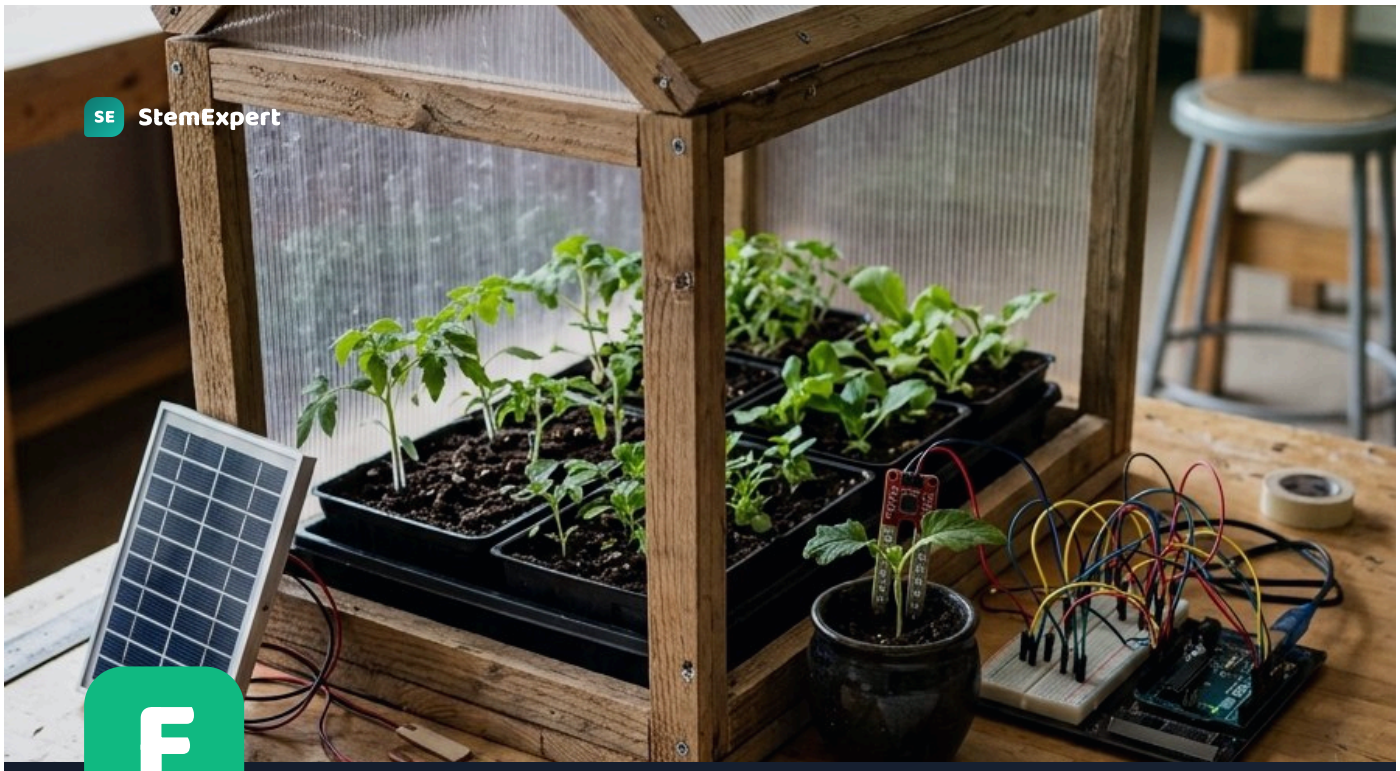


StemExpert

F

Fundamental
Handboek

Leerstof: uitleg, uitgewerkte voorbeelden, proeven, naslag en verbanden.

12-14 jaar · 33 hoofdstukken · schaal 1–4

Brecht Corbeel · schoolium.me

StemExpert Fundamental — Handboek

Auteur: Brecht Corbeel
Uitgave: schoolium.me
Reeks: StemExpert — STEM in drie niveaus (Fundamental, Intermediate, Expert)

Voor wie: Voor wie STEM voor het eerst systematisch leert (eerste graad secundair, of volwassen beginners). Geen voorkennis nodig. Rekenen met breuken, procenten en verhoudingen wordt opgebouwd waar het nodig is; eenvoudige formules worden ingevoerd als 'rekenregels met betekenis'.

Wiskunde op dit niveau: hoofdrekenen, breuken, procenten, verhoudingen, eenvoudige formules omvormen, grafieken lezen

Habitat-laag: De meetkas: een kleine kas die haar eigen klimaat meet, de planten automatisch water geeft en draait op een zonnepaneel.

Dit boek hoort bij een handboek, een werkboek en een oplossingenboek per niveau, en bij de offline website van StemExpert. De StemExpert-schaal (1 tot 9) loopt over de drie niveaus heen. Druk af zonder schaling (100 %).

Inhoud

F1 · Denken en werken als STEM'er

F1 Wat is STEM? 4
F2 Onderzoeken: van vraag tot besluit 23
F3 Meten: grootheden en eenheden 38
F4 Tabellen, grafieken en verbanden 59
F5 Veilig werken in labo en werkplaats 79

F2 · Materie en materialen

F6 Het deeltjesmodel 100
F7 Massa, volume en dichtheid 118
F8 Zuivere stoffen en mengsels 137
F9 Mengsels scheiden 158
F10 Materialen en hun eigenschappen 180

F3 · Krachten, beweging en constructies

F11 Krachten 199
F12 Hefbomen en mechanismen 224
F13 Constructies: sterk en stabiel 242
F14 Beweging en snelheid 260

F4 · Energie

F15 Energie: vormen en omzettingen 276
F16 Warmte en temperatuur 296
F17 Energie uit zon, wind en water 318

F5 · Elektriciteit

F18 De elektrische kring 341
F19 Spanning, stroom en weerstand 362
F20 Serie- en parallelschakeling 374
F21 Elektrisch vermogen en energie 391

F6 · Programmeren en automatiseren

F22 Computationeel denken 409
F23 Programmeren met blokken 427
F24 De microcontroller 450
F25 Sensoren en automatisch regelen 472

F7 · Leven en systemen

F26 Cellen en organismen 492
F27 Planten: fotosynthese en groei 514
F28 Ecosystemen en kringlopen 534
F29 Het lichaam als systeem 554

F8 · Ontwerpen en maken

F30 De ontwerpcyclus 576
F31 Technisch tekenen 600
F32 Van idee tot object: CAD en 3D-printen 621

F9 · Habitat F: de meetkas

F33 Integratieproject: de meetkas 642

F FUNDAMENTAL · DEEL F1 · DENKEN EN WERKEN ALS STEM'ER

HANDBOEK · HOOFDSTUK 1

Wat is STEM?

Vier manieren van denken, één manier van kijken, en een station dat je zelf gaat bouwen

Een smartphone, een fiets, een kas vol tomaten, een poolstation op Antarctica: achter elk ervan zitten mensen die onderzoeken, rekenen, ontwerpen en bouwen. Samen heet dat **STEM**. In dit eerste hoofdstuk leer je wat de vier letters betekenen, hoe je elk toestel als **systeem** kan bekijken, en maak je kennis met **Habitat**: het onderzoeksstation dat je in deze opleiding laag per laag mee opbouwt.

5× uitleg | 3× uitgewerkt voorbeeld | 1× proef | 2× ontleed | 1× naslag | 2× verhaal | 1× het geheel | ± 5 lestijden

O Onderzoeken en meten | D Ontwerpen en maken



Onderzoeken, rekenen, ontwerpen en bouwen aan één tafel: zo begint de meetkas.

Na dit hoofdstuk

- Je kan in eigen woorden uitleggen wat wetenschap, technologie, engineering en wiskunde elk doen, en waarom ze samen sterker zijn.
- Je kan een toestel of situatie beschrijven als systeem met input, proces en output, en die stromen benoemen als materie, energie of informatie.
- Je kan een systeemgrens kiezen en uitleggen wat daardoor input of output wordt.
- Je kan uitleggen wat terugkoppeling is, en in voorbeelden herkennen of een systeem stuurt (zonder terugkoppeling) of regelt (met terugkoppeling).
- Je kan een wetenschappelijke vraag onderscheiden van een technisch probleem, en zeggen welke cyclus erbij hoort.
- Je kan enkele STEM-beroepen beschrijven: wat iemand er op een gewone dag doet en welke letters erin zitten.
- Je kan de missie van Habitat en de onderdelen van de meetkas beschrijven.

VERHAAL · 1.1

Een station aan de rand van de wereld

1/15

Op een granieten bergkam in Oost-Antarctica, op 1382 meter hoogte, staat een zilverwit gebouw op stalen poten: het Belgische onderzoeksstation **Prinses Elisabeth**. Het werd in februari 2009 ingehuldigd en is alleen tijdens de zuidelijke zomer bewoond. Er is geen stroomnet, geen waterleiding en geen winkel in de buurt. Alles wat het station nodig heeft, moet het zelf opwekken, zuiveren en regelen.

Kijk wie er allemaal nodig was om dat mogelijk te maken:

- **Wetenschappers** onderzoeken er het klimaat, de atmosfeer en het ijs. Daarvoor is het station er: om vragen over de natuur te beantwoorden.
- **Ingenieurs** ontwierpen een gebouw dat ijzige stormen doorstaat en zo weinig mogelijk warmte verliest. Negen windturbines langs de bergkam en zonnepanelen leveren de energie. Omdat het station voor zijn gewone werking alleen wind en zon gebruikt, heet het een *zero-emissiestation*; generatoren staan enkel klaar als reserve.
- **Technologie** houdt alles draaiende: batterijen slaan energie op, een 'slim net' (smart grid) verdeelt ze over de toestellen, en een zuiveringsinstallatie reinigt het afvalwater zodat een deel ervan opnieuw gebruikt kan worden voor douches, toiletten en wasmachines.
- **Wiskunde** zit overal: hoeveel energie leveren de turbines bij deze wind, hoeveel verbruikt het station per dag, hoe lang houden de batterijen het uit?

Geen van die vier groepen had het station alleen kunnen bouwen. Dat is het idee achter **STEM**.

> **Waarom dit verhaal ertoe doet**
>
> Zo'n station is een reuzenvoorbeeld van alles wat je in deze opleiding leert: meten, energie opwekken en bewaren, water zuiveren, planten kweken, regelen met sensoren. In StemExpert ontwerp je je eigen versie, **Habitat**, laag per laag. Je begint klein, met een kas die zichzelf meet.



Een poolstation dat draait op wind en zon: onderzoek, techniek en rekenwerk in één gebouw.

UITLEG · 1.2

Vier letters, vier manieren van denken

STEM komt uit het Engels: *science, technology, engineering, mathematics*. Elke letter staat voor een eigen manier van denken en werken.

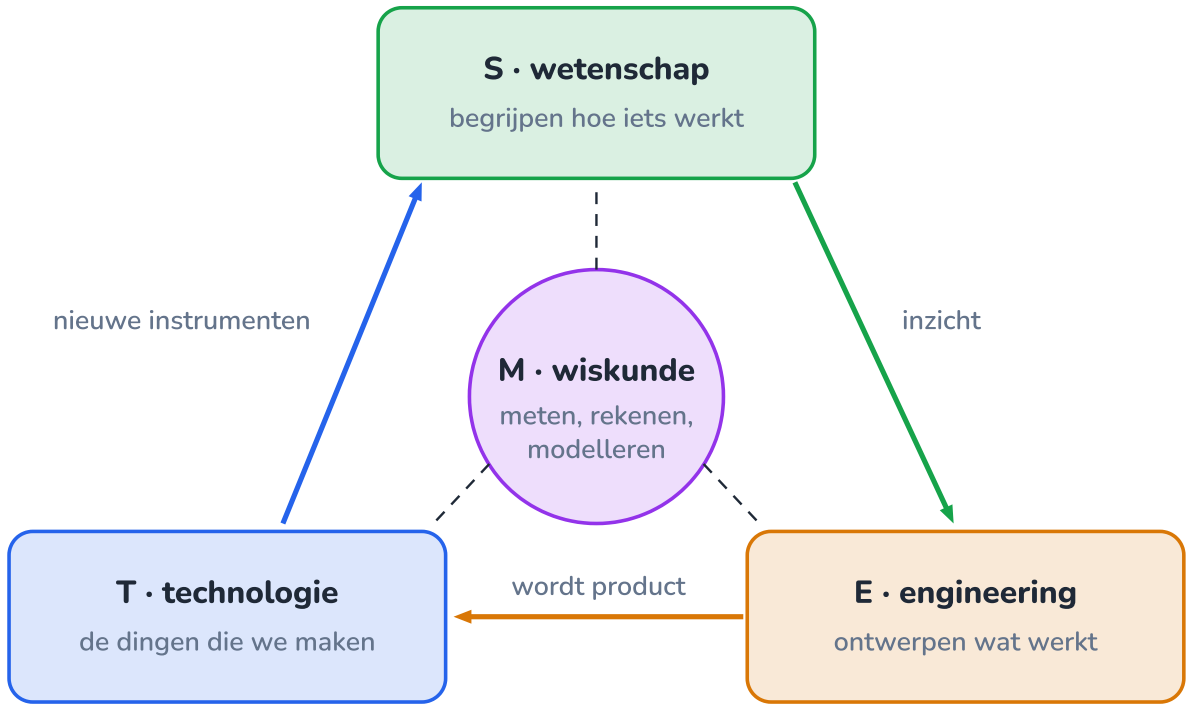
letter	wat je doet	de vraag die je stelt	voorbeeld in de kas
S wetenschap	onderzoeken, meten, verklaren	Hoe werkt het? Waarom gebeurt dit?	Waarom groeit de sla trager in de winter?
T technologie	gebruiken en maken van toestellen, materialen, programma's	Welk hulpmiddel lost dit op?	een sensor, een pomp, een ledstrip
E engineering	ontwerpen, testen, verbeteren binnen beperkingen	Hoe maken we iets dat werkt, veilig is en betaalbaar?	een watergeefsysteem dat een week zonder jou werkt
M wiskunde	rekenen, meten, patronen zoeken, modelleren	Hoeveel? Hoe snel? Welk verband?	hoeveel liter water de planten per week nodig hebben

Technologie en engineering worden vaak door elkaar gebruikt. Het verschil: **technologie** is het resultaat (de pomp, de app, het materiaal), **engineering** is het ontwerpwerk dat eraan voorafgaat: eisen opstellen, ideeën vergelijken, een prototype testen en verbeteren.

De letters versterken elkaar in een kringloop. Wat wetenschappers ontdekken, gebruiken ingenieurs om iets te ontwerpen. Het resultaat is nieuwe technologie, en daarmee kunnen wetenschappers weer beter meten: de microscoop leidde tot de ontdekking van cellen, een satelliet meet het smelten van het poolijs. Wiskunde is de taal die ze alle drie spreken.

STEM is niet 'gewoon veel wiskunde en computers'

Wie STEM hoort, denkt vaak aan rekenen of programmeren. Maar STEM gaat vooral over een houding: nieuwsgierig zijn, zorgvuldig meten, iets durven proberen dat mislukt, en uitzoeken waarom. Een tuinier die een proefje doet met twee soorten potgrond, is ook met STEM bezig.



Inzicht wordt een ontwerp, het ontwerp wordt een product, en nieuwe instrumenten maken nieuw onderzoek mogelijk. Wiskunde verbindt alles.

UITGEWERKT VOORBEELD · 1.3

Eén probleem, vier brillen

3/15

Tijdens een warme week in juni verdorren de planten in de schoolkas, hoewel iemand elke ochtend water geeft. Hoe pakt een STEM-team dat aan? Toon welke rol elke letter speelt.

GEGEVEN

- planten verdorren tijdens warme dagen
- er wordt één keer per dag (ochtend) water gegeven

GEVRAAGD

- een aanpak waarin wetenschap, wiskunde, engineering en technologie elk een rol hebben

OPLOSSING

1. **S: eerst begrijpen.** Het team meet een paar dagen lang de temperatuur in de kas en het vocht in de grond, 's ochtends, 's middags en 's avonds. Het ziet dat de grond 's middags al droog is: bij hitte verdampen de planten veel meer water.
2. **M: rekenen.** Uit de metingen volgt hoeveel water er per dag verdwijnt. Stel dat dat bij hitte ongeveer 2 liter per dag is, terwijl er 's ochtends maar 1 liter gegeven wordt: er is dan een tekort van 1 liter per dag.
3. **E: ontwerpen.** Het team stelt eisen op: de planten krijgen water wanneer de grond droog is, ook in het weekend; het systeem mag niet overstromen; het werkt op de stroom van een klein zonnepaneel. Het vergelijkt ideeën (een grotere gieter, een druppelslang met timer, een pomp met sensor) en kiest.
4. **T: bouwen met technologie.** Een bodemvochtsensor, een microcontroller en een klein pompje worden gekoppeld aan een druppelslang.
5. **En weer S: testen.** Het team meet opnieuw: blijft de grond nu vochtig genoeg? Verdorren er nog planten? Zo niet, dan past het de drempel of de hoeveelheid water aan.

ANTWOORD

Geen enkele letter lost het probleem alleen op. Wetenschap vindt de oorzaak, wiskunde maakt ze meetbaar, engineering ontwerpt een oplossing die aan de eisen voldoet, technologie levert de onderdelen, en een nieuwe meting toont of het werkt.

Klopt dit? Merk op dat de aanpak begint en eindigt met meten. Een oplossing die je niet test, is een gok. De liters zijn hier een voorbeeld: in je eigen kas meet je ze zelf (hoofdstuk 3 en 27).

UITLEG · 1.4

Denken in systemen: input, proces, output

4/15

Een **systeem** is een geheel van onderdelen die samenwerken om iets te doen. Een broodrooster, een plant, een fabriek en je eigen lichaam zijn systemen. Om een systeem te begrijpen zonder meteen alle details te kennen, stel je drie vragen:

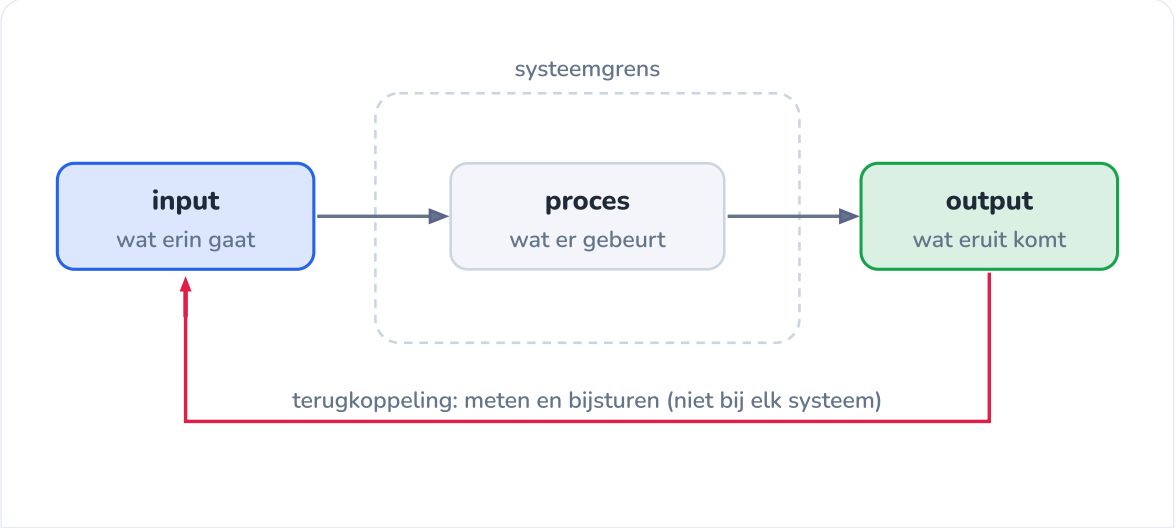
- **Input:** wat gaat erin?
- **Proces:** wat gebeurt ermee?
- **Output:** wat komt eruit?

Wat er in- en uitgaat, is altijd een van drie soorten: **materie** (stoffen en voorwerpen: water, brood, lucht), **energie** (elektrische energie, warmte, licht, beweging) of **informatie** (een druk op een knop, een meting, een signaal).

systeem	input	proces	output
broodrooster	brood (materie), elektrische energie, de stand van de knop (informatie)	de weerstanddraden worden heet en roosteren het brood	geroosterd brood, warmte naar de keuken, het 'klik' als het klaar is (informatie)
zonnepaneel	licht (energie)	licht omzetten in elektrische energie	elektrische energie, warmte
kasplant	water, koolstofdioxide, voedingsstoffen (materie), licht (energie)	fotosynthese en groei	bladeren en vruchten (materie), zuurstof, waterdamp

Waar het systeem ophoudt, bepaal je zelf met de **systeemgrens**: een denkbeeldige lijn rond wat je bekijkt. Alles wat die lijn kruist, is input of output. Kies je de grens rond één plant, dan is het water uit de pomp een input. Kies je de grens rond de hele kas, dan is die pomp een onderdeel en wordt het regenwater dat in het reservoir loopt de input.

Grote systemen bestaan uit **deelsystemen**: de fiets heeft een aandrijving, remmen en verlichting; de kas heeft een energiedeel, een waterdeel en een meetdeel. Een groot probleem opsplitsen in deelsystemen is een van de krachtigste gewoontes van een STEM'er.



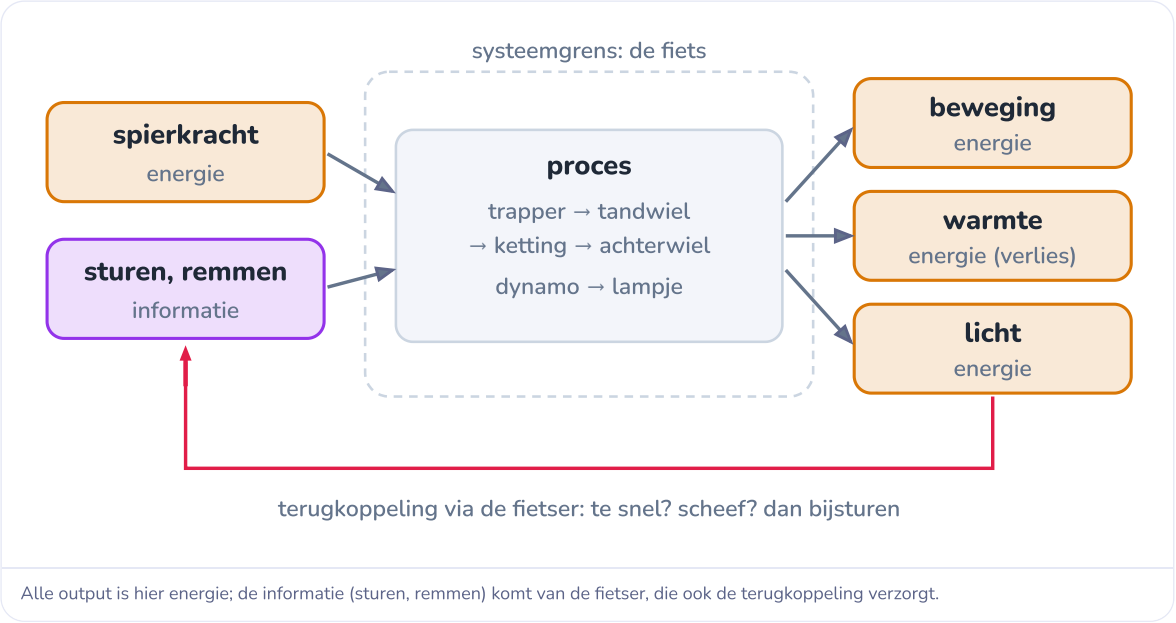
Het blokschema: een doos voor het proces, pijlen voor wat erin en eruit gaat, en de gestippelde systeemgrens eromheen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 1.5

De fiets als systeem

5/15

Beschrijf een gewone fiets met dynamoverlichting als systeem: input, proces, output en terugkoppeling.
Welke deelsystemen herken je?



Alle output is hier energie; de informatie (sturen, remmen) komt van de fietser, die ook de terugkoppeling verzorgt.

GEGEVEN

- een fiets met trappers, ketting, remmen en een dynamo op het wiel
- een fietser

GEVRAAGD

- input, proces en output, met de soort stroom
- deelsystemen
- waar de terugkoppeling zit

OPLOSSING

1. **Systeemgrens kiezen.** We tekenen de grens rond de fiets. De fietser staat erbuiten: hij levert input.
2. **Input.** De spierkracht op de trappers is *energie*. Sturen en remmen zijn *informatie*: ze zeggen de fiets wat hij moet doen.

3 **Proces.** De trapper draait het voorste tandwiel, de ketting brengt de beweging naar het achterwiel. De dynamo zet een klein deel van de beweging om in elektrische energie voor het lampje.

4 **Output.** Beweging van fiets en fietser (energie), licht (energie) en warmte door wrijving in de ketting, de lagers en de banden (energie die verloren gaat).

5 **Deelsystemen.** Aandrijving (trappers, tandwielen, ketting), remmen, stuur, verlichting (dynamo, draden, lampjes). Elk kan je apart bekijken, met zijn eigen input en output.

6 **Terugkoppeling.** De fietser ziet en voelt hoe snel hij gaat en of hij scheef hangt, en stuurt bij. Die lus loopt via de fietser, dus buiten onze systeemgrens. Trek je de grens rond fiets *en* fietser, dan ligt de terugkoppeling binnen het systeem.

ANTWOORD

Input: spierkracht (energie) en sturen en remmen (informatie). Proces: overbrengen van beweging, en omzetten van beweging in elektrische energie. Output: beweging, licht en warmte. De terugkoppeling loopt via de ogen, het evenwichtsgevoel en de hersenen van de fietser.

Klopt dit? Tel de energie na: alles wat de fietser in de trappers stopt, komt ergens terug als beweging, licht of warmte. Energie verdwijnt niet, ze verandert van vorm (hoofdstuk 15).

UITLEG · 1.6

Terugkoppeling: sturen of regelen

6/15

Een sproeier met een tijdschakelaar geeft elke ochtend om 7 uur tien minuten water. Ook als het de hele nacht geregend heeft. Hij **stuurt**: hij voert uit wat ingesteld is, zonder te controleren of het resultaat goed is. Dat heet ook een **open lus**.

Een systeem met **terugkoppeling** (feedback) meet het resultaat en past zich aan. Het **regelt**. In de meetkas: een sensor meet hoe vochtig de grond is, een microcontroller vergelijkt die meting met de gewenste waarde, en alleen als de grond te droog is, zet hij de pomp aan. De grond wordt natter, de sensor meet dat, en de pomp gaat weer uit. De output (natte grond) komt via de meting terug bij het begin: een **gesloten lus**.

Elke regelkring heeft dezelfde vier stappen: **meten**, **vergelijken** met wat je wil, **beslissen** en **doen**. Dat patroon vind je overal:

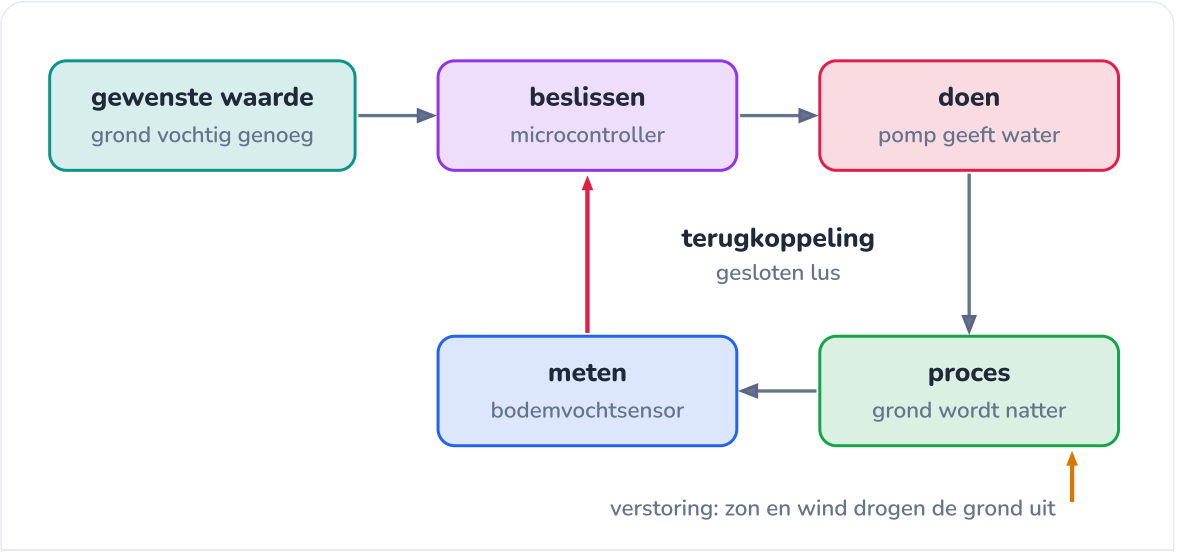
- een thermostaat meet de temperatuur en zet de verwarming aan of uit;
- je lichaam houdt zijn temperatuur rond 37 °C: te warm, dan ga je zweten; te koud, dan ga je rillen (hoofdstuk 29);
- een fietser stuurt voortdurend een beetje bij om recht te blijven rijden.

Automatisch betekent niet 'met terugkoppeling'

De sproeier met tijdschakelaar werkt automatisch, maar zonder terugkoppeling. Ook een straatlamp met een lichtsensor meet niet of zijn eigen licht volstaat: hij meet het daglicht en schakelt op een vaste drempel. Stel jezelf altijd de vraag: *meet het systeem het resultaat van zijn eigen werk?* Pas dan is er een gesloten lus.

Waarom regelen beter is, en niet altijd nodig

Regelen vangt **verstoringen** op: een hete dag, wind, een open deur. Sturen is eenvoudiger en goedkoper, en volstaat als er weinig verandert: een broodrooster met een timer doet prima zijn werk. Ingenieurs kiezen wat het probleem vraagt.



Meten, beslissen, doen en opnieuw meten: de lus sluit zich via de sensor. Zon en wind zijn verstoringen die de lus opvangt.

PROEF · 1.7

Balanceren met en zonder terugkoppeling

7/15

ONDERZOEKSVRAAG

Wat gebeurt er met een systeem als je de terugkoppeling wegneemt? Je test het met je eigen lichaam: een bezemsteel rechtop op je handpalm houden.

MATERIAAL

- bezemsteel of houten lat van ongeveer 1,2 m
- lat van 30 cm
- stopwatch
- een partner die de tijd opneemt

Veiligheid

Zorg voor twee meter vrije ruimte rond je. Niemand staat in de buurt van de vallende steel. Werk niet naast ramen.



Ogen, hersenen en hand vormen samen een regelkring die de steel rechtop houdt.

WERKWIJZE

1. Zet de bezemsteel rechtop op je vlakke hand. Kijk naar de top van de steel. Je partner meet hoe lang je hem rechtop houdt (stop bij 30 s).
2. Herhaal drie keer.
3. Doe hetzelfde, maar kijk nu weg naar de muur (of sluit je ogen) zodra de steel stilstaat. Je partner vangt de steel als hij valt. Drie keer.

4. Probeer ten slotte de korte lat van 30 cm te balanceren, met je ogen open. Drie keer.

5. Noteer alle tijden in een tabel en vergelijk.

WAARNEMING

Zo kan het resultaat van één leerling eruitzien:

situatie	poging 1	poging 2	poging 3
bezemsteel, ogen open	30 s (gestopt)	30 s (gestopt)	24 s
bezemsteel, ogen weg	2,1 s	1,6 s	2,8 s
lat van 30 cm, ogen open	1,4 s	0,9 s	1,7 s

Met je ogen open lukt het lang. Zonder zicht valt de steel binnen enkele seconden. En een korte lat is veel moeilijker dan een lange.

VERKLARING

Balanceren is een regelkring. Je **ogen** zijn de sensor: ze zien de steel kantelen. Je **hersenen** beslissen hoe je hand moet bewegen, je **hand** voert het uit. Sluit je je ogen, dan valt de belangrijkste meting weg: de lus is open en de steel valt. Je hand voelt nog een beetje, maar veel te weinig.

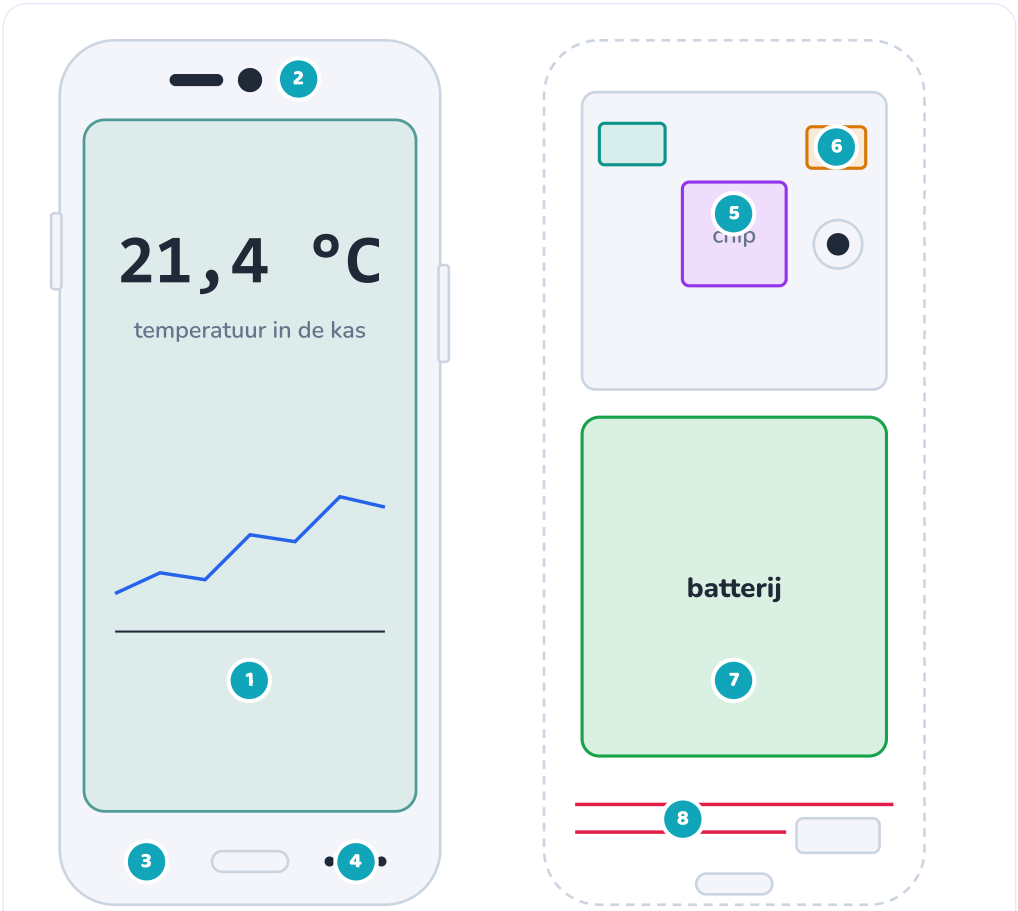
Een korte lat kantelt sneller om dan een lange. Je ogen en hersenen hebben ongeveer 0,2 s nodig om te reageren, en dat is voor de korte lat te traag. Een regelkring werkt alleen als hij snel genoeg reageert voor het systeem dat hij regelt. Zelfbalancerende robots en elektrische eenwielers gebruiken hetzelfde principe, met sensoren die veel sneller meten dan je ogen.

ONTLEED · 1.8

De smartphone: een systeem vol deelsystemen

8/15

Je smartphone is een van de ingewikkeldste systemen die je elke dag gebruikt, maar met input, proces en output krijg je er grip op. Links zie je de voorkant, rechts een doorkijk naar binnen. Let op: het aanraakscherm is tegelijk input (je vinger) en output (het beeld).



Vooraanzicht en doorkijk: sensoren voor input, een chip voor het proces, scherm en luidspreker voor output, een batterij voor energie.

1 Aanraakscherm
Input en output tegelijk: het meet waar je vinger het glas raakt, en het toont beeld. Het scherm is ook de grootste verbruiker van energie.

2 Camera en lichtsensor
Input. De lichtsensor meet het omgevingslicht en past de helderheid van het scherm aan. Dat is sturen: de sensor meet het daglicht, niet het licht van het scherm zelf.

3 Microfoon
Input: zet geluid om in een elektrisch signaal (informatie).

4 Luidspreker
Output: zet een elektrisch signaal om in geluid.

5 Chip (processor en geheugen)
Het proces: rekent, beslist en bewaart. De chip meet ook zijn eigen temperatuur en werkt trager als hij te heet wordt. Dat is regelen: minder rekenen, minder warmte, lagere temperatuur.

6 Bewegingssensoren en gps
Input: een versnellingsmeter en een gyroscoop voelen hoe je de telefoon draait (daarom draait het beeld mee), de gps-ontvanger bepaalt waar je bent.

7 Batterij
Slaat energie op. Tijdens het laden meet de telefoon voortdurend de spanning van de batterij en past de laadstroom aan: weer een regelkring.

8 Antennes
Informatie in en uit: gesprekken, berichten en data reizen als radiogolven naar de gsm-mast en de wifi-router.

UITLEG · 1.9

Wetenschappelijke vraag of technisch probleem?

9/15

STEM'ers werken aan twee soorten opdrachten, en het loont om ze uit elkaar te houden.

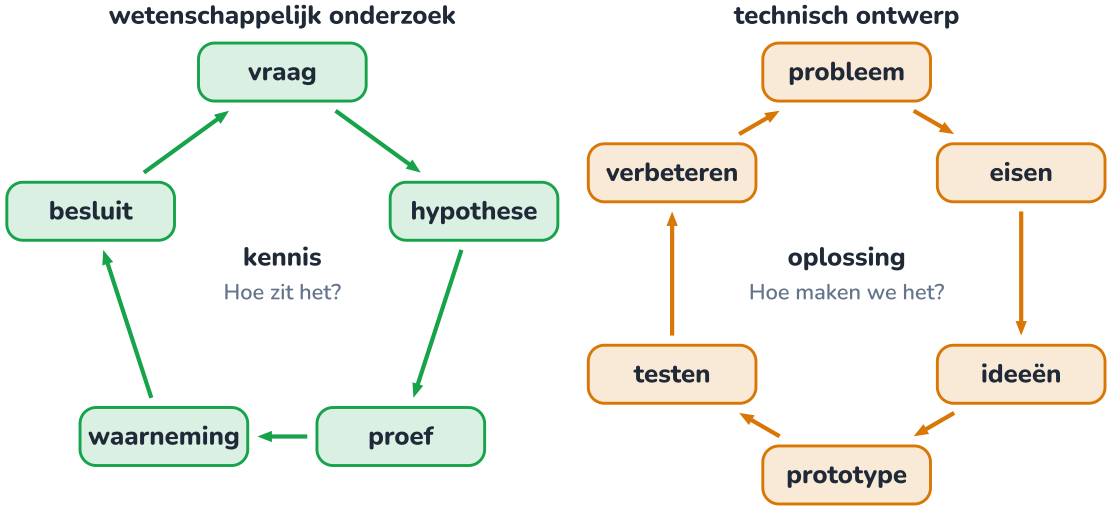
Een **wetenschappelijke vraag** gaat over hoe de natuur werkt: *Waarom beslaat de kaswand 's ochtends? Groeit basilicum sneller onder blauw of onder rood licht?* Het antwoord is **kennis**. Je vindt het met de **onderzoekscyclus**: vraag, hypothese, proef, waarneming, besluit (hoofdstuk 2).

Een **technisch probleem** vraagt om iets dat je maakt: *Hoe voorkomen we dat condenswater op de planten drupt? Hoe houden we de kas 's nachts boven 10 °C zonder stopcontact?* Het antwoord is een **oplossing**: een toestel, een constructie, een programma. Je vindt ze met de **ontwerpcyclus**: probleem verkennen, eisen opstellen, ideeën bedenken, een prototype maken, testen en verbeteren (hoofdstuk 30).

	wetenschappelijke vraag	technisch probleem
begint met	Waarom ...? Hoe hangt ... af van ...?	Hoe maken we ...? Hoe zorgen we dat ...?
resultaat	kennis, een verklaring	een werkend product of systeem
werkwijze	onderzoekscyclus	ontwerpcyclus
goed als ...	de proef eerlijk is en het besluit uit de metingen volgt	de oplossing aan de eisen voldoet
er zijn ...	meestal één juist antwoord (dat je nog moet vinden)	vaak meerdere goede oplossingen

Ze hebben elkaar nodig

Wie een goede verwarming voor de kas wil ontwerpen, moet eerst weten hoe een kas warmte verliest: een wetenschappelijke vraag binnen een technisch probleem. En wie wil weten hoe snel de grond uitdroogt, moet eerst een meetopstelling bouwen: een technisch probleem binnen een wetenschappelijke vraag. In beide cycli is **testen en meten** de stap die alles eerlijk houdt.



Twee cycli met dezelfde ruggengraat: iets proberen, meten wat er gebeurt, en daaruit leren voor de volgende ronde.

UITGEWERKT VOORBEELD · 1.10

Van waarneming naar vraag en probleem

10/15

Leerlingen zien dat de planten aan de raamkant van de kas scheef groeien, naar het glas toe. Formuleer een wetenschappelijke vraag en een technisch probleem die bij deze waarneming passen, en zeg welke cyclus je telkens volgt.

GEGEVEN

- waarneming: planten aan de raamkant groeien scheef naar het licht

GEVRAAGD

- een wetenschappelijke vraag
- een technisch probleem
- de bijhorende cyclus

OPLOSSING

1. **Wat valt op?** De planten buigen naar de kant waar het meeste licht vandaan komt. Dat roept een 'waarom' op en ook een 'wat doen we eraan'.

2. **Wetenschappelijke vraag.** Een vraag die je met metingen kan beantwoorden, bijvoorbeeld: *Hoe hangt de hoek waaronder een kiemplantje buigt af van de richting van het licht?* Je zet kiemplantjes in dozen met een opening links, rechts of bovenaan en meet na enkele dagen de hoek. Dat is de onderzoekscyclus.

3. **Technisch probleem.** Iets wat je wil oplossen door iets te maken, bijvoorbeeld: *Hoe zorgen we ervoor dat alle planten in de kas evenveel licht krijgen?* Mogelijke oplossingen: een draaiende plantenbak, een reflecterende wand aan de donkere kant, of een ledstrip bovenaan. Dat is de ontwerpcyclus.

4. **Verband.** Het antwoord op de wetenschappelijke vraag helpt het technische probleem: weet je hoe sterk planten op lichtrichting reageren, dan weet je hoe gelijkmatig het licht moet zijn.

ANTWOORD

Wetenschappelijke vraag: 'Hoe hangt de buighoek van een kiemplantje af van de richting van het licht?' (onderzoekscyclus). Technisch probleem: 'Hoe zorgen we dat alle planten evenveel licht krijgen?' (ontwerpcyclus).

Klopt dit? Test je vraag: kan je het antwoord meten? Test je probleem: kan je nagaan of een oplossing werkt (bijvoorbeeld door na een week te kijken of de planten recht staan)? Twee keer ja: goed geformuleerd.

VERHAAL · 1.11

STEM-beroepen: wie doet wat?

11/15

STEM is geen schoolvak maar een manier van werken, en je vindt ze in honderden beroepen, van technicus tot professor. Enkele voorbeelden, met wat die mensen op een gewone dag doen:

beroep	op een gewone dag	letters
klimaatwetenschapper	analyseert metingen van ijs, oceaan en lucht, schrijft computermodellen, gaat soms op expeditie	S, M, T
technicus windturbines	klimt tientallen meters hoog in de mast, zoekt storingen met meettoestellen, vervangt onderdelen	T, E
ingenieur bouwkunde	rekent na of een brug of gebouw sterk genoeg is, overlegt met architect en aannemer	E, M
medisch laboratoriumtechnoloog	onderzoekt bloedstalen met automaten, controleert of de metingen betrouwbaar zijn	S, T
data-analist	zoekt patronen in grote hoeveelheden gegevens, maakt grafieken, programmeert	M, T
productontwerper	bedenkt nieuwe producten, maakt prototypes met een 3D-printer, test ze bij gebruikers	E, T
softwareontwikkelaar voor toestellen	schrijft de programma's in een wasmachine, een auto of een medisch toestel	T, M, E
teeltadviseur glastuinbouw	stuurt het klimaat in grote serres bij, meet water en voeding, vergelijkt rassen	S, T, M

Een dag van een teeltadviseur. 's Morgens bekijkt ze op de klimaatcomputer de grafieken van de nacht: temperatuur, luchtvochtigheid, CO_2-gehalte en licht in de serre. Daarna loopt ze door de rijen tomatenplanten, meet de lengte van enkele stengels en telt de trossen. Ze neemt een staal van het water dat onder de planten wegloopt en meet hoeveel voedingszouten erin zitten. Is dat te veel, dan

past ze het voedingsrecept aan. 's Middags overlegt ze met de teler en vergelijkt ze de opbrengst van twee rassen in een rekenblad. Haar serre is een reusachtige versie van jouw meetkas.

> **Elk opleidingsniveau**
> STEM-jobs bestaan met een diploma secundair onderwijs (technicus, installateur, operator), een bachelor (laborant, technoloog, programmeur) of een master (ingenieur, wetenschapper). Veel bedrijven zoeken zulke profielen. Belangrijker dan welk diploma je later haalt: nieuwsgierig blijven en graag uitzoeken hoe iets werkt.



Technicus windturbines: meten en herstellen op grote hoogte.



Teeltadviseur: klimaat, water en voeding meten in een serre, een grote broer van de meetkas.

UITLEG · 1.12

Habitat: een station dat zichzelf in leven houdt

12/15

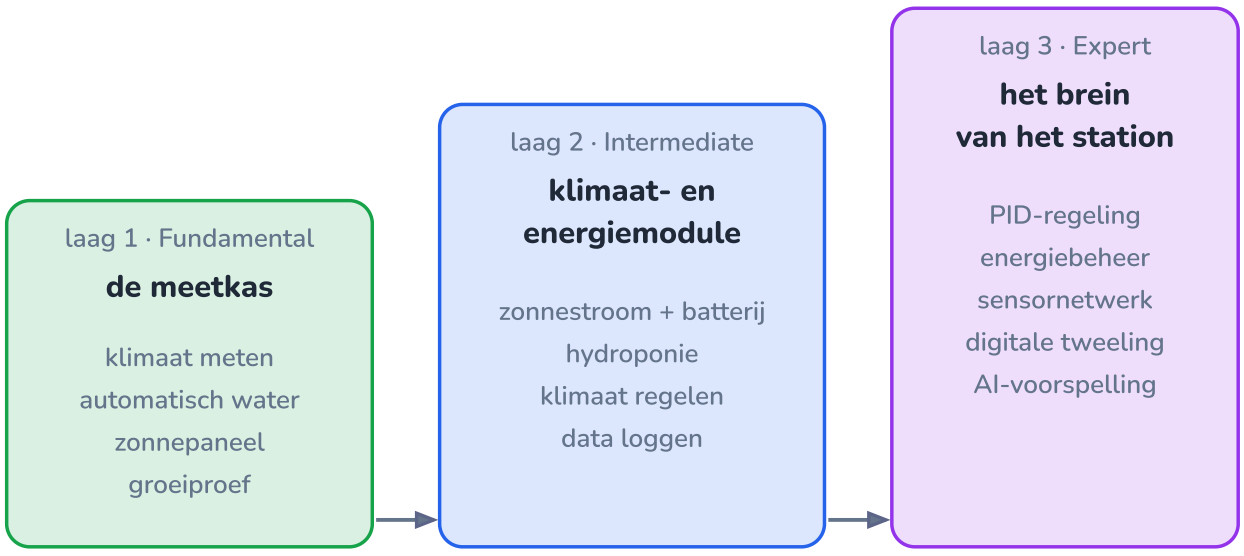
Stel je een klein onderzoeksstation voor op een afgelegen plek: een poolgebied, een eiland, ooit misschien de maan. Er komt zelden bevoorrading. Het station moet zelf zorgen voor vijf dingen:

- **energie**: opwekken met zon en wind, opslaan, zuinig verdelen;
- **water**: opvangen, zuiveren, hergebruiken;
- **voedsel**: planten kweken in een gecontroleerd klimaat;
- **een leefbaar klimaat**: warmte, verse lucht, de juiste vochtigheid;
- **informatie**: meten wat er gebeurt en op tijd bijsturen.

Dat is **Habitat**, het project dat door heel StemExpert loopt. Je ontwerpt het niet in één keer, maar in drie lagen die op elkaar bouwen, één per niveau:

1. **Fundamental: de meetkas.** Een kleine kas die haar eigen klimaat meet, de planten automatisch water geeft en draait op een zonnepaneel.
2. **Intermediate: de klimaat- en energiemodule.** Eigen zonnestroom met batterij, een waterkringloop met teelt zonder aarde (hydroponie), een geregeld klimaat en een datalogger.
3. **Expert: het brein van het station.** Een systeem dat alles samen regelt, met een sensornetwerk, energiebeheer, een digitale tweeling (een computermodel van het station) en voorspellingen met AI.

Elk hoofdstuk levert een bouwsteen. In het werkboek herken je die aan het type **Habitat**. Bewaar je Habitat-opdrachten in een **portfolio**: aan het einde van elk niveau voeg je ze samen tot een integratieproject (hoofdstuk 33 voor de meetkas).



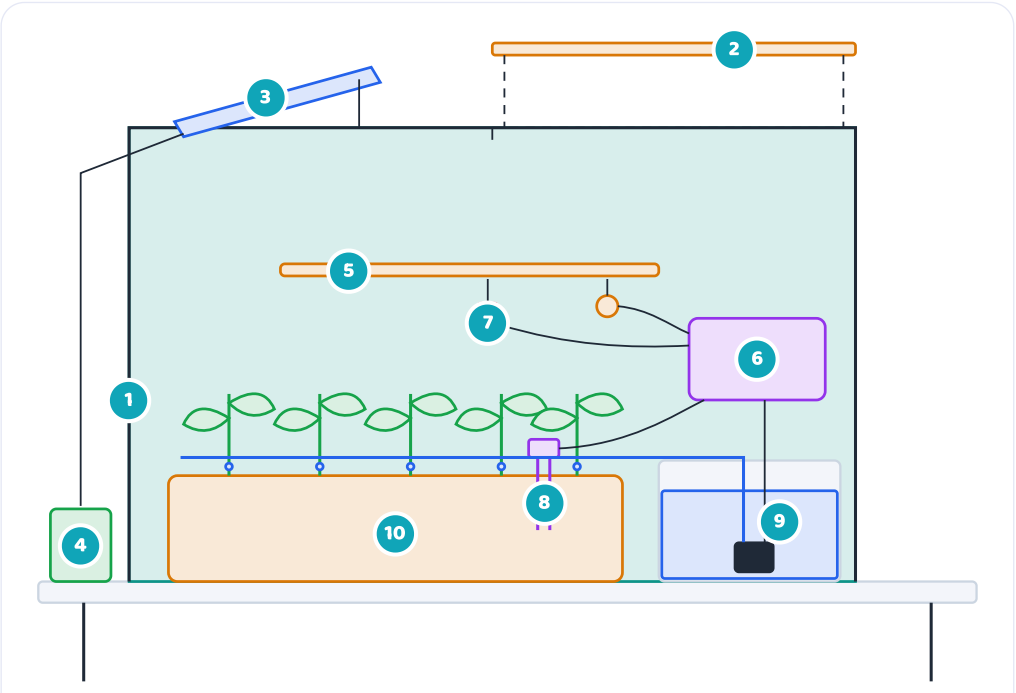
Drie lagen, drie niveaus: elke laag bouwt voort op wat de vorige kon.

ONTLEED · 1.13

De meetkas: de eerste module

13/15

Dit is een eerste schets van de meetkas die je in Fundamental ontwerpt en bouwt. Elk onderdeel hoort bij een of meer hoofdstukken: bij het nummer staat waar je leert wat je ervoor nodig hebt. De echte maten en keuzes bepaal je later zelf, in je programma van eisen (hoofdstuk 30).



Zijaanzicht van de meetkas: zon, water, planten, sensoren en een microcontroller die alles samenhoudt.

1 Frame en wanden
Licht, stevig en doorzichtig: welk materiaal (hoofdstuk 10) en welke vorm (hoofdstuk 13)? De afmetingen en de oppervlakte van de wanden reken je uit in hoofdstuk 3.

2 Dakraam
De rechterhelft van het platte dak, met het scharnier achteraan: de voorrand gaat omhoog als het te warm wordt. Met de hand en een hefboom (hoofdstuk 12), later automatisch (hoofdstuk 25).

3 Zonnepaneel
Zet licht om in elektrische energie (hoofdstuk 17). Hoeveel energie de kas per dag nodig heeft, reken je in hoofdstuk 21.

4 Batterij
Bewaart energie voor de nacht en voor bewolkte dagen (hoofdstuk 17).

5 Ledstrip
Extra licht in de winter. De kring, de spanning, de stroom en de zekering: hoofdstukken 18 tot 21.

6 Microcontroller
Het brein van de meetkas: leest de sensoren en stuurt de pomp (hoofdstukken 22 tot 25).

7 Temperatuur- en lichtsensor
Meten het klimaat in de kas (hoofdstukken 3, 16 en 25). Hun metingen zet je in een grafiek (hoofdstuk 4).

8 Bodemvochtsensor
Meet hoe vochtig de grond is: het begin van de regelkring die water geeft (hoofdstuk 25).

9 Reservoir en pomp
Hoeveel water past erin en hoe lang doet de kas ermee? Hoofdstuk 3 (volume) en hoofdstuk 14 (hoe snel het water stroomt).

10 Plantenbak
Het levende hart: wat heeft een plant nodig om te groeien (hoofdstukken 2, 26 en 27)? Je voert er een eerlijke groeiproef mee uit.

NASLAG · 1.14

Overzicht: STEM, systemen en de elf leerlijnen

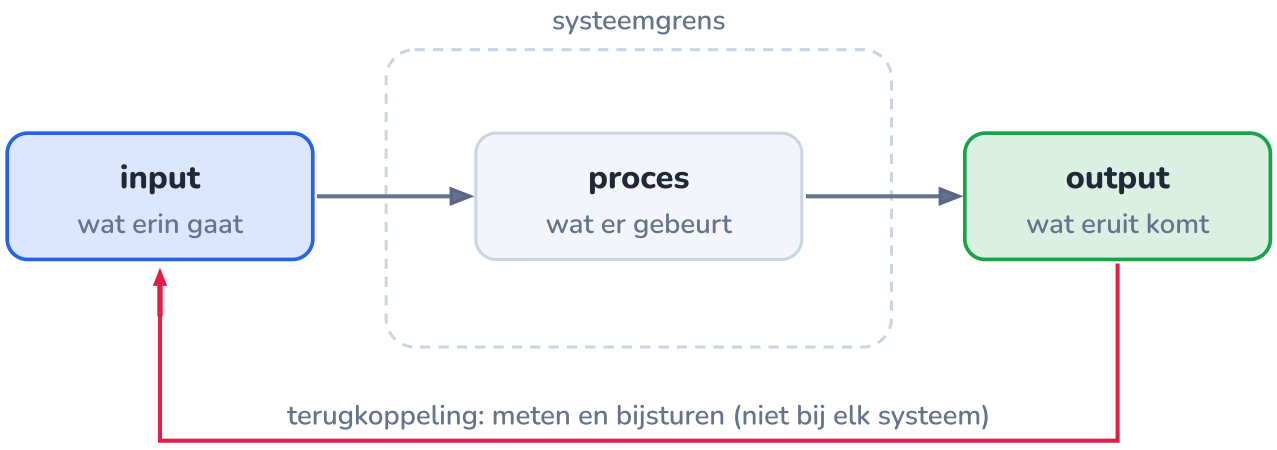
14/15

Bovenaan elk hoofdstuk staan gekleurde letters: de **leerlijnen**. Ze lopen door alle drie de niveaus, zodat je elk onderwerp later dieper terugziet. Dit hoofdstuk hoort bij O (onderzoeken) en D (ontwerpen).

begrip	in één zin	voorbeeld
systeem	onderdelen die samen iets doen	fiets, kas, smartphone
systeemgrens	wat je binnen het systeem rekent	rond de plant of rond de hele kas
input / output	materie, energie of informatie die de grens kruist	water in, zuurstof uit
proces	wat er binnen met de input gebeurt	fotosynthese, opwarmen, rekenen
deelsysteem	een systeem binnen een systeem	de remmen van de fiets
sturen (open lus)	uitvoeren zonder het resultaat te meten	sproeier met tijdschakelaar
regelen (gesloten lus)	meten, vergelijken, bijsturen	thermostaat, pomp met bodemvochtsensor
wetenschappelijke vraag	hoe of waarom iets gebeurt; onderzoekscyclus	Waarom beslaat de kas?
technisch probleem	iets maken dat werkt; ontwerpcyclus	Hoe houden we de kas warm?

code	leerlijn	waarover	in de meetkas
O	Onderzoeken en meten	vragen stellen, meten, betrouwbare besluiten	de groeiproef, de metingen
W	Wiskundig modelleren	verhoudingen, grafieken, formules	het temperatuurverloop in een grafiek
M	Materie en chemie	deeltjes, stoffen, mengsels, materialen	condens, voedingsoplossing, materiaal van het frame
K	Krachten, beweging en constructies	krachten, hefbomen, stevige constructies	het frame, het dakraam
E	Energie	energievormen, warmte, zon en wind	zonnepaneel, warmte vasthouden
L	Elektriciteit en elektronica	stroomkringen, spanning, vermogen	ledstrip, pomp, batterij
P	Programmeren en computationeel denken	algoritmen, blokken, later Python en C++	het programma dat water geeft
R	Regelen en robotica	sensoren, regelen, actuatoren	automatisch water geven
D	Ontwerpen en maken	ontwerpcyclus, tekenen, CAD, prototypes	programma van eisen, werktekening, 3D-print

code	leerlijn	waarover	in de meetkas
B	Leven en systemen	cellen, planten, ecosystemen, het lichaam	fotosynthese, groei van de planten
A	Data en AI	data visualiseren, patronen, lerende systemen	voorspellen wanneer de planten water nodig hebben



Het blokschema in het klein: dit patroon gebruik je in elk hoofdstuk opnieuw.

HET GEHEEL · 1.15

Waar dit hoofdstuk naartoe leidt

15/15

Dit hoofdstuk is een landkaart. Bijna elk begrip komt later terug, telkens preciezer. De **onderzoekscyclus** werk je uit in het volgende hoofdstuk, de **ontwerpcyclus** in hoofdstuk 30. Het **systeemdenken** (input, proces, output) gebruik je bij energieketens, stroomkringen, algoritmen, het lichaam en ecosystemen. En de **regelkring** met terugkoppeling groeit van een eenvoudige aan/uit-schakeling in Fundamental tot een PID-regeling in Expert.

F2 Onderzoeken: van vraag tot besluit
De onderzoekscyclus stap voor stap: vraag, hypothese, eerlijke proef, waarneming, besluit.

F22 Computationeel denken
Een groot probleem opdelen in deelproblemen (decompositie) is systeemdenken voor algoritmen.

F25 Sensoren en automatisch regelen
Je bouwt je eerste echte regelkring: meten, beslissen, doen, met een drempelwaarde.

F29 Het lichaam als systeem
Je lichaam als systeem, met lichaamstemperatuur als natuurlijke regelkring.

F30 De ontwerpcyclus
Het technische probleem aanpakken: eisen, ideeën, prototype, testen, verbeteren.

F33 Integratieproject: de meetkas
Het integratieproject: alle bouwstenen samen worden de meetkas.

I31 Regelsystemen
Regelkringen met blokschema's en hysterese, voor verwarming en ventilatie.

E45 Systems engineering en het V-model
Systeemdenken op ingenieursniveau: eisen, architectuur, interfaces en het V-model.

Habitat

De missie: een station dat zichzelf in leven houdt. De eerste module is de meetkas. Maak in je portfolio een eerste blokschema van de meetkas (opdracht 1.11 in het werkboek) en bewaar het: in hoofdstuk 30 wordt het de basis van je programma van eisen, in hoofdstuk 33 bouw je de kas echt.

SAMENVATTING

In het kort

- STEM staat voor wetenschap, technologie, engineering en wiskunde: vier manieren van denken die elkaar versterken.
- Wetenschap zoekt kennis, engineering ontwerpt oplossingen, technologie is wat we maken, wiskunde is de taal van alle drie.
- Een systeem beschrijf je met input, proces en output; wat in- en uitgaat, is materie, energie of informatie.
- De systeemgrens kies je zelf, en ze bepaalt wat input of output is. Grote systemen bestaan uit deelsystemen.
- Sturen voert uit zonder te meten (open lus); regelen meet het resultaat en stuurt bij (gesloten lus, terugkoppeling).
- Een wetenschappelijke vraag los je op met de onderzoekscyclus, een technisch probleem met de ontwerpcyclus.
- Habitat is een station dat zichzelf in leven houdt; in Fundamental bouw je de eerste module: de meetkas.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

STEM
Afkorting van science, technology, engineering en mathematics: wetenschap, technologie, engineering en wiskunde, als één samenhangend geheel.

wetenschap
Systematisch onderzoeken hoe de natuur werkt, met vragen, metingen en proeven; het resultaat is kennis.

technologie
Alles wat mensen maken om een probleem op te lossen of een behoefte te vervullen: toestellen, materialen, programma's, werkwijzen.

engineering
Het ontwerpen en verbeteren van oplossingen die moeten werken binnen eisen en beperkingen (geld, materiaal, veiligheid, tijd).

systeem
Een geheel van onderdelen die samenwerken om iets te doen; je beschrijft het met input, proces en output.

systeemgrens
De (denkbeeldige) lijn die bepaalt wat bij het systeem hoort; alles wat die lijn kruist, is input of output.

input
Wat een systeem binnenkomt: materie, energie of informatie.

output
Wat een systeem verlaat: materie, energie of informatie, gewenst of ongewenst.

proces
Wat er in het systeem met de input gebeurt: omzetten, vervoeren, opslaan, bewerken.

deelsysteem
Een systeem dat zelf deel is van een groter systeem, zoals de remmen van een fiets.

terugkoppeling
De output wordt gemeten en die meting stuurt het systeem bij; ook feedback genoemd.

sturen (open lus)
Een systeem doet wat ingesteld is, zonder te meten of het resultaat bereikt wordt.

regelen (gesloten lus)
Een systeem meet het resultaat en stuurt bij tot de gewenste waarde bereikt is.

wetenschappelijke vraag
Een vraag naar hoe of waarom iets in de natuur gebeurt; je beantwoordt ze met onderzoek.

technisch probleem
Een probleem waarvoor je iets wil ontwerpen of maken dat werkt; je lost het op met de ontwerpcyclus.

Habitat

Het onderzoeksstation dat je in StemExpert in drie lagen ontwerpt: meetkas, klimaat- en energiemodule, brein van het station.

HANDBOEK · HOOFDSTUK 2

Onderzoeken: van vraag tot besluit

Hoe je een eerlijke proef opzet, en waarom één meting nooit genoeg is

Wetenschappers raden niet: ze stellen een vraag, voorspellen wat er zal gebeuren, meten zorgvuldig en kijken of hun voorspelling klopt. In dit hoofdstuk leer je die **onderzoekscyclus** gebruiken: een goede vraag stellen, een **eerlijke proef** opzetten met één veranderende variabele, **herhalen** en het gemiddelde nemen, **waarneming** en **interpretatie** uit elkaar houden, en alles opschrijven in een kort onderzoeksverslag.

5× uitleg | 4× uitgewerkt voorbeeld | 1× proef | 1× naslag | 1× verhaal | 1× het geheel | ± 6 lestijden

Onderzoeken en meten



Meten, noteren, vergelijken: een groeiproef is onderzoek in het klein.

Na dit hoofdstuk

- Je kan de vijf stappen van de onderzoekscyclus noemen en uitleggen wat je in elke stap doet.
- Je kan een vage vraag omvormen tot een onderzoeksvraag met een meetbaar antwoord, en een hypothese formuleren als 'als … dan …, omdat …'.
- Je kan in een proef de onafhankelijke, de afhankelijke en de gecontroleerde variabelen aanduiden.
- Je kan beoordelen of een proef eerlijk is, en een oneerlijke proef verbeteren.
- Je kan uitleggen waarom je metingen herhaalt, het gemiddelde en het bereik berekenen, en zorgvuldig omgaan met een uitschieter.
- Je kan een waarneming onderscheiden van een interpretatie.
- Je kan een kort onderzoeksverslag opbouwen: vraag, hypothese, materiaal, werkwijze, resultaten, besluit, bespreking.

VERHAAL · 2.1

Een wilg, vijf jaar geduld en één grote vergissing

1/13

Waar haalt een boom zijn massa vandaan? In de eerste helft van de zeventiende eeuw wilde de Brusselse arts en scheikundige **Jan Baptist van Helmont** dat precies weten. De meeste mensen dachten toen dat een plant zich voedt met aarde. Van Helmont besloot het te *meten*.

Hij droogde 200 pond aarde in een oven, woog ze en deed ze in een grote pot. Daarin plantte hij een jonge wilg van 5 pond. (Een pond was toen ongeveer een halve kilogram.) Hij gaf de boom alleen

regenwater of gedestilleerd water, en dekte de pot af met een geperforeerde, vertinde ijzeren plaat, zodat er geen stof of vuil in kon vallen. Zo wachtte hij vijf jaar.

Toen woog de wilg ongeveer 169 pond. De afgevallen bladeren van vier herfsten had hij niet eens meegeteld. Hij droogde de aarde opnieuw en woog ze: nog steeds 200 pond, op ongeveer 2 ounces na (zowat 57 gram). Zijn besluit: de boom was ruim 164 pond zwaarder geworden door *water alleen*.

Van Helmonts proef was voor zijn tijd heel zorgvuldig. Hij maakte een duidelijke vraag meetbaar, hij hield bewust dingen gelijk (de afgedekte pot, alleen zuiver water) en hij woog voor en na. Zijn **metingen** waren juist. Maar zijn **besluit** klopte niet: hij had aan één input niet gedacht, de lucht. Vandaag weten we dat het grootste deel van de droge massa van een boom uit koolstofdioxide uit de lucht komt, dat de plant met licht en water omzet in suikers (fotosynthese, hoofdstuk 27).

Waarom dit verhaal ertoe doet

Dit hoofdstuk gaat over precies wat Van Helmont goed deed (een vraag meetbaar maken, eerlijk vergelijken, zorgvuldig meten) en over de valkuil die hem te pakken kreeg: een juiste *waarneming* verwarren met de enige mogelijke *interpretatie*. En zijn vraag is ook de vraag van de meetkas: wat heeft een plant nodig om te groeien?



Vijf jaar lang wegen, water geven en wachten: een van de eerste nauwkeurige proeven met planten.

UITLEG · 2.2

De onderzoekscyclus

2/13

Elk wetenschappelijk onderzoek, van een schoolproef tot een klimaatstudie, volgt dezelfde vijf stappen. We volgen ze met een voorbeeld: tuinkers in de meetkas.

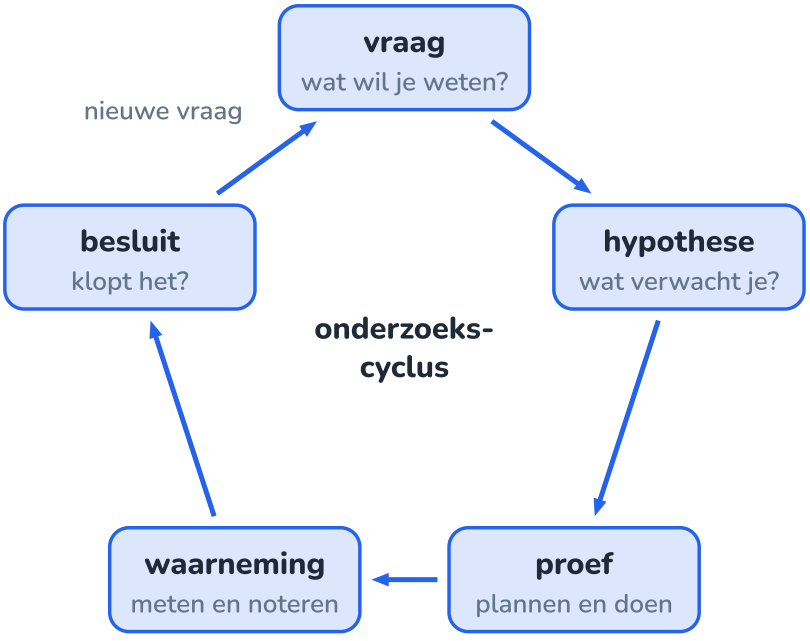
1. **Vraag.** Wat wil je te weten komen? *Hoe hangt de lengte van tuinkers na 7 dagen af van het aantal uren licht per dag?*
2. **Hypothese.** Wat verwacht je, en waarom? *Als tuinkers meer uren licht krijgt, dan wordt ze langer, omdat een plant licht gebruikt om voedsel te maken.*
3. **Proef.** Plan hoe je het test (wat verander je, wat meet je, wat hou je gelijk) en voer het uit: drie groepen bakjes krijgen 4, 8 of 12 uur licht per dag.
4. **Waarneming.** Meet en noteer zorgvuldig, in een tabel met eenheden: de lengte van de plantjes in millimeter, na 7 dagen.
5. **Besluit.** Beantwoord je vraag met je metingen. Klopt je hypothese? Dan is ze *bevestigd*. Klopt ze niet? Dan is ze *weerlegd*, en ook dat is een resultaat.

Het besluit roept bijna altijd een nieuwe vraag op (*en wat als het licht rood is in plaats van wit?*). Daarom is het een **cyclus**: onderzoek is nooit echt af.

Een goede onderzoeksvraag is:

- **meetbaar**: het antwoord is een getal of een waarneming die iedereen kan controleren;
- **afgebakend**: over één verband, liefst in de vorm 'Hoe hangt … af van …?';
- **haalbaar**: met het materiaal en de tijd die je hebt, en veilig;
- **echt**: je kan het antwoord niet gewoon opzoeken, of je wil controleren of wat je leest klopt.

> **Een hypothese is geen gok, en ze mag fout zijn**
>
> Een hypothese is een verwachting *met een reden*. Ze moet toetsbaar zijn, niet juist. Een weerlegde hypothese is geen mislukte proef: je hebt iets geleerd dat je daarvoor niet wist. Pas wel op dat je je hypothese niet achteraf aanpast aan je resultaten.



Vijf stappen in een kring: het besluit van het ene onderzoek is de vraag van het volgende.

UITGEWERKT VOORBEELD · 2.3

Van een vage vraag naar een toetsbare hypothese

3/13

Een klasgenoot vraagt zich af: *Houden planten van muziek?* Maak er een onderzoeksvraag en een toetsbare hypothese van.

GEGEVEN

- de vage vraag 'Houden planten van muziek?'
- tuinkers, bakjes, een luidsprekertje, 10 dagen tijd

GEVRAAGD

- een meetbare onderzoeksvraag
- een hypothese in de vorm 'als ..., dan ..., omdat ...'

OPLOSSING

1. **Maak 'houden van' meetbaar.** Een plant kan niet zeggen wat ze leuk vindt. Wat je wel kan meten: hoe goed ze groeit. Kies één afhankelijke variabele: de lengte in millimeter na 10 dagen.
2. **Maak 'muziek' concreet.** Kies wat je verandert: het aantal uren muziek per dag (0, 2 en 4 uur), telkens hetzelfde nummer op hetzelfde volume.
3. **Schrijf de onderzoeksvraag.** *Hoe hangt de lengte van tuinkers na 10 dagen af van het aantal uren muziek per dag?*
4. **Formuleer een hypothese met een reden.** Bijvoorbeeld: *Als tuinkers meer uren muziek krijgt, dan wordt ze niet langer dan zonder muziek, omdat planten geen oren hebben om geluid waar te nemen.* De omgekeerde verwachting mag ook, zolang je een reden geeft.
5. **Controleer.** Meetbaar: ja, met een lat. Afgebakend: één verband. Haalbaar: 10 dagen, vensterbank, luidsprekertje. Veilig: ja.

ANTWOORD

Onderzoeksvraag: 'Hoe hangt de lengte van tuinkers na 10 dagen af van het aantal uren muziek per dag?' Hypothese: 'Als tuinkers meer uren muziek krijgt, dan wordt ze niet langer, omdat planten geen oren hebben.'

Klopt dit? Een goede test: kan een klasgenoot met jouw vraag en hypothese precies dezelfde proef opzetten, zonder jou iets te vragen? Dan is ze duidelijk genoeg.

UITLEG · 2.4

Variabelen: veranderen, meten, gelijk houden

4/13

Een **variabele** is alles wat in een proef kan veranderen: de hoeveelheid licht, de temperatuur, de lengte van een plant. Bij elke proef onderscheid je drie soorten:

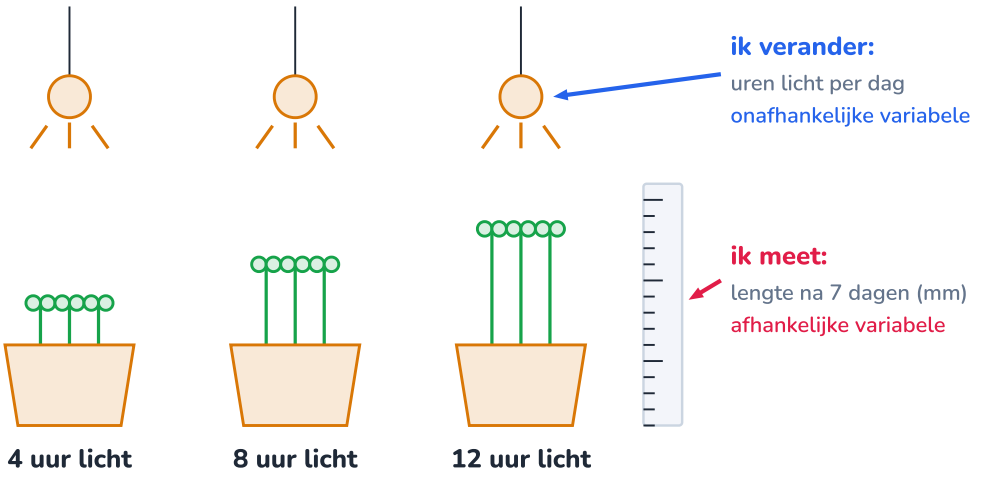
- De **onafhankelijke variabele** kies en verander *jij*: het aantal uren licht per dag.
- De **afhankelijke variabele** *meet* je: de lengte na 7 dagen. Ze hangt (misschien) af van de onafhankelijke variabele; dat wil je net ontdekken.
- De **gecontroleerde variabelen** hou je bewust *gelijk*: dezelfde soort zaad, dezelfde potgrond, evenveel water, dezelfde temperatuur, hetzelfde aantal dagen.

Een handig ezelsbruggetje: **één ding verander ik, één ding meet ik, al de rest hou ik gelijk**.

De onderzoeksvraag verraadt meestal al welke variabele welke is: in *Hoe hangt de lengte af van het aantal uren licht?* staat de afhankelijke variabele eerst en de onafhankelijke na 'af van'. In een grafiek zet je de onafhankelijke variabele op de horizontale as en de afhankelijke op de verticale as (hoofdstuk 4).

Schrijf ze vooraf op

Noteer vóór je begint welke variabelen je gelijk houdt, en hoe. 'Evenveel water' wordt dan '20 mL per bakje, elke ochtend om 8 uur, met dezelfde maatspuit'. Wat je niet opschrijft, vergeet je halverwege.



Drie bakjes die alleen verschillen in het aantal uren licht: dat is de enige variabele die je verandert.

UITLEG · 2.5

De eerlijke proef

5/13

Een proef is **eerlijk** als je maar **één variabele** verandert en al de rest gelijk houdt. Alleen dan weet je zeker dat een verschil in het resultaat door die ene variabele komt.

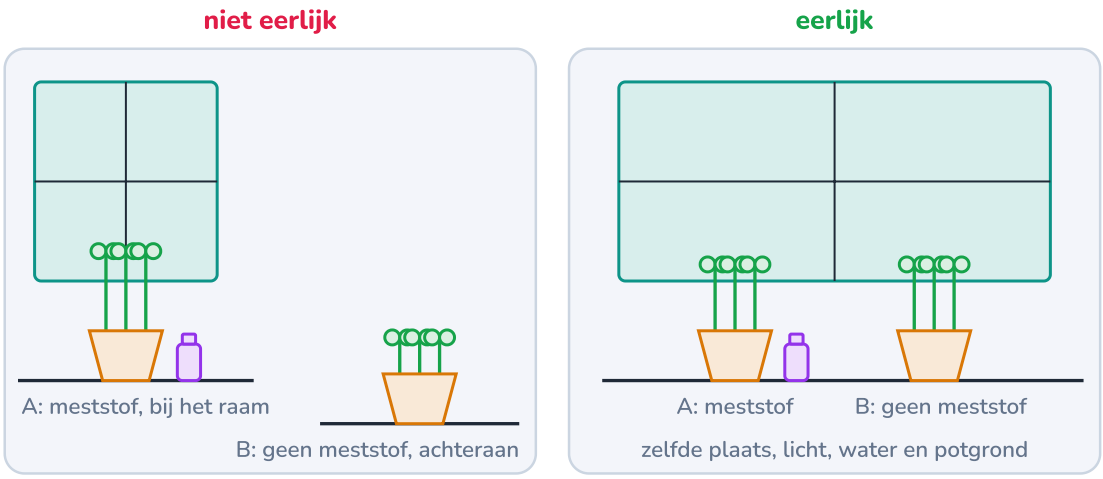
In de linkse opstelling hieronder wil een leerling weten of een meststof tuinkers sneller doet groeien. Bakje A krijgt meststof en staat bij het raam; bakje B krijgt geen meststof en staat achteraan in het lokaal. Groeit A sneller, dan weet je niet of dat door de meststof komt of door het extra licht en de warmte bij het raam. Twee variabelen tegelijk veranderen: het resultaat zegt niets.

In de rechtse opstelling staan beide bakjes naast elkaar voor hetzelfde raam. Ze krijgen evenveel water; het enige verschil is de meststof in het water van A. Bakje B is de **controlegroep**: de vergelijkingsgroep die de meststof niet krijgt.

Voor een eerlijke proef let je ook op **hoe je meet**: met hetzelfde instrument, op hetzelfde moment, bij alle bakjes op dezelfde manier (bijvoorbeeld tien willekeurige plantjes per bakje, niet alleen het grootste). En je gebruikt **meer dan één bakje** per groep: planten verschillen van nature.

Alles tegelijk veranderen gaat sneller

Het lijkt handig: meer licht, meer water én meststof tegelijk, en kijken of de plant beter groeit. Maar als dat zo is, weet je niet welke van de drie het deed, en of ze elkaar misschien tegenwerken. Drie vragen vragen drie eerlijke proeven.



Links verschillen de bakjes in meststof én in plaats; rechts alleen in meststof. Alleen de rechtse proef is eerlijk.

UITGEWERKT VOORBEELD · 2.6

Is deze proef eerlijk?

6/13

Lotte wil weten of meststof tuinkers sneller doet groeien. Bakje A krijgt water met meststof en staat op de vensterbank. Bakje B krijgt kraantjeswater en staat op een tafel achteraan. A krijgt elke dag 20 mL, B 'als ik eraan denk'. Na 5 dagen meet ze in elk bakje het langste plantje: A 38 mm, B 25 mm. Haar besluit: 'Meststof werkt.' Beoordeel de proef en verbeter ze.

GEGEVEN

- onafhankelijke variabele: meststof of niet
- afhankelijke variabele: lengte van een plantje (mm)
- resultaat: A 38 mm, B 25 mm (één plantje per bakje)

GEVRAAGD

- is de proef eerlijk?
- welke variabelen zijn niet gecontroleerd?
- een verbeterd plan

OPLOSSING

1. **Zoek de onafhankelijke variabele.** Meststof: ja of nee. Dat is het enige wat mocht verschillen.
2. **Zoek wat nog meer verschilt.** De plaats (licht en temperatuur zijn bij het raam anders dan achteraan), de hoeveelheid water (elke dag 20 mL tegenover soms), en de manier van meten (alleen het langste plantje, dat toevallig kan uitschieten).
3. **Oordeel.** De proef is niet eerlijk: drie variabelen verschillen tegelijk. Het verschil van 13 mm kan evengoed door het licht of het water komen.
4. **Verbeter.** Beide groepen naast elkaar op de vensterbank (en elke dag van plaats wisselen, zodat geen enkel bakje altijd het meeste licht krijgt); elke ochtend 20 mL per bakje, voor A met opgeloste meststof en voor B zuiver water; drie bakjes per groep; na 5 dagen tien willekeurige plantjes per bakje meten en het gemiddelde nemen.

ANTWOORD

De proef is niet eerlijk: licht en temperatuur, de hoeveelheid water en de meetmethode verschillen ook. In het verbeterde plan verschilt alleen de meststof; al de rest is gelijk, en er wordt per groep meer gemeten dan één plantje.

Klopt dit? Loop het verbeterde plan na met één vraag: 'Waarin verschillen A en B nog?' Is het antwoord 'alleen in de meststof', dan is de proef eerlijk.

PROEF · 2.7

De papieren helikopter

7/13

ONDERZOEKSVRAAG

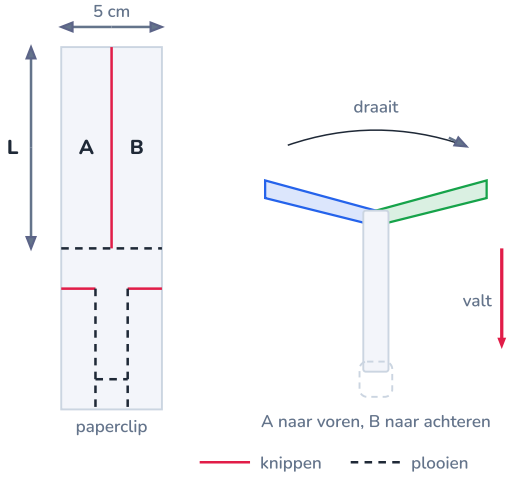
Hoe hangt de valtijd van een papieren helikopter af van de lengte van zijn vleugels?

MATERIAAL

papier (80 g/m²), schaar, lat, potlood · paperclips (één per helikopter) · meetlint · stopwatch

Veiligheid

Laat los vanaf een stevige stoel of trap, niet vanop een tafel. Een klasgenoot houdt de stoel vast.



Knip langs de volle lijnen, plooi langs de stippellijnen: vleugel A naar voren, B naar achteren, de zijkanten naar binnen, de onderkant omhoog met een paperclip.

WERKWIJZE

1. Maak vier helikopters volgens de bouwplaat, met vleugellengte L = 6, 8, 10 en 12 cm. Al de rest is gelijk: breedte 5 cm, romp, één paperclip.
2. Hou een helikopter met de vleugels open zo dat de onderkant van de romp 2,00 m boven de grond is. Laat los zonder te duwen.
3. Start de stopwatch bij het loslaten en stop bij het neerkomen. Laat telkens dezelfde leerling loslaten en dezelfde leerling meten.
4. Doe vijf worpen per helikopter, in een lokaal zonder tocht (ramen en deur dicht).
5. Noteer alle tijden in een tabel en bereken per helikopter het gemiddelde.

WAARNEMING

Zo zag het resultaat van één groep eruit (tijden in seconden):

L (cm)	worp 1	worp 2	worp 3	worp 4	worp 5	gemiddelde (s)	bereik (s)
6	1,31	1,38	1,29	1,35	1,33	1,33	
8	1,55	1,62	1,58	1,51	1,60	1,57	
10	1,82	1,74	1,79	1,85	1,77	1,79	
12	1,97	2,04	1,93	2,01	1,98	1,99	

De helikopters draaien tijdens de val. Hoe langer de vleugels, hoe trager ze vallen. De vijf worpen met dezelfde helikopter geven telkens iets andere tijden.

VERKLARING

Langere vleugels hebben een grotere oppervlakte: ze botsen tegen meer lucht en worden dus meer afgeremd. Daardoor langer. Het verband is niet evenredig: twee keer zo lange vleugels (6 cm naar 12 cm) geven een valtijd die ongeveer 1,5 keer zo lang is (1,33 s naar 1,99 s).

De worpen verschillen van elkaar door **toevallige afwijkingen**: je reactietijd bij het starten en stoppen van de stopwatch, een kleine duw bij het loslaten, een zuchtje lucht. Daarom meet je vijf keer en neem je het gemiddelde (volgend blad).

UITLEG · 2.8

Waarom één meting niets bewijst

8/13

Kijk naar de worpen van de helikopter: met exact dezelfde helikopter meet je 1,51 s, dan 1,62 s. Elke meting heeft een kleine, toevallige afwijking. Wie maar één keer meet, weet niet of hij een 'gewone' of een 'toevallig hoge' meting heeft. Stel dat je bij 6 cm alleen 1,38 s en bij 8 cm alleen 1,51 s had gemeten: dan leek het verschil 0,13 s. Met 1,29 s en 1,62 s leek het 0,33 s. Eén meting geeft dus een toevallig antwoord.

Daarom **herhaal** je elke meting, minstens drie keer en liefst vijf keer of meer, en reken je het **gemiddelde** uit:

GEMIDDELDE

$$\text{gemiddelde} = \frac{\text{som van alle metingen}}{\text{aantal metingen}}$$

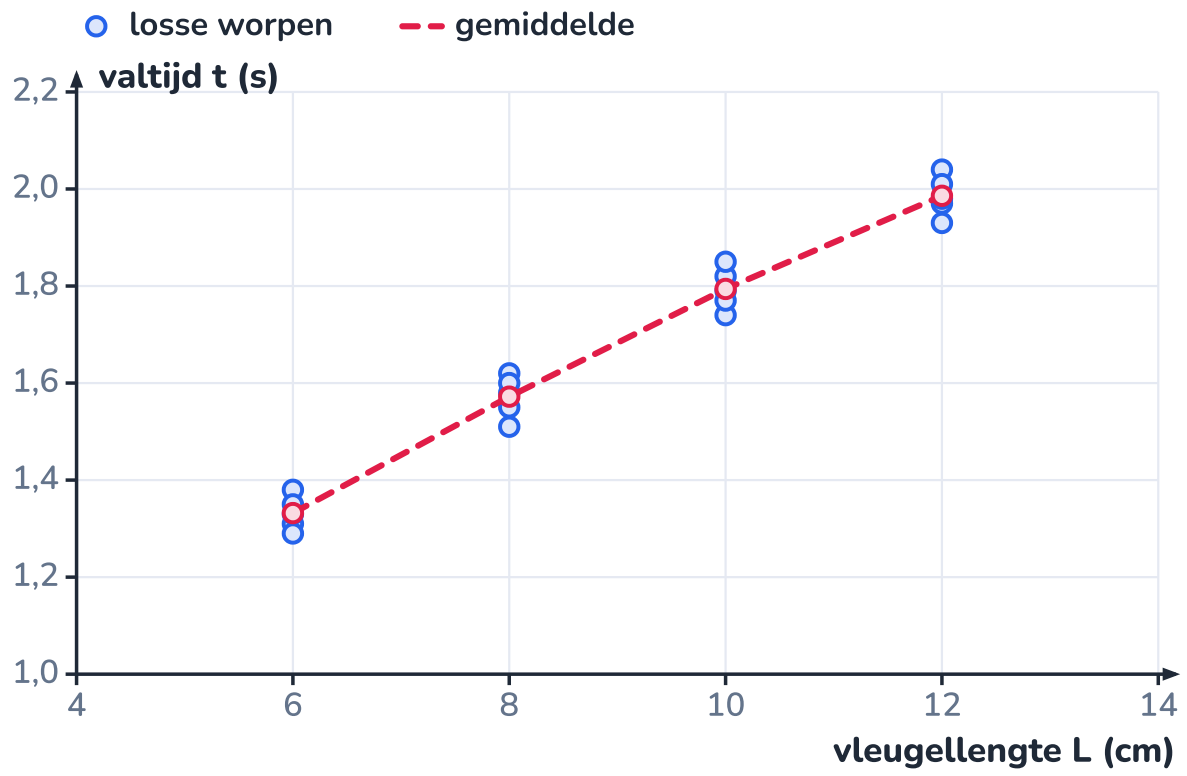
Het gemiddelde heeft dezelfde eenheid als de metingen. Rond het af op evenveel decimalen als de metingen zelf.

Hoe sterk de metingen verschillen, zie je aan het **bereik**: de grootste min de kleinste meting. Bij $L = 8\,\text{cm}$ is dat $1{,}62 - 1{,}51 = 0{,}11\,\text{s}$. Is het verschil tussen twee groepen veel groter dan het bereik binnen een groep, dan is het verschil waarschijnlijk echt. Is het kleiner, wees dan voorzichtig met je besluit.

Bij levende dingen is herhalen nog belangrijker: geen twee plantjes zijn gelijk. Daarom meet je in een groeiproef niet één plant per groep, maar liefst tien of meer.

Wetenschappers herhalen ook elkaars werk

Een resultaat telt pas echt als andere onderzoekers het met hun eigen proef kunnen herhalen. Daarom beschrijf je je werkwijze zo precies dat iemand anders ze kan overdoen.



De blauwe punten zijn de afzonderlijke worpen, de rode het gemiddelde per vleugellengte. De spreiding binnen een groep is veel kleiner dan het verschil tussen de groepen.

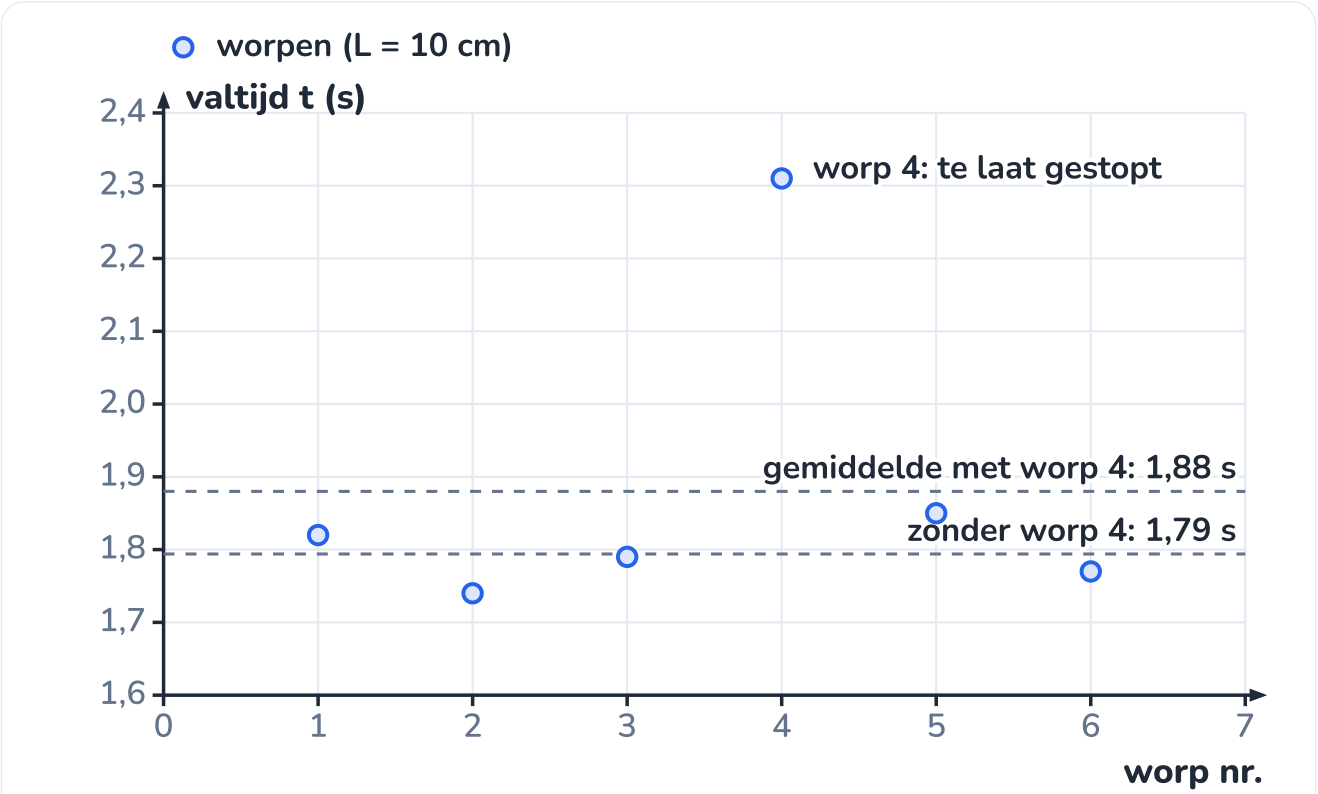
UITGEWERKT VOORBEELD · 2.9

Het gemiddelde, en wat met een uitschieter?

9/13

(a) Bereken het gemiddelde en het bereik van de vijf worpen met $L = 8\,\text{cm}$: 1,55; 1,62; 1,58; 1,51; 1,60 s.

(b) Een andere groep meet met $L = 10\,\text{cm}$ zes keer: 1,82; 1,74; 1,79; 2,31; 1,85; 1,77 s. Bij de vierde worp drukte de leerling de stopwatch pas af toen de helikopter al lag. Welk gemiddelde noteer je?



Eén foute worp trekt het gemiddelde omhoog van 1,79 s naar 1,88 s.

GEGEVEN

- (a) 5 worpen bij $L = 8\,\text{cm}$
- (b) 6 worpen bij $L = 10\,\text{cm}$, waarvan worp 4 met een gekende fout

GEVRAAGD

- (a) gemiddelde en bereik
- (b) een verantwoord gemiddelde

OPLOSSING

1 (a) Som: $1{,}55 + 1{,}62 + 1{,}58 + 1{,}51 + 1{,}60 = 7{,}86\,\text{s}$.

2 Gemiddelde: $7{,}86/5 = 1{,}572\,\text{s}$. De metingen hebben twee decimalen, dus: $1{,}57\,\text{s}$.

3 Bereik: grootste min kleinste $= 1{,}62 - 1{,}51 = 0{,}11\,\text{s}$.

4 (b) Worp 4 (2,31 s) ligt ver van de andere vijf, die tussen 1,74 en 1,85 s liggen: een **uitschieter**. Met alle zes: $11{,}28/6 = 1{,}88\,\text{s}$. Zonder worp 4: $8{,}97/5 = 1{,}794\,\text{s} \approx 1{,}79\,\text{s}$.

5 Mag worp 4 eruit? Ja, omdat je een **gekende reden** hebt: de stopwatch werd te laat gestopt. Schrap hem niet ongemerkt: vermeld in je verslag dat je hem weggelaten hebt en waarom. Een afwijkende meting zonder gekende fout laat je staan, en je meet liever een paar keer extra.

ANTWOORD

(a) Gemiddelde $1{,}57\,\text{s}$, bereik $0{,}11\,\text{s}$. (b) Gemiddelde $1{,}79\,\text{s}$ (vijf worpen), met in het verslag de vermelding dat worp 4 weggelaten is wegens een meetfout.

Klopt dit? Een gemiddelde ligt altijd tussen de kleinste en de grootste meting. 1,57 s ligt tussen 1,51 en 1,62 s. En de tweede groep vindt zonder de fout 1,79 s, precies wat de eerste groep bij 10 cm vond: de proef is herhaalbaar.

UITLEG · 2.10

10/13

Zien of denken: waarneming en interpretatie

Een **waarneming** is wat je vaststelt met je zintuigen of een meetinstrument, zonder uitleg: *de bladeren van plant B zijn geel*. Een **interpretatie** is wat je denkt dat die waarneming betekent: *plant B krijgt te weinig voeding*. Het eerste kan iedereen controleren, het tweede is een verklaring die fout kan zijn.

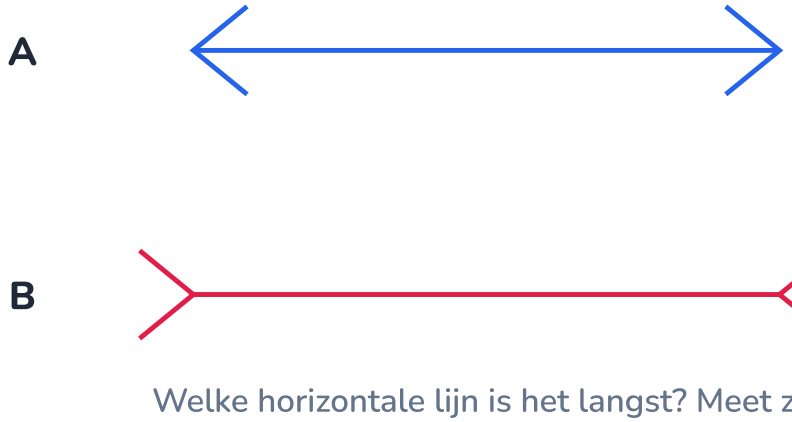
waarneming	mogelijke interpretatie
De bladeren van plant B zijn geel.	Plant B krijgt te weinig voeding. (Of te veel water? Of te weinig licht?)
's Ochtends hangen er druppels aan de binnenkant van de kas.	Het water komt uit de lucht in de kas, die 's nachts afkoelt.
De helikopter met 12 cm-vleugels valt gemiddeld 0,66 s trager dan die met 6 cm.	Langere vleugels remmen meer af.
De grond in Van Helmonts pot verloor maar 57 gram.	De massa van de boom komt uit het water. (Fout: ook uit de lucht.)

In een onderzoeksverslag hou je ze gescheiden: bij de **resultaten** staan alleen waarnemingen (tabellen, grafieken, wat je zag), in het **besluit** en de **bespreking** je interpretatie. Zo kan een lezer je metingen controleren en er eventueel een andere verklaring voor vinden, zoals latere onderzoekers deden met Van Helmonts wilg.

Ook je waarneming zelf kan je bedriegen. Kijk naar de figuur: de onderste lijn lijkt langer. Meet beide lijnen met een lat: ze zijn even lang. Daarom vertrouwen onderzoekers liever op een meetinstrument dan op hun indruk (hoofdstuk 3).

Signaalwoorden

Woorden als *omdat, doordat, daarom, waarschijnlijk, dus* wijzen meestal op een interpretatie. Een zuivere waarneming kan je aanwijzen, tellen of meten.



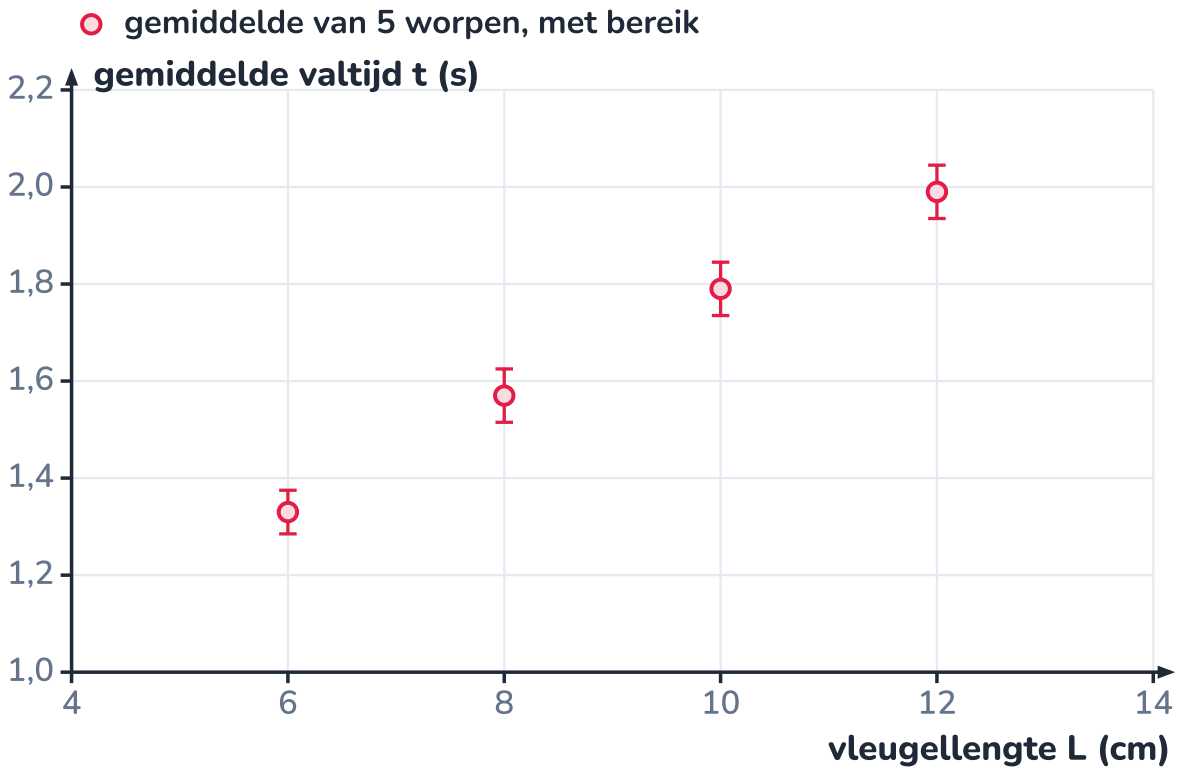
Lijn B lijkt langer dan lijn A, maar een lat toont dat ze even lang zijn.

UITGEWERKT VOORBEELD · 2.11

Een kort onderzoeksverslag

11/13

Schrijf een kort verslag van de proef met de papieren helikopter. Gebruik de metingen uit het proefblad.



In een verslag toon je het gemiddelde, en met een streepje het bereik van de metingen.

GEGEVEN

- de metingen: vijf worpen voor elke vleugellengte (6, 8, 10 en 12 cm)

GEVRAAGD

- een verslag met de vaste onderdelen

OPLOSSING

1. **Titel en onderzoeksvraag.** *Hoe hangt de valtijd van een papieren helikopter af van de vleugellengte?*
2. **Hypothese.** Als de vleugels langer zijn, dan valt de helikopter trager (langere valtijd), omdat grotere vleugels meer lucht tegenhouden.
3. **Materiaal.** Papier 80 g/m², schaar, lat, vier paperclips, meetlint, stopwatch.
4. **Werkwijze.** Vier helikopters met L = 6, 8, 10 en 12 cm, verder identiek (breedte 5 cm, één paperclip). Loslaten vanaf 2,00 m (onderkant van de romp), zonder duwen, ramen en deur dicht. Dezelfde leerling laat los en meet. Vijf worpen per helikopter.
5. **Resultaten** (waarnemingen). De tabel met alle worpen, gemiddelden en bereik, en de grafiek met de gemiddelde valtijd tegenover de vleugellengte. De valtijd stijgt van 1,33 s (6 cm) tot 1,99 s (12 cm). Het bereik per helikopter is 0,09 tot 0,11 s.
6. **Besluit** (antwoord op de vraag). Hoe langer de vleugels, hoe langer de valtijd. De hypothese is bevestigd. Twee keer zo lange vleugels geven geen twee keer zo lange valtijd, maar ongeveer 1,5 keer.
7. **Bespreking.** De worpen verschillen tot 0,11 s, vooral door de reactietijd bij de stopwatch. Verbeteren: van grotere hoogte laten vallen, de val filmen en de beelden tellen, meer worpen. Nieuwe vraag: hangt de valtijd ook af van de breedte van de vleugels?

ANTWOORD

Een verslag heeft zeven vaste onderdelen: titel met onderzoeksvraag, hypothese, materiaal, werkwijze, resultaten, besluit en bespreking. Waarnemingen staan bij de resultaten, interpretaties in het besluit en de bespreking.

Klopt dit? Lees je besluit en je onderzoeksvraag na elkaar: beantwoordt het besluit precies de vraag? En kan iemand met jouw werkwijze de proef overdoen?

NASLAG · 2.12

Overzicht: van vraag tot verslag

gemiddelde

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n}$$

symbool	betekenis	eenheid
$\bar{x}$	gemiddelde (spreek uit: x-streep)	zelfde eenheid als de metingen
$x_1, x_2, \ldots$	de afzonderlijke metingen	
n	aantal metingen	

bereik

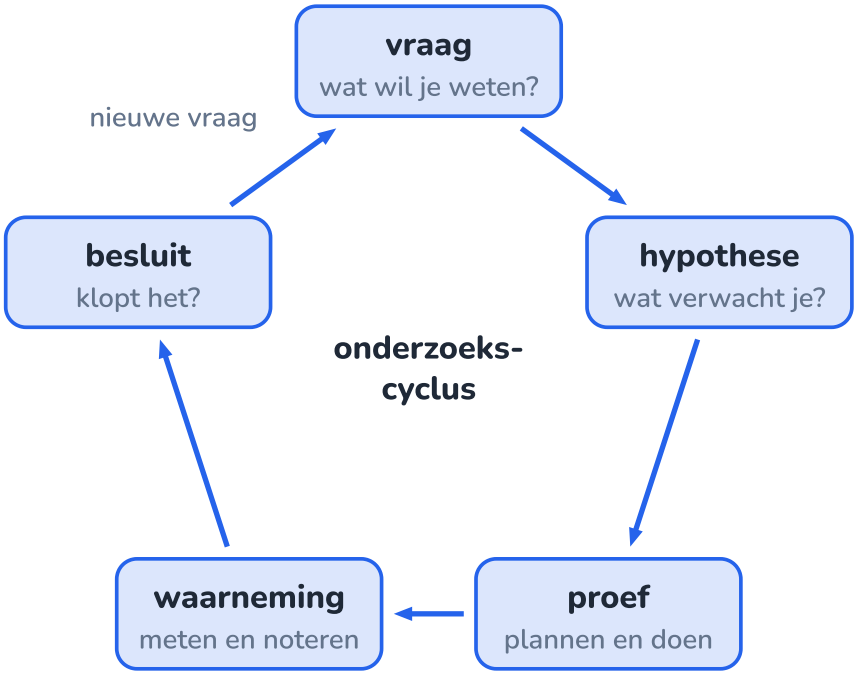
$$\text{bereik} = x_{\text{grootst}} - x_{\text{kleinst}}$$

symbool	betekenis	eenheid
x_{grootst}	grootste meting	
x_{kleinst}	kleinste meting	

stap	vraag die je jezelf stelt	let op
vraag	Wat wil ik weten?	meetbaar, één verband: 'Hoe hangt … af van …?'
hypothese	Wat verwacht ik, en waarom?	'als …, dan …, omdat …'; ze mag fout zijn
proef	Wat verander ik, wat meet ik, wat hou ik gelijk?	één variabele veranderen; herhalen; controlegroep
waarneming	Wat meet en zie ik?	tabel met grootheid en eenheid; niets weglaten zonder reden
besluit	Wat is het antwoord op mijn vraag? Klopt de hypothese?	alleen besluiten wat de metingen tonen

checklist eerlijke proef
Ik verander maar één variabele.
Ik heb opgeschreven welke variabelen ik gelijk hou, en hoe.
Er is een vergelijkingsgroep (controlegroep) als dat zinvol is.
Ik meet elke situatie minstens drie keer, of met meerdere planten of voorwerpen.
Ik meet overal op dezelfde manier, met hetzelfde instrument.

onderdeel van het verslag	wat erin staat
titel en onderzoeksvraag	de vraag, zo precies mogelijk
hypothese	verwachting met reden
materiaal	alles wat je gebruikte, met hoeveelheden
werkwijze	stappen, zo dat iemand anders ze kan overdoen; ook wat je gelijk hield
resultaten	tabel en grafiek, met eenheden; alleen waarnemingen
besluit	antwoord op de vraag; hypothese bevestigd of weerlegd
bespreking	hoe betrouwbaar? wat kon beter? welke nieuwe vraag?



De onderzoekscyclus: de vijf stappen die je in elk onderzoek doorloopt.

HET GEHEEL · 2.13

Waar onderzoeken naartoe leidt

13/13

Onderzoeken is de ruggengraat van de leerlijn **Onderzoeken en meten**, en je gebruikt het in elk hoofdstuk met een proef. In het volgende hoofdstuk leer je **meten** met de juiste eenheden en instrumenten, daarna zet je je metingen in **tabellen en grafieken**. In Intermediate wordt 'herhalen en gemiddelde nemen' een echte foutenleer met standaardafwijking, en in Expert beslis je met statistiek of een verschil echt is of toeval.

F1 Wat is STEM?
Wetenschappelijke vraag tegenover technisch probleem: hier werk je de onderzoekscyclus uit.

F3 Meten: grootheden en eenheden
Een waarneming is pas bruikbaar met een getal én een eenheid, gemeten met het juiste instrument.

F4 Tabellen, grafieken en verbanden
Je metingen ordenen in een tabel en een grafiek, en een verband herkennen.

F27 Planten: fotosynthese en groei
De groeiproef met één variabele, en het antwoord op Van Helmonts vraag.

F33 Integratieproject: de meetkas
In het integratieproject voer je de groeiproef in de meetkas echt uit en rapporteer je ze.

I1 Meetfouten en nauwkeurigheid
Toevallige en systematische fouten, standaardafwijking en uitschieters met een regel.

I2 Experimenten ontwerpen en rapporteren
Controlegroep, steekproefgrootte, blind meten en het wetenschappelijk verslag.

E6 Statistiek en meetonzekerheid
Met een t-toets bepalen of een verschil tussen twee groepen echt is.

Habitat
De meetkas wordt een onderzoeksstation in het klein. De eerste onderzoeksvraag: wat heeft een plant nodig om snel te groeien? In opdracht 2.13 schrijf je het onderzoeksplan voor een eerlijke groeiproef in de kas. Bewaar het in je portfolio: in hoofdstuk 27 en 33 voer je het uit.

SAMENVATTING

In het kort

- De onderzoekscyclus: vraag, hypothese, proef, waarneming, besluit; het besluit leidt tot een nieuwe vraag.
- Een goede onderzoeksvraag is meetbaar, afgebakend en haalbaar. Een hypothese is een verwachting met een reden en mag fout blijken.
- Je verandert één variabele (onafhankelijk), meet één variabele (afhankelijk) en houdt al de rest gelijk (gecontroleerd).
- Een proef is pas eerlijk als alleen de onderzochte variabele verschilt; een controlegroep dient als vergelijking.
- Eén meting bewijst niets: herhaal, neem het gemiddelde en kijk naar het bereik. Laat een uitschieter alleen weg met een gekende reden, en vermeld het.
- Een waarneming stel je vast; een interpretatie is je verklaring. Hou ze gescheiden in je verslag.
- Een verslag: titel en vraag, hypothese, materiaal, werkwijze, resultaten, besluit, bespreking.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

onderzoekscyclus
De vaste volgorde van wetenschappelijk onderzoek: vraag, hypothese, proef, waarneming, besluit; het besluit leidt vaak tot een nieuwe vraag.

onderzoeksvraag
Een vraag waarop je met metingen een antwoord kan vinden, meestal van de vorm 'Hoe hangt … af van …?'.

hypothese
Een voorspelling met een reden, die je met een proef kan toetsen: 'als …, dan …, omdat …'.

onafhankelijke variabele
De grootheid die je in een proef zelf kiest en verandert.

afhankelijke variabele
De grootheid die je meet om te zien of ze verandert; ze hangt (misschien) af van de onafhankelijke variabele.

gecontroleerde variabele
Een grootheid die je bewust gelijk houdt, zodat ze het resultaat niet beïnvloedt.

eerlijke proef
Een proef waarin je maar één variabele verandert en al de rest gelijk houdt.

controlegroep
Een vergelijkingsgroep waarbij je de onderzochte factor niet toepast, bijvoorbeeld planten zonder meststof.

gemiddelde
De som van alle metingen gedeeld door het aantal metingen.

bereik
Het verschil tussen de grootste en de kleinste meting; een eenvoudige maat voor hoe sterk metingen verschillen.

uitschieter
Een meting die duidelijk afwijkt van de andere, vaak door een fout bij het meten.

waarneming
Wat je met je zintuigen of een meetinstrument vaststelt, zonder uitleg.

interpretatie
Wat je denkt dat een waarneming betekent: een verklaring of een oorzaak.

F FUNDAMENTAL · DEEL F1 · DENKEN EN WERKEN ALS STEM'ER

HANDBOEK · HOOFDSTUK 3

Meten: grootheden en eenheden

Getal, eenheid en instrument: zo wordt een meting iets waar anderen op kunnen bouwen

Zonder eenheid is een getal niets waard, en met de verkeerde eenheid kan het zelfs gevaarlijk zijn. In dit hoofdstuk leer je hoe je een meetresultaat noteert als **grootheid, getal en eenheid**, wat het internationale **SI** is, hoe je met **voorvoegsels** en de **eenhedentrap** omzet, en hoe je oppervlakte en volume uitdrukt. Je leert meten met lat, schuifmaat, balans, maatcilinder, thermometer en stopwatch, **afleesfouten** vermijden en je resultaat **zinvol afronden**.

8× uitleg · 5× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 2× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

O Onderzoeken en meten · W Wiskundig modelleren



Meten tot op een tiende millimeter: het frame van de meetkas onder de schuifmaat.

Na dit hoofdstuk

- Je kan in een meetresultaat de grootheid, het getal en de eenheid aanduiden, en een meetresultaat correct noteren.
- Je kan de zeven SI-basisgrootheden met hun basiseenheid opnoemen en uitleggen waarom één stelsel van eenheden nodig is.
- Je kan de voorvoegsels mega, kilo, hecto, deca, deci, centi en milli gebruiken, en eenheden van lengte, massa en inhoud omzetten met de eenhedentrap.
- Je kan tijd omzetten tussen uren, minuten en seconden, en weet waarom dat niet tiendelig gaat.
- Je kan oppervlakte en volume berekenen en omzetten tussen mm², cm², m² en tussen cm³, dm³, m³, mL en L.
- Je kan meten met lat, schuifmaat, balans, maatcilinder, thermometer en stopwatch, en de kleinste stap van elk instrument benoemen.
- Je kan parallax en de meniscus uitleggen en correct aflezen.
- Je kan een meting en een berekend resultaat zinvol afronden.

VERHAAL · 3.1

Verloren door een eenheid

1/19

Op 23 september 1999 moest de Amerikaanse ruimtesonde **Mars Climate Orbiter** in een baan rond Mars gaan. De sonde was negen maanden onderweg geweest. Ze dook achter de planeet weg en er kwam nooit meer een signaal terug. Ze was veel te dicht bij Mars gekomen: op ongeveer 57 kilometer

boven het oppervlak in plaats van de geplande 226 kilometer, en ging vermoedelijk in de atmosfeer verloren.

Het onderzoek bracht de oorzaak aan het licht. Het team van de bouwer rekende de kleine stoten van de stuurraketjes uit in Engelse eenheden (*pound-force seconds*). Het navigatieteam van NASA verwachtte SI-eenheden (*newtonseconden*). Eén Engelse eenheid is 4,45 keer zo groot als één SI-eenheid. Niemand merkte het op: de getallen zagen er gewoon uit. Een missie van ruim 300 miljoen dollar ging verloren door een eenheid die niet vermeld of niet nagekeken werd.

Het is niet de enige keer. In 1983 kwam een Boeing 767 van Air Canada tijdens een vlucht zonder brandstof te zitten. De hoeveelheid brandstof was berekend in *pond* in plaats van in *kilogram*, zodat er minder dan de helft van de nodige brandstof in de tanks zat. De piloten zweefden met stilgevallen motoren naar een oude luchtmachtbasis in Gimli, in Canada, en landden. Alle 69 mensen aan boord overleefden (werkboekopdracht 3.16 rekent het na).

Waarom dit verhaal ertoe doet

Een getal zonder eenheid, of met de verkeerde eenheid, is erger dan geen getal: het ziet er betrouwbaar uit. Daarom schrijf je in StemExpert **altijd** de eenheid bij een getal, en werken we met één stelsel van eenheden: het SI.



Een sonde die te diep in de atmosfeer van Mars dook, door een verwisseling van eenheden.

UITLEG · 3.2

Grootheid, getal en eenheid

2/19

Alles wat je kan meten, heet een **grootheid**: lengte, massa, tijd, temperatuur, volume. Meten is vergelijken met een afgesproken maat: de **eenheid**. Als de kas 1,20 m lang is, past de eenheid meter er 1,20 keer in. Een meetresultaat bestaat dus altijd uit drie delen:

$$l = 1{,}20\,\mathrm{m}$$

- de **grootheid**, met een symbool in schuine letters: l voor lengte, m voor massa, t voor tijd, V voor volume;

- het **getal**: hoeveel keer de eenheid erin past;
- de **eenheid**, met een symbool in rechte letters: m, kg, s, L.

Tussen getal en eenheid staat een spatie: 1,20 m, niet 1,20m. Symbolen van eenheden krijgen geen meervoud en geen punt: 5 kg, niet 5 kgs of 5 kg. als afkorting. En let op hoofdletters: m is meter, M is mega; s is seconde, S is de siemens, een eenheid uit de elektronica.

grootheid	symbool	eenheid	symbool eenheid
lengte	l	meter	m
massa	m	kilogram	kg
tijd	t	seconde	s
oppervlakte	A	vierkante meter	m²
volume	V	kubieke meter, liter	m³, L
temperatuur	t of T	graad Celsius, kelvin	°C, K

Massa of gewicht?

In de winkel zeg je dat boter 250 gram 'weegt'. Wat een weegschaal aangeeft, is de **massa**: hoeveel stof er in de boter zit, in kilogram of gram. Het **gewicht** is in de natuurwetenschappen een kracht, in newton, en dat is op de maan zes keer kleiner, terwijl de massa gelijk blijft. Meer daarover in hoofdstuk 11.



Symbool van de grootheid schuin, eenheid recht, en daartussen het getal met een spatie ervoor.

VERHAAL · 3.3

Van een platina staaf naar natuurconstanten

3/19

Nog geen driehonderd jaar geleden had bijna elke stad haar eigen maten. Een el of een voet was in Brugge anders dan in Antwerpen of Brussel, en handelaars moesten voortdurend omrekenen. Tijdens de Franse Revolutie besloten Franse wetenschappers dat het anders moest: één maat voor iedereen, gebaseerd op de aarde zelf.

De **meter** werd één tienmiljoenste van de afstand van de Noordpool tot de evenaar, gemeten langs de meridiaan door Parijs. Twee astronomen maten jarenlang een deel van die meridiaan op, tussen Duinkerke en Barcelona. In 1799 werd een platina staaf van precies die lengte de officiële meter. De **kilogram** was oorspronkelijk de massa van een liter water.

In 1875 ondertekenden zeventien landen, waaronder België, de **Meterconventie**. Vanaf 1889 lagen in Sèvres bij Parijs een internationale standaardmeter en een standaardkilogram: een cilinder van platina

en iridium van ongeveer 4 cm hoog. In 1960 kreeg het stelsel zijn naam: het **Système International d'Unités**, kortweg **SI**. Het heeft zeven **basisgrootheden**, elk met een **basiseenheid**:

grootheid	symbool	basiseenheid	symbool	vastgelegd via (sinds 2019)
lengte	l	meter	m	de lichtsnelheid
massa	m	kilogram	kg	de constante van Planck
tijd	t	seconde	s	de trilling van cesiumatomen
elektrische stroomsterkte	I	ampère	A	de lading van één elektron
temperatuur	T	kelvin	K	de constante van Boltzmann
hoeveelheid stof	n	mol	mol	het getal van Avogadro
lichtsterkte	I_v	candela	cd	de lichtopbrengst van een bepaald groen licht

Een metalen voorwerp als maat heeft een nadeel: het kan veranderen. De standaardkilogram en zijn kopieën groeiden in honderd jaar zowat 50 microgram uit elkaar. Daarom liggen sinds 20 mei 2019 alle zeven basiseenheden vast via **natuurconstanten**, getallen die overal en altijd hetzelfde zijn. De meter is bijvoorbeeld de afstand die licht in het luchtledige aflegt in 1/299 792 458 seconde, en de seconde is 9 192 631 770 trillingen van een cesiumatoom.

Alle andere eenheden zijn **afgeleid** van de basiseenheden: de vierkante meter (m²) voor oppervlakte, de kubieke meter (m³) voor volume, de meter per seconde (m/s) voor snelheid (hoofdstuk 14), de kilogram per kubieke meter (kg/m³) voor dichtheid (hoofdstuk 7). Enkele handige eenheden buiten het SI mag je ernaast gebruiken: de liter, de minuut, het uur, de ton (1 t = 1000 kg) en de hectare.



Van 1889 tot 2019 was de kilogram de massa van één cilinder van platina en iridium.

UITLEG · 3.4

Voorvoegsels: van nano tot giga

4/19

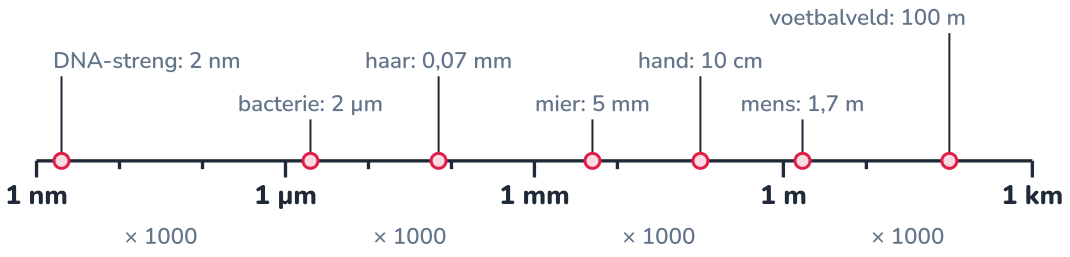
Een bacterie is 0,000 002 m lang, een windturbine levert 3 000 000 W. Zulke getallen zijn lastig te lezen. Daarom zet je een **voorvoegsel** voor de eenheid: 2 µm (micrometer) en 3 MW (megawatt). Het voorvoegsel betekent een vermenigvuldiging met een macht van tien.

voorvoegsel	symbool	betekenis	macht van 10	voorbeeld
giga	G	× 1 000 000 000	10^{9}	een grote kernreactor levert ongeveer 1 GW
mega	**M**	× 1 000 000	10^{6}	een grote windturbine op land: enkele MW
kilo	**k**	× 1000	10^{3}	kilometer, kilogram
hecto	h	× 100	10^{2}	hectoliter, hectare
deca	da	× 10	10^{1}	decameter (zelden gebruikt)
(geen)		× 1	10^{0}	meter, gram, liter, seconde
deci	d	× 0,1	10^{-1}	deciliter
centi	**c**	× 0,01	10^{-2}	centimeter, centiliter
milli	**m**	× 0,001	10^{-3}	millimeter, milliliter, milliampère
micro	μ	× 0,000 001	10^{-6}	micrometer: een bacterie is enkele μm lang
nano	n	× 0,000 000 001	10^{-9}	nanometer: een DNA-streng is ongeveer 2 nm breed

Een **macht van 10** is een korte schrijfwijze: $10^{3} = 10 \times 10 \times 10 = 1000$ en $10^{-3} = 1/1000 = 0{,}001$. De voorvoegsels in het vet gebruik je het meest; micro en nano kom je tegen bij heel kleine dingen (cellen, hoofdstuk 26).

Een voorvoegsel lees je als een vervanging: **k** betekent '× 1000'. Dus 3 km = 3 × 1000 m = 3000 m, en 250 mA = 250 × 0,001 A = 0,250 A.

> ⚠ **Kleine en grote letters**
>
> **m** (milli) en **M** (mega) verschillen een factor 1 000 000 000. 1 mm is een millimeter, 1 Mm zou duizend kilometer zijn. En de **k** van kilo is altijd een kleine letter: km, kg, kW.



Elke grote streep is een factor 1000: van nanometer via micrometer en millimeter tot meter en kilometer. De afmetingen zijn ordes van grootte.

UITLEG · 3.5

De eenhedentrap

5/19

Bij lengte liggen de eenheden telkens een factor 10 uit elkaar: 1 km = 10 hm = 100 dam = 1000 m, 1 m = 10 dm = 100 cm = 1000 mm. Zet ze op een trap, van groot naar klein:

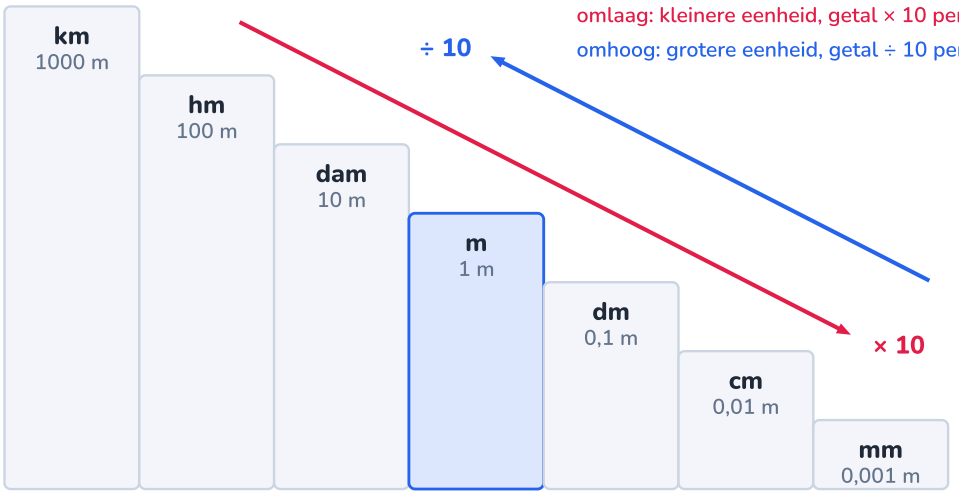
- Ga je een trede **omlaag** (naar een kleinere eenheid), dan heb je er **meer** van nodig: vermenigvuldig het getal met 10.
- Ga je een trede **omhoog** (naar een grotere eenheid), dan heb je er **minder** van nodig: deel het getal door 10.

Vermenigvuldigen met 10 is de komma één plaats naar rechts schuiven; delen door 10 is één plaats naar links. Ontbreken er cijfers, dan vul je aan met nullen: 0,8 m = 8 dm = 80 cm = 800 mm.

Dezelfde trap werkt voor **massa** (kg, hg, dag, g, dg, cg, mg) en voor **inhoud in liter** (hL, daL, L, dL, cL, mL). Tussen kg en g zitten drie treden: 1 kg = 1000 g. Voor oppervlakte en volume zijn de treden groter (volgende bladen).

Tijd is niet tiendelig

1 uur = 60 minuten, 1 minuut = 60 seconden, 1 dag = 24 uur. Daarom is **1,5 uur** geen 1 uur en 50 minuten, maar 1 uur en een half uur: **1 h 30 min** = 90 min. En 0,1 uur is 6 minuten. Omzetten doe je hier met 60 en 24, niet met de trap.



De eenhedentrap voor lengte: omlaag × 10 per trede, omhoog ÷ 10 per trede. De meter is de basiseenheid.

UITGEWERKT VOORBEELD · 3.6

Omzetten met de trap

6/19

Zet om: (a) 2,35 km naar m; (b) 450 mg naar g; (c) 75 cL naar L; (d) 0,8 m naar mm; (e) 2 h 15 min naar min.

GEGEVEN

- $2{,}35\,\text{km}$
- $450\,\text{mg}$
- $75\,\text{cL}$
- $0{,}8\,\text{m}$
- 2 h 15 min

GEVRAAGD

- dezelfde hoeveelheid in de nieuwe eenheid

OPLOSSING

1. (a) Van km naar m: drie treden **omlaag** (km, hm, dam, m), dus $\times 10 \times 10 \times 10 = \times 1000$. De komma drie plaatsen naar rechts: $2{,}35\,\text{km} = 2350\,\text{m}$.
2. (b) Van mg naar g: drie treden **omhoog** (mg, cg, dg, g), dus $\div 1000$. De komma drie plaatsen naar links: $450\,\text{mg} = 0{,}450\,\text{g}$.
3. (c) Van cL naar L: twee treden omhoog (cL, dL, L), dus $\div 100$: $75\,\text{cL} = 0{,}75\,\text{L}$.
4. (d) Van m naar mm: drie treden omlaag, dus $\times 1000$: $0{,}8\,\text{m} = 800\,\text{mm}$ (nullen aanvullen).

5 (e) Tijd is niet tiendelig: 2 h = $2 \times 60 = 120$ min, plus 15 min: 135 min.

ANTWOORD

(a) 2350 m; (b) 0,450 g; (c) 0,75 L; (d) 800 mm; (e) 135 min.

Klopt dit? Naar een kleinere eenheid moet het getal groter worden (2350 is meer dan 2,35), naar een grotere eenheid kleiner (0,450 is minder dan 450). Klopt de richting niet, dan liep je de trap de verkeerde kant op.

UITLEG · 3.7

Oppervlakte: vierkante eenheden

7/19

De **oppervlakte** A van een vlak zegt hoeveel vierkantjes van 1 bij 1 erop passen. Voor een rechthoek vermenigvuldig je lengte en breedte:

OPPERVLAKTE VAN EEN RECHTHOEK

$$A = l \cdot b$$

l en b in dezelfde eenheid; de eenheid van A is die eenheid in het kwadraat: cm × cm = cm², m × m = m².

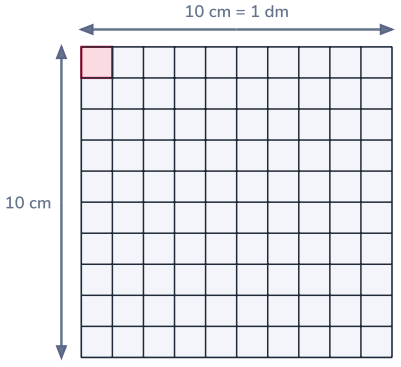
Een vierkante decimeter is een vierkant van 10 cm op 10 cm. Daarin passen $10 \times 10 = 100$ vierkante centimeters. Bij oppervlakte is elke trede van de trap dus een factor **100**:

$$1\,\text{m}^2 = 100\,\text{dm}^2 = 10\,000\,\text{cm}^2 = 1\,000\,000\,\text{mm}^2$$

Voor grond gebruik je ook de **are** en de **hectare**: 1 a = 100 m² (een vierkant van 10 m op 10 m) en 1 ha = 10 000 m² (100 m op 100 m, iets groter dan een voetbalveld).

Eerst dezelfde eenheid

Een plank van 1,2 m op 30 cm? Zet eerst om: 1,2 m = 120 cm. Dan $A = 120\,\text{cm} \times 30\,\text{cm} = 3600\,\text{cm}^2$, of in meter: $1{,}2\,\text{m} \times 0{,}30\,\text{m} = 0{,}36\,\text{m}^2$. Nooit 1,2 × 30 = 36 van 'iets'.



1 dm² = 10 × 10 = 100 cm²

het rode hokje: 1 cm × 1 cm = 1 cm²

Tien rijen van tien hokjes: 1 dm² = 100 cm². Daarom is de trap voor oppervlakte een factor 100 per trede.

UITLEG · 3.8

Volume: kubieke eenheden, liter en milliliter

8/19

Het **volume** V zegt hoeveel ruimte iets inneemt: hoeveel kubusjes van 1 bij 1 bij 1 erin passen. Voor een balk (een doos met rechte hoeken):

VOLUME VAN EEN BALK

$$V = l \cdot b \cdot h$$

l, b en h in dezelfde eenheid; de eenheid van V is die eenheid tot de derde macht: cm³, dm³, m³.

Een kubieke decimeter is een kubus van 10 cm op 10 cm op 10 cm. Daarin passen $10 \times 10 \times 10 = 1000$ kubieke centimeters. Bij volume is elke trede een factor **1000**:

$$1\,\text{m}^3 = 1000\,\text{dm}^3 = 1\,000\,000\,\text{cm}^3$$

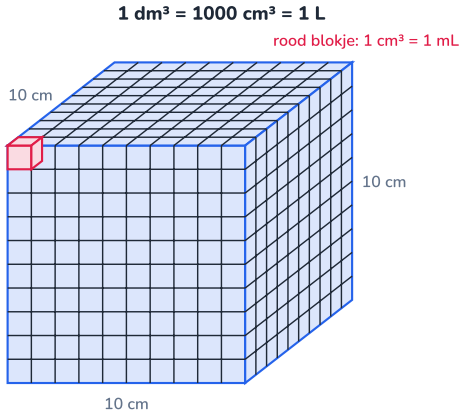
Voor vloeistoffen gebruik je de **liter**. De afspraak die alles verbindt:

$$1\,\text{L} = 1\,\text{dm}^3 \qquad 1\,\text{mL} = 1\,\text{cm}^3 \qquad 1\,\text{m}^3 = 1000\,\text{L}$$

Een brik melk van 1 L past dus precies in een kubus van 10 cm, een lepel siroop van 5 mL is 5 cm³, en een kubieke meter water (een kuip van 1 m op 1 m op 1 m) is 1000 liter.

Welke trap?

Lengte: 10 per trede. Oppervlakte (²): 100 per trede. Volume (³): 1000 per trede. De liter-eenheden (L, dL, cL, mL) volgen weer de gewone trap van 10.



Tien lagen van honderd blokjes: 1 dm³ = 1000 cm³, en dat is precies één liter.

UITGEWERKT VOORBEELD · 3.9

De grondoppervlakte van de meetkas

9/19

Een eerste ontwerp van de meetkas heeft een grondvlak van 1,20 m op 0,60 m. (a) Bereken de grondoppervlakte in m² en in cm². (b) Hoeveel plantenbakjes van 30 cm op 20 cm passen er naast elkaar op de bodem?

GEGEVEN

- $l = 1{,}20\,\text{m}$, $b = 0{,}60\,\text{m}$
- bakje: $30\,\text{cm} \times 20\,\text{cm}$

GEVRAAGD

- A in m² en cm²
- aantal bakjes

OPLOSSING

1. (a) $A = l \cdot b = 1{,}20\,\text{m} \times 0{,}60\,\text{m} = 0{,}72\,\text{m}^2$.

2. Naar cm²: van m² naar cm² zijn twee treden omlaag op de oppervlaktetrap, dus $\times 100 \times 100 = \times 10\,000$: $0{,}72\,\text{m}^2 = 7200\,\text{cm}^2$.

3. Controle langs een andere weg: $120\,\text{cm} \times 60\,\text{cm} = 7200\,\text{cm}^2$. Dezelfde uitkomst.

4. (b) Tel per richting. Leg de bakjes met hun korte kant langs de lengte van de kas: in de lengte passen $120/20 = 6$ bakjes, in de breedte $60/30 = 2$ bakjes. Samen $6 \times 2 = 12$ bakjes: twee rijen van zes. Andersom gelegd ($120/30 = 4$ en $60/20 = 3$) passen er ook 12. De meetkas kiest twee rijen van zes, zodat er boven elke rij één ledstrip kan hangen (hoofdstuk 20).

5. Controle met de oppervlakte: één bakje is $30 \times 20 = 600\,\text{cm}^2$, en $12 \times 600 = 7200\,\text{cm}^2$: de bodem is precies vol.

ANTWOORD

(a) $0{,}72\,\text{m}^2 = 7200\,\text{cm}^2$. (b) 12 bakjes.

Klopt dit? Delen van de totale oppervlakte door de oppervlakte van één bakje geeft het *maximum*. Of dat ook echt past, hangt af van de vorm: tel daarom altijd per richting. Hier klopt het omdat 120 en 60 precies deelbaar zijn door 30 en 20.

UITGEWERKT VOORBEELD · 3.10

Hoeveel water past in het reservoir?

10/19

Het waterreservoir van de meetkas is een bak met binnenmaten 40 cm lang, 30 cm breed en 25 cm hoog. (a) Hoeveel liter past erin? (b) Je vult tot 20 cm hoog. Hoeveel liter is dat? (c) De planten gebruiken samen 1,8 L per dag. Hoeveel volle dagen kan de kas zonder bijvullen?

GEGEVEN

- binnenmaten $40\,\text{cm} \times 30\,\text{cm} \times 25\,\text{cm}$
- waterhoogte $20\,\text{cm}$
- verbruik $1{,}8\,\text{L}$ per dag

GEVRAAGD

- volume van de bak in L
- volume van het water in L
- aantal volle dagen

OPLOSSING

1. (a) $V = l \cdot b \cdot h = 40\,\text{cm} \times 30\,\text{cm} \times 25\,\text{cm} = 30\,000\,\text{cm}^3$.

2. Naar liter: $1\,\text{L} = 1\,\text{dm}^3 = 1000\,\text{cm}^3$, dus $30\,000\,\text{cm}^3 = 30\,\text{dm}^3 = 30\,\text{L}$.

3. (b) Alleen de hoogte verandert: $40 \times 30 \times 20 = 24\,000\,\text{cm}^3 = 24\,\text{L}$.

4. (c) $24\,\text{L}/1{,}8\,\text{L}$ per dag $= 13{,}3$ dagen. Volle dagen: 13.

ANTWOORD

(a) 30 L; (b) 24 L; (c) 13 volle dagen.

Klopt dit? Een emmer bevat ongeveer 10 L: de bak is zo groot als drie emmers, dat klinkt redelijk voor een bak van 40 bij 30 cm. En afronden naar beneden is hier de veilige keuze: op dag 14 is het water op.

UITLEG · 3.11

Meetinstrumenten en hun nauwkeurigheid

Elk instrument heeft een **meetbereik** (van hoe klein tot hoe groot je ermee kan meten) en een **kleinste stap**: het kleinste verschil dat je nog kan aflezen. Op een lat met millimeterstreepjes is dat 1 mm, op een digitale thermometer die 21,4 °C toont 0,1 °C. Die kleinste stap bepaalt de **nauwkeurigheid van het instrument**: hoe fijn je ermee kan meten.

instrument	grootheid	meetbereik (typisch)	kleinste stap (typisch)	let op
lat, meetlat	lengte	30 cm tot 1 m	1 mm	meet vanaf het nulstreepje, niet vanaf de rand van de lat
rolmeter	lengte	3 tot 5 m	1 mm	lint strak en recht; het haakje schuift bewust een klein beetje, om zijn eigen dikte te compenseren
schuifmaat	lengte, dikte, diameter, diepte	0 tot 150 mm	0,1 mm of 0,05 mm (digitaal 0,01 mm)	niet knijpen; bekken recht op het voorwerp
keukenweegschaal	massa	tot enkele kg	1 g	eerst op nul zetten (tarreren)
labobalans	massa	tot enkele honderden g	0,1 g of 0,01 g	geen tocht, niet tegen de tafel leunen
maatcilinder	volume van een vloeistof	10 mL tot 1 L	1 mL (bij een cilinder van 100 mL)	op ooghoogte, onderkant van de meniscus
thermometer	temperatuur	−10 tot 110 °C	1 °C (digitaal 0,1 °C)	wachten tot de waarde niet meer verandert
stopwatch (chronometer)	tijd	tot enkele uren	0,01 s op het scherm	je reactietijd is ongeveer 0,2 s

Kies het instrument dat bij je meting past. Wil je 5 mL afmeten, neem dan een maatcilinder van 10 mL en niet een van 250 mL: bij die grote zijn de streepjes 2 mL uit elkaar en is 5 mL amper af te lezen. Voor de dikte van een munt is een lat te grof; neem een schuifmaat.

Vóór je meet: controleer het nulpunt. Een weegschaal met een leeg bakje erop zet je op nul (*tarreren*), zodat je alleen de inhoud weegt. Een schuifmaat met gesloten bekken moet 0,0 mm aanwijzen.

Meer cijfers is niet altijd juister

Een stopwatch toont 12,47 s: twee cijfers na de komma. Maar jij drukt de knop in met een reactietijd van ongeveer 0,2 s, en dat is niet elke keer even lang. Het laatste cijfer betekent dus weinig. Ook een digitale thermometer kan een tiende van een graad tonen en toch een hele graad naast de werkelijke temperatuur zitten. Hoe je dat nagaat, leer je in Intermediate (meetfouten).

Thermometers

Vroeger zat er kwik in thermometers. Omdat kwik giftig is, gebruik je nu thermometers met gekleurde alcohol of digitale. Laat een glazen thermometer nooit rollen en hou hem niet in een vlam.



Zes instrumenten, zes grootheden: lengte, lengte tot op 0,1 mm, massa, volume, temperatuur en tijd.

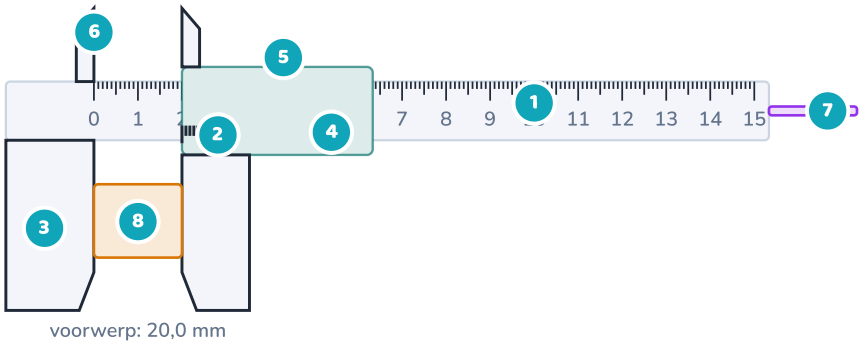
ONTLEED · 3.12

De schuifmaat

12/19

Met een **schuifmaat** (ook *schuifpasser* genoemd) meet je lengtes, diktes en diameters tot op 0,1 mm of zelfs 0,05 mm, tien of twintig keer fijner dan met een lat. Zo gebruik je hem:

1. Sluit de bekken en controleer dat de nul van de nonius precies bij de nul van de hoofdschaal staat.
2. Klem het voorwerp tussen de bekken, recht en zonder te knijpen.
3. Draai de klemschroef aan, neem de schuifmaat weg en lees af (volgend blad).



De bekken staan 20,0 mm open. De nonius op de schuif schuift mee langs de hoofdschaal.

1. **Hoofdschaal**
   Een liniaal in millimeter op de vaste staaf. De cijfers staan meestal in centimeter: 1, 2, 3 … betekent 10, 20, 30 mm.

2. **Nonius**
   Een kleine schaal op de schuif: 10 streepjes over 9 mm (soms 20 streepjes over 39 mm). Hiermee lees je de tienden van een millimeter af.

3. **Vaste bek**
   Zit vast aan de hoofdschaal. Het voorwerp rust tegen zijn binnenkant, het meetvlak.

4. **Schuif met beweegbare bek**
   Schuift langs de hoofdschaal. De afstand tussen de twee meetvlakken is wat je afleest.

5. **Klemschroef**
   Zet de schuif vast, zodat de meting niet verschuift als je de schuifmaat wegneemt om af te lezen.

6. **Binnenbekken**
   Voor binnenmaten: steek ze in een gat of een buis en schuif ze uit elkaar tot ze de wand raken.

7. **Dieptestaaf**
   Komt achteraan uit de staaf als je de schuif opent. Zet het uiteinde van de staaf op de rand van een gat en schuif tot de staaf de bodem raakt: zo meet je een diepte.

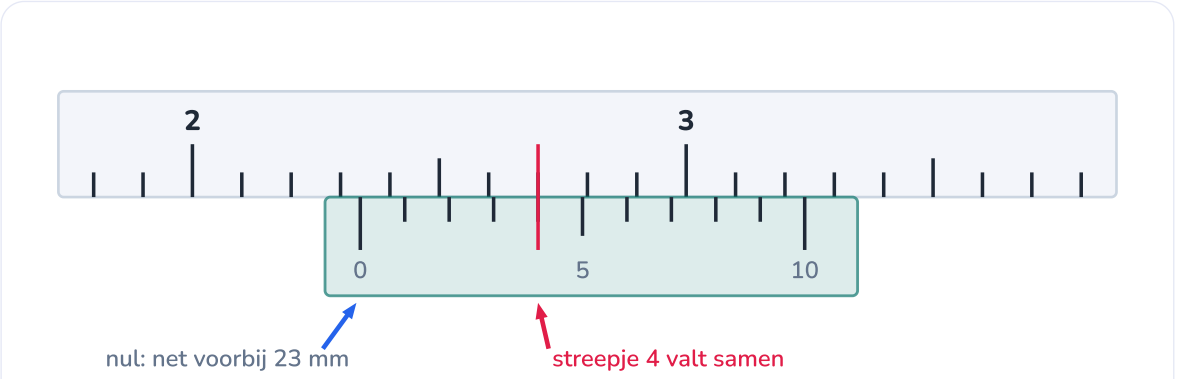
8. **Voorwerp tussen de meetvlakken**
   Hou het voorwerp recht: schuin gemeten lees je een te grote waarde af. Meet een munt op een paar plaatsen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 3.13

Een schuifmaat aflezen

13/19

Welke lengte wijst deze schuifmaat aan? De figuur toont de schalen sterk vergroot.



De nul van de nonius staat net voorbij 23 mm; streepje 4 van de nonius valt samen met een streepje van de hoofdschaal: 23,4 mm.

GEGEVEN

- hoofdschaal in mm (de 2 en de 3 betekenen 20 en 30 mm)
- nonius met 10 streepjes over 9 mm

GEVRAAGD

- de lengte tot op 0,1 mm

OPLOSSING

1. **Hele millimeters.** Zoek de **nul van de nonius**. Kijk welk streepje van de hoofdschaal er net links van staat: 23 mm (drie streepjes na de 2). De nul staat iets verder: de lengte is 23 mm en nog een stukje.

2. **Tienden.** Zoek het streepje van de nonius dat **precies samenvalt** met een streepje van de hoofdschaal. Hier is dat streepje 4 (het valt samen met 27 mm). Dat betekent 0,4 mm.

3. **Samen.** 23 mm + 0,4 mm = 23,4 mm.

4. **Waarom werkt dit?** De nonius heeft 10 streepjes over 9 mm: elk nonius-deel is 0,9 mm, 0,1 mm korter dan een millimeter. Staat de nul 0,4 mm voorbij 23 mm, dan haalt elk volgend nonius-streepje 0,1 mm in, en na 4 streepjes vallen ze samen: $23{,}4 + 4 \times 0{,}9 = 27{,}0$ mm.

ANTWOORD

$l = 23{,}4\,\text{mm}.$

Klopt dit? De nul van de nonius staat duidelijk tussen 23 en 24 mm, iets voor het midden: 23,4 mm past daarbij. Op een schuifmaat met 20 nonius-streepjes lees je op dezelfde manier af, maar telt elk streepje 0,05 mm.

UITLEG · 3.14

Aflezen zonder fouten: parallax en meniscus

14/19

Kijk je schuin naar een schaal, dan lees je een verkeerde waarde af. Die fout heet **parallax**. Je kent het effect: vanop de passagiersstoel lijkt de snelheidsmeter van een auto met een naald iets anders aan te wijzen dan voor de bestuurder.

Bij een **maatcilinder** komt er nog iets bij. Water 'kruipt' een beetje langs het glas omhoog, waardoor het oppervlak hol gebogen is: de **meniscus**. Afspraak: je leest de **onderkant** van de meniscus af.

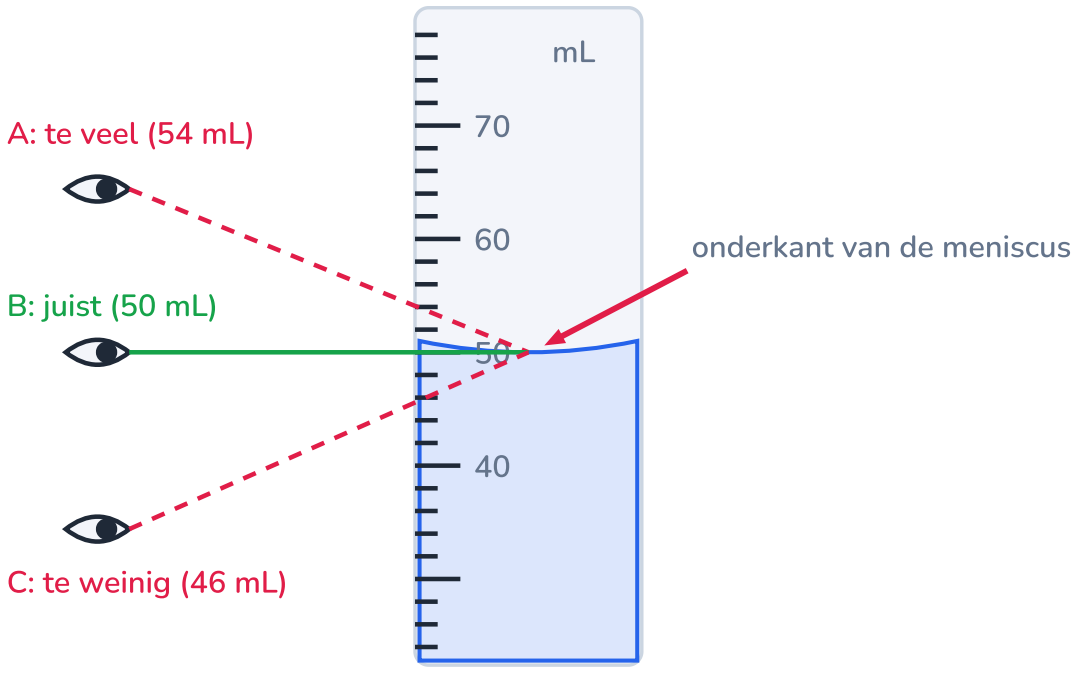
Zo lees je correct af:

- zet de maatcilinder op een vlakke tafel (niet in je hand);
- breng je oog **op dezelfde hoogte** als het vloeistofoppervlak;
- lees de onderkant van de meniscus af, tot op het kleinste streepje.

Kijk je van boven (oog A), dan lees je te veel af; van onder (oog C) te weinig. Hetzelfde geldt voor een thermometer, een lat die niet plat op het voorwerp ligt, of een meter met een wijzer. Sommige meters met een wijzer hebben daarom een spiegelstrookje achter de naald: zie je de naald en haar spiegelbeeld samenvallen, dan kijk je recht.

Thermometer aflezen

Laat het reservoir van de thermometer (het bolletje onderaan) volledig in de vloeistof en zonder de bodem of de wand te raken. Wacht tot het vloeistofdraadje niet meer beweegt, en lees af op ooghoogte, terwijl de thermometer nog in de vloeistof zit.



Alleen oog B, op de hoogte van de vloeistof, leest de juiste waarde: 50 mL.

PROEF · 3.15

Hoe dik is één blad papier?

15/19

ONDERZOEKSVRAAG

Hoe meet je iets dat dunner is dan de kleinste stap van je instrument, zoals één blad papier?

MATERIAAL

- pak printpapier (80 g/m², 500 vel)
- lat van 30 cm met millimeterverdeling
- schuifmaat



Te dun voor een lat? Meet er 250 samen en deel door 250.

WERKWIJZE

1. Probeer de dikte van één blad te meten met de lat. Noteer wat je ziet.
2. Tel 250 bladen af (een half pak). Leg ze als een nette stapel op tafel en druk ze licht samen.
3. Meet de dikte van de stapel met de lat, op ooghoogte, tot op 1 mm.
4. Meet de dikte van dezelfde stapel met de schuifmaat, zonder te knijpen, tot op 0,1 mm.
5. Deel elke meting door 250.

WAARNEMING

Eén blad kan je met de lat niet meten: het is veel dunner dan 1 mm. Voor de stapel van 250 bladen meet een groep:

instrument	dikte van 250 bladen	dikte van 1 blad
lat	26 mm	26 mm / 250 = 0,104 mm
schuifmaat	25,8 mm	25,8 mm / 250 = 0,1032 mm

VERKLARING

Eén blad printpapier van 80 g/m² is ongeveer **0,10 mm** dik. Door veel bladen samen te meten, wordt de afleesfout mee gedeeld: zit je met de lat 1 mm naast de juiste dikte van de stapel, dan is dat per blad maar $1/250 = 0{,}004\,\text{mm}$.

Dezelfde truc, **veel meten en delen**, gebruik je voor de massa van een rijstkorrel (weeg er 100), het volume van een druppel (tel er 20 in een maatcilinder), of de tijd van één schommeling van een slinger (meet er 10). Opgelet: druk je de stapel verschillend samen, dan verandert de dikte. Meet dus altijd op dezelfde manier.

UITLEG · 3.16

Zinvol afronden

16/19

Een meting is nooit perfect. Hoe precies ze is, toon je met het aantal cijfers dat je opschrijft. Daarom geldt:

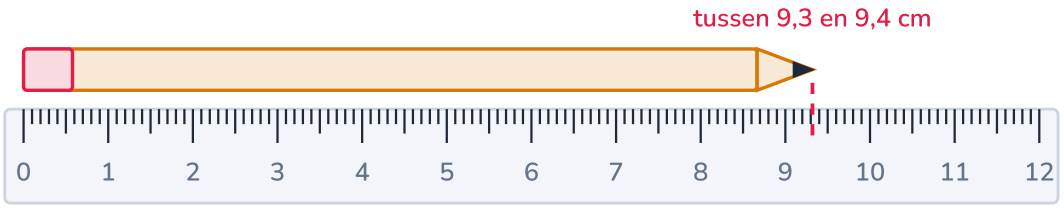
1. **Noteer een meting tot op de kleinste stap van het instrument.** Het potlood in de figuur eindigt tussen 9,3 en 9,4 cm, het dichtst bij 9,3: met deze lat noteer je 9,3 cm (93 mm). Een liniaal kan geen 9,32 cm aflezen.
2. **Nullen achteraan tellen.** 1,20 m betekent: gemeten tot op de centimeter. 1,2 m betekent: tot op de decimeter. Laat een gemeten nul dus niet weg.
3. **Een berekend resultaat krijgt niet meer cijfers dan je metingen.** Een rekenmachine geeft acht cijfers, maar die zijn niet allemaal betekenisvol. Tel de cijfers van je metingen (vanaf het eerste cijfer dat geen nul is) en geef je uitkomst met ongeveer evenveel cijfers als de meting met de minste cijfers.

Afronden doe je zo: kijk naar het eerste cijfer dat je weglaat. Is dat 0, 1, 2, 3 of 4, dan blijft het laatste cijfer dat je houdt gelijk. Is het 5, 6, 7, 8 of 9, dan verhoog je het met één.

getal	afronden op	resultaat	waarom
2,346	2 decimalen	2,35	het weggelaten cijfer is 6
2,344	2 decimalen	2,34	het weggelaten cijfer is 4
7,95	1 decimaal	8,0	9 + 1 geeft 10: de nul blijft staan
13,333…	geheel getal	13	het weggelaten cijfer is 3

⚠ **Rond pas op het einde af**

Reken met de volledige tussenresultaten en rond alleen het eindresultaat af. Wie tussendoor afrondt, stapelt kleine fouten op.



Het potlood eindigt tussen 9,3 en 9,4 cm. Met een millimeterlat noteer je 9,3 cm: meer cijfers kan je niet betrouwbaar aflezen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 3.17

Afronden na een berekening

17/19

(a) Je meet een plankje met een lat: 23,4 cm op 11,8 cm. De rekenmachine geeft voor de oppervlakte 276,12. Wat noteer je? (b) Een touw van 2,50 m wordt in drie gelijke stukken geknipt. Hoe lang is elk stuk?

GEGEVEN

- (a) $l = 23{,}4\,\text{cm}$, $b = 11{,}8\,\text{cm}$ (tot op 1 mm gemeten)
- (b) $l = 2{,}50\,\text{m}$, 3 stukken

GEVRAAGD

- een zinvol afgerond resultaat, met eenheid

OPLOSSING

1. (a) $A = 23{,}4\,\text{cm} \times 11{,}8\,\text{cm} = 276{,}12\,\text{cm}^2$ (volgens de rekenmachine).
2. Beide metingen hebben drie cijfers. Geef de uitkomst dus met drie cijfers: $276\,\text{cm}^2$. Het weggelaten cijfer is een 1: niet naar boven afronden.

3 Waarom niet 276,12? Was de lengte 23,5 in plaats van 23,4 cm (een verschil van 1 mm, wat met een lat makkelijk kan), dan was de oppervlakte 277,3 cm². De cijfers na de komma zeggen dus niets.

4 (b) $2{,}50\,\text{m}/3 = 0{,}8333\ldots\,\text{m}$. De meting 2,50 heeft drie cijfers: $0{,}833\,\text{m}$, of handiger in centimeter: $83{,}3\,\text{cm}$.

ANTWOORD

(a) $A \approx 276\,\text{cm}^2$; (b) elk stuk is $83{,}3\,\text{cm}$ lang.

Klopt dit? Tel de cijfers: 23,4 en 11,8 hebben er drie, 276 ook. 2,50 heeft er drie, 83,3 ook. De nul in 2,50 telt mee: ze betekent dat het touw tot op de centimeter gemeten is.

NASLAG · 3.18

Overzicht: eenheden, omzetten en afronden

18/19

oppervlakte van een rechthoek

$$A = l \cdot b$$

symbool	betekenis	eenheid
A	oppervlakte	m², cm² …
l	lengte	m, cm …
b	breedte	m, cm …

volume van een balk

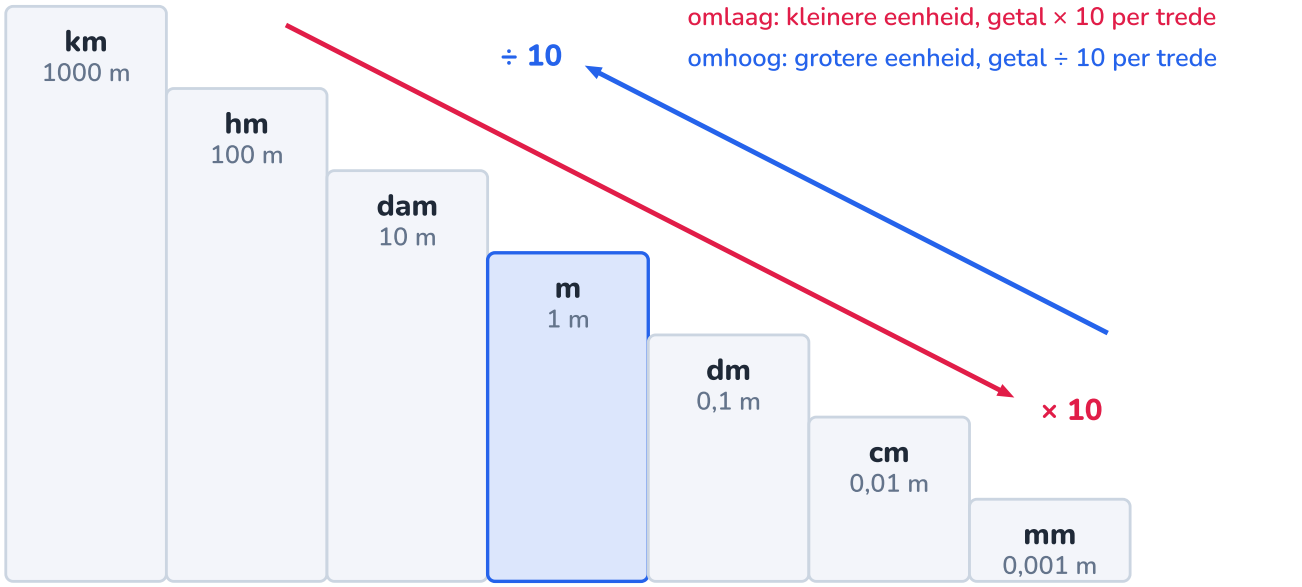
$$V = l \cdot b \cdot h$$

symbool	betekenis	eenheid
V	volume	m³, cm³, L …
l, b, h	lengte, breedte, hoogte	m, cm …

grootheid	trap	omzettingen
lengte	× 10 per trede	1 km = 1000 m; 1 m = 10 dm = 100 cm = 1000 mm
massa	× 10 per trede	1 t = 1000 kg; 1 kg = 1000 g; 1 g = 1000 mg
inhoud (liter)	× 10 per trede	1 L = 10 dL = 100 cL = 1000 mL; 1 hL = 100 L
oppervlakte	× 100 per trede	1 m² = 100 dm² = 10 000 cm²; 1 cm² = 100 mm²; 1 a = 100 m²; 1 ha = 10 000 m²
volume	× 1000 per trede	1 m³ = 1000 dm³; 1 dm³ = 1000 cm³; 1 cm³ = 1000 mm³
volume en inhoud		1 L = 1 dm³; 1 mL = 1 cm³; 1 m³ = 1000 L
tijd	niet tiendelig	1 min = 60 s; 1 h = 60 min = 3600 s; 1 d = 24 h = 86 400 s
temperatuur		in het dagelijks leven °C; de SI-eenheid kelvin (K) volgt in hoofdstuk 16

voorvoegsel	M	k	h	da	d	c	m	µ
factor	1 000 000	1000	100	10	0,1	0,01	0,001	0,000 001

regel	voorbeeld
altijd een eenheid bij een getal, met een spatie ertussen	1,20 m; 18,5 °C
meting tot op de kleinste stap van het instrument	lat: 9,3 cm; schuifmaat: 23,4 mm
gemeten nullen achteraan blijven staan	1,20 m is niet hetzelfde als 1,2 m
uitkomst met ongeveer evenveel cijfers als de minst precieze meting	23,4 cm × 11,8 cm ≈ 276 cm²
afronden: weggelaten cijfer 5 of meer, dan naar boven	2,346 → 2,35; 2,344 → 2,34
op ooghoogte aflezen; bij water de onderkant van de meniscus	maatcilinder, thermometer



De eenhedentrap voor lengte. Voor oppervlakte wordt elke trede × 100, voor volume × 1000.

HET GEHEEL · 3.19

Waar meten naartoe leidt

19/19

Meten is de basis van de hele leerlijn **Onderzoeken en meten**: elke proef in StemExpert begint met een goed genoteerde meting. Eenheden omzetten kom je overal tegen: milliampère en kilo-ohm in elektriciteit, km/h en m/s bij snelheid, kilowattuur op de energiefactuur. In Intermediate leer je hoe zeker een meting is (waarde ± fout, beduidende cijfers) en hoe je een sensor ijkt; in Expert reken je met meetonzekerheid en statistiek.

F2 Onderzoeken: van vraag tot besluit

Herhalen en het gemiddelde nemen: een meting wordt pas betrouwbaar als je ze herhaalt.

F4 Tabellen, grafieken en verbanden

Metingen in een tabel met grootheid en eenheid in de kop, en in een grafiek.

F7 Massa, volume en dichtheid

Massa en volume meten (ook door onderdompelen) en de dichtheid in g/cm³ en kg/m³.

F14 Beweging en snelheid

Snelheid als afgeleide eenheid, en omzetten tussen km/h en m/s.

F16 Warmte en temperatuur

De kelvin, de SI-eenheid van temperatuur, naast de graad Celsius.

F19 Spanning, stroom en weerstand

Voorvoegsels in de elektronica: mA, kΩ, MΩ, en een multimeter met meetbereiken.

F31 Technisch tekenen

Maten en schaal op een werktekening.

I1 Meetfouten en nauwkeurigheid

Nauwkeurig tegenover precies, absolute en relatieve fout, beduidende cijfers.

I22 De spanningsdeler en sensoren

Een sensor ijken met een referentie: de ijkproef van opdracht 3.15 op een hoger niveau.

Habitat

De meetkas krijgt haar eerste maten: grondvlak, wanden en het volume van het waterreservoir. In opdracht 3.14 kies je een reservoir dat groot genoeg is voor twee weken en dat onder de plantentafel past. Noteer de maten in je portfolio: in hoofdstuk 30 (programma van eisen) en 31 (werktekening) bouw je erop verder.

SAMENVATTING

In het kort

- Een meetresultaat is grootheid = getal + eenheid, bv. $l = 1{,}20\,\mathrm{m}$. Zonder eenheid betekent een getal niets.
- Het SI heeft zeven basisgrootheden: lengte (m), massa (kg), tijd (s), stroomsterkte (A), temperatuur (K), hoeveelheid stof (mol), lichtsterkte (cd).
- Voorvoegsels vermenigvuldigen met een macht van 10: M = 1 000 000, k = 1000, c = 0,01, m = 0,001, µ = 0,000 001.
- Eenheidentrap: omlaag vermenigvuldigen, omhoog delen; per trede 10 (lengte, massa, liter), 100 (oppervlakte) of 1000 (volume). Tijd gaat met 60 en 24.
- $A = l \cdot b$ en $V = l \cdot b \cdot h$; 1 L = 1 dm³, 1 mL = 1 cm³, 1 m³ = 1000 L.
- Kies een instrument waarvan de kleinste stap past bij de meting; controleer het nulpunt; lees af op ooghoogte, bij water de onderkant van de meniscus.
- Noteer een meting tot op de kleinste stap; geef een berekend resultaat met ongeveer evenveel cijfers als je metingen, en rond pas op het einde af.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

grootheid
Een eigenschap die je kan meten, zoals lengte, massa, tijd of temperatuur; ze heeft een symbool, bv. l voor lengte.

eenheid
De afgesproken maat waarmee je een grootheid vergelijkt, zoals de meter of de seconde.

meetresultaat
Een getal met een eenheid, bv. $l = 1{,}20\,\mathrm{m}$: 1,20 keer de eenheid meter.

SI
Het Internationale Stelsel van Eenheden, met zeven basisgrootheden en hun basiseenheden (meter, kilogram, seconde, ampère, kelvin, mol, candela).

voorvoegsel
Een woordje voor een eenheid dat ze met een macht van tien vermenigvuldigt, zoals kilo (× 1000) of milli (× 0,001).

eenhedentrap
Een schema om eenheden om te zetten: per trede omlaag vermenigvuldig je, per trede omhoog deel je (lengte: 10, oppervlakte: 100, volume: 1000).

oppervlakte
Hoe groot een vlak is; eenheid m² (en cm², mm² …). Voor een rechthoek: lengte × breedte.

volume
Hoeveel ruimte iets inneemt; eenheid m³ (en dm³, cm³, L, mL). Voor een balk: lengte × breedte × hoogte.

liter
Een eenheid van volume: 1 L = 1 dm³; 1 mL = 1 cm³.

nonius
Een hulpschaal op de schuif van een schuifmaat waarmee je tienden (of twintigsten) van een millimeter afleest.

meniscus
Het gebogen oppervlak van een vloeistof in een smalle buis; bij water lees je de onderkant af.

parallax
Een afleesfout doordat je schuin op een schaal kijkt; je voorkomt ze door loodrecht en op ooghoogte te kijken.

nauwkeurigheid van een instrument
Hoe fijn je met een instrument kan meten: de kleinste stap die je betrouwbaar kan aflezen.

afronden
Een getal inkorten tot een zinvol aantal cijfers: is het eerste weggelaten cijfer 5 of meer, dan rond je naar boven af.

F FUNDAMENTAL · DEEL F1 · DENKEN EN WERKEN ALS STEM'ER

HANDBOEK · HOOFDSTUK 4

Tabellen, grafieken en verbanden

Van een rij getallen naar een beeld dat een verband toont, en weten hoe ver je dat beeld mag vertrouwen

Meten levert getallen op. Pas als je ze ordent in een **tabel** en tekent in een **grafiek**, zie je wat ze vertellen: stijgt iets, daalt het, verdubbelt het samen met iets anders? In dit hoofdstuk leer je een tabel en een grafiek maken volgens de afspraken, een **recht evenredig verband** herkennen en zijn **evenredigheidsconstante** bepalen, aflezen tussen je metingen (**interpoleren**) en voorbij je metingen (**extrapoleren**, met de nodige voorzichtigheid), en voor elke soort data de juiste grafiek kiezen.

6× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 2× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

W Wiskundig modelleren · O Onderzoeken en meten · A Data en AI



Een dag metingen uit de meetkas wordt één lijn op millimeterpapier.

Na dit hoofdstuk

- Je kan meetresultaten ordenen in een tabel met grootheid en eenheid in de kop.
- Je kan kiezen welke grootheid op de horizontale en welke op de verticale as komt.
- Je kan een handige schaal kiezen en een grafiek tekenen met assen, punten en een trendlijn.
- Je kan een recht evenredig verband herkennen in een tabel (vaste verhouding) en in een grafiek (rechte door de oorsprong).
- Je kan de evenredigheidsconstante berekenen, met eenheid, en ermee rekenen.
- Je kan interpoleren en extrapoleren, en uitleggen wanneer extrapoleren gevaarlijk is.
- Je kan voor een reeks data kiezen tussen een lijngrafiek, staafdiagram, cirkeldiagram en spreidingsdiagram, en een cirkeldiagram tekenen.
- Je kan een misleidende grafiek herkennen, onder meer een staafdiagram waarvan de as niet bij nul begint.

VERHAAL · 4.1

Een Schot, een verpleegster en de uitvinding van de grafiek

1/16

Grafieken lijken zo gewoon dat je zou denken dat ze altijd hebben bestaan. Toch is de lijngrafiek nauwelijks tweehonderdveertig jaar oud. In 1786 gaf de Schotse ingenieur en econoom **William Playfair** in Londen een boek uit over de handel van Engeland, *The Commercial and Political Atlas*. In

plaats van lange tabellen met getallen tekende hij de in- en uitvoer van jaar tot jaar als **lijnen**, en voor de handel van Schotland met andere landen in één jaar gebruikte hij **staven**. In 1801 voegde hij er in een volgend boek nog een vorm aan toe: de cirkel die in sectoren verdeeld is, het **cirkeldiagram**. Zijn argument: het oog ziet in één blik een patroon dat in een tabel verborgen blijft.

Ruim zeventig jaar later bewees de Britse verpleegster **Florence Nightingale** hoe krachtig dat is. Tijdens de Krimoorlog (1853-1856) verzorgde ze gewonde soldaten in een legerhospitaal bij Istanbul. Ze hield nauwkeurig bij waaraan de soldaten stierven. Haar cijfers toonden iets ontstellends: veel meer soldaten stierven aan **infectieziekten**, die met hygiëne, schoon water en verluchting te voorkomen waren, dan aan hun **verwondingen**. Omdat ze wist dat politici geen tabellen lezen, tekende ze die cijfers in 1858 als een rond diagram met één sector per maand, waarin de oppervlakte van elke gekleurde sector toonde hoeveel soldaten er die maand stierven, en waaraan. In één oogopslag zag je waar de doden vandaan kwamen. Haar grafieken hielpen om leger en regering te overtuigen de hygiëne in legerhospitalen en kazernes grondig te verbeteren. In datzelfde jaar werd Nightingale als eerste vrouw lid van de Statistical Society in Londen.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Een goede grafiek maakt een patroon zichtbaar dat in een rij getallen verborgen zit, en overtuigt waar een tabel niet gelezen wordt. Een slechte grafiek verbergt het patroon, of erger: toont een patroon dat er niet is. In dit hoofdstuk leer je beide herkennen.



Lijnen, staven en sectoren: uitgevonden om getallen te laten spreken.

Een goede tabel

Wie meet, noteert eerst in een **tabel**. Een leerling test het waterpompje van de meetkas: het pompt water door een dun slangetje in een maatbeker, en elke 5 seconden leest hij af hoeveel water erin zit. Zijn eerste notities zien er zo uit:

Tijd	Water
10 s	79 mL
0	0
5	41
20	0,16 L
15	121
30	241 mL
25	198,0

Alles staat erin, maar het is een puzzel: waar staan de eenheden, is 0,16 L meer of minder dan 121, en in welke volgorde is er gemeten? Dezelfde metingen in een **goede tabel** (figuur) lees je in één oogopslag. De afspraken:

1. **Eén kolom per grootheid.** Bij weinig metingen mag het ook in rijen (een liggende tabel).
2. **In de kop: grootheid en eenheid**, de eenheid tussen haakjes: t (s), V (mL). In de cellen staan dan alleen getallen.
3. **Eén eenheid per kolom.** Heb je 0,16 L genoteerd tussen milliliters, zet dan om: 160 mL (hoofdstuk 3).
4. **De grootheid die je zelf kiest**, de onafhankelijke variabele (hoofdstuk 2), komt in de eerste kolom, van klein naar groot. De grootheid die je meet, volgt erna.
5. **Zoveel cijfers als je instrument toont**, per kolom liefst op dezelfde manier: niet eens 198,0 en dan weer 121.
6. **Een titel**: wat is er gemeten, en waar.

Maak de tabel vóór je meet

Teken de lege tabel met de kop al ingevuld voor je aan de proef begint. Zo weet je welke eenheid je noteert, en vergeet je geen meting. Heb je een meting fout genoteerd, streep ze dan door in plaats van ze uit te gommen: wie later je notities leest, ziet wat er gebeurd is.

Tabel 1 · Water uit het pompje van de meetkas

t (s)	V (mL)
0	0
5	41
10	79
15	121
20	160
25	198
30	241

Kop
grootheid met de eenheid tussen haakjes

Eerste kolom
wat je zelf kiest, van klein naar groot

Cellen
alleen getallen, één eenheid per kolom

Cijfers
zoveel als het instrument toont

Dezelfde zeven metingen, nu volgens de afspraken: je ziet meteen dat het volume gelijkmatig stijgt.

UITLEG · 4.3

Van tabel naar grafiek in vijf stappen

3/16

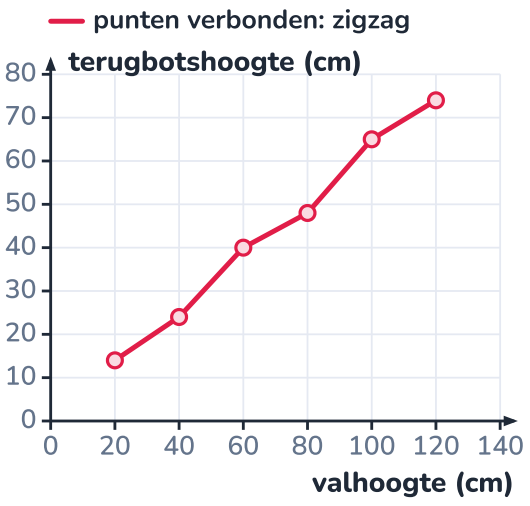
Een tabel toont de getallen, een **grafiek** toont het verband. Zo teken je er een op millimeterpapier:

1. **Kies de assen.** De grootheid die je zelf kiest (onafhankelijke variabele) komt op de **horizontale as**, de grootheid die je meet (afhankelijke variabele) op de **verticale as**. Bij metingen in de tijd staat de tijd dus bijna altijd horizontaal.
2. **Zet bij elke as de grootheid en de eenheid**, net als in de kop van de tabel: t (s) en V (mL).
3. **Kies een schaal.** De stappen zijn overal even groot, en het zijn handige stappen: 1, 2 of 5 (of 10, 20, 50, en eventueel 2,5 of 25) per centimeter. De grafiek vult het grootste deel van het papier. Begin bij nul, tenzij je een goede reden hebt (zie het blad over misleidende grafieken).
4. **Zet de punten**, met een potlood, als een klein kruisje of een stip precies op de juiste plaats.
5. **Teken een trendlijn.** Meetpunten van een proef liggen nooit perfect op een lijn: elke meting heeft een kleine fout. Teken daarom een vloeiende lijn, vaak een rechte, die het verloop zo goed mogelijk volgt, met ongeveer evenveel punten erboven als eronder. Verbind de punten niet met een zigzag: die knikken zijn meetfouten, geen deel van het verband.

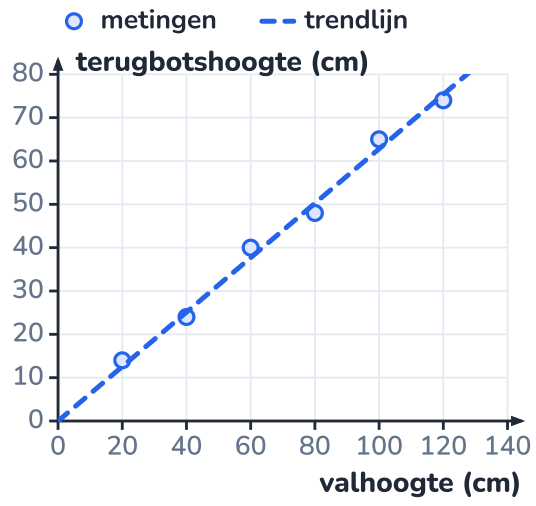
Er is één uitzondering op stap 5. Volg je iets **in de tijd** en telt elke meting (de temperatuur in de kas, elk uur), dan mag je de punten met rechte stukjes verbinden. Zo'n **lijngrafiek** toont het verloop, zonder te beweren dat er één eenvoudig verband achter zit.

Door de oorsprong of niet?

Laat de trendlijn door de oorsprong (0, 0) gaan als je weet dat ze erdoor moet: een bal die je van 0 cm laat vallen, botst 0 cm op. Weet je dat niet, dan trek je de lijn gewoon door de punten en kijk je waar ze uitkomt. Ook dat is informatie.



Fout: een bal botst op, en de knikken in de zigzag zijn alleen meetfouten.



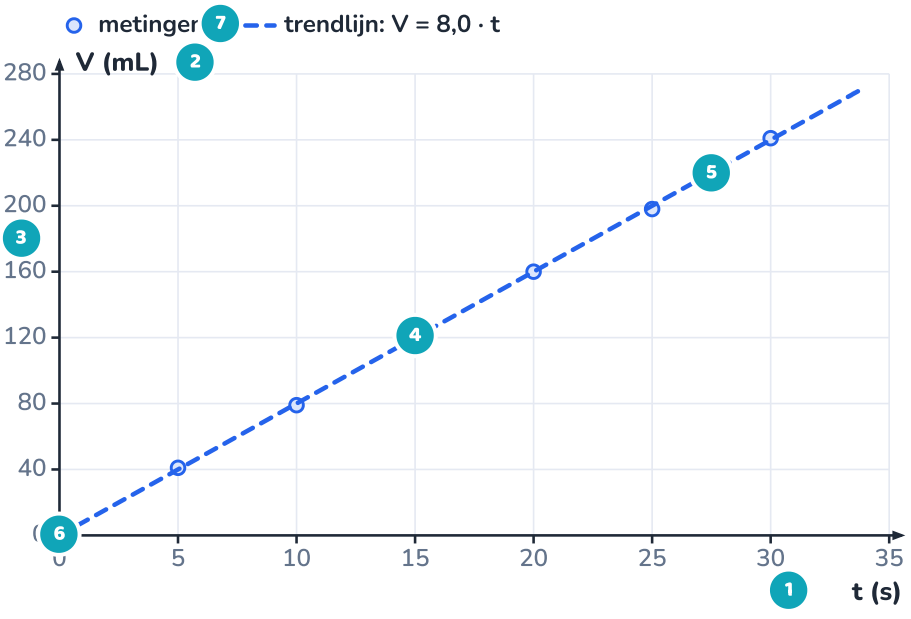
Goed: één rechte tussen de punten toont het verband. Terugbotshoogte ≈ 0,63 × valhoogte.

ONTLEED · 4.4

De onderdelen van een grafiek

4/16

Dit is de grafiek van de pompmetingen uit de tabel. Elk onderdeel heeft een taak: haal er één weg en de grafiek wordt onleesbaar of zelfs misleidend.



Het volume water uit het pompje tegenover de tijd: zeven metingen en één trendlijn.

1 Horizontale as
De grootheid die je zelf kiest (hier de tijd t), met haar eenheid tussen haakjes. Ook de x-as genoemd.

2 Verticale as
De grootheid die je meet (hier het volume V), met haar eenheid. Ook de y-as genoemd.

3 Schaalverdeling
Getallen op gelijke afstanden en in gelijke stappen: 0, 40, 80, 120 … Ontbreken ze, dan zegt de grafiek niets over hoeveel.

4 Meetpunt
Eén rij uit de tabel: na 15 s zat er 121 mL in de maatbeker. Zoek het getal op elke as en ga recht omhoog en recht opzij.

5 Trendlijn
Een rechte die het verloop volgt, niet door elk punt, maar er zo dicht mogelijk langs. Ze toont het verband, zonder de kleine meetfouten.

6 Oorsprong
Het punt (0, 0). Na 0 s is er nog 0 mL gepompt: de trendlijn gaat hier door.

7 **Legenda**
Zegt wat elk teken betekent. Onmisbaar als er meer dan één reeks in de grafiek staat.

UITGEWERKT VOORBEELD · 4.5

Een schaal kiezen

5/16

Je tekent de pompmetingen op millimeterpapier. Je hebt 16 cm plaats in de breedte en 14 cm in de hoogte. De tijd loopt van 0 tot 30 s, het volume van 0 tot 241 mL. Welke schaal kies je voor elke as?

GEGEVEN

- t: van 0 tot 30 s; 16 cm breed
- V: van 0 tot 241 mL; 14 cm hoog

GEVRAAGD

- een handige schaal voor de horizontale en de verticale as

OPLOSSING

1 **Horizontale as.** Deel de grootste waarde door de beschikbare lengte: $30\,\text{s}/16\,\text{cm} \approx 1{,}9$ s per cm. Rond naar **boven** af naar een handige stap: **2 s per cm**. Dan komt 30 s op $30/2 = 15$ cm: dat past.

2 **Verticale as.** $241\,\text{mL}/14\,\text{cm} \approx 17{,}2$ mL per cm. De eerste handige stap erboven is **20 mL per cm**. Dan komt 241 mL op $241/20 = 12{,}05$ cm: dat past ook.

3 **Waarom naar boven afronden?** Met 10 mL per cm zou 241 mL op 24,1 cm komen: van het papier af. Naar boven afronden maakt de grafiek iets kleiner, maar ze past altijd.

4 **Waarom een handige stap?** Met 17,2 mL per cm moet je voor elk punt rekenen: 121 mL ligt dan op 7,03 cm. Met 20 mL per cm ligt 121 mL op $121/20 = 6{,}05$ cm, dus 60,5 mm: dat vind je meteen. Vergelijk de mogelijkheden:

SCHAAL (VERTICALE AS)	241 ML KOMT OP	OORDEEL
10 mL per cm	24,1 cm	past niet op 14 cm
17,2 mL per cm	14,0 cm	past net, maar geen enkel punt is vlot te zetten
20 mL per cm	**12,05 cm**	**goed: handige stap, grafiek vult het blad**
50 mL per cm	4,8 cm	te klein: de punten liggen op een hoopje

5 **Getallen bij de as.** Zet niet bij elke centimeter een getal, maar bijvoorbeeld om de 5 cm op de horizontale as (0, 10, 20, 30 s) en om de 2 cm op de verticale as (0, 40, 80 … 280 mL).

ANTWOORD

Horizontaal 2 s per cm (30 s op 15 cm), verticaal 20 mL per cm (241 mL op 12,05 cm).

Klopt dit? De grafiek gebruikt 15 van de 16 cm en 12 van de 14 cm: ruim meer dan de helft in beide richtingen. Een grafiek die maar een hoekje van het blad vult, is even onnauwkeurig als een meting met een te grove lat.

PROEF · 4.6

Omtrek en diameter: een verborgen constante

6/16

ONDERZOEKSVRAAG

Hoe hangt de omtrek van een rond voorwerp af van zijn diameter?

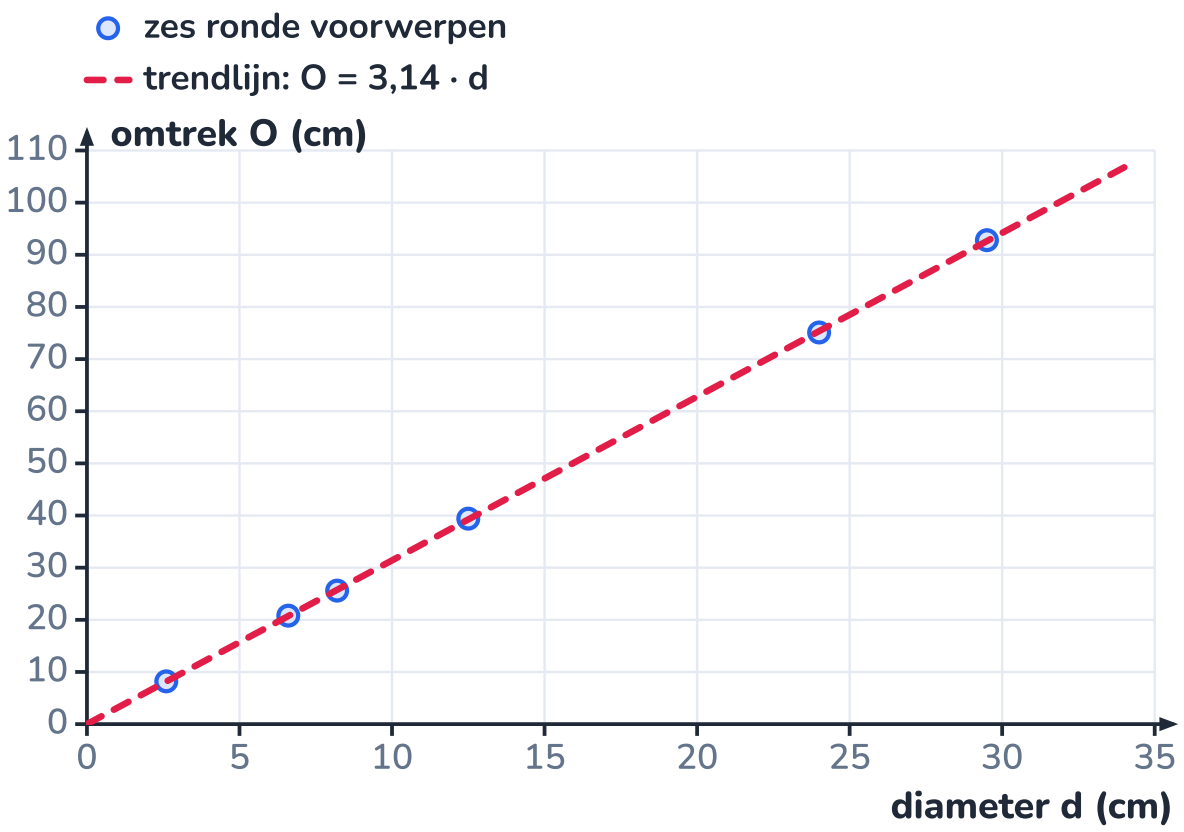
MATERIAAL

zes ronde voorwerpen van klein tot groot: een munt, een blikje, een mok, een bloempot, een bord, een emmerdeksel

stroken papier (of een naaimeter)

lat van 30 cm en een meetlint

potlood, millimeterpapier



Zes voorwerpen, van munt tot emmerdeksel, en toch één rechte: $O = 3{,}14 \cdot d$.

WERKWIJZE

1. Maak een lege tabel met drie kolommen: voorwerp, d (cm) en O (cm).
2. Meet de **diameter** d: de breedste afstand dwars door het midden. Meet in twee richtingen en neem het gemiddelde.
3. Meet de **omtrek** O: leg een strook papier strak rond het voorwerp, zet een streepje waar ze zichzelf raakt, rol af en meet.
4. Bereken voor elk voorwerp de verhouding O/d.
5. Teken de grafiek: d horizontaal, O verticaal. Teken een trendlijn.

WAARNEMING

voorwerp	d (cm)	O (cm)	O/d
2-euromunt	2,6	8,2	3,15
frisdrankblikje	6,6	20,8	3,15
mok	8,2	25,6	3,12
bloempot	12,5	39,4	3,15
bord	24,0	75,1	3,13
deksel van een emmer	29,5	92,8	3,15

De punten liggen op een rechte door de oorsprong, en de verhouding O/d is voor elk voorwerp ongeveer 3,1: gemiddeld 3,14.

VERKLARING

Hoe groot of klein de cirkel ook is: de omtrek is altijd ongeveer 3,14 keer de diameter. Verdubbelt de diameter, dan verdubbelt de omtrek. Omtrek en diameter zijn **recht evenredig**, en de vaste verhouding is een van de beroemdste getallen uit de wiskunde: **pi**, met het symbool π, dat begint met 3,14159 en eindeloos verder gaat. Al rond 250 voor Christus bewees de Griekse wiskundige Archimedes dat π tussen $3\frac{10}{71}$ en $3\frac{1}{7}$ ligt.

Omdat omtrek en diameter allebei lengtes zijn, heeft deze constante **geen eenheid**: cm gedeeld door cm. De kleine verschillen (3,12 tot 3,15) zijn meetfouten: de strook papier ligt niet helemaal strak, of de lat ligt net niet door het midden.

UITLEG · 4.7

Recht evenredig verband

7/16

Bij het pompje en bij de cirkel zag je hetzelfde patroon: wordt de ene grootheid 2, 3 of 10 keer zo groot, dan wordt de andere ook 2, 3 of 10 keer zo groot. Zulke grootheden zijn **recht evenredig**. Hun verhouding is altijd hetzelfde getal, de **evenredigheidsconstante** k:

RECHT EVENREDIG VERBAND

$$y = k \cdot x \quad \Leftrightarrow \quad k = \frac{y}{x}$$

x staat op de horizontale as, y op de verticale. De eenheid van k is de eenheid van y gedeeld door die van x, bijvoorbeeld mL/s.

Je herkent een recht evenredig verband op twee manieren:

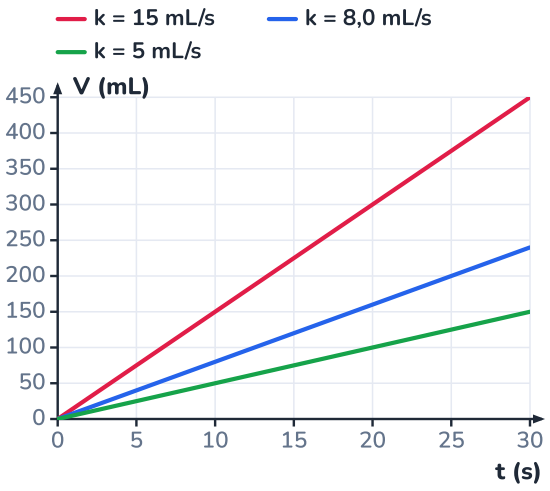
- **in de tabel**: y/x is (binnen de meetfout) voor elke rij hetzelfde;
- **in de grafiek**: de punten liggen op een **rechte door de oorsprong**.

De constante k heeft een betekenis: bij het pompje is het het aantal milliliter per seconde. Hoe groter k, hoe **steiler** de rechte (eerste figuur). Recht evenredige verbanden kom je in StemExpert overal tegen:

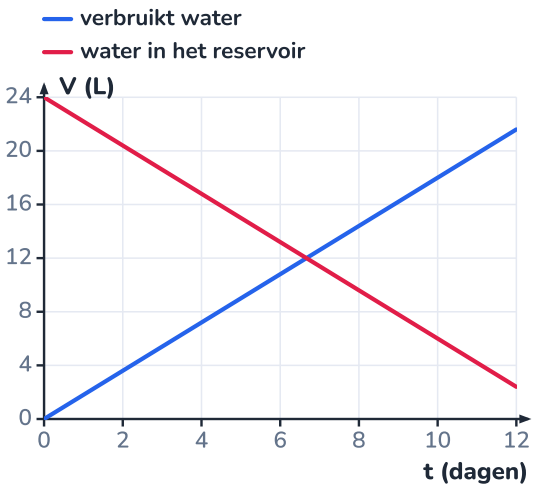
verband	constante k	hoofdstuk
prijs = prijs per kg × massa	prijs per kg (€/kg)	dagelijks leven
omtrek $O = \pi \cdot d$	$\pi \approx 3{,}14$ (geen eenheid)	dit hoofdstuk
massa $m = \rho \cdot V$	dichtheid (g/cm³)	7
uitrekking van een veer en de kracht	veerconstante	11
afstand $s = v \cdot t$ bij constante snelheid	snelheid (m/s)	14
spanning $U = R \cdot I$	weerstand (Ω)	19

Elke rechte is recht evenredig

Niet waar. Het reservoir van de meetkas bevat 24 L en de planten verbruiken 1,8 L per dag. Het **verbruikte** water is recht evenredig met de tijd: een rechte door de oorsprong. Het water dat nog **in het reservoir** zit, ligt ook op een rechte, maar die daalt en begint bij 24 L. Na 2 dagen zit er 20,4 L in, na 4 dagen niet het dubbele maar 16,8 L: de verhouding is niet constant. Een rechte die niet door de oorsprong gaat, heet een **lineair** verband; daar leer je in Intermediate mee rekenen.



Hoe groter de evenredigheidsconstante, hoe steiler de rechte door de oorsprong.



Verbruikt water: recht evenredig. Water in het reservoir: een rechte, maar niet door de oorsprong.

UITGEWERKT VOORBEELD · 4.8

De evenredigheidsconstante van het pompje

8/16

Gebruik de pompmetingen. (a) Is het volume recht evenredig met de tijd? (b) Bereken de evenredigheidsconstante, met eenheid. (c) De planten in de meetkas hebben samen 1,8 L water per dag nodig. Hoe lang moet het pompje per dag draaien? (d) Hoeveel water pompt het in één minuut?



Het pompje van de meetkas testen: stopwatch in de ene hand, potlood in de andere.

GEGEVEN

- de metingen van t (s) en V (mL)
- nodig: $1{,}8\,\mathrm{L}$ per dag

GEVRAAGD

- recht evenredig?
- k in mL/s
- pomptijd per dag
- volume per minuut

OPLOSSING

1 (a) Bereken voor elke meting V/t:

T (S)	5	10	15	20	25	30
V (ML)	41	79	121	160	198	241
V/T (ML/S)	8,2	7,9	8,1	8,0	7,9	8,0

De verhouding is telkens ongeveer 8, en de grafiek is een rechte door de oorsprong. Het volume is recht evenredig met de tijd. De kleine schommelingen (7,9 tot 8,2) zijn afleesfouten aan de maatbeker.

2 (b) Neem het gemiddelde van de verhoudingen: $k \approx 8{,}0$. Of lees een punt ver op de trendlijn af, bijvoorbeeld (30 s; 240 mL): $k = 240/30 = 8{,}0$. De eenheid is mL gedeeld door s: $k = 8{,}0\,\mathrm{mL/s}$. Het pompje pompt dus 8,0 mL per seconde.

3 (c) Zet eerst om: $1{,}8\,\mathrm{L} = 1800\,\mathrm{mL}$. Uit $V = k \cdot t$ volgt $t = V/k$: $t = \dfrac{1800\,\mathrm{mL}}{8{,}0\,\mathrm{mL/s}} = 225\,\mathrm{s}$, of 3 min 45 s.

4 (d) $V = k \cdot t = 8{,}0\,\mathrm{mL/s} \times 60\,\mathrm{s} = 480\,\mathrm{mL}$: bijna een halve liter per minuut.

ANTWOORD

(a) ja; (b) $k = 8{,}0\,\mathrm{mL/s}$; (c) 225 s, of 3 min 45 s per dag; (d) 480 mL.

Klopt dit? Eenheden nakijken: mL gedeeld door mL/s geeft s, en mL/s maal s geeft mL. In (c) en (d) reken je verder dan de gemeten 30 s. Dat mag hier, omdat een pompje niet trager gaat werken zolang er water genoeg in het reservoir staat. Wanneer zo'n voorspelling wel misloopt, lees je op het volgende blad.

UITLEG · 4.9

Interpoleren en extrapoleren

9/16

Een grafiek laat je ook waarden aflezen die je niet gemeten hebt. Daarvoor bestaan twee woorden:

- **Interpoleren**: een waarde aflezen **tussen** twee metingen in. Hoeveel water zat er na 12 s in de maatbeker? Je hebt 10 en 15 s gemeten; de trendlijn geeft ongeveer 96 mL. Omdat je aan weerszijden een meting hebt, is dat meestal betrouwbaar.
- **Extrapoleren**: een waarde voorspellen **buiten** je metingen, door de lijn verder door te trekken. Het gebied dat je gemeten hebt, heet het **meetbereik**. Buiten het meetbereik weet je niet zeker of het verband nog geldt.

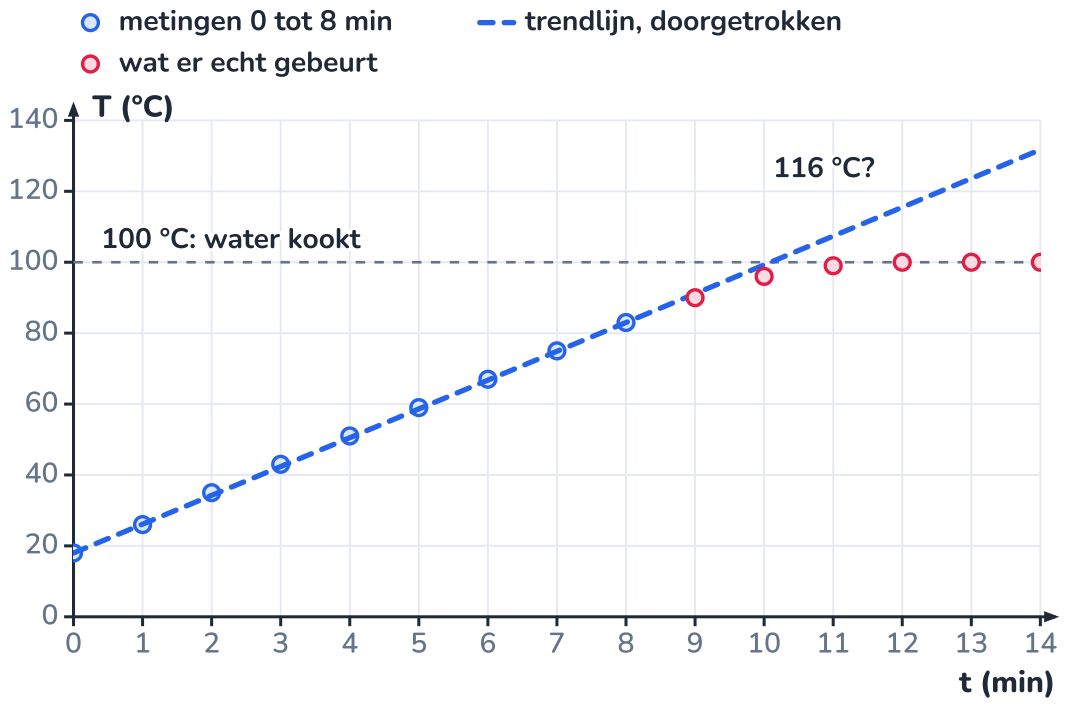
De figuur toont waarom extrapoleren gevaarlijk kan zijn. Een beker water op een kookplaat warmt elke minuut ongeveer 8 °C op: na 8 minuten 83 °C. Trek je die rechte door, dan voorspel je na 12 minuten ongeveer 116 °C. Maar water kookt bij ongeveer 100 °C, en dan stijgt de temperatuur niet meer: de extra energie gaat naar het verdampen (waarom, leer je in hoofdstuk 6). Het verband *verandert* buiten het meetbereik.

Wanneer mag je wel extrapoleren?

- als je weet waarom het verband bestaat, en dat die reden blijft gelden (de omtrek is π keer de diameter voor elke cirkel, ook een grote);
- als je niet ver buiten het meetbereik gaat;

- en als je nagaat of er niets verandert: water dat kookt, een reservoir dat leeg raakt, een veer die uitrekt tot ze vervormt, een plant die stopt met groeien.

> ⚠ **Ook de oorsprong kan extrapolatie zijn**
>
> Trek je een trendlijn door naar nul terwijl je daar niet gemeten hebt, dan extrapoleer je ook. Laat een lijn alleen door de oorsprong gaan als je zeker weet dat ze erdoor moet (0 s pompen is 0 mL water).



Tot 8 minuten gemeten; de doorgetrokken trendlijn voorspelt meer dan 100 °C, maar kokend water blijft op 100 °C.

ONTLEED · 4.10

Een dag in de meetkas

10/16

Een temperatuursensor in de meetkas en een tweede sensor buiten meten een hele zonnige dag in april elk uur de temperatuur. De punten van de kas zijn verbonden: elke meting telt, het is een verloop in de tijd. Wat vertelt deze grafiek?



Om het uur gemeten: de kas (rood) en buiten (blauw, gestippeld).

1 Het koudste moment
Rond 5 à 6 uur: 7,7 °C in de kas. De hele nacht is er warmte weggelekt, en de zon is nog niet op.

2 Snelle opwarming
Zodra de zon op de kas schijnt, stijgt de temperatuur steil: tussen 8 en 12 uur gemiddeld meer dan 4 °C per uur. Hoe steiler de lijn, hoe sneller de verandering.

3 25 °C om 11 uur
Precies op een meetpunt. Wil je weten wanneer het 23 °C was, dan interpoleer je tussen 10 uur (20,5 °C) en 11 uur (25,0 °C).

4 Het warmste moment
Om 14 uur: 32,0 °C in de kas, terwijl het buiten 17,3 °C is. De kas houdt de zonnewarmte vast, zoals een auto in de zon (hoofdstuk 16).

5 De grens van 30 °C
Een hulplijn. Boven 30 °C lijden de meeste kasplanten onder de hitte. Tussen ongeveer 12:35 en 15:10 ligt de kas erboven: het dakraam moet open.

6 Afkoelen
Als de zon zakt, daalt de temperatuur bijna even snel als ze 's morgens steeg.

7 's Nachts
's Nachts is de kas maar ongeveer 1 °C warmer dan buiten: zonder zon houdt een dunne wand de warmte niet vast.

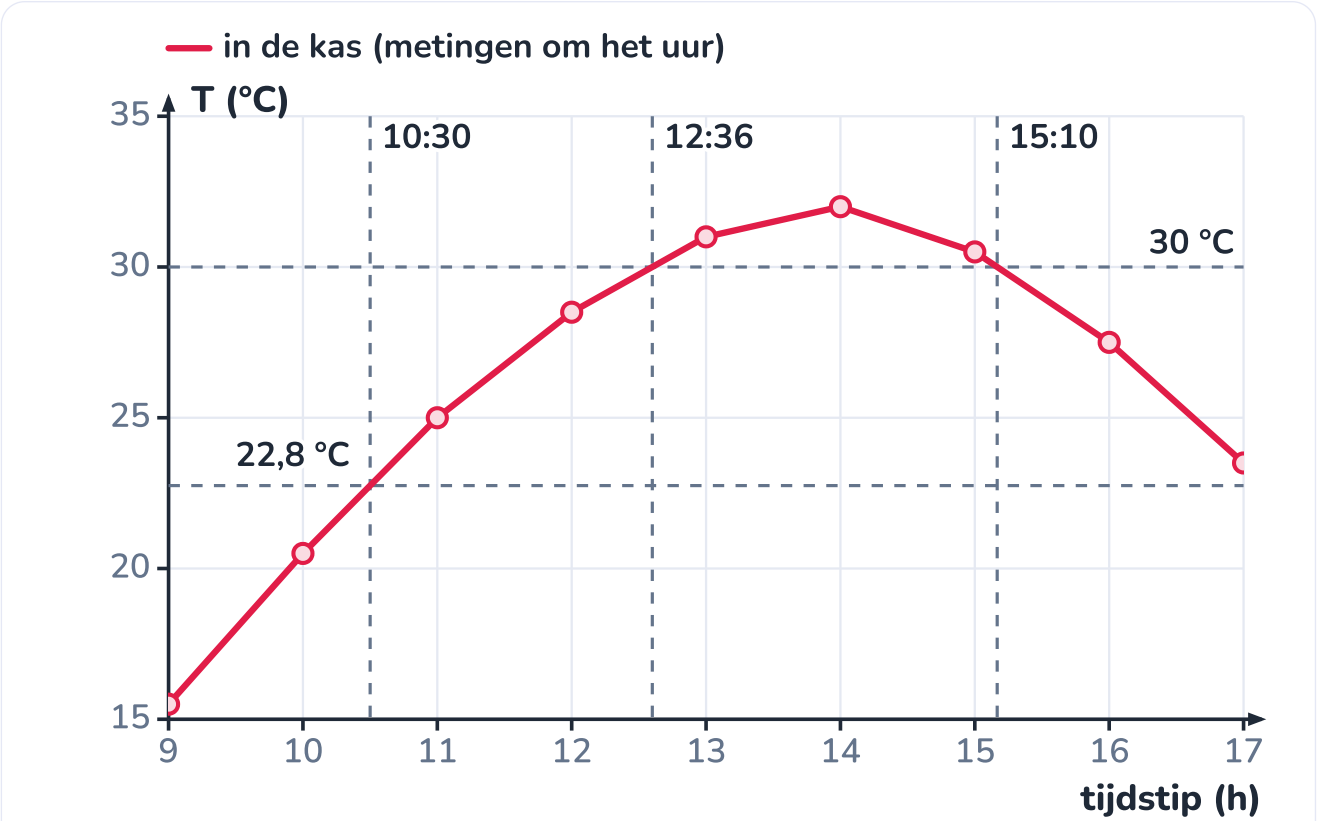
8 Buiten
De buitentemperatuur ter vergelijking. Ze bereikt haar maximum later dan de kas, rond 16 uur, en is veel vlakker.

UITGEWERKT VOORBEELD · 4.11

De kasgrafiek lezen

11/16

Gebruik de metingen van de kas (om het uur). (a) Hoe warm was het om 10:30? (b) Van wanneer tot wanneer was het in de kas warmer dan 30 °C? (c) Hoeveel warmer dan buiten was de kas om 14 uur en om 2 uur 's nachts? (d) Wat betekent dit voor het ontwerp van de meetkas?



Ingezoomd tussen 9 en 17 uur, met hulplijnen voor het aflezen.

GEGEVEN

- kas: 10 h: 20,5 °C; 11 h: 25,0 °C; 12 h: 28,5 °C; 13 h: 31,0 °C; 14 h: 32,0 °C; 15 h: 30,5 °C; 16 h: 27,5 °C; 2 h: 8,6 °C
- buiten: 14 h: 17,3 °C; 2 h: 7,6 °C

GEVRAAGD

- temperatuur om 10:30
- tijdstippen waarop 30 °C overschreden wordt
- verschil met buiten
- besluit voor het ontwerp

OPLOSSING

1. (a) 10:30 ligt precies halfweg tussen 10 en 11 uur. **Interpoleren** met een rechte tussen de twee meetpunten: halfweg tussen 20,5 en 25,0 °C, dus $(20{,}5 + 25{,}0)/2 = 22{,}75$, afgerond **22,8 °C**. In de ingezoomde grafiek lees je hetzelfde af.
2. (b) **Stijgend** gaat de lijn door 30 °C tussen 12 uur (28,5 °C) en 13 uur (31,0 °C). In dat uur stijgt de temperatuur 2,5 °C, en er is 1,5 °C nodig om 30 °C te halen: dat is $1{,}5/2{,}5 = 0{,}6$ van het uur, of 36 minuten. Dus om ongeveer **12:36**.
3. **Dalend** gaat ze door 30 °C tussen 15 uur (30,5 °C) en 16 uur (27,5 °C): een daling van 3,0 °C, waarvan 0,5 °C nodig is: $0{,}5/3{,}0 = 1/6$ van het uur, 10 minuten. Dus om ongeveer **15:10**. De kas is ongeveer 2 uur en 34 minuten te warm.
4. (c) Om 14 uur: $32{,}0 - 17{,}3 = 14{,}7$ °C warmer. Om 2 uur: $8{,}6 - 7{,}6 = 1{,}0$ °C warmer.
5. (d) Overdag moet de kas **verlucht** worden (een dakraam dat opengaat), anders lijden de planten onder de hitte. 's Nachts houdt ze bijna geen warmte vast: op een koude nacht is ze even koud als buiten. Warmte vasthouden en isoleren is het onderwerp van hoofdstuk 16.

ANTWOORD

(a) ongeveer 22,8 °C; (b) van ongeveer 12:36 tot 15:10; (c) 14,7 °C en 1,0 °C; (d) verluchten overdag, isoleren 's nachts.

Klopt dit? Interpoleren met een rechte tussen twee punten veronderstelt dat de temperatuur in dat uur gelijkmatig verandert. Dat is een benadering: meet je elke 10 minuten, dan worden de tijdstippen nauwkeuriger. Merk ook op dat de verticale as van de ingezoomde grafiek bij 15 °C begint: bij een lijngrafiek mag dat, als de getallen duidelijk op de as staan.

UITLEG · 4.12

Lijn, staaf, cirkel of spreiding?

12/16

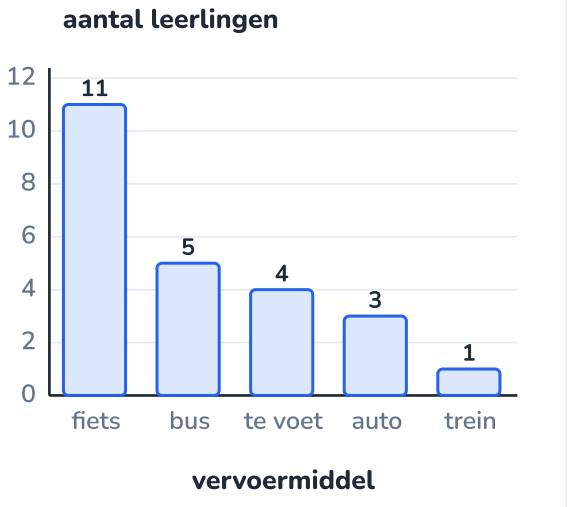
Niet elke grafiek past bij elke soort data. De vraag is telkens: *wat wil je tonen?*

grafiek	gebruik je voor	voorbeeld	let op
lijngrafiek	hoe een grootheid verandert met de tijd, of met een grootheid die je zelf regelt	temperatuur in de kas per uur; volume uit het pompje	bij metingen van een proef een trendlijn
staafdiagram	hoeveelheden van aparte groepen vergelijken	aantal leerlingen per vervoermiddel; neerslag per maand	de as begint bij 0; de volgorde van de groepen mag je kiezen
cirkeldiagram	tonen hoe één geheel verdeeld is	samenstelling van de lucht; het afval van de school	alleen als de delen samen 100 % zijn; niet voor meer dan zes à zeven delen
spreidingsdiagram	per voorwerp of persoon twee gemeten grootheden: hangen ze samen?	lengte en armspanwijdte van leerlingen	punten niet verbinden; eventueel een trendlijn

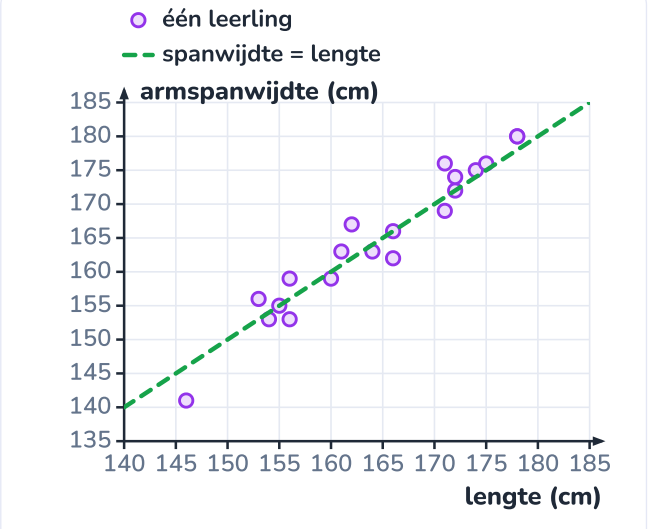
In het **spreidingsdiagram** is elk punt één leerling. De punten liggen niet op één lijn, maar vormen een wolk rond de lijn 'spanwijdte = lengte': je armspanwijdte is ongeveer even groot als je lengte. Een spreidingsdiagram toont dus een *trend*, geen vaste regel. Met zo'n wolk punten voorspellen is precies wat computers doen die 'leren uit data' (leerlijn Data en AI).

⚠ Een lijn tussen groepen betekent niets

Verbind de toppen van een staafdiagram nooit met een lijn: tussen 'fiets' en 'bus' ligt geen tussenwaarde. Een lijn suggereert een verloop dat er niet is.



Staafdiagram: aparte groepen, de lengte van een staaf is het aantal.



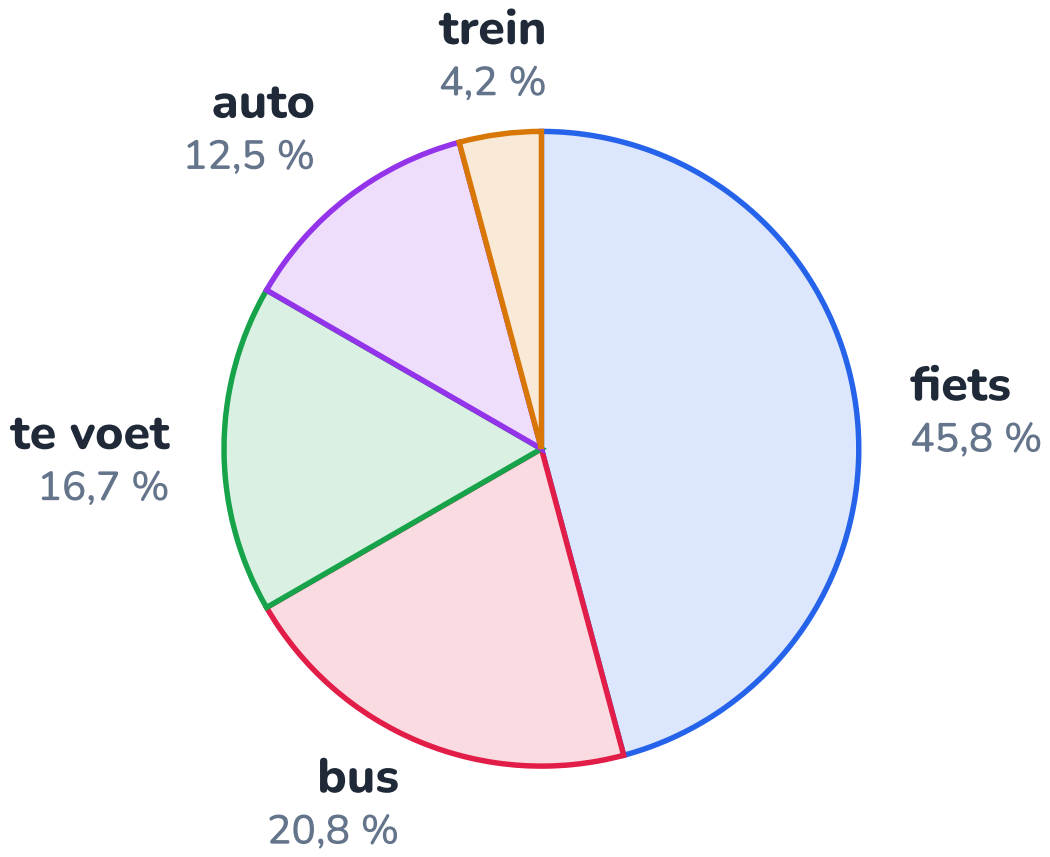
Spreidingsdiagram: elk punt is één leerling. De punten liggen rond de lijn 'spanwijdte = lengte'.

UITGEWERKT VOORBEELD · 4.13

Van tabel naar cirkeldiagram

13/16

In klas 1B komen 24 leerlingen naar school: 11 met de fiets, 5 met de bus, 4 te voet, 3 met de auto en 1 met de trein. Teken een cirkeldiagram.



Start bovenaan, met de klok mee, de grootste sector eerst.

GEGEVEN

- aantallen per vervoermiddel; totaal 24 leerlingen
- een volle cirkel is 360°

GEVRAAGD

- percentage en middelpuntshoek per vervoermiddel
- het cirkeldiagram

OPLOSSING

1 Bereken per groep het **deel van het geheel**: aantal gedeeld door 24. Maal 100 geeft het percentage, maal 360° de hoek van de sector:

VERVOERMIDDEL	AANTAL	DEEL	PERCENTAGE	HOEK
fiets	11	11/24	45,8 %	165°
bus	5	5/24	20,8 %	75°
te voet	4	4/24	16,7 %	60°
auto	3	3/24	12,5 %	45°
trein	1	1/24	4,2 %	15°
samen	**24**	**1**	**100 %**	**360°**

2 Een snellere weg voor de hoek: één leerling is $360^\circ/24 = 15^\circ$. De fietsers krijgen dus $11 \times 15^\circ = 165^\circ$. Werk je met percentages, dan is 1 % gelijk aan $360^\circ/100 = 3{,}6^\circ$.

3 Controleer: $165 + 75 + 60 + 45 + 15 = 360^\circ$. Klopt de som niet, dan heb je een rekenfout of een afrondingsfout.

4 Teken een cirkel en een straal naar boven. Zet de gradenboog op het middelpunt en teken de sectoren **met de klok mee**, de grootste eerst. Schrijf bij elke sector de naam en het percentage.

ANTWOORD

Sectoren van 165°, 75°, 60°, 45° en 15° (zie figuur).

Klopt dit? Een cirkeldiagram toont goed dat bijna de helft van de klas fietst. Maar het faalt bij heel kleine delen. Droge lucht bestaat voor 78,08 % uit stikstof, 20,95 % zuurstof, 0,93 % argon en ongeveer 0,04 % koolstofdioxide. De sector van CO_2 is dan $0{,}04 \times 3{,}6^\circ \approx 0{,}14^\circ$: dunner dan een potloodstreep, terwijl net die kleine hoeveelheid de planten in de kas voedt (hoofdstuk 27).

UITLEG · 4.14

Grafieken die misleiden

14/16

Twee zaadhandelaars verkopen tomatenzaad. Van merk A kiemt 92 % van de zaadjes, van merk B 95 %. Handelaar B zet dat in een reclamegrafiek waarvan de as bij 90 % begint. Zijn staaf lijkt dan **2,5 keer** zo hoog: $(95 - 90)/(92 - 90) = 2{,}5$. In werkelijkheid kiemen er per 100 zaadjes maar 3 meer. Met de as vanaf 0 % zie je dat de twee merken bijna even goed zijn.

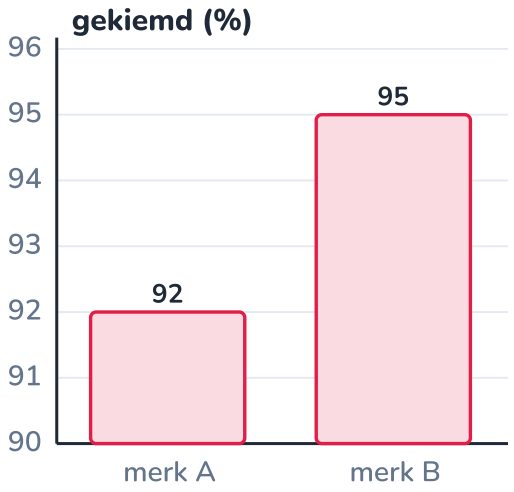
Bij een staafdiagram moet de as bij nul beginnen, omdat je oog de *lengte* van de staven vergelijkt. Bij een **lijngrafiek** mag je wel inzoomen (zoals de kasgrafiek tussen 15 en 35 °C): daar lees je de *positie* van punten af, niet een lengte. Voorwaarde is dat de getallen duidelijk op de as staan. Sommigen tekenen een klein zigzagje onderaan de as om aan te geven dat er een stuk weggelaten is.

Andere trucs om op te letten:

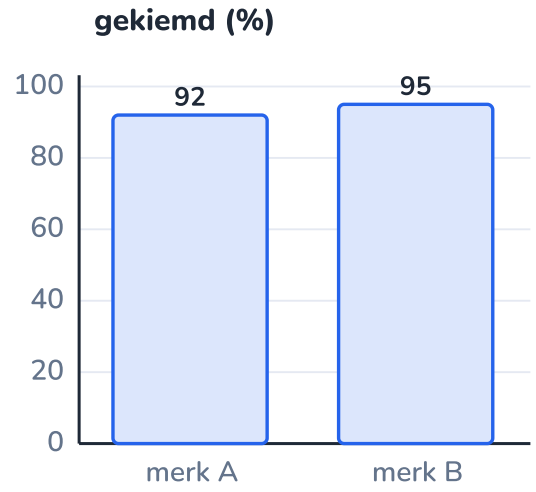
- een as **zonder getallen** of **zonder eenheid**: dan kan de lijn alles betekenen;
- een **ongelijke schaalverdeling**: 0, 10, 20, 50, 100 op gelijke afstanden;
- alleen het **stukje data** tonen dat het verhaal steunt, en de rest weglaten;
- **3D-effecten** en schuin getekende cirkels: de sectoren vooraan lijken groter dan ze zijn.

Grafieken lezen als een onderzoeker

Kijk bij elke grafiek eerst naar de assen: welke grootheid, welke eenheid, waar begint de schaal? Pas dan naar de lijnen of de staven. In Intermediate (hoofdstuk 39) leer je meer misleidende grafieken ontmaskeren, en ook waarom twee dingen die samen stijgen elkaar niet per se veroorzaken.



Misleidend: de staaf van B lijkt 2,5 keer zo hoog.



Dezelfde getallen vanaf 0 %: de verschillen zijn klein.

NASLAG · 4.15

Overzicht: tabellen, grafieken en verbanden

15/16

recht evenredig verband

$$y = k \cdot x \qquad k = \frac{y}{x}$$

symbool	betekenis	eenheid
x	grootheid op de horizontale as	bv. s
y	grootheid op de verticale as	bv. mL
k	evenredigheidsconstante	eenheid van y / eenheid van x, bv. mL/s

sector van een cirkeldiagram

$$\text{hoek} = \frac{\text{deel}}{\text{geheel}} \times 360°$$

symbool	betekenis	eenheid
hoek	middelpuntshoek van de sector	°

onderdeel	afspraak
tabel	één kolom per grootheid; kop: grootheid (eenheid); alleen getallen in de cellen; onafhankelijke variabele eerst, van klein naar groot; titel
assen	onafhankelijke variabele horizontaal, afhankelijke verticaal; bij elke as grootheid en eenheid
schaal	grootste waarde ÷ beschikbare lengte, naar boven afronden naar 1, 2, 5 (of 2,5) × 10, 100 ...; gelijke stappen; de grafiek vult het papier
punten	klein kruisje of stip, met potlood, precies geplaatst
trendlijn	vloeiende lijn of rechte tussen de punten; geen zigzag; door de oorsprong alleen als het moet
recht evenredig	y/x constant; rechte door de oorsprong; k met eenheid
interpoleren	aflezen tussen metingen: meestal betrouwbaar
extrapoleren	voorspellen buiten het meetbereik: alleen als het verband blijft gelden, en niet te ver
staafdiagram	as altijd vanaf 0
cirkeldiagram	delen van één geheel; 1 % = 3,6°; controleer dat de hoeken samen 360° zijn



Vier vragen, vier grafieken. Past geen enkele vraag, dan is een tabel misschien de beste keuze.

HET GEHEEL · 4.16

Waar grafieken naartoe leiden

16/16

Dit hoofdstuk is het begin van twee leerlijnen. In **Wiskundig modelleren** is het recht evenredig verband de eerste formule die een verschijnsel beschrijft: $y = k \cdot x$, met een constante die een betekenis heeft. In Intermediate komen daar rechten die niet door de oorsprong gaan, krommen en exponentiële groei bij; in Expert wordt de steilheid van een grafiek de afgeleide. In **Data en AI** is een trendlijn door een wolk punten het eenvoudigste voorspellende model: wie later een computer leert voorspellen, doet in wezen hetzelfde, met veel meer data en dezelfde valkuil van het extrapoleren.

F2 Onderzoeken: van vraag tot besluit

Onafhankelijke en afhankelijke variabele: welke grootheid op welke as komt.

F3 Meten: grootheden en eenheden

Grootheid en eenheid in de kop, omzetten naar één eenheid, zinvol afronden.

F6 Het deeltjesmodel

Waarom kokend water op 100 °C blijft: de faseovergang achter de 'knik' in de opwarmgrafiek.

F7 Massa, volume en dichtheid

Massa is recht evenredig met volume; de constante is de dichtheid.

F14 Beweging en snelheid

De (s,t)-grafiek: hoe steiler de rechte, hoe groter de snelheid.

F19 Spanning, stroom en weerstand

De wet van Ohm als recht evenredig verband: de constante is de weerstand.

F25 Sensoren en automatisch regelen

Sensoren die elke minuut meten: hun data lees je als grafiek.

I3 Verbanden in data

Lineaire verbanden met snijpunt, de best passende rechte, rekenblad en lineariseren.

I39 Data visualiseren en eerste stappen in AI

Misleidende grafieken ontmaskeren, correlatie tegenover oorzaak, en een eerste voorspellend model.

E41 Van data naar model: regressie

De best passende lijn berekenen met de kleinste kwadraten, en voorspellen met een model.

Habitat

De meetkas meet voortdurend: temperatuur, licht, bodemvocht. Die metingen worden pas bruikbaar als grafiek. In opdracht 4.13 teken je een dag temperatuur in de kas en beslis je wanneer het dakraam open moet. Noteer ook de evenredigheidsconstante van

het pompje (8,0 mL/s) in je portfolio: in hoofdstuk 25 bepaalt ze hoe lang de pomp aan moet.

SAMENVATTING

In het kort

- Een tabel heeft één kolom per grootheid, met grootheid en eenheid in de kop en alleen getallen in de cellen; de onafhankelijke variabele staat eerst.
- In een grafiek staat de onafhankelijke variabele horizontaal en de afhankelijke verticaal, elk met grootheid en eenheid.
- Kies een schaal met handige, gelijke stappen (1, 2, 5 × ...) zodat de grafiek het papier vult.
- Meetpunten van een proef krijgen een trendlijn, geen zigzag; een verloop in de tijd mag je verbinden.
- Recht evenredig: y/x is constant en de grafiek is een rechte door de oorsprong; $y = k \cdot x$, met k in de eenheid van y gedeeld door die van x.
- Interpoleren (tussen metingen) is meestal betrouwbaar; extrapoleren (buiten het meetbereik) alleen als het verband blijft gelden.
- Lijngrafiek voor een verloop, staafdiagram voor aparte groepen, cirkeldiagram voor delen van een geheel, spreidingsdiagram voor twee metingen per voorwerp.
- Een staafdiagram waarvan de as niet bij nul begint, vergroot verschillen: kijk altijd eerst naar de assen.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

resultatentabel
Een tabel waarin je metingen ordent: één kolom per grootheid, met grootheid en eenheid in de kop en alleen getallen in de cellen.

grafiek
Een tekening van hoe een grootheid samenhangt met een andere, met twee assen die elk een grootheid, een eenheid en een schaalverdeling hebben.

schaal van een as
Hoeveel eenheden van een grootheid met één hokje of één centimeter op het papier overeenkomen, bv. 20 mL per cm.

trendlijn
Een vloeiende lijn (vaak een rechte) die het verloop van meetpunten zo goed mogelijk volgt, met ongeveer evenveel punten erboven als eronder.

oorsprong
Het punt waar beide assen nul zijn: (0, 0).

recht evenredig
Twee grootheden zijn recht evenredig als hun verhouding constant is: wordt de ene 2 of 3 keer zo groot, dan ook de andere. De grafiek is een rechte door de oorsprong.

evenredigheidsconstante
Het vaste getal k in $y = k \cdot x$ bij een recht evenredig verband; $k = y/x$, met als eenheid de eenheid van y gedeeld door die van x.

interpoleren
Een waarde aflezen of berekenen tussen twee metingen in, dus binnen het meetbereik.

extrapoleren
Een waarde voorspellen buiten het meetbereik, door het verband voorbij de laatste meting door te trekken.

meetbereik
Het gebied tussen de kleinste en de grootste waarde die je gemeten hebt.

lijngrafiek
Een grafiek met punten die met een lijn verbonden zijn of een trendlijn krijgen; toont hoe iets verandert.

staafdiagram
Een grafiek met staven waarvan de lengte een hoeveelheid voorstelt; om aparte groepen te vergelijken.

cirkeldiagram

spreidingsdiagram

Een cirkel verdeeld in sectoren die samen het geheel (100 %) vormen; elke procent is 3,6°.

Een grafiek met losse punten, één per voorwerp of persoon, om te zien of twee gemeten grootheden samenhangen.

HANDBOEK · HOOFDSTUK 5

Veilig werken in labo en werkplaats

Wie weet wat er mis kan gaan, kan er iets aan doen: veiligheid als deel van het vak

Een chirurg, een elektricien en een piloot werken elke dag met iets gevaarlijks, en toch loopt het bijna altijd goed. Niet omdat ze bang zijn, maar omdat ze weten waar het gevaar zit en vaste gewoontes hebben. In dit hoofdstuk leer je die gewoontes: **gevarenpictogrammen** lezen, veilig werken in het labo en met **gereedschap**, weten wat je doet bij een **ongeval**, begrijpen waarom **230 V** iets anders is dan 5 V, en vóór je begint een **risico** inschatten met een eenvoudige tabel.

8× uitleg · 3× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 2× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 5 lestijden

O Onderzoeken en meten · D Ontwerpen en maken



Bril op, werkstuk vast, bout in de houder: vakmensen aan het werk.

Na dit hoofdstuk

- Je kan het verschil tussen gevaar en risico uitleggen, en risico schatten als kans × ernst.
- Je kan de negen GHS-gevarenpictogrammen herkennen, benoemen en een voorbeeld geven.
- Je kan een etiket lezen: pictogrammen, signaalwoord (Gevaar of Waarschuwing), H-zinnen en P-zinnen.
- Je kan de belangrijkste laboregels toepassen en voor elke regel zeggen waarom ze bestaat.
- Je kan het juiste persoonlijke beschermingsmiddel kiezen, en weet wanneer handschoenen net gevaarlijk zijn.
- Je kan bij een ongeval de eerste stappen zetten: eigen veiligheid, hulp roepen, eerste hulp.
- Je kan zaag, cutter, boormachine, lijmpistool en soldeerbout veilig gebruiken.
- Je kan uitleggen waarom 230 V gevaarlijk is en 5 V of 12 V niet, en wat een differentieelschakelaar doet.
- Je kan met een risicotabel en het STOP-principe maatregelen kiezen vóór je aan een taak begint.

VERHAAL · 5.1

Een vliegtuig dat te ingewikkeld was voor het geheugen

1/17

Op 30 oktober 1935 stond op het vliegveld Wright Field in de Verenigde Staten een nieuw vliegtuig klaar voor een demonstratievlucht: de Boeing Model 299, een bommenwerper met vier motoren, groter en sneller dan alles wat het leger tot dan toe had. Aan boord zaten ervaren piloten, onder wie Boeings hoofdtestpiloot Leslie Tower. Kort na het opstijgen steeg het toestel steil, verloor snelheid en stortte neer. Twee mensen aan boord kwamen om.

Het onderzoek vond geen defect. De piloten waren vergeten een vergrendeling los te maken die de roeren van het vliegtuig vastzet als het op de grond staat, zodat de wind ze niet heen en weer slaat. Met vastgezette roeren kon niemand het toestel besturen.

Sommigen besloten dat het vliegtuig te ingewikkeld was om mee te vliegen. Een groep testpiloten bedacht iets anders: een korte lijst met de stappen voor het taxiën, het opstijgen en het landen, die de piloten telkens samen overlopen. De **checklist** was geboren. Niet omdat de piloten hun vak niet kenden, maar omdat zelfs de beste vakman onder druk iets kan vergeten. Met die lijst werd het toestel veilig gevlogen; het werd de beroemde B-17. De checklist is uit de luchtvaart niet meer weggeweest en wordt vandaag ook in ziekenhuizen gebruikt, onder meer bij operaties.

> **Waarom dit verhaal ertoe doet**
>
> Veilig werken heeft niets met bang zijn te maken, en ook niet met dom zijn. Het is **vakmanschap**: weten waar het gevaar zit, en gewoontes hebben die voorkomen dat een gewone vergissing een ongeval wordt. Die gewoontes leer je in dit hoofdstuk.



Een korte lijst op een kaartje: de eenvoudigste veiligheidsuitvinding van de twintigste eeuw.

UITLEG · 5.2

Gevaar en risico

2/17

Een soldeerbout is aan de punt ongeveer 350 °C heet. Dat is een **gevaar**: iets wat schade kan doen. Of er echt iets misgaat, hangt af van hoe je werkt. Ligt de bout los op tafel, naast een snoer en een blad papier, dan is de kans op een brandwonde of een brandje veel groter dan wanneer hij in zijn houder staat. Het gevaar is hetzelfde, het **risico** niet.

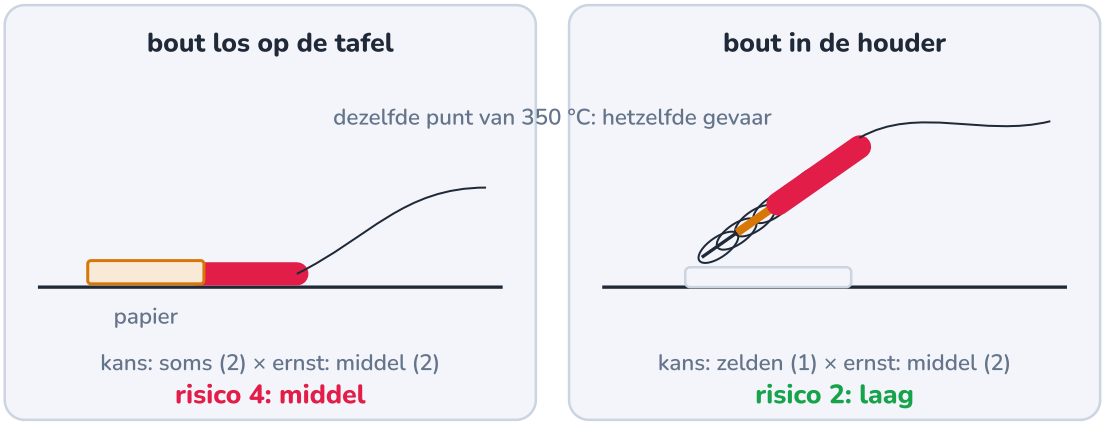
Het risico hangt af van twee dingen:

- de **kans** dat het misgaat: zelden, soms of vaak;
- de **ernst** als het misgaat: een schrammetje, een wonde die EHBO nodig heeft, of een letsel voor de dokter of het ziekenhuis.

Een eenvoudige schatting is **risico = kans × ernst**, elk met een score van 1 tot 3. Een gevaar kan je niet altijd wegnemen: een soldeerbout moet heet zijn om te solderen. Het risico kan je wel kleiner maken, door de kans te verkleinen (een houder, een afspraak) of de ernst (een bril, snel koelen). Dat is wat vakmensen doen.

Veilig werken is traag werken

Een ongeval kost altijd meer tijd dan een voorzorg. Een werkstuk vastklemmen duurt tien seconden; een werkstuk dat wegschiet, bederft je werk en soms je hand. Wie vaste gewoontes heeft, werkt net rustiger en sneller.



Links ligt de hete punt naast papier en snoer, rechts zit ze veilig in een spiraal: zelfde gevaar, kleiner risico.

UITLEG · 5.3

Gevarenpictogrammen: negen ruiten

3/17

Op producten die gevaarlijk kunnen zijn, staat een **gevarenpictogram**: een zwart symbool in een witte ruit met een rode rand. Het systeem heet **GHS** (*Globally Harmonized System*): het werd door de Verenigde Naties uitgewerkt en wordt wereldwijd gebruikt, in de Europese Unie via de CLP-verordening. Sinds 2017 zie je in de EU alleen nog deze ruiten; de oude oranje vierkanten zijn verdwenen. Er zijn er precies negen:

code	naam	symbool	betekenis	voorbeelden	signaalwoord
GHS01	**ontplofbaar**	ontploffende bom	kan ontploffen door vuur, een schok of wrijving	springstof, het kruit in vuurwerk	meestal Gevaar

code	naam	symbool	betekenis	voorbeelden	signaalwoord
GHS02	**ontvlambaar**	vlam	vat snel vuur, ook de damp	ethanol, aceton, benzine, spuitbussen, propaan	Gevaar of Waarschuwing
GHS03	**oxiderend**	vlam boven een cirkel	levert zuurstof en maakt een brand veel heviger	zuurstofgas, kaliumpermanganaat	Gevaar of Waarschuwing
GHS04	**gas onder druk**	gasfles	kan ontploffen als hij warm wordt; sommige gassen zijn zo koud dat ze bevriezingen geven	flessen met propaan, CO_2, stikstof	Waarschuwing
GHS05	**bijtend**	vloeistof die een plaatje en een hand aantast	vreet huid, ogen en metaal aan	ontstopper, natriumhydroxide, zoutzuur	Gevaar (alleen bijtend voor metaal: Waarschuwing)
GHS06	**acuut giftig**	doodshoofd met gekruiste beenderen	een kleine hoeveelheid kan dodelijk zijn	methanol, sommige rattengiffen	Gevaar
GHS07	**schadelijk, irriterend**	uitroepteken	irriteert huid, ogen of luchtwegen, schadelijk bij inslikken, kan allergie geven	allesreiniger, kopersulfaat	Waarschuwing
GHS08	**ernstig gevaar voor de gezondheid**	silhouet met een ster op de borst	schade op lange termijn (kanker, organen, erfelijk materiaal) of longschade als je het inslikt en verslikt	benzine, lampolie, terpentine	Gevaar of Waarschuwing
GHS09	**milieugevaarlijk**	dode boom en dode vis	giftig voor planten en dieren in het water	kopersulfaat, sommige insectenverdelgers, benzine	Waarschuwing (of geen)

Bij de pictogrammen staat een **signaalwoord**: **Gevaar** bij de ernstigere gevaren, **Waarschuwing** bij de minder ernstige. Er staat hooguit één signaalwoord op een etiket, ook als er meerdere pictogrammen zijn: dan geldt het ernstigste. Eén product kan meerdere pictogrammen dragen: benzine heeft er vier (ontvlambaar, schadelijk, gezondheidsgevaar, milieugevaarlijk).

Natuurlijk is onschuldig

Ook natuurlijke producten dragen gevarenpictogrammen. Veel etherische oliën, zoals tea-tree-olie, hebben er drie: schadelijk, gezondheidsgevaar en milieugevaarlijk. En omgekeerd: een product zonder pictogram (kokend water, een scherp mes) kan ook gevaarlijk zijn. Het pictogram vertelt iets over de *stof*, niet over alles wat er mis kan gaan.



Vereenvoudigd getekend. De echte pictogrammen hebben dezelfde vorm, kleuren en symbolen.

ONTLEED · 5.4

Het etiket van een fles ethanol

4/17

Ethanol (alcohol) gebruik je in het labo om te ontvetten, als brandstof in een spiritusbrander of als oplosmiddel. Het etiket vertelt in een vaste volgorde wat het gevaar is en wat je moet doen.



Een etiket volgens de Europese regels, met de officiële Nederlandse zinnen.

1. **Naam van het product**
   Wat zit erin? Bij een mengsel staan ook de gevaarlijke bestanddelen vermeld.

2. **Pictogram: ontvlambaar (GHS02)**
   Ethanol verdampt snel; de damp vat vuur aan een vlam of een vonk, ook op een afstand.

3. **Pictogram: irriterend (GHS07)**
   Hier voor de ogen: een spat ethanol in je oog doet pijn en kan het oog beschadigen.

4. **Signaalwoord**
   'Gevaar': het ernstigste van de twee signaalwoorden, omdat ethanol licht ontvlambaar is.

5. **H-zinnen**
   Gevarenaanduidingen (H van hazard). Het nummer is overal in Europa hetzelfde, de zin staat in de taal van het land.

6. **P-zinnen**
   Veiligheidsaanbevelingen (P van precaution): hoe je het gevaar vermijdt en wat je doet als het toch misgaat.

7. **Leverancier**
   Wie het product verkoopt, met een telefoonnummer. Bij de leverancier vraag je het veiligheidsinformatieblad op: een document met alle details over het product.

UITGEWERKT VOORBEELD · 5.5

Een etiket lezen: de ontstopper

5/17

Onder de gootsteen staat een ontstopper op basis van natriumhydroxide. Op het etiket: het pictogram GHS05, het signaalwoord **Gevaar**, en de zinnen *H314 Veroorzaakt ernstige brandwonden en oogletsel*, *H290 Kan bijtend zijn voor metalen*, *P280 Beschermende handschoenen/beschermende kleding/oogbescherming/gelaatsbescherming dragen* en *P301+P330+P331 NA INSLIKKEN: de mond spoelen — GEEN braken opwekken.* (a) Wat betekent het pictogram? (b) Hoe ernstig is het gevaar? (c) Hoe bescherm je jezelf? (d) Een kind heeft ervan gedronken. Wat doe je? (e) Mag je de ontstopper mengen met een ander schoonmaakmiddel om hem sterker te maken?

GEGEVEN

- pictogram GHS05, signaalwoord Gevaar
- H314, H290, P280, P301+P330+P331

GEVRAAGD

- betekenis, ernst, bescherming, eerste hulp, mengen

OPLOSSING

1. (a) GHS05 is **bijtend**: de stof vreet huid, ogen en metalen aan. Natriumhydroxide lost vet en haar op; daarom ontstopt het een afvoer, en daarom tast het ook je huid aan.

2. (b) 'Gevaar' is het ernstigste signaalwoord. H314 zegt waarom: ernstige brandwonden en oogletsel, dus blijvende schade is mogelijk.

3. (c) P280 zegt het letterlijk: handschoenen en oogbescherming. Giet voorzichtig, zonder spatten, en houd je gezicht weg van de afvoer.

4. (d) P301+P330+P331: de mond laten spoelen, **niet** laten braken (de bijtende stof zou dan een tweede keer langs slokdarm en mond komen). Neem het etiket mee en bel het **Antigifcentrum: 070 245 245**, of 112 als het kind het moeilijk heeft.

5. (e) Nee. Schoonmaakproducten meng je nooit: sommige combinaties reageren heftig of geven een giftig gas (bleekwater met een zuur, zoals een ontkalker, geeft chloorgas). Twee ontstoppers kunnen bovendien een zuur en een base zijn, die bij het mengen heet worden en spatten.

ANTWOORD

Bijtend, ernstig gevaar; handschoenen en bril; bij inslikken spoelen, niet laten braken en het Antigifcentrum bellen; nooit mengen.

Klopt dit? Kijk bij een etiket altijd in deze volgorde: pictogram (wat), signaalwoord (hoe erg), H-zinnen (precies wat), P-zinnen (wat doe ik). Wie die volgorde volgt, hoeft niets van buiten te kennen.

UITLEG · 5.6

Laboregels en beschermingsmiddelen

6/17

Laboregels zijn geen willekeur: achter elke regel zit een ongeval dat ooit gebeurd is. Ken je de reden, dan onthoud je de regel.

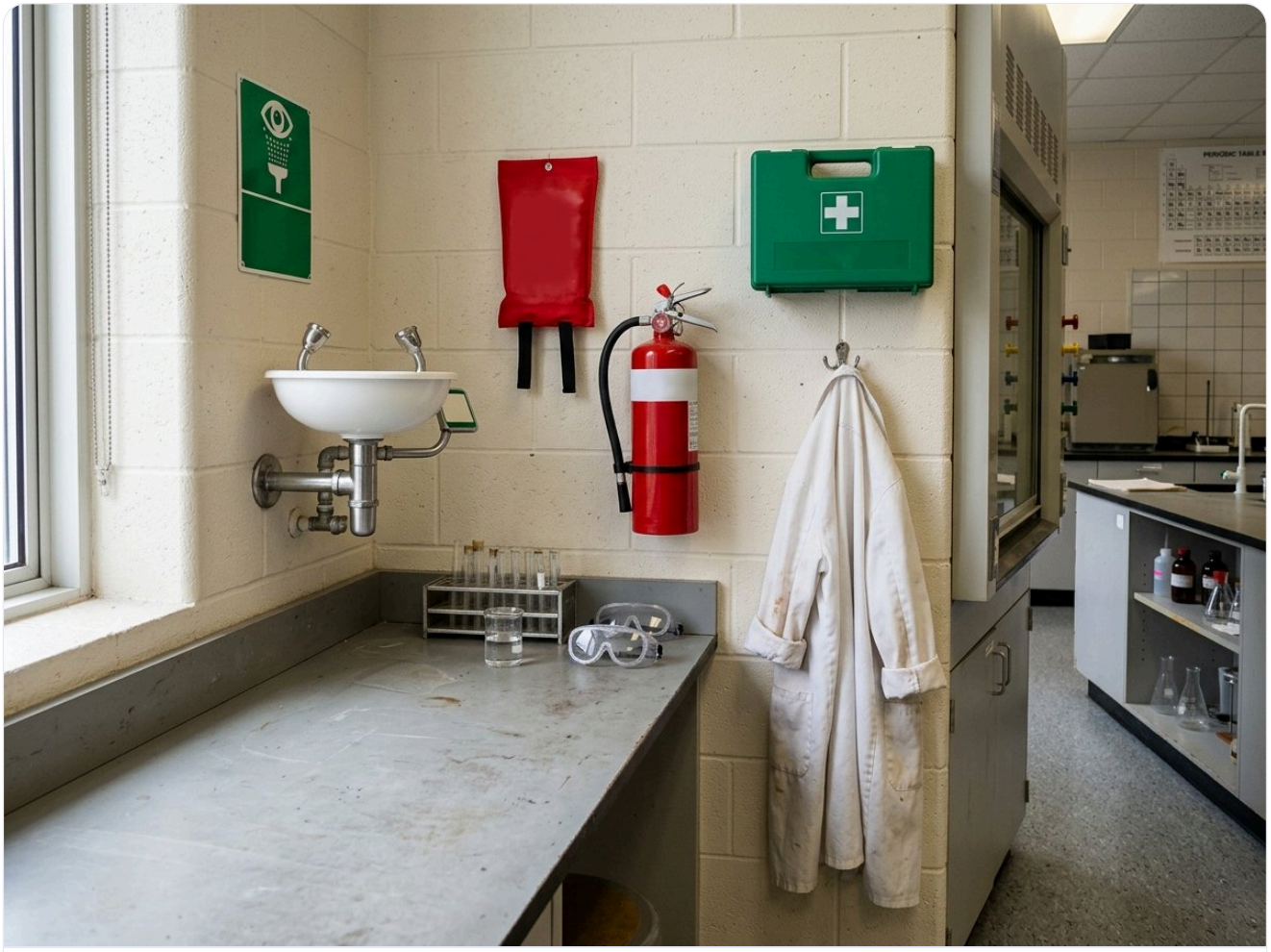
1. **Niet eten, drinken of kauwgom kauwen** in het labo of de werkplaats: wat op je handen zit, komt anders in je mond.
2. **Lang haar vast, geen sjaal of loshangende koordjes, gesloten schoenen**: haar en koordjes vatten vuur of worden gegrepen door een draaiende machine.
3. **Bril op** zodra iemand in het lokaal met chemicaliën of gereedschap werkt, ook als jij even niets doet.
4. **Lees eerst** het hele werkvoorschrift en de etiketten. Begin pas als je weet wat je doet en waarom.
5. **Ruik nooit rechtstreeks** aan een stof: wuif de damp met je hand naar je neus.
6. **Pipetteer nooit met je mond**: gebruik een pipetteerballon.
7. **Eerst het water, dan het zuur.** Giet een geconcentreerd zuur langzaam in water, nooit omgekeerd: bij het mengen komt veel warmte vrij, en water dat op zuur valt, kan meteen koken en opspatten.
8. **Verwarm een reageerbuis schuin**, met de opening van iedereen weg.
9. **Giet nooit iets terug** in de voorraadfles; afval gaat in het juiste vat, niet zomaar in de gootsteen.
10. **Ruim op** terwijl je werkt: tassen weg van gangpaden, snoeren niet over de rand van de tafel.
11. **Weet waar alles hangt**: oogdouche, brandblusser, blusdeken, EHBO-koffer, nooduitgang, noodstop.
12. **Meld elk ongeval** aan de leerkracht, hoe klein ook.

Wat overblijft na goede afspraken, vang je op met **persoonlijke beschermingsmiddelen** (PBM):

beschermingsmiddel	beschermt tegen	let op
veiligheidsbril	spatten, splinters, spaanders, vonken	ook over een gewone bril (overzetbril); altijd bij chemicaliën, zagen, boren, solderen
labojas van katoen	spatten op huid en kleding	dichtknopen; katoen smelt niet in een vlam, sommige kunstvezels wel
wegwerphandschoenen (nitril)	chemicaliën op de handen	**nooit** bij een draaiende machine: de boor kan de handschoen en je hand meetrekken
snijbestendige handschoen	snijwonden	aan de hand die het werkstuk of de lat vasthoudt
gehoorbescherming	lawaai van machines	bij lawaaierige machines, zoals een decoupeerzaag
stofmasker	fijn stof bij schuren en zagen	vooral bij hout en mdf

Handschoenen zijn niet altijd veiliger

Bij chemicaliën beschermen handschoenen je handen. Maar bij een boormachine of een andere draaiende machine zijn ze net gevaarlijk: grijpt de boor de handschoen, dan trekt hij je hand mee. Een beschermingsmiddel past bij één gevaar, niet bij alle.



Oogdouche, blusdeken, brandblusser en EHBO-koffer: weet waar ze hangen voor je ze nodig hebt.

PROEF · 5.7

Hoe lang blijft een lijmpistool gevaarlijk heet?

7/17

ONDERZOEKSVRAAG

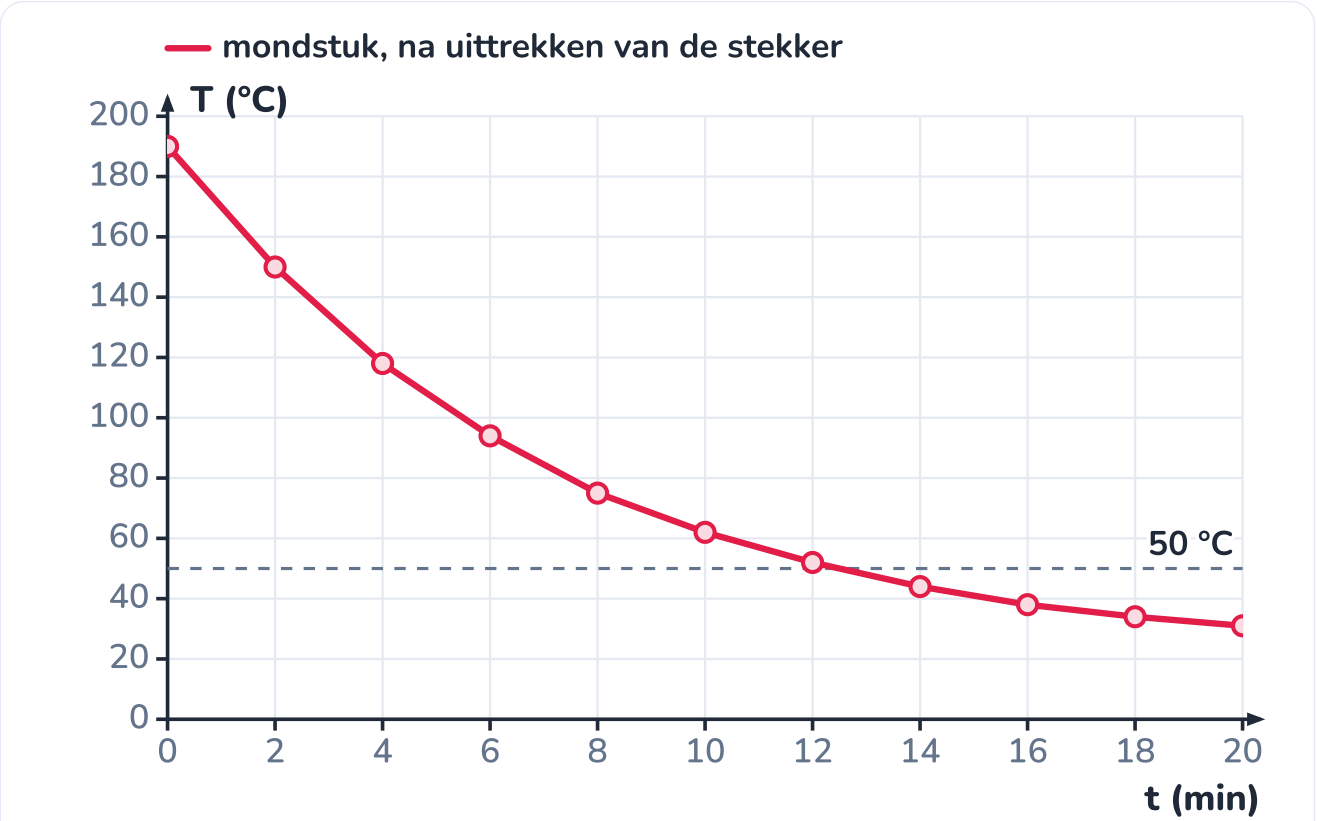
Een lijmpistool is uit, de stekker is eruit. Mag je het mondstuk meteen aanraken of opbergen?

MATERIAAL

- lijmpistool (bediend door de leerkracht)
- thermometer met draadsonde (thermokoppel), bv. op een multimeter
- stopwatch
- tafel met een hittebestendige ondergrond

Veiligheid

De leerkracht bedient het lijmpistool en houdt de sonde tegen het mondstuk met een klem. Leerlingen lezen af en noteren; niemand raakt het mondstuk aan.



Snel en dan steeds trager: pas na ongeveer 12,5 minuten is het mondstuk onder 50 °C.

WERKWIJZE

1. Laat het lijmpistool 5 minuten opwarmen op zijn standaard.
2. Klem de sonde van de thermometer tegen het metalen mondstuk en trek de stekker uit. Start de stopwatch.
3. Lees om de 2 minuten de temperatuur af, 20 minuten lang, en noteer ze in een tabel met t (min) en T (°C).
4. Zet de metingen in een grafiek (hoofdstuk 4) en lees af wanneer het mondstuk onder 50 °C komt.

WAARNEMING

t (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
T (°C)	190	150	118	94	75	62	52	44	38	34	

Het mondstuk koelt eerst snel af (40 °C in de eerste twee minuten), daarna steeds trager. Pas na ongeveer 12,5 minuten zakt het onder 50 °C (interpoleren tussen 12 en 14 min), en na 20 minuten is het nog altijd 31 °C.

VERKLARING

…t metalen mondstuk en het verwarmingselement erachter …ben veel warmte opgeslagen. Die warmte lekt maar langzaam weg naar de lucht, en hoe kleiner het verschil met de kamer, hoe trager het gaat. Water van 60 °C geeft op de huid al na enkele seconden een brandwonde, dus **uit is niet koud**: een lijmpistool of soldeerbout berg je pas na een kwartier op, en tot dan blijft het op zijn standaard of in zijn houder.

UITLEG · 5.8

Als het toch misgaat

8/17

Ook bij vakmensen gebeurt soms een ongeval. Het verschil maken dan de eerste minuten. Onthoud drie stappen, in deze volgorde:

1. **Eigen veiligheid.** Word geen tweede slachtoffer: schakel de stroom uit, draai het gas dicht, ga niet in een rookwolk staan.
2. **Alarm.** Roep de leerkracht. Is het ernstig, bel dan **112** (brandweer en ziekenwagen, overal in Europa). Bij een vergiftiging: het **Antigifcentrum, 070 245 245**, dag en nacht.
3. **Eerste hulp**, volgens de tabel.

wat gebeurde er?	eerste hulp	niet doen
brandwonde (soldeerbout, lijmpistool, heet glas)	zo snel mogelijk **20 minuten koelen met lauw stromend water**; ringen en horloge uitdoen voor het zwelt	geen ijs of ijskoud water; blaren niet openprikken; gestolde lijm niet lostrekken
stof op de huid	besmeurde kleding uit, huid lang spoelen met veel water	niet wrijven
stof in het oog	meteen de oogdouche: minstens een kwartier spoelen, ooglid open, lenzen uit als dat lukt; blijven spoelen tot er hulp is	niet in het oog wrijven
stof ingeslikt	mond spoelen, etiket bijhouden, **Antigifcentrum 070 245 245** bellen	niet laten braken
snijwonde	drukken met een schoon kompres, daarna verbinden	een diepe wonde niet zelf verzorgen: laat ze bekijken
elektrische schok	**eerst de stroom uitschakelen** (stekker, differentieel), dan pas het slachtoffer aanraken; 112 bellen	nooit iemand aanraken die nog onder spanning staat
kleding in brand	stop, laat je vallen en rol; of doof met de blusdeken	niet weglopen: lopen wakkert de vlammen aan

Waarom 20 minuten koelen?

Een brandwonde blijft na het contact nog doorbranden: de warmte zit in je huid. Lauw stromend water voert die warmte af en beperkt de schade. IJskoud water of ijs doet net meer schade en kan je lichaam te veel afkoelen. Twintig minuten lijkt lang: zet een timer.



Twintig minuten lauw stromend water: de belangrijkste eerste hulp bij een brandwonde.

UITLEG · 5.9

Gereedschap veilig gebruiken

9/17

Voor de meetkas zaag je kokerprofielen, snijd je polycarbonaat, boor je gaten, lijm je en soldeer je. Elk gereedschap heeft zijn eigen gevaar, en dus zijn eigen gewoontes. Twee regels gelden altijd: **het werkstuk ligt vast, niet in je hand**, en **je werkt van je lichaam weg**.

gereedschap	gevaar	zo werk je veilig
zaag (handzaag, beugelzaag, figuurzaag)	snijwonden, werkstuk dat wegschiet	werkstuk vast in een bankschroef of met lijmklemmen; hand naast en achter de zaagsnede; rustig zagen met de hele lengte van het blad; zaag neerleggen met de tanden van je af
cutter (polycarbonaat, karton)	diepe snijwonden	snijden van je af, langs een metalen lat; snijbestendige handschoen aan de hand die de lat vasthoudt; mes intrekken als je het neerlegt
boormachine en kolomboor	haar, kleding of handschoen die wordt meegetrokken; rondtollend werkstuk; hete, scherpe spaanders	werkstuk in een machineklem; bril; haar vast, **geen handschoenen**, mouwen opgestroopt; boorkopsleutel eruit voor je start; spaanders wegvegen met een borsteltje als de boor stilstaat
lijmpistool	brandwonden: de lijm is tot ongeveer 190 °C heet en plakt aan je huid	pistool op zijn standaard; niet aan het mondstuk komen; lijmdraadjes pas wegnemen als ze koud zijn

gereedschap	gevaar	zo werk je veilig
soldeerbout	brandwonden (punt ongeveer 350 °C), rook van het vloeimiddel, spatjes tin	bout altijd in de houder; afzuiging of open raam; bril; draadjes in een klem, niet in je vingers; na afloop laten afkoelen in de houder; handen wassen

Machines in de werkplaats

Een kolomboor, decoupeerzaag of schuurmachine gebruik je pas na uitleg van de leerkracht, en nooit alleen in het lokaal. Weet waar de **noodstop** zit: een grote rode knop die alle machines in één keer stilzet.



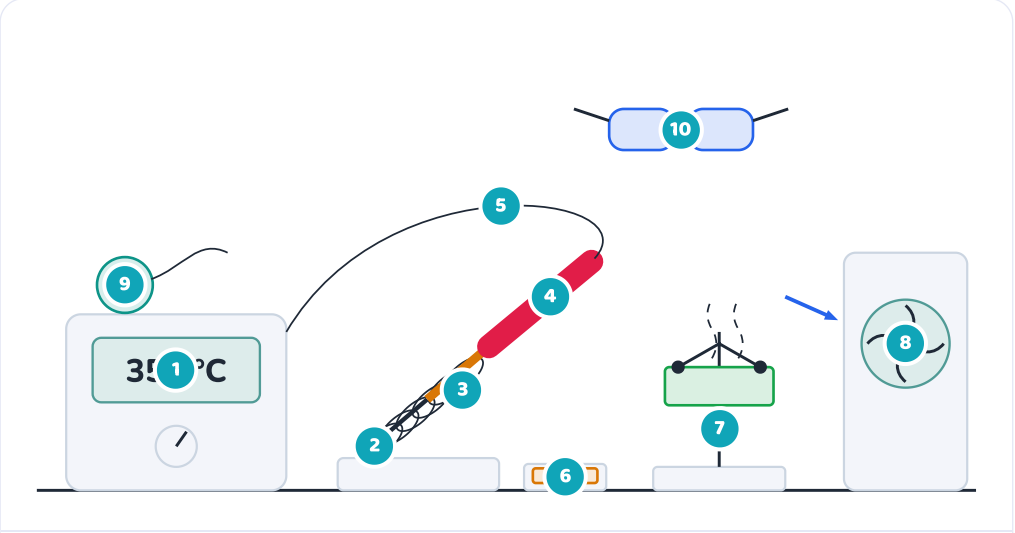
Het werkstuk zit vast, de vrije hand ligt ver van de zaagsnede.

ONTLEED · 5.10

Een veilige soldeerplek

10/17

Solderen verbindt draadjes met gesmolten metaal: het soldeertin smelt rond 220 °C (loodvrij), de punt van de bout is ongeveer 350 °C. Zo ziet een soldeerplek eruit waar dat veilig kan.



Station, houder, derde hand en afzuiging: elk onderdeel vangt een gevaar op.

1 Soldeerstation
Regelt de temperatuur van de punt. Hoger dan nodig maakt meer rook en slijt de punt sneller.

2 De punt
Ongeveer 350 °C. Het enige deel dat heet moet zijn, en het deel dat je nooit aanraakt.

3 Houder
Een metalen spiraal waar de bout tussendoor in rust. Een soldeerbout ligt nooit los op tafel, ook niet 'even'.

4 Handvat
Blijft koel. Hou de bout vast als een pen, zo ver mogelijk van de punt.

5 Snoer
Loopt weg van de punt en niet over de rand van de tafel: een snoer dat smelt of waaraan iemand blijft haken, is een ongeval.

6 Sponsje
Een vochtig sponsje (of messingwol) om de punt schoon te vegen, in een bakje: niet met je vingers.

7 Derde hand
Klemmen houden het printplaatje en de draadjes vast. Een draadje in je vingers wordt in enkele seconden heet: metaal geleidt warmte goed.

8 Afzuiging
De rook komt van het vloeimiddel in het soldeertin en irriteert ogen en luchtwegen. Een ventilator met filter trekt ze weg.

9 Soldeertin
Op school loodvrij: een vervanging die het gevaar van lood wegneemt (de S van het STOP-principe). Na het solderen toch handen wassen.

10 Veiligheidsbril
Een draadje dat je afknipt of een spatje tin kan wegspringen, recht naar je oog.

UITLEG · 5.11

Waarom 230 V anders is dan 5 V

11/17

Een USB-lader geeft 5 V, de meetkas werkt op 12 V, het stopcontact in België geeft **230 V** wisselspanning. Hoe gevaarlijk elektriciteit is, hangt af van de **stroom** die door je lichaam gaat, en die stroom hangt af van de spanning: hoe hoger de spanning, hoe harder ze de stroom door je lichaam duwt. In hoofdstuk 19 leer je de rekenregel:

$$\text{stroom} = \frac{\text{spanning}}{\text{weerstand}}$$

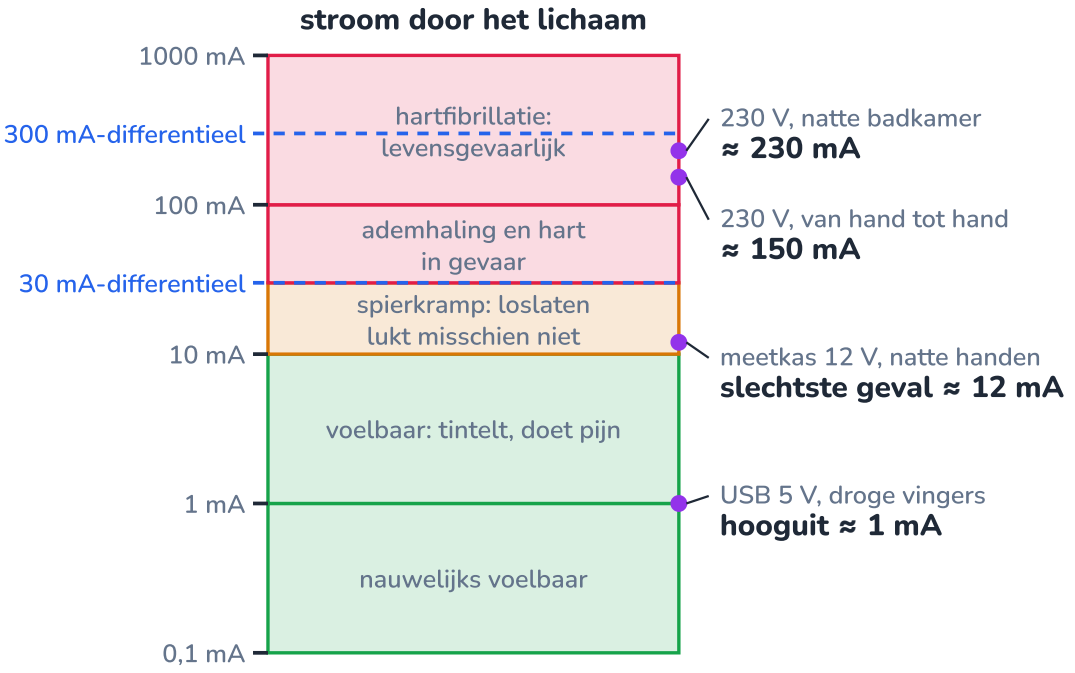
Je lichaam heeft een **weerstand** die vooral van je huid komt. Bij lage spanning is die groot: droge huid laat bij 5 V of 12 V nauwelijks stroom door. Bij 230 V breekt de huid als het ware door, en blijft er van hand tot hand maar ongeveer 1 à 2 kΩ over. Dan gaat er meer dan 100 mA door je lichaam, genoeg om je hart te ontregelen (figuur).

Spanningen tot 50 V wisselspanning of 120 V gelijkspanning heten in de techniek **zeer lage spanning**. De 5 V van USB en de 12 V van de meetkas horen daarbij: daarom werk je in StemExpert alleen met

zulke spanningen, en blijf je van 230 V weg. Aan een installatie op 230 V werkt alleen een elektricien, en ook die schakelt eerst de stroom af.

Lage spanning is altijd ongevaarlijk

Voor je *lichaam* is 12 V veilig, voor je *materiaal* niet altijd. Sluit je een batterij of een voeding kort (een draad rechtstreeks van plus naar min), dan loopt er een heel grote stroom: draden worden gloeiend heet, isolatie smelt, een lithiumbatterij kan vuur vatten. Daarom zit er een zekering in de kring (hoofdstuk 18).



Elke stap op de schaal is tien keer meer stroom. Richtwaarden voor wisselstroom van 50 Hz door het lichaam.

UITLEG · 5.12

Differentieel, zekering en aarding

12/17

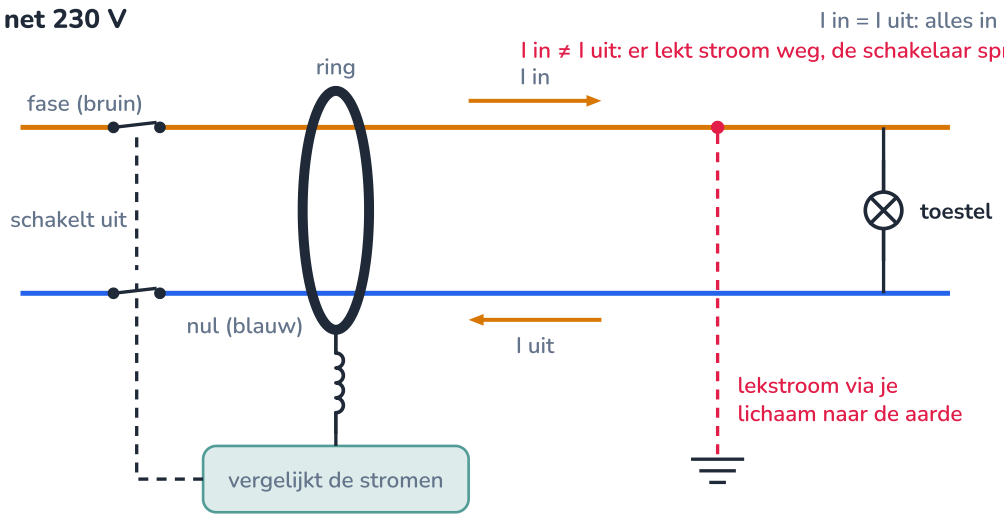
Een Belgische huisinstallatie heeft drie beveiligingen die elk iets anders doen:

- De **zekering** (of automaat) beschermt de **draden**: loopt er te veel stroom, bijvoorbeeld bij kortsluiting, dan schakelt ze af voor de draden te heet worden en brand veroorzaken. Voor jou als persoon doet ze weinig: ze reageert pas bij vele ampère.
- De **aarding** is een extra draad (geel-groen) die de metalen behuizing van een toestel met de aarde verbindt. Een Belgisch stopcontact heeft daarvoor een pen. Raakt een stroomvoerende draad de behuizing, dan vloeit de stroom via de aarding weg in plaats van via jou.
- De **differentieelschakelaar** beschermt **mensen**. Hij vergelijkt de stroom die via de fase naar een toestel gaat met de stroom die via de nul terugkomt. Normaal zijn die gelijk. Lekt er stroom weg, via een defect toestel of via iemands lichaam naar de aarde, dan is er een verschil, en schakelt hij binnen een fractie van een seconde af.

In België is een differentieel van **300 mA** aan het begin van de hele installatie verplicht. Voor de badkamer en toestellen als de wasmachine komt er een gevoeligere van **30 mA** bij: in een natte omgeving is de weerstand van je lichaam kleiner en de stroom dus groter. Druk af en toe op de testknop van je differentieel: hij moet dan meteen uitschakelen.

⚠ Een differentieel beschermt niet tegen alles

Hij schakelt ook niet meteen: je voelt de schok, maar die duurt te kort om je hart te ontregelen. En raak je de fase en de nul tegelijk aan, dan gaat de stroom door je lichaam en komt ze via de nul terug: de schakelaar ziet geen verschil en schakelt niet af. Werken aan 230 V blijft dus iets voor een elektricien, met de stroom af.



De ring meet het verschil tussen de stroom in de fase en in de nul. Is dat verschil groot genoeg, dan gaan de schakelaars open.

UITGEWERKT VOORBEELD · 5.13

Waarom de badkamer 30 mA nodig heeft

13/17

In een badkamer raakt iemand met natte handen en blote, natte voeten een defecte lamp aan die onder 230 V staat. De weerstand van zijn lichaam, van hand tot voeten, is in die toestand ongeveer 1 kΩ = 1000 Ω. (a) Hoe groot is de stroom door zijn lichaam? (b) Schakelt een differentieel van 300 mA af? (c) En een van 30 mA? (d) Wat besluit je?

GEGEVEN

- $U = 230\ \mathrm{V}$
- weerstand van het lichaam ongeveer $1000\ \Omega$
- differentiëlen van 300 mA en 30 mA

GEVRAAGD

- stroom door het lichaam
- welke differentieel afschakelt

OPLOSSING

1. (a) Stroom = spanning / weerstand: $230\ \mathrm{V} / 1000\ \Omega = 0{,}23\ \mathrm{A} = 230\ \mathrm{mA}$. Volgens de figuur van het vorige blad is dat levensgevaarlijk als het blijft duren.
2. (b) Deze stroom lekt via het lichaam naar de aarde en komt niet via de nul terug: dat is het verschil dat de differentieel ziet. $230\ \mathrm{mA}$ is **kleiner dan 300 mA**: een differentieel van 300 mA schakelt **niet** af.
3. (c) $230\ \mathrm{mA}$ is ruim **groter dan 30 mA**: de gevoelige differentieel schakelt binnen een fractie van een seconde af.
4. (d) De differentieel van 300 mA beschermt vooral tegen brand door lekstromen in de installatie; alleen de differentieel van 30 mA beschermt een persoon in een natte ruimte. Daarom is hij in de badkamer verplicht.

ANTWOORD

Ongeveer 230 mA; de 300 mA-differentieel schakelt niet af, de 30 mA-differentieel wel.

Klopt dit? Met droge handen en schoenen aan is de weerstand veel groter en de stroom kleiner, maar bij 230 V nog altijd gevaarlijk. De 1 kΩ is een orde van grootte: de echte waarde hangt af van hoe nat de huid is, hoe groot het contact en welke weg de stroom neemt.

UITLEG · 5.14

Risico's inschatten vóór je begint

14/17

Vakmensen denken na over wat er mis kan gaan *voor* ze beginnen, niet erna. Een eenvoudig hulpmiddel is de **risicotabel**:

1. Schrijf de **stappen** van je taak op.
2. Zoek bij elke stap de **gevaren**: wat kan snijden, branden, knellen, spatten, vallen, ontvlammen?
3. Geef elk gevaar een score voor **kans** (1 zelden, 2 soms, 3 vaak) en **ernst** (1 klein, 2 middel, 3 ernstig). Het **risico** is kans × ernst.
4. Beslis: 1 à 2 is **laag** (aanvaardbaar, wel opletten); 3 à 4 is **middel** (alleen met maatregelen); 6 à 9 is **hoog** (zo niet beginnen: eerst maatregelen, en vraag de leerkracht).
5. Kies **maatregelen** en schat het risico opnieuw: het **restrisico**.

Welke maatregel kies je eerst? Het **STOP-principe** geeft de volgorde: van de maatregel die het gevaar zelf wegneemt, naar de maatregel die alleen jou beschermt. Beschermingsmiddelen komen als laatste, omdat ze alleen werken als je ze draagt en als ze passen bij het gevaar.

stap	vraag	voorbeeld bij de meetkas
S: substitutie (vervangen)	Kan het gevaar weg, of kan iets minder gevaarlijks in de plaats?	loodvrij soldeertin; lijm op waterbasis in plaats van lijm met oplosmiddel; 12 V in plaats van 230 V
T: technische maatregel	Kan een toestel of een voorziening het gevaar afschermen?	houder voor de soldeerbout, afzuiging, werkstuk in een klem, afscherming op de boormachine
O: organisatorische maatregel	Welke afspraken, volgorde of opleiding helpen?	één leerling per machine, eerst uitleg van de leerkracht, opgeruimde werktafel, niet alleen werken
P: persoonlijke beschermingsmiddelen	Wat blijft er over, en hoe bescherm je jezelf?	veiligheidsbril, snijbestendige handschoen bij het snijden van polycarbonaat



Groen: aanvaardbaar. Oranje: alleen met maatregelen. Rood: zo niet beginnen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 5.15

Een risicotabel voor het solderen van de sensordraadjes

15/17

Voor de meetkas soldeer je drie draadjes aan een temperatuursensor. Maak een risicotabel, kies maatregelen met het STOP-principe en bepaal het restrisico.

GEGEVEN

- taak: draadjes solderen met een soldeerbout van 350 °C
- scores van 1 tot 3 voor kans en ernst

GEVRAAGD

- gevaren met risico, maatregelen, restrisico

OPLOSSING

1 **Gevaren en scores zonder maatregelen:**

GEVAAR	KANS	ERNST	RISICO
brandwonde aan de punt of aan een heet draadje	2	2	4 middel
spatje tin of afgeknipt draadje in het oog	2	3	6 hoog
rook van het vloeimiddel inademen	3	1	3 middel
brandje: bout tegen snoer of papier	1	3	3 middel
lood uit soldeertin	2	2	4 middel

2 **Maatregelen volgens STOP.** S: loodvrij soldeertin (het loodgevaar verdwijnt). T: houder, derde hand, afzuiging. O: opgeruimde tafel zonder papier, snoer weg van de punt, bout laten afkoelen in de houder. P: veiligheidsbril.

3 Restrisico:

GEVAAR	KANS	ERNST	RESTRISICO
brandwonde	1	2	2 laag
iets in het oog (met bril)	1	3	3 middel, met de bril aanvaardbaar
rook	1	1	1 laag
brandje	1	3	3 middel, met de maatregelen aanvaardbaar
lood	weggenomen door substitutie		

ANTWOORD

Met loodvrij tin, houder, derde hand, afzuiging, een opgeruimde tafel en een bril is geen enkel risico nog hoog.

Klopt dit? Een maatregel verlaagt meestal de *kans*, zelden de ernst: een oog blijft kwetsbaar, ook met een bril. Blijft een risico 'middel', dan mag je beginnen zolang de maatregelen echt genomen zijn. Zo'n tabel is ook een checklist: lees ze na vóór je de bout aanzet.

NASLAG · 5.16

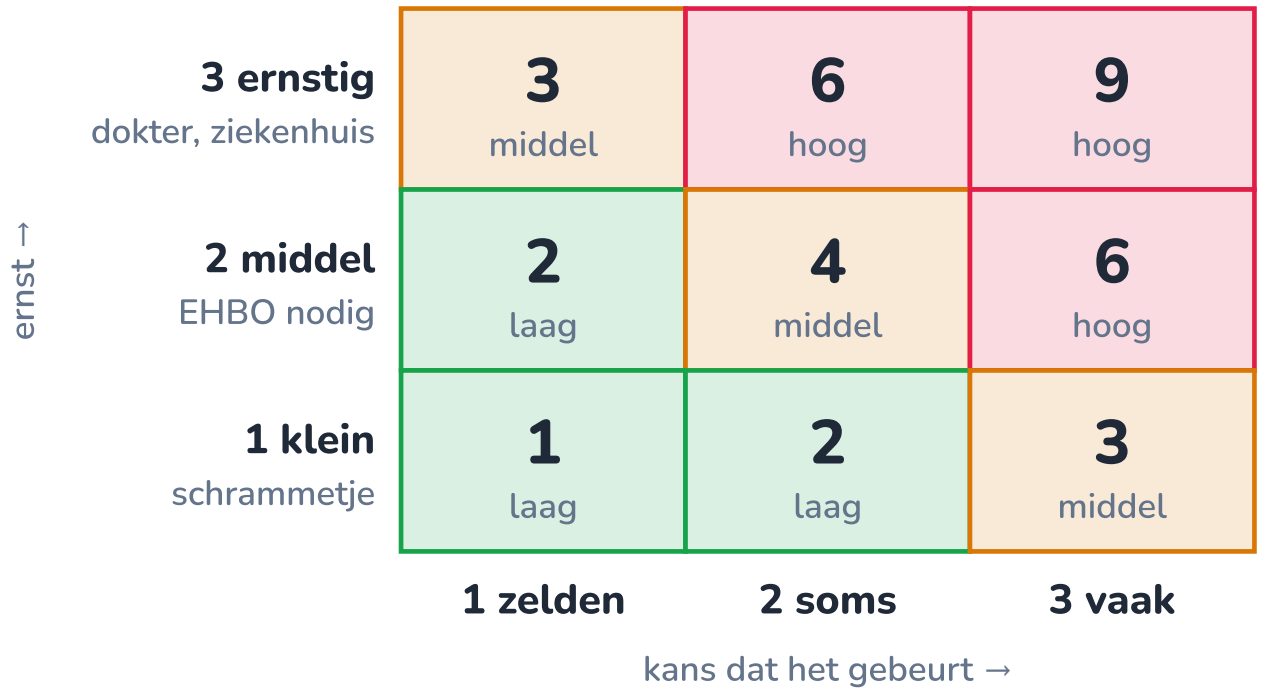
Overzicht: veilig werken

16/17

pictogram	betekenis	pictogram	betekenis
GHS01 bom	ontplofbaar	GHS06 doodshoofd	acuut giftig
GHS02 vlam	ontvlambaar	GHS07 uitroepteken	schadelijk, irriterend
GHS03 vlam boven cirkel	oxiderend	GHS08 silhouet met ster	ernstig gezondheidsgevaar
GHS04 gasfles	gas onder druk	GHS09 boom en vis	milieugevaarlijk
GHS05 bijtend	tast huid, ogen, metaal aan	signaalwoord	Gevaar (ernstiger) of Waarschuwing

noodnummer	wanneer
112	brand, ernstig ongeval, ziekenwagen (overal in Europa)
070 245 245	Antigifcentrum: iets ingeslikt, ingeademd of op de huid gekregen

onderwerp	onthoud
risico	kans × ernst (elk 1 tot 3); 1-2 laag, 3-4 middel, 6-9 hoog
STOP	Substitutie, Technisch, Organisatorisch, Persoonlijke bescherming: in die volgorde
brandwonde	20 minuten lauw stromend water
oog	oogdouche, minstens een kwartier spoelen
elektrische schok	eerst stroom uit, dan helpen
handschoenen	wel bij chemicaliën, nooit bij draaiende machines
spanning	5 V en 12 V: zeer lage spanning; 230 V: alleen voor de elektricien
beveiliging	zekering beschermt de draden; differentieel (300 mA woning, 30 mA badkamer) beschermt mensen; aarding voert lekstroom af



De risicotabel: kans × ernst.

HET GEHEEL · 5.17

Veiligheid door alle hoofdstukken heen

17/17

Veilig werken is geen apart vak: het komt terug in elke proef en elk project. In de leerlijn **Onderzoeken** hoort een risicotabel bij elk onderzoeksplan; in **Ontwerpen en maken** is veiligheid een eis in elk programma van eisen. Hoe hoger het niveau, hoe groter de gevaren (zuren, batterijen, netspanning, machines) en hoe grondiger de analyse: in Expert wordt de risicotabel een volledige faalanalyse van een systeem.

F1 Wat is STEM?
Engineering is ontwerpen binnen beperkingen, en veiligheid is de eerste beperking.

F4 Tabellen, grafieken en verbanden
De afkoelgrafiek van het lijmpistool lezen en interpoleren.

F8 Zuivere stoffen en mengsels
Stofeigenschappen zoals ontvlambaarheid en oplosbaarheid, en veilig werken met oplossingen.

F18 De elektrische kring
Kortsluiting en de zekering: waarom een kring beveiligd moet zijn.

F19 Spanning, stroom en weerstand
Stroom = spanning / weerstand: rekenen aan de stroom door je lichaam.

F32 Van idee tot object: CAD en 3D-printen
Een 3D-printer heeft een hete nozzle en een verwarmd bed: dezelfde gewoontes als bij de soldeerbout.

I15 Zuren, basen en pH
Werken met zuren en basen: bijtend, verdunnen, neutraliseren.

I16 Redox en batterijen
Lithiumbatterijen veilig laden, opslaan en kortsluiting vermijden.

E46 Betrouwbaarheid en risico
De FMEA: een risicotabel voor een heel systeem, met ook de kans dat je een fout op tijd ontdekt.

Habitat

De meetkas bouw je met zaag, cutter, boor, lijmpistool en soldeerbout, en er staat water naast elektriciteit. In opdracht 5.12 maak je de veiligheidsfiche voor de bouw: de stappen, de risico's, de maatregelen en wat je doet bij een ongeval. Ze gaat mee in je Habitat-portfolio en wordt aangevuld bij elk nieuw onderdeel.

SAMENVATTING

In het kort

- Een gevaar is wat schade kan doen; het risico is kans × ernst. Een gevaar blijft, een risico kan je verkleinen.
- De negen GHS-pictogrammen zijn zwarte symbolen in een witte ruit met een rode rand; het signaalwoord is Gevaar of Waarschuwing.
- Lees een etiket in de volgorde pictogram, signaalwoord, H-zinnen, P-zinnen.
- Laboregels hebben elk een reden; bril op, haar vast, niet eten, eerst het water dan het zuur.
- Handschoenen bij chemicaliën, nooit bij draaiende machines. Het werkstuk ligt vast, niet in je hand.
- Bij een ongeval: eigen veiligheid, alarm (leerkracht, 112, Antigifcentrum 070 245 245), eerste hulp. Een brandwonde koel je 20 minuten met lauw stromend water.
- 5 V en 12 V zijn zeer lage spanning; bij 230 V kan een levensgevaarlijke stroom door je lichaam gaan.
- De zekering beschermt de draden, de differentieel beschermt mensen: 300 mA voor de woning, 30 mA in de badkamer.
- Kies maatregelen met het STOP-principe: substitutie, technisch, organisatorisch, en pas dan persoonlijke bescherming.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

gevaar
Alles wat schade kan veroorzaken: een hete soldeerbout, een bijtende stof, een draaiende boor.

risico
Hoe groot de kans is dat een gevaar echt schade doet, samen met hoe erg die schade is; eenvoudig geschat als kans × ernst.

risicotabel
Een tabel met de kans op de ene as en de ernst op de andere; het product geeft aan of een risico laag, middel of hoog is.

GHS-pictogram
Een van de negen internationale gevarensymbolen: een zwart symbool in een witte ruit met een rode rand.

signaalwoord
Het woord op een etiket dat zegt hoe ernstig het gevaar is: 'Gevaar' (ernstiger) of 'Waarschuwing' (minder ernstig).

H-zin
Een gevarenaanduiding op een etiket (H van het Engelse hazard), bv. H225 Licht ontvlambare vloeistof en damp.

P-zin
Een veiligheidsaanbeveling op een etiket (P van precaution), bv. P210 Verwijderd houden van warmte ...

persoonlijk beschermingsmiddel (PBM)
Iets dat je draagt om jezelf te beschermen, zoals een veiligheidsbril, handschoenen of gehoorbescherming.

STOP-principe
Volgorde om maatregelen te kiezen: eerst Substitutie, dan Technische en Organisatorische maatregelen, als laatste Persoonlijke bescherming.

differentieelschakelaar
Schakelaar die de stroom afschakelt als er stroom weglekt, bijvoorbeeld via iemands lichaam naar de aarde; in België 300 mA voor de hele woning en 30 mA voor de badkamer.

zeer lage spanning
Spanning tot 50 V wisselspanning of 120 V gelijkspanning, zoals de 5 V van USB of de 12 V van de meetkas.

Antigifcentrum
Dienst die je dag en nacht kan bellen bij een vergiftiging: 070 245 245.

F FUNDAMENTAL · DEEL F2 · MATERIE EN MATERIALEN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 6

Het deeltjesmodel

Onzichtbaar kleine deeltjes die altijd bewegen: een model dat smelten, koken, uitzetten en condens verklaart

Waarom smelt ijs, waarom wordt een brug in de zomer langer, waarom ruik je soep tot in de gang, en waarom hangen er 's morgens druppels aan de binnenkant van de meetkas? Eén idee verklaart het allemaal: alle stoffen bestaan uit heel kleine **deeltjes** die voortdurend **bewegen**. In dit hoofdstuk leer je met dat **deeltjesmodel** de drie toestanden, de zes **faseovergangen**, **temperatuur**, **uitzetten** en **diffusie** verklaren, en je leert ook waar het model ophoudt.

8× uitleg · 3× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

M Materie en chemie · E Energie



Elke ochtend hangen er druppels aan de binnenkant van de meetkas. Waar komen ze vandaan?

Na dit hoofdstuk

- Je kan de afspraken van het deeltjesmodel opnoemen: deeltjes, lege ruimte, beweging, aantrekking.
- Je kan vaste stoffen, vloeistoffen en gassen beschrijven en hun eigenschappen verklaren met het deeltjesmodel, ook in een tekening.
- Je kan de zes faseovergangen benoemen, voorbeelden geven en zeggen of er energie bij moet of af gaat.
- Je kan uitleggen dat temperatuur een maat is voor hoe snel de deeltjes bewegen.
- Je kan een opwarm- of afkoelcurve lezen en uitleggen waarom de temperatuur tijdens een faseovergang gelijk blijft.
- Je kan uitzetten en krimpen verklaren en uitrekenen hoeveel een brug, een spoorstaaf of een plaat langer wordt.
- Je kan diffusie verklaren en uitleggen waarom ze sneller gaat bij een hogere temperatuur.
- Je kan uitleggen waar condens vandaan komt, en de grenzen van het deeltjesmodel benoemen.

VERHAAL · 6.1

Een dansend korreltje onder de microscoop

1/16

Al ongeveer 2400 jaar geleden stelde de Griekse denker **Democritus** dat alles bestaat uit piepkleine, ondeelbare deeltjes, die hij *atomos* noemde. Bewijzen kon hij het niet: hij had geen microscoop en deed geen proeven. Tweeduizend jaar lang bleef het een idee.

In 1827 bekeek de Schotse plantkundige **Robert Brown** onder zijn microscoop stuifmeelkorrels in een druppel water. Hij zag dat heel kleine korreltjes die uit het stuifmeel kwamen, voortdurend schokkerig heen en weer bewogen, zonder ooit te stoppen. Eerst dacht hij dat ze leefden. Maar hij zag precies dezelfde dans bij fijngemalen glas en gesteente, en die leven zeker niet. Brown kon de beweging niet verklaren; ze kreeg zijn naam: de **Brownse beweging**.

De verklaring kwam pas in **1905**, van de jonge **Albert Einstein**. Het water bestaat uit deeltjes die veel te klein zijn om te zien, en die voortdurend en van alle kanten tegen het korreltje botsen. Omdat die botsingen nooit precies in evenwicht zijn, wordt het korreltje nu eens de ene, dan weer de andere kant op geduwd. Einstein berekende hoe ver zo'n korreltje gemiddeld verschuift. De Franse natuurkundige **Jean Perrin** mat dat enkele jaren later nauwkeurig na, en haalde er zelfs de grootte van de deeltjes uit. Daarmee waren de laatste twijfelaars overtuigd. Perrin kreeg er in 1926 de Nobelprijs voor.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Niemand kan een watermolecule met het blote oog of een gewone microscoop zien. Toch weten we zeker dat ze bestaan, omdat een model (deeltjes die bewegen) een waarneming (een dansend korreltje) verklaart én een voorspelling doet die je kan nameten. Zo werkt wetenschap: dit hoofdstuk gaat over dat model.



Met een microscoop als deze zag Robert Brown in 1827 korreltjes dansen in een druppel water.

UITLEG · 6.2

Alles bestaat uit deeltjes

2/16

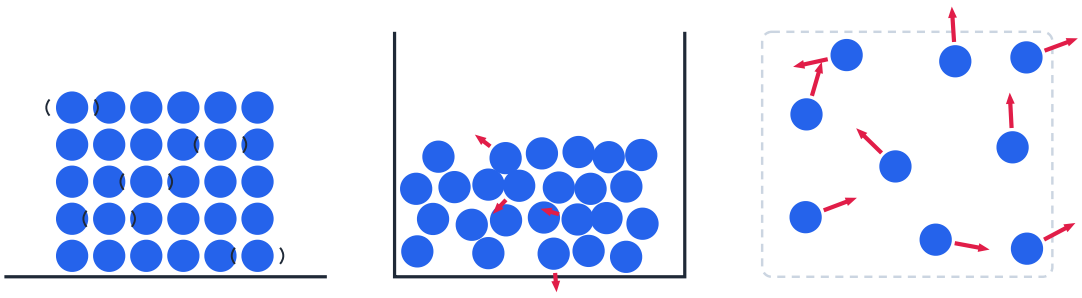
Het **deeltjesmodel** beschrijft elke stof met vier afspraken:

1. **Elke stof bestaat uit deeltjes.** Ze zijn onvoorstelbaar klein: een deeltje water (een **molecule**) is ongeveer 0,3 nanometer groot, drie tienmiljoenste van een millimeter (hoofdstuk 3). In één druppel water van 0,05 mL zitten er ongeveer $1{,}7 \cdot 10^{21}$: een 17 met twintig nullen, zo'n 200 miljard keer zoveel als er mensen op aarde zijn.
2. **Deeltjes van dezelfde zuivere stof zijn gelijk**; deeltjes van verschillende stoffen verschillen (in grootte, massa, vorm).
3. **Tussen de deeltjes is lege ruimte.** Daar zit niets: geen lucht, geen water, niets.
4. **De deeltjes bewegen altijd**, en ze **trekken elkaar aan**. Hoe dichter ze bij elkaar zijn, hoe sterker die aantrekking.

In tekeningen stellen we deeltjes voor als bolletjes. Dat is een afspraak: echte deeltjes hebben geen kleur en geen scherpe rand. Een model is een vereenvoudigde voorstelling die helpt om te redeneren en te voorspellen. Het is niet de werkelijkheid zelf (zie het blad over de grenzen van het model).

Tussen de deeltjes zit lucht

Tussen de deeltjes van water zit geen lucht, en tussen de deeltjes van lucht zit ook geen lucht: er zit **niets**. Lucht bestaat zelf uit deeltjes (vooral stikstof en zuurstof). Een lege ruimte zonder deeltjes heet een vacuüm.



Dezelfde deeltjes, drie manieren om samen te zijn. De pijltjes tonen de beweging, de boogjes het trillen.

UITLEG · 6.3

Vast, vloeibaar en gas

3/16

Een stof kan in drie **aggregatietoestanden** voorkomen: vast, vloeibaar of gas. Het verschil zit niet in de deeltjes zelf, maar in hoe ze samen zijn:

	vast	vloeibaar	gas
afstand	tegen elkaar, in een vaste orde	tegen elkaar, zonder orde	ver uit elkaar (in lucht gemiddeld zo'n tien keer hun eigen grootte)
beweging	trillen op hun plaats	schuiven langs elkaar	vliegen vrij rond en botsen
aantrekking	sterk	minder sterk	bijna geen
vorm	eigen vorm	vorm van het vat	vult het hele vat
volume	vast	vast	vult elke ruimte
samendrukbaar?	bijna niet	bijna niet	ja, makkelijk

Met het model verklaar je die eigenschappen. Een vaste stof houdt haar vorm, omdat de deeltjes op hun plaats blijven. Een vloeistof stroomt, omdat de deeltjes langs elkaar kunnen schuiven, maar ze blijft hetzelfde volume houden, omdat ze tegen elkaar blijven. Een gas kan je samendrukken (denk aan een fietspomp met je vinger op het gaatje), omdat er zoveel lege ruimte tussen de deeltjes is.

Hoe snel is een gasdeeltje?

Een deeltje zuurstof of stikstof in de lucht rond je vliegt bij kamertemperatuur gemiddeld ongeveer 500 meter per seconde: sneller dan een lijnvliegtuig. Toch komt het nergens snel, want het botst miljarden keren per seconde tegen andere deeltjes en verandert telkens van richting.



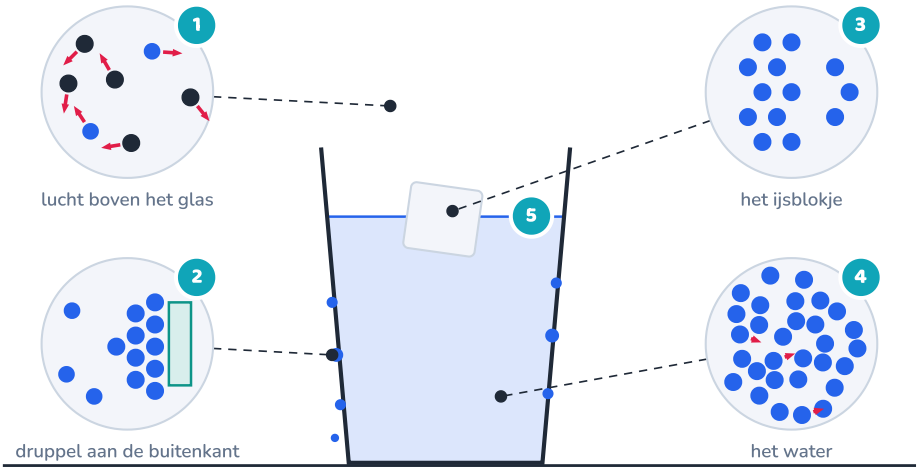
Water in drie toestanden naast elkaar. (De witte 'damp' boven de tuit is al weer gecondenseerd tot druppeltjes: echte waterdamp is onzichtbaar.)

ONTLEED · 6.4

Een glas ijswater, ingezoomd

4/16

Een glas water met een ijsblokje, op een warme dag. Het is één stof, water, in drie toestanden, met lucht erboven. Zoom in op vier plaatsen.



Blauw: waterdeeltjes; donker: deeltjes van lucht (stikstof en zuurstof). Sterk vereenvoudigd, en niet op schaal.

1 Lucht boven het glas
Een gas: deeltjes ver uit elkaar, snel bewegend. Er zit ook waterdamp tussen: onzichtbare waterdeeltjes die uit het glas zijn verdampt.

2 Een druppel aan de buitenkant
De koude glaswand koelt de lucht ertegen af. Waterdamp uit de lucht condenseert tot druppels. Het water komt niet door het glas.

3 Het ijsblokje
Vast: de deeltjes zitten in een vaste orde en trillen op hun plaats. Bij ijs is die orde vrij 'open', met meer ruimte dan in vloeibaar water: daarom drijft ijs (hoofdstuk 7).

4 Het water
Vloeibaar: de deeltjes raken elkaar, maar schuiven voortdurend langs elkaar. Aan het ijs nemen ze warmte op, en het ijs smelt.

5 Het wateroppervlak
Hier verdampen voortdurend deeltjes die net snel genoeg zijn om los te komen, ook al is het water ver onder 100 °C.

UITLEG · 6.5

Temperatuur: hoe snel de deeltjes bewegen

5/16

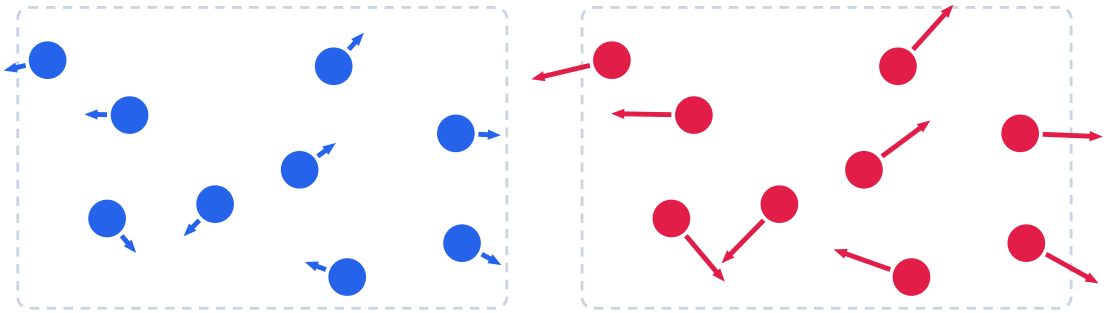
Wat meet een thermometer eigenlijk? In het deeltjesmodel is het antwoord eenvoudig: de **temperatuur** is een maat voor hoe snel de deeltjes gemiddeld bewegen. In warm water bewegen de waterdeeltjes sneller dan in koud water; in een warme vaste stof trillen de deeltjes heviger dan in een koude.

Niet alle deeltjes bewegen even snel: sommige zijn snel, andere traag, en door de botsingen verandert dat voortdurend. De temperatuur hoort bij het gemiddelde. Eén deeltje heeft dus geen temperatuur: het is niet warm of koud, het is snel of traag.

Hoe verder je afkoelt, hoe trager de deeltjes gaan. Bij **−273,15 °C** bewegen ze zo weinig als het maar kan. Kouder kan niet: dat heet het **absolute nulpunt**. De temperatuurschaal die daar begint, de kelvinschaal, leer je in hoofdstuk 16.

Een ijsdeeltje is koud

Een deeltje ijs, water of stoom is hetzelfde deeltje: een watermolecule. Het verschil tussen ijs en stoom zit in hoe snel de deeltjes bewegen en hoe ver ze uit elkaar zitten, niet in de deeltjes zelf. Ze worden ook niet groter, zachter of vloeibaar.



koud
de deeltjes bewegen trager

warm
de deeltjes bewegen sneller

Langere pijlen: snellere deeltjes. De temperatuur meet de gemiddelde snelheid.

UITLEG · 6.6

Zes faseovergangen

Verwarm je een stof, dan bewegen de deeltjes sneller. Op een bepaald moment zijn ze zo snel dat ze hun plaats in de vaste orde verlaten: de stof **smelt**. Nog sneller, en ze ontsnappen helemaal aan de aantrekking van hun buren: de stof **verdampt**. Koel je af, dan gebeurt het omgekeerde. Zo zijn er zes overgangen:

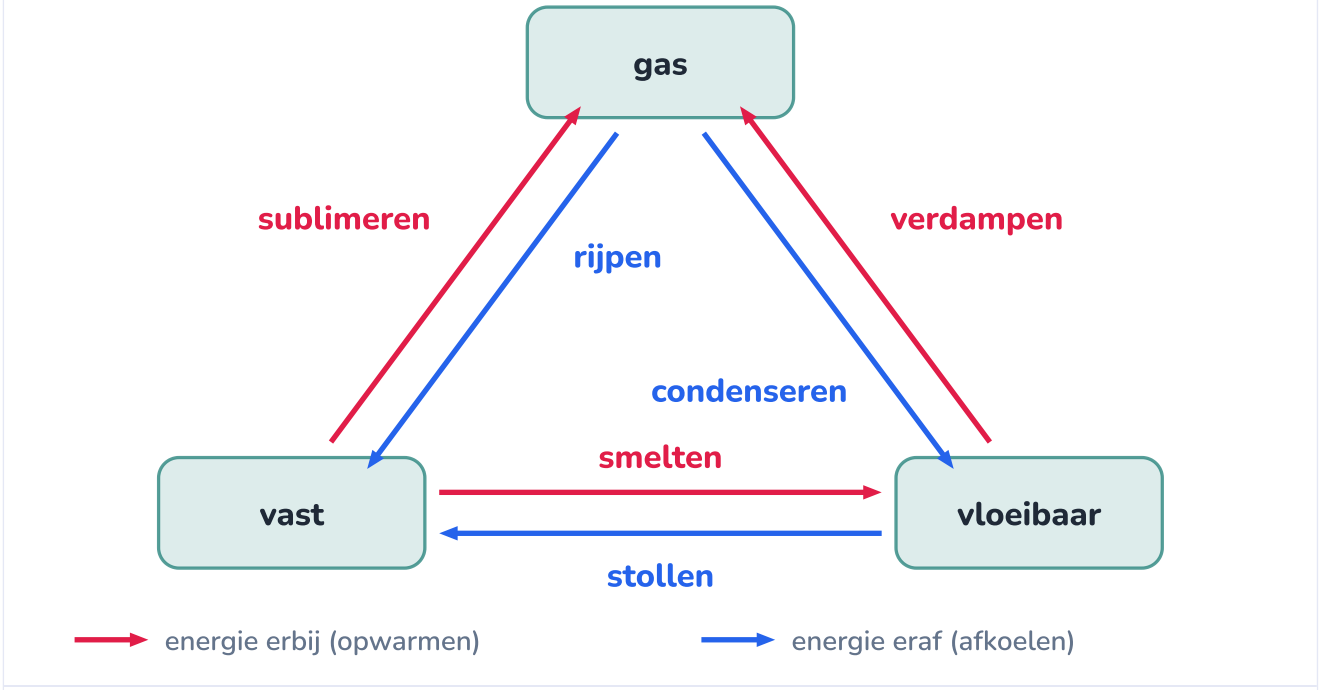
overgang	van	naar	energie	voorbeeld
smelten	vast	vloeibaar	erbij	ijsblokje in een glas; tin in een soldeerbout
stollen	vloeibaar	vast	eraf	water in de diepvries; kaarsvet dat hard wordt
verdampen	vloeibaar	gas	erbij	een plas die opdroogt; koken
condenseren	gas	vloeibaar	eraf	een beslagen spiegel; dauw; condens op de kaswand
sublimeren	vast	gas	erbij	droog ijs (vaste CO_2); bevroren wasgoed dat toch droogt
rijpen	gas	vast	eraf	rijp op het gras en op de autoruit; ijsbloemen

Verdampen en koken zijn niet hetzelfde. Verdampen gebeurt bij elke temperatuur, aan het oppervlak: de snelste deeltjes ontsnappen. Zo droogt een plas op, ook in de winter. **Koken** is verdampen in de hele vloeistof tegelijk, met dampbellen die opstijgen: dat gebeurt pas bij het **kookpunt** (voor water 100 °C bij normale luchtdruk). De temperatuur waarbij een stof smelt, is haar **smeltpunt** (voor water 0 °C); bij een zuivere stof is dat ook de temperatuur waarbij ze stolt.

Bij de overgangen naar een meer 'losse' toestand (smelten, verdampen, sublimeren) moet er **energie bij**: de deeltjes moeten zich losmaken van elkaar. Bij de omgekeerde overgangen komt die energie weer **vrij**. Daarom koelt zweet je af als het verdampt, en daarom verwarmt condenserende stoom je hand heel sterk: een brandwonde door stoom is erger dan een door water van 100 °C.

Als water verdampt, verdwijnt het

Het water verdwijnt niet: de deeltjes vliegen als onzichtbare waterdamp in de lucht rond. Koelt die lucht af tegen iets kouds, dan komen ze terug als druppels. Zo gaat er in de waterkringloop (hoofdstuk 28) geen druppel verloren.



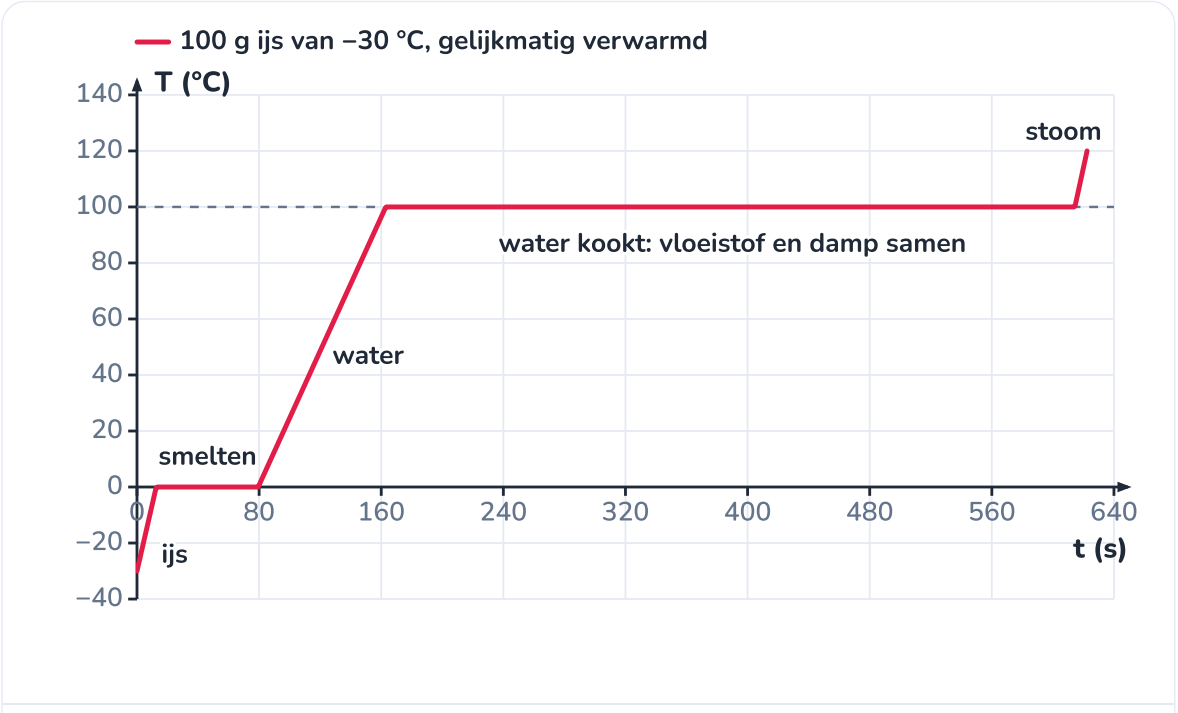
Rode pijlen: er moet energie bij. Blauwe pijlen: er komt energie vrij.

UITGEWERKT VOORBEELD · 6.7

De opwarmcurve van ijs lezen

7/16

Je verwarmt 100 g ijs van −30 °C met een verwarming die elke seconde evenveel warmte geeft, en er gaat geen warmte verloren. De grafiek toont de berekende temperatuur. (a) Wat gebeurt er in elk stuk van de grafiek? (b) Waarom blijft de temperatuur twee keer een tijd gelijk, hoewel je blijft verwarmen? (c) Welke overgang vraagt het meeste energie?



Twee vlakke stukken: bij 0 °C smelt het ijs, bij 100 °C kookt het water. Het koken duurt het langst.

GEGEVEN

- de opwarmcurve
- gelijkmatige verwarming: elke seconde evenveel warmte

GEVRAAGD

- de toestand in elk stuk
- de verklaring van de vlakke stukken
- welke overgang de meeste energie vraagt

OPLOSSING

1 (a) Van 0 tot ongeveer 13 s warmt het **ijs** op van −30 tot 0 °C. Van 13 tot 79 s blijft het 0 °C: het ijs **smelt**, er is ijs en water samen. Van 79 tot 163 s warmt het **water** op tot 100 °C. Van 163 tot 614 s blijft het 100 °C: het water **kookt**. Daarna warmt de **stoom** op.

2 (b) Tijdens het smelten en het koken gaat alle toegevoerde energie naar het losmaken van de deeltjes uit hun toestand, niet naar sneller bewegen. De gemiddelde snelheid, en dus de temperatuur, blijft gelijk tot alle ijs gesmolten of al het water verdampt is. Dat verklaart ook waarom de temperatuur in hoofdstuk 4 bij het koken op 100 °C bleef steken.

3 (c) Omdat er elke seconde evenveel warmte bijkomt, is de tijd een maat voor de energie. Smelten duurt $79 - 13 = 66$ s, koken $614 - 163 = 451$ s: bijna **zeven keer** zo lang. Verdampen vraagt veel meer energie dan smelten: bij het verdampen moeten de deeltjes helemaal los van elkaar, bij smelten alleen uit hun vaste orde.

ANTWOORD

IJs opwarmen, smelten (0 °C), water opwarmen, koken (100 °C), stoom opwarmen; tijdens een faseovergang gaat de energie naar het losmaken van de deeltjes; koken vraagt bijna zeven keer zoveel energie als smelten.

Klopt dit? Een echte meting ziet er minder strak uit: er gaat warmte verloren, en het water warmt niet overal even snel op. Maar de twee vlakke stukken bij 0 en 100 °C zie je altijd bij zuiver water. Bij een mengsel (zout water) liggen ze anders: dat onderzoek je in hoofdstuk 8.

PROEF · 6.8

Kleurstof in koud en in warm water

8/16

ONDERZOEKSVRAAG

Verspreidt een druppel kleurstof zich sneller in warm water dan in koud water?

MATERIAAL

twee gelijke bekerglazen of glazen potten · koud water uit de koelkast en warm water (hooguit 60 °C) · voedingskleurstof met een druppelteller · twee thermometers, stopwatch · wit blad als achtergrond

Veiligheid

Warm water van hooguit 60 °C, uit een waterkoker waarin het eerst wat is afgekoeld. Zet de glazen stevig neer.



Links koud, rechts warm water, één minuut na de druppel.

WERKWIJZE

1. Vul beide glazen met 200 mL water: het ene koud, het andere warm. Meet de temperatuur.
2. Wacht een minuut tot het water stil staat. Stoot daarna niet meer tegen de tafel.
3. Laat tegelijk in elk glas één druppel kleurstof vallen, vlak boven het water. Start de stopwatch. Roer niet.
4. Kijk elke minuut en noteer wat je ziet. Noteer de tijd tot het water overal even sterk gekleurd lijkt.

WAARNEMING

tijd	koud water (9 °C)	warm water (58 °C)
0 min	de druppel zakt als een sliert naar de bodem	de druppel zakt en waaiert meteen uit
1 min	een gekleurd laagje op de bodem, helder water erboven	een grote gekleurde wolk tot halverwege
5 min	het laagje wordt dikker, bovenaan nog helder	bijna overal gekleurd, bovenaan iets lichter
overal even sterk	na meer dan 20 min	na ongeveer 6 min

Voorbeeld van waarnemingen in een klas. In warm water verspreidt de kleur zich veel sneller.

VERKLARING

Zonder te roeren mengt de kleurstof toch met het water: de deeltjes van kleurstof en water bewegen voortdurend en botsen, zodat de kleurstofdeeltjes zich over het hele glas verspreiden. Dat heet **diffusie**. In warm water bewegen alle deeltjes sneller, dus gaat de diffusie sneller. In het warme glas helpen ook kleine stromingen mee (warm water beweegt omhoog, koeler water zakt), maar ook zonder die stromingen verloopt diffusie sneller bij een hogere temperatuur. De druppel zakt eerst naar beneden, omdat kleurstof met suiker of glycerine erin iets zwaarder is dan water.

UITLEG · 6.9

Diffusie: mengen zonder te roeren

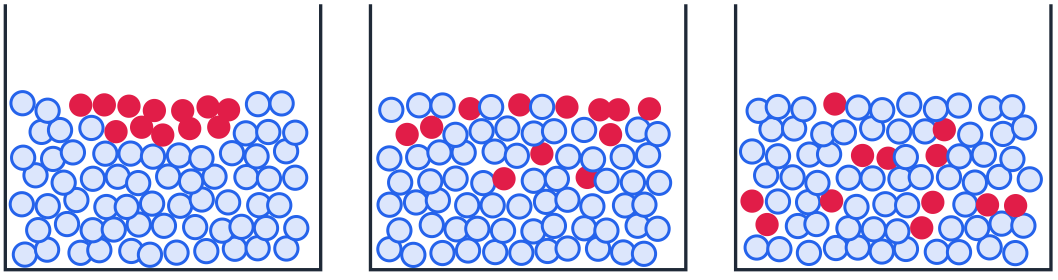
9/16

Diffusie is het vanzelf mengen van stoffen doordat hun deeltjes bewegen. De deeltjes gaan daarbij gemiddeld van de plaats waar er veel zijn naar de plaats waar er weinig zijn, tot ze overal even dicht verspreid zijn. Niemand duwt ze: het is gewoon het gevolg van miljarden botsingen in alle richtingen.

Hoe snel gaat het?

- **Warmer is sneller**: de deeltjes bewegen sneller (de proef).
- **In een gas sneller dan in een vloeistof**: gasdeeltjes zijn snel en hebben meer ruimte. In een vaste stof gaat diffusie zo traag dat je er jaren op moet wachten.
- Over **korte afstanden** gaat diffusie snel, over grote afstanden traag. Dat je de geur van soep tot in de gang ruikt, komt vooral door luchtstromingen; diffusie alleen zou er veel langer over doen.

Diffusie is overal in de natuur. Een theezakje kleurt het water, ook zonder roeren. Zuurstof gaat in je longen vanuit de lucht naar je bloed (hoofdstuk 29), en koolstofdioxide gaat door kleine openingen in een blad naar binnen (hoofdstuk 27). Over zulke kleine afstanden werkt diffusie razendsnel.



De rode kleurstofdeeltjes beginnen samen en raken door de botsingen over het hele glas verspreid.

UITLEG · 6.10

Uitzetten en krimpen

10/16

Warm je een stof op, dan bewegen de deeltjes heviger en duwen ze elkaar iets verder weg: de stof neemt meer ruimte in. Ze **zet uit**. Koelt ze af, dan **krimpt** ze. Dat geldt voor vaste stoffen, vloeistoffen en gassen:

- **Gassen** zetten het sterkst uit: een halflege ballon in de zon wordt bol.
- **Vloeistoffen** zetten minder uit: de vloeistof in een thermometer stijgt in het smalle buisje als ze warmer wordt. Zo werkt de thermometer uit hoofdstuk 3.
- **Vaste stoffen** zetten het minst uit, maar met enorme kracht: een stalen balk die niet kan uitzetten, duwt hard genoeg om beton te laten barsten.

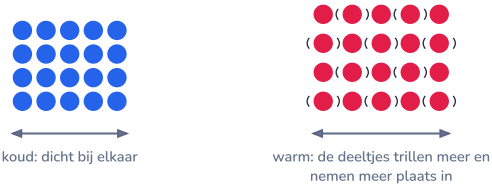
Daarom laten ingenieurs ruimte. In een **brug** zitten **voegen** (uitzettingsvoegen of dilatatievoegen): openingen tussen twee delen van het brugdek, vaak met 'vingers' die in elkaar grijpen. Rijd je over een brug, dan voel je ze als een kleine schok. Vroeger lieten spoorlopers kleine openingen tussen de **spoorstaven**: vandaar het 'tadam-tadam' van de trein. Vandaag worden spoorstaven meestal aan elkaar gelast en stevig vastgezet, zodat ze niet kunnen uitzetten; het staal zit dan onder spanning, en bij extreme hitte kan een spoor toch zijdelings uitknikken.

Hoeveel een stof uitzet, hangt af van het materiaal:

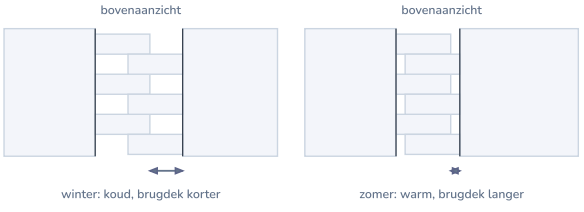
materiaal	een staaf van 1 m wordt per °C langer met
staal	0,012 mm
beton	0,012 mm
aluminium	0,023 mm
glas	0,009 mm
polycarbonaat	0,065 mm

De deeltjes worden groter

Bij uitzetten worden de deeltjes zelf niet groter: ze bewegen heviger en de afstand ertussen wordt groter. Het is dezelfde hoeveelheid stof, met dezelfde massa, in een groter volume.



Warmer: dezelfde deeltjes trillen heviger en staan iets verder uit elkaar. In werkelijkheid is het verschil veel kleiner.



De vingers van beide brugdelen schuiven in elkaar: in de zomer is de spleet klein, in de winter groot.

UITGEWERKT VOORBEELD · 6.11

Hoeveel langer worden een brug en een kasplaat?

11/16

(a) Een stalen brugdek is 80 m lang. Op een winternacht is het staal −20 °C, in de zomerzon kan het 50 °C worden. Hoeveel verschilt de lengte? (b) De lange wand van de meetkas is een plaat polycarbonaat van 1,20 m, vastgeschroefd op een aluminium frame. In de

kas varieert de temperatuur tussen −5 °C en 45 °C. Hoeveel verandert de lengte van de plaat, en van het frame? Wat betekent dat voor de schroeven?

GEGEVEN

- staal: 0,012 mm per m per °C; brug 80 m; van −20 tot 50 °C
- polycarbonaat: 0,065 mm per m per °C; aluminium: 0,023 mm per m per °C; 1,20 m; van −5 tot 45 °C

GEVRAAGD

- lengteverschil van de brug
- lengteverschil van plaat en frame

OPLOSSING

1. **Rekenregel**: verlenging = (verlenging per m per °C) × lengte in m × temperatuurverschil in °C.
2. (a) Temperatuurverschil: van −20 tot 50 °C is $50 - (-20) = 70$ °C. Verlenging: $0{,}012 \times 80 \times 70 = 67{,}2\,\text{mm}$, bijna 7 cm. De voeg moet dus minstens 7 cm kunnen openen en sluiten.
3. (b) Temperatuurverschil: $45 - (-5) = 50$ °C. Plaat: $0{,}065 \times 1{,}20 \times 50 = 3{,}9\,\text{mm}$. Frame: $0{,}023 \times 1{,}20 \times 50 \approx 1{,}4\,\text{mm}$.
4. De plaat verandert $3{,}9 - 1{,}4 = 2{,}5\,\text{mm}$ meer dan het frame. Schroef je ze aan beide uiteinden vast in krappe gaten, dan gaat de plaat in de zomer bol staan of scheurt ze rond de schroeven. De oplossing: gaten in de plaat die groter zijn dan de schroef (of sleufgaten), zodat de plaat kan schuiven.

ANTWOORD

(a) ongeveer 67 mm, bijna 7 cm; (b) plaat 3,9 mm, frame 1,4 mm: de plaat moet 2,5 mm ten opzichte van het frame kunnen bewegen.

Klopt dit? Een brug van 80 m die 7 cm verandert: dat is minder dan een duizendste van haar lengte, maar genoeg om beton te breken als er geen voeg is. Kunststof zet ongeveer vijf keer zoveel uit als staal: daarom schrijven fabrikanten van polycarbonaat grotere boorgaten voor.

UITLEG · 6.12

Condens op de kaswand

12/16

Op een heldere nacht koelt de meetkas af. 's Morgens hangen er druppels aan de binnenkant van de wanden en het dak. Lekt de kas? Nee: het water komt uit de lucht in de kas zelf.

Lucht bevat altijd wat onzichtbare **waterdamp**. In de kas is dat veel: de planten verdampen water door hun bladeren (hoofdstuk 27), en ook de natte grond en het reservoir verdampen water. Maar lucht kan niet onbeperkt waterdamp bevatten, en hoe kouder de lucht, hoe minder:

temperatuur (°C)	0	5	10	15	20	25	30
maximum waterdamp (g/m³)	4,8	6,8	9,4	12,8	17,3	23,0	30,3

's Avonds is de kaslucht 20 °C en bevat ze 12 g waterdamp per m³: ongeveer 70 % van het maximum (17,3 g/m³). 's Nachts koelt de wand af tot 10 °C. De lucht die tegen de wand afkoelt, kan bij 10 °C maar 9,4 g/m³ bevatten. De rest **condenseert**: de waterdeeltjes vertragen tegen de koude wand, blijven aan elkaar hangen en vormen druppels. De temperatuur waarbij dat begint, heet het **dauwpunt**: voor de kaslucht ongeveer 14 °C.

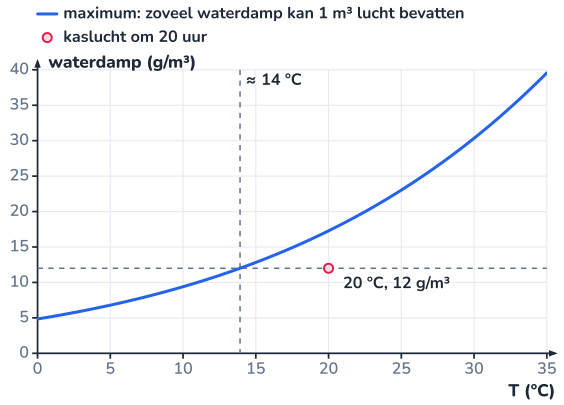
Is condens erg? Druppels houden licht tegen en vallen op de bladeren, waar ze schimmels een kans geven. Maar ze zijn ook nuttig: het water gaat niet verloren en druipt terug naar de grond. In een gesloten ruimte, zoals een ruimtestation, wordt condens net opgevangen en hergebruikt.

Het water komt door het glas

Een glas ijswater 'zweet' aan de buitenkant. Het water komt niet door het glas: kleur je het water blauw, dan zijn de druppels buiten toch kleurloos, en het glas wordt zelfs zwaarder. Het water komt uit de lucht die tegen het koude glas afkoelt (opdracht 6.9).



Warme, vochtige lucht binnen, een koude wand: de waterdamp condenseert aan de binnenkant.



Hoe kouder de lucht, hoe minder waterdamp ze kan bevatten. De kaslucht (rood punt) raakt de kromme bij ongeveer 14 °C.

UITGEWERKT VOORBEELD · 6.13

Hoeveel water condenseert er in de meetkas?

13/16

De meetkas bevat 576 L lucht (1,20 m × 0,60 m × 0,80 m). 's Avonds is de lucht 20 °C en bevat ze 12 g waterdamp per m³. (a) Hoeveel gram waterdamp zit er in de kaslucht? (b) Stel dat 's nachts alle kaslucht afkoelt tot 10 °C. Hoeveel water condenseert er dan? (c) De planten verbruiken samen ongeveer 1,8 L water per dag, en verdampen bijna alles daarvan. Wat besluit je?

GEGEVEN

- volume: $576\,\text{L} = 0{,}576\,\text{m}^3$
- 12 g/m³ waterdamp bij 20 °C
- maximum bij 10 °C: 9,4 g/m³
- verbruik van de planten: 1,8 L per dag

GEVRAAGD

- waterdamp in de kaslucht
- condens bij 10 °C
- besluit

OPLOSSING

1 (a) $12\,\text{g/m}^3 \times 0{,}576\,\text{m}^3 \approx 6{,}9\,\text{g}$ waterdamp: minder dan een eetlepel water.

2 (b) Bij 10 °C kan er maar 9,4 g/m³ in de lucht blijven. Per m³ condenseert $12 - 9{,}4 = 2{,}6\,\text{g}$. Voor de hele kas: $2{,}6 \times 0{,}576 \approx 1{,}5\,\text{g}$.

3 (c) De planten verdampen elke dag ongeveer 1,8 L = 1800 g water: honderden keren meer dan wat er op één moment in de lucht zit. De lucht is dus maar een tussenstation. In een gesloten kas komt het meeste verdampte water uiteindelijk als condens op de koude wanden terecht, vooral 's nachts en 's morgens.

ANTWOORD

(a) ongeveer 6,9 g; (b) ongeveer 1,5 g; (c) het meeste water van de planten komt via verdampen en condenseren terug: de kas is een kleine waterkringloop.

Klopt dit? De waarde 1,5 g lijkt klein naast de druppels die je 's morgens ziet. Dat klopt: de planten blijven ook 's nachts wat water verdampen, en de grond ook, zodat er voortdurend nieuwe waterdamp bijkomt die op de wand condenseert. Hoeveel precies, meet je in Intermediate met een vochtigheidssensor.

De grenzen van het deeltjesmodel

Het deeltjesmodel verklaart veel met weinig: toestanden, faseovergangen, uitzetten, diffusie, condens. Maar het is een model, en elk model heeft grenzen.

het model verklaart	het model verklaart niet
waarom een vaste stof haar vorm houdt en een gas elk vat vult	waarom water bij 0 °C smelt en ijzer pas bij 1538 °C: daarvoor moet je weten hoe sterk de deeltjes elkaar aantrekken, en waarom
waarom de temperatuur tijdens smelten en koken gelijk blijft	waarom water uitzet als het bevriest, terwijl bijna alle andere stoffen dan krimpen
uitzetten, krimpen, diffusie, condens	wat de deeltjes zelf zijn, waarom metalen stroom geleiden, waarom stoffen een kleur hebben
waarom een gas samendrukbaar is	chemische reacties, waarbij de deeltjes zelf veranderen

Het voorbeeld van water is opvallend. Volgens het eenvoudige model zitten de deeltjes in een vaste stof dichter op elkaar dan in de vloeistof, dus zou ijs moeten zinken. Toch drijft ijs, en een fles water die bevriest, barst. Watermoleculen hebben een vorm en een manier van binden waardoor ze in ijs een open rooster vormen. Dat leer je in Intermediate (hoofdstukken 12 en 13), met een uitgebreider model: atomen en moleculen.

Wees ook voorzichtig met tekeningen. Twintig bolletjes stellen geen glas water voor, waarin miljarden miljarden deeltjes zitten. In lucht staan de deeltjes gemiddeld zo'n tien keer hun eigen grootte uit elkaar, veel verder dan wij ze tekenen. En echte deeltjes zijn geen gekleurde knikkers.

Een model is gereedschap

Wetenschappers vragen niet of een model 'waar' is, maar of het werkt: verklaart het wat we zien, en voorspelt het iets wat we kunnen nameten? Werkt het niet meer, dan maken ze een beter model. Het deeltjesmodel is het eerste van een reeks, en het blijft handig, ook als je later de betere kent.



IJs drijft en een bevroren fles barst: water gedraagt zich anders dan het eenvoudige model voorspelt.

NASLAG · 6.15

Overzicht: het deeltjesmodel

15/16

afspraak van het model	gevolg
alles bestaat uit heel kleine deeltjes	een deeltje water is ongeveer 0,3 nm; één druppel bevat er ongeveer $1{,}7 \cdot 10^{21}$
deeltjes van één stof zijn gelijk	ijs, water en stoom bestaan uit dezelfde deeltjes
tussen de deeltjes is lege ruimte	gassen zijn samendrukbaar; tussen de deeltjes zit geen lucht
deeltjes bewegen altijd	temperatuur = hoe snel ze gemiddeld bewegen; diffusie
deeltjes trekken elkaar aan	vaste stoffen en vloeistoffen houden samen; energie nodig om te smelten en te verdampen

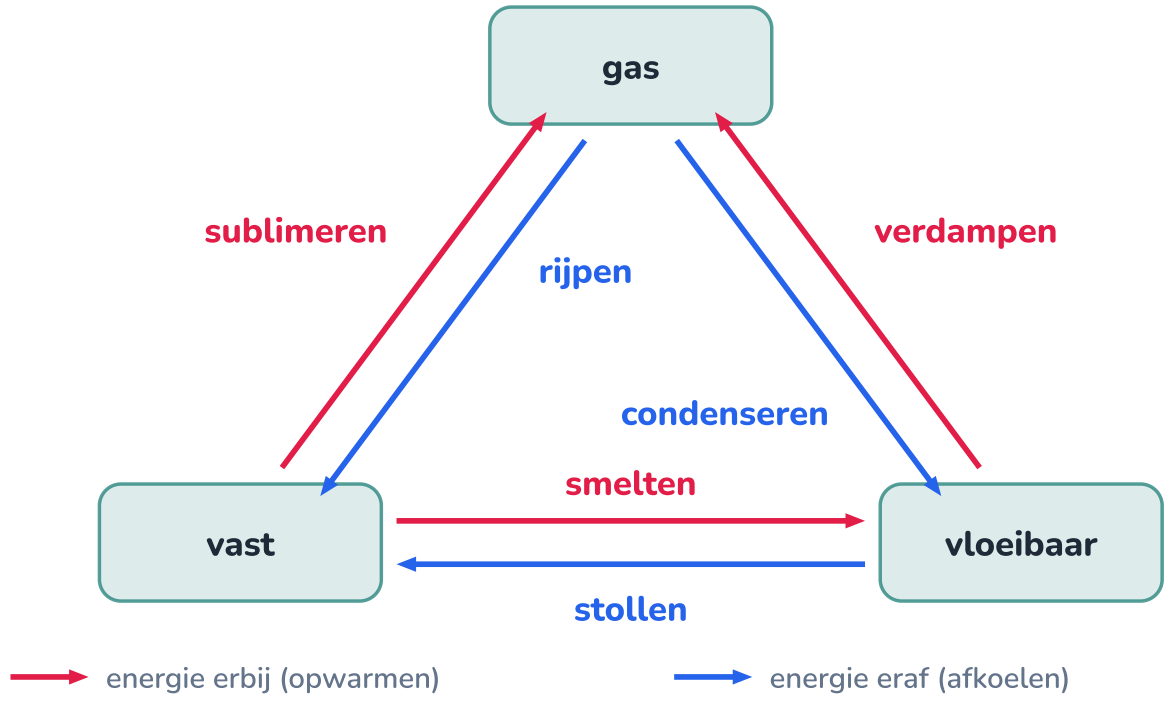
overgang	van	naar	energie	voorbeeld
smelten	vast	vloeibaar	erbij	ijsblokje in een glas; tin in een soldeerbout
stollen	vloeibaar	vast	eraf	water in de diepvries; kaarsvet dat hard wordt
verdampen	vloeibaar	gas	erbij	een plas die opdroogt; koken
condenseren	gas	vloeibaar	eraf	een beslagen spiegel; dauw; condens op de kaswand
sublimeren	vast	gas	erbij	droog ijs (vaste CO_2); bevroren wasgoed dat toch droogt
rijpen	gas	vast	eraf	rijp op het gras en op de autoruit; ijsbloemen

stof	smeltpunt (°C)	kookpunt (°C)
water	0	100
ethanol (alcohol)	−114	78
zuurstof	−218	−183
ijzer	1538	2862
koolstofdioxide	sublimeert bij −78,5 °C	

Bij normale luchtdruk. Het absolute nulpunt is −273,15 °C.

materiaal	een staaf van 1 m wordt per °C langer met
staal	0,012 mm
beton	0,012 mm
aluminium	0,023 mm
glas	0,009 mm
polycarbonaat	0,065 mm

temperatuur (°C)	0	5	10	15	20	25	30
maximum waterdamp (g/m³)	4,8	6,8	9,4	12,8	17,3	23,0	30,3



De zes faseovergangen: rood met energie erbij, blauw met energie eraf.

HET GEHEEL · 6.16

Waar het deeltjesmodel naartoe leidt

16/16

Het deeltjesmodel is de basis van de leerlijn **Materie en chemie**. In Fundamental gebruik je het om dichtheid, mengsels en scheidingstechnieken te verklaren. In Intermediate krijgen de deeltjes een naam

en een binnenkant: atomen, moleculen, ionen, en de bindingen ertussen, zodat je ook smeltpunten, geleiding en reacties begrijpt. In Expert reken je met de beweging van de deeltjes zelf: de kinetische gastheorie verbindt de druk en de temperatuur van een gas met de snelheid van zijn deeltjes. Via temperatuur en faseovergangen raakt het model ook de leerlijn **Energie**.

F4 Tabellen, grafieken en verbanden
De opwarmgrafiek met het vlakke stuk bij 100 °C, en waarom extrapoleren daar misloopt.

F7 Massa, volume en dichtheid
Dichtheid en waarom ijs drijft: de deeltjes van ijs zitten verder uit elkaar.

F8 Zuivere stoffen en mengsels
Smelt- en kookpunt als stofeigenschap, en de curves van een zuivere stof en een mengsel.

F9 Mengsels scheiden
Indampen en destilleren: scheiden met verdampen en condenseren.

F16 Warmte en temperatuur
Warmte en temperatuur, de kelvinschaal, en warmtegeleiding verklaard met trillende deeltjes.

F27 Planten: fotosynthese en groei
Verdamping door de bladeren: waar de waterdamp in de kas vandaan komt.

F28 Ecosystemen en kringlopen
De waterkringloop: verdampen, condenseren en neerslag op wereldschaal.

I12 Atomen en het periodiek systeem
Wat de deeltjes zijn: atomen en moleculen.

I13 Chemische bindingen en stofeigenschappen
Waarom water zo bijzonder is en waarom ijs drijft.

I18 Warmte berekenen
De energie van smelten en verdampen berekenen: de lengte van de vlakke stukken in de opwarmcurve.

E14 Gassen en de gaswetten
De kinetische gastheorie, luchtvochtigheid en het dauwpunt, nu kwantitatief.

Habitat
Condens is een van de eerste dingen die je in de meetkas ziet. In opdracht 6.11 bereken je hoeveel water er condenseert en bedenk je maatregelen: verluchten, isoleren, of het water net opvangen. Noteer in je portfolio ook de uitzetting van de platen (2,5 mm meer dan het frame): bij de werktekening in hoofdstuk 31 teken je de gaten groot genoeg.

SAMENVATTING
In het kort

- Alle stoffen bestaan uit heel kleine deeltjes met lege ruimte ertussen; de deeltjes bewegen altijd en trekken elkaar aan.
- Vast: deeltjes in een vaste orde, trillend. Vloeibaar: tegen elkaar, schuivend. Gas: ver uit elkaar, vrij vliegend.
- Zes faseovergangen: smelten, stollen, verdampen, condenseren, sublimeren, rijpen. Naar een lossere toestand moet er energie bij.
- Temperatuur is een maat voor hoe snel de deeltjes gemiddeld bewegen; het absolute nulpunt is −273,15 °C.
- Tijdens smelten en koken blijft de temperatuur gelijk: de energie gaat naar het losmaken van de deeltjes.
- Opwarmen doet stoffen uitzetten, omdat de deeltjes meer ruimte innemen; de deeltjes zelf worden niet groter. Daarom hebben bruggen voegen.
- Diffusie is mengen door de beweging van de deeltjes; ze gaat sneller bij een hogere temperatuur en in gassen.
- Condens ontstaat als vochtige lucht afkoelt tegen een koud oppervlak, onder haar dauwpunt.
- Het deeltjesmodel is een model: het verklaart niet waarom ijs drijft of waarom stoffen verschillende smeltpunten hebben.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

deeltjesmodel
Een model waarin elke stof bestaat uit heel kleine deeltjes met lege ruimte ertussen, die altijd bewegen en elkaar aantrekken.

aggregatietoestand
De toestand waarin een stof zich bevindt: vast, vloeibaar of gas.

faseovergang
Het overgaan van een stof van de ene toestand naar een andere, zoals smelten of condenseren.

smelten
Van vast naar vloeibaar; er moet energie bij. Het omgekeerde is stollen.

verdampen
Van vloeibaar naar gas; er moet energie bij. Gebeurt aan het oppervlak bij elke temperatuur; koken is verdampen in de hele vloeistof bij het kookpunt.

condenseren
Van gas naar vloeibaar; er gaat energie af. Zo ontstaan dauw, een beslagen spiegel en condens op een koude wand.

sublimeren
Van vast rechtstreeks naar gas, zonder te smelten; bv. droog ijs.

rijpen
Van gas rechtstreeks naar vast; bv. rijp op het gras.

temperatuur
Een maat voor hoe snel de deeltjes van een stof gemiddeld bewegen.

absoluut nulpunt
De laagst mogelijke temperatuur, −273,15 °C: de deeltjes bewegen dan zo weinig als mogelijk.

uitzetten
Groter worden door opwarmen, omdat de deeltjes meer bewegen en meer ruimte innemen; de deeltjes zelf worden niet groter.

diffusie
Het vanzelf mengen van stoffen doordat hun deeltjes bewegen, van waar veel deeltjes zijn naar waar er weinig zijn.

dauwpunt
De temperatuur waarbij lucht zoveel waterdamp bevat als ze maximaal kan bevatten; kouder dan dat condenseert er water.

Brownse beweging
Het schokkerig bewegen van kleine korreltjes in water of lucht, doordat onzichtbare deeltjes er van alle kanten tegenaan botsen.

F FUNDAMENTAL · DEEL F2 · MATERIE EN MATERIALEN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 7

Massa, volume en dichtheid

Waarom een boomstam drijft en een paperclip zinkt, en hoe je een stof herkent zonder ze te proeven

Een kilogram kurk en een kilogram lood zijn even zwaar, maar het kurk neemt bijna zestig keer zoveel plaats in. Het verschil zit in de **dichtheid**: hoeveel massa er in elke kubieke centimeter zit. In dit hoofdstuk meet je **massa** en **volume**, ook van voorwerpen met een grillige vorm, reken je met $\rho = m/V$ in drie richtingen, voorspel je wat zinkt, zweeft of drijft, en ontdek je waarom ijs op water drijft, terwijl bijna alle andere vaste stoffen in hun eigen vloeistof zinken.

5× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 2× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

M Materie en chemie · W Wiskundig modelleren · O Onderzoeken en meten



Het grootste deel van een ijsberg zit onder water. Hoe groot dat deel is, volgt uit twee dichtheden.

Na dit hoofdstuk

- Je kan de massa van een voorwerp meten met een balans en het volume bepalen met een lat, een maatcilinder of door onderdompelen.
- Je kan uitleggen wat dichtheid is en ze berekenen met $\rho = m/V$, met de juiste eenheid.
- Je kan dichtheden omzetten tussen g/cm³, g/mL, kg/L en kg/m³.
- Je kan met de formule ook de massa of het volume berekenen als de andere twee gegeven zijn.
- Je kan uit een (V, m)-grafiek de dichtheid halen als de helling van de rechte.
- Je kan met dichtheden voorspellen of een voorwerp zinkt, zweeft of drijft, en uitleggen waarom een stalen schip drijft.
- Je kan uitleggen waarom ijs op water drijft en wat dat betekent voor meren, flessen en ijsbergen.
- Je kan een stof herkennen aan haar dichtheid, en uitleggen waarom één meting daarvoor niet altijd genoeg is.

VERHAAL · 7.1

Archimedes en de gouden krans

1/15

Rond 250 voor Christus regeerde koning **Hiëro II** over Syracuse, een Griekse stad op Sicilië. Hij gaf een goudsmid een afgewogen hoeveelheid goud om er een krans voor de goden van te maken. De krans die terugkwam, woog precies evenveel als het goud. Toch ging het gerucht dat de goudsmid een deel van

het goud had gehouden en er goedkoper zilver door had gemengd. Hoe bewijs je dat, zonder de krans te beschadigen?

De koning vroeg het aan **Archimedes**, de beroemdste denker van de stad. Volgens het verhaal zag Archimedes in een openbaar bad het water over de rand stromen toen hij in de kuip stapte. Hij besefte dat een voorwerp dat onder water gaat, evenveel water opzij duwt als zijn eigen volume. Hij zou zo blij geweest zijn dat hij naakt naar huis liep en riep: '*Eureka!*' (Grieks voor 'ik heb het gevonden').

Zijn plan: zilver is lichter dan goud, dus neemt een kilo zilver meer plaats in dan een kilo goud. Een krans met zilver erin heeft bij dezelfde massa een groter volume dan een krans van zuiver goud, en duwt dus meer water over de rand. Archimedes liet een vat tot de rand vol water lopen, dompelde er een klomp zuiver goud in met dezelfde massa als de krans, en daarna de krans zelf. De krans duwde meer water weg: er zat zilver in.

Legende of geschiedenis?

Archimedes zelf heeft dit verhaal nergens opgeschreven. We kennen het van de Romeinse architect **Vitruvius**, die het ongeveer 200 jaar later vertelde. Het is dus een **legende**. In 1586 rekende de 22-jarige **Galileo Galilei** het na in een kort geschrift, *La bilancetta* ('het weegschaaltje'): bij een krans van een kilo zou het verschil in water maar enkele kubieke centimeter zijn, te weinig om met een vat en het oog te zien. Galilei dacht dat Archimedes eerder een balans gebruikte, met de krans onder water. Je rekent het zelf na in opdracht 7.13. Het idee achter het verhaal klopt wel: elke stof heeft haar eigen **dichtheid**, en daaraan kan je ze herkennen.



Een krans, een vat vol water en een balans: het gereedschap uit de legende van Archimedes.

UITLEG · 7.2

Massa en volume: twee verschillende dingen

In hoofdstuk 3 leerde je twee grootheden meten die in dit hoofdstuk samenkomen:

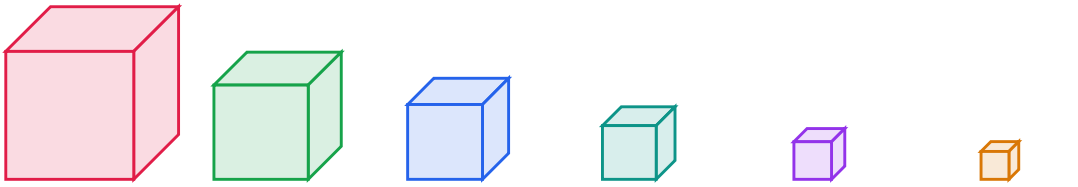
- De **massa** m zegt hoeveel stof er in een voorwerp zit. Je meet ze met een **balans**, in kilogram (kg) of gram (g). Zet de balans eerst op nul met het lege bakje erop (tarreren).
- Het **volume** V zegt hoeveel ruimte het voorwerp inneemt, in m³, dm³ (= L) of cm³ (= mL). Van een blok met rechte hoeken bereken je het: $V = l \cdot b \cdot h$. Van een vloeistof lees je het af op een **maatcilinder**, op ooghoogte, aan de onderkant van de meniscus.

Massa en volume hangen niet vanzelf samen. De zes blokken in de figuur hebben allemaal een massa van 100 g, maar het blok kurk is bijna honderd keer zo groot als het blok goud. 'Zwaar' en 'groot' zijn dus niet hetzelfde. Om stoffen te vergelijken, heb je een grootheid nodig die massa en volume samen bekijkt: de **dichtheid**.

Wat weegt meer: een kilo lood of een kilo veren?

Ze zijn even zwaar: allebei een kilogram. Het lood is wel veel kleiner. Wie 'lood is zwaarder' zegt, bedoelt eigenlijk: een even groot stuk lood heeft een grotere massa. Dat is precies wat dichtheid uitdrukt.

Zes blokken van elk 100 g



kurk	dennenhout	water	aluminium	ijzer	goud
V = 500 cm³	V = 200 cm³	V = 100 cm³	V = 37 cm³	V = 13 cm³	V = 5,2 cm³
ρ = 0,2 g/cm³	ρ = 0,5 g/cm³	ρ = 1,00 g/cm³	ρ = 2,70 g/cm³	ρ = 7,87 g/cm³	ρ = 19,3 g/cm³

Evenveel massa, heel verschillende volumes. De blokken zijn op schaal getekend.

UITLEG · 7.3

Het volume van een grillig voorwerp: onderdompelen

Een steen, een sleutel of een krans heeft geen rechte hoeken: $l \cdot b \cdot h$ werkt niet. Dan gebruik je water. Een voorwerp dat helemaal onder water gaat, neemt de plaats in van evenveel water. Twee manieren:

1. **Verschilmethode** met een maatcilinder. Giet water in de maatcilinder en lees het volume af (figuur, 1). Laat het voorwerp aan een draadje voorzichtig in het water zakken en lees opnieuw af (2). Het volume van het voorwerp is het verschil: $V = 78\,\text{mL} - 60\,\text{mL} = 18\,\text{mL} = 18\,\text{cm}^3$.
2. **Overloopvat** voor grotere voorwerpen die niet in een maatcilinder passen. Vul het vat tot het water uit het tuitje begint te lopen en wacht tot het stopt. Zet een maatbeker onder het tuitje en laat het voorwerp in het vat zakken. Het water dat overloopt, heeft hetzelfde volume als het voorwerp (3).

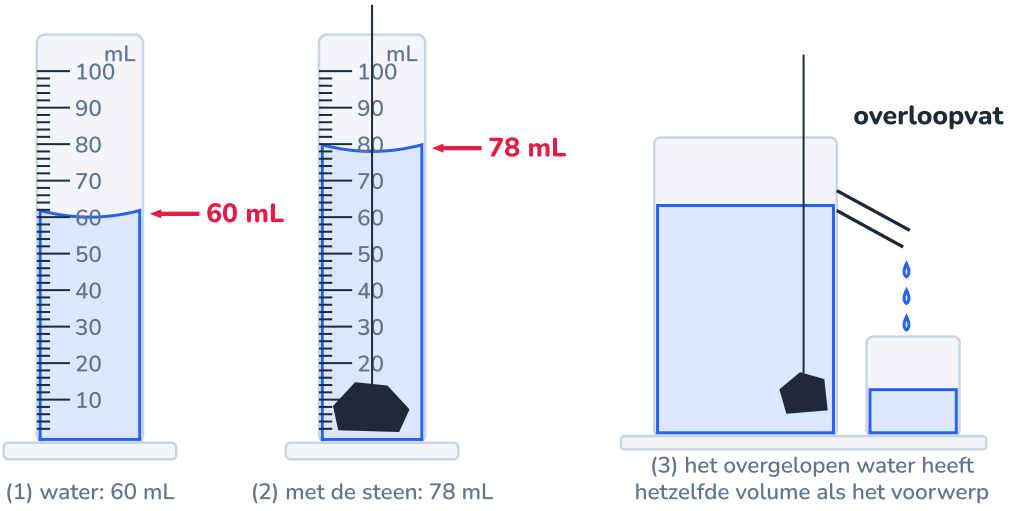
Enkele regels voor een goede meting:

- Het voorwerp moet **helemaal** onder water zitten, maar het water mag niet over de rand van de maatcilinder komen.
- Tik zacht tegen het glas zodat **luchtbelletjes** loskomen: een belletje telt anders mee als volume.
- Het voorwerp mag geen water opzuigen (hout, spons, poreuze steen) en niet oplossen (suiker, zout).

- Kies een maatcilinder die past: hoe smaller, hoe fijner de verdeling en hoe nauwkeuriger. Een voorwerp van 2 cm³ meet je niet in een cilinder van 1 L.

En als het voorwerp drijft?

Een stuk kaars of hout drijft. Duw het met een dunne naald helemaal onder water: het volume van de naald zelf is zo klein dat je het mag verwaarlozen. Of bind er een zwaar voorwerp aan (een zinker) waarvan je het volume al kent, en trek dat af.



Links de verschilmethode (78 − 60 = 18 mL), rechts het overloopvat: het water dat overloopt, is even groot als het voorwerp.

UITGEWERKT VOORBEELD · 7.4

Een steen onder water

4/15

Een leerling wil weten hoeveel ruimte een steen uit de tuin inneemt, en hoe zwaar hij is voor zijn grootte. Ze weegt de steen: 47,7 g. In een maatcilinder van 100 mL giet ze 60 mL water. Met de steen erin staat het water op 78 mL. (a) Wat is het volume van de steen? (b) Hoeveel gram weegt elke kubieke centimeter van de steen?

GEGEVEN

- $m = 47{,}7\,\text{g}$
- water alleen: $60\,\text{mL}$
- water met steen: $78\,\text{mL}$

GEVRAAGD

- volume V van de steen
- massa per cm³

OPLOSSING

1. (a) Het water steeg omdat de steen plaats inneemt: $V = 78\,\text{mL} - 60\,\text{mL} = 18\,\text{mL}$.
2. Omzetten: $1\,\text{mL} = 1\,\text{cm}^3$, dus $V = 18\,\text{cm}^3$.
3. (b) De massa verdeeld over de kubieke centimeters: $47{,}7\,\text{g} / 18\,\text{cm}^3 = 2{,}65\,\text{g}$ per cm³.

ANTWOORD

(a) $18\,\text{cm}^3$; (b) elke kubieke centimeter steen heeft een massa van ongeveer $2{,}65\,\text{g}$.

Klopt dit? De steen is zwaarder dan water (1 g per cm³), wat klopt: hij zinkt. Het getal 2,65 is precies wat het volgende blad de dichtheid noemt. Veel stenen, zoals graniet en zandsteen, zitten rond 2,6 à 2,7.

UITLEG · 7.5

Dichtheid: hoeveel massa in elke kubieke centimeter

5/15

De **dichtheid** van een stof is de massa van één volume-eenheid ervan: hoeveel gram er in één kubieke centimeter zit, of hoeveel kilogram in één kubieke meter. Je berekent ze door de massa te delen door het volume. Het symbool is de Griekse letter ρ (spreek uit: rho).

DICHTHEID

$$\rho = \frac{m}{V}$$

m in g en V in cm³ geeft ρ in g/cm³; m in kg en V in m³ geeft ρ in kg/m³.

Dichtheid is een **verhouding**, net als de evenredigheidsconstante in hoofdstuk 4: massa en volume van dezelfde stof zijn recht evenredig. Een twee keer zo groot stuk aluminium is twee keer zo zwaar; de dichtheid blijft 2,70 g/cm³. Zaag je een blok doormidden, dan halveren massa en volume, en verandert de dichtheid niet. Daarom is dichtheid een **stofeigenschap**: ze hoort bij de stof, niet bij het voorwerp. Massa, volume en vorm zijn **voorwerpeigenschappen**.

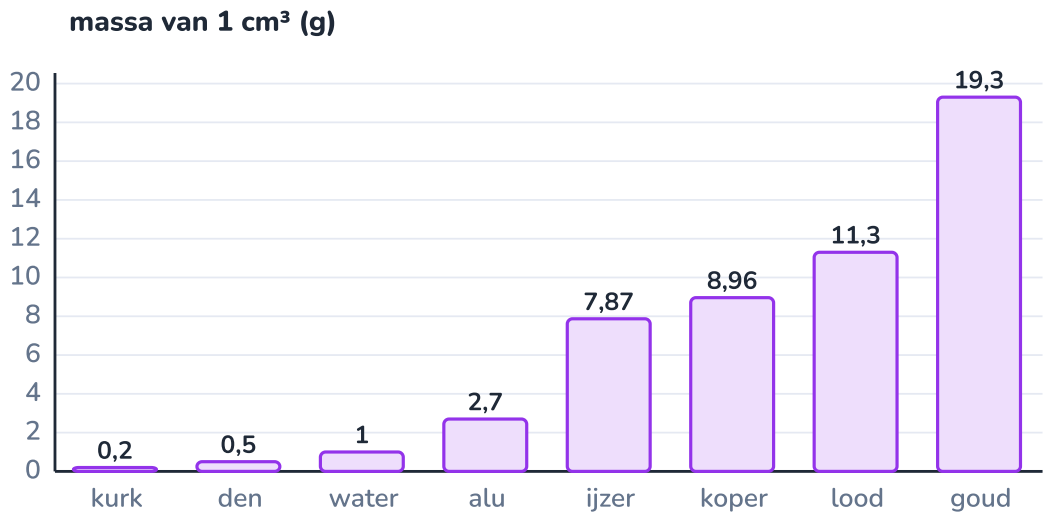
Eenheden. Omdat $1\,\text{mL} = 1\,\text{cm}^3$ en $1\,\text{L} = 1\,\text{dm}^3$, zijn deze eenheden gelijk:

$$1\,\text{g/cm}^3 = 1\,\text{g/mL} = 1\,\text{kg/L} = 1000\,\text{kg/m}^3$$

Waarom keer 1000? Een kubus van 1 m bij 1 m bij 1 m bevat $100 \times 100 \times 100 = 1\,000\,000\,\text{cm}^3$. Weegt elke cm³ 1 g, dan weegt de kubus $1\,000\,000\,\text{g} = 1000\,\text{kg}$. Dus: van g/cm³ naar kg/m³ vermenigvuldig je met 1000; terug deel je door 1000. Aluminium: $2{,}70\,\text{g/cm}^3 = 2700\,\text{kg/m}^3$. Een kubieke meter water weegt een ton.

Water als maatstaf

Toen het metriek stelsel ontstond, werd de kilogram gekozen als de massa van een liter water (hoofdstuk 3). Daarom heeft water een dichtheid van (bijna precies) 1 g/cm³, en is water de handigste vergelijking: een stof met een dichtheid boven 1 g/cm³ is 'zwaarder dan water', eronder 'lichter dan water'.



De dichtheid in g/cm³ is de massa van één kubieke centimeter: een kubusje goud weegt bijna honderd keer meer dan een kubusje kurk.

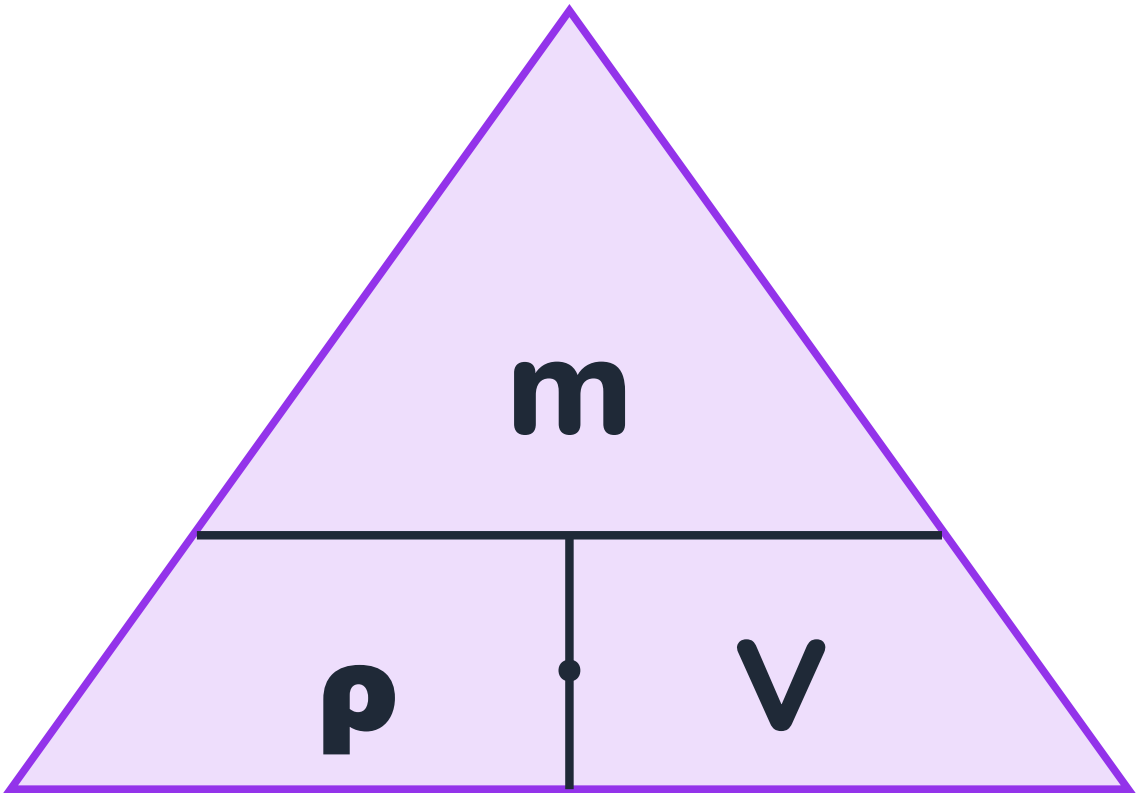
UITGEWERKT VOORBEELD · 7.6

Rekenen in drie richtingen

6/15

Uit $\rho = m/V$ kan je elk van de drie grootheden berekenen als je de andere twee kent. (a) Een aluminium blokje is 5,0 cm lang, 4,0 cm breed en 2,0 cm hoog en weegt 108 g. Wat is de dichtheid, in g/cm³ en in

kg/m³? (b) Hoeveel weegt het water in het volle reservoir van de meetkas (30 L)? (c) Hoeveel plaats neemt 250 g olijfolie in? (d) Hoeveel weegt de lucht in de meetkas (576 L)?



Bedek wat je zoekt: m = ρ · V, ρ = m / V en V = m / ρ. Leer vooral zelf omvormen.

GEGEVEN

- (a) $5{,}0 \times 4{,}0 \times 2{,}0\,\text{cm}$, $m = 108\,\text{g}$
- (b) $V = 30\,\text{L}$, $\rho_{\text{water}} = 1{,}00\,\text{kg/L}$
- (c) $m = 250\,\text{g}$, $\rho_{\text{olie}} = 0{,}91\,\text{g/mL}$
- (d) $V = 576\,\text{L}$, $\rho_{\text{lucht}} = 1{,}20\,\text{kg/m}^3 = 1{,}20\,\text{g/L}$

GEVRAAGD

- (a) ρ
- (b) m
- (c) V
- (d) m

OPLOSSING

1. **Omvormen.** $\rho = \dfrac{m}{V}$ geeft ook $m = \rho \cdot V$ (vermenigvuldig beide kanten met V) en $V = \dfrac{m}{\rho}$ (deel dan door ρ). Kies telkens de vorm met het gevraagde alleen aan één kant.
2. (a) $V = 5{,}0 \times 4{,}0 \times 2{,}0 = 40\,\text{cm}^3$. $\rho = \dfrac{108\,\text{g}}{40\,\text{cm}^3} = 2{,}70\,\text{g/cm}^3$, of $2{,}70 \times 1000 = 2700\,\text{kg/m}^3$.
3. (b) $m = \rho \cdot V = 1{,}00\,\text{kg/L} \times 30\,\text{L} = 30\,\text{kg}$.
4. (c) $V = \dfrac{m}{\rho} = \dfrac{250\,\text{g}}{0{,}91\,\text{g/mL}} \approx 275\,\text{mL}$.
5. (d) $m = \rho \cdot V = 1{,}20\,\text{g/L} \times 576\,\text{L} \approx 691\,\text{g}$, ongeveer 0,7 kg. De omzetting: $1{,}20\,\text{kg/m}^3$ is $1200\,\text{g}$ per $1000\,\text{L}$, dus $1{,}20\,\text{g/L}$.

ANTWOORD

(a) $2{,}70\,\text{g/cm}^3 = 2700\,\text{kg/m}^3$ (aluminium); (b) 30 kg; (c) ongeveer 275 mL; (d) ongeveer 0,69 kg.

Klopt dit? Eenheden nakijken: g gedeeld door g/mL geeft mL, en kg/L maal L geeft kg. En een grootte-check: olie is lichter dan water, dus 250 g olie neemt iets méér plaats in dan 250 mL. Dat de lucht in een kleine kas bijna 0,7 kg weegt, verrast veel mensen: ook een gas heeft massa.

PROEF · 7.7

Massa en volume van water en olie

7/15

ONDERZOEKSVRAAG

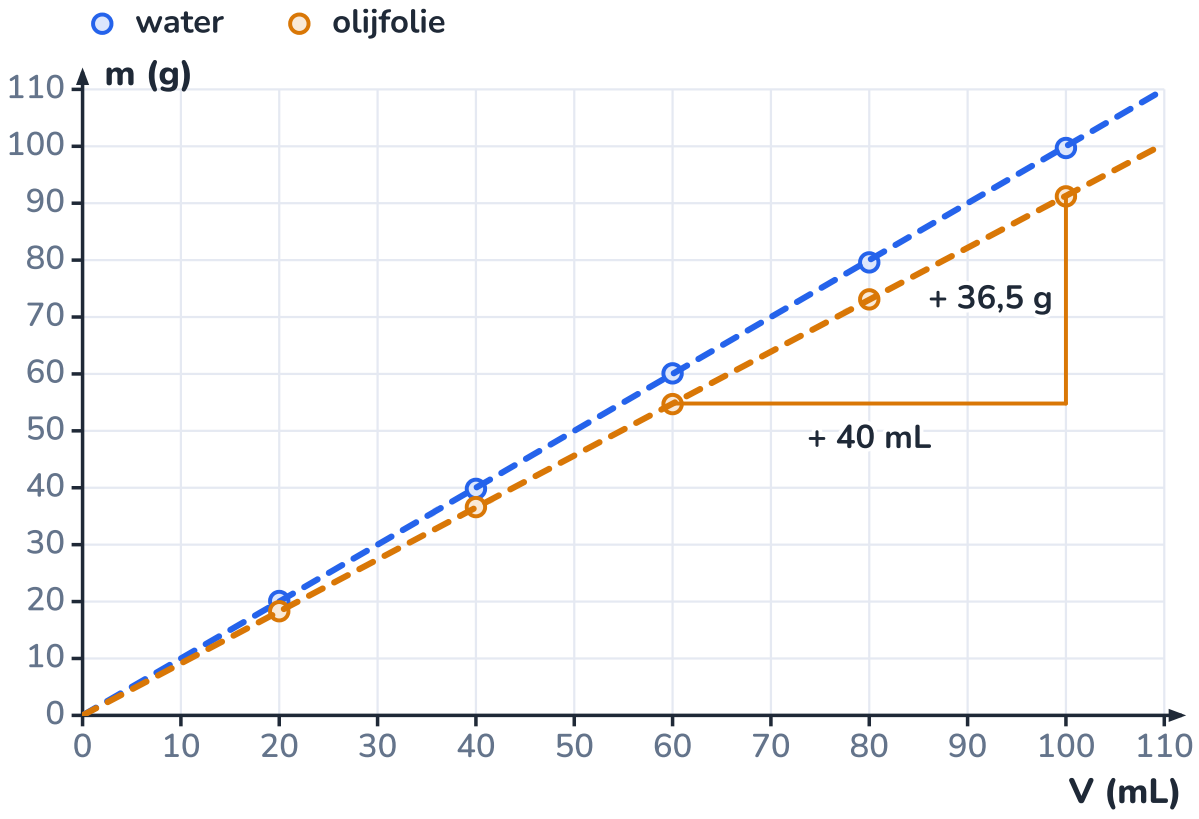
Hoe hangt de massa van een vloeistof af van haar volume? En verschilt dat verband van vloeistof tot vloeistof?

MATERIAAL

balans (0,1 g) · maatcilinder van 100 mL · droog bekerglas van 250 mL · water en olijfolie · keukenpapier

Veiligheid

Olie op de vloer of de tafel is glad: veeg gemorste olie meteen op.



Twee rechten door de oorsprong: de steilste hoort bij de grootste dichtheid. De hellingsdriehoek geeft 36,5 g per 40 mL.

WERKWIJZE

1. Zet het lege bekerglas op de balans en druk op nul (tarreren).
2. Meet 20 mL water af in de maatcilinder, giet het in het bekerglas en noteer de massa.
3. Giet er telkens 20 mL bij, tot 100 mL. Noteer telkens het totale volume en de totale massa.

4. Herhaal met een schoon, droog bekerglas en olijfolie. Laat de maatcilinder goed uitlekken.

5. Bereken voor elke meting m/V en zet de metingen in een grafiek met V horizontaal.

WAARNEMING

V (mL)	m water (g)	m/V water	m olie (g)	m/V olie
20	20,1	1,005	18,3	0,915
40	39,8	0,995	36,6	0,915
60	60,1	1,002	54,7	0,912
80	79,6	0,995	73,1	0,914
100	99,7	0,997	91,2	0,912

Voorbeeldmetingen van een klas. De punten van elke vloeistof liggen op een rechte door de oorsprong; die van olie is minder steil.

VERKLARING

Bij elke vloeistof is de massa **recht evenredig** met het volume: 2 keer zoveel mL is 2 keer zoveel g. De verhouding m/V is voor water ongeveer 1,00 g/mL en voor olie ongeveer 0,91 g/mL: dat is de **dichtheid**. In de grafiek is de dichtheid de **helling** van de rechte (hoofdstuk 4). Neem twee punten op de trendlijn van olie, bijvoorbeeld bij 60 mL en 100 mL: $\rho = \dfrac{91{,}3 - 54{,}8}{100 - 60} = \dfrac{36{,}5\,\text{g}}{40\,\text{mL}} \approx 0{,}91\,\text{g/mL}$. De kleine verschillen tussen de verhoudingen (0,995 tot 1,005 bij water) komen door het aflezen van de maatcilinder en door druppels die in de cilinder achterblijven. Daarom geeft de helling van een rechte door alle punten een betrouwbaarder resultaat dan één enkele meting (hoofdstuk 2).

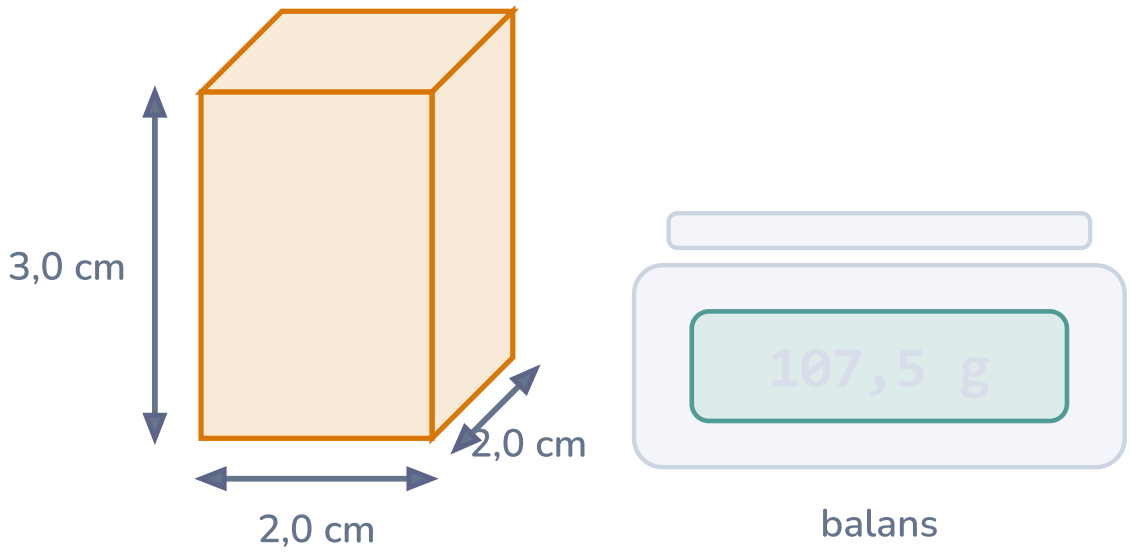


Stap voor stap 20 mL erbij, en telkens de massa aflezen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 7.8

Een stof herkennen aan haar dichtheid

In de werkplaats ligt een roodbruin metalen blokje van 2,0 cm × 2,0 cm × 3,0 cm. De balans wijst 107,5 g aan. Van welk metaal is het blokje waarschijnlijk gemaakt? Gebruik de tabel met dichtheden verderop in dit hoofdstuk.



Drie maten en een massa: genoeg om het blokje te herkennen.

GEGEVEN

- $2{,}0 \times 2{,}0 \times 3{,}0\,\text{cm}$
- $m = 107{,}5\,\text{g}$
- roodbruine kleur

GEVRAAGD

- het metaal

OPLOSSING

1. Volume: $V = 2{,}0 \times 2{,}0 \times 3{,}0 = 12\,\text{cm}^3$.
2. Dichtheid: $\rho = \dfrac{107{,}5\,\text{g}}{12\,\text{cm}^3} \approx 8{,}96\,\text{g/cm}^3$.
3. In de tabel: koper heeft 8,96 g/cm³. Messing (± 8,5) en ijzer (7,87) liggen duidelijk lager.
4. De roodbruine kleur past bij koper. Twee eigenschappen wijzen dezelfde kant uit.

ANTWOORD

Het blokje is zo goed als zeker van koper ($\rho \approx 8{,}96\,\text{g/cm}^3$).

Klopt dit? Met een schuifmaat en een balans van 0,1 g is 8,96 betrouwbaar tot op enkele honderdsten. Bij een klein voorwerp, zoals een ring, wordt het volume onnauwkeurig en de dichtheid dus ook: dan kan je koper, zilver en lood soms niet meer uit elkaar houden (opdracht 7.10). Dichtheid is een sterke aanwijzing, maar je combineert ze best met andere stofeigenschappen: kleur, smeltpunt, magnetisme (hoofdstuk 8).

NASLAG · 7.9

Overzicht: formules en dichtheden

De dichtheid met haar twee omgevormde versies, de eenheden, en een tabel om stoffen op te zoeken.

dichtheid

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad m = \rho \cdot V \qquad V = \frac{m}{\rho}$$

symbool	betekenis	eenheid
ρ	dichtheid	g/cm³ of kg/m³
m	massa	g of kg
V	volume	cm³ (= mL) of m³

eenheid	is gelijk aan
1 cm³	1 mL
1 dm³	1 L = 1000 cm³
1 m³	1000 L = 1 000 000 cm³
1 g/cm³	1 g/mL = 1 kg/L = 1000 kg/m³ = 1 t/m³
1 kg/m³	1 g/L = 0,001 g/cm³

vaste stof	ρ (g/cm³)	vloeistof	ρ (g/cm³)
kurk	± 0,2	ethanol (alcohol)	0,79
dennenhout (droog)	± 0,5	olijfolie	± 0,91
eikenhout (droog)	± 0,7	zonnebloemolie	± 0,92
kaarsvet (paraffine)	± 0,9	water (4 °C)	1,000
polypropeen (PP)	0,90	water (20 °C)	0,998
ijs (0 °C)	0,92	zeewater	± 1,025
polyetheen (HDPE)	± 0,95	melk	± 1,03
polycarbonaat (PC)	1,20	glycerine	1,26
PLA (3D-printfilament)	1,24	honing	± 1,4
PET (drankflessen)	1,38	kwik	13,5
glas	± 2,5		
graniet	± 2,7	**gas** (20 °C, normale luchtdruk)	**ρ (kg/m³)**
aluminium	2,70	helium	0,17
ijzer	7,87	lucht	1,20
staal	± 7,85	zuurstof	1,33
messing (koper + zink)	± 8,5	koolstofdioxide	1,84
koper	8,96		
zilver	10,5		
lood	11,3		
goud	19,3		

Het teken ± betekent: ongeveer; de waarde hangt af van de soort (hout, olie, glas) of van hoeveel er is ingeperst (kurk). Let op de eenheid bij de gassen: kg/m³. In g/cm³ zijn die getallen duizend keer kleiner: lucht heeft een dichtheid van $1{,}20\,\mathrm{kg/m^3} = 0{,}0012\,\mathrm{g/cm^3}$.

vergelijk	het voorwerp
$\rho_{\text{voorwerp}} > \rho_{\text{vloeistof}}$	zinkt
$\rho_{\text{voorwerp}} = \rho_{\text{vloeistof}}$	zweeft
$\rho_{\text{voorwerp}} < \rho_{\text{vloeistof}}$	drijft

Bij een voorwerp met holtes (een schip, een fles) telt de **gemiddelde** dichtheid: totale massa gedeeld door totaal volume.

UITLEG · 7.10

Zinken, zweven en drijven

10/15

Of een voorwerp in een vloeistof zinkt of drijft, hangt niet af van hoe zwaar het is, maar van twee dichtheden: die van het voorwerp en die van de vloeistof.

- Is het voorwerp **dichter** dan de vloeistof, dan **zinkt** het: een stalen moer in water (7,85 tegenover 1,00 g/cm³).
- Is het **even dicht**, dan **zweeft** het: het blijft hangen waar je het loslaat. Een vis regelt dat met zijn zwemblaas, een duikboot met ballasttanks die hij met water vult of met perslucht leegblaast.
- Is het **minder dicht**, dan **drijft** het: een boomstam van 500 kg drijft op water (dennenhout ± 0,5 g/cm³), terwijl een paperclip van 1 g zinkt.

Een drijvend voorwerp zakt precies zo ver weg tot het evenveel vloeistof opzij duwt als zijn eigen massa. Het deel onder het oppervlak is daarom de verhouding van de twee dichtheden: een blok dennenhout (0,5) zit voor de helft onder water, een ijsblok (0,92) voor 92 %. Waarom dat zo is (de opwaartse kracht van Archimedes) leer je in Intermediate.

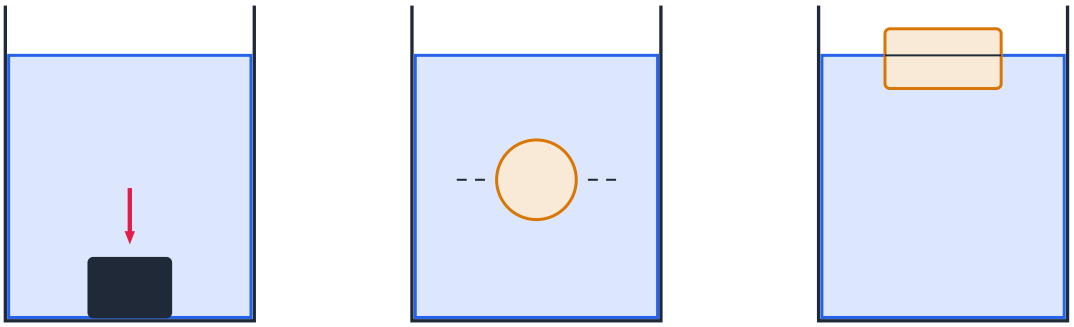
Waarom drijft een schip van staal? Een schip is geen massief blok staal: het is een stalen schaal vol lucht. Voor drijven telt de **gemiddelde dichtheid**: de totale massa gedeeld door het totale volume onder de waterlijn, lucht inbegrepen. Die is kleiner dan die van water. Loopt het schip vol water, dan stijgt de gemiddelde dichtheid en zinkt het.

Zware dingen zinken, lichte drijven

Een tanker van honderdduizenden ton drijft, een zandkorrel zinkt. Niet de massa beslist, maar de dichtheid, vergeleken met die van de vloeistof. Hetzelfde voorwerp kan in de ene vloeistof drijven en in de andere zinken: een ijsblokje drijft in water, maar zinkt in alcohol (0,79 g/cm³), en een ijzeren spijker drijft zelfs op kwik (13,5 g/cm³).

Ook gassen en lucht

Hetzelfde geldt in de lucht. Een ballon met helium (0,17 kg/m³) stijgt in lucht (1,20 kg/m³). Warme lucht is minder dicht dan koude, omdat ze uitzet (hoofdstuk 6): daarom stijgt een heteluchtballon en verzamelt de warmste lucht zich bovenin de meetkas.



zinken
ρ voorwerp > ρ vloeistof

zweven
ρ voorwerp = ρ vloeistof

drijven
ρ voorwerp < ρ vloeistof

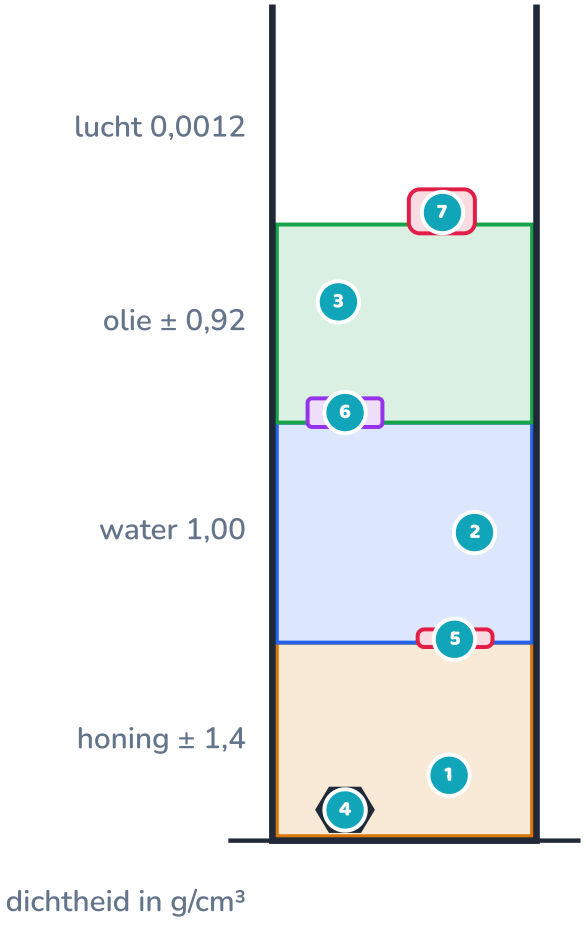
Links zinkt het voorwerp, in het midden blijft het hangen, rechts steekt een deel boven het water uit.

ONTLEED · 7.11

De dichtheidstoren

11/15

Giet voorzichtig langs een lepel eerst honing, dan (gekleurd) water en dan zonnebloemolie in een hoog glas. De vloeistoffen stapelen zich volgens hun dichtheid, en voorwerpen die je erin laat vallen, blijven hangen op de grens waar ze 'passen'.



De kleuren dienen alleen om de lagen te onderscheiden. Van onder naar boven daalt de dichtheid.

1. **Honing**
De dichtste vloeistof (± 1,4 g/cm³) zakt naar de bodem. Honing is een oplossing van veel suiker in wat water (hoofdstuk 8).

2. **Water**
1,00 g/cm³: lichter dan honing, zwaarder dan olie. Water en honing mengen langzaam als je roert; olie en water mengen helemaal niet.

3. **Zonnebloemolie**
± 0,92 g/cm³: ze drijft op het water. Olie en water blijven twee lagen, hoe hard je ook schudt (een heterogeen mengsel).

4. **Stalen moer**
7,85 g/cm³: dichter dan alle drie de vloeistoffen, dus ligt ze op de bodem.

5. **Stukje PLA-filament**
1,24 g/cm³: zinkt door het water (1,00), maar drijft op de honing (1,4). Het blijft op de grens liggen.

6. **Stukje HDPE**
± 0,95 g/cm³ (plastic met recyclagecode 2): drijft op water, maar zinkt in olie. Het hangt net onder de grens water-olie.

7. **Kurk**
± 0,2 g/cm³: drijft op alles. Maar een vijfde van de kurk zit onder het olieoppervlak (0,2 / 0,92).

PROEF · 7.12

Een ei laten zweven

12/15

ONDERZOEKSVRAAG

Zinkt een ei in water? En kan je het laten zweven of drijven zonder het ei te veranderen?

MATERIAAL

een vers ei | een hoog glas of een bokaal | 300 mL kraanwater | keukenzout, een eetlepel en een balans | lepel om te roeren



Kraanwater, wat zout, veel zout: zinken, zweven, drijven.

WERKWIJZE

1. Leg het ei voorzichtig in het glas water. Noteer wat je ziet.
2. Haal het ei eruit. Los 10 g zout op in het water, roer tot alles opgelost is, en leg het ei er opnieuw in.
3. Herhaal: telkens 10 g zout erbij, oplossen, ei erin. Noteer bij hoeveel zout het ei gaat zweven en drijven.
4. Giet tot slot voorzichtig langs een lepel een laag kraanwater bovenop het zoute water. Leg het ei erin.

WAARNEMING

zout in 300 mL water	het ei
0 g	zinkt en ligt op de bodem
20 g	zinkt, maar lijkt 'lichter' op de bodem te liggen
40 g	zweeft halverwege, of komt heel traag omhoog
60 g	drijft, met een klein stukje boven water

Met een laag kraanwater bovenop blijft het ei in het midden hangen, op de grens tussen zout en zoet water. Voorbeeld van waarnemingen; elk ei is een beetje anders.

VERKLARING

Een vers ei heeft een dichtheid van ongeveer 1,08 à 1,09 g/cm³: iets meer dan water, dus zinkt het. Zout dat oplost, maakt de vloeistof zwaarder zonder dat het volume veel groter wordt: de dichtheid van de oplossing stijgt. Met ongeveer 40 g zout in 300 g water (bijna 12 % zout) is de dichtheid ongeveer 1,08 g/cm³, even groot als die van het ei: het zweeft. Met meer zout is de oplossing dichter dan het ei en drijft het. In de laatste stap drijft het ei op het zoute water, maar zinkt het door het zoete water erboven. Zo kan je de dichtheid van het ei bepalen: ze is gelijk aan die van de oplossing waarin het zweeft.

> **Vers of oud?**
> In een ei zit een luchtkamertje dat groter wordt naarmate het ei ouder is, omdat er vocht door de schaal verdampt. Een oud ei heeft dus een kleinere gemiddelde dichtheid: in kraanwater gaat het rechtop staan of drijft het zelfs.

UITLEG · 7.13

IJs drijft: water is een uitzondering

13/15

Bijna elke stof is als vaste stof dichter dan als vloeistof: de deeltjes zitten in een vaste orde dicht tegen elkaar (hoofdstuk 6). Een blok vast kaarsvet zinkt in gesmolten kaarsvet. Water doet het omgekeerd. IJs heeft een dichtheid van 0,917 g/cm³, vloeibaar water bijna 1,00 g/cm³: ijs drijft. De waterdeeltjes vormen in ijs een open rooster met meer lege ruimte dan in vloeibaar water. Waarom ze dat doen, leer je in Intermediate (hoofdstuk 13).

Er is nog een tweede eigenaardigheid. Warm water zet uit als het warmer wordt, zoals elke stof. Maar onder 4 °C zet water ook uit als het **kouder** wordt. Vloeibaar water is dus het dichtst bij **4 °C** (grafiek). Samen heten die twee uitzonderingen de **anomalie van water**.

De gevolgen zie je overal:

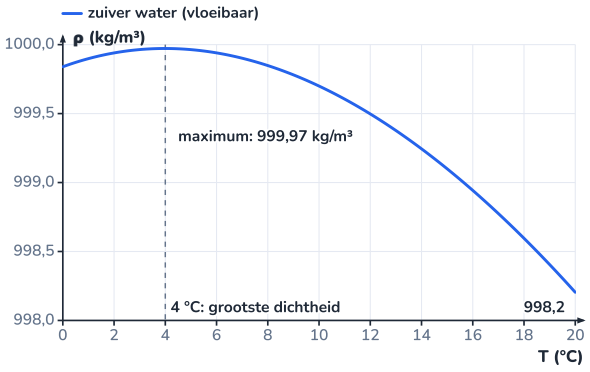
- **Meren bevriezen van boven naar beneden.** In de herfst koelt het oppervlak af; het koudere, dichtere water zakt, tot het hele meer 4 °C is. Koelt het oppervlak dan verder af, dan blijft dat lichtere, koude water boven liggen en bevriest het. De ijslaag drijft en houdt de kou tegen, zodat vissen op de bodem in water van ongeveer 4 °C de winter doorkomen.
- **Een volle fles barst in de diepvries.** Dezelfde massa ijs neemt ongeveer 9 % meer plaats in: $1/0{,}917 \approx 1{,}09$. Een liter water wordt 1,09 L ijs, en dat duwt met enorme kracht. Zo breekt

bevriezend water ook stenen en wegdek open (vorstschade).

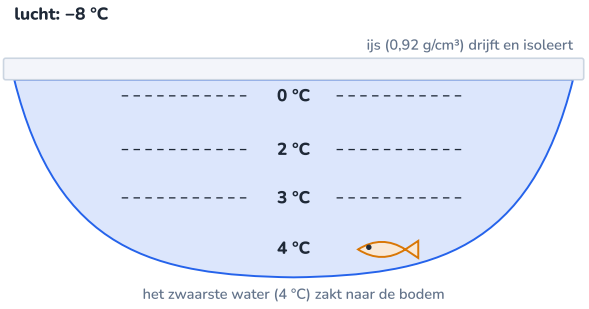
- **IJsbergen** drijven met ongeveer $0{,}917 / 1{,}025 \approx 0{,}89$, dus bijna 90 % van hun volume onder het zeewater: 'het topje van de ijsberg'.

IJs is bevroren water, dus zwaarder

Bij het bevriezen blijft de massa gelijk: er komen geen deeltjes bij en er gaan er geen weg. Het volume wordt groter. Evenveel massa in meer volume betekent een **kleinere** dichtheid.



Berekend met de formule van Kell. Tussen 0 en 20 °C verandert de dichtheid maar 0,2 %, maar het maximum bij 4 °C beslist hoe een meer bevriest.



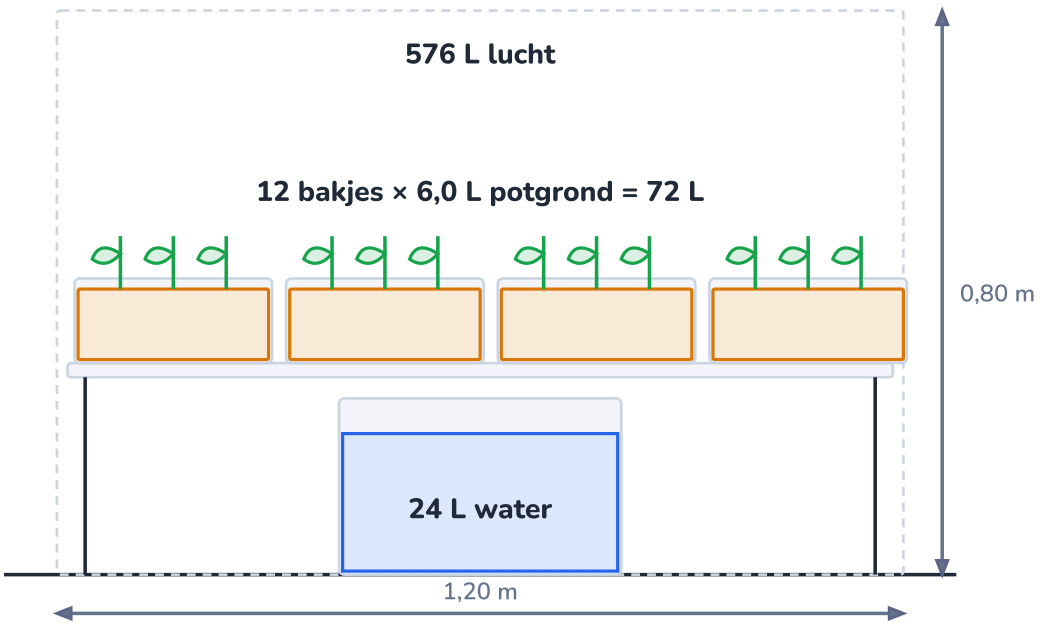
Het ijs drijft bovenaan; het dichtste water (4 °C) ligt op de bodem, waar de vissen overwinteren.

UITGEWERKT VOORBEELD · 7.14

Habitat: hoeveel wegen water, grond en lucht in de meetkas?

14/15

In de meetkas staan 12 plantenbakjes van 30 cm × 20 cm, gevuld met 10 cm potgrond. Het reservoir (binnenmaten 40 × 30 × 25 cm) is gevuld tot 20 cm (24 L, hoofdstuk 3). Vochtige potgrond heeft een dichtheid van ongeveer 0,6 kg/L; droge potgrond uit een zak ongeveer 0,3 kg/L. (a) Hoeveel weegt het water? (b) Hoeveel weegt de potgrond, droog en na het water geven? (c) Hoeveel weegt de lucht (576 L)? (d) Wat weegt het meest?



Op de tafel 72 L potgrond, eronder 24 L water, en overal 576 L lucht.

GEGEVEN

- 12 bakjes, grond $30 \times 20 \times 10\,\text{cm}$
- water: $24\,\text{L}$
- $\rho_{\text{water}} = 1{,}00\,\text{kg/L}$; $\rho_{\text{potgrond}} \approx 0{,}3\,\text{kg/L}$ (droog) tot $0{,}6\,\text{kg/L}$ (vochtig)
- lucht: $576\,\text{L}$, $\rho = 1{,}20\,\text{g/L}$

GEVRAAGD

- massa van water, potgrond (droog en vochtig) en lucht

OPLOSSING

1 (a) $m = \rho \cdot V = 1{,}00\,\text{kg/L} \times 24\,\text{L} = 24\,\text{kg}$ (en 30 kg als het reservoir helemaal vol is).

2 (b) Volume grond in één bakje: $30 \times 20 \times 10 = 6000\,\text{cm}^3 = 6{,}0\,\text{L}$. Voor 12 bakjes: $12 \times 6{,}0 = 72\,\text{L}$. Droog: $0{,}3 \times 72 \approx 22\,\text{kg}$. Vochtig: $0{,}6 \times 72 \approx 43\,\text{kg}$.

3 (c) $1{,}20\,\text{g/L} \times 576\,\text{L} \approx 691\,\text{g} \approx 0{,}7\,\text{kg}$.

4 (d) De vochtige potgrond (± 43 kg), dan het water (24 kg). Het verschil tussen droge en vochtige grond (± 21 kg) is zelf water: potgrond houdt veel water vast in de ruimte tussen de korrels.

ANTWOORD

Water 24 kg; potgrond ± 22 kg droog en ± 43 kg vochtig; lucht ± 0,7 kg. Met vochtige grond samen ongeveer 68 kg, zonder de kas zelf.

Klopt dit? Potgrond is veel lichter dan 'gewone' tuingrond, die rond 1,2 à 1,6 kg/L zit: ze bestaat vooral uit turf of vezels met veel lucht ertussen. Neem je gewone grond, dan weegt de plantentafel meer dan het dubbele. Of de tafel die 43 kg (plus de bakjes) kan dragen, bereken je in hoofdstuk 11.

HET GEHEEL · 7.15

Waar dichtheid terugkomt

15/15

Dichtheid is de eerste grootheid in StemExpert die je niet rechtstreeks meet, maar **berekent** uit twee metingen: een massa en een volume. Het is ook het eerste voorbeeld van een verhouding met een eigen eenheid (g/cm³), en van een recht evenredig verband waarvan de helling een fysische betekenis heeft: de leerlijn **wiskundig modelleren**. In de leerlijn **materie en chemie** is dichtheid de eerste stofeigenschap; in de leerlijn **krachten** komt ze terug zodra massa een gewicht wordt.

F3 Meten: grootheden en eenheden
Massa en volume meten, de eenhedentrap, en de Gimli Glider: een vliegtuig dat zonder brandstof viel door een fout in de dichtheid.

F4 Tabellen, grafieken en verbanden
Massa is recht evenredig met volume; de evenredigheidsconstante is de dichtheid.

F6 Het deeltjesmodel
Uitzetten maakt een stof minder dicht; het open rooster van ijs verklaart waarom ijs drijft.

F8 Zuivere stoffen en mengsels
Dichtheid naast smeltpunt, kookpunt en oplosbaarheid als stofeigenschap; de dichtheid van oplossingen.

F9 Mengsels scheiden
Bezinken, decanteren en centrifugeren scheiden stoffen op basis van hun dichtheid.

F10 Materialen en hun eigenschappen
Licht of zwaar bouwen: aluminium (2,70) tegenover staal (7,85) voor het kasframe.

F11 Krachten
Van massa naar gewicht: hoeveel newton duwen de potgrond en het water op de plank?

I1 Meetfouten en nauwkeurigheid
Hoe nauwkeurig is een dichtheid die je uit drie lengtes en een massa berekent?

I11 Druk en hydraulica
De wet van Archimedes: waarom een voorwerp in een vloeistof lichter lijkt, en de druk onderaan de watertank.

E14 Gassen en de gaswetten
De dichtheid van een gas hangt af van druk en temperatuur: de ideale gaswet.

Habitat
Vanaf nu ken je de massa's in de meetkas: 24 à 30 kg water in het reservoir, ongeveer 43 kg vochtige potgrond op de tafel, 0,7 kg lucht. Noteer ze in je portfolio (opdracht 7.12): in hoofdstuk 11 reken je ze om naar krachten, en in hoofdstuk 13 ontwerp je een frame dat ze draagt.

SAMENVATTING

In het kort

- Massa (in kg, met een balans) is hoeveel stof er is; volume (in m³, L of cm³) is hoeveel ruimte ze inneemt.
- Het volume van een grillig voorwerp bepaal je door onderdompelen: het water stijgt (of loopt over) met het volume van het voorwerp.
- Dichtheid is massa per volume: $\rho = m/V$. Omgevormd: $m = \rho \cdot V$ en $V = m/\rho$.
- 1 g/cm³ = 1 g/mL = 1 kg/L = 1000 kg/m³. Water heeft een dichtheid van ongeveer 1 g/cm³.
- Dichtheid is een stofeigenschap: ze hangt niet af van de grootte of de vorm van het voorwerp. In een (V, m)-grafiek is ze de helling van de rechte.
- Een voorwerp zinkt in een vloeistof met een kleinere dichtheid, zweeft bij gelijke dichtheid en drijft bij een grotere. Bij holle voorwerpen telt de gemiddelde dichtheid.
- Water is het dichtst bij 4 °C en zet uit bij het bevriezen: ijs (0,917 g/cm³) drijft, meren bevriezen van boven, en een volle fles barst.

- Met de dichtheid herken je een stof, maar bij kleine voorwerpen is de meting onnauwkeurig: combineer met andere eigenschappen.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

massa
Hoeveel stof er in een voorwerp zit. Symbool m, eenheid kilogram (kg); je meet ze met een balans.

volume
Hoeveel ruimte een voorwerp inneemt. Symbool V, eenheid kubieke meter (m³); ook cm³, L en mL.

dichtheid
De massa per volume-eenheid van een stof: $\rho = m/V$, in g/cm³ of kg/m³. Symbool ρ (de Griekse letter rho).

onderdompelen
Een vast voorwerp helemaal onder water brengen om zijn volume te meten: het water stijgt met het volume van het voorwerp.

overloopvat
Vat met een tuitje; een voorwerp dat erin gaat, duwt evenveel water over de rand als zijn eigen volume.

zweven
Blijven hangen in een vloeistof, zonder te zinken of te stijgen: de dichtheid van het voorwerp is gelijk aan die van de vloeistof.

gemiddelde dichtheid
De totale massa van een voorwerp gedeeld door zijn totale volume, lucht in holtes inbegrepen; bepaalt of een schip drijft.

anomalie van water
Water heeft zijn grootste dichtheid bij 4 °C en zet uit als het bevriest; daardoor drijft ijs.

aräometer
Drijvend buisje met een schaal om de dichtheid van een vloeistof af te lezen; ook densimeter genoemd.

F FUNDAMENTAL · DEEL F2 · MATERIE EN MATERIALEN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 8

Zuivere stoffen en mengsels

Waarom 'puur' sap een mengsel is, hoeveel zout er in water past, en hoeveel voeding er in de gieter moet

Bijna alles om je heen is een **mengsel**: lucht, kraanwater, melk, zeewater, staal, potgrond. Een **zuivere stof** bestaat uit één soort deeltjes en heeft vaste **stofeigenschappen**, zoals een smeltpunt en een kookpunt. In dit hoofdstuk leer je stoffen herkennen aan hun eigenschappen, mengsels indelen in **homogeen** en **heterogeen**, rekenen met **oplossingen** (verzadiging, oplosbaarheid, **concentratie** in g/L), en aan een smelt- of kookcurve zien of iets zuiver is. Voor de meetkas maak je een voedingsoplossing op de juiste sterkte.

8× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

M Materie en chemie · O Onderzoeken en meten



Zes glazen, zes mengsels. Welke zijn homogeen, welke heterogeen?

Na dit hoofdstuk

- Je kan stofeigenschappen (kleur, geur, smeltpunt, kookpunt, dichtheid, oplosbaarheid, geleiding) opnoemen en onderscheiden van voorwerpeigenschappen.
- Je kan een stof herkennen door enkele stofeigenschappen te onderzoeken en te vergelijken met een tabel.
- Je kan het verschil tussen een zuivere stof en een mengsel uitleggen, ook met het deeltjesmodel.
- Je kan mengsels indelen in homogeen en heterogeen, en voorbeelden geven van oplossing, legering, suspensie, emulsie, schuim, rook en nevel.
- Je kan de woorden oplosmiddel, opgeloste stof, oplossing, verzadigd en oplosbaarheid correct gebruiken.
- Je kan een oplosbaarheidscurve lezen en voorspellen hoeveel stof er kristalliseert als een oplossing afkoelt.
- Je kan rekenen met de concentratie $c = m/V$ in g/L, in drie richtingen.
- Je kan legeringen, lucht en zeewater beschrijven als mengsels en hun samenstelling geven.
- Je kan aan een smelt-, stol- of kookcurve zien of een stof zuiver is of een mengsel.

VERHAAL · 8.1

Hoe zuiver is zuiver?

Op een brik sinaasappelsap staat '100 % puur'. In de winkel hangt een affiche over 'zuivere lucht'. In het dagelijks leven betekent *zuiver* of *puur*: er is niets aan toegevoegd. In de wetenschap betekent het iets heel anders: een **zuivere stof** bestaat uit één enkele stof. Puur sinaasappelsap is dan een mengsel van water, suikers, zuren, vitaminen, kleur- en geurstoffen en vruchtvlees. Zuivere lucht is een mengsel van stikstof, zuurstof, argon en nog wat andere gassen.

Hoe zuiver kan een stof worden? Het record staat op naam van de chipindustrie. Chips worden gemaakt van **silicium**, dat uit kwartszand gehaald wordt. Voor een chip moet het silicium minstens **99,9999999 %** zuiver zijn ('negen negens'): op een miljard siliciumatomen mag er hooguit één vreemd atoom zitten. Om dat te bereiken, wordt het silicium eerst omgezet in een vloeistof die men steeds opnieuw destilleert (hoofdstuk 9). Daarna trekt men uit gesmolten silicium langzaam een staaf die uit één enkel kristal bestaat, soms twee meter lang. Die wordt in schijven (wafers) gezaagd van minder dan een millimeter dik.

En dan gebeurt er iets opvallends: in dat supergezuiverde silicium brengt men bewust piepkleine, exact afgemeten hoeveelheden van andere atomen, zoals boor of fosfor. Pas dan werkt het als halfgeleider (hoofdstuk 23 in Intermediate). Wie een mengsel precies wil maken, moet eerst zuivere stoffen hebben.

Waarom dit verhaal ertoe doet

'Zuiver' is in STEM geen reclamewoord maar een meetbare eigenschap. Een zuivere stof herken je aan haar vaste stofeigenschappen, zoals een scherp smeltpunt. In dit hoofdstuk leer je die eigenschappen kennen, en in hoofdstuk 9 hoe je stoffen uit een mengsel haalt.



Een wafer van bijna perfect zuiver silicium: de grondstof van elke chip.

UITLEG · 8.2

Stofeigenschappen: het paspoort van een stof

2/17

In hoofdstuk 7 zag je dat de dichtheid bij de stof hoort, niet bij het voorwerp. Zulke eigenschappen heten **stofeigenschappen**. Samen vormen ze een soort paspoort: aan een handvol ervan herken je een stof.

- **Waarneembaar met je zintuigen**: kleur, glans, geur, aggregatietoestand bij kamertemperatuur. Ruik voorzichtig door de damp naar je toe te wuiven, en **proef nooit** in een labo (hoofdstuk 5).
- **Meetbaar**: smeltpunt, kookpunt en dichtheid (hoofdstukken 6 en 7), oplosbaarheid in water, elektrische geleiding, warmtegeleiding.
- **Gedrag**: is de stof magnetisch, brandbaar, reageert ze met azijn?

Massa, volume, vorm en temperatuur zijn geen stofeigenschappen: ze zeggen iets over het voorwerp of over de toestand waarin het nu is. Een ijzeren spijker en een ijzeren brug hebben een heel andere massa, maar hetzelfde smeltpunt: 1538 °C.

stof	kleur, geur	smeltpunt (°C)	kookpunt (°C)	ρ (g/cm³)	lost op in water?	geleidt stroom?
water	kleurloos, geurloos	0	100	1,00	(is zelf het oplosmiddel)	zuiver: nauwelijks
ethanol	kleurloos, alcoholgeur	−114	78	0,79	ja, mengt volledig	nee
keukenzout	wit, geurloos	801	1465	2,16	ja: 36 g per 100 g water	vast niet, opgelost wel

stof	kleur, geur	smeltpunt (°C)	kookpunt (°C)	ρ (g/cm³)	lost op in water?	geleidt stroom?
suiker (sacharose)	wit, geurloos	ontleedt vanaf ± 186	(geen)	1,59	ja: 202 g per 100 g water	nee, ook opgelost niet
zwavel	geel, geurloos (vast)	115	445	2,07	nee	nee
aluminium	zilvergrijs	660	± 2500	2,70	nee	ja
koper	roodbruin	1085	2562	8,96	nee	ja, heel goed
ijzer	grijs, magnetisch	1538	2862	7,87	nee	ja

Smelt- en kookpunten bij normale luchtdruk, oplosbaarheid bij 20 °C. Suiker heeft geen kookpunt: vanaf ongeveer 186 °C valt ze uiteen en wordt ze karamel.

Eén eigenschap is zelden genoeg

Suiker en keukenzout zijn allebei wit, geurloos en oplosbaar in water. Maar zout water geleidt stroom en suikerwater niet, en suiker smelt en wordt bruin in een lepel boven een vlammetje, terwijl zout onveranderd blijft. Combineer daarom altijd enkele eigenschappen (opdracht 8.6).



Vijf witte poeders die er bijna hetzelfde uitzien. Hun stofeigenschappen verschillen wel.

PROEF · 8.3

Geleidt de oplossing stroom?

3/17

ONDERZOEKSVRAAG

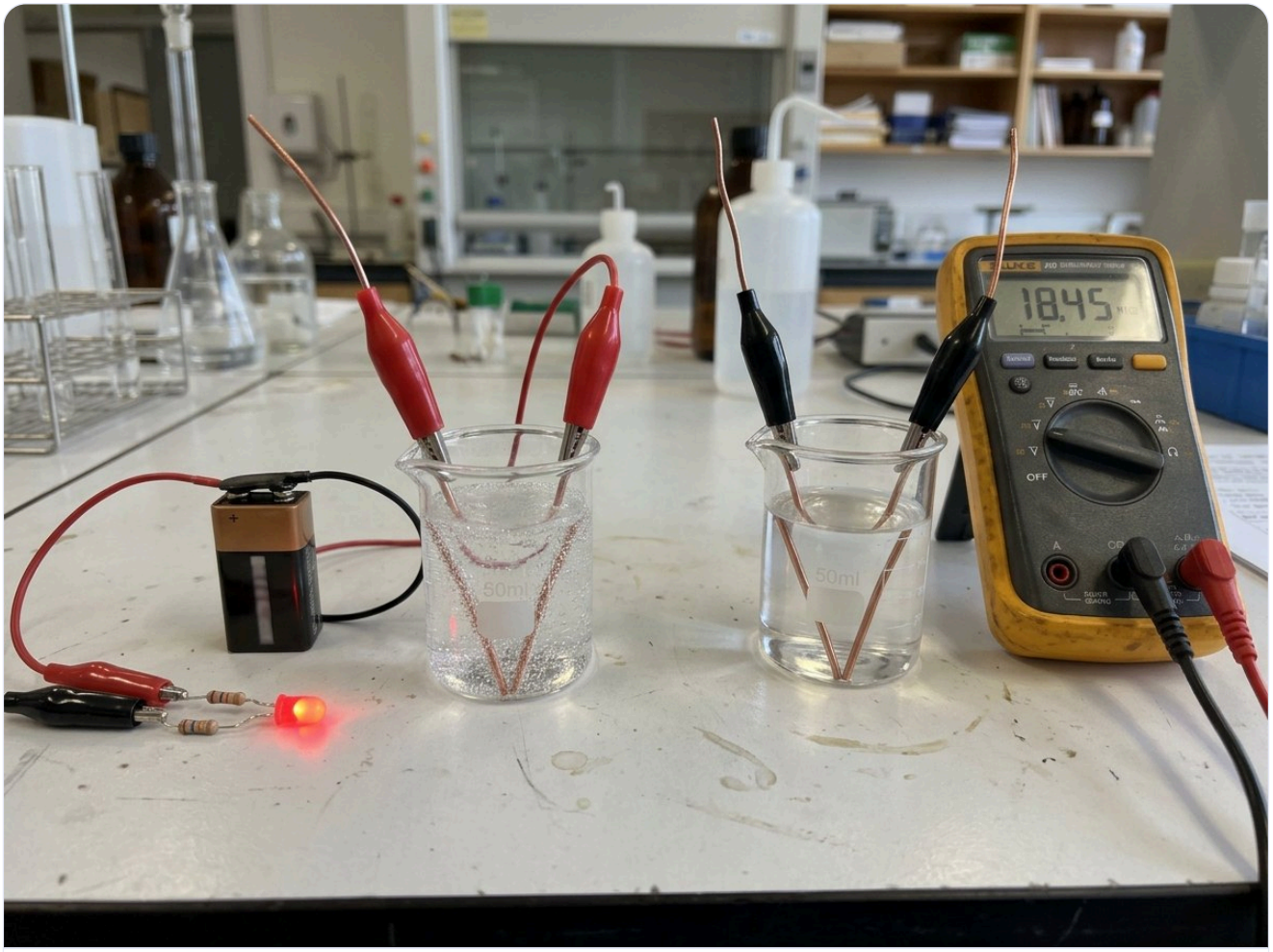
Geleidt water stroom? En maakt het uit wat er in het water opgelost is?

MATERIAAL

- 9 V-batterij met clip
- led met een weerstand van 470 Ω in serie
- twee koperdraadjes (of twee potloodstiften) als elektroden
- multimeter op mA (in serie)
- vijf bekertjes: gedemineraliseerd water, kraanwater, zout water, suikerwater, azijn
- keukenpapier

Veiligheid

Alleen met de 9 V-batterij, nooit met het stopcontact (hoofdstuk 5). Laat de stroom telkens maar enkele seconden lopen: aan de elektroden ontstaan gasbelletjes.



In zout water brandt de led; in suikerwater blijft ze uit.

WERKWIJZE

1. Maak de zout- en de suikeroplossing met **gedemineraliseerd** water: een theelepel in 100 mL.
2. Bouw de kring: batterij, weerstand, led, multimeter en de twee elektroden, die nog niet in het water hangen. Test de kring door de elektroden even tegen elkaar te houden.
3. Hang de elektroden in het eerste bekertje, 1 cm uit elkaar. Noteer of de led brandt en wat de multimeter toont.

4 Spoel en droog de elektroden, en herhaal voor elk bekertje, altijd op dezelfde afstand en even diep.

WAARNEMING

vloeistof	led	stroom (mA)
gedemineraliseerd water	uit	0,0
kraanwater	uit of heel zwak	0,4
suiker in gedemineraliseerd water	uit	0,0
azijn	zwak	2,1
zout in gedemineraliseerd water	fel	13,6

Voorbeeld van metingen. De getallen hangen af van de elektroden, hun afstand en hoeveel er opgelost is, maar de volgorde is altijd dezelfde.

VERKLARING

Zuiver water geleidt nauwelijks. Of een oplossing geleidt, hangt af van wat erin opgelost is. Zout valt in water uiteen in geladen deeltjes (**ionen**) die kunnen bewegen en zo de lading door de vloeistof dragen. Suiker lost ook op, maar als ongeladen deeltjes: suikerwater geleidt niet. Kraanwater geleidt een beetje, omdat er altijd wat zouten in opgelost zijn (kalk bijvoorbeeld). Geleiding is dus een stofeigenschap die zout en suiker van elkaar onderscheidt, en een meting die zegt hoeveel zout er opgelost is: in Intermediate meet je zo de sterkte van de voedingsoplossing (EC-meter, hoofdstuk 13).

UITLEG · 8.4

Zuivere stof of mengsel?

4/17

In het deeltjesmodel (hoofdstuk 6) is het verschil eenvoudig:

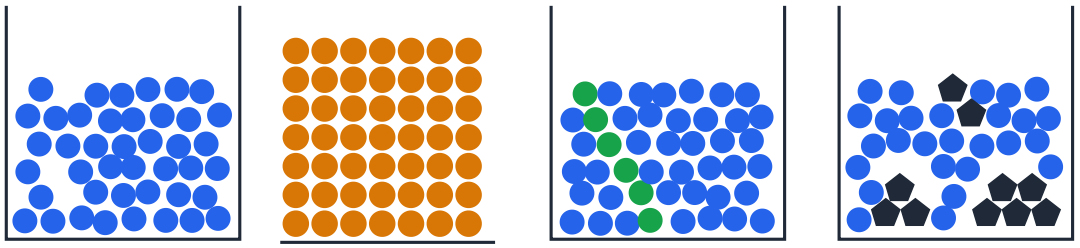
- Een **zuivere stof** bestaat uit één soort deeltjes: gedestilleerd water, suiker, koper, zuurstof.
- Een **mengsel** bevat twee of meer soorten deeltjes, van verschillende stoffen: kraanwater, lucht, melk, brons.

In een mengsel behoudt elke stof haar eigen deeltjes en dus haar eigen eigenschappen. Suiker in water is nog altijd zoet; het ijzer in een mengsel van zand en ijzervijlsel is nog altijd magnetisch. Daarom kan je een mengsel scheiden met een techniek die gebruikmaakt van zo'n verschil (hoofdstuk 9). En de verhouding in een mengsel kan je kiezen: een beetje of veel suiker in je thee.

Hoe zie je of iets zuiver is? Niet met het oog: kraanwater en gedestilleerd water zien er hetzelfde uit. Wel met een **stofeigenschap die je nauwkeurig meet**. Een zuivere stof smelt en kookt bij één vaste temperatuur; een mengsel smelt en kookt over een temperatuurgebied (verderop in dit hoofdstuk).

Een mengsel is een nieuwe stof

Als je zout in water oplost, verdwijnt het zout niet en ontstaat er geen nieuwe stof: indampen geeft je het zout terug. Bij een **chemische reactie**, zoals het verbranden van hout of het roesten van ijzer, ontstaan wel nieuwe stoffen met andere eigenschappen. Reacties zijn het onderwerp van hoofdstuk 14 (Intermediate).



zuivere stof
water

zuivere stof
koper

homogeen mengsel
suikerwater

heterogeen mengsel
zand in water

Blauw: waterdeeltjes; groen: suiker; donker: zandkorrels (elk korreltje bevat zelf miljarden deeltjes).

UITLEG · 8.5

Homogeen en heterogeen

5/17

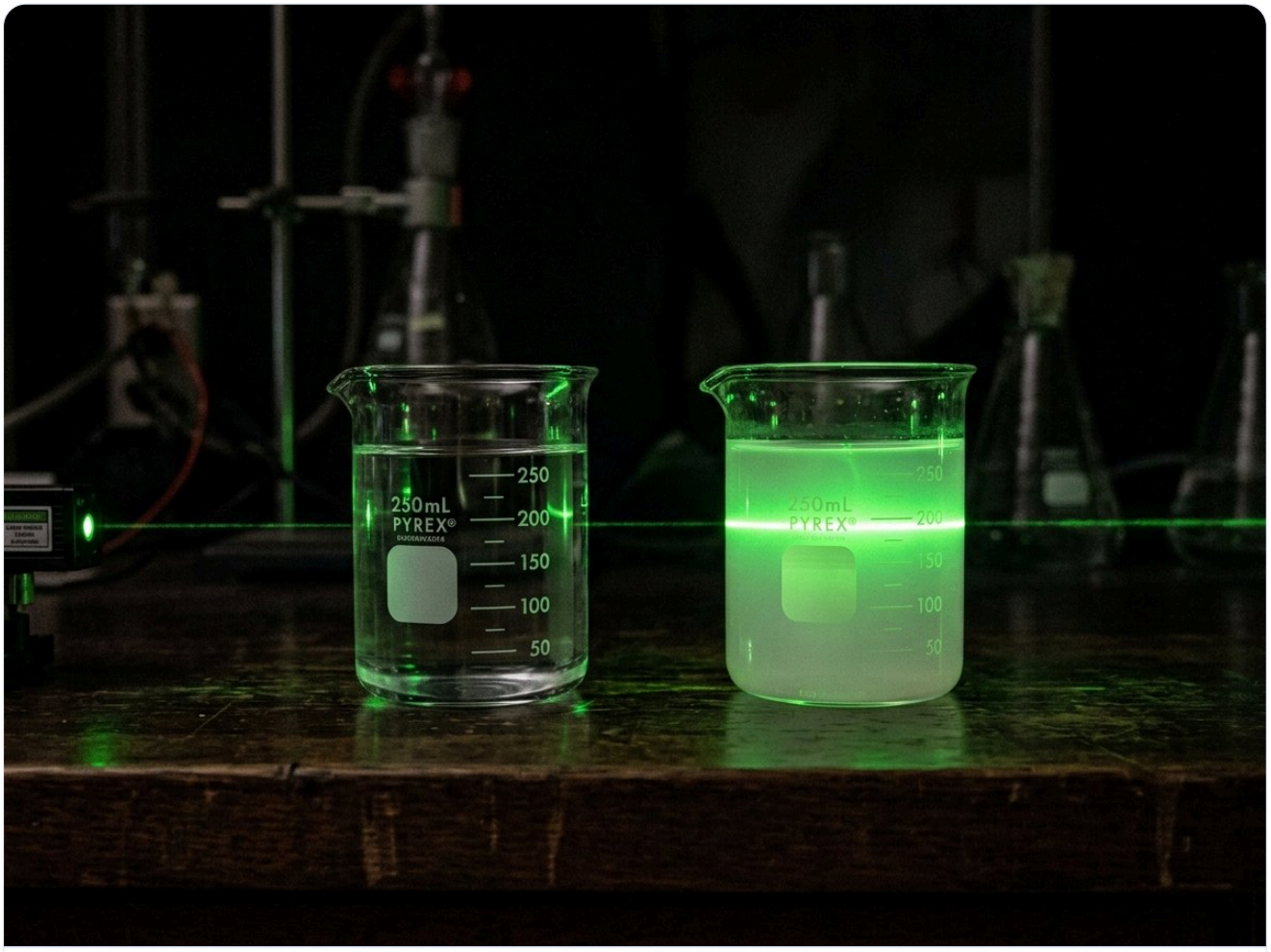
Mengsels deel je in volgens wat je ziet.

- In een **homogeen** mengsel zijn de stoffen tot op het niveau van de deeltjes gemengd. Het mengsel is overal hetzelfde en meestal helder (doorzichtig, al kan het gekleurd zijn): suikerwater, zeewater na filtreren, lucht, brons.
- In een **heterogeen** mengsel zitten brokjes, druppeltjes of belletjes van de ene stof in de andere. Soms zie je dat meteen (zand in water), soms pas onder een microscoop (melk: vetdruppeltjes in water). Een heterogeen mengsel is vaak troebel, en na een tijd kan het ontmengen: de deeltjes zakken (modderwater) of stijgen (room op melk die niet gehomogeniseerd is).

soort	wat zit waarin?	voorbeelden
homogeen: overal hetzelfde, ook onder een microscoop		
oplossing	vaste stof, vloeistof of gas opgelost in een vloeistof	suikerwater, zeewater, spuitwater, wijn
gasmengsel	gas in gas	lucht, uitgeademde lucht
legering	metaal met een ander metaal (of koolstof), samen gesmolten en gestold	brons, messing, staal, soldeertin
heterogeen: je ziet (met het oog of een microscoop) verschillende delen		
suspensie	vaste deeltjes in een vloeistof	modderwater, sinaasappelsap met vruchtvlees, verf
emulsie	druppeltjes vloeistof in een andere vloeistof	melk, mayonaise, vinaigrette na schudden
schuim	gasbellen in een vloeistof of vaste stof	slagroom, bierschuim, piepschuim, brood
rook	vaste deeltjes in een gas	rook van een kampvuur, fijnstof
nevel	druppeltjes vloeistof in een gas	mist, wolken, spray
vast mengsel	korrels van verschillende stoffen	graniet, beton, muesli, potgrond

Een lichtstraal als test

Schijn met een laserpointer (nooit in iemands ogen) of een smalle lichtbundel door een glas. In zout water zie je de straal *niet*: de opgeloste deeltjes zijn te klein om licht opzij te sturen. In water met een paar druppels melk zie je een heldere streep: de vetdruppeltjes verstrooien het licht. Zo zie je dat melk heterogeen is, al lijkt het één witte vloeistof. Dat heet het **Tyndall-effect**; je ziet het ook aan zonnestralen in mist of in een stoffige zolder.



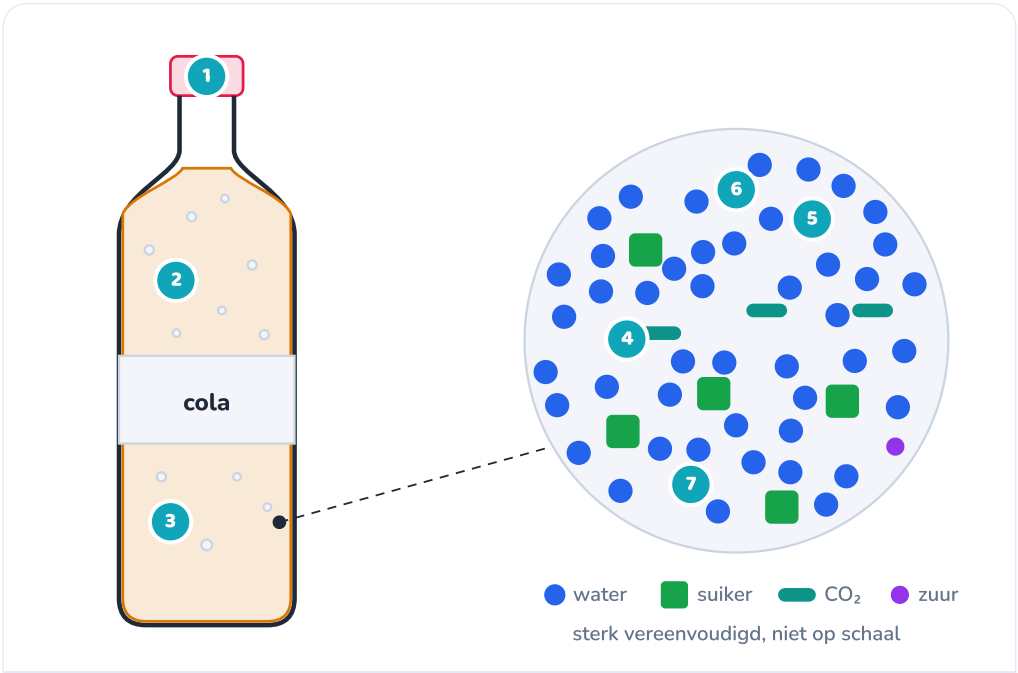
Links een oplossing, rechts water met wat melk: alleen in het heterogene mengsel zie je de straal.

ONTLEED · 8.6

Een fles cola, ingezoomd

6/17

Een gesloten fles cola is een homogeen mengsel: een oplossing met veel opgeloste stoffen, waaronder een gas. Draai je de dop open, dan verandert dat.



Links de fles, rechts een sterk vergrote druppel: water als oplosmiddel, met suiker, koolstofdioxide en zuur erin opgelost.

1 Dop
Houdt het gas onder druk in de fles. Zolang die druk er is, blijft er veel koolstofdioxide opgelost.

2 Belletjes na het openen
Zakt de druk, dan kan niet al het gas opgelost blijven: er ontstaan bellen. Nu is het mengsel heterogeen (gas in vloeistof). Warme cola verliest sneller zijn prik: gassen lossen slechter op in warm water.

3 De oplossing
Helder (bruin gekleurd, maar doorzichtig): homogeen. Een lichtstraal gaat er onzichtbaar door.

4 Water: het oplosmiddel
Bijna 90 % van de massa. Het water 'draagt' alle andere stoffen.

5 Suiker: opgeloste stof
Ongeveer 10 à 11 g per 100 mL, dus ruim 100 g/L. In een blikje van 33 cL zit ongeveer 35 g suiker.

6 Koolstofdioxide: opgelost gas
Onder druk opgelost; het geeft de prik en maakt de drank iets zuurder.

7 Zuur, kleur- en smaakstoffen
Kleine hoeveelheden, maar ze bepalen de smaak. Cola is zuur (pH ongeveer 2,5, hoofdstuk 15 in Intermediate).

UITLEG · 8.7

Oplossen: oplosmiddel en opgeloste stof

7/17

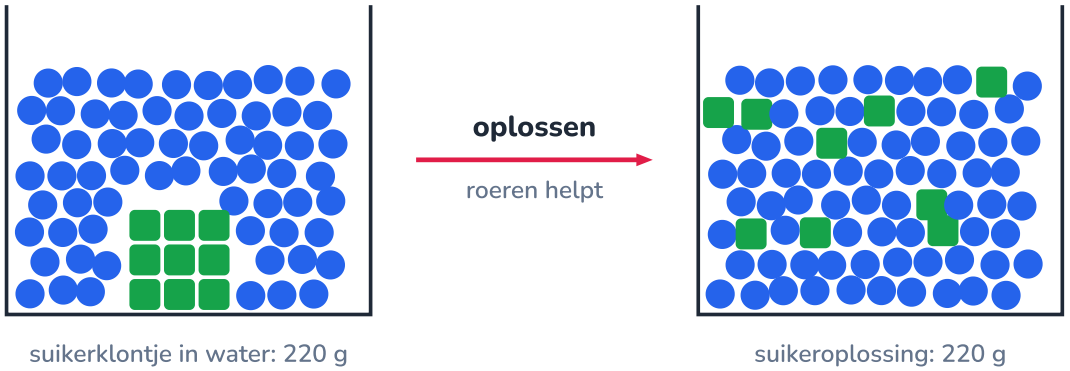
Doe een suikerklontje in water en wacht: het klontje wordt kleiner en verdwijnt. De suiker is niet weg (het water smaakt zoet), maar ze is **opgelost**. De watermoleculen botsen voortdurend tegen de suiker en maken deeltje na deeltje los. Door diffusie (hoofdstuk 6) raken die suikerdeeltjes verspreid tussen de waterdeeltjes, tot ze overal even dicht zitten.

- De stof die oplost, heet de **opgeloste stof** (hier: suiker).
- De stof waarin ze oplost, heet het **oplosmiddel** (hier: water). Zijn er twee vloeistoffen, dan noem je de stof waarvan er het meest is het oplosmiddel.
- Samen vormen ze een **oplossing**: een homogeen mengsel.

De massa blijft behouden. 200 g water en 20 g suiker geven 220 g suikerwater: er gaan geen deeltjes verloren. Het volume telt niet altijd netjes op, omdat kleine deeltjes in de ruimte tussen grotere kunnen schuiven: 50 mL alcohol en 50 mL water geven samen maar ongeveer 97 mL.

Sneller oplossen doe je door te roeren, door de stof fijner te maken (poedersuiker lost sneller op dan een klontje: meer oppervlak) en door het oplosmiddel te verwarmen (snellere deeltjes).

Niet alles lost op in water. Olie, vet, zand en was lossen niet op. Water is wel het beste oplosmiddel dat we kennen, maar voor sommige stoffen heb je een ander nodig: alcohol voor de inkt van een watervaste stift, aceton voor nagellak, wasbenzine voor vet. Waarom dat zo is, leer je in Intermediate (hoofdstuk 13).



Voor en na het oplossen: dezelfde deeltjes, dezelfde massa. De suikerdeeltjes zitten nu verspreid tussen de waterdeeltjes.

UITLEG · 8.8

Verzadigd: hoeveel er maximaal oplost

8/17

Blijf je zout in een glas water scheppen en roeren, dan komt er een moment waarop het zout niet meer oplost: het blijft als een laagje op de bodem liggen (een **bezinksel**). De oplossing is dan **verzadigd**. Zolang er nog meer kan oplossen, is ze **onverzadigd**.

Hoeveel er maximaal oplost, is een stofeigenschap: de **oplosbaarheid**. Je drukt ze uit als het aantal gram dat oplost in 100 g water (100 mL) bij een bepaalde temperatuur. Keukenzout: 35,9 g bij 20 °C. Suiker lost veel beter op: 202 g in 100 g water, meer suiker dan water! Krijt, zand en olie lossen praktisch niet op.

Bij de meeste vaste stoffen stijgt de oplosbaarheid met de temperatuur, maar niet bij allemaal even sterk. Dat zie je in een **oplosbaarheidscurve**. Kaliumnitraat (een meststof, ook voor de meetkas) lost bij 20 °C maar 31,6 g op per 100 g water, en bij 60 °C al 110 g. De curve van keukenzout is bijna vlak: van 35,7 g bij 0 °C tot 39,0 g bij 100 °C.

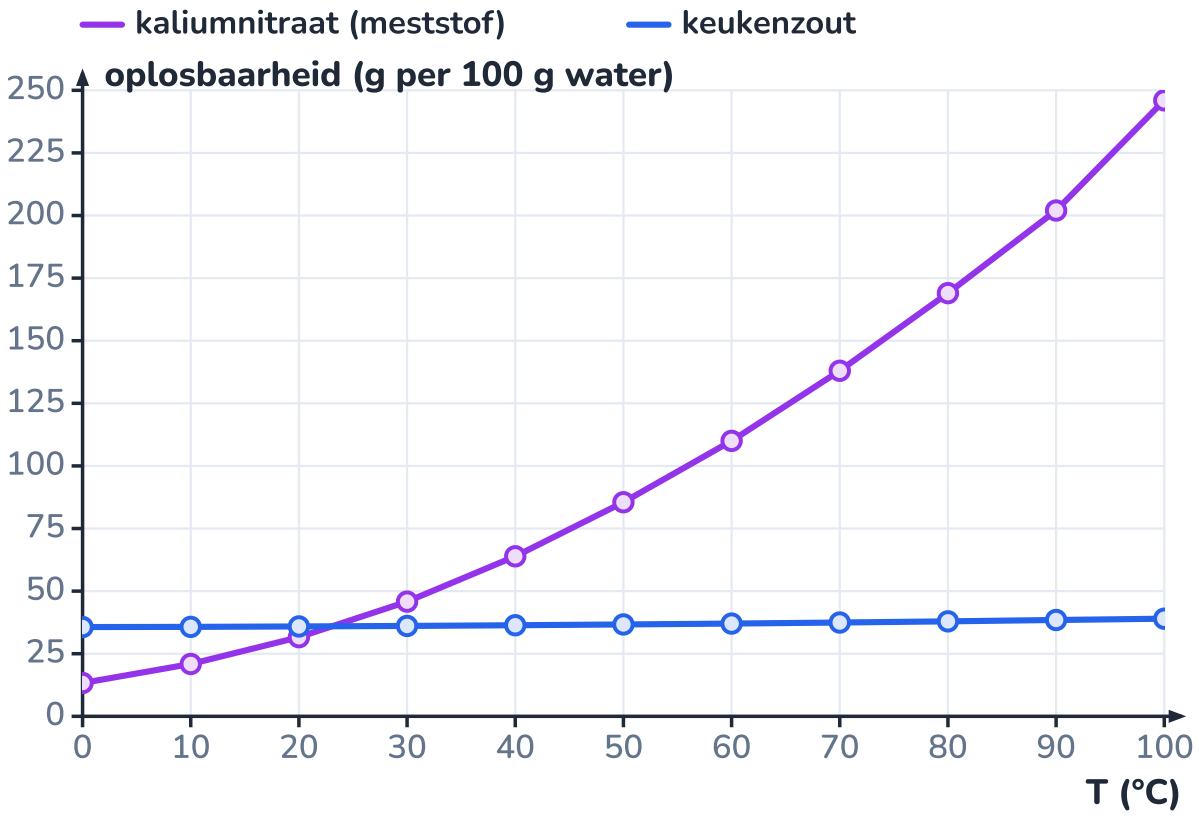
Koel je een verzadigde oplossing af, dan kan er minder opgelost blijven: het teveel komt terug als vaste stof, vaak in mooie kristallen. Dat heet **kristalliseren**. Zo zuivert men stoffen, en zo maak je kandijsuiker (opdracht 8.15).

T (°C)	0	20	40	60	80	100
keukenzout	35,6	35,9	36,4	37,0	37,9	39,0
kaliumnitraat	13,3	31,6	63,9	110	169	246
suiker	182	202	236	289	365	476

Maximaal op te lossen massa, in gram per 100 g water (100 g water is 100 mL).

Gassen doen het omgekeerd

Gassen lossen *slechter* op in warm water. Water van 10 °C kan ongeveer 11 mg zuurstof per liter bevatten, water van 30 °C maar ongeveer 7,6 mg. Daarom krijgen vissen het moeilijk in een warme zomer, verliest warme frisdrank snel zijn prik, en moet de voedingsoplossing van een hydrocultuur koel en belucht blijven (hoofdstuk 36 in Intermediate).



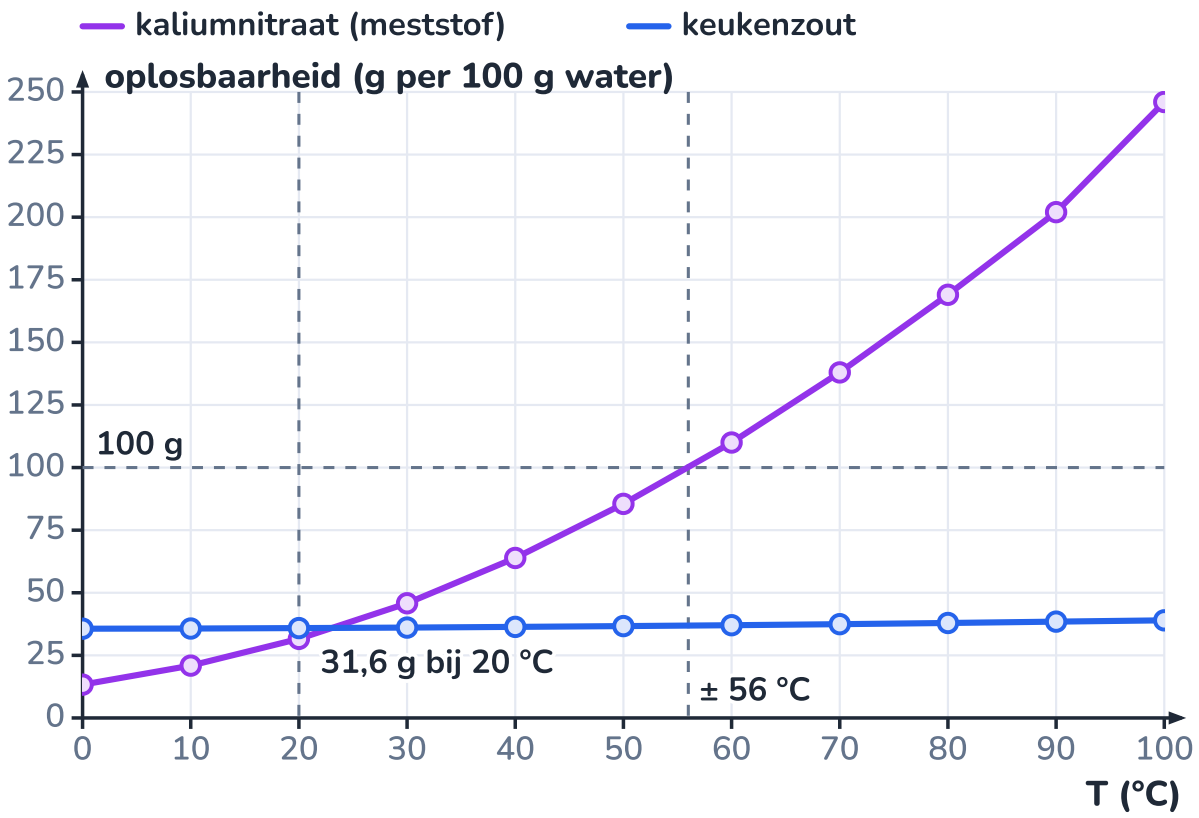
Kaliumnitraat lost bij hoge temperatuur veel beter op; keukenzout bijna even goed bij elke temperatuur.

UITGEWERKT VOORBEELD · 8.9

Een oplosbaarheidscurve lezen

9/17

In 100 g water van 70 °C los je 100 g kaliumnitraat op. Je laat de oplossing afkoelen tot 20 °C. (a) Is de oplossing bij 70 °C verzadigd? (b) Bij welke temperatuur verschijnen de eerste kristallen? (c) Hoeveel gram kristallen liggen er bij 20 °C? (d) Waarom werkt deze methode slecht om keukenzout uit zout water te halen?



Horizontale hulplijn bij 100 g: die snijdt de curve van kaliumnitraat bij ongeveer 56 °C.

GEGEVEN

- 100 g kaliumnitraat in 100 g water, bij 70 °C
- de oplosbaarheidscurve en de tabel

GEVRAAGD

- verzadigd bij 70 °C?
- temperatuur van de eerste kristallen
- massa kristallen bij 20 °C
- keukenzout?

OPLOSSING

1 (a) Bij 70 °C lost er maximaal 138 g op. 100 g is minder: de oplossing is **onverzadigd**.

2 (b) Zoek op de curve waar de oplosbaarheid 100 g is: tussen 50 °C (85,5 g) en 60 °C (110 g), ongeveer bij **56 °C**. Tot dan blijft alles opgelost; onder 56 °C is er meer kaliumnitraat dan er kan opgelost blijven.

3 (c) Bij 20 °C blijft er maar 31,6 g opgelost. De rest kristalliseert: $100 - 31{,}6 = 68{,}4\,\text{g}$ kristallen, en de vloeistof erboven is een verzadigde oplossing.

4 (d) De curve van keukenzout is bijna vlak: een verzadigde oplossing van 60 °C (37,0 g) houdt bij 20 °C nog 35,9 g opgelost. Er kristalliseert amper 1,1 g. Keukenzout haal je daarom uit water door het water te laten **verdampen** (indampen, hoofdstuk 9).

ANTWOORD

(a) onverzadigd; (b) bij ongeveer 56 °C; (c) 68,4 g kristallen; (d) de oplosbaarheid van keukenzout verandert bijna niet met de temperatuur.

Klopt dit? Lees af op de grafiek én controleer met de tabel: 56 °C ligt netjes tussen 50 en 60 °C, en 100 g tussen 85,5 en 110 g. Een curve interpoleer je, je rekent niet met één punt.

UITLEG · 8.10

Concentratie: hoeveel gram per liter

10/17

Hoe sterk is een oplossing? Dat zegt de **concentratie**: hoeveel gram opgeloste stof er in één liter oplossing zit.

CONCENTRATIE

$$c = \frac{m}{V}$$

m: massa van de opgeloste stof (g); V: volume van de oplossing (L); c in g/L. Omgevormd: $m = c \cdot V$ en $V = m/c$.

Doe je 10 g suiker in een liter water, dan is de concentratie 10 g/L. Dezelfde 10 g in een halve liter geeft 20 g/L: de suikerdeeltjes zitten dichter op elkaar (figuur). Voor kleine concentraties gebruik je milligram per liter (mg/L).

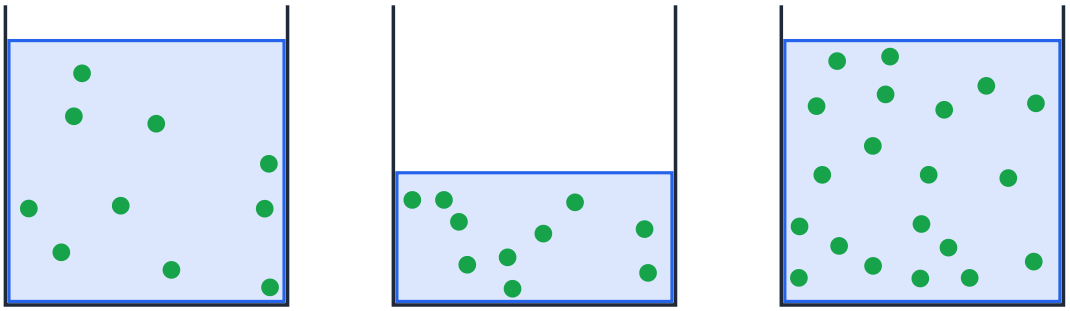
oplossing	opgeloste stof	concentratie
zuurstof in water van 20 °C (maximum)	zuurstof	± 9 mg/L
drinkwater (wettelijk maximum)	nitraat	50 mg/L
voedingsoplossing voor planten	voedingszouten	± 1 à 2 g/L
fysiologisch zout (infuus, lenzenvloeistof)	keukenzout	9 g/L
zeewater	zouten	± 35 g/L
cola	suiker	± 105 g/L

Concentratie en dichtheid zijn hetzelfde, want allebei g/L

Ze hebben dezelfde eenheid, maar meten iets anders. De **dichtheid** van zeewater is de massa van de hele oplossing per liter: ongeveer 1025 g/L. De **concentratie** is alleen de massa van het opgeloste zout per liter: ongeveer 35 g/L. Kijk dus altijd welke massa er in de teller staat.

Per liter oplossing

De concentratie gaat over het volume van de *oplossing*, niet van het water dat je gebruikte. Bij een paar gram per liter is het verschil verwaarloosbaar. Bij sterke oplossingen niet: los je 300 g suiker op in 1 L water, dan heb je bijna 1,2 L oplossing.



10 g in 1,0 L
c = 10 g/L

10 g in 0,5 L
c = 20 g/L

20 g in 1,0 L
c = 20 g/L

Elk groen bolletje stelt 1 g suiker voor. Het tweede en derde glas hebben dezelfde concentratie.

UITGEWERKT VOORBEELD · 8.11

Rekenen met concentraties

11/17

(a) Fysiologisch zout heeft een concentratie van 9,0 g/L. Hoeveel zout zit er in een zakje infuus van 250 mL? (b) Op een blikje cola van 330 mL staat: 35 g suiker. Wat is de concentratie? (c) Zeewater bevat ongeveer 35 g zout per liter. Hoeveel liter zeewater moet je indampen voor een pak van 1,0 kg zout?

GEGEVEN

- (a) $c = 9{,}0\,\mathrm{g/L}$, $V = 250\,\mathrm{mL}$
- (b) $m = 35\,\mathrm{g}$, $V = 330\,\mathrm{mL}$
- (c) $c = 35\,\mathrm{g/L}$, $m = 1{,}0\,\mathrm{kg}$

GEVRAAGD

- (a) m
- (b) c
- (c) V

OPLOSSING

1. **Eenheden eerst**: de concentratie staat in g/L, dus het volume in liter en de massa in gram.
2. (a) $V = 250\,\mathrm{mL} = 0{,}250\,\mathrm{L}$. $m = c \cdot V = 9{,}0\,\mathrm{g/L} \times 0{,}250\,\mathrm{L} = 2{,}25\,\mathrm{g}$.
3. (b) $V = 0{,}330\,\mathrm{L}$. $c = \dfrac{m}{V} = \dfrac{35\,\mathrm{g}}{0{,}330\,\mathrm{L}} \approx 106\,\mathrm{g/L}$.
4. (c) $m = 1000\,\mathrm{g}$. $V = \dfrac{m}{c} = \dfrac{1000\,\mathrm{g}}{35\,\mathrm{g/L}} \approx 29\,\mathrm{L}$.

ANTWOORD

(a) 2,25 g zout; (b) ongeveer 106 g/L; (c) ongeveer 29 L zeewater (bijna drie emmers).

Klopt dit? Grootte-check: 9 g per liter is ongeveer een theelepel per liter; in een kwartliter dus een kwart daarvan, ruim 2 g. En 29 L zeewater voor 1 kg zout verklaart waarom zoutpannen zo groot zijn: het water verdampt er in de zon (hoofdstuk 9).

UITGEWERKT VOORBEELD · 8.12

Habitat: de voedingsoplossing voor de meetkas

12/17

De planten in de meetkas krijgen water uit het reservoir. Om ze te voeden, los je er **voedingszouten** in op (stikstof, fosfor, kalium en andere). De juiste sterkte is **1,0 g per liter**. Je gebruikt een vloeibare plantenvoeding die 200 g voedingszouten per liter bevat. (a) Hoeveel mL van die vloeistof heb je nodig per liter water? (b) Hoeveel mL voor het reservoir, gevuld met 24 L? (c) Hoeveel gram voedingszouten krijgen de planten per dag, als ze 1,8 L verbruiken?



120 mL plantenvoeding in 24 L water: 1,0 g voedingszouten per liter.

GEGEVEN

- gewenst: $c = 1{,}0\,\mathrm{g/L}$
- plantenvoeding: $c = 200\,\mathrm{g/L}$
- reservoir: $24\,\mathrm{L}$; verbruik: $1{,}8\,\mathrm{L}$ per dag

GEVRAAGD

- mL plantenvoeding per liter
- mL voor 24 L
- g voedingszouten per dag

OPLOSSING

1 (a) In 1 L gietwater moet 1,0 g voedingszouten. De plantenvoeding bevat 200 g/L. Welk volume bevat 1,0 g? $V = \frac{m}{c} = \frac{1{,}0\,\mathrm{g}}{200\,\mathrm{g/L}} = 0{,}005\,\mathrm{L} = 5\,\mathrm{mL}$: één dopje per liter.

2 (b) Voor 24 L: $24 \times 1{,}0\,\mathrm{g} = 24\,\mathrm{g}$ voedingszouten, dus $24 \times 5\,\mathrm{mL} = 120\,\mathrm{mL}$ plantenvoeding. De vloeistof wordt 200 keer verdund.

3 (c) $m = c \cdot V = 1{,}0\,\mathrm{g/L} \times 1{,}8\,\mathrm{L} = 1{,}8\,\mathrm{g}$ per dag.

ANTWOORD

(a) 5 mL per liter; (b) 120 mL voor het reservoir; (c) ongeveer 1,8 g voedingszouten per dag.

Klopt dit? De 120 mL plantenvoeding maakt het volume 24,12 L in plaats van 24 L: een verschil van een half procent, te verwaarlozen. Meer is niet beter: een te sterke oplossing trekt water uit de wortels, en de planten verwelken. In opdracht 8.12 bereken je wat er gebeurt als je het reservoir bijvult.

Legeringen, lucht en zeewater

Drie mengsels waar je elke dag mee te maken hebt:

Legeringen. Zuivere metalen zijn vaak te zacht. Meng je er een ander metaal door (in gesmolten toestand), dan krijg je een **legering** met betere eigenschappen:

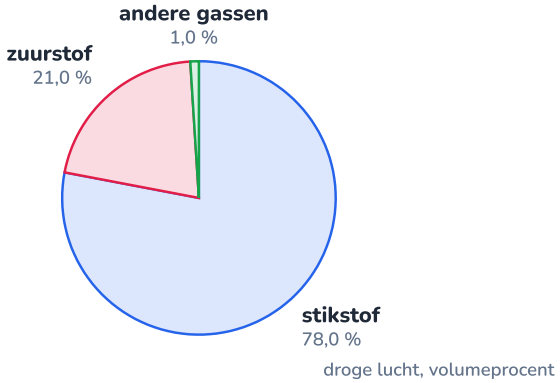
legering	samenstelling	waarom
brons	koper met ± 12 % tin	harder dan koper; klokken, beelden, lagers
messing	koper met 30 à 40 % zink	goed te bewerken, roest niet; sleutels, kranen
staal	ijzer met minder dan 2 % koolstof	veel sterker en taaier dan zuiver ijzer
roestvast staal	staal met minstens 10,5 % chroom (vaak ook nikkel)	roest niet; bestek, spoelbak
soldeertin (loodvrij)	tin met 3 % zilver en 0,5 % koper	smelt lager dan de onderdelen (hoofdstuk 5)
goud van 18 karaat	75 % goud, rest zilver en koper	harder en slijtvaster dan zuiver goud

Lucht is een homogeen gasmengsel. Droge lucht bestaat (in volume) voor 78 % uit stikstof, 21 % zuurstof, 0,9 % argon en ongeveer 0,04 % koolstofdioxide, plus sporen van andere gassen. Daarnaast bevat lucht een wisselende hoeveelheid waterdamp (hoofdstuk 6). Dat kleine beetje koolstofdioxide is wel wat planten nodig voor fotosynthese (hoofdstuk 27).

Zeewater is ongeveer 96,5 % water en 3,5 % opgeloste zouten: ± 35 g per liter, waarvan ruim drie kwart keukenzout. Het is een oplossing, dus homogeen, zolang er geen zand of plankton in zweeft. Het bevriest pas rond −2 °C en is iets dichter dan zoet water (1,025 g/cm³, hoofdstuk 7).

Waarom geen zeewater drinken?

Je nieren kunnen het zout niet sneller kwijt dan in urine die minder zout is dan zeewater. Om het zout van één liter zeewater af te voeren, verlies je dus meer water dan je gedronken hebt. Op zee kan je van dorst omkomen, midden in het water. Daarom maakt een schip drinkwater door zeewater te destilleren of te filtreren door een heel fijn membraan (hoofdstuk 9).



Stikstof en zuurstof vormen samen 99 % van droge lucht. 'Andere gassen' is vooral argon.



Brons, messing, roestvast staal, soldeertin en goud van 18 karaat: allemaal legeringen.

UITLEG · 8.14

Smelten, stollen en koken: zuiver of mengsel?

14/17

In hoofdstuk 6 zag je de opwarmcurve van ijs en de afkoelcurve van stearinezuur: tijdens een faseovergang blijft de temperatuur van een **zuivere stof** gelijk. Een vlak stuk in de grafiek bij één temperatuur is het kenmerk van een zuivere stof.

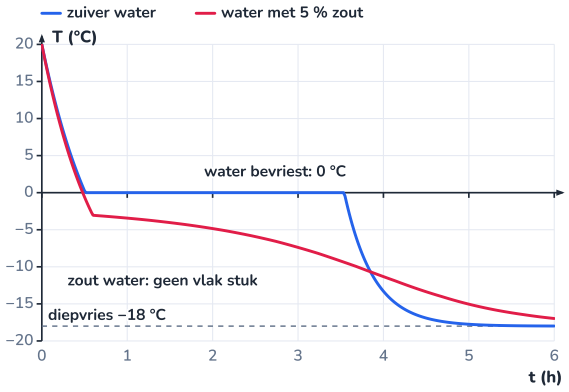
Een **mengsel** gedraagt zich anders. De grafiek toont 100 g zuiver water en 100 g water met 5 % zout, samen in een diepvries van −18 °C (berekend met een eenvoudig model).

- Het **zuivere water** koelt af tot 0 °C en blijft daar staan tot alles bevroren is, van 0,5 h tot 3,5 h. Pas daarna koelt het ijs verder af.
- Het **zoute water** begint pas te bevriezen bij ongeveer −3 °C. Er vormt zich ijs van zuiver water; het zout blijft achter in het water dat nog vloeibaar is. Dat restje wordt dus zouter, en zouter water bevriest pas bij een lagere temperatuur. De temperatuur blijft dalen tijdens het bevriezen: na 3 uur is het −7 °C, na 5 uur −15 °C, en er is nog altijd een beetje zeer zout vloeibaar water tussen het ijs. Een vlak stuk is er niet.

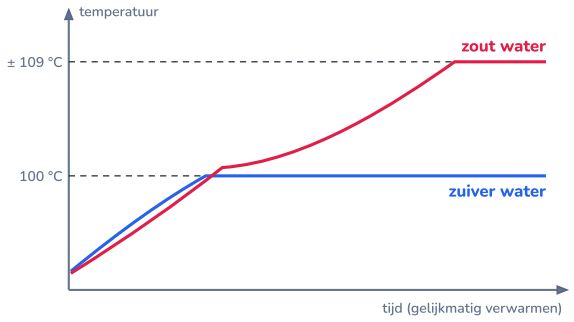
Bij het **koken** zie je hetzelfde (schets). Zuiver water kookt bij 100 °C en blijft daar. Zout water begint iets boven 100 °C te koken, en terwijl het water wegkookt, wordt de oplossing zouter en stijgt de kooktemperatuur verder, tot ongeveer 109 °C als ze verzadigd is. Vanaf dan kristalliseert het zout en blijft de temperatuur gelijk.

Zo herken je een mengsel

Een zuivere stof smelt, stolt en kookt bij **één** temperatuur: een vlak stuk. Een mengsel doet het over een **temperatuurgebied**, meestal lager (smelten, stollen) of hoger (koken) dan de zuivere stof. Daarom strooien we zout op de weg: zout water bevriest pas onder 0 °C, zodat het ijs smelt. Bij strenge vorst (kouder dan ongeveer −10 °C) werkt het veel minder goed.



Zuiver water: een vlak stuk bij 0 °C. Zout water: geen vlak stuk, de temperatuur blijft zakken terwijl er ijs bij komt.



Schets, niet op schaal: zuiver water kookt bij één temperatuur, zout water over een gebied.

UITGEWERKT VOORBEELD · 8.15

Is dit poeder zuiver?

15/17

Een apotheker controleert een lading pijnstiller. Zuivere paracetamol smelt bij 169 °C. Ze bepaalt het smeltpunt van drie stalen door een beetje poeder langzaam te verwarmen:

staal	begint te smelten bij	volledig gesmolten bij
A	168,5 °C	169,5 °C

staal	begint te smelten bij	volledig gesmolten bij
B	158 °C	165 °C
C	168,6 °C	169,4 °C

(a) Welke stalen zijn zuiver? (b) Wat is er met staal B aan de hand? (c) Ze mengt een beetje van staal A met een onbekend wit poeder X. Het mengsel smelt scherp bij 169 °C. Wat besluit ze over X?

GEGEVEN

- smeltpunt zuivere paracetamol: 169 °C
- smeltgedrag van drie stalen

GEVRAAGD

- zuiver of niet
- verklaring voor B
- wat is X?

OPLOSSING

1. (a) A en C smelten binnen één graad, rond 169 °C: dat is het scherpe smeltpunt van zuivere paracetamol.
2. (b) Staal B smelt **lager** en over een **gebied** van 7 °C. Dat is het kenmerk van een mengsel: er zit een andere stof in, een verontreiniging. Die lading mag niet verkocht worden.
3. (c) Was X een andere stof, dan zou het mengsel lager en over een gebied smelten, zoals B. Het smelt scherp bij 169 °C: X is zelf zuivere paracetamol. Deze controle met een mengsel heet een **mengsmeltpunt**.

ANTWOORD

(a) A en C; (b) B is verontreinigd: een mengsel smelt lager en over een temperatuurgebied; (c) X is paracetamol.

Klopt dit? Zo controleren labo's echt de zuiverheid van geneesmiddelen en grondstoffen: een smeltpunttoestel verwarmt een klein buisje poeder heel langzaam, zodat je het begin en het einde van het smelten nauwkeurig ziet.

NASLAG · 8.16

Overzicht: stoffen, mengsels en oplossingen

16/17

concentratie

$$c = \frac{m}{V} \qquad m = c \cdot V \qquad V = \frac{m}{c}$$

symbool	betekenis	eenheid
c	concentratie	g/L (of mg/L)
m	massa opgeloste stof	g
V	volume oplossing	L

begrip	betekenis	voorbeeld
zuivere stof	één soort deeltjes; vast smelt- en kookpunt	gedestilleerd water, suiker, koper
homogeen mengsel	overal hetzelfde, meestal helder	suikerwater, lucht, brons
heterogeen mengsel	verschillende delen te onderscheiden, vaak troebel	melk, modderwater, mist
oplosmiddel	de stof waarin iets oplost	water in suikerwater
opgeloste stof	de stof die oplost	suiker in suikerwater
verzadigd	er kan niet meer oplossen	zout water met zout op de bodem
oplosbaarheid	maximaal op te lossen massa per 100 g water, bij een temperatuur	keukenzout: 35,9 g bij 20 °C
kristalliseren	vaste stof komt uit een oplossing terug	kandijsuiker, zoutkristallen

soort	wat zit waarin?	voorbeelden
homogeen: overal hetzelfde, ook onder een microscoop		
oplossing	vaste stof, vloeistof of gas opgelost in een vloeistof	suikerwater, zeewater, spuitwater, wijn
gasmengsel	gas in gas	lucht, uitgeademde lucht
legering	metaal met een ander metaal (of koolstof), samen gesmolten en gestold	brons, messing, staal, soldeertin
heterogeen: je ziet (met het oog of een microscoop) verschillende delen		
suspensie	vaste deeltjes in een vloeistof	modderwater, sinaasappelsap met vruchtvlees, verf
emulsie	druppeltjes vloeistof in een andere vloeistof	melk, mayonaise, vinaigrette na schudden
schuim	gasbellen in een vloeistof of vaste stof	slagroom, bierschuim, piepschuim, brood
rook	vaste deeltjes in een gas	rook van een kampvuur, fijnstof
nevel	druppeltjes vloeistof in een gas	mist, wolken, spray
vast mengsel	korrels van verschillende stoffen	graniet, beton, muesli, potgrond

T (°C)	0	20	40	60	80	100
keukenzout	35,6	35,9	36,4	37,0	37,9	39,0
kaliumnitraat	13,3	31,6	63,9	110	169	246
suiker	182	202	236	289	365	476

Maximaal op te lossen massa, in gram per 100 g water (100 g water is 100 mL).

	zuivere stof	mengsel
smelten, stollen	bij één temperatuur: vlak stuk	over een gebied, meestal lager
koken	bij één temperatuur	over een gebied, meestal hoger
samenstelling	vast	kan je kiezen
eigenschappen	vast (stofeigenschappen)	hangen af van de samenstelling

HET GEHEEL · 8.17

Waar stoffen en mengsels naartoe leiden

17/17

Met dit hoofdstuk heb je de woordenschat van de leerlijn **materie en chemie**: stof, mengsel, oplossing, concentratie. Je gebruikt ze meteen in hoofdstuk 9 (stoffen scheiden op basis van hun eigenschappen) en hoofdstuk 10 (materialen, waaronder legeringen). In Intermediate kijk je binnen in de deeltjes: atomen, ionen en bindingen verklaren waarom zout water geleidt en suikerwater niet, en waarom olie niet oplost in water. Concentraties komen terug bij de pH, bij reacties en bij de hydrocultuur. In Expert reken je met chemisch evenwicht, bijvoorbeeld wanneer een zout neerslaat.

F5 Veilig werken in labo en werkplaats

Etiketten en pictogrammen: stofeigenschappen als ontvlambaarheid en giftigheid, en veilig werken met oplossingen.

F6 Het deeltjesmodel

Het deeltjesmodel verklaart oplossen (diffusie) en de vlakke stukken in een smelt- en kookcurve.

F7 Massa, volume en dichtheid

Dichtheid als stofeigenschap; de dichtheid van zout water en het ei dat zweeft.

F9 Mengsels scheiden

Filtreren, indampen, destilleren, kristalliseren: stoffen uit een mengsel halen.

F10 Materialen en hun eigenschappen

Legeringen en composieten als materialen met eigenschappen op maat.

F27 Planten: fotosynthese en groei

Wat een plant uit de voedingsoplossing en uit de lucht haalt.

I12 Atomen en het periodiek systeem

Welke elementen een plant nodig heeft: N, P, K en andere.

I13 Chemische bindingen en stofeigenschappen

Ionen en polariteit: waarom zout oplost en geleidt, en olie niet oplost. De EC-meter.

I14 Reacties en stoichiometrie

Bij een reactie ontstaan nieuwe stoffen; rekenen met de mol.

I36 Hydroponie en voedselproductie

De voedingsoplossing op sterkte houden met EC en pH.

E26 Chemisch evenwicht

Oplosbaarheid en neerslag als evenwicht, kwantitatief.

Habitat

In de meetkas gaat de voedingsoplossing via de pomp naar de planten: 1,0 g voedingszouten per liter, of 5 mL van een plantenvoeding met 200 g/L per liter water, dus 120 mL voor 24 L. In opdracht 8.12 werk je een doseerplan uit voor je portfolio, ook voor het bijvullen van het reservoir.

SAMENVATTING

In het kort

- Stofeigenschappen horen bij de stof, niet bij het voorwerp: kleur, geur, smeltpunt, kookpunt, dichtheid, oplosbaarheid, geleiding. Combineer er enkele om een stof te herkennen.
- Een zuivere stof bestaat uit één soort deeltjes; een mengsel uit twee of meer. In een mengsel behoudt elke stof haar eigenschappen.
- Een homogeen mengsel is overal hetzelfde (oplossing, gasmengsel, legering); in een heterogeen mengsel zie je verschillende delen (suspensie, emulsie, schuim, rook, nevel).
- Een oplossing bestaat uit een opgeloste stof in een oplosmiddel. De massa blijft behouden bij het oplossen.
- De oplosbaarheid (g per 100 g water) hangt af van de stof en de temperatuur. Een verzadigde oplossing kan niet meer oplossen; afkoelen laat het teveel kristalliseren.
- Concentratie is massa opgeloste stof per volume oplossing: $c = m/V$ in g/L. Niet te verwarren met dichtheid.
- Legeringen (brons, messing, staal), lucht (78 % stikstof, 21 % zuurstof) en zeewater (± 35 g zout per liter) zijn mengsels.
- Een zuivere stof smelt, stolt en kookt bij één temperatuur (vlak stuk in de curve); een mengsel over een temperatuurgebied.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

stofeigenschap

Eigenschap die bij een stof hoort, los van de grootte of vorm van het voorwerp: smeltpunt, kookpunt, dichtheid, kleur, oplosbaarheid, geleiding.

zuivere stof

Stof die uit één soort deeltjes bestaat; ze heeft een vast smeltpunt en een vast kookpunt.

mengsel

Twee of meer stoffen samen, elk met haar eigen deeltjes; een mengsel smelt en kookt over een temperatuurgebied.

homogeen mengsel

Mengsel dat overal hetzelfde is, ook onder een microscoop: een oplossing, een gasmengsel, een legering.

heterogeen mengsel

Mengsel waarin je verschillende delen kan onderscheiden: suspensie, emulsie, schuim, rook, nevel.

oplossing

Homogeen mengsel van een opgeloste stof in een oplosmiddel, bv. suiker in water.

oplosbaarheid

verzadigde oplossing

concentratie

De grootste massa van een stof die oplost in 100 g oplosmiddel bij een bepaalde temperatuur.

Oplossing waarin niet meer van de stof kan oplossen; extra stof blijft als bezinksel liggen.

Massa opgeloste stof per volume oplossing: $c = m/V$, meestal in g/L.

legering
Mengsel van een metaal met andere metalen of met koolstof, zoals brons, messing en staal.

emulsie
Heterogeen mengsel van druppeltjes van een vloeistof in een andere vloeistof, zoals melk of mayonaise.

suspensie
Heterogeen mengsel van vaste deeltjes die in een vloeistof zweven, zoals modderwater.

F FUNDAMENTAL · DEEL F2 · MATERIE EN MATERIALEN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 9

Mengsels scheiden

Van modderwater naar drinkwater: elke scheidingstechniek steunt op één verschil tussen stoffen

Zout uit zeewater, alcohol uit wijn, zand uit water, ijzer uit afval, kleurstoffen uit inkt: telkens haal je een stof uit een mengsel. Elke **scheidingstechniek** maakt gebruik van één verschil in **stofeigenschappen** (hoofdstuk 8): grootte, dichtheid, kookpunt, oplosbaarheid, magnetisme. In dit hoofdstuk leer je de technieken en hun opstellingen kennen, lees en ontwerp je **scheidingsschema's**, volg je water van de rivier tot de kraan, en ontwerp je een **regenwaterfilter** voor de meetkas.

6× uitleg · 3× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 3× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

M Materie en chemie · D Ontwerpen en maken



Een drinkwaterbedrijf is een reeks scheidingstechnieken na elkaar, in het groot.

Na dit hoofdstuk

- Je kan voor elke scheidingstechniek zeggen op welk verschil in stofeigenschap ze steunt.
- Je kan zeven, bezinken, decanteren, centrifugeren, filtreren, indampen, kristalliseren en destilleren beschrijven en de juiste kiezen voor een mengsel.
- Je kan een filtreer- en een destillatieopstelling tekenen en de onderdelen benoemen, en de woorden residu, filtraat en destillaat correct gebruiken.
- Je kan een papierchromatografie uitvoeren en een chromatogram lezen.
- Je kan magnetisch scheiden, extraheren en adsorberen uitleggen met een voorbeeld.
- Je kan een scheidingsschema lezen en zelf een scheidingsschema ontwerpen voor een mengsel van drie of vier stoffen.
- Je kan de stappen van de drinkwaterzuivering in de juiste volgorde uitleggen, met het stofverschil bij elke stap.
- Je kan een eenvoudige regenwaterfilter ontwerpen en uitleggen waarom gefilterd regenwater geen drinkwater is.

VERHAAL · 9.1

De pomp in Broad Street

1/16

Eind augustus 1854 brak in Soho, een wijk in Londen, een zware uitbraak van **cholera** uit, een darmziekte die mensen in enkele dagen kan doden. In tien dagen stierven er meer dan vijfhonderd

mensen. Veel artsen dachten toen dat cholera zich verspreidde via 'slechte lucht' uit rottend afval.

De arts **John Snow** geloofde dat niet. Hij ging langs bij de families van de slachtoffers en zette elk sterfgeval als een streepje op een kaart van de wijk. De streepjes lagen opvallend dicht rond één waterpomp, in Broad Street, waar de buurt haar drinkwater haalde. Hij vond ook uitzonderingen die zijn idee bevestigden: in de brouwerij vlak bij de pomp werd bijna niemand ziek (de arbeiders dronken bier), en in een armenhuis met een eigen waterput evenmin.

Op 8 september 1854 overtuigde Snow het bestuur van de parochie om de hendel van de pomp te verwijderen. De uitbraak was toen al over haar hoogtepunt heen, maar Snows kaart werd beroemd. Later bleek dat de put lekte naar een beerput vlak ernaast. Het water zag er helder uit en smaakte gewoon, maar het zat vol ziekteverwekkers, te klein om te zien. Welke bacterie cholera veroorzaakt, werd pas jaren later algemeen aanvaard.

> **Waarom dit verhaal ertoe doet**
>
> Helder water is niet hetzelfde als zuiver water. Wat je niet ziet, haal je er ook niet uit met een zeef of een doek. Vandaag zuiveren drinkwaterbedrijven water in een reeks stappen, elk met een eigen scheidingstechniek, en controleert een labo het elke dag. In dit hoofdstuk leer je die technieken, en waarom het regenwater voor de meetkas geen drinkwater is.



Een pomp zonder hendel: het symbool van het verhaal van John Snow.

UITLEG · 9.2

Scheiden steunt op een verschil

2/16

In een mengsel behoudt elke stof haar eigen eigenschappen (hoofdstuk 8). Daarom kan je stoffen weer uit elkaar halen: je zoekt een eigenschap waarin ze verschillen, en een techniek die van dat verschil gebruikmaakt. Grind en zand verschillen in korrelgrootte: een zeef houdt het grind tegen. IJzervijlsel en

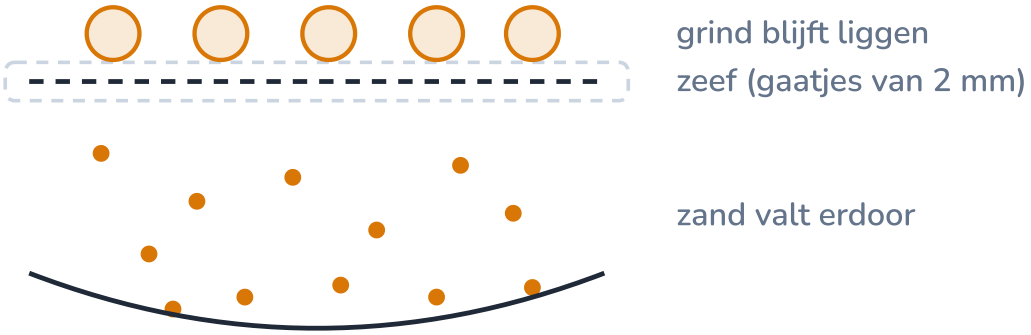
zand verschillen in magnetisme: een magneet haalt het ijzer eruit. Zout en water verschillen in kookpunt: verwarm je zout water, dan verdampt het water en blijft het zout achter.

techniek	stofverschil	wat scheid je?	voorbeeld
zeven	korrelgrootte	vaste stoffen van elkaar	grind en zand; bloem zeven
bezinken en decanteren	dichtheid	vaste stof uit een vloeistof; twee vloeistoffen	modder in water; olie op water
centrifugeren	dichtheid (versneld)	heel fijne deeltjes of druppels uit een vloeistof	room uit melk; bloedcellen uit bloed
filtreren	deeltjesgrootte (groter of kleiner dan de poriën)	vaste stof uit een vloeistof of gas	koffiefilter; stofzuigerzak; zandfilter
indampen	kookpunt (het oplosmiddel verdampt)	opgeloste vaste stof uit een oplossing	zout uit zeewater
kristalliseren	oplosbaarheid die met de temperatuur verandert	opgeloste stof uit een oplossing	kandijsuiker; zuiveren van meststoffen
destilleren	kookpunt	vloeistof uit een oplossing; vloeistoffen van elkaar	gedestilleerd water; alcohol uit wijn
chromatografie	hoe sterk een stof aan het papier hecht en in de loopvloeistof oplost	opgeloste stoffen van elkaar	kleurstoffen in inkt of in bladeren
magnetisch scheiden	magnetisme	ijzer, nikkel en kobalt uit een mengsel	blikjes uit afval
extraheren	oplosbaarheid in een oplosmiddel	een stof uit een vaste stof halen	thee, koffie
adsorberen	hoe sterk een stof aan een oppervlak kleeft	kleine hoeveelheden opgeloste stoffen of gassen	actieve kool in een waterfilter of afzuigkap

Na het scheiden heeft elk deel een naam. Wat op een filter blijft liggen, is het **residu**; wat erdoor loopt, het **filtraat**. Wat na bezinken op de bodem ligt, is het **bezinksel**. Wat bij het destilleren condenseert en opgevangen wordt, is het **destillaat**.

Filtreren haalt het zout uit zeewater

Een filter houdt alleen deeltjes tegen die groter zijn dan zijn poriën. Opgeloste stoffen zijn verspreid als afzonderlijke deeltjes (hoofdstuk 8) en lopen gewoon mee door het filter. Gefilterd zeewater is helder, maar nog even zout. Om opgeloste stoffen te scheiden, heb je indampen, destilleren, kristalliseren of chromatografie nodig.



Een zeef scheidt op grootte: wat groter is dan de gaatjes, blijft liggen.

UITLEG · 9.3

Bezinken, decanteren en centrifugeren

3/16

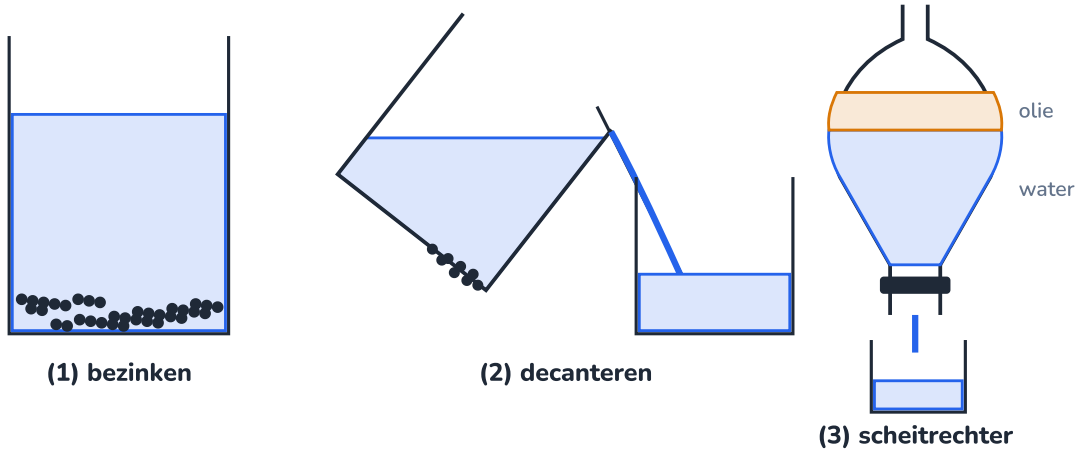
Laat je modderwater een tijd staan, dan zakken de zanddeeltjes naar de bodem: ze zijn dichter dan water (hoofdstuk 7). Dat is **bezinken**. Daarna giet je de heldere vloeistof er voorzichtig af, langs een roerstaaf zodat ze niet over de rand van het glas loopt: **decanteren**. Het bezinksel blijft achter.

Twee vloeistoffen die niet mengen, zoals olie en water, scheiden zich ook volgens hun dichtheid: de olie drijft. Met een **scheitrechter** laat je onderaan eerst het water weglopen en sluit je het kraantje net voor de olie komt.

Heel fijne deeltjes, zoals klei of vetdruppeltjes in melk, bezinken zo traag dat je er dagen op kan wachten. Dan **centrifugeer** je: het mengsel draait heel snel rond, en de dichtste deeltjes worden veel sterker naar buiten gedreven dan de zwaartekracht ze naar beneden trekt. Zo scheidt een zuivelfabriek room van melk (de room is minder dicht en blijft binnenin), en een ziekenhuislabo de bloedcellen van het bloedplasma. Een slacentrifuge en het centrifugeren van een wasmachine werken iets anders: het water vliegt naar buiten door de gaatjes van de trommel, terwijl de sla of de kleren achterblijven.

Bezinken is traag, maar gratis

Een regenton of een bezinkput werkt zonder energie: geef het vuil de tijd om te zakken, en neem het water bovenaan af. Dat principe gebruik je in de regenwaterfilter van de meetkas.



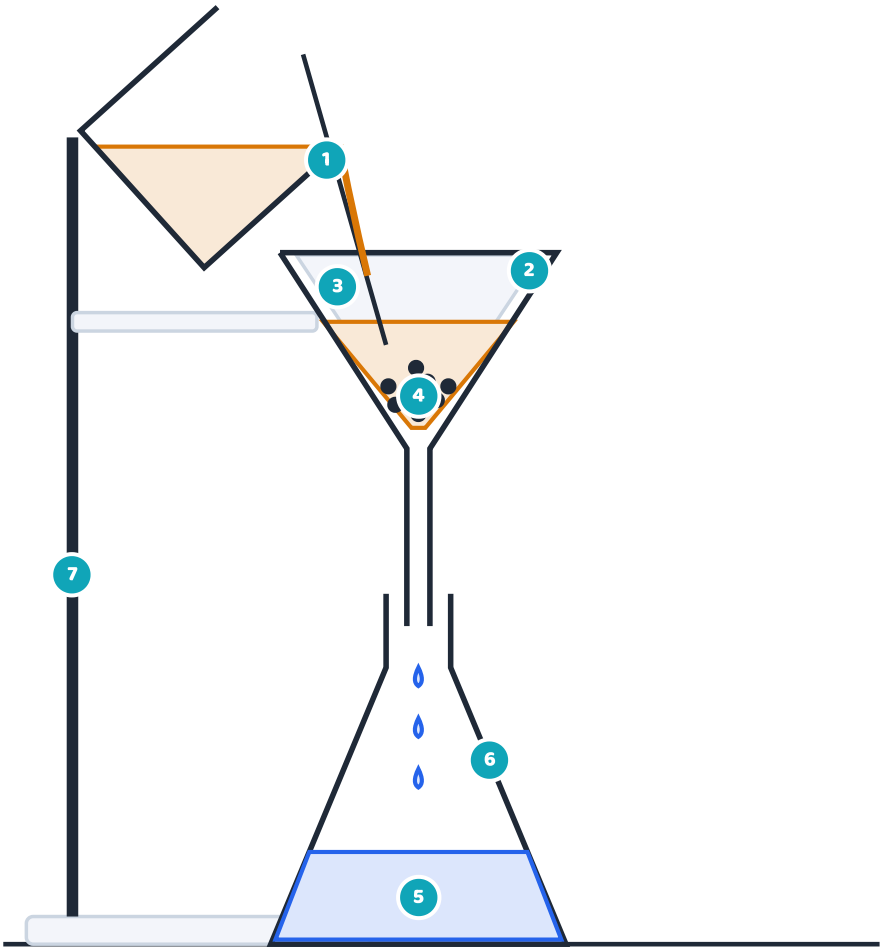
Bezinken en decanteren scheiden een vaste stof van een vloeistof; de scheitrechter twee vloeistoffen die niet mengen.

ONTLEED · 9.4

Filtreren

4/16

Bij **filtreren** giet je een heterogeen mengsel door filtreerpapier. Het papier bestaat uit vezels met heel kleine openingen (poriën) van enkele duizendsten van een millimeter. Vaste deeltjes die groter zijn, blijven achter: het **residu**. Het water en alles wat erin opgelost is, lopen erdoor: het **filtraat**. Filters vind je overal: in een koffiezetapparaat, een stofzuiger, een mondmasker, het luchtfilter van een auto en het aanzuigfilter van een pomp.



Filtreeropstelling: het mengsel loopt langs een roerstaaf in de trechter met gevouwen filtreerpapier.

1 Roerstaaf
Het mengsel loopt langs de staaf in de trechter, zonder te spatten of over de rand van het papier te lopen.

2 Trechter
Houdt het filtreerpapier. Het uiteinde raakt de wand van de erlenmeyer, zodat het filtraat rustig langs de wand loopt.

3 Filtreerpapier
Rond papier, twee keer gevouwen tot een kegel en licht bevochtigd zodat het tegen de trechter plakt. Vul het nooit tot de rand.

4 Residu
De vaste deeltjes die groter zijn dan de poriën: hier zand of modder.

5 Filtraat
Wat door het filter loopt: helder, maar met alle opgeloste stoffen er nog in.

6 Erlenmeyer
Vangt het filtraat op. De smalle hals houdt de trechter recht.

7 Statief met ring
Houdt de trechter stevig vast, zodat je je handen vrij hebt om te gieten.

UITLEG · 9.5

Indampen en kristalliseren

5/16

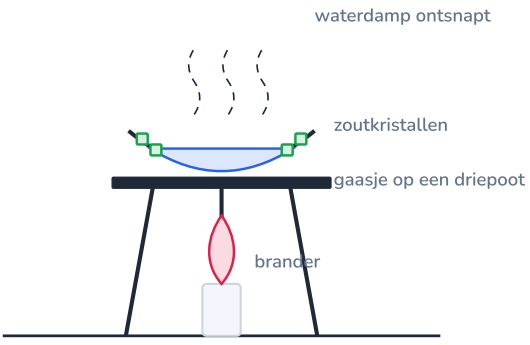
Een opgeloste vaste stof haal je terug door het oplosmiddel te laten verdampen. Bij **indampen** verwarm je de oplossing in een indampschaal tot al het water weg is; het zout blijft achter als een witte korst. Het water gaat als damp de lucht in: wil je het ook terug, dan moet je destilleren (volgend blad).

In **zoutpannen** aan de kust gebeurt dat zonder brander. Zeewater (± 35 g zout per liter, hoofdstuk 8) stroomt in ondiepe bekkens, zon en wind laten het water verdampen, en na enkele weken kristalliseert het zout. Omdat zeewater ook andere zouten bevat, is zeezout een mengsel.

Kristalliseren door afkoelen gebruikt de oplosbaarheidscurve: een warme, verzadigde oplossing die afkoelt, kan minder opgelost houden, en het teveel komt als kristallen terug. Omdat andere stoffen (in kleine hoeveelheden) opgelost blijven, zijn de kristallen zuiverder dan de stof waarmee je begon. Zo zuivert men meststoffen zoals kaliumnitraat. Bij keukenzout werkt het slecht, omdat de oplosbaarheid bijna niet verandert met de temperatuur.

Indampen met een brander

Draag een veiligheidsbril: op het einde springen er hete zoutkristallen uit de schaal. Zet de vlam kleiner als het meeste water weg is, en laat de schaal afkoelen op het gaasje; een hete schaal ziet er net zo uit als een koude (hoofdstuk 5).



Het water verdampt en verdwijnt in de lucht; aan de rand van de schaal groeien de eerste kristallen.



Zoutpannen: zon en wind dampen het zeewater in.

UITLEG · 9.6

Destilleren: scheiden op kookpunt

6/16

Bij **destilleren** gebruik je twee faseovergangen uit hoofdstuk 6 na elkaar: je laat een vloeistof **verdampen** en je laat de damp weer **condenseren** in een koeler. Het opgevangen condensaat is het **destillaat**. Wat niet verdampt, blijft achter in de kolf.

Destilleer je zout water, dan verdampt alleen het water: het destillaat is zuiver water, het zout blijft in de kolf. Zo maakten schepen vroeger drinkwater uit zeewater. Vandaag halen de meeste ontziltingsinstallaties het zout eruit met een heel fijn membraan onder hoge druk (omgekeerde osmose), omdat dat minder energie kost.

Twee vloeistoffen scheiden kan ook, als hun kookpunten verschillen. Ethanol kookt bij 78 °C, water bij 100 °C. Verwarm je wijn, dan bevat de damp verhoudingsgewijs veel meer ethanol dan de wijn zelf: het destillaat is veel sterker dan de wijn. Helemaal zuivere ethanol krijg je zo nooit: meer dan ongeveer 96 % haal je met gewoon destilleren niet. In een **raffinaderij**, zoals in de haven van Antwerpen, scheidt men aardolie op dezelfde manier in delen met een verschillend kookpunt: gas, benzine, kerosine, diesel en stookolie.

Destilleren is werk voor een labo

De opstelling mag nooit gesloten zijn: de damp moet ergens heen, anders bouwt de druk op tot het glas springt. Gebruik kookstenen, zodat de vloeistof niet plots opspat. Ethanoldamp is licht ontvlambaar (pictogram GHS02, hoofdstuk 5): verwarm met een elektrische verwarmingsplaat, nooit met een open vlam. Alcohol stoken buiten een schoollabo is bovendien wettelijk streng geregeld.



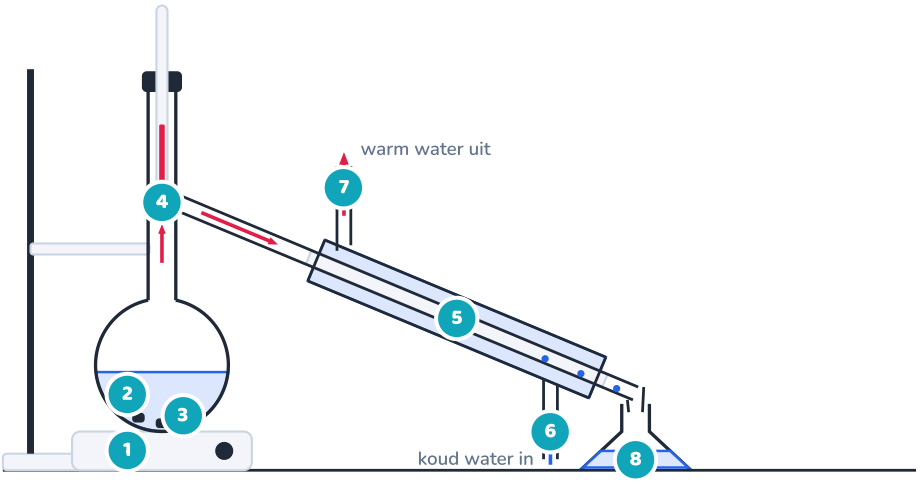
Een echte destillatieopstelling: de roze kleurstof blijft in de kolf, het destillaat is kleurloos.

ONTLEED · 9.7

De destillatieopstelling met een Liebigkoeler

7/16

Zo ziet een destillatie in het labo eruit. De koeler is genoemd naar de Duitse scheikundige Justus von Liebig, die hem in de negentiende eeuw bekend maakte: een binnenbuis voor de damp, met daarrond een mantel waardoor koud water stroomt.



De damp gaat door de binnenbuis naar rechts beneden; het koelwater stroomt in de mantel in de omgekeerde richting.

1 Verwarmingsplaat
Verwarmt de vloeistof zonder open vlam. Regel ze zo dat de vloeistof rustig kookt.

2 Destilleerkolf
Ronde kolf, hoogstens voor twee derde gevuld met het mengsel. Wat niet verdampt (het residu), blijft hier achter.

3 Kookstenen
Kleine poreuze steentjes waaraan zich dampbelletjes vormen, zodat de vloeistof rustig kookt en niet plots opspat.

4 Thermometer
Het reservoir zit ter hoogte van de zijbuis: je meet de temperatuur van de damp die naar de koeler gaat, niet die van de vloeistof. Zo zie je welke stof er op dat moment overkomt.

5 Liebigkoeler
De damp in de binnenbuis geeft warmte af aan het koelwater en condenseert tot druppels.

6 Koelwater in, onderaan
Koud water gaat onderaan in. Zo staat de mantel altijd helemaal vol, en ontmoet het koudste water de damp op het laatste stuk.

7 Koelwater uit, bovenaan
Het opgewarmde water verlaat de koeler aan de hoge kant (tegenstroom).

8 Destillaat
Het gecondenseerde, opgevangen deel. Bij zout water: zuiver water.

PROEF · 9.8

Uit welke kleuren bestaat zwarte inkt?

8/16

ONDERZOEKSVRAAG

Is de inkt van een zwarte viltstift één stof, of een mengsel van kleurstoffen?

MATERIAAL

- strook filtreerpapier (of koffiefilter) van 2 × 12 cm
- zwarte viltstift op waterbasis (niet watervast)
- potlood en lat
- hoog glas met een bodempje water (1 cm)
- wasknijper of plakband om de strook op te hangen



Links de opstelling, rechts de strook na afloop: de zwarte stip is uiteengevallen in drie kleurstoffen.

WERKWIJZE

1. Trek met **potlood** een startlijn op 2 cm van de onderkant van de strook.
2. Zet op het midden van de lijn een kleine, stevige stip met de viltstift. Laat drogen en zet er nog een stip op.
3. Hang de strook in het glas: de onderkant in het water, maar de startlijn **boven** het water.
4. Wacht tot het water bijna bovenaan is (10 à 20 minuten). Haal de strook eruit, markeer met potlood tot waar het water kwam (het loopfront) en laat drogen.

WAARNEMING

Het water kruipt omhoog in het papier. Als het de stip bereikt, neemt het de inkt mee en splitst die zich in gekleurde vlekken: onderaan blauw, in het midden rood tot roze, bovenaan geel. Voorbeeld van een meting: het loopfront ligt op 8,0 cm van de startlijn, de vlekken op 2,0 cm (blauw), 4,4 cm (rood) en 6,8 cm (geel).

VERKLARING

Zwarte inkt is een **mengsel** van kleurstoffen. Het water (de **loopvloeistof**) lost ze op en neemt ze mee omhoog. Elke kleurstof kleeft anders aan de papiervezels en lost anders op in water: een stof die sterk aan het papier kleeft, blijft achter (blauw), een stof die goed oplost en zwak kleeft, gaat bijna mee tot het loopfront (geel). Zo scheiden de stoffen zich over het papier: dat is **chromatografie**, en de strook met vlekken is een **chromatogram**. De startlijn staat in potlood, omdat grafiet niet oplost; een balpenlijn zou zelf mee opschuiven.

Een getal voor elke vlek

Deel de afstand van de vlek door de afstand van het loopfront, allebei gemeten vanaf de startlijn: rood $4{,}4 / 8{,}0 = 0{,}55$. Die verhouding (de R_f-waarde) is voor een kleurstof altijd ongeveer gelijk, als je hetzelfde papier en dezelfde loopvloeistof gebruikt. Zo kan je inkten vergelijken, zoals in opdracht 9.5.

De naam komt van de Russische plantkundige Michail Tsvet, die rond 1900 zo de kleurstoffen uit bladeren scheidde: *chroma* betekent kleur, *grafein* schrijven.

UITLEG · 9.9

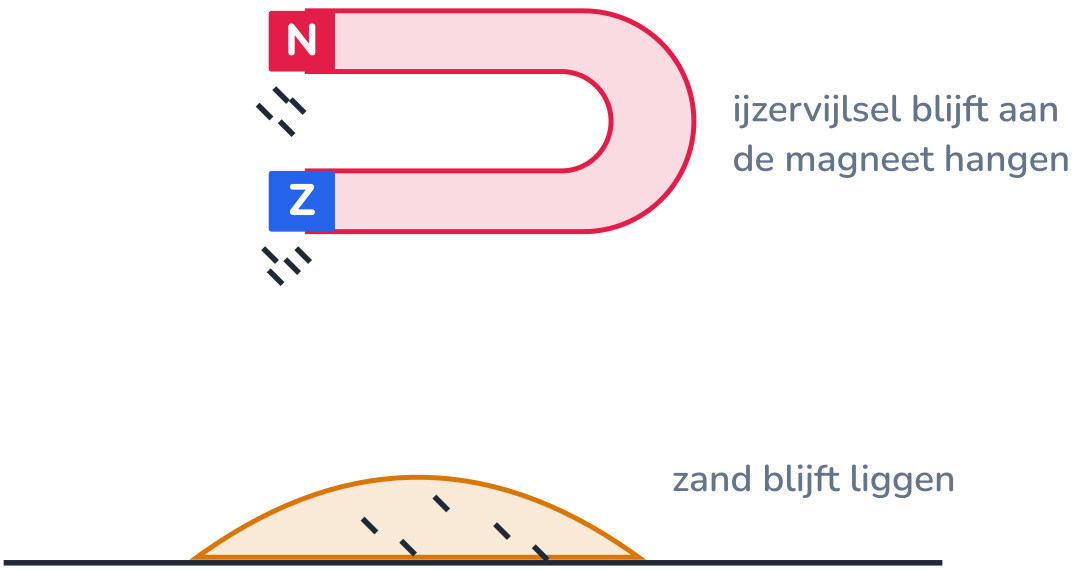
Magneet, oplosmiddel en actieve kool

9/16

Drie technieken die je elke dag tegenkomt:

- **Magnetisch scheiden.** IJzer (en staal), nikkel en kobalt worden door een magneet aangetrokken, de meeste andere stoffen niet. In een afvalsorteercentrum haalt een grote magneet de stalen blikjes uit het PMD-afval. In het labo stop je de magneet in een plastic zakje, zodat je het ijzervijlsel er makkelijk weer af krijgt.
- **Extraheren.** Je haalt een stof uit een vaste stof met een oplosmiddel waarin alleen die stof goed oplost. Thee zetten is extraheren: heet water haalt kleur-, smaak- en geurstoffen (en cafeïne) uit de blaadjes, de bladresten blijven over. Een koffiezetapparaat extraheert en filtreert in één keer.
- **Adsorberen.** Sommige stoffen kleven aan het oppervlak van een vaste stof. **Actieve kool** is kool vol piepkleine gaatjes: één gram heeft een inwendig oppervlak van enkele honderden tot meer dan duizend vierkante meter, meer dan een basketbalveld. Geur-, smaak- en kleurstoffen blijven eraan kleven. Je vindt actieve kool in waterfilters, in de afzuigkap, in een aquariumfilter en in een gasmasker.

Soms combineer je technieken met een slimme truc. In de **zink-drijfbak** van een recyclagebedrijf drijven snippers polypropeen en polyetheen op water, terwijl PET zinkt (hoofdstuk 7): scheiden op dichtheid.



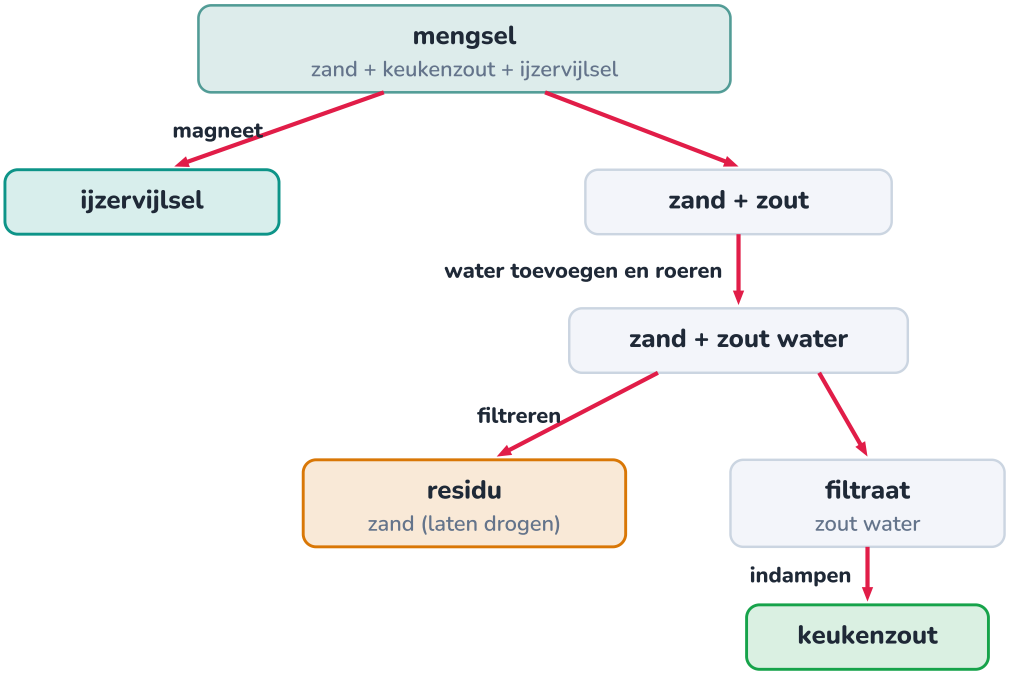
Een magneet trekt het ijzervijlsel aan; het zand blijft liggen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 9.10

Een scheidingsschema lezen

10/16

Een mengsel bevat zand, keukenzout en ijzervijlsel. Het scheidingsschema toont hoe je het in drie stoffen scheidt. (a) Op welk stofverschil steunt elke stap? (b) Waarom voeg je water toe? (c) Waarom filtreer je en dampt je daarna in, en niet omgekeerd? (d) Wat zou er misgaan als je de magneet pas op het einde gebruikt?



Lees van boven naar beneden: bij elke pijl een techniek, in elk kader wat er overblijft.

GEGEVEN

- het scheidingsschema

GEVRAAGD

- stofverschil per stap

- de reden voor elke stap en voor de volgorde

OPLOSSING

1. (a) Magneet: magnetisme (alleen het ijzer wordt aangetrokken). Water toevoegen: oplosbaarheid (zout lost op, zand niet). Filtreren: deeltjesgrootte (zandkorrels blijven op het filter, het opgeloste zout gaat erdoor). Indampen: kookpunt (water verdampt, zout niet).

2. (b) Zand en zout zijn allebei witte korrels: je kan ze niet met een zeef of een magneet scheiden. In water lost het zout op en het zand niet. Zo maak je van het verschil in oplosbaarheid een verschil in grootte.

3. (c) Na het filtreren zit het zout opgelost in het filtraat; het zand ligt op het filter. Dampte je eerst in, dan kreeg je weer zand en zout door elkaar.

4. (d) Na het oplossen en filtreren zou het ijzer samen met het zand als residu op het filter liggen, nat. Je kan het er dan nog uit halen, maar het ijzer begint te roesten en het nat zand kleeft aan de magneet. Een droge magneetstap eerst is eenvoudiger en zuiverder.

ANTWOORD

Magnetisme, oplosbaarheid, deeltjesgrootte en kookpunt, in deze volgorde; elke stap maakt de volgende mogelijk.

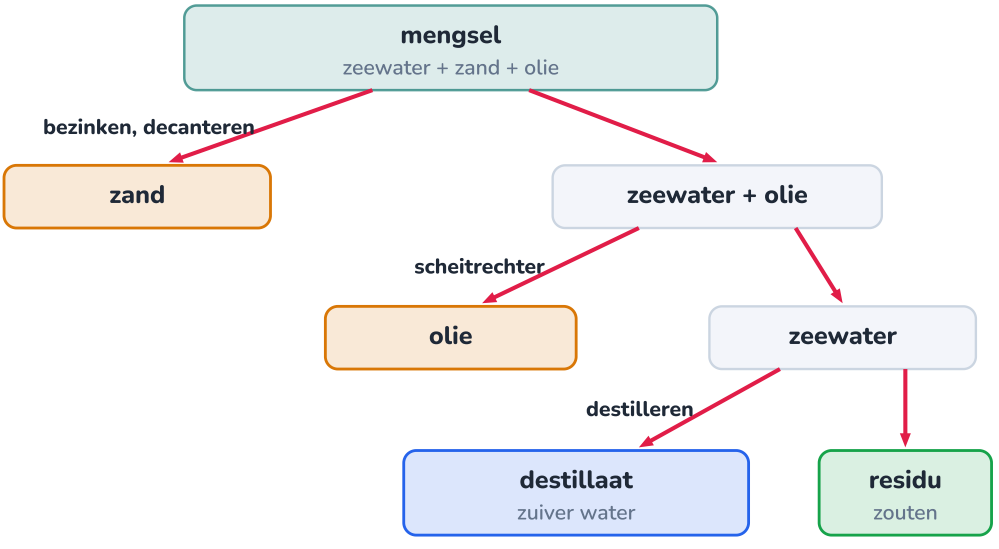
Klopt dit? Een goed schema eindigt met elke stof apart, en je kan bij elke pijl het stofverschil noemen. Weeg je het mengsel vooraf en de drie stoffen achteraf, dan zie je hoe goed de scheiding lukte (opdracht 9.6).

UITGEWERKT VOORBEELD · 9.11

Een scheidingsschema ontwerpen

11/16

Na een storm raap je op het strand een fles op met zeewater, zand en een laagje olie. Ontwerp een scheidingsschema waarmee je vier dingen apart krijgt: zand, olie, zuiver water en de zouten.



Eén mogelijk schema. Er bestaan andere goede volgordes.

GEGEVEN

- mengsel: zeewater (water met opgeloste zouten), zand, olie

GEVRAAGD

- een scheidingsschema met technieken en stofverschillen

OPLOSSING

1. **Stap 1: bekijk de stoffen en hun verschillen.** Zand: vast, niet oplosbaar, dichter dan water. Olie: vloeibaar, lost niet op in water, minder dicht dan water. Zouten: opgelost, hoog kookpunt. Water: kookt bij 100 °C.

2 **Stap 2: begin met wat het makkelijkst te scheiden is.** Laat de fles staan: het zand bezinkt. Decanteer de vloeistoffen voorzichtig in een scheitrechter (of filtreer, dan blijft het zand op het filter).

3 **Stap 3:** in de scheitrechter drijft de olie op het zeewater (dichtheid). Laat het zeewater onderaan weglopen en sluit het kraantje voor de olie komt.

4 **Stap 4:** het zeewater is een oplossing: filtreren helpt niet. Destilleer: het water verdampt en condenseert in de koeler (destillaat: zuiver water), de zouten blijven in de kolf (residu). Wil je alleen de zouten, dan volstaat indampen.

ANTWOORD

Bezinken en decanteren (zand), scheitrechter (olie), destilleren (zuiver water en zouten).

Klopt dit? Controleer bij elke pijl het stofverschil: dichtheid, dichtheid en niet-mengbaar, kookpunt. En denk aan de volgorde: zolang er zand in de vloeistof zit, verstopt het de scheitrechter; zolang er olie op het water drijft, zou ze mee in de destilleerkolf gaan.

UITLEG · 9.12

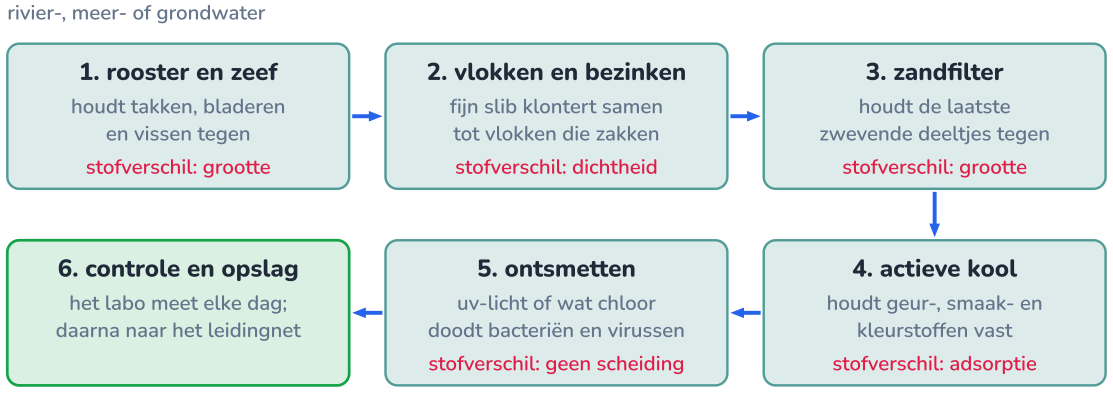
Van ruw water naar drinkwater

12/16

Drinkwater komt uit grondwater of uit oppervlaktewater (rivieren, kanalen, meren). Oppervlaktewater bevat zand, slib, bladeren, opgeloste stoffen en micro-organismen. Een drinkwaterbedrijf zuivert het in een reeks stappen, telkens met een andere scheidingstechniek:

1. **Roosters en zeven** houden takken, bladeren en vissen tegen (grootte).
2. **Vlokken en bezinken.** Een vlokmiddel laat heel fijne slibdeeltjes samenklonteren tot vlokken die groot en zwaar genoeg zijn om te bezinken (dichtheid).
3. **Zandfilters** houden de laatste zwevende deeltjes tegen (grootte). In een traag zandfilter leeft in de bovenste laag ook een laagje bacteriën dat stoffen afbreekt.
4. **Actieve kool** houdt geur-, smaak- en kleurstoffen en resten van bijvoorbeeld bestrijdingsmiddelen vast (adsorptie).
5. **Ontsmetten** met uv-licht of een klein beetje chloor doodt bacteriën en virussen die nog overblijven. Dat is geen scheiding, maar wel de stap die cholera tegenhoudt.
6. **Controle.** Een labo meet elke dag tientallen stoffen en bacteriën, en toetst ze aan wettelijke normen (bijvoorbeeld hoogstens 50 mg nitraat per liter).

De volgorde is belangrijk: eerst het grove, dan het fijne. Een zandfilter raakt verstopt als het grove vuil niet eerst weg is, en actieve kool raakt 'vol' als ze ook het slib moet tegenhouden. Ontsmetten werkt het best in helder water, dus komt het bijna aan het einde.



Eerst grof, dan fijn: elke stap haalt iets anders weg, en de ontsmetting komt pas als het water helder is.

ONTLEED · 9.13

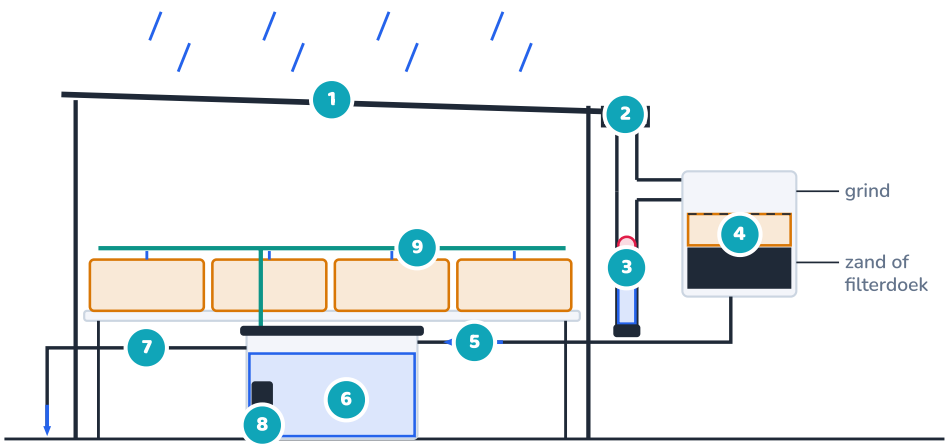
Habitat: de regenwaterfilter van de meetkas

13/16

Het dak van de meetkas (0,72 m²) vangt regen op. Met een goot en een eenvoudige filter vult dat water het reservoir onder de plantentafel aan. Het ontwerp gebruikt drie technieken uit dit hoofdstuk: zeven (bladvanger), bezinken en afscheiden (first flush) en filtreren (grind en zand of filterdoek).

Gefilterd regenwater is geen drinkwater

Regenwater dat van een dak loopt, bevat stof, vogelpoep met bacteriën, stuifmeel en soms metalen uit de goot. De filter maakt het helder genoeg voor de planten en de pomp, maar niet veilig om te drinken: er is geen ontsmetting en geen controle. Kleef een etiket 'geen drinkwater' op het reservoir, en was je handen na onderhoud.



Van dak tot druppelslang: zeven, afscheiden, filtreren, en een afgedekt reservoir met een overloop.

1 Dak (0,72 m²)
Licht hellend naar de goot. Elke millimeter regen levert 0,72 L water op.

2 Goot met bladvanger
Een roostertje of zeef over de ingang van de regenpijp houdt bladeren, zaden en insecten tegen (zeven).

3 First flush
Doodlopende buis die de eerste, vuilste liter van elke bui opvangt (stof en poep van het dak). Is ze vol, dan sluit het drijvende balletje af en stroomt het water verder naar de filter. Na de bui laat je ze leeglopen.

4 Filter
Een laag grind en daaronder fijn zand of filterdoek houdt de deeltjes tegen die de pomp en de druppelslang zouden verstoppen (filtreren).

5 Inlaat
Het gefilterde water loopt onder de deksel het reservoir in.

6 Reservoir, afgedekt en donker
Een ondoorzichtige bak met deksel: zonder licht groeien er geen algen, en muggen kunnen er geen eitjes leggen. Wat nog bezinkt, blijft op de bodem.

7 Overloop
Is het reservoir vol, dan loopt het teveel via deze buis naar buiten, niet over de vloer van de kas.

8 Aanzuigfilter van de pomp
Een laatste zeefje voor de pomp. Het pompje zit iets boven de bodem, zodat het geen bezinksel aanzuigt.

9 Druppelslang
Geeft het water druppel per druppel aan de bakjes. De gaatjes zijn heel klein: daarom moet het water zo proper zijn.

UITGEWERKT VOORBEELD · 9.14

Habitat: hoeveel regenwater vangt het dak op?

14/16

Het dak van de meetkas is 1,20 m × 0,60 m. In Ukkel valt gemiddeld 837 mm neerslag per jaar. De planten verbruiken 1,8 L water per dag. (a) Hoeveel liter water levert 1 mm regen op het dak? (b) Hoeveel liter per jaar? Is dat genoeg? (c) De first flush vangt per bui 1 L per m² dak op. Hoeveel water komt er in het reservoir na een bui van 12 mm?



Goot, bladvanger en first flush aan de meetkas: elke millimeter regen is 0,72 L.

GEGEVEN

- dak $1{,}20\,\text{m} \times 0{,}60\,\text{m}$
- $837\,\text{mm}$ per jaar
- verbruik $1{,}8\,\text{L}$ per dag
- first flush: $1\,\text{L}$ per m² per bui

GEVRAAGD

- water per mm
- water per jaar en vergelijking met het verbruik
- water na één bui van 12 mm

OPLOSSING

1 (a) 1 mm regen is een laagje water van 1 mm hoog. Op 1 m² is dat $1\,\text{m}^2 \times 0{,}001\,\text{m} = 0{,}001\,\text{m}^3 = 1\,\text{L}$. Dus **1 mm regen = 1 L per m²**. Het dak: $1{,}20 \times 0{,}60 = 0{,}72\,\text{m}^2$, dus $0{,}72\,\text{L}$ per mm.

2 (b) $0{,}72\,\text{L/mm} \times 837\,\text{mm} \approx 603\,\text{L}$ per jaar. Verbruik: $1{,}8 \times 365 = 657\,\text{L}$. Het dak levert ongeveer 92 % van wat de planten nodig hebben, en dan nog zonder de first flush en zonder het water dat verdampt of overloopt als het reservoir vol is.

3 (c) Regen: $0{,}72 \times 12 \approx 8{,}6\,\text{L}$. First flush: $1\,\text{L/m}^2 \times 0{,}72\,\text{m}^2 \approx 0{,}7\,\text{L}$. In het reservoir: ongeveer $7{,}9\,\text{L}$, genoeg voor vier dagen.

ANTWOORD

(a) 0,72 L per mm; (b) ongeveer 600 L per jaar, iets minder dan de 657 L die nodig is; (c) ongeveer 7,9 L.

Klopt dit? Het jaartotaal is niet het hele verhaal: regen valt niet gelijkmatig. In een droge zomermaand valt er soms maar 20 mm (14 L), terwijl de planten dan juist het meest drinken, en in een natte maand loopt het reservoir over. Daarom rekent opdracht 9.10 met maanden, en blijft kraanwater bijvullen een reserveplan. Een groter dak (van een tuinhuis) levert meer: 3 m² geeft ruim 2500 L per jaar.

NASLAG · 9.15

15/16

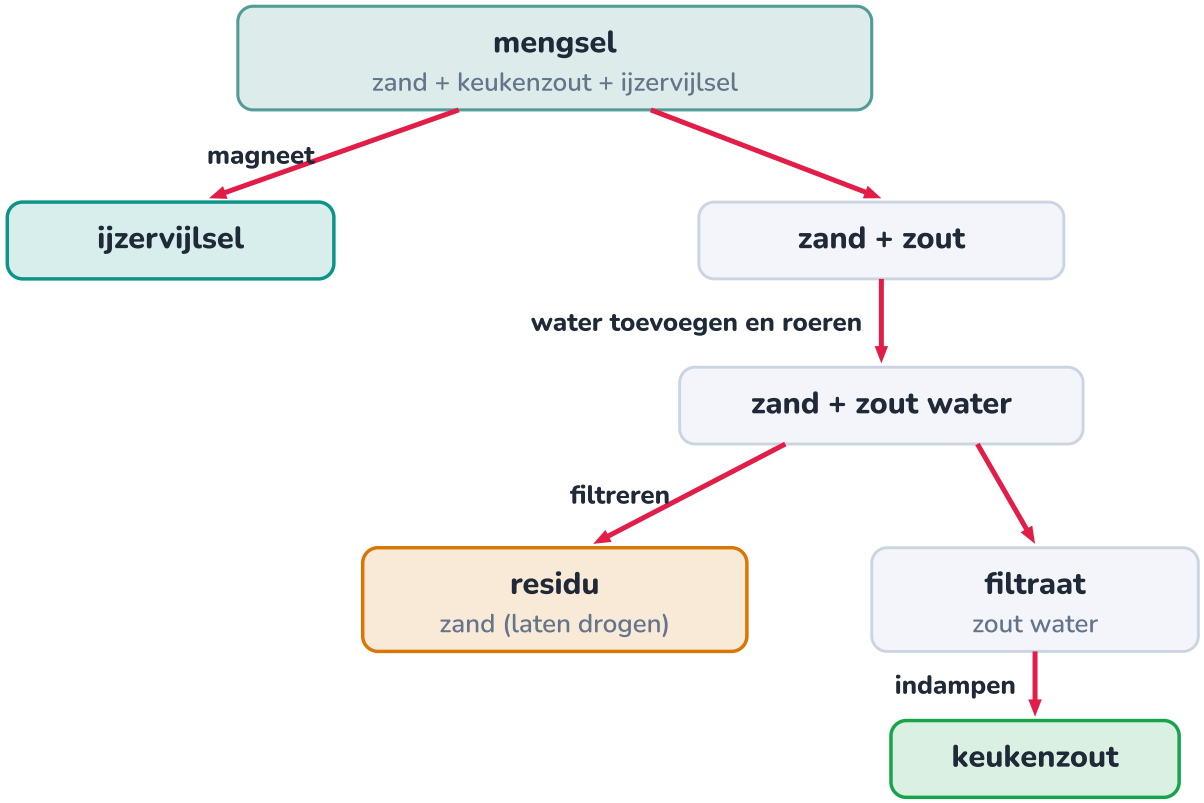
Overzicht: scheidingstechnieken

Welke techniek, op welk verschil, en hoe heten de delen die je overhoudt?

techniek	stofverschil	wat scheid je?	voorbeeld
zeven	korrelgrootte	vaste stoffen van elkaar	grind en zand; bloem zeven
bezinken en decanteren	dichtheid	vaste stof uit een vloeistof; twee vloeistoffen	modder in water; olie op water
centrifugeren	dichtheid (versneld)	heel fijne deeltjes of druppels uit een vloeistof	room uit melk; bloedcellen uit bloed
filtreren	deeltjesgrootte (groter of kleiner dan de poriën)	vaste stof uit een vloeistof of gas	koffiefilter; stofzuigerzak; zandfilter
indampen	kookpunt (het oplosmiddel verdampt)	opgeloste vaste stof uit een oplossing	zout uit zeewater
kristalliseren	oplosbaarheid die met de temperatuur verandert	opgeloste stof uit een oplossing	kandijsuiker; zuiveren van meststoffen
destilleren	kookpunt	vloeistof uit een oplossing; vloeistoffen van elkaar	gedestilleerd water; alcohol uit wijn
chromatografie	hoe sterk een stof aan het papier hecht en in de loopvloeistof oplost	opgeloste stoffen van elkaar	kleurstoffen in inkt of in bladeren
magnetisch scheiden	magnetisme	ijzer, nikkel en kobalt uit een mengsel	blikjes uit afval
extraheren	oplosbaarheid in een oplosmiddel	een stof uit een vaste stof halen	thee, koffie
adsorberen	hoe sterk een stof aan een oppervlak kleeft	kleine hoeveelheden opgeloste stoffen of gassen	actieve kool in een waterfilter of afzuigkap

woord	betekenis
residu	wat achterblijft: op het filter, of in de kolf na destilleren
filtraat	wat door het filter loopt
bezinksel	wat na bezinken op de bodem ligt
destillaat	het gecondenseerde deel dat je bij destilleren opvangt
loopvloeistof en loopfront	bij chromatografie: de vloeistof die over het papier kruipt, en tot waar ze kwam

mengsel	eerste keuze
vaste stof + vaste stof	zeven, magneet, of oplossen en filtreren
vaste stof in een vloeistof (niet opgelost)	bezinken en decanteren, filtreren, centrifugeren
vaste stof opgelost in een vloeistof	indampen, kristalliseren, destilleren (om ook de vloeistof te houden)
twee vloeistoffen die niet mengen	scheitrechter
twee vloeistoffen die mengen	destilleren
kleurstoffen of andere opgeloste stoffen van elkaar	chromatografie



Een scheidingsschema: bij elke pijl een techniek, in elk kader wat overblijft.

HET GEHEEL · 9.16

Waar scheiden naartoe leidt

16/16

Scheidingstechnieken brengen de leerlijn **materie en chemie** samen met **ontwerpen en maken**: een scheidingsschema is een ontwerp, met eisen, keuzes en een volgorde. Je gebruikt de stofeigenschappen uit hoofdstuk 8 en de dichtheid uit hoofdstuk 7, en de faseovergangen uit hoofdstuk 6 bij indampen en destilleren. Verder in de opleiding worden scheidingen kwantitatief en industrieel: recyclage van materialen, zuivering van water in een gesloten kringloop, en in Expert de bioreactor en de levenscyclus van producten.

F6 Het deeltjesmodel
Verdampen en condenseren: de basis van indampen en destilleren.

F7 Massa, volume en dichtheid
Bezinken, decanteren, centrifugeren en de zink-drijfbak steunen op dichtheid.

F8 Zuivere stoffen en mengsels
Stofeigenschappen, oplosbaarheid en kristalliseren: waarop elke scheiding steunt.

F10 Materialen en hun eigenschappen
Grondstoffen winnen en materialen recycleren: sorteren met magneet, luchtstroom en zink-drijfbak.

F28 Ecosystemen en kringlopen
De waterkringloop: de natuur destilleert zeewater tot regen.

F30 De ontwerpcyclus
Een programma van eisen voor de regenwaterfilter, en testen en verbeteren.

I15 Zuren, basen en pH
De pH van regenwater en van de voedingsoplossing meten en bijsturen.

I17 Polymeren en composieten
Kunststoffen sorteren en recycleren.

I36 Hydroponie en voedselproductie
Water in een gesloten kringloop filteren en hergebruiken.

E30 Biotechnologie en genetische technieken
Gelelektroforese: DNA-stukken scheiden op grootte, een verre verwant van

E31 Bioprocestechniek
Een bioreactor en het zuiveren van wat eruit komt, op industriële schaal.

chromatografie.

Habitat

De meetkas krijgt een regenwaterfilter: bladvanger, first flush van 0,7 L, grind- en zandfilter, een afgedekt reservoir met overloop en een aanzuigfilter voor de pomp. Het dak levert ongeveer 600 L per jaar, ruim 90 % van wat de planten verbruiken. In opdracht 9.12 werk je het ontwerp uit voor je portfolio; in hoofdstuk 25 laat de microcontroller je weten wanneer het reservoir bijna leeg is.

SAMENVATTING

In het kort

- Elke scheidingstechniek steunt op een verschil in stofeigenschap: grootte, dichtheid, kookpunt, oplosbaarheid, magnetisme, hechting.
- Zeven en filtreren scheiden op grootte; opgeloste stoffen lopen door elk filter mee (filtraat), grotere deeltjes blijven achter (residu).
- Bezinken, decanteren, de scheitrechter en centrifugeren scheiden op dichtheid.
- Indampen haalt een opgeloste vaste stof uit een oplossing; kristalliseren gebruikt de oplosbaarheidscurve; destilleren (verdampen en condenseren) scheidt op kookpunt en levert een destillaat.
- In een destillatieopstelling zit de thermometer ter hoogte van de zijbuis en gaat het koelwater onderaan in de Liebigkoeler.
- Chromatografie scheidt opgeloste stoffen doordat een loopvloeistof ze verschillend ver meeneemt; de startlijn trek je in potlood.
- Een scheidingsschema toont de volgorde van de technieken; begin met het eenvoudigste en grofste.
- Drinkwater ontstaat in stappen: zeven, vlokken en bezinken, zandfilter, actieve kool, ontsmetten, controle. Gefilterd regenwater is geen drinkwater.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

scheidingstechniek
Methode om een mengsel te scheiden, die steunt op een verschil in stofeigenschap tussen de stoffen.

bezinken
Vaste deeltjes (of druppels) met een grotere dichtheid zakken naar de bodem van een vloeistof.

decanteren
Na het bezinken de heldere vloeistof voorzichtig afgieten, zodat het bezinksel achterblijft.

centrifugeren
Een mengsel heel snel laten ronddraaien, zodat de deeltjes met de grootste dichtheid veel sneller naar buiten gaan dan bij gewoon bezinken.

filtreren
Een mengsel door een filter met kleine poriën gieten: grote deeltjes blijven achter (residu), de vloeistof met alles wat opgelost is gaat erdoor (filtraat).

indampen
Een oplossing verwarmen tot het oplosmiddel verdampt is, zodat de opgeloste vaste stof achterblijft.

destilleren
Een vloeistof laten verdampen en de damp weer laten condenseren; stoffen met een verschillend kookpunt worden zo gescheiden. Het opgevangen condensaat heet het destillaat.

chromatografie
Scheiding van opgeloste stoffen doordat een loopvloeistof ze verschillend ver meeneemt over papier.

adsorberen
Stoffen laten vastkleven aan het oppervlak van een vaste stof, zoals actieve kool.

scheidingsschema
Stroomschema dat toont in welke volgorde je welke technieken gebruikt en wat er bij elke stap overblijft.

HANDBOEK · HOOFDSTUK 10

Materialen en hun eigenschappen

Waarom een kas uit aluminium en polycarbonaat bestaat, en hoe je dat met proeven en een keuzetabel onderbouwt

Een ingenieur kiest geen materiaal omdat het 'goed' is, maar omdat het past bij wat het onderdeel moet doen. In dit hoofdstuk leer je de vijf **materiaalfamilies** kennen, en de **eigenschappen** waarmee je ze vergelijkt: hardheid, sterkte, stijfheid, taaiheid, elasticiteit, geleiding en duurzaamheid. Je test ze met eenvoudige proeven, je kiest met een **gewogen keuzetabel**, en je volgt materialen van grondstof tot recyclage. Zo onderbouw je de keuze voor het frame en de wanden van de meetkas.

7× uitleg · 2× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

M Materie en chemie · D Ontwerpen en maken · K Krachten, beweging en constructies



Vijf families, tientallen materialen. Welk ervan past bij welk onderdeel?

Na dit hoofdstuk

- Je kan de vijf materiaalfamilies (hout, metalen, kunststoffen, keramiek en glas, composieten) herkennen en er typische eigenschappen van geven.
- Je kan hardheid, sterkte, stijfheid, taaiheid, elasticiteit, geleiding en duurzaamheid uitleggen en van elkaar onderscheiden.
- Je kan eenvoudige materiaalproeven eerlijk uitvoeren: buigen, krassen en geleiden.
- Je kan de hardheidsschaal van Mohs gebruiken om materialen te rangschikken.
- Je kan uitleggen waarom composieten en legeringen gemaakt worden, met gewapend beton als voorbeeld.
- Je kan een gewogen keuzetabel opstellen, invullen en kritisch bekijken.
- Je kan de materialenkringloop beschrijven, van grondstof tot recyclage, en uitleggen waarom recycleren van aluminium zoveel energie bespaart.
- Je kan de materiaalkeuze voor het frame en de wanden van de meetkas onderbouwen.

VERHAAL · 10.1

Een schip dat in de haven brak

1/14

Tijdens de Tweede Wereldoorlog bouwden de Verenigde Staten in recordtempo vrachtschepen en tankers. In plaats van staalplaten met duizenden klinknagels aan elkaar te zetten, werden ze voor het

eerst op grote schaal gelast: sneller en goedkoper. Maar er ging iets mis. Honderden schepen kregen scheuren, en enkele braken zomaar in twee.

Het bekendste geval is de tanker **SS Schenectady**. Op 16 januari 1943 lag het gloednieuwe schip na zijn proefvaart rustig aan de kade in Portland, in het noordwesten van de VS. Er was geen storm en geen lading. Toch scheurde het schip, met een knal die je meer dan een kilometer ver hoorde, bijna helemaal door, net achter de opbouw. Alleen de bodemplaten hielden het nog bij elkaar.

Onderzoekers ontdekten dat het staal van die schepen bij koud weer **bros** werd. Bij kamertemperatuur vervormt zulk staal eerst voor het breekt: het is **taai**. Maar onder een bepaalde temperatuur breekt het plots, zoals glas, en een scheurtje bij een lasnaad of een scherpe hoek loopt dan in een oogwenk door de hele plaat. De Britse onderzoekster **Constance Tipper** toonde met een eenvoudige proef op ingekerfde staafjes aan dat staal zo'n overgangstemperatuur heeft. Sindsdien kiezen scheepsbouwers staal dat ook in de kou taai blijft, en vermijden ze scherpe hoeken.

Waarom dit verhaal ertoe doet

'Sterk' is niet genoeg. Het staal van de Schenectady was sterk, maar in de kou niet taai. Een materiaal kiezen betekent: weten welke eigenschappen tellen voor dit onderdeel, in deze omstandigheden. Voor de meetkas, die buiten staat en in de winter vriest, geldt dat ook.



Reconstructie: een gelaste tanker die in 1943 aan de kade in twee scheurde.

UITLEG · 10.2

Vijf materiaalfamilies

2/14

Duizenden materialen, maar ze vallen uiteen in vijf **families**. Binnen een familie lijken de eigenschappen op elkaar, omdat de deeltjes op een gelijkaardige manier aan elkaar vastzitten (dat zie je in Intermediate en Expert).

familie	voorbeelden	typisch	let op
hout	grenen, eik, beuk; plaatmateriaal: multiplex, MDF	licht, sterk langs de vezel, makkelijk te bewerken, hernieuwbaar	zwelt en krimpt met vocht, rot als het nat blijft, brandbaar
metalen	staal, roestvast staal, aluminium, koper, messing, zink	sterk, taai, glanzend, geleiden stroom en warmte goed, vervormbaar	zwaar (behalve aluminium), veel roesten of corroderen
kunststoffen	PE, PP, PVC, PET, polycarbonaat, acryl, PLA	licht, isolerend, in elke vorm te gieten, waterbestendig	weinig stijf, worden zacht bij warmte, veel verouderen in zonlicht
keramiek en glas	baksteen, tegels, porselein, beton, glas	hard, stijf, hittebestendig, slijtvast, sterk op druk	bros: breekt zonder te vervormen, zwak op trek
composieten	gewapend beton, glasvezel, koolstofvezel, multiplex	combineren de sterke punten van twee materialen	moeilijk te scheiden en te recycleren

In de meetkas zie je ze allemaal: een frame van metaal (aluminium), wanden van kunststof (polycarbonaat), plantenbakjes van kunststof (PP) of keramiek (terracotta), een plantentafel van hout (multiplex) en de elektronica op een printplaat van glasvezelversterkte kunststof: een composiet.

Materiaal of stof?

Een **stof** (hoofdstuk 8) is wat iets is: aluminium, polyetheen. Een **materiaal** is een stof of mengsel zoals je het gebruikt om iets te maken, met een vorm en een bewerking: een aluminium koker, een geperste multiplexplaat. Hetzelfde polycarbonaat kan een massieve plaat of een lichte kanaalplaat zijn: dezelfde stof, een ander materiaal.



Hout, metalen, kunststoffen, keramiek en glas, composieten.

UITLEG · 10.3

Eigenschappen: wat bedoelen we precies?

3/14

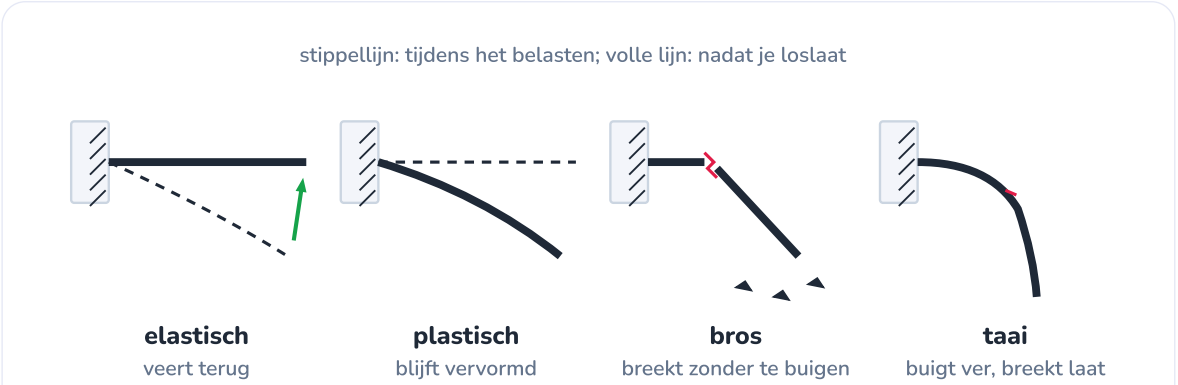
In het dagelijks leven zeggen we 'sterk' voor bijna alles. Een ingenieur maakt onderscheid:

- **Hardheid**: weerstand tegen krassen en indrukken. Glas is hard, polycarbonaat niet: een korrel zand maakt er een kras in.
- **Sterkte**: hoeveel kracht het materiaal kan dragen voor het bezwijkt. Je spreekt van sterk op *trek* (uit elkaar trekken), op *druk* (samendrukken) of op *buiging*.
- **Stijfheid**: hoe weinig het vervormt onder een kracht. Een stalen lat buigt minder door dan een even grote aluminium lat, en die veel minder dan een kunststof lat.
- **Elastisch of plastisch**: veert het terug als je loslaat (een stalen lat, een elastiek), of blijft het vervormd (een paperclip, een aluminium strook die je ver doorbuigt)? Elk materiaal is elastisch tot aan een grens; daarboven vervormt het blijvend of breekt het.
- **Taai of bros**: vervormt het veel voor het breekt (taai: staal bij kamertemperatuur, polycarbonaat, koper), of breekt het plots (bros: glas, keramiek, gietijzer, acryl)?
- **Geleiding**: laat het elektrische stroom en warmte goed door?
- **Duurzaamheid**: blijft het goed in zijn omgeving: tegen vocht, roest, rot, zonlicht, slijtage?

Daarnaast tellen **dichtheid** (hoofdstuk 7), **uitzetting** bij warmte (hoofdstuk 6), **doorzichtigheid**, **bewerkbaarheid** (zagen, boren, lijmen, lassen, gieten) en de **prijs**.

Hard is sterk

Glas en een stalen mes zijn ongeveer even hard (± 5,5 op de schaal van Mohs). Maar een glazen staaf breekt al bij een tik, terwijl een stalen staaf buigt. Hard en bros gaan vaak samen: zelfs diamant, het hardste materiaal, splijt met een goede tik op de juiste plaats. Hardheid, sterkte en taaiheid zijn drie verschillende eigenschappen.



Dezelfde proef, vier soorten gedrag: een stalen lat, een aluminium strook, een strook acryl en een strook polycarbonaat.

PROEF · 10.4

Buigen, krassen en geleiden

4/14

ONDERZOEKSVRAAG

Hoe verschillen zeven materialen in stijfheid, hardheid en geleiding, als je ze op dezelfde manier test?

MATERIAAL

- stroken van 20 mm × 3 mm, 25 cm lang, uit staal, aluminium, koper, grenen, PVC, acryl en polycarbonaat
- lijmklem en tafelrand, lat met millimeterverdeling, gewichtje van 100 g met een haakje
- vingernagel, koperen munt, stalen spijker
- led-tester (9 V, led, weerstand, twee draden)

Veiligheid

Draag een veiligheidsbril bij het buigen: acryl kan in scherpe stukjes breken. Buig niet naar je gezicht toe.



Zelfde afmetingen, zelfde gewicht, heel verschillende doorbuiging.

WERKWIJZE

1. **Buigen.** Klem elke strook zo vast dat er precies 20 cm voorbij de tafelrand uitsteekt. Meet de hoogte van het uiteinde, hang het gewichtje eraan en meet opnieuw. Het verschil is de doorbuiging.
2. Neem het gewichtje weg: komt het uiteinde terug op zijn plaats? Buig daarna elke strook voorzichtig met de hand ver door en laat los.
3. **Krassen.** Probeer op elke strook een kras te maken met je nagel, met de koperen munt en met de stalen spijker. Voel met je vingertop of er een groef is.
4. **Geleiden.** Hou de twee draden van de led-tester 10 cm uit elkaar tegen de strook. Brandt de led?

WAARNEMING

strook	doorbuiging met 100 g	ver buigen en loslaten	kras met led
staal	minder dan 1 mm	veert terug (verenstaal) of blijft wat gebogen	niet
aluminium	± 1 mm	blijft gebogen	spij (mu lich
koper	± 0,5 mm	blijft gebogen	spij (mu lich
grenen	± 5 mm	veert terug; splintert als je te ver gaat	nag (eer deu
PVC	± 19 mm	veert grotendeels terug	mu spij
acryl	± 18 mm	breekt plots	spij
polycarbonaat	± 24 mm	buigt heel ver en veert terug	mu spij

Voorbeeld van waarnemingen. De doorbuigingen passen bij wat je met de stijfheid van elk materiaal berekent (Intermediate); de kleinste lees je met een lat niet nauwkeurig af.

VERKLARING

Stijf[illegible]etalen buigen het minst; staal is ongeveer drie [illegible]als aluminium en zeventig keer zo stijf als PVC. Kunststoffen zijn licht en taai, maar slap. **Elastisch of plastisch**: bij een kleine kracht veren alle stroken terug; bij een grote kracht blijven aluminium en koper gebogen (plastisch), breekt acryl (bros) en veert polycarbonaat terug (taai). **Hardheid**: een stalen spijker krast bijna alles behalve staal zelf; kunststoffen en hout zijn het zachtst. **Geleiding**: alleen de metalen geleiden stroom.

De proef is eerlijk omdat alleen het materiaal verandert: alle stroken zijn even breed, even dik en steken even ver uit (hoofdstuk 2). Een dikkere strook van hetzelfde materiaal buigt veel minder door: de vorm telt minstens zo zwaar als het materiaal (hoofdstuk 13).

UITLEG · 10.5

Hardheid: wie krast wie?

5/14

In 1812 bedacht de Duitse mineraloog **Friedrich Mohs** een eenvoudige hardheidsschaal: tien mineralen, van zacht naar hard, zodat elk mineraal alle vorige krast en door alle volgende gekrast wordt. Een onbekend materiaal plaats je door te kijken wat het krast en waardoor het gekrast wordt. Wordt het gekrast door een koperen munt maar niet door je vingernagel, dan ligt de hardheid tussen 2,5 en 3,5.

De schaal is een **rangschikking**, geen meting met gelijke stappen: het verschil tussen korund (9) en diamant (10) is veel groter dan dat tussen talk (1) en gips (2). Voor metalen en kunststoffen meten ingenieurs de hardheid anders: ze drukken er met een bekende kracht een hard kogeltje of puntje in en meten de indruk.

Waarom telt hardheid voor de meetkas? Stof en zand bevatten korreltjes kwarts (hardheid 7): die krassen zelfs glas (± 5,5), en kunststoffen, die veel zachter zijn, nog veel makkelijker. Een kasplaat van polycarbonaat die je met een droge doek afveegt, krijgt fijne krasjes, en daardoor laat ze na enkele jaren minder licht door. Spoel ze daarom eerst met water, en was met een zachte spons. Acryl is iets krasvaster dan polycarbonaat, maar veel brosser.



Links de tien mineralen van Mohs, rechts voorwerpen die je in de klas hebt om mee te vergelijken.

UITLEG · 10.6

Trek en druk, en waarom beton wapening nodig heeft

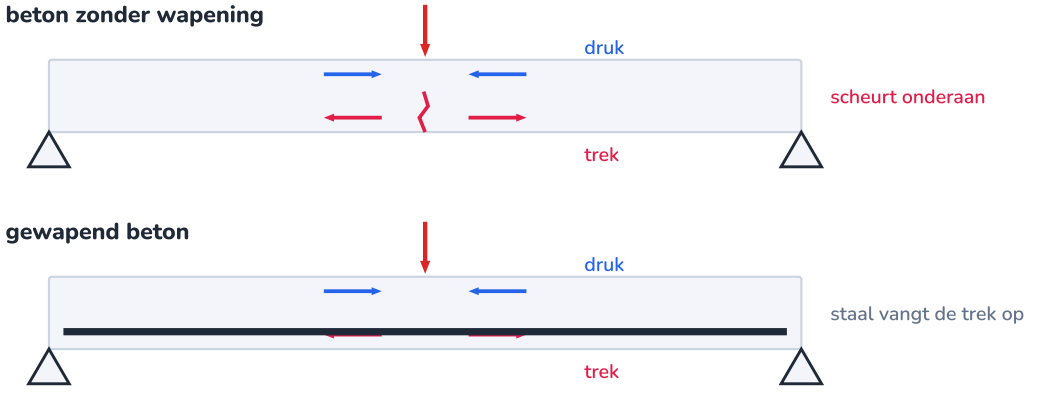
6/14

Een balk die doorbuigt, wordt aan de bovenkant samengedrukt en aan de onderkant uitgerekt. Materialen reageren daar heel verschillend op.

- **Beton, steen en baksteen** zijn sterk op **druk** maar zwak op **trek**: ongeveer tien keer zwakker. Een balk van gewoon beton scheurt daarom onderaan, waar hij uitgerekt wordt. Daarom bouwden de Romeinen en de middeleeuwse bouwmeesters bogen en gewelven: vormen die overal op druk belast worden.
- **Staal** is sterk op trek én op druk. Een dunne staaldraad kan honderden kilo dragen.
- **Hout** is sterk langs de vezels, en veel zwakker dwars op de vezels: een plank splijt makkelijk in de lengterichting.

Stop je stalen staven onderaan in het beton, dan vangt het staal de trek op en het beton de druk: **gewapend beton**. Dat is een **composiet**: twee materialen samen, met betere eigenschappen dan elk apart. Het werkt ook omdat staal en beton even sterk uitzetten bij warmte (hoofdstuk 6).

Andere composieten: **glasvezelversterkte kunststof** (dunne glasvezels in hars: boten, windturbinebladen, printplaten), **koolstofvezel** (heel licht en stijf: raceframes, vliegtuigonderdelen), **multiplex** (dunne houtlagen met de vezels kruislings verlijmd: sterk in twee richtingen, en het werkt minder bij vocht), en al duizenden jaren **leem met stro**. Het nadeel: composieten zijn moeilijk te scheiden en dus moeilijk te recycleren.



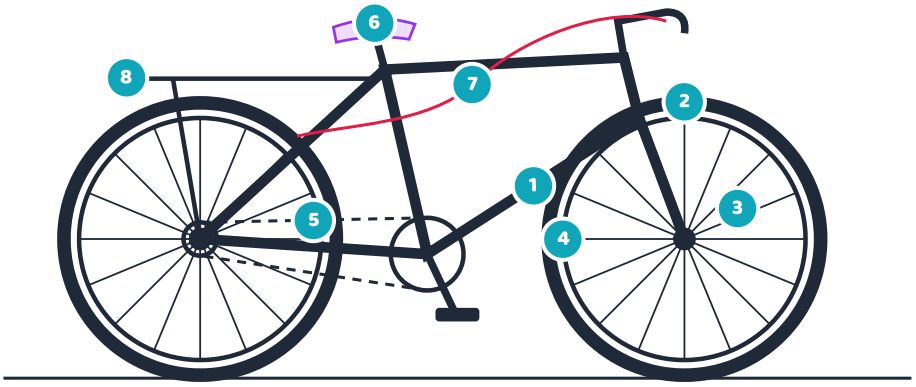
Boven wordt de balk samengedrukt (blauw), onder uitgerekt (rood). De stalen wapening onderaan vangt de trek op.

ONTLEED · 10.7

Een fiets: welk materiaal zit waar?

7/14

Een fiets is een verzameling onderdelen, elk met zijn eigen taak, en dus zijn eigen materiaal (de mechanismen bekijk je in hoofdstuk 12).



Elk onderdeel stelt andere eisen: licht, stijf, taai, slijtvast, soepel of goedkoop.

1 Kader
Moet stijf, sterk, taai en licht zijn. Aluminium (licht), staal (sterk, goedkoop, maar zwaarder) of koolstofvezel (een composiet: heel licht en stijf, maar duur en moeilijk te recycleren).

2 Band
Rubber, versterkt met een weefsel van kunststofvezels en een staaldraad in de rand: een composiet die soepel is, grip heeft en niet scheurt.

3 Spaken
Dunne draden van roestvast staal, altijd op trek belast. Staal is sterk op trek; roestvast, zodat ze niet verzwakken.

4 Velg
Aluminium: licht, stijf genoeg en bestand tegen regen.

5 Ketting
Gehard staal: heel hard, zodat de schakels niet snel slijten, en sterk op trek.

6 Zadel
Een kunststof schaal met zacht schuim erop: elastisch en comfortabel.

7 **Remkabel**
Een staalkabel (sterk op trek) in een kunststof mantel (glad, en bestand tegen regen).

8 **Achterlicht met reflector**
Doorzichtige kunststof (acryl of polycarbonaat): licht, breekt niet zoals glas, en in elke vorm te gieten.

UITLEG · 10.8

Geleiding: stroom en warmte

Metalen geleiden **elektrische stroom** goed: ze zitten vol vrije elektronen die kunnen bewegen (hoofdstuk 19). Daarom zijn draden van koper. Kunststoffen, hout, glas en keramiek zijn **isolatoren**: daarom is de mantel rond een draad van PVC en de houder van een zekering van keramiek. Een opvallende uitzondering is grafiet, de 'mine' van een potlood: een niet-metaal dat wel geleidt.

Ook **warmte** gaat vlot door metalen en traag door kunststof, hout en vooral lucht:

materiaal	warmtegeleiding (W per m per K)	geleidt stroom?
koper	400	heel goed
aluminium	± 200	goed
staal	± 50	goed
glas	± 1	nee
polycarbonaat	0,20	nee
dennenhout	± 0,13	nee (droog)
piepschuim	± 0,035	nee
stilstaande lucht	0,026	nee

Hoe groter het getal, hoe sneller warmte door het materiaal gaat. Wat het getal precies betekent, leer je in Intermediate (hoofdstuk 19); hier telt de volgorde: koper geleidt warmte ruim tienduizend keer beter dan stilstaande lucht.

Dat verklaart waarom een metalen trapleuning in de winter kouder aanvoelt dan een houten, ook al hebben ze dezelfde temperatuur: het metaal voert de warmte van je hand veel sneller weg. En waarom een pan een bodem van metaal heeft (de warmte moet erdoor) en een handvat van kunststof of hout (de warmte mag er niet door).

Een koudebrug in de meetkas

Het aluminium frame geleidt warmte ongeveer duizend keer beter dan de polycarbonaatplaten. In een koude nacht voert het de warmte van binnen snel naar buiten, en is het aan de binnenkant het koudste deel van de kas: daar vormt zich het eerst condens (hoofdstuk 6). Zo'n plaats heet een **koudebrug**. In hoofdstuk 16 leer je hoe je die beperkt.



Metaal waar warmte door moet, kunststof en hout waar je vastpakt.

UITLEG · 10.9

Duurzaamheid: vocht, roest, rot en zonlicht

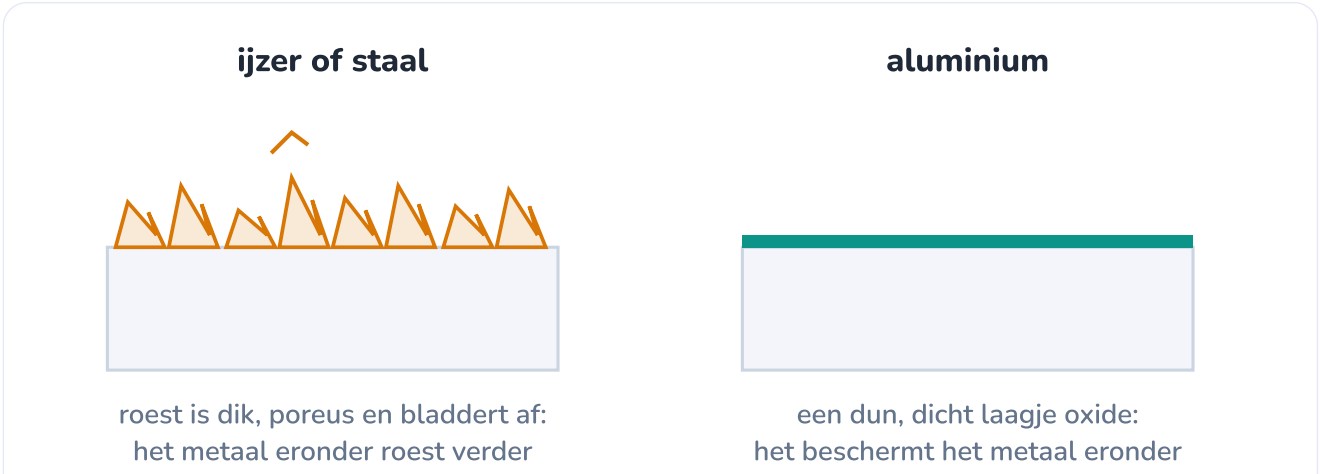
9/14

Een materiaal moet ook na jaren nog doen wat het moet. De meetkas staat in een vochtige, zonnige omgeving met grote temperatuurverschillen: een zware proef.

- **Roest.** IJzer en gewoon staal reageren met zuurstof en water tot roest. Roest is poreus en bladdert af, zodat het metaal eronder verder roest tot het doorgeroest is. Zout versnelt dat. Bescherming: verven, een laagje zink (**verzinken**), of **roestvast staal** met chroom erin.
- **Aluminium** reageert ook met zuurstof, maar vormt een heel dun, dicht laagje oxide dat het metaal eronder afschermt. Daarom 'roest' een aluminium frame niet door.
- **Rot en schimmel.** Hout dat lang nat blijft, rot. Bescherming: hout dat droog kan opdrogen, een behandeling (verf, olie, verduurzaming) of een van nature duurzame houtsoort.
- **Zonlicht.** Het ultraviolette licht van de zon breekt kunststoffen langzaam af: ze worden geel, dof en bros. Kasplaten van polycarbonaat krijgen daarom aan één kant een UV-beschermlaag, die naar buiten moet. Tuinfolie gaat maar enkele jaren mee.
- **Vermoeiing en slijtage.** Een paperclip die je vaak heen en weer buigt, breekt, ook al zou één keer buigen niets doen. Bewegende delen (scharnieren, kettingen) slijten.

Twee metalen tegen elkaar

Raken twee verschillende metalen elkaar in vochtige lucht, dan kan één ervan sneller aangetast worden. In de meetkas zet je het aluminium frame daarom vast met roestvast stalen schroeven M4, met een kunststof ringetje ertussen. Waarom dat helpt, leer je in Intermediate (hoofdstuk 16).



Links: roest laat water en lucht door tot bij het metaal. Rechts: het oxidelaagje van aluminium sluit af.

UITGEWERKT VOORBEELD · 10.10

Habitat: een keuzetabel voor het kasframe

Het frame van de meetkas bestaat uit 10,4 m profiel (alle ribben van de kas van 1,20 × 0,60 × 0,80 m). Vier opties: een aluminium koker van 20 × 20 × 1,5 mm, een grenen lat van 34 × 34 mm, een verzinkt stalen koker van 20 × 20 × 1,5 mm en een PVC-buis van 25 mm. Welke kies je, en hoe onderbouw je dat?

GEGEVEN

- massa van het frame (hoofdstuk 7): aluminium 3,1 kg; grenen 6,0 kg; staal 9,1 kg; PVC 2,0 kg
- de eigenschappen uit dit hoofdstuk en uitzetting (hoofdstuk 6)

GEVRAAGD

- een gewogen keuzetabel en een onderbouwde keuze

OPLOSSING

1. **Stap 1: criteria.** Wat moet het frame doen? Het moet stijf en sterk zijn (de platen en het dak dragen, niet doorbuigen), bestand zijn tegen vocht (de kas is vochtig, hoofdstuk 6), licht zijn (je wil de kas kunnen verplaatsen), makkelijk te zagen en te boren zijn (in de klas), niet te duur zijn, en achteraf te recycleren.

2. **Stap 2: gewichten.** Niet elk criterium is even belangrijk. Stijfheid en vochtbestendigheid krijgen 3 (zonder die twee faalt de kas), licht, bewerkbaarheid en prijs 2, recyclage 1.

3. **Stap 3: scores van 1 tot 5**, telkens met een reden. Aluminium: stijf genoeg in kokervorm (4), roest niet door zijn oxidelaag (5), het lichtst van de metalen (5), zaagt en boort vlot (4), middelmatige prijs (3), onbeperkt te recycleren (5). Grenen: stijf genoeg (3), rot en zwelt in vochtige lucht (2), 6 kg (3), het makkelijkst te bewerken (5), goedkoop (5). Staal: het stijfst (5), roest waar de zinklaag beschadigd is bij zaagsneden en boorgaten (3), zwaar (1), moeilijker te zagen (2). PVC: veel te slap en kruipt bij warmte (1), vocht deert het niet (5), licht (5), goedkoop (5), moeilijk te recycleren (2).

4 **Stap 4: vermenigvuldig elke score met het gewicht en tel op** (tabel).

CRITERIUM	GEWICHT	ALUMINIUM	GRENEN	VERZINKT STAAL	PVC
stijf en sterk	3	4 (12)	3 (9)	5 (15)	1 (3)
bestand tegen vocht	3	5 (15)	2 (6)	3 (9)	5 (15)
licht	2	5 (10)	3 (6)	1 (2)	5 (10)
makkelijk te bewerken	2	4 (8)	5 (10)	2 (4)	4 (8)
prijs	2	3 (6)	5 (10)	4 (8)	5 (10)
recycleerbaar	1	5 (5)	3 (3)	5 (5)	2 (2)
totaal (max. 65)		**56**	**44**	**43**	**48**

ANTWOORD

Aluminium wint met 56 op 65 punten, voor PVC (48), grenen (44) en staal (43). De keuze uit hoofdstuk 6 is dus onderbouwd: een aluminium koker van 20 × 20 × 1,5 mm.

Klopt dit? Kijk altijd of de uitkomst gevoelig is voor de gewichten. Geef je prijs gewicht 3 en stijfheid gewicht 1, dan komt PVC dicht bij aluminium: wie kiest, moet dus kunnen uitleggen waarom stijfheid belangrijker is dan prijs. En let op wat de tabel niet ziet: het aluminium frame vormt een koudebrug, en het zet anders uit dan de platen (daarom sleufgaten, hoofdstuk 6).

UITGEWERKT VOORBEELD · 10.11

Habitat: de wanden kiezen

11/14

De wanden en het dak van de meetkas zijn samen 3,60 m². Vijf opties: glas van 4 mm, massief polycarbonaat van 4 mm, een kanaalplaat van polycarbonaat van 4 mm, acryl (PMMA) van 4 mm en tuinfolie van polyetheen van 0,2 mm. Welke kies je?

optie	laat licht door	massa per m²	bij een harde tik	isoleert	levensduur in de zon
glas 4 mm	± 90 %	10 kg	breekt in scherpe scherven	slecht	tientallen jaren
PC massief 4 mm	± 88 %	4,8 kg	breekt niet	slecht	± 10 jaar en meer (met UV-laag)
PC kanaalplaat 4 mm	± 80 %	0,8 kg	deukt, breekt niet	goed (lucht in de kanalen)	± 10 jaar en meer (met UV-laag)
acryl 4 mm	± 92 %	4,8 kg	barst	slecht	lang, vergeelt nauwelijks
tuinfolie 0,2 mm	± 85 % (nieuw)	0,2 kg	scheurt	slecht	enkele jaren



Een kanaalplaat: twee dunne wanden met ribben ertussen, en lucht in de kanalen.

GEGEVEN

- de tabel met eigenschappen
- oppervlakte van wanden en dak: 3,60 m²

GEVRAAGD

- een gewogen keuzetabel en een keuze

OPLOSSING

1 **Criteria en gewichten.** Licht doorlaten (3: planten hebben licht nodig, hoofdstuk 27) en veilig zijn bij een stoot (3: de kas staat in een klas en in de wind). Isoleren (2: 's nachts minder warmteverlies en minder condens), licht zijn (2), lang meegaan (2), prijs (1).

2 **Scores** uit de tabel. Glas scoort hoog op licht en levensduur, maar laag op veiligheid, massa (36 kg voor de hele kas) en isolatie. De kanaalplaat laat wat minder licht door, maar is taai, weegt voor de hele kas maar 2,9 kg en isoleert het best: de stilstaande lucht in de kanalen geleidt warmte slecht.

CRITERIUM	GEWICHT	GLAS	PC MASSIEF	PC KANAALPLAAT	ACRYL	FOLIE
laat licht door	3	5 (15)	4 (12)	3 (9)	5 (15)	4 (12)
breekt niet, veilig	3	1 (3)	5 (15)	4 (12)	2 (6)	2 (6)
isoleert	2	1 (2)	1 (2)	4 (8)	1 (2)	1 (2)
licht	2	1 (2)	3 (6)	5 (10)	3 (6)	5 (10)
levensduur (UV)	2	5 (10)	4 (8)	4 (8)	5 (10)	1 (2)
prijs	1	3 (3)	2 (2)	3 (3)	2 (2)	5 (5)
totaal (max. 65)		**35**	**45**	**50**	**41**	**37**

ANTWOORD

De kanaalplaat van polycarbonaat wint met 50 op 65 punten, voor massief polycarbonaat (45) en acryl (41). Glas (35) valt af door zijn gewicht en omdat het in scherpe scherven breekt.

Klopt dit? Bij het monteren tellen nog details die de tabel niet toont: de UV-kant naar buiten; de kanalen verticaal, zodat condens eruit kan lopen; bovenaan dichtplakken en onderaan afdekken met een geperforeerde tape tegen stof en insecten; en de gaten groter boren dan de schroeven, omdat polycarbonaat sterk uitzet (hoofdstuk 6).

UITLEG · 10.12

Van grondstof tot recyclage

12/14

Elk materiaal begint als **grondstof** uit de natuur: ijzererts voor staal, bauxiet voor aluminium, zand, soda en kalk voor glas, klei voor keramiek, aardolie (of maïs en suikerriet) voor kunststof, bomen voor hout. Van grondstof tot materiaal kost vaak veel energie. Aluminium wordt met elektriciteit uit aluminiumoxide gehaald: voor één ton nieuw aluminium is ongeveer 186 gigajoule nodig, voor één ton gerecycleerd aluminium maar ongeveer 8,3 gigajoule, zo'n 95 % minder.

De weg van een materiaal heet de **materialenkringloop**. Hoe langer een materiaal in de kringloop blijft, hoe minder grondstof en energie er nodig is. Daarom is er een volgorde van voorkeur:

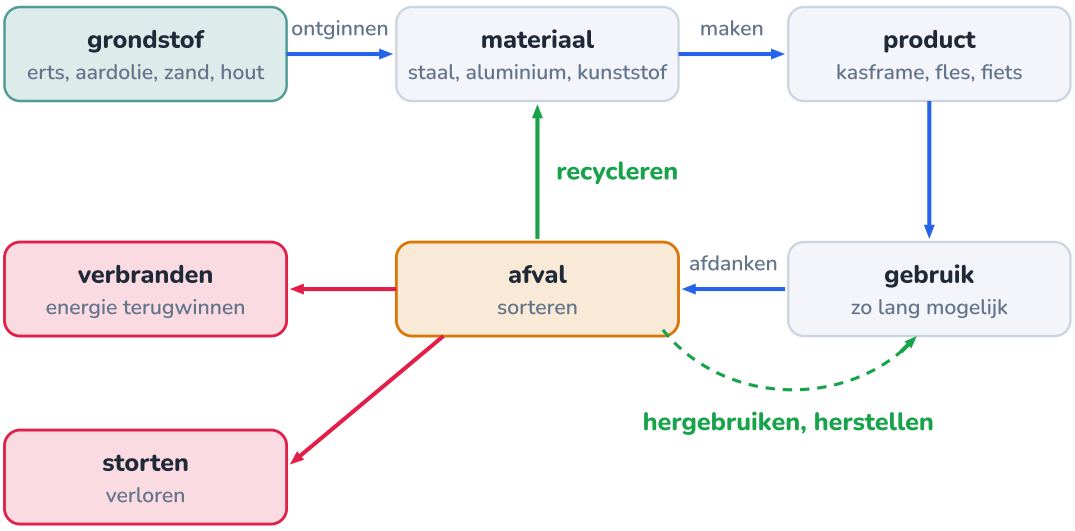
1. **minder gebruiken** en lang laten meegaan;
2. **hergebruiken en herstellen**: een product opnieuw gebruiken zoals het is;
3. **recycleren**: het materiaal opnieuw maken (smelten, vermalen) tot een nieuw product;
4. **verbranden** met energieterugwinning;
5. **storten**: het materiaal is verloren.

Niet elk materiaal recycleert even goed. Metalen en glas kan je telkens opnieuw smelten zonder dat ze slechter worden. Papier kan een aantal keer mee, tot de vezels te kort worden. Kunststoffen moeten per soort gesorteerd worden (hoofdstuk 9); daarvoor dient de **recyclagecode**. Composieten zijn het moeilijkst, omdat de twee materialen vast aan elkaar zitten.

code	kunststof	voorbeelden
1	PET	drankflessen
2	HDPE (polyetheen, hard)	flacons, doppen
3	PVC	buizen, kabelmantels
4	LDPE (polyetheen, zacht)	folie, zakjes
5	PP	potjes, doppen, plantenbakjes
6	PS	piepschuim, yoghurtpotjes
7	andere (polycarbonaat, PLA, mengsels)	kasplaten, 3D-printonderdelen

Ontwerpen voor de kringloop

Wie ontwerpt, beslist mee hoe recycleerbaar iets is. Schroeven in plaats van lijmen maakt uit elkaar halen mogelijk. Eén soort kunststof in plaats van drie maakt sorteren eenvoudiger. De meetkas is zo ontworpen: een geschroefd aluminium frame en losse platen.



Groene pijlen houden het materiaal in de kringloop; rode pijlen halen het eruit.

NASLAG · 10.13

Overzicht: materialen kiezen

13/14

De families, de eigenschappen, de proeven en de stappen van een keuzetabel op één blad.

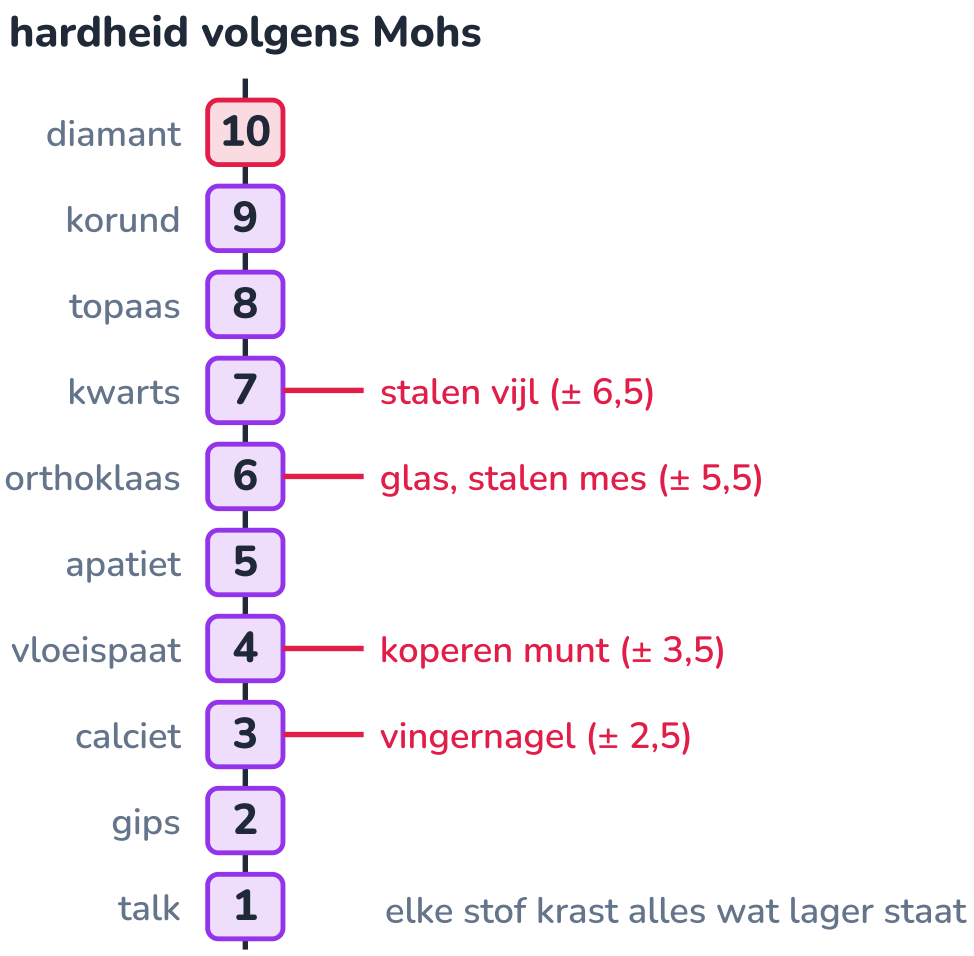
familie	voorbeelden	typisch	let op
hout	grenen, eik, beuk; plaatmateriaal: multiplex, MDF	licht, sterk langs de vezel, makkelijk te bewerken, hernieuwbaar	zwelt en krimpt met vocht, rot als het nat blijft, brandbaar
metalen	staal, roestvast staal, aluminium, koper, messing, zink	sterk, taai, glanzend, geleiden stroom en warmte goed, vervormbaar	zwaar (behalve aluminium), veel roesten of corroderen
kunststoffen	PE, PP, PVC, PET, polycarbonaat, acryl, PLA	licht, isolerend, in elke vorm te gieten, waterbestendig	weinig stijf, worden zacht bij warmte, veel verouderen in zonlicht
keramiek en glas	baksteen, tegels, porselein, beton, glas	hard, stijf, hittebestendig, slijtvast, sterk op druk	bros: breekt zonder te vervormen, zwak op trek
composieten	gewapend beton, glasvezel, koolstofvezel, multiplex	combineren de sterke punten van twee materialen	moeilijk te scheiden en te recycleren

eigenschap	vraag	eenvoudige proef
hardheid	krast het?	krassen met nagel, munt, spijker (schaal van Mohs)
sterkte	hoeveel kracht voor het breekt?	belasten tot het bezwijkt (hoofdstuk 13)
stijfheid	hoeveel vervormt het?	doorbuiging meten met een gewicht
elastisch of plastisch	komt het terug?	belasten en loslaten
taai of bros	vervormt het voor het breekt?	ver buigen of een tik (met bril)
geleiding	gaan stroom en warmte erdoor?	led-tester; ijsblokje dat smelt
duurzaamheid	blijft het goed?	een week in water, zout water, zon

stap	keuzetabel
1	criteria: wat moet het onderdeel doen, in welke omstandigheden?
2	gewicht per criterium (bv. 1 tot 3), met een reden

stap	keuzetabel
3	score per optie (1 tot 5), met een reden of een meting
4	score × gewicht, optellen per optie
5	controleren: verandert de winnaar als je de gewichten wat verschuift? Wat ziet de tabel niet?

code	kunststof	voorbeelden
1	PET	drankflessen
2	HDPE (polyetheen, hard)	flacons, doppen
3	PVC	buizen, kabelmantels
4	LDPE (polyetheen, zacht)	folie, zakjes
5	PP	potjes, doppen, plantenbakjes
6	PS	piepschuim, yoghurtpotjes
7	andere (polycarbonaat, PLA, mengsels)	kasplaten, 3D-printonderdelen



De hardheidsschaal van Mohs.

HET GEHEEL · 10.14

Waar materialen naartoe leiden

14/14

Met dit hoofdstuk sluit het deel Materie en materialen af. Materialen verbinden de leerlijn **materie en chemie** (waaruit bestaat het?) met **ontwerpen en maken** (wat maak je ervan?) en met **krachten en constructies** (wat houdt het?). Wat je hier kwalitatief vergelijkt, wordt verder in de opleiding kwantitatief: in Intermediate de opbouw van kunststoffen en een keuzematrix met milieucriteria, in Expert spanning, rek en stijfheid in getallen, en materiaalkeuze met Ashby-diagrammen.

F5 Veilig werken in labo en werkplaats
Veilig zagen, boren en lijmen in de werkplaats.

F6 Het deeltjesmodel
Uitzetten: polycarbonaat zet drie keer zoveel uit als aluminium, dus sleufgaten.

F7 Massa, volume en dichtheid
De massa van het frame en de wanden, uit volume en dichtheid.

F8 Zuivere stoffen en mengsels
Legeringen als mengsels met eigenschappen op maat.

F9 Mengsels scheiden
Recyclage begint met sorteren: magneet, zink-drijfbak, luchtstroom.

F11 Krachten
Elastisch vervormen en de wet van Hooke: de veerunster.

F13 Constructies: sterk en stabiel
Trek, druk, buiging; profielen en waarom vorm meer telt dan materiaal.

F16 Warmte en temperatuur
Isoleren met luchtlagen; de koudebrug van het frame.

F32 Van idee tot object: CAD en 3D-printen
PLA en andere filamenten: materiaalkeuze voor 3D-geprinte onderdelen.

I16 Redox en batterijen
Corrosie als chemische reactie, en waarom twee metalen elkaar aantasten.

I17 Polymeren en composieten
Hoe kunststoffen en composieten opgebouwd zijn; recyclagecodes.

I38 Duurzaam ontwerpen
Een materiaalkeuzematrix met milieucriteria en de levenscyclus.

E12 Sterkteleer
Spanning, rek, elasticiteitsmodulus en de veiligheidsfactor in getallen.

E28 Materiaalkunde
Kristalstructuur, warmtebehandeling en materiaalkeuze met Ashby-diagrammen.

Habitat

De meetkas krijgt een frame van aluminium koker 20 × 20 × 1,5 mm (3,1 kg, geschroefd met roestvast stalen schroeven M4 en kunststof ringetjes) en wanden en dak van kanaalplaat polycarbonaat van 4 mm (2,9 kg, UV-kant buiten, kanalen verticaal). In opdracht 10.11 kies en verantwoord je de materialen van de plantentafel en de bakjes voor je portfolio; in hoofdstuk 13 ontwerp je hoe het frame stijf blijft.

SAMENVATTING

In het kort

- Materialen vallen in vijf families: hout, metalen, kunststoffen, keramiek en glas, composieten.
- Hardheid (krassen), sterkte (kracht tot breuk), stijfheid (hoeveel vervorming) en taaiheid (vervormen voor het breekt) zijn verschillende eigenschappen.
- Elastisch materiaal veert terug, plastisch materiaal blijft vervormd; bros materiaal breekt plots, taai materiaal vervormt eerst.
- De schaal van Mohs rangschikt hardheid van 1 (talk) tot 10 (diamant): elk materiaal krast alles wat zachter is.
- Metalen geleiden stroom en warmte goed; kunststof, hout, glas, keramiek en lucht isoleren.

- Duurzaamheid: ijzer roest door, aluminium beschermt zich met een oxidelaagje, hout rot als het nat blijft, kunststof verouderd in zonlicht.
- Composieten combineren materialen: in gewapend beton vangt het staal de trek en het beton de druk op.
- Met een gewogen keuzetabel kies je onderbouwd: criteria, gewichten, scores, optellen, en controleren of de keuze gevoelig is voor de gewichten.
- De materialenkringloop: grondstof, materiaal, product, gebruik, en dan liefst hergebruiken of recycleren. Gerecycleerd aluminium kost 95 % minder energie.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

materiaalfamilie
Groep materialen met gelijkaardige eigenschappen: hout, metalen, kunststoffen, keramiek en glas, composieten.

hardheid
Hoe goed een materiaal weerstaat aan krassen of indrukken; de schaal van Mohs rangschikt van 1 (talk) tot 10 (diamant).

sterkte
Hoeveel kracht een materiaal kan dragen voor het bezwijkt, op trek, druk of buiging.

stijfheid
Hoe weinig een materiaal vervormt onder een kracht; staal is ongeveer drie keer zo stijf als aluminium.

taai
Vervormt veel voor het breekt en neemt zo veel energie op; het tegengestelde is bros.

bros
Breekt plots, zonder vooraf zichtbaar te vervormen, zoals glas en keramiek.

elastisch
Neemt na het wegnemen van de kracht weer zijn oorspronkelijke vorm aan.

plastisch
Blijft na het wegnemen van de kracht vervormd.

corrosie
Aantasting van een metaal door zijn omgeving, zoals het roesten van ijzer in vochtige lucht.

composiet
Materiaal uit twee of meer materialen die samen betere eigenschappen hebben dan elk apart, zoals gewapend beton.

keuzetabel
Tabel waarin je opties scoort op criteria met een gewicht, om onderbouwd te kiezen.

materialenkringloop
De weg van een materiaal van grondstof over product en gebruik naar hergebruik, recyclage, verbranding of storten.

F FUNDAMENTAL · DEEL F3 · KRACHTEN, BEWEGING EN CONSTRUCTIES

HANDBOEK · HOOFDSTUK 11

Krachten

Duwen, trekken, wegen en glijden: hoe je een kracht herkent, tekent en meet

Een kracht zie je niet, maar je ziet wel wat ze doet: een veer wordt langer, een bal vertrekt, een fiets remt, een moer draait los. In dit hoofdstuk leer je krachten herkennen, tekenen als een **pijl** en meten in **newton**. Je ontdekt waarom een meetkoffer op de maan zes keer lichter aanvoelt maar niet minder massa heeft, hoe een veer werkt als krachtmeter (de **wet van Hooke**), en waarom je zonder **wrijving** niet eens zou kunnen stappen. Voor de meetkas bereken je hoe hard de plantenbakken op de tafel duwen, en of die tafel dat aankan.

7× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 3× proef · 2× ontleed · 1× naslag · 2× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

K Krachten, beweging en constructies · W Wiskundig modelleren · O Onderzoeken en meten



Hoe hard duwt een volle plantenbak op de tafel? Een krachtmeter geeft het antwoord in newton.

Na dit hoofdstuk

- Je kan een kracht beschrijven als een duw of een trek tussen twee voorwerpen, en contactkrachten onderscheiden van krachten op afstand.
- Je kan herkennen wat een kracht doet: vervormen, versnellen, afremmen, van richting doen veranderen of doen draaien.
- Je kan een kracht tekenen als een pijl met de juiste grootte (op schaal), richting en aangrijpingspunt, en een krachtpijl aflezen.
- Je kan een krachtmeter kiezen, op nul zetten en correct aflezen.
- Je kan de zwaartekracht berekenen met $F_z = m \cdot g$, op aarde en op andere hemellichamen.
- Je kan massa, zwaartekracht en gewicht van elkaar onderscheiden.
- Je kan de wet van Hooke gebruiken: de uitrekking van een veer is recht evenredig met de kracht, tot aan de elasticiteitsgrens.
- Je kan uitleggen waar wrijving vandaan komt, wanneer ze nuttig of hinderlijk is, en hoe je ze groter of kleiner maakt.

VERHAAL · 11.1

Een appel en de maan

1/20

In 1665 brak in Engeland de pest uit en ging de universiteit van Cambridge dicht. De jonge student **Isaac Newton** (1643-1727) keerde terug naar de boerderij van zijn familie in Woolsthorpe en werkte er anderhalf jaar alleen verder. Veel later, toen hij een oude man was, vertelde hij aan zijn vriend William

Stukeley dat hij in die tijd in de tuin een appel had zien vallen, en dat dat hem aan het denken zette. (Dat de appel op zijn hoofd viel, is een versiering die later is bijgekomen.)

Zijn vraag was eenvoudig en groots tegelijk. Als de aarde een appel naar zich toe trekt, ook boven in de hoogste boom, reikt die trekkracht dan niet veel verder? Tot aan de maan? In 1687 publiceerde hij het antwoord in zijn boek *Principia*: dezelfde kracht die de appel doet vallen, houdt de maan in haar baan rond de aarde, en de aarde in haar baan rond de zon. Die kracht noemen we de **zwaartekracht**.

Newton beschreef ook in drie wetten hoe krachten een beweging veranderen. Die wetten leer je in Intermediate (hoofdstuk 8). Hier begin je bij het begin: wat is een kracht, hoe teken je ze, en hoe meet je ze? De eenheid waarin je dat doet, draagt vandaag zijn naam: de **newton**.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Newton zag een verband dat niemand eerder zag: een vallende appel en een draaiende maan gehoorzamen aan dezelfde regel. Zo werkt wetenschap vaak. Eén goed idee verklaart plots heel veel verschillende dingen (hoofdstuk 1).



Een vallende appel en de maan boven de boom: volgens Newton trekt de aarde aan allebei.

UITLEG · 11.2

Kracht: duwen of trekken

2/20

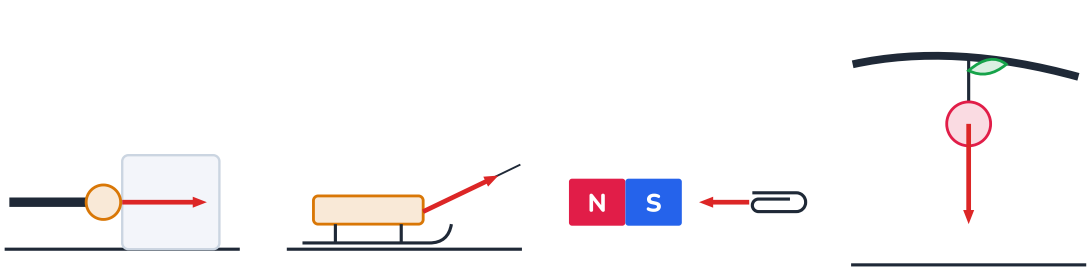
Een **kracht** is een duw of een trek. Er zijn altijd **twee voorwerpen** bij betrokken: het ene oefent de kracht uit, het andere ondergaat ze. Stel daarom bij elke kracht de vraag: *wie* duwt of trekt, en *op wie*?

- **Contactkrachten** werken alleen als de voorwerpen elkaar raken: je hand die een kar duwt, een touw dat trekt (de *spankracht*), een veer die terugduwt (de *veerkracht*), de vloer die je draagt, de *wrijving* tussen je schoen en de grond.
- **Krachten op afstand** werken ook zonder contact: de *zwaartekracht* van de aarde, de *magnetische kracht* van een magneet, de *elektrische kracht* van een opgewreven ballon op je haar.

situatie	wie oefent de kracht uit?	op wie?	soort
je duwt een kar	je handen	de kar	contact
een touw houdt een schommel	het touw	de schommel	contact (spankracht)
een veer trekt een deur dicht	de veer	de deur	contact (veerkracht)
de vloer draagt je	de vloer	jou	contact
een slee glijdt uit	de sneeuw	de slee	contact (wrijving)
een appel valt	de aarde	de appel	op afstand (zwaartekracht)
een magneet trekt een paperclip	de magneet	de paperclip	op afstand (magnetisch)
een opgewreven ballon trekt je haar op	de ballon	je haar	op afstand (elektrisch)

Een gegooide bal heeft 'kracht in zich'

Veel mensen denken dat een bal die je gooit de kracht van je hand meeneemt, en stopt als die kracht 'op' is. Maar zodra de bal je hand verlaat, duwt je hand niet meer. Op de vliegende bal werken alleen nog de zwaartekracht en de luchtweerstand. Dat hij toch verder vliegt, komt doordat een bewegend voorwerp uit zichzelf blijft bewegen. Een kracht is dus geen voorraad in een voorwerp, maar iets wat het ene voorwerp op het andere doet, zolang het duwt of trekt (hoofdstuk I8).



duwen
contactkracht

trekken
contactkracht

magnetische kracht
kracht op afstand

zwaartekracht
kracht op afstand

De rode pijlen tonen de kracht op de doos, de slee, de paperclip en de appel. Magneet en aarde raken niets aan.

UITLEG · 11.3

Wat een kracht kan doen

3/20

Een kracht zie je niet. Je herkent ze aan wat ze doet. Een kracht kan een voorwerp

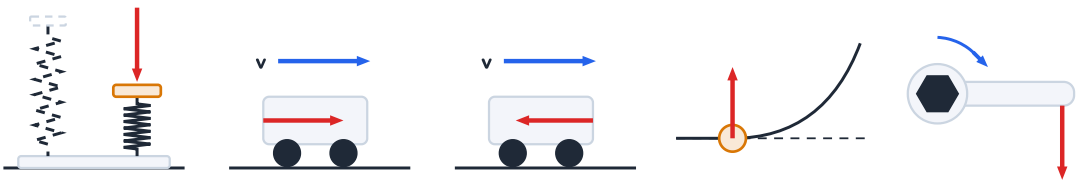
- **vervormen**: een veer indrukken, een elastiek uitrekken, een plank doen doorbuigen. Veert het voorwerp terug als de kracht weg is, dan was de vervorming *elastisch*; blijft het vervormd, dan *plastisch* (hoofdstuk 10);

- **versnellen**: de kracht werkt in de zin van de beweging, het voorwerp gaat sneller (een sprinter die zich afzet, een fietser die trapt);
- **afremmen**: de kracht werkt tegen de beweging in, het voorwerp gaat trager (remmen, een bal die je opvangt);
- **van richting doen veranderen**: de kracht werkt dwars op de beweging, het voorwerp buigt af (een bal die je met je hoofd opzij kopt, een auto in een bocht);
- **doen draaien**: de kracht werkt naast het draaipunt, het voorwerp draait (een moersleutel, een deurklink, een trapper).

Vaak gebeuren er meerdere dingen tegelijk. Trap je tegen een bal, dan wordt hij even platgedrukt, vertrekt hij snel en verandert hij van richting.

Krachten die elkaar opheffen

Trekken twee even sterke ploegen aan een touw, elk naar hun kant, dan beweegt het touw niet: de twee krachten heffen elkaar op. Ze zijn **in evenwicht**. Er werken dan wel krachten (het touw staat strak gespannen), maar samen veranderen ze de beweging niet. Een boek dat stil op tafel ligt, is ook in evenwicht: de aarde trekt het omlaag, de tafel duwt het even hard omhoog.



vervormen de veer wordt korter — **versnellen** kracht in de zin van de beweging — **afremmen** kracht tegen de beweging in — **afbuigen** kracht dwars op de beweging — **draaien** kracht ver van het draaipunt

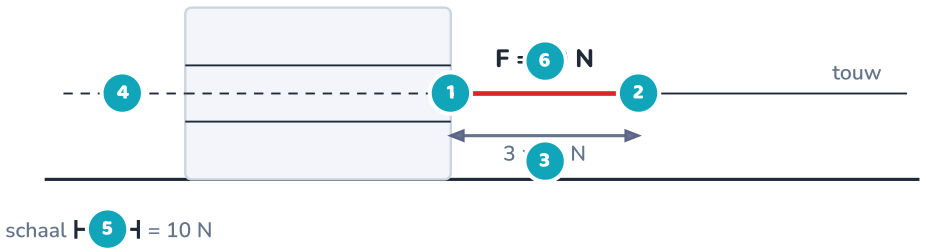
Rood is telkens de kracht, blauw de snelheid. Waar de kracht staat tegenover de beweging, bepaalt wat er gebeurt.

ONTLEED · 11.4

De krachtpijl

4/20

Een kracht heeft een **grootte** (hoeveel newton), een **richting** en een **aangrijpingspunt** (waar ze op het voorwerp werkt). Een pijl toont alle drie tegelijk. Een grootheid met een richting noem je een **vector**: in formules krijgt ze een pijltje, $\vec{F}$. Schrijf je alleen de grootte, dan laat je het pijltje weg: $F = 30\,\mathrm{N}$. Met vectoren rekenen leer je in hoofdstuk I6.



Een kist wordt met een touw naar rechts getrokken. Het schaalstreepje zegt hoeveel newton één stukje pijl voorstelt.

1 Aangrijpingspunt
De pijl begint waar de kracht op het voorwerp werkt: hier waar het touw aan de kist vastzit. Bij de zwaartekracht is dat het zwaartepunt (hoofdstuk 13).

2 Pijlpunt: de zin
De punt wijst in de zin waarin geduwd of getrokken wordt: naar rechts, niet naar links.

3 Lengte: de grootte
Hoe langer de pijl, hoe groter de kracht. Deze pijl is drie schaalstreepjes lang: 3 × 10 N = 30 N.

4 Werklijn
De rechte waarop de pijl ligt (stippellijn). Richting en werklijn liggen vast door het touw: de kracht werkt langs het touw.

5 Schaal
Zonder schaal zegt een lengte niets. Op papier schrijf je bijvoorbeeld 1 cm ≙ 10 N (lees: 1 cm stelt 10 N voor).

6 Naam en waarde
Zet bij elke pijl een naam en een waarde met eenheid: F = 30 N, of F_z = 39 N voor een zwaartekracht.

UITGEWERKT VOORBEELD · 11.5

Krachtpijlen tekenen en aflezen

5/20

(a) Lisa trekt een kar horizontaal naar rechts met een kracht van 45 N. Het touw zit vast aan de voorkant van de kar. Teken de kracht op schaal: 1 cm ≙ 10 N.
(b) In een andere tekening met schaal 1 cm ≙ 50 N staat een krachtpijl van 3,2 cm. Hoe groot is die kracht?



De oplossing van (a). Hier is het schaalstreepje 10 N; de pijl is er vier en een half keer zo lang.

GEGEVEN

GEVRAAGD

- (a) $F = 45\,\mathrm{N}$, horizontaal naar rechts, schaal 1 cm ≙ 10 N
- (b) pijl van 3,2 cm, schaal 1 cm ≙ 50 N

- (a) de krachtpijl
- (b) de grootte van de kracht

OPLOSSING

1. (a) **Lengte**: elke centimeter stelt 10 N voor, dus $45/10 = 4{,}5\,\mathrm{cm}$.
2. **Aangrijpingspunt**: het punt waar het touw aan de kar vastzit. Zet daar een stip.
3. **Richting en zin**: langs het touw, horizontaal, naar rechts. Teken vanaf de stip een pijl van 4,5 cm naar rechts en schrijf erbij: $F = 45\,\mathrm{N}$.
4. (b) Elke centimeter is 50 N: $3{,}2 \times 50 = 160\,\mathrm{N}$.

ANTWOORD

(a) Een pijl van 4,5 cm naar rechts, vanaf de plaats waar het touw vastzit. (b) $F = 160\,\mathrm{N}$.

Klopt dit? Omgekeerd rekenen: 160 N gedeeld door 50 N per cm geeft 3,2 cm. Kies zelf een schaal zo dat de langste pijl in je tekening tussen 3 en 8 cm lang wordt: te kort lees je slecht af, te lang past niet.

UITLEG · 11.6

De newton en de krachtmeter

6/20

Krachten druk je uit in **newton** (N). Om er een gevoel voor te krijgen: houd een reep chocolade van 100 g op je vlakke hand. Die duwt met ongeveer 1 N op je hand. Grote krachten schrijf je in kilonewton: $1\,\mathrm{kN} = 1000\,\mathrm{N}$.

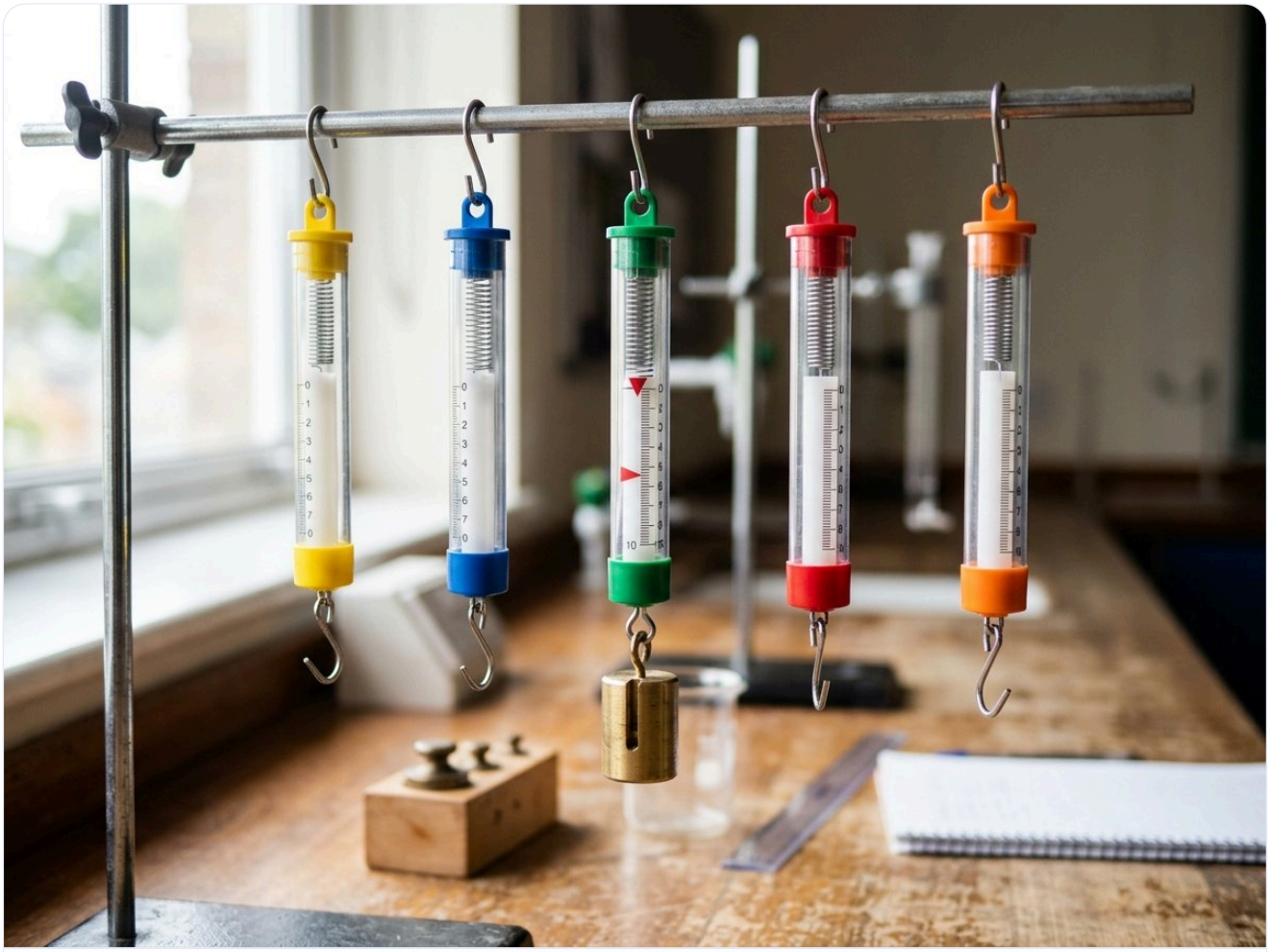
voorwerp	massa	zwaartekracht (afgerond)
reep chocolade	100 g	1 N
pak melk van 1 L	1,0 kg	9,8 N
volle plantenbak van de meetkas	4,0 kg	39 N
leerling	50 kg	490 N
kleine auto	1200 kg	11 800 N = 11,8 kN

Een kracht meet je met een **krachtmeter**, ook **veerunster** of **dynamometer** genoemd. Binnenin zit een veer die langer wordt naarmate je harder trekt; een wijzer toont de kracht op een schaal in newton. Zo gebruik je hem:

1. **Kies het bereik.** Een meter van 1 N is nauwkeurig voor kleine krachten, maar gaat stuk bij 3 N. Schat eerst hoe groot de kracht ongeveer is.
2. **Zet hem op nul**, in de stand waarin je gaat meten: verticaal als je iets ophangt, horizontaal als je iets over de tafel trekt. De veer en de haak wegen zelf ook iets.
3. **Trek in de richting van de kracht**, langs de as van de meter, zonder dat de binnenbuis tegen de huls schuurt.
4. **Lees af op ooghoogte**, recht voor de wijzer (parallax, hoofdstuk 3), en schrijf de eenheid erbij.

Niet overbelasten

Trek je harder dan het bereik, dan rekt de veer voorbij haar **elasticiteitsgrens**: ze vervormt plastisch en komt niet meer terug op nul (hoofdstuk 10). De meter is dan onbruikbaar. Twijfel je, begin dan met de meter met het grootste bereik.



Krachtmeters met een verschillend bereik: hoe kleiner het bereik, hoe fijner de schaal.

PROEF · 11.7

Hoeveel newton per kilogram?

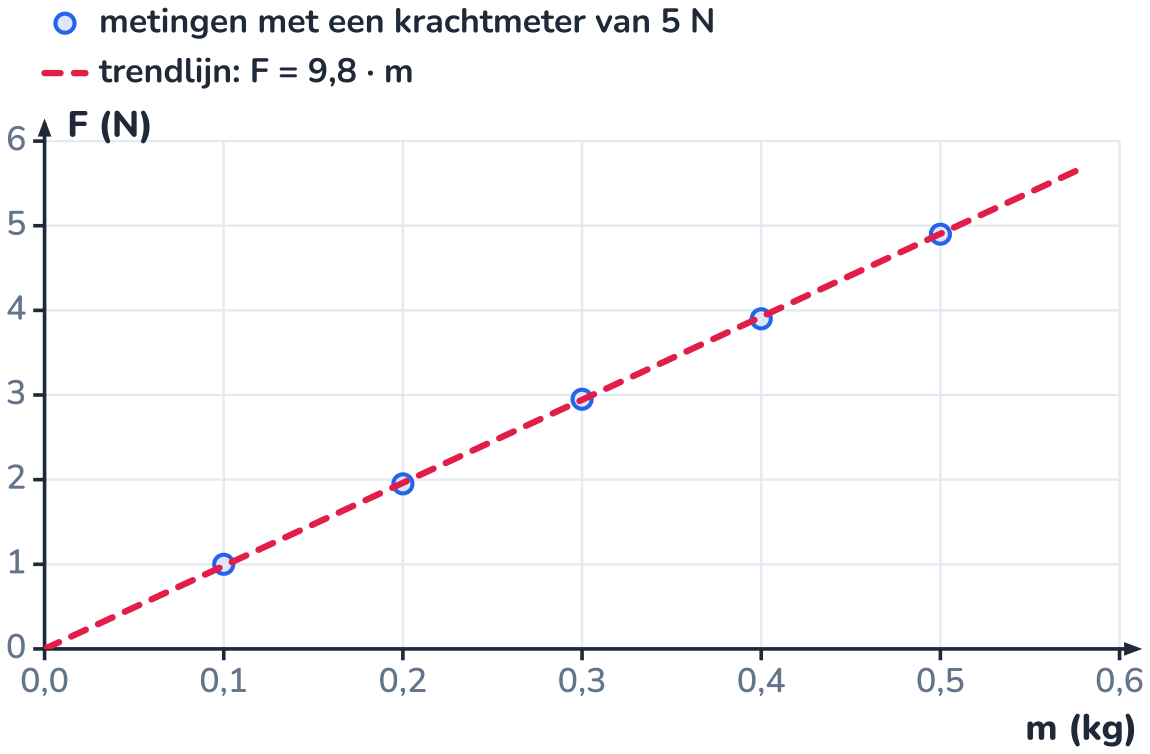
7/20

ONDERZOEKSVRAAG

Hoe hangt de zwaartekracht op een voorwerp af van zijn massa?

MATERIAAL

- krachtmeter met een bereik van 5 N (schaalverdeling 0,05 N)
- vijf haakgewichten van 100 g
- statief met klem
- balans om de massa's te controleren



De trendlijn gaat door de oorsprong: geen massa, geen zwaartekracht. De helling is 9,8 N per kilogram.

WERKWIJZE

1. Hang de krachtmeter verticaal aan het statief en zet hem op nul.
2. Controleer met de balans dat elk haakgewicht 100 g is.
3. Hang één haakgewicht aan de krachtmeter. Wacht tot de wijzer stilstaat en lees af op ooghoogte.
4. Hang er telkens een haakgewicht bij, tot 500 g. Noteer telkens de massa en de kracht.
5. Bereken voor elke meting de verhouding F/m, met de massa in kilogram. Zet de metingen in een grafiek met m horizontaal.

WAARNEMING

m (g)	m (kg)	F (N)	F/m (N/kg)
100	0,100	1,00	10,0
200	0,200	1,95	9,75
300	0,300	2,95	9,83
400	0,400	3,90	9,75
500	0,500	4,90	9,80

De punten liggen op een rechte door de oorsprong.

VERKLARING

Dubbel zoveel massa geeft dubbel zoveel kracht: de zwaartekracht is **recht evenredig** met de massa (hoofdstuk 4). De verhouding F/m is telkens ongeveer 9,8 N/kg: de **evenredigheidsconstante**. De kleine verschillen komen doordat je maar op 0,05 N nauwkeurig afleest; bij de grootste massa weegt die afleesfout het minst: $4{,}90/0{,}500 = 9{,}80\,\mathrm{N/kg}$. Met nauwkeurigere toestellen vind je in België $9{,}81\,\mathrm{N/kg}$. Die constante krijgt de letter g.

Zwaartekracht

Alles wat massa heeft, trekt aan alles wat massa heeft. Tussen twee appels is die kracht zo klein dat je ze nooit merkt, maar de aarde is zo groot dat ze alles om zich heen merkbaar naar zich toe trekt. Die kracht heet de **zwaartekracht** F_z.

- **Richting**: naar het middelpunt van de aarde. Dat noemen we 'verticaal naar beneden'; een schietlood (een gewichtje aan een draad) toont die richting.
- **Aangrijpingspunt**: het **zwaartepunt** van het voorwerp (hoofdstuk 13).
- **Grootte**: recht evenredig met de massa, zoals de proef toonde.

ZWAARTEKRACHT

$$F_z = m \cdot g$$

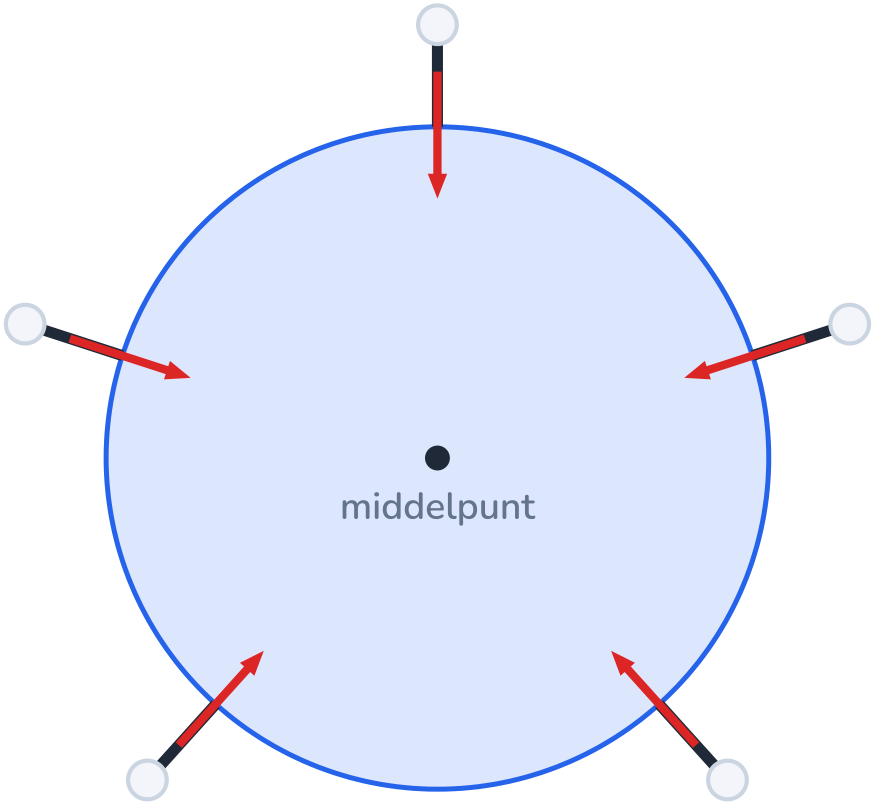
F_z in newton (N), m in kilogram (kg), g in newton per kilogram (N/kg). Op aarde, in België, is $g = 9{,}81\,\mathrm{N/kg}$: elke kilogram wordt met 9,81 N aangetrokken.

Het getal g heet de **zwaarteveldsterkte**. Het hangt af van waar je bent: een kleiner hemellichaam trekt minder hard. (In hoofdstuk I7 zie je dat hetzelfde getal ook zegt hoe snel een vallend voorwerp versnelt.)

plaats	g (N/kg)	zwaartekracht op 1,0 kg
aarde, in België	9,81	9,81 N
aarde, aan de evenaar en aan de polen	9,78 en 9,83	9,78 N en 9,83 N
maan	1,62	1,62 N
Mars	3,71	3,71 N
Jupiter (bovenkant van de wolken)	24,8	24,8 N

Zonder lucht geen zwaartekracht

Sommige mensen denken dat de lucht ons op de grond drukt, en dat er daarom op de maan (zonder lucht) niets zou vallen. Maar de zwaartekracht heeft geen lucht nodig: de maan trekt voorwerpen naar zich toe, alleen zes keer minder hard dan de aarde. Astronauten liepen er, zij het met grote sprongen, en wat ze lieten vallen, viel.



Voor iedereen op aarde wijst 'naar beneden' naar hetzelfde punt: het middelpunt. Niet op schaal.

UITLEG · 11.9

Massa, zwaartekracht en gewicht

9/20

In het dagelijks leven zeg je 'ik weeg 50 kg'. In de natuurwetenschappen houden we drie begrippen uit elkaar:

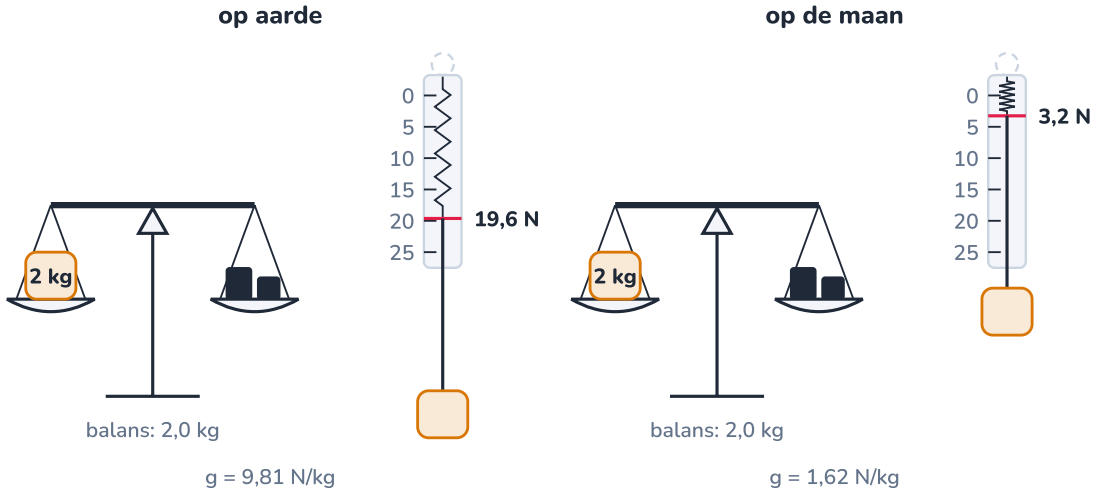
	massa	zwaartekracht	gewicht
wat is het?	hoeveel stof er in een voorwerp zit	de kracht waarmee de aarde (of de maan) aan het voorwerp trekt	de kracht waarmee het voorwerp op zijn steun duwt of aan zijn ophanging trekt
symbool, eenheid	m, kilogram (kg)	F_z, newton (N)	G, newton (N)
aangrijpingspunt	(geen kracht)	het zwaartepunt van het voorwerp	waar het voorwerp steunt of hangt
op de maan	hetzelfde	ongeveer 6 keer kleiner	ongeveer 6 keer kleiner
meten met	een balans	een krachtmeter (in rust even groot)	

Het verschil tussen zwaartekracht en gewicht zit vooral in *op wie* de kracht werkt. De zwaartekracht werkt op het bakje; het gewicht werkt op de tafel waarop het bakje staat. Ligt of hangt iets stil, dan zijn ze even groot.

Een **balans** vergelijkt een massa met gekende massa's: op de maan worden beide kanten even veel lichter, dus ze toont overal dezelfde massa. Een **krachtmeter** meet een kracht: op de maan toont hij zes keer minder. Een **personenweegschaal** meet eigenlijk ook een kracht en rekent die om met 9,81 N/kg. Iemand van 50 kg zou er op de maan $50 \times 1{,}62/9{,}81 \approx 8{,}3\,\text{kg}$ op aflezen, terwijl zijn massa gewoon 50 kg blijft.

'Max. 25 kg' op een verpakking

Op een plankdrager staat 'draagvermogen 25 kg'. De fabrikant bedoelt: de plank mag hoogstens zo hard op de drager duwen als het gewicht van 25 kg op aarde, dus met $25 \times 9{,}81 \approx 245\,\text{N}$. In het dagelijks leven zijn kilogrammen handiger; een ingenieur rekent in newton.



De balans blijft in evenwicht op aarde en op de maan: de massa is dezelfde. De veerunster toont op de maan 3,2 N in plaats van 19,6 N.

UITGEWERKT VOORBEELD · 11.10

Een meetkoffer naar de maan

10/20

Een onderzoeker van Habitat neemt een meetkoffer van 12 kg mee naar de maan. (a) Wat is de massa van de koffer op de maan? (b) Hoe groot is de zwaartekracht op de koffer op aarde en op de maan? (c) Hoeveel massa kan de onderzoeker op de maan optillen met dezelfde kracht waarmee ze op aarde de koffer optilt?

GEGEVEN

- $m = 12\,\text{kg}$
- $g_{\text{aarde}} = 9{,}81\,\text{N/kg}$, $g_{\text{maan}} = 1{,}62\,\text{N/kg}$

GEVRAAGD

- m op de maan
- F_z op aarde en op de maan
- de massa die ze op de maan kan tillen

OPLOSSING

1. (a) Massa is hoeveel stof er is. Die verandert niet door de reis: op de maan is de massa ook $12\,\text{kg}$.
2. (b) Op aarde: $F_z = m \cdot g = 12\,\text{kg} \times 9{,}81\,\text{N/kg} = 117{,}7\,\text{N} \approx 118\,\text{N}$. Op de maan: $F_z = 12 \times 1{,}62 = 19{,}4\,\text{N}$.

3 (c) Ze kan op de maan een zwaartekracht van 117,7 N overwinnen. Welke massa hoort daarbij? Vorm de formule om: $m = \frac{F_z}{g} = \frac{117{,}7\,\text{N}}{1{,}62\,\text{N/kg}} = 72{,}7\,\text{kg}$.

ANTWOORD

(a) 12 kg. (b) 118 N op aarde, 19,4 N op de maan. (c) Ongeveer 73 kg.

Klopt dit? De maan trekt $9{,}81/1{,}62 \approx 6{,}1$ keer minder hard: $12 \times 6{,}06 \approx 73$. Klopt. Let op: optillen gaat op de maan zes keer makkelijker, maar een zware koffer opzij duwen of afremmen niet. Daarvoor telt de massa, en die is niet veranderd (hoofdstuk I8).

UITGEWERKT VOORBEELD · 11.11

Habitat: hoe hard duwen de plantenbakken op de tafel?

11/20

In de meetkas staan twaalf plantenbakjes op een tafelblad van watervast multiplex (1,18 m × 0,58 m, 18 mm dik). Elk bakje bevat 6,0 L vochtige potgrond (0,6 kg/L, hoofdstuk 7); het bakje zelf (PP) weegt 0,30 kg en de planten samen ongeveer 0,10 kg. (a) Bereken de massa, de zwaartekracht en het gewicht van één volle bak. (b) Hoe hard duwen de twaalf bakken samen op het tafelblad? (c) Het tafelblad zelf heeft een massa van 8,4 kg. Het rust met zijn twee korte kanten op twee steunen. Hoeveel kracht moet elke steun opvangen?



Links trekt de aarde aan een bak (in zijn zwaartepunt), rechts duwt een bak op de plank (waar hij steunt). Even groot, maar op een ander voorwerp.

GEGEVEN

- potgrond: $6{,}0\,\text{L} \times 0{,}6\,\text{kg/L}$; bakje $0{,}30\,\text{kg}$; planten $0{,}10\,\text{kg}$
- 12 bakken; tafelblad $8{,}4\,\text{kg}$; twee steunen
- $g = 9{,}81\,\text{N/kg}$

GEVRAAGD

- massa, zwaartekracht en gewicht van één bak
- kracht van alle bakken op de tafel
- kracht op elke steun

OPLOSSING

1 (a) Massa van de potgrond: $6{,}0 \times 0{,}6 = 3{,}6\,\text{kg}$. Eén volle bak: $3{,}6 + 0{,}30 + 0{,}10 = 4{,}0\,\text{kg}$.

2 Zwaartekracht: $F_z = 4{,}0\,\text{kg} \times 9{,}81\,\text{N/kg} = 39\,\text{N}$, in het zwaartepunt van de bak, naar beneden. Het gewicht is de kracht van de bak op het tafelblad: ook 39 N, want de bak staat stil.

3 (b) Twaalf bakken: $12 \times 4{,}0 = 48\,\text{kg}$, dus $48 \times 9{,}81 = 471\,\text{N}$ op het tafelblad.

4 (c) Het tafelblad zelf: $8{,}4 \times 9{,}81 = 82\,\text{N}$. Samen: $471 + 82 = 553\,\text{N}$. De bakken staan gelijk verdeeld en de tafel is symmetrisch, dus elke steun draagt de helft: $553/2 \approx 277\,\text{N}$.

ANTWOORD

Eén bak: 4,0 kg, 39 N. Alle bakken samen: 471 N op het tafelblad. Elke steun: ongeveer 277 N.

Klopt dit? 277 N is de zwaartekracht op ongeveer 28 kg: een steun die 'max. 25 kg' draagt, is dus te zwak. Of het tafelblad zelf niet te ver doorbuigt, is een tweede vraag. Een plank gedraagt zich als een stijve veer: dat onderzoek je met de wet van Hooke in opdracht 11.13.

VERHAAL · 11.12

Een geheim in veertien letters

12/20

In 1676 stond achteraan in een boekje van de Engelse wetenschapper **Robert Hooke** (1635-1703) een vreemde reeks letters: **ceiiinosssttuv**. Het was een *anagram*: de letters van een Latijnse zin, alfabetisch door elkaar gezet. Twee jaar later gaf Hooke de oplossing: *ut tensio, sic vis*, 'zoals de uitrekking, zo de kracht'.

Waarom die geheimzinnigheid? Hooke had ontdekt dat een veer twee keer zo ver uitrekt als je er twee keer zo hard aan trekt. Dat was belangrijk: hij werkte aan horloges die met een veertje de tijd bijhielden, en hij lag in een felle ruzie met de Nederlandse wetenschapper Christiaan Huygens over wie dat idee het eerst had. Met het anagram kon hij later bewijzen dat hij de regel al in 1676 kende, zonder hem meteen weg te geven. Wetenschappers gebruikten die truc in die tijd vaker.

Hooke was een duizendpoot. Hij bouwde luchtpompen en microscopen, en gaf in zijn boek *Micrographia* (1665) de cel haar naam (hoofdstuk 26). Toch bestaat er van hem geen enkel portret waarvan zeker is dat hij het is. Zijn regel voor veren kent wel iedereen: de **wet van Hooke**. Je ontdekt ze zelf in de volgende proef.



Veren, uurwerken en microscopen: de werktafel van iemand als Hooke.

PROEF · 11.13

Een veer uitrekken

13/20

ONDERZOEKSVRAAG

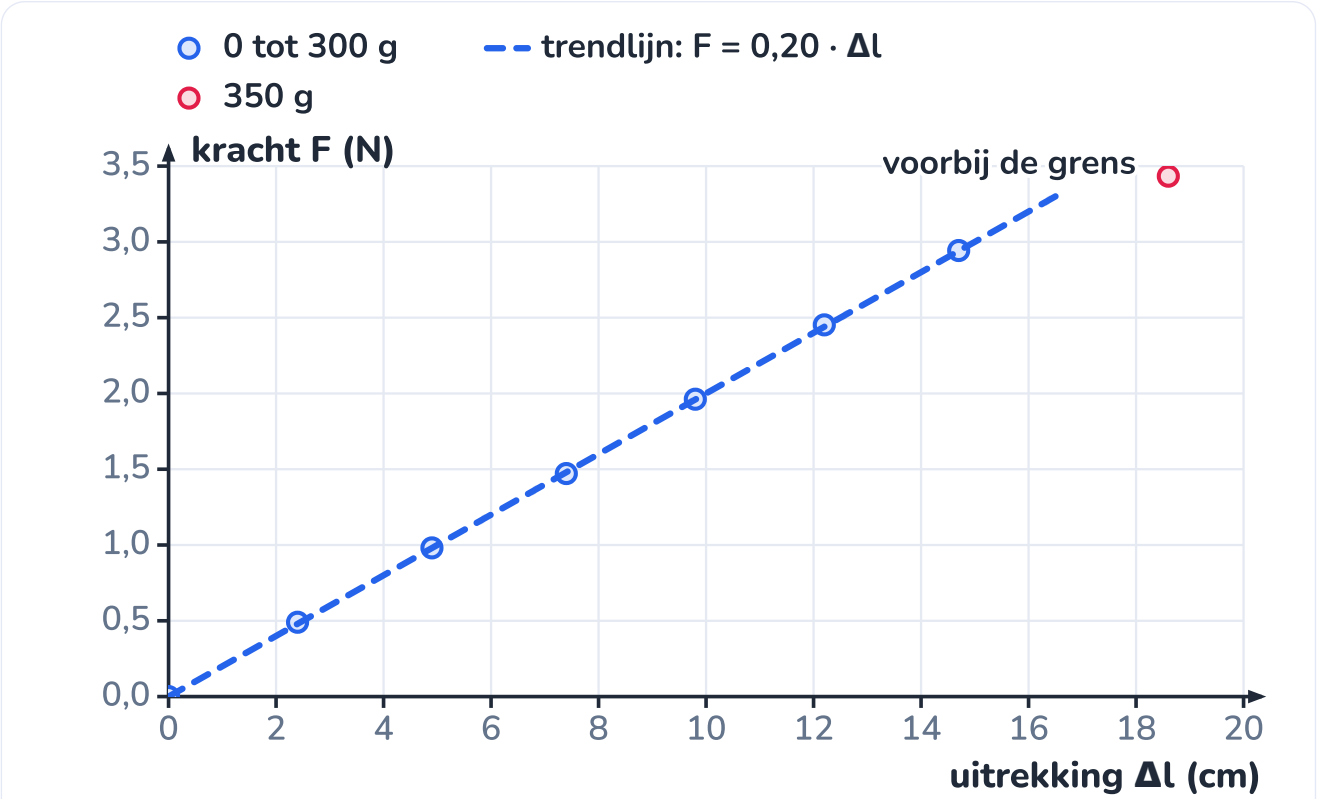
Hoe hangt de uitrekking van een veer af van de kracht die eraan trekt?

MATERIAAL

- schroefveer
- statief met klem en een haakje
- meetlat met millimeterverdeling, verticaal opgesteld
- zeven haakgewichten van 50 g

Veiligheid

Zet het statief stevig en houd je voeten weg onder de gewichten.



Tot 300 g liggen de punten op een rechte door de oorsprong. Het rode punt (350 g) valt eronder: de veer rekt te ver uit.

WERKWIJZE

1. Hang de veer aan het statief en meet haar lengte l_0 zonder gewicht (de beginlengte).
2. Hang er 50 g aan. Wacht tot de veer stilhangt en meet de nieuwe lengte l.
3. Voeg telkens 50 g toe, tot 300 g. Meet telkens de lengte.
4. Hang ten slotte 350 g aan de veer. Neem daarna alle gewichten weg en meet de lengte opnieuw.
5. Bereken voor elke meting de kracht $F = m \cdot g$ en de **uitrekking** $\Delta l = l - l_0$ (lees: delta l, het verschil in lengte).

WAARNEMING

massa (g)	F (N)	lengte l (cm)	uitrekking Δl (cm)	$F/\Delta l$ (N/cm)
0	0,00	6,0	0,0	–
50	0,49	8,4	2,4	0,204
100	0,98	10,9	4,9	0,200
150	1,47	13,4	7,4	0,199
200	1,96	15,8	9,8	0,200
250	2,45	18,2	12,2	0,201
300	2,94	20,7	14,7	0,200
350	3,43	24,6	18,6	0,185

Na de meting met 350 g hangt de veer zonder gewicht op 6,8 cm in plaats van 6,0 cm.

VERKLARING

Tot 300 g is de uitrekking recht evenredig met de kracht: dubbel zoveel kracht, dubbel zoveel uitrekking. De verhouding $F/\Delta l$ is telkens ongeveer 0,20 N per cm, of 20 N per meter. Dat getal is de **veerconstante** van deze veer.

Met 350 g verwacht je een uitrekking van $3{,}43/0{,}20 \approx 17\,\text{cm}$, maar je meet 18,6 cm, en na het wegnemen blijft de veer 0,8 cm te lang. De veer is voorbij haar **elasticiteitsgrens** gegaan en plastisch vervormd (hoofdstuk 10). Voorbij die grens geldt het verband niet meer.

UITLEG · 11.14

De wet van Hooke

14/20

De proef toont wat Hooke vond: zolang een veer elastisch blijft, is haar uitrekking recht evenredig met de kracht erop.

WET VAN HOOKE

$$F = k \cdot \Delta l$$

F in newton (N), Δl (de uitrekking) in meter (m), k (de **veerconstante**) in newton per meter (N/m). Geldt alleen tot aan de elasticiteitsgrens.

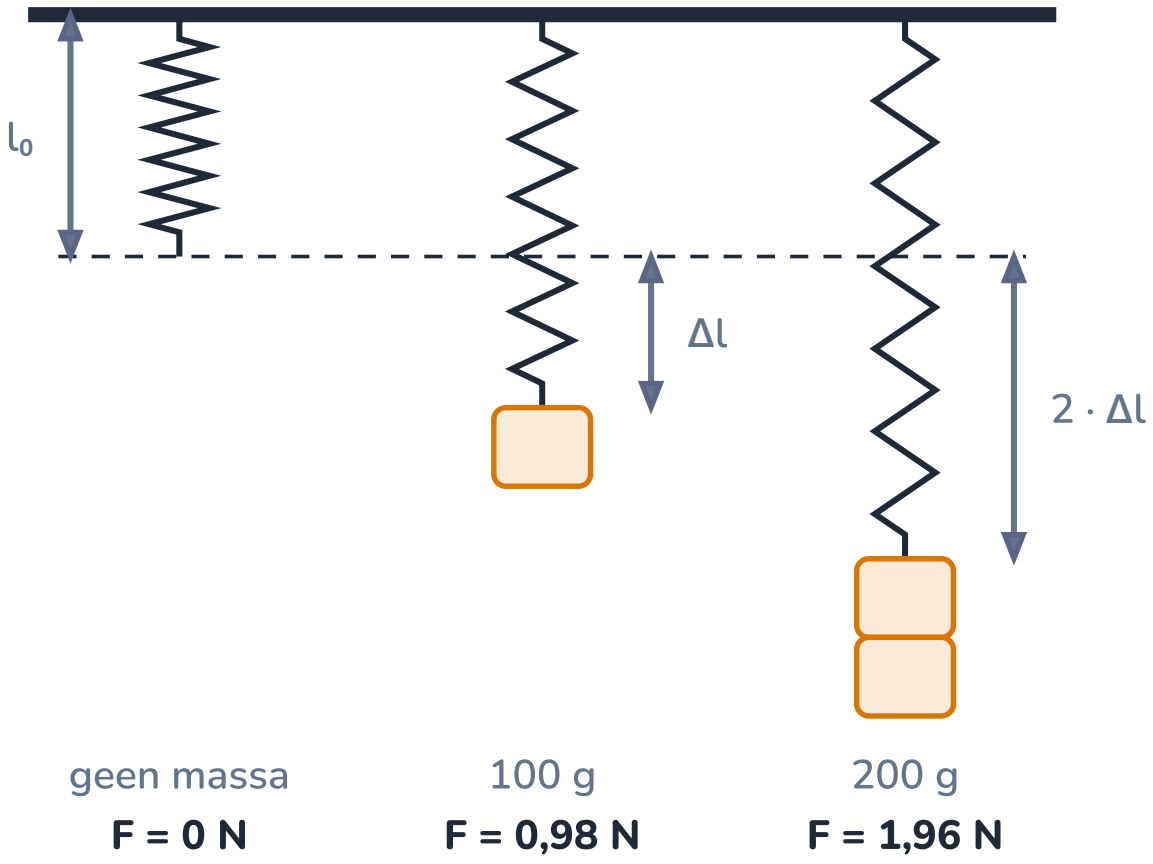
De veerconstante zegt hoe **stijf** een veer is. Een slappe veer van een balpen heeft een kleine k; de veer in de schokdemper van een auto een heel grote. De veer uit de proef heeft $k = 20\,\text{N/m}$: voor elke meter uitrekking is 20 N nodig, of 0,20 N per centimeter.

In een grafiek met de uitrekking horizontaal en de kracht verticaal is de wet van Hooke een rechte door de oorsprong. Zo lees je k af als de helling. (Je mag de assen ook omwisselen; dan is de helling $1/k$, het aantal centimeter per newton.)

Toepassingen. Een krachtmeter heeft een schaal met gelijke stappen, juist omdat de veer de wet van Hooke volgt. Ook een plank, een brug of een kasframe gedraagt zich als een heel stijve veer: de doorbuiging is evenredig met de last, zolang het materiaal elastisch blijft (hoofdstuk 10). Een elastiekje daarentegen volgt de wet van Hooke slecht: zijn grafiek is geen rechte.

Dubbel zoveel kracht, dubbel zo lang

Niet de **lengte** verdubbelt, maar de **uitrekking**. De veer uit de proef is zonder gewicht 6,0 cm lang en met 100 g 10,9 cm. Met 200 g is ze niet 21,8 cm, maar $6{,}0 + 2 \times 4{,}9 = 15{,}8\,\text{cm}$ lang. Trek altijd eerst de beginlengte af.



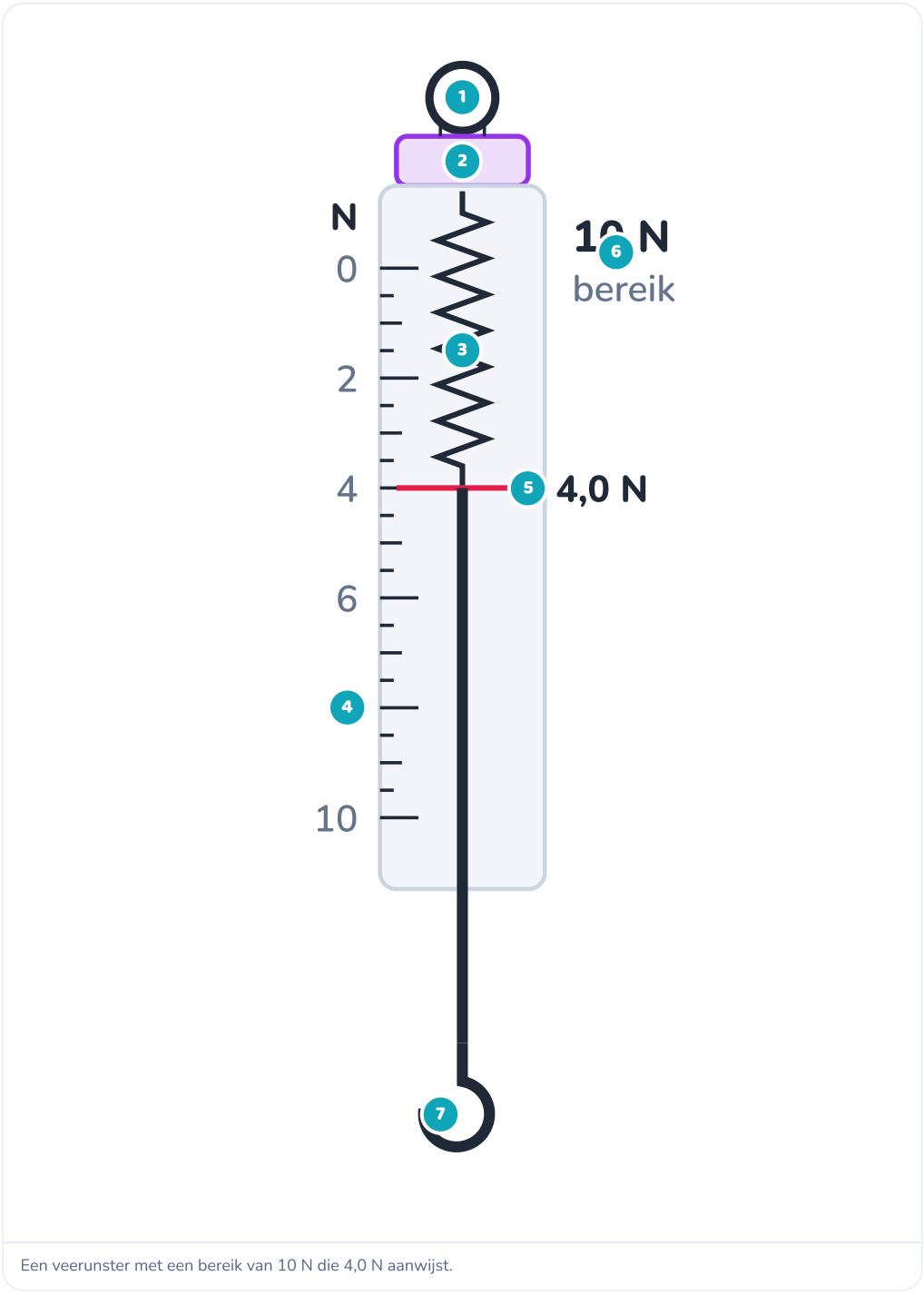
Elke 100 g extra rekt de veer evenveel verder uit. De beginlengte l_0 blijft erbij.

ONTLEED · 11.15

De veerunster van binnen

15/20

Een veerunster is niets anders dan een veer met een schaal. Omdat de veer de wet van Hooke volgt, liggen de streepjes op gelijke afstanden.



Een veerunster met een bereik van 10 N die 4,0 N aanwijst.

1 Ophangoog
Hier houd je de meter vast of hang je hem aan een statief.

2 Nulsteller
Door aan deze dop te draaien, schuift de schaal op tot de wijzer op 0 staat. Doe dat telkens in de stand waarin je meet.

3 Veer
Het hart van de meter: ze rekt evenredig uit met de kracht (wet van Hooke). Een stijvere veer geeft een groter bereik.

4 Schaal
Streepjes op gelijke afstanden, in newton. Hier: kleine streepjes per 0,5 N, getallen per 2 N.

5 Wijzer
De streep op de binnenbuis. Lees af op ooghoogte, recht ervoor.

6 Bereik
De grootste kracht die je mag meten. Meer is plastische vervorming van de veer.

7 Haak
Hier komt de last. Trek altijd langs de as van de meter, niet schuin.

UITGEWERKT VOORBEELD · 11.16

Rekenen met de veerconstante

16/20

Een veer heeft een veerconstante van 25 N/m en is zonder last 8,0 cm lang. Haar elasticiteitsgrens ligt bij 5,0 N. (a) Hoe lang is de veer als er 1,5 N aan trekt? (b) Hoeveel kracht is nodig om de veer 20,0 cm lang te maken? (c) Iemand hangt er een zak appelsienen van 2,0 kg aan. Wat gebeurt er?

GEGEVEN

- $k = 25\,\mathrm{N/m}$
- $l_0 = 8{,}0\,\mathrm{cm}$
- elasticiteitsgrens: $5{,}0\,\mathrm{N}$

GEVRAAGD

- (a) l bij $1{,}5\,\mathrm{N}$
- (b) F voor $l = 20{,}0\,\mathrm{cm}$
- (c) wat er gebeurt met 2,0 kg

OPLOSSING

1. (a) Uitrekking: $\Delta l = \dfrac{F}{k} = \dfrac{1{,}5\,\mathrm{N}}{25\,\mathrm{N/m}} = 0{,}060\,\mathrm{m} = 6{,}0\,\mathrm{cm}$. Lengte: $l = l_0 + \Delta l = 8{,}0 + 6{,}0 = 14{,}0\,\mathrm{cm}$.

2. (b) Uitrekking: $\Delta l = 20{,}0 - 8{,}0 = 12{,}0\,\mathrm{cm} = 0{,}120\,\mathrm{m}$. Kracht: $F = k \cdot \Delta l = 25 \times 0{,}120 = 3{,}0\,\mathrm{N}$. Dat is onder de 5,0 N: de wet van Hooke geldt.

3. (c) Zwaartekracht op de zak: $2{,}0 \times 9{,}81 = 19{,}6\,\mathrm{N}$, bijna vier keer de elasticiteitsgrens. De formule geldt niet meer: de veer rekt veel verder uit dan voorspeld, vervormt blijvend of breekt.

ANTWOORD

(a) 14,0 cm. (b) 3,0 N. (c) De veer wordt overbelast en is daarna onbruikbaar.

Klopt dit? Reken de eenheden mee: N gedeeld door N/m geeft m. Zet centimeter altijd eerst om naar meter als k in N/m staat. Een uitrekking van 12 cm voor 3 N past bij 25 N/m: 3 / 0,12 = 25.

UITLEG · 11.17

Wrijving: tegenwerken en vasthouden

17/20

Schuif een boek over de tafel en laat los: het stopt na enkele centimeters. Tussen het boek en de tafel werkt **wrijving**, een kracht die de beweging tegenwerkt. Ze ontstaat doordat geen enkel oppervlak echt glad is: onder een vergrootglas zijn het bergen en dalen die in elkaar haken en tegen elkaar schuren.

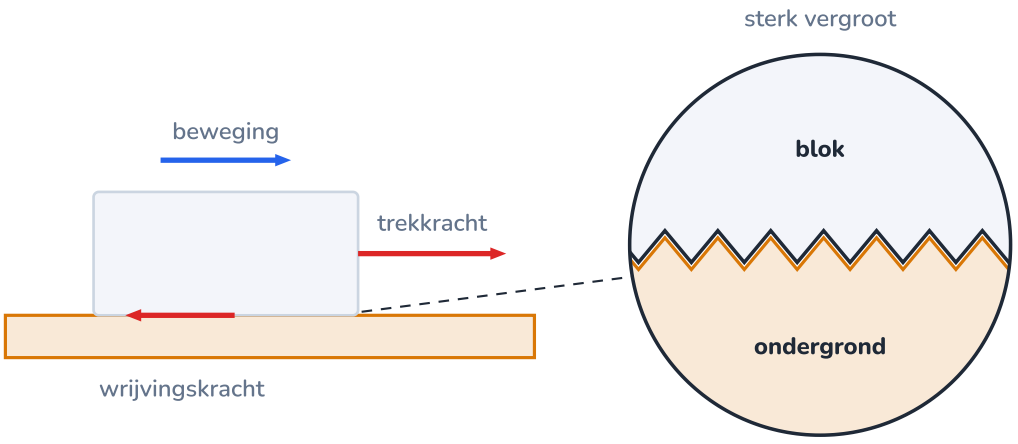
- De wrijving werkt **tegen de beweging in**, of tegen de beweging die zou ontstaan: een kist op een helling glijdt niet weg omdat de wrijving haar tegenhoudt.
- Ze is groter bij **ruwere oppervlakken** en als de oppervlakken **harder tegen elkaar** gedrukt worden (een zwaardere kist).
- Om iets in beweging te krijgen, is meestal iets meer kracht nodig dan om het in beweging te houden.
- **Rollen** geeft veel minder wrijving dan glijden: daarom zijn er wielen en kogellagers.
- **Lucht- en waterweerstand** zijn wrijving met een gas of vloeistof. Ze worden groter naarmate je sneller gaat; een gestroomlijnde vorm maakt ze kleiner.

	voorbeelden	zo maak je ze groter of kleiner
nuttig	stappen zonder uit te schuiven; remmen; de grip van een band; een schroef, een spijker of een knoop die vastzit; iets vasthouden; schrijven met een potlood; een lucifer aanstrijken	**groter**: ruwe oppervlakken, profiel in zolen en banden, zand of zout op ijs, rubber, harder tegen elkaar drukken

	voorbeelden	zo maak je ze groter of kleiner
hinderlijk	slijtage van schoenen, banden en tandwielen; machines die warm worden; energie die verloren gaat; een lade die klemt	**kleiner**: smeren met olie, vet of grafiet; kogellagers; wielen (rollen in plaats van glijden); gladde oppervlakken; stroomlijn tegen lucht- en waterweerstand

Rekenen met wrijving

In Intermediate (hoofdstuk 8) meet je hoe de wrijving afhangt van hoe hard een voorwerp op de ondergrond duwt, en reken je met een **wrijvingscoëfficiënt**. Zo bereken je bijvoorbeeld hoeveel kracht de motor van een schuivend kasdak moet leveren.



De trekkracht werkt naar rechts, de wrijving aan het grensvlak naar links. Sterk vergroot haken de oppervlakken in elkaar.



Profiel in zolen en banden: wrijving die je wil houden, ook als het nat is.

PROEF · 11.18

Wrijving meten met een krachtmeter

18/20

ONDERZOEKSVRAAG

Waarvan hangt de wrijving tussen een blok en de ondergrond af: van de ruwheid, van de grootte van het contactvlak, van hoe zwaar het blok is? En wat doen rollen?

MATERIAAL

houten blok met een haakje (500 g) · krachtmeter van 5 N · gelakt tafelblad, schuurpapier · extra massa van 500 g · vier ronde potloden



Een blok over schuurpapier trekken: de krachtmeter horizontaal, de snelheid klein en constant.

WERKWIJZE

1. Zet de krachtmeter horizontaal op nul en haak hem aan het blok.
2. Trek horizontaal, eerst heel zacht en dan harder. Noteer de grootste kracht net voor het blok vertrekt.
3. Trek het blok daarna met een kleine, **constante snelheid** verder en lees de kracht af tijdens het glijden. Bij een constante snelheid is je trekkracht even groot als de wrijving: ze zijn in evenwicht.
4. Herhaal met het blok op zijn smalle zijde, met 500 g extra erop, op schuurpapier, en op vier ronde potloden. Verander telkens maar één ding.

WAARNEMING

ondergrond	blok ligt op	extra massa	kracht bij het vertrekken (N)	kracht bij glijden (N)
gelakt tafelblad	grote zijde	geen	2,0	
gelakt tafelblad	smalle zijde	geen	2,0	
gelakt tafelblad	grote zijde	500 g	3,9	
schuurpapier	grote zijde	geen	4,0	
ronde potloden als rollen	grote zijde	geen	0,2	

VERKLARING

apier is de wrijving ruim twee keer zo op de grote of de smalle zijde meet je dezelfde kracht. Dat verrast veel mensen: het kleinere vlak drukt harder per vierkante centimeter, en dat compenseert. **Zwaarder**: met dubbel zoveel massa is de wrijving ongeveer dubbel zo groot. **Rollen**: op de potloden is er bijna geen wrijving meer. En altijd is het vertrekken zwaarder dan het doorschuiven.

Om de meetkas te verplaatsen, zet je ze dus beter op wielen of rollen dan dat je ze over de vloer schuift.

NASLAG · 11.19

Overzicht: krachten

19/20

De formules, de begrippen en de afspraken uit dit hoofdstuk op één blad.

zwaartekracht

$$F_z = m \cdot g$$

symbool	betekenis	eenheid
F_z	zwaartekracht	newton (N)
m	massa	kilogram (kg)
g	zwaarteveldsterkte (9,81 op aarde, 1,62 op de maan)	N/kg

wet van Hooke (tot de elasticiteitsgrens)

$$F = k \cdot \Delta l$$

symbool	betekenis	eenheid
F	kracht op de veer	newton (N)
k	veerconstante	N/m
Δl	uitrekking = lengte − beginlengte	meter (m)

	massa	zwaartekracht	gewicht
wat is het?	hoeveel stof er in een voorwerp zit	de kracht waarmee de aarde (of de maan) aan het voorwerp trekt	de kracht waarmee het voorwerp op zijn steun duwt of aan zijn ophanging trekt
symbool, eenheid	m, kilogram (kg)	F_z, newton (N)	G, newton (N)
aangrijpingspunt	(geen kracht)	het zwaartepunt van het voorwerp	waar het voorwerp steunt of hangt
op de maan	hetzelfde	ongeveer 6 keer kleiner	ongeveer 6 keer kleiner
meten met	een balans	een krachtmeter (in rust even groot)	

plaats	g (N/kg)	zwaartekracht op 1,0 kg
aarde, in België	9,81	9,81 N
aarde, aan de evenaar en aan de polen	9,78 en 9,83	9,78 N en 9,83 N
maan	1,62	1,62 N
Mars	3,71	3,71 N
Jupiter (bovenkant van de wolken)	24,8	24,8 N

een krachtpijl	toont
beginpunt	het aangrijpingspunt
werklijn en punt	de richting en de zin
lengte	de grootte, op schaal (bv. 1 cm ≙ 10 N)
label	naam en waarde met eenheid: $F_z = 39\,\mathrm{N}$

een kracht kan	voorbeeld
vervormen	een veer rekt uit, een plank buigt door
versnellen	een sprinter zet zich af
afremmen	de remmen van een fiets
van richting doen veranderen	een bal opzij koppen
doen draaien	een moersleutel

	voorbeelden	zo maak je ze groter of kleiner
nuttig	stappen zonder uit te schuiven; remmen; de grip van een band; een schroef, een spijker of een knoop die vastzit; iets vasthouden; schrijven met een potlood; een lucifer aanstrijken	**groter**: ruwe oppervlakken, profiel in zolen en banden, zand of zout op ijs, rubber, harder tegen elkaar drukken
hinderlijk	slijtage van schoenen, banden en tandwielen; machines die warm worden; energie die verloren gaat; een lade die klemt	**kleiner**: smeren met olie, vet of grafiet; kogellagers; wielen (rollen in plaats van glijden); gladde oppervlakken; stroomlijn tegen lucht- en waterweerstand

HET GEHEEL · 11.20

Waar krachten naartoe leiden

20/20

Met dit hoofdstuk begint de leerlijn **krachten, beweging en constructies**. Bijna alles wat volgt, bouwt erop verder: hefbomen doen draaien met een kracht, constructies dragen krachten, en in Intermediate verbinden de wetten van Newton kracht en beweging. De leerlijn **wiskundig modelleren** zit er ook in: zwaartekracht en veerkracht zijn allebei recht evenredige verbanden, met g en k als evenredigheidsconstanten.

F3 Meten: grootheden en eenheden
Massa meten met een balans, aflezen zonder parallax, en het verschil tussen massa en gewicht.

F4 Tabellen, grafieken en verbanden
Recht evenredig verband: de constante is hier g (zwaartekracht) of k (veer).

F7 Massa, volume en dichtheid
De massa's van water en potgrond in de meetkas, die je hier omrekent naar krachten.

F10 Materialen en hun eigenschappen
Elastisch en plastisch vervormen, stijfheid: een veer en een plank gedragen zich op dezelfde manier.

F12 Hefbomen en mechanismen
Een kracht die doet draaien: met een hefboom til je met een kleine kracht een grote last.

F13 Constructies: sterk en stabiel
Zwaartepunt en stabiliteit, en hoe een frame krachten draagt.

F14 Beweging en snelheid
Hoe je een beweging beschrijft, voor je leert wat krachten ermee doen.

F15 Energie: vormen en omzettingen
Een uitgerekte veer en een opgetild voorwerp bevatten energie.

I6 Goniometrie en vectoren
Krachten als vectoren optellen en ontbinden, ook op een helling.

I8 De wetten van Newton
Hoe krachten een beweging veranderen: $F = m \cdot a$, en rekenen met een wrijvingscoëfficiënt.

I10 Moment en evenwicht
Krachten die doen draaien: moment en evenwicht van een balk.

E11 Trillingen en resonantie
Een massa aan een veer trilt: de veerconstante bepaalt hoe snel.

E12 **Sterkteleer**

De wet van Hooke voor materialen: spanning, rek en de elasticiteitsmodulus.

Habitat

Een volle plantenbak van de meetkas heeft een massa van 4,0 kg: een zwaartekracht van 39 N. De twaalf bakken duwen met 471 N op het tafelblad, en elke steun van de tafel draagt ongeveer 277 N. In opdracht 11.13 onderzoek je met de wet van Hooke of het tafelblad niet te ver doorbuigt; noteer je besluit in je portfolio. In hoofdstuk 13 ontwerp je het frame dat al die krachten naar de grond brengt.

SAMENVATTING

In het kort

- Een kracht is een duw of een trek van het ene voorwerp op het andere: met contact (duwen, trekken, veer, wrijving) of op afstand (zwaartekracht, magnetisme, elektrische kracht).
- Een kracht kan vervormen, versnellen, afremmen, van richting doen veranderen of doen draaien.
- Je tekent een kracht als een pijl: het beginpunt is het aangrijpingspunt, de pijl toont richting en zin, de lengte is de grootte op schaal.
- Krachten meet je in newton (N) met een krachtmeter: kies het bereik, zet op nul in de meetstand, trek langs de as, lees af op ooghoogte.
- De zwaartekracht is recht evenredig met de massa: $F_z = m \cdot g$, met $g = 9{,}81\,\mathrm{N/kg}$ op aarde en $1{,}62\,\mathrm{N/kg}$ op de maan.
- Massa (kg) is overal dezelfde; zwaartekracht en gewicht (N) hangen af van waar je bent. Gewicht is de kracht op de steun of de ophanging.
- Wet van Hooke: de uitrekking van een veer is recht evenredig met de kracht, $F = k \cdot \Delta l$, tot aan de elasticiteitsgrens.
- Wrijving werkt tegen de beweging in; ze is groter bij ruwe oppervlakken en als ze harder tegen elkaar drukken, en veel kleiner bij rollen. Soms nuttig, soms hinderlijk.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

kracht
Een duw of een trek van het ene voorwerp op het andere. Een kracht kan vervormen, versnellen, afremmen, van richting doen veranderen of doen draaien.

newton
De eenheid van kracht, symbool N. De zwaartekracht op een voorwerp van ongeveer 100 g is 1 N.

aangrijpingspunt
Het punt waar een kracht op een voorwerp inwerkt; daar begint de krachtpijl.

krachtmeter
Toestel dat een kracht meet met een veer die uitrekt: ook veerunster of dynamometer genoemd.

zwaartekracht
De kracht waarmee de aarde (of een ander hemellichaam) aan een voorwerp trekt: $F_z = m \cdot g$, gericht naar het middelpunt.

gewicht
De kracht waarmee een voorwerp op zijn steun duwt of aan zijn ophanging trekt. In rust even groot als de zwaartekracht.

zwaarteveldsterkte
Het getal g: het aantal newton zwaartekracht per kilogram: 9,81 N/kg in België, 1,62 N/kg op de maan.

wet van Hooke
De uitrekking van een veer is recht evenredig met de kracht erop: $F = k \cdot \Delta l$, zolang de veer elastisch blijft.

veerconstante
Het getal k in de wet van Hooke: hoeveel newton er nodig is per meter (of centimeter) uitrekking. Een stijve veer heeft een grote k.

elasticiteitsgrens
De grootste kracht waarbij een veer of materiaal nog helemaal terugveert; daarboven vervormt het blijvend.

wrijving
Kracht tussen twee oppervlakken die over elkaar schuiven (of willen schuiven), tegen de beweging in.

HANDBOEK · HOOFDSTUK 12

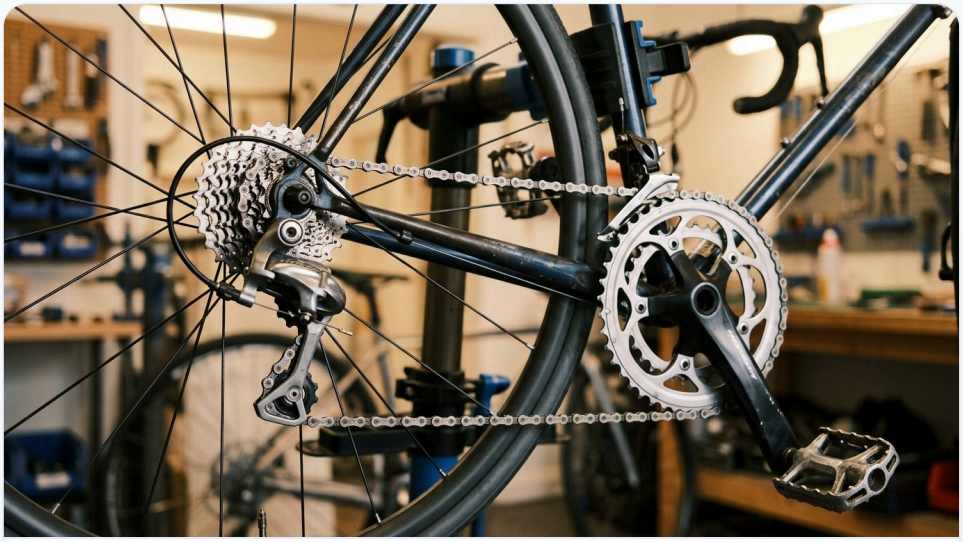
Hefbomen en mechanismen

Hoe een plank, een touw of een tandwiel een kleine kracht groot maakt, en wat je daarvoor inlevert

Met een koevoet til je een steen op die je met je handen niet van zijn plaats krijgt. Met een takel hijs je een motor uit een auto, met de versnellingen van je fiets rijd je een helling op. Al die toestellen zijn **mechanismen**: ze veranderen de grootte, de richting of de snelheid van een beweging. In dit hoofdstuk leer je hoe een **hefboom** werkt en reken je met de **hefboomwet**. Je herkent drie soorten hefbomen, in je gereedschapskist en in je eigen lichaam. Daarna volgen katrollen, tandwielen, riemen en kettingen, en de fiets, die ze allemaal combineert. Voor de meetkas bereken je hoe je het dakraam opent.

7× uitleg · 7× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

K Krachten, beweging en constructies · W Wiskundig modelleren · D Ontwerpen en maken



Trapper, kettingblad, ketting, tandwielen, derailleur: een fiets is een verzameling mechanismen.

Na dit hoofdstuk

- Je kan bij een hefboom het draaipunt, de kracht, de last en de armen aanduiden.
- Je kan met de hefboomwet $F_1 \cdot a_1 = F_2 \cdot a_2$ een kracht of een arm berekenen.
- Je kan uitleggen dat je met een hefboom kracht wint ten koste van afstand, of afstand ten koste van kracht.
- Je kan hefbomen van de eerste, tweede en derde soort herkennen in gereedschap en in het menselijk lichaam.
- Je kan berekenen hoeveel kracht nodig is met een vaste katrol, een losse katrol en een takel.
- Je kan bij tandwielen, riemen en kettingen de draairichting bepalen en de overbrengingsverhouding berekenen.
- Je kan de mechanismen van een fiets benoemen en uitrekenen hoe ver je komt met één trapomwenteling.
- Je kan berekenen hoeveel kracht nodig is om het dakraam van de meetkas te openen, en waar je het best duwt.

VERHAAL · 12.1

De sjadoef en Archimedes

1/19

Langs de Nijl staan boeren al duizenden jaren voor hetzelfde probleem: het water zit in de rivier of in een put, en de gewassen staan hoger. Een volle emmer optillen, honderden keren per dag, is zwaar werk. De

oplossing heet een **sjadoef**: een lange paal die op een paal of een muurtje kan kantelen. Aan het lange uiteinde hangt een emmer, aan het korte uiteinde een zware steen of een klomp gedroogde klei. De boer trekt de lege emmer omlaag in het water, en daarna tilt het tegengewicht de volle emmer bijna vanzelf omhoog.

Op een cilinderzegel uit Mesopotamië van ongeveer 2200 v.Chr. staat al een sjadoef afgebeeld; in Egyptische graven uit de tijd van de farao's zie je boeren die er het water mee over hun akkers verdelen. In delen van Egypte en Zuid-Azië wordt hij nog altijd gebruikt.

De sjadoef werkte al lang voor iemand kon uitleggen waarom. Dat deed de Griekse wiskundige **Archimedes** (ongeveer 287-212 v.Chr.) uit Syracuse: hij beschreef de regel van de hefboom in een wiskundig bewijs. Volgens de latere schrijver Pappus zou hij gezegd hebben: 'Geef me een plaats om te staan, en ik beweeg de aarde.' Met een lang genoeg hefboom kan een kleine kracht elke last verplaatsen. Maar zoals je in dit hoofdstuk ontdekt, betaal je daar een prijs voor.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Techniek komt vaak vóór de wetenschap die ze verklaart. Boeren bouwden sjadoefs door te proberen en te verbeteren (de ontwerpcyclus, hoofdstuk 30). Archimedes maakte er een regel van waarmee je vooraf kan **berekenen** hoe groot het tegengewicht moet zijn. In opdracht 12.13 doe je dat zelf.



Een sjadoef: het tegengewicht aan het korte uiteinde doet het meeste werk.

UITLEG · 12.2

De hefboom

2/19

Een **hefboom** is een stijf voorwerp (een plank, een staaf, een bot) dat kan draaien rond een vast punt: het **draaipunt**. Op de hefboom werken twee krachten die elk de andere kant op willen draaien:

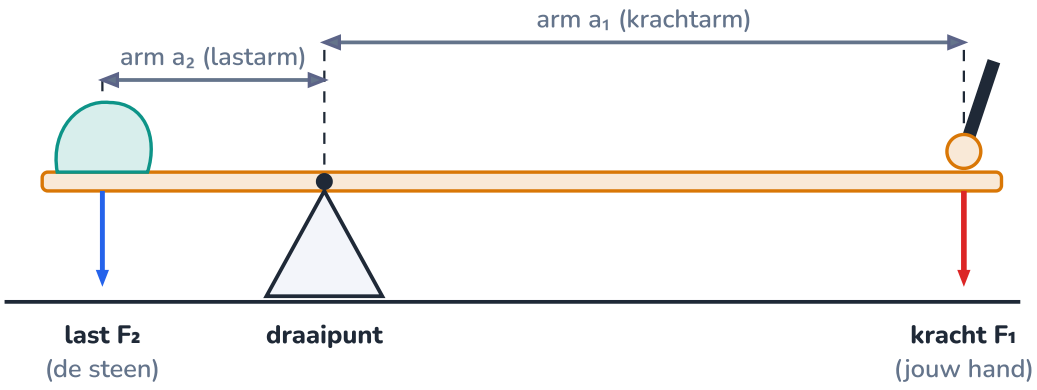
- de **kracht** F_1: wat jij (of een spier, een motor) levert;
- de **last** F_2: wat je wil verplaatsen of tegenhouden, zoals het gewicht van een steen.

De afstand van het draaipunt tot de plaats waar een kracht aangrijpt, heet de **arm**: de **krachtarm** a_1 en de **lastarm** a_2. In dit hoofdstuk staan de krachten altijd loodrecht op de hefboom. Staat een kracht schuin, dan meet je de arm anders; dat leer je in hoofdstuk I10.

Probeer het met een liniaal op een potlood. Leg een gum op het ene uiteinde en druk met één vinger op het andere. Schuif het potlood (het draaipunt) dichter bij de gum: je vinger moet minder hard duwen. Hoe langer de krachtarm en hoe korter de lastarm, hoe kleiner de kracht die je nodig hebt.

Eerst het draaipunt zoeken

Bij elk mechanisme stel je eerst de vraag: rond welk punt draait het? Pas dan zie je welke arm bij welke kracht hoort. Bij een schaar is dat de schroef in het midden, bij een kruiwagen de as van het wiel, bij je onderarm de elleboog.



De hand duwt ver van het draaipunt (lange krachtarm), de steen ligt er dichtbij (korte lastarm). Daardoor is een kleine kracht genoeg.

PROEF · 12.3

Wanneer is een hefboom in evenwicht?

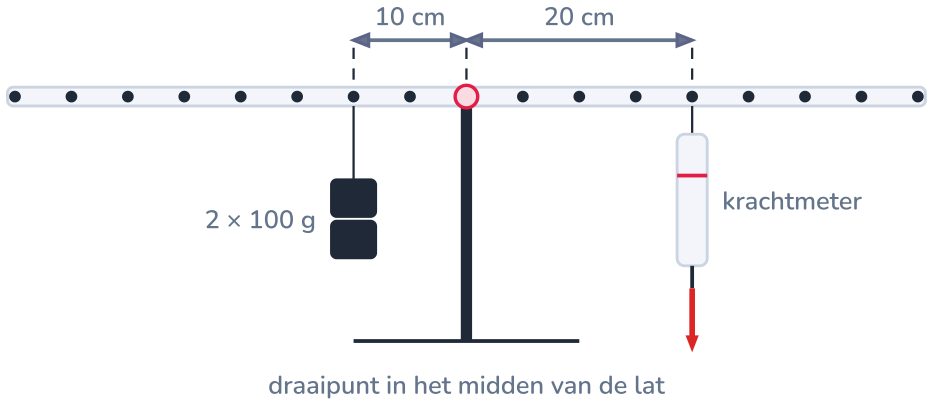
3/19

ONDERZOEKSVRAAG

Welke regel verbindt de krachten en de armen als een hefboom in evenwicht is?

MATERIAAL

- hefboomlat met gaatjes om de 5 cm, in het midden op een statief
- haakgewichten van 100 g
- krachtmeter van 5 N
- meetlat



Twee gewichtjes op 10 cm links, de krachtmeter op 20 cm rechts: hij wijst ongeveer de helft van hun zwaartekracht aan.

WERKWIJZE

1. Controleer dat de lat zonder gewichten horizontaal hangt.
2. Hang links een aantal gewichtjes op een gekozen afstand a_1 van het draaipunt. De kracht F_1 is hun zwaartekracht: 0,98 N per 100 g.
3. Haak rechts de krachtmeter in een gaatje op afstand a_2 en trek verticaal omlaag tot de lat horizontaal hangt. Lees F_2 af.
4. Herhaal met andere gewichten en andere afstanden. Verander telkens maar één ding.
5. Bereken voor elke meting de producten $F_1 \cdot a_1$ en $F_2 \cdot a_2$.

WAARNEMING

links	F_1 (N)	a_1 (cm)	F_2 (N)	a_2 (cm)	$F_1 \cdot a_1$ (N·cm)	$F_2 \cdot a_2$ (N·cm)
2 × 100 g	1,96	10	1,00	20	19,6	20,0
2 × 100 g	1,96	30	2,95	20	58,8	59,0
3 × 100 g	2,94	20	1,95	30	58,8	58,5
1 × 100 g	0,98	40	3,90	10	39,2	39,0
4 × 100 g	3,92	5	0,65	30	19,6	19,5

VERKLARING

De twee producten zijn telkens (bijna) gelijk. De verschillen zijn afleesfouten: de krachtmeter leest af op 0,05 N. Wordt de ene arm twee keer zo lang, dan is maar half zoveel kracht nodig. Kracht en arm zijn **omgekeerd evenredig**: hun product blijft gelijk.

De hefboomwet

Wat de proef toont, schreef Archimedes als eerste op:

HEFBOOMWET

$$F_1 \cdot a_1 = F_2 \cdot a_2$$

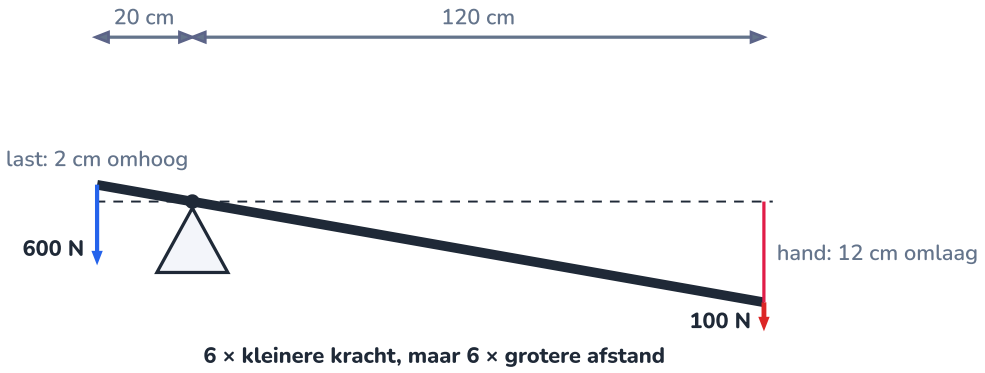
F_1 = kracht, a_1 = krachtarm; F_2 = last, a_2 = lastarm. Krachten in newton (N), armen in meter of in centimeter (maar aan beide kanten dezelfde eenheid).

Met de wet reken je één onbekende uit als je de drie andere kent. Voor de kracht: $F_1 = \dfrac{F_2 \cdot a_2}{a_1}$. Is de krachtarm 6 keer zo lang als de lastarm, dan is 6 keer minder kracht nodig.

Maar er is een prijs. Draait de hefboom, dan maken beide uiteinden een boog. Het uiteinde met de lange arm legt een grotere afstand af: 6 keer zo lange arm, 6 keer zo ver. Til je met een koevoet een steen 2 cm op, dan zakt je hand 12 cm. Dat is de **gulden regel van de mechanica**: wat je wint aan kracht, verlies je aan afstand. Het geldt voor elk mechanisme in dit hoofdstuk: katrollen, tandwielen, fietsen.

Een hefboom geeft je gratis kracht

Een hefboom maakt de kracht kleiner, niet het werk. Kracht maal afstand is aan beide kanten hetzelfde: 100 N over 12 cm aan je hand, 600 N over 2 cm aan de steen. Je spaart dus geen inspanning uit, je verdeelt ze anders: minder hard, maar langer. (In hoofdstuk I9 heet dat product de *arbeid*.) Een machine die meer levert dan je erin stopt, bestaat niet.



De lastarm is 20 cm, de krachtarm 120 cm: zes keer minder kracht, maar de hand beweegt zes keer verder dan de last.

UITGEWERKT VOORBEELD · 12.5

Een steen optillen met een koevoet

5/19

Een tuinier wil een steen van 60 kg optillen om er een plantenbak onder te schuiven. Ze legt een koevoet over een blokje hout: het blokje (het draaipunt) ligt 15 cm van de steen, haar handen duwen 1,20 m van het blokje. (a) Hoeveel kracht moet ze uitoefenen? (b) Hoe ver moeten haar handen zakken om de steen 2,0 cm op te tillen?

GEGEVEN

- last: $m = 60\,\text{kg}$, dus $F_2 = 60 \times 9{,}81 = 589\,\text{N}$
- $a_2 = 0{,}15\,\text{m}$
- $a_1 = 1{,}20\,\text{m}$

GEVRAAGD

- F_1
- de afstand die de handen afleggen

OPLOSSING

1 Hefboomwet omgevormd naar de kracht: $F_1 = \dfrac{F_2 \cdot a_2}{a_1}$.

2 Invullen: $F_1 = \dfrac{589\,\text{N} \times 0{,}15\,\text{m}}{1{,}20\,\text{m}} = 73{,}6\,\text{N} \approx 74\,\text{N}$.

3 De krachtarm is $1{,}20/0{,}15 = 8$ keer zo lang als de lastarm. Dus is de kracht 8 keer kleiner, en moeten de handen 8 keer verder bewegen: $8 \times 2{,}0\,\text{cm} = 16\,\text{cm}$.

ANTWOORD

(a) Ongeveer 74 N: de zwaartekracht op zo'n 7,5 kg. (b) De handen zakken 16 cm.

Klopt dit? Kracht maal afstand: 589 N × 0,020 m ≈ 11,8 en 73,6 N × 0,16 m ≈ 11,8. Aan beide kanten hetzelfde: de gulden regel klopt. Een koevoet over een blokje is een hefboom van de eerste soort: het draaipunt ligt tussen de last en de kracht.

UITGEWERKT VOORBEELD · 12.6

De wip in evenwicht

6/19

Op een wip zit Noor (30 kg) op 1,50 m van het draaipunt. Waar moet haar broer Lars (45 kg) aan de andere kant gaan zitten zodat de wip in evenwicht is?

GEGEVEN

- $F_1 = 30 \times 9{,}81 = 294\,\text{N}$, $a_1 = 1{,}50\,\text{m}$
- $F_2 = 45 \times 9{,}81 = 441\,\text{N}$

GEVRAAGD

- a_2

OPLOSSING

1 Hefboomwet omgevormd naar de onbekende arm: $a_2 = \dfrac{F_1 \cdot a_1}{F_2}$.

2 Invullen: $a_2 = \dfrac{294\,\text{N} \times 1{,}50\,\text{m}}{441\,\text{N}} = 1{,}00\,\text{m}$.

ANTWOORD

Lars moet op 1,00 m van het draaipunt zitten: dichter bij het midden, omdat hij zwaarder is.

Klopt dit? Snelle controle zonder newton: $30 \times 1{,}50 = 45$ en $45 \times 1{,}00 = 45$. Omdat aan beide kanten met dezelfde g vermenigvuldigd wordt, mag je bij een wip ook met de massa's rekenen.

UITLEG · 12.7

Drie soorten hefbomen

7/19

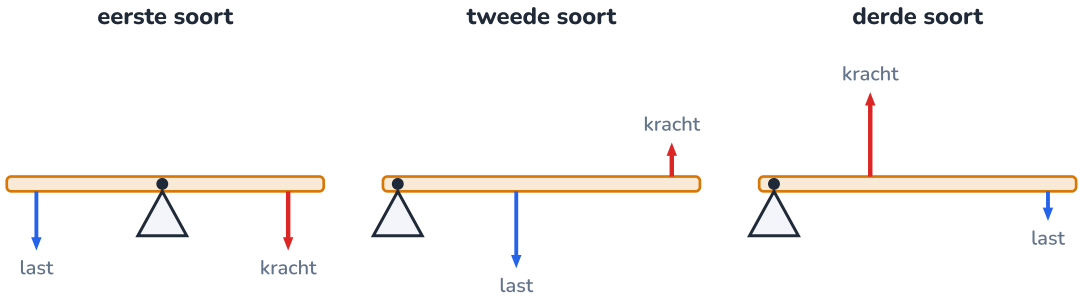
Hefbomen worden ingedeeld volgens wat er **in het midden** ligt: het draaipunt, de last of de kracht.

soort	wat staat in het midden?	voorbeelden	wat win je?
eerste soort	het draaipunt	wip, schaar, combinatietang, nijptang, koevoet over een blokje, balans	kracht als de krachtarm langer is, afstand als hij korter is; altijd ook een omgekeerde beweging
tweede soort	de last	kruiwagen, notenkraker, flesopener	altijd kracht: de krachtarm is altijd de langste

soort	wat staat in het midden?	voorbeelden	wat win je?
derde soort	de kracht	pincet, bezem, hengel, kolentang, je onderarm	altijd afstand en snelheid: de last beweegt verder en sneller dan je hand

Een hefboom van de **tweede soort** wint altijd kracht: de last ligt dichter bij het draaipunt dan je hand. Daarom kan je met een kruiwagen 70 kg potgrond verplaatsen. Een hefboom van de **derde soort** kost altijd kracht, maar wint afstand en snelheid: met een kleine beweging van je hand zwaai je het uiteinde van een hengel ver en snel. Een pincet is ook zo'n hefboom: je wil geen grote kracht, maar een fijne, gecontroleerde beweging.

> ⚠ **Hoe deel je in?**
>
> Zoek eerst het draaipunt, dan de last (wat wordt er verplaatst, geknipt, gekraakt?), dan de kracht (waar duw je?). Kijk dan wat in het midden ligt. Bij een schaar is de schroef het draaipunt en ligt het papier aan de ene kant, je vingers aan de andere: eerste soort. Bij een notenkraker is het scharnier het draaipunt aan het uiteinde, ligt de noot in het midden en knijpen je handen aan de andere kant: tweede soort.



De lengte van de pijlen volgt de hefboomwet: bij de tweede soort is de kracht kleiner dan de last, bij de derde soort groter.

UITLEG · 12.8

Hefbomen in je lichaam

8/19

Je skelet zit vol hefbomen. De botten zijn de staven, de gewrichten de draaipunten, en de spieren leveren de kracht. Een spier kan alleen **trekken**, nooit duwen: daarom zitten er vaak twee spieren tegenover elkaar (de biceps buigt je arm, de triceps strekt hem).

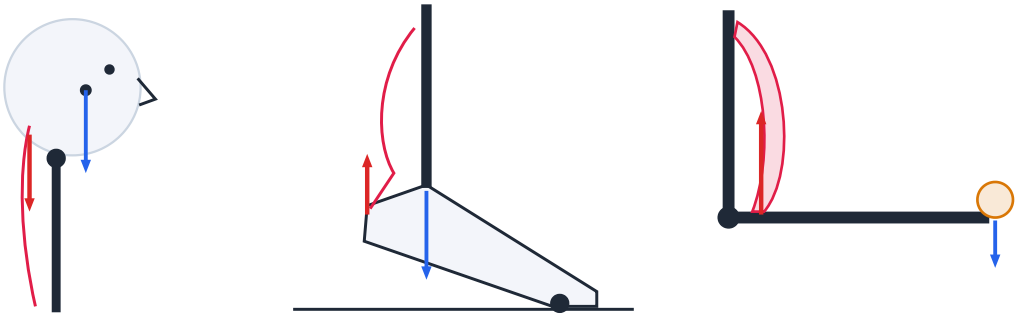
beweging	draaipunt	kracht	last	soort
hoofd knikken	bovenste halswervel	nekspieren achteraan	gewicht van het hoofd, vooraan	eerste
op je tenen staan	de bal van je voet	kuitspier via de achillespees aan de hiel	je lichaam, via het scheenbeen in de enkel	tweede
iets in je hand optillen	de elleboog	biceps, enkele cm voor de elleboog	het voorwerp in je hand	derde

Opvallend: de meeste hefbomen in je lichaam zijn van de **derde soort**. De spier hecht dicht bij het gewricht aan en moet dus veel harder trekken dan de last die je hand draagt. Wat levert dat op? Snelheid en bereik. Als je biceps 1 cm korter wordt, beweegt je hand ongeveer 8 cm. Daardoor kan je snel gooien, slaan en grijpen met spieren die maar een paar centimeter kunnen samentrekken.

Je kaak

Ook je onderkaak is een hefboom: het kaakgewricht vlak voor je oor is het draaipunt, de kauwspieren trekken iets verder naar voren. Een harde noot kraak je met je kiezen, niet met je voortanden: de kiezen liggen dichter bij de spieren en het draaipunt, dus met dezelfde spierkracht bijt je daar harder.

zwarte stip: draaipunt · rood: spierkracht · blauw: last (niet op schaal)



hoofd knikken
eerste soort

op je tenen staan
tweede soort

een gewicht in je hand
derde soort

Hoofd knikken (eerste soort), op je tenen staan (tweede soort) en een gewicht in je hand houden (derde soort).

UITGEWERKT VOORBEELD · 12.9

Waarom je biceps zo sterk moet zijn

9/19

Je houdt je onderarm horizontaal en draagt een halter van 5,0 kg in je hand. De biceps hecht aan 4,0 cm van de elleboog, de halter hangt op 33 cm van de elleboog. Hoe hard moet je biceps trekken? (Het gewicht van je onderarm zelf laten we weg.)

GEGEVEN

- last: $F_2 = 5{,}0 \times 9{,}81 = 49{,}1\,\text{N}$, $a_2 = 33\,\text{cm}$
- $a_1 = 4{,}0\,\text{cm}$

GEVRAAGD

- de spierkracht F_1

OPLOSSING

1. Draaipunt: de elleboog. Kracht: de biceps, dicht bij de elleboog. Last: de halter, ver weg. Derde soort.
2. $F_1 = \dfrac{F_2 \cdot a_2}{a_1} = \dfrac{49{,}1\,\text{N} \times 33\,\text{cm}}{4{,}0\,\text{cm}} = 405\,\text{N}.$
3. Je mag de armen in centimeter laten staan: ze staan boven en onder de breukstreep, de eenheid valt weg.

ANTWOORD

De biceps trekt met ongeveer 400 N: ruim acht keer de zwaartekracht op de halter.

Klopt dit? 405 N is de zwaartekracht op ongeveer 41 kg. Dat klinkt veel, maar spieren kunnen zulke krachten leveren. En de onderarm weegt zelf ook iets: in werkelijkheid moet de biceps nog wat harder trekken (opdracht 12.11).

UITLEG · 12.10

Katrollen en takels

10/19

Een **katrol** is een wiel met een groef waarover een touw loopt. We verwaarlozen de wrijving en de massa van de katrollen en het touw.

- Een **vaste katrol** hangt vast aan het plafond. Ze verandert alleen de **richting** van de kracht: je trekt omlaag om iets omhoog te hijsen, wat makkelijker is, want je kan je eigen gewicht gebruiken. De kracht blijft even groot als de last.
- Een **losse katrol** hangt in het touw en beweegt mee met de last. Nu dragen **twee touwdelen** de last, elk de helft. Je trekt met de helft van de kracht, maar je moet twee keer zoveel touw binnenhalen: tilt de last 1 m, dan worden beide touwdelen 1 m korter.
- Een **takel** combineert vaste en losse katrollen. Tel het aantal touwdelen n dat het onderste katrolblok draagt.

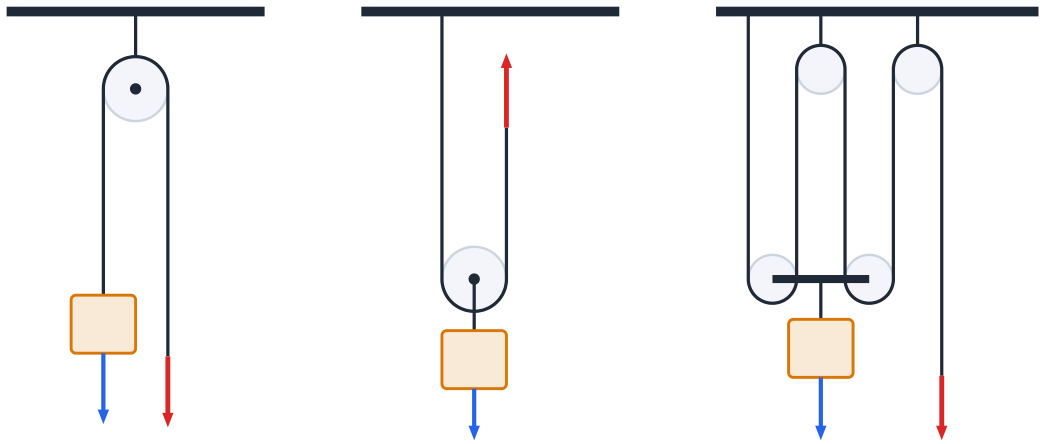
TAKEL MET N DRAGENDE TOUWDELEN

$$F = \frac{F_z}{n} \qquad s_{\text{touw}} = n \cdot h$$

F = trekkracht, F_z = zwaartekracht op de last, n = aantal touwdelen aan de losse katrollen, h = hoogte waarover de last stijgt, s_{touw} = hoeveel touw je binnenhaalt.

⚠ Tellen, niet raden

Tel alleen de touwdelen die de losse katrollen (en dus de last) dragen. Het stuk touw dat van de bovenste vaste katrol naar je hand loopt, telt niet mee als het naar beneden loopt: het verandert alleen de richting. Trek je aan een touw dat omhoog loopt vanaf de losse katrol, dan telt het wel.



Links draagt één touwdeel de last, in het midden twee, rechts vier. Rood is telkens de trekkracht, blauw de last.



Een kettingtakel: een paar kilo trekkracht aan de handketting tilt een motorblok.

UITGEWERKT VOORBEELD · 12.11

Een motor uittakelen

11/19

In een garage hangt een takel met vier dragende touwdelen. Een mecanicien hijst er een motor van 150 kg mee 0,50 m omhoog. (a) Met welke kracht moet ze trekken? (b) Hoeveel touw haalt ze binnen? (c) Het onderste katrolblok heeft zelf een massa van 2,0 kg. Hoeveel kracht is er dan echt nodig?

GEGEVEN

- $m = 150\,\text{kg}$, $F_z = 150 \times 9{,}81 = 1472\,\text{N}$
- $n = 4$
- $h = 0{,}50\,\text{m}$
- onderste katrolblok: $2{,}0\,\text{kg}$

GEVRAAGD

- F
- s_{touw}
- F met het katrolblok

OPLOSSING

1 (a) $F = \dfrac{F_z}{n} = \dfrac{1472\,\text{N}}{4} = 368\,\text{N}$.

2 (b) $s_{\text{touw}} = n \cdot h = 4 \times 0{,}50\,\text{m} = 2{,}0\,\text{m}$.

3 (c) De touwdelen dragen ook het katrolblok: $(150 + 2{,}0) \times 9{,}81 = 1491\,\text{N}$, gedeeld door 4: $373\,\text{N}$.

ANTWOORD

(a) 368 N. (b) 2,0 m touw. (c) 373 N, en door de wrijving in de katrollen nog wat meer.

Klopt dit? Kracht maal afstand: 368 N × 2,0 m = 736 en 1472 N × 0,50 m = 736. Dezelfde gulden regel als bij de hefboom. Een echte takel heeft wrijving; daarom meet je in opdracht 12.14 dat je iets harder moet trekken dan de formule zegt.

UITLEG · 12.12

Tandwielen: draaien doorgeven

12/19

Een **tandwiel** geeft een draaiende beweging door aan een ander tandwiel. De tanden grijpen in elkaar, dus aan de rand bewegen beide wielen even snel: per seconde passeren even veel tanden. Een klein wiel met 12 tanden moet daarom drie keer rondgaan om een groot wiel met 36 tanden één keer rond te krijgen.

- **Draairichting**: twee tandwielen die in elkaar grijpen, draaien **tegengesteld**. Zet je er een **tussenwiel** tussen, dan draaien het eerste en het laatste wiel in dezelfde zin. Het tussenwiel verandert de snelheid van het laatste wiel niet.
- **Snelheid**: het aantal omwentelingen per minuut (n) is omgekeerd evenredig met het aantal tanden (z).

OVERBRENGINGSVERHOUDING

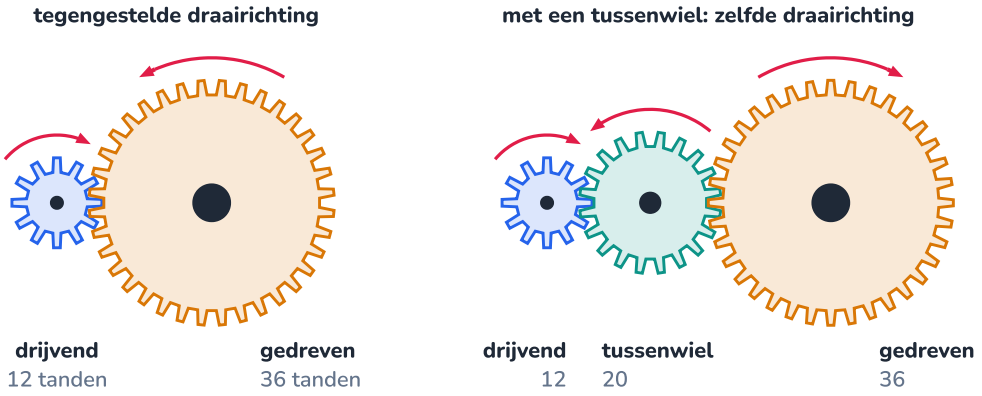
$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

1 = het drijvende wiel (daar zit de motor of je trapper), 2 = het gedreven wiel. z = aantal tanden, n = omwentelingen per minuut. $i > 1$: het gedreven wiel draait trager.

Wat je wint aan snelheid, verlies je aan kracht, en omgekeerd: de gulden regel weer. Drijft een klein tandwiel een groot aan ($i > 1$, een **vertraging**), dan draait het grote trager, maar het kan harder duwen. Zo krijgt een snel draaiend motortje genoeg kracht om een pomp of een dakraam te bewegen. Drijft een groot tandwiel een klein aan ($i < 1$), dan gaat het sneller, maar met minder kracht: zo werkt een handmixer of de versnelling van een fiets.

Het wormwiel

Een **worm** is een schroef die in een tandwiel grijpt. Bij elke omwenteling van de worm schuift het tandwiel één tand op: een wormwiel met 40 tanden geeft dus een overbrenging van 40 in één stap. Veel wormoverbrengingen werken bovendien maar in één richting: de worm kan het tandwiel draaien, maar het tandwiel kan de worm niet terugdraaien. Zo'n **zelfremmende** overbrenging houdt het schuifpaneel van de klimaatmodule dicht zonder dat de motor stroom verbruikt (hoofdstuk I8).



Links draait het grote wiel tegengesteld en drie keer trager. Rechts keert het tussenwiel de draairichting om; het grote wiel draait nog altijd drie keer trager.



Een uurwerk: tandwielen die de snelle beweging van een veer vertragen tot die van de wijzers.

UITGEWERKT VOORBEELD · 12.13

Hoe snel draait het grote tandwiel?

13/19

Een motortje draait 90 omwentelingen per minuut (omw/min). Op zijn as zit een tandwiel met 12 tanden, dat een tandwiel met 36 tanden aandrijft. (a) Bereken de overbrengingsverhouding. (b) Hoe snel draait het grote tandwiel, en in welke zin, als de motor met de klok mee draait? (c) Je zet er een tussenwiel met 20 tanden tussen. Wat verandert er?

GEGEVEN

- $z_1 = 12$, $n_1 = 90\,\text{omw/min}$
- $z_2 = 36$
- tussenwiel: 20 tanden

GEVRAAGD

- i
- n_2 en de draairichting
- het effect van het tussenwiel

OPLOSSING

1. (a) $i = \dfrac{z_2}{z_1} = \dfrac{36}{12} = 3$.

2. (b) $n_2 = \dfrac{n_1}{i} = \dfrac{90}{3} = 30\,\text{omw/min}$, tegen de klok in (twee tandwielen draaien tegengesteld).

3 (c) Het tussenwiel draait tegen de klok in, het grote wiel dus weer met de klok mee. De snelheid blijft 30 omw/min: het kleine wiel duwt 12 tanden per omwenteling door, en die 12 tanden komen via het tussenwiel aan bij het grote wiel. De tanden van het tussenwiel tellen niet mee.

ANTWOORD

$i = 3$; het grote wiel draait 30 omw/min tegen de klok in. Met een tussenwiel: 30 omw/min, met de klok mee.

Klopt dit? Per minuut passeren aan de rand van het kleine wiel 90 × 12 = 1080 tanden; bij het grote wiel 30 × 36 = 1080. Klopt.

UITLEG · 12.14

Riemen en kettingen

14/19

Liggen twee assen ver uit elkaar, dan verbind je ze met een **riem** over twee schijven, of met een **ketting** over twee tandwielen. Voor de overbrenging geldt dezelfde regel als bij tandwielen: bij een riem gebruik je de diameters ($i = d_2/d_1$), bij een ketting de aantallen tanden.

- **Draairichting**: bij een open riem en bij een ketting draaien beide wielen in dezelfde zin. Kruis je de riem, dan draaien ze tegengesteld.
- **Riem**: stil, geen smering nodig, en hij kan **slippen**. Dat is soms een voordeel: loopt een machine vast, dan slipt de riem in plaats van dat er iets breekt. Moet de beweging precies kloppen, dan neem je een **tandriem**, met tanden aan de binnenkant.
- **Ketting**: kan niet slippen en brengt grote krachten over, maar moet gesmeerd worden en slijt. Daarom zit er een ketting op een fiets en een motorfiets.

De draairichting bepalen

Volg met je vinger één tand of één stuk riem: waar het ene wiel naartoe duwt, beweegt de rand van het andere wiel mee. Bij tandwielen raken de wielen elkaar aan één kant, dus draaien ze tegengesteld. Een open riem loopt rond beide wielen aan dezelfde kant: zelfde zin.



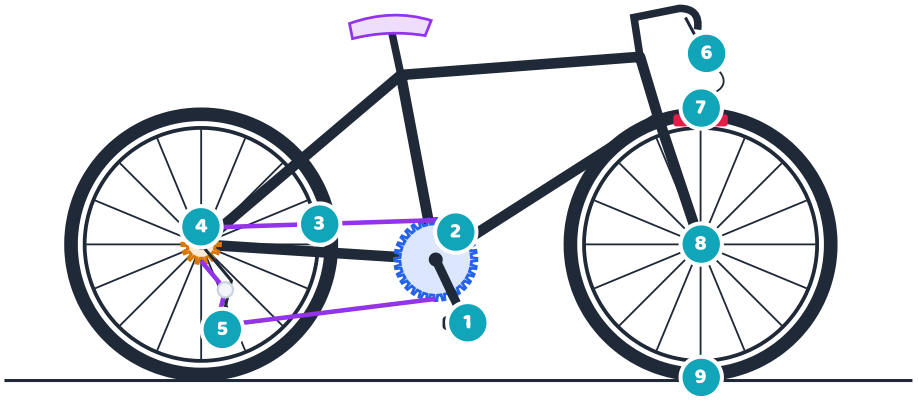
Een open riem en een ketting laten beide wielen in dezelfde zin draaien; een gekruiste riem keert de zin om.

ONTLEED · 12.15

De fiets als verzameling mechanismen

15/19

Een fiets zet de draaiende beweging van je benen om in een snelle rit. Onderweg passeer je bijna alles uit dit hoofdstuk. (Welke materialen waar zitten, zag je in hoofdstuk 10.)



De aandrijving, de remmen en de wielen van een fiets.

1 Trapper
De trapperarm is een hefboom rond de trapas, meestal 17 cm lang. Je voet duwt aan het uiteinde; hoe langer de arm, hoe kleiner de kracht die nodig is.

2 Kettingblad
Het drijvende tandwiel vooraan, vast aan de trapper. Een koersfiets heeft er vaak twee: bijvoorbeeld 50 en 34 tanden.

3 Ketting
Brengt de beweging over naar het achterwiel zonder te slippen. Voor en achter draaien in dezelfde zin.

4 Tandwiel achter
Het gedreven tandwiel, vast aan het achterwiel. Een kleiner tandwiel achteraan laat het wiel meer toeren per trapomwenteling maken: je rijdt sneller, maar trapt zwaarder.

5 Derailleur
Duwt de ketting naar een ander tandwiel: zo kies je de overbrenging. De twee wieltjes houden de ketting gespannen.

6 Remhendel
Een hefboom die kracht wint: je vingers trekken ver van het draaipunt, de remkabel zit er dichtbij.

7 Remblokjes
Knijpen de velg samen. Hier is wrijving net wat je wil: ze remt het wiel af (hoofdstuk 11).

8 Naaf met kogellagers
Kogeltjes tussen de as en de naaf laten het wiel rollen in plaats van glijden: heel weinig wrijving.

9 Band
Het wiel is zelf een hefboom: de ketting trekt aan een kleine straal, de band duwt tegen de weg aan een grote straal. Zo win je snelheid. De wrijving tussen band en weg duwt de fiets vooruit.

UITGEWERKT VOORBEELD · 12.16

Hoe ver kom je met één trapomwenteling?

16/19

Je fietst met het kettingblad van 44 tanden en het tandwiel achter van 16 tanden. Het achterwiel heeft een omtrek van 2,10 m. (a) Hoeveel keer draait het achterwiel rond per trapomwenteling? (b) Hoe ver kom je met één trapomwenteling? (c) Hoe snel rijd je als je 70 keer per minuut rondtrapt? (d) Bergop schakel je naar 34 tanden voor en 28 tanden achter. Hoe ver kom je nu per trapomwenteling, en waarom helpt dat?

GEGEVEN

- $z_{\text{voor}} = 44$, $z_{\text{achter}} = 16$
- omtrek van het wiel: $2{,}10\,\text{m}$
- 70 trapomwentelingen per minuut
- bergop: 34 en 28 tanden

GEVRAAGD

- wielomwentelingen per trapomwenteling
- afstand per trapomwenteling
- snelheid
- afstand bergop

OPLOSSING

1. (a) Eén trapomwenteling schuift 44 schakels van de ketting door. Het achtertandwiel moet dan $44/16 = 2{,}75$ keer rond, en het wiel met hem.

2. (b) Elke wielomwenteling brengt je één omtrek verder: $2{,}75 \times 2{,}10\,\mathrm{m} = 5{,}78\,\mathrm{m}$.

3. (c) Per minuut: $70 \times 5{,}78\,\mathrm{m} = 404\,\mathrm{m}$. Per uur: $404 \times 60 = 24\,260\,\mathrm{m}$, ongeveer $24\,\mathrm{km/h}$ (hoofdstuk 14).

4. (d) $34/28 = 1{,}21$ wielomwentelingen, dus $1{,}21 \times 2{,}10 = 2{,}55\,\mathrm{m}$ per trapomwenteling. Je komt minder ver per omwenteling, maar elke omwenteling vraagt minder kracht: de gulden regel.

ANTWOORD

(a) 2,75 keer. (b) 5,78 m. (c) Ongeveer 24 km/h. (d) 2,55 m per trapomwenteling: trager, maar lichter trappen.

Klopt dit? Met de overbrengingsverhouding: het kettingblad drijft (1), het achtertandwiel wordt gedreven (2): $i = 16/44 = 0{,}36$, kleiner dan 1: een versnelling. Het wiel draait $1/0{,}36 = 2{,}75$ keer sneller dan de trappers.

UITGEWERKT VOORBEELD · 12.17

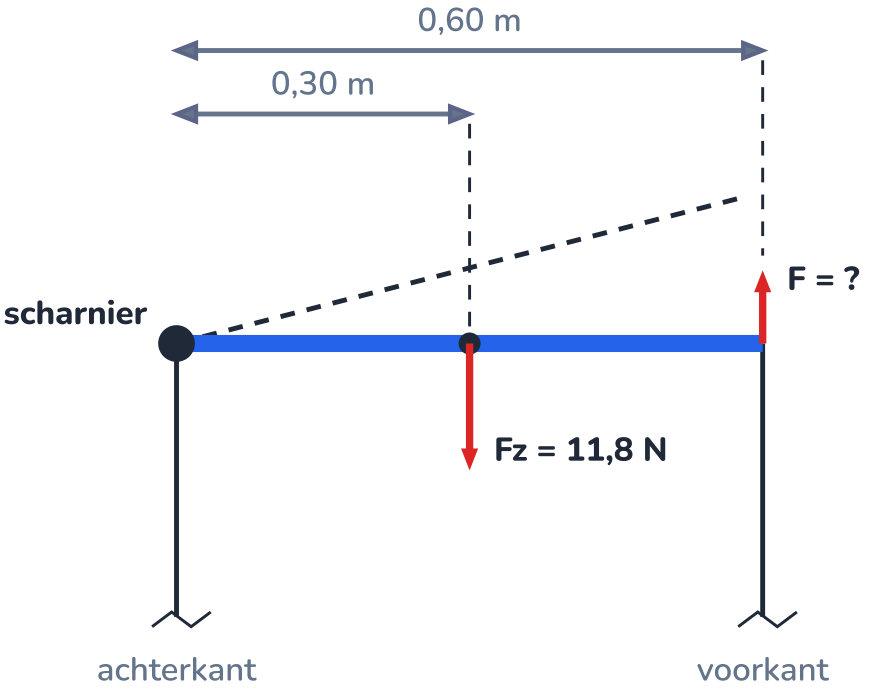
Habitat: het dakraam van de meetkas openen

17/19

Op warme dagen wordt het in de meetkas te heet (tot 32 °C, hoofdstuk 4). Daarom is de rechterhelft van het dak een **dakraam** van 0,60 m × 0,60 m, met een scharnier aan de achterkant. Het raam heeft een massa van 1,2 kg; zijn zwaartepunt ligt in het midden. (a) Met welke kracht til je het raam op aan de voorrand? (b) En als je het zou openduwen op 10 cm van het scharnier? (c) Hoe ver moet dat punt op 10 cm stijgen om de voorrand 15 cm te openen?

Dakraam of schuifpaneel?

In Intermediate (hoofdstukken I7 en I8) heeft het kasdak een schuifpaneel met een motor. Dat hoort bij de klimaatmodule, de tweede laag van Habitat. De meetkas is eenvoudiger: een dakraam met een scharnier, dat je met de hand opent en met een klemhendel dichtdrukt (opdracht 12.15). Een automatische opener ontwerp je in opdracht 12.12.



Het scharnier is het draaipunt. De zwaartekracht grijpt aan in het midden, je hand aan de voorrand. Stippellijn: het raam open, met de voorrand 15 cm hoger.

GEGEVEN

- $m = 1{,}2\,\text{kg}$, dus $F_z = 1{,}2 \times 9{,}81 = 11{,}8\,\text{N}$
- zwaartepunt op $0{,}30\,\text{m}$ van het scharnier; voorrand op $0{,}60\,\text{m}$

GEVRAAGD

- kracht aan de voorrand
- kracht op 10 cm van het scharnier
- hoe ver dat punt stijgt

OPLOSSING

1. Het scharnier is het draaipunt, de zwaartekracht op het raam is de last. Je hand tilt verder van het scharnier dan het zwaartepunt: een hefboom van de **tweede soort**.

2. (a) $F_1 = \dfrac{F_2 \cdot a_2}{a_1} = \dfrac{11{,}8\,\text{N} \times 0{,}30\,\text{m}}{0{,}60\,\text{m}} = 5{,}9\,\text{N}$.

3. (b) Nu is de krachtarm 0,10 m, korter dan de lastarm: een hefboom van de derde soort. $F_1 = \dfrac{11{,}8 \times 0{,}30}{0{,}10} = 35\,\text{N}$, zes keer zoveel.

4. (c) Het punt op 0,10 m ligt zes keer dichter bij het scharnier dan de voorrand, dus het stijgt zes keer minder: $15/6 = 2{,}5\,\text{cm}$.

ANTWOORD

(a) 5,9 N aan de voorrand. (b) 35 N op 10 cm van het scharnier. (c) Dat punt stijgt maar 2,5 cm.

Klopt dit? Kracht maal afstand: 5,9 N × 15 cm en 35 N × 2,5 cm geven allebei ongeveer 88 N·cm. Wie dicht bij het scharnier duwt, heeft meer kracht nodig maar maar een kleine beweging. Precies dat maakt het interessant voor een kleine motor met een korte slag (opdracht 12.12).

NASLAG · 12.18

Overzicht: hefbomen en mechanismen

18/19

De rekenregels en de afspraken uit dit hoofdstuk. Wrijving en de massa van katrollen en touwen laten we weg.

hefboomwet

$$F_1 \cdot a_1 = F_2 \cdot a_2$$

symbool	betekenis	eenheid
F_1	kracht	N
a_1	krachtarm	m of cm
F_2	last	N
a_2	lastarm	m of cm (zelfde eenheid als a_1)

takel

$$F = \frac{F_z}{n} \qquad s_{\text{touw}} = n \cdot h$$

symbool	betekenis	eenheid
n	aantal dragende touwdelen	–
F_z	zwaartekracht op de last	N
h	hoogte die de last stijgt	m

overbrengingsverhouding

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

symbool	betekenis	eenheid
z	aantal tanden	–
d	diameter van een riemschijf	cm
n	omwentelingen per minuut	omw/min
$1, 2$	drijvend, gedreven	

soort	wat staat in het midden?	voorbeelden	wat win je?
eerste soort	het draaipunt	wip, schaar, combinatietang, nijptang, koevoet over een blokje, balans	kracht als de krachtarm langer is, afstand als hij korter is; altijd ook een omgekeerde beweging
tweede soort	de last	kruiwagen, notenkraker, flesopener	altijd kracht: de krachtarm is altijd de langste
derde soort	de kracht	pincet, bezem, hengel, kolentang, je onderarm	altijd afstand en snelheid: de last beweegt verder en sneller dan je hand

mechanisme	draairichting	kenmerk
twee tandwielen	tegengesteld	geen slip, compact
met tussenwiel	zelfde zin	zelfde overbrenging als zonder tussenwiel
wormwiel	haaks	grote vertraging in één stap, vaak zelfremmend
open riem	zelfde zin	stil, kan slippen, grote afstand tussen de assen
gekruiste riem	tegengesteld	zoals de open riem
ketting	zelfde zin	geen slip, grote krachten, smeren

gulden regel van de mechanica

Wat je wint aan kracht, verlies je aan afstand (of snelheid), en omgekeerd. Kracht × afstand is aan beide kanten van een mechanisme even groot (zonder wrijving).

HET GEHEEL · 12.19

Waar hefbomen naartoe leiden

19/19

Hefbomen en mechanismen zijn het scharnier tussen **krachten** (hoofdstuk 11) en **ontwerpen en maken**: elk toestel dat beweegt, gebruikt ze. De hefboomwet is ook een eerste voorbeeld van een **omgekeerd evenredig** verband (leerlijn wiskundig modelleren): het product blijft constant. In Intermediate wordt kracht maal arm het **moment**, en de gulden regel het behoud van arbeid en energie.

F11 Krachten
Krachten tekenen en meten in newton; de zwaartekracht als last.

F13 Constructies: sterk en stabiel
Zwaartepunt en kantelen: waar een voorwerp omvalt, draait het rond zijn kantelrand.

F14 Beweging en snelheid
Van omwentelingen per minuut naar kilometer per uur.

F15 Energie: vormen en omzettingen

F25 Sensoren en automatisch regelen
Een servo of een pomp als actuator: een motor met een tandwielkast.

F30 De ontwerpcyclus
Een mechanisme ontwerpen, bouwen, testen en verbeteren.

Waarom geen enkel mechanisme energie maakt, en waar de wrijving de energie naartoe stuurt.

I3 Verbanden in data
Omgekeerd evenredige verbanden in een grafiek herkennen.

I9 Arbeid, energie en vermogen
Arbeid W = F · s: de gulden regel als behoud van arbeid, met rendement.

I10 Moment en evenwicht
Moment M = F · d, ook voor schuine krachten, en evenwicht van een balk met meerdere krachten.

I26 Motoren en actuatoren
De motor van het kasdak kiezen, met een tandwiel- of wormoverbrenging.

I33 Een mobiele robot
Overbrenging en snelheid van de wielen van een robot.

E10 Rotatie
Hoeksnelheid, traagheidsmoment en vermogen van draaiende assen.

Habitat
Het dakraam van de meetkas (0,60 m × 0,60 m, 1,2 kg, scharnier achteraan) is een hefboom van de tweede soort: aan de voorrand til je het met 5,9 N op. In opdracht 12.12 kies je waar een duwstang moet aangrijpen zodat een kleine motor het raam ver genoeg opent, en in opdracht 12.15 reken je de klemhendel uit die het raam dichtdrukt. Noteer beide in je portfolio.

SAMENVATTING
In het kort

- Een hefboom draait rond een draaipunt. De arm is de afstand van het draaipunt tot waar een kracht aangrijpt.
- Hefboomwet: $F_1 \cdot a_1 = F_2 \cdot a_2$. Een lange krachtarm en een korte lastarm maken de nodige kracht klein.
- Gulden regel van de mechanica: wat je wint aan kracht, verlies je aan afstand. Een mechanisme levert nooit meer dan je erin stopt.
- Eerste soort: draaipunt in het midden (wip, schaar). Tweede soort: last in het midden (kruiwagen, notenkraker). Derde soort: kracht in het midden (pincet, onderarm).
- De meeste hefbomen in je lichaam zijn van de derde soort: ze kosten kracht, maar winnen snelheid en bereik.
- Een vaste katrol verandert de richting; een takel met n dragende touwdelen deelt de kracht door n, maar je haalt n keer zoveel touw binnen.
- Tandwielen die in elkaar grijpen, draaien tegengesteld; $i = z_2/z_1 = n_1/n_2$. Een tussenwiel keert de zin om zonder de snelheid te veranderen.
- Een open riem en een ketting laten beide wielen in dezelfde zin draaien; een riem kan slippen, een ketting niet.
- Een fiets combineert hefbomen (trapper, remhendel), een kettingoverbrenging met versnellingen en kogellagers.

BEGRIPPEN
Wat je nu kent

hefboom
Een stijf voorwerp dat kan draaien rond een vast punt, het draaipunt. Met een hefboom kan je een kleine kracht een grote last laten verplaatsen.

draaipunt
Het punt waarrond een hefboom draait.

arm
De afstand van het draaipunt tot de plaats waar een kracht aangrijpt (voor een kracht loodrecht op de hefboom).

hefboomwet

gulden regel van de mechanica

katrol

Een hefboom is in evenwicht als $F_1 \cdot a_1 = F_2 \cdot a_2$: kracht maal krachtarm is last maal lastarm.

Wat je met een mechanisme wint aan kracht, verlies je aan afstand (en omgekeerd).

Een wiel met een groef waarover een touw loopt. Een vaste katrol verandert de richting van de kracht; een losse katrol halveert de nodige kracht.

takel

Een combinatie van vaste en losse katrollen. Met n touwdelen die de last dragen, is de nodige kracht F_z/n.

overbrengingsverhouding

Hoe veel trager (of sneller) het gedreven wiel draait dan het drijvende: $i = z_2/z_1 = n_1/n_2$.

tussenwiel

Een tandwiel tussen het drijvende en het gedreven wiel: het keert de draairichting om, maar verandert de overbrengingsverhouding niet.

HANDBOEK · HOOFDSTUK 13

Constructies: sterk en stabiel

Waarom een brug uit driehoeken bestaat, een balk een I-vorm heeft, en een kast omvalt als je de bovenste lade vult

Een constructie moet twee dingen: **sterk** zijn (niet breken en niet te ver vervormen) en **stabiel** zijn (niet omvallen). In dit hoofdstuk leer je hoe een onderdeel belast kan worden: op trek, druk, buiging, afschuiving of torsie. Je ontdekt waarom de **driehoek** de basis is van bruggen, torens en fietskaders, en waarom de **vorm** van een profiel vaak meer telt dan het materiaal. Daarna zoek je het **zwaartepunt** en bepaal je wanneer iets kantelt. Je test een brug tot ze bezwijkt, en je maakt het frame van de meetkas stevig zonder het veel zwaarder te maken.

6× uitleg · 3× uitgewerkt voorbeeld · 3× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

K Krachten, beweging en constructies · D Ontwerpen en maken



Driehoek na driehoek: een vakwerkbrug draagt een trein met verrassend weinig staal.

Na dit hoofdstuk

- Je kan trek, druk, buiging, afschuiving en torsie herkennen en met een voorbeeld uitleggen.
- Je kan uitleggen dat een balk die doorbuigt aan de ene kant op druk en aan de andere kant op trek belast wordt.
- Je kan uitleggen waarom een driehoek uit staven stijf is en een vierkant niet, en een vorm stijf maken met diagonalen.
- Je kan in een eenvoudig vakwerk trekstaven en drukstaven aanwijzen.
- Je kan profielen (I, U, L, T, koker, buis) herkennen en uitleggen waarom vorm meer telt dan materiaal.
- Je kan met het stijfheidsgetal $b \cdot h^3$ vergelijken hoe stijf een plank of een koker is.
- Je kan het zwaartepunt van een vlakke figuur bepalen en uitleggen wanneer een voorwerp kantelt.
- Je kan een constructie eerlijk testen tot ze bezwijkt en het resultaat vergelijken met haar eigen massa.
- Je kan het kasframe van de meetkas verstevigen met diagonalen en hoekplaatjes, en de extra massa berekenen.

VERHAAL · 13.1

De brug die knikte

1/16

Aan het begin van de twintigste eeuw wilde Canada bij de stad Quebec een spoorbrug over de Sint-Laurensrivier bouwen: de langste brug van haar soort ter wereld. Om kosten te sparen werd de middelste overspanning tijdens het ontwerp verlengd tot ongeveer 550 meter. Dat maakte de brug zwaarder, en de staven onderaan, die het meeste gewicht op **druk** moesten dragen, kregen enorme krachten te verwerken.

In de zomer van 1907 zagen ingenieurs op de werf dat enkele van die drukstaven een beetje krom stonden. Ze meldden het, er werd overlegd, maar het werk ging door. Op 29 augustus 1907, aan het eind van een werkdag, knikte een drukstaaf. In enkele seconden stortte de half gebouwde brug in de rivier. Van de 86 arbeiders op de brug kwamen er 75 om het leven.

De brug werd opnieuw ontworpen, veel steviger, en in 1917 afgewerkt, na nog een ongeval in 1916 waarbij de middenoverspanning bij het ophijsen in de rivier viel. Ze staat er nog altijd. Het onderzoek naar de ramp veranderde de manier waarop ingenieurs rekenen, controleren en waarschuwingen ernstig nemen.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Een staaf die op trek belast wordt, kan je dun maken: een kabel volstaat. Een staaf die op druk belast wordt, gedraagt zich anders: als ze te slank is, buigt ze plots opzij en bezwijkt ze, lang voor het materiaal zelf kapotgaat. Dat heet **knik**. Wie een constructie ontwerpt, moet dus weten welke onderdelen op trek en welke op druk werken. Dat leer je in dit hoofdstuk.



Reconstructie: het wrak van de Quebecbrug na het instorten in 1907.

UITLEG · 13.2

Vijf manieren om te belasten

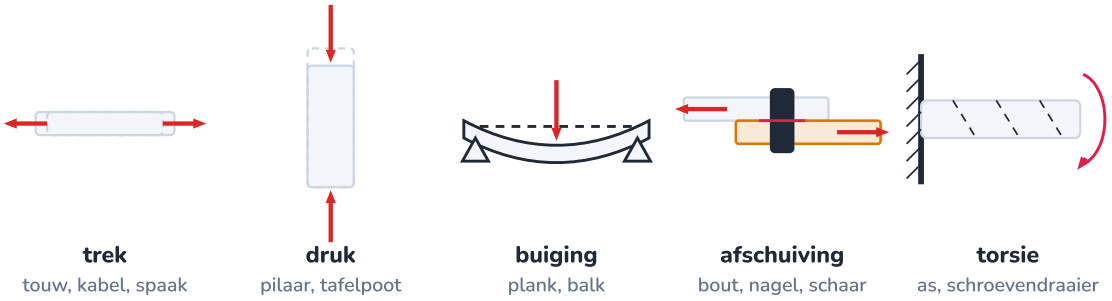
2/16

Elke kracht op een onderdeel is een **belasting**. Hoe het onderdeel reageert, hangt af van hoe de krachten erop werken. Er zijn vijf basisvormen:

belasting	wat gebeurt er?	voorbeelden	zwakke plek
trek	het onderdeel wordt uitgerekt	touw van een schommel, kabel van een hangbrug, spaken van een fietswiel	scheuren, doorbreken
druk	het onderdeel wordt samengedrukt	pilaar, tafelpoot, muur, zijkant van een blikje	verpletteren; lange dunne staven **knikken** opzij
buiging	het onderdeel buigt door: boven druk, onder trek	plank met boeken, balk van een brug, duikplank	te ver doorbuigen, breken aan de trekkant
afschuiving	twee delen schuiven langs elkaar	bout tussen twee platen, nagel, papier tussen de messen van een schaar	afknippen langs een vlak
torsie	het onderdeel wordt verdraaid	as van een motor, schroevendraaier, handdoek uitwringen	scheuren in een spiraal, afbreken

Veel onderdelen krijgen meerdere belastingen tegelijk. Een fietstrapper wordt gebogen én verdraaid, een tafelpoot gedrukt én, als je tegen de tafel duwt, gebogen. Welk materiaal je kiest, hangt af van de belasting: beton is sterk op druk maar zwak op trek, staal is sterk op allebei, een touw kan alleen trek opnemen (hoofdstuk 10).

> ⚠ **Knik: gevaar bij druk**
>
> Druk op een rauwe spaghetti van boven: ze buigt opzij en breekt, lang voor ze zou verpletteren. Hoe langer en dunner een drukstaaf, hoe sneller ze **knikt**. Een even lange spaghetti kan wel een flinke trekkracht verdragen. Daarom zijn drukstaven in een brug dikker dan trekstaven, en kan een schoor die op druk werkt, niet zomaar door een kabel vervangen worden.



De rode pijlen tonen de krachten; de stippellijnen bij trek en druk tonen de vorm zonder belasting.

PROEF · 13.3

Buigen is trekken en drukken tegelijk

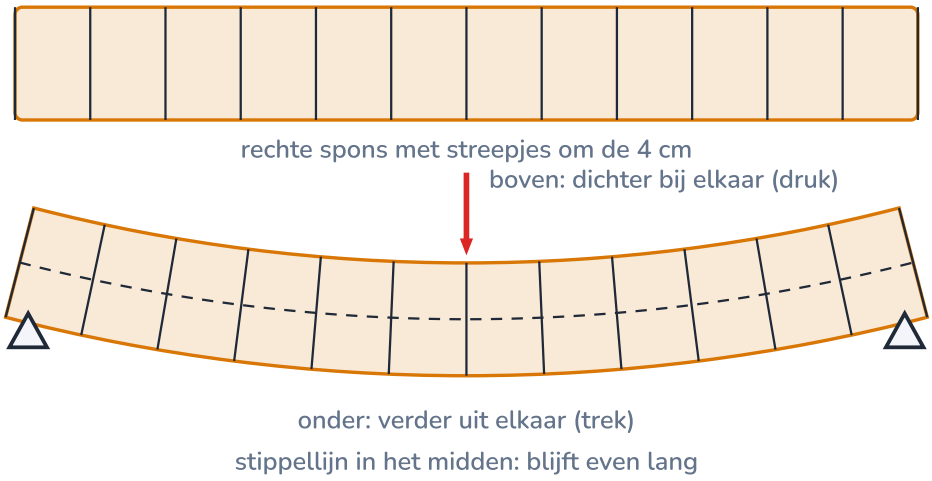
3/16

ONDERZOEKSVRAAG

Wat gebeurt er binnen in een balk die doorbuigt?

MATERIAAL

een lange spons of een blok schuimrubber (± 30 cm) · een stift · twee boeken als steunen



Boven komen de streepjes dichter bij elkaar, onder gaan ze uit elkaar. De middenlijn verandert niet van lengte.

WERKWIJZE

1. Teken met de stift verticale streepjes op de zijkant van de spons, om de 2 cm, en een horizontale lijn in het midden van de dikte.
2. Leg de spons met haar uiteinden op de twee boeken.
3. Druk met je hand in het midden naar beneden en kijk naar de streepjes.
4. Meet (of schat) de afstand tussen twee streepjes aan de bovenkant, in het midden en aan de onderkant.

WAARNEMING

Aan de bovenkant komen de streepjes dichter bij elkaar, aan de onderkant gaan ze verder uit elkaar. Op de middenlijn blijft de afstand gelijk. De streepjes blijven recht, maar ze wijzen allemaal schuin naar een punt boven de spons.

VERKLARING

Een balk die doorbuigt, wordt aan de bovenkant samengedrukt (**druk**) en aan de onderkant uitgerekt (**trek**). In het midden ligt een laag die niet langer en niet korter wordt. Hoe verder van die middenlaag, hoe groter de druk of de trek. Dat verklaart twee dingen uit dit hoofdstuk: waarom beton onderaan wapening nodig heeft (hoofdstuk 10) en waarom een I-profiel zijn materiaal bovenaan en onderaan heeft, waar het het meeste werk doet.

UITLEG · 13.4

De driehoek: de stijfste vorm

4/16

Maak een vierkant uit vier stroken karton met splitpennen in de hoeken, en duw tegen een hoek: het vierkant zakt scheef tot een ruit. De staven zelf blijven even lang, alleen de hoeken veranderen. Doe hetzelfde met een driehoek: die kan niet vervormen zonder dat een staaf langer of korter wordt. Bij drie gegeven lengtes hoort maar één driehoek.

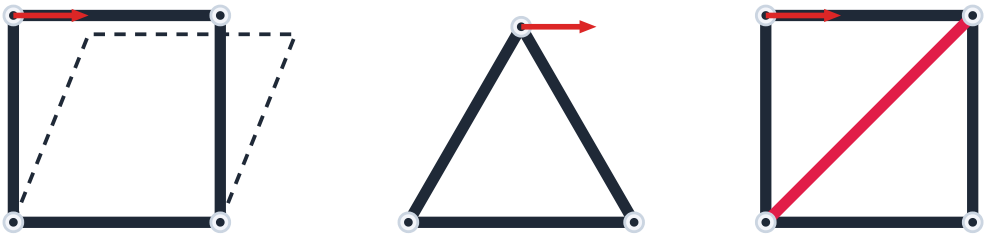
Wil je een vierkant stijf maken, dan heb je twee mogelijkheden:

- een **diagonaal** (een *schoor*): het vierkant wordt twee driehoeken;
- **stijve hoeken**: de staven zo vastmaken dat de hoek niet kan veranderen, met een hoekplaatje of een lasnaad. Dat werkt, maar de hoeken moeten dan grote krachten opvangen.

Driehoeken zie je overal waar iets licht en stijf moet zijn: in dakspanten, in hoogspanningsmasten, in de arm van een kraan en in het kader van een fiets, dat uit twee driehoeken bestaat.

Probeer het met je handen

Neem een rechthoekig boekenrek zonder achterwand: het wiebelt opzij. Schroef er een dunne achterwand tegen, of een schuin latje, en het staat stijf. Een dunne plaat werkt hier als een hele reeks diagonalen tegelijk.



vierkant: zakt scheef (stippellijn)

driehoek: blijft stijf (lengtes liggen de vorm vast)

met een diagonaal: twee driehoeken, stijf

Dezelfde duw: het vierkant zakt scheef (stippellijn), de driehoek en het vierkant met een diagonaal niet.

UITLEG · 13.5

Vakwerken: bruggen en torens uit driehoeken

5/16

Een **vakwerk** is een constructie uit rechte staven die in **knooppunten** met elkaar verbonden zijn, zodat ze driehoeken vormen. Grijpen de lasten aan in de knooppunten, dan wordt elke staaf alleen op **trek** of op **druk** belast, niet op buiging. Dat is precies waar een staaf het sterkst is. Daarom is een vakwerk licht en toch stijf.

Hoe weet je of een staaf op trek of op druk werkt? Een handige denktruc: stel je voor dat je de staaf wegneemt. Zouden de twee knooppunten dan uit elkaar gaan, dan hield de staaf ze bij elkaar: **trek**. Zouden ze naar elkaar toe vallen, dan hield de staaf ze uit elkaar: **druk**. Bij een brug die in het midden belast wordt, is de onderrand daardoor op trek belast en de bovenrand op druk, zoals bij de spons.

Vakwerken zie je in spoorbruggen, dakspanten, hoogspanningsmasten, torenkranen en de **Eiffeltoren**. Die toren van 1889 heeft een metalen skelet van ongeveer 7300 ton. Dat lijkt veel, maar in opdracht 13.10 reken je uit hoe dun een plaat zou zijn als je al dat ijzer over de grondvlakte van de toren zou uitgieten.

Rekenen aan vakwerken

Hoe groot de kracht in elke staaf is, bereken je in Expert (hoofdstuk E13) met de knooppuntenmethode: in elk knooppunt moeten de krachten elkaar opheffen. De kleuren in de figuur van het volgende blad komen uit zo'n berekening.



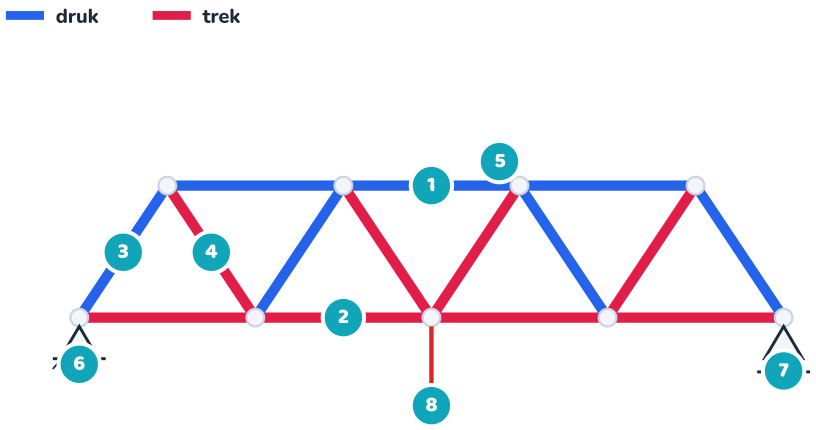
Binnen in een poot van de Eiffeltoren: overal driehoeken, overal lucht.

ONTLEED · 13.6

Een vakwerkbrug

6/16

Een eenvoudige vakwerkbrug met vier vakken, belast met een gewicht in het midden. De kleuren tonen welke staven op druk (blauw) en welke op trek (rood) werken.



Warren-vakwerk: de diagonalen vormen een reeks W's. Onderrand trek, bovenrand druk, diagonalen om beurten.

1 **Bovenrand**
Op druk, zoals de bovenkant van de spons. In het midden het zwaarst belast. Drukstaven moeten stevig genoeg zijn om niet te knikken.

2 **Onderrand**
Op trek. Hier kan een slankere staaf of zelfs een kabel volstaan.

3 **Diagonaal op druk**
De diagonaal bij de oplegging duwt het gewicht naar beneden, naar de steun.

4 **Diagonaal op trek**
De volgende diagonaal wordt uitgerekt. Denktruc: haal hem weg, en de knooppunten zouden uit elkaar gaan.

5 **Knooppunt**
Hier komen de staven samen, vastgezet met bouten, klinknagels of een las, vaak via een knoopplaat.

6 **Vaste oplegging**
Een scharnier op de pijler: de brug kan hier draaien maar niet verschuiven.

7 **Rol-oplegging**
Aan de andere kant kan de brug schuiven. Staal zet uit als het warm wordt (hoofdstuk 6): zonder rol zou de brug zichzelf klemmen.

8 **Last**
Het gewicht van een trein of een vrachtwagen, via het wegdek naar de knooppunten van de onderrand.

UITLEG · 13.7

Profielen: vorm telt meer dan materiaal

Leg een lat plat over twee boeken en druk erop: ze buigt ver door. Zet dezelfde lat op haar kant: ze is veel stijver. Het materiaal en de massa zijn dezelfde, alleen de vorm van de doorsnede is anders. Bij buiging telt vooral hoe ver het materiaal van de middenlaag af ligt: daar werken de grootste trek en druk (de spons).

Voor een rechthoekige doorsnede met breedte b en hoogte h (in de richting van de belasting) groeit de stijfheid met $b \cdot h^3$. De hoogte telt tot de derde macht mee: twee keer zo hoog is acht keer zo stijf. We noemen $b \cdot h^3$ hier het **stijfheidsgetal**. Het is handig om vormen van hetzelfde materiaal te vergelijken. (Voor een koker trek je het stijfheidsgetal van het gat af.)

RECHTHOEKIGE DOORSNEDE, BELASTING IN DE RICHTING VAN H

$$\text{stijfheidsgetal} = b \cdot h^3$$

Hoe groter, hoe stijver bij buiging (voor hetzelfde materiaal). In Expert (hoofdstuk E12) wordt dit het traagheidsmoment van de doorsnede, $bh^3/12$.

Daarom hebben balken en liggers speciale **profielen**: vormen die het materiaal ver van de middenlaag leggen.

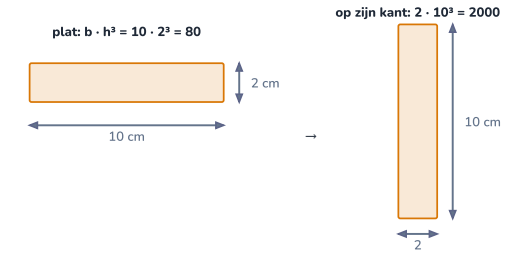
- Het **I-profiel** heeft brede flenzen boven en onder (waar trek en druk het grootst zijn) en een dun lijf ertussen. Ideaal voor een balk die in één richting belast wordt.
- Een **koker** of **buis** is in alle richtingen stijf en ook sterk tegen torsie. Daarom is een fietskader van buizen, en het kasframe van kokers.
- **U-**, **L-** en **T-profielen** zijn makkelijk aan elkaar te zetten en worden veel gebruikt voor kaders, randen en hoeken.

Sterker materiaal is altijd beter

Een massieve staaf aluminium is minder stijf dan een aluminium koker met dezelfde massa. En een blad papier dat je in een harmonica plooit, draagt honderd keer meer dan een plat blad. Vaak win je meer met een slimme vorm dan met een duurder materiaal.



Doorsneden: het blauwe materiaal ligt zo ver mogelijk van het midden.



Op zijn kant is dezelfde plank 25 keer zo stijf: 2000 tegenover 80.

UITGEWERKT VOORBEELD · 13.8

Hoeveel stijver is een koker?

8/16

(a) Een plank van 10 cm breed en 2 cm dik ligt eerst plat en dan op haar kant. Hoeveel keer stijver is ze op haar kant? (b) Het frame van de meetkas is gemaakt van een aluminium koker van 20 × 20 × 1,5 mm (doorsnede 1,11 cm², hoofdstuk 10). Vergelijk met een massieve vierkante staaf met dezelfde doorsnede, dus dezelfde massa per meter.

GEGEVEN

- plank: b = 10 cm, h = 2 cm
- koker: buitenkant 2,0 × 2,0 cm, gat 1,7 × 1,7 cm, doorsnede 1,11 cm²

GEVRAAGD

- verhouding van de stijfheidsgetallen

OPLOSSING

1. (a) Plat: $b \cdot h^3 = 10 \times 2^3 = 80$. Op haar kant ($b = 2$, $h = 10$): $2 \times 10^3 = 2000$. $2000/80 = 25$.
2. (b) Koker: buitenkant min het gat: $2{,}0 \times 2{,}0^3 - 1{,}7 \times 1{,}7^3 = 16{,}0 - 8{,}35 = 7{,}65$.
3. Massieve staaf met 1,11 cm² doorsnede: zijde $\sqrt{1{,}11} = 1{,}054\,\text{cm}$, dus $1{,}054 \times 1{,}054^3 = 1{,}23$.
4. Verhouding: $7{,}65/1{,}23 \approx 6{,}2$.

ANTWOORD

(a) 25 keer zo stijf op haar kant. (b) De koker is ongeveer 6 keer zo stijf als een massieve staaf van dezelfde massa.

Klopt dit? Het getal bij (a) hangt niet af van het materiaal: voor grenen en voor staal is de plank op haar kant 25 keer zo stijf. Welk materiaal stijver is (staal of aluminium), telt daar nog bovenop (hoofdstuk 10). Ook het tafelblad van 18 mm uit hoofdstuk 11 volgt deze regel: een blad van 22 mm is $(22/18)^3 \approx 1{,}8$ keer zo stijf.

UITLEG · 13.9

Het zwaartepunt

9/16

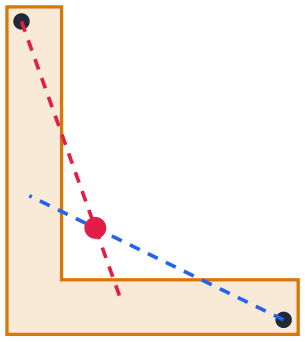
De zwaartekracht trekt aan elk stukje van een voorwerp. Voor het geheel mag je doen alsof ze in één punt aangrijpt: het **zwaartepunt** Z. Ondersteun je een voorwerp recht onder zijn zwaartepunt, dan blijft het in evenwicht: zo balanceer je een liniaal op je vinger.

- Bij een **symmetrisch** voorwerp uit één materiaal ligt Z in het midden: een bal, een baksteen, een liniaal.
- Is een kant zwaarder, dan schuift Z die kant op: een hamer heeft zijn zwaartepunt dicht bij de kop.
- Z kan **buiten** het voorwerp liggen: in het gat van een ring, naast het hout van een boemerang.

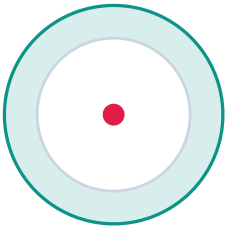
Een hangend voorwerp draait altijd tot zijn zwaartepunt recht onder het ophangpunt hangt. Dat gebruik je om Z van een vlakke figuur te vinden (de proef op het volgende blad).

Rekenen met het zwaartepunt

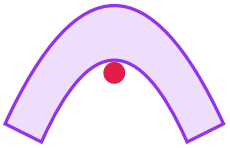
Het zwaartepunt van een samengestelde vorm (een L, of de hele meetkas met water, grond en frame) kan je ook berekenen uit de massa's en hun plaats. Dat leer je in hoofdstuk I10. Hier zoek je het met een proef.



L-vorm: Z naast het karton



ring: Z in het gat



boemerang: Z naast het hout

Bij de L-vorm snijden twee loodlijnen elkaar in Z. Bij de ring en de boemerang ligt Z in de lucht.

PROEF · 13.10

Het zwaartepunt van een vlakke figuur vinden

10/16

ONDERZOEKSVRAAG

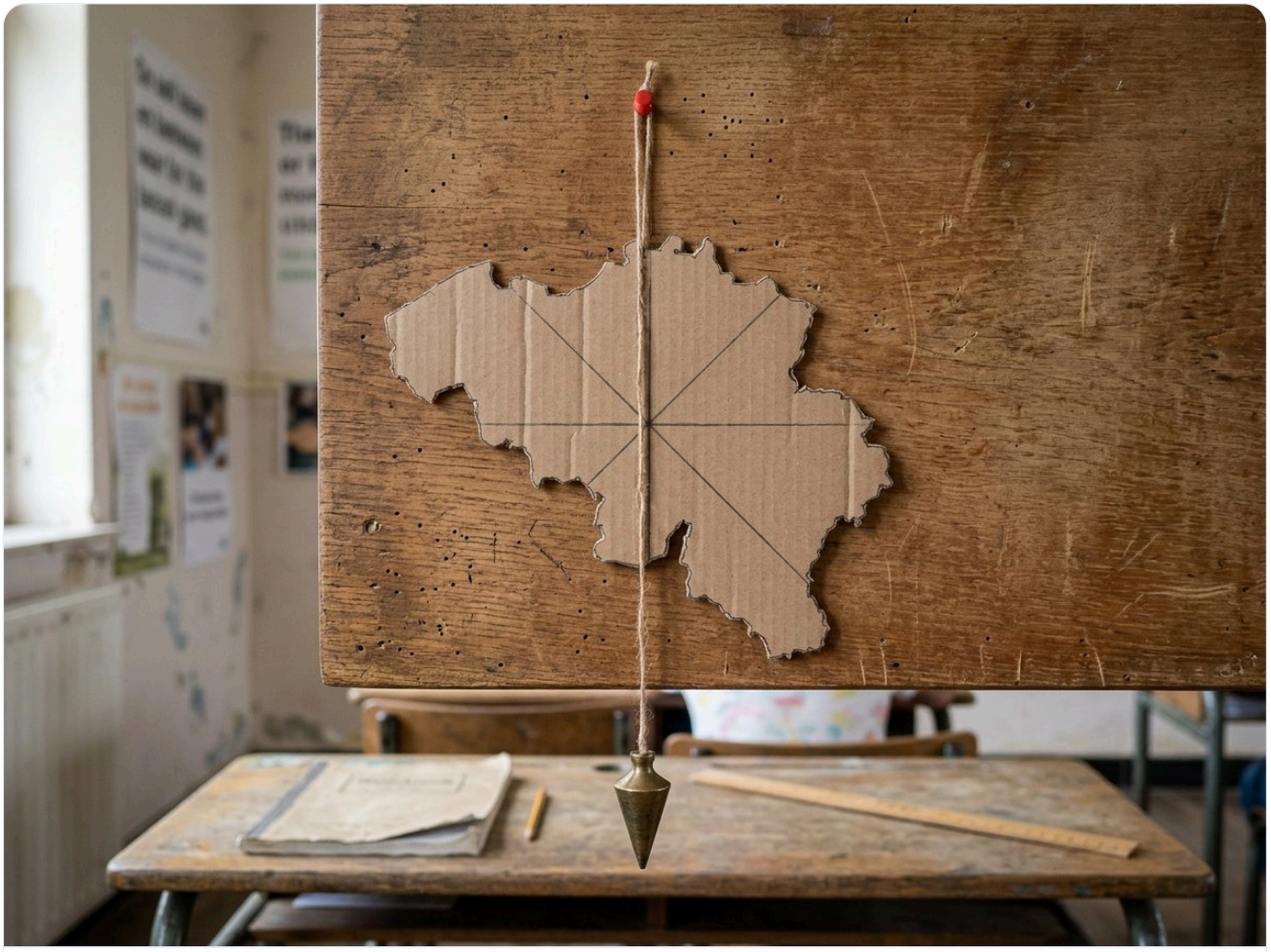
Waar ligt het zwaartepunt van een grillig stuk karton?

MATERIAAL

- een stuk karton in een vrije vorm (bv. een L, een landkaart van België)
- een punaise of spijker in een kurk of een statief
- een touwtje met een gewichtje (schietlood)
- potlood en lat

Veiligheid

Let op met de punaise; prik niet naar je hand toe.



Twee loodlijnen, één snijpunt: het zwaartepunt.

WERKWIJZE

1. Prik drie gaatjes dicht bij de rand van het karton, ver uit elkaar.
2. Hang het karton aan het eerste gaatje op de punaise, zodat het vrij kan draaien. Hang het schietlood aan dezelfde punaise.
3. Wacht tot alles stilhangt en trek een lijn langs het touwtje.
4. Herhaal met het tweede en het derde gaatje.
5. Controle: leg het karton met het snijpunt op de punt van een potlood. Blijft het in evenwicht?

WAARNEMING

De drie lijnen snijden elkaar (bijna) in één punt. Op dat punt balanceert het karton op de punt van een potlood. Bij een L-vorm ligt het punt soms net naast het karton, in de binnenhoek.

VERKLARING

Een hangend voorwerp komt tot rust met zijn zwaartepunt recht onder het ophangpunt: dan kan de zwaartekracht het niet meer doen draaien. Het zwaartepunt ligt dus altijd op de loodlijn door het ophangpunt. Twee lijnen volstaan om het te vinden; de derde is een controle. Dat de lijnen niet precies in één punt samenkomen, komt door de dikte van het touwtje en het tekenen.

UITLEG · 13.11

Steunvlak en stabiliteit: wanneer kantelt iets?

Een voorwerp op de grond steunt op een **steunvlak**: het vlak binnen zijn buitenste steunpunten. Bij een stoel is dat de rechthoek tussen de vier poten, bij jou het vlak rond je twee voeten.

De regel is eenvoudig: trek een verticale lijn (een loodlijn) door het zwaartepunt.

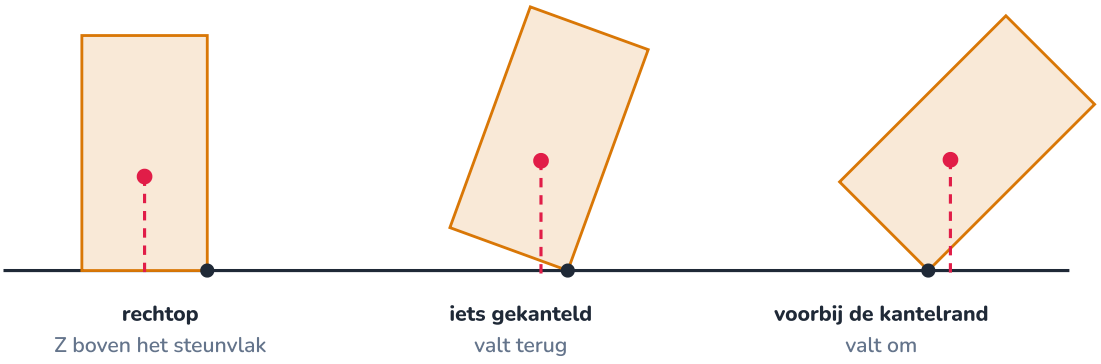
- Valt ze **binnen** het steunvlak, dan blijft het voorwerp staan. Kantel je het een beetje, dan valt het terug.
- Valt ze precies op de **kantelrand**, dan staat het op een wankel evenwicht.
- Valt ze **buiten** het steunvlak, dan valt het om.

Hoe ver je iets kan kantelen voor het omvalt, hangt af van de hoogte van het zwaartepunt en van de breedte van het steunvlak. Een laag zwaartepunt en een breed steunvlak geven een grote **kantelhoek**: het voorwerp is stabiel.

meer stabiel als	voorbeeld
het zwaartepunt lager ligt	zware spullen onderaan in een kast; een raceauto ligt laag
het steunvlak groter is	wijd staande voeten; de uitschuifbare steunpoten van een kraanwagen
het voorwerp zwaarder is (bij een duw of wind van opzij)	het tegengewicht van een torenkraan; zandzakken op een tentvoet
het vastzit aan de grond	verankeren met pinnen of bouten

Kasten en rekken

Vul een kast of rek altijd van onder naar boven, en trek niet alle bovenste laden tegelijk open: dan schuift het zwaartepunt naar voren en naar boven, en kan de kast op je vallen. Hoge kasten schroef je vast aan de muur.



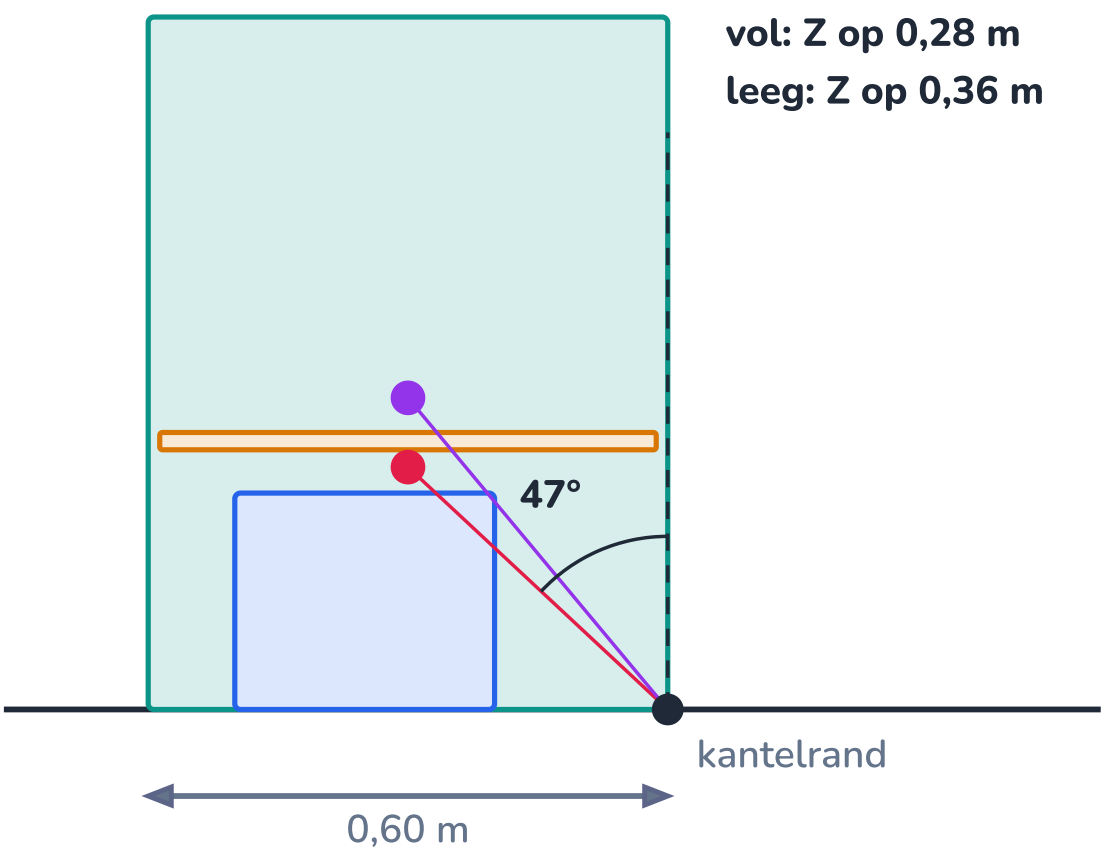
Links en in het midden valt de loodlijn door Z binnen het steunvlak: de doos blijft staan of valt terug. Rechts valt ze voorbij de kantelrand: de doos valt om.

UITGEWERKT VOORBEELD · 13.12

Habitat: kantelt de meetkas?

De meetkas is 0,60 m diep en 0,80 m hoog. Met water en natte potgrond heeft ze een massa van ongeveer 87 kg en ligt haar zwaartepunt 0,28 m boven de grond (berekend met de massa's uit

hoofdstukken 7 en 10; in hoofdstuk I10 leer je hoe). Een lege kas (zonder water, grond en planten) heeft maar 19 kg, met het zwaartepunt op 0,36 m. (a) Over welke hoek kan je de volle kas opzij kantelen voor ze omvalt? (b) En de lege? (c) Welke kas waait het makkelijkst om, en waarom?



Hoe hoger Z, hoe steiler de lijn naar de kantelrand en hoe kleiner de kantelhoek.

GEGEVEN

- diepte (steunvlak opzij): 0,60 m; zwaartepunt in het midden
- vol: 87 kg, Z op 0,28 m
- leeg: 19 kg, Z op 0,36 m

GEVRAAGD

- kantelhoek vol en leeg
- welke kas het makkelijkst omwaait

OPLOSSING

1. Teken de kas in zijaanzicht op schaal, bijvoorbeeld 1:10: een rechthoek van 6,0 cm breed en 8,0 cm hoog. Zet het zwaartepunt in het midden van de breedte, op 2,8 cm hoogte.
2. De kas valt om zodra het zwaartepunt recht boven de kantelrand komt. Trek een lijn van de kantelrand (rechtsonder) naar Z. De hoek tussen die lijn en de verticaal door de kantelrand is de kantelhoek. Meet hem met je geodriehoek: ongeveer 47°.
3. Voor de lege kas ligt Z op 3,6 cm in je tekening: de lijn staat steiler, de hoek is ongeveer 40°.
4. De lege kas heeft niet alleen een kleinere kantelhoek, ze is ook vier à vijf keer lichter. Een windstoot die tegen de grote zijwand duwt, moet de hele kas rond de kantelrand doen draaien. Bij een lichte kas is daarvoor veel minder kracht nodig.

ANTWOORD

(a) Ongeveer 47°. (b) Ongeveer 40°. (c) De lege kas: hoger zwaartepunt én veel lichter. Een lege kas buiten zet je daarom vast.

Klopt dit? Wie de goniometrie van hoofdstuk I6 kent, kan de hoek ook uitrekenen: $\tan\alpha = 0{,}30/0{,}28$, dus $\alpha \approx 47°$. Hoeveel windkracht nodig is om de kas om te duwen, bereken je in hoofdstuk I10. Tot dan: zet de kas vast met pinnen of houd het reservoir gevuld, want het water ligt laag en maakt de kas zwaar.

PROEF · 13.13

Een papieren brug testen tot ze bezwijkt

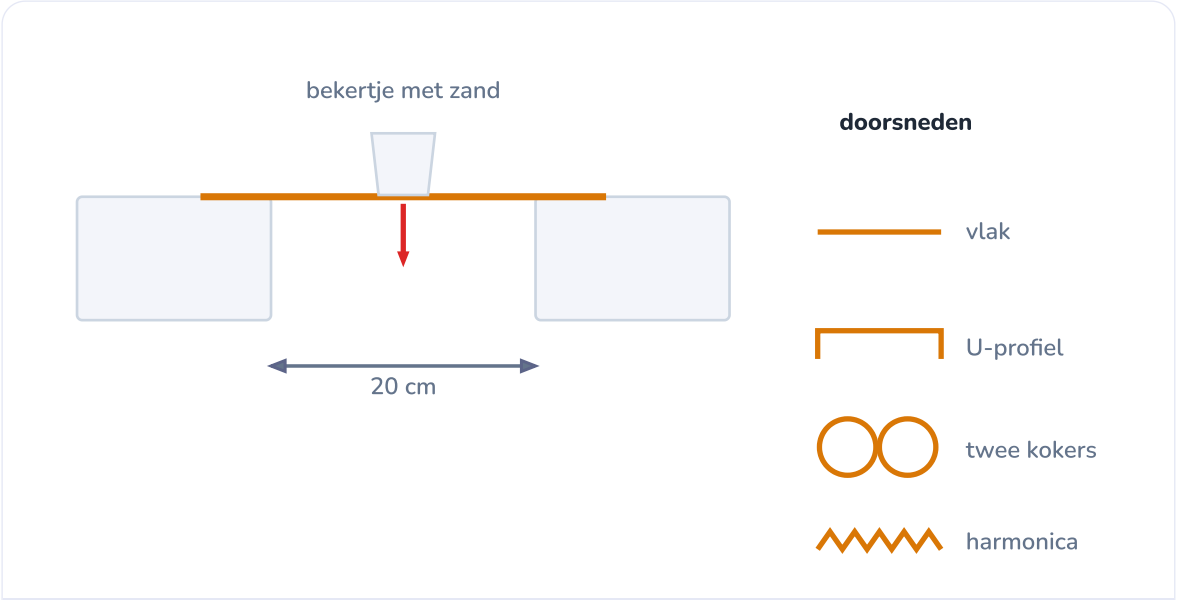
13/16

ONDERZOEKSVRAAG

Hoeveel kan één blad papier dragen als brug, en hoe hangt dat af van de vorm?

MATERIAAL

- A4-bladen van 80 g/m² (elk ± 5 g)
- twee even hoge stapels boeken, 20 cm uit elkaar
- plastic bekertje (± 8 g), droog zand, lepel
- keukenweegschaal
- plakband (alleen om de vorm vast te houden)



Links de opstelling, rechts de vier vormen in doorsnede.

WERKWIJZE

1. Leg een blad plat over de opening. Zet het bekertje in het midden en giet er met een lepel zand in, tot de brug bezwijkt: ze plooit, zakt in of het bekertje valt.
2. Weeg het bekertje met het zand: dat is de massa bij bezwijken.
3. Herhaal met nieuwe bladen in een andere vorm: randen van 2 cm omgeplooid (U-profiel), twee opgerolde kokers naast elkaar, en een harmonica met plooien van 1 cm.
4. Test elke vorm drie keer en neem het gemiddelde. De overspanning, het papier en de plaats van het bekertje blijven telkens gelijk.

WAARNEMING

vorm	massa bij bezwijken (g)	hoe bezweek ze?	draagt × eigen massa
plat blad	0	zakt al door onder het lege bekertje	–
U-profiel (randen 2 cm)	± 90	de randen plooien opzij	± 18
twee kokers	± 350	de kokers deuken in onder het bekertje	± 70
harmonica (plooien 1 cm)	± 600	de plooien duwen plat	± 120

Voorbeeld van waarnemingen. Jouw getallen hangen af van het papier, van hoe netjes je plooit en van hoe voorzichtig je het zand toevoegt; de volgorde komt bijna altijd terug.

VERKLARING

…fde blad, dezelfde massa, maar een verschil van niets …er dan een halve kilogram. Plat ligt al het papier in de middenlaag: het stijfheidsgetal is bijna nul. Plooien en rollen leggen papier ver van het midden, zoals een I-profiel of een koker. De harmonica werkt bovendien als een rij kleine balkjes op hun kant.

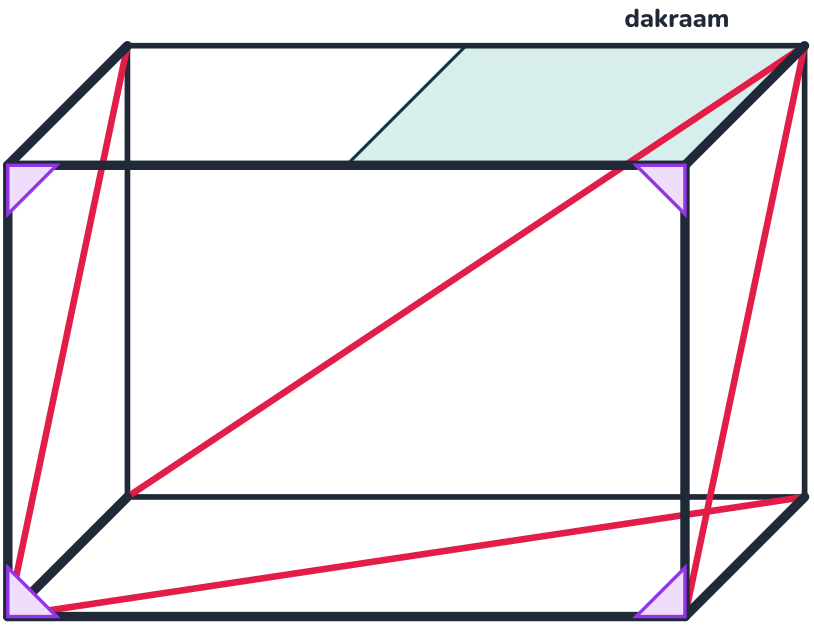
Een constructie testen tot ze **bezwijkt** is geen vernieling om de vernieling: zo leer je waar de zwakke plek zit, en hoeveel reserve een ontwerp heeft. Ingenieurs vergelijken ontwerpen met de verhouding tussen wat ze dragen en wat ze zelf wegen. En ze bouwen nooit zo dat de verwachte last net onder de breuklast ligt: ze nemen een **veiligheidsfactor**, bijvoorbeeld 2 of 3 (opdracht 13.13).

UITGEWERKT VOORBEELD · 13.14

Habitat: een stevig en licht kasframe

14/16

Het frame van de meetkas (hoofdstuk 10) bestaat uit de twaalf ribben van een doos van 1,20 × 0,60 × 0,80 m, in aluminium koker van 20 × 20 × 1,5 mm (0,30 kg/m): 10,4 m of 3,1 kg. Duwt de wind tegen de zijkant, dan kunnen de rechthoekige vlakken scheef zakken, net als het vierkant uit staven. Waar zet je diagonalen, en hoeveel zwaarder wordt het frame? Vergelijk drie oplossingen: diagonalen in koker, gekruiste stroken aluminium van 20 × 2 mm (0,108 kg/m) en gekruiste roestvast stalen kabels van 2 mm (0,025 kg/m) met kleine spanners.



rood: diagonalen in achterwand, zijwanden en bodem
paars: hoekplaatjes aan de open voorkant

Het kasframe met diagonalen (rood) in de dichte vlakken en hoekplaatjes (paars) aan de open voorkant.

GEGEVEN

- kas 1,20 × 0,60 × 0,80 m; koker 0,30 kg/m; strook 0,108 kg/m; kabel 0,025 kg/m
- de voorkant moet open kunnen (planten verzorgen), het dak heeft een dakraam

GEVRAAGD

- waar de diagonalen komen
- extra massa van de drie oplossingen

OPLOSSING

1. **Waar?** In elk vlak dat dicht mag blijven: de achterwand, de twee zijwanden en de bodem. De voorkant moet open kunnen en het dak heeft een dakraam: daar gebruik je **stijve hoeken** met hoekplaatjes (zie het blad over de driehoek), en de geschroefde kanaalplaten helpen ook een beetje mee.

2. **Lengtes** (de diagonaal van elke rechthoek, met de stelling van Pythagoras of opgemeten op een tekening op schaal): achterwand $1{,}20 \times 0{,}80$: 1,44 m; zijwanden $0{,}60 \times 0{,}80$: 2 × 1,00 m; bodem $1{,}20 \times 0{,}60$: 1,34 m. Samen $1{,}44 + 2{,}00 + 1{,}34 = 4{,}78\,\text{m}$.

3. **Koker**: één diagonaal per vlak volstaat, want een koker kan zowel trek als druk opnemen: $4{,}78 \times 0{,}30 = 1{,}4\,\text{kg}$ extra.

4. **Strook of kabel**: een dunne strook of een kabel **knikt** of hangt slap als ze op druk belast wordt. Ze kan alleen trek opnemen. Daarom zet je ze **gekruist** (een X): welke kant de wind ook duwt, één van de twee staat op trek. Dus dubbele lengte: strook $2 \times 4{,}78 \times 0{,}108 = 1{,}0\,\text{kg}$; kabel $2 \times 4{,}78 \times 0{,}025 = 0{,}24\,\text{kg}$ plus de spanners.

ANTWOORD

Diagonalen in achterwand, zijwanden en bodem; hoekplaatjes aan de voorkant en het dak. Extra massa: koker 1,4 kg (frame 4,5 kg), gekruiste stroken 1,0 kg (4,1 kg), gekruiste kabels ongeveer 0,3 kg (± 3,4 kg). De kabels zijn het lichtst, maar moeten gespannen blijven.

Klopt dit? Kijk wat de keuze nog meer bepaalt: kabels en stroken laten meer licht door dan een koker en zijn goedkoop, maar kabels rekken na en moeten opnieuw gespannen worden. In opdracht 13.11 maak je je eigen keuze en bewaar je ze in je portfolio. En let op: roestvast staal en aluminium raken elkaar niet rechtstreeks (hoofdstuk 10): gebruik een kunststof ringetje.

NASLAG · 13.15

Overzicht: constructies

Belastingen, vormen en stabiliteit op één blad.

vergelijken van rechthoekige doorsneden (zelfde materiaal)

$$\text{stijfheidsgetal} = b \cdot h^3$$

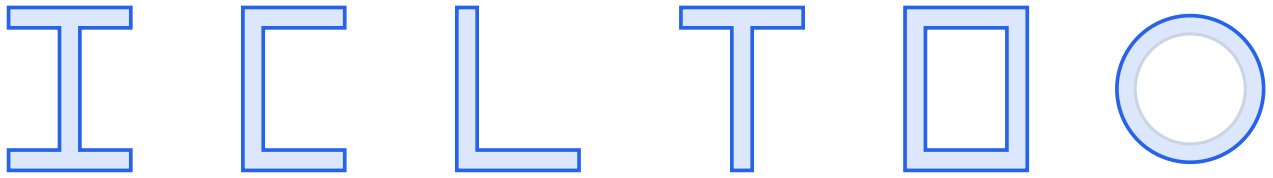
symbool	betekenis	eenheid
b	breedte van de doorsnede	cm
h	hoogte, in de richting van de belasting	cm

belasting	wat gebeurt er?	voorbeelden	zwakke plek
trek	het onderdeel wordt uitgerekt	touw van een schommel, kabel van een hangbrug, spaken van een fietswiel	scheuren, doorbreken
druk	het onderdeel wordt samengedrukt	pilaar, tafelpoot, muur, zijkant van een blikje	verpletteren; lange dunne staven **knikken** opzij
buiging	het onderdeel buigt door: boven druk, onder trek	plank met boeken, balk van een brug, duikplank	te ver doorbuigen, breken aan de trekkant
afschuiving	twee delen schuiven langs elkaar	bout tussen twee platen, nagel, papier tussen de messen van een schaar	afknippen langs een vlak
torsie	het onderdeel wordt verdraaid	as van een motor, schroevendraaier, handdoek uitwringen	scheuren in een spiraal, afbreken

vorm	stijf?	hoe maak je het stijf?
driehoek uit staven	ja	–
vierkant of rechthoek uit staven	nee, zakt scheef	diagonaal (schoor), stijve hoeken of een plaat
vakwerk	ja, als het uit driehoeken bestaat	lasten in de knooppunten: staven op trek of druk
dunne strook of kabel als diagonaal	alleen op trek	gekruist plaatsen (X)

meer stabiel als	voorbeeld
het zwaartepunt lager ligt	zware spullen onderaan in een kast; een raceauto ligt laag
het steunvlak groter is	wijd staande voeten; de uitschuifbare steunpoten van een kraanwagen
het voorwerp zwaarder is (bij een duw of wind van opzij)	het tegengewicht van een torenkraan; zandzakken op een tentvoet
het vastzit aan de grond	verankeren met pinnen of bouten

zwaartepunt vinden
symmetrisch en uit één materiaal: in het midden
vlakke figuur: twee keer ophangen, loodlijnen trekken, snijpunt
balanceren: het punt waar het voorwerp op één steunpunt in evenwicht blijft



I-profiel
balken, liggers

U-profiel
randen, rails

L-profiel
hoeken, kaders

T-profiel
steunen

koker
frames, palen

buis
fietskader, as

De zes profielen.

HET GEHEEL · 13.16

Waar constructies naartoe leiden

16/16

Constructies brengen de leerlijnen **krachten** en **ontwerpen en maken** samen: wat je hier kwalitatief leert (trek of druk, driehoek of vierkant, hoog of laag zwaartepunt), wordt in Intermediate en Expert kwantitatief. Dan bereken je de krachten in de steunen van een balk, het zwaartepunt van een samengestelde vorm, de spanning in een staaf en de kracht in elke staaf van een vakwerk.

F6 Het deeltjesmodel
Uitzetten bij warmte: waarom een brug een rol-oplegging heeft.

F10 Materialen en hun eigenschappen
Sterk op trek of op druk; stijfheid; gewapend beton; het materiaal van het kasframe.

F11 Krachten
Krachten tekenen, zwaartekracht, doorbuiging die evenredig is met de last.

F12 Hefbomen en mechanismen
Kantelen is draaien rond de kantelrand, zoals een hefboom rond zijn draaipunt.

F30 De ontwerpcyclus
Ontwerpen, testen tot het bezwijkt, verbeteren: iteratie.

F31 Technisch tekenen
Een frame tekenen in aanzichten en op schaal.

F33 Integratieproject: de meetkas
Het frame, de tafel en het dakraam komen samen in het integratieproject.

I6 Goniometrie en vectoren
De kantelhoek en de krachten in een schuine staaf uitrekenen.

I10 Moment en evenwicht
Steunpuntsreacties, zwaartepunt berekenen en kantelveiligheid in getallen.

E12 Sterkteleer
Spanning, rek, traagheidsmoment van een doorsnede en knik (Euler).

E13 Vakwerken en constructieanalyse
De kracht in elke staaf van een vakwerk berekenen met de knooppuntenmethode.

Habitat
Het kasframe krijgt diagonalen in de achterwand, de zijwanden en de bodem, en hoekplaatjes aan de open voorkant en aan het dak. Met gekruiste kabels weegt het frame ongeveer 3,4 kg, met kokers 4,5 kg. De volle kas kan ongeveer 47° kantelen voor ze omvalt; een lege kas is lichter en valt sneller om, dus zet je ze vast. Opdracht 13.11 is je ontwerpkeuze voor het portfolio.

SAMENVATTING

In het kort

- Onderdelen worden belast op trek, druk, buiging, afschuiving of torsie, vaak op meerdere tegelijk.
- Een balk die doorbuigt, wordt aan de ene kant samengedrukt en aan de andere kant uitgerekt; de middenlaag verandert niet van lengte.

- Lange, dunne drukstaven knikken; trekstaven mogen dun zijn. Een kabel kan alleen trek opnemen.
- Een driehoek uit staven is stijf, een vierkant niet. Met een diagonaal of stijve hoeken maak je een rechthoek stijf.
- Een vakwerk bestaat uit driehoeken; als de lasten in de knooppunten aangrijpen, werken de staven op trek of druk.
- Vorm telt meer dan materiaal: de stijfheid groeit met $b \cdot h^3$. Profielen zoals I, koker en buis leggen het materiaal ver van het midden.
- Het zwaartepunt is het punt waarin je de zwaartekracht kan denken. Een vlakke figuur hang je twee keer op en je trekt loodlijnen.
- Een voorwerp blijft staan zolang de loodlijn door zijn zwaartepunt binnen het steunvlak valt. Laag zwaartepunt en breed steunvlak: stabiel.
- Testen tot iets bezwijkt toont de zwakke plek; ontwerpers houden een veiligheidsfactor aan.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

trek
Belasting die een onderdeel uitrekt, zoals bij een touw of een kabel.

druk
Belasting die een onderdeel samendrukt, zoals bij een pilaar of een tafelpoot.

buiging
Belasting waarbij een onderdeel doorbuigt: de ene kant wordt samengedrukt, de andere uitgerekt.

afschuiving
Belasting waarbij twee delen langs elkaar willen schuiven, zoals een bout tussen twee platen.

torsie
Belasting waarbij een onderdeel verdraaid wordt, zoals een as of een schroevendraaier.

knik
Een lange, dunne staaf die op druk belast wordt, buigt plots opzij en bezwijkt.

vakwerk
Constructie uit staven die in knooppunten verbonden zijn en driehoeken vormen; de staven krijgen vooral trek of druk.

profiel
De vorm van de doorsnede van een balk of staaf, zoals een I, U, L, koker of buis.

zwaartepunt
Het punt waarin je je de zwaartekracht op een voorwerp kan denken; het kan ook buiten het voorwerp liggen.

steunvlak
Het vlak binnen de buitenste steunpunten van een voorwerp op de grond.

stabiel
Een voorwerp is stabiel zolang de verticale lijn door zijn zwaartepunt binnen het steunvlak valt.

bezwijken
Het moment waarop een constructie breekt, knikt of zo ver vervormt dat ze haar taak niet meer vervult.

HANDBOEK · HOOFDSTUK 14

Beweging en snelheid

Hoe ver, hoe lang, hoe snel: een beweging beschrijven met getallen en een grafiek

Alles beweegt: een fietser, een trein, het water in een slang, de wijzers van een klok. Om een beweging precies te beschrijven, heb je maar een paar begrippen nodig: **plaats**, **verplaatsing**, **afgelegde weg**, **tijd** en **snelheid**. In dit hoofdstuk reken je met de gemiddelde snelheid $v = s/t$, zet je om tussen km/h en m/s, en leer je een **(s,t)-grafiek** lezen en tekenen: hoe steiler de lijn, hoe sneller. Je meet zelf snelheden, met een meetlint en een stopwatch en met sensoren. Voor de meetkas bereken je hoe snel het water door de druppelslang stroomt.

6× uitleg · 5× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

K Krachten, beweging en constructies · W Wiskundig modelleren · O Onderzoeken en meten



Honderd meter, gemeten tot op de honderdste van een seconde.

Na dit hoofdstuk

- Je kan plaats, verplaatsing en afgelegde weg van elkaar onderscheiden.
- Je kan de gemiddelde snelheid berekenen met $v = s/t$, en de formule omvormen om de afstand of de tijd te vinden.
- Je kan snelheden omzetten tussen m/s en km/h met de factor 3,6, en uitleggen waar die factor vandaan komt.
- Je kan een (s,t)-grafiek lezen: stilstaan, sneller, trager, terugkeren, en de snelheid bepalen uit de steilheid.
- Je kan een (s,t)-grafiek tekenen uit een tabel met metingen.
- Je kan een eenparige beweging herkennen in een tabel, een figuur en een grafiek.
- Je kan een snelheid meten met een meetlint en een stopwatch, en uitleggen hoe sensoren snelheid meten.
- Je kan berekenen hoe snel het water door de druppelslang van de meetkas stroomt.

VERHAAL · 14.1

9,58 seconden

1/15

Op 16 augustus 2009, op het wereldkampioenschap atletiek in Berlijn, liep de Jamaicaan **Usain Bolt** de 100 meter in 9,58 seconden, een wereldrecord waar jarenlang niemand in de buurt kwam. Gemiddeld legde hij $100/9{,}58 = 10{,}4$ meter per seconde af, bijna 38 kilometer per uur.

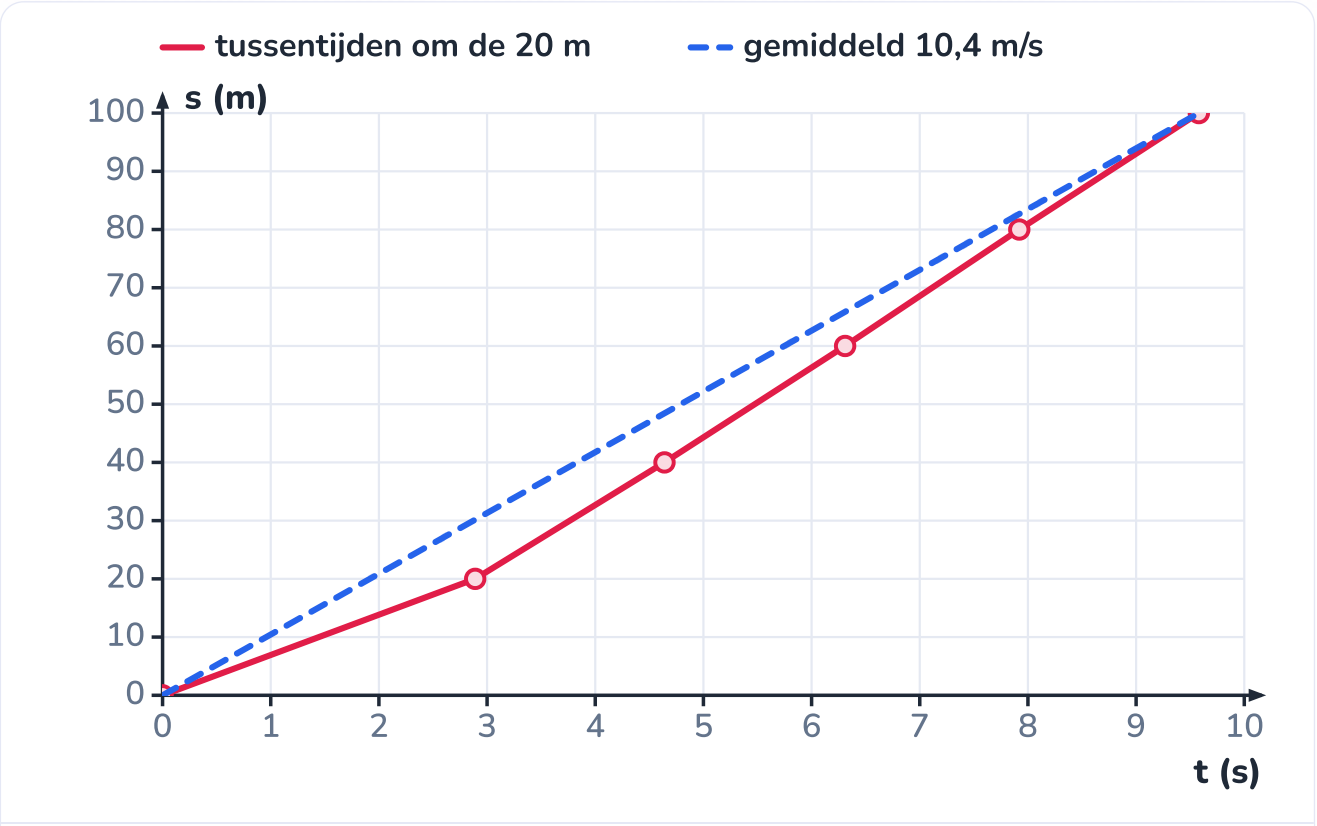
Maar zo snel liep hij niet de hele tijd. Wetenschappers filmden de race met snelle camera's en maten wanneer hij elke 20 meter passeerde. De klok start bij het startschot; Bolt reageerde na 0,15 s en moest dan nog op gang komen.

afstand (m)	0	20	40	60	80	100
tijd (s)	0	2,89	4,64	6,31	7,92	9,58

Over de eerste 20 m had hij 2,89 s nodig, over de 20 m tussen 60 en 80 m maar 1,61 s: daar liep hij $20/1{,}61 = 12{,}4\,\mathrm{m/s}$, bijna 45 km/h. In de grafiek zie je het: in het begin buigt de lijn, want elke seconde gaat hij sneller; daarna is ze bijna recht, want zijn snelheid blijft ongeveer gelijk.

Wat je hier leert lezen

Eén getal (9,58 s) vertelt weinig over hoe een beweging verloopt. Een tabel met tussentijden en een grafiek vertellen het hele verhaal: waar iemand sneller ging, waar trager, waar hij stilstond. (De tussentijden komen uit een van de officiële analyses; een tweede analyse wijkt tot 0,02 s af. Ook gemeten tijden hebben een meetfout, hoofdstuk I1.)



Rood: de gemeten tussentijden. Blauw: wie de hele race even snel zou lopen (10,4 m/s). Bolt ligt eerst achter en haalt in.

UITLEG · 14.2

Plaats, verplaatsing en afgelegde weg

2/15

Om een beweging te beschrijven, kies je eerst een **vertrekpunt** (een referentiepunt): je huis, de startlijn, het begin van de slang. Dan heb je drie verschillende begrippen:

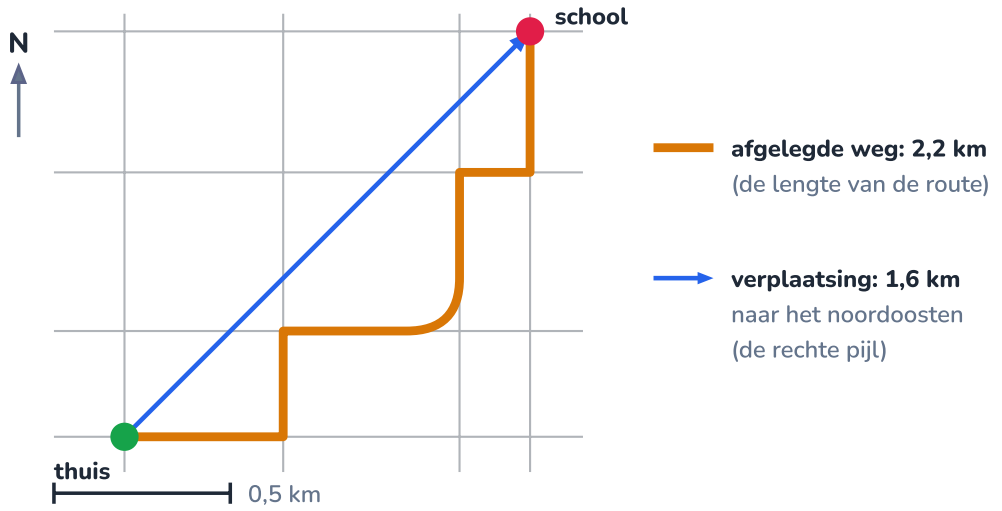
- De **plaats**: waar het voorwerp op een bepaald moment is. 'Op 360 m van huis', 'bij kilometerpaal 23'.
- De **verplaatsing**: de rechte pijl van de beginplaats naar de eindplaats. Ze heeft een grootte en een richting, en ze trekt zich niets aan van de omwegen onderweg.
- De **afgelegde weg** s: de lengte van de hele route, met alle bochten, heen en terug.

Loop je één ronde op een atletiekpiste van 400 m, dan is de afgelegde weg 400 m, maar de verplaatsing nul: je staat weer waar je begon. Rijd je met de lift naar de vijfde verdieping en terug, dan idem. De afgelegde weg is dus nooit kleiner dan de grootte van de verplaatsing.

En de tijd? Ook daar zijn er twee dingen: een **tijdstip** (een aflezing van de klok: 'om 8:05') en een **tijdsduur** (hoe lang iets duurt: '15 minuten'). In formules staat t meestal voor een tijdsduur.

Beweging is relatief

Zit je in een rijdende trein, dan sta je stil ten opzichte van je stoel, maar beweeg je aan 300 km/h ten opzichte van het perron. Of iets beweegt en hoe snel, hangt af van het vertrekpunt dat je kiest. Zeg daarom altijd ten opzichte van wat je meet.



De route langs de straten is langer dan de rechte pijl van thuis naar school.

UITLEG · 14.3

Snelheid

3/15

De **snelheid** zegt hoe snel de plaats verandert: hoeveel meter per seconde, of hoeveel kilometer per uur. Over een hele rit bereken je de **gemiddelde snelheid**:

GEMIDDELDE SNELHEID

$$v = \frac{s}{t} \quad \Leftrightarrow \quad s = v \cdot t \quad \Leftrightarrow \quad t = \frac{s}{v}$$

v = gemiddelde snelheid, s = afgelegde weg, t = tijdsduur. In SI-eenheden: s in meter, t in seconde, v in meter per seconde (m/s). In het verkeer: km en h, dus km/h.

Gemiddeld betekent: alsof je de hele tijd even snel ging. Wie in 15 minuten 4,2 km fietst, rijdt gemiddeld 16,8 km/h, ook al stond hij even stil aan een verkeerslicht en reed hij bergaf 30 km/h. De snelheid op één moment heet de **ogenblikkelijke snelheid**: dat is wat de snelheidsmeter van een auto of een fietscomputer toont.

wat beweegt?	snelheid (ongeveer)	in km/h
tuinslak	enkele mm/s	0,01
water in de druppelslang van de meetkas	0,16 m/s	0,6
wandelaar	1,4 m/s	5
fietser	5 m/s	18

wat beweegt?	snelheid (ongeveer)	in km/h
snelste sprinter ooit, gemiddeld over 100 m	10,4 m/s	37,6
auto in de bebouwde kom	14 m/s	50
auto op de snelweg	33 m/s	120
hogesnelheidstrein	83 m/s	300
passagiersvliegtuig op kruishoogte	250 m/s	900
geluid in lucht van 20 °C	343 m/s	1235
licht	300 000 km/s	ongeveer 1 miljard

Nog één stap verder

In Intermediate (hoofdstuk I7) krijgt een beweging langs een rechte een as met een plus- en een minkant. Dan gebruik je de verplaatsing in plaats van de afgelegde weg, en kan een snelheid negatief zijn: je beweegt terug. Wat hier 'gemiddelde snelheid' heet, noem je daar de gemiddelde baansnelheid.

UITGEWERKT VOORBEELD · 14.4

De fietstocht naar school

4/15

Lina fietst 4,2 km naar school en doet er 15 minuten over. Bereken haar gemiddelde snelheid in km/h en in m/s.

GEGEVEN

- $s = 4{,}2\,\text{km} = 4200\,\text{m}$
- $t = 15\,\text{min} = 0{,}25\,\text{h} = 900\,\text{s}$

GEVRAAGD

- v in km/h en in m/s

OPLOSSING

1. In km/h: zet de tijd om naar uur. 15 min is een kwart uur: $t = 0{,}25\,\text{h}$.
2. $v = \dfrac{s}{t} = \dfrac{4{,}2\,\text{km}}{0{,}25\,\text{h}} = 16{,}8\,\text{km/h}$.
3. In m/s: zet alles om naar meter en seconde. $s = 4200\,\text{m}$, $t = 15 \times 60 = 900\,\text{s}$.
4. $v = \dfrac{4200\,\text{m}}{900\,\text{s}} = 4{,}67\,\text{m/s}$.

ANTWOORD

Lina fietst gemiddeld 16,8 km/h, of 4,67 m/s.

Klopt dit? Past het bij de tabel? Een fietser rijdt typisch 15 à 20 km/h: ja. En de omzetting: $4{,}67 \times 3{,}6 = 16{,}8$. Klopt (volgend blad).

UITLEG · 14.5

km/h en m/s omzetten

5/15

In het verkeer gebruik je kilometer per uur, in de wetenschap meter per seconde. Waarom is de factor tussen de twee precies 3,6?

Wie 1 m/s gaat, legt in één uur (3600 s) $3600 \times 1\,\text{m} = 3600\,\text{m} = 3{,}6\,\text{km}$ af. Dus $1\,\text{m/s} = 3{,}6\,\text{km/h}$.

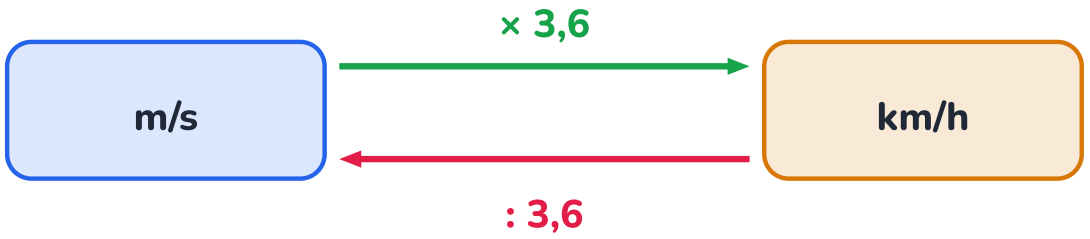
- Van **m/s naar km/h**: vermenigvuldigen met 3,6. $10\,\text{m/s} = 36\,\text{km/h}$.

- Van **km/h naar m/s**: delen door 3,6. $90\,\mathrm{km/h} = 25\,\mathrm{m/s}$.

Controle met gezond verstand: het getal in km/h is altijd **groter** dan hetzelfde tempo in m/s, want een kilometer is duizend meter, maar een uur is zelfs 3600 seconden.

Het grootste getal is het snelst

Welke is sneller: een fietser aan 30 km/h of een sprinter aan 10 m/s? De sprinter: $10 \times 3{,}6 = 36\,\mathrm{km/h}$. Vergelijk snelheden altijd in dezelfde eenheid.



1 m/s = 3600 m per uur = 3,6 km/h

Naar km/h: × 3,6. Naar m/s: : 3,6.

UITGEWERKT VOORBEELD · 14.6

Rekenen in drie richtingen

6/15

Een hogesnelheidstrein rijdt 300 km/h. (a) Hoeveel meter legt hij af per seconde? (b) Hoe lang doet hij, aan die snelheid, over 120 km? (c) Hoe ver komt hij in de 5,0 s dat een passagier met zijn ogen knippert en een foto neemt?

GEGEVEN

- $v = 300\,\mathrm{km/h}$
- $s = 120\,\mathrm{km}$
- $t = 5{,}0\,\mathrm{s}$

GEVRAAGD

- v in m/s
- t voor 120 km
- s in 5,0 s

OPLOSSING

1. (a) $v = 300/3{,}6 = 83{,}3\,\mathrm{m/s}$.
2. (b) Omvormen naar de tijd: $t = \frac{s}{v} = \frac{120\,\mathrm{km}}{300\,\mathrm{km/h}} = 0{,}40\,\mathrm{h}$. In minuten: $0{,}40 \times 60 = 24\,\mathrm{min}$.
3. (c) Omvormen naar de afstand, met de snelheid in m/s: $s = v \cdot t = 83{,}3\,\mathrm{m/s} \times 5{,}0\,\mathrm{s} = 417\,\mathrm{m}$.

ANTWOORD

(a) 83,3 m/s. (b) 24 minuten. (c) Ongeveer 420 m.

Klopt dit? Kijk telkens of de eenheden bij elkaar passen: km met km/h geeft uur, m/s met s geeft meter. Rekenen met km/h en seconden tegelijk is de meest gemaakte fout.

UITLEG · 14.7

De (s,t)-grafiek

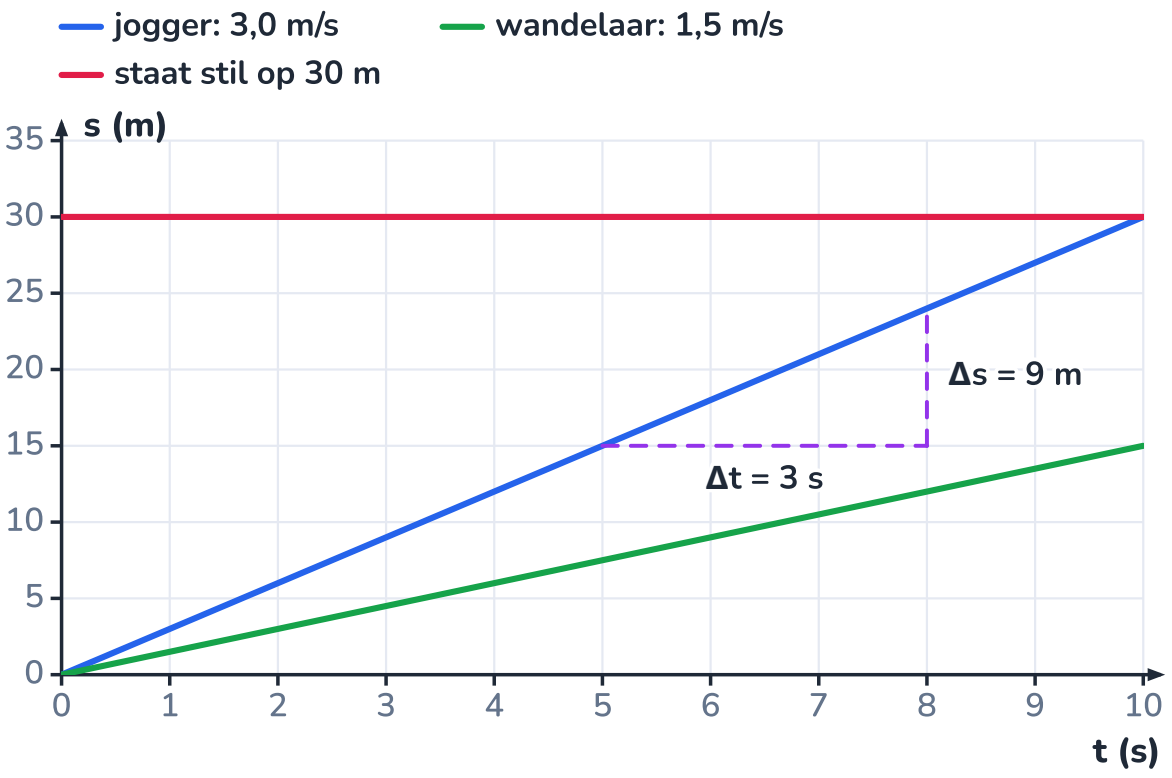
7/15

Een beweging teken je in een **(s,t)-grafiek**: de tijd horizontaal, de afgelegde weg (of de plaats) verticaal. Uit de vorm van de lijn lees je meteen hoe het voorwerp beweegt:

- **Horizontale lijn**: de afstand verandert niet, het voorwerp staat stil.
- **Rechte, schuin omhoog**: elke seconde evenveel meter erbij: een constante snelheid.
- **Steiler**: meer meter per seconde, dus sneller. **Hoe steiler, hoe sneller.**
- **Gebogen lijn**: de snelheid verandert (steiler worden: sneller gaan; vlakker worden: trager gaan).
- Staat verticaal de **afstand tot het vertrekpunt**, dan **daalt** de lijn als het voorwerp terugkeert.

De snelheid aflezen. Kies op een rechte twee punten ver uit elkaar en teken een **hellingsdriehoek**: hoeveel tijd (Δt) verstrijkt er, en hoeveel meter (Δs) komt er bij? De snelheid is $v = \Delta s / \Delta t$: de **helling** van de lijn. Voor de jogger in de figuur: $9\,\mathrm{m} / 3\,\mathrm{s} = 3{,}0\,\mathrm{m/s}$. (Het teken Δ, delta, betekent 'verschil'.)

> ⚠ **Geen landkaart**
>
> Een (s,t)-grafiek is geen tekening van de weg. Een lijn die steil omhoog gaat, is geen helling die je oploopt, maar een snelle beweging. En een fietser die een bocht neemt, geeft geen bocht in de grafiek als hij even snel blijft rijden.



De jogger (blauw) is steiler dan de wandelaar (groen): sneller. De rode lijn staat stil. De hellingsdriehoek geeft 9 m in 3 s: 3,0 m/s.

UITGEWERKT VOORBEELD · 14.8

Naar de bakker en terug

8/15

Jonas wandelt naar de bakker en terug. De grafiek toont zijn afstand tot huis. (a) Wanneer staat hij stil? (b) Bereken zijn snelheid in elk deel waarin hij beweegt, in m/s. (c) Bereken zijn gemiddelde snelheid

over de hele tocht van 22 minuten. (d) En zijn gemiddelde snelheid als je alleen de tijd telt waarin hij wandelt?



Horizontaal: stilstaan. Stijgend: weg van huis. Dalend: terug naar huis.

GEGEVEN

- de (s,t)-grafiek: 0 tot 4 min van 0 naar 360 m; 4 tot 6 min stil; 6 tot 9 min van 360 naar 720 m; 9 tot 14 min stil; 14 tot 22 min van 720 m terug naar 0

GEVRAAGD

- waar hij stilstaat
- snelheid per deel
- gemiddelde snelheid over alles
- gemiddelde snelheid tijdens het wandelen

OPLOSSING

1. (a) Waar de lijn horizontaal is: van 4 tot 6 min (hij wacht aan een rood licht) en van 9 tot 14 min (in de bakkerij).
2. (b) Deel 1: $360\,\text{m}$ in $4\,\text{min} = 240\,\text{s}$: $v = 360/240 = 1{,}5\,\text{m/s}$. Deel 2: $360\,\text{m}$ in $180\,\text{s}$: $2{,}0\,\text{m/s}$ (de steilste lijn). Terug: $720\,\text{m}$ in $480\,\text{s}$: $1{,}5\,\text{m/s}$ (de lijn daalt, want hij komt dichter bij huis).
3. (c) Afgelegde weg: $720\,\text{m}$ heen en $720\,\text{m}$ terug, samen $1440\,\text{m}$. Tijd: $22\,\text{min} = 1320\,\text{s}$. $v = 1440/1320 = 1{,}09\,\text{m/s}$.
4. (d) Hij wandelt $4 + 3 + 8 = 15\,\text{min} = 900\,\text{s}$: $v = 1440/900 = 1{,}6\,\text{m/s}$.

ANTWOORD

(a) Van 4 tot 6 min en van 9 tot 14 min. (b) 1,5 m/s, 2,0 m/s en 1,5 m/s terug. (c) 1,09 m/s. (d) 1,6 m/s.

Klopt dit? De gemiddelde snelheid (c) is kleiner dan elke wandelsnelheid, omdat de wachttijden meetellen. Let op: Jonas staat na 22 minuten weer thuis. Zijn verplaatsing is nul, maar hij heeft wel 1440 m afgelegd.

UITLEG · 14.9

De eenparige beweging

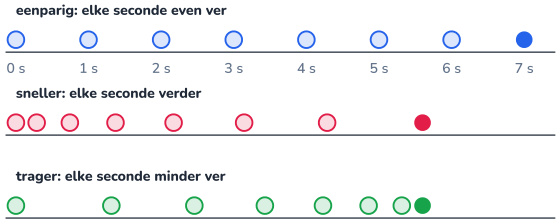
9/15

Een beweging langs een rechte lijn is **eenparig** als het voorwerp in gelijke tijden gelijke afstanden aflegt: elke seconde evenveel meter. De snelheid is dan constant, en de gemiddelde snelheid is op elk moment ook de snelheid op dat moment.

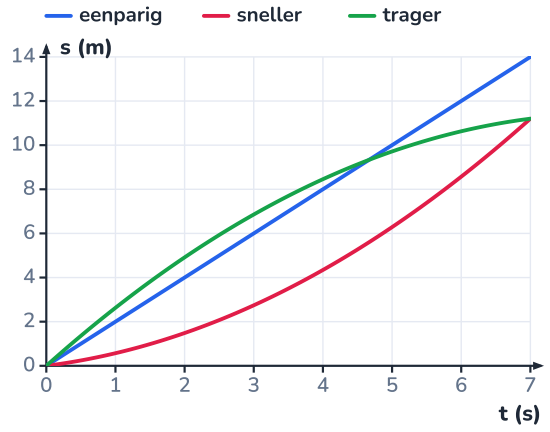
Je herkent een eenparige beweging op drie manieren:

- in een **tabel**: de afstand neemt telkens met hetzelfde getal toe als de tijd met een vaste stap toeneemt;
- op een **stroboscoopfoto** (een foto waarop een voorwerp om de zoveel tijd opnieuw belicht wordt): de posities liggen op gelijke afstanden;
- in een **(s,t)-grafiek**: een rechte. Vertrekt het voorwerp op $t = 0$ vanaf het vertrekpunt, dan gaat de rechte door de oorsprong: s is **recht evenredig** met t (hoofdstuk 4), met de snelheid als evenredigheidsconstante: $s = v \cdot t$.

Een volkomen eenparige beweging is zeldzaam: bij het vertrekken moet alles op gang komen, en wrijving remt af (hoofdstuk 11). Een trein op kruissnelheid, een roltrap, het water in een slang of een transportband komen er wel dicht bij. Een beweging waarbij de afstand per seconde groter wordt, heet **versnellend**; wordt ze kleiner, dan is ze **vertragend**. Hoe je daarmee rekent, leer je in hoofdstuk I7.



Een bal om de seconde gefotografeerd: gelijke stappen (eenparig), groter wordende stappen (sneller), kleiner wordende stappen (trager).



In de grafiek: eenparig is een rechte, sneller buigt omhoog, trager buigt af.

PROEF · 14.10

Snelheid meten met meetlint en stopwatch

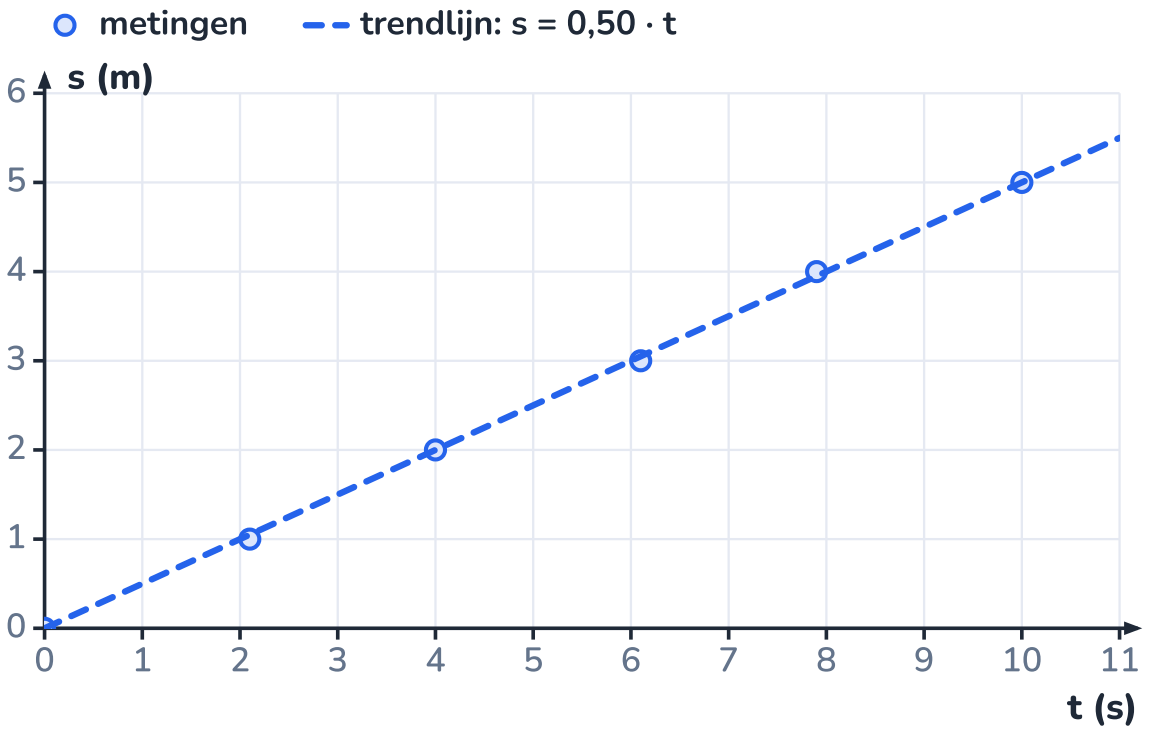
10/15

ONDERZOEKSVRAAG

Rijdt een speelgoedauto op batterijen eenparig? Hoe snel?

MATERIAAL

- speelgoedauto op batterijen (of een loopwagentje)
- meetlint, plakband om de meter te markeren
- vijf stopwatches (of smartphones), vijf tijdopnemers en een starter



De trendlijn door de oorsprong heeft een helling van 0,50 m/s.

WERKWIJZE

1. Markeer op de vloer een startlijn en om de meter een streep, tot 5 m. Aan elke streep staat een tijdopnemer.
2. Laat de auto al een halve meter vóór de startlijn vertrekken, zodat hij op snelheid is als hij de startlijn passeert.
3. Bij het passeren van de startlijn roept de starter 'nu': alle tijdopnemers starten tegelijk. Elke tijdopnemer stopt zijn stopwatch als de auto zijn streep passeert.
4. Noteer de tijden in een tabel en zet ze in een (s,t)-grafiek. Herhaal de proef twee keer en neem het gemiddelde per streep.

WAARNEMING

s (m)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
t (s)	0	2,1	4,0	6,1	7,9	10,0
tijd per meter (s)	–	2,1	1,9	2,1	1,8	2,1

De punten liggen bijna op een rechte door de oorsprong.

VERKLARING

De auto doet telkens ongeveer 2 s over een meter: de beweging is (bijna) eenparig. De snelheid lees je af als de helling van de trendlijn: $5{,}0\,\mathrm{m} / 10{,}0\,\mathrm{s} = 0{,}50\,\mathrm{m/s}$ $(1{,}8\,\mathrm{km/h})$.

De kleine verschillen (1,8 tot 2,1 s per meter) komen vooral van de **reactietijd** van de tijdopnemers, ongeveer 0,2 s (hoofdstuk 3). Daarom neem je de helling over de hele afstand, en niet de snelheid tussen twee strepen die dicht bij elkaar liggen: over 5 m weegt een fout van 0,2 s veel minder zwaar dan over 1 m.



Vijf tijdopnemers, één per meter: een (s,t)-grafiek in één rit.

UITLEG · 14.11

Snelheid meten met een sensor

11/15

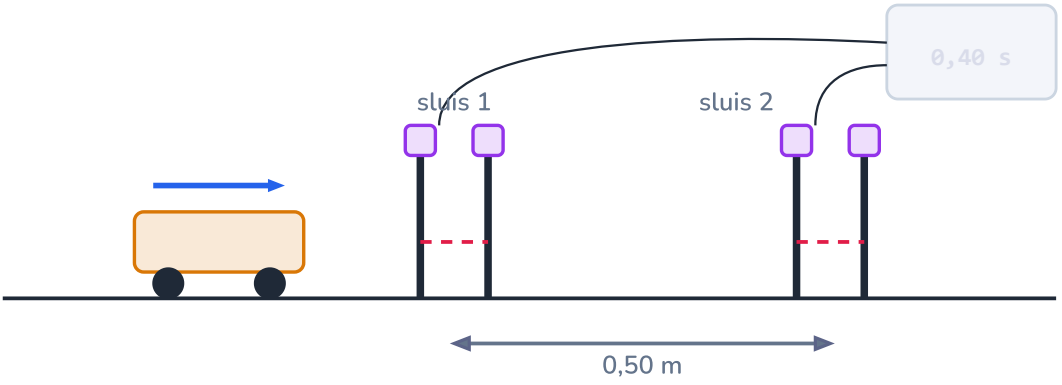
Een stopwatch in je hand is niet nauwkeuriger dan je reactietijd. Voor snelle of korte bewegingen gebruik je een **sensor**, die zelf de tijd of de plaats registreert.

methode	wat meet je?	wat krijg je?
meetlint en stopwatch	een afstand en een tijd	de gemiddelde snelheid
twee lichtsluizen	de tijd tussen twee onderbrekingen van een lichtstraal, op gekende afstand	de gemiddelde snelheid over een kort stuk: bijna de snelheid op dat ogenblik
fietscomputer	hoe vaak een magneetje aan de spaken een sensor passeert	afstand = aantal omwentelingen × omtrek; snelheid
ultrasone afstandssensor	de tijd tot een geluidsecho terugkomt	de afstand, telkens opnieuw: een (s,t)-grafiek
GPS in een smartphone	de plaats, om de seconde	afgelegde weg en snelheid
video	de plaats in elk beeldje (bv. 30 per seconde)	een (s,t)-grafiek
trajectcontrole	de tijd tussen twee camera's, kilometers uit elkaar	de gemiddelde snelheid over het traject

Bij twee **lichtsluizen** onderbreekt het voorwerp eerst de ene lichtstraal (de teller start) en dan de andere (de teller stopt). Staan ze 0,50 m uit elkaar en meet de teller 0,40 s, dan is de snelheid $0{,}50 / 0{,}40 = 1{,}25\ \mathrm{m/s}$. Hoe dichter de sluizen bij elkaar, hoe meer die gemiddelde snelheid op de snelheid op dat ogenblik lijkt, maar hoe nauwkeuriger de tijd gemeten moet worden.

Zelf bouwen

Met een microcontroller (hoofdstuk 24) en twee lichtsensoren maak je zelf een snelheidsmeter. De microcontroller telt in duizendsten van een seconde, veel nauwkeuriger dan jij met een stopwatch. In opdracht 14.15 schrijf je het programma.



Het wagentje onderbreekt eerst sluis 1 en daarna sluis 2; de teller meet de tijd ertussen.



Een fietscomputer telt hoe vaak het magneetje de sensor passeert, en kent de omtrek van het wiel.

UITGEWERKT VOORBEELD · 14.12

Trajectcontrole

12/15

Op een gewestweg geldt 70 km/h. Een trajectcontrole meet over 3,5 km. Een auto passeert de eerste camera om 14:02:10 en de tweede om 14:04:55. Reed de auto te snel?



Twee camera's, kilometers uit elkaar: ze meten de gemiddelde snelheid.

GEGEVEN

- $s = 3{,}5\,\text{km} = 3500\,\text{m}$
- tijdstippen: 14:02:10 en 14:04:55
- maximum 70 km/h

GEVRAAGD

- de gemiddelde snelheid in km/h

OPLOSSING

1 Tijdsduur = verschil van de twee tijdstippen: van 14:02:10 tot 14:04:55 is 2 min 45 s = $165\,\text{s}$.

2 $v = \dfrac{s}{t} = \dfrac{3500\,\text{m}}{165\,\text{s}} = 21{,}2\,\text{m/s}$.

3 Omzetten: $21{,}2 \times 3{,}6 = 76{,}4\,\text{km/h}$.

ANTWOORD

De auto reed gemiddeld 76 km/h over het traject: te snel.

Klopt dit? Vertragen vlak voor elke camera helpt niet: wie over het hele traject gemiddeld te snel rijdt, moet ergens nog sneller dan 76 km/h gereden hebben. Een gemiddelde zegt niets over één moment, maar wel dat de snelheid op sommige momenten minstens zo groot was.

UITGEWERKT VOORBEELD · 14.13

Habitat: hoe snel stroomt het water door de slang?

13/15

Het pompje van de meetkas pompt 8,0 mL per seconde (hoofdstuk 4). Het water gaat door een doorzichtige slang met een binnendiameter van 8,0 mm: eerst 0,60 m van de pomp in het reservoir naar de tafel, dan verder als druppelslang langs de bakjes. (a) Hoe snel stroomt het water in de aanvoerslang? (b) Hoe lang doet vers water over die 0,60 m? (c) Hoe zou je die snelheid meten?



Per seconde schuift er een zuil van 8,0 cm³ voorbij: bij een doorsnede van 0,50 cm² is die 16 cm lang.

GEGEVEN

- debiet: $8{,}0\,\text{mL/s} = 8{,}0\,\text{cm}^3/\text{s}$
- binnendiameter $8{,}0\,\text{mm}$: doorsnede $\pi \times (0{,}40\,\text{cm})^2 = 0{,}50\,\text{cm}^2$ (hoofdstuk 3)
- lengte aanvoerslang $0{,}60\,\text{m}$

GEVRAAGD

- snelheid van het water
- tijd voor 0,60 m
- een meetmethode

OPLOSSING

1. (a) Denk aan een zuil water in de slang. Per seconde schuift er $8{,}0\,\text{cm}^3$ voorbij. Die zuil heeft een doorsnede van $0{,}50\,\text{cm}^2$, dus een lengte van $8{,}0/0{,}50 = 16\,\text{cm}$.
2. Elke seconde schuift het water dus 16 cm op: $v = 16\,\text{cm/s} = 0{,}16\,\text{m/s}$. In km/h: $0{,}16 \times 3{,}6 = 0{,}57\,\text{km/h}$, trager dan wandelen.
3. (b) $t = \dfrac{s}{v} = \dfrac{60\,\text{cm}}{16\,\text{cm/s}} = 3{,}8\,\text{s}$.
4. (c) Met een spuitje een druppel voedingskleurstof (of een luchtbelletje) in de doorzichtige slang brengen en met een stopwatch meten hoe lang het kleurfront over 1,00 m doet. Verwacht: $100/16 \approx 6{,}3\,\text{s}$.

ANTWOORD

Het water stroomt 16 cm/s (0,16 m/s, ongeveer 0,6 km/h) en doet 3,8 s over de aanvoerslang.

Klopt dit? De eenheden: cm³ gedeeld door cm² geeft cm, per seconde. Na elke druppelaar stroomt er minder water door de slang, dus daar wordt het water trager. Wat dat betekent voor het laatste bakje, onderzoek je in opdracht 14.12.

NASLAG · 14.14

Overzicht: beweging en snelheid

14/15

De formule, de omzetting en de grafiekregels op één blad.

gemiddelde snelheid

$$v = \frac{s}{t} \qquad s = v \cdot t \qquad t = \frac{s}{v}$$

symbool	betekenis	eenheid
v	gemiddelde snelheid	m/s of km/h
s	afgelegde weg	m of km
t	tijdsduur	s of h

omzetten

$$1\,\text{m/s} = 3{,}6\,\text{km/h}$$

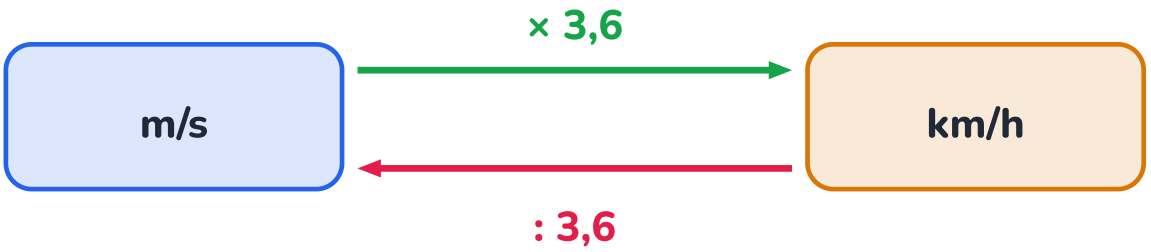
symbool	betekenis	eenheid
$\times 3{,}6$	van m/s naar km/h	
$: 3{,}6$	van km/h naar m/s	

begrip	betekenis	voorbeeld: één ronde van 400 m
plaats	waar je bent, ten opzichte van een vertrekpunt	aan de startlijn

begrip	betekenis	voorbeeld: één ronde van 400 m
verplaatsing	rechte pijl van begin naar eind	0 m
afgelegde weg	lengte van de hele route	400 m
tijdstip / tijdsduur	aflezing van de klok / hoe lang iets duurt	start om 10:00 / 80 s

in de (s,t)-grafiek	betekent
horizontale lijn	stilstaan
schuine rechte	eenparige beweging (constante snelheid)
steilere rechte	grotere snelheid
lijn die steiler wordt / vlakker wordt	sneller gaan / trager gaan
dalende lijn (afstand tot vertrekpunt)	terugkeren
helling $\Delta s/\Delta t$	de snelheid

wat beweegt?	snelheid (ongeveer)	in km/h
tuinslak	enkele mm/s	0,01
water in de druppelslang van de meetkas	0,16 m/s	0,6
wandelaar	1,4 m/s	5
fietser	5 m/s	18
snelste sprinter ooit, gemiddeld over 100 m	10,4 m/s	37,6
auto in de bebouwde kom	14 m/s	50
auto op de snelweg	33 m/s	120
hogesnelheidstrein	83 m/s	300
passagiersvliegtuig op kruishoogte	250 m/s	900
geluid in lucht van 20 °C	343 m/s	1235
licht	300 000 km/s	ongeveer 1 miljard



1 m/s = 3600 m per uur = 3,6 km/h

Omzetten tussen m/s en km/h.

HET GEHEEL · 14.15

Waar beweging naartoe leidt

15/15

Met snelheid begint de beschrijving van beweging, de **kinematica**. De leerlijn **wiskundig modelleren** is overal: een eenparige beweging is een recht evenredig verband, de snelheid is een helling, en wie ogenblikkelijke snelheid echt wil begrijpen, komt in Expert bij de afgeleide terecht. De leerlijn **onderzoeken en meten** zit in elke tijdsmeting, met haar reactietijd en haar meetfout.

F3 Meten: grootheden en eenheden
Tijd en afstand meten, de stopwatch en je reactietijd; meter en seconde als SI-eenheden.

F4 Tabellen, grafieken en verbanden
Een grafiek tekenen en een helling lezen; de eenparige beweging als recht evenredig verband.

F11 Krachten
Wat een kracht met een beweging doet: versnellen, afremmen, van richting veranderen.

F12 Hefbomen en mechanismen
Van trapomwentelingen naar km/h met de versnellingen van een fiets.

F24 De microcontroller
Een snelheidsmeter met lichtsluizen programmeren.

I7 Beweging beschrijven
Plaats met een teken, versnelling, (v,t)- en (a,t)-grafieken, vrije val en remweg.

I8 De wetten van Newton
Waarom een beweging verandert: kracht, massa en versnelling.

I33 Een mobiele robot
Afstand meten met ultrasoon geluid: s = v · t / 2.

E1 Afgeleiden: verandering meten
De ogenblikkelijke snelheid als afgeleide: de helling van de raaklijn.

E8 Beweging in twee dimensies
Snelheid als vector in twee dimensies: worpen en cirkelbewegingen.

E18 Stroming van vloeistoffen en gassen
Debiet en snelheid in leidingen: de continuïteitsvergelijking.

Habitat

Het water stroomt met 16 cm/s door de aanvoerslang van 8,0 mm (doorsnede 0,50 cm²) en doet 3,8 s over de 0,60 m tot aan de tafel. Na elke druppelaar wordt het trager. In opdracht 14.12 bereken je hoe lang vers water nodig heeft tot aan het laatste bakje, en meet je de snelheid met een druppel kleurstof. Noteer de slangmaten en je meting in je portfolio.

SAMENVATTING

In het kort

- De plaats zegt waar iets is ten opzichte van een vertrekpunt; de verplaatsing is de rechte pijl van begin naar eind; de afgelegde weg is de lengte van de hele route.
- Gemiddelde snelheid: $v = s/t$. Omgevormd: $s = v \cdot t$ en $t = s/v$. Reken altijd met passende eenheden.
- $1\,\mathrm{m/s} = 3{,}6\,\mathrm{km/h}$: van m/s naar km/h vermenigvuldig je met 3,6, terug deel je door 3,6.
- In een (s,t)-grafiek staat de tijd horizontaal. Horizontaal is stilstaan, steiler is sneller, een gebogen lijn is een veranderende snelheid.
- De snelheid is de helling van de (s,t)-grafiek: $v = \Delta s/\Delta t$, af te lezen met een hellingsdriehoek.
- Een eenparige beweging legt in gelijke tijden gelijke afstanden af: in de (s,t)-grafiek een rechte.
- Met meetlint en stopwatch meet je een gemiddelde snelheid; lichtsluizen, fietscomputers, ultrasone sensoren, GPS en video meten nauwkeuriger.
- Het water in de aanvoerslang van de meetkas stroomt 16 cm/s: debiet gedeeld door doorsnede.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

plaats
Waar een voorwerp is, ten opzichte van een gekozen vertrekpunt, bijvoorbeeld 'op 360 m van huis'.

verplaatsing
De rechte pijl van de beginplaats naar de eindplaats: een afstand met een richting. Wat er onderweg gebeurde, telt niet.

afgelegde weg
De lengte van de hele weg die een voorwerp gevolgd heeft, met alle bochten en omwegen. Symbool s.

gemiddelde snelheid
De afgelegde weg gedeeld door de tijd die daarvoor nodig was: $v = s/t$.

ogenblikkelijke snelheid
De snelheid op één moment, zoals een snelheidsmeter ze toont.

(s,t)-grafiek
Grafiek met de tijd horizontaal en de afgelegde weg (of de plaats) verticaal. Hoe steiler, hoe sneller.

eenparige beweging
Beweging langs een rechte waarbij het voorwerp in gelijke tijden gelijke afstanden aflegt: de snelheid is constant.

lichtsluis
Sensor die meet wanneer een voorwerp een lichtstraal onderbreekt; met twee lichtsluizen meet je een snelheid.

F FUNDAMENTAL · DEEL F4 · ENERGIE

HANDBOEK · HOOFDSTUK 15

Energie: vormen en omzettingen

Wat energie is, in welke vormen ze voorkomt, en waarom er bij elke omzetting 'verlies' is zonder dat er iets verdwijnt

Een fiets die bergaf rolt, een batterij die leegloopt, een plant die groeit in de zon: telkens verandert **energie** van vorm. In dit hoofdstuk leer je de energievormen herkennen, **energieketens** tekenen en rekenen met de eenheid van energie, de **joule**. Je ontdekt een van de belangrijkste wetten uit de natuurwetenschappen: energie gaat nooit verloren. En toch 'verliest' elk toestel energie. Met het **rendement** en het **Sankey-diagram** zie je waar ze naartoe gaat. Voor de meetkas volg je de energie van de zon tot in de plant.

8× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

Energie · Wiskundig modelleren



Zonlicht wordt suiker, warmte en een beetje elektriciteit: de meetkas zit vol energieomzettingen.

Na dit hoofdstuk

- Je kan acht energievormen benoemen en in voorbeelden herkennen.
- Je kan een energieketen opstellen voor een toestel of een situatie, en bij elke omzetting zeggen welke vorm erin gaat en welke eruit komt.
- Je kan de wet van behoud van energie in eigen woorden uitleggen en gebruiken om te verklaren waar 'verloren' energie naartoe gaat.
- Je kan energie uitdrukken in joule, kilojoule en megajoule, kilocalorieën en kilowattuur omzetten, en je hebt een gevoel voor hoe groot die hoeveelheden zijn.
- Je kan berekenen hoeveel energie nodig is om iets op te tillen: $E = F_z \cdot h$.
- Je kan het rendement van een omzetting in procent berekenen en uitleggen wat het betekent.
- Je kan een Sankey-diagram lezen en zelf op schaal tekenen.
- Je kan de energieketen van de zon tot de plant in de meetkas beschrijven en in een Sankey-diagram tonen.

VERHAAL · 15.1

Een schoepenrad in een vat water

1/17

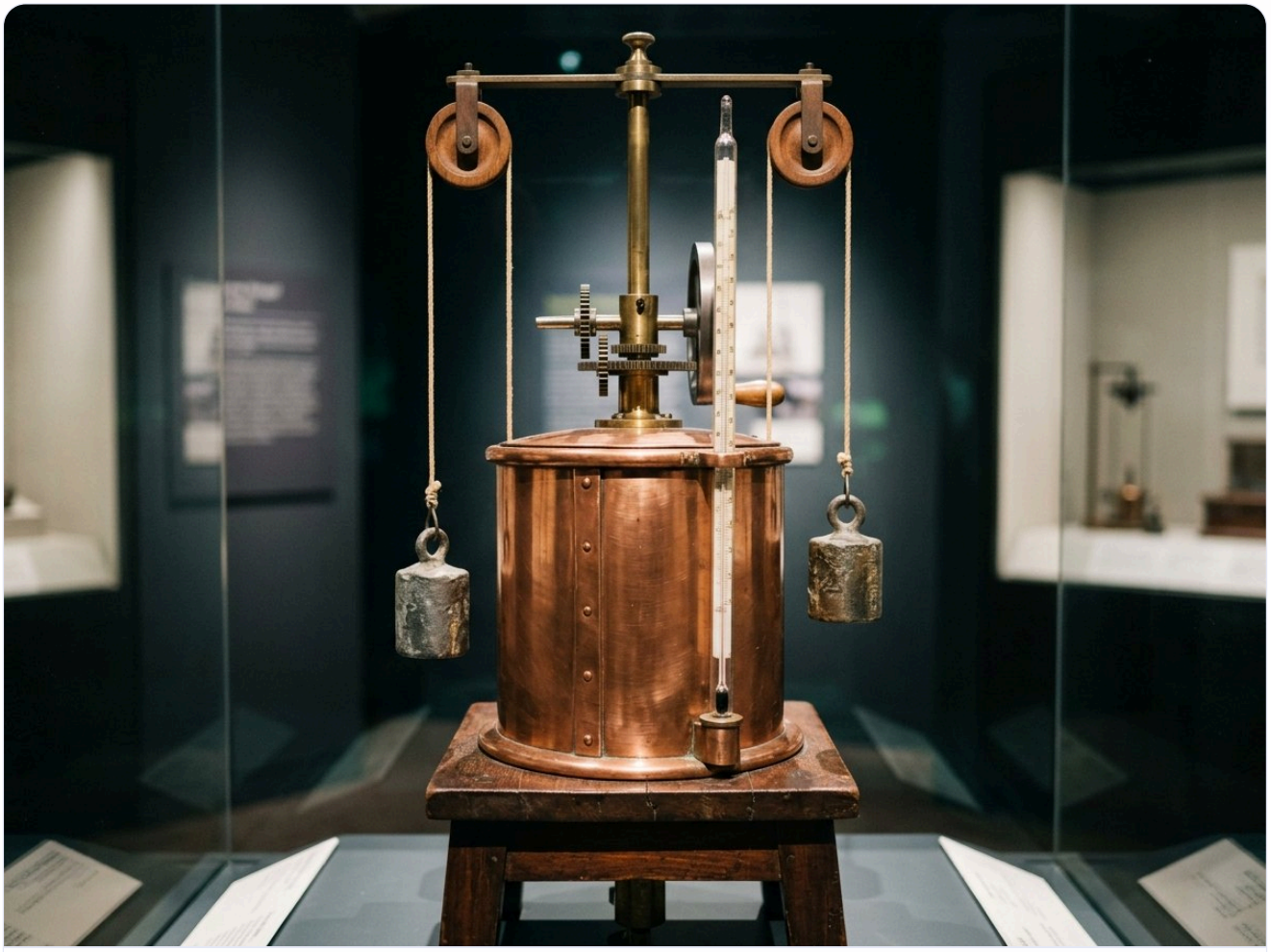
In de jaren 1840 stelde **James Prescott Joule**, de zoon van een brouwer uit Salford bij Manchester, een vraag die vreemd klinkt: kan je water opwarmen door erin te roeren?

Hij bouwde een goed afgesloten vat met water, met binnenin een schoepenrad. Twee gewichten aan touwen zakten langzaam naar beneden en deden het rad draaien. De schoepen woelden het water om, en het water werd warmer: niet veel, een fractie van een graad. Joule mat die kleine temperatuurstijging met een heel nauwkeurige thermometer en herhaalde de proef vele keren, ook op andere manieren: door water door nauwe buisjes te persen, door lucht samen te drukken.

Zijn besluit: als de gewichten een bepaalde afstand zakken, komt er altijd **evenveel warmte** bij, hoe je het ook doet. Beweging, hoogte en warmte zijn dus geen losse dingen, maar verschillende vormen van één grootheid die je kan omrekenen: **energie**. Rond dezelfde tijd kwamen ook de Duitse arts Julius Robert Mayer en de Duitse natuurkundige Hermann von Helmholtz tot dat inzicht. Samen legden ze de basis voor de **wet van behoud van energie**. De eenheid van energie draagt de naam van de brouwerszoon: de **joule** (J).

Waarom dit verhaal ertoe doet

Joule deed wat je in hoofdstuk 2 leerde: één ding veranderen (hoe ver de gewichten zakken), heel precies meten (de temperatuur), herhalen en een patroon zoeken. Met een vergelijkbare proef, met zand in een fles, zie je het zelf in dit hoofdstuk.



Zakkende gewichten draaien het schoepenrad; het water wordt een fractie van een graad warmer.

UITLEG · 15.2

Wat is energie?

2/17

Energie zie je niet, maar je merkt ze wel aan wat ze doet. Er is energie nodig om iets in **beweging** te brengen, iets **op te tillen**, iets **op te warmen**, iets te laten **oplichten** of **geluid** te maken, en om stoffen te

laten **veranderen** of een plant te laten **groeien**. Kort gezegd: **energie is wat nodig is om iets te laten gebeuren**.

Energie is geen stof. Je kan geen liter energie in een fles gieten. Wel kan ze **opgeslagen** zitten in iets: in benzine, in een boterham, in een batterij, in water dat hoog in een stuwmeer staat. En ze kan **onderweg** zijn van de ene plaats naar de andere: als licht van de zon naar de aarde, als elektrische stroom door een kabel, als warmte van een radiator naar de lucht.

In hoofdstuk 1 leerde je elk toestel bekijken als een systeem met input, proces en output. Energie is een van de drie dingen die door een systeem stromen (naast materie en informatie). In dit hoofdstuk volg je die energiestroom: waar komt hij vandaan, in welke vorm, en waar gaat hij naartoe?

Energie en kracht zijn hetzelfde

In de dagelijkse taal lopen ze door elkaar ('ik heb geen kracht meer', 'ik heb geen energie meer'), maar in STEM zijn het twee verschillende grootheden. Een **kracht** is een duw of een trek, in newton (hoofdstuk 11). **Energie** is wat nodig is om iets te doen, in joule. Een boek dat op een tafel ligt, duwt al jaren met een kracht op de tafel, maar er wordt geen energie overgedragen: er gebeurt niets. Pas als een kracht iets over een afstand verplaatst, gaat er energie over.



Stoom, gloeiende draden, een rijdend speelgoedje, een stuiterende bal: overal is energie aan het werk.

UITLEG · 15.3

Acht energievormen

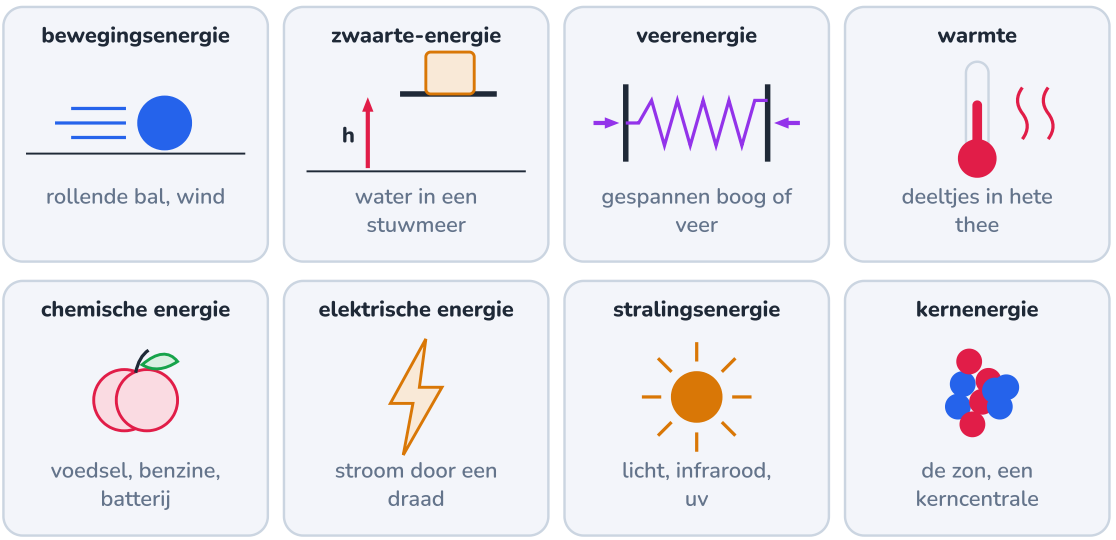
3/17

Energie komt in verschillende **vormen** voor. Welke vorm het is, hangt af van waar de energie 'zit'. In deze opleiding gebruiken we acht vormen:

energievorm	waar zit de energie?	voorbeelden	in de meetkas
bewegingsenergie	in alles wat beweegt	rollende bal, wind, stromend water; ook geluid (trillende deeltjes)	water in de druppelslang, de draaiende pomp
zwaarte-energie	in alles wat hoog ligt, door de aantrekking van de aarde	water in een stuwmeer, een appel aan de boom	het opengeduwde dakraam; water dat omhoog gepompt is
veerenergie	in iets wat elastisch vervormd is	gespannen boog, opgewonden veer, uitgerekt elastiek	de veer in een drukknop
warmte (thermische energie)	in de beweging van de deeltjes van een stof (hoofdstuk 6)	hete thee, warme lucht, je lichaam	de warme lucht en grond na een zonnige dag
chemische energie	in stoffen; ze komt vrij bij een chemische reactie	voedsel, benzine, hout, aardgas, een batterij	de suiker in de planten, de batterij
elektrische energie	in bewegende lading (hoofdstuk 19)	stroom uit het stopcontact of uit een batterij	de stroom naar de ledstrip, de pomp en de microcontroller
stralingsenergie	in licht en andere straling	zonlicht, de warmte die je van een kampvuur voelt	zonlicht door de wand, het licht van de ledstrip
kernenergie	in de kernen van atomen	de zon (kernfusie), een kerncentrale (kernsplijting)	onrechtstreeks: alle zonlicht

Twee opmerkingen. **Geluid** is geen aparte vorm: het is een trilling van deeltjes die zich voortplant, dus bewegingsenergie die onderweg is. En in andere boeken zie je soms andere namen: *kinetische energie* voor bewegingsenergie, *potentiële energie* voor opgeslagen energie door de plaats of de vorm (zwaarte-energie en veerenergie), *mechanische energie* voor beweging en hoogte samen. In Intermediate (hoofdstuk I9) krijgen bewegings- en zwaarte-energie een formule.

> **Warmte of thermische energie?**
> In de dagelijkse taal zeg je 'warmte' voor de energie die in een warm voorwerp zit. Strikt genomen heet die energie van de bewegende deeltjes **thermische energie**, en is **warmte** de energie die van een warm naar een koud voorwerp *stroomt*. Dat verschil wordt belangrijk in hoofdstuk 16. In dit hoofdstuk gebruiken we 'warmte' voor allebei.



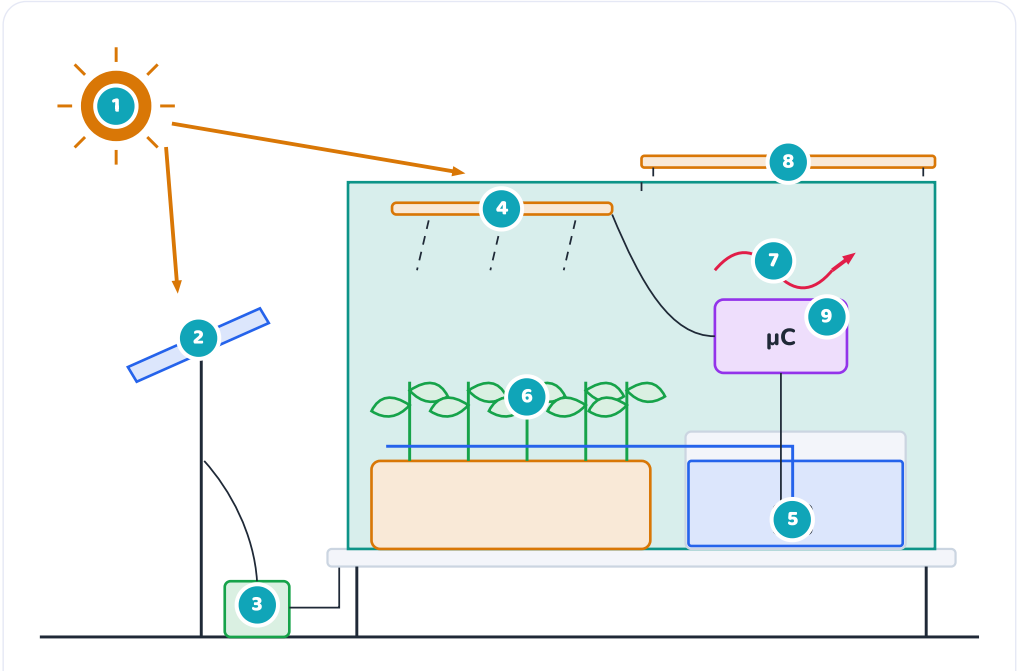
Acht vormen, elk met een voorbeeld. Bij bijna elke omzetting komt er ook warmte vrij.

ONTLEED · 15.4

Energie in de meetkas

4/17

In de meetkas zit bijna elke energievorm, en overal wordt energie omgezet. Volg de nummers: van de zon, via het zonnepaneel en de batterij, naar de ledstrip, de pomp en de planten.



Zijaanzicht van de meetkas met zonnepaneel en batterij. Rode golf: warme lucht onder het dak.

1 Zon
In de kern van de zon smelten atoomkernen samen (kernfusie). Die kernenergie komt vrij als stralingsenergie: zichtbaar licht, infrarood en uv.

2 Zonnepaneel
Zet stralingsenergie rechtstreeks om in elektrische energie: ongeveer een vijfde van het licht. De rest wordt warmte (hoofdstuk 17).

3 Batterij
Bij het laden wordt elektrische energie chemische energie; bij het ontladen omgekeerd. Zo is er ook 's nachts energie.

4 Ledstrip
Elektrische energie wordt licht voor de planten, en warmte. Hoeveel van elk, zie je in hoofdstuk 21.

5 Pomp
Elektrische energie wordt bewegingsenergie van het water, en zwaarte-energie als het water omhoog gaat. In de slang en de druppelaars wordt die door wrijving warmte.

6 Planten
Maken met licht suiker uit water en koolstofdioxide (fotosynthese, hoofdstuk 27): stralingsenergie wordt chemische energie. Maar dat is maar een heel klein deel van het licht.

7 Lucht, grond en water
Licht dat niet in suiker terechtkomt, wordt warmte: de grond, het water en de lucht warmen op. Warme lucht stijgt en blijft onder het dak hangen (hoofdstuk 16).

8 Dakraam
Wie het dakraam openduwt (hoofdstuk 12), geeft het zwaarte-energie. Als het dicht valt, wordt die bewegingsenergie en dan warmte en geluid.

9 Microcontroller
Gebruikt elektrische energie om te meten en te beslissen. Alles wat hij gebruikt, wordt uiteindelijk warmte.

UITLEG · 15.5

Energieketens

5/17

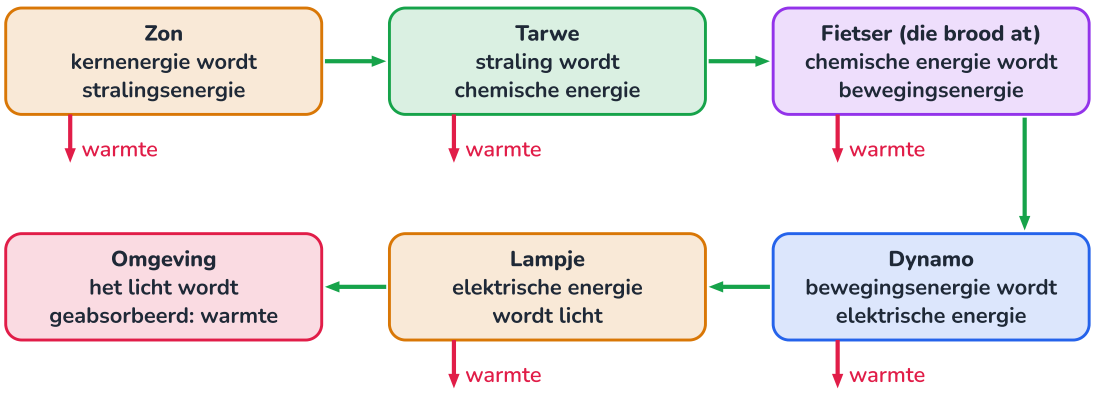
Energie verandert zelden maar één keer van vorm. Meestal loopt ze door een hele **energieketen**: een reeks **omzettingen** na elkaar. Elke omzetting gebeurt in iets: een toestel, een plant, een lichaam. Dat noemen we de **omzetter**.

Neem het lampje van een fiets met dynamo. Waar komt het licht vandaan? Uit de dynamo, die draait omdat het wiel draait. Het wiel draait omdat de fietser trapt. De fietser haalt zijn energie uit zijn eten, bijvoorbeeld brood. Het graan voor dat brood groeide in de zon. En de zon straalt omdat in haar kern atoomkernen samensmelten. Van achter naar voor gelezen is dat de keten in de figuur.

Zo'n keten teken je met **blokken** (de omzetters) en **pijlen** (de energie die van de ene naar de volgende gaat). Schrijf in elk blok welke vorm erin gaat en welke eruit komt. Bij bijna elke omzetting komt er ook **warmte** vrij die niet verder gaat in de keten: teken die als een zijpijl.

Bijna alles begint bij de zon

Voedsel, hout, wind (de zon warmt de lucht ongelijk op), waterkracht (de zon laat water verdampen dat later als regen hoog in de bergen valt) en zelfs steenkool, aardolie en aardgas (resten van planten en plankton die miljoenen jaren geleden zonlicht opvingen): allemaal zonne-energie. Er zijn maar enkele uitzonderingen: kernenergie in uranium, aardwarmte uit het binnenste van de aarde, en de getijden, die vooral door de maan komen.



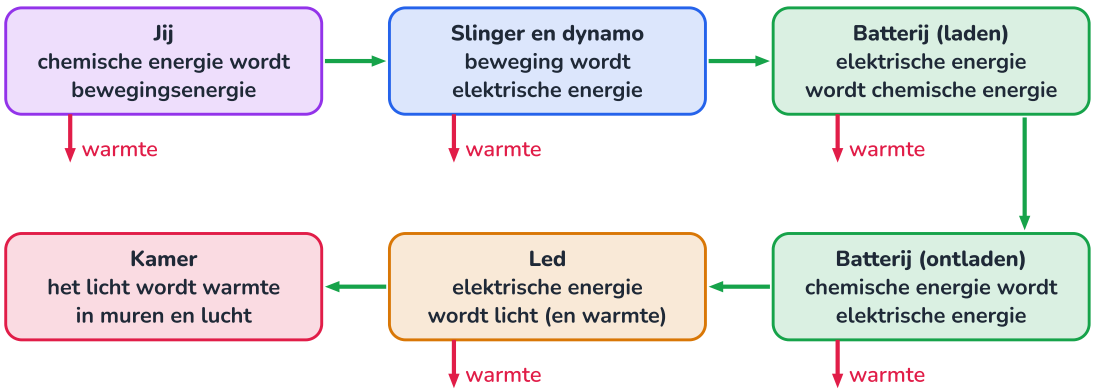
Zes omzetters na elkaar. Bij elke stap komt er warmte vrij (rode pijlen).

UITGEWERKT VOORBEELD · 15.6

De keten van een zaklamp met een slinger

6/17

Een noodzaklamp heeft een slinger. Je draait een minuut aan de slinger; daarna kan de lamp een half uur branden, ook als je niet meer draait, want binnenin zit een oplaadbare batterij. Stel de energieketen op, van je spieren tot het licht, en zeg waar er energie 'verloren' gaat.



De batterij komt twee keer voor: eerst slaat ze energie op, later geeft ze die weer af.

GEGEVEN

- een zaklamp met slinger, dynamo, oplaadbare batterij en led

GEVRAAGD

- de energieketen: omzetters en energievormen
- waar er warmte vrijkomt

OPLOSSING

1. **Zoek de omzetters**, in de volgorde waarin de energie ze doorloopt: je spieren, de slinger met de dynamo, de batterij (twee keer: laden en ontladen), de led.
2. **Schrijf per omzetter de vorm erin en eruit.** Spieren: chemische energie (uit je voedsel) wordt bewegingsenergie. Dynamo: bewegingsenergie wordt elektrische energie. Batterij bij het laden: elektrische energie wordt chemische energie. Batterij bij het ontladen: chemische energie wordt weer elektrische energie. Led: elektrische energie wordt licht.
3. **Waar komt er warmte vrij?** Bij elke stap: je spieren worden warm, de tandwielen in de slinger en de dynamo worden warm door wrijving, de batterij wordt een beetje warm bij het laden en het ontladen, en de led wordt warm.
4. **En het licht zelf?** Het valt op de muren en wordt daar opgenomen: ook het licht eindigt als warmte in de kamer.

ANTWOORD

Chemische energie (spieren) → bewegingsenergie (slinger) → elektrische energie (dynamo) → chemische energie (batterij laden) → elektrische energie (batterij ontladen) → licht (led) → warmte (kamer). Bij elke omzetting gaat een deel als warmte naar de omgeving.

Klopt dit? Kijk of elke pijl in je keten bij een omzetter hoort, en of de vorm die een blok verlaat, dezelfde is als de vorm die het volgende blok binnenkomt. Merk op dat de keten eindigt in warmte: dat is bijna altijd zo.

De wet van behoud van energie

Wat Joule ontdekte, is een van de belangrijkste wetten uit de natuurwetenschappen:

WET VAN BEHOUD VAN ENERGIE

$$\text{energie erin} = \text{energie eruit}$$

Energie kan niet ontstaan en niet verdwijnen. Ze kan alleen van vorm veranderen, of van het ene voorwerp naar het andere gaan.

Je kan het vergelijken met een boekhouding. Stort je geld van je spaarrekening naar je zichtrekening, dan verandert er niets aan je totaal. Zo is het ook met energie: bij elke omzetting verschuift ze naar een andere 'rekening' (een andere vorm), maar het totaal blijft gelijk. Er is nog nooit een uitzondering op deze wet gevonden.

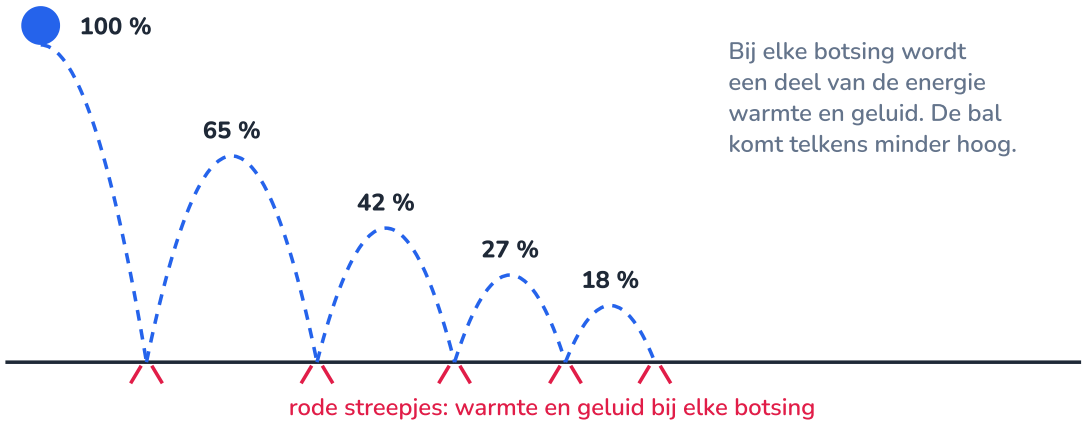
Maar waarom komt een stuiterbal dan telkens minder hoog? Waar blijft die energie? Bij elke botsing worden de bal en de vloer een heel klein beetje **warmer**, en er ontstaat **geluid** (dat ook eindigt als warmte). De energie is dus niet weg, maar ze zit nu in een vorm die de bal niet meer omhoog helpt: verspreid over miljarden trillende deeltjes in de bal, de vloer en de lucht.

Energie raakt op

We zeggen 'de batterij is leeg' of 'ik heb energie verbruikt'. De energie is niet weg: ze is omgezet, meestal in warmte die zich over de omgeving verspreidt. Wat wel opraakt, is energie in een **bruikbare** vorm: warmte die verspreid is over een hele kamer, kan je niet meer gebruiken om een lamp te laten branden. Energie 'verbruiken' betekent dus: bruikbare energie omzetten in minder bruikbare.

Geen eeuwig draaiende machine

Uitvinders probeerden eeuwenlang een **perpetuum mobile** te bouwen: een machine die zonder brandstof of stroom eeuwig blijft draaien, en liefst nog iets aandrijft. Het lukte nooit, en de wet van behoud van energie zegt waarom. Een machine kan niet meer energie afgeven dan ze krijgt, en door de wrijving wordt er altijd een deel warmte. Een hefboom of een tandwiel kan een kracht groter maken (hoofdstuk 12), maar nooit de energie.



Elke botsing zet 35 % van de energie om in warmte en geluid; de bal komt telkens minder hoog.

PROEF · 15.8

Warmte uit beweging: zand schudden

8/17

ONDERZOEKSVRAAG

Wordt zand warmer als je het lang en hard schudt, zoals het water in de proef van Joule?

MATERIAAL

- twee gelijke plastic flessen van 0,5 L met schroefdop
- 2 × 300 g droog zand
- digitale thermometer met een sonde (0,1 °C)
- stopwatch
- ovenwanten of een dikke handdoek
- keukenweegschaal

Veiligheid

Draai de doppen goed dicht en schud niet in de buurt van iemands hoofd.



Links wordt geschud, rechts staat de controlefles: alleen het geschudde zand wordt warmer.

WERKWIJZE

1. Doe in elke fles 300 g zand. Laat beide flessen een half uur in het lokaal staan, zodat ze dezelfde temperatuur krijgen.
2. Meet de temperatuur in het midden van het zand, in beide flessen. Sluit de flessen.
3. Fles A: schud ze drie minuten lang zo hard mogelijk op en neer, met ovenwanten aan, zodat de warmte van je handen het zand niet opwarmt. Wissel elke minuut van schudder.

4 Fles B blijft op tafel staan: dat is de **controle**.

5 Meet meteen daarna opnieuw de temperatuur in beide flessen. Herhaal de proef met zes minuten schudden.

WAARNEMING

	voor	na 3 min	stijging	na 6 min	stijging
fles A (geschud)	19,6 °C	20,9 °C	+ 1,3 °C	22,1 °C	+ 2,5 °C
fles B (controle)	19,6 °C	19,7 °C	+ 0,1 °C	19,7 °C	+ 0,1 °C

Voorbeeld van resultaten in een klas. Het geschudde zand wordt merkbaar warmer, het zand in de controlefles nauwelijks.

VERKLARING

Bij elke schudbeweging krijgt het zand **bewegingsenergie**. Als het zand tegen de bodem en de dop botst en de korrels over elkaar schuren, wordt die bewegingsenergie **warmte**: de deeltjes van het zand gaan heviger trillen (hoofdstuk 6). Twee keer zo lang schudden geeft ongeveer twee keer zoveel warmte. De controlefles toont dat het niet aan het lokaal of aan je handen ligt.

Waarom zo weinig? Eén schudbeweging geeft het zand hooguit ongeveer 1 J. Om 300 g zand één graad warmer te maken, is ongeveer 250 J nodig. Drie minuten schudden, drie keer per seconde, geeft ongeveer 500 schudbewegingen: net genoeg voor een à twee graden. Een deel van de warmte gaat bovendien naar de fles en de lucht. Dat is precies wat Joule ontdekte: een beetje warmte stemt overeen met heel veel beweging.

UITLEG · 15.9

De joule: hoeveel is dat?

Energie meet je in **joule** (J). Hoeveel is dat? De eenvoudigste manier om het te voelen is iets optillen. Om iets op te tillen, moet je de zwaartekracht overwinnen (hoofdstuk 11) over een zekere hoogte. De energie die je daarvoor nodig hebt, zit daarna als zwaarte-energie in het voorwerp:

ENERGIE OM IETS OP TE TILLEN

$$E = F_z \cdot h$$

E in joule (J), F_z = de zwaartekracht in newton (N), met $F_z = m \cdot g$ en $g = 9{,}81\,\mathrm{N/kg}$; h = de hoogte in meter (m). Dus: $1\,\mathrm{J} = 1\,\mathrm{N} \cdot 1\,\mathrm{m}$.

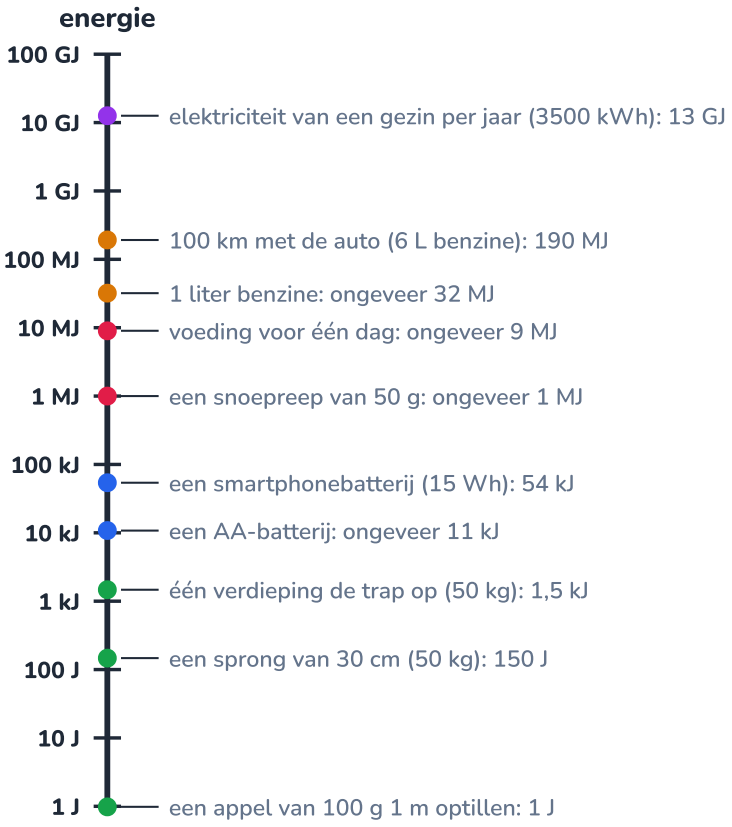
Een appel van 100 g ondervindt een zwaartekracht van ongeveer 1 N. Til je hem 1 m op, dan heb je ongeveer **1 joule** energie gebruikt. Een joule is dus weinig. Daarom gebruik je vaak veelvouden:

eenheid	symbool	in joule	waar je ze tegenkomt
joule	J	1 J	de SI-eenheid van energie
kilojoule	kJ	1000 J	voedingsetiketten
megajoule	MJ	1 000 000 J	brandstoffen, voeding per dag
gigajoule	GJ	1 000 000 000 J	verwarming van een huis per jaar
kilocalorie	kcal	4184 J (ongeveer 4,2 kJ)	voedingsetiketten, naast kJ
kilowattuur	kWh	3 600 000 J = 3,6 MJ	de elektriciteitsfactuur (hoofdstuk 21)

Op voedingsetiketten staat de energie in kJ en in kcal (kilocalorie, een oudere eenheid): $1\,\mathrm{kcal} = 4{,}184\,\mathrm{kJ}$. Op je elektriciteitsfactuur staat ze in kilowattuur: $1\,\mathrm{kWh} = 3{,}6\,\mathrm{MJ}$. Waar dat getal vandaan komt, leer je in hoofdstuk 21.

De energieladder

In de figuur is elke stap naar boven tien keer meer energie. Zo passen een appel en de elektriciteit van een heel gezin op één ladder: tien stappen, of een factor tien miljard. Een snoepreep bevat evenveel energie als een miljoen keer een appel één meter optillen.



De energieladder (orde van grootte). Elke streep is een factor tien: een logaritmische schaal.

UITGEWERKT VOORBEELD · 15.10

Hoeveel trappen voor één snoepreep?

10/17

Lotte (50 kg) eet een snoepreep. Op de wikkel staat: 1000 kJ per reep. Hoeveel verdiepingen van 3,0 m hoog moet ze de trap op lopen om die energie om te zetten in zwaarte-energie?

GEGEVEN

- $m = 50\,\text{kg}$
- $h = 3{,}0\,\text{m}$ per verdieping
- energie in de reep: $1000\,\text{kJ}$

GEVRAAGD

- het aantal verdiepingen

OPLOSSING

1. **Zwaartekracht op Lotte**: $F_z = m \cdot g = 50\,\text{kg} \times 9{,}81\,\text{N/kg} = 490{,}5\,\text{N}$.
2. **Energie per verdieping**: $E = F_z \cdot h = 490{,}5\,\text{N} \times 3{,}0\,\text{m} = 1471{,}5\,\text{J} \approx 1{,}5\,\text{kJ}$.
3. **Zelfde eenheid**: de reep bevat $1000\,\text{kJ} = 1\,000\,000\,\text{J}$.
4. **Delen**: $1\,000\,000 / 1471{,}5 \approx 680$ verdiepingen.

ANTWOORD

Om de energie van één reep in zwaarte-energie om te zetten, moet Lotte ongeveer 680 verdiepingen hoog klimmen: een toren van ongeveer 2 km.

Klopt dit? Dat lijkt onwaarschijnlijk veel, en het klopt ook niet helemaal: haar spieren zetten maar ongeveer een kwart van de energie om in beweging, de rest wordt warmte (zie *rendement*, verder in dit hoofdstuk). In werkelijkheid is de reep dus al 'op' na ongeveer $680/4 = 170$ verdiepingen. Nog altijd veel: voedsel bevat heel veel energie.

UITLEG · 15.11

Nuttige en verloren energie: het rendement

Een toestel is gemaakt om energie om te zetten in één bepaalde vorm: een lamp in licht, een motor in beweging, een waterkoker in warmte van het water. Dat deel heet de **nuttige energie**. De rest gaat meestal als warmte naar de omgeving: de **verloren energie**. 'Verloren' betekent hier niet 'verdwenen' (dat kan niet), maar 'niet gebruikt waarvoor het toestel dient'.

Hoe goed een toestel is in die omzetting, zegt het **rendement**: welk deel van de energie die je erin stopt, komt eruit in de nuttige vorm?

RENDEMENT

$$\text{rendement} = \frac{\text{nuttige energie}}{\text{toegevoerde energie}} \times 100\,\%$$

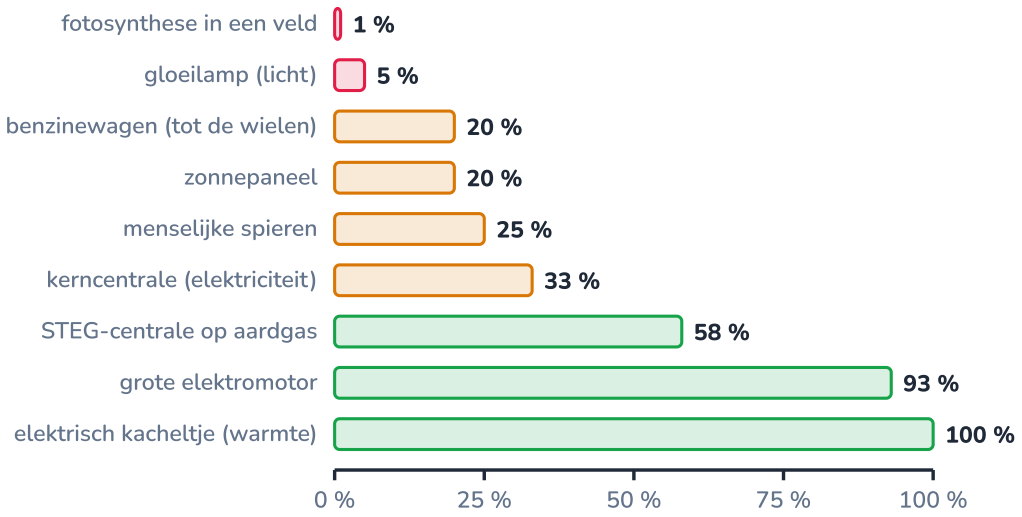
Beide energieën in dezelfde eenheid. Het rendement ligt altijd tussen 0 en 100 %. In formules schrijf je het rendement vaak met de Griekse letter η (èta).

Een rendement van 30 % betekent: van elke 100 J die erin gaat, komt er 30 J nuttig uit, en worden 70 J warmte (of een andere vorm die je niet nodig had). Je kan het rendement ook omgekeerd gebruiken: weet je het rendement en de toegevoerde energie, dan is de nuttige energie = rendement × toegevoerde energie.

Een rendement van meer dan 100 %

Kan niet: er kan nooit meer nuttige energie uitkomen dan er in totaal ingaat. Zie je ergens '110 %' staan, dan wordt er iets anders bedoeld, of ontbreekt er een energiebron in de telling. Een warmtepomp bijvoorbeeld haalt warmte uit de buitenlucht die niet in de rekening zit (hoofdstuk E16).

Wat 'nuttig' is, hangt af van wat je wil. Bij een gloeilamp is de warmte verloren energie; bij een elektrisch kacheltje is diezelfde warmte net de bedoeling: het rendement is dan (bijna) 100 %.



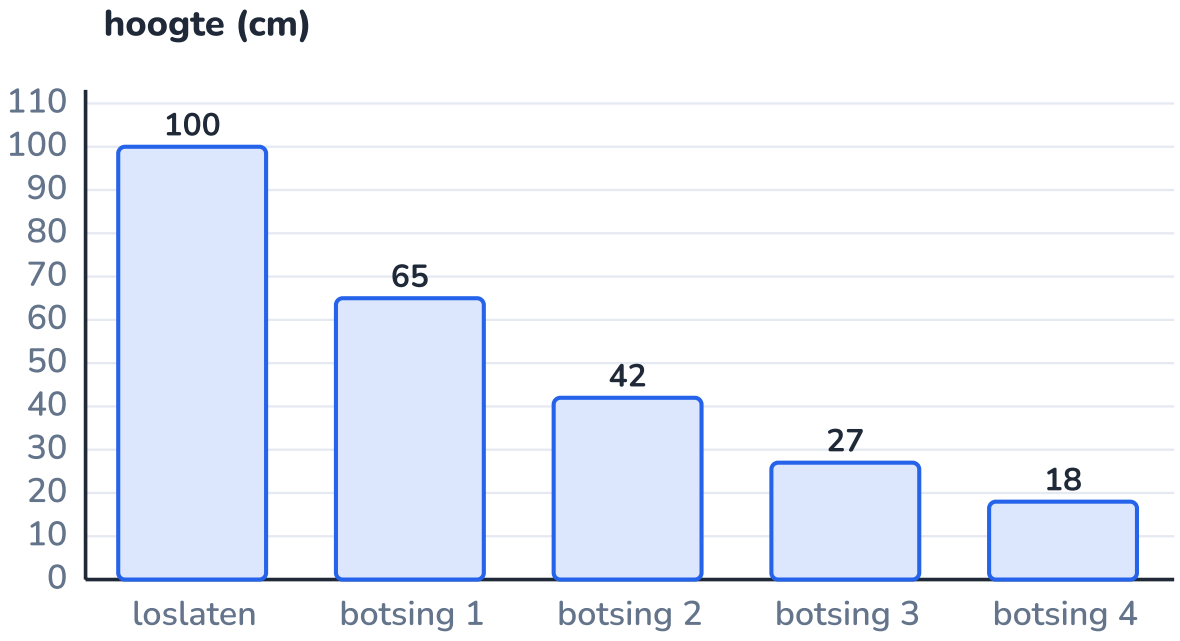
Typische rendementen, als orde van grootte. Een elektromotor is heel goed, een benzinemotor matig, een plant (voor energie) slecht.

UITGEWERKT VOORBEELD · 15.12

Het rendement van een stuiterbal

12/17

In hoofdstuk 4 liet je een bal vallen van verschillende hoogtes. Van 1,00 m stuitert hij terug tot 0,65 m. (a) Hoe groot is het rendement van één botsing? (b) Hoe hoog komt hij na de tweede en de derde botsing? (c) Waar gaat de rest van de energie naartoe?



Na elke botsing 65 % van de vorige hoogte: 100, 65, 42, 27 en 18 cm.

GEGEVEN

- valhoogte $1{,}00\ \mathrm{m}$
- hoogte na de botsing $0{,}65\ \mathrm{m}$

GEVRAAGD

- rendement van een botsing
- hoogte na botsing 2 en 3
- waar de rest heen gaat

OPLOSSING

1. **Energie en hoogte**: de zwaarte-energie is $E = F_z \cdot h$. Het is dezelfde bal, dus F_z blijft gelijk. De energie is recht evenredig met de hoogte: 65 % van de hoogte is 65 % van de energie.

2. (a) Toegevoerd: de zwaarte-energie bij het loslaten ($F_z \times 1{,}00\,\text{m}$). Nuttig: de zwaarte-energie op het hoogste punt na de botsing ($F_z \times 0{,}65\,\text{m}$). Rendement $= 0{,}65 / 1{,}00 \times 100\,\% = 65\,\%$.

3. (b) Elke botsing houdt 65 % over: $0{,}65 \times 0{,}65\,\text{m} = 0{,}42\,\text{m}$ na de tweede, $0{,}65 \times 0{,}42\,\text{m} = 0{,}27\,\text{m}$ na de derde.

4. (c) Telkens 35 % wordt warmte in de bal en de vloer, en geluid (de 'tok' die je hoort). Ook een beetje luchtweerstand remt de bal af en maakt de lucht warmer.

ANTWOORD

(a) 65 %. (b) 0,42 m en 0,27 m. (c) Warmte in bal en vloer, geluid, en wat warmte in de lucht.

Klopt dit? De hoogte daalt niet elke keer met hetzelfde aantal centimeter, maar met hetzelfde percentage: eerst 35 cm, dan 23 cm, dan 15 cm. Zo'n verband (elke stap maal hetzelfde getal) heet exponentieel; je leert het in Intermediate (hoofdstuk I5).

UITLEG · 15.13

Het Sankey-diagram

13/17

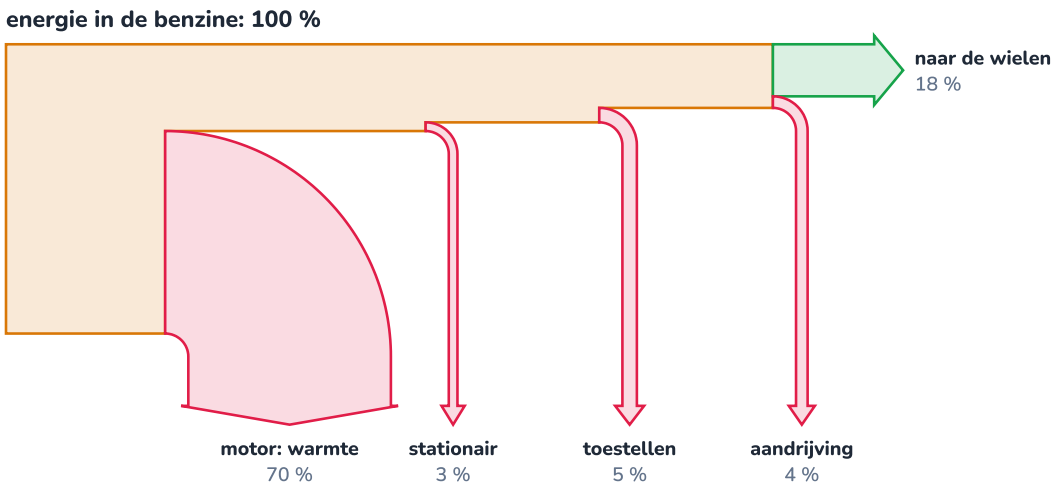
Een **Sankey-diagram** toont in één oogopslag waar de energie naartoe gaat. Het is genoemd naar de Ierse ingenieur Matthew Sankey, die er in 1898 de energiestromen van een stoommachine mee tekende. De regels:

1. De energie stroomt als een brede pijl van links naar rechts.
2. De **breedte** van elke pijl is **evenredig** met de hoeveelheid energie. Twee keer zo breed is twee keer zoveel energie. Kies daarom eerst een schaal, bijvoorbeeld 1 mm per procent.
3. De **nuttige energie** loopt rechtdoor; de **verliezen** buigen af, meestal naar onder.
4. Door de wet van behoud van energie is de breedte van de pijl die binnenkomt gelijk aan de **som** van de breedtes van alle pijlen die buitengaan.
5. Schrijf bij elke pijl wat het is, met de hoeveelheid energie of het percentage.

Het diagram hieronder toont een benzinewagen in gemengd verkeer. Van de energie in de benzine wordt ongeveer 70 % meteen warmte in de motor, die via de uitlaatgassen en de radiator naar buiten gaat. Wat overblijft, gaat deels naar stationair draaien (wachten aan een verkeerslicht), naar toestellen zoals de airco en de pompen, en naar wrijving in de versnellingsbak. Maar ongeveer **18 %** komt aan bij de wielen. Het rendement is dus ongeveer 18 %. En ook die energie wordt uiteindelijk warmte: door luchtweerstand, de rolweerstand van de banden en het remmen.

Eerst rekenen, dan tekenen

Tel altijd na of de verliezen en de nuttige energie samen de toegevoerde energie geven. Hier: $70 + 3 + 5 + 4 + 18 = 100$ %. Klopt de som niet, dan heb je een energiestroom vergeten.



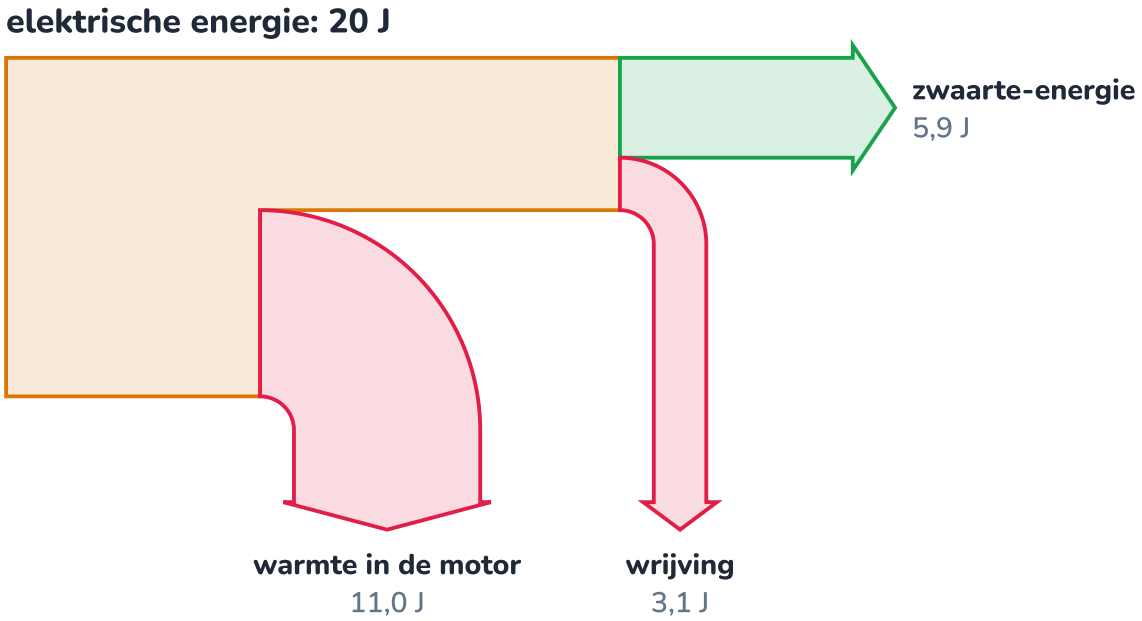
Benzinewagen in gemengd stads- en snelwegverkeer (afgerond, naar cijfers van de Amerikaanse milieudienst EPA). De breedtes zijn op schaal.

UITGEWERKT VOORBEELD · 15.14

Een Sankey-diagram tekenen op schaal

14/17

Een elektromotortje tilt een blok van 0,50 kg 1,20 m hoog. Een energiemeter tussen de voeding en de motor telt 20 J. Met een warmtecamera en een berekening schat je dat de motor zelf 11,0 J warmte afgeeft. De rest van het verlies is wrijving in de tandwielen en het touw. Bereken het rendement en teken het Sankey-diagram op schaal.



Op schaal: de pijl van 20 J is 160 beeldpunten breed, dus 8 beeldpunten per joule.

GEGEVEN

- toegevoerd: $20\,\mathrm{J}$ elektrische energie
- blok: $m = 0{,}50\,\mathrm{kg}$, $h = 1{,}20\,\mathrm{m}$
- warmte in de motor: $11{,}0\,\mathrm{J}$

GEVRAAGD

- nuttige energie en wrijving
- rendement
- Sankey-diagram op schaal

OPLOSSING

1. **Nuttige energie**: $F_z = 0{,}50 \times 9{,}81 = 4{,}9\,\text{N}$; $E = F_z \cdot h = 4{,}9\,\text{N} \times 1{,}20\,\text{m} = 5{,}9\,\text{J}$.
2. **Wrijving** met behoud van energie: $20 - 5{,}9 - 11{,}0 = 3{,}1\,\text{J}$.
3. **Rendement**: $5{,}9/20 \times 100\,\% \approx 29\,\%$.
4. **Schaal**: kies 1 J = 4 mm. Invoer: $20 \times 4 = 80\,\text{mm}$ breed. Warmte in de motor: 44 mm. Wrijving: 12 mm. Nuttig: 24 mm. Controle: $44 + 12 + 24 = 80\,\text{mm}$.
5. **Tekenen**: een brede pijl van 80 mm naar rechts. Eerst buigt een pijl van 44 mm naar onder (warmte in de motor), dan een van 12 mm (wrijving). De pijl van 24 mm loopt rechtdoor: de zwaarte-energie van het blok. Schrijf de waarden erbij.

ANTWOORD

Nuttig 5,9 J, wrijving 3,1 J, rendement ongeveer 29 %. Zie het Sankey-diagram.

Klopt dit? Een klein motortje heeft een laag rendement: veel van de energie gaat naar het opwarmen van zijn wikkelingen. Grote elektromotoren halen meer dan 90 %. Als je zo'n motor aanraakt na het werk, voel je het verschil tussen 'nuttig' en 'verloren'.

UITLEG · 15.15

Habitat: van de zon tot de plant in de meetkas

15/17

De meetkas bestaat om planten te laten groeien, en planten groeien op licht. Hoeveel van het zonlicht komt er echt terecht in de plant? Volg 1000 J zonlicht dat op de kas valt:

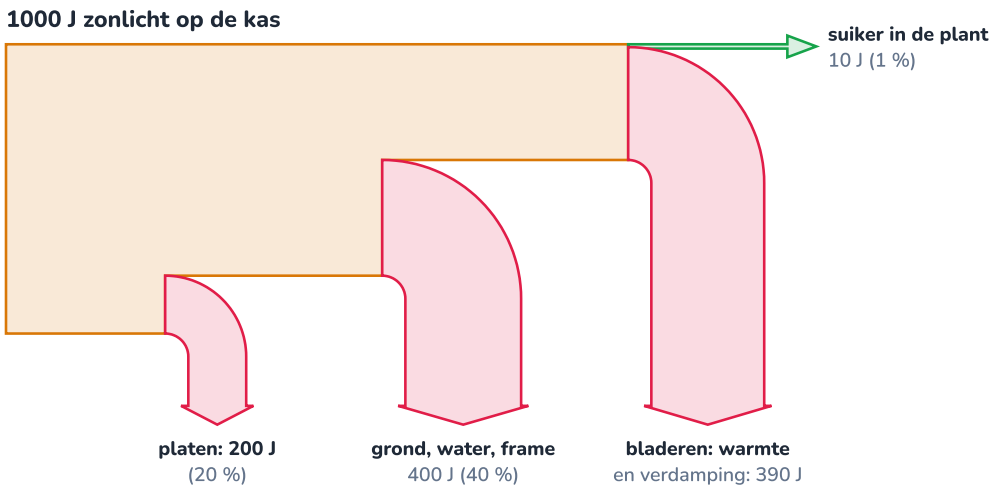
1. De polycarbonaatplaten laten ongeveer **80 %** van het licht door (hoofdstuk 10). De andere 200 J wordt teruggekaatst of door de platen opgenomen, die er warm van worden.
2. Van de 800 J die binnenkomt, valt ongeveer de helft op de bladeren. De rest (400 J) valt op de grond, de bakjes, het water en het frame, en wordt daar **warmte**.
3. Van de 400 J op de bladeren gebruikt de plant maar een klein deel voor **fotosynthese**: suiker maken uit water en koolstofdioxide (hoofdstuk 27). De rest wordt warmte, of gaat naar het **verdampen** van water uit de bladeren (verdampen vraagt energie, hoofdstuk 6).

Uiteindelijk wordt ongeveer **1 %** van het zonlicht chemische energie in suiker. Dat klopt met wat onderzoekers meten: gewassen op een veld slaan over een heel groeiseizoen meestal 1 à 2 % van het zonlicht op als chemische energie; het theoretische maximum ligt rond 5 à 6 %. Voor de plant is dat genoeg: ze gebruikt die suiker om te leven en te groeien, en wij eten ze op.

Het Sankey-diagram toont ook waarom de kas op een zonnige dag zo **warm** wordt (32 °C in april, hoofdstuk 4): bijna alle energie van het zonlicht wordt warmte *binnen* de kas. Hoe die warmte in de kas blijft hangen en hoe ze weer weglekt, is het onderwerp van hoofdstuk 16.

Een schatting

De verdeling in dit diagram is een schatting (orde van grootte). Hoeveel licht op de bladeren valt, hangt af van hoe groot de planten zijn en hoe dicht ze staan. Kleine zaailingen vangen veel minder dan 50 %, een volgroeide sla bijna alles. Het besluit blijft: het meeste zonlicht wordt warmte, een heel klein deel wordt suiker.



Van 1000 J zonlicht wordt ongeveer 10 J suiker. De pijl naar rechts is zo dun dat je hem bijna niet ziet: precies de boodschap.

NASLAG · 15.16

Overzicht: energie, vormen en rendement

16/17

De energievormen, de eenheden, de twee formules en de regels voor een Sankey-diagram op één blad.

energie om iets op te tillen

$$E = F_z \cdot h \qquad F_z = m \cdot g$$

symbool	betekenis	eenheid
E	energie	joule (J)
F_z	zwaartekracht	newton (N)
h	hoogte	meter (m)
m	massa	kilogram (kg)
g	9,81 op aarde	N/kg

rendement

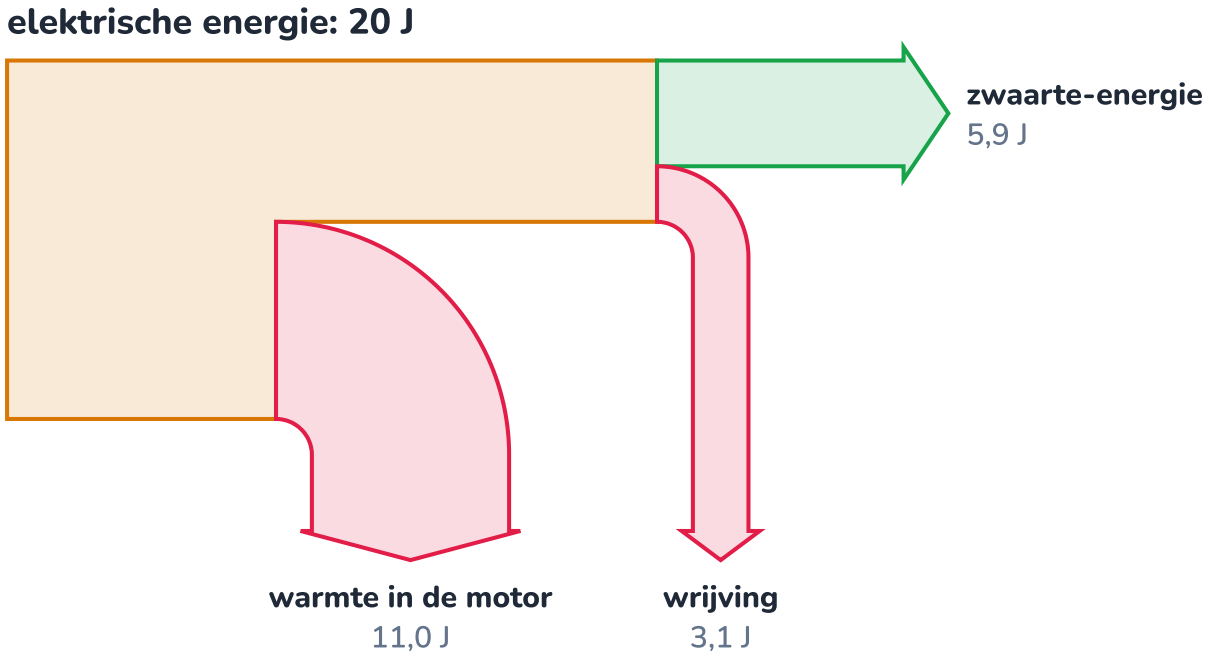
$$\text{rendement} = \frac{E_{\text{nuttig}}}{E_{\text{toegevoerd}}} \times 100\,\%$$

symbool	betekenis	eenheid
E_{nuttig}	nuttige energie	J
$E_{\text{toegevoerd}}$	toegevoerde energie	J

energievorm	waar zit de energie?	voorbeelden	in de meetkas
bewegingsenergie	in alles wat beweegt	rollende bal, wind, stromend water; ook geluid (trillende deeltjes)	water in de druppelslang, de draaiende pomp
zwaarte-energie	in alles wat hoog ligt, door de aantrekking van de aarde	water in een stuwmeer, een appel aan de boom	het opengeduwde dakraam; water dat omhoog gepompt is
veerenergie	in iets wat elastisch vervormd is	gespannen boog, opgewonden veer, uitgerekt elastiek	de veer in een drukknop
warmte (thermische energie)	in de beweging van de deeltjes van een stof (hoofdstuk 6)	hete thee, warme lucht, je lichaam	de warme lucht en grond na een zonnige dag
chemische energie	in stoffen; ze komt vrij bij een chemische reactie	voedsel, benzine, hout, aardgas, een batterij	de suiker in de planten, de batterij
elektrische energie	in bewegende lading (hoofdstuk 19)	stroom uit het stopcontact of uit een batterij	de stroom naar de ledstrip, de pomp en de microcontroller
stralingsenergie	in licht en andere straling	zonlicht, de warmte die je van een kampvuur voelt	zonlicht door de wand, het licht van de ledstrip
kernenergie	in de kernen van atomen	de zon (kernfusie), een kerncentrale (kernsplijting)	onrechtstreeks: alle zonlicht

eenheid	symbool	in joule	waar je ze tegenkomt
joule	J	1 J	de SI-eenheid van energie
kilojoule	kJ	1000 J	voedingsetiketten
megajoule	MJ	1 000 000 J	brandstoffen, voeding per dag
gigajoule	GJ	1 000 000 000 J	verwarming van een huis per jaar
kilocalorie	kcal	4184 J (ongeveer 4,2 kJ)	voedingsetiketten, naast kJ
kilowattuur	kWh	3 600 000 J = 3,6 MJ	de elektriciteitsfactuur (hoofdstuk 21)

regel voor een Sankey-diagram	waarom
breedte evenredig met de energie, op een gekozen schaal	zo zie je meteen wat groot en klein is
nuttige energie rechtdoor, verliezen buigen af	het verschil tussen nuttig en verloren valt op
breedte erin = som van de breedtes eruit	wet van behoud van energie
label met waarde of percentage bij elke pijl	een diagram zonder getallen kan je niet controleren



Een Sankey-diagram op schaal: 20 J erin, 11,0 + 3,1 + 5,9 = 20 J eruit.

HET GEHEEL · 15.17

Waar energie naartoe leidt

17/17

Energie is de rode draad van de leerlijn **Energie**, maar ze zit in bijna elke andere leerlijn: een stroomkring vervoert energie, een plant slaat ze op, een motor zet ze om, een regelaar beslist waar ze naartoe gaat. Met het rendement en het Sankey-diagram raak je ook de leerlijn **wiskundig modelleren**: procenten, evenredigheid en een schaal kiezen. In Intermediate krijgen de energievormen formules, in Expert wordt de wet van behoud de eerste hoofdwet van de thermodynamica.

F1 Wat is STEM?
Een systeem met input en output: energie is een van de drie stromen.

F6 Het deeltjesmodel
Warmte als beweging van deeltjes; energie bij smelten en verdampen.

F11 Krachten
De zwaartekracht $F_z = m \cdot g$ die je nodig hebt om de energie van het optillen te

berekenen; de gespannen veer.

F12 Hefbomen en mechanismen
Een hefboom maakt de kracht groter, nooit de energie; waarom een perpetuum mobile niet bestaat.

F16 Warmte en temperatuur
Waar de 'verloren' warmte naartoe gaat, en hoe je ze vasthoudt in de meetkas.

F17 Energie uit zon, wind en water
Energiebronnen: fossiel en hernieuwbaar, zonnepanelen, wind, water en opslag.

F21 Elektrisch vermogen en energie
Elektrische energie berekenen in joule en kilowattuur; led tegenover gloeilamp in cijfers.

F27 Planten: fotosynthese en groei
Hoe een plant licht omzet in suiker: de fotosynthese.

F28 Ecosystemen en kringlopen
Energie stroomt door een ecosysteem, stoffen gaan in een kringloop.

F29 Het lichaam als systeem
Energie uit voeding in kJ; het rendement van je spieren.

I9 Arbeid, energie en vermogen
Arbeid, kinetische en potentiële energie met formules; rendement van pompen en motoren.

I18 Warmte berekenen
Hoeveel energie nodig is om iets op te warmen: $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$.

E15 De hoofdwetten van de thermodynamica
De wet van behoud van energie als eerste hoofdwet, en waarom warmte nooit helemaal nuttig te maken is.

Habitat
De meetkas vangt zonlicht op en zet het om in suiker, warmte en (met het zonnepaneel) elektriciteit. In opdracht 15.14 maak je het Sankey-diagram van de meetkas voor een zonnige aprildag en zoek je manieren om meer van het licht in de planten te krijgen. Bewaar het in je portfolio: in hoofdstuk 16 gebruik je het om te verklaren waarom de kas overdag zo warm wordt.

SAMENVATTING

In het kort

- Energie is wat nodig is om iets te laten gebeuren: bewegen, optillen, opwarmen, oplichten, stoffen veranderen.
- Acht energievormen: bewegings-, zwaarte-, veer-, warmte-, chemische, elektrische, stralings- en kernenergie.
- In een energieketen verandert energie meerdere keren van vorm; bij bijna elke omzetting komt er ook warmte vrij.
- Wet van behoud van energie: energie kan niet ontstaan of verdwijnen, alleen van vorm veranderen. 'Verloren' energie is omgezet in een vorm die je niet nodig had, meestal warmte.
- Energie meet je in joule (J). Iets optillen: $E = F_z \cdot h$; 1 J is ongeveer een appel 1 m optillen. $1\,\text{kcal} = 4{,}184\,\text{kJ}$, $1\,\text{kWh} = 3{,}6\,\text{MJ}$.
- Rendement $= E_{\text{nuttig}} / E_{\text{toegevoerd}} \times 100\,\%$; het ligt altijd tussen 0 en 100 %.
- In een Sankey-diagram is de breedte van elke pijl evenredig met de energie; de pijl erin is even breed als alle pijlen eruit samen.
- In de meetkas wordt ongeveer 1 % van het zonlicht suiker in de planten; bijna al de rest wordt warmte in de kas.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

energie
Wat nodig is om iets te laten gebeuren: iets in beweging brengen, optillen, opwarmen, laten oplichten of van stof laten veranderen. Eenheid: joule (J).

energievorm
De manier waarop energie aanwezig is: in beweging, in hoogte, in een gespannen veer, in warmte, in stoffen, in elektrische stroom, in straling of in atoomkernen.

energieomzetting
Het veranderen van energie van de ene vorm in de andere, bijvoorbeeld van elektrische energie in licht.

energieketen
Een reeks energieomzettingen na elkaar, van de bron tot het eindgebruik.

wet van behoud van energie
Energie kan niet ontstaan en niet verdwijnen; ze kan alleen van vorm veranderen of van plaats wisselen.

joule
De eenheid van energie. Eén joule is ongeveer de energie om een appel van 100 g één meter op te tillen.

nuttige energie
Het deel van de energie dat een toestel omzet in de vorm waarvoor het gemaakt is.

rendement
Het deel van de toegevoerde energie dat nuttig gebruikt wordt, meestal in procent: nuttige energie gedeeld door toegevoerde energie.

Sankey-diagram
Stroomdiagram van energie waarin de breedte van elke pijl evenredig is met de hoeveelheid energie.

perpetuum mobile
Een machine die zonder energietoevoer eeuwig zou blijven werken. Ze bestaat niet: ze zou de wet van behoud van energie breken.

F FUNDAMENTAL · DEEL F4 · ENERGIE

HANDBOEK · HOOFDSTUK 16

Warmte en temperatuur

Waarom de meetkas in april 32 °C wordt, waarom ze 's nachts afkoelt, en hoe je warmte vasthoudt

Een kopje thee is heter dan een bad, maar het bad bevat veel meer warmte. In dit hoofdstuk leer je het verschil tussen **temperatuur** en **warmte**, en reken je temperaturen om naar de wetenschappelijke eenheid, de **kelvin**. Je ontdekt de drie manieren waarop warmte zich verplaatst: **geleiding**, **stroming** en **straling**, en hoe je ze tegenhoudt met isolatie. Zo begrijp je waarom de meetkas op een zonnige dag zo warm wordt, wat dat te maken heeft met het **broeikaseffect** van de aarde (en wat niet), en hoe je de kas 's nachts warm houdt.

8× uitleg · 3× uitgewerkt voorbeeld · 2× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 2× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

Energie · Materie en chemie



Door een warmtecamera: de grond en het water houden de warmte vast, het aluminium frame is het koudst.

Na dit hoofdstuk

- Je kan het verschil tussen temperatuur, thermische energie en warmte uitleggen met het deeltjesmodel en met voorbeelden.
- Je kan temperaturen omrekenen tussen graden Celsius en kelvin met $T = t + 273{,}15$, en uitleggen wat het absolute nulpunt is.
- Je kan met de rekenregel 4,2 kJ per liter per graad berekenen hoeveel warmte nodig is om water op te warmen.
- Je kan geleiding, stroming en straling uitleggen en herkennen in voorbeelden.
- Je kan uitleggen waarom stilstaande lucht goed isoleert, en materialen vergelijken met hun warmtegeleiding.
- Je kan uitleggen waarom een kas overdag warm wordt, en hoe het broeikaseffect van de atmosfeer daarvan verschilt.
- Je kan een eerlijke isolatieproef opzetten en een afkoelgrafiek lezen.
- Je kan maatregelen voorstellen om de meetkas 's nachts warm te houden en hun effect schatten.

VERHAAL · 16.1

32 graden in april

1/18

In hoofdstuk 4 maten twee sensoren een hele zonnige dag in april: een in de meetkas en een buiten. Buiten werd het niet warmer dan 17,9 °C. In de kas liep de temperatuur op tot 32,0 °C, zo warm dat

sommige planten er schade van krijgen. En toch was de kas om 5 uur 's ochtends nog maar 7,7 °C: amper een graad warmer dan buiten.

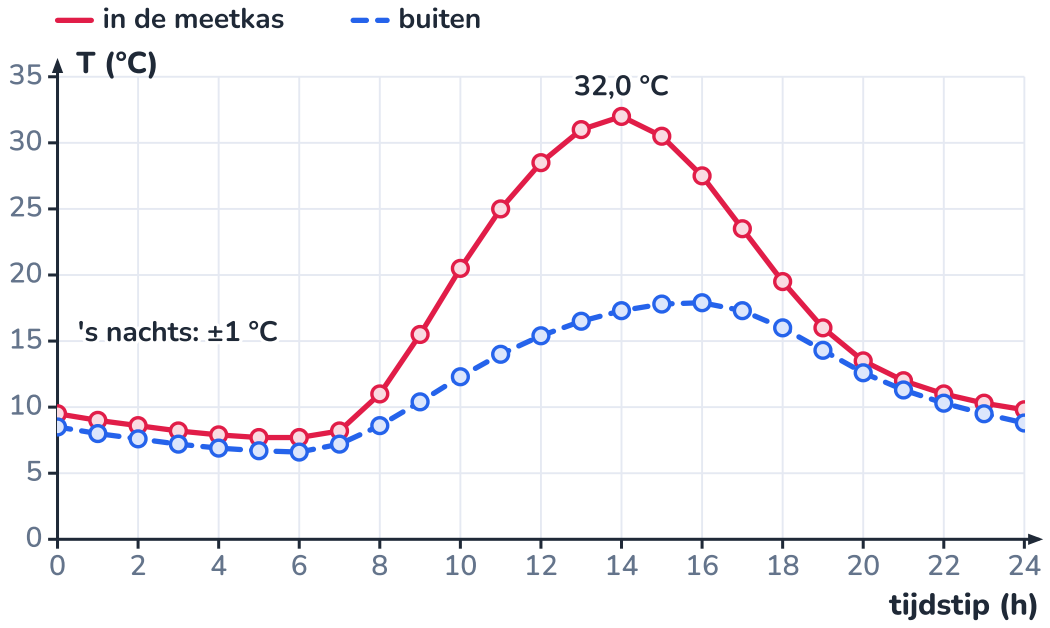
Die ene grafiek roept drie vragen op die dit hoofdstuk beantwoordt:

1. Hoe komt de warmte in de kas, en waarom blijft ze er overdag in hangen?
2. Waarom lekt ze 's nachts bijna helemaal weg, door een wand van amper 4 mm?
3. Hoe hou je de warmte van de dag vast voor de nacht, zonder een verwarming die veel energie kost?

Om die vragen te beantwoorden, heb je eerst twee woorden nodig die in de dagelijkse taal door elkaar lopen: **temperatuur** en **warmte**. Daarna volg je de warmte op haar drie wegen: door een stof heen, met een stroming mee, en als straling.

Een auto in de zon

Wat met de kas gebeurt, ken je van een auto die in de zon geparkeerd staat. Binnen kan het veel warmer worden dan buiten, soms meer dan 50 °C. Laat daarom nooit een kind of een dier achter in een auto in de zon, ook niet 'even'.



Overdag loopt de kas ver voor op buiten; 's nachts zakt ze bijna tot de buitentemperatuur.

UITLEG · 16.2

Temperatuur en warmte zijn niet hetzelfde

2/18

In hoofdstuk 6 leerde je: alle stoffen bestaan uit deeltjes die voortdurend bewegen. Daarmee kan je drie begrippen uit elkaar houden:

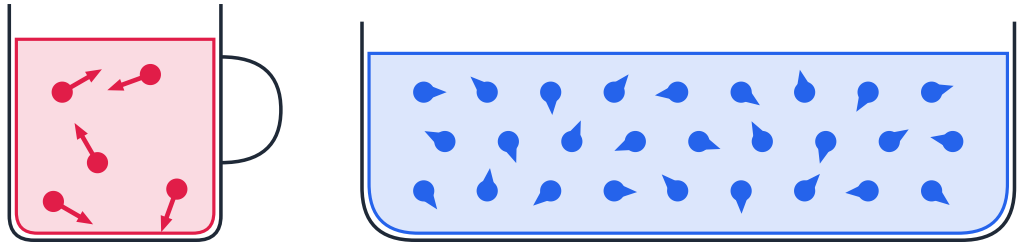
- De **temperatuur** zegt hoe snel de deeltjes *gemiddeld* bewegen. Ze hangt niet af van hoeveel stof er is: een druppel en een emmer water van 20 °C hebben dezelfde temperatuur.
- De **thermische energie** is de energie van *alle* bewegende deeltjes samen. Die hangt wel af van hoeveel stof er is: een bad van 40 °C bevat veel meer thermische energie dan een kopje thee van 80 °C, want het bad heeft veel meer deeltjes.
- **Warmte** is energie die *stroomt*: van een voorwerp met een hoge temperatuur naar een voorwerp met een lagere temperatuur. Ze stroomt vanzelf altijd in die richting, en stopt pas als beide even warm

zijn. Het symbool voor warmte is Q; de eenheid is de joule, zoals voor elke vorm van energie (hoofdstuk 15).

De vonken van een sterretje zijn meer dan 1000 °C heet, maar ze doen geen pijn op je hand: elke vonk is zo klein dat er maar heel weinig warmte in zit. Een pan water van 60 °C doet wel pijn, omdat er veel meer warmte naar je huid kan stromen.

Doe de deur dicht, de kou komt binnen

Koude is geen ding dat kan stromen. Wat er gebeurt, is het omgekeerde: **warmte** stroomt van binnen naar buiten. Net zo 'verwarmt' een trui je niet: je lichaam maakt zelf warmte, en de trui remt af dat die warmte wegstroomt. Een trui om een ijsblokje houdt het ijsblokje net *langer* koud.



kopje thee: 80 °C
hoge temperatuur

bad: 40 °C
lagere temperatuur, maar veel meer deeltjes: veel meer thermische energie

De deeltjes in de thee bewegen sneller (langere pijlen): hogere temperatuur. Het bad heeft veel meer deeltjes: meer thermische energie.

UITGEWERKT VOORBEELD · 16.3

Hoeveel warmte om water op te warmen?

3/18

Water heeft veel energie nodig om warmer te worden: om 1 liter water 1 °C warmer te maken, is ongeveer 4,2 kJ nodig. Hoeveel warmte is nodig voor (a) een kopje thee: 0,25 L water van 20 °C tot 100 °C? (b) Een bad: 150 L water van 15 °C tot 40 °C? (c) Welk van de twee wordt het heetst, en welk vraagt het meeste energie?

GEGEVEN

- rekenregel voor water: $4{,}2\,\mathrm{kJ}$ per liter per °C
- thee: $0{,}25\,\mathrm{L}$, van 20 °C naar 100 °C
- bad: $150\,\mathrm{L}$, van 15 °C naar 40 °C

GEVRAAGD

- warmte voor de thee
- warmte voor het bad
- vergelijking

OPLOSSING

1 De rekenregel als formule:

WARMTE OM WATER OP TE WARMEN

$$Q = 4{,}2 \cdot V \cdot \Delta t$$

Q in kJ, V = volume water in liter, Δt = de temperatuurstijging in °C. Alleen voor water; andere stoffen hebben een ander getal (hoofdstuk I18).

2 (a) Temperatuurstijging: $100 - 20 = 80$ °C. $Q = 4{,}2 \times 0{,}25 \times 80 = 84\,\text{kJ}$.

3 (b) Temperatuurstijging: $40 - 15 = 25$ °C. $Q = 4{,}2 \times 150 \times 25 = 15\,750\,\text{kJ} \approx 15{,}8\,\text{MJ}$.

4 (c) De thee wordt het heetst (100 °C tegenover 40 °C), maar het bad vraagt $15\,750/84 \approx 190$ keer zoveel warmte: er moeten veel meer deeltjes sneller gaan bewegen.

ANTWOORD

(a) 84 kJ; (b) ongeveer 15,8 MJ; (c) de thee is heter, het bad vraagt bijna 190 keer zoveel warmte.

Klopt dit? Vergelijk met hoofdstuk 15: een snoepreep bevat ongeveer 1 MJ. Een bad opwarmen kost dus de energie van zestien snoeprepen. Dat water zoveel warmte opslaat, is handig: in de meetkas kan een vat water de warmte van de dag bewaren voor de nacht (verder in dit hoofdstuk).

UITLEG · 16.4

Graden Celsius en kelvin

4/18

De temperatuurschaal van het dagelijks leven is de schaal van de Zweedse sterrenkundige **Anders Celsius** (1742): het smeltpunt van ijs en het kookpunt van water bij normale luchtdruk liggen 100 graden uit elkaar. Het nulpunt is een afspraak: 0 °C is 'zo koud als smeltend ijs'. Daarom bestaan er negatieve temperaturen.

In hoofdstuk 6 zag je dat er een laagst mogelijke temperatuur bestaat: het **absolute nulpunt**, $-273{,}15$ °C, waar de deeltjes zo weinig bewegen als maar kan. De Britse natuurkundige William Thomson, later Lord Kelvin, stelde in 1848 een schaal voor die daar begint. Die **kelvinschaal** is de SI-eenheid van temperatuur (hoofdstuk 3). Eén kelvin is even groot als één graad Celsius; alleen het nulpunt ligt anders.

VAN GRADEN CELSIUS NAAR KELVIN EN TERUG

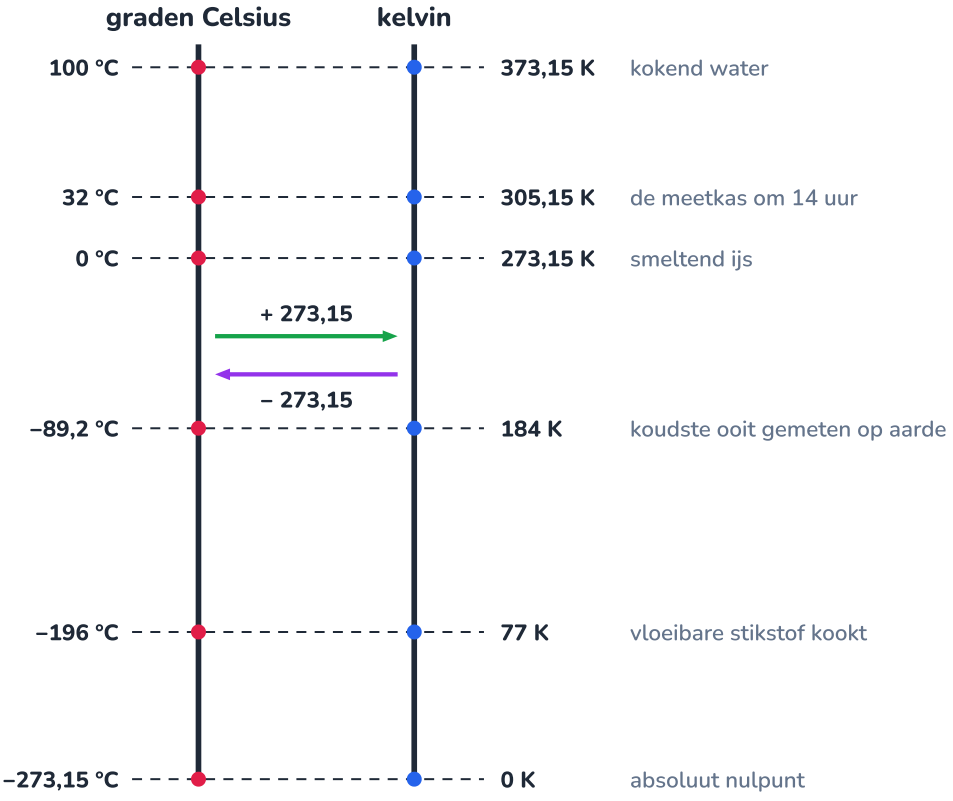
$$T = t + 273{,}15 \qquad t = T - 273{,}15$$

T = temperatuur in kelvin (K), t = temperatuur in graden Celsius (°C). Je schrijft '300 K', zonder het woord graden en zonder °.

Twee gevolgen: in kelvin bestaan er **geen negatieve temperaturen**, en een **temperatuurverschil** is in kelvin en in graden Celsius hetzelfde getal. Wordt de kas 24,3 °C warmer, dan is dat ook 24,3 K. Voor veel berekeningen volstaat 273 in plaats van 273,15.

Waarom de wetenschap kelvin gebruikt

In kelvin is de temperatuur een echte maat voor de beweging van de deeltjes: bij 0 K is ze minimaal. Daardoor worden veel natuurwetten eenvoudig. Een gas bij 600 K heeft deeltjes die gemiddeld twee keer zoveel bewegingsenergie hebben als bij 300 K (hoofdstuk E14). Met graden Celsius kan je dat niet zeggen: 20 °C is niet 'twee keer zo warm' als 10 °C.



Links graden Celsius, rechts kelvin: elke horizontale lijn is dezelfde temperatuur.

UITGEWERKT VOORBEELD · 16.5

Omrekenen naar kelvin

5/18

(a) Reken de laagste (7,7 °C) en de hoogste temperatuur (32,0 °C) in de meetkas om naar kelvin. Hoe groot is het verschil in beide eenheden? (b) Vloeibare stikstof kookt bij 77 K. Hoeveel is dat in °C? (c) Iemand zegt: 'Vandaag is het 20 °C, gisteren 10 °C: het is twee keer zo warm.' Klopt dat?

GEGEVEN

- $t_{\text{min}} = 7{,}7$ °C, $t_{\text{max}} = 32{,}0$ °C
- $T = 77\,\text{K}$
- 20 °C en 10 °C

GEVRAAGD

- temperaturen in K en het verschil
- 77 K in °C
- twee keer zo warm?

OPLOSSING

1. (a) $T_{\text{min}} = 7{,}7 + 273{,}15 = 280{,}85\,\text{K}$ en $T_{\text{max}} = 32{,}0 + 273{,}15 = 305{,}15\,\text{K}$. Verschil: $305{,}15 - 280{,}85 = 24{,}3\,\text{K}$, en in °C: $32{,}0 - 7{,}7 = 24{,}3$ °C. Hetzelfde getal.
2. (b) $t = T - 273{,}15 = 77 - 273{,}15 = -196{,}15$ °C, afgerond -196 °C.
3. (c) In kelvin: $20 + 273{,}15 = 293{,}15\,\text{K}$ en $10 + 273{,}15 = 283{,}15\,\text{K}$. De verhouding is $293{,}15/283{,}15 = 1{,}035$: de deeltjes bewegen gemiddeld maar ongeveer 3,5 % meer, niet twee keer zoveel.

ANTWOORD

(a) 280,85 K en 305,15 K; verschil 24,3 K = 24,3 °C. (b) –196 °C. (c) Nee: in kelvin is het maar 3,5 % meer.

Klopt dit? Een temperatuur in kelvin is altijd 273,15 hoger dan in °C, en nooit negatief. Krijg je een negatief getal in kelvin, dan heb je in de verkeerde richting gerekend.

Warmte op weg (1): geleiding

Warmte stroomt altijd van warm naar koud, maar ze kan dat op drie manieren doen: door **geleiding**, door **stroming** en door **straling**. Bij een pan op het vuur zie je ze alle drie tegelijk (tweede figuur).

Bij **geleiding** gaat de warmte door een stof heen, zonder dat de stof zelf beweegt. Verwarm je het uiteinde van een metalen staaf, dan gaan de deeltjes daar heviger trillen. Ze botsen tegen hun buren, die daardoor ook heviger gaan trillen, enzovoort: de trilling wordt doorgegeven, en zo kruipt de warmte door de staaf.

Niet elke stof geleidt even goed. **Metalen** zijn de beste geleiders: ze hebben vrije elektronen (dezelfde die de elektrische stroom vervoeren, hoofdstuk 19) die de energie snel doorgeven. Hout, kunststof en vooral **lucht** geleiden slecht. Dat getal staat in de tabel:

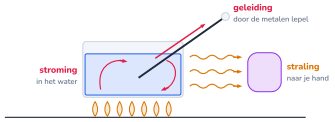
materiaal	warmtegeleiding (W per m per K)	geleidt warmte
koper	400	heel goed: metalen
aluminium	± 200	
staal (roestvast staal)	± 50 (± 15)	
ijs	2,2	matig
beton	± 1,5	
glas	± 1	
water	0,6	
polycarbonaat	0,20	slecht
dennenhout	± 0,13	
kurk, schapenwol	± 0,04	heel slecht: isolatoren
piepschuim (EPS), minerale wol	± 0,035	
PUR-schuim	± 0,025	
stilstaande lucht	0,026	

Afgeronde waarden (orde van grootte). Hoe kleiner het getal, hoe beter het materiaal isoleert. Wat het getal precies betekent, leer je in hoofdstuk I19.

Dat verklaart waarom een metalen trapleuning in de winter kouder aanvoelt dan een houten, bij dezelfde temperatuur (hoofdstuk 10). Je huid voelt niet de temperatuur, maar hoe snel de warmte uit je hand wegstroomt.



Links trillen de deeltjes het hevigst (lange streepjes); ze geven hun trilling door naar rechts.



Drie wegen tegelijk: door de lepel (geleiding), in het water (stroming), naar je hand (straling).

UITLEG · 16.7

Warmte op weg (2): stroming

7/18

In een vloeistof of een gas kan de warme stof zelf bewegen en zo de warmte meenemen. Dat heet **stroming** of **convectie**. Warme lucht zet uit (hoofdstuk 6), heeft daardoor een kleinere dichtheid dan de koude lucht eromheen (hoofdstuk 7) en stijgt, zoals een kurk in water. Koude lucht zakt en neemt haar plaats in. Zo ontstaat een kringloop.

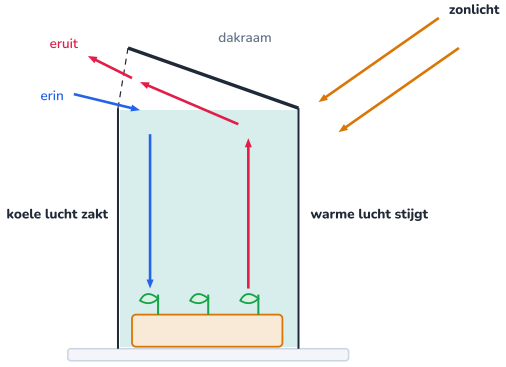
Zo warmt een radiator een hele kamer op: de lucht aan de radiator wordt warm, stijgt naar het plafond, koelt af en zakt aan de andere kant van de kamer weer naar beneden. Ondanks zijn naam geeft een radiator het grootste deel van zijn warmte af door stroming, niet door straling.

In de meetkas warmen de grond, de planten en het water op in de zon. Ze geven hun warmte door aan de lucht die ertegen stroomt; die warme lucht stijgt en blijft onder het dak hangen. Zet je het **dakraam** open (hoofdstuk 12), dan kan de warme lucht bovenaan ontsnappen en valt er koele buitenlucht naar binnen. Een dakraam van 0,60 m × 0,60 m is een sterke rem op oververhitting.

Stroming kan ook **gedwongen** zijn: een ventilator, of de wind. Daarom voelt een winterse dag met wind veel kouder aan dan een windstille dag bij dezelfde temperatuur: de wind voert de warme laag lucht rond je huid telkens weg.

Stroming zichtbaar maken

Laat een korreltje kaliumpermanganaat (of een druppel voedingskleurstof) in een bekerglas koud water op de bodem zakken, aan één kant. Verwarm het bekerglas voorzichtig aan die kant met een kaarsje of een brander. Je ziet een paarse pluim opstijgen, naar de andere kant stromen en weer zakken: een kringloop.
Kaliumpermanganaat is schadelijk en kleurt huid en kleren: gebruik een pincet en een schort (hoofdstuk 5).



Doorsnede van de kas (zijkant): met het dakraam open ontsnapt de warme lucht bovenaan, koele lucht valt binnen.



Een glastuinbouwbedrijf zet op warme dagen de luchtramen in de nok open: de warme lucht ontsnapt bovenaan.

PROEF · 16.8

Zwart, wit of zilver in de zon

8/18

ONDERZOEKSVRAAG

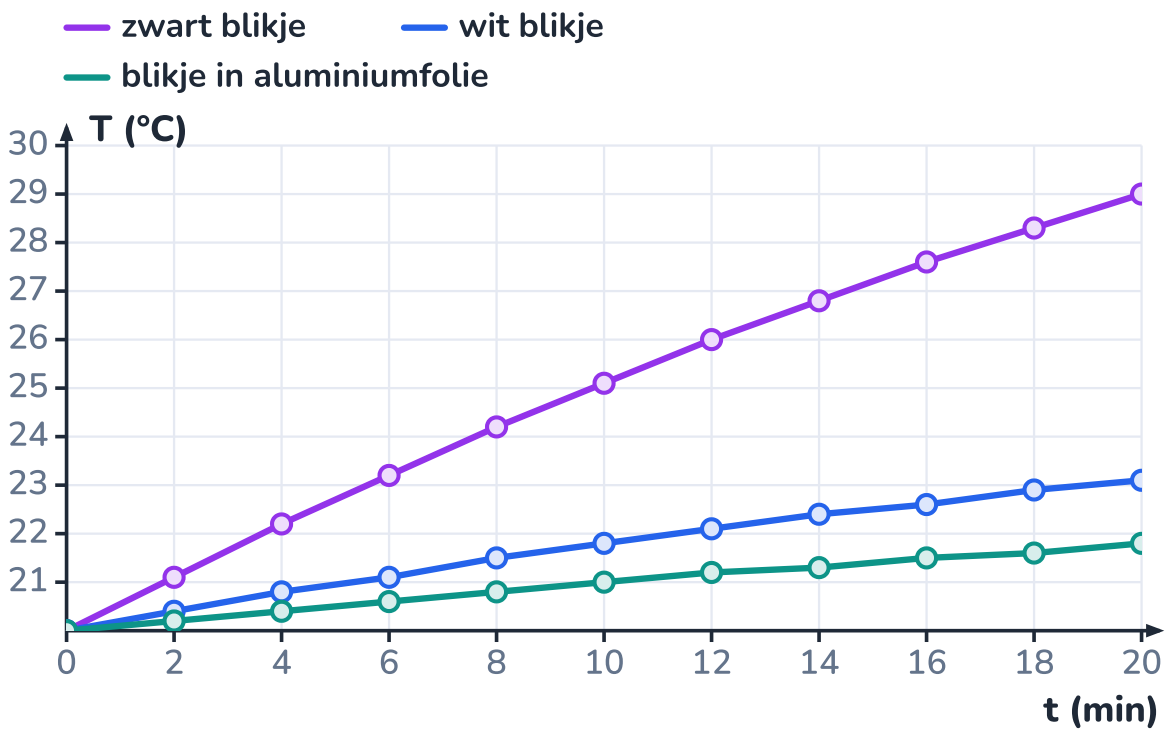
Warmt een zwart blikje water sneller op onder een lamp dan een wit of een blinkend blikje?

MATERIAAL

- drie lege drankblikjes van 330 mL: één mat zwart geverfd, één wit geverfd, één in aluminiumfolie gewikkeld
- maatbeker, water op kamertemperatuur
- drie thermometers of temperatuursensoren
- lamp van 100 W (halogeen of gloeilamp) of volle zon
- stopwatch, lat

Veiligheid

Een halogeenlamp wordt heel heet: raak ze niet aan en zet ze niet dicht bij papier.



Zwart neemt de meeste straling op, blinkend het minst. Alle blikjes kregen evenveel licht.

WERKWIJZE

1. Doe in elk blikje 200 mL water van kamertemperatuur. Steek een thermometer in elk blikje.
2. Zet de drie blikjes op dezelfde afstand (bijvoorbeeld 30 cm) van de lamp, naast elkaar, zodat ze evenveel licht krijgen.
3. Noteer de begintemperatuur, zet de lamp aan en lees elke twee minuten de temperatuur af, twintig minuten lang.
4. Zet de metingen in een grafiek, met de tijd horizontaal.

WAARNEMING

blikje	0 min	10 min	20 min	stijging
zwart	20,0 °C	25,1 °C	29,0 °C	+ 9,0 °C
wit	20,0 °C	21,8 °C	23,1 °C	+ 3,1 °C
aluminiumfolie	20,0 °C	21,0 °C	21,8 °C	+ 1,8 °C

Voorbeeld van resultaten in een klas. Het zwarte blikje warmt het snelst op, het blinkende het traagst.

VERKLARING

De lamp stuurt energie naar de blikjes als **straling**: zichtbaar licht en infrarood. Een **mat zwart** oppervlak neemt bijna alle straling op (het **absorbeert** ze) en zet ze om in warmte. Een wit oppervlak kaatst het meeste zichtbare licht terug, een **blinkend** oppervlak kaatst zowel licht als infrarood terug. De grafieken worden na een tijd vlakker: hoe warmer het blikje, hoe meer warmte het zelf weer verliest aan de lucht.

Het werkt ook omgekeerd: een zwart voorwerp **straalt** ook het best zijn warmte uit, een blinkend het slechtst. Daarom zijn thermosflessen vanbinnen verzilverd, en is een reddingsdeken blinkend. In de meetkas warmt donkere potgrond snel op in de zon. Glastuinders doen het omgekeerde in de zomer: ze maken het glas van hun kas wit met een laagje krijt, zodat er minder zonlicht binnenkomt en de kas minder oververhit.

UITLEG · 16.9

Warmte op weg (3): straling

9/18

De zon verwarmt de aarde door 150 miljoen kilometer luchtledige ruimte heen, waar geen deeltjes zijn om de warmte te geleiden of mee te stromen. Dat kan alleen door **straling**: licht en onzichtbare **infrarode straling** (infrarood). Straling heeft geen stof nodig.

Niet alleen de zon straalt. **Elk voorwerp** zendt infrarood uit, en hoe warmer het is, hoe meer. Je lichaam, een kopje thee, de muren van je kamer, zelfs een ijsblokje: allemaal stralen ze infrarood uit, dat je ogen niet zien. Wordt een voorwerp heel heet, dan zendt het ook zichtbaar licht uit: de gloeiende draad van een broodrooster (rood), de gloeidraad van een lamp (geelwit), de zon (ongeveer 5500 °C aan het oppervlak).

Een **warmtecamera** ziet infrarood en toont het in kleuren: warme plekken licht, koude plekken donker. Zo zie je waar een huis zijn warmte verliest: rond ramen, onder deuren, langs slecht geïsoleerde muren.

Wat straling tegenhoudt: **blinkende oppervlakken** die terugkaatsen (aluminiumfolie, de zilverlaag in een thermosfles, een reddingsdeken). En sommige materialen laten zichtbaar licht door, maar houden infrarood grotendeels tegen: **glas** en **polycarbonaat**. Dat wordt belangrijk voor de kas.

Infrarood is hetzelfde als warmte

Infrarood is straling, net als licht, alleen onzichtbaar voor jouw ogen. Het wordt pas warmte als een voorwerp het opneemt. Een infraroodstraal die door de lucht gaat, warmt de lucht nauwelijks op, maar wel je huid als die hem opvangt. Daarom voel je een kampvuur aan je gezicht, ook als de lucht tussen jou en het vuur koud is.



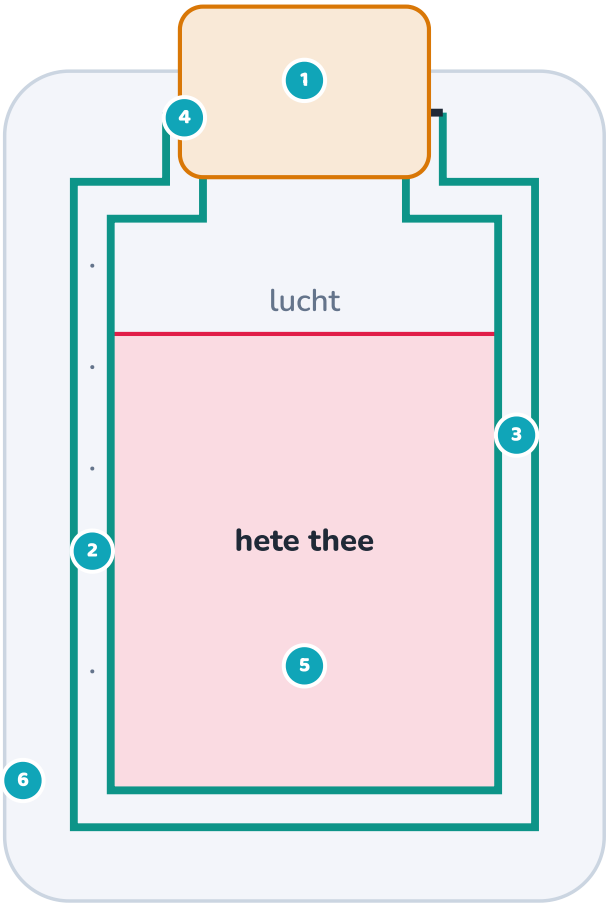
Een warmtebeeld: waar het huis licht kleurt, lekt de warmte weg.

ONTLEED · 16.10

De thermosfles

10/18

Een goede thermosfles houdt koffie urenlang warm en ijswater urenlang koud. Ze remt alle drie de manieren van warmtetransport tegelijk af. De Schotse scheikundige en natuurkundige James Dewar vond het principe in 1892 uit, om vloeibare gassen koud te bewaren.



Doorsnede: twee wanden met luchtledig ertussen, verzilverd aan de binnenkant, en een isolerende dop.

1 De dop
Van kunststof of kurk, vaak hol: geleidt slecht. Zonder dop zou de warme lucht boven de thee opstijgen en ontsnappen (stroming), en zou er water verdampen.

2 Het luchtledige
Tussen de twee wanden is de lucht weggepompt. Zonder deeltjes geen geleiding en geen stroming: dit is de belangrijkste isolatie.

3 De zilverlaag
De wanden zijn aan de kant van het luchtledige verzilverd. Ze kaatsen het infrarood terug naar waar het vandaan komt: dat remt de straling.

4 De rand
Hier zijn de binnen- en de buitenwand aan elkaar vast. Het is de enige plaats waar warmte door geleiding naar buiten kan: een koudebrug. Daarom is de hals smal en de wand dun.

5 De inhoud
Hete thee of ijskoud water: de fles werkt in beide richtingen, want ze remt de warmtestroom, welke kant die ook op gaat.

6 De mantel
Beschermt de breekbare binnenfles (vaak van glas) tegen stoten. Bij een roestvast stalen thermosbeker zijn de wanden zelf van staal.

UITLEG · 16.11

Isoleren: lucht vangen

11/18

Isoleren betekent: de warmtestroom afremmen. Je doet dat met de drie wegen in gedachten:

- **Geleiding** tegenhouden met materialen die slecht geleiden. De beste 'stof' is **stilstaande lucht** (0,026 in de tabel): bijna veertig keer slechter dan glas en vijftienduizend keer slechter dan koper, als ze

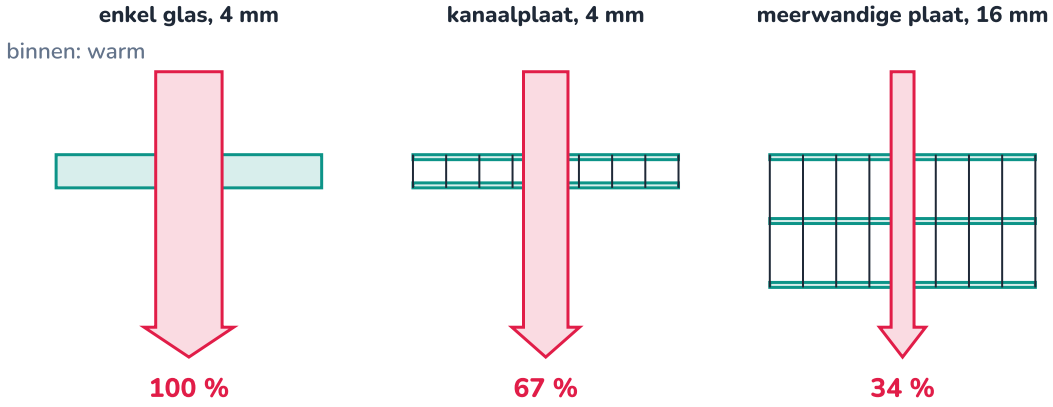
tenminste stilstaat.

- **Stroming** tegenhouden door de lucht op te sluiten in **kleine cellen**, zodat ze niet kan rondstromen. Dat doen piepschuim (kleine bolletjes vol lucht), wol, veren, vacht en zelfs verse sneeuw. Het materiaal zelf dient vooral om de lucht vast te houden.
- **Straling** tegenhouden met een blinkende laag, zoals de aluminiumfolie op isolatieplaten.

Ook een **luchtlaag** tussen twee platen isoleert: dubbel glas, of de **kanaalplaat** van de meetkas, twee dunne wanden polycarbonaat met luchtkanalen ertussen. Maar een luchtlaag mag niet te dik zijn: in een brede spleet begint de lucht zelf rond te stromen, en dan isoleert ze minder. Daarom is de spouw van dubbel glas maar ongeveer 1 à 2 cm, en is een dikke meerwandige plaat opgedeeld in meerdere smalle kanalen.

Bouwers geven voor een wand of een plaat de **U-waarde**: hoeveel warmte er per seconde door 1 m² gaat per graad verschil. Enkel glas: ongeveer 5,8; de kanaalplaat van 4 mm: ongeveer 3,9; een meerwandige plaat van 16 mm: ongeveer 2. Hoe kleiner, hoe beter. Rekenen met de U-waarde doe je in hoofdstuk I19.

> ⚠ **De koudebrug in de meetkas**
>
> In hoofdstuk 10 zag je dat het aluminium frame warmte ongeveer duizend keer beter geleidt dan de polycarbonaatplaten. Waar het profiel van binnen naar buiten loopt, lekt de warmte weg: een **koudebrug**. Je beperkt ze door de profielen zo smal mogelijk te houden, door een strip kunststof of rubber tussen de plaat en het profiel te zetten (een 'thermische onderbreking'), of door het profiel aan de binnenkant af te dekken met isolerend materiaal.



Bij hetzelfde temperatuurverschil laat een kanaalplaat een derde minder warmte door dan enkel glas, een meerwandige plaat twee derde minder.

PROEF · 16.12

Een eerlijke isolatieproef

12/18

ONDERZOEKSVRAAG

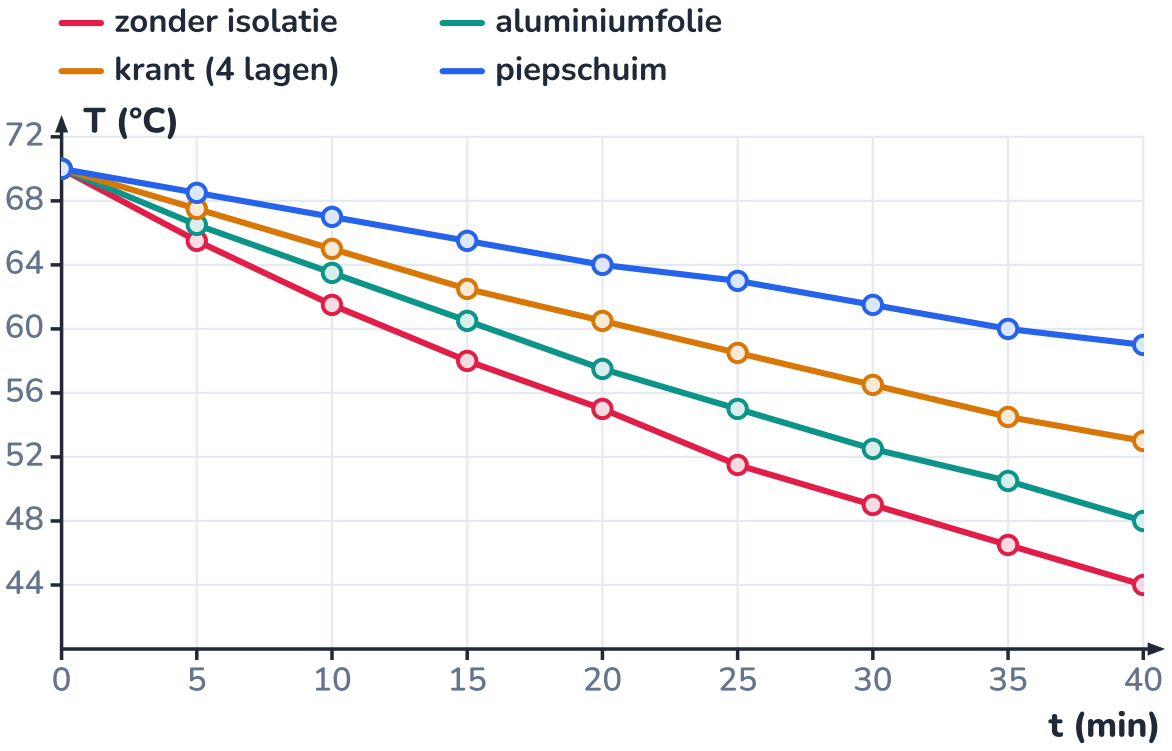
Welk materiaal houdt een pot warm water het langst warm?

MATERIAAL

- zes gelijke glazen potten van 250 mL met deksel
- isolatie, telkens een laag van ongeveer 1 cm: aluminiumfolie (meerdere lagen), krant (4 lagen), noppenfolie, wollen sjaal, piepschuim (doos of platen)
- waterkoker, maatbeker, plakband
- zes thermometers of temperatuursensoren
- stopwatch

Veiligheid

Werk met water van hooguit 70 °C en giet het met een maatbeker, niet rechtstreeks uit de waterkoker.



Vier van de zes potten: zonder isolatie daalt de temperatuur het snelst, met piepschuim het traagst.

WERKWIJZE

1. Kies wat je verandert (de **onafhankelijke variabele**): het isolatiemateriaal. Eén pot krijgt geen isolatie: dat is de **controle**.
2. Kies wat je meet (de **afhankelijke variabele**): de temperatuur van het water, om de 5 minuten, 40 minuten lang.
3. Hou al de rest gelijk (de **gecontroleerde variabelen**): dezelfde potten, 250 mL water, dezelfde begintemperatuur (70 °C), dezelfde dikte isolatie rond de wand, de deksels erop, alle potten op dezelfde tafel, weg van de verwarming en het raam.
4. Vul alle potten tegelijk (of snel na elkaar), sluit ze, wikkel ze in en start de stopwatch.
5. Herhaal de proef een tweede keer, of vergelijk met een andere groep: één meting bewijst niets (hoofdstuk 2).

WAARNEMING

isolatie (1 cm dik)	0 min	20 min	40 min	daling in 40 min
zonder isolatie	70,0 °C	55,0 °C	44,0 °C	26,0 °C
aluminiumfolie	70,0 °C	57,5 °C	48,0 °C	22,0 °C
krant (4 lagen)	70,0 °C	60,5 °C	53,0 °C	17,0 °C
noppenfolie	70,0 °C	61,5 °C	55,0 °C	15,0 °C
wollen sjaal	70,0 °C	62,5 °C	56,5 °C	13,5 °C
piepschuim	70,0 °C	64,0 °C	59,0 °C	11,0 °C

Voorbeeld van resultaten in een klas (kamer van 20 °C). Hoe beter de isolatie, hoe trager de temperatuur daalt.

VERKLARING

Alle potten verliezen warmte, maar niet even snel. Het piepschuim houdt het water het warmst: het bestaat voor meer dan 95 % uit lucht, opgesloten in kleine cellen. Wol en noppenfolie werken om dezelfde reden. Aluminiumfolie helpt maar een beetje: het kaatst infrarood terug en houdt de luchtstroming langs de pot tegen, maar het is dun en metaal geleidt goed.

Alle krommen worden vlakker naarmate het water afkoelt: hoe kleiner het temperatuurverschil met de kamer, hoe trager de warmte wegstroomt. Na lange tijd hebben alle potten 20 °C. Isolatie houdt de warmte dus niet tegen, ze **remt** ze af.

Waarom is de proef eerlijk? Omdat alleen het materiaal verschilt. Neem je voor het piepschuim heter water of een pot zonder deksel, dan weet je niet meer wat het verschil veroorzaakt.



Zes potten, één verschil: het isolatiemateriaal. Al de rest blijft gelijk.

UITLEG · 16.13

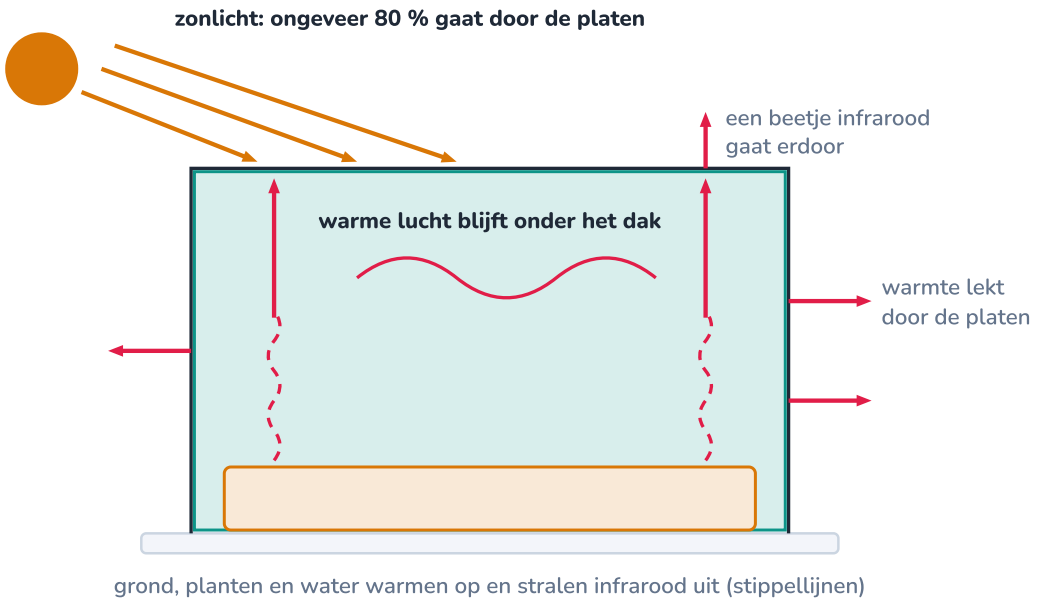
Waarom de kas overdag warm wordt

13/18

Nu kan je de grafiek van het begin van dit hoofdstuk verklaren. Volg de energie van het zonlicht (hoofdstuk 15):

1. **Het zonlicht komt binnen.** De polycarbonaatplaten laten ongeveer 80 % van het zonlicht door. Het meeste valt op de grond, de planten, de bakjes en het water.
2. **Het wordt warmte.** Die voorwerpen nemen het licht op en warmen op, net zoals het zwarte blikje in de proef. Ze geven hun warmte door aan de lucht die ertegen stroomt.
3. **De warme lucht kan niet weg.** Buiten zou de opgewarmde lucht opstijgen en meteen vervangen worden door koelere lucht, en zou de wind ze wegblazen. In de kas zitten wanden en een dak: de warme lucht blijft binnen. **Dat is de belangrijkste reden waarom een kas warm wordt: de stroming wordt tegengehouden.**
4. **Het infrarood blijft grotendeels binnen.** De warme grond en planten stralen infrarood uit. Polycarbonaat (en glas) laat dat infrarood maar weinig door: de plaat neemt het op, warmt op, en straalt een deel ervan terug naar binnen. Ook dat helpt, maar minder dan het opsluiten van de lucht.
5. **Evenwicht.** Hoe warmer de kas, hoe sneller ze warmte verliest door geleiding door de dunne platen en langs de kieren. De temperatuur stijgt tot er evenveel warmte weglekt als er binnenkomt. Op de zonnige apriltag lag dat evenwicht rond 32 °C.

En 's nachts? Dan komt er niets meer binnen, maar het weglekken gaat door. De grond en het water geven hun warmte van de dag langzaam af, maar de dunne wand laat die snel door. Op een heldere nacht straalt de kas bovendien infrarood uit naar de koude hemel. Tegen de ochtend is de kas bijna even koud als buiten.



Zonlicht erin, warme lucht opgesloten onder het dak, infrarood grotendeels tegengehouden door de platen; door de wanden lekt warmte weg.

VERHAAL · 16.14

Een kas met een ruit van zout

14/18

Klopt het wel dat een kas vooral warm wordt omdat de lucht niet weg kan? In 1909 zocht de Amerikaanse natuurkundige **Robert W. Wood** het uit met een slimme proef. Hij maakte twee kleine

dozen van zwart karton. De ene dekte hij af met een glasplaat, de andere met een plaat **steenzout**. Steenzout ziet eruit als glas, maar het laat infrarood bijna volledig door. Als het tegenhouden van infrarood de belangrijkste reden was, moest de doos met zout veel koeler blijven.

Hij zette beide dozen in de zon, met een thermometer in elk. Beide werden flink warm. Om eerlijk te vergelijken, liet hij het zonlicht eerst door een extra glasplaat gaan, zodat beide dozen precies hetzelfde licht kregen. Resultaat: beide dozen werden ongeveer 55 °C, en het verschil was minder dan één graad. Zijn besluit: een kas wordt vooral warm omdat ze de opgewarmde lucht opsluit.

Latere onderzoekers herhaalden de proef zorgvuldiger. Zij vonden dat het tegenhouden van infrarood wel een beetje uitmaakt, maar dat Wood gelijk had over het belangrijkste effect. In opdracht 16.14 herhaal je een eenvoudige versie: huishoudfolie laat, net als steenzout, veel infrarood door.

> ⚠ **Een kas is geen model van de atmosfeer**
>
> Wood trok ook een besluit over de atmosfeer van de aarde, en dat klopte niet: rond de aarde zit geen dak dat de lucht opsluit. Daar werkt het 'broeikaseffect' helemaal via de straling. Hoe, zie je op het volgende blad.



Glas houdt infrarood tegen, steenzout laat het door. Toch werden beide dozen bijna even warm.

UITLEG · 16.15

Het broeikaseffect van de aarde

15/18

De aarde heeft ook een 'broeikaseffect', maar het werkt anders dan in een kas. Er is geen dak: de lucht kan vrij opstijgen en rondstromen. Het effect zit in de **straling**:

1. Het **zonlicht** gaat bijna ongehinderd door de lucht en warmt het aardoppervlak op.

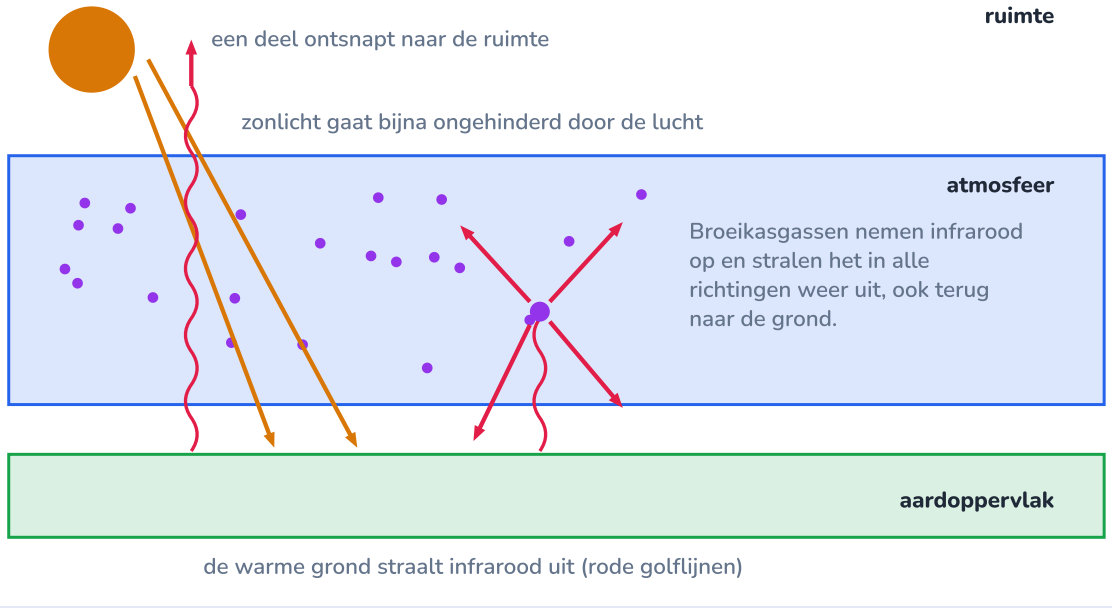
2. Het warme aardoppervlak straalt **infrarood** uit, naar boven.
3. Enkele gassen in de lucht nemen een deel van dat infrarood op: de **broeikasgassen**. De belangrijkste zijn **waterdamp**, **koolstofdioxide** (CO_2), methaan en lachgas. Stikstof en zuurstof, samen 99 % van de droge lucht, doen dat niet.
4. De broeikasgassen stralen die energie weer uit, **in alle richtingen**: een deel naar de ruimte, een deel **terug naar de grond**. Daardoor krijgt het aardoppervlak meer energie dan van de zon alleen, en wordt het warmer.

Dat **natuurlijke broeikaseffect** is levensbelangrijk. Zonder broeikasgassen zou de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak ongeveer −18 °C zijn in plaats van ongeveer 15 °C: een aarde vol ijs.

Het probleem is het **extra** broeikaseffect. Door steenkool, aardolie en aardgas te verbranden, brengt de mens veel CO_2 in de lucht. Voor 1850 zat er ongeveer 280 deeltjes CO_2 per miljoen deeltjes lucht (280 ppm), in 2025 al 427 ppm. Meer broeikasgassen betekent dat er meer infrarood naar de grond teruggestraald wordt: de aarde warmt op. Daarover gaat hoofdstuk 17.

De atmosfeer werkt als het dak van een kas

Het woord 'broeikaseffect' doet dat denken, maar de twee werken verschillend. Een kas wordt vooral warm omdat het dak de warme **lucht** opsluit (stroming tegengehouden). De atmosfeer sluit niets op: de lucht stroomt vrij. Daar komt het effect van broeikasgassen die **infrarood** opnemen en terugstralen. Wat ze gemeen hebben: zonlicht komt makkelijker binnen dan de warmte weer weg kan.



Zonlicht gaat erdoor, infrarood wordt deels opgenomen door broeikasgassen (paarse stippen) en in alle richtingen weer uitgestraald.

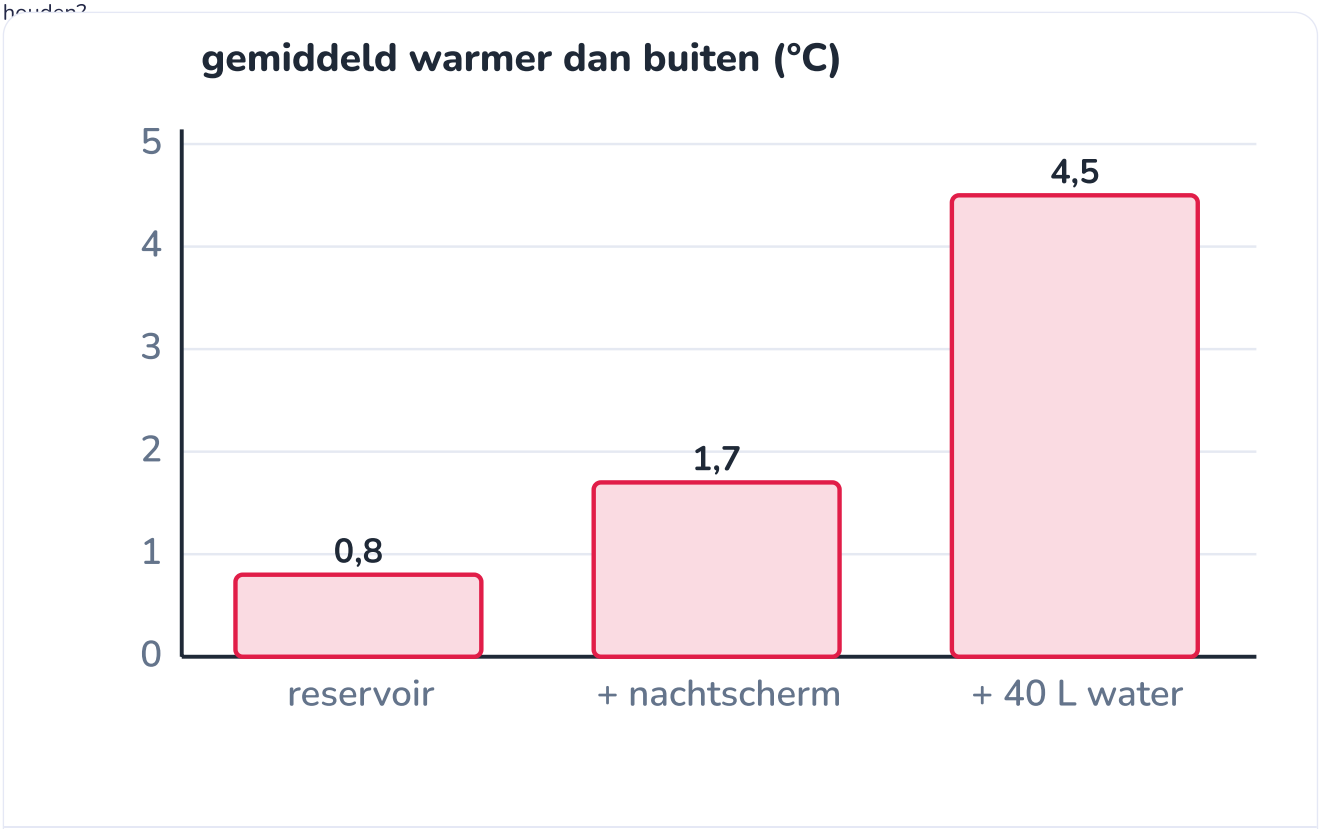
UITGEWERKT VOORBEELD · 16.16

Habitat: de meetkas 's nachts warm houden

16/18

De platen van de meetkas laten ongeveer **50 kJ warmte per uur** door voor elke graad dat de kas warmer is dan buiten (door de tafel en de kieren nog wat meer). Het reservoir bevat 24 L water. Op een lentenacht van 12 uur koelt dat water 5 °C af. (a) Hoeveel warmte geeft het reservoir af? (b) Hoeveel warmer dan buiten kan dat de kas gemiddeld houden? (c) Een nachtscherm van noppenfolie tegen de binnenkant halveert het verlies. Wat is dan het effect? (d) Je zet er nog vier donkere jerrycans van 10 L water bij, die overdag in de zon opwarmen en 's nachts ook 5 °C afkoelen. (e) Hoeveel energie zou een

elektrisch verwarmingselement nodig hebben om de kas zonder scherm de hele nacht 5 °C warmer te houden?



Isoleren en bufferen: zonder extra energie blijft de kas 's nachts tot ongeveer 4,5 °C warmer dan buiten.

GEGEVEN

- verlies: $50\,\mathrm{kJ}$ per uur per °C verschil (met nachtscherm: 25)
- nacht: 12 uur
- reservoir: $24\,\mathrm{L}$, koelt 5 °C af
- extra water: $4 \times 10\,\mathrm{L} = 40\,\mathrm{L}$, koelt 5 °C af
- water: $4{,}2\,\mathrm{kJ}$ per liter per °C

GEVRAAGD

- warmte uit het reservoir
- verschil met buiten, zonder en met nachtscherm, en met extra water
- energie voor een verwarming

OPLOSSING

1. (a) $Q = 4{,}2 \times 24 \times 5 = 504\,\mathrm{kJ}$. Per uur: $504/12 = 42\,\mathrm{kJ}$.
2. (b) De kas verliest 50 kJ per uur per graad. Met 42 kJ per uur blijft ze gemiddeld $42/50 \approx 0{,}8$ °C warmer dan buiten. Dat klopt met de meting van hoofdstuk 4 (ongeveer 1 °C): de potgrond geeft ook nog wat warmte af.
3. (c) Met het scherm verliest de kas nog 25 kJ per uur per graad: $42/25 \approx 1{,}7$ °C. Het scherm verdubbelt het effect, zonder één joule extra energie.
4. (d) Extra water: $4{,}2 \times 40 \times 5 = 840\,\mathrm{kJ}$. Samen $504 + 840 = 1344\,\mathrm{kJ}$, of $112\,\mathrm{kJ}$ per uur. Met scherm: $112/25 \approx 4{,}5$ °C warmer dan buiten.
5. (e) $50 \times 5 \times 12 = 3000\,\mathrm{kJ} = 3{,}0\,\mathrm{MJ}$ per nacht, de energie van drie snoeprepen, elke nacht opnieuw. In hoofdstuk 17 zie je dat het zonnepaneel van de meetkas in de winter per dag minder dan een tiende daarvan levert.

ANTWOORD

(a) 504 kJ. (b) Ongeveer 0,8 °C. (c) Ongeveer 1,7 °C. (d) Ongeveer 4,5 °C. (e) 3,0 MJ per nacht. Isoleren en warmte bufferen in water is veel slimmer dan verwarmen.

Klopt dit? Dit is een ruwe schatting: in werkelijkheid geeft het water de meeste warmte af in het begin van de nacht, en koelt het niet precies 5 °C af. Maar de orde van grootte klopt, en de besluiten blijven: dicht het dakraam en de kieren, hang 's nachts een scherm op, en gebruik water als warmtebuffer. Ook Princess Elisabeth Antarctica heeft geen klassieke verwarming: dikke wanden (ongeveer 60 cm, met een dikke laag polystyreen) houden de warmte van de zon, de bewoners en de toestellen binnen.

NASLAG · 16.17

Overzicht: warmte en temperatuur

17/18

De formules, de drie wegen van warmte en de warmtegeleiding van materialen op één blad.

van graden Celsius naar kelvin

$$T = t + 273{,}15$$

symbool	betekenis	eenheid
T	temperatuur	kelvin (K)
t	temperatuur	graad Celsius (°C)

warmte om water op te warmen

$$Q = 4{,}2 \cdot V \cdot \Delta t$$

symbool	betekenis	eenheid
Q	warmte	kilojoule (kJ)
V	volume water	liter (L)
Δt	temperatuurstijging	°C (of K)

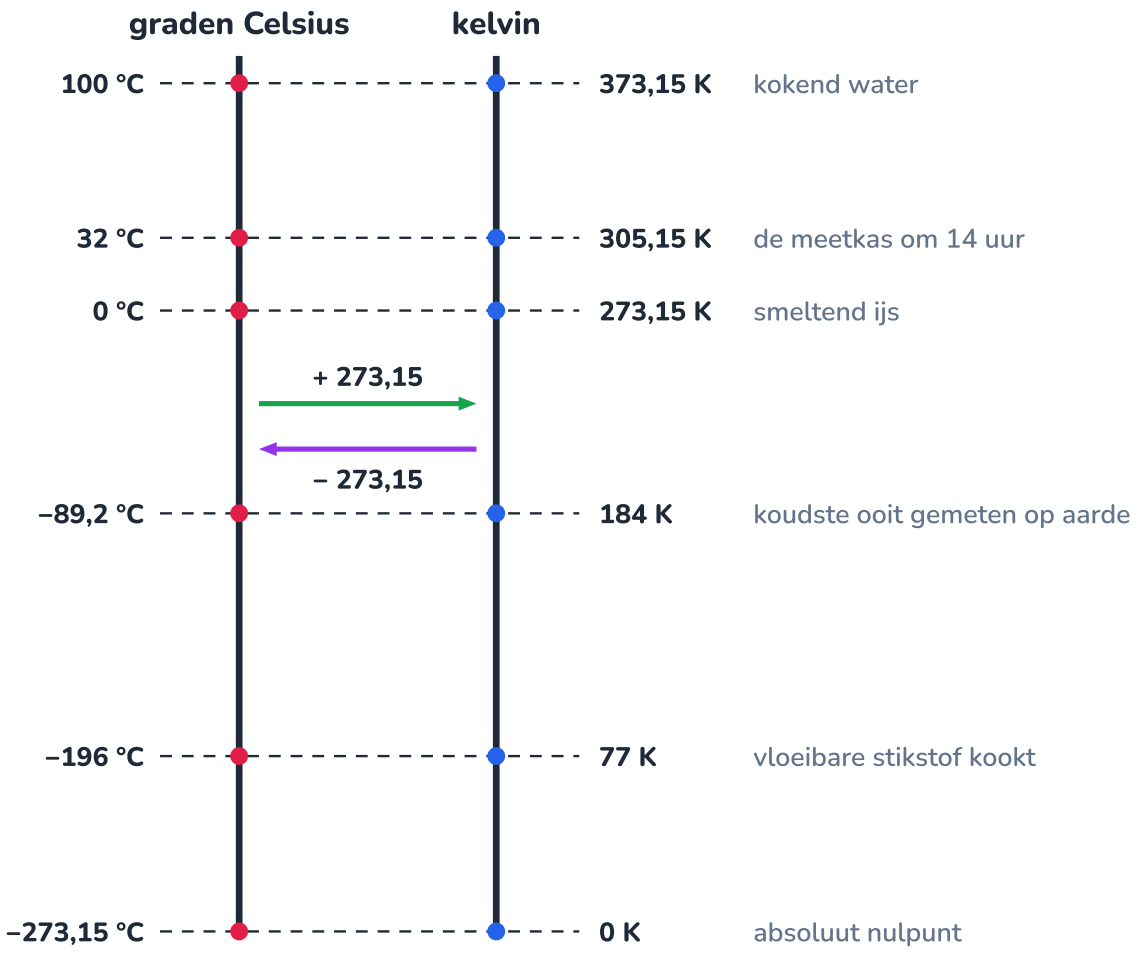
	geleiding	stroming (convectie)	straling
hoe?	deeltjes geven hun trilling door aan hun buren	warme lucht of vloeistof verplaatst zich en neemt de warmte mee	infrarood (en licht) gaat van het warme voorwerp naar het koude
waar?	vooral in vaste stoffen	alleen in vloeistoffen en gassen	overal, ook door het luchtledige
voorbeeld	een metalen lepel in hete soep	verwarming die een kamer opwarmt, wind	de zon, een kampvuur
tegenhouden	isolatiemateriaal, stilstaande lucht, vacuüm	lucht opsluiten in kleine cellen, kieren dichten	blinkende oppervlakken die terugkaatsen

materiaal	warmtegeleiding (W per m per K)	geleidt warmte
koper	400	heel goed: metalen
aluminium	± 200	
staal (roestvast staal)	± 50 (± 15)	
ijs	2,2	matig
beton	± 1,5	
glas	± 1	
water	0,6	
polycarbonaat	0,20	slecht
dennenhout	± 0,13	
kurk, schapenwol	± 0,04	heel slecht: isolatoren
piepschuim (EPS), minerale wol	± 0,035	
PUR-schuim	± 0,025	
stilstaande lucht	0,026	

Afgeronde waarden (orde van grootte). Hoe kleiner het getal, hoe beter het materiaal isoleert. Wat het getal precies betekent, leer je in hoofdstuk I19.

begrip	betekenis
temperatuur	hoe snel de deeltjes gemiddeld bewegen; niet afhankelijk van de hoeveelheid

begrip	betekenis
thermische energie	de energie van alle bewegende deeltjes samen
warmte	energie die van warm naar koud stroomt
broeikaseffect in een kas	vooral: de warme lucht kan niet weg; deels: de platen houden infrarood tegen
broeikaseffect van de aarde	broeikasgassen nemen infrarood op en stralen een deel terug naar de grond



Celsius en kelvin: dezelfde stappen, een ander nulpunt.

HET GEHEEL · 16.18

Waar warmte naartoe leidt

18/18

Warmte en temperatuur verbinden de leerlijn **Energie** met **Materie en chemie**: het deeltjesmodel verklaart wat temperatuur is en waarom metalen goed geleiden. Met de isolatieproef en de afkoelgrafieken zit je in **Onderzoeken en meten**, en met isoleren en het warm houden van de kas in **Ontwerpen en maken**. In Intermediate reken je warmte en warmteverlies echt uit, in Expert bouw je er een warmtemodel mee dat de temperatuur van het station voorspelt.

F4 Tabellen, grafieken en verbanden
Het temperatuurverloop van de meetkas tekenen en lezen.

F6 Het deeltjesmodel
Temperatuur als beweging van deeltjes, uitzetten, en condens op de koude wand.

F7 Massa, volume en dichtheid
Warme lucht heeft een kleinere dichtheid en stijgt.

F10 Materialen en hun eigenschappen

F15 Energie: vormen en omzettingen

F17 Energie uit zon, wind en water

Warmtegeleiding als materiaaleigenschap; de koudebrug van het aluminium frame.

Warmte als energievorm; waarom bijna alle energie op het eind warmte wordt.

CO2 en het klimaat; de zonneboiler; warmte opslaan in water.

F25 Sensoren en automatisch regelen

Een thermostaat die het dakraam of een verwarming aan- en uitzet.

I18 Warmte berekenen

Warmte berekenen voor elke stof: $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$; water als warmtebuffer.

I19 Warmtetransport en isolatie

Lambda-waarde, R-waarde, U-waarde en het warmteverlies van een kleine kas berekenen.

E14 Gassen en de gaswetten

Waarom je bij gassen met kelvin moet rekenen.

E17 Warmteoverdracht kwantitatief

Geleiding, convectie en straling in formules; het warmtemodel van het station.

Habitat

De meetkas wordt overdag warm omdat ze de door de zon opgewarmde lucht opsluit, en koelt 's nachts af omdat de dunne platen de warmte snel doorlaten. In opdracht 16.13 maak je een nachtplan: dakraam en kieren dicht, een nachtscherm, water als warmtebuffer. Noteer in je portfolio de rekenwaarde: de platen verliezen ongeveer 50 kJ per uur per graad verschil (hoofdstuk I19 rekent het na).

SAMENVATTING

In het kort

- Temperatuur zegt hoe snel de deeltjes gemiddeld bewegen; thermische energie is de energie van alle deeltjes samen; warmte is energie die van warm naar koud stroomt.
- Om 1 L water 1 °C warmer te maken, is ongeveer 4,2 kJ nodig: $Q = 4{,}2 \cdot V \cdot \Delta t$.
- Kelvin is de SI-eenheid van temperatuur: $T = t + 273{,}15$. Het absolute nulpunt is 0 K = −273,15 °C. Een verschil van 1 °C is een verschil van 1 K.
- Warmte verplaatst zich door geleiding (vooral in vaste stoffen, metalen het best), stroming (in vloeistoffen en gassen) en straling (infrarood, ook door het luchtledige).
- Isoleren is de warmtestroom afremmen: stilstaande lucht in kleine cellen of smalle luchtlagen, blinkende lagen tegen straling. Een metalen profiel is een koudebrug.
- Een kas wordt warm vooral omdat ze de opgewarmde lucht opsluit, en deels omdat de platen infrarood tegenhouden.
- Het broeikaseffect van de aarde werkt via straling: broeikasgassen nemen infrarood op en stralen een deel terug naar de grond. Meer CO2 betekent opwarming.
- Een eerlijke isolatieproef verandert één ding (het materiaal) en houdt al de rest gelijk, met een controle zonder isolatie.
- De meetkas warm houden 's nachts: kieren en dakraam dicht, een nachtscherm, water als warmtebuffer. Verwarmen kost veel meer energie.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

temperatuur

Een maat voor hoe snel de deeltjes van een stof gemiddeld bewegen; je meet ze met een thermometer, in °C of in kelvin.

thermische energie

De energie van alle bewegende deeltjes in een voorwerp samen; hoe meer deeltjes en hoe sneller, hoe meer.

warmte

Energie die van een warm naar een kouder voorwerp stroomt, omdat hun temperatuur verschilt.

kelvin
De SI-eenheid van temperatuur. De kelvinschaal begint bij het absolute nulpunt: $T = t + 273{,}15$.

absoluut nulpunt
De laagst mogelijke temperatuur, 0 K of −273,15 °C: de deeltjes bewegen zo weinig als maar kan.

geleiding
Warmtetransport doordat deeltjes hun trilling doorgeven aan hun buren, vooral in vaste stoffen.

stroming (convectie)
Warmtetransport doordat een warme vloeistof of een warm gas zich verplaatst en de warmte meeneemt.

straling
Warmtetransport door infrarood en licht; werkt ook door het luchtledige.

isolator
Een materiaal dat warmte slecht geleidt, zoals piepschuim, wol of stilstaande lucht.

koudebrug
Een plaats in een wand waar warmte veel makkelijker naar buiten lekt dan elders, bijvoorbeeld een metalen profiel.

broeikaseffect
De opwarming van het aardoppervlak doordat broeikasgassen infrarood opnemen en een deel ervan terug naar de grond uitstralen.

F FUNDAMENTAL · DEEL F4 · ENERGIE

HANDBOEK · HOOFDSTUK 17

Energie uit zon, wind en water

Waar onze energie vandaan komt, waarom dat moet veranderen, en hoe je de meetkas op zonne-energie laat draaien

Steenkool, aardolie en aardgas hebben de wereld tweehonderd jaar lang aangedreven, maar ze raken op en ze warmen de aarde op. In dit hoofdstuk vergelijk je **fossiele**, **nucleaire** en **hernieuwbare** energiebronnen en zie je hoe CO_2 het klimaat verandert. Je leert hoe een **zonnepaneel**, een **zonneboiler**, een **windturbine** en een **waterkrachtcentrale** werken, en je rekent met **watt** en **wattuur** uit hoeveel energie een klein zonnepaneel in de zomer en in de winter levert. Omdat zon en wind niet altijd beschikbaar zijn, bekijk je hoe je energie **opslaat**. Met dat alles kies je hoe de meetkas van energie voorzien wordt.

9× uitleg · 5× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

E Energie · L Elektriciteit en elektronica · D Ontwerpen en maken



Princess Elisabeth Antarctica: een poolstation dat draait op zon en wind.

Na dit hoofdstuk

- Je kan fossiele, nucleaire en hernieuwbare energiebronnen onderscheiden, met voor- en nadelen.
- Je kan uitleggen hoe het verbranden van fossiele brandstoffen via CO2 bijdraagt aan de opwarming van de aarde, en een CO2-grafiek lezen.
- Je kan het verschil tussen vermogen (in watt) en energie (in wattuur) uitleggen en rekenen met energie = vermogen × tijd.
- Je kan uitleggen hoe een zonnepaneel en een zonneboiler werken, en wanneer je welke kiest.
- Je kan de energieketen van een windturbine en een waterkrachtcentrale beschrijven.
- Je kan de dagopbrengst van een zonnepaneel schatten met zijn piekvermogen, in de zomer en in de winter.
- Je kan manieren om energie op te slaan vergelijken: batterij, water omhoog pompen, warmtebuffer.
- Je kan een onderbouwde keuze maken voor de energievoorziening van de meetkas.

VERHAAL · 17.1

Een poolstation op zon en wind

Op 15 februari 2009 werd op een rotsrug in Oost-Antarctica, 1382 m boven de zeespiegel, het Belgische poolstation **Princess Elisabeth Antarctica** geopend. Het is het eerste poolstation dat ontworpen werd om zonder fossiele brandstoffen te werken. Dat is geen kleinigheid: de meeste poolstations draaien op diesel, die per schip en daarna vaak per sneeuwtractor over honderden kilometers ijs aangevoerd moet worden.

Hoe doet het station het dan?

- **Wind**: negen windturbines van elk 6 kW, samen 54 kW. Wind is er genoeg: het station staat op een plaats met zware stormen.
- **Zon**: honderden zonnepanelen (ongeveer 380 m²) op en rond het gebouw. In de Antarctische zomer gaat de zon er wekenlang niet onder, en op een goede dag leveren ze ongeveer 420 kWh.
- **Warm water**: zonnecollectoren (ongeveer 24 m²) warmen water op, zoals een zonneboiler.
- **Opslag**: batterijen vangen de pieken en de dalen op. Een 'slim net' beslist voortdurend welke toestellen voorrang krijgen, zodat er nooit meer gevraagd wordt dan er is.
- **Zuinig**: dikke, goed isolerende wanden (hoofdstuk 16) maken een klassieke verwarming overbodig.

Het station wordt alleen in de zomer (november tot februari) bemand; in de lange poolnacht is het dicht. Voor noodgevallen staan er ook reservegeneratoren. Wat daar in het extreemste klimaat van de aarde lukt, is precies wat je in dit hoofdstuk op kleine schaal doet: de meetkas laten draaien op zonne-energie.

Twee keer Elisabeth

Voor de Belgische kust wordt een tweede 'Prinses Elisabeth' gebouwd: het **Prinses Elisabetheiland**, een kunstmatig energie-eiland op ongeveer 45 km voor Oostende. Het verzamelt de kabels van nieuwe windparken op zee (samen tot 3,5 GW) en brengt de stroom naar land. Beide zijn genoemd naar kroonprinses Elisabeth.



Windturbines op de rotsrug naast het station.

UITLEG · 17.2

Fossiel, nucleair of hernieuwbaar

2/19

Energiebronnen deel je in drie groepen in:

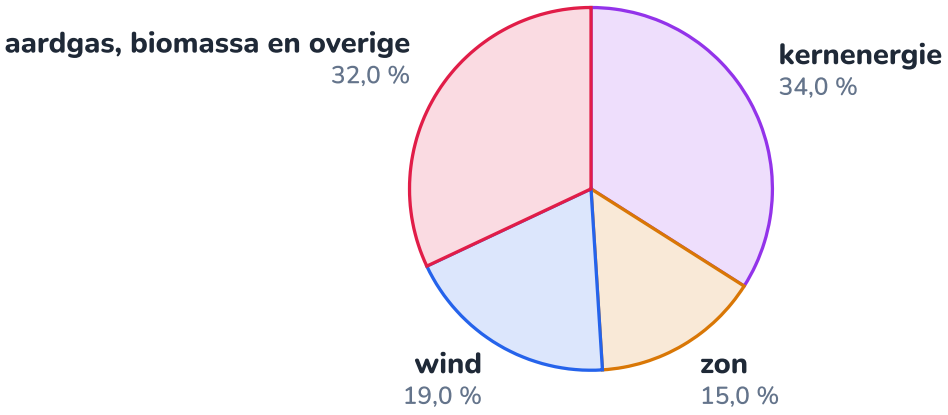
- **Fossiele brandstoffen**: steenkool, aardolie (waaruit benzine, diesel en stookolie komen) en aardgas. Ze ontstonden uit resten van planten en plankton die miljoenen jaren onder de grond lagen. Het is opgeslagen zonne-energie van lang geleden (hoofdstuk 15). Wat we opstoken, komt in een mensenleven niet terug: de voorraad **raakt op**. En bij het verbranden komt **CO_2** vrij.
- **Kernenergie**: in een kerncentrale splijten uraniumkernen en komt warmte vrij, waarmee stoom een turbine aandrijft. Er komt tijdens de werking bijna geen CO_2 vrij, maar er ontstaat radioactief afval dat heel lang veilig bewaard moet worden, en ook uranium raakt ooit op.
- **Hernieuwbare energie**: bronnen die vanzelf aangevuld worden: zon, wind, stromend water, aardwarmte en biomassa (hout, plantenresten, mest) zolang er evenveel teruggroeit als er verbruikt wordt. Ze raken niet op en geven (bijna) geen CO_2. Het woord **duurzaam** betekent: zo dat ook latere generaties nog kunnen doen wat wij doen.

bron	soort	voordelen	nadelen
steenkool, aardolie, aardgas	fossiel	veel energie in weinig brandstof; op elk moment beschikbaar	CO_2 en luchtvervuiling; raakt op; vaak ingevoerd

bron	soort	voordelen	nadelen
uranium (kerncentrale)	nucleair	bijna geen CO_2; op elk moment beschikbaar	radioactief afval; duur om te bouwen; risico bij ongevallen; uranium raakt op
zon (zonnepaneel, zonneboiler)	hernieuwbaar	geen brandstof, stil, op elk dak	's nachts niets, in de winter weinig
wind	hernieuwbaar	veel energie op zee, ook in de winter	wisselend; zichtbaar in het landschap
water (stuwdam, rivier)	hernieuwbaar	regelbaar, lange levensduur	in België weinig hoogteverschil; stuwmeren veranderen een vallei
biomassa (hout, gft, mest)	hernieuwbaar als er evenveel teruggroeit	opslaanbaar	ruimte en landbouwgrond nodig

België. In 2025 kwam ongeveer een derde van de elektriciteit die in België geproduceerd werd uit kerncentrales, een derde uit zon en wind, en de rest vooral uit aardgascentrales, met wat biomassa en waterkracht. Zonnepanelen leverden voor het eerst meer dan 10 TWh (België had toen 11,6 GW aan panelen). Daarnaast voerde België 14 TWh meer elektriciteit in dan het uitvoerde.

> ⚠ **Elektriciteit is maar een deel**
>
> Elektriciteit is ongeveer een vijfde van alle energie die in België gebruikt wordt. Voor verwarming (aardgas, stookolie) en vervoer (benzine, diesel) gebruiken we nog vooral fossiele brandstoffen. Wereldwijd komt ongeveer 80 % van alle energie uit fossiele brandstoffen.



Belgische elektriciteitsproductie in 2025, afgerond (bron: Elia). Een derde kernenergie, een derde zon en wind.

UITLEG · 17.3

CO_2 en het klimaat

3/19

Fossiele brandstoffen bestaan grotendeels uit koolstof. Bij het verbranden verbindt die koolstof zich met zuurstof uit de lucht tot **koolstofdioxide**, CO_2. Dat gas is onzichtbaar en reukloos, en het blijft honderden jaren in de lucht. Een liter benzine geeft ongeveer 2,3 kg CO_2: meer dan de benzine zelf weegt, omdat de zuurstof uit de lucht meetelt (hoe je dat berekent, leer je in hoofdstuk I14).

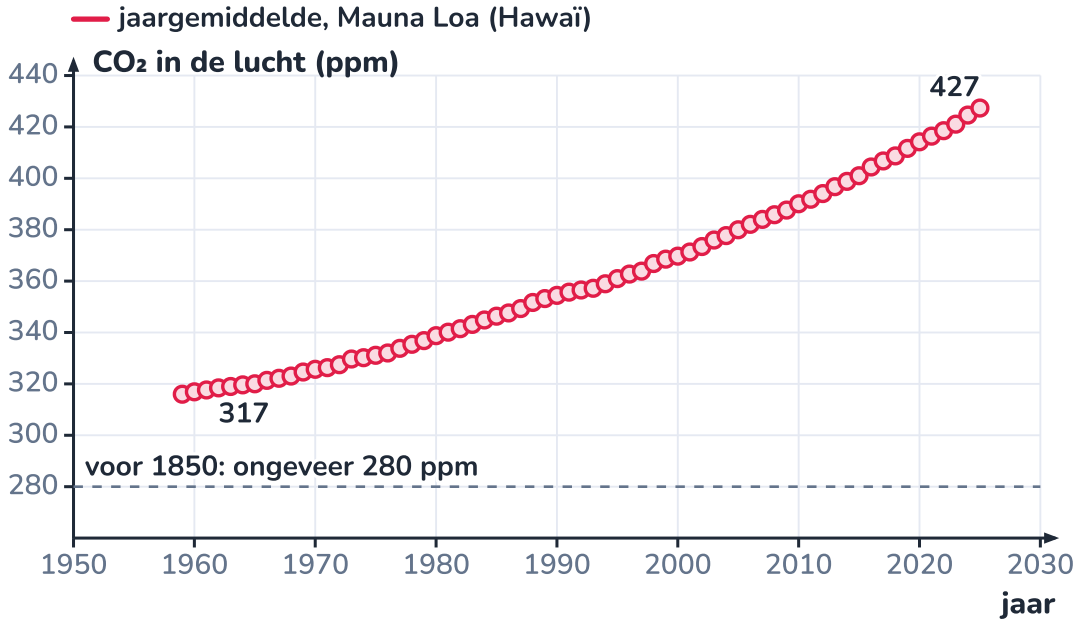
Sinds 1958 meten onderzoekers op de vulkaan Mauna Loa (Hawaï), ver van steden en fabrieken, hoeveel CO_2 er in de lucht zit. De grafiek stijgt elk jaar, en steeds sneller: in de jaren 1960 kwam er ongeveer 0,9 ppm per jaar bij, de voorbije tien jaar ongeveer 2,6 ppm per jaar. In 2025 was het jaargemiddelde 427 ppm, tegenover ongeveer 280 ppm voor de industriële revolutie.

In hoofdstuk 16 zag je waarom dat ertoe doet: CO_2 is een **broeikasgas**. Meer CO_2 betekent dat er meer infrarood naar het aardoppervlak teruggestraald wordt, en dus dat de aarde opwarmt. Volgens de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO) was het in 2025 gemiddeld al ongeveer 1,4 °C warmer dan rond 1850-1900; 2024 was het warmste jaar ooit gemeten (ongeveer 1,55 °C), en de elf jaren van 2015 tot 2025 waren de elf warmste sinds het begin van de metingen.

De gevolgen: meer en hevigere hittegolven, smeltende gletsjers en ijskappen, een stijgende zeespiegel, en op veel plaatsen zwaardere regenbuien en langere droogtes. Voor een laag land aan zee zoals België is de zeespiegel een belangrijke zorg.

Het klimaat is gewoon het weer

Het **weer** is wat er vandaag en morgen gebeurt: een koude week, een warme dag. Het **klimaat** is het gemiddelde over tientallen jaren. Een koude winter spreekt de opwarming niet tegen, net zoals één slechte toets niet zegt hoe goed je een vak beheerst.



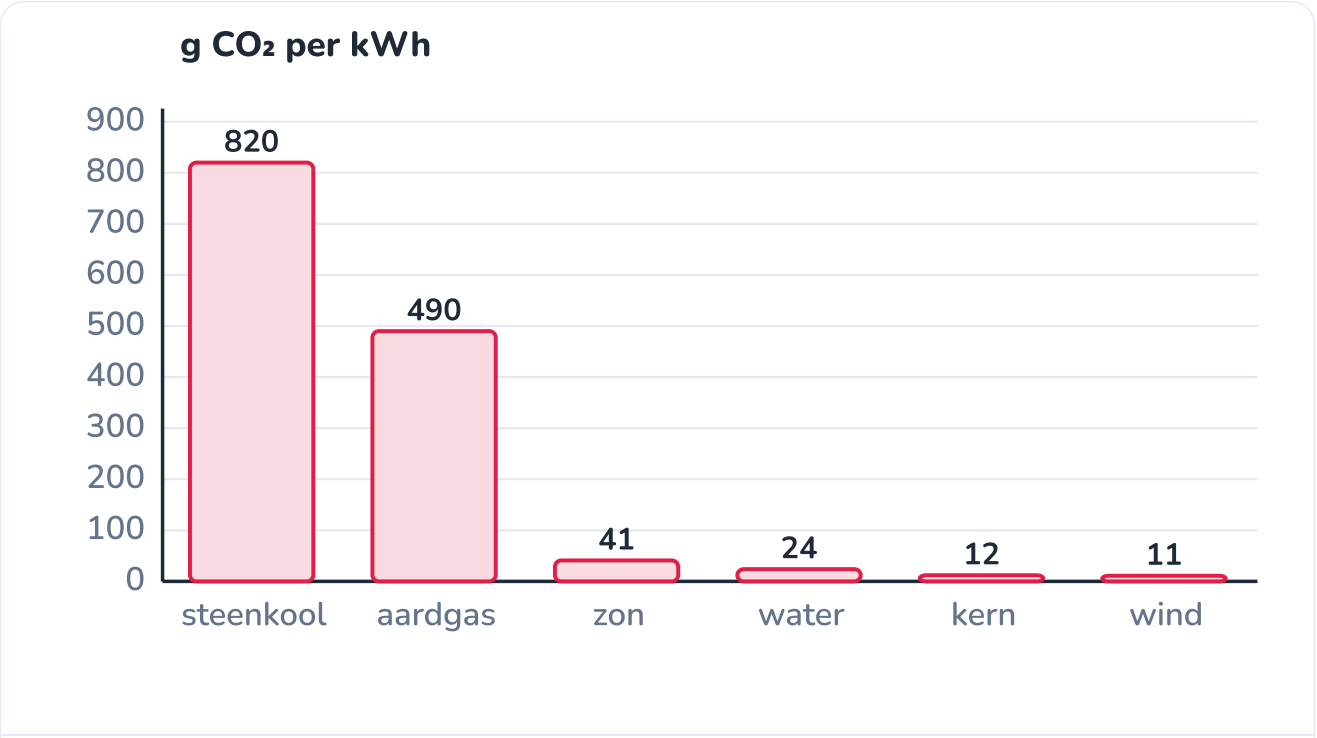
Jaargemiddelden gemeten op Mauna Loa (NOAA). De lijn stijgt steeds steiler.

UITGEWERKT VOORBEELD · 17.4

Hoeveel CO_2 zit er in je elektriciteit?

4/19

Ook een windturbine of een zonnepaneel veroorzaakt wat CO_2: bij het maken van staal, beton, glas en silicium. Het Klimaatpanel van de Verenigde Naties (IPCC) berekende hoeveel CO_2 er per kWh vrijkomt over de hele levensduur van een centrale (zie figuur). Een gezin gebruikt 3500 kWh elektriciteit per jaar. Hoeveel CO_2 is dat als alle stroom komt uit (a) steenkool, (b) aardgas, (c) wind op land? (d) Vergelijk met een auto die 10 000 km rijdt en 6 L benzine per 100 km verbruikt.



CO2 per kWh over de hele levensduur (IPCC, 2014, mediaanwaarden). Zon: panelen op een dak; wind: op land.

GEGEVEN

- verbruik: $3500\,\text{kWh}$ per jaar
- CO_2 per kWh: steenkool 820 g, aardgas 490 g, wind 11 g
- auto: $10\,000\,\text{km}$, $6\,\text{L}$ per 100 km, 2,3 kg CO_2 per liter

GEVRAAGD

- CO_2 per jaar voor elke bron
- vergelijking met de auto

OPLOSSING

1. (a) $3500 \times 820\,\text{g} = 2\,870\,000\,\text{g} = 2870\,\text{kg}$, bijna 3 ton.
2. (b) $3500 \times 490\,\text{g} = 1\,715\,000\,\text{g} \approx 1700\,\text{kg}$.
3. (c) $3500 \times 11\,\text{g} = 38\,500\,\text{g} \approx 40\,\text{kg}$: zeventig keer minder dan steenkool.
4. (d) Brandstof: $10\,000/100 \times 6 = 600\,\text{L}$; CO_2: $600 \times 2{,}3 = 1380\,\text{kg}$.

ANTWOORD

Steenkool ongeveer 2,9 ton, aardgas ongeveer 1,7 ton, wind ongeveer 40 kg CO_2 per jaar. De auto stoot ongeveer 1,4 ton uit: evenveel als de elektriciteit van het gezin uit een gascentrale.

Klopt dit? Let op de eenheden: gram per kWh maal kWh geeft gram; deel door 1000 voor kilogram. En let op wat meetelt: bij zon en wind komt de CO2 van het bouwen, bij steenkool en gas vooral van het verbranden.

UITLEG · 17.5

Vermogen en energie: watt en wattuur

5/19

Een zonnepaneel, een lamp, een pomp: bij elk toestel staat een getal in **watt** (W). Dat getal is geen energie, maar het **vermogen**: hoeveel energie het toestel *per seconde* omzet. $1\,\text{W} = 1\,\text{J}$ per seconde. Een ledlamp van 10 W zet elke seconde 10 J elektrische energie om in licht en warmte. Een waterkoker van 2000 W (2 kW) doet dat tweehonderd keer zo snel.

Hoeveel energie het toestel in totaal omzet, hangt af van hoe **lang** het werkt:

ENERGIE UIT VERMOGEN

$$\text{energie} = \text{vermogen} \times \text{tijd}$$

Vermogen in watt en tijd in seconden geeft joule. Vermogen in watt en tijd in uur geeft **wattuur** (Wh). $1\,\text{Wh} = 1\,\text{W} \times 3600\,\text{s} = 3600\,\text{J}$, en $1\,\text{kWh} = 1000\,\text{Wh} = 3{,}6\,\text{MJ}$.

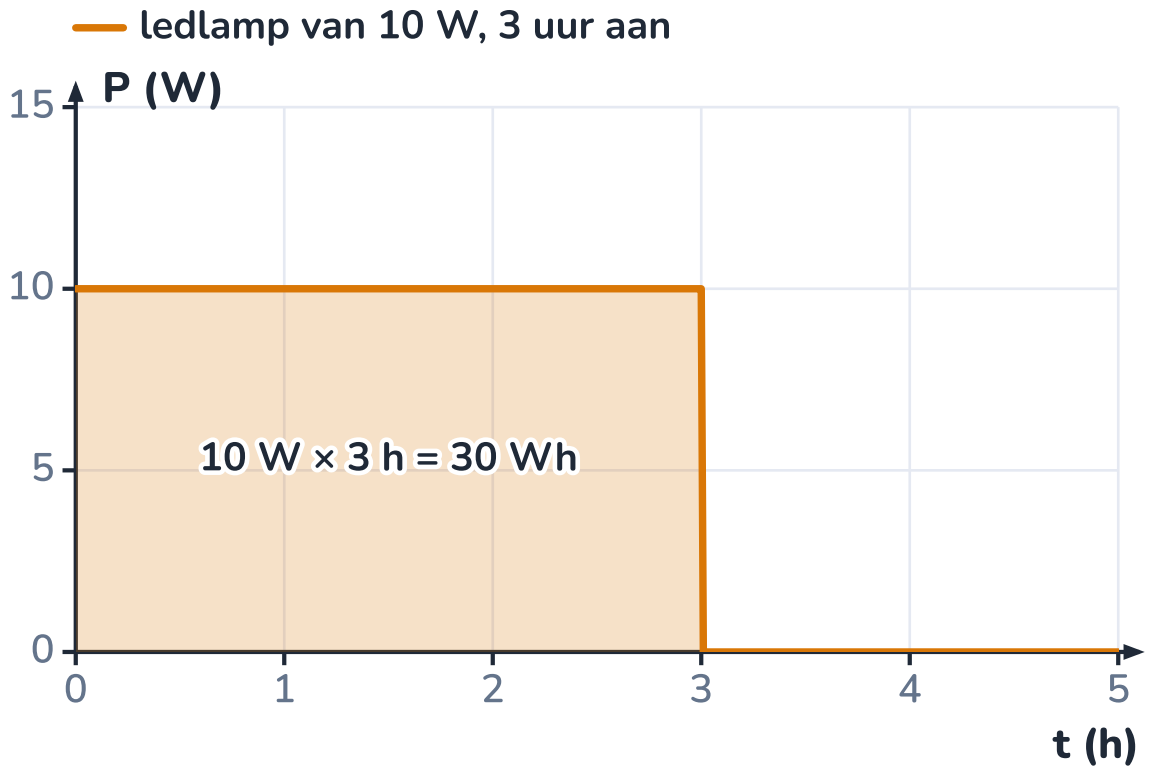
Een ledlamp van 10 W die 3 uur brandt, zet $10\,\text{W} \times 3\,\text{h} = 30\,\text{Wh}$ om. Teken je het vermogen in een grafiek in functie van de tijd, dan is de energie de **oppervlakte** onder de lijn (figuur). Dat idee gebruik je straks voor een zonnepaneel, waarvan het vermogen de hele dag verandert.

toestel	vermogen	energie in 1 uur
microcontroller met sensoren van de meetkas	1,8 W	1,8 Wh
ledstrip van de meetkas	4,8 W	4,8 Wh
waterpompje van de meetkas	7,8 W	7,8 Wh
ledlamp in de woonkamer	5 à 10 W	5 à 10 Wh
laptop	30 à 60 W	30 à 60 Wh
waterkoker	2000 W = 2 kW	2 kWh
windturbine op zee (vol vermogen)	9,5 MW	9,5 MWh

De vermogens van de meetkas volgen uit de spanning en de stroom van elk toestel: dat leer je in de hoofdstukken 19 en 21.

Een paneel van 50 W levert 50 W

Het getal op een zonnepaneel is een **maximum**, bij volle zon. 's Morgens, 's avonds, bij bewolking en in de winter levert het veel minder, en 's nachts niets. Watt zegt hoe *snel*; wattuur zegt hoeveel. Hoe je vermogen berekent uit spanning en stroom, en wat een kWh op je factuur kost, leer je in hoofdstuk 21.



Tien watt gedurende drie uur: een rechthoek met een oppervlakte van 30 Wh.

UITLEG · 17.6

Het zonnepaneel

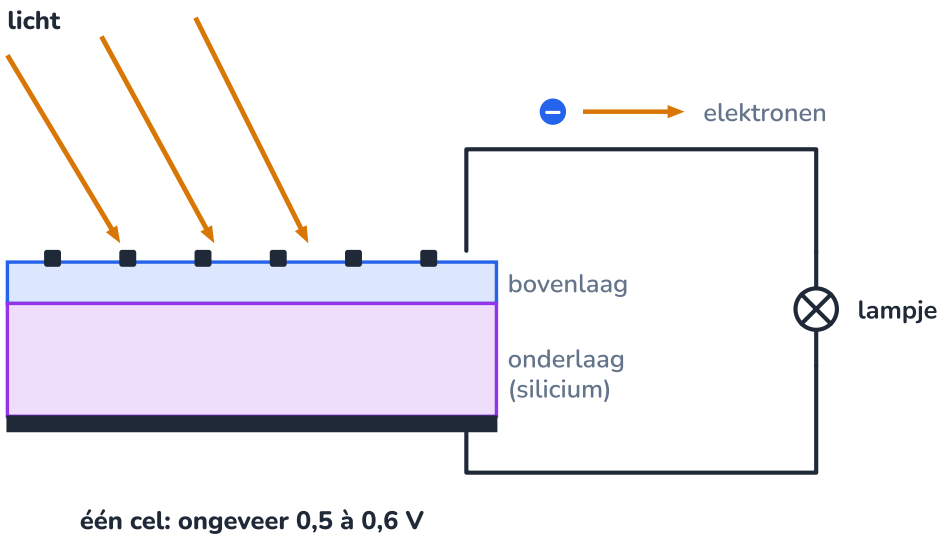
Een zonnepaneel zet licht **rechtstreeks** om in elektrische energie, zonder bewegende delen. Dat heet **fotovoltaïsch** (foto = licht, volt = spanning). Het paneel bestaat uit **zonnecellen**: dunne plaatjes **silicium**, een element dat je ook in zand vindt (zand is grotendeels siliciumdioxide), maar dan heel zuiver. De bovenste en de onderste laag van een cel zijn een beetje anders gemaakt (in Intermediate leer je hoe, hoofdstuk I23). Valt er licht op de cel, dan maakt het elektronen los die door die opbouw maar in één richting kunnen: naar een contact aan de bovenkant. Verbind je boven- en onderkant met een lampje, dan stromen de elektronen door de kring en brandt het lampje.

Eén cel geeft maar ongeveer 0,5 à 0,6 V. Daarom zet men cellen **achter elkaar** (in serie, hoofdstuk 20). Een klein paneel met 36 cellen geeft ongeveer 18 V in de zon: genoeg om een 12 V-batterij te laden. De panelen op een huisdak hebben 60 of meer cellen.

Een goed paneel zet vandaag ongeveer **20 à 22 %** van het zonlicht om in elektrische energie (hoofdstuk 15). De rest wordt warmte: een paneel in de zomerzon kan 60 °C worden, en hoe warmer het is, hoe minder het levert. Een zonnepaneel geeft **gelijkspanning**. Voor de toestellen in huis zet een **omvormer** die om in de wisselspanning van het stopcontact (hoofdstuk E24).

Wattpiek

Het vermogen van een paneel wordt gegeven in **wattpiek** (Wp): het vermogen bij standaardomstandigheden, afgesproken om panelen te kunnen vergelijken: zonlicht van 1000 W per m² dat loodrecht invalt, en een paneel van 25 °C. Zo sterk is de zon in België alleen op een heldere zomermiddag.



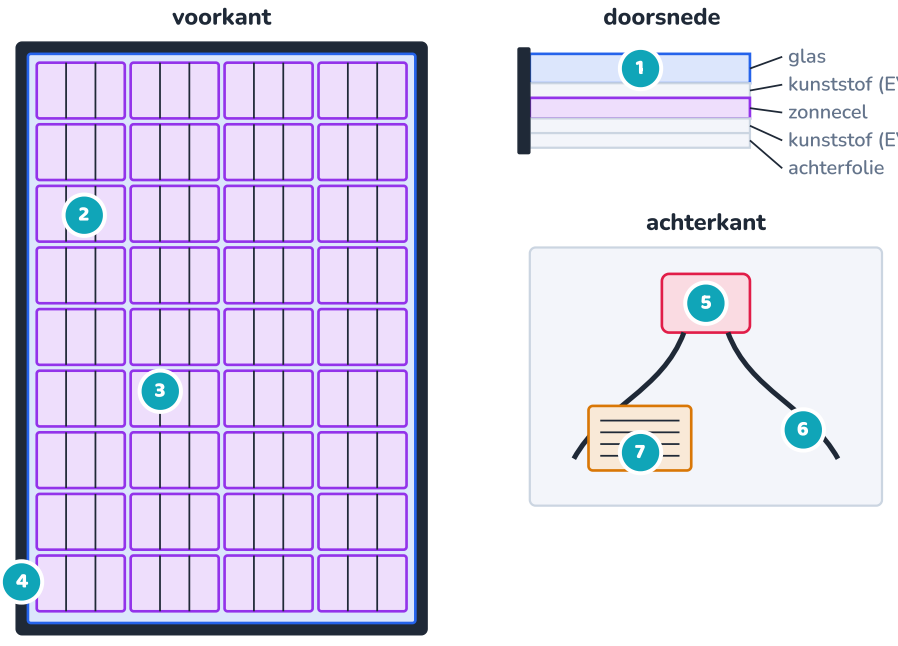
Licht maakt elektronen los in de cel; ze stromen via het contact bovenaan door de kring en het lampje terug naar de onderkant.

ONTLEED · 17.7

Een zonnepaneel van dichtbij

7/19

Een klein paneel zoals dat van de meetkas: 36 cellen in 9 rijen van 4. Links de voorkant, rechts een doorsnede (de lagen zijn veel dikker getekend dan in werkelijkheid) en de achterkant.



Voorkant, doorsnede en achterkant van een paneel van 36 cellen.

1 Glas
Gehard glas van enkele millimeters, met een laagje dat weerkaatsing vermindert. Beschermt de breekbare cellen tegen regen, hagel en vuil.

2 Zonnecel
Een dun plaatje silicium, ongeveer 0,5 à 0,6 V. Alle 36 cellen staan in serie: hun spanningen tellen op.

3 Contactstrips
Dunne metalen strips verzamelen de stroom van elke cel en verbinden ze met de volgende. Ze houden een beetje licht tegen, daarom zijn ze smal.

4 Aluminium frame
Maakt het paneel stijf en geeft een plaats om het vast te schroeven. Aluminium roest niet door (hoofdstuk 10).

5 Aansluitdoos
Hier komen de draden van de cellen samen. Er zitten diodes in die de stroom omleiden als een deel van het paneel in de schaduw ligt.

6 Kabels
Een plus- en een minkabel naar de laadregelaar van de batterij. Het paneel geeft gelijkspanning.

7 Typeplaatje
Het piekvermogen (bv. 50 Wp), de spanning en de stroom bij standaardomstandigheden. Zo vergelijk je panelen.

PROEF · 17.8

Een zonnepaneeltje, de hoek en de schaduw

8/19

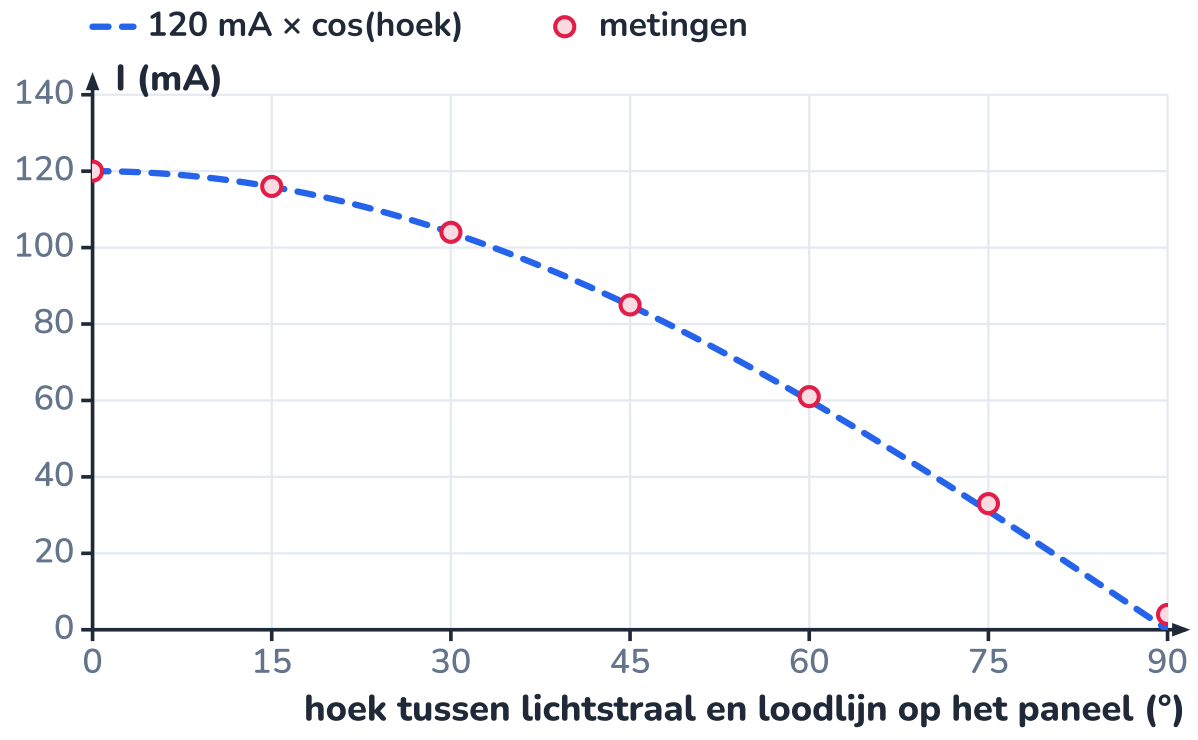
ONDERZOEKSVRAAG

Hoe hangt de opbrengst van een zonnepaneel af van de hoek waaronder het licht invalt? En wat doet een beetje schaduw?

MATERIAAL

- klein zonnepaneel (bv. 6 V, 1 W)
- multimeter, door de docent ingesteld op mA (hij meet de stroom die het paneel levert)
- lamp van 100 W op 30 cm, of volle zon
- gradenboog, een stuk karton

Veiligheid
Een krachtige lamp wordt heet. Raak ze niet aan en zet het paneel niet te dichtbij.



De metingen volgen de cosinus: bij 60° nog de helft, bij 90° bijna niets.

WERKWIJZE

1. Zet het paneel loodrecht op het licht (de lichtstraal valt recht op het paneel: hoek 0°). Lees de stroom af.

2. Draai het paneel telkens 15° verder, tot 90° (het licht scheert dan langs het paneel). Lees telkens af.

3. Zet het paneel terug op 0°. Dek met het karton één cel volledig af. Lees af.

4. Leg het karton er daarna zo op dat het een strook van alle cellen een beetje afdekt. Lees af.

WAARNEMING

hoek	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
stroom (mA)	120	116	104	85	61	33	4

Eén cel volledig afgedekt: 10 mA. Een smalle strook over alle cellen: 95 mA. Voorbeeld van resultaten in een klas. De stroom is een goede maat voor hoeveel licht het paneel opvangt.

VERKLARING

Staat het paneel schuin, dan vangt het een smallere bundel licht op: dezelfde lichtstraal wordt over een grotere oppervlakte uitgesmeerd. Bij 60° vangt het paneel nog maar de helft (0,50) op, bij 90° bijna niets. Hoe je dat precies berekent met de cosinus, leer je in hoofdstuk I6. Daarom zet je een paneel zo loodrecht mogelijk op de zon. In België, waar de zon in de winter laag staat, kies je voor de meetkas een steile hoek: 60° (hoofdstuk I6).

De schaduw is verrassend: één afgedekte cel doet de stroom bijna helemaal wegvallen, terwijl een strook over alle cellen maar een beetje scheelt. De cellen staan in serie: de stroom moet door *alle* cellen, en de zwakste cel bepaalt hoeveel er kan stromen, zoals de smalste plaats in een slang. Grote panelen hebben daarom diodes in de aansluitdoos. Maar ook dan geldt: **geen schaduw** op een zonnepaneel, ook niet van één tak of schoorsteen.

UITLEG · 17.9

Hoeveel energie levert een zonnepaneel per dag?

9/19

Een paneel van 50 Wp levert 50 W alleen op een heldere zomermiddag. De rest van de dag is de zon zwakker, en 's nachts levert het niets. De grafiek toont het vermogen van zo'n paneel op een gemiddelde dag in juni en in december, in Brussel, met het paneel op het zuiden onder 60°. De **oppervlakte onder de kromme** is de energie van die dag: ongeveer 177 Wh in juni, maar maar 62 Wh in december.

Om snel te rekenen, gebruik je **volle zonuren**: hoeveel uur zon op volle sterkte (1000 W per m²) zou evenveel energie geven als het echte zonlicht van die dag? Op een gemiddelde junidag zijn dat er ongeveer 4,6, op een gemiddelde decemberdag ongeveer 1,5. Een paneel levert niet al die energie: een deel gaat verloren doordat het paneel warm wordt, door de kabels en bij het omzetten. Je rekent met ongeveer 80 %:

DAGOPBRENGST VAN EEN ZONNEPANEEL

$$\text{dagopbrengst (Wh)} \approx \text{piekvermogen (Wp)} \times \text{volle zonuren (h)} \times 0{,}8$$

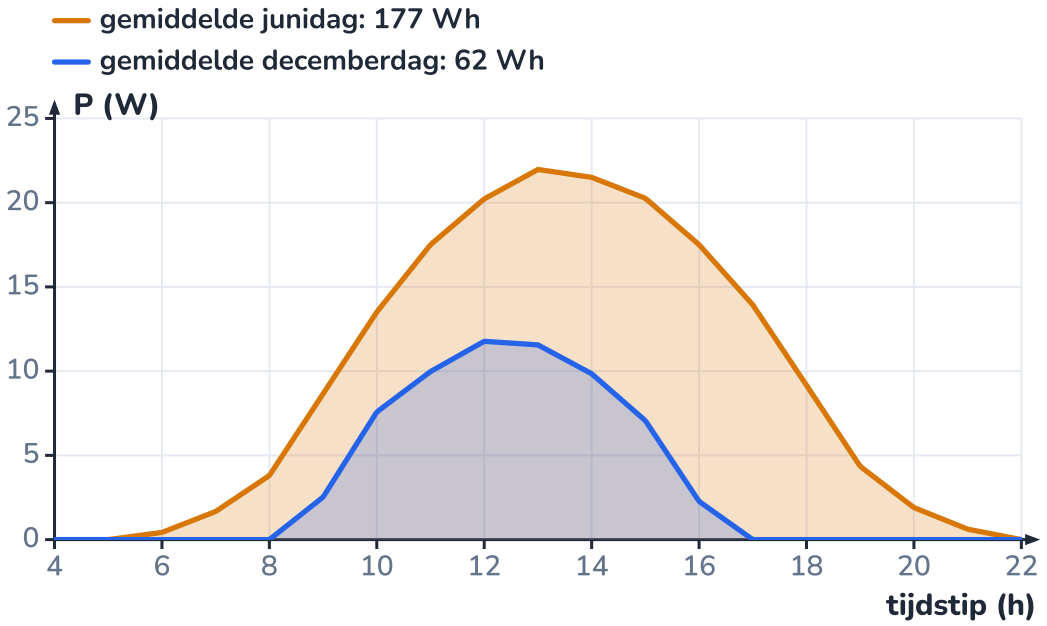
Voor Brussel, paneel op het zuiden onder 60°: juni ongeveer 4,6 volle zonuren, december ongeveer 1,5. Het resultaat is een gemiddelde over veel jaren.

Nog handiger: de tabel geeft meteen hoeveel wattuur elke **wattpiek** per dag oplevert, verliezen inbegrepen. Die cijfers komen uit **PVGIS**, een gratis rekenprogramma van de Europese Commissie dat de zonnestraling van vele jaren kent:

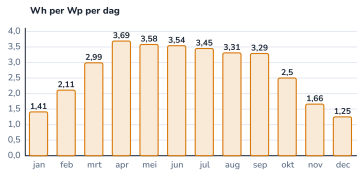
maand	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Wh per Wp per dag	1,41	2,11	2,99	3,69	3,58	3,54	3,45	3,31	3,29	2,50	1,66	1,25

Paneel op het zuiden onder 60°, in Brussel, met de gewone verliezen (warmte, kabels, omvormen) meegerekend. Gemiddelde over de jaren 2005-2023 (PVGIS, Europese Commissie).

> ⚠ **Gemiddelden**
>
> Een heldere junidag geeft in Brussel ongeveer 6,6 volle zonuren, een grijze decemberdag vaak minder dan een half. De maandgemiddelden verbergen dus grote verschillen. Wie op zonne-energie rekent, heeft een **batterij** nodig voor de nacht en voor grijze dagen (verder in dit hoofdstuk), en ontwerpt voor de slechtste maand, niet voor de beste.



De oppervlakte onder elke kromme is de energie van die dag. Juni: lang en hoog; december: kort en laag.



Gemiddelde opbrengst per wattpiek, per maand: in juni ongeveer drie keer zoveel als in december.

UITGEWERKT VOORBEELD · 17.10

Een paneel van 10 Wp

10/19

Een klein paneel van 10 Wp staat in Brussel op het zuiden onder 60°. (a) Hoeveel energie levert het op een gemiddelde dag in juni en in december? Reken met de volle zonuren en met de tabel. (b) Kan je er elke dag een smartphone (batterij van 15 Wh) mee opladen? (c) Hoeveel levert het in een heel jaar?

GEGEVEN

- $10\ \mathrm{Wp}$
- juni: 4,6 volle zonuren, of 3,54 Wh per Wp
- december: 1,5 volle zonuren, of 1,25 Wh per Wp
- jaar: 998 Wh per Wp
- smartphonebatterij: $15\ \mathrm{Wh}$

GEVRAAGD

- dagopbrengst in juni en december
- genoeg voor een smartphone?
- jaaropbrengst

OPLOSSING

1. (a) Met de volle zonuren: juni $10 \times 4{,}6 \times 0{,}8 \approx 37\ \text{Wh}$; december $10 \times 1{,}5 \times 0{,}8 = 12\ \text{Wh}$. Met de tabel: juni $10 \times 3{,}54 \approx 35\ \text{Wh}$, december $10 \times 1{,}25 = 12{,}5\ \text{Wh}$. Beide manieren geven ongeveer hetzelfde.

2. (b) In juni: $35/15 \approx 2{,}3$ smartphones per dag. In december: $12{,}5/15 \approx 0{,}8$: gemiddeld nog geen volle lading per dag, en op een grijze dag veel minder. Bovendien gaat er bij het laden van een batterij nog wat verloren.

3. (c) $10 \times 998\ \text{Wh} \approx 10\,000\ \text{Wh} = 10\ \text{kWh}$ per jaar.

ANTWOORD

Juni ongeveer 35 Wh per dag, december ongeveer 12 Wh per dag; zomer ruim genoeg voor een smartphone, winter niet; ongeveer 10 kWh per jaar.

Klopt dit? Vuistregel voor België: 1 kWp levert ongeveer 1000 kWh per jaar, dus 1 Wp ongeveer 1 kWh per jaar. En in december levert een paneel ongeveer een derde van wat het in juni levert.

UITLEG · 17.11

De zonneboiler

11/19

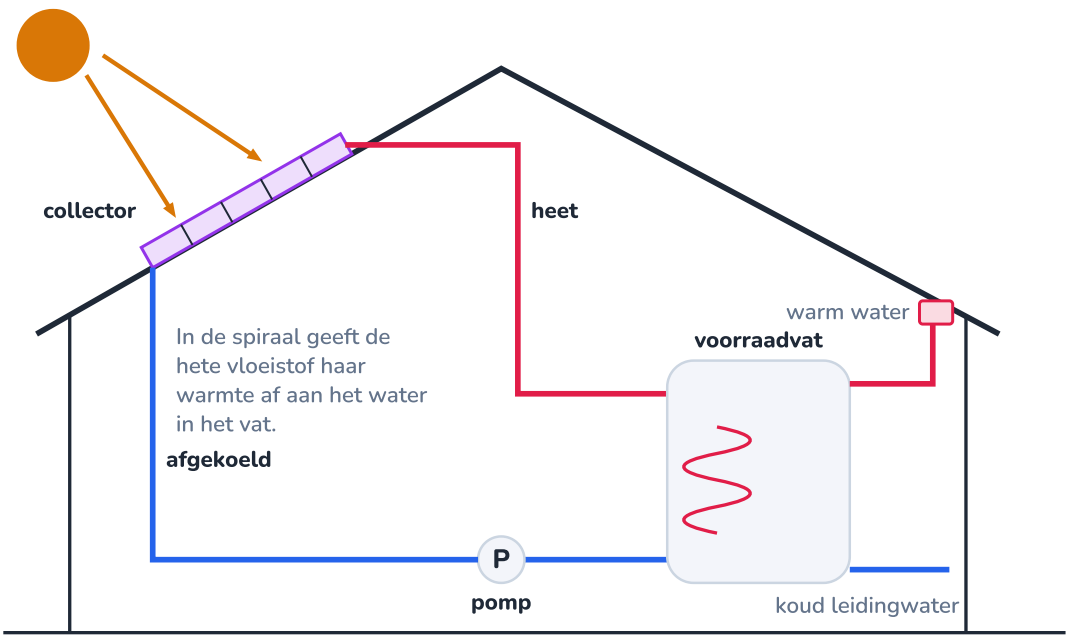
Een zonnepaneel maakt elektriciteit. Wie vooral **warm water** nodig heeft, kan de zon ook rechtstreeks laten opwarmen met een **zonneboiler**:

1. Op het dak ligt een **zonnecollector**: een geïsoleerde bak met een zwarte plaat onder glas (of een rij glazen buizen met luchtledig). De zwarte plaat neemt het zonlicht op en wordt heet (hoofdstuk 16: zwart absorbeert het best; het glas en de isolatie houden de warmte vast).
2. Door buisjes onder de plaat stroomt een vloeistof, meestal water met antivries. Een kleine **pomp** brengt de hete vloeistof naar het **voorraadvat**.
3. In het vat loopt de vloeistof door een spiraal (een **warmtewisselaar**) en geeft haar warmte af aan het leidingwater. Afgekoeld gaat ze terug naar de collector.
4. Het goed geïsoleerde vat bewaart het warme water voor 's avonds: een **warmtebuffer**. Is het water niet warm genoeg, dan warmt een gewone verwarmingsketel of een elektrisch element het bij.

Een zonnecollector zet een veel groter deel van het zonlicht om dan een zonnepaneel: ongeveer de helft of meer, tegenover ongeveer een vijfde. In Vlaanderen levert 1 m² collector ongeveer 400 à 500 kWh warmte per jaar; een zonneboiler van 4 à 6 m² met een vat van 200 à 300 L dekt tot ongeveer 60 % van het warme water van een gezin. Maar warmte is minder veelzijdig dan elektriciteit: je kan er geen lamp of pomp mee laten werken.

Welke kies je?

Nodig je warmte (douche, afwas), dan is een zonneboiler efficiënter per m². Nodig je elektriciteit (lampen, pompen, een microcontroller), dan heb je zonnepanelen nodig. Het poolstation Princess Elisabeth gebruikt allebei. Voor de meetkas, die vooral elektriciteit gebruikt, kies je een zonnepaneel.



De pomp (P) laat de vloeistof rondgaan tussen de collector op het dak en de spiraal in het vat.



Twee zonnecollectoren (links) naast gewone zonnepanelen: de ene maakt warm water, de andere elektriciteit.

UITLEG · 17.12

Windenergie

12/19

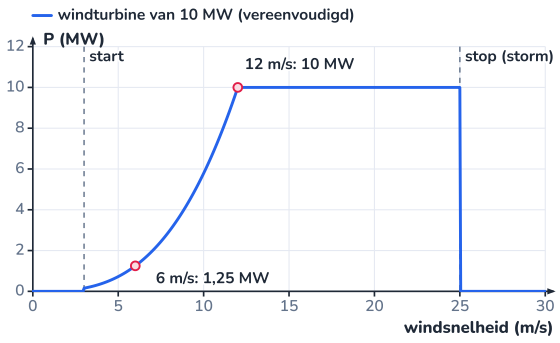
Wind is lucht die beweegt, omdat de zon de aarde ongelijk opwarmt (hoofdstuk 15). Een **windturbine** zet de bewegingsenergie van de lucht om in elektrische energie: de wind duwt tegen de **wieken**, de **rotor** draait, en een **generator** in de gondel bovenaan de mast maakt er elektriciteit van (hoe een generator werkt, leer je in hoofdstuk E19). De energieketen: bewegingsenergie van de wind → bewegingsenergie van de rotor → elektrische energie, met wat warmte in de tandwielen en de generator.

Het vermogen van een windturbine hangt heel sterk af van de **windsnelheid**: waait het twee keer zo hard, dan levert de turbine tot **acht keer** zoveel ($2 \times 2 \times 2$). Onder ongeveer 3 m/s draait ze niet. Vanaf ongeveer 12 m/s levert ze haar maximale vermogen, en bij storm (rond 25 m/s) wordt ze stilgezet om schade te voorkomen.

Op zee waait het harder en regelmatiger dan op land. Voor de Belgische kust staan windparken met samen **2,26 GW** vermogen; ze leverden 8 TWh in 2023 en 7,1 TWh in 2024 (een minder winderig jaar). De grootste turbines zijn hoger dan het Atomium (102 m) en hebben wieken van meer dan 80 m lang.

Windmolen of windturbine?

Een **windmolen** gebruikt de wind om graan te malen of water te pompen: de beweging zelf is nuttig. Een **windturbine** maakt elektriciteit. In de dagelijkse taal worden beide 'windmolen' genoemd.



Vereenvoudigde vermogenscurve: van 6 naar 12 m/s is twee keer zo hard, en acht keer zoveel vermogen.



Een windpark op zee: de wind waait er harder en regelmatiger dan op land.

UITGEWERKT VOORBEELD · 17.13

Hoeveel levert een windturbine op zee?

13/19

In het windpark Northwester 2 voor de Belgische kust staan turbines van 9,5 MW. (a) Lees op de vereenvoudigde vermogenscurve (voor een turbine van 10 MW) af hoeveel ze levert bij 6 m/s en bij 12 m/s. Hoeveel keer meer is dat? (b) Door de wisselende wind levert een turbine op zee gemiddeld ongeveer 36 % van haar maximale vermogen (2024). Hoeveel energie levert één turbine van 9,5 MW in een jaar? (c) Voor hoeveel gezinnen (3500 kWh per jaar) is dat genoeg?

GEGEVEN

- vermogenscurve
- $9{,}5\,\mathrm{MW}$, gemiddeld 36 % daarvan
- 1 jaar $= 365 \times 24 = 8760\,\mathrm{h}$
- gezin: $3500\,\mathrm{kWh}$ per jaar

GEVRAAGD

- vermogen bij 6 en 12 m/s
- jaaropbrengst
- aantal gezinnen

OPLOSSING

1. (a) Bij 6 m/s: 1,25 MW. Bij 12 m/s: 10 MW. Dat is $10/1{,}25 = 8$ keer meer, bij twee keer zoveel wind.
2. (b) Gemiddeld vermogen: $0{,}36 \times 9{,}5\,\mathrm{MW} = 3{,}4\,\mathrm{MW}$. Energie: $3{,}42\,\mathrm{MW} \times 8760\,\mathrm{h} \approx 30\,000\,\mathrm{MWh} = 30\,\mathrm{GWh}$.
3. (c) $30\,000\,000\,\mathrm{kWh} / 3500\,\mathrm{kWh} \approx 8600$ gezinnen.

ANTWOORD

(a) 1,25 MW en 10 MW: acht keer zoveel. (b) Ongeveer 30 GWh per jaar. (c) Ongeveer 8600 gezinnen.

Klopt dit? Vergelijk met de hele Belgische zee: $2{,}26\,\mathrm{GW} \times 0{,}36 \times 8760\,\mathrm{h} \approx 7{,}1\,\mathrm{TWh}$, precies de productie van 2024. Megawatt maal uur geeft megawattuur (MWh); 1 MWh = 1000 kWh.

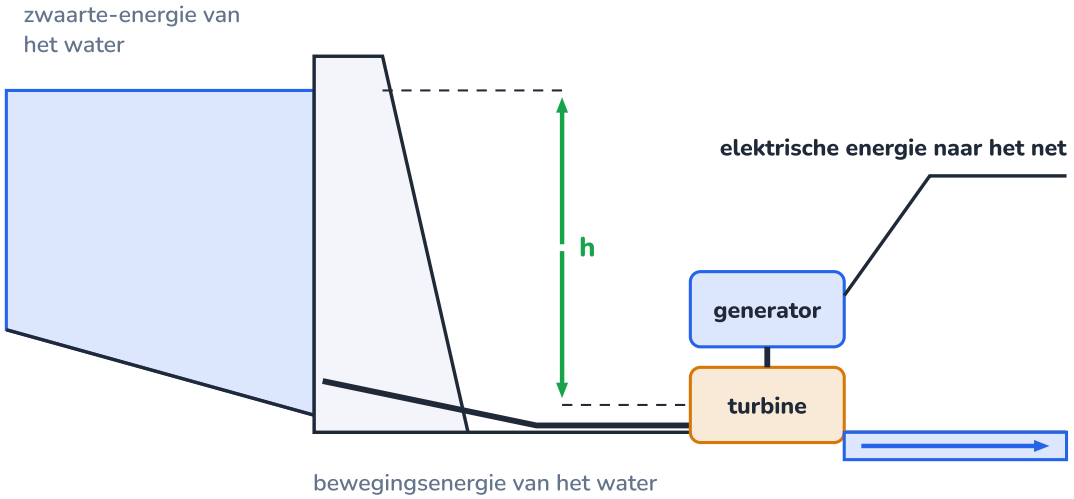
Water dat hoog ligt, heeft zwaarte-energie (hoofdstuk 15). In een **waterkrachtcentrale** stroomt het door een buis naar beneden, krijgt het bewegingsenergie, en drijft het een **turbine** aan die met een **generator** verbonden is. De energieketen: zwaarte-energie → bewegingsenergie van het water → bewegingsenergie van de turbine → elektrische energie. Grote waterkrachtcentrales halen een rendement van ongeveer 90 %: beter dan bijna elke andere centrale.

Hoe meer water en hoe groter de hoogte, hoe meer energie (herinner je: $E = F_z \cdot h$). Daarom liggen de grote stuwdammen in de bergen: in Noorwegen, Zwitserland, China, Brazilië. Wereldwijd levert waterkracht ongeveer een zevende van alle elektriciteit. België is te vlak: er draaien kleine centrales op de Maas en andere rivieren, samen ongeveer 110 MW, goed voor ongeveer 0,3 TWh per jaar, minder dan 1 % van onze elektriciteit.

Wel heeft België een grote **pompcentrale** in **Coo** (Ardennen). Die maakt geen extra energie, maar slaat ze op: als er veel elektriciteit is, pompt ze water naar een hoog meer; als er te weinig is, laat ze het terugstromen door de turbines (hoofdstuk I9). Zo werkt ze als een reusachtige batterij.

Water in beweging

Ook getijden (het water dat twee keer per dag stijgt en daalt, vooral door de maan) en golven bevatten energie. Getijdencentrales bestaan al, bijvoorbeeld in Frankrijk sinds 1966, maar ze zijn zeldzaam: er zijn maar weinig plaatsen met een groot genoeg verschil tussen eb en vloed.



Hoe groter de hoogte h, hoe meer zwaarte-energie elke liter water meebrengt naar de turbine.



Een kleine waterkrachtcentrale aan een stuw op de Maas: weinig hoogteverschil, maar veel water.

UITLEG · 17.15

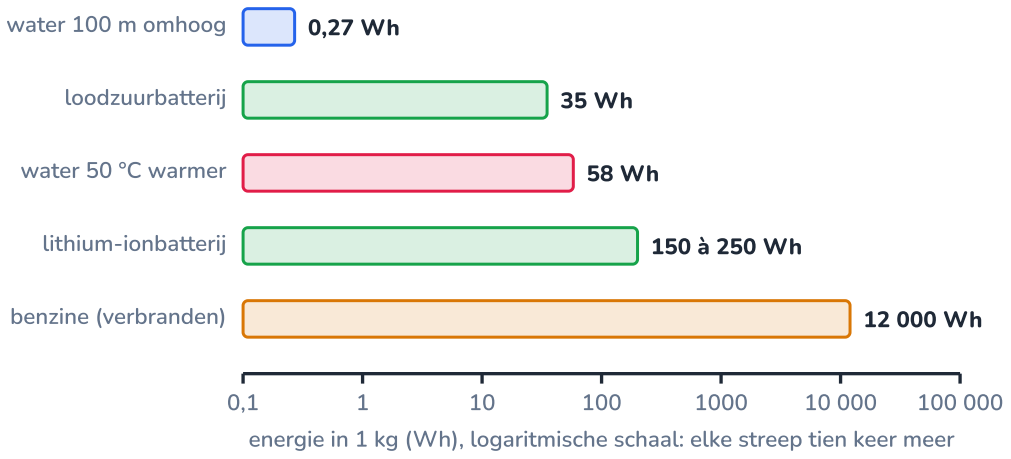
Energie opslaan

15/19

De zon schijnt niet 's nachts, en de wind waait niet altijd. Wie op zon en wind draait, moet energie kunnen **bewaren** voor later. Er zijn veel manieren; drie ervan ken je al:

- **Batterij**: elektrische energie wordt chemische energie, en bij het ontladen weer elektrische (hoofdstuk 15). Een batterij is compact en levert meteen stroom. Er gaat bij laden en ontladen samen ongeveer 5 à 20 % verloren, afhankelijk van het type. Welke types er zijn en hoe ze werken, leer je in hoofdstuk I16.
- **Water omhoog pompen**: elektrische energie wordt zwaarte-energie, en via een turbine weer elektrische. De pompcentrale van Coo slaat zo ongeveer 5 GWh op, met een rendement van ongeveer 75 % voor de hele kringloop (hoofdstuk I9). Maar je hebt enorm veel water en een groot hoogteverschil nodig.
- **Warmtebuffer**: warmte bewaren in een goed geïsoleerd vat water (de zonneboiler), of in het water en de grond van de meetkas (hoofdstuk 16). Water slaat veel warmte op: 4,2 kJ per liter per graad. Maar warmte kan je niet zomaar terug omzetten in elektriciteit.

Hoeveel energie past er in één kilogram? De figuur vergelijkt, op een logaritmische schaal. Merk op hoe weinig energie er in water zit dat 100 m omhoog gepompt is: een lithium-ionbatterij bevat per kg honderden keren meer. En hoe veel er in benzine zit: daarom zijn fossiele brandstoffen zo moeilijk te vervangen in vliegtuigen en schepen. Andere opslagvormen, zoals waterstof en vliegwielen, komen in Expert aan bod (hoofdstukken E27 en E10).



Energie per kilogram (orde van grootte). Elke streep op de schaal is tien keer meer.

UITGEWERKT VOORBEELD · 17.16

Hoeveel water voor één smartphone?

16/19

Een smartphonebatterij bevat ongeveer 15 Wh. (a) Hoeveel joule is dat? (b) Hoeveel kilogram water moet je 10 m hoog pompen om evenveel zwaarte-energie op te slaan? (c) Hoeveel graden warmer kan je 1 L water maken met die energie?

GEGEVEN

- $15\,\mathrm{Wh}$
- hoogte $10\,\mathrm{m}$, $g = 9{,}81\,\mathrm{N/kg}$
- water: $4{,}2\,\mathrm{kJ}$ per liter per °C

GEVRAAGD

- energie in joule
- massa water
- temperatuurstijging van 1 L

OPLOSSING

1 (a) $15\,\text{Wh} = 15 \times 3600\,\text{J} = 54\,000\,\text{J} = 54\,\text{kJ}$.

2 (b) Per kg water, 10 m hoog: $E = F_z \cdot h = 9{,}81\,\text{N} \times 10\,\text{m} = 98{,}1\,\text{J}$. Aantal kg: $54\,000/98{,}1 \approx 550\,\text{kg}$, dus ongeveer 550 L water: meer dan twee volle badkuipen.

3 (c) $\Delta t = Q/(4{,}2 \times V) = 54/(4{,}2 \times 1) \approx 13\,°\text{C}$.

ANTWOORD

(a) 54 kJ. (b) Ongeveer 550 kg water, 10 m hoog. (c) 1 L water wordt ongeveer 13 °C warmer.

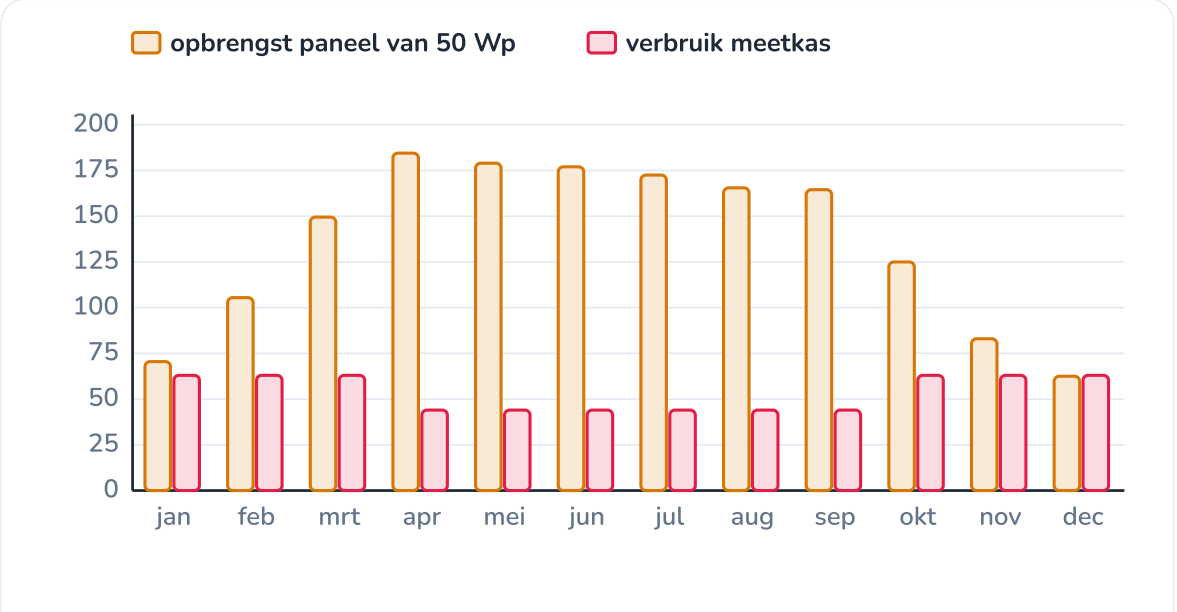
Klopt dit? Een batterij van 50 g bevat dus evenveel energie als een halve ton water op 10 m hoogte. Water omhoog pompen is alleen zinvol op heel grote schaal, zoals in Coo, waar miljoenen kubieke meter water honderden meter hoog opgepompt worden.

UITGEWERKT VOORBEELD · 17.17

Habitat: de meetkas van energie voorzien

17/19

Tot nu toe hangt de meetkas aan een 12 V-voeding die in het stopcontact zit (hoofdstuk 5). Kan ze op zonne-energie draaien? De toestellen: microcontroller met sensoren 1,8 W, dag en nacht; ledstrip 4,8 W, 4 uur per dag, alleen van oktober tot maart; pompje 7,8 W, 225 s per dag (hoofdstuk 4). (a) Schat het verbruik per dag in de zomer en in de winter. (b) Hoe groot moet het paneel zijn? (c) Hoe groot moet de batterij zijn als ze drie dagen zonder zon moet overbruggen? (d) Waar zet je het paneel?



Gemiddelde opbrengst en verbruik in Wh per dag. Van maart tot oktober levert het paneel ruim genoeg; in december en januari is het krap.

GEGEVEN

- vermogens: 1,8 W (24 h), 4,8 W (4 h, oktober tot maart), 7,8 W (225 s)
- paneel op het zuiden onder 60°: juni 3,54 Wh per Wp per dag, december 1,25 Wh per Wp per dag
- 3 dagen reserve

GEVRAAGD

- verbruik per dag
- piekvermogen van het paneel
- grootte van de batterij
- plaats van het paneel

OPLOSSING

1 (a) Microcontroller: $1{,}8\,\text{W} \times 24\,\text{h} = 43{,}2\,\text{Wh}$. Pompje: $7{,}8\,\text{W} \times 225\,\text{s} = 1755\,\text{J} \approx 0{,}5\,\text{Wh}$. Ledstrip: $4{,}8 \times 4 = 19{,}2\,\text{Wh}$. Zomer: $43{,}2 + 0{,}5 \approx 44\,\text{Wh}$; winter: $44 + 19 = 63\,\text{Wh}$ per dag.

2 (b) Juni: $44/3{,}54 \approx 12\,\mathrm{Wp}$ zou volstaan. December: $63/1{,}25 \approx 50\,\mathrm{Wp}$. Je ontwerpt voor de slechtste maand: een paneel van **50 Wp** (ongeveer 0,65 m × 0,55 m). In de zomer levert het veel meer dan nodig (177 Wh op een gemiddelde junidag).

3 (c) Drie dagen verbruik in de winter: $3 \times 63 = 189\,\mathrm{Wh}$. Een batterij mag niet helemaal leeg: kies een 12 V-batterij van ongeveer **250 Wh**, waarvan je ongeveer 200 Wh mag gebruiken.

4 (d) Niet op het dak van de kas: een paneel van 0,36 m² zou de helft van het dak (0,72 m²) in de schaduw zetten. Zet het naast de kas op een paal, op een open plek waar het de hele dag zon krijgt en zelf geen schaduw op de planten werpt. In december staat de zon in België 's middags maar 16° hoog: een voorwerp werpt dan een schaduw van ongeveer drie en een half keer zijn eigen hoogte.

ANTWOORD

Verbruik ongeveer 44 Wh (zomer) tot 63 Wh (winter) per dag; paneel van 50 Wp op een paal naast de kas, op het zuiden onder 60°; 12 V-batterij van ongeveer 250 Wh. In december is dat krap: hou de adapter als reserve, of maak de meetkas zuiniger.

Klopt dit? In december levert het paneel gemiddeld 62 Wh per dag, net zoveel als het verbruik: er is geen reserve, en bij het laden van de batterij gaat nog wat verloren. Twee oplossingen: de adapter als reserve voor november tot januari, of zuiniger zijn. De microcontroller verbruikt het meest: in Expert (hoofdstuk E37) leer je hoe je hem laat 'slapen' tussen twee metingen. Hoe je het verbruik precies uitrekent uit spanning en stroom, doe je in hoofdstuk 21.



Het paneel staat naast de kas, op een paal: het krijgt de hele dag zon en werpt geen schaduw op de planten.

NASLAG · 17.18

Overzicht: energie uit zon, wind en water

18/19

De rekenregels, de energiebronnen en de opbrengst van een zonnepaneel in België op één blad.

energie uit vermogen

$$E = P \cdot t$$

symbool	betekenis	eenheid
E	energie	J of Wh
P	vermogen	watt (W)
t	tijd	s of h

wattuur en kilowattuur

$$1\,\text{Wh} = 3600\,\text{J} \qquad 1\,\text{kWh} = 3{,}6\,\text{MJ}$$

symbool	betekenis	eenheid
Wh	wattuur	1 W gedurende 1 uur
kWh	kilowattuur	1 kW gedurende 1 uur

dagopbrengst van een zonnepaneel

$$E_{\text{dag}} \approx P_{\text{piek}} \times \text{volle zonuren} \times 0{,}8$$

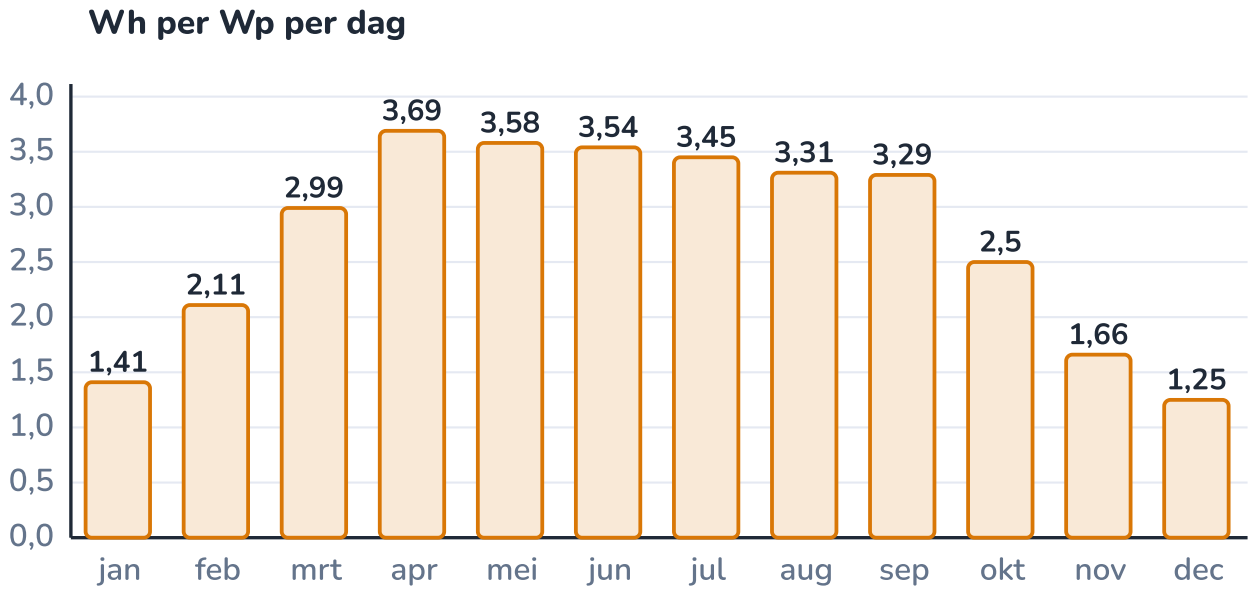
symbool	betekenis	eenheid
E_{dag}	energie per dag	Wh
P_{piek}	piekvermogen	Wp
$vollezonuren$	Brussel, 60°: juni 4,6, december 1,5	h

bron	soort	voordelen	nadelen
steenkool, aardolie, aardgas	fossiel	veel energie in weinig brandstof; op elk moment beschikbaar	CO_2 en luchtvervuiling; raakt op; vaak ingevoerd
uranium (kerncentrale)	nucleair	bijna geen CO_2; op elk moment beschikbaar	radioactief afval; duur om te bouwen; risico bij ongevallen; uranium raakt op
zon (zonnepaneel, zonneboiler)	hernieuwbaar	geen brandstof, stil, op elk dak	's nachts niets, in de winter weinig
wind	hernieuwbaar	veel energie op zee, ook in de winter	wisselend; zichtbaar in het landschap
water (stuwdam, rivier)	hernieuwbaar	regelbaar, lange levensduur	in België weinig hoogteverschil; stuwmeren veranderen een vallei
biomassa (hout, gft, mest)	hernieuwbaar als er evenveel teruggroeit	opslaanbaar	ruimte en landbouwgrond nodig

maand	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Wh per Wp per dag	1,41	2,11	2,99	3,69	3,58	3,54	3,45	3,31	3,29	2,50	1,66	1,25

Paneel op het zuiden onder 60°, in Brussel, met de gewone verliezen (warmte, kabels, omvormen) meegerekend. Gemiddelde over de jaren 2005-2023 (PVGIS, Europese Commissie).

opslag	energievorm	per kg (orde van grootte)	geschikt voor
batterij (lithium-ion)	chemisch	150 à 250 Wh	smartphone, auto, huis, meetkas
batterij (loodzuur)	chemisch	35 Wh	goedkoop, zwaar; auto-startaccu, poolstation
water omhoog pompen	zwaarte-energie	0,27 Wh (100 m hoog)	heel grote hoeveelheden (Coo)
warmtebuffer (water)	warmte	58 Wh (50 °C warmer)	warm water, de nacht in de kas



Opbrengst per wattpiek per dag, per maand (Brussel, 60°, PVGIS).

HET GEHEEL · 17.19

Waar duurzame energie naartoe leidt

19/19

Duurzame energie verbindt de leerlijn **Energie** met **Elektriciteit** (panelen, batterijen, turbines) en met **Ontwerpen en maken**: een energiesysteem kiezen en dimensioneren is een ontwerpprobleem met afwegingen. Met de CO_2-grafiek en de maandopbrengsten zit je in **Data**, en met het klimaat in **Leven en systemen**. In Intermediate dimensioneer je de zonne-installatie van de klimaatmodule echt, in Expert stuur je het energiebeheer van het hele station.

F15 Energie: vormen en omzettingen
Energievormen, energieketens en rendement: de basis van elke centrale.

F16 Warmte en temperatuur
Het broeikaseffect en warmte opslaan in water.

F19 Spanning, stroom en weerstand
Spanning en stroom van een zonnepaneel meten.

F20 Serie- en parallelschakeling
Zonnecellen in serie: waarom één cel in de schaduw zoveel kost.

F21 Elektrisch vermogen en energie
Vermogen uit spanning en stroom; het dagelijkse energieverbruik van de meetkas precies berekenen.

F33 Integratieproject: de meetkas
Het energiebudget van de meetkas met een klein zonnepaneel, in het integratieproject.

I6 Goniometrie en vectoren
De hoek van de zon en de beste hellingshoek van een paneel.

I9 Arbeid, energie en vermogen
Rekenen met water omhoog pompen; de pompcentrale van Coo.

I14 Reacties en stoichiometrie
Hoeveel CO2 er uit een liter brandstof komt.

I16 Redox en batterijen
Welk batterijtype, en wat Ah en Wh betekenen.

I20 Zonne-energie dimensioneren
Zonnepaneel en batterij van de klimaatmodule berekenen, met dagen autonomie.

E24 Vermogenselektronica en elektrische machines
De omvormer en de MPPT-lader: het maximum uit een paneel halen.

E27 Elektrochemie: batterijen, brandstofcellen en elektrolyse
Waterstof en brandstofcellen als seizoensopslag.

E47 Duurzaamheid en levenscyclusanalyse
Hoe lang een zonnepaneel moet werken om de energie van zijn productie terug te

verdienen.

Habitat

Voorstel voor de meetkas: een zonnepaneel van 50 Wp (12 V) op een paal naast de kas, op het zuiden onder 60°, en een 12 V-batterij van ongeveer 250 Wh, met de 230 V-adapter als reserve voor de donkerste maanden. Dat volstaat voor een verbruik van ongeveer 44 Wh (zomer) tot 63 Wh (winter) per dag. In opdracht 17.13 maak je zelf de keuze met een keuzetabel; in hoofdstuk 21 reken je het verbruik precies uit, en in hoofdstuk 33 bouw je het.

SAMENVATTING

In het kort

- Fossiele brandstoffen (steenkool, aardolie, aardgas) raken op en geven CO2; kernenergie geeft bijna geen CO2 maar wel radioactief afval; hernieuwbare bronnen (zon, wind, water, biomassa, aardwarmte) raken niet op.
- CO2 in de lucht steeg van ongeveer 280 ppm voor 1850 tot 427 ppm in 2025; als broeikasgas warmt het de aarde op (ongeveer 1,4 °C sinds 1850-1900).
- Vermogen is energie per seconde, in watt (1 W = 1 J/s). Energie = vermogen × tijd; $1\,\mathrm{Wh} = 3600\,\mathrm{J}$, $1\,\mathrm{kWh} = 3{,}6\,\mathrm{MJ}$.
- Een zonnepaneel zet ongeveer 20 % van het licht rechtstreeks om in elektriciteit; een zonneboiler zet een groter deel om in warm water.
- Een paneel levert in Brussel (60°, zuiden) gemiddeld 3,5 Wh per Wp per dag in juni en 1,25 in december: dagopbrengst ≈ Wp × volle zonuren × 0,8.
- Een windturbine levert bij twee keer zoveel wind tot acht keer zoveel vermogen; waterkracht zet zwaarte-energie van water om.
- Energie opslaan kan in een batterij (compact), in water dat omhoog gepompt is (alleen op grote schaal) of als warmte in water.
- De meetkas verbruikt ongeveer 44 à 63 Wh per dag: een paneel van 50 Wp en een batterij van ongeveer 250 Wh volstaan, met de adapter als reserve in de winter.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

fossiele brandstof
Steenkool, aardolie of aardgas: resten van planten en plankton van miljoenen jaren geleden. Verbranden geeft energie en CO2; de voorraad raakt op.

hernieuwbare energie
Energie uit een bron die vanzelf aangevuld wordt: zon, wind, stromend water, aardwarmte, biomassa die teruggroeit.

vermogen
Hoeveel energie er per seconde omgezet wordt. Eenheid: watt (W); 1 W = 1 J per seconde.

wattuur
De energie die een vermogen van 1 W in 1 uur omzet: 1 Wh = 3600 J. 1 kWh = 1000 Wh.

zonnepaneel (fotovoltaïsch)
Paneel van zonnecellen dat licht rechtstreeks omzet in elektrische energie.

wattpiek (Wp)
Het vermogen van een zonnepaneel bij standaardomstandigheden: zonlicht van 1000 W per m² en een paneeltemperatuur van 25 °C.

volle zonuren
Het aantal uren zon op volle sterkte (1000 W per m²) dat evenveel energie zou geven als het zonlicht van die hele dag.

zonneboiler
Installatie die met een zonnecollector water opwarmt en het warme water in een vat bewaart.

windturbine
Machine die de bewegingsenergie van de wind met wieken en een generator omzet in elektrische energie.

energieopslag

Energie bewaren voor later: chemisch (batterij), als zwaarte-energie (water omhoog) of als warmte (warmtebuffer).

F FUNDAMENTAL · DEEL F5 · ELEKTRICITEIT

HANDBOEK · HOOFDSTUK 18

De elektrische kring

Bron, verbruiker, draad en schakelaar: van zaklamp tot trappenhuis

Een zaklamp, een deurbel, de lamp boven de trap: ze werken allemaal pas als de stroom een **gesloten weg** vindt, van de bron door de verbruiker en terug. In dit hoofdstuk leer je die kring kennen en in **schakelschema's** tekenen met de internationale symbolen. Je onderzoekt welke stoffen stroom geleiden, ontdekt waarom een **kortsluiting** gevaarlijk is en hoe een **zekering** dat oplost, en je leert schakelaars slim combineren: tot een lamp die je van onder én van boven aan de trap bedient. Daarmee teken je het schema van de verlichting van de meetkas.

7× uitleg · 3× uitgewerkt voorbeeld · 2× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

L Elektriciteit en elektronica



Een lampje, een batterij, twee draden en een schakelaar: de kleinste kring die iets doet.

Na dit hoofdstuk

- Je kan de onderdelen van een gesloten kring benoemen (bron, verbruiker, geleiders, schakelaar) en hun taak uitleggen.
- Je kan een kring tekenen als schakelschema met IEC-symbolen, en een opstelling omzetten in een schema en omgekeerd.
- Je kan met een testkring nagaan of een stof een geleider of een isolator is, en uitleggen waarom metalen goed geleiden.
- Je kan uitleggen wat een open kring en een kortsluiting zijn, en waarom een kortsluiting gevaarlijk is.
- Je kan uitleggen hoe een smeltzekering en een automaat werken en waar een zekering in de kring hoort.
- Je kan een schakelaar, een drukknop (maak- en verbreekcontact) en een wisselschakelaar onderscheiden, en schakelaars in serie (EN) en parallel (OF) gebruiken.
- Je kan een trappenhuisschakeling tekenen en voor alle vier de standen nagaan of de lamp brandt.
- Je kan het schema van de verlichting van de meetkas tekenen en verantwoorden.

VERHAAL · 18.1

Kikkerbillen en een zuil van munten

1/16

Rond 1780 deed de Italiaanse arts **Luigi Galvani** in Bologna proeven met kikkerbillen. Hij merkte iets vreemds op: raakte hij een zenuw en een spier tegelijk aan met twee *verschillende* metalen, bijvoorbeeld

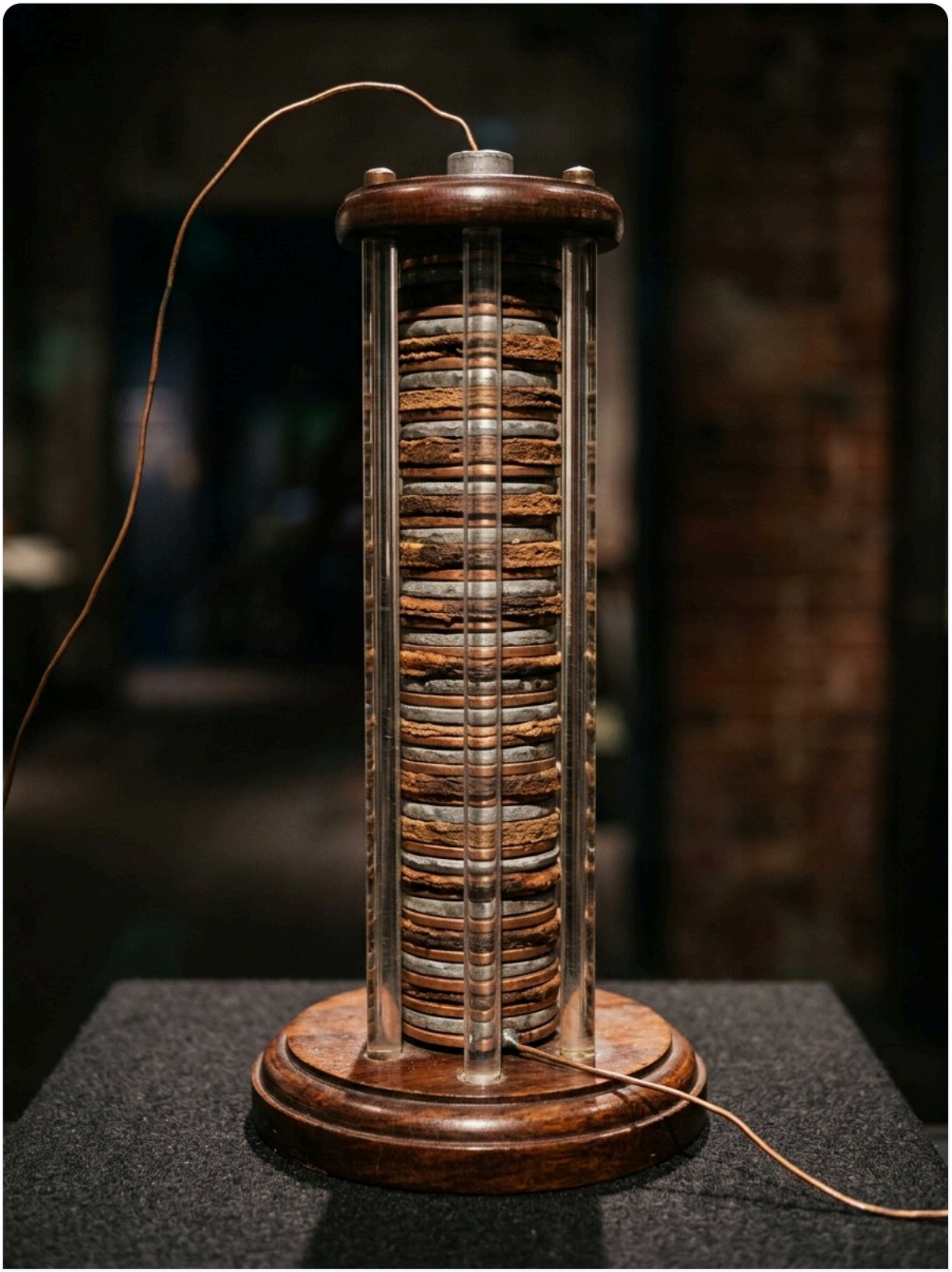
koper en ijzer, dan trok de poot samen, alsof hij leefde. Galvani dacht dat hij 'dierlijke elektriciteit' had ontdekt, een kracht die in het lichaam zelf zat. Hij publiceerde zijn proeven in 1791.

Zijn landgenoot **Alessandro Volta**, professor natuurkunde in Pavia, geloofde daar niet in. Volgens hem kwam de elektriciteit van de twee verschillende metalen, met iets vochtigs ertussen; de kikkerpoot was alleen een gevoelige meter. Om dat te bewijzen, liet hij het dier helemaal weg. Hij stapelde schijfjes **zink** en **koper** om beurten op elkaar, telkens met een stukje karton gedrenkt in **zout water** ertussen. In een brief van 20 maart 1800 aan de Royal Society in Londen beschreef hij zijn 'zuil'.

Het was de eerste **batterij**. Tot dan kende men elektriciteit alleen als vonken en schokken die in een fractie van een seconde voorbij waren, zoals bij de Leidse fles, een opslagfles voor lading die in 1746 in Leiden beschreven werd. De zuil van Volta gaf iets nieuws: een stroom die **bleef lopen**, zolang je de bovenkant en de onderkant met een draad verbond. Binnen enkele weken gebruikten twee Engelse onderzoekers, William Nicholson en Anthony Carlisle, zo'n zuil om water te splitsen in waterstof en zuurstof. De eenheid van spanning draagt vandaag Volta's naam: de **volt**.

Het kernidee van dit hoofdstuk

Volta's zuil deed niets zolang de twee uiteinden los waren. Pas als een draad ze verbond, liep er stroom. Dat is de **gesloten kring**: de weg moet rond zijn, van de bron door de draad en terug naar de bron.



Een zuil van Volta: zink, koper en karton met zout water, telkens opnieuw gestapeld.

UITLEG · 18.2

De gesloten kring

2/16

Elke werkende elektrische kring heeft vier soorten onderdelen:

- een **bron**: een batterij, een adapter of een zonnepaneel. De bron 'duwt' de lading door de kring en levert de energie. Ze heeft twee aansluitingen, de **pluspool** (+) en de **minpool** (–);

- een of meer **verbruikers**: een lamp, een motor, een zoemer. Een verbruiker zet elektrische energie om in een andere vorm: licht, beweging, geluid en altijd ook wat warmte (hoofdstuk 15);
- **geleiders**: de draden, meestal koper met een kunststof mantel eromheen;
- een **schakelaar**: daarmee open of sluit je de kring.

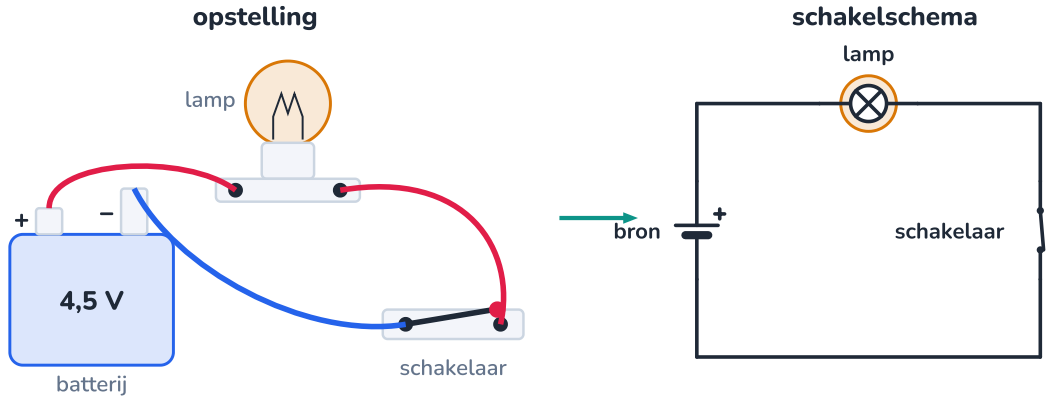
Er loopt alleen stroom als er een **gesloten weg** is: van de pluspool, door de draden en de verbruiker, terug naar de minpool. Is die weg ergens onderbroken, dan is de kring **open** en loopt er nergens stroom, ook niet in het stuk dat nog vastzit aan de bron.

Eén draad naar de lamp is genoeg

Een lamp heeft altijd **twee** aansluitingen nodig: de stroom moet erin én eruit. Wat de lamp opneemt, is energie, geen lading: de lading gaat rond en komt terug in de bron. In hoofdstuk 19 zie je dat er evenveel stroom uit de lamp komt als erin gaat.

Dicht is aan

Bij een deur betekent 'open' dat je erdoor kan. Bij een schakelaar is het omgekeerd: een **gesloten** (dichte) schakelaar laat de stroom door, een **open** schakelaar onderbreekt de kring.



Links zie je hoe de onderdelen er echt uitzien, rechts hetzelfde als schakelschema: korter, duidelijker en overal ter wereld leesbaar.

UITLEG · 18.3

Schakelschema's: de taal van elektriciens

3/16

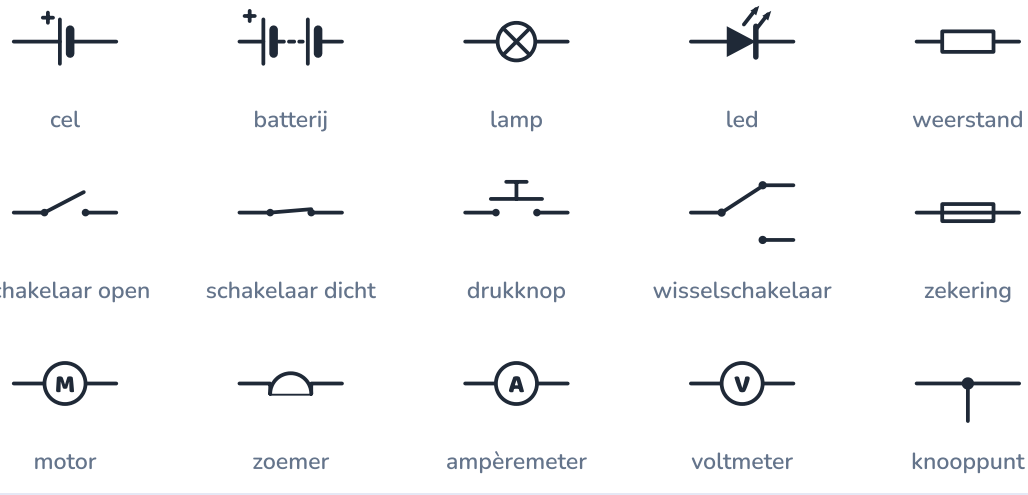
Een foto of een tekening van een opstelling toont hoe de onderdelen eruitzien, maar niet meteen hoe ze verbonden zijn. Daarom tekenen elektriciens en ingenieurs een **schakelschema**. Elk onderdeel krijgt een vast **symbool**, internationaal afgesproken in de norm IEC 60617. Een schema uit Japan lees je dus net zo goed als een schema uit België.

De tekenregels:

1. Teken draden als **rechte lijnen**, horizontaal of verticaal, met rechte hoeken. Hoe lang een draad is en hoe hij in het echt loopt, doet er niet toe.
2. Een **knooppunt** (dik punt) betekent: deze draden zijn verbonden. Twee draden die elkaar **kruisen zonder punt**, zijn **niet** verbonden.
3. Bij een splitsing (T-vorm) zet je altijd een punt.
4. Zet de bron meestal links, en schrijf bij de onderdelen een naam of een letter met een nummer: S1 en S2 voor twee schakelaars, F1 voor een zekering, M1 voor een motor.
5. Teken schakelaars in de stand waarin ze 'rusten' (meestal open), tenzij je een bepaalde stand wil tonen.

Volg de stroom met je vinger

Een schema lezen doe je door vanaf de pluspool de draden te volgen, door elk onderdeel, tot je terug bent bij de minpool. Kom je vast te zitten (een open schakelaar, een losse draad), dan is de kring open.



De symbolen die je in Fundamental het meest gebruikt. Een volledige tabel met hun betekenis staat op het naslagblad.



Een punt maakt het verschil: met punt zijn de draden verbonden, zonder punt lopen ze gewoon over elkaar.

PROEF · 18.4

Geleider of isolator?

4/16

ONDERZOEKSVRAAG

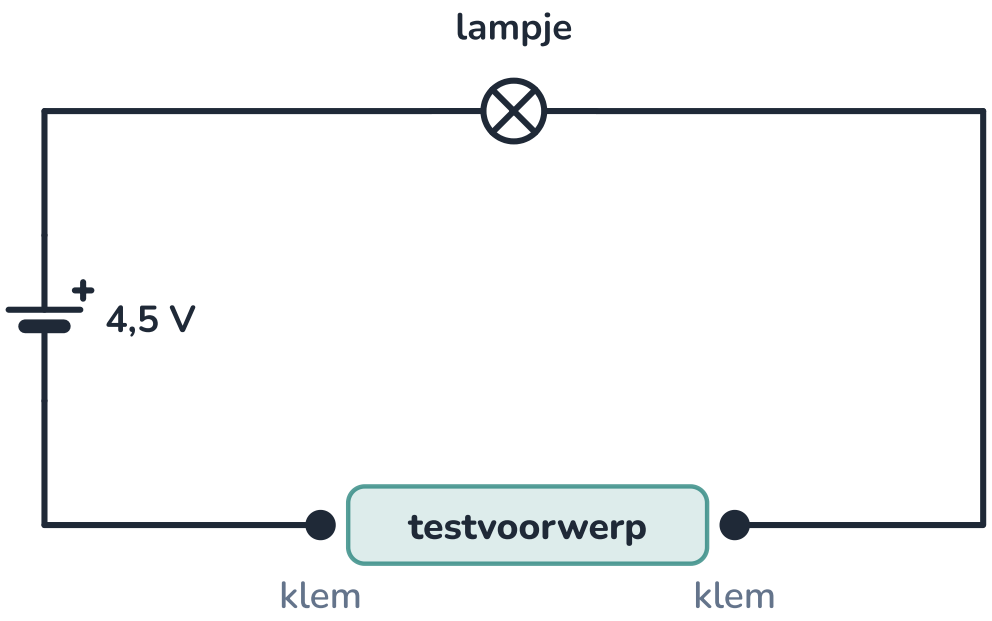
Welke stoffen laten stroom door, en welke niet?

MATERIAAL

- platte batterij van 4,5 V, lampje van 3,5 V in een fitting, 3 snoertjes met krokodillenklemmen
- een led met voorschakelweerstand (voor stoffen die maar een klein beetje geleiden)
- testvoorwerpen: paperclip, aluminiumfolie, munt, potlood (aan twee kanten geslepen), gum, plastic lat, hout, glas
- drie bekertjes: kraanwater, gedestilleerd water, zout water (een eetlepel zout in 100 mL)

Veiligheid

Werk alleen met de batterij van 4,5 V, nooit met het stopcontact. Laat de klemmen niet rechtstreeks tegen elkaar komen zonder lampje in de kring.



Tussen de twee klemmen komt het voorwerp dat je test. Een geleider sluit de kring.

WERKWIJZE

1. Bouw de testkring zoals in het schema. Raak de twee klemmen even tegen elkaar: het lampje moet branden. Zo weet je dat de kring werkt.
2. Klem het eerste voorwerp tussen de twee klemmen. Brandt het lampje? Noteer.
3. Test zo alle voorwerpen. Voor het potlood klem je beide geslepen punten vast, zodat je de mine raakt.
4. Steek voor de vloeistoffen de twee klemmen in het bekertje, ongeveer 1 cm uit elkaar, zonder dat ze elkaar raken.
5. Vervang het lampje door de led met voorschakelweerstand en test opnieuw de voorwerpen waarbij het lampje niet brandde.

WAARNEMING

voorwerp	lampje	led
paperclip, aluminiumfolie, munt	brandt	brandt
potloodmine (grafiet)	brandt, iets zwakker	brandt
gum, plastic lat, hout, glas	brandt niet	brandt niet
gedestilleerd water	brandt niet	brandt niet
kraanwater	brandt niet	gloeit heel zwak
zout water	gloeit zwak	brandt duidelijk

Voorbeeld van resultaten in een klas. In het zoute water ontstaan kleine belletjes aan de klemmen. Hoe fel de led in water brandt, hangt af van hoe ver de klemmen uit elkaar staan.

VERKLARING

Metalen en grafiet zijn **geleiders**: het lampje brandt. Kunststof, rubber, hout en glas zijn **isolatoren**: de kring is 'open', ook al is ze niet onderbroken. Zuiver water geleidt bijna niet; kraanwater een beetje, door de zouten die erin opgelost zijn (hoofdstuk 8). Hoe meer zout, hoe beter het water geleidt. De led toont dat verschil beter dan het lampje: ze licht al op bij een heel kleine stroom, terwijl een lampje een grote stroom nodig heeft. De belletjes in het zoute water zijn gassen: de stroom ontbindt een klein beetje van het water, net zoals bij Nicholson en Carlisle in 1800.

UITLEG · 18.5

Geleiders en isolatoren

5/16

Waarom geleidt een metaal wel en een stuk plastic niet? In een metaal zitten **vrije elektronen**: kleine, negatief geladen deeltjes die niet vastzitten aan één atoom, maar door het hele metaal kunnen schuiven (hoofdstuk 19). Duwt een bron, dan schuiven ze allemaal tegelijk op: dat is stroom. In kunststof, glas en rubber zitten de elektronen vast aan hun atomen: er kan bijna niets bewegen. In water zijn het geen elektronen maar opgeloste **ionen** van zouten die de lading dragen: daarom geleidt zout water beter dan zuiver water (in Intermediate, hoofdstuk I13, leer je meer over ionen).

goede geleiders	zwakke geleiders	isolatoren
zilver, koper, goud, aluminium	kraanwater, zout water	kunststof (pvc, pe), rubber
ijzer en staal, messing, tin	menselijk lichaam (vooral met natte huid)	glas, porselein
grafiet (potloodmine)	vochtige grond, vochtig hout	droog hout, papier, lucht

Zilver is de beste geleider, koper de tweede. Draden zijn van **koper**: het geleidt bijna zo goed als zilver, is veel goedkoper en makkelijk te buigen. Hoogspanningslijnen zijn meestal van **aluminium**, omdat dat veel lichter is. Een snoer bestaat dus uit twee delen met een tegengestelde taak: een geleidende kern en een isolerende mantel.

In een huisinstallatie geeft de kleur van de mantel aan welke draad wat doet: **bruin** (of zwart, grijs) is de fase, **blauw** de nul, en **geel-groen** de aarding (hoofdstuk 5).

Een isolator laat nooit stroom door

Elke isolator geeft het op als de spanning maar groot genoeg is. Droge lucht isoleert goed, maar bij ongeveer 3000 V per millimeter slaat ze door: er springt een vonk over. Een bliksem is zo'n vonk, honderden meters tot kilometers lang. En een isolator die nat of vuil is, laat over zijn oppervlak toch stroom door.

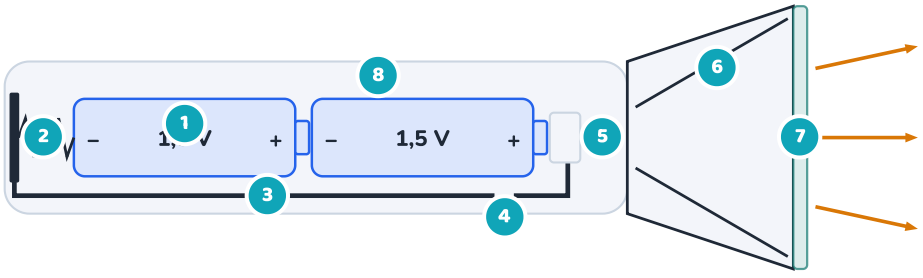


Een snoer: koperen kernen (geleider) in een kunststof mantel (isolator). Bruin is de fase, blauw de nul, geel-groen de aarding.

ONTLEED · 18.6

Een zaklamp van binnen

Een eenvoudige zaklamp is een complete elektrische kring in een buis. Volg de nummers en zoek de bron, de verbruiker, de geleiders en de schakelaar. Het schema eronder toont dezelfde kring.



Doorsnede van een zaklamp met twee AA-batterijen. Hier is de schakelaar ingedrukt: de kring is gesloten.

1 Twee batterijen
De bron: twee cellen van 1,5 V achter elkaar, de pluspool van de ene tegen de minpool van de andere. Samen duwen ze harder: 3 V (hoofdstuk 20).

2 Veer
Duwt de batterijen tegen het lampje en maakt contact met de minpool. Een metalen veer is een geleider.

3 Metalen strip
De 'draad' van de zaklamp: brengt de stroom van de veer langs de binnenkant naar voren. In een metalen zaklamp is de buis zelf die geleider.

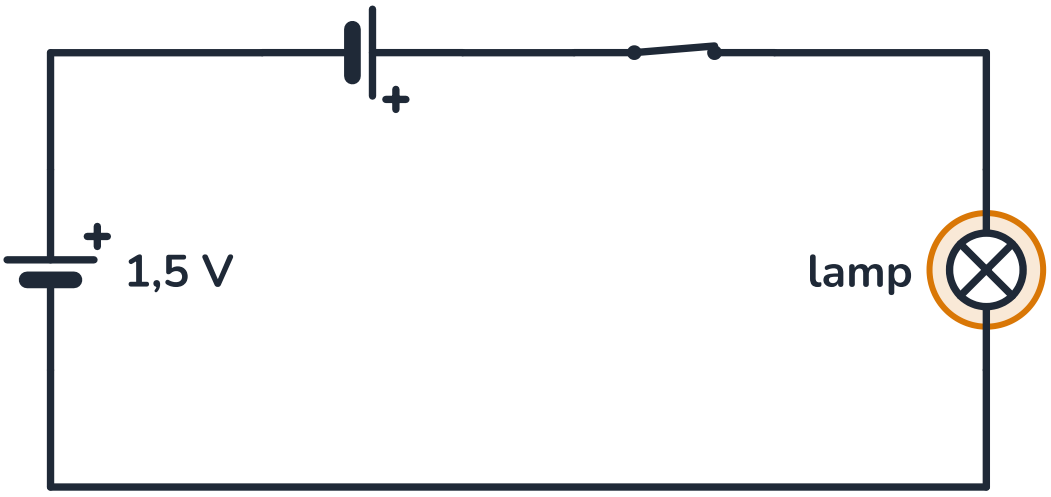
4 Schakelaar
Een knop die twee stukken strip met elkaar verbindt of ze los laat: de kring gesloten of open.

5 Lampje of led
De verbruiker. Het contact onderaan raakt de pluspool van de batterij, de fitting is verbonden met de strip.

6 Reflector
Een spiegelende trechter die het licht dat opzij en naar achter gaat, naar voren kaatst.

7 Venster
Doorzichtige kunststof of glas: beschermt het lampje en laat het licht door.

8 Behuizing
Van kunststof: een isolator. Je kan de zaklamp overal vastnemen zonder de kring te beïnvloeden.



Het schakelschema van de zaklamp: twee cellen, een schakelaar en een lampje in één lus.

UITLEG · 18.7

Open kring en kortsluiting

7/16

In een **open kring** is de weg ergens onderbroken: een schakelaar staat open, een draad is los, een lampje is doorgebrand. Er loopt dan nergens stroom. Dat is niet gevaarlijk; het is gewoon hoe je iets uitzet.

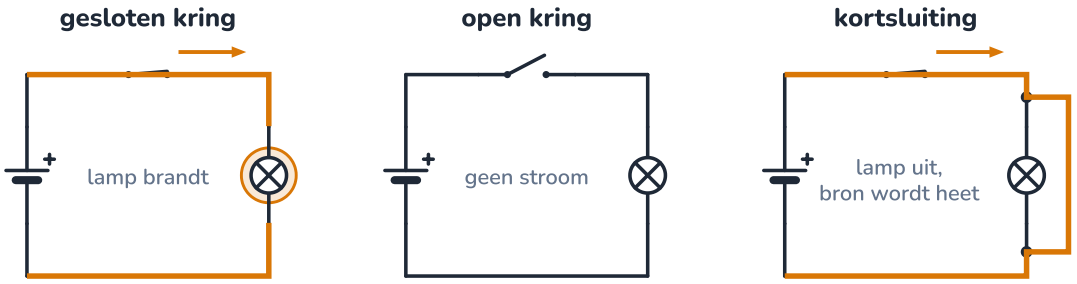
Een **kortsluiting** is het omgekeerde: er ontstaat een weg van de ene pool naar de andere die **niet door de verbruiker** gaat, maar alleen door draden of metaal. Een draad remt de stroom bijna niet af, een lamp wel (hoe sterk, meet je in hoofdstuk 19 als 'weerstand'). De stroom neemt daarom vrijwel volledig de korte weg. Gevolg:

- de lamp gaat uit, want er loopt bijna geen stroom meer door;
- door de draden en de bron loopt een **heel grote stroom**. De draden worden heet, de isolatie kan smelten, de bron raakt beschadigd. Een lithiumbatterij kan zelfs vuur vatten (hoofdstuk 5).

Kortsluiting ontstaat vaak per ongeluk: twee blanke draadeinden die elkaar raken, een schroevendraaier tussen twee contacten, een beschadigd snoer, water in een stekkerdoos, een munt in je broekzak naast een reservebatterij.

Nooit een bron kortsluiten

Verbind nooit de twee polen van een batterij of een voeding rechtstreeks met een draad, ook niet 'even'. Bewaar losse batterijen zo dat hun polen niet tegen metaal kunnen komen, en plak de polen af van batterijen die je naar het inzamelpunt brengt.



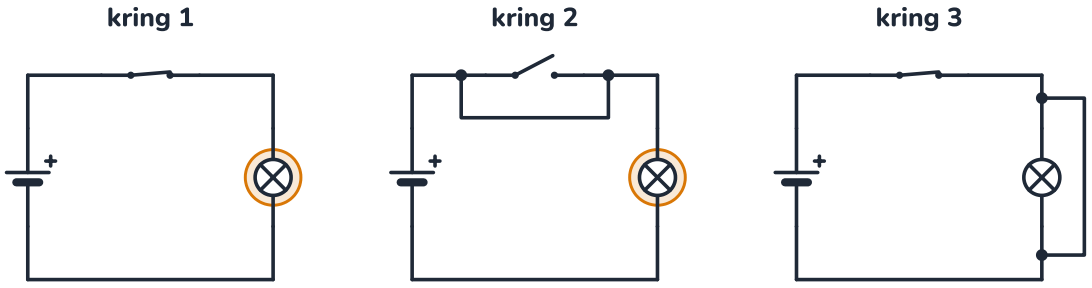
De dikke gekleurde lijn toont waar de stroom loopt. Bij kortsluiting gaat ze door de draad naast de lamp, niet door de lamp.

UITGEWERKT VOORBEELD · 18.8

Brandt de lamp?

8/16

Een leerling bouwt de drie kringen hieronder, telkens met een batterij en een lampje. In welke brandt de lamp? Leg uit waarom, zoals een elektricien redeneert.



Drie kringen met één batterij en één lamp. Let op de knooppunten.

GEGEVEN

- drie schakelschema's
- regel: de lamp brandt als er een gesloten weg van + naar – door de lamp loopt, die niet kortgesloten wordt

GEVRAAGD

- brandt de lamp in kring 1, 2 en 3?

OPLOSSING

1. **Methode.** Start bij de pluspool (lange streep). Volg de draad en ga door elk onderdeel. Vraag je bij elke splitsing af: is er een weg *zonder* verbruiker? Die neemt de stroom.
2. **Kring 1.** Van + via de gesloten schakelaar naar de lamp, door de lamp, terug naar –. Een gesloten weg door de lamp, en geen korte weg ernaast: de lamp **brandt**.
3. **Kring 2.** De schakelaar staat open, maar er loopt een draad met twee knooppunten over de schakelaar heen. De stroom gaat via die draad: de kring is toch gesloten en de lamp **brandt**. De schakelaar kan de lamp niet meer uitzetten: een fout in de bedrading.
4. **Kring 3.** De schakelaar is dicht, maar een draad verbindt de twee kanten van de lamp. Die draad is een weg zonder verbruiker: **kortsluiting**. De lamp brandt **niet**, en de batterij wordt warm.

ANTWOORD

In kring 1 en 2 brandt de lamp, in kring 3 niet (kortsluiting). In kring 2 werkt de schakelaar niet meer.

Klopt dit? Tel de knooppunten: waar een draad met twee punten aan beide kanten van een onderdeel zit, loopt de stroom om dat onderdeel heen. Dat is de snelste manier om een kortsluiting of een overbrugde schakelaar te vinden.

UITLEG · 18.9

De zekering

9/16

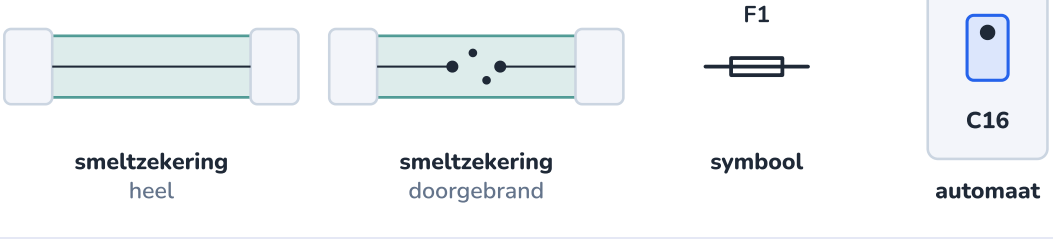
Omdat een kortsluiting zo gevaarlijk is, zit er in elke goede kring een **zekering**. Ze staat **in serie**: alle stroom moet erdoor. Loopt er te veel stroom, dan onderbreekt ze de kring, lang voor de draden heet genoeg worden om brand te veroorzaken. Er zijn twee soorten:

- Een **smeltzekering** bevat een dun draadje. Bij te veel stroom wordt het zo heet dat het smelt: de kring is open. Een doorgebrande smeltzekering vervang je door een nieuwe met dezelfde waarde. Je vindt ze als glaszekering in toestellen en in je multimeter, als steekzekering in een auto, en als patroonzekering in oude huisinstallaties.
- Een **automaat** (automatische zekering) doet hetzelfde met een mechanisme. Bij een te grote stroom die blijft duren, warmt een **bimetaal** op, buigt en schakelt uit (na seconden tot minuten). Bij kortsluiting trekt een **elektromagneet** het contact in een fractie van een seconde open. Na het herstellen van de fout duw je de hendel gewoon terug omhoog.

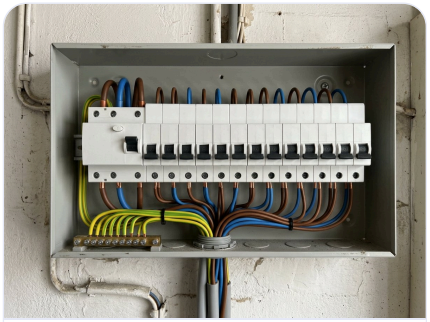
Op een zekering staat een getal met de letter A: de stroom in **ampère** (hoofdstuk 19) waarbij ze nog net niet afschakelt. In een Belgische woning beveiligt een automaat van 16 A een lichtkring met draden van 1,5 mm², en een automaat van 20 A een kring met stopcontacten en draden van 2,5 mm²: een dikkere draad mag meer stroom dragen. De zekering beschermt dus de **draden** en de toestellen. Mensen beschermt ze nauwelijks: dat doet de differentieelschakelaar (hoofdstuk 5).

Waar de zekering hoort

Zet de zekering zo dicht mogelijk bij de bron, in de draad die van de pluspool komt (bij 230 V: in de fase). Zo is alles wat erna komt beveiligd. En vervang een doorgebrande zekering nooit door een zwaardere of door een stukje draad: dan beschermt ze niets meer. Springt een zekering, zoek dan eerst de oorzaak.



Links een smeltzekering, heel en doorgebrand. Het symbool is een rechthoek met een lijn erdoor. Rechts een automaat van 16 A.



De zekeringkast van een woning: een automaat per kring, plus de differentieelschakelaar.

PROEF · 18.10

Staalwol als zekering (demonstratie)

10/16

ONDERZOEKSVRAAG

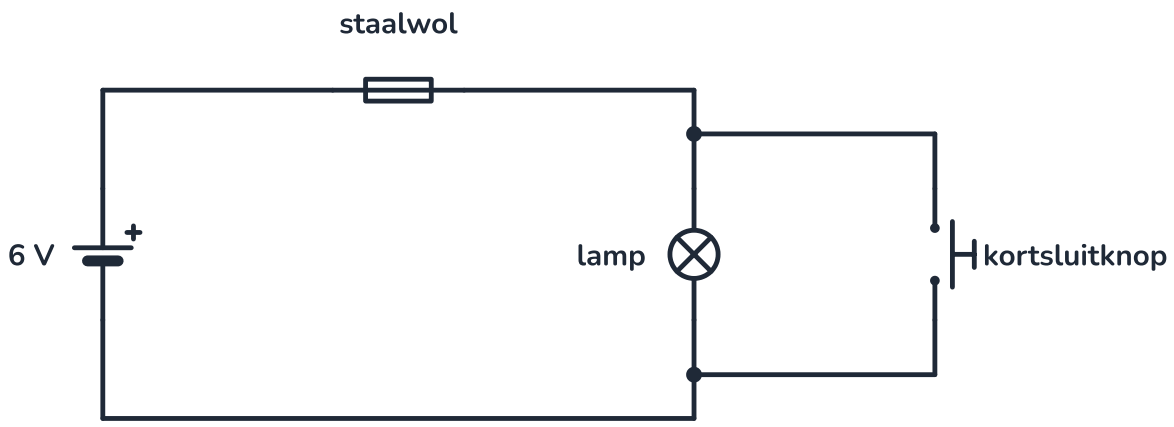
Wat gebeurt er met een dun draadje in de kring als je een kortsluiting maakt?

MATERIAAL

- regelbare voeding van 6 V met stroombegrenzing
- lampje van 6 V in een fitting
- enkele draadjes fijne staalwol tussen twee krokodillenklemmen, op een tegel
- drukknop, snoertjes

Veiligheid

Alleen als demonstratie door de docent. Staalwol wordt gloeiend heet en kan vonken: werk op een tegel, zonder papier of andere brandbare stoffen in de buurt, met een veiligheidsbril. Raak het staalwol na de proef niet meteen aan.



Het staalwol staat in serie; de kortsluitknop maakt een korte weg naast de lamp.

WERKWIJZE

1. Bouw de kring volgens het schema: de voeding, het plukje staalwol als 'zekering', het lampje, en een drukknop parallel over het lampje.
2. Zet de voeding aan. Het lampje brandt. (De docent test vooraf hoeveel draadjes staalwol er nodig zijn: genoeg om het lampje te laten branden.)
3. Druk op de drukknop: je maakt een kortsluiting over het lampje. Kijk naar het staalwol.
4. Laat de drukknop los. Brandt het lampje weer?

WAARNEMING

Zolang het lampje brandt, blijft het staalwol koud en heel. Bij het indrukken van de knop gaat het lampje uit, en na een fractie van een seconde gloeit het staalwol oranje op en smelt het door. Laat je de knop los, dan blijft het lampje uit.

VERKLARING

Met de knop ingedrukt kan de stroom om het lampje heen: er loopt een veel grotere stroom. De dunne draadjes staalwol worden daardoor zo heet dat ze smelten, en de kring is **open**. Dat is precies hoe een smeltzekering werkt: het zwakste stukje in de kring geeft het bewust als eerste op, op een veilige plaats, voor de rest heet wordt. Na de 'kortsluiting' moet je het staalwol vervangen, zoals een doorgebrande zekering.

UITLEG · 18.11

Schakelaars: aan/uit, drukknop en wissel

Er bestaan veel soorten schakelaars. Vier ervan gebruik je in dit hoofdstuk:

- De gewone **schakelaar** (aan/uit) blijft in de stand waarin je hem zet: de lichtschakelaar in de klas.
- Een **drukknop** veert terug als je loslaat. Een **maakcontact** sluit de kring zolang je drukt: de deurbel, de toetsen van een rekenmachine. Een **verbreekcontact** doet het omgekeerde: het opent de kring zolang je drukt. Het lampje in de koelkast werkt zo: is de deur dicht, dan duwt ze de knop in en is het lampje uit; open je de deur, dan komt de knop vrij en gaat het lampje aan.
- Een **wisselschakelaar** heeft drie aansluitingen. Hij verbindt het gemeenschappelijke contact met de ene *of* met de andere uitgang: hij kiest een weg.

Twee schakelaars samen. Staan twee schakelaars **in serie** (achter elkaar), dan brandt de lamp alleen als S1 **én** S2 dicht zijn. Staan ze **parallel** (naast elkaar, elk in een eigen tak), dan brandt de lamp als S1 **of** S2 dicht is (of allebei).

S1	S2	serie (EN)	parallel (OF)
open	open	uit	uit
open	dicht	uit	aan
dicht	open	uit	aan
dicht	dicht	aan	aan

Voorbeelden: een wasmachine start pas als de deur dicht is **én** je op start drukt. Een deurbel met een knop aan de voordeur en een aan de achterdeur: de bel gaat als iemand aan de ene **of** de andere drukt. In een appartementsgebouw zit op elke verdieping een drukknop voor de trapverlichting; ze staan parallel, zodat elke knop de lichten (met een tijdschakelaar) aanzet.

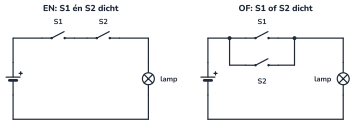
EN en OF: de basis van computers

Met EN en OF (en NIET) kan je beslissingen bouwen. Een computer doet niets anders, met miljarden piepkleine schakelaars. In hoofdstuk 22 gebruik je EN en OF in algoritmen, in Expert (hoofdstuk E23) bouw je er logische schakelingen mee.



schakelaar blijft staan — **drukknop: maakcontact** dicht zolang je drukt — **drukknop: verbreekcontact** open zolang je drukt — **wisselschakelaar** kiest boven of onder

Schakelaar, drukknop met maakcontact, drukknop met verbreekcontact en wisselschakelaar. Bij het verbreekcontact rust de brug op de contacten.



In serie moeten beide schakelaars dicht zijn (EN); parallel volstaat één van de twee (OF).

UITLEG · 18.12

De trappenhuisschakeling

12/16

Je komt 's avonds thuis en wil het licht van de trap aandoen, beneden. Boven wil je het weer uitdoen. Met gewone schakelaars lukt dat niet: in serie moet je er twee aanzetten, parallel kan je niet meer uitzetten als de andere aan staat. De oplossing is de **trappenhuisschakeling**, ook **wisselschakeling** genoemd (in Nederland vaak 'hotelschakeling'):

- twee **wisselschakelaars**, W1 onderaan en W2 bovenaan de trap;
- de bron gaat naar het gemeenschappelijke contact van W1;
- tussen de twee schakelaars lopen **twee schakeldraden**: ze verbinden de uitgangen van W1 met de uitgangen van W2;
- het gemeenschappelijke contact van W2 gaat naar de lamp, en de lamp terug naar de bron.

De lamp brandt als beide schakelaars **dezelfde** schakeldraad kiezen: dan is er een gesloten weg. Kiezen ze een verschillende draad, dan loopt de weg dood. Omdat elke schakelaar de keuze kan omdraaien, verandert de lamp van toestand, bij welke schakelaar je ook drukt.

Van meer dan twee plaatsen

Voor een lange gang met drie of meer deuren zet je tussen de twee wisselschakelaars een of meer **kruisschakelaars**. Een kruisschakelaar laat de twee schakeldraden rechtdoor lopen of kruist ze. Met twee wisselschakelaars en één kruisschakelaar bedien je een lamp van drie plaatsen (opdracht 18.15).



Zoals hier getekend kiest W1 schakeldraad 1 en W2 schakeldraad 2: de weg loopt dood en de lamp is uit.



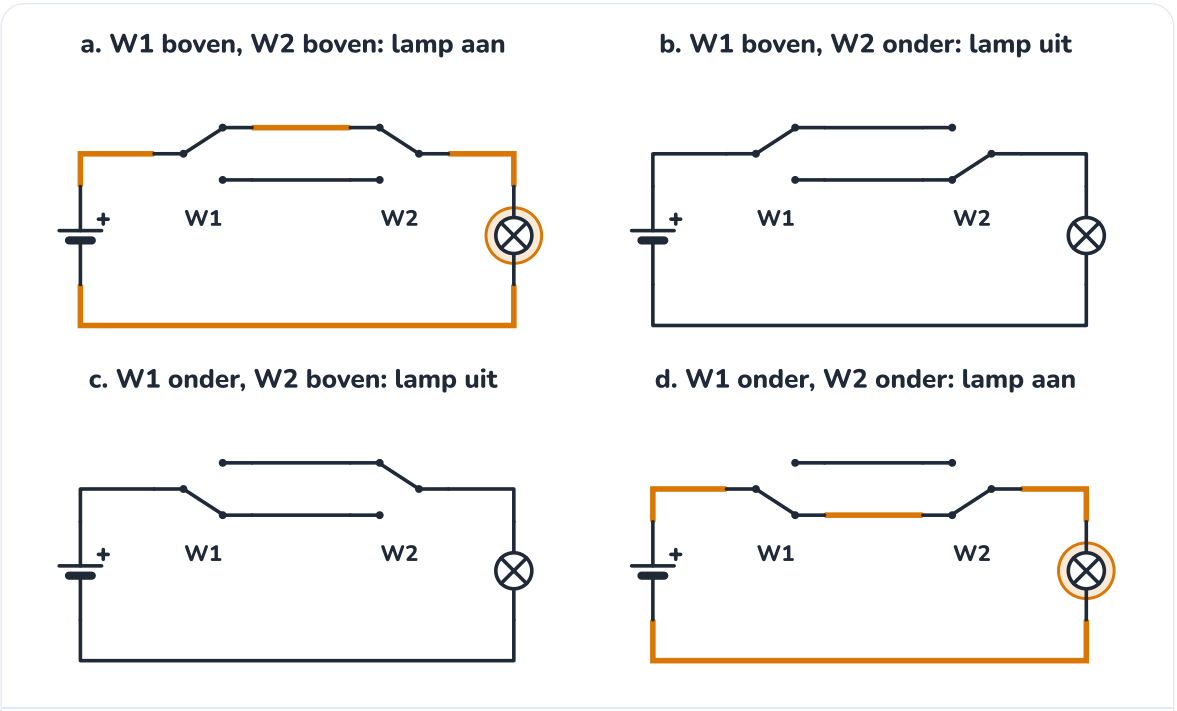
Twee schakelaars, één lamp: onderaan aandoen, bovenaan uitdoen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 18.13

Alle vier de standen nagaan

13/16

Elke wisselschakelaar heeft twee standen: boven of onder. Controleer voor alle vier de combinaties of de lamp brandt. Werkt de schakeling zoals het hoort: verandert de lamp telkens als je één schakelaar omzet?



De vier standen. De dikke gekleurde lijn toont de gesloten weg; zonder die weg blijft de lamp uit.

GEGEVEN

- trappenhuisschakeling met W1 en W2
- schakeldraad 1 verbindt de bovenste uitgangen, schakeldraad 2 de onderste

GEVRAAGD

- toestand van de lamp in de vier standen
- verandert de lamp bij elke omzetting?

OPLOSSING

1. **a. W1 boven, W2 boven.** Bron → W1 → schakeldraad 1 → W2 → lamp → bron: een gesloten weg. De lamp is **aan**.
2. **b. W1 boven, W2 onder.** De stroom komt via schakeldraad 1 aan bij W2, maar W2 is verbonden met schakeldraad 2, die bij W1 los eindigt. De weg loopt dood: **uit**.
3. **c. W1 onder, W2 boven.** W1 stuurt de stroom naar schakeldraad 2, W2 neemt schakeldraad 1: **uit**.
4. **d. W1 onder, W2 onder.** Bron → W1 → schakeldraad 2 → W2 → lamp: **aan**.
5. **Omzetten.** Van a naar b (W2 om): aan → uit. Van b naar d (W1 om): uit → aan. Van d naar c (W2 om): aan → uit. Van c naar a (W1 om): uit → aan. Bij elke omzetting van één schakelaar wisselt de lamp.

ANTWOORD

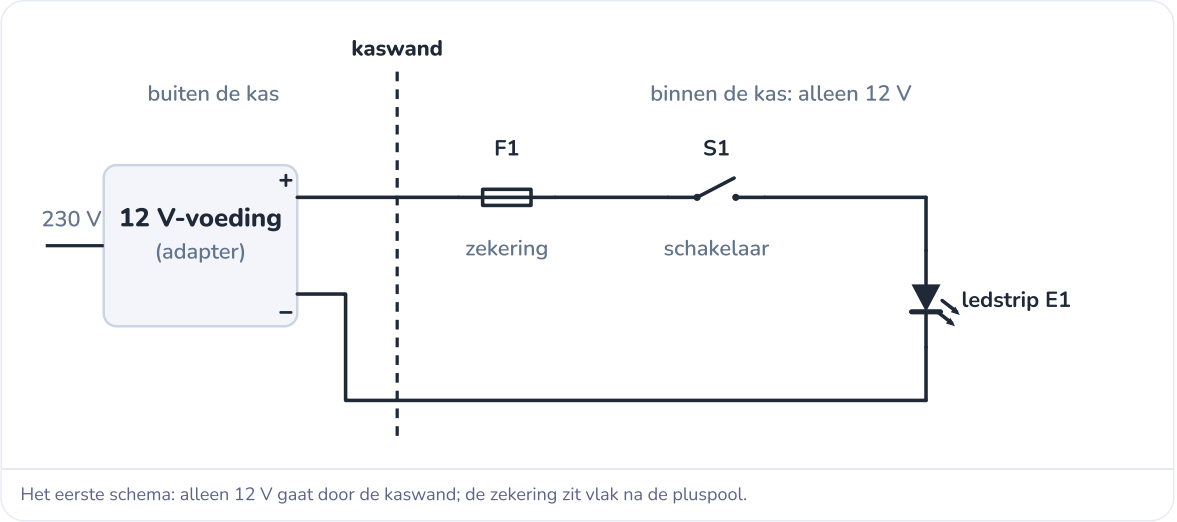
De lamp brandt als beide schakelaars in dezelfde stand staan (a en d), en is uit als ze verschillen (b en c). Elke schakelaar zet de lamp dus altijd om: de schakeling werkt.

Klopt dit? In elke stand loopt er door hoogstens één schakeldraad stroom, en nooit ontstaat er een kortsluiting: elke weg van de pluspool naar de minpool gaat door de lamp. Wie W1 en W2 per ongeluk aan de verkeerde contacten aansluit, merkt het meteen: dan werkt de lamp in een van de standen niet.

UITGEWERKT VOORBEELD · 18.14

Habitat: het schema van de kasverlichting

Boven de plantenbakken van de meetkas komt een ledstrip van 12 V. Teken het schakelschema. De eisen: (1) de 230 V-adapter staat buiten de kas, droog en achter een differentieel (hoofdstuk 5); (2) in de kas is er alleen 12 V; (3) de kring is beveiligd tegen kortsluiting; (4) je kan de ledstrip met de hand aan- en uitzetten; (5) later moet de microcontroller de ledstrip ook zelf kunnen schakelen (hoofdstuk 25).



Het eerste schema: alleen 12 V gaat door de kaswand; de zekering zit vlak na de pluspool.

GEGEVEN

- 12 V-voeding (adapter) met een plus- en een minaansluiting
- ledstrip van 12 V
- zekering, schakelaar, wisselschakelaar, relaiscontact van de microcontroller

GEVRAAGD

- schakelschema voor eisen 1 tot 4
- uitbreiding voor eis 5

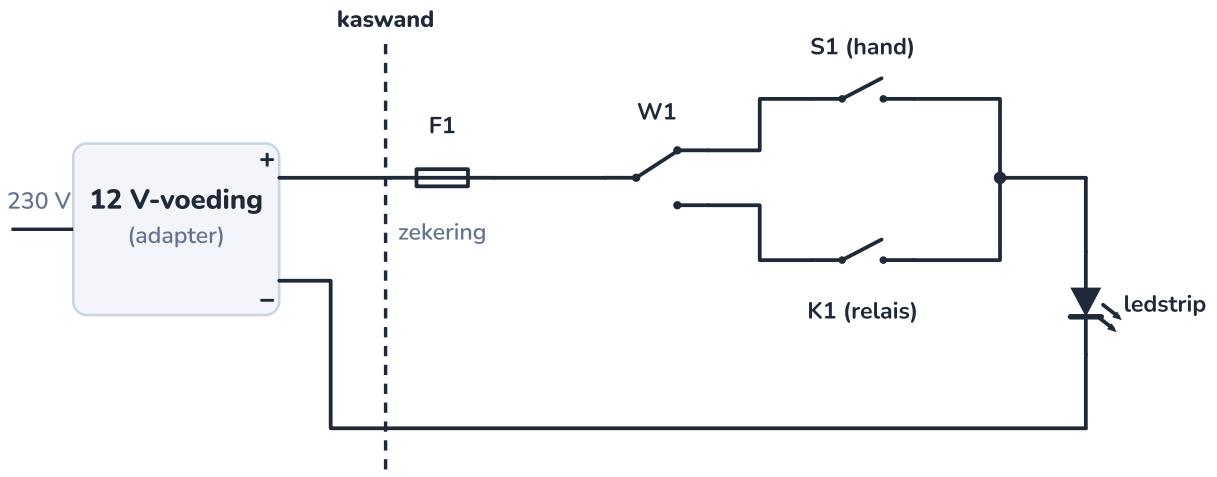
OPLOSSING

1. **Bron.** De adapter zet 230 V om in 12 V en staat buiten de kas. Alleen het 12 V-snoer gaat door de kaswand naar binnen.
2. **Zekering.** F1 komt meteen na de pluspool van de voeding, in serie: bij een kortsluiting ergens in de kas onderbreekt ze de hele kring. (Welke waarde, bereken je in hoofdstuk 19: net boven de stroom van de ledstrip.)
3. **Schakelaar.** S1 staat in serie met de ledstrip, na de zekering. De minaansluiting van de ledstrip gaat terug naar de minpool van de voeding: de kring is gesloten als S1 dicht is (eerste schema).
4. **Uitbreiding.** Vervang S1 door een **wisselschakelaar** W1 die kiest tussen 'hand' en 'automaat'. Op de ene uitgang zit S1, op de andere het relaiscontact K1 dat de microcontroller later bedient. Beide komen samen in een knooppunt voor de ledstrip (tweede schema).
5. **Controle per stand.** W1 op hand: de ledstrip brandt als S1 dicht is, K1 doet niets. W1 op automaat: K1 beslist, S1 doet niets. In geen enkele stand ontstaat een weg buiten de ledstrip om.

ANTWOORD

Voeding (buiten) → F1 → S1 → ledstrip → terug naar de voeding. Voor de automatische stand komt er een wisselschakelaar W1 bij die kiest tussen S1 (hand) en het relaiscontact K1 (automaat).

Klopt dit? Volg met je vinger de weg van + naar – in elke stand van W1: er is telkens precies één weg, en die gaat door F1 en door de ledstrip. Een zekering die pas na de ledstrip kwam, zou een kortsluiting in de draad naar de ledstrip niet opmerken.



De uitbreiding: W1 kiest tussen de schakelaar S1 (hand) en het relaiscontact K1 van de microcontroller (automaat).

NASLAG · 18.15

Overzicht: symbolen en regels

15/16

De symbolen uit dit hoofdstuk, met wat ze doen, en de regels voor een goed schema en een veilige kring.

symbool	naam	betekenis
	cel	Bron met één cel. De lange, dunne streep is de pluspool (+).
	batterij	Bron met meerdere cellen achter elkaar.
	wisselspanningsbron	Het stopcontact (230 V wisselspanning).
	lamp	Verbruiker die licht geeft.
	led	Lichtgevende diode: laat de stroom maar in één richting door, in de richting van het driehoekje.
	weerstand	Remt de stroom af (hoofdstuk 19).
	motor	Zet elektrische energie om in beweging.
	zoemer	Zet elektrische energie om in geluid.
	schakelaar (open)	Onderbreekt de kring; blijft in de stand waarin je hem zet.

symbool	naam	betekenis
	schakelaar (dicht)	Sluit de kring.
	drukknop, maakcontact	Sluit de kring zolang je drukt (deurbel).
	drukknop, verbreekcontact	Opent de kring zolang je drukt (lampje in de koelkast).
	wisselschakelaar	Verbindt het gemeenschappelijke contact met de ene of de andere uitgang.
	zekering	Onderbreekt de kring als er te veel stroom loopt.
	ampèremeter	Meet de stroom; staat in de kring (hoofdstuk 19).
	voltmeter	Meet de spanning; staat over een onderdeel (hoofdstuk 19).
	knooppunt	Punt waar draden verbonden zijn. Kruisen zonder punt: niet verbonden.

regel	waarom
rechte draden, rechte hoeken	een schema toont verbindingen, geen echte ligging
knooppunt = punt; kruisen zonder punt = niet verbonden	geen twijfel over wat verbonden is
de kring moet gesloten zijn	zonder gesloten weg loopt er geen stroom
nooit een weg zonder verbruiker tussen + en −	dat is kortsluiting: heel grote stroom, hitte
zekering in serie, vlak na de pluspool (of in de fase)	ze beveiligt alles wat erna komt
schakelaar in serie met wat hij bedient	open schakelaar = open kring
schakelaars in serie: EN; parallel: OF	zo combineer je voorwaarden
trappenhuis: 2 wisselschakelaars + 2 schakeldraden	één lamp van twee plaatsen; per extra plaats een kruisschakelaar

HET GEHEEL · 18.16

Waar de kring naartoe leidt

16/16

De gesloten kring is het vertrekpunt van de hele leerlijn **elektriciteit en elektronica**. Alles wat later komt, van de wet van Ohm tot een microcontroller, speelt zich af in een kring die je als schema tekent. Met EN en OF raak je ook de leerlijn **programmeren**: dezelfde logica stuurt algoritmen en computers. En de zekering hoort bij **veilig werken**.

F5 Veilig werken in labo en werkplaats

F10 Materialen en hun eigenschappen

Elektrische geleiding als materiaaleigenschap in een keuzetabel.

F19 Spanning, stroom en weerstand

Hoeveel stroom er loopt en hoe hard de bron duwt: meten met de multimeter,

Waarom 230 V gevaarlijk is, de differentieelschakelaar en de aarding: de zekering is de derde beveiliging.

rekenen met Ohm, de waarde van een zekering kiezen.

F20 Serie- en parallelschakeling

Verbruikers in serie en parallel: wat er gebeurt met stroom en spanning, en waarom je huis parallel geschakeld is.

F22 Computationeel denken

EN, OF en NIET in algoritmen en stroomdiagrammen.

F24 De microcontroller

Een drukknop inlezen en een led schakelen met een microcontroller.

I21 De wetten van Kirchhoff

Kringen met knooppunten en lussen doorrekenen.

E23 Digitale logica

EN, OF en NIET als logische poorten: de bouwstenen van een processor.

Habitat

Je hebt nu het eerste schema van de meetkas: de ledstrip op een 12 V-voeding buiten de kas, met een zekering vlak na de pluspool en een schakelaar, en een wisselschakelaar voor de latere automatische sturing. In hoofdstuk 19 kies je de waarde van de zekering, in hoofdstuk 20 sluit je ook het pompje en de microcontroller op dezelfde voeding aan, en in hoofdstuk 21 bereken je hoeveel energie de kas per dag gebruikt. Opdracht 18.12 breidt het schema uit met het pompje en een droogloopbeveiliging.

SAMENVATTING

In het kort

- Een kring werkt alleen als ze gesloten is: van de pluspool van de bron, door de verbruiker en de geleiders, terug naar de minpool. De schakelaar opent of sluit de kring.
- Een schakelschema gebruikt IEC-symbolen, rechte draden en knooppunten; kruisen zonder punt is niet verbonden.
- Metalen en grafiet zijn geleiders (vrije elektronen); kunststof, glas, rubber en droge lucht zijn isolatoren. Zout water geleidt, zuiver water bijna niet.
- Een open kring is onderbroken; bij kortsluiting loopt de stroom buiten de verbruiker om, met een heel grote stroom en hitte als gevolg.
- Een zekering staat in serie, vlak na de pluspool, en onderbreekt de kring bij te veel stroom: een smeltzekering smelt door, een automaat schakelt uit. Ze beschermt de draden.
- Een drukknop veert terug (maakcontact of verbreekcontact); een wisselschakelaar kiest tussen twee uitgangen. Schakelaars in serie werken als EN, parallel als OF.
- De trappenhuisschakeling: twee wisselschakelaars met twee schakeldraden. De lamp brandt als beide dezelfde draad kiezen; elke schakelaar zet de lamp om.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

elektrische kring

Een gesloten weg van de bron, door een of meer verbruikers en geleiders, terug naar de bron; alleen dan loopt er stroom.

bron

Onderdeel dat de lading door de kring duwt en energie levert: batterij, adapter, zonnepaneel.

verbruiker

Onderdeel dat elektrische energie omzet in een andere vorm: licht, beweging, geluid, warmte.

geleider

Stof die stroom goed doorlaat, zoals een metaal of grafiet.

isolator

Stof die (bijna) geen stroom doorlaat, zoals kunststof, glas, rubber of droge lucht.

schakelschema

Tekening van een kring met afgesproken (IEC-)symbolen, rechte draden en knooppunten.

kortsluiting
Een weg met (bijna) geen weerstand tussen de polen van de bron, buiten de verbruiker om: er loopt een heel grote stroom.

zekering
Onderdeel in serie dat de kring onderbreekt als er te veel stroom loopt: een smeltzekering smelt door, een automaat schakelt uit.

drukknop
Schakelaar die terugveert: een maakcontact sluit zolang je drukt, een verbreekcontact opent zolang je drukt.

wisselschakelaar
Schakelaar met drie aansluitingen die het gemeenschappelijke contact met de ene of de andere uitgang verbindt.

trappenhuisschakeling
Schakeling met twee wisselschakelaars en twee schakeldraden waarmee je één lamp van twee plaatsen bedient (ook wisselschakeling).

F FUNDAMENTAL · DEEL F5 · ELEKTRICITEIT

HANDBOEK · HOOFDSTUK 19

Spanning, stroom en weerstand

Wat een multimeter meet, en waarom één eenvoudige regel zoveel verklaart

Een lampje brandt, een motor draait, een sensor meet: telkens beweegt er lading door een kring. In dit hoofdstuk leer je de drie grootheden kennen die elke elektrische kring beschrijven: **stroom**, **spanning** en **weerstand**. Je meet ze met een multimeter en ontdekt het verband dat Georg Ohm tweehonderd jaar geleden vond: $U = R \cdot I$.

4× uitleg · 2× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

L Elektriciteit en elektronica · W Wiskundig modelleren · O Onderzoeken en meten



Meten is weten: de spanning over de ledstrip van de meetkas.

Na dit hoofdstuk

- Je kan stroom, spanning en weerstand in eigen woorden uitleggen, met hun symbool en eenheid.
- Je kan milliampère, ampère, kilo-ohm en ohm in elkaar omzetten.
- Je kan een ampèremeter in serie en een voltmeter parallel aansluiten, en uitleggen waarom het zo moet.
- Je kan een multimeter veilig instellen en aflezen.
- Je kan met de wet van Ohm de spanning, de stroom of de weerstand berekenen.
- Je kan uit een (U,I)-grafiek afleiden of een onderdeel zich als een weerstand gedraagt, en de weerstand bepalen.
- Je kan de waarde van een weerstand aflezen met de kleurcode.

VERHAAL · 19.1

Een leraar met een draad en een kompasnaald

1/11

In 1825 was Georg Simon Ohm leraar wiskunde en natuurkunde aan een gymnasium in Keulen. Elektriciteit was toen nog een raadsel: batterijen bestonden nog maar een kwarteeuw, een meettoestel kon je niet kopen, en niemand wist precies wat er in een draad gebeurde.

Ohm bouwde zijn meetopstelling zelf. Om de stroom te meten gebruikte hij een kompasnaald die uitwijkt als er stroom door een draad eronder loopt: hoe groter de uitwijking, hoe groter de stroom. Om een *stabiele* bron te hebben (de batterijen van toen zakten snel in), gebruikte hij een thermokoppel: twee

metalen die aan elkaar gelast zijn en een kleine, constante spanning geven als het ene uiteinde in kokend water hangt en het andere in ijswater.

Hij verving telkens de draad door een langere of een dunnere, en noteerde de uitwijking. Het patroon dat hij vond, publiceerde hij in 1827: de stroom hangt af van de 'duw' van de bron en van hoe goed de draad geleidt. Zijn werk werd eerst nauwelijks ernstig genomen. Pas in 1841 kreeg hij er de Copley-medaille van de Royal Society voor, een van de hoogste onderscheidingen in de wetenschap. Vandaag draagt de eenheid van weerstand zijn naam: de **ohm**, met het symbool Ω.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Ohm had geen dure toestellen, wel een goed plan: één ding veranderen, de rest gelijk houden, zorgvuldig meten en een patroon zoeken. Dat is de onderzoekscyclus uit hoofdstuk 2. In dit hoofdstuk doe je zijn proef opnieuw, met een multimeter.



Zo zag een meetopstelling er in de tijd van Ohm uit: een kompasnaald als stroommeter.

UITLEG · 19.2

Stroom: lading die beweegt

2/11

Een metalen draad zit vol **vrije elektronen**: kleine deeltjes met een negatieve lading die los tussen de atomen van het metaal bewegen. Sluit je de draad aan op een batterij, dan schuiven al die elektronen tegelijk op, van de min-pool door de kring naar de plus-pool. Die beweging van lading noemen we **elektrische stroom**.

De **stroomsterkte** I zegt hoeveel lading er per seconde voorbijkomt. De eenheid is de **ampère** (A). Kleine stromen druk je uit in milliampère: $1\,\mathrm{A} = 1000\,\mathrm{mA}$.

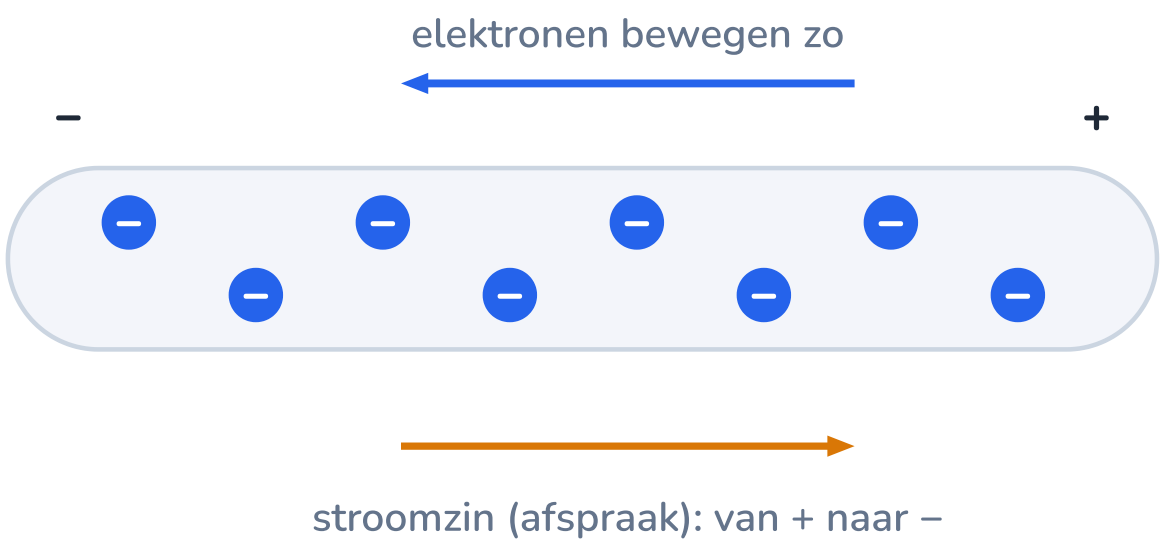
toestel	typische stroom
led als statuslampje	5 tot 20 mA
microcontrollerbordje (Arduino Uno, zonder extra's)	ongeveer 50 mA
smartphone die laadt	1 tot 3 A
waterkoker op 230 V	ongeveer 9 A

De stroom raakt niet op

Een lamp 'verbruikt' geen stroom. Er komt precies evenveel stroom uit de lamp als erin gaat: in een kring zonder vertakkingen is de stroom overal even groot. Wat de lamp wél opneemt, is *energie*: die zet ze om in licht en warmte. Energie is het onderwerp van hoofdstuk 21.

Twee richtingen

Afgesproken is dat de stroom van **plus naar min** loopt door de kring (de *conventionele stroomzin*). De elektronen bewegen in werkelijkheid de andere kant op. Die afspraak dateert van vóór iemand wist dat elektronen bestaan, en ze is gebleven: in schema's teken je de stroompijl altijd van + naar −.



De elektronen schuiven naar de pluspool; de afgesproken stroomzin wijst de andere kant op.

UITLEG · 19.3

Spanning: de duw van de bron

3/11

Zonder bron beweegt er niets. Een batterij, een zonnepaneel of een adapter 'duwt' de lading door de kring. Hoe hard die duw is, heet de **spanning** U. De eenheid is de **volt** (V).

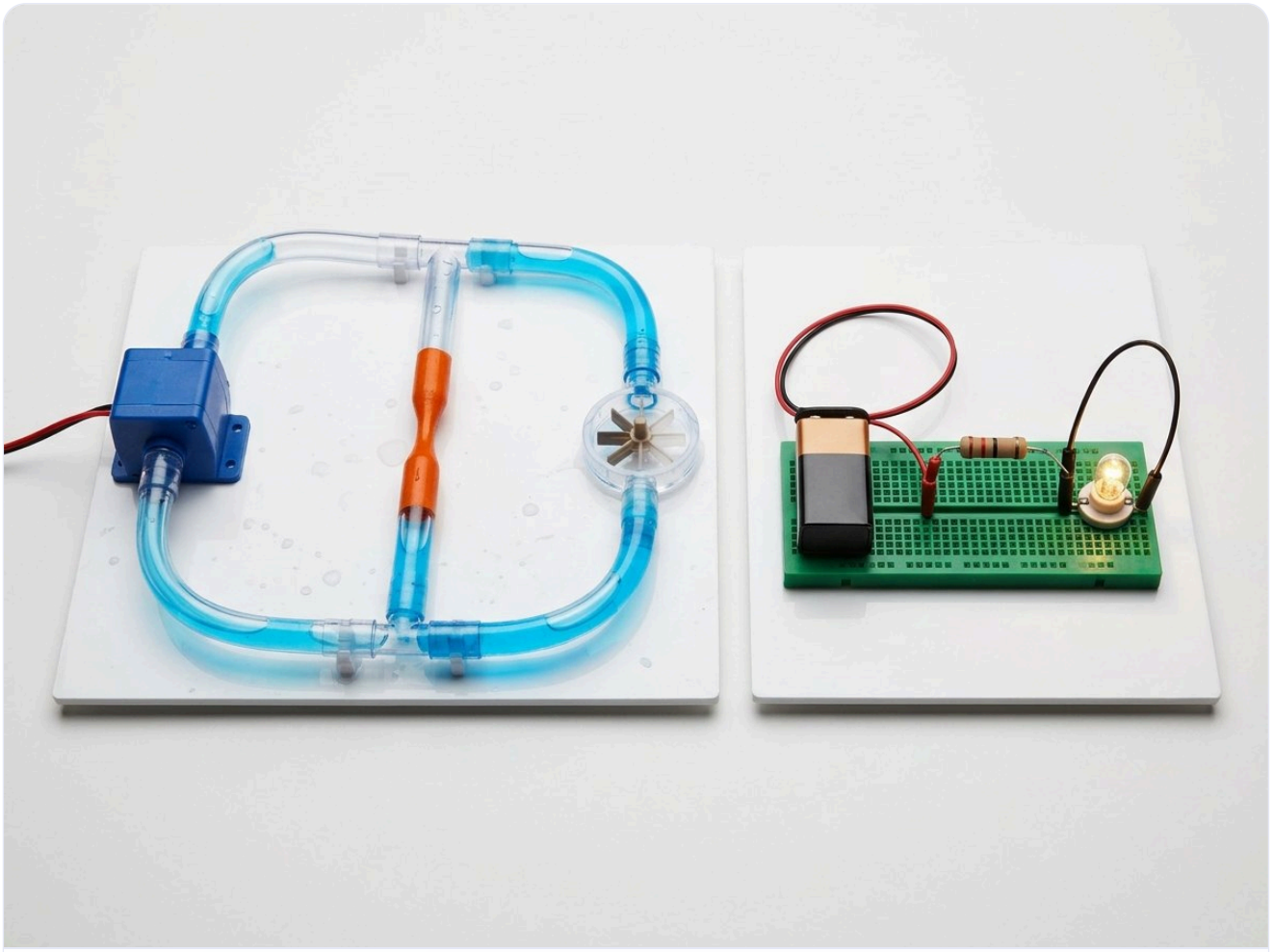
Spanning bestaat altijd *tussen twee punten*: tussen de plus- en de min-pool van een batterij, of tussen het begin en het einde van een lamp. Je zegt dus 'de spanning *over* de lamp', nooit 'de spanning *in* de lamp'.

bron	spanning
AA-batterij	1,5 V
USB-poort	5 V

bron	spanning
autobatterij, ledstrip van de meetkas	12 V
stopcontact in België	230 V (wisselspanning)

Het **watermodel** helpt om spanning en stroom uit elkaar te houden. Een pomp duwt water rond in een gesloten buizenstelsel. Het *drukverschil* dat de pomp maakt, lijkt op de spanning. Hoeveel liter per seconde er door de buis stroomt, lijkt op de stroomsterkte. En een vernauwing in de buis remt het water af, zoals een weerstand de stroom afremt.

> ⚠ **Een model is geen werkelijkheid**
>
> In het watermodel stroomt het water zichtbaar weg als een buis breekt. Een elektrische kring die je opent, 'lekt' geen elektronen: de stroom stopt gewoon overal tegelijk. En in een buis zit water, terwijl een draad vol elektronen zit die er al waren. Gebruik het model om te redeneren, niet om te bewijzen.



Watermodel en stroomkring naast elkaar: pomp en bron, vernauwing en weerstand.

ONTLEED · 19.4

De multimeter

4/11

Met één toestel meet je spanning, stroom én weerstand. Juist daardoor gaat het vaak mis: de draaiknop en de bussen moeten bij elkaar passen. Leer de onderdelen kennen voor je meet.



Schematische multimeter: de draaiknop staat op gelijkspanning (V⎓).

1 Scherm
Toont het meetresultaat. Het getal zonder eenheid heeft geen betekenis: kijk altijd welk bereik de knop kiest. Staat er `OL` (overload), dan is het bereik te klein.

2 Draaiknop
Kiest wat je meet: gelijkspanning (V⎓), wisselspanning (V~), stroom (A⎓, mA) of weerstand (Ω). Draai hem pas als de meetsnoeren los zijn.

3 COM-bus
De gemeenschappelijke aansluiting: hier komt **altijd** het zwarte snoer.

4 V Ω mA-bus
Het rode snoer voor spanning, weerstand en kleine stromen (meestal tot 200 of 400 mA).

5 10A-bus
Het rode snoer voor grote stromen. Deze bus heeft vaak geen zekering: meet er nooit langer dan enkele seconden mee.

6 Stand OFF
Na het meten terug op OFF: een multimeter die op 'A' blijft staan, is een kortsluiting die wacht op de volgende gebruiker.

UITLEG · 19.5

Meten: ampèremeter in serie, voltmeter parallel

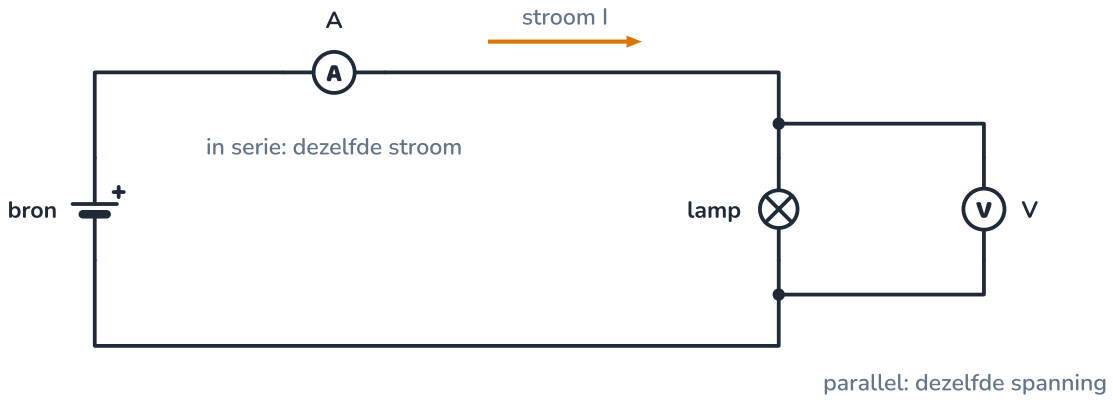
5/11

Een **ampèremeter** meet de stroom die *door* hem heen gaat. Je moet de kring dus **openknippen** en de meter in het gat zetten: de meter staat **in serie**. Dezelfde stroom die door de lamp gaat, gaat dan door de meter.

Een **voltmeter** meet het spanningsverschil *tussen* twee punten. Je knipt niets open: je houdt de twee meetpennen aan beide kanten van het onderdeel. De meter staat **parallel**.

Nooit een ampèremeter parallel over een bron

Een ampèremeter heeft zelf een heel kleine weerstand (hij moet de stroom zo weinig mogelijk hinderen). Zet je hem rechtstreeks over een batterij of een voeding, dan maak je een **kortsluiting**: er loopt een enorme stroom, de zekering in de meter springt of de batterij wordt gevaarlijk heet. Een voltmeter heeft net een heel grote weerstand: in serie gezet, laat hij bijna geen stroom door en gaat de lamp uit.



De ampèremeter zit in de draad zelf, de voltmeter hangt eraan vast zonder iets te onderbreken.

PROEF · 19.6

Hoe hangt de stroom af van de spanning?

6/11

ONDERZOEKSVRAAG

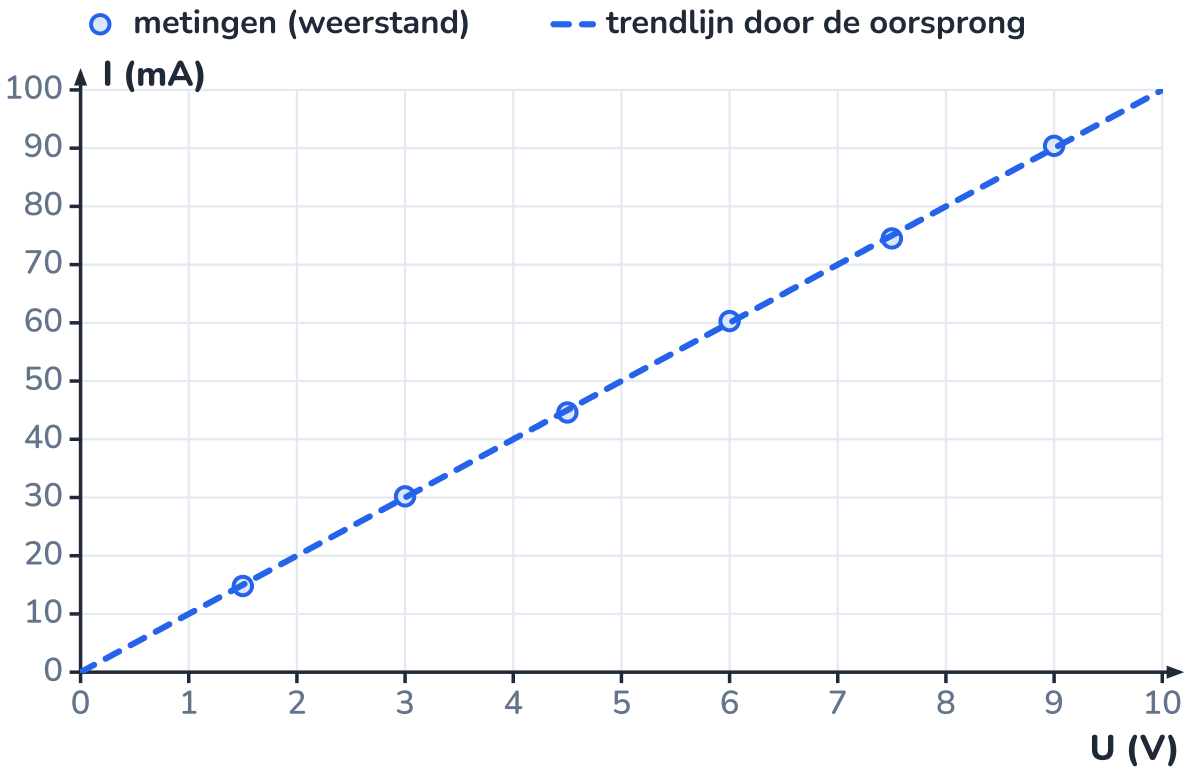
Als je de spanning over een weerstand verdubbelt, wat gebeurt er dan met de stroom erdoor?

MATERIAAL

- regelbare voeding (0-12 V) of 1 tot 6 AA-batterijen
- weerstand van 100 Ω
- 2 multimeters
- 5 snoertjes met krokodillenklemmen

Veiligheid

Werk onder 12 V. Controleer de stand van de ampèremeter (mA, rode snoer in de mA-bus) voor je de voeding aanzet.



De metingen liggen op een rechte door de oorsprong: I is recht evenredig met U.

WERKWIJZE

1. Bouw de kring zoals in het schema van het vorige blad, met de weerstand op de plaats van de lamp.
2. Zet de voeding op 1,5 V (of gebruik één batterij). Lees de spanning over de weerstand en de stroom af.
3. Verhoog de spanning telkens met 1,5 V (of voeg een batterij toe) tot 9 V. Noteer elke keer U en I.
4. Bereken voor elke meting de verhouding U/I.
5. Zet de metingen in een grafiek met U horizontaal en I verticaal.

WAARNEMING

U (V)	I (mA)	U/I (V/A)
1,5	14,8	101
3,0	30,2	99
4,5	44,6	101
6,0	60,3	100
7,5	74,5	101
9,0	90,4	100

De punten liggen op een rechte door de oorsprong (zie grafiek). Let op: om U/I te berekenen, zet je de stroom eerst om naar ampère: $14{,}8\,\text{mA} = 0{,}0148\,\text{A}$.

VERKLARING

Verdubbelt de spanning, dan verdubbelt de stroom: stroom en spanning zijn **recht evenredig** (hoofdstuk 4). De verhouding U/I blijft gelijk, rond 100. Die constante is een eigenschap van de weerstand zelf: het is zijn **weerstandswaarde**, 100 Ω. De kleine verschillen (99, 101) zijn meetfouten: de meter geeft maar een beperkt aantal cijfers, en de weerstand heeft zelf een tolerantie van enkele procenten.

UITLEG · 19.7

De wet van Ohm

7/11

De proef toont het: voor een weerstand is de verhouding tussen spanning en stroom constant. Die constante noemen we de **weerstand** R:

WET VAN OHM

$$U = R \cdot I \quad \Leftrightarrow \quad R = \frac{U}{I} \quad \Leftrightarrow \quad I = \frac{U}{R}$$

U in volt (V), I in ampère (A), R in ohm (Ω). Eén ohm is de weerstand waardoor 1 A stroomt bij een spanning van 1 V.

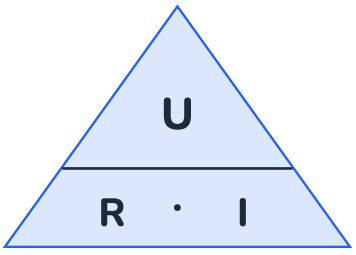
Een grote weerstand laat bij dezelfde spanning weinig stroom door; een kleine weerstand veel. In de grafiek zie je dat aan de helling: hoe **steiler** de rechte (met U horizontaal), hoe **kleiner** de weerstand.

Wat bepaalt de weerstand van een draad? Vier dingen:

- het **materiaal**: koper geleidt veel beter dan ijzer, en ijzer veel beter dan nichroom (het metaal in de gloeidraad van een broodrooster);
- de **lengte**: twee keer zo lang is twee keer zoveel weerstand;
- de **dikte**: een dikkere draad heeft minder weerstand (daarom zijn de snoeren van een waterkoker dik);
- de **temperatuur**: bij metalen stijgt de weerstand als ze warmer worden.

De driehoek van Ohm

Bedek wat je zoekt. Bedek je U, dan blijft $R \cdot I$ over. Bedek je I, dan zie je U boven R: $I = U/R$. Handig om te onthouden, maar leer vooral de formule zelf omvormen: dat heb je vanaf Intermediate bij elke formule nodig.



Wat boven staat, deel je door wat onder staat; wat naast elkaar staat, vermenigvuldig je.

UITGEWERKT VOORBEELD · 19.8

De ledstrip van de meetkas

8/11

De ledstrip boven de plantenbak werkt op 12 V. Een leerling meet dat de strip samen een weerstand van 60 Ω heeft (in bedrijf). Hoe groot is de stroom door de strip?

GEGEVEN

- $U = 12\,\text{V}$
- $R = 60\,\Omega$

GEVRAAGD

- I

OPLOSSING

1. Kies de vorm van de wet van Ohm met I alleen: $I = \frac{U}{R}$.

2 Vul in, met eenheden: $I = \frac{12\,\mathrm{V}}{60\,\Omega}$.

3 Reken uit: $12/60 = 0{,}2$. Volt gedeeld door ohm geeft ampère: $I = 0{,}2\,\mathrm{A}$.

4 Zet om naar een handige eenheid: $0{,}2\,\mathrm{A} = 200\,\mathrm{mA}$.

ANTWOORD

Door de ledstrip loopt een stroom van $0{,}2\,\mathrm{A}$, of $200\,\mathrm{mA}$.

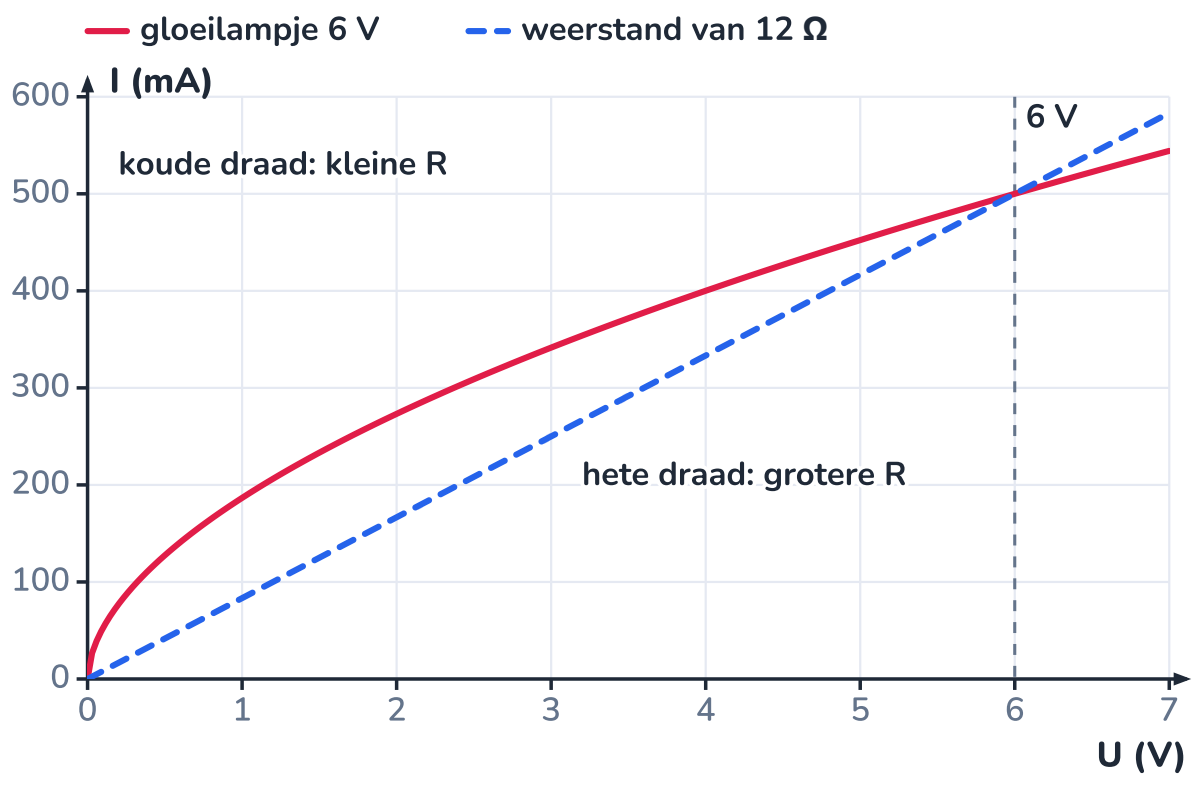
Klopt dit? Een ledstrip van een halve meter trekt typisch enkele honderden milliampère: de grootte-orde klopt. En de eenheid: V gedeeld door Ω is A. Klopt de eenheid niet, dan heb je de formule verkeerd omgevormd.

UITGEWERKT VOORBEELD · 19.9

Is een gloeilampje een weerstand?

9/11

Een gloeilampje van 6 V brandt normaal bij 0,50 A. Bereken zijn weerstand als het brandt. Daarna meet je het koude lampje met de ohmmeter: je leest 1,8 Ω. Hoe verklaar je het verschil?



Het lampje (volle lijn) buigt af; de weerstand van 12 Ω (stippellijn) blijft recht. Bij 6 V geven ze dezelfde stroom.

GEGEVEN

- $U = 6{,}0\,\mathrm{V}$
- $I = 0{,}50\,\mathrm{A}$ (brandend)
- $R_{\text{koud}} = 1{,}8\,\Omega$ (gemeten)

GEVRAAGD

- R_{brandend}
- verklaring van het verschil

OPLOSSING

1 $R = \frac{U}{I} = \frac{6{,}0\,\mathrm{V}}{0{,}50\,\mathrm{A}} = 12\,\Omega$.

2 Brandend is de weerstand $12/1{,}8 \approx 7$ keer groter dan koud.

3 De gloeidraad wordt meer dan 2000 °C heet. De weerstand van een metaal stijgt met de temperatuur: de trillende atomen hinderen de elektronen meer.

4 Gevolg: de (U,I)-grafiek van een lampje is **geen rechte**. Bij kleine spanning (koude draad) stijgt de stroom snel, bij grote spanning (hete draad) minder snel.

ANTWOORD

Brandend heeft het lampje een weerstand van $12\,\Omega$. Omdat die weerstand verandert met de temperatuur, is een gloeilampje geen ohmse weerstand: de wet van Ohm geldt er alleen punt per punt ($R = U/I$ op dat ene moment), niet als vaste constante.

Klopt dit? Daarom brandt een gloeilamp meestal door op het moment dat je ze aanzet: de koude draad laat heel even een grote stroom door.

NASLAG · 19.10

Overzicht: grootheden, meters en kleurcode

10/11

wet van Ohm

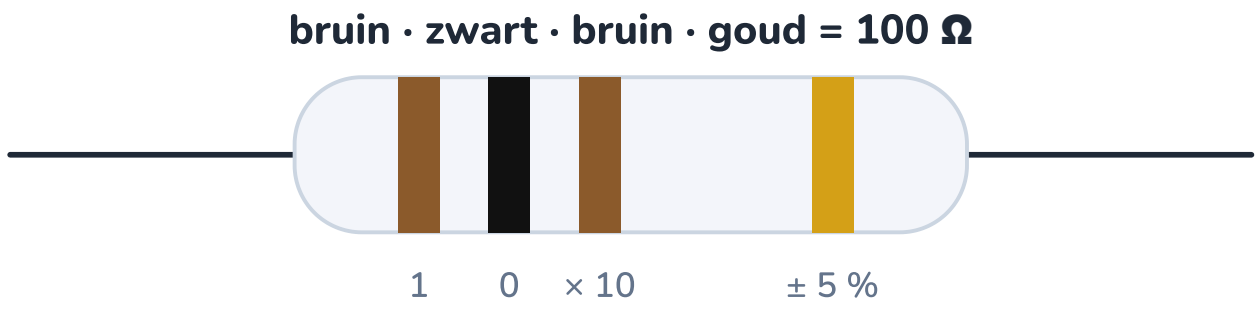
$$U = R \cdot I$$

symbool	betekenis	eenheid
U	spanning	volt (V)
I	stroomsterkte	ampère (A)
R	weerstand	ohm (Ω)

grootheid	symbool	eenheid	meter	aansluiten	omzetten
stroomsterkte	I	ampère (A)	ampèremeter	in serie	1 A = 1000 mA
spanning	U	volt (V)	voltmeter	parallel	1 kV = 1000 V; 1 V = 1000 mV
weerstand	R	ohm (Ω)	ohmmeter	los uit de kring, stroom af	1 kΩ = 1000 Ω; 1 MΩ = 1000 kΩ

kleur	cijfer	vermenigvuldiger	tolerantie
zwart	0	× 1	
bruin	1	× 10	± 1 %
rood	2	× 100	± 2 %
oranje	3	× 1000	
geel	4	× 10 000	
groen	5	× 100 000	± 0,5 %
blauw	6	× 1 000 000	± 0,25 %
violet	7		± 0,1 %
grijs	8		
wit	9		
goud		× 0,1	± 5 %
zilver		× 0,01	± 10 %

Bij een weerstand met vier ringen: ring 1 en 2 zijn cijfers, ring 3 is de vermenigvuldiger, ring 4 (vaak goud) de tolerantie. Voorbeeld: **bruin-zwart-bruin-goud** = 1, 0, × 10 = 100 Ω ± 5 %.



Lees van de kant waar de ringen het dichtst bij de rand staan; goud of zilver staat altijd achteraan.

HET GEHEEL · 19.11

Waar Ohm terugkomt

11/11

De wet van Ohm is een van de bouwstenen waar de hele leerlijn elektronica op rust. Je komt hem in elk niveau opnieuw tegen, telkens in een rijkere vorm. En omdat het een **recht evenredig verband** is, is het ook een schoolvoorbeeld van de leerlijn wiskundig modelleren: de helling van een rechte heeft hier een fysische betekenis.

F4 Tabellen, grafieken en verbanden
Recht evenredig verband en evenredigheidsconstante: hier is die constante de weerstand.

F20 Serie- en parallelschakeling
Wat gebeurt er met stroom en spanning als je meerdere weerstanden combineert?

F21 Elektrisch vermogen en energie
Stroom en spanning samen bepalen hoeveel energie per seconde een toestel opneemt: $P = U \cdot I$.

F24 De microcontroller
Een led aan een microcontroller heeft een voorschakelweerstand nodig; je berekent hem met Ohm.

I22 De spanningsdeler en sensoren
Twee weerstanden in serie verdelen de spanning: zo lees je een lichtsensor uit.

E20 Wisselstroom
Bij wisselstroom wordt weerstand 'impedantie', met ook spoelen en condensatoren erbij.

Habitat
In de meetkas werk je met 12 V voor de ledstrip en het pompje, en met 5 V voor de microcontroller. Met de wet van Ohm bereken je welke stroom elk onderdeel trekt, en dus welke zekering en welke draaddikte je nodig hebt. Opdracht 19.13 in het werkboek is de eerste stap.

SAMENVATTING

In het kort

- Stroom is bewegende lading. De stroomsterkte I meet je in ampère (A) met een ampèremeter **in serie**.
- Spanning is de duw van de bron, altijd tussen twee punten. Je meet U in volt (V) met een voltmeter **parallel**.
- Weerstand R (in ohm, Ω) zegt hoe sterk een onderdeel de stroom tegenwerkt.
- Voor een weerstand zijn stroom en spanning recht evenredig: $U = R \cdot I$ (wet van Ohm).
- Een gloeilampje is geen ohmse weerstand: zijn weerstand stijgt als de draad heet wordt.

- De multimeter: zwart snoer in COM, rood in de juiste bus, draaiknop passend bij wat je meet, en achteraf op OFF.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

stroom (stroomsterkte)
De hoeveelheid lading die per seconde door een doorsnede van de kring stroomt. Symbool I, eenheid ampère (A).

spanning
Het 'duwen' van een bron op de lading, gemeten als verschil tussen twee punten. Symbool U, eenheid volt (V).

weerstand
Hoe sterk een onderdeel de stroom tegenwerkt. Symbool R, eenheid ohm (Ω).

wet van Ohm
Voor een weerstand is de stroom recht evenredig met de spanning: $U = R \cdot I$.

ampèremeter
Meter voor stroom; staat in serie, zodat dezelfde stroom erdoor gaat.

voltmeter
Meter voor spanning; staat parallel over het onderdeel waarvan je de spanning wil kennen.

ohmse weerstand
Onderdeel waarvan de weerstand niet verandert met de spanning: de (U,I)-grafiek is een rechte door de oorsprong.

HANDBOEK · HOOFDSTUK 20

Serie- en parallelschakeling

Eén weg of meerdere wegen: wat er gebeurt met stroom en spanning

Een kerstslinger die helemaal uitvalt door één kapot lampje, een huis waar elke lamp apart brandt, een zonnepaneel dat bijna niets meer levert als er één cel in de schaduw ligt: het verschil zit in hoe de onderdelen geschakeld zijn. In dit hoofdstuk leer je de regels van de **serieschakeling** en de **parallelschakeling** voor stroom en spanning, je rekent met de **vervangingsweerstand**, en je bevestigt alles met metingen. Daarmee sluit je de ledstrip, het pompje en de microcontroller van de meetkas correct aan op één voeding.

6× uitleg · 5× uitgewerkt voorbeeld · 2× proef · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

Elektriciteit en elektronica · Wiskundig modelleren



Links valt de hele slinger uit door één lampje, rechts branden de andere gewoon verder.

Na dit hoofdstuk

- Je kan in een schema en een opstelling herkennen welke onderdelen in serie en welke parallel staan.
- Je kan de regels voor de stroom toepassen: in serie overal dezelfde stroom, parallel tellen de stromen van de takken op.
- Je kan de regels voor de spanning toepassen: in serie verdeelt de spanning zich, parallel staat over elke tak dezelfde spanning.
- Je kan voorspellen welke lampjes blijven branden als er één uitvalt, en hoe fel ze branden.
- Je kan de vervangingsweerstand berekenen van weerstanden in serie en van twee (of meer) gelijke weerstanden parallel.
- Je kan uitleggen waarom een huisinstallatie parallel geschakeld is en wanneer een stekkerdoos overbelast raakt.
- Je kan met metingen nagaan of de regels kloppen.
- Je kan de verbruikers van de meetkas correct op één bron aansluiten en de stroom van de voeding berekenen.

VERHAAL · 20.1

Edison en de lamp die je apart kan aanzetten

1/16

Rond 1880 kregen de eerste steden elektrische straatverlichting. Het waren **booglampen**: een felle vonk tussen twee staafjes koolstof, veel te fel voor in huis. Uitvinders als de Amerikaan Charles Brush zetten ze **in serie**, als kralen aan een ketting: één lange kabel liep van lamp naar lamp en terug naar de dynamo. Dat was eenvoudig, maar alle lampen gingen samen aan en uit, en als er één uitviel, moest een automatisch contact de kring weer sluiten om niet de hele straat in het donker te zetten.

Thomas Edison wilde iets anders: licht in elke kamer, dat je zelf aan- en uitzet, zoals een gaslamp. Daarvoor moest elke lamp een eigen tak krijgen tussen twee hoofdleidingen: een **parallelschakeling**. Elke lamp krijgt dan dezelfde spanning, en een lamp aan- of uitzetten verandert niets aan de andere. Maar er was een probleem: alle stromen van al die lampen samen moesten door de hoofdleidingen, en dikke koperen kabels waren duur. Edison zocht daarom een gloeidraad die de stroom sterk afremt, zodat elke lamp maar een kleine stroom vraagt. Na honderden proeven vond hij die in een draadje van verkoold plantenmateriaal.

Op 4 september 1882 zette Edison in New York zijn elektriciteitscentrale aan Pearl Street aan. Ze leverde gelijkspanning van 110 V aan de huizen en kantoren in de buurt, met alle lampen parallel. Zo werkt de installatie in je huis nog altijd: elke lamp, elk stopcontact zit in een eigen tak.

Dit hoofdstuk in één zin

In serie delen de onderdelen één weg: dezelfde stroom, en ze verdelen de spanning. Parallel heeft elk onderdeel een eigen weg: dezelfde spanning, en ze verdelen de stroom.



Een booglamp in een straat van rond 1880: fel licht, en alle lampen samen in één lange serie.

UITLEG · 20.2

Eén weg of meerdere wegen

2/16

Zitten er in een kring twee of meer verbruikers, dan kan je ze op twee manieren schakelen:

- **In serie**: achter elkaar, in één weg. De stroom moet door het ene onderdeel en daarna door het volgende. Er is geen splitsing.

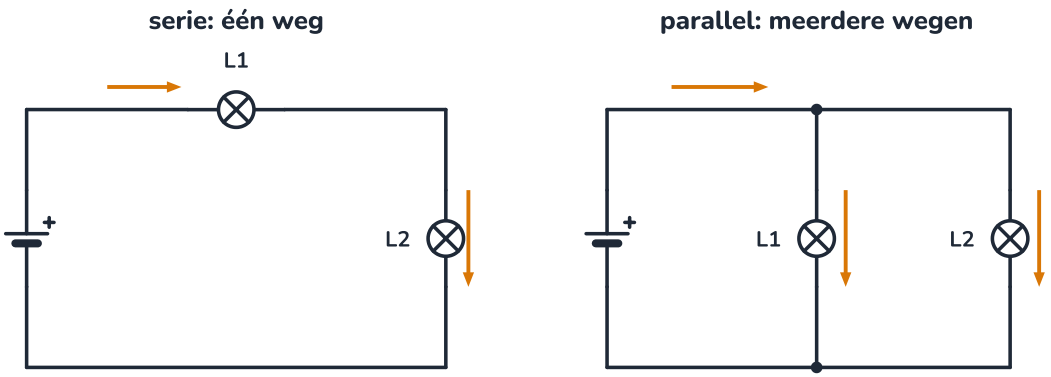
- **Parallel**: naast elkaar, elk in een eigen **tak**. De draad splitst in een **knooppunt**, de stroom verdeelt zich over de takken en komt in een tweede knooppunt weer samen.

Zo herken je het. Volg de stroom met je vinger van de pluspool naar de minpool. Kom je langs alle onderdelen zonder ooit te moeten kiezen, dan staan ze in serie. Moet je bij een knooppunt kiezen tussen twee wegen, en komen die wegen later weer samen, dan staan de onderdelen in die wegen parallel. Hoe het schema getekend is (naast of onder elkaar), maakt niets uit: alleen de verbindingen tellen.

Veel schakelingen zijn **gemengd**: een schakelaar in serie met twee lampen die parallel staan, bijvoorbeeld. In hoofdstuk 18 zag je dat al met schakelaars: in serie werken ze als EN, parallel als OF.

Naast elkaar getekend is parallel

Twee lampen die in het schema naast elkaar op dezelfde draad staan, zijn net in **serie**. Parallel betekent: elk in een eigen tak, met een knooppunt ervoor en erna. Zoek de knooppunten.



Links één weg door L1 en L2. Rechts splitst de stroom in het knooppunt: een deel gaat door L1, een deel door L2.

PROEF · 20.3

Lampjes in serie en parallel

3/16

ONDERZOEKSVRAAG

Branden twee lampjes in serie even fel als twee lampjes parallel? En wat gebeurt er als je er één losdraait?

MATERIAAL

voeding van 6 V (of 4 AA-batterijen in een houder) · 3 lampjes van 6 V / 0,1 A in een fitting · multimeter op mA, als ampèremeter in de hoofdleiding · snoertjes

Veiligheid

Werk met 6 V. Lampjes worden warm: draai ze los aan de fitting, niet aan het glas.



Een gele ring betekent: brandt fel. Een gestreepte ring: brandt zwak.

WERKWIJZE

1. Sluit één lampje aan op de bron, met de ampèremeter in serie. Noteer de stroom en hoe fel het lampje brandt.
2. Zet twee lampjes in serie. Noteer de stroom en hoe fel ze branden. Draai daarna één lampje los: wat doet het andere?
3. Zet twee lampjes parallel, met de ampèremeter in de hoofdleiding (vóór de splitsing). Noteer. Draai één lampje los.
4. Voeg een derde lampje parallel toe. Wat gebeurt er met de stroom in de hoofdleiding?

WAARNEMING

schakeling	stroom in de hoofdleiding	helderheid	één lampje losgedraaid
één lampje	100 mA	fel	uit
twee in serie	68 mA	beide zwak, oranje	het andere gaat uit
twee parallel	200 mA	beide fel	het andere blijft fel; 100 mA
drie parallel	300 mA	alle drie fel	de andere twee blijven fel

Voorbeeld van resultaten met een voeding van 6 V.

VERKLARING

Serie. De lampjes delen één weg: draai je er één los, dan is de ...ring open en gaat alles uit. De twee lampjes delen ook de 6 V van de bron: elk krijgt maar 3 V, en brandt dus zwak. De stroom is kleiner dan bij één lampje, maar niet de helft: een lampje is geen gewone weerstand, en een koude gloeidraad laat relatief meer stroom door (hoofdstuk 19).

Parallel. Elk lampje heeft een eigen tak en krijgt de volle 6 V: het brandt even fel als alleen. Draai je er één los, dan blijft de tak van het andere gesloten. Maar de bron moet voor elk lampje een eigen stroom leveren: bij twee lampjes de dubbele stroom, bij drie de drievoudige. Een batterij is dan ook sneller leeg.

UITLEG · 20.4

Stroom: overal gelijk in serie, optellen in parallel

4/16

In serie is er maar één weg. Alle lading die door het eerste onderdeel gaat, moet ook door het tweede: er gaat onderweg niets verloren en er komt niets bij. Daarom is de stroom **overal even groot**. Een ampèremeter wijst hetzelfde aan, waar je hem ook in de kring zet.

STROOM IN SERIE

$$\text{serie:} \quad I = I_1 = I_2$$

Parallel splitst de stroom in een knooppunt. Wat erin gaat, moet eruit: de stroom in de hoofdleiding is gelijk aan de **som** van de stromen in de takken. Dat heet de **knooppuntregel**. Denk aan een rivier die zich splitst rond een eiland: hoeveel water er per seconde langs beide kanten stroomt, samen, is evenveel als wat de rivier aanvoert.

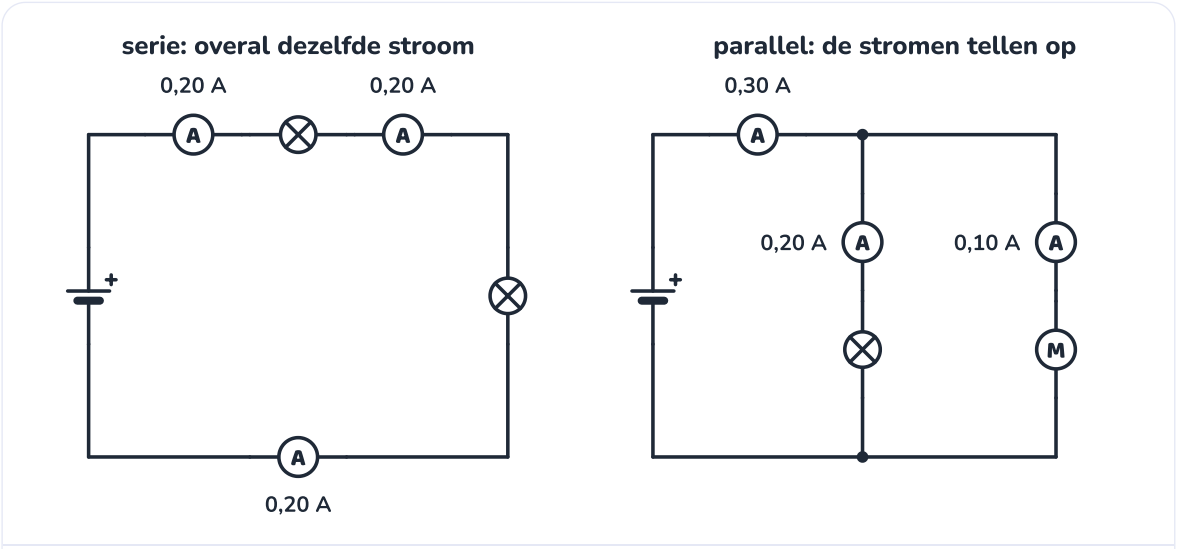
STROOM IN PARALLEL

$$\text{parallel:} \quad I = I_1 + I_2$$

De tak met het onderdeel dat de stroom het minst afremt (de kleinste weerstand), krijgt de grootste stroom. In de figuur neemt de lamp 0,20 A en de motor 0,10 A: de bron levert samen 0,30 A.

De eerste lamp neemt de meeste stroom

In een serieschakeling 'pakt' de eerste lamp niet eerst haar deel. De stroom is overal dezelfde, ook meteen na de bron en vlak voor de minpool. In hoofdstuk 19 zag je al dat er evenveel stroom uit een lamp komt als erin gaat.



Links wijzen de drie ampèremeters hetzelfde aan. Rechts: 0,20 A + 0,10 A = 0,30 A in de hoofdleiding.

UITLEG · 20.5

Spanning: verdelen in serie, gelijk in parallel

5/16

Spanning is de 'duw' van de bron (hoofdstuk 19). Een handig beeld: de bron tilt de lading op een hoogte, en in elke verbruiker valt ze een stukje naar beneden, zoals water van een trap. Onderaan, bij de minpool, is ze weer op de bodem.

In serie valt de lading in stapjes: eerst door het ene onderdeel, dan door het volgende. De spanningen over de onderdelen **tellen op** tot de spanning van de bron. Het onderdeel met de grootste weerstand krijgt het grootste deel: bij 40 Ω en 80 Ω in serie op 12 V krijgt de weerstand van 80 Ω twee keer zoveel spanning, 8 V tegenover 4 V.

SPANNING IN SERIE

$$\text{serie:} \quad U = U_1 + U_2$$

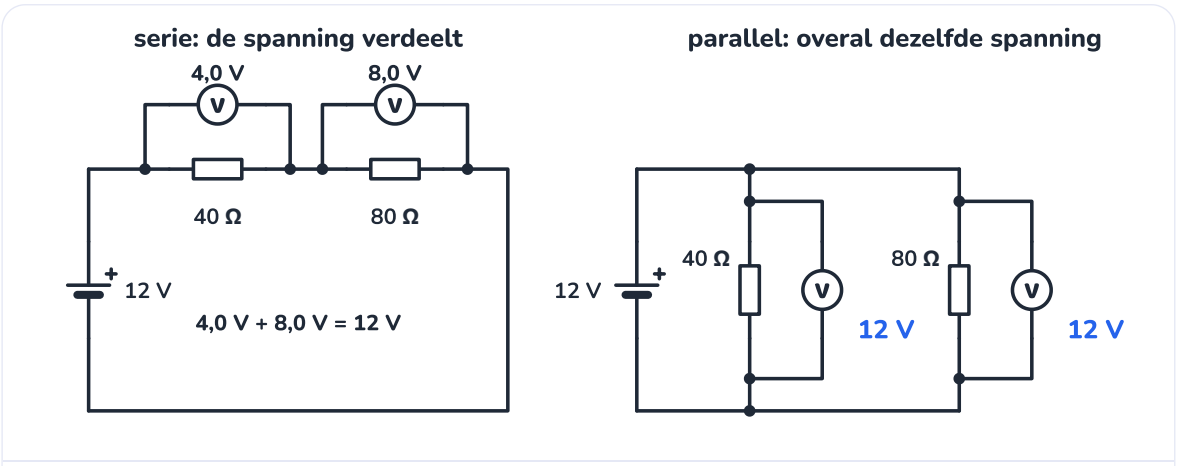
Parallel hangt elke tak rechtstreeks tussen dezelfde twee knooppunten. Elke tak overbrugt dus dezelfde 'hoogte': over elke tak staat **dezelfde spanning**, de volle spanning van de bron.

SPANNING IN PARALLEL

$$\text{parallel:} \quad U = U_1 = U_2$$

Vier regels, twee zinnen

Serie: **dezelfde stroom**, de spanning verdeelt. Parallel: **dezelfde spanning**, de stroom verdeelt. Wat 'verdeelt', telt samen op tot het totaal.



Links delen de weerstanden van 40 Ω en 80 Ω de 12 V. Rechts meet je over elke tak 12 V.

PROEF · 20.6

Metingen die de regels bevestigen

6/16

ONDERZOEKSVRAAG

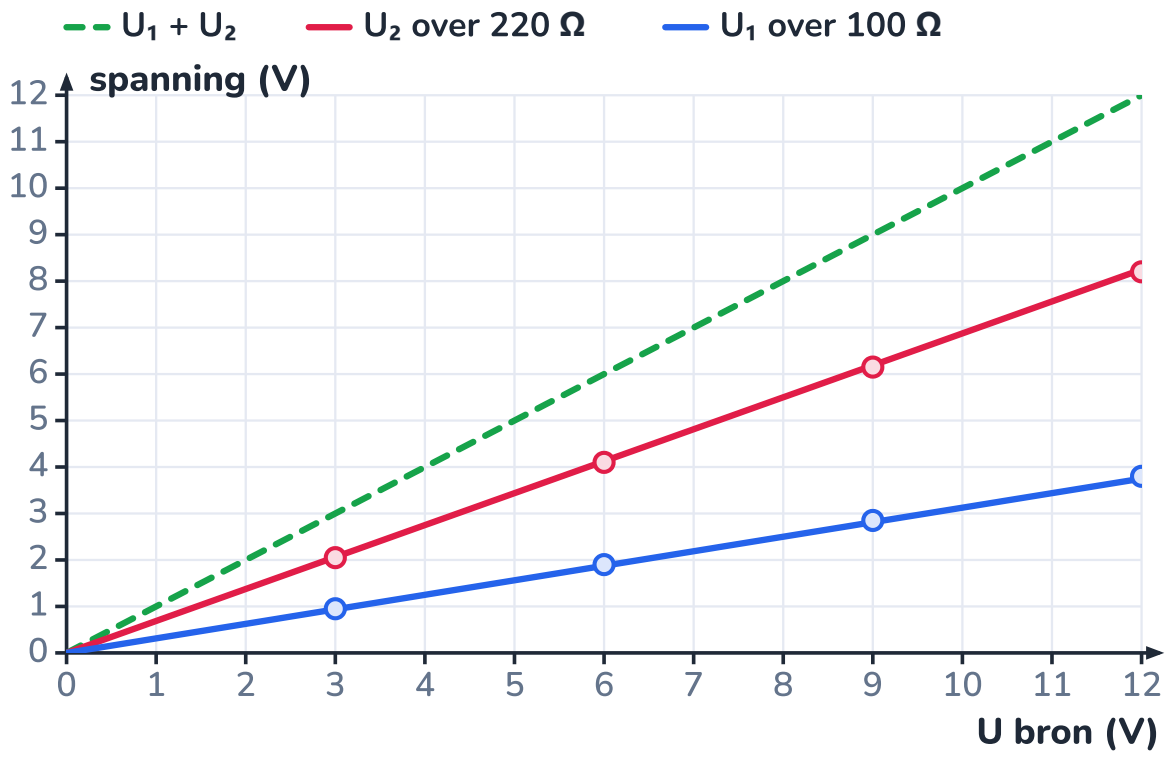
Kloppen de vier regels ook met echte meetwaarden, met weerstanden die niet precies hun opgedrukte waarde hebben?

MATERIAAL

- regelbare voeding, ingesteld op 9,0 V
- weerstanden van 100 Ω en 220 Ω (tolerantie 5 %)
- 2 multimeters
- snoertjes met krokodillenklemmen

Veiligheid

Controleer bij elke stroommeting of de multimeter op mA staat en in serie zit.



De punten zijn metingen, de lijnen de verwachting met 100 Ω en 220 Ω. Opgeteld geven ze telkens de bronspanning.

WERKWIJZE

1. Zet de twee weerstanden in serie op 9,0 V. Meet de stroom op drie plaatsen: vóór R_1, tussen R_1 en R_2, en na R_2.
2. Meet de spanning over R_1, over R_2 en over de bron.
3. Herhaal de spanningsmetingen bij 3, 6 en 12 V.
4. Zet de weerstanden parallel op 9,0 V. Meet de stroom in elke tak en in de hoofdleiding, en de spanning over elke tak.

WAARNEMING

serie, 9,0 V	gemeten
stroom vóór R_1, tussen R_1 en R_2, na R_2	28,2 mA; 28,2 mA; 28,2 mA
spanning over R_1 en R_2	2,85 V en 6,15 V
som van de spanningen	9,00 V

parallel, 9,0 V	gemeten
spanning over R_1 en over R_2	9,00 V en 9,00 V
stroom door R_1 en door R_2	89,1 mA en 41,3 mA
stroom in de hoofdleiding	130,4 mA

VERKLARING

In serie is de stroom op de drie plaatsen gelijk, en de spanningen tellen op tot de bronspanning: $2,85 + 6,15 = 9,00\ \mathrm{V}$. In parallel staat over beide takken dezelfde spanning, en de takstromen tellen op tot de stroom in de hoofdleiding: $89,1 + 41,3 = 130,4\ \mathrm{mA}$. De regels kloppen tot op de laatste decimaal.

De spanningen zijn niet precies $100/320$ en $220/320$ van 9 V (2,81 V en 6,19 V): de weerstanden zijn in werkelijkheid 101 Ω en 218 Ω, binnen hun tolerantie van 5 %. De grafiek toont dat de verdeling bij elke bronspanning dezelfde blijft: U_2 is altijd ruim twee keer U_1.

UITGEWERKT VOORBEELD · 20.7

Twee weerstanden in serie

7/16

Een weerstand van 40 Ω en een van 80 Ω staan in serie op een bron van 12 V. Bereken de stroom en de spanning over elke weerstand.

GEGEVEN

- $R_1 = 40\,\Omega$, $R_2 = 80\,\Omega$, in serie
- $U = 12\,\text{V}$

GEVRAAGD

- I
- U_1 en U_2

OPLOSSING

1. De stroom moet door beide weerstanden: samen remmen ze als één weerstand van $R = R_1 + R_2 = 40 + 80 = 120\,\Omega$.
2. Wet van Ohm voor de hele kring: $I = \dfrac{U}{R} = \dfrac{12\,\text{V}}{120\,\Omega} = 0{,}10\,\text{A}$.
3. Dezelfde stroom loopt door elke weerstand: $U_1 = R_1 \cdot I = 40 \times 0{,}10 = 4{,}0\,\text{V}$ en $U_2 = R_2 \cdot I = 80 \times 0{,}10 = 8{,}0\,\text{V}$.

ANTWOORD

$I = 0{,}10\,\text{A}$ **(100 mA);** $U_1 = 4{,}0\,\text{V}$ **en** $U_2 = 8{,}0\,\text{V}$.

Klopt dit? $4{,}0 + 8{,}0 = 12\,\text{V}$: de spanningen tellen op tot de bronspanning. En de dubbele weerstand krijgt de dubbele spanning, zoals verwacht.

UITLEG · 20.8

De vervangingsweerstand

8/16

Een groep weerstanden kan je vervangen door één weerstand die dezelfde stroom zou laten lopen: de **vervangingsweerstand** R_v.

In serie moet de stroom door de ene vernauwing én door de andere: de weerstanden tellen op. Twee draden van 1 m achter elkaar gedragen zich als één draad van 2 m (hoofdstuk 19).

VERVANGINGSWEERSTAND IN SERIE

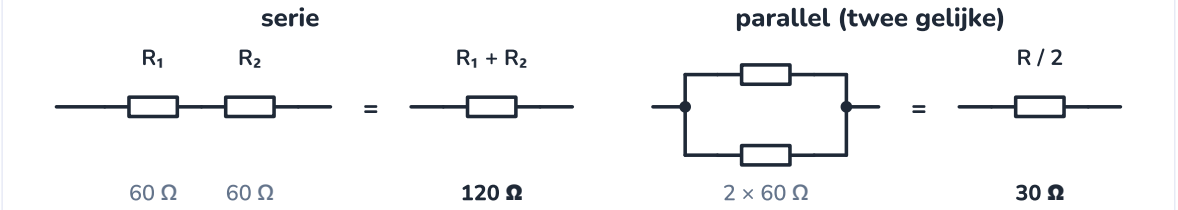
$$\text{serie:} \quad R_\text{v} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots$$

Parallel krijgt de stroom er een extra weg bij. Twee gelijke weerstanden naast elkaar zijn als één draad die twee keer zo dik is: er kan twee keer zoveel stroom door, dus de weerstand is de helft. Met drie gelijke weerstanden is het een derde, met n gelijke weerstanden een n-de:

VERVANGINGSWEERSTAND PARALLEL (GELIJKE WEERSTANDEN)

$$\text{parallel, } n \text{ gelijke weerstanden } R\text{:} \quad R_\text{v} = \frac{R}{n}$$

Parallel is de vervangingsweerstand altijd **kleiner dan de kleinste** weerstand in de groep: elke extra tak is een extra weg voor de stroom. Voor ongelijke weerstanden parallel bestaat er ook een formule; die leer je in Intermediate (hoofdstuk I21). Tot dan kan je het met de stromen: bereken de stroom in elke tak, tel ze op, en deel de spanning door die totale stroom.



Twee keer 60 Ω in serie gedraagt zich als 120 Ω; twee keer 60 Ω parallel als 30 Ω.

UITGEWERKT VOORBEELD · 20.9

De ledstrip van de meetkas: twee helften parallel

9/16

In hoofdstuk 19 had een stuk ledstrip een weerstand van 60 Ω op 12 V. De meetkas heeft er twee, één boven elke rij plantenbakken, parallel aangesloten. (a) Hoe groot is de vervangingsweerstand? (b) Welke stroom levert de voeding aan de twee samen? (c) Wat gebeurt er als één helft losraakt?

GEGEVEN

- twee gelijke stukken van $60\,\Omega$, parallel
- $U = 12\,\mathrm{V}$

GEVRAAGD

- R_v
- stroom van de voeding
- gevolg als één helft losraakt

OPLOSSING

1. (a) Twee gelijke weerstanden parallel: $R_\mathrm{v} = \dfrac{60\,\Omega}{2} = 30\,\Omega$.
2. (b) Met de vervangingsweerstand: $I = \dfrac{12\,\mathrm{V}}{30\,\Omega} = 0{,}40\,\mathrm{A}$. Controle via de takken: elke helft krijgt de volle 12 V en trekt $12/60 = 0{,}20\,\mathrm{A}$; samen $0{,}20 + 0{,}20 = 0{,}40\,\mathrm{A}$.
3. (c) De andere helft zit in een eigen tak: ze krijgt nog altijd 12 V en blijft even fel branden, met 0,20 A. De voeding levert dan nog maar 0,20 A.

ANTWOORD

$R_\mathrm{v} = 30\,\Omega$; de voeding levert $0{,}40\,\mathrm{A}$; valt één helft uit, dan brandt de andere gewoon verder.

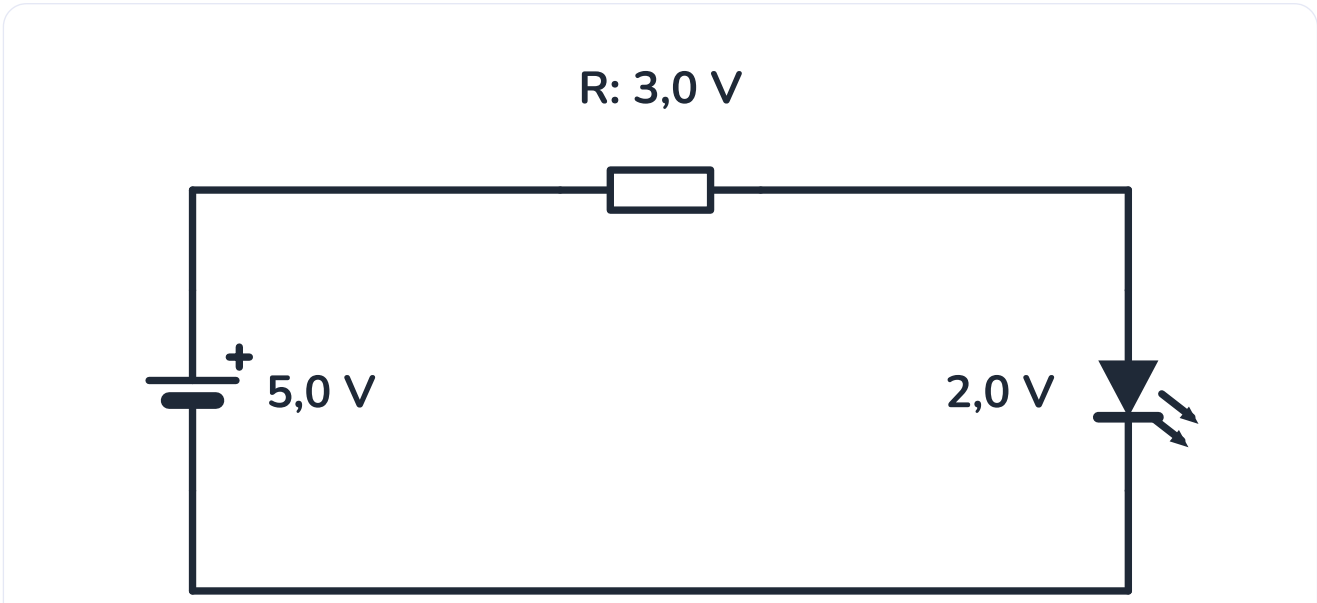
Klopt dit? Dat is precies de ledstrip uit het stationsdossier: 30 Ω en 0,40 A. De twee manieren van rekenen (vervangingsweerstand of takstromen optellen) geven hetzelfde: zo controleer je jezelf.

UITGEWERKT VOORBEELD · 20.10

Een led met een voorschakelweerstand

10/16

Een rode led moet branden op de 5 V van een USB-poort. Volgens de fabrikant krijgt ze 2,0 V en 20 mA. Te veel spanning maakt de stroom veel te groot en de led brandt door. Daarom zet je een weerstand in serie. Hoe groot moet die zijn?



De weerstand neemt de 3,0 V op die de led niet mag krijgen.

GEGEVEN

- bron $U = 5{,}0\,\text{V}$
- led: $U_{\text{led}} = 2{,}0\,\text{V}$ bij $I = 20\,\text{mA}$
- led en weerstand in serie

GEVRAAGD

- R van de voorschakelweerstand

OPLOSSING

1. In serie tellen de spanningen op: $U = U_{\text{led}} + U_R$, dus $U_R = 5{,}0 - 2{,}0 = 3{,}0\,\text{V}$.
2. In serie is de stroom overal gelijk: ook door de weerstand loopt $20\,\text{mA} = 0{,}020\,\text{A}$.
3. Wet van Ohm voor de weerstand: $R = \dfrac{U_R}{I} = \dfrac{3{,}0\,\text{V}}{0{,}020\,\text{A}} = 150\,\Omega$.

ANTWOORD

Een voorschakelweerstand van $150\,\Omega$ (die waarde bestaat ook echt als standaardweerstand).

Klopt dit? Omgekeerd: $I = 3{,}0/150 = 0{,}020\,\text{A}$. Let op: een led is geen gewone weerstand; je mag de wet van Ohm alleen op de weerstand toepassen, niet op de led zelf. In hoofdstuk 24 gebruik je dit om een led aan een microcontroller te hangen.

UITLEG · 20.11

Cellen en zonnecellen in serie en parallel

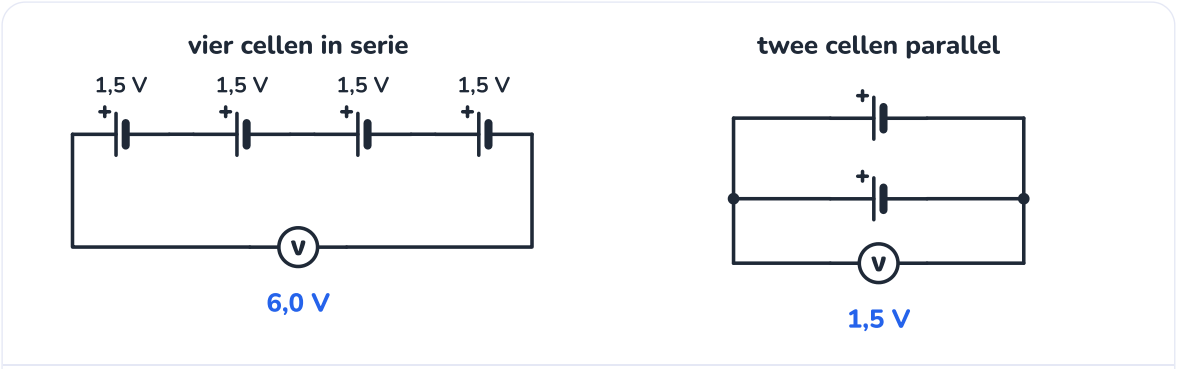
11/16

Ook bronnen kan je in serie of parallel zetten.

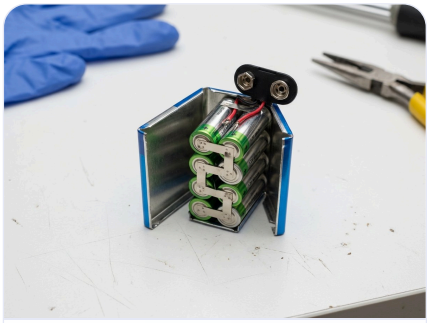
In serie (de pluspool van de ene tegen de minpool van de volgende) tellen de spanningen op. Vier AA-batterijen van 1,5 V geven samen 6 V. Een alkalische blokbatterij van 9 V bevat zes kleine cellen van 1,5 V in serie, een autobatterij van 12 V zes cellen van ongeveer 2 V. Een zonnepaneel met 36 cellen van ongeveer 0,5 V geeft zo ongeveer 18 V (hoofdstuk 17). Steek je één cel omgekeerd in de houder, dan werkt ze tegen: $1{,}5 + 1{,}5 - 1{,}5 + 1{,}5 = 3\,\text{V}$.

Parallel (alle pluspolen samen, alle minpolen samen) blijft de spanning die van één cel. Wel kunnen ze samen meer stroom leveren, of dezelfde stroom twee keer zo lang: twee cellen parallel gaan ongeveer twee keer zo lang mee. Zet alleen **gelijke** cellen parallel: een volle cel naast een lege duwt stroom in de lege, en die kan heet worden.

De zwakste schakel. In serie moet dezelfde stroom door elke cel. Levert één zonnecel minder stroom, omdat ze in de schaduw ligt, dan remt ze de stroom van alle andere af. Dat verklaart de proef met het zonnepaneeltje in hoofdstuk 17: één afgedekte cel liet de stroom bijna helemaal wegvallen. Grote panelen hebben daarom **bypassdiodes** in de aansluitdoos: een omweg voor de stroom rond een groep cellen die in de schaduw ligt.



In serie tellen de spanningen op (6,0 V); parallel blijft het 1,5 V, maar de cellen delen het werk.



In een alkalische blokbatterij van 9 V zitten zes cellen van 1,5 V in serie.

UITLEG · 20.12

Waarom je huis parallel geschakeld is

12/16

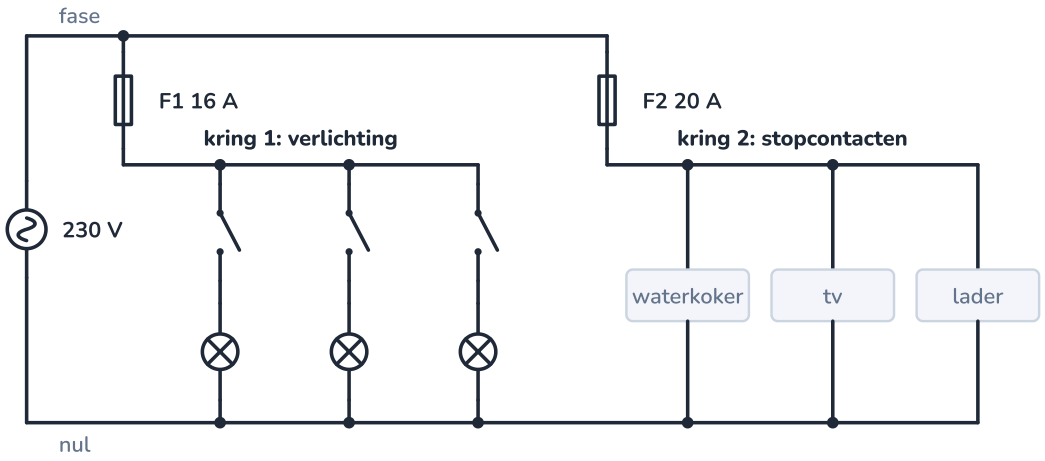
Alle lampen en stopcontacten in een huis staan **parallel** tussen twee draden: de fase en de nul (hoofdstuk 5). Daar zijn drie goede redenen voor:

1. Elk toestel krijgt de volle **230 V**, waarvoor het gemaakt is.
2. Elk toestel kan je **apart** aan- en uitzetten: de schakelaar staat in serie met zijn eigen lamp, in haar eigen tak.
3. Valt er één toestel uit, dan werken de andere **gewoon verder**.

Er is één nadeel, dat je al kent van de proef: alle takstromen tellen op in de draden die ze delen. Hoe meer toestellen er tegelijk aan staan, hoe groter de stroom door de draad van de kring. Daarom is de installatie verdeeld in **kringen**, elk met een eigen zekering: 16 A voor een lichtkring met draden van 1,5 mm², 20 A voor een kring met stopcontacten en draden van 2,5 mm², met hoogstens acht stopcontacten per kring. Een waterkoker trekt al bijna 9 A.

De stekkerdoos

Een stekkerdoos zet nog meer toestellen parallel op één stopcontact. Het snoer van de stekkerdoos is vaak dunner dan de draden in de muur en verdraagt meestal hoogstens 16 A. De automaat van 20 A in de zekeringkast beschermt dat snoer dus niet. Steek nooit meerdere verwarmende toestellen samen in één stekkerdoos, en nooit stekkerdozen in elkaar.



Elke lamp en elk toestel zit in een eigen tak tussen fase en nul. De zekering van een kring ziet de som van al zijn takstromen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 20.13

Een stekkerdoos in de keuken

13/16

Op een stekkerdoos (hoogstens 16 A) staan een waterkoker (8,7 A), een broodrooster (3,9 A) en een microgolfoven (5,2 A). Het stopcontact hangt aan een kring met een automaat van 20 A. (a) Hoeveel stroom loopt er door het snoer van de stekkerdoos als alles tegelijk werkt? (b) Is dat veilig? (c) Schakelt de automaat uit?

GEGEVEN

- drie toestellen parallel: 8,7 A, 3,9 A en 5,2 A
- stekkerdoos: hoogstens 16 A
- automaat: 20 A

GEVRAAGD

- stroom in het snoer
- veilig?
- reageert de automaat?

OPLOSSING

1. (a) De toestellen staan parallel: de stromen tellen op in het snoer. $I = 8{,}7 + 3{,}9 + 5{,}2 = 17{,}8\ \text{A}$.
2. (b) $17{,}8\ \text{A}$ is meer dan de 16 A waarvoor de stekkerdoos gemaakt is. Het snoer en de contacten worden warm, zeker als dat lang duurt: brandgevaar.
3. (c) $17{,}8\ \text{A}$ is minder dan 20 A: de automaat schakelt **niet** uit. Hij beschermt de draden in de muur (2,5 mm²), niet het dunnere snoer van de stekkerdoos.

ANTWOORD

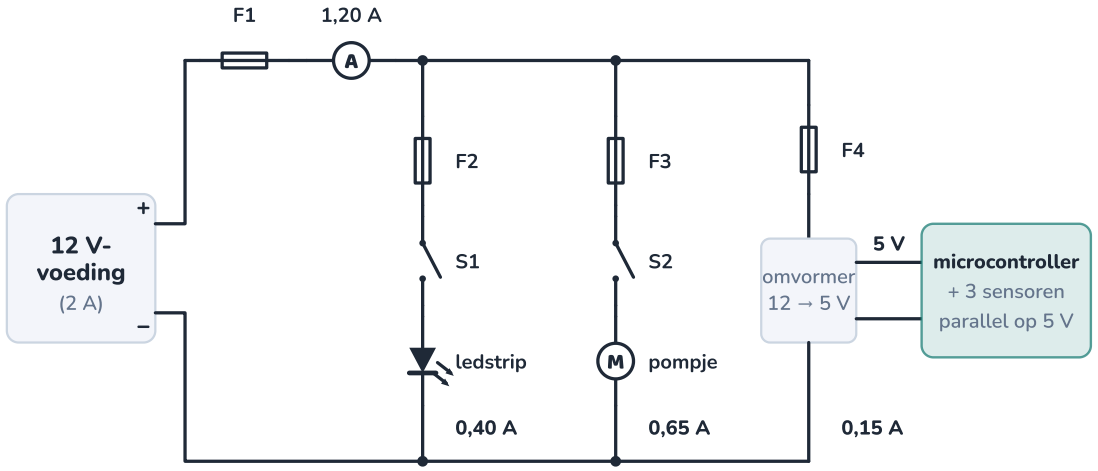
17,8 A: te veel voor de stekkerdoos, terwijl de automaat van 20 A niet reageert. Verdeel de toestellen over verschillende stopcontacten en kringen.

Klopt dit? De stroom van de kring is nog groter als er op een ander stopcontact van dezelfde kring ook iets werkt. Komt de som boven 20 A, dan schakelt de automaat wel uit. In hoofdstuk 21 zie je dat 17,8 A op 230 V overeenkomt met ongeveer 4100 W.

UITGEWERKT VOORBEELD · 20.14

Habitat: alles op één 12 V-voeding

De meetkas heeft één 12 V-voeding van 2 A. Daarop komen de ledstrip (30 Ω), het pompje (0,65 A) en de omvormer van 12 V naar 5 V voor de microcontroller (0,15 A aan de 12 V-kant). Op de 5 V-kant hangen de microcontroller en drie sensoren (temperatuur, licht, bodemvocht). (a) Hoe sluit je alles aan? (b) Welke stroom levert de voeding? (c) Wat zou er gebeuren als je de ledstrip en het pompje per ongeluk in serie zet?



De 12 V-verdeling van de meetkas: drie takken parallel, elk met een eigen zekering. De ampèremeter na F1 meet de som: 1,20 A.

GEGEVEN

- voeding 12 V, hoogstens 2 A
- ledstrip 30 Ω
- pompje 0,65 A bij 12 V
- omvormer 0,15 A bij 12 V

GEVRAAGD

- schema
- stroom van de voeding
- gevolg van een serieschakeling

OPLOSSING

1 (a) Elke verbruiker is gemaakt voor 12 V en moet apart kunnen werken: dus **parallel**, elk in een eigen tak tussen de plus- en de minleiding, met een eigen zekering en (voor ledstrip en pompje) een eigen schakelaar. Een hoofdzekering F1 komt vóór de eerste splitsing (hoofdstuk 18). Op de 5 V-kant staan de microcontroller en de sensoren ook parallel: elk krijgt 5 V.

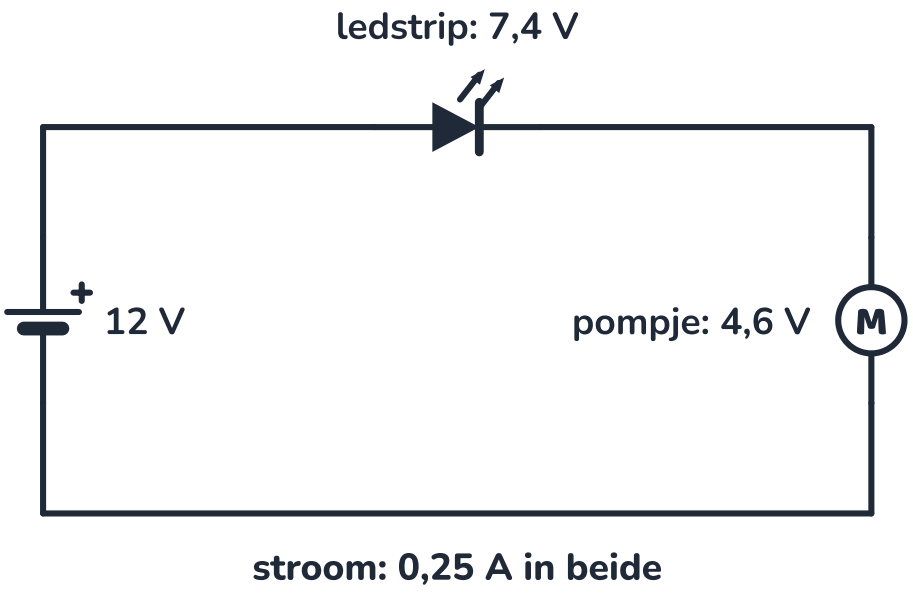
2 (b) Ledstrip: $I = 12/30 = 0{,}40\ \text{A}$. Parallel tellen de stromen op: $0{,}40 + 0{,}65 + 0{,}15 = 1{,}20\ \text{A}$. Dat is minder dan 2 A: de voeding volstaat, met reserve voor de aanloopstroom van het pompje.

3 (c) In serie delen ze één stroom en de 12 V. Rekenen we het pompje voor de eenvoud als een weerstand van $12/0{,}65 \approx 18{,}5\ \Omega$, dan is $R_v = 30 + 18{,}5 = 48{,}5\ \Omega$ en $I = 12/48{,}5 \approx 0{,}25\ \text{A}$. De ledstrip krijgt $30 \times 0{,}25 \approx 7{,}4\ \text{V}$, het pompje $18{,}5 \times 0{,}25 \approx 4{,}6\ \text{V}$.

ANTWOORD

Alles parallel op 12 V, elk met een eigen zekering; de voeding levert 1,20 A. In serie zouden de ledstrip 7,4 V en het pompje 4,6 V krijgen: de ledstrip brandt zwak, het pompje start waarschijnlijk niet, en je kan ze niet apart schakelen.

Klopt dit? $7{,}4 + 4{,}6 = 12\ \text{V}$: de spanningen tellen op. Een motor is geen gewone weerstand (bij weinig spanning draait hij traag of niet, en trekt hij dan juist veel stroom), dus de getallen in (c) zijn een schatting. Het besluit blijft: verbruikers voor dezelfde spanning horen parallel.



Zo niet: in serie krijgt geen van beide de 12 V waarvoor hij gemaakt is.

NASLAG · 20.15

Overzicht: serie en parallel

15/16

De regels voor stroom, spanning en vervangingsweerstand naast elkaar.

serie

$$I = I_1 = I_2 \qquad U = U_1 + U_2 \qquad R_v = R_1 + R_2$$

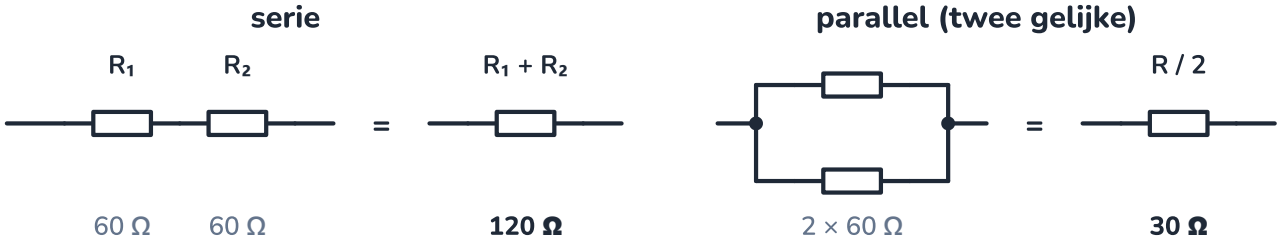
symbool	betekenis	eenheid
I	stroom	A
U	spanning	V
R_v	vervangingsweerstand	Ω

parallel (n gelijke weerstanden R)

$$U = U_1 = U_2 \qquad I = I_1 + I_2 \qquad R_v = \frac{R}{n}$$

symbool	betekenis	eenheid
n	aantal gelijke weerstanden	—
R	weerstand van elke tak	Ω

	serie	parallel
weg van de stroom	één weg, geen knooppunten	een eigen tak per onderdeel, tussen twee knooppunten
stroom	overal dezelfde	telt op: $I = I_1 + I_2$
spanning	verdeelt zich: $U = U_1 + U_2$; grootste R krijgt het meest	over elke tak dezelfde
vervangingsweerstand	groter dan de grootste: $R_1 + R_2$	kleiner dan de kleinste (twee gelijke: de helft)
één onderdeel valt uit	alles valt uit	de andere werken verder
lampjes erbij	ze branden zwakker	ze branden even fel; de bron levert meer stroom
cellen	spanningen tellen op	zelfde spanning, gaan langer mee
voorbeelden	oude kerstslinger, schakelaar met zijn lamp, zekering, voorschakelweerstand, zonnecellen in een paneel	huisinstallatie, stekkerdoos, verbruikers van de meetkas



Vervangingsweerstand: in serie optellen, twee gelijke parallel halveren.

HET GEHEEL · 20.16

Waar serie en parallel terugkomen

16/16

Serie en parallel zijn de twee bouwstenen van elke schakeling, hoe ingewikkeld ook. Met de regels voor stroom en spanning reken je in de leerlijn **elektriciteit** alles uit, en je gebruikt ze ook buiten de elektriciteit: warmte die door twee lagen isolatie moet, werkt als weerstanden in serie; onderdelen die elkaar kunnen vervangen, maken een systeem betrouwbaarder, zoals takken in parallel.

F17 Energie uit zon, wind en water
Zonnecellen in serie: waarom één cel in de schaduw het hele paneel afremt.

F18 De elektrische kring
Schakelaars in serie (EN) en parallel (OF), en de zekering in serie.

F19 Spanning, stroom en weerstand
De wet van Ohm, die je hier per onderdeel en voor de hele kring gebruikt.

F21 Elektrisch vermogen en energie
Hoeveel energie de verbruikers samen opnemen: vermogens tellen op, net als de stromen parallel.

F24 De microcontroller
Een led met voorschakelweerstand aan een pin van de microcontroller.

I21 De wetten van Kirchhoff
Knooppuntwet en maaswet: de algemene vorm van deze regels, en ongelijke weerstanden parallel.

I22 De spanningsdeler en sensoren
Twee weerstanden in serie verdelen de spanning: zo lees je een lichtsensor uit.

I19 Warmtetransport en isolatie
Warmteweerstanden van lagen isolatie tellen op, zoals weerstanden in serie.

E46 Betrouwbaarheid en risico
Systemen in serie en parallel: hoe betrouwbaar is het geheel?

Habitat

De meetkas hangt nu correct aan één 12 V-voeding: ledstrip (0,40 A), pompje (0,65 A) en omvormer (0,15 A) parallel, elk met een eigen zekering, samen 1,20 A van de 2 A die de voeding kan leveren. De ledstrip bestaat uit twee helften van 60 Ω parallel. Op de 5 V-kant staan de microcontroller en de sensoren parallel. In hoofdstuk 21 bereken je hoeveel energie dat per dag vraagt; in hoofdstuk I21 reken je de hele voeding van de sensoren na met de wetten van Kirchhoff.

SAMENVATTING

In het kort

- In serie staan onderdelen achter elkaar in één weg; parallel heeft elk onderdeel een eigen tak tussen twee knooppunten.
- Serie: overal dezelfde stroom; de spanningen tellen op tot de bronspanning ($U = U_1 + U_2$). De grootste weerstand krijgt het grootste deel.
- Parallel: over elke tak dezelfde spanning; de takstromen tellen op ($I = I_1 + I_2$, knooppuntregel).
- In serie valt alles uit als één onderdeel stuk is, en branden lampjes zwakker; parallel werken de andere verder en levert de bron meer stroom.

- Vervangingsweerstand: in serie $R_v = R_1 + R_2$; n gelijke weerstanden parallel: $R_v = R/n$, altijd kleiner dan de kleinste.
- Cellen in serie: spanningen tellen op; parallel: dezelfde spanning, maar ze gaan langer mee. In serie bepaalt de zwakste cel de stroom.
- Een huis is parallel geschakeld, verdeeld in kringen met elk een zekering; een stekkerdoos kan overbelast raken zonder dat de automaat reageert.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

serieschakeling
Onderdelen achter elkaar in één weg: door alle onderdelen loopt dezelfde stroom en de spanning van de bron verdeelt zich over hen.

parallelschakeling
Onderdelen naast elkaar, elk in een eigen tak tussen dezelfde twee knooppunten: over elke tak staat dezelfde spanning en de stromen tellen op.

tak
Eén van de wegen tussen twee knooppunten in een parallelschakeling.

knooppuntregel
De stroom die een knooppunt binnenkomt, is gelijk aan de stroom die eruit gaat.

vervangingsweerstand
De ene weerstand die dezelfde stroom zou laten lopen als een hele groep weerstanden. In serie: $R = R_1 + R_2$; twee gelijke parallel: $R_1/2$.

voorschakelweerstand
Weerstand in serie met een led, die het deel van de spanning opneemt dat de led niet mag krijgen.

F FUNDAMENTAL · DEEL F5 · ELEKTRICITEIT

HANDBOEK · HOOFDSTUK 21

Elektrisch vermogen en energie

Hoeveel een toestel per seconde omzet, wat dat per dag kost, en waarom de led de gloeilamp verving

Op elk toestel staat een getal in **watt**, op elke energiefactuur een getal in **kilowattuur**. In dit hoofdstuk leer je wat ze betekenen en hoe ze samenhangen. Je berekent het **vermogen** uit spanning en stroom met $P = U \cdot I$, de **energie** met $E = P \cdot t$, en wat die energie kost. Je leest energielabels, ontmaskert het stand-byverbruik en vergelijkt een led met een gloeilamp in cijfers. Tot slot bereken je exact hoeveel energie de meetkas per dag gebruikt.

5× uitleg | 7× uitgewerkt voorbeeld | 1× proef | 1× naslag | 1× verhaal | 1× het geheel | ± 6 lestijden

Elektriciteit en elektronica | Energie | Wiskundig modelleren



Evenveel licht: links voor 60 W, rechts voor 8,5 W.

Na dit hoofdstuk

- Je kan het vermogen van een toestel berekenen met $P = U \cdot I$ en de formule omvormen om de stroom of de spanning te vinden.
- Je kan een typeplaatje lezen en de stroom van een toestel berekenen uit zijn vermogen.
- Je kan energie berekenen met $E = P \cdot t$ in joule en in kilowattuur, en omzetten ($1\,\text{kWh} = 3{,}6\,\text{MJ}$).
- Je kan uit meterstanden en een prijs per kWh berekenen wat elektriciteit kost, en uitleggen wat er nog op een energiefactuur staat.
- Je kan een energielabel lezen en het stand-byverbruik van toestellen omrekenen naar kWh en euro per jaar.
- Je kan een led en een gloeilamp vergelijken in lumen per watt, rendement en kosten over hun levensduur.
- Je kan het dagelijkse energieverbruik van de meetkas berekenen en vergelijken met de opbrengst van het zonnepaneel en de batterij.

VERHAAL · 21.1

Het afscheid van de gloeilamp

1/16

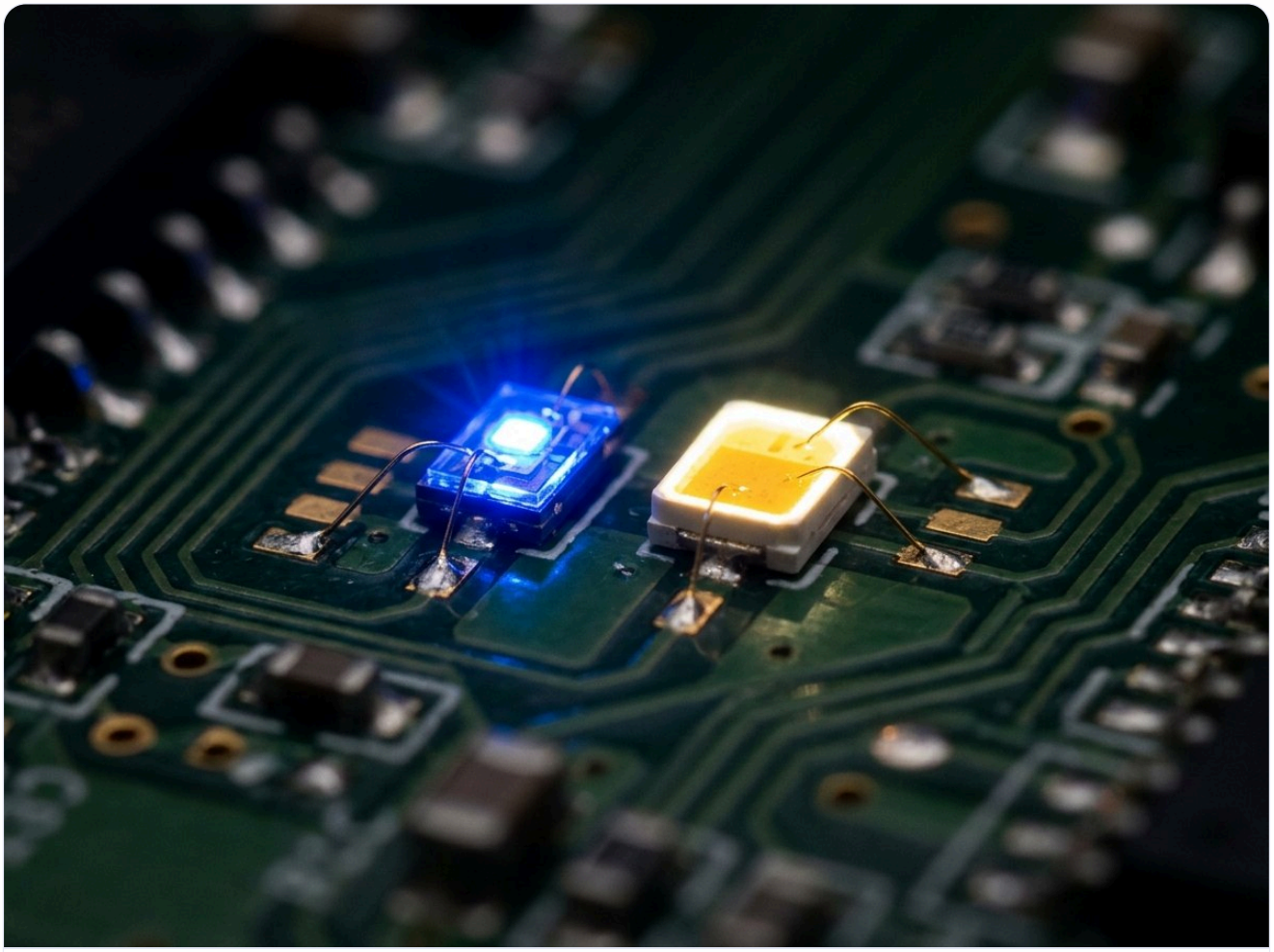
Meer dan honderd jaar lang was de **gloeilamp** hét symbool van een goed idee. Een wolfraamdraadje in een glazen bol wordt door de stroom zo heet, ongeveer 2500 °C, dat het wit gloeit. Maar een gloeilamp is vooral een kacheltje dat toevallig ook licht geeft: van elke 100 J elektrische energie wordt er maar 5 à 10 J zichtbaar licht, de rest warmte.

Daarom besliste de Europese Unie om de gloeilamp stap voor stap uit de winkels te halen: vanaf 2009 de lampen van 100 W, in 2012 de laatste kleinere. In 2018 volgden de meeste halogeenlampen, in 2023 de spaarlampen, die kwik bevatten. Wat bleef, is de **led**.

Dat een led vandaag wit licht geeft, is geen vanzelfsprekendheid. Rode leds bestonden al sinds de jaren 1960, groene kort daarna, maar voor wit licht heb je ook **blauw** nodig, en een heldere blauwe led lukte decennialang niet. Pas in het begin van de jaren 1990 slaagden de Japanse onderzoekers Isamu Akasaki, Hiroshi Amano en Shuji Nakamura erin. In 2014 kregen ze de Nobelprijs voor natuurkunde, voor de uitvinding van efficiënte blauwe leds, die heldere en zuinige witte lampen mogelijk maakten. Een witte ledlamp is een blauwe led met een geel oplichtend laagje erop: samen zien ze er wit uit.

Waarom dit verhaal over energie gaat

Een ledlamp geeft evenveel licht als een gloeilamp voor ongeveer een zevende van het vermogen. In dit hoofdstuk leer je die vergelijking zelf maken: in watt, in lumen, in kilowattuur en in euro.



Een blauwe led en een witte led: het gele laagje maakt van blauw licht wit licht.

UITLEG · 21.2

Vermogen: hoeveel energie per seconde

2/16

In hoofdstuk 17 zag je dat het **vermogen** zegt hoeveel energie een toestel per seconde omzet, in **watt**: $1\,\mathrm{W} = 1\,\mathrm{J}$ per seconde. Hoe groot is het vermogen van een elektrisch toestel? Dat hangt af van twee dingen die je al kan meten (hoofdstuk 19):

- de **spanning** U: hoeveel energie elk pakje lading afgeeft als het door het toestel gaat. Eén volt betekent: elke **coulomb** lading (de eenheid van lading) geeft 1 joule af;
- de **stroom** I: hoeveel lading er per seconde door het toestel gaat. Eén ampère is één coulomb per seconde.

Energie per coulomb maal coulomb per seconde geeft energie per seconde:

ELEKTRISCH VERMOGEN

$$P = U \cdot I$$

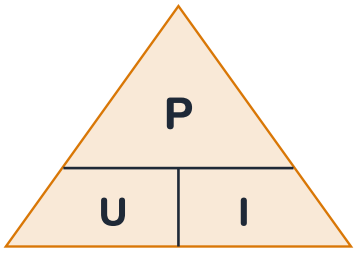
P in watt (W), U in volt (V), I in ampère (A). $1\,\mathrm{W} = 1\,\mathrm{V} \cdot 1\,\mathrm{A}$. Omgevormd: $I = \dfrac{P}{U}$ en $U = \dfrac{P}{I}$.

Grote vermogens schrijf je in kilowatt: $1\,\mathrm{kW} = 1000\,\mathrm{W}$.

toestel	U	I	P
led als statuslampje	2 V	0,02 A	0,04 W
ledstrip van de meetkas	12 V	0,40 A	4,8 W
smartphone die snel laadt (USB-C)	9 V	2 A	18 W
laptopadapter	19,5 V	3,33 A	65 W
waterkoker	230 V	8,7 A	2000 W = 2 kW

Hoge spanning betekent groot vermogen

Een toestel op 230 V is niet automatisch krachtiger dan een op 12 V. Een ledlampje van 0,5 W op 230 V trekt maar ongeveer 2 mA; het pompje van de meetkas neemt op 12 V ruim 15 keer zoveel vermogen. Pas spanning *en* stroom samen bepalen het vermogen.



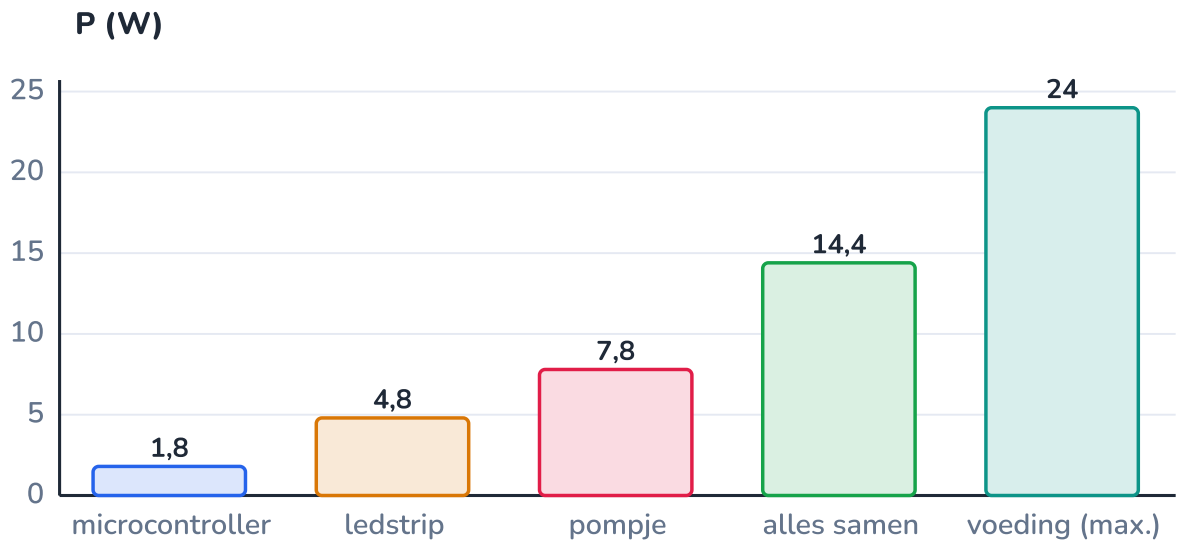
Zoals de driehoek van Ohm: bedek wat je zoekt. Bedek je I, dan zie je P boven U: I = P / U.

UITGEWERKT VOORBEELD · 21.3

Het vermogen van de toestellen van de meetkas

3/16

Op de 12 V-voeding van de meetkas hangen de ledstrip (30 Ω), het pompje (0,65 A) en de omvormer voor de microcontroller (0,15 A aan de 12 V-kant). (a) Bereken het vermogen van elk toestel. (b) Hoeveel vermogen vraagt alles samen? (c) De voeding levert hoogstens 2 A. Hoeveel vermogen kan ze leveren?



Het pompje heeft het grootste vermogen, de microcontroller het kleinste. Samen blijven ze ruim onder de 24 W van de voeding.

GEGEVEN

- $U = 12\,\text{V}$
- ledstrip $R = 30\,\Omega$
- pompje $I = 0{,}65\,\text{A}$
- omvormer $I = 0{,}15\,\text{A}$
- voeding hoogstens $2\,\text{A}$

GEVRAAGD

- vermogen per toestel
- samen
- maximaal vermogen van de voeding

OPLOSSING

1. (a) Ledstrip: eerst de stroom met Ohm: $I = U/R = 12/30 = 0{,}40\,\text{A}$. Dan $P = U \cdot I = 12\,\text{V} \times 0{,}40\,\text{A} = 4{,}8\,\text{W}$.
2. Pompje: $P = 12 \times 0{,}65 = 7{,}8\,\text{W}$. Omvormer: $P = 12 \times 0{,}15 = 1{,}8\,\text{W}$.
3. (b) De toestellen staan parallel; hun stromen tellen op tot $1{,}20\,\text{A}$ (hoofdstuk 20). Samen: $P = 12 \times 1{,}20 = 14{,}4\,\text{W}$, precies de som $4{,}8 + 7{,}8 + 1{,}8$.
4. (c) $P_{\text{max}} = 12\,\text{V} \times 2\,\text{A} = 24\,\text{W}$.

ANTWOORD

Ledstrip 4,8 W, pompje 7,8 W, omvormer 1,8 W; samen 14,4 W. De voeding kan 24 W leveren: genoeg, met reserve.

Klopt dit? Dit zijn precies de vermogens waarmee je in hoofdstuk 17 het energieverbruik schatte: ze kloppen met $P = U \cdot I$. Parallel tellen niet alleen de stromen op, maar ook de vermogens.

UITGEWERKT VOORBEELD · 21.4

Van typeplaatje naar stroom

4/16

Lees de twee typeplaatjes. (a) Welke stroom trekt de waterkoker uit het stopcontact van 230 V? (b) Welk vermogen levert de laptopadapter aan de laptop? (c) Waarom staat er op de adapter aan de ingang 1,5 A, terwijl $65\,\text{W}/230\,\text{V}$ maar 0,28 A is?



Typeplaatjes van een waterkoker en een laptopadapter. Het teken ~ betekent wisselspanning, ⎓ gelijkspanning.

GEGEVEN

- waterkoker: 220-240 V, 1850-2200 W
- adapter: uitgang 19,5 V en 3,33 A; ingang 100-240 V, 1,5 A

GEVRAAGD

- stroom van de waterkoker
- vermogen van de adapter
- verklaring van de 1,5 A

OPLOSSING

1 (a) Het vermogen hangt af van de netspanning: bij 220 V is het 1850 W, bij 240 V 2200 W. Bij de Belgische 230 V is het ongeveer 2000 W. Stroom: $I = \frac{P}{U} = \frac{2000\,\mathrm{W}}{230\,\mathrm{V}} \approx 8{,}7\,\mathrm{A}$.

2 (b) $P = U \cdot I = 19{,}5\,\mathrm{V} \times 3{,}33\,\mathrm{A} \approx 65\,\mathrm{W}$: de 65 W op het plaatje klopt.

3 (c) De 1,5 A aan de ingang is de grootste stroom die de adapter ooit trekt, ook bij de laagste netspanning (100 V, zoals in Japan) en bij het inschakelen. Bij 230 V en vol vermogen is het veel minder: ongeveer $65/230 \approx 0{,}28\,\mathrm{A}$, plus wat de adapter zelf verliest.

ANTWOORD

De waterkoker trekt ongeveer 8,7 A; de adapter levert 65 W; de 1,5 A is een bovengrens, geen gewone waarde.

Klopt dit? Dat klopt met de tabel uit hoofdstuk 19 (een waterkoker trekt ongeveer 9 A) en met de stekkerdoos uit hoofdstuk 20: 17,8 A op 230 V is $17{,}8 \times 230 \approx 4100\,\mathrm{W}$, meer dan de 3680 W ($16\,\mathrm{A} \times 230\,\mathrm{V}$) die zo'n stekkerdoos verdraagt.

UITLEG · 21.5

Energie: vermogen maal tijd

5/16

Het vermogen zegt hoe *snel* een toestel energie omzet. Hoeveel energie het in totaal omzet, hangt ook af van hoe **lang** het werkt:

ELEKTRISCHE ENERGIE

$$E = P \cdot t$$

Met P in watt en t in seconden krijg je E in joule (J). Met P in watt en t in uur krijg je wattuur (Wh); met P in kilowatt en t in uur kilowattuur (kWh).

De joule is de SI-eenheid, maar voor elektrische energie is ze klein: een waterkoker zet er elke seconde 2000 om. Daarom rekent men met de **kilowattuur**: de energie die een vermogen van 1 kW in één uur omzet. In hoofdstuk 15 kreeg je al het getal $1\,\mathrm{kWh} = 3{,}6\,\mathrm{MJ}$. Nu zie je waar het vandaan komt:

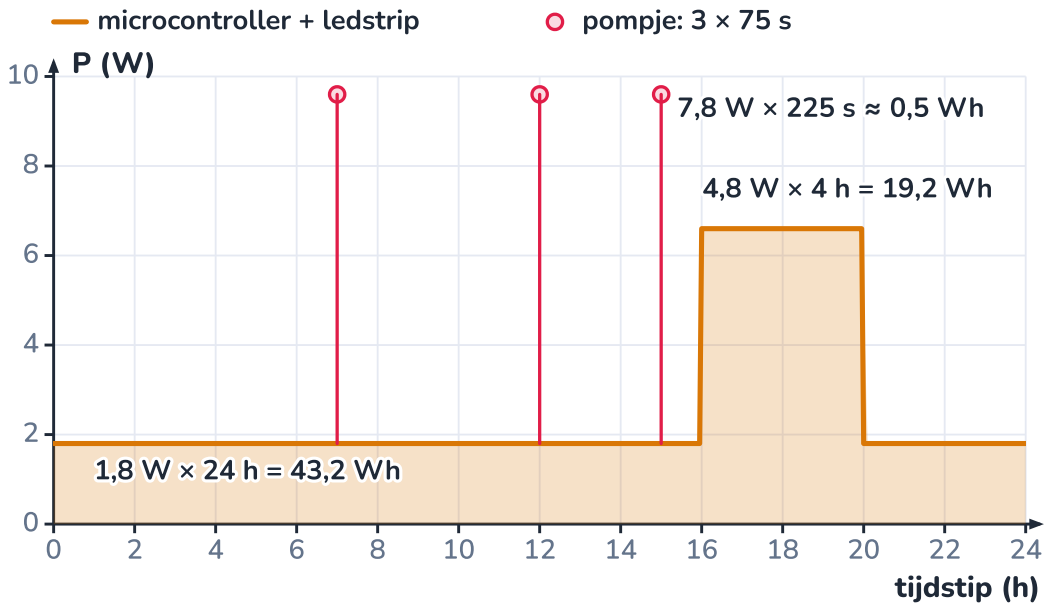
$$1\,\mathrm{kWh} = 1000\,\mathrm{W} \times 3600\,\mathrm{s} = 3\,600\,000\,\mathrm{J} = 3{,}6\,\mathrm{MJ}$$

Verandert het vermogen in de loop van de dag, dan teken je het in een grafiek: de energie is de **oppervlakte onder de lijn** (hoofdstuk 17). De grafiek toont de meetkas op een winterdag. De

microcontroller vraagt maar 1,8 W, maar dag en nacht: 43,2 Wh. Het pompje heeft het grootste vermogen, 7,8 W, maar draait maar 225 s per dag: nog geen halve wattuur.

Omzetten zonder fouten

Schrijf altijd de eenheden erbij. $\mathrm{W} \times \mathrm{s} = \mathrm{J}$; $\mathrm{W} \times \mathrm{h} = \mathrm{Wh}$; $\mathrm{kW} \times \mathrm{h} = \mathrm{kWh}$. En: $1\,\mathrm{Wh} = 3600\,\mathrm{J}$, $1\,\mathrm{kWh} = 1000\,\mathrm{Wh}$.



De oppervlakte onder de lijn is de energie. Het pompje geeft hoge, maar zo smalle pieken dat hun oppervlakte bijna nul is.

UITGEWERKT VOORBEELD · 21.6

Joule of kilowattuur?

6/16

(a) Een waterkoker van 2000 W werkt 3 minuten. Hoeveel energie is dat in joule en in kWh? (b) Een laptop van 45 W staat 5 uur per dag aan. Hoeveel kWh is dat per jaar? (c) Hoeveel joule zit er in een smartphonebatterij van 15 Wh?

GEGEVEN

- $P = 2000\,\mathrm{W}$, $t = 3\,\mathrm{min}$
- $P = 45\,\mathrm{W}$, 5 h per dag, 365 dagen
- $E = 15\,\mathrm{Wh}$

GEVRAAGD

- energie in J en kWh
- energie per jaar in kWh
- energie in J

OPLOSSING

1. (a) In joule: $t = 3 \times 60 = 180\,\mathrm{s}$; $E = 2000\,\mathrm{W} \times 180\,\mathrm{s} = 360\,000\,\mathrm{J}$. In kWh: $E = 2\,\mathrm{kW} \times 0{,}05\,\mathrm{h} = 0{,}1\,\mathrm{kWh}$. Controle: $360\,000 / 3\,600\,000 = 0{,}1$.
2. (b) Per dag: $45\,\mathrm{W} \times 5\,\mathrm{h} = 225\,\mathrm{Wh} = 0{,}225\,\mathrm{kWh}$. Per jaar: $0{,}225 \times 365 \approx 82\,\mathrm{kWh}$.
3. (c) $E = 15\,\mathrm{Wh} = 15 \times 3600\,\mathrm{J} = 54\,000\,\mathrm{J} = 54\,\mathrm{kJ}$.

ANTWOORD

(a) 360 000 J = 0,1 kWh; (b) ongeveer 82 kWh per jaar; (c) 54 kJ.

Klopt dit? Een waterkoker die 3 minuten werkt, gebruikt evenveel energie als de laptop in ruim 2 uur, of als zes smartphonebatterijen. Groot vermogen, korte tijd; klein vermogen, lange tijd: vergelijk altijd de energie, niet alleen het vermogen.

UITLEG · 21.7

De energiefactuur

Je huis heeft een **digitale meter** die telt hoeveel elektrische energie er uit het net komt, in kWh. Heb je zonnepanelen, dan telt hij ook wat je terug in het net stuurt. Het verbruik over een periode is het verschil tussen twee meterstanden.

Wat je betaalt, bestaat uit meer dan de energie zelf:

- de **energiekost**: het aantal kWh maal de prijs van je leverancier;
- de **nettarieven** voor het transport van de elektriciteit naar je huis. In Vlaanderen hangt een deel daarvan sinds 2023 af van je hoogste verbruik per kwartier, in **kilowatt**: het **capaciteitstarief**. Wie de oven, de waterkoker en de wasmachine tegelijk laat werken, maakt een hoge piek en betaalt meer;
- **heffingen en accijnzen** voor de overheid, en **btw** (6 % voor gezinnen).

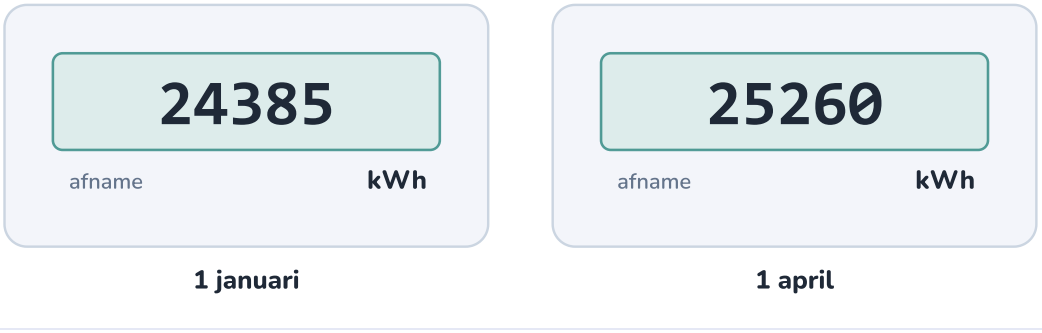
De prijzen veranderen voortdurend en verschillen per leverancier en per contract. In dit hoofdstuk rekenen we met een **rekenwaarde van € 0,30 per kWh**, alles inbegrepen. Dat is een afgerond, realistisch getal voor een Belgisch gezin, geen officiële prijs: voor echte beslissingen zoek je de prijs op je eigen factuur op.

KOSTEN VAN ELEKTRICITEIT

$$\text{kosten} = \text{energie (kWh)} \times \text{prijs per kWh}$$

Vermogen of energie?

Op de factuur staan beide. Voor de kWh betaal je de *energie* die je gebruikt hebt. Het capaciteitstarief rekent op het *vermogen*: hoeveel je tegelijk gebruikt. Spreid grote verbruikers dus in de tijd.



Twee meterstanden van dezelfde meter, drie maanden na elkaar. Het verbruik is het verschil.



De digitale meter telt de kWh die je huis uit het net haalt (en terug levert).

UITGEWERKT VOORBEELD · 21.8

Wat kost een kwartaal elektriciteit?

8/16

Een gezin leest op 1 januari de meterstand 24 385 kWh af en op 1 april 25 260 kWh. (a) Hoeveel energie gebruikte het gezin? (b) Wat kost dat, met de rekenwaarde van € 0,30 per kWh? (c) Hoeveel kWh is dat gemiddeld per dag (90 dagen)? (d) Wat kost één keer een liter water koken (0,11 kWh)?

GEGEVEN

- meterstanden 24 385 kWh en 25 260 kWh
- rekenwaarde € 0,30 per kWh
- 90 dagen
- water koken: 0,11 kWh

GEVRAAGD

- verbruik
- kosten
- verbruik per dag
- kosten per keer water koken

OPLOSSING

1. (a) $25\,260 - 24\,385 = 875\,\text{kWh}$.
2. (b) $875 \times 0{,}30 = 262{,}50$: dat is € 262,50.
3. (c) $875/90 \approx 9{,}7\,\text{kWh}$ per dag.
4. (d) $0{,}11 \times 0{,}30 \approx 0{,}03$: € 0,03, ongeveer drie cent.

ANTWOORD

875 kWh, dus € 262,50 voor het kwartaal; gemiddeld 9,7 kWh per dag; water koken kost ongeveer 3 cent.

Klopt dit? Een Belgisch gezin gebruikt gemiddeld ongeveer 3500 kWh per jaar, of 9,6 kWh per dag: dit gezin zit daar net boven, zoals je in de winter verwacht (meer licht, meer tijd binnen).

PROEF · 21.9

Meten met een energiemeter

9/16

ONDERZOEKSVRAAG

Hoeveel vermogen nemen toestellen in de klas echt op, aan en in stand-by?

MATERIAAL

- energiemeter (tussenstekker die je tussen het stopcontact en het toestel steekt)
- bureaulamp met een halogeenlamp van 42 W en een ledlamp van 8,5 W
- laptoplader, printer of beamer met een stand-bystand

Veiligheid

Je raakt geen 230 V aan: je steekt alleen stekkers in de energiemeter. Controleer vooraf of snoeren en stekkers onbeschadigd zijn. Een halogeenlamp wordt heel heet: laat ze afkoelen voor je ze vervangt.



Een energiemeter tussen het stopcontact en de lamp toont het vermogen en telt de kWh.

WERKWIJZE

1. Steek de energiemeter in het stopcontact en de bureaulamp met de halogeenlamp in de energiemeter. Lees het vermogen af.
2. Vervang (koud!) de halogeenlamp door de ledlamp. Lees opnieuw af. Houd je hand even op 10 cm boven elke lamp: wat voel je?
3. Meet de laptoplader: met de laptop die laadt, en zonder laptop.
4. Meet de printer of de beamer: aan, en in stand-by.
5. Bereken voor elk stand-byverbruik hoeveel kWh en euro dat is in een jaar (8760 uur).

WAARNEMING

toestel	gemeten vermogen	per jaar, als het altijd zo blijft
halogeenlamp (42 W op de verpakking)	41,6 W	—
ledlamp (8,5 W op de verpakking)	8,3 W	—
laptoplader, laptop laadt	45 W	—
laptoplader zonder laptop	0,1 W	0,9 kWh = € 0,26
printer in stand-by	2,4 W	21 kWh = € 6,31
beamer in stand-by	0,4 W	3,5 kWh = € 1,05

Voorbeeld van resultaten. Boven de halogeenlamp voel je veel warmte, boven de ledlamp nauwelijks.

VERKLARING

De gemeten vermogens liggen dicht bij wat op de verpakking staat. De halogeenlamp geeft ongeveer evenveel licht als de ledlamp, maar neemt vijf keer zoveel vermogen: het verschil voel je als warmte. Een stand-byverbruik lijkt verwaarloosbaar, maar een jaar telt 8760 uur: $2{,}4\,\mathrm{W} \times 8760\,\mathrm{h} \approx 21\,\mathrm{kWh}$, of ongeveer € 6 voor een printer die niets doet. Een lader zonder toestel verbruikt bijna niets meer: sinds 2025 mag een nieuw toestel in stand-by hoogstens 0,5 W opnemen (0,8 W met een display).

UITLEG · 21.10

Energielabels en stand-by

10/16

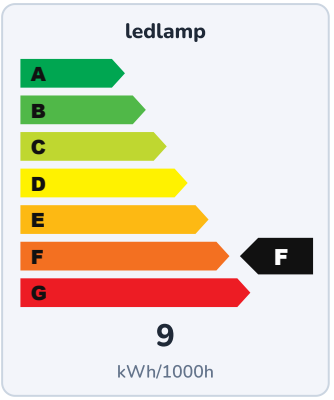
Op lampen, koelkasten, wasmachines, televisies en andere toestellen die je in de EU koopt, staat een **energielabel**. Sinds 2021 gaat de schaal van **A** (groen, zuinig) tot **G** (rood), zonder de vroegere klassen A+, A++ en A+++. De grens werd zo streng gelegd dat er bijna geen toestellen in klasse A zitten: zo is er ruimte voor betere toestellen in de toekomst.

Onderaan staat het **verbruik**: bij een koelkast in kWh per jaar, bij een lamp in kWh per 1000 uur. Dat laatste is handig: een lamp van 9 W verbruikt in 1000 uur $9\,\mathrm{W} \times 1000\,\mathrm{h} = 9000\,\mathrm{Wh} = 9\,\mathrm{kWh}$. Het getal in kWh per 1000 h is dus het vermogen in watt. De klasse van een lamp hangt af van het aantal lumen per watt: vanaf 210 lm/W klasse A, onder 85 lm/W klasse G. Een gewone ledlamp van 95 lm/W zit in klasse F; een gloeilamp zou ver onder G vallen.

Stand-by is de stand waarin een toestel 'uit' lijkt, maar klaar staat: een tv die op de afstandsbediening wacht, een microgolfoven met een klok. Sinds mei 2025 mag een nieuw toestel in stand-by hoogstens 0,5 W opnemen, of 0,8 W met een display. Oudere toestellen en toestellen die altijd verbonden blijven (een router, een decoder, een spelconsole in 'rustmodus') nemen vaak veel meer. Dat **sluipverbruik** loopt dag en nacht door: 1 W die het hele jaar aanstaat, is $1 \times 8760 = 8{,}76\,\mathrm{kWh}$, of ongeveer € 2,60 per jaar.

Sluipverbruik opsporen

Lees 's avonds laat de meter af als alles 'uit' staat, en 's morgens opnieuw voor iemand iets aanzet. Deel het verschil door het aantal uren: dat is je sluipverbruik in kW (opdracht 21.8). Een stekkerdoos met een schakelaar zet een hele groep toestellen echt uit.



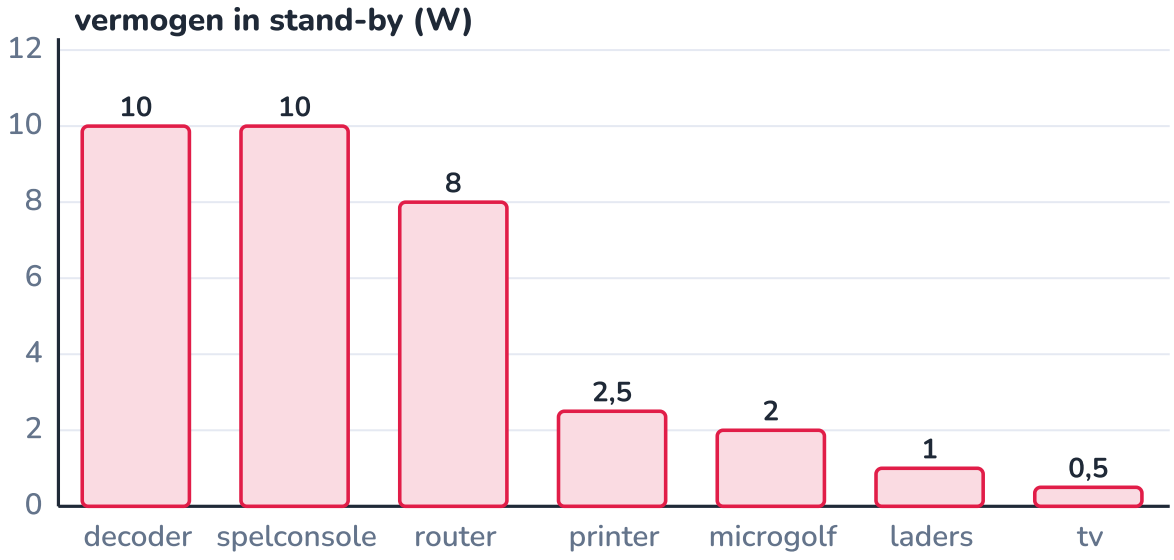
Vereenvoudigd energielabel van een ledlamp van 8,5 W met 806 lumen: 95 lm/W geeft klasse F; 9 kWh per 1000 uur.

UITGEWERKT VOORBEELD · 21.11

Het sluipverbruik van een huishouden

11/16

Een gezin meet met een energiemeter het vermogen van zijn toestellen als ze 'uit' staan (zie grafiek). (a) Hoeveel vermogen is dat samen? (b) Hoeveel kWh en hoeveel euro is dat per jaar? (c) Welk deel van een jaarverbruik van 3500 kWh is dat?



Vermogen in stand-by (voorbeeld van een meting). Oude decoders en consoles in rustmodus springen eruit.

GEGEVEN

- decoder 10 W, spelconsole in rustmodus 10 W, router 8 W, printer 2,5 W, microgolfoven 2 W, laders 1 W, tv 0,5 W
- 8760 uur per jaar
- € 0,30 per kWh
- jaarverbruik 3500 kWh

GEVRAAGD

- totaal vermogen
- kWh en euro per jaar
- deel van het jaarverbruik

OPLOSSING

1 (a) $10 + 10 + 8 + 2{,}5 + 2 + 1 + 0{,}5 = 34\,\text{W}$.

2 (b) $E = 34\,\mathrm{W} \times 8760\,\mathrm{h} = 297\,840\,\mathrm{Wh} \approx 298\,\mathrm{kWh}$; kosten $298 \times 0{,}30 \approx 89$ euro per jaar.

3 (c) $298/3500 \approx 0{,}085$: ongeveer 8,5 % van het jaarverbruik.

ANTWOORD

34 W, dus ongeveer 298 kWh of € 89 per jaar: bijna een tiende van alles wat het gezin verbruikt.

Klopt dit? De router kan je meestal niet uitzetten (hij zorgt voor internet en telefoon), maar decoder, spelconsole en printer wel. Zet die drie echt uit, dan spaar je $22{,}5 \times 8{,}76 \approx 197\,\mathrm{kWh}$, ongeveer € 59 per jaar.

UITLEG · 21.12

Led tegenover gloeilamp

12/16

Hoeveel licht een lamp geeft, meet je in **lumen** (lm): een eenheid die rekening houdt met hoe gevoelig je oog is voor elke kleur. Hoe zuinig een lamp is, zegt het aantal **lumen per watt**:

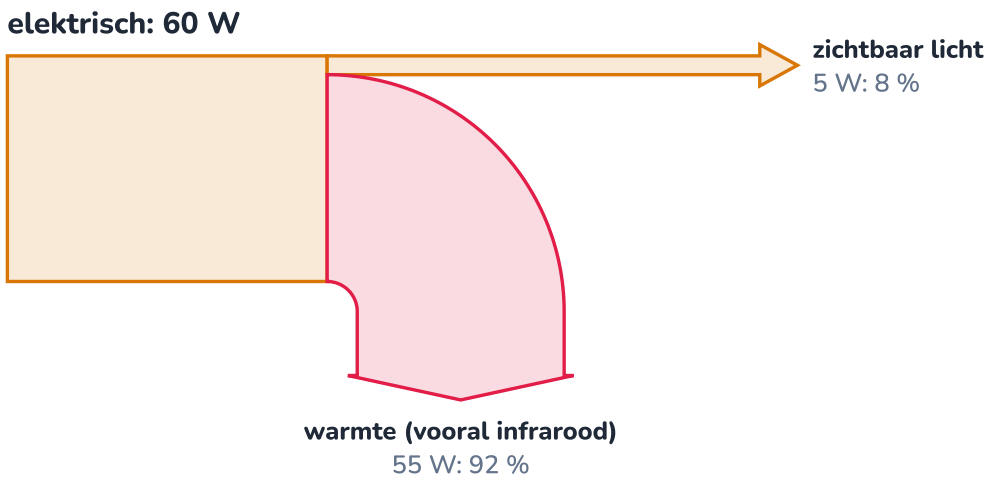
lamp	vermogen	licht	lumen per watt	levensduur	in de EU-winkels
gloeilamp	60 W	710 lm	12	±1000 h	niet meer sinds 2009-2012
halogeenlamp	42 W	630 lm	15	±2000 h	niet meer sinds 2018
spaarlamp (compacte tl)	11 W	600 lm	55	±10 000 h	niet meer sinds 2023
ledlamp	8,5 W	806 lm	95	15 000 à 25 000 h	standaard
zuinigste ledlampen (klasse A)			210 of meer		nog zeldzaam

Een ledlamp geeft per watt ongeveer acht keer zoveel licht als een gloeilamp. Uitgedrukt als **rendement** (hoofdstuk 15): een gloeilamp van 60 W zet ongeveer 8 % van de elektrische energie om in zichtbaar licht (in hoofdstuk 15 rekenden we ruw met 5 %: het blijft minder dan een tiende). De rest wordt warmte, vooral onzichtbaar infrarood. Een witte ledlamp zet ongeveer 30 % om in licht, de beste iets meer. Ook een led wordt dus warm, maar veel minder, en die warmte zit in de voet, niet in het licht.

De ledstrip van de meetkas doet het iets minder goed dan een goede ledlamp, omdat er op de strip ook kleine weerstanden zitten die warm worden: van de 4,8 W wordt ongeveer een kwart licht voor de planten (ruim 1 W) en de rest warmte. Zo beantwoord je de vraag uit hoofdstuk 15.

Waarom lumen en niet 'watt licht'?

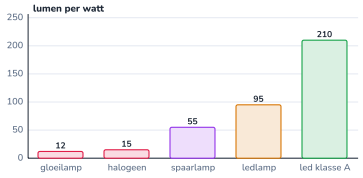
Het licht van een gloeilamp is roder dan dat van een led: veel ervan zit in kleuren waarvoor je oog weinig gevoelig is. Daardoor geeft de led met minder watt licht (2,5 W tegenover 5 W) toch meer licht voor je ogen (806 lm tegenover 710 lm). Lumen meet wat je ziet.



Gloeilamp van 60 W: de brede band buigt af als warmte, een smalle band wordt licht.



Ledlamp van 8,5 W op dezelfde schaal: veel minder energie in, en toch meer lumen.



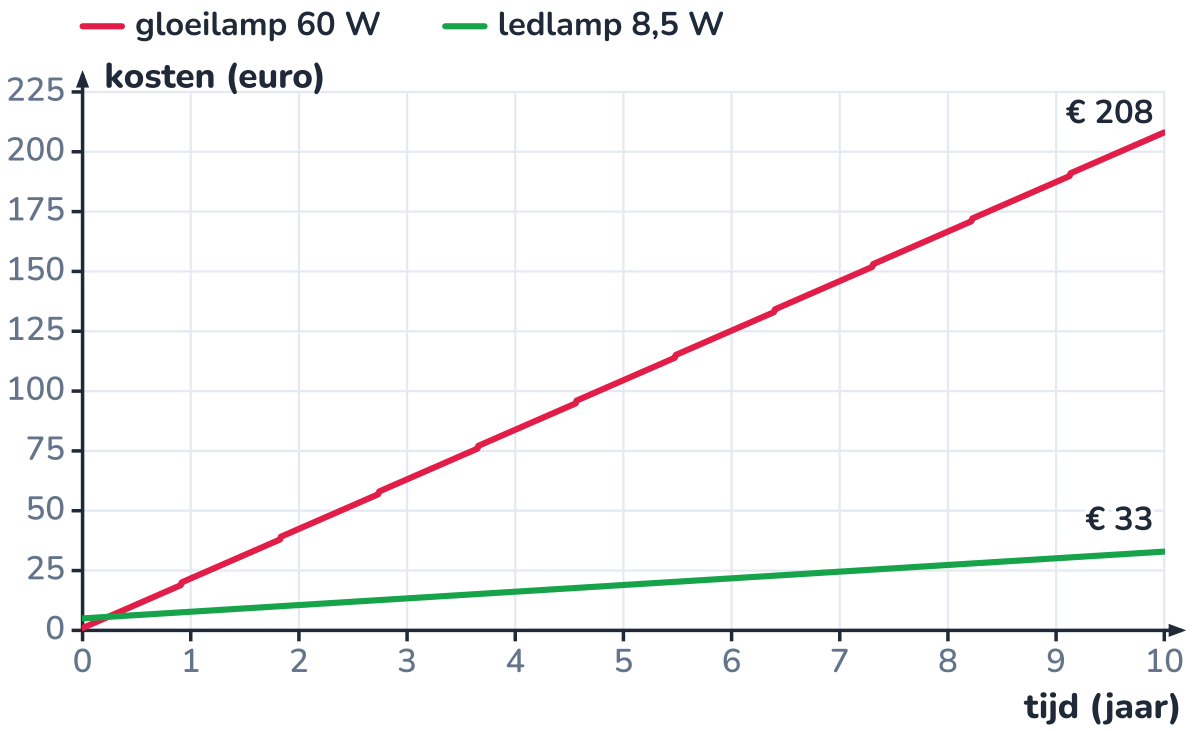
Lumen per watt: van de gloeilamp naar de zuinigste leds.

UITGEWERKT VOORBEELD · 21.13

Gloeilamp of led: wat kost het over tien jaar?

13/16

Stel dat je nog een gloeilamp van 60 W had, en je vergelijkt ze met een ledlamp van 8,5 W die evenveel licht geeft. De lamp brandt 3 uur per dag. Rekenwaarden: gloeilamp € 1 per stuk, gaat 1000 uur mee; ledlamp € 5, gaat 15 000 uur mee; elektriciteit € 0,30 per kWh. (a) Wat kost elke lamp per jaar aan elektriciteit? (b) Wat kost elk over tien jaar, lampen inbegrepen? (c) Na hoeveel tijd is de duurdere ledlamp terugverdiend?



Cumulatieve kosten: de ledlamp start duurder, maar de lijn stijgt zeven keer minder steil.

GEGEVEN

- 60 W tegenover 8,5 W
- 3 h per dag: $3 \times 365 = 1095\,\text{h}$ per jaar
- gloeilamp € 1, 1000 h; ledlamp € 5, 15 000 h
- € 0,30 per kWh

GEVRAAGD

- elektriciteit per jaar
- totale kosten over tien jaar
- terugverdientijd

OPLOSSING

1 (a) Gloeilamp: $60\,\text{W} \times 1095\,\text{h} = 65\,700\,\text{Wh} = 65{,}7\,\text{kWh}$, dus $65{,}7 \times 0{,}30 \approx 19{,}71$ euro per jaar. Ledlamp: $8{,}5 \times 1095 \approx 9{,}3\,\text{kWh}$, dus ongeveer € 2,79 per jaar.

2 (b) In tien jaar brandt de lamp 10 950 uur. Gloeilampen: 11 stuks (elke 1000 uur een nieuwe), € 11, plus € 197,10 elektriciteit ($10 \times 19{,}71$): samen ongeveer € 208. Ledlamp: één lamp (15 000 h is meer dan 10 950 h), € 5, plus € 27,92 elektriciteit ($10 \times 2{,}79$): samen ongeveer € 33.

3 (c) De ledlamp kost € 4 meer bij aankoop, maar spaart $19{,}71 - 2{,}79 = 16{,}92$ euro per jaar aan elektriciteit. $4 / 16{,}92 \approx 0{,}24$ jaar: na ongeveer drie maanden is ze terugverdiend.

ANTWOORD

Over tien jaar kost de gloeilamp ongeveer € 208 en de ledlamp ongeveer € 33: een besparing van € 175 voor één lamp. Na ongeveer drie maanden is de ledlamp terugverdiend.

Klopt dit? In de grafiek zie je de trapjes van de gloeilamp (ongeveer elk jaar een nieuwe lamp) en het snijpunt van de twee lijnen vlak bij het begin. Een huis heeft al gauw twintig lampen: de ommezwaai naar led spaart per gezin honderden kWh per jaar.

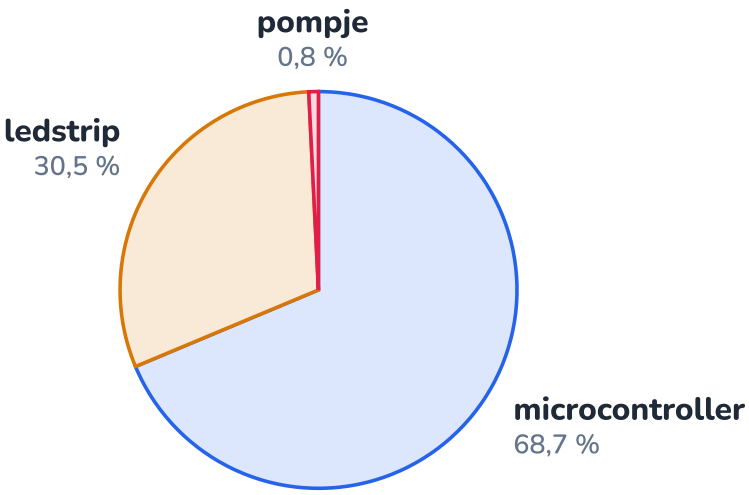
UITGEWERKT VOORBEELD · 21.14

Habitat: het exacte energieverbruik van de meetkas

14/16

In hoofdstuk 17 schatte je het verbruik van de meetkas op ongeveer 44 Wh per dag in de zomer en 63 Wh in de winter. Reken nu exact, met $P = U \cdot I$ en $E = P \cdot t$. (a) Wat is het verbruik per dag in de

zomer (april tot september) en in de winter (oktober tot maart, met de ledstrip 4 uur per dag)? (b) Hoeveel is dat per jaar, en wat zou het kosten van het net? (c) Hoeveel dagen houdt de batterij van 250 Wh het vol, als je er hoogstens 80 % uit haalt? (d) Klopt het zonnepaneel van 50 Wp in elke maand?



Een winterdag in de meetkas: 62,9 Wh, waarvan twee derde voor de microcontroller.

GEGEVEN

- alles op 12 V: omvormer 0,15 A (24 h), ledstrip 0,40 A (4 h, oktober tot maart), pompje 0,65 A (225 s)
- 183 zomerdagen, 182 winterdagen
- batterij 250 Wh, 80 % bruikbaar
- opbrengst paneel: tabel uit hoofdstuk 17
- € 0,30 per kWh

GEVRAAGD

- verbruik per dag
- verbruik en kosten per jaar
- autonomie van de batterij
- balans per maand

OPLOSSING

1. (a) Vermogens: $12 \times 0{,}15 = 1{,}8\,\mathrm{W}$; $12 \times 0{,}40 = 4{,}8\,\mathrm{W}$; $12 \times 0{,}65 = 7{,}8\,\mathrm{W}$. Energie per dag: $1{,}8 \times 24 = 43{,}2\,\mathrm{Wh}$; $4{,}8 \times 4 = 19{,}2\,\mathrm{Wh}$; $7{,}8\,\mathrm{W} \times 225\,\mathrm{s} = 1755\,\mathrm{J} = 1755/3600 \approx 0{,}49\,\mathrm{Wh}$ (zie de tabel).
2. Zomer: $43{,}2 + 0{,}49 \approx 43{,}7\,\mathrm{Wh}$ per dag. Winter: $43{,}7 + 19{,}2 = 62{,}9\,\mathrm{Wh}$ per dag. De schatting uit hoofdstuk 17 (44 en 63 Wh) was correct afgerond.
3. (b) $183 \times 43{,}69 + 182 \times 62{,}89 \approx 19\,440\,\mathrm{Wh} \approx 19{,}4\,\mathrm{kWh}$ per jaar. Van het net zou dat $19{,}4 \times 0{,}30 \approx 5{,}83$ euro per jaar kosten.
4. (c) Bruikbaar: $0{,}80 \times 250 = 200\,\mathrm{Wh}$. In de winter: $200/62{,}9 \approx 3{,}2$ dagen; in de zomer $200/43{,}7 \approx 4{,}6$ dagen.
5. (d) Zie de tabel: alleen in december is de gemiddelde opbrengst (62,5 Wh) iets kleiner dan het verbruik (62,9 Wh). In november en januari is het overschot klein; bij het laden en ontladen van de batterij gaat bovendien nog wat verloren. Daarom blijft de 230 V-adapter reserve van november tot januari.

ANTWOORD

43,7 Wh per dag in de zomer en 62,9 Wh in de winter; 19,4 kWh per jaar (van het net € 5,83); de batterij overbrugt ruim drie winterdagen; het paneel volstaat, behalve (net niet) in december.

Klopt dit? De microcontroller gebruikt 43,2 van de 62,9 Wh: ruim twee derde, omdat hij nooit stopt. Het pompje, met het grootste vermogen, gebruikt het minst. Wie de meetkas zuiniger wil maken, begint dus bij de microcontroller (opdracht 21.12).

NASLAG · 21.15

Overzicht: vermogen, energie en kosten

15/16

De formules, de omzettingen en de tabellen van dit hoofdstuk, met de meetkas als voorbeeld. De berekening van de meetkas per toestel en de balans met het zonnepaneel per maand staan onderaan.

elektrisch vermogen

$$P = U \cdot I$$

symbool	betekenis	eenheid
P	vermogen	watt (W)
U	spanning	volt (V)
I	stroom	ampère (A)

energie

$$E = P \cdot t$$

symbool	betekenis	eenheid
E	energie	J, Wh of kWh
P	vermogen	W of kW
t	tijd	s of h

omzetten

$$1\,\text{Wh} = 3600\,\text{J} \qquad 1\,\text{kWh} = 3{,}6\,\text{MJ}$$

symbool	betekenis	eenheid
Wh	wattuur	1 W gedurende 1 uur
kWh	kilowattuur	1 kW gedurende 1 uur

kosten

$$\text{kosten} = E\ (\text{kWh}) \times \text{prijs per kWh}$$

symbool	betekenis	eenheid
E	energie	kWh

toestel	U	I	$P = U \cdot I$	tijd per dag	energie per dag
omvormer + microcontroller + sensoren	12 V	0,15 A	1,8 W	24 h	43,2 Wh
ledstrip (oktober tot maart)	12 V	0,40 A	4,8 W	4 h	19,2 Wh
pompje	12 V	0,65 A	7,8 W	225 s	1755 J = 0,49 Wh
samen, april tot september					**43,7 Wh**
samen, oktober tot maart					**62,9 Wh**

maand	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
paneel 50 Wp (Wh/dag)	70,5	105,5	149,5	184,5	179,0	177,0	172,5	165,5	164,5	125,0	83,0	62,5
verbruik (Wh/dag)	62,9	62,9	62,9	43,7	43,7	43,7	43,7	43,7	43,7	62,9	62,9	62,9
overschot (Wh/dag)	7,6	42,6	86,6	140,8	135,3	133,3	128,8	121,8	120,8	62,1	20,1	−0,4

klasse lamp	A	B	C	D	E	F	G
lumen per watt	210 of meer	185-210	160-185	135-160	110-135	85-110	minder dan 85

Stand-by (nieuwe toestellen, sinds mei 2025): hoogstens 0,5 W, met display 0,8 W. Rekenwaarde elektriciteit: € 0,30 per kWh.

HET GEHEEL · 21.16

Waar vermogen en energie naartoe leiden

16/16

Met $P = U \cdot I$ komen twee leerlijnen samen: **elektriciteit** (spanning en stroom) en **energie** (joule, rendement, opslag). De kilowattuur is de munt waarin elk energiebudget rekent, van de meetkas tot een land. En elk verbruik is ook een ontwerpkeuze: de zuinigste oplossing kiezen is **duurzaam ontwerpen**.

F15 Energie: vormen en omzettingen

Energievormen, rendement en het Sankey-diagram: de led en de gloeilamp in dezelfde taal.

F17 Energie uit zon, wind en water

Watt en wattuur intuïtief, het zonnepaneel van 50 Wp en de batterij van 250 Wh: hier exact nagerekend.

F19 Spanning, stroom en weerstand

Spanning, stroom en de wet van Ohm: de bouwstenen van het vermogen.

F20 **Serie- en parallelschakeling**

Parallel tellen stromen en vermogens op: de voeding en de stekkerdoos.

F33 **Integratieproject: de meetkas**

Het energiebudget van de meetkas in het integratieproject.

I9 **Arbeid, energie en vermogen**

Vermogen als arbeid per seconde; de pomp van de klimaatmodule neemt 12 V · 1,0 A = 12 W op.

I16 **Redox en batterijen**

Capaciteit in ampère-uur en wattuur: wat er echt in een batterij past.

I20 **Zonne-energie dimensioneren**

Een volledig energiebudget met zonnepanelen en batterij voor de klimaatmodule.

I25 **Van analoog naar digitaal**

Een led dimmen met PWM: minder vermogen door snel aan en uit te schakelen.

E37 **Embedded systemen en IoT**

Slaapstanden: een microcontroller die bijna niets verbruikt tussen twee metingen.

Habitat

Het energieverbruik van de meetkas ligt nu vast: 43,7 Wh per dag van april tot september en 62,9 Wh van oktober tot maart, 19,4 kWh per jaar. De schatting uit hoofdstuk 17 klopte. De microcontroller verbruikt ruim twee derde; alleen in december is het paneel van 50 Wp gemiddeld net te klein, en de batterij van 250 Wh overbrugt ruim drie winterdagen. In opdracht 21.12 maak je de kas zuiniger.

SAMENVATTING

In het kort

- Vermogen is energie per seconde: $P = U \cdot I$, in watt (1 W = 1 V · 1 A = 1 J per seconde).
- Energie is vermogen maal tijd: $E = P \cdot t$. W × s = J; W × h = Wh; kW × h = kWh; $1\,\mathrm{kWh} = 3{,}6\,\mathrm{MJ}$.
- Op een typeplaatje staan spanning en vermogen (of stroom); de stroom is vermogen gedeeld door spanning.
- De kosten zijn het verbruik in kWh maal de prijs per kWh (hier de rekenwaarde € 0,30). Op de factuur staan ook nettarieven, heffingen en btw.
- Een energielabel gaat van A tot G; bij lampen hangt de klasse af van het aantal lumen per watt. Stand-by en sluipverbruik lopen 8760 uur per jaar door.
- Een ledlamp geeft per watt ongeveer acht keer zoveel licht als een gloeilamp (95 tegenover 12 lm/W): ongeveer 30 % tegenover 8 % licht.
- De meetkas gebruikt 43,7 Wh per dag in de zomer en 62,9 Wh in de winter, 19,4 kWh per jaar; de microcontroller gebruikt het meest.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

elektrisch vermogen

De energie die een toestel per seconde omzet: $P = U \cdot I$. Eenheid watt (W); 1 W = 1 J per seconde = 1 V · 1 A.

kilowattuur

De energie die een vermogen van 1 kW in 1 uur omzet: 1 kWh = 3 600 000 J = 3,6 MJ. De eenheid op de energiefactuur.

typeplaatje

Plaatje of opdruk op een toestel met onder meer de spanning, de frequentie en het vermogen of de stroom.

energielabel

stand-byverbruik

lumen

Europees label met een klasse van A (zuinig) tot G, en het verbruik in kWh per jaar of per 1000 uur.

Het vermogen dat een toestel opneemt als het 'uit' staat maar klaar is om aan te gaan (afstandsbediening, klok).

Eenheid voor de hoeveelheid licht die een lamp geeft, zoals je oog ze waarneemt (symbool lm).

lumen per watt

Hoeveel licht een lamp geeft per watt elektrisch vermogen: een maat voor hoe zuinig ze is.

capaciteitstarief

Deel van de nettarieven in Vlaanderen (sinds 2023) dat afhangt van je hoogste verbruiksvermogen per maand, in kW.

HANDBOEK · HOOFDSTUK 22

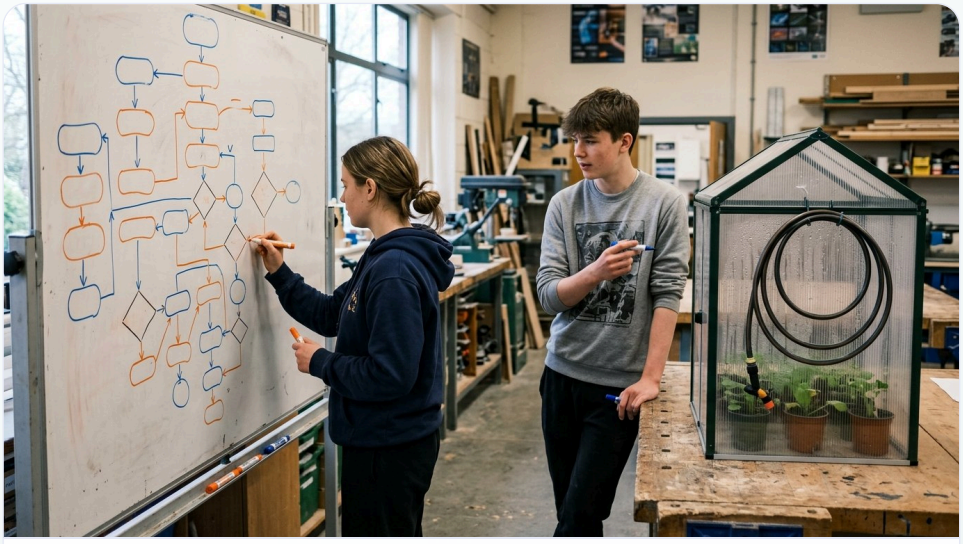
Computationeel denken

Denken als een programmeur, nog voor je één regel code schrijft

Een computer is snel en gehoorzaam, maar hij bedenkt niets zelf: hij volgt precies de stappen die jij opschrijft. **Computationeel denken** is de manier van denken waarmee je een probleem zo opdeelt en beschrijft dat een machine het kan uitvoeren. Je leert vier gereedschappen, tekent stroomdiagrammen, speelt algoritmen na op papier en zoekt er de fouten in. En je ontdekt het verschil tussen een regel die een mens schrijft en een regel die een computer zelf leert uit voorbeelden: de kern van wat men AI noemt.

8× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

P Programmeren en computationeel denken · W Wiskundig modelleren · A Data en AI



Eerst denken, dan programmeren: het algoritme van de meetkas groeit op het bord.

Na dit hoofdstuk

- Je kan een probleem opdelen in deelproblemen (decompositie) en herhalingen in een probleem herkennen (patroonherkenning).
- Je kan bij een probleem aangeven welke gegevens ertoe doen en welke je mag weglaten (abstractie).
- Je kan een algoritme schrijven als genummerde stappen en tekenen als stroomdiagram met de juiste symbolen.
- Je kan een algoritme stap voor stap naspelen in een trace-tabel en zo de uitkomst voorspellen.
- Je kan fouten in een algoritme vinden en verbeteren: verkeerde volgorde, ontbrekende stap, oneindige lus, verkeerde vergelijking.
- Je kan het verschil uitleggen tussen een vast algoritme en een systeem dat een regel leert uit gelabelde voorbeelden, en zeggen wat AI wel en niet kan.
- Je kan het algoritme 'water geven' voor de meetkas als stroomdiagram tekenen en naspelen.

VERHAAL · 22.1

Een woord uit Bagdad

1/16

Rond het jaar 825 schreef de wiskundige **Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi** in Bagdad een boek over rekenen met de Indische cijfers: de tien tekens 0 tot 9 die jij vandaag gebruikt. Hij legde uit hoe je met die cijfers optelt, aftrekt, vermenigvuldigt en deelt, *stap voor stap*, zodat iedereen die de stappen volgt het juiste antwoord vindt. Het boek werd in de twaalfde eeuw in het Latijn vertaald. Het oudste bewaarde

handschrift begint met de woorden *Dixit Algorizmi*: 'zo sprak Algorizmi'. Van die verlatijnste naam (ook als *Algoritmi* geschreven) komt ons woord **algoritme**.

Een algoritme is dus veel ouder dan de computer. De staartdeling die je in de lagere school leerde, is een algoritme: je hoeft niet te begrijpen *waarom* ze werkt om ze foutloos uit te voeren. Precies dat maakt algoritmen zo krachtig: wie de stappen volgt, mens of machine, komt tot hetzelfde resultaat.

In 1843 schreef de Britse wiskundige **Ada Lovelace** lange noten bij een artikel over de *Analytical Engine*, een rekenmachine die Charles Babbage ontworpen had maar nooit afwerkte. In haar laatste noot beschreef ze stap voor stap hoe die machine een reeks ingewikkelde getallen (de getallen van Bernoulli) kon berekenen, met herhalingen erin. Ze zag ook al dat zo'n machine meer kon dan rekenen: alles wat je in symbolen kan vastleggen, zoals muziek, kan ze bewerken.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Tussen al-Khwarizmi en Ada Lovelace liggen duizend jaar, maar het idee is hetzelfde: een probleem zo precies beschrijven dat je het kan *uitbesteden*. In dit hoofdstuk leer je dat zelf, eerst op papier. In de volgende hoofdstukken besteed je het uit aan een computer en een microcontroller.



Rekenen met de cijfers 0 tot 9, stap voor stap uitgeschreven: de oudste algoritmen staan op perkament.

UITLEG · 22.2

Vier gereedschappen om te denken

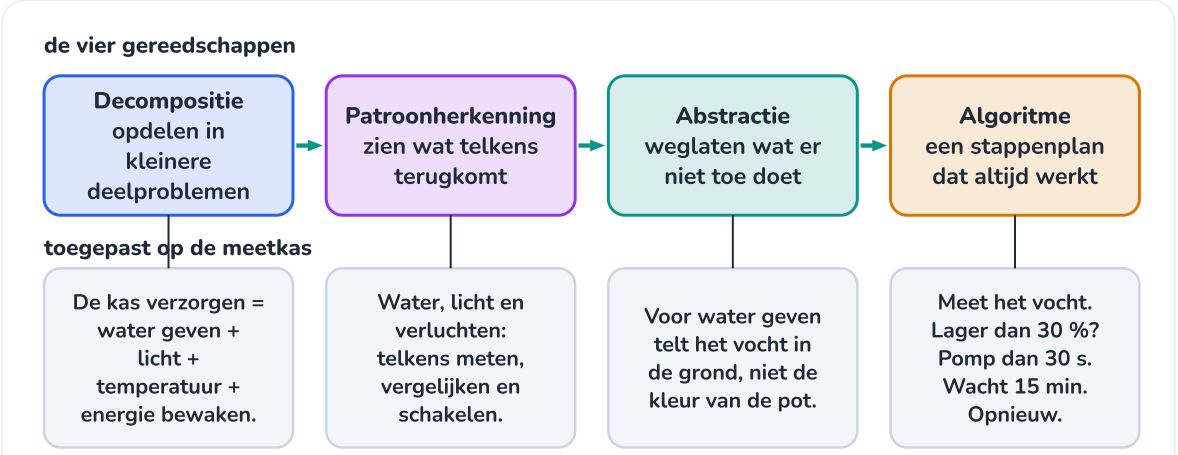
2/16

Computationeel denken is niet 'denken zoals een computer', maar denken zodat een computer je kan helpen. Programmeurs, ingenieurs en wetenschappers gebruiken er vier gereedschappen voor. Je hebt

ze niet altijd alle vier nodig, en ze lopen door elkaar, maar samen maken ze een groot probleem hanteerbaar.

1. **Decompositie**: een groot probleem opdelen in deelproblemen die je apart kan aanpakken.
2. **Patroonherkenning**: zien wat telkens terugkomt, zodat je één oplossing meerdere keren kan gebruiken.
3. **Abstractie**: alleen overhouden wat ertoe doet voor het probleem, en de rest weglaten.
4. **Algoritme**: een stappenplan maken dat het probleem altijd oplost, zo precies dat een machine het kan uitvoeren.

In de figuur zie je ze toegepast op de meetkas van Habitat. De opdracht 'zorg voor de planten' is te groot om in één keer te programmeren. Na de vier stappen blijft er een kort stappenplan over dat een microcontroller (hoofdstuk 24) kan uitvoeren.



Van een vage opdracht naar een stappenplan: elk gereedschap maakt het probleem kleiner of duidelijker.

UITLEG · 22.3

Decompositie: van groot naar klein

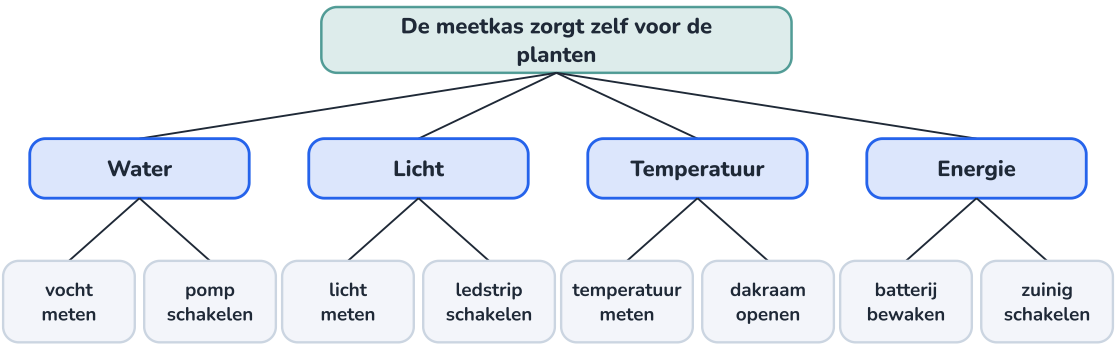
3/16

Een probleem dat te groot is om te overzien, knip je in stukken. Elk stuk knip je opnieuw, tot elk deel klein genoeg is om in één keer op te lossen. Zo ontstaat een **boom**: bovenaan het hele probleem, onderaan de kleine taken.

Decompositie heeft drie voordelen. Je ziet wat er allemaal moet gebeuren (en vergeet minder). Je kan het werk verdelen: in een team neemt elk lid een tak. En je kan elk deel apart **testen**: werkt het vochtmeten, dan pas koppel je er de pomp aan.

Wanneer is een deel klein genoeg?

Als je het in één zin kan beschrijven met een werkwoord en je weet hoe je het doet: 'vocht meten', 'pomp schakelen'. Kan je dat nog niet, knip dan verder.



Elk blad onderaan is klein genoeg om als één stap te programmeren.

De meetkas in vier deelproblemen, elk opgesplitst in taken die een microcontroller kan uitvoeren.

PROEF · 22.4

Robot spelen op ruitjespapier

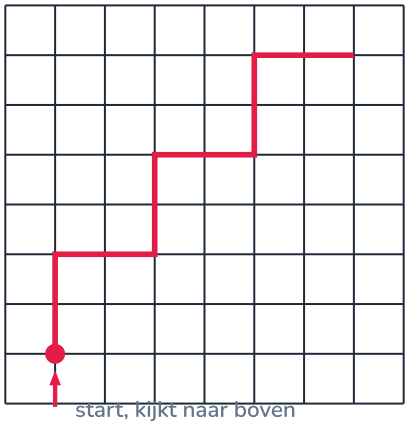
4/16

ONDERZOEKSVRAAG

Hoe precies moeten instructies zijn opdat iemand ze uitvoert zonder te raden, zoals een machine?

MATERIAAL

- ruitjespapier (2 vellen per duo)
- potlood en gom
- een map of boek als schermpje tussen de twee leerlingen



programma

```
1 VOORUIT 2
2 RECHTS
3 VOORUIT 2
4 LINKS
5 VOORUIT 2
6 RECHTS
7 VOORUIT 2
8 LINKS
9 VOORUIT 2
10 RECHTS
11 VOORUIT 2
```

met een patroon

```
HERHAAL 3 KEER:
VOORUIT 2
RECHTS
VOORUIT 2
LINKS
```

Het patroon herhaalt zich drie keer. Het laatste LINKS is overbodig, maar doet geen kwaad.

Elf commando's tekenen een trap; met HERHAAL volstaan er vijf regels.

WERKWIJZE

1. Leerling A tekent in het geheim een figuur van 6 tot 10 lijnstukken langs de lijnen van het ruitjespapier.
2. **Ronde 1.** A beschrijft de figuur in gewone woorden; B tekent zonder te kijken. Vergelijk daarna.
3. **Ronde 2.** Een nieuwe figuur. Nu mag A alleen vier commando's gebruiken: VOORUIT n (n hokjes), LINKS en RECHTS (een kwartdraai ter plaatse) en een startpunt met een kijkrichting. A schrijft het hele programma eerst op, B voert het letterlijk uit.
4. Tel in beide rondes het aantal lijnstukken dat verkeerd staat. Wissel daarna van rol.
5. Zoek in je programma van ronde 2 een stukje dat zich herhaalt en schrijf het korter met HERHAAL.

WAARNEMING

In ronde 1 gaat het vaak mis bij woorden als 'een beetje naar rechts', 'schuin' of 'terug'. In ronde 2 staan de meeste figuren meteen juist. De fouten die overblijven, zijn tel- en draaifouten: vooral LINKS en RECHTS verwisselen als de 'robot' naar beneden kijkt. Een trap wordt met HERHAAL drie keer korter (zie figuur).

VERKLARING

Gewone taal is vol dubbelzinnigheid: een mens vult aan wat bedoeld wordt, een machine niet. Een **programmeertaal** is net een kleine verzameling commando's die elk maar één betekenis hebben. Wat overblijft zijn **bugs**: fouten in het programma zelf. Je vindt ze door het programma stap voor stap na te spelen, precies wat B deed. Het korter schrijven met HERHAAL is patroonherkenning; in het volgende hoofdstuk heet dat blok *herhaal*.

UITLEG · 22.5

Patronen zien en weglaten wat niet telt

5/16

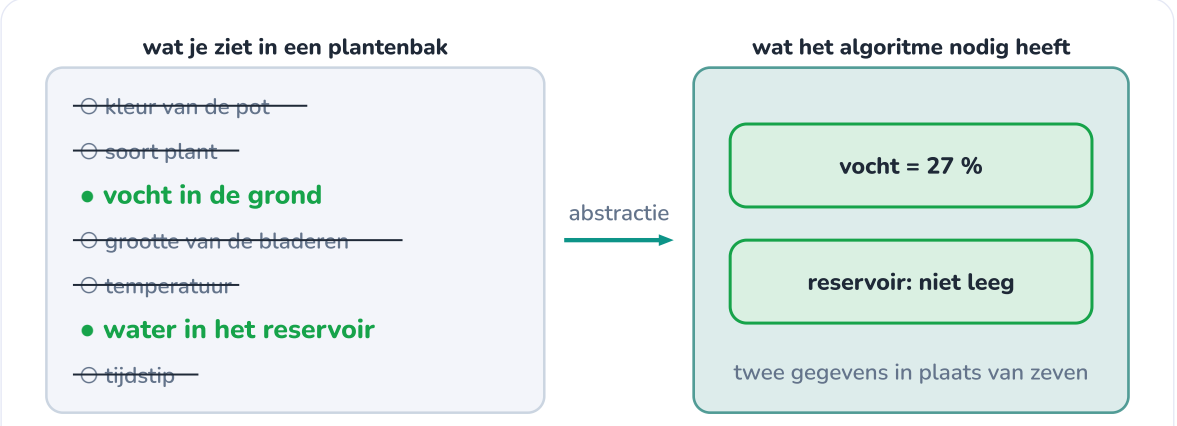
Patroonherkenning. Kijk nog eens naar de boom van het vorige blad. Water, licht en temperatuur werken alle drie op dezelfde manier: *meet* iets, *vergelijk* het met een grens, *schakel* iets aan of uit. Wie dat patroon ziet, hoeft het maar één keer goed uit te denken en kan het drie keer gebruiken. In hoofdstuk 25 krijgt dat patroon een naam: meten, beslissen, doen.

Abstractie. Een echte plantenbak heeft honderd eigenschappen: de kleur van de pot, de soort plant, de vorm van de bladeren. Voor het algoritme 'water geven' tellen er maar twee: hoe vochtig de grond is, en of er water in het reservoir zit. De rest laat je weg. Dat is geen slordigheid, het is net de kunst: een goede abstractie maakt een probleem eenvoudig zonder dat je iets belangrijks verliest.

Je kent abstracties al: een metrokaart toont de stations op rechte lijnen, zonder straten en zonder de echte afstanden. Voor een reiziger is dat net handiger dan een echte kaart (de schematische kaart van de Londense metro, ontworpen door Harry Beck, verscheen in 1933). Ook een schakelschema (hoofdstuk 18) is een abstractie: het toont verbindingen, niet hoe de draden echt lopen.

⚠ Te veel weglaten kan ook

Laat je 'water in het reservoir' weg, dan pompt de kas ook als het reservoir leeg is: de pomp draait droog en gaat stuk. Een abstractie is goed als ze alles bevat wat de beslissing kan veranderen.



Van zeven eigenschappen blijven er twee over die het algoritme echt nodig heeft.

Algoritmen in het dagelijks leven

Een **algoritme** is een stappenplan met vier eigenschappen:

- **eenduidig**: elke stap kan maar op één manier begrepen worden ('bak de pannenkoek tot hij goudbruin is' is voor een mens duidelijk genoeg, voor een machine niet);
- **vaste volgorde**: de stappen staan in de juiste volgorde, en bij een keuze staat er wat je doet bij 'ja' en bij 'nee';
- **eindig**: het algoritme stopt na een eindig aantal stappen (behalve als het met opzet eindeloos doorgaat, zoals een thermostaat);
- **invoer en uitvoer**: het krijgt gegevens binnen en levert een resultaat.

algoritme	invoer	stappen	uitvoer
recept voor pannenkoeken	bloem, melk, eieren	mengen, rusten, bakken, keren	pannenkoeken
route van een gps	vertrekpunt, bestemming, kaart	zoek de kortste weg langs de wegen	de route
kaarten sorteren	een stapel kaarten	zoek telkens de kleinste en leg hem vooraan	een gesorteerde rij
staartdeling	deeltal en deler	schatten, vermenigvuldigen, aftrekken, cijfer bijhalen	quotiënt en rest

Een gps kiest de kortste route door telkens de weg uit te breiden die tot nu toe het kortst is, tot hij de bestemming bereikt. Een sorteeralgoritme zet een stapel in volgorde. Die algoritmen werken voor elke kaart en elke stapel: dat bedoelen we met 'een stappenplan dat altijd werkt'.

> ⚠ **Een recept is (bijna) een algoritme**
>
> 'Voeg een snuifje zout toe' en 'bak tot goudbruin' zijn voor een kok duidelijk, maar niet eenduidig. Een machine heeft een getal nodig ('2 g zout') of een meting ('bak tot de onderkant 160 °C heeft'). Hoe preciezer, hoe dichter bij een echt algoritme.



Een recept is een stappenplan met invoer (de ingrediënten), stappen in volgorde en uitvoer.

UITGEWERKT VOORBEELD · 22.7

Kaarten sorteren met een algoritme

7/16

Sorteer de kaarten 7, 3, 9, 1, 5 van klein naar groot met **selectiesorteren**: zoek in het ongesorteerde deel de kleinste kaart en wissel ze met de eerste kaart van dat deel. Hoeveel keer vergelijk je twee kaarten? En hoeveel keer bij 100 kaarten?



Na elke ronde staat er één kaart meer op haar plaats (groen); na vier rondes liggen vijf kaarten juist.

GEGEVEN

- rij: 7, 3, 9, 1, 5
- regel: zoek de kleinste in het ongesorteerde deel en wissel naar voren

GEVRAAGD

- de rij na elke ronde
- het aantal vergelijkingen voor 5 en voor 100 kaarten

OPLOSSING

1. **Ronde 1.** Zoek de kleinste van 7, 3, 9, 1, 5: dat is 1 (4 vergelijkingen). Wissel met 7: 1, 3, 9, 7, 5.
2. **Ronde 2.** Kleinste van 3, 9, 7, 5: dat is 3 (3 vergelijkingen). Hij staat al vooraan: niets wisselen.
3. **Ronde 3.** Kleinste van 9, 7, 5: dat is 5 (2 vergelijkingen). Wissel met 9: 1, 3, 5, 7, 9.
4. **Ronde 4.** Kleinste van 7, 9: dat is 7 (1 vergelijking). De laatste kaart staat dan vanzelf goed.
5. **Tellen.** $4 + 3 + 2 + 1 = 10$ vergelijkingen. Voor 100 kaarten: $99 + 98 + \cdots + 1 = 4950$.

ANTWOORD

Na vier rondes: 1, 3, 5, 7, 9. Dat kost 10 vergelijkingen; voor 100 kaarten 4950.

Klopt dit? Na elke ronde staat er één kaart meer definitief op haar plaats, dus na $n - 1$ rondes is alles gesorteerd. Merk op dat het aantal vergelijkingen veel sneller groeit dan het aantal kaarten: 20 keer meer kaarten, bijna 500 keer meer werk. Er bestaan slimmere sorteeralgoritmen; hoe snel een algoritme is, bestudeer je op Expert-niveau.

UITLEG · 22.8

Het stroomdiagram

8/16

Een algoritme in genummerde zinnen wordt snel onoverzichtelijk zodra er keuzes en herhalingen in zitten. Daarom teken je het als **stroomdiagram**, met vaste symbolen die iedereen kent:

symbool	betekenis	voorbeeld
afgeronde rechthoek (ovaal)	start of stop	Start

symbool	betekenis	voorbeeld
rechthoek	handeling: doe iets	zet de pomp aan
ruit	beslissing: een vraag met ja of nee	vocht < 30 %?
parallellogram	invoer of uitvoer: meet, lees, toon	meet het vocht
pijl	de volgorde: wat komt erna	

Vijf afspraken maken een stroomdiagram leesbaar:

1. Er is precies één **Start**.
2. Uit een ruit vertrekken altijd **twee** pijlen, met 'ja' en 'nee' erbij.
3. Uit een rechthoek of parallellogram vertrekt precies één pijl.
4. Een pijl die terugloopt naar een eerder punt maakt een **lus** (herhaling).
5. Lees van boven naar onder; kruisende pijlen vermijd je.

Een vraag die met ja of nee eindigt

Schrijf in een ruit altijd een vraag die je met ja of nee kan beantwoorden: 'vocht < 30 %?', niet 'vocht'. Zo zie je meteen welke pijl bij welk antwoord hoort.



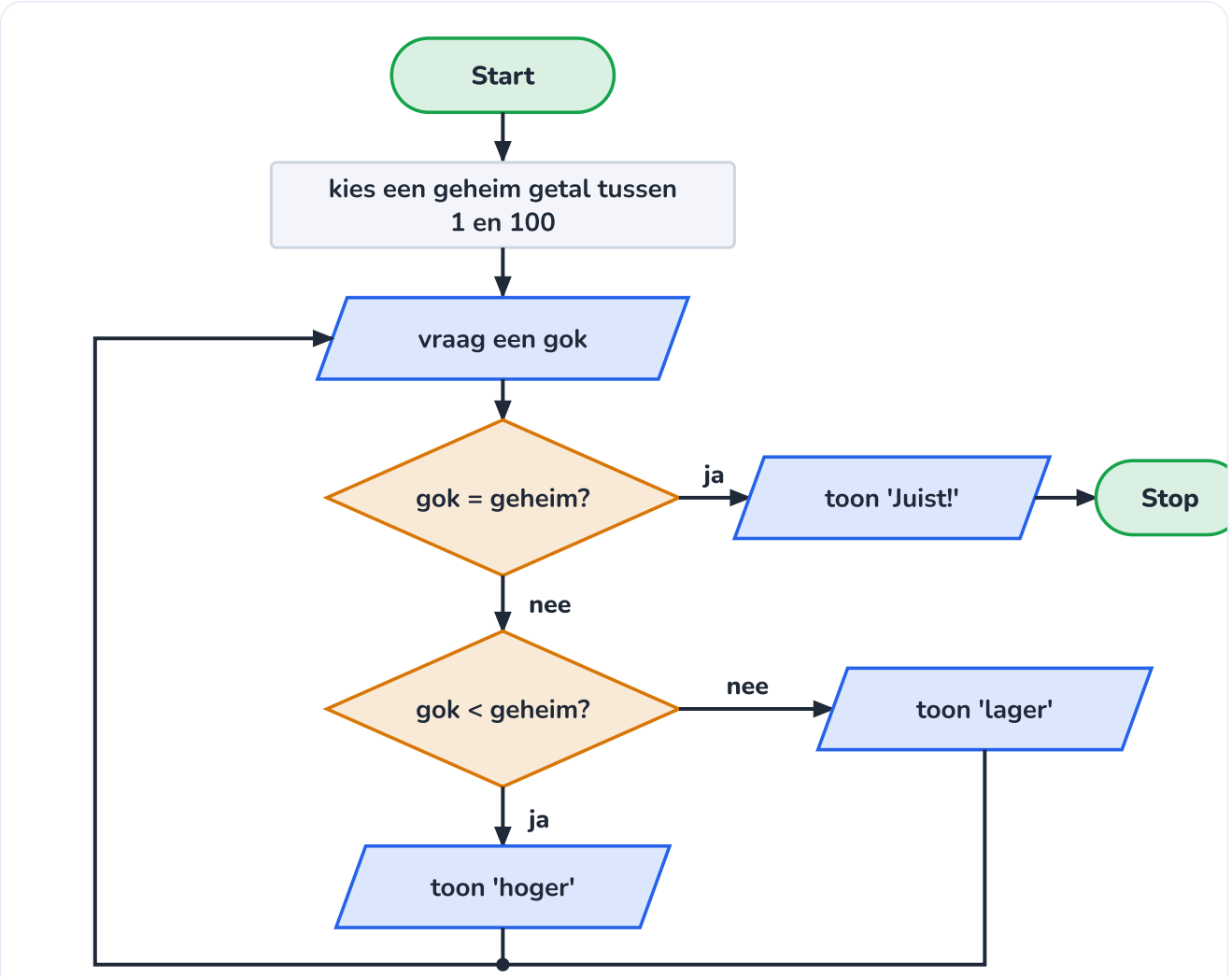
Vijf symbolen volstaan voor elk algoritme in dit hoofdstuk.

UITGEWERKT VOORBEELD · 22.9

Raad het getal als stroomdiagram

9/16

In het spel *raad het getal* kiest de computer een geheim getal van 1 tot 100. De speler raadt; de computer antwoordt 'hoger', 'lager' of 'Juist!'. Teken het algoritme van de computer als stroomdiagram.



De lus loopt terug naar de vraag; alleen het antwoord 'Juist!' leidt naar Stop.

GEGEVEN

- geheim getal van 1 tot 100
- antwoorden: 'hoger', 'lager', 'Juist!'

GEVRAAGD

- stroomdiagram met de juiste symbolen

OPLOSSING

1. **Decompositie.** Wat doet de computer? (1) een getal kiezen; (2) een gok vragen; (3) de gok vergelijken; (4) een antwoord tonen; (5) opnieuw beginnen bij (2), tot het getal geraden is.
2. **Symbolen kiezen.** Kiezen is een handeling (rechthoek). Een gok vragen en een antwoord tonen zijn invoer en uitvoer (parallellogram). Vergelijken is een beslissing (ruit).
3. **Twee vragen na elkaar.** Eén ruit kan maar twee uitgangen hebben, en er zijn drie antwoorden. Daarom vraag je eerst 'gok = geheim?' en pas bij 'nee' 'gok < geheim?'.
4. **De lus.** Na 'hoger' of 'lager' loopt de pijl terug naar 'vraag een gok'. Het algoritme stopt alleen bij 'Juist!'.

ANTWOORD

Zie de figuur: Start, kies een geheim getal, vraag een gok, twee beslissingen na elkaar, drie mogelijke uitvoeren, en een lus terug naar de vraag tot het getal geraden is.

Klopt dit? Speel het na met een geheim getal, bijvoorbeeld 71 en de gokken 50 en 71: 50 → nee → 50 < 71 → ja → 'hoger' → terug; 71 → ja → 'Juist!' → Stop. Elke pijl uit een ruit heeft een label, en er is geen pad dat nergens heen gaat.

UITGEWERKT VOORBEELD · 22.10

Naspelen met een trace-tabel: slim raden

10/16

Er bestaat een slimme manier om te raden: gok telkens het **midden** van wat nog mogelijk is. Speel die strategie na voor het geheime getal 71. Hoeveel pogingen heb je nodig? En hoeveel hoogstens, voor elk getal van 1 tot 100?

GEGEVEN

- ondergrens 1, bovengrens 100
- gok = midden van onder- en bovengrens (naar beneden afgerond)
- bij 'hoger': ondergrens = gok + 1; bij 'lager': bovengrens = gok − 1

GEVRAAGD

- trace-tabel voor het geheime getal 71
- het grootste aantal pogingen voor 1 tot 100

OPLOSSING

1 Maak een tabel met een kolom voor elke **variabele** (een naam met een waarde die kan veranderen): ondergrens, bovengrens en gok. Na elke stap schrijf je de nieuwe waarden op een nieuwe rij.

2 Poging 1: $(1 + 100) : 2 = 50{,}5$, dus 50. Het antwoord is 'hoger': de ondergrens wordt 51.

3 Poging 2: $(51 + 100) : 2 = 75{,}5$, dus 75: 'lager', de bovengrens wordt 74. Zo verder, zie de tabel.

4 Elke poging halveert (ongeveer) het aantal getallen dat nog kan: 100, 50, 25, 12, 6, 3, 1. Na 7 halveringen blijft er één getal over. Omgekeerd: $2^7 = 128$ is het eerste tweemacht groter dan 100.

5

POGING	ONDERGRENS	BOVENGRENS	GOK = MIDDEN	ANTWOORD
1	1	100	(1 + 100) : 2 → **50**	hoger
2	51	100	(51 + 100) : 2 → **75**	lager
3	51	74	(51 + 74) : 2 → **62**	hoger
4	63	74	(63 + 74) : 2 → **68**	hoger
5	69	74	(69 + 74) : 2 → **71**	**juist!**

Geheim getal: 71. Bij een oneven som rond je naar beneden af.

ANTWOORD

Voor 71: vijf pogingen (50, 75, 62, 68, 71). Voor elk getal van 1 tot 100 volstaan hoogstens 7 pogingen. Wie gewoon 1, 2, 3, … probeert, heeft er soms 100 nodig.

Klopt dit? De onder- en bovengrens komen na elke rij dichter bij elkaar en het geheime getal ligt er altijd tussen: 71 ligt tussen 51 en 100, tussen 51 en 74, tussen 63 en 74, tussen 69 en 74. Dit slimme raden heet **binair zoeken**; het zit in elke computer die snel iets opzoekt in een gesorteerde lijst.

UITLEG · 22.11

Fouten zoeken: debuggen op papier

11/16

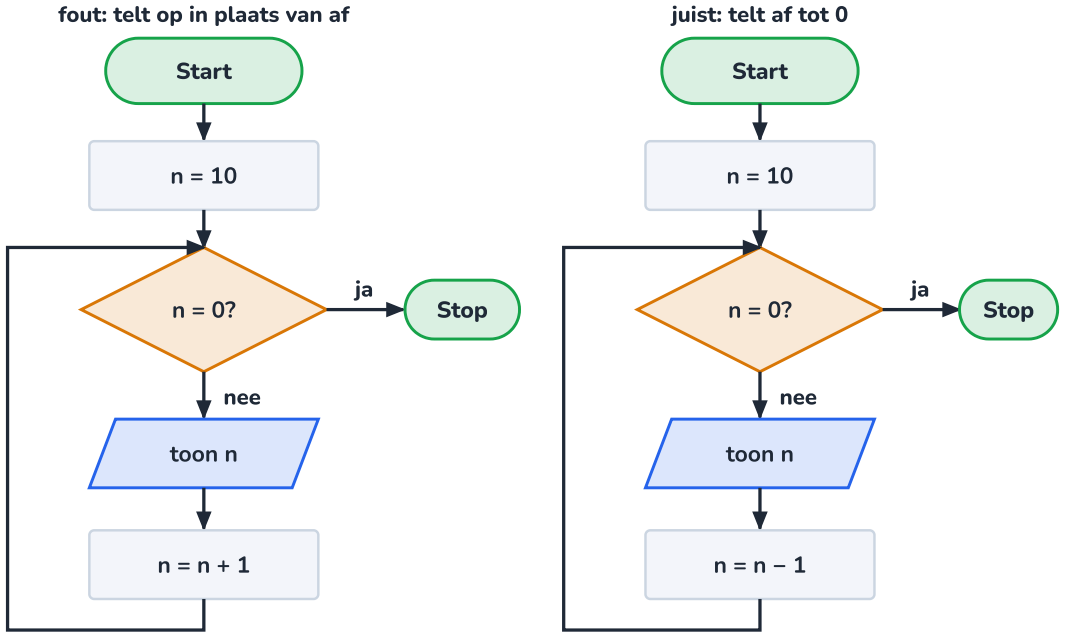
Een fout in een algoritme heet een **bug**, het zoeken en verbeteren **debuggen**. De krachtigste methode kost niets: speel het algoritme na met een trace-tabel en kijk waar het iets anders doet dan je verwacht. Vijf fouten komen steeds terug:

soort fout	voorbeeld	zo vind je ze
verkeerde volgorde	eerst pompen, dan meten	vraag bij elke stap: weet ik al wat ik hier nodig heb?
ontbrekende stap	de teller nooit op 0 zetten	kijk of elke variabele een beginwaarde krijgt
oneindige lus	de voorwaarde om te stoppen wordt nooit waar	kijk of de lus de variabele in de juiste richting verandert
verkeerde vergelijking	< waar ≤ moest, of een grensgeval vergeten	test precies op de grens: wat gebeurt er bij 30 %?
pijl die nergens heen gaat	een ruit met maar één uitgang	tel de pijlen: twee uit elke ruit

In de figuur moet het algoritme aftellen van 10 naar 0. Speel het links na: n wordt 10, 11, 12, 13 … en de vraag 'n = 0?' is nooit ja. Het algoritme stopt nooit: een **oneindige lus**. Rechts is één teken verbeterd: n = n − 1. Nu toont het 10, 9, …, 1 en stopt het bij 0.

De computer doet wat je bedoelt

Nee: hij doet wat je *schrijft*. Een computer ziet niet dat 'n = n + 1' een vergissing is. Hij telt vrolijk verder, miljoenen keren per seconde. Daarom test je elk algoritme met gewone gevallen, met grensgevallen (precies 30 %) en met rare gevallen (een lege lijst, een sensor die 0 geeft).



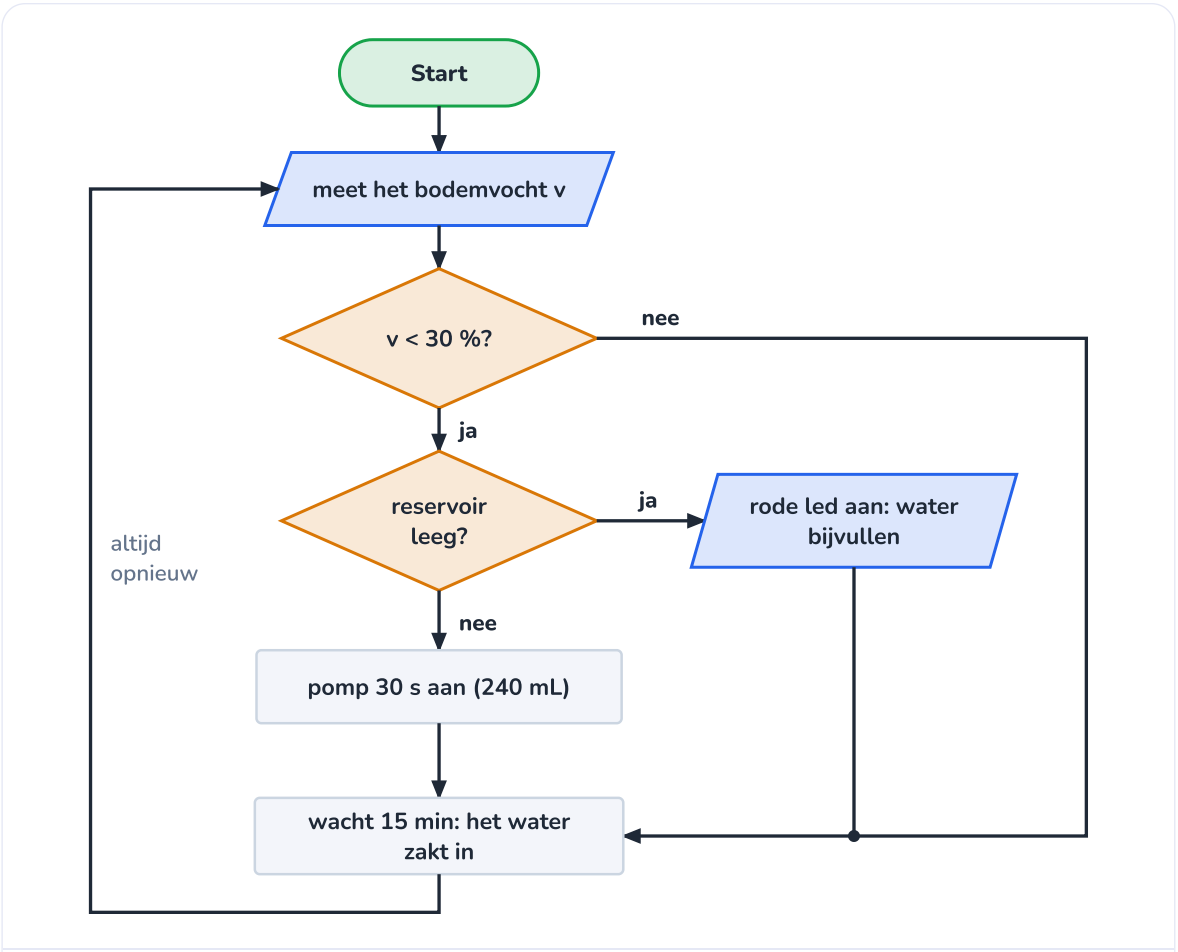
Links een oneindige lus: n wordt nooit 0. Rechts de verbetering met één ander teken.

UITGEWERKT VOORBEELD · 22.12

Habitat: het algoritme 'water geven'

12/16

De meetkas moet zelf water geven. Er is een bodemvochtsensor in een van de bakjes, een pompje dat 8,0 mL/s levert (hoofdstuk 4) en een reservoir met een vlotter die meldt of het leeg is. Het water heeft na het gieten een tijd nodig om naar de sensor te zakken. Ontwerp het algoritme en speel een ochtend na.



Het algoritme dat de meetkas zal uitvoeren. In hoofdstuk 23 simuleer je het, in hoofdstuk 25 draait het op een microcontroller.

GEGEVEN

- drempel: water geven onder 30 % bodemvocht
- pompje 8,0 mL/s
- vlotter: reservoir leeg ja/nee
- na het gieten 15 min wachten voor je opnieuw meet

GEVRAAGD

- stroomdiagram
- hoeveel water per beurt als de pomp 30 s draait
- trace van een ochtend

OPLOSSING

1. **Decompositie.** Meten, beslissen, reservoir controleren, pompen, wachten, opnieuw.
2. **Abstractie.** Twee gegevens: het vocht v en 'reservoir leeg ja/nee'.
3. **Volgorde.** Eerst meten, dan beslissen. Het reservoir controleer je vóór je pompt, anders draait de pomp droog (in de kas beveiligt een vlotterschakelaar in serie met de pomp dat ook elektrisch, hoofdstuk 18).
4. **Pompbeurt.** $30\,\text{s} \times 8{,}0\,\text{mL/s} = 240\,\text{mL}$, verdeeld over 12 bakjes: 20 mL per bakje. Voor 1,8 L per dag zijn dat $1800/240 = 7{,}5$ beurten per dag.
5. **De lus.** Na elke beslissing wacht het algoritme 15 minuten en begint het opnieuw. Deze lus stopt met opzet nooit: de kas werkt dag en nacht. Een eindeloze lus is hier dus geen bug.
6. **Trace van een ochtend.** In dit voorbeeld daalt het vocht ongeveer 1 procentpunt per kwartier; een pompbeurt maakt de grond ongeveer 16 procentpunten natter.

7	TIJD	V (%)	V < 30 %?	RESERVOIR LEEG?	ACTIE
	07:00	32	nee	(niet gevraagd)	wacht 15 min
	07:15	31	nee	(niet gevraagd)	wacht 15 min
	07:30	30	nee	(niet gevraagd)	wacht 15 min
	07:45	29	**ja**	nee	**pomp 30 s**, wacht 15 min
	08:00	44	nee	(niet gevraagd)	wacht 15 min

ANTWOORD

Zie het stroomdiagram: meet, vergelijk met 30 %, controleer het reservoir, pomp 30 s (240 mL), wacht 15 min, opnieuw. Om 07:45 zakt het vocht onder 30 % en pompt de kas één keer.

Klopt dit? Test de grensgevallen: bij precies 30 % is 'v < 30 %?' nee, dus geen water; bij 29 % wel. Test ook het rare geval: reservoir leeg en grond droog → de rode led gaat aan en de pomp blijft uit. Zonder de wachttijd zou de kas bij 29 % meteen opnieuw meten, nog geen verschil zien en blijven pompen tot de bakjes overlopen.

UITLEG · 22.13

Een vaste regel of leren uit voorbeelden?

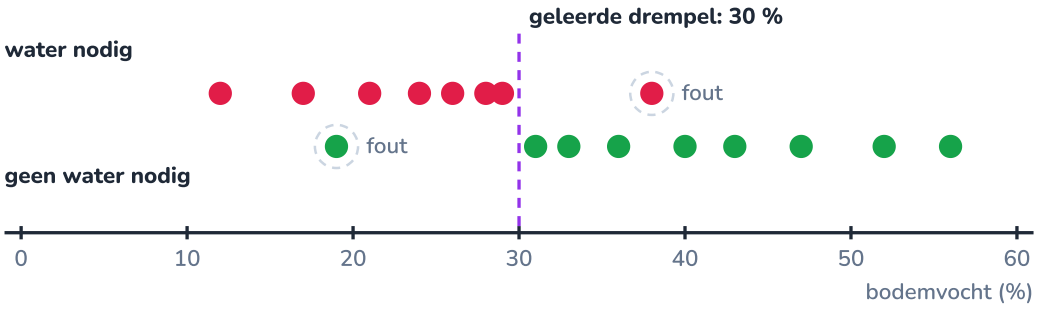
13/16

Tot nu toe schreef een mens de regel: 'geef water als het vocht lager is dan 30 %'. Maar waar komt die 30 % vandaan? Misschien weet een ervaren tuinier het niet als getal, maar ziet hij het wel aan de plant. Dan kan je het ook anders aanpakken: laat de computer de regel **leren uit voorbeelden**.

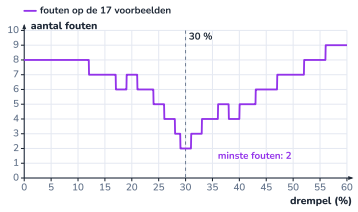
De tuinier meet zeventien keer het bodemvocht en zegt telkens of de plant op dat moment water nodig had. Zo'n voorbeeld met het juiste antwoord erbij heet een **gelabeld voorbeeld**. De computer probeert dan elke mogelijke drempel en telt hoeveel voorbeelden de regel 'water als vocht < drempel' fout voorspelt. Hij houdt de drempel met de **minste fouten**. Dat is **machinaal leren** in zijn eenvoudigste vorm.

In de grafiek zie je het resultaat: met een drempel van 10 % zijn er 8 fouten (alle droge planten krijgen geen water), met 60 % zijn er 9 (alle natte planten krijgen toch water). Het minimum, 2 fouten, ligt tussen 29 en 31 %: de computer kiest het midden, **30 %**. Twee voorbeelden blijven fout: een plant die bij 38 % toch dorst had (ze stond in de volle zon) en een die bij 19 % nog niet klaagde. Geen enkele drempel krijgt alles juist.

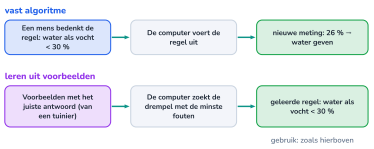
Testen. Of de geleerde regel deugt, weet je pas met *nieuwe* voorbeelden die de computer nooit gezien heeft. Van zes nieuwe metingen (15, 27 en 32 % met dorst; 34, 45 en 50 % zonder) voorspelt de regel er vijf juist: de plant met dorst bij 32 % krijgt geen water.



Rood: de plant had water nodig; groen: niet. De drempel van 30 % scheidt ze het best, met twee fouten.



Leren is hier zoeken: voor elke drempel het aantal fouten tellen en de laagste kiezen.



Twee wegen naar dezelfde regel: bedenken of leren. Gebruikt wordt ze op dezelfde manier.

UITLEG · 22.14

Wat AI wel en niet is

14/16

Artificiële intelligentie (AI) is een verzamelnaam voor computersystemen die taken doen waarvoor mensen hun verstand gebruiken: een gezicht herkennen, een tekst vertalen, een route voorspellen. Bijna alle moderne AI werkt met machinaal leren, zoals de drempel hierboven, maar dan met duizenden tot miljarden getallen tegelijk, geleerd uit enorme hoeveelheden voorbeelden.

	vast algoritme	systeem dat leert uit voorbeelden
wie maakt de regel?	een mens	de computer, uit voorbeelden met het juiste antwoord
wat heb je nodig?	kennis van het probleem	veel goede, gelabelde voorbeelden
kan je uitleggen waarom?	ja, de regel staat er	bij één drempel wel; bij grote AI-systemen vaak niet
wanneer het beste?	als je de regel kent en ze eenvoudig is	als de regel te ingewikkeld is om op te schrijven (een ziek blad herkennen op een foto)
typische fout	een vergeten geval in de regel	slechte of eenzijdige voorbeelden: het systeem leert de fout mee

Drie dingen om te onthouden:

- **Een lerend systeem is zo goed als zijn voorbeelden.** Zijn de voorbeelden slordig of eenzijdig (allemaal uit de zomer, allemaal van één soort plant), dan leert het die fout mee.
- **Het maakt fouten, ook als het zeker lijkt.** Ook de beste drempel had hier 2 fouten op 17. Een AI-systeem zegt zelden 'ik weet het niet'.
- **Het begrijpt niet wat het doet.** De computer weet niet wat een plant of water is; hij zoekt een getal dat de voorbeelden zo goed mogelijk scheidt. Een mens blijft verantwoordelijk voor wat er met de uitkomst gebeurt.

> **AI denkt zoals een mens**
>
> Een AI-systeem dat een ziek blad herkent op een foto, heeft geleerd welke patronen van pixels vaak samengaan met het label 'ziek'. Het weet niets van schimmels of plantencellen. Het kan daardoor dingen zien die een mens mist, maar ook domme fouten maken die een mens nooit zou maken, bijvoorbeeld als de foto van een andere camera komt dan de voorbeelden.

Voor de meetkas is de vaste regel de beste keuze: ze is eenvoudig, uit te leggen en te controleren. Lerende systemen komen terug in Intermediate (een beslisboom die voorspelt of de planten water nodig hebben) en in Expert (neurale netwerken).



Een ziek blad herkennen is moeilijk als vaste regel te schrijven: hier kan een lerend systeem helpen, als de voorbeelden goed zijn.

NASLAG · 22.15

Overzicht: computationeel denken

15/16

De gereedschappen, de symbolen en de regels om een algoritme na te spelen en te verbeteren.

gereedschap	vraag die je stelt	resultaat
decompositie	Uit welke deelproblemen bestaat dit?	een boom van kleine taken
patroonherkenning	Wat komt telkens terug?	één oplossing die je vaker gebruikt (een lus)
abstractie	Welke gegevens veranderen de beslissing?	een eenvoudig model
algoritme	Welke stappen, in welke volgorde?	een stappenplan of stroomdiagram

symbool	betekenis	pijlen eruit
ovaal	start of stop	Start: 1; Stop: 0
rechthoek	handeling	1
ruit	beslissing (ja/nee-vraag)	2, met 'ja' en 'nee'
parallellogram	invoer of uitvoer	1

naspelen met een trace-tabel	debuggen
één kolom per variabele (en eventueel voor de uitvoer)	speel na en vergelijk met wat je verwacht
één nieuwe rij na elke stap die iets verandert	test gewone gevallen, grensgevallen en rare gevallen

naspelen met een trace-tabel	debuggen
schrijf elke waarde op, ook als ze niet verandert	verander één ding tegelijk en test opnieuw

HET GEHEEL · 22.16

Waar computationeel denken naartoe leidt

16/16

Dit hoofdstuk is het begin van de leerlijn **programmeren en computationeel denken**. Alles wat volgt, van blokken tot Python en C++, is een manier om een algoritme op te schrijven voor een machine. Het raakt ook de leerlijn **wiskundig modelleren** (abstractie is modelleren; tweemachten tellen de stappen van binair zoeken) en de leerlijn **data en AI**: je zag hoe een regel geleerd wordt uit gelabelde voorbeelden, en waarom goede voorbeelden zo belangrijk zijn.

F1 Wat is STEM?
Systeemdenken: invoer, proces, uitvoer en terugkoppeling, de basis van elk algoritme dat iets bestuurt.

F2 Onderzoeken: van vraag tot besluit
Debuggen is onderzoeken: één ding veranderen, testen, besluiten.

F18 De elektrische kring
Schakelaars in serie en parallel zijn EN en OF: dezelfde logica als twee ruiten na elkaar.

F23 Programmeren met blokken
Van stroomdiagram naar blokprogramma: raad het getal en een simulatie van de kas in Scratch.

F25 Sensoren en automatisch regelen
Het algoritme 'water geven' draait echt, met een sensor, een relais en een pomp.

I27 Python: de basis
Dezelfde algoritmen in tekst: if, while en for in Python.

I39 Data visualiseren en eerste stappen in AI
Trainen en testen, een beslisboom die leert of de planten water nodig hebben, en bias in data.

E34 Algoritmen en complexiteit
Hoe snel is een algoritme? Sorteren en zoeken met de O-notatie.

E42 Classificatie en clustering
Machinaal leren met veel kenmerken tegelijk, en hoe je meet hoe goed een model is.

Habitat
Het algoritme 'water geven' is het hart van de automatische meetkas: meet het bodemvocht, geef 30 s water (240 mL) als het onder 30 % zakt en het reservoir niet leeg is, en wacht 15 minuten. In hoofdstuk 23 test je het in een simulatie, in hoofdstuk 24 bouw je het statuslampje, en in hoofdstuk 25 draait het op de microcontroller. Opdracht 22.12 voegt een foutdetectie toe.

SAMENVATTING

In het kort

- Computationeel denken gebruikt vier gereedschappen: decompositie (opdelen), patroonherkenning (herhalingen zien), abstractie (weglaten wat niet telt) en algoritme (een stappenplan).
- Een algoritme is eenduidig, heeft een vaste volgorde, stopt (tenzij het met opzet eindeloos doorgaat) en zet invoer om in uitvoer.
- Een stroomdiagram gebruikt een ovaal (start/stop), rechthoek (handeling), ruit (beslissing met ja en nee) en parallellogram (invoer/uitvoer); een pijl terug maakt een lus.
- Met een trace-tabel speel je een algoritme stap voor stap na: één kolom per variabele, één rij per stap.
- Veelvoorkomende bugs: verkeerde volgorde, ontbrekende beginwaarde, oneindige lus, verkeerde vergelijking op de grens, een ruit met één uitgang.
- Een vaste regel schrijft een mens; bij machinaal leren zoekt de computer de regel met de minste fouten op gelabelde voorbeelden. Een

lerend systeem is zo goed als zijn voorbeelden en begrijpt niet wat het doet.

- De meetkas geeft 30 s water (240 mL) als het bodemvocht onder 30 % zakt en het reservoir niet leeg is, en wacht dan 15 minuten.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

computationeel denken
Een probleem zo opdelen, vereenvoudigen en beschrijven dat een computer (of een mens) het met een stappenplan kan oplossen.

decompositie
Een groot probleem opdelen in kleinere deelproblemen die je apart kan oplossen.

patroonherkenning
Zien welke stappen of situaties telkens terugkomen, zodat je één oplossing vaker kan gebruiken.

abstractie
Alleen de gegevens overhouden die voor het probleem tellen, en de rest weglaten.

algoritme
Een eindig, eenduidig stappenplan dat bij dezelfde invoer altijd tot dezelfde uitkomst leidt.

stroomdiagram
Tekening van een algoritme met vaste symbolen: ovaal (start/stop), rechthoek (handeling), ruit (beslissing), parallellogram (invoer/uitvoer) en pijlen.

lus
Een deel van een algoritme dat herhaald wordt, tot een voorwaarde bereikt is (of altijd).

trace-tabel
Tabel waarin je bij het naspelen van een algoritme na elke stap de waarde van de variabelen noteert.

bug
Een fout in een algoritme of programma; debuggen is die fout opsporen en verbeteren.

machinaal leren
Een computer zoekt zelf een regel uit voorbeelden waarvan het juiste antwoord gegeven is (gelabelde voorbeelden).

artificiële intelligentie (AI)
Verzamelnaam voor computersystemen die taken doen waarvoor mensen intelligentie gebruiken; de meeste moderne AI werkt met machinaal leren.

F FUNDAMENTAL · DEEL F6 · PROGRAMMEREN EN AUTOMATISEREN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 23

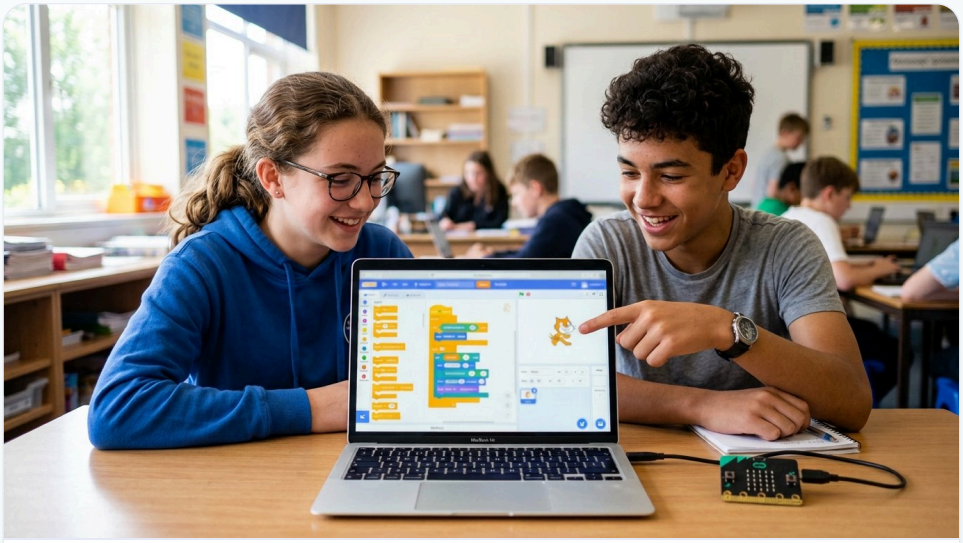
Programmeren met blokken

Sequentie, herhaling, keuze en variabelen: programmeren door blokken te stapelen

In het vorige hoofdstuk tekende je algoritmen op papier. Nu voer je ze uit op een computer. Met **blokken** programmeer je zonder typfouten: elk blok is een commando, en ze passen alleen in elkaar als het klopt. Je leert de bouwstenen van elk programma kennen (volgorde, herhaling, keuze, variabelen en gebeurtenissen), je zet een stroomdiagram om in blokken en je jaagt op bugs. Tot slot bouw je een simulatie van de meetkas, zodat je het algoritme 'water geven' kan testen voor er één druppel water valt.

6× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · 1× code · ± 7 lestijden

P Programmeren en computationeel denken



Blokken stapelen tot een programma: een fout typen kan niet, een fout denken wel.

Na dit hoofdstuk

- Je kan de soorten blokken (hoed-, stapel-, C-, waarde-, ja/nee- en eindblok) herkennen en hun categorie benoemen.
- Je kan een programma bouwen met een sequentie, een herhaling (herhaal, herhaal tot, eindeloos) en een keuze (als … dan … anders).
- Je kan een variabele gebruiken als teller: een beginwaarde geven, verhogen of verlagen, en de waarde gebruiken.
- Je kan uitleggen wat een gebeurtenis is en scripts laten samenwerken met signalen.
- Je kan een stroomdiagram omzetten in een blokprogramma en omgekeerd.
- Je kan een programma naspelen en fouten vinden en verbeteren (debuggen), met een trace-tabel en door één ding tegelijk te veranderen.
- Je kan het algoritme 'water geven' testen in een simulatie van de meetkas in blokken.

VERHAAL · 23.1

Programmeren zonder te typen

1/16

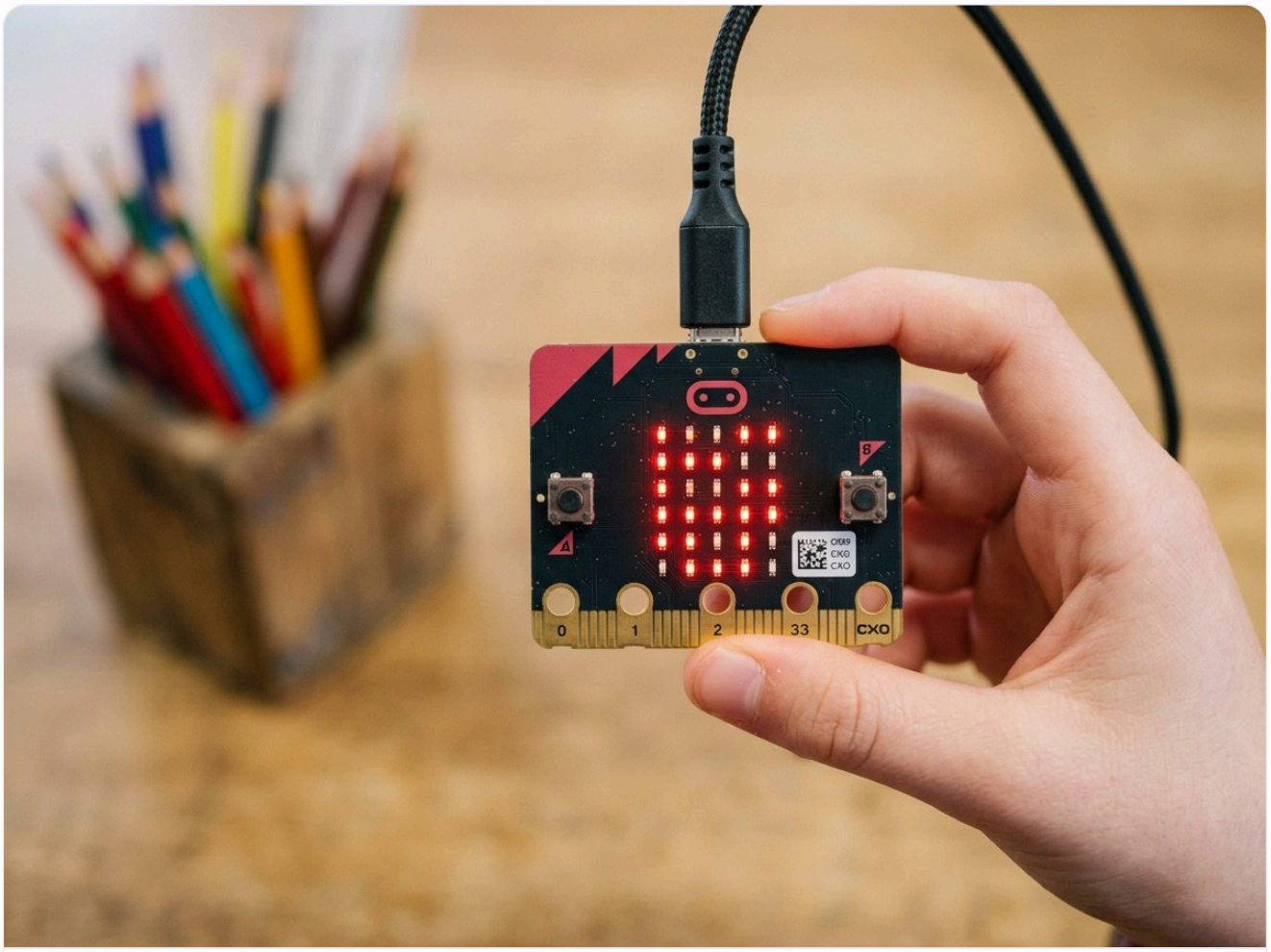
Lang was programmeren iets voor wie foutloos lange regels tekst kon typen, met haakjes, puntkomma's en woorden als `while`. Eén vergeten teken en het programma werkte niet. In het Media Lab van het MIT in Boston zocht een groep rond Mitchel Resnick een manier om kinderen te laten programmeren zoals ze

met bouwstenen spelen. In mei 2007 ging **Scratch** online: commando's zijn gekleurde blokken die als puzzelstukken in elkaar klikken. Een blok dat niet past, klikt niet vast. De huidige versie, Scratch 3.0, verscheen op 2 januari 2019. Scratch is gratis, bestaat in tientallen talen (ook het Nederlands) en wordt wereldwijd gebruikt door tientallen miljoenen jongeren.

Het idee sloeg aan. Google maakte met Blockly een bibliotheek om zelf blokeditors te bouwen, en Microsoft bouwde daarmee **MakeCode**. In 2016 kregen ongeveer een miljoen Britse leerlingen een **BBC micro:bit**, een klein bordje met 25 lampjes, twee knoppen en sensoren, dat je met MakeCode in blokken programmeert. Voor de Arduino bestaan dan weer blokeditors zoals mBlock.

Blokken zijn echt programmeren

Achter elk blok zit gewone programmacode. In MakeCode kan je met één klik wisselen tussen blokken en JavaScript of Python. Wat je hier leert (volgorde, lussen, keuzes, variabelen), gebruik je later in elke programmeertaal: in Python (Intermediate, hoofdstuk 27) en in C++ voor de Arduino (hoofdstuk 24 en Intermediate, hoofdstuk 29).



Een micro:bit: een kleine computer die je in blokken programmeert.

ONTLEED · 23.2

De blokken van Scratch

2/16

Een Scratch-programma bestaat uit **sprites** (figuurtjes op het **speelveld**) met elk hun eigen **scripts**. De blokken zitten in categorieën met een eigen kleur: **Beweging** (blauw), **Uiterlijken** (paars), **Geluid** (roze), **Gebeurtenissen** (geel), **Besturen** (oranje), **Waarnemen** (lichtblauw), **Functies** (groen), **Variabelen** (donkeroranje) en **Mijn blokken** (rood). De **vorm** van een blok zegt waar het past.



Dit script telt tien keer 1 bij de score; vanaf 6 zegt de sprite telkens de score. Daarna stopt alles.

1 Hoedblok
Staat bovenaan en start het script als er iets gebeurt (hier: een klik op de groene vlag). Er kan niets boven.

2 Stapelblok
Een gewoon commando. De inkeping bovenaan en het nokje onderaan klikken in de blokken erboven en eronder.

3 C-blok
Heeft een mond waarin andere blokken passen: herhaal, herhaal tot, als ... dan. Het pijltje rechtsonder toont een lus.

4 Invoervak
Een wit vak waarin je een getal of tekst typt. Je kan er ook een rond blok in slepen.

5 Ja/nee-blok
Zeshoekig: een voorwaarde die waar of niet waar is. Past alleen in een zeshoekige opening (als, herhaal tot, wacht tot).

6 Waardeblok
Rond: geeft een getal of tekst terug, zoals de waarde van een variabele. Past in elk rond of wit vak.

7 Eindblok
Onderaan plat: er kan niets meer onder. 'stop alle' beëindigt alle scripts.

UITLEG · 23.3

Sequentie: de volgorde telt

3/16

De eenvoudigste structuur is de **sequentie**: de blokken worden van boven naar onder uitgevoerd, één na één. Een blok begint pas als het vorige klaar is. Bij 'zeg Hallo! 2 sec.' wacht het script dus twee seconden voor het volgende blok aan de beurt is.

Script A en script B bevatten dezelfde vier blokken, in een andere volgorde. De sprite start ergens op het speelveld. Script A zet ze eerst in het midden (x = 0, y = 0), zegt 'Hallo!' en loopt dan 100 stappen naar rechts: ze eindigt op x = 100. Script B loopt eerst 100 stappen vanaf waar ze toevallig stond, zegt daar 'Hallo!' en springt dan naar het midden: ze eindigt op x = 0. Zelfde blokken, ander resultaat.

Het speelveld

Het speelveld van Scratch is 480 stappen breed en 360 hoog. Het midden is x = 0, y = 0; rechts is x positief, boven is y positief. Eén stap is één beeldpunt.

script A



script B



Dezelfde blokken, andere volgorde: A eindigt op x = 100, B in het midden.

UITLEG · 23.4

Herhaling: herhaal, herhaal tot en eindeloos

4/16

Wie een vierkant wil lopen, herhaalt vier keer hetzelfde paar: 100 stappen, kwartdraai. Dat **patroon** (hoofdstuk 22) zet je in een lus. Scratch heeft drie soorten:

blok	wat het doet	voorbeeld
herhaal (10)	voert de mond een vast aantal keer uit	vier zijden van een vierkant
herhaal tot <voorwaarde>	herhaalt tot de voorwaarde waar is; de voorwaarde wordt vóór elke ronde gecontroleerd	aftellen tot 0
herhaal (zonder getal)	herhaalt eindeloos, tot je op het stopteken klikt	een animatie, een thermostaat

Twee blokken met bijna dezelfde naam

In de Nederlandse Scratch heet het blok voor een vast aantal keer **herhaal (10)**, en het eindeloze blok gewoon **herhaal**, zonder getal. Het eindeloze blok heeft onderaan geen nokje: er kan niets onder, want het houdt nooit op. In het Engels heten ze *repeat* en *forever*.

Het derde script toont een **animatie**: steeds het volgende uiterlijk, met een korte pauze. Zonder het blok 'wacht 0.5 sec.' wisselt het uiterlijk zo snel dat je niets ziet bewegen.



Links negen blokken, in het midden vier: de lus doet hetzelfde. Rechts een lus die nooit stopt.

UITGEWERKT VOORBEELD · 23.5

Hoeveel keer loopt de lus?

5/16

Een sprite moet een regelmatige zeshoek lopen met zijden van 80 stappen. (a) Welk getal zet je in 'herhaal' en in 'draai'? (b) Hoeveel stappen legt de sprite in totaal af? (c) Hoeveel blokken bespaar je met de lus?

GEGEVEN

- zeshoek: 6 gelijke zijden van 80 stappen
- na een volledige toer kijkt de sprite weer dezelfde kant op

GEVRAAGD

- getallen in herhaal en draai
- totale afstand
- bespaarde blokken

OPLOSSING

1. Een zeshoek heeft 6 zijden: **herhaal (6)**.
2. Na zes keer draaien heeft de sprite één volle toer gedraaid: $360° : 6 = 60°$ per keer, dus **draai (60) graden**.
3. Afstand: $6 \times 80 = 480$ stappen, precies de breedte van het speelveld.
4. Zonder lus: 6 × 2 = 12 blokken. Met lus: herhaal + 2 blokken = 3 blokken. Je bespaart 9 blokken, en om een achthoek te maken verander je maar twee getallen (8 en 45).

ANTWOORD

herhaal (6) met 'neem (80) stappen' en 'draai (60) graden'; 480 stappen; 12 blokken worden er 3.

Klopt dit? Test het patroon op het vierkant: 4 × 90° = 360°. Voor elke regelmatige veelhoek met n zijden is de draaihoek 360° : n. Een driehoek draait dus 120°, niet 60° (de binnenhoek): een klassieke bug.

UITLEG · 23.6

Keuze: als … dan … anders

6/16

Met een **keuze** doet het programma iets anders naargelang de situatie. Het blok **als <voorwaarde> dan** voert zijn mond alleen uit als de voorwaarde waar is. Het blok **als … dan … anders** heeft twee monden: de eerste als de voorwaarde waar is, de tweede als ze niet waar is. Het is de ruit van het stroomdiagram.

Een **voorwaarde** is een zeshoekig blok. Je maakt er een met een vergelijking uit Functies (<, =, >) of met een vraag uit Waarnemen: is een toets ingedrukt, raakt de sprite de rand? Met **en**, **of** en **niet** combineer je voorwaarden, zoals schakelaars in serie (EN) en parallel (OF) in hoofdstuk 18.

> ⚠ **Wat gebeurt er op de grens?**
>
> In het script hiernaast is 'antwoord < 12' niet waar voor 12. Wie 12 is, krijgt dus 'Veel plezier!'. Wil je 12 ook laten wachten, dan schrijf je 'antwoord < 13'. Scratch heeft geen blok voor ≤: test daarom altijd precies op de grens.



De voorwaarde bepaalt welke mond uitgevoerd wordt; de andere wordt overgeslagen.



Drie voorwaarden: een vergelijking, een toets en een aanraking.

UITLEG · 23.7

Variabelen en tellers

7/16

Een **variabele** is een doos met een naam, waarin het programma een waarde bewaart. Je maakt ze bij Variabelen met 'Maak een variabele'. Drie blokken doen het werk:

- **maak [score] (0)**: leeg de doos en stop er 0 in (de **beginwaarde**);
- **verander [score] met (1)**: tel 1 bij wat erin zit (met −1 tel je af);
- **(score)**: het ronde blok geeft de inhoud, om te tonen of te vergelijken.

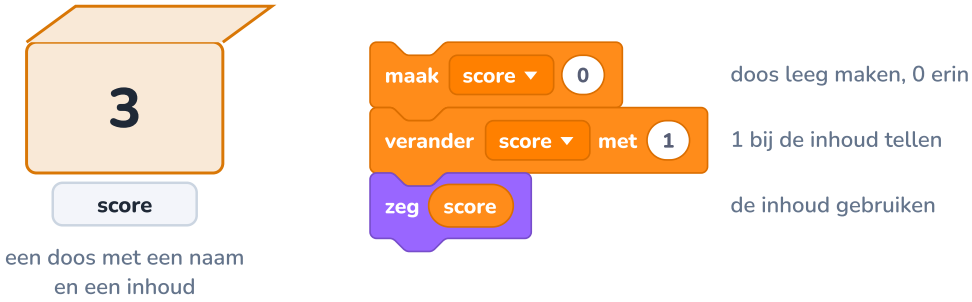
Een **teller** is een variabele die bij elke gebeurtenis met dezelfde stap verandert: punten in een spel, pogingen bij raad het getal, pompbeurten in de meetkas. De vaste volgorde is: beginwaarde geven vóór de lus, veranderen in de lus, gebruiken na (of in) de lus.

'maak' is geen vergelijking

'maak [score] (0)' betekent niet 'score is 0' zoals in een wiskundige gelijkheid, maar: 'zet vanaf nu 0 in de doos score'. Daarom mag 'verander [score] met (1)' gewoon: de nieuwe inhoud is de oude plus 1. Vergelijken doe je met het groene blok 'score = 10'.

Een decimaal getal typen

In een invoervak van Scratch typ je een decimaal getal met een **punt**: 0.24, niet 0,24. Met een komma begrijpt Scratch het getal niet.



Een variabele is een doos met een naam en een inhoud; de oranje blokken vullen, veranderen en lezen de doos.

UITGEWERKT VOORBEELD · 23.8

Aftellen met een teller

8/16

Speel het aftelscript na. Wat zegt de sprite, en hoe lang duurt het voor 'Start!' verschijnt? Hoeveel keer wordt de mond van de lus uitgevoerd?



Een teller met beginwaarde 10 die bij elke ronde 1 lager wordt.

GEGEVEN

- beginwaarde tijd = 10
- herhaal tot tijd = 0: zeg tijd 1 sec., verander tijd met −1

GEVRAAGD

- wat de sprite zegt
- hoe lang het duurt
- aantal rondes

OPLOSSING

1 Voor de eerste ronde: is tijd = 0? Nee (10). De sprite zegt 10 en tijd wordt 9.

2

RONDE	TIJD VÓÓR DE RONDE	TIJD = 0?	SPRITE ZEGT	TIJD NA DE RONDE
1	10	nee	10	9
2	9	nee	9	8
...	...	...	...	...
10	1	nee	1	0
(11)	0	**ja**: lus stopt	Start!	

3 Elke ronde duurt 1 seconde (het zeg-blok wacht). Tien rondes: 10 s, daarna meteen 'Start!'.

ANTWOORD

De sprite zegt 10, 9, 8, ..., 1 (telkens 1 s) en na 10 s 'Start!'. De mond wordt 10 keer uitgevoerd; 0 wordt nooit gezegd.

Klopt dit? De voorwaarde wordt vóór elke ronde getest: bij tijd = 0 stopt de lus nog voor 'zeg'. Wil je ook 0 zien, dan gebruik je 'herhaal tot tijd < 0'. Staat er per ongeluk 'verander tijd met 1', dan wordt tijd 11, 12, ... en nooit 0: een oneindige lus (hoofdstuk 22).

UITLEG · 23.9

Gebeurtenissen: wanneer ...

9/16

Een script start pas als er iets gebeurt: een **gebeurtenis** (in het Engels *event*). Het gele hoedblok bepaalt welke: de groene vlag, een toets, een klik op de sprite, of een **signaal** van een ander script. Scripts die door dezelfde gebeurtenis starten, lopen tegelijk.

Met **zend signaal** laat je scripts samenwerken, ook van verschillende sprites. De kat zegt 'Klaar?' en zendt dan het signaal 'start'. De hond wacht daarop en loopt pas dan weg. Zo bepaal je de volgorde tussen sprites zonder met wachttijden te moeten rekenen.

Ook een microcontroller werkt met gebeurtenissen. In MakeCode voor de micro:bit start het blok **bij opstarten** één keer als het bordje stroom krijgt, en **wanneer knop A wordt ingedrukt** telkens als je op knop A drukt. Het blok **de hele tijd** is de eindeloze lus van de micro:bit.

Eén script per taak

Maak liever drie korte scripts met elk hun eigen gebeurtenis dan één lang script dat alles controleert. Zo zie je meteen welk script wat doet, en kan je elk apart testen.



De hond loopt pas weg als de kat het signaal 'start' zendt; met de spatiebalk laat je haar ook een stapje zetten.



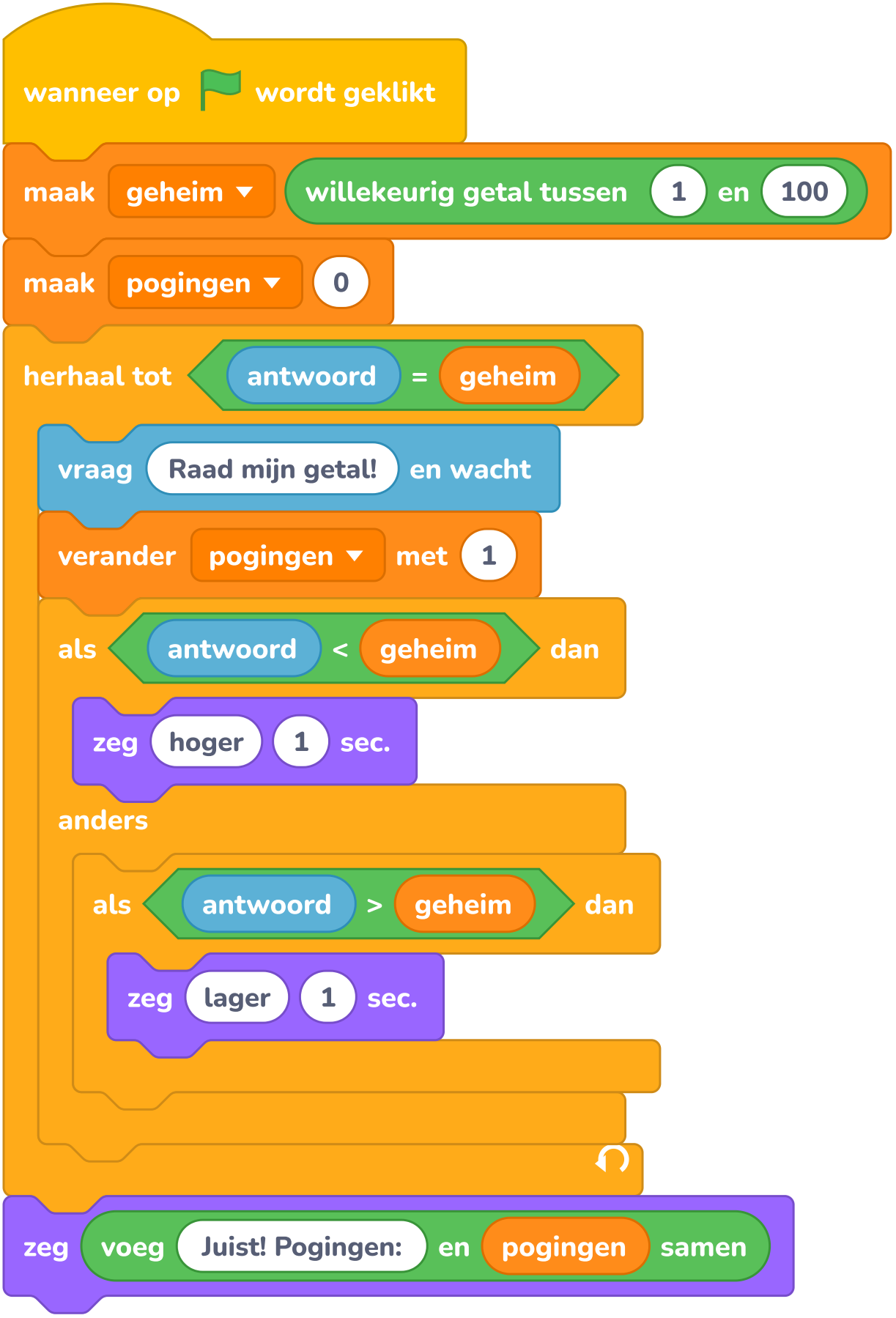
Dezelfde idee in MakeCode: een blok dat start bij het opstarten, en een dat start bij een druk op knop A.

UITGEWERKT VOORBEELD · 23.10

Van stroomdiagram naar blokken: raad het getal

10/16

Zet het stroomdiagram van *raad het getal* uit hoofdstuk 22 om in een Scratch-programma. Tel ook het aantal pogingen en toon het op het einde.



Het stroomdiagram als blokken: de ruit met de lus terug wordt 'herhaal tot'.

GEGEVEN

- het stroomdiagram uit hoofdstuk 22

GEVRAAGD

- een werkend blokprogramma met een teller voor de pogingen

- Scratch-blokken: vraag … en wacht, antwoord, willekeurig getal tussen … en …

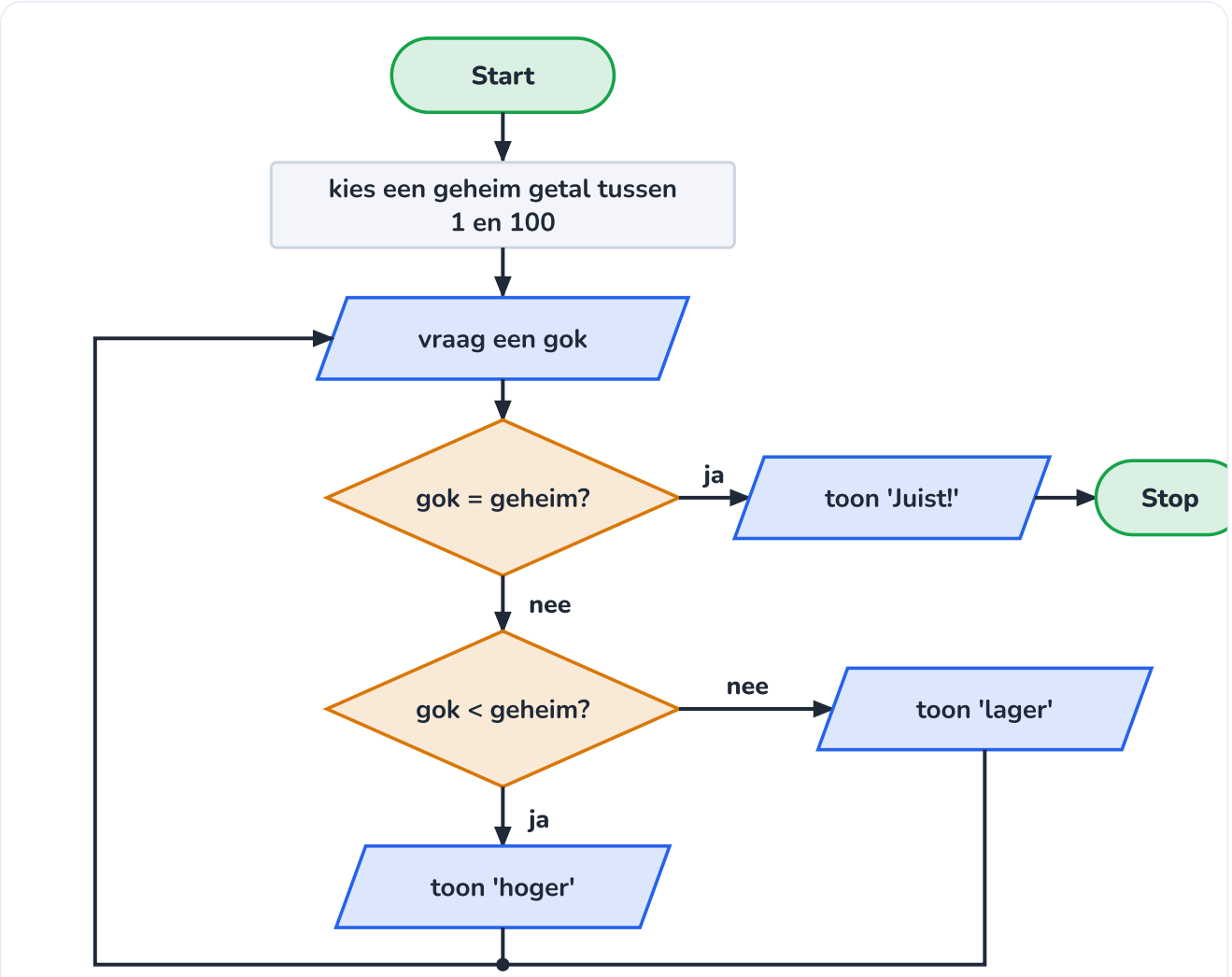
OPLOSSING

1. **Start** → hoedblok 'wanneer op de groene vlag wordt geklikt'.
2. **Kies een geheim getal** (rechthoek) → een variabele: 'maak [geheim] (willekeurig getal tussen 1 en 100)'. Voor de teller: 'maak [pogingen] (0)'.
3. **De lus met de ruit 'gok = geheim?'** → 'herhaal tot <antwoord = geheim>'. Zolang het antwoord niet juist is, loopt de lus. De ja-uitgang van de ruit is het einde van de lus.
4. **Vraag een gok** (parallellogram) → 'vraag [Raad mijn getal!] en wacht'; het ronde blok 'antwoord' bevat wat de speler typt. Meteen daarna: 'verander [pogingen] met (1)'.
5. **De ruit 'gok < geheim?'** → 'als <antwoord < geheim> dan zeg hoger, anders …'. In de anders-mond komt nog een 'als <antwoord > geheim> dan zeg lager': bij een juiste gok moet de sprite niets zeggen, want de lus stopt dan.
6. **Toon 'Juist!'** → na de lus: 'zeg (voeg [Juist! Pogingen:] en (pogingen) samen)'.

ANTWOORD

Zie het script: elk symbool van het stroomdiagram heeft een blok gekregen; de lus terug wordt 'herhaal tot'.

Klopt dit? Speel het na met geheim 71 en de gokken 50, 75, 71: 'hoger', 'lager', en na de derde poging stopt de lus en zegt de sprite 'Juist! Pogingen: 3'. Test ook een rare invoer: typt de speler 'appel', dan is dat noch kleiner noch groter dan 71, de sprite zegt niets en de lus vraagt opnieuw. Geen crash, wel een verloren poging.



Het stroomdiagram uit hoofdstuk 22, ter vergelijking.

CODE · 23.11

Hetzelfde spel in tekst

11/16

Programmeertalen zoals Python gebruiken dezelfde bouwstenen, maar dan in tekst. Leg het programma naast de blokken: `random.randint(1, 100)` is 'willekeurig getal tussen 1 en 100', `while antwoord != geheim:` is 'herhaal tot antwoord = geheim' (`!=` betekent 'is niet gelijk aan'), `input` is 'vraag en wacht' en `if` / `elif` is 'als … dan … anders als'. De inspringing (vier spaties) doet wat de mond van een C-blok doet. Je hoeft dit nog niet te kunnen schrijven: in Intermediate (hoofdstuk 27) leer je het.

Python `raad_het_getal.py` 13 regels

```python
import random

geheim = random.randint(1, 100)    # willekeurig getal tussen 1 en 100
pogingen = 0
antwoord = 0
while antwoord != geheim:          # herhaal tot antwoord = geheim
    antwoord = int(input("Raad mijn getal (1 tot 100): "))
    pogingen = pogingen + 1
    if antwoord < geheim:
        print("hoger")
    elif antwoord > geheim:
        print("lager")
print("Juist! Pogingen:", pogingen)
```

Zo verloopt een spelletje (gecontroleerd door het programma te draaien; geheim getal 31, de speler raadt met halveren):

```
Raad mijn getal (1 tot 100): 50
lager
Raad mijn getal (1 tot 100): 25
hoger
Raad mijn getal (1 tot 100): 37
lager
Raad mijn getal (1 tot 100): 31
Juist! Pogingen: 4
```

Eén verschil: `int(...)` zet de getypte tekst om in een getal. Typt de speler 'appel', dan stopt Python met een foutmelding, waar Scratch gewoon verder doet.

UITLEG · 23.12

Debuggen: fouten vinden en verbeteren

12/16

Een programma doet zelden meteen wat je wil. Debuggen is geen falen, het is de helft van het werk. Het script in de figuur moet van 10 aftellen, maar er zitten drie fouten in:

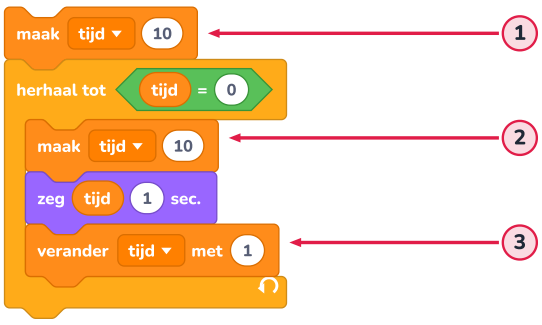
1. **Geen hoedblok.** Het script start nooit vanzelf. Zet 'wanneer op de groene vlag wordt geklikt' erboven.
2. **De beginwaarde staat in de lus.** Elke ronde wordt tijd opnieuw 10. Het blok hoort vóór de lus (het staat er al; dit tweede exemplaar moet weg).
3. **Verkeerde richting.** 'verander tijd met 1' telt op: tijd wordt nooit 0. Maak er −1 van.

Zes gewoonten maken debuggen sneller:

- **Lees hardop** wat er staat, niet wat je bedoelde.
- **Toon je variabelen**: zet het vinkje naast de variabele aan, dan zie je haar waarde op het speelveld veranderen.
- **Vertraag**: een 'wacht 1 sec.' in de lus laat je elke stap zien.
- **Speel na** met een trace-tabel (hoofdstuk 22).
- **Test klein**: bouw een paar blokken, test, bouw verder.
- **Verander één ding tegelijk**, zoals bij een eerlijke proef (hoofdstuk 2). Verander je drie dingen en werkt het, dan weet je niet welke verandering hielp.

Waarom heet een fout een bug?

Ingenieurs noemden een storing in een machine al in de negentiende eeuw een *bug* (een beestje). Beroemd werd een logboek van de Mark II-computer aan de universiteit van Harvard: op 9 september 1947 vonden de technici een mot tussen de contacten van een relais. Ze plakten ze in het logboek, met de opmerking dat dit het eerste echte geval van een bug was. De computerpionier Grace Hopper vertelde het verhaal graag verder. Het logboek ligt vandaag in een museum in Washington.



Drie fouten: (1) geen startblok, (2) de beginwaarde in de lus, (3) optellen in plaats van aftrekken.



Een mot in een relais, in 1947 in een logboek geplakt: de bekendste 'bug' uit de geschiedenis.

PROEF · 23.13

Hoe snel reageer jij?

13/16

ONDERZOEKSVRAAG

Hoeveel tijd zit er tussen het moment dat je iets ziet veranderen en het moment dat je op een toets drukt?

MATERIAAL

- computer met Scratch 3
- een sprite met twee uiterlijken: 'rood' en 'groen' (bv. een cirkel)



Rood, een willekeurige wachttijd, groen, en dan de klok laten lopen tot de spatiebalk.

WERKWIJZE

1. Bouw het script uit de figuur. Het wacht een **willekeurige** tijd tussen 2 en 5 s voor het groen wordt.
2. Druk op de groene vlag, wacht tot de sprite groen wordt en druk dan zo snel mogelijk op de spatiebalk.
3. Noteer de tijd die de sprite zegt. Herhaal tot je tien metingen hebt.
4. Bereken het gemiddelde. Kijk of er een meting is die sterk afwijkt, en zoek een verklaring.
5. Probeer ook: wat gebeurt er als je op de spatiebalk drukt vóór de sprite groen wordt?

WAARNEMING

Tien metingen van één leerling (in seconden): 0,31; 0,28; 0,35; 0,27; 0,30; 0,42; 0,29; 0,26; 0,33; 0,30. Gemiddelde: $3{,}11 / 10 \approx 0{,}31$ s. De meting van 0,42 s wijkt af: de leerling keek even weg. Zonder die meting is het gemiddelde 0,30 s. Scratch toont veel decimalen (bijvoorbeeld 0.3125); die zijn niet allemaal zinvol. Wie te vroeg drukt, krijgt een tijd van bijna 0: het script test pas na de groene kleur.

VERKLARING

Een reactietijd van 0,2 à 0,3 s is gewoon: je ogen, je hersenen en je spieren hebben tijd nodig. De **willekeurige wachttijd** maakt de proef eerlijk: met een vaste wachttijd zou je leren *voorspellen* in plaats van reageren. Het programma meet niet oneindig precies: Scratch kijkt ongeveer 30 keer per seconde of de toets al ingedrukt is, dus een meting kan tot een paar honderdsten van een seconde te laat zijn. Daarom rond je af op 0,01 s en neem je het gemiddelde van tien metingen (hoofdstuk 2).

UITGEWERKT VOORBEELD · 23.14

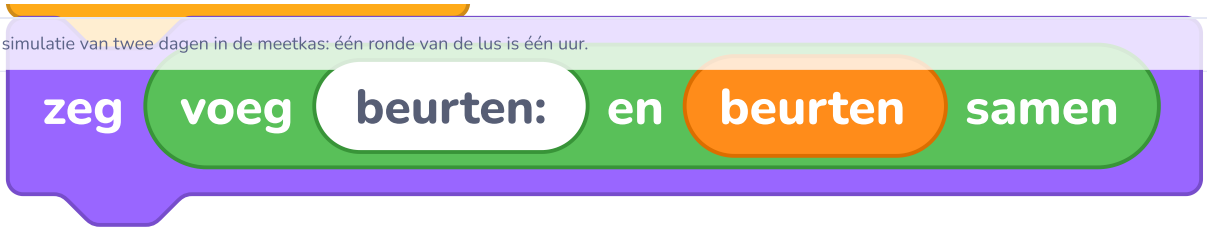
Habitat: de meetkas als simulatie

14/16

Voor je een echte pomp aansluit, test je het algoritme 'water geven' (hoofdstuk 22) in een **simulatie**. Het model: het bodemvocht daalt elk uur 5 procentpunt; een pompbeurt van 30 s (240 mL) maakt het 16 procentpunt hoger. Simuleer 48 uur met de drempel 30 %. Hoeveel beurten zijn er, en hoeveel water blijft er over in het reservoir van 30 L?


wanneer op wordt geklikt
maak vocht 50
maak water 30
maak beurten 0
herhaal 48
verander vocht met -5
als vocht < 30 dan
verander vocht met 16
verander water met -0.24
verander beurten met 1
wacht 0.2 sec.

Een simulatie van twee dagen in de meetkas: één ronde van de lus is één uur.



OPLOSSING

1. **Abstractie.** Drie variabelen: vocht, water en beurten. Eén ronde van de lus is één uur; de wachttijd van 0.2 s laat je het verloop zien zonder twee dagen te wachten.

2. **Algoritme.** In de lus: eerst het vocht laten dalen (de planten drinken), dan de keuze 'als vocht < 30 dan geef water'. De teller 'beurten' telt de pompbeurten.

3. **Naspelen.** 50, 45, 40, 35, 30 (30 is niet kleiner dan 30), 25 → beurt → 41, 36, 31, 26 → beurt → 42, … Na de eerste beurt geeft de kas ongeveer om de drie uur water.

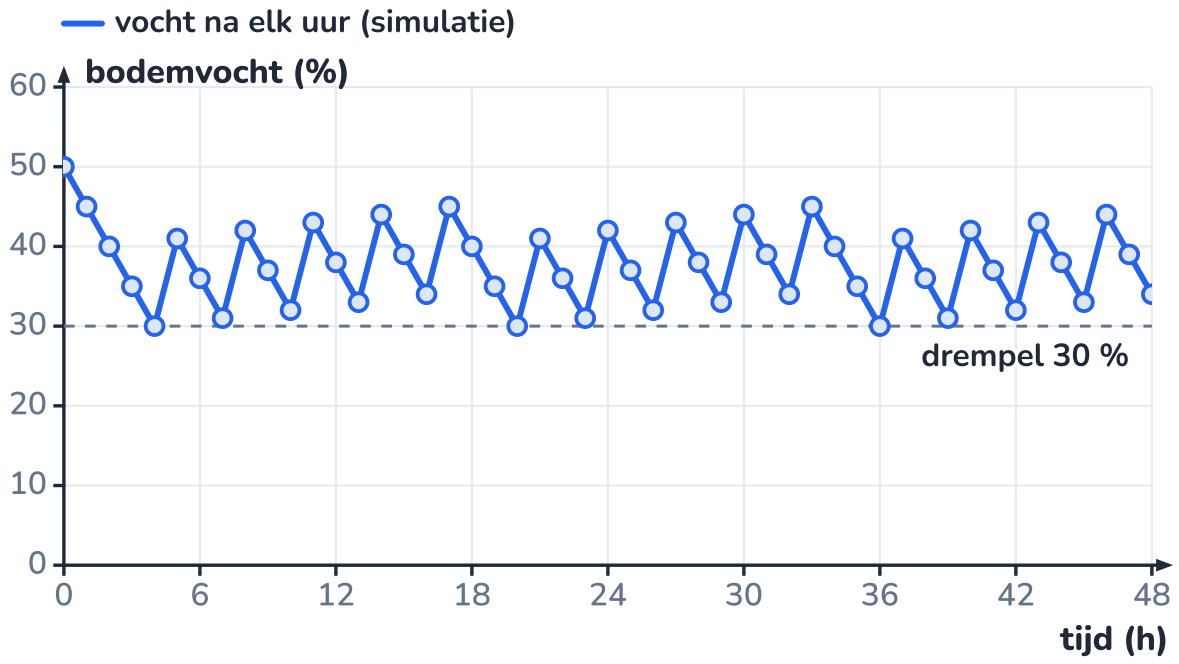
4. **Uitkomst.** Na 48 uur zijn er 14 beurten geweest: $14 \times 0{,}24 = 3{,}36\,\text{L}$ water, er blijft 26,64 L over.

5. **Vergelijken.** Op lange termijn daalt het vocht 120 procentpunt per dag; dat vraagt $120 : 16 = 7{,}5$ beurten, of $7{,}5 \times 0{,}24 = 1{,}8\,\text{L}$ per dag: precies het verbruik uit het stationsdossier. In de eerste 48 uur zijn het er iets minder, omdat de grond nat begon.

ANTWOORD

14 beurten in 48 uur, 26,64 L water over. Op lange termijn 7,5 beurten per dag (1,8 L): een vol reservoir van 30 L houdt ongeveer 16 dagen.

Klopt dit? Een simulatie is zo goed als haar model. In het echt daalt het vocht 's nachts trager dan overdag en hangt het af van het weer. Het model zegt dus niet precies hoeveel water de kas gebruikt, wel dat het algoritme werkt: het vocht blijft tussen 30 en 45 % en er is geen oneindige reeks beurten. In opdracht 23.12 maak je het model realistischer.



Het vocht zakt elk uur 5 procentpunt en springt omhoog bij elke beurt: een zaagtand boven de drempel.

NASLAG · 23.15

15/16

Overzicht: de belangrijkste blokken

De blokken uit dit hoofdstuk met hun Nederlandse naam in Scratch 3, en de Engelse naam die je in handleidingen tegenkomt.

categorie	blok (Nederlands)	Engels	wat het doet
Gebeurtenissen	wanneer op de groene vlag wordt geklikt	when green flag clicked	start het script
Gebeurtenissen	wanneer [spatiebalk] is ingedrukt	when [space] key pressed	start bij een toets
Gebeurtenissen	zend signaal [...] / wanneer ik signaal [...] ontvang	broadcast / when I receive	scripts laten samenwerken
Besturen	wacht (1) sec.	wait (1) seconds	pauze
Besturen	herhaal (10)	repeat (10)	vast aantal keer
Besturen	herhaal tot <...>	repeat until	tot de voorwaarde waar is
Besturen	herhaal	forever	eindeloos
Besturen	als <...> dan / anders	if then / else	keuze
Besturen	wacht tot <...>	wait until	wachten op een voorwaarde
Besturen	stop [alle]	stop [all]	alles stoppen
Variabelen	maak [..] (0) / verander [..] met (1)	set to / change by	beginwaarde / tellen
Functies	(..) < (..), (..) = (..), (..) > (..)	<, =, >	vergelijken
Functies	<..> en <..>, of, niet	and, or, not	voorwaarden combineren
Functies	willekeurig getal tussen (1) en (10)	pick random	toeval
Waarnemen	vraag (..) en wacht / (antwoord)	ask and wait / answer	invoer van de gebruiker
Waarnemen	zet klok op 0 / (klok)	reset timer / timer	tijd meten
Uiterlijken	zeg (..) (2) sec.	say for secs	uitvoer in een tekstballon

stroomdiagram	blok
Start	hoedblok (gebeurtenis)
handeling	stapelblok
invoer / uitvoer	vraag en wacht / zeg
ruit zonder lus terug	als ... dan (... anders)
ruit met een lus terug	herhaal tot <voorwaarde>
lus die nooit stopt	herhaal (eindeloos)
Stop	einde van het script of 'stop alle'



Beweging, Uiterlijken, Besturen, Variabelen en Waarnemen: de kleur zegt waar je het blok vindt.

HET GEHEEL · 23.16

Waar blokken naartoe leiden

16/16

Blokken zijn de eerste programmeertaal van de leerlijn **programmeren en computationeel denken**. De vier bouwstenen (sequentie, herhaling, keuze, variabelen) plus gebeurtenissen vind je in elke taal terug.

Met de simulatie raak je ook de leerlijn **wiskundig modelleren**: een model doorrekenen stap voor stap, zoals later met de methode van Euler.

F22 Computationeel denken
Het stroomdiagram en het algoritme 'water geven' die je hier in blokken omzet.

F2 Onderzoeken: van vraag tot besluit
Debuggen en de reactietijdproef: één ding tegelijk veranderen, herhalen, gemiddelde nemen.

F24 De microcontroller
Dezelfde blokken sturen een echte led en lezen een echte drukknop op een Arduino of micro:bit.

F25 Sensoren en automatisch regelen
De simulatie wordt werkelijkheid: een sensor meet het vocht en een relais zet de pomp aan.

I27 Python: de basis
Van blokken naar tekst: if, while en for in Python.

I32 Toestandsmachines
Gebeurtenissen en toestanden netjes ordenen: dag, nacht, alarm.

E4 Differentiaalvergelijkingen en simulatie
Een simulatie stap voor stap doorrekenen: de methode van Euler is dezelfde lus met een wiskundig model.

Habitat
Je hebt het algoritme 'water geven' getest zonder één druppel water: in de simulatie blijft het vocht tussen 30 en 45 % met gemiddeld 7,5 beurten (1,8 L) per dag. In hoofdstuk 24 zet je het eerste echte onderdeel op een microcontroller (het statuslampje), in hoofdstuk 25 draait het hele algoritme met een echte sensor en pomp. Opdracht 23.12 maakt de simulatie realistischer.

SAMENVATTING

In het kort

- Een blokprogramma bestaat uit scripts; een hoedblok start het script bij een gebeurtenis.
- De vorm zegt waar een blok past: stapelblok, C-blok (met mond), rond waardeblok, zeshoekig ja/nee-blok, eindblok.
- Sequentie: blokken worden van boven naar onder uitgevoerd; de volgorde bepaalt het resultaat.
- Herhaling: herhaal (n) voor een vast aantal keer, herhaal tot voor 'tot een voorwaarde waar is', herhaal (zonder getal) voor eindeloos.
- Keuze: als … dan … anders voert een van twee monden uit, afhankelijk van een voorwaarde. Test altijd op de grens.
- Een variabele is een doos met een naam; een teller krijgt een beginwaarde vóór de lus en verandert in de lus.
- Debuggen: lees hardop, toon variabelen, vertraag, speel na, test klein, verander één ding tegelijk.
- In de simulatie van de meetkas blijft het vocht tussen 30 en 45 %, met gemiddeld 7,5 beurten (1,8 L) per dag.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

script
Een reeks blokken die aan elkaar vastzitten en samen uitgevoerd worden, meestal onder een hoedblok.

sequentie
Blokken die na elkaar worden uitgevoerd, in de volgorde waarin ze gestapeld zijn.

herhaling (lus)
Een blok dat de blokken in zijn mond meerdere keren uitvoert: een vast aantal keer, tot een voorwaarde waar is, of eindeloos.

keuze
Een blok dat afhankelijk van een voorwaarde de ene of de andere groep blokken uitvoert: als … dan … anders.

voorwaarde
Een uitdrukking die waar of niet waar is, zoals 'vocht < 30'; in Scratch een zeshoekig blok.

variabele
Een geheugenplaats met een naam, waarin het programma een waarde bewaart die kan veranderen.

teller
Een variabele die telkens met een vaste stap verandert, om iets te tellen.

gebeurtenis (event)
Iets wat gebeurt (klik op de groene vlag, een toets, een signaal) en een script laat starten.

debuggen
Fouten in een programma opsporen en verbeteren.

simulatie
Een programma dat een echt systeem nabootst met een vereenvoudigd model, om het te kunnen testen.

F FUNDAMENTAL · DEEL F6 · PROGRAMMEREN EN AUTOMATISEREN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 24

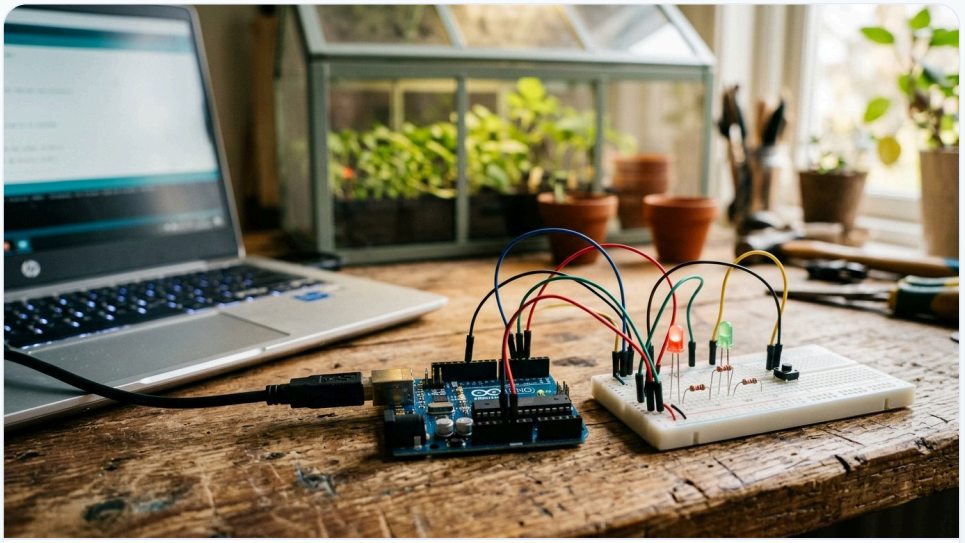
De microcontroller

Een computer van een paar euro die leds, knoppen en later de hele meetkas bestuurt

Een wasmachine, een verwarmingsketel, een speelgoedrobot: overal zit een kleine computer die één taak eindeloos herhaalt. Zo'n **microcontroller** leest ingangen (een knop, een sensor) en stuurt uitgangen (een led, een relais). In dit hoofdstuk leer je de Arduino Uno en de micro:bit kennen, je berekent de weerstand voor een led met wat je in hoofdstuk 19 en 20 leerde, je leest een drukknop in, en je schrijft je eerste programma's in blokken en in Arduino-code. Voor de meetkas bouw je een statuslampje.

6× uitleg · 3× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · 4× code · ± 8 lestijden

P Programmeren en computationeel denken · L Elektriciteit en elektronica · R Regelen en robotica



Een Arduino, een breadboard, twee leds en een knop: het begin van de automatische meetkas.

Na dit hoofdstuk

- Je kan uitleggen wat een microcontroller is, waarin hij verschilt van een computer en in welke toestellen hij zit.
- Je kan bij een toestel de input, de verwerking en de output aanwijzen.
- Je kan de onderdelen van een Arduino Uno aanwijzen: USB, voeding, microcontroller, digitale en analoge pinnen, GND en 5V.
- Je kan de voorschakelweerstand van een led berekenen, een waarde uit de E12-reeks kiezen en de stroom narekenen.
- Je kan een led en een drukknop correct aansluiten, als schema en op een breadboard, met een pull-down of met INPUT_PULLUP.
- Je kan een knipperlicht en een verkeerslicht programmeren in blokken en in Arduino-code (setup, loop, pinMode, digitalWrite, digitalRead, delay).
- Je kan een programma uploaden en systematisch testen, en een schakeling die niet werkt stap voor stap nakijken.

VERHAAL · 24.1

Een computer in alles

1/18

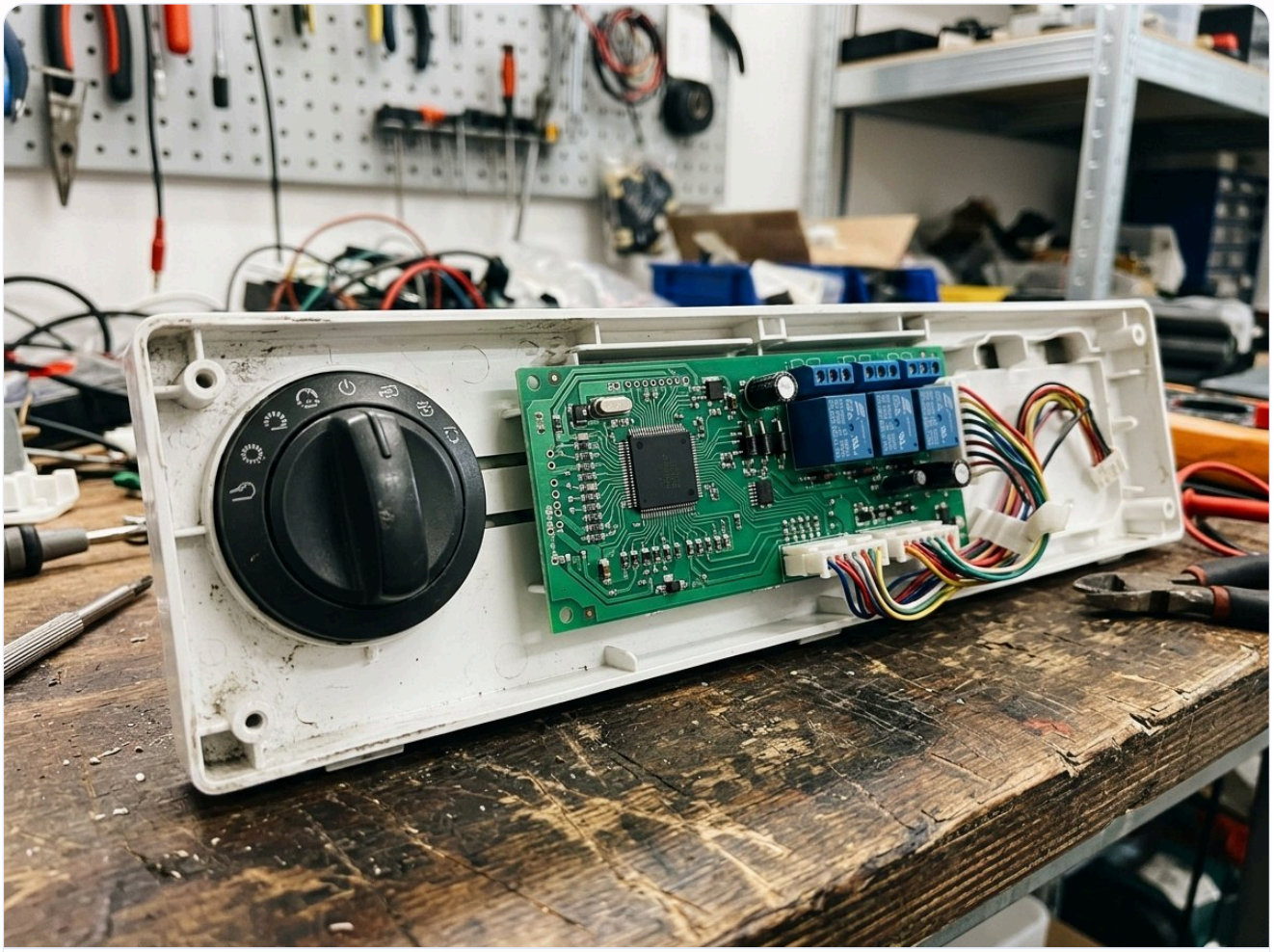
Tel de computers in je huis. De laptop en de smartphone, dat weet je. Maar ook de wasmachine heeft er een (welk programma, hoe lang, hoe warm), net als de microgolfoven, de thermostaat, de afstandsbediening, de elektrische tandenborstel en de fietscomputer. Een moderne auto bevat er

tientallen. Het zijn geen laptops in het klein, maar **microcontrollers**: goedkope chips die één taak doen, dag en nacht, met heel weinig energie.

Wie zelf met microcontrollers wilde werken, had lang dure apparatuur nodig. Dat veranderde in 2005 in het Italiaanse stadje Ivrea. Aan het Interaction Design Institute zocht een groep docenten, onder wie Massimo Banzi, een goedkoop bordje waarmee hun studenten (ontwerpers, geen ingenieurs) snel iets konden laten bewegen of oplichten. Ze noemden het naar het café waar ze samenkwamen: **Arduino**. Het ontwerp werd vrij gegeven, iedereen mag het namaken. Vandaag gebruiken scholen, kunstenaars, wetenschappers en hobbyisten wereldwijd Arduino-bordjes, en de **BBC micro:bit** (2016) maakte programmeerbare elektronica nog toegankelijker.

Waarom dit voor de meetkas telt

Tot nu toe zette jij de ledstrip en de pomp aan met een schakelaar. Een microcontroller kan dat zelf, op basis van metingen. Hij is het 'brein' van de meetkas, en hij gebruikt maar ongeveer 1,5 W (hoofdstuk 21).



Achter de draaiknop van een wasmachine zit een printplaat met een microcontroller die het programma uitvoert.

UITLEG · 24.2

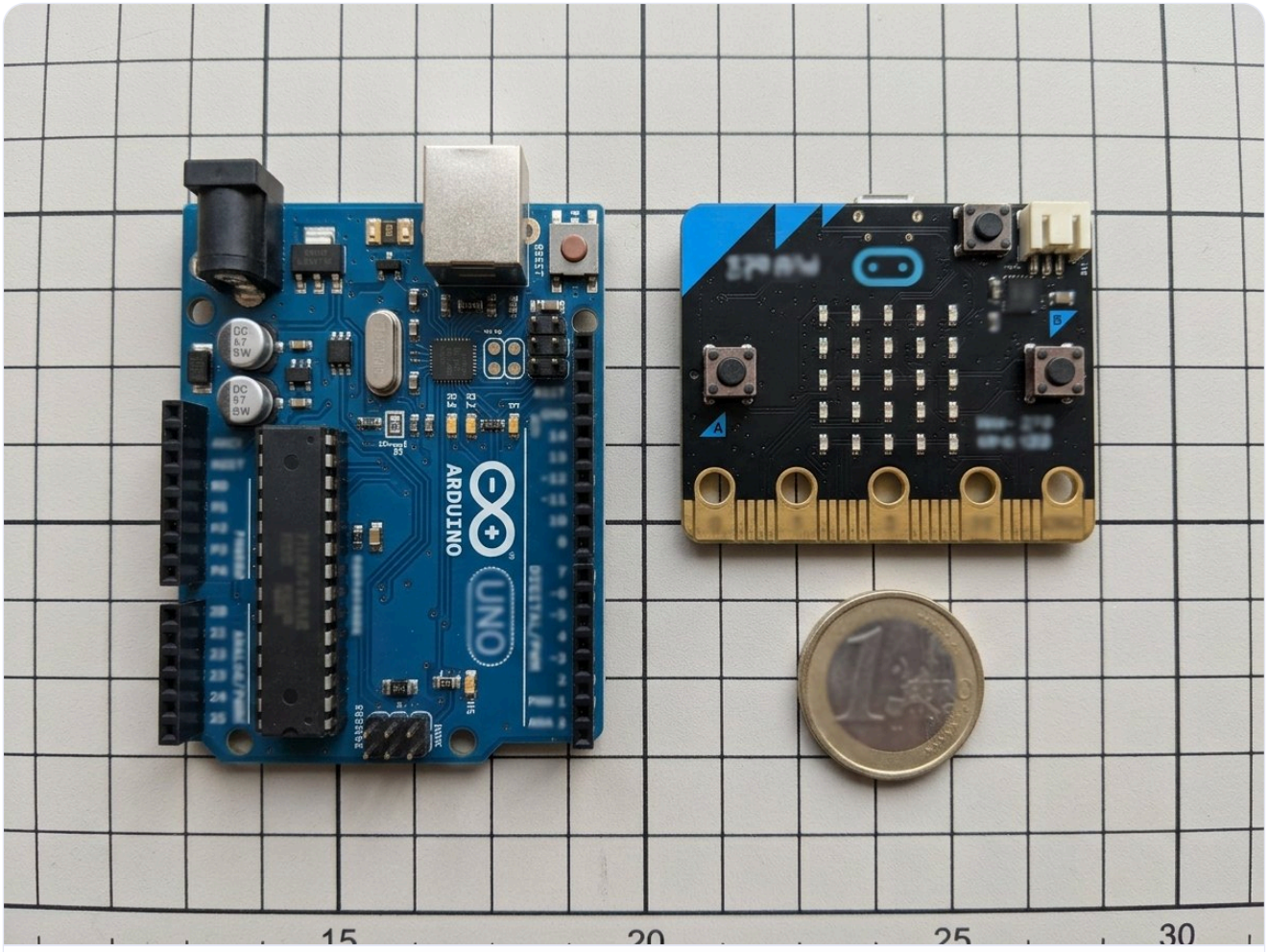
Wat is een microcontroller?

2/18

Een **microcontroller** is een volledige computer op één chip: een **processor** die instructies uitvoert, **flashgeheugen** waarin het programma bewaard blijft (ook zonder stroom), een klein **werkgeheugen** voor variabelen, en **pinnen**: aansluitingen die de chip met de buitenwereld verbinden. Hij heeft geen scherm, geen toetsenbord en geen besturingssysteem. Hij start meteen zijn ene programma en herhaalt dat tot de stroom uitvalt.

	Arduino Uno R3	BBC micro:bit V2	laptop (ter vergelijking)
processor	ATmega328P, 16 MHz, 8 bit	nRF52833, 64 MHz, 32 bit	enkele GHz, 64 bit, meerdere kernen
programmageheugen	32 KB flash	512 KB flash	honderden GB (schijf)
werkgeheugen	2 KB	128 KB	8 tot 32 GB
werkspanning pinnen	5 V	3,3 V	(geen losse pinnen)
ingebouwd	één led (L op pin 13)	25 leds, 2 knoppen, sensoren, luidspreker	scherm, toetsenbord
programmeren	Arduino IDE (C++), mBlock (blokken)	MakeCode (blokken, JavaScript, Python)	alles
vermogen	ongeveer 0,25 W	minder dan 0,5 W	tientallen watt

Een laptop heeft ongeveer acht miljoen keer zoveel werkgeheugen als een Arduino Uno. Toch is de Uno ruim genoeg om een kas te besturen: het programma 'water geven' past met gemak in 32 KB. In dit hoofdstuk werk je met de **Arduino Uno R3**; alles werkt ook op een micro:bit, met MakeCode en 3,3 V in plaats van 5 V.



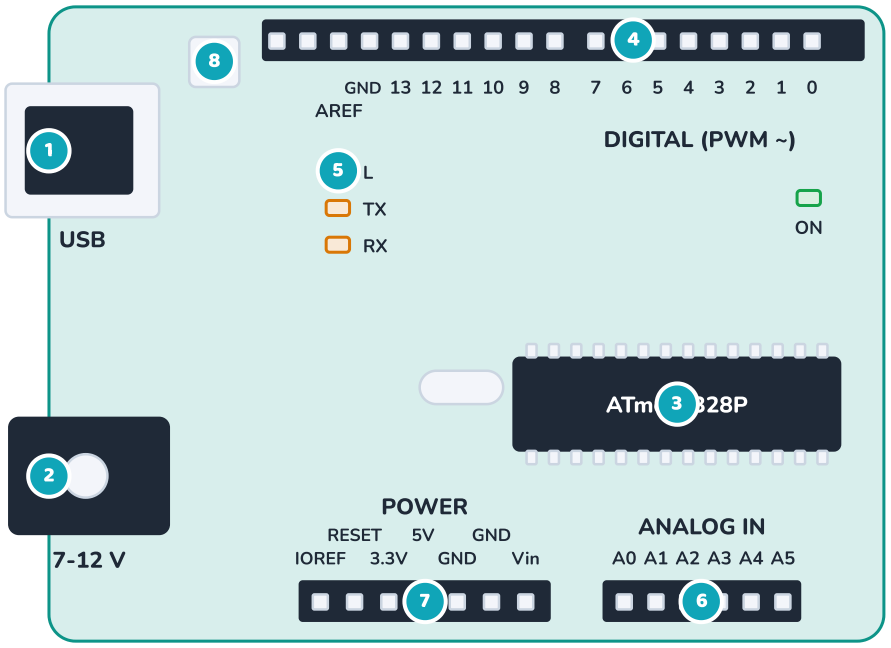
Een Arduino Uno en een micro:bit, met een munt van 1 euro om de grootte te vergelijken.

ONTLEED · 24.3

De Arduino Uno

3/18

Het bordje heet Uno, maar er zit veel op. Leer vooral de pinnen kennen: daar sluit je alles op aan.



Schematisch bovenaanzicht van een Arduino Uno R3 (68,6 × 53,4 mm). Bovenaan de digitale pinnen, onderaan voeding en analoge ingangen.

1 USB-aansluiting
Voor het uploaden van het programma, voor communicatie met de computer en als voeding (5 V). Een herstelbare zekering van 500 mA beschermt de USB-poort van je computer.

2 Voedingsbus
Voor een adapter of batterij van 7 tot 12 V als de Uno zonder computer werkt. Een spanningsregelaar op het bord maakt er 5 V van.

3 Microcontroller ATmega328P
De eigenlijke computer: 16 MHz, 32 KB flash voor het programma, 2 KB werkgeheugen. Al de rest op het bord is voeding en aansluitingen.

4 Digitale pinnen 0 tot 13
In- of uitgang, HIGH (5 V) of LOW (0 V). Pinnen met een ~ kunnen ook PWM (Intermediate, hoofdstuk 25). Pin 0 en 1 gebruikt de USB-verbinding: laat ze vrij.

5 Ingebouwde led L
Hangt aan pin 13, met een eigen weerstand. Handig om een eerste programma te testen zonder iets aan te sluiten.

6 Analoge ingangen A0 tot A5
Lezen een spanning tussen 0 en 5 V als een getal van 0 tot 1023: hier komen de sensoren van hoofdstuk 25.

7 Voedingspinnen
5V en 3.3V leveren spanning aan kleine schakelingen; GND is de massa (0 V). Elke schakeling moet met GND verbonden zijn.

8 Resetknop
Start het programma opnieuw vanaf het begin. Het programma blijft bewaard.

UITLEG · 24.4

Input, verwerking, output

4/18

Elk systeem met een microcontroller volgt hetzelfde schema, dat je in hoofdstuk 1 als systeemdenken leerde:

- **Input**: wat de microcontroller leest. Een drukknop, een schakelaar, een vlotter, een sensor.
- **Verwerking**: het programma. Het vergelijkt, telt, beslist.
- **Output**: wat de microcontroller stuurt. Een led, een zoemer, een display, of via een relais een pomp of een ledstrip.

De microcontroller levert zelf maar kleine stromen: genoeg voor een led, veel te weinig voor een pomp van 0,65 A. Grote verbruikers schakel je met een tussenstap: een **relais** (hoofdstuk 25) of een transistor (Intermediate, hoofdstuk 23). Zo kwam in hoofdstuk 18 het relaiscontact K1 in het schema van de kasverlichting.

Een pin is geen stopcontact

Een pin van een Uno R3 levert hoogstens 20 mA (40 mA is het absolute maximum: daarboven gaat de chip stuk), en alle pinnen samen hoogstens 200 mA. Sluit nooit een motor, pomp of lamp rechtstreeks aan op een pin, en verbind nooit een pin rechtstreeks met GND of 5V als ze een uitgang is: dat is een kortsluiting.



Wat binnenkomt, wordt verwerkt tot wat iets doet. Grote verbruikers gaan via een relais.

UITLEG · 24.5

Digitale pinnen: HIGH of LOW

5/18

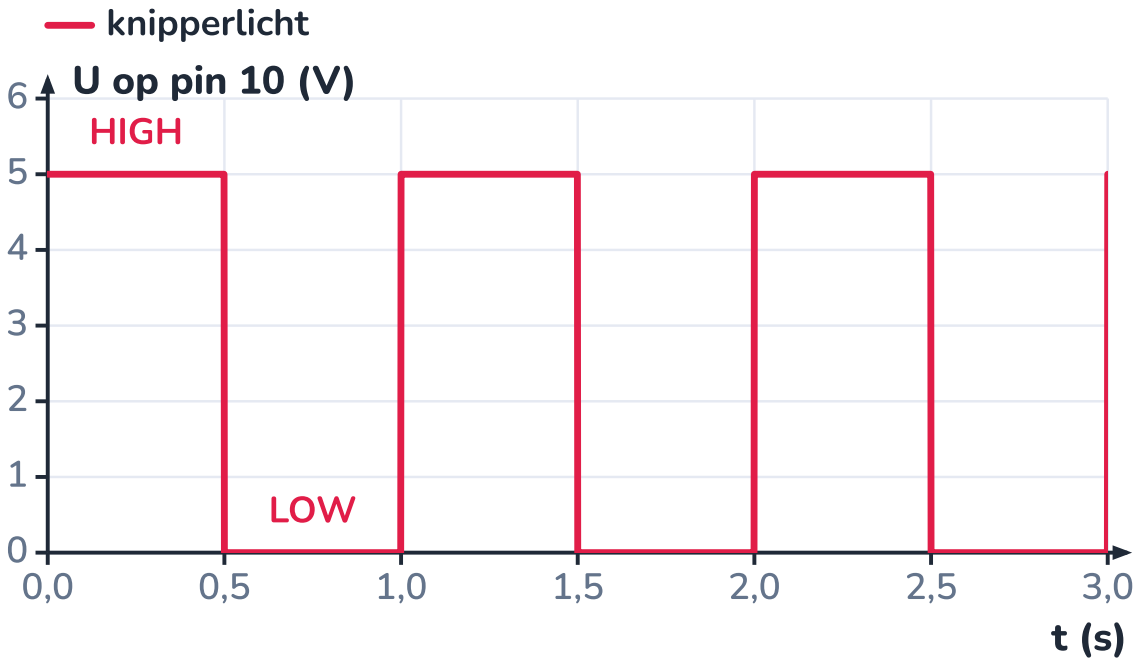
Een **digitale pin** kent maar twee toestanden: **HIGH** (1) en **LOW** (0). Bij een Uno betekent HIGH ongeveer 5 V en LOW 0 V, gemeten ten opzichte van **GND**. Voor je een pin gebruikt, zeg je in het programma of ze een ingang of een uitgang is:

Arduino-code	betekenis
`pinMode(10, OUTPUT);`	pin 10 is een uitgang
`digitalWrite(10, HIGH);`	zet 5 V op pin 10
`digitalWrite(10, LOW);`	zet 0 V op pin 10
`pinMode(2, INPUT_PULLUP);`	pin 2 is een ingang met de interne pull-up
`digitalRead(2)`	geeft HIGH of LOW terug: wat ligt er op pin 2?
`delay(500);`	wacht 500 ms (0,5 s)

Een ingang leest HIGH als de spanning boven ongeveer 3 V ligt en LOW onder ongeveer 1,5 V. Wat ertussen ligt, is onzeker: vermijd het.

Hoofdletters tellen

C++ maakt verschil tussen hoofdletters en kleine letters: `digitalWrite` werkt, `digitalwrite` niet. En elke opdracht eindigt op een puntkomma.



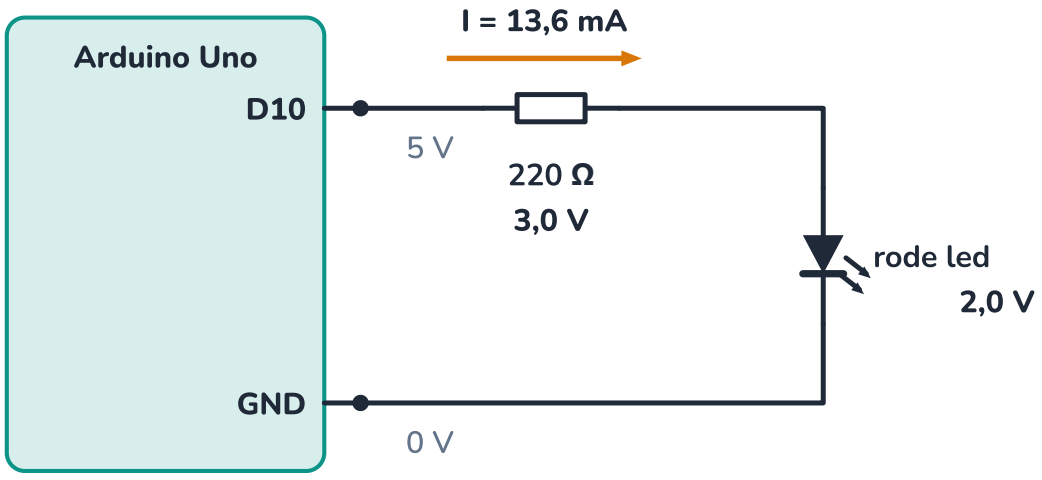
Een knipperlicht in spanning: 0,5 s HIGH (5 V), 0,5 s LOW (0 V), en zo verder.

UITGEWERKT VOORBEELD · 24.6

De voorschakelweerstand berekenen

6/18

Een rode led moet branden op pin 10 van een Arduino Uno. Volgens het gegevensblad krijgt de led 2,0 V bij 20 mA. Welke weerstand zet je in serie? Kies een weerstand die je echt kan kopen en reken de stroom na.



De 5 V van de pin verdeelt zich: 3,0 V over de weerstand, 2,0 V over de led, en door beide loopt 13,6 mA.

GEGEVEN

- pin HIGH: $U = 5{,}0\,\mathrm{V}$
- led: $U_{\mathrm{led}} = 2{,}0\,\mathrm{V}$ bij $I = 20\,\mathrm{mA}$
- weerstanden te koop in de E12-reeks: 10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82 (maal 10, 100, ...)

GEVRAAGD

- R
- een E12-waarde
- de stroom met die weerstand

OPLOSSING

1. **Spanning over de weerstand** (in serie tellen de spanningen op, hoofdstuk 20): $U_R = 5{,}0 - 2{,}0 = 3{,}0\,\text{V}$.

2. **Wet van Ohm** (hoofdstuk 19) voor de weerstand, met dezelfde stroom als door de led: $R = \frac{U_R}{I} = \frac{3{,}0\,\text{V}}{0{,}020\,\text{A}} = 150\,\Omega$.

3. **Kiezen.** 150 Ω staat in de E12-reeks, maar geeft precies 20 mA: de bovengrens van de led én de aanbevolen grens van de pin. Neem een grotere waarde voor wat marge. De waarde die in elke starterskit zit, is **220 Ω** (rood-rood-bruin-goud).

4. **Narekenen.** $I = \frac{U_R}{R} = \frac{3{,}0\,\text{V}}{220\,\Omega} = 0{,}0136\,\text{A} = 13{,}6\,\text{mA}$. De led brandt nog duidelijk; het verschil in helderheid met 20 mA zie je nauwelijks.

5. **Vermogen in de weerstand** (hoofdstuk 21): $P = U_R \cdot I = 3{,}0 \times 0{,}0136 = 0{,}041\,\text{W}$. Een gewone weerstand kan 0,25 W aan: ruim genoeg.

ANTWOORD

Minstens 150 Ω; gekozen: 220 Ω. De stroom is dan 13,6 mA.

Klopt dit? Omgekeerd: $13{,}6\,\text{mA} \times 220\,\Omega = 3{,}0\,\text{V}$, plus 2,0 V over de led is 5,0 V. Voor een groene led (ongeveer 2,2 V) geeft 220 Ω 12,7 mA, voor een blauwe of witte (ongeveer 3,0 V) 9,1 mA: één waarde voor alle kleuren is dus prima. Pas op met een **Uno R4**: die pinnen mogen maar 8 mA leveren; kies daar minstens 375 Ω, bijvoorbeeld 470 Ω (6,4 mA).

UITLEG · 24.7

Van schema naar breadboard

7/18

Op een **breadboard** bouw je zonder solderen. Onder elk gaatje zit een metalen klem. De vijf gaatjes van een **kolom** (a tot e, of f tot j) zijn met elkaar verbonden; over de gleuf in het midden niet. De lange rijen aan de rand (de **rails**, rood + en blauw –) zijn over de hele lengte verbonden: daar komen 5V en GND.

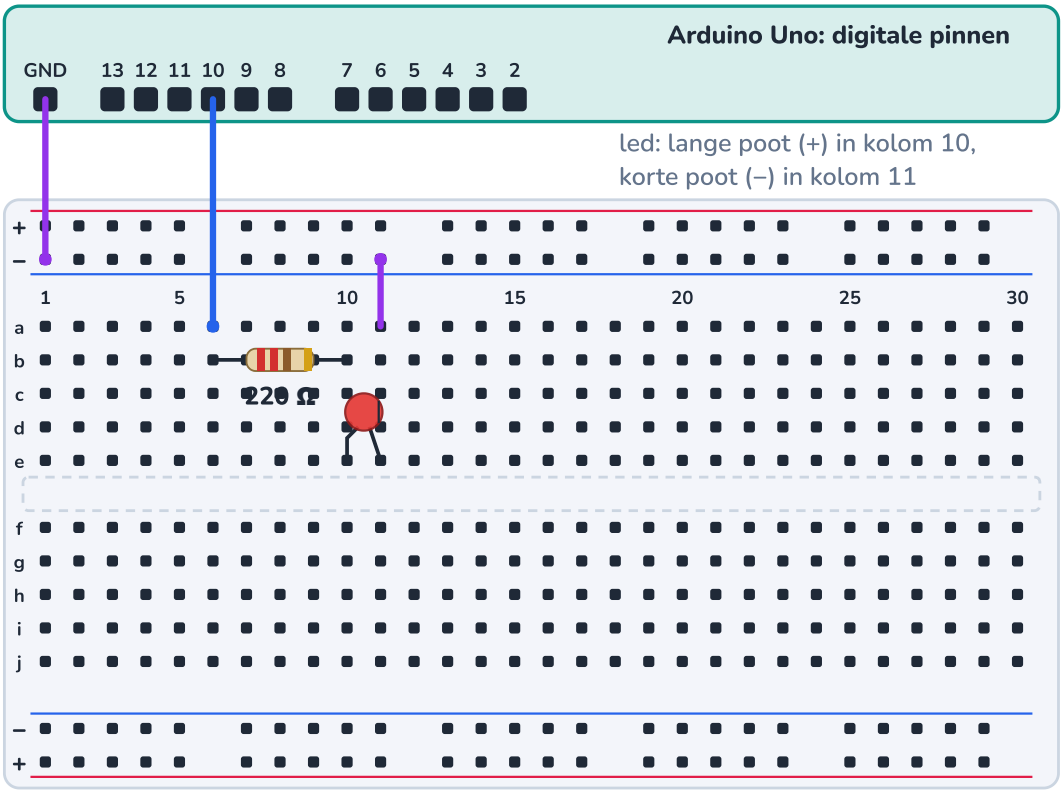
Zo volg je het schema: pin 10 → kolom 6 → weerstand van kolom 6 naar kolom 10 → lange poot van de led in kolom 10 → korte poot in kolom 11 → kabeltje van kolom 11 naar de blauwe rail → GND van de Arduino.

Een led heeft een richting

De **lange poot** is de anode (+, naar de weerstand en de pin), de **korte poot** de kathode (–, naar GND). Ook de rand van de led is aan de kathodekant plat. Andersom brandt ze niet (maar gaat ze bij 5 V ook niet stuk).

Twee pootjes in dezelfde kolom

Steek je beide pootjes van een weerstand in dezelfde kolom, dan is ze kortgesloten: de klem verbindt ze al. Een onderdeel moet altijd over twee verschillende kolommen staan.



Dezelfde schakeling als het schema, op een breadboard: blauw is het signaal van pin 10, paars is GND.

CODE · 24.8

Het eerste programma: een knipperlicht

8/18

Elk Arduino-programma (een *sketch*) heeft twee delen. `setup()` loopt één keer als het bord stroom krijgt: daar zeg je welke pinnen uitgangen zijn. `loop()` loopt daarna eindeloos. Het is precies het blok 'bij opstarten' en de eindeloze lus 'herhaal' uit hoofdstuk 23. Alles na `//` is commentaar: uitleg voor mensen, de computer slaat het over.

C++ (Arduino) **knipperlicht.ino** 13 regels

```cpp
// Knipperlicht: de led op pin 10 gaat elke halve seconde aan of uit
const int LED = 10;          // rode led met 220 ohm naar GND

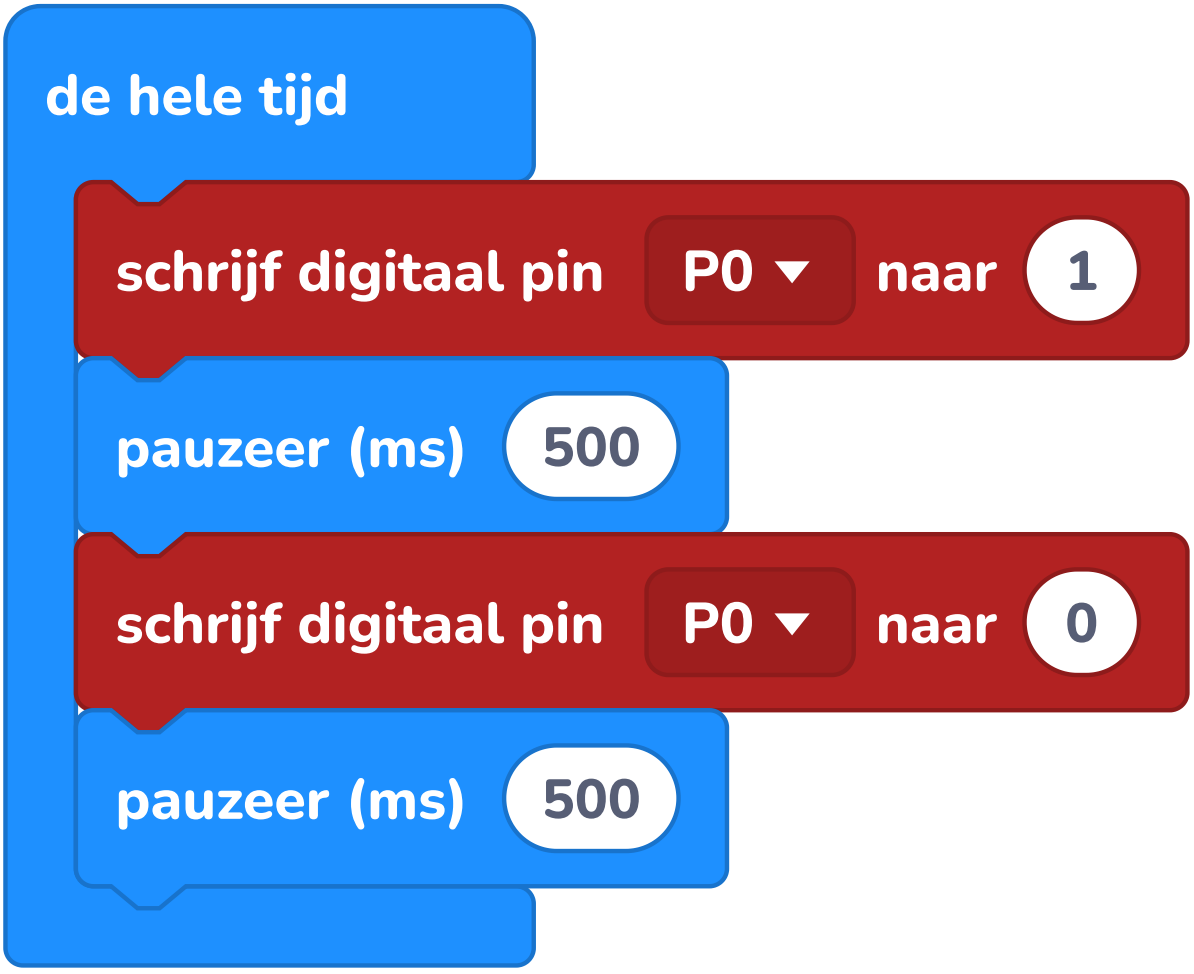
void setup() {
  pinMode(LED, OUTPUT);      // pin 10 is een uitgang (gebeurt 1 keer)
}

void loop() {                // herhaalt eindeloos
  digitalWrite(LED, HIGH);   // pin op 5 V: led aan
  delay(500);                // 500 ms wachten
  digitalWrite(LED, LOW);    // pin op 0 V: led uit
  delay(500);
}
```



Het knipperlicht in blokken (mBlock-stijl). 'wacht 0.5 sec.' is delay(500).

In blokken is het hetzelfde programma: een hoedblok, een eindeloze lus en vier blokken. In mBlock hoef je geen `pinMode` te schrijven: het blok 'zet digitale pin' doet het voor je. Op de micro:bit gebruik je pin P0 en schrijf je 1 en 0 in plaats van HIGH en LOW. Wil je het sneller laten knipperen, dan verklein je de twee wachttijden: met `delay(100)` knippert de led vijf keer per seconde.



Hetzelfde op een micro:bit in MakeCode: 'de hele tijd' is loop(), 'pauzeer (ms) 500' is delay(500).

PROEF · 24.9

Knipperlicht bouwen en meten

9/18

ONDERZOEKSVRAAG

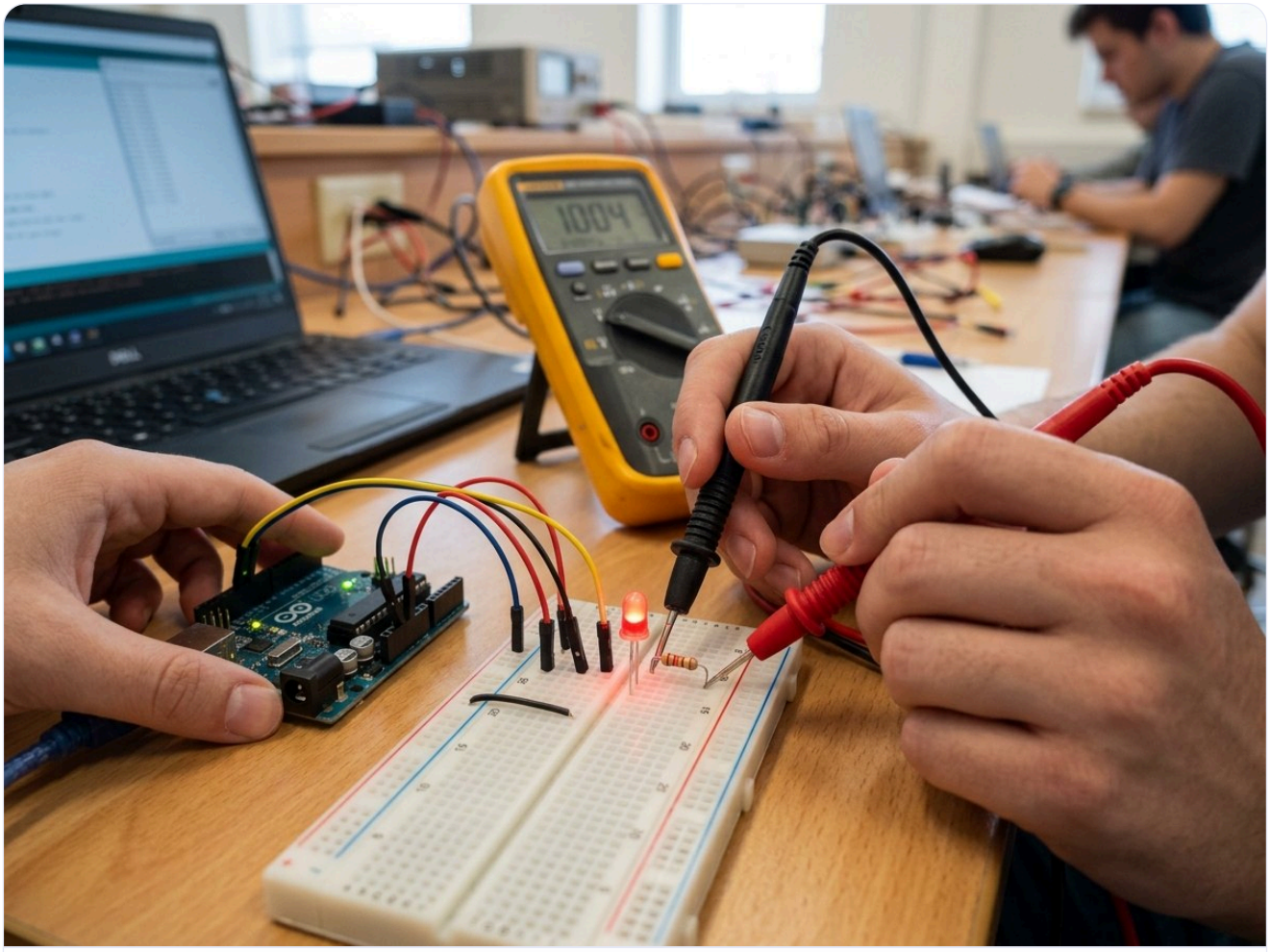
Klopt de berekende stroom van 13,6 mA met wat er echt door de led loopt?

MATERIAAL

- Arduino Uno met USB-kabel en computer
- breadboard, 3 kabeltjes
- rode led, weerstand 220 Ω
- multimeter

Veiligheid

Bouw en verander de schakeling alleen als de USB-kabel los is. Controleer voor je de kabel insteekt dat geen draad van 5V of een pin rechtstreeks naar GND loopt.



Meten over de weerstand: met de wet van Ohm vind je de stroom zonder de kring te openen.

WERKWIJZE

1. Bouw de schakeling van het breadboard. Upload het knipperlicht, maar maak de wachttijden 5000 ms, zodat je rustig kan meten.
2. Meet met de multimeter ($V_{\text{⎓}}$) de spanning tussen pin 10 en GND als de led brandt, en de spanning over de led en over de weerstand.
3. Neem de USB-kabel los, meet de weerstand zelf (Ω).
4. Bereken de stroom met de wet van Ohm uit de spanning over de weerstand. Of meet ze: zet de multimeter (mA) in serie tussen de weerstand en de led.
5. Controleer: tellen de spanningen over weerstand en led op tot de spanning op de pin?

WAARNEMING

Een meting: pin 10 geeft 4,86 V (niet precies 5 V: de pin zakt een beetje als hij stroom levert). Over de led 1,93 V, over de weerstand 2,93 V; samen 4,86 V. De weerstand meet 218 Ω (binnen de tolerantie van 5 %). Stroom: $2{,}93/218 = 0{,}0134\,\text{A} = 13{,}4\,\text{mA}$; de multimeter in serie geeft 13,3 mA.

VERKLARING

De meting ligt binnen 2 % van de berekening. De kleine verschillen komen van de pin (4,86 V in plaats van 5,00 V), de led (1,93 V in plaats van 2,0 V) en de tolerantie van de weerstand. Dat is precies waarom je een weerstand met wat marge kiest: de werkelijkheid wijkt altijd een beetje af van het gegevensblad. De spanningen tellen op zoals in elke serieschakeling (hoofdstuk 20).

UITLEG · 24.10

Uploaden en testen

10/18

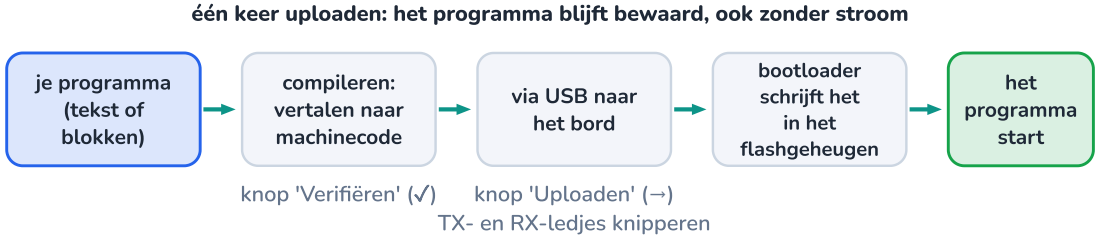
Een programma in tekst of blokken kan de chip niet lezen. De computer **compileert** het eerst: hij vertaalt het naar machinecode (enen en nullen). Staat er een fout in de schrijfwijze, dan stopt hij hier met een foutmelding en een regelnummer. Daarna **upload** je: via USB schrijft een klein hulpprogramma op de chip (de *bootloader*) de machinecode in het flashgeheugen. Het programma start meteen en blijft bewaard.

In de Arduino IDE kies je eerst het bord (Arduino Uno) en de poort (de USB-verbinding), dan klik je op **Verifiëren** (compileren) en **Uploaden**. Daarna **test** je, volgens een plan:

test	verwacht	gezien
bord krijgt stroom	ON-led brandt	ja
na het uploaden	led op pin 10 knippert 1 keer per seconde	ja
resetknop	knipperen begint opnieuw	ja
USB los en weer in	programma start vanzelf	ja

Werkt het niet? Van programma naar draad

Test eerst het programma zonder schakeling: laat de ingebouwde led L (pin 13) knipperen. Knippert L, dan werken bord, upload en programma, en zit de fout in de schakeling: led omgekeerd, weerstand in één kolom, verkeerde pin, GND vergeten, kabeltje los. Kijk ze één voor één na, en meet met de multimeter.



Compileren vertaalt, uploaden schrijft het in het flashgeheugen; daarna start het programma vanzelf.

UITLEG · 24.11

Een drukknop inlezen: pull-down of pull-up

11/18

Een drukknop is een maakcontact (hoofdstuk 18): ingedrukt verbindt hij twee pootjes. Verbind je hem alleen tussen 5V en een ingang, dan ligt de ingang op 5 V als je drukt. Maar als je loslaat, is de ingang met niets verbonden. Zo'n **zwevende ingang** werkt als een antenne: ze leest willekeurig HIGH of LOW, soms al als je je hand in de buurt houdt.

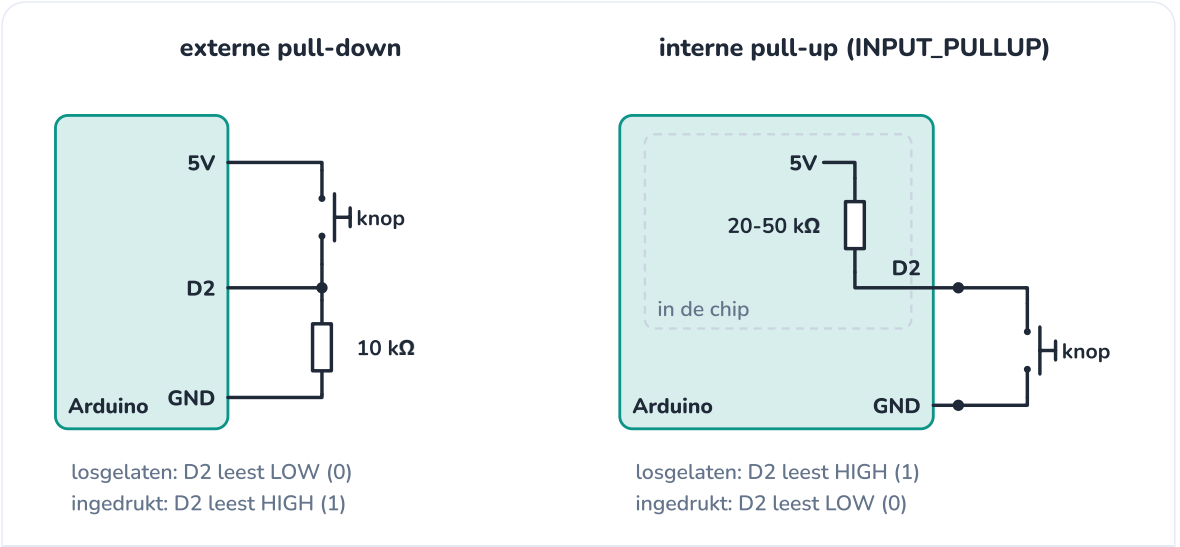
De oplossing is een weerstand die de ingang in rust naar een vaste spanning trekt:

- **Pull-down**: 10 kΩ van de ingang naar GND, knop naar 5V. Losgelaten leest de pin LOW, ingedrukt HIGH. Ingedrukt loopt er $5/10\,000 = 0{,}5\,\mathrm{mA}$ door de weerstand: verwaarloosbaar. Zonder die weerstand zou de knop 5V rechtstreeks met GND verbinden: kortsluiting.
- **Interne pull-up**: de Uno heeft in de chip bij elke pin een weerstand van 20 à 50 kΩ naar 5 V, die je aanzet met `pinMode(2, INPUT_PULLUP)`. De knop komt dan tussen de pin en GND. Losgelaten leest de pin **HIGH**, ingedrukt **LOW**: omgekeerd.

De pull-up is eenvoudiger (geen extra weerstand, één draad minder), daarom gebruik je hem in dit hoofdstuk. Onthoud wel dat 'ingedrukt' dan LOW betekent.

Een knop met vier pootjes

Een drukknop voor het breadboard heeft vier pootjes, per twee altijd verbonden. Zet hem over de gleuf en gebruik twee **diagonaal** tegenover elkaar liggende pootjes: dan werkt hij, hoe je hem ook draait.



Links trekt een weerstand de ingang naar 0 V, rechts trekt de interne weerstand haar naar 5 V. De knop doet het omgekeerde.

CODE · 24.12

Knop en led: lezen en beslissen

12/18

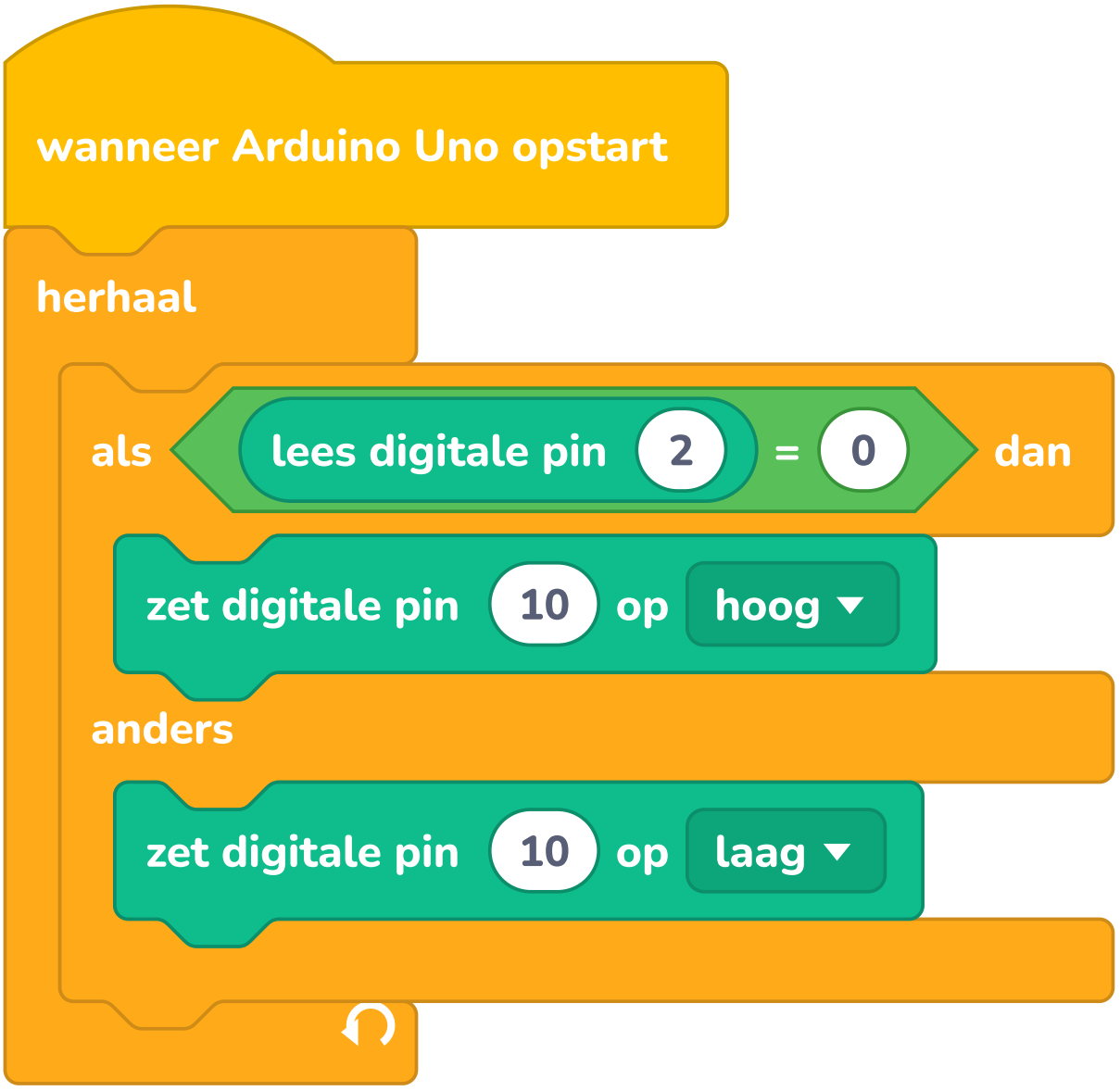
Nu komt er een keuze in het programma (hoofdstuk 23): de led brandt zolang de knop ingedrukt is. Omdat de knop met INPUT_PULLUP werkt, betekent 'ingedrukt' dat de pin LOW leest. In C++ vergelijk je met **twee** gelijktekens: `==`. Eén gelijkteken (`=`) geeft een waarde aan een variabele, zoals 'maak' in Scratch.

C++ (Arduino) **knop_led.ino** 16 regels

```cpp
// Led op pin 10 brandt zolang de drukknop op pin 2 ingedrukt is
const int KNOP = 2;          // knop tussen pin 2 en GND
const int LED = 10;

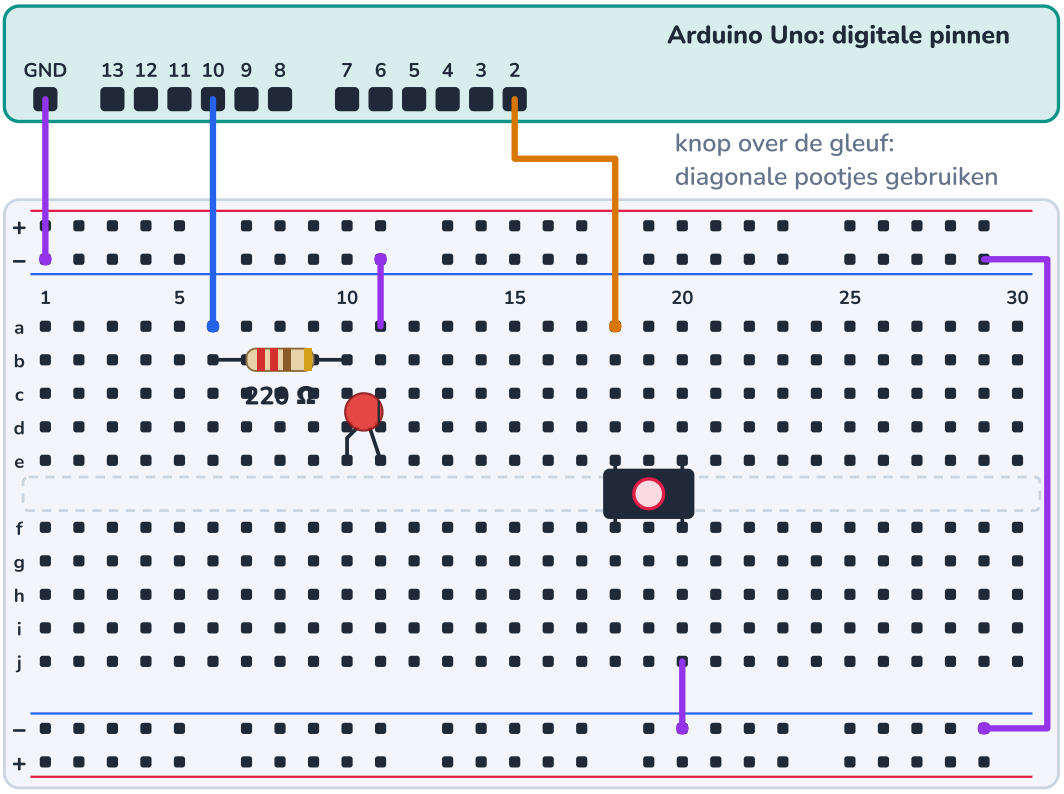
void setup() {
  pinMode(KNOP, INPUT_PULLUP);   // interne weerstand naar 5 V: losgelaten = HIGH
  pinMode(LED, OUTPUT);
}

void loop() {
  if (digitalRead(KNOP) == LOW) {    // ingedrukt: de knop verbindt pin 2 met GND
    digitalWrite(LED, HIGH);
  } else {
    digitalWrite(LED, LOW);
  }
}
```



In blokken: 'lees digitale pin 2' geeft 0 als de knop ingedrukt is (pull-up).

`loop()` loopt duizenden keren per seconde. Elke ronde leest ze de knop en zet ze de led juist. Daarom lijkt de led meteen te reageren. De schakeling op het breadboard: de led van het vorige blad, plus een knop over de gleuf, met één pootje naar pin 2 en het diagonale pootje naar GND.



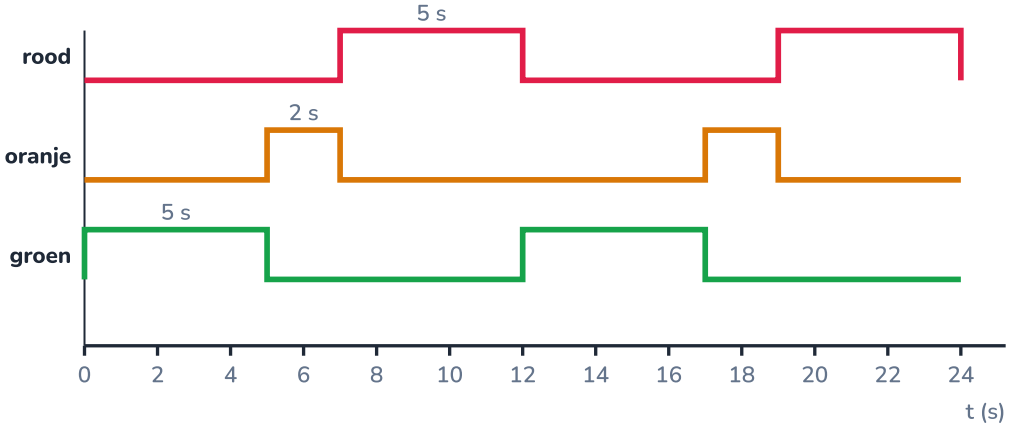
De knop staat over de gleuf: oranje van pin 2 naar kolom 18, paars van kolom 20 naar GND. Een draadje rechts verbindt de twee GND-rails.

UITGEWERKT VOORBEELD · 24.13

Een verkeerslicht

13/18

Bouw een verkeerslicht met drie leds: groen 5 s, oranje 2 s, rood 5 s, en zo verder. Teken het tijdsdiagram, het schema en het programma. Hoe lang duurt één volledige cyclus?



Groen 5 s, oranje 2 s, rood 5 s: na 12 s begint alles opnieuw.

GEGEVEN

- leds rood, oranje, groen op de pinnen 11, 12 en 13
- elke led met een eigen weerstand van 220 Ω
- volgorde in België: groen → oranje → rood → groen

GEVRAAGD

- tijdsdiagram
- schema
- programma
- duur van een cyclus

OPLOSSING

1. **Decompositie.** Drie toestanden na elkaar: groen, oranje, rood. In elke toestand brandt precies één led.

2. **Tijdsdiagram.** Zet per led een lijn die hoog is als de led brandt. Tel op: $5 + 2 + 5 = 12\,\text{s}$ per cyclus.

3. **Schema.** Elke led krijgt een eigen weerstand. Eén gemeenschappelijke weerstand voor de drie leds zou werken zolang er maar één tegelijk brandt, maar met eigen weerstanden is elke led onafhankelijk.

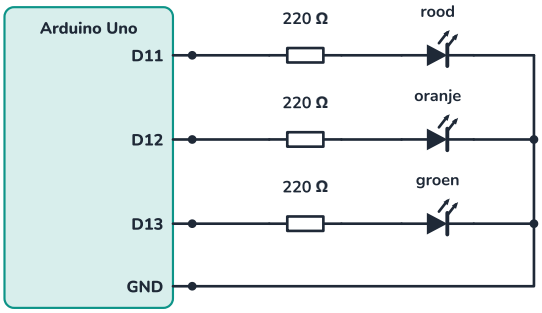
4. **Programma.** In `setup()` drie uitgangen. In `loop()`: groen aan, 5000 ms, groen uit; oranje aan, 2000 ms, oranje uit; rood aan, 5000 ms, rood uit. Dan begint loop opnieuw.

5. **Testen.** Brandt er ooit geen of meer dan één led? Kijk vooral naar de overgangen: zet je 'uit' vóór 'aan', dan is er even geen licht (een paar microseconden, onzichtbaar); vergeet je 'uit', dan branden er twee.

ANTWOORD

Een cyclus duurt 12 s. Zie het tijdsdiagram, het schema en de code hieronder.

Klopt dit? Echte verkeerslichten staan langer op oranje (meestal enkele seconden, afhankelijk van de toegelaten snelheid) en hebben een korte tijd waarin alle richtingen rood hebben. Een echt kruispunt heeft ook meerdere lichten die samen moeten werken: dan wordt het een toestandsmachine (Intermediate, hoofdstuk 32).



Drie leds op drie pinnen, elk met een eigen weerstand, samen naar GND.



Het verkeerslicht in blokken.

CODE · 24.14

Het verkeerslicht in Arduino-code

14/18

De code volgt het tijdsdiagram regel per regel. Constanten met een naam (`ROOD`, `ORANJE`, `GROEN`) maken het programma leesbaar: wil je andere pinnen, dan pas je één regel aan.

C++ (Arduino) **verkeerslicht.ino** 22 regels

```cpp
// Verkeerslicht: groen, oranje, rood, en opnieuw
const int ROOD = 11;
const int ORANJE = 12;
const int GROEN = 13;

void setup() {
  pinMode(ROOD, OUTPUT);
  pinMode(ORANJE, OUTPUT);
  pinMode(GROEN, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(GROEN, HIGH);    // groen
  delay(5000);
  digitalWrite(GROEN, LOW);
  digitalWrite(ORANJE, HIGH);   // oranje
```

```
  delay(2000);
  digitalWrite(ORANJE, LOW);
  digitalWrite(ROOD, HIGH);     // rood
  delay(5000);
  digitalWrite(ROOD, LOW);
}
```

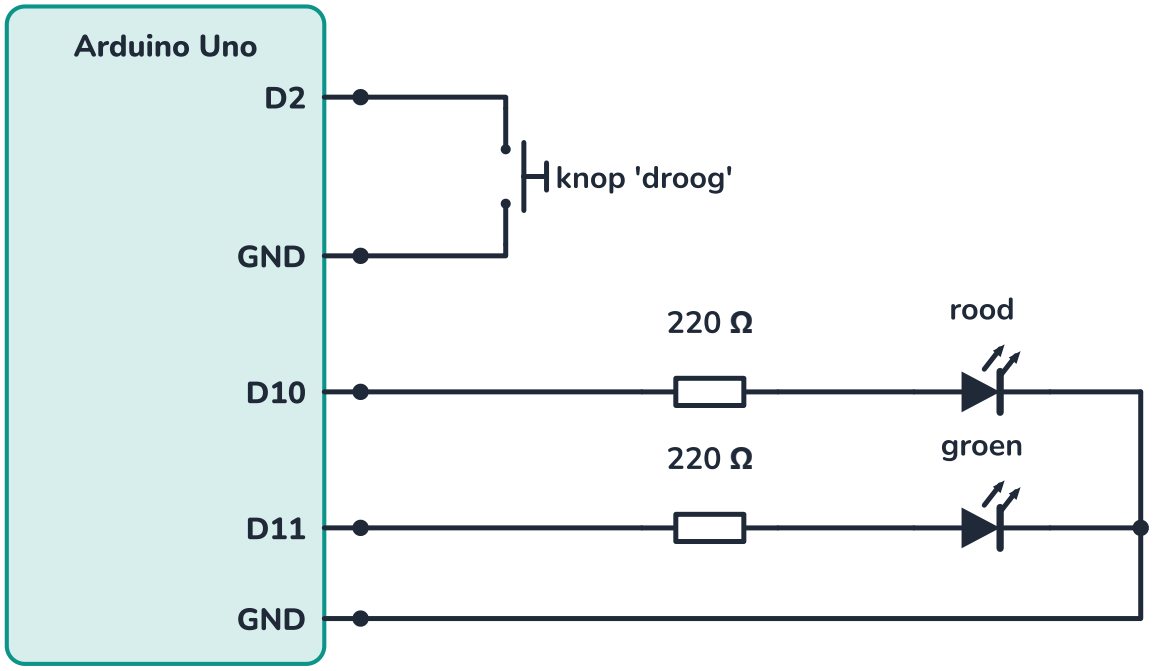
Een nadeel van `delay()`: tijdens het wachten doet de microcontroller niets anders. Een knop die je in die 12 s indrukt, wordt niet opgemerkt. Voor een voetgangersknop die altijd reageert, heb je een andere techniek nodig (`millis()`, Intermediate, hoofdstuk 29). Opdracht 24.13 toont een eenvoudige oplossing die de knop alleen tussen twee cycli leest.

UITGEWERKT VOORBEELD · 24.15

Habitat: het statuslampje van de meetkas

15/18

De meetkas krijgt een statuslampje: **groen** als alles goed is, **rood** als de planten water nodig hebben. De bodemvochtsensor komt pas in hoofdstuk 25; tot dan speelt een drukknop voor 'de grond is droog'. Ontwerp de schakeling en het programma, en controleer het stroomverbruik.



Het statuslampje: een knop als stand-in voor de sensor, twee leds met elk een weerstand.

GEGEVEN

- Arduino Uno op de 5 V-omvormer van de meetkas (hoofdstuk 20)
- rode en groene led, elk 220 Ω
- drukknop 'droog' met INPUT_PULLUP
- pinnen: knop D2, rood D10, groen D11

GEVRAAGD

- schema
- programma in blokken en in code
- stroom van de leds en vergelijking met het budget

OPLOSSING

1. **Input, verwerking, output.** Input: de knop op D2 (later de sensor). Verwerking: 'droog?' Output: de rode led op D10 of de groene op D11.
2. **Schema.** Twee keer het schema led + 220 Ω, op D10 en D11; de knop tussen D2 en GND.

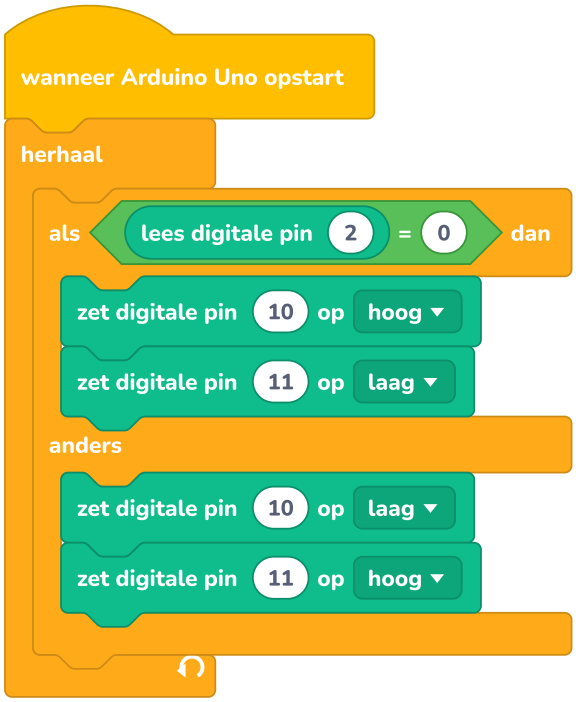
3 **Programma.** Eindeloze lus met een keuze: als D2 LOW leest (ingedrukt = droog), rood aan en groen uit; anders rood uit en groen aan. Er brandt altijd precies één led: zo zie je ook dat de microcontroller werkt.

4 **Stroom.** Rood: $3{,}0/220 = 13{,}6\,\text{mA}$. Groen (ongeveer 2,2 V): $2{,}8/220 = 12{,}7\,\text{mA}$. Er brandt er één tegelijk: hoogstens 13,6 mA, of $5 \times 0{,}0136 = 0{,}07\,\text{W}$. Aan de 5 V-kant van de omvormer is 0,30 A beschikbaar (hoofdstuk 21): het lampje gebruikt minder dan 5 % daarvan.

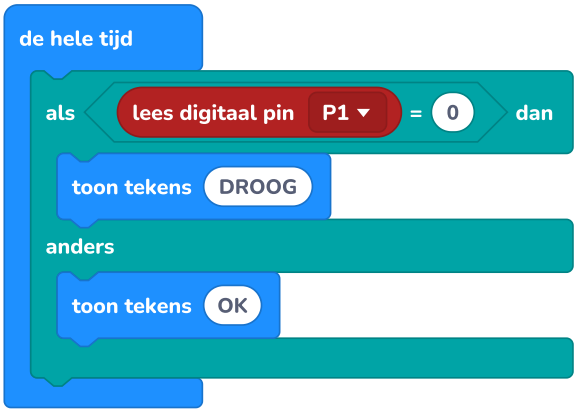
ANTWOORD

Knop op D2 (INPUT_PULLUP), rode led op D10 en groene op D11, elk met 220 Ω; hoogstens 13,6 mA extra.

Klopt dit? Test beide toestanden: knop los → groen; knop ingedrukt → rood. Test ook de overgang: rood en groen branden nooit samen en nooit allebei niet. In opdracht 24.12 laat je rood knipperen als het reservoir leeg is.



In blokken: als D2 0 leest, rood aan en groen uit; anders omgekeerd.



Op een micro:bit kan het ook met de ingebouwde leds: 'DROOG' of 'OK' schuift over het schermpje van 5 × 5 lampjes.

CODE · 24.16

Het statuslampje in Arduino-code

16/18

De code is die van 'knop en led', met een tweede uitgang. Het commentaar bovenaan zegt wat er later verandert: in hoofdstuk 25 vervang je `digitalRead(DROOG) == LOW` door een vergelijking met de bodemvochtsensor.

C++ (Arduino) **statuslampje.ino** 21 regels

```cpp
// Statuslampje van de meetkas: rood = water nodig, groen = alles goed.
// Tot hoofdstuk 25 speelt een drukknop voor de bodemvochtsensor: ingedrukt = de grond is droog.
const int DROOG = 2;      // drukknop naar GND (INPUT_PULLUP)
const int ROOD = 10;      // rode led, 220 ohm
const int GROEN = 11;     // groene led, 220 ohm

void setup() {
  pinMode(DROOG, INPUT_PULLUP);
  pinMode(ROOD, OUTPUT);
  pinMode(GROEN, OUTPUT);
}

```

```
void loop() {
  if (digitalRead(DROOG) == LOW) {   // 'droog'
    digitalWrite(ROOD, HIGH);
    digitalWrite(GROEN, LOW);
  } else {                           // 'vochtig genoeg'
    digitalWrite(ROOD, LOW);
    digitalWrite(GROEN, HIGH);
  }
}
```

Het bord hangt in de meetkas aan de 5 V-omvormer, niet aan de computer. Upload dus eerst via USB, en sluit daarna de voeding aan. Het programma blijft in het flashgeheugen en start vanzelf.

NASLAG · 24.17

Overzicht: pinnen, code en weerstanden

17/18

voorschakelweerstand van een led

$$R = \frac{U_{\text{bron}} - U_{\text{led}}}{I}$$

symbool	betekenis	eenheid
R	weerstand	ohm (Ω)
U_{bron}	spanning van de pin of de bron	volt (V)
U_{led}	spanning over de led (gegevensblad)	volt (V)
I	gewenste stroom	ampère (A)

led-kleur	spanning (ongeveer)	stroom met 220 Ω op 5 V
rood	2,0 V	13,6 mA
oranje, geel	2,1 V	13,2 mA
groen	2,2 V (felgroen tot 3,0 V)	12,7 mA (9,1 mA)
blauw, wit	3,0 V	9,1 mA

blok (mBlock-stijl)	Arduino-code	MakeCode (micro:bit)
wanneer Arduino Uno opstart	`void setup() { ... }`	bij opstarten
herhaal (eindeloos)	`void loop() { ... }`	de hele tijd
zet digitale pin 10 op hoog	`digitalWrite(10, HIGH);`	schrijf digitaal pin P0 naar 1
lees digitale pin 2	`digitalRead(2)`	lees digitaal pin P1
wacht 0.5 sec.	`delay(500);`	pauzeer (ms) 500
als … dan … anders	`if (...) { ... } else { ... }`	als … dan … anders
(ingang met pull-up)	`pinMode(2, INPUT_PULLUP);`	zet pull pin P1 op omhoog

Uno R3: grens	waarde
stroom per pin	20 mA aanbevolen, 40 mA absoluut maximum
alle pinnen samen	200 mA
HIGH / LOW	ongeveer 5 V / 0 V; ingang: boven ±3 V HIGH, onder ±1,5 V LOW
interne pull-up	20 à 50 kΩ
E12-reeks	10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82 (maal 1, 10, 100, 1000 …)

Uno R3: grens	waarde
Uno R4	hoogstens 8 mA per pin: gebruik 470 Ω of meer voor een led

HET GEHEEL · 24.18

Waar de microcontroller vandaan komt en naartoe gaat

18/18

De microcontroller is het kruispunt van drie leerlijnen: **programmeren** (het programma), **elektriciteit en elektronica** (de schakeling rond de pinnen) en **regelen en robotica** (een systeem dat zelf reageert). Wat je hier doet met leds en knoppen, doe je in hoofdstuk 25 met sensoren en relais.

F18 De elektrische kring
Maakcontact, schakelaar en relaiscontact K1: de drukknop is de ingang van de microcontroller.

F19 Spanning, stroom en weerstand
De wet van Ohm voor de voorschakelweerstand, en de multimeter om na te meten.

F20 Serie- en parallelschakeling
Led en weerstand in serie: de spanningen tellen op, de stroom is overal gelijk.

F23 Programmeren met blokken
Dezelfde blokken: bij opstarten, eindeloze lus, als … dan … anders.

F25 Sensoren en automatisch regelen
De drukknop wordt een sensor, de led een relais met een pomp: automatisch water geven.

I23 Halfgeleiders: diode, led en transistor
Waarom een led een vaste spanning heeft, en hoe een transistor een pomp schakelt.

I24 Condensatoren en de RC-tijd
Een drukknop 'dendert': hij maakt en verbreekt een paar keer contact. Ontdenderen met een RC-kring.

I29 Microcontrollers programmeren in C++
Meer C++: variabelen en types, millis() in plaats van delay(), de seriële monitor.

E37 Embedded systemen en IoT
Interrupts, slaapstanden en draadloze sensornetwerken.

Habitat
De meetkas heeft nu een brein: een Arduino Uno op de 5 V-omvormer. Het statuslampje gebruikt D2 (knop), D10 (rood) en D11 (groen), elk met 220 Ω. In hoofdstuk 25 komt de bodemvochtsensor op A0 in plaats van de knop, en schakelt een relais op D6 het pompje. Opdracht 24.12 voegt het reservoiralarm toe.

SAMENVATTING

In het kort

- Een microcontroller is een computer op één chip (processor, flashgeheugen, werkgeheugen, pinnen) die één programma eindeloos uitvoert.
- Elk systeem met een microcontroller heeft input (knop, sensor), verwerking (programma) en output (led, via een relais: pomp).
- Een digitale pin is HIGH (ongeveer 5 V) of LOW (0 V); een Uno R3-pin levert hoogstens 20 mA (absoluut maximum 40 mA).
- Voorschakelweerstand: R = (U_bron − U_led) / I. Voor 5 V en een rode led: minstens 150 Ω; 220 Ω geeft 13,6 mA.
- Een drukknop heeft een pull-down (knop naar 5V, 10 kΩ naar GND) of de interne pull-up (knop naar GND, INPUT_PULLUP: ingedrukt = LOW) nodig.
- Een Arduino-programma heeft setup() (één keer) en loop() (eindeloos); pinMode, digitalWrite, digitalRead en delay doen het werk.
- Compileren vertaalt, uploaden schrijft het programma in het flashgeheugen; test daarna volgens een plan, eerst met de ingebouwde led.

- Het statuslampje van de meetkas: D2 knop 'droog', D10 rode led, D11 groene led, elk 220 Ω.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

microcontroller
Een kleine computer op één chip, met processor, geheugen en in- en uitgangspinnen, die één programma eindeloos uitvoert.

pin
Aansluiting van een microcontroller die als ingang (lezen) of als uitgang (schrijven) werkt.

digitaal signaal
Een signaal met maar twee toestanden: HIGH (1, bij de Uno ongeveer 5 V) en LOW (0, 0 V).

GND
De massa of min van de schakeling (0 V); alle spanningen worden ten opzichte van GND gemeten.

voorschakelweerstand
Weerstand in serie met een led die de stroom beperkt tot een veilige waarde.

E12-reeks
De twaalf standaardwaarden per decade waarin weerstanden te koop zijn: 10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82 (maal 1, 10, 100, ...).

pull-down / pull-up
Weerstand die een ingang naar 0 V (pull-down) of naar 5 V (pull-up) trekt zolang de knop los is, zodat de ingang nooit zweeft.

breadboard
Insteekbord om zonder solderen te bouwen: de vijf gaatjes van een kolom (a-e of f-j) zijn verbonden, net als de gaatjes van een voedingsrail.

setup() en loop()
In een Arduino-programma loopt setup() één keer bij het opstarten, loop() daarna eindeloos.

uploaden
Het vertaalde programma via USB in het flashgeheugen van de microcontroller schrijven.

F FUNDAMENTAL · DEEL F6 · PROGRAMMEREN EN AUTOMATISEREN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 25

Sensoren en automatisch regelen

Meten, beslissen, doen: de meetkas geeft zelf water en zet zelf haar dakraam open

Een microcontroller met alleen knoppen en leds weet niets van de wereld. Met **sensoren** meet hij temperatuur, licht en bodemvocht; met **actuatoren** zoals een relais, een pomp of een servo grijpt hij in. Daartussen zit een eenvoudige regel: is de meting te hoog of te laag, schakel dan iets aan of uit. In dit hoofdstuk leer je analoge waarden inlezen, een sensor ijken tegenover een betrouwbare referentie, en een aan/uit-regeling bouwen. De meetkas geeft voortaan zelf water en opent zelf haar dakraam.

5× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · 2× code · ± 8 lestijden

R Regelen en robotica · P Programmeren en computationeel denken · L Elektriciteit en elektronica



De meetkas regelt zichzelf: het dakraam staat open en de sensor bewaakt het vocht in de grond.

Na dit hoofdstuk

- Je kan het blokschema meten - beslissen - doen tekenen en uitleggen, en een open lus onderscheiden van een gesloten lus.
- Je kan voor temperatuur, licht en bodemvocht een sensor kiezen en zeggen welke grootheid er verandert.
- Je kan een ruwe waarde van een 10-bits ADC (0 tot 1023) omrekenen naar een spanning en omgekeerd, voor een Uno (5 V) en een micro:bit (3,3 V).
- Je kan een sensor ijken met een referentie: metingen in een tabel en een ijklijn zetten, en de ijklijn gebruiken.
- Je kan een aan/uit-regeling met een drempelwaarde ontwerpen, en uitleggen waarom twee drempels (hysterese) het schakelen rustiger maken.
- Je kan een geschikte actuator kiezen (servo, pomp, ventilator, relais, duwstang) en uitleggen waarom een relais nodig is.
- Je kan het automatisch water geven van de meetkas bouwen, programmeren en testen, met aandacht voor wat er gebeurt als iets faalt.

VERHAAL · 25.1

Drie uitvinders en een vlotter

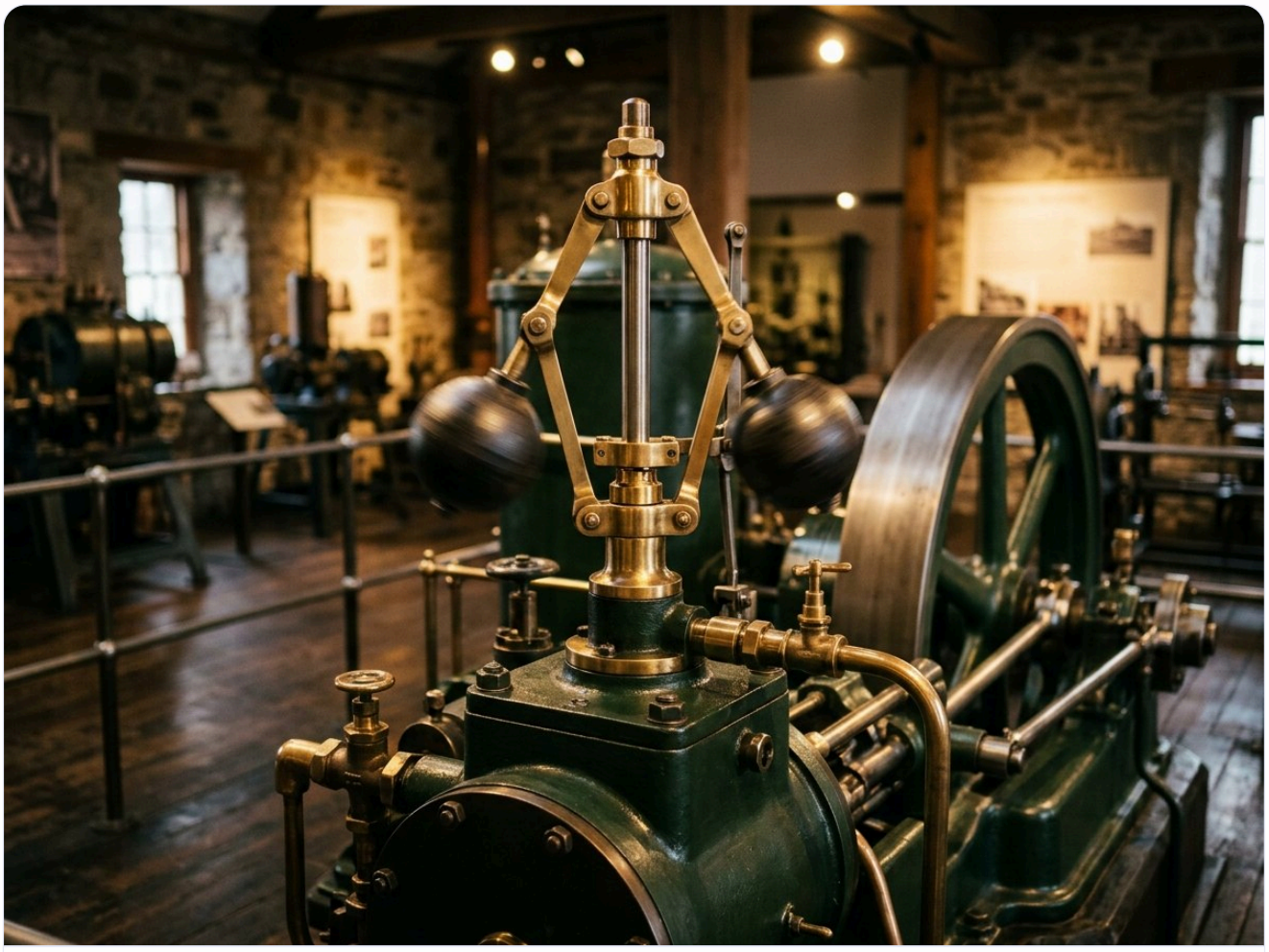
1/16

Al meer dan tweeduizend jaar bouwen mensen machines die zichzelf bijsturen. In de derde eeuw voor Christus maakte **Ktesibios** in Alexandrië een waterklok: water druppelt gelijkmatig in een vat, en het

stijgende peil wijst de tijd aan. Gelijkmatig druppelen lukt alleen als het water erboven op een vaste hoogte blijft. Ktesibios gebruikte daarvoor een **vlotter** die de toevoer afsluit als het peil stijgt en opent als het daalt: hetzelfde principe als het vlotterventiel in een toiletreservoir.

Rond 1620 bouwde de Nederlandse uitvinder **Cornelis Drebbel** een broedoven die zijn temperatuur zelf op peil hield: een vloeistof die uitzette bij warmte, bewoog een klep die de luchttoevoer van het vuur verkleinde. Een van de eerste thermostaten. En in 1788 zette **James Watt** een centrifugaalregulateur op zijn stoommachine: twee draaiende kogels die uit elkaar zwaaien als de machine te snel draait, en dan de stoomklep wat dichtduwen.

Een vlotter, een uitzettende vloeistof, draaiende kogels: telkens **meet** iets de toestand, **beslist** het mechanisme of er bijgestuurd moet worden, en **doet** een klep het werk. Vandaag doet een sensor het meten, een microcontroller het beslissen en een actuator het doen. Het idee is hetzelfde gebleven.



Een centrifugaalregulateur: draait de machine te snel, dan zwaaien de kogels uit en gaat de stoomklep wat dicht.

UITLEG · 25.2

Meten, beslissen, doen

2/16

Elke automatische regeling bestaat uit dezelfde blokken:

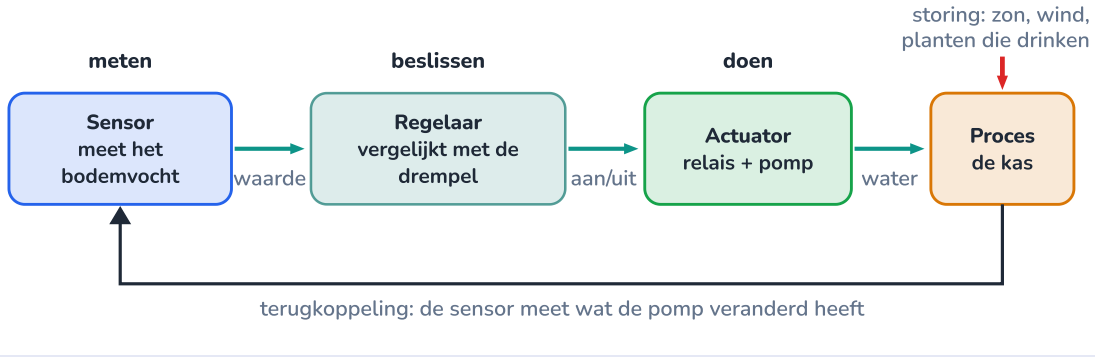
- een **sensor** meet de grootheid die je wil bewaken (het bodemvocht);
- een **regelaar** vergelijkt de meting met wat je wil (de drempel) en beslist (de microcontroller met zijn programma);
- een **actuator** grijpt in (het relais met de pomp);
- het **proces** verandert (de grond wordt natter), en de sensor meet dat opnieuw.

Die laatste pijl terug heet **terugkoppeling**. Met terugkoppeling spreek je van een **gesloten lus**: de regeling ziet het resultaat van haar eigen actie, en ook van **storingen** zoals een zonnige dag of planten die veel drinken.

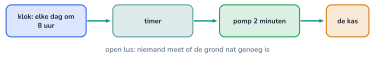
Zonder terugkoppeling heb je een **open lus**: een tuinsproeier met een timer geeft elke dag om 8 uur twee minuten water, ook als het de hele nacht geregend heeft. Open lussen zijn eenvoudig en goedkoop, maar reageren niet op wat er echt gebeurt.

Een sensor maakt een lus nog niet gesloten

Een buitenlamp met een bewegingsmelder heeft een sensor, maar de sensor meet niet het resultaat van de lamp (het licht). Dat is een open lus die door een gebeurtenis gestart wordt. Gesloten is een lus pas als de sensor meet wat de actuator verandert.



Meten, beslissen, doen, en dan opnieuw meten: de pijl terug maakt er een gesloten regelkring van.



Een open lus: de timer weet niet of de grond al nat is.

UITLEG · 25.3

Sensoren: van grootheid naar spanning

3/16

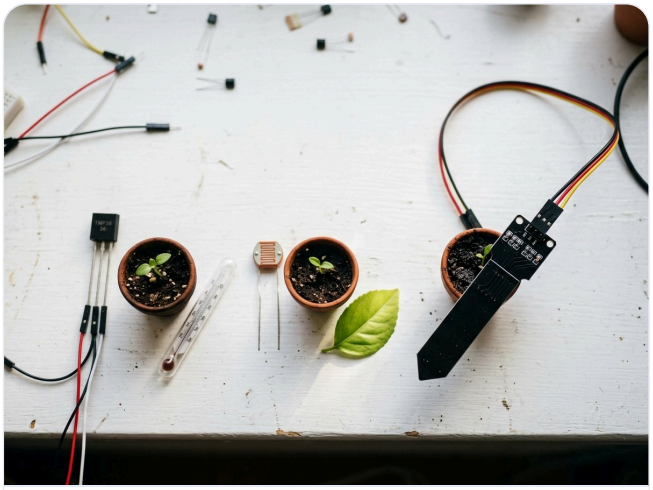
Een microcontroller meet spanningen. Een **sensor** zet een grootheid om in een spanning (of in een weerstand die je met een tweede weerstand in een spanning omzet; hoe dat precies werkt, zie je in Intermediate, hoofdstuk 22).

grootheid	sensor	wat verandert er?	in de meetkas
temperatuur	TMP36	uitgangsspanning: 0,5 V bij 0 °C, 10 mV meer per °C	A1
temperatuur	NTC-weerstand	weerstand daalt als het warmer wordt	(alternatief)
licht	LDR (lichtgevoelige weerstand)	weerstand daalt bij meer licht	A2, met 10 kΩ
bodemvocht	capacitieve sensor	uitgangsspanning daalt als de grond natter is	A0
waterpeil	vlotterschakelaar	contact open of dicht (digitaal)	D3

Let op het verschil: een vlotter of een drukknop geeft maar twee toestanden (**digitaal**), een temperatuursensor elke waarde binnen een bereik (**analoog**). Analoge sensoren sluit je aan op A0 tot A5.

Het gegevensblad

Van elke sensor bestaat een gegevensblad (*datasheet*) met het bereik, de nauwkeurigheid en het verband tussen grootheid en spanning. Voor de TMP36 staat er: 10 mV per °C, 750 mV bij 25 °C, nauwkeurigheid ±2 °C. Een sensor van enkele euro's is dus niet op de tiende van een graad juist: daarom ijk je hem.



Temperatuur, licht en bodemvocht: drie sensoren voor de meetkas.



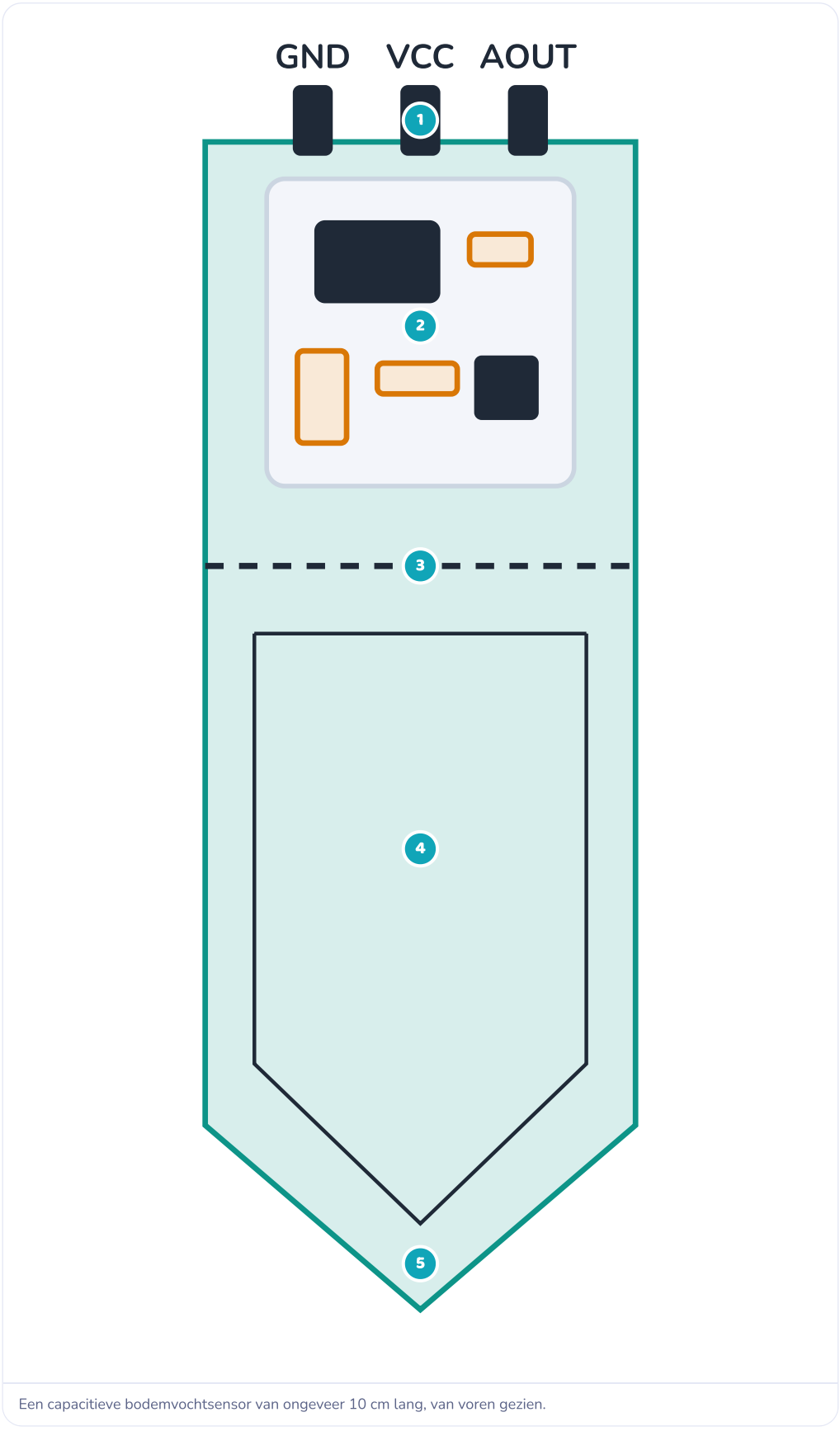
Symbolen van drie sensoren die hun weerstand veranderen: NTC, LDR en potentiometer.

ONTLEED · 25.4

De capacitieve bodemvochtsensor

4/16

Een bodemvochtsensor meet hoeveel water er in de grond zit. Oudere sensoren hebben twee blote metalen pinnen en meten de weerstand van de grond; die pinnen roesten snel weg. De **capacitieve** sensor heeft geen blootliggend metaal: hij meet hoe goed de grond een elektrisch veld doorlaat, en dat hangt sterk af van het water erin.



Een capacitieve bodemvochtsensor van ongeveer 10 cm lang, van voren gezien.

1 Aansluitingen
GND naar GND, VCC naar 5V (of 3,3 V), AOUT naar een analoge ingang (A0). Drie draadjes.

2 Elektronica
Een kleine schakeling maakt van de meting een spanning. Moet droog blijven: niet in de grond, en best afdekken (krimpkous of lak).

3 Tot hier in de grond
De streep geeft aan hoe diep de sensor mag. Steek hem altijd even diep, anders verandert de meting.

4 **Meetzone**
Twee koperbanen onder een beschermlaag vormen een soort condensator. Hoe natter de grond, hoe lager de spanning op AOUT.

5 **Punt**
Steek de sensor voorzichtig in: de printplaat breekt als je ze tegen een steen duwt. Duw niet op de elektronica.

UITLEG · 25.5

Analoog inlezen: van spanning naar getal

5/16

Een analoge ingang meet een spanning en geeft een **getal** terug. Dat doet de **analoog-digitaalomzetter** (ADC) in de chip. Een Uno heeft een ADC van **10 bits**: hij verdeelt het bereik van 0 tot 5 V in $2^{10} = 1024$ trapjes, genummerd van **0 tot 1023**. Eén trapje is $5\,\mathrm{V} / 1024 \approx 4{,}9\,\mathrm{mV}$.

VAN SPANNING NAAR RUWE WAARDE (ARDUINO UNO)

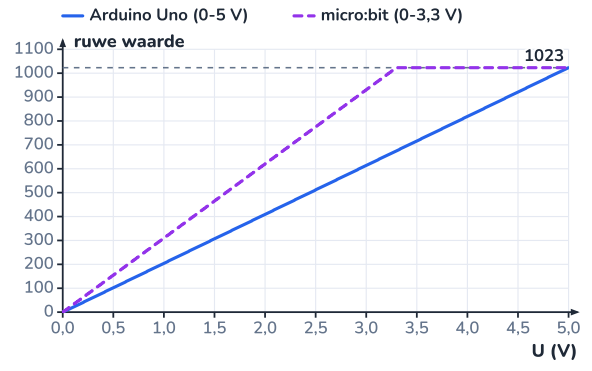
$$\text{ruw} \approx \frac{U}{5\,\mathrm{V}} \times 1023 \quad \Leftrightarrow \quad U \approx \text{ruw} \times \frac{5\,\mathrm{V}}{1023}$$

Een micro:bit meet van 0 tot 3,3 V, ook in 1024 trapjes: vervang 5 V door 3,3 V.

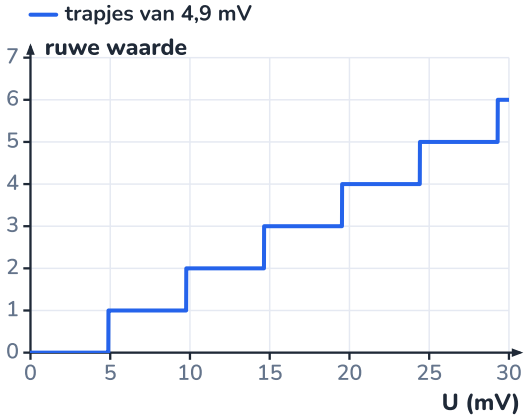
In Arduino-code lees je de ruwe waarde met `analogRead(A0)`; in blokken met 'lees analoge pin A0', in MakeCode met 'lees analoog pin P0'. Een spanning van 2,5 V geeft ongeveer 512: de helft.

Een getal is nog geen meting

De ruwe waarde heeft geen eenheid. 512 betekent 2,5 V, en wat 2,5 V betekent (een temperatuur, een vochtigheid) hangt af van de sensor. Die laatste stap doe je met het gegevensblad of met een ijklijn.



Hoe hoger de spanning, hoe hoger het getal; boven 5 V (of 3,3 V op de micro:bit) blijft het 1023.



Van dichtbij: elke 4,9 mV een trapje hoger. Kleinere verschillen ziet de Uno niet.

UITGEWERKT VOORBEELD · 25.6

Van getal naar temperatuur

6/16

Een TMP36 op A1 van een Uno geeft de ruwe waarde 150. Welke temperatuur is dat volgens het gegevensblad? Welke ruwe waarde verwacht je bij 30 °C? En hoe groot is één trapje in °C?

GEGEVEN

- ruwe waarde 150, bereik 0-5 V, 0-1023
- TMP36: $U = 0{,}5\,\mathrm{V} + 0{,}010\,\mathrm{V/°C} \times T$

GEVRAAGD

- T bij ruw 150
- ruwe waarde bij 30 °C
- één trapje in °C

OPLOSSING

1. **Getal naar spanning.** $U = 150 \times \dfrac{5\,\text{V}}{1023} = 0{,}733\,\text{V}$.
2. **Spanning naar temperatuur.** Boven 0,5 V is elke 0,010 V één graad: $T = \dfrac{0{,}733 - 0{,}5}{0{,}010} = 23{,}3\,^\circ\text{C}$.
3. **Omgekeerd, bij 30 °C.** $U = 0{,}5 + 0{,}010 \times 30 = 0{,}80\,\text{V}$; ruw $= \dfrac{0{,}80}{5} \times 1023 = 164$ (afgerond).
4. **Eén trapje** is 4,9 mV, en 10 mV is 1 °C: één trapje is ongeveer **0,5 °C**. Fijner kan deze opstelling de temperatuur niet onderscheiden.

ANTWOORD

Ruw 150 is 23,3 °C; bij 30 °C verwacht je ongeveer 164; de Uno meet de TMP36 in stapjes van ongeveer 0,5 °C.

Klopt dit? Eenheden: volt gedeeld door volt per graad geeft graden. Orde van grootte: 23 °C is een gewone kamertemperatuur, en 0,73 V ligt netjes tussen de 0,5 V (0 °C) en 1,0 V (50 °C) van de sensor. Maar de sensor zelf is maar op ±2 °C nauwkeurig: 23,3 °C kan ook 21,5 °C zijn. Dat zoek je uit door te ijken.

PROEF · 25.7

Een temperatuursensor ijken

7/16

ONDERZOEKSVRAAG

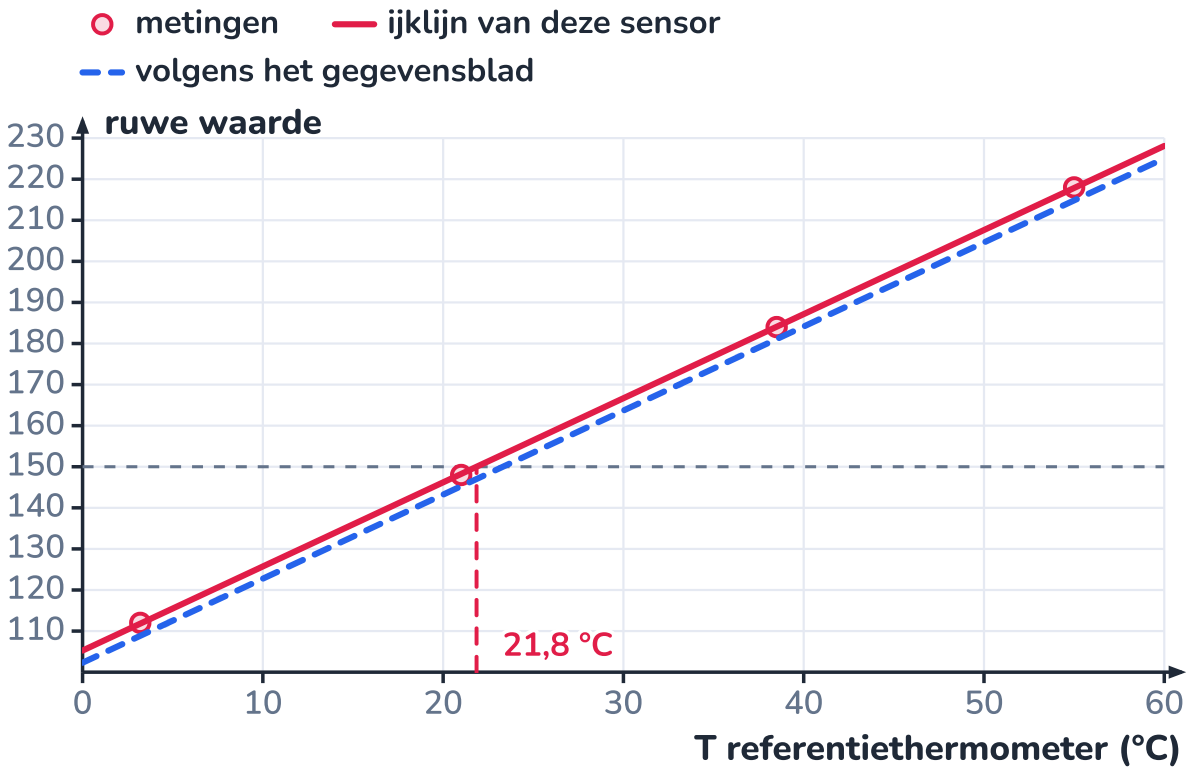
Wijst onze TMP36 de juiste temperatuur aan, en hoe corrigeren we hem als dat niet zo is?

MATERIAAL

- Arduino Uno met TMP36 op A1 (5V, A1, GND)
- referentiethermometer (bv. een digitale labothermometer)
- vier bekers: ijswater, kraanwater, lauw water, warm water (tot ±60 °C)
- plastic zakje of krimpkous om de sensor waterdicht te maken
- computer met de seriële monitor (Serial.println)

Veiligheid

Warm water tot 60 °C kan brandwonden geven: vul de beker niet te vol en zet hem stevig neer. De elektronica mag niet nat worden: alleen de ingepakte sensor gaat in het water.



De ijklijn ligt evenwijdig met de lijn van het gegevensblad, 1,5 °C ernaast. Aflezen: 150 → 21,8 °C.

WERKWIJZE

1. Pak de sensor waterdicht in. Laat de Arduino elke seconde `analogRead(A1)` naar de computer sturen.
2. Hang de sensor en de referentiethermometer naast elkaar in de beker met ijswater. Roer, wacht tot beide waarden niet meer veranderen.
3. Noteer de temperatuur van de referentie en de ruwe waarde van de sensor.
4. Herhaal met kraanwater, lauw water en warm water.
5. Zet de metingen in een grafiek: temperatuur van de referentie horizontaal, ruwe waarde verticaal. Teken de best passende rechte: de **ijklijn**.
6. Teken in dezelfde grafiek de lijn volgens het gegevensblad en vergelijk.

WAARNEMING

referentie (°C)	ruwe waarde	volgens het gegevensblad (°C)	verschil (°C)
3,2	112	4,7	+1,5
21,0	148	22,3	+1,3
38,5	184	39,9	+1,4
55,0	218	56,5	+1,5

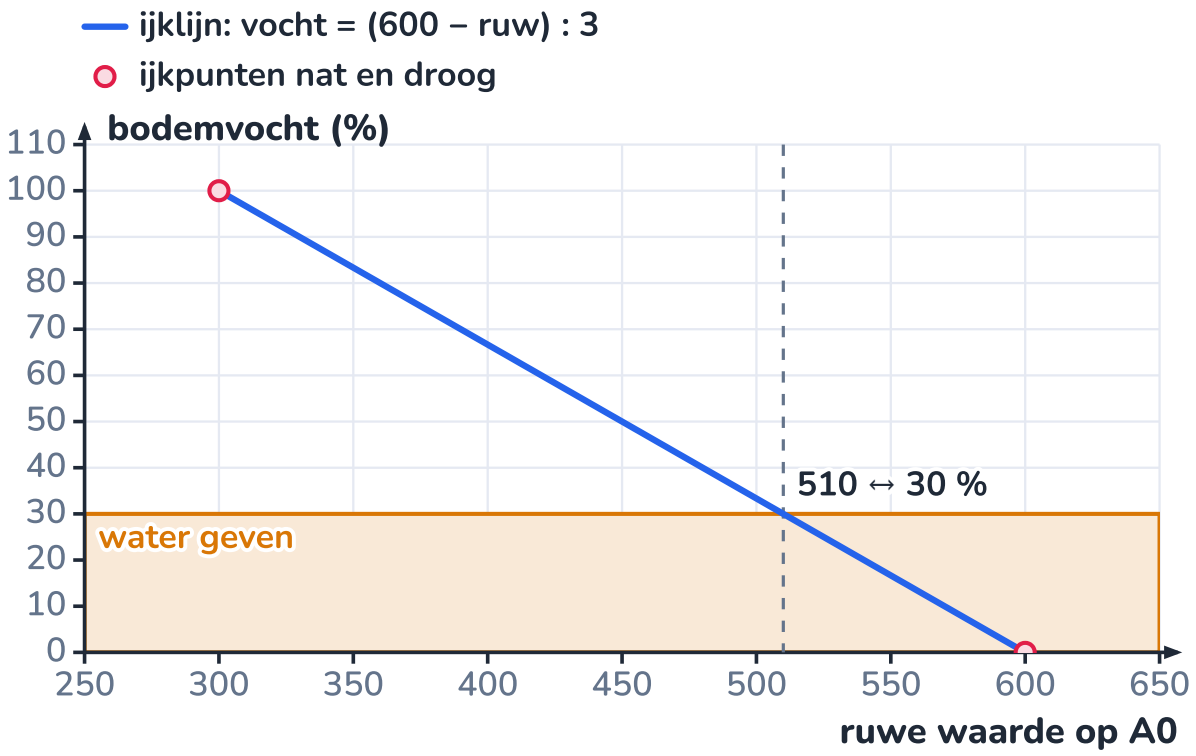
De punten liggen op een rechte die evenwijdig loopt met de lijn van het gegevensblad, maar er iets boven ligt: deze sensor wijst telkens ongeveer 1,5 °C te hoog aan.

VERKLARING

Elke sensor heeft kleine afwijkingen door de productie. Hier is het een vaste verschuiving (een **offset**) van ongeveer +1,5 °C: de helling klopt, het beginpunt niet. De ijklijn corrigeert dat. Lees je later de ruwe waarde 150 af, dan ga je in de grafiek van 150 horizontaal naar de ijklijn en dan naar beneden: 21,8 °C, en niet de 23,3 °C van het gegevensblad. In het programma trek je voortaan 1,5 °C af. Zo is een sensor van een paar euro even betrouwbaar als de referentie waarmee je hem ijkte, binnen het bereik dat je gemeten hebt (hier 3 tot 55 °C).

De bodemvochtsensor ijken in twee punten

Voor de bodemvochtsensor bestaat geen gegevensblad met een formule. Je ijkt hem daarom met twee referentiepunten: in **droge potgrond** meet je 600, in **natte potgrond** (net gegoten en uitgelekt) 300. Maak een schaal van 0 % (droog) tot 100 % (nat). Welk bodemvocht hoort bij 450? En bij welke ruwe waarde moet de kas water geven, als de drempel 30 % is?



Een dalende ijklijn door twee referentiepunten: boven 510 zakt het vocht onder 30 %.

GEGEVEN

- droog: ruw 600 → 0 %
- nat: ruw 300 → 100 %
- tussen de twee punten: een rechte (een aanname)

GEVRAAGD

- vocht bij ruw 450
- ruwe waarde bij 30 %

OPLOSSING

1. **Het bereik.** Van droog naar nat daalt de ruwe waarde met $600 - 300 = 300$. Dat zijn 100 procentpunten: elke 3 lager is 1 % natter.
2. **De ijklijn.** $\text{vocht} = \dfrac{600 - \text{ruw}}{3}$ %. Controle: ruw 600 geeft 0 %, ruw 300 geeft 100 %.
3. **Ruw 450.** $(600 - 450)/3 = 50$ %: precies in het midden.
4. **De drempel.** 30 % is $30 \times 3 = 90$ onder 600: ruw $= 510$. Boven 510 is de grond droger dan 30 %.

ANTWOORD

Ruw 450 is 50 %; de kas geeft water als de ruwe waarde boven 510 komt (vocht onder 30 %).

Klopt dit? Omgekeerd: hoe natter, hoe **lager** het getal. Wie dat vergeet, geeft water als de grond nat is. Let ook op wat de schaal betekent: 30 % is geen 30 % water in de grond, maar 'op 30 % van de weg van droog naar nat, voor deze sensor in deze potgrond'. Een andere grond of een sensor die dieper zit, vraagt een nieuwe ijking. In Arduino-code doet `map(ruw, 600, 300, 0, 100)` deze omrekening.

UITLEG · 25.9

9/16

Drempelwaarde en aan/uit-regeling

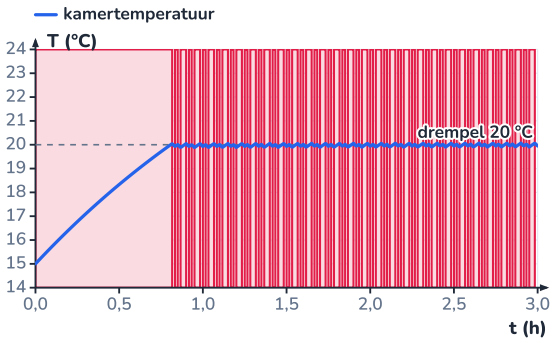
De eenvoudigste regelaar kent maar twee standen: **aan** of **uit**. Hij vergelijkt de meting met een **drempelwaarde**: 'is het kouder dan 20 °C, dan verwarming aan, anders uit'. Zo werkt de thermostaat van een verwarming, een koelkast of een strijkijzer. Het is precies de ruit van een stroomdiagram (hoofdstuk 22) in een eindeloze lus.

In de eerste grafiek meet de thermostaat elke minuut. Ligt de temperatuur net onder 20 °C, dan gaat de verwarming aan; een minuut later is het net boven 20 °C en gaat ze uit. De temperatuur blijft netjes op 20 °C, maar de verwarming schakelt in drie uur **107 keer** (elke rode strook is een periode 'aan'). Voor een ketel, een relais of een motor is dat slecht: ze verslijten door het voortdurende aan en uit.

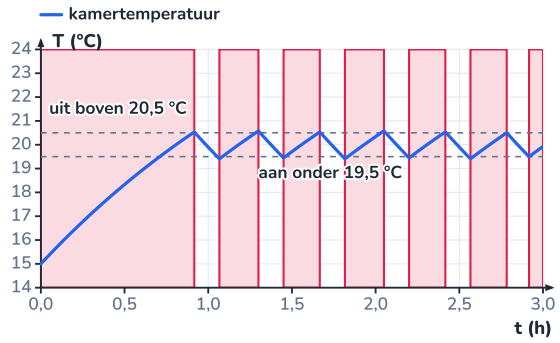
Echte thermostaten gebruiken daarom **twee drempels**: aan onder 19,5 °C, uit boven 20,5 °C. Daartussen verandert er niets. Nu schommelt de temperatuur een halve graad rond 20 °C, en schakelt de verwarming in drie uur maar **13 keer**. Dat verschil tussen de aan- en de uitdrempel heet **hysterese**. Hoe je het goed kiest, leer je in Intermediate (hoofdstuk 31).

Waarom schommelt het?

Een aan/uit-regeling kan nooit precies op 20,0 °C blijven: de verwarming geeft ofwel alles, ofwel niets. Wie een temperatuur heel stil wil houden, doseert het vermogen: 30 % verwarmen in plaats van aan of uit. Dat doet de PID-regelaar van het station op Expert-niveau.



Eén drempel: de temperatuur blijft op 20 °C, maar de verwarming (rood) flikkert aan en uit.



Twee drempels: een halve graad schommeling, maar veel minder schakelingen.

UITLEG · 25.10

Actuatoren: van signaal naar actie

10/16

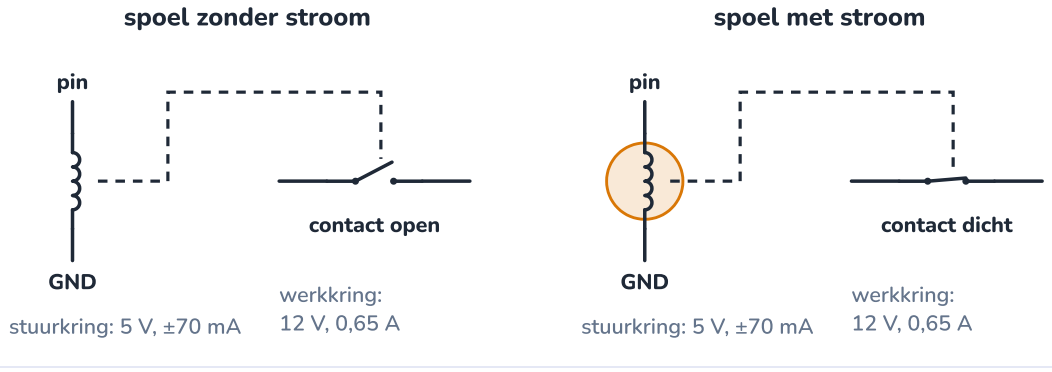
Een **actuator** zet het besluit van de regelaar om in een actie. Een microcontrollerpin levert hoogstens 20 mA bij 5 V (hoofdstuk 24): genoeg voor een led, niet voor een pomp. Daarom stuur je de meeste actuatoren via een tussenstap aan.

actuator	wat hij doet	hoe je hem aanstuurt	in de meetkas
led, zoemer	licht, geluid	rechtstreeks op een pin (met weerstand)	statuslampje
servo	draait naar een hoek van 0 tot 180°	signaal op een pin; voeding apart (5 V)	(opdracht 25.15)
pomp, ventilator (12 V)	water pompen, lucht verplaatsen	via een relais of een transistor	pompje 0,65 A
relais	schakelt een aparte kring	relaismodule op een pin	K1 ledstrip, K2 pomp

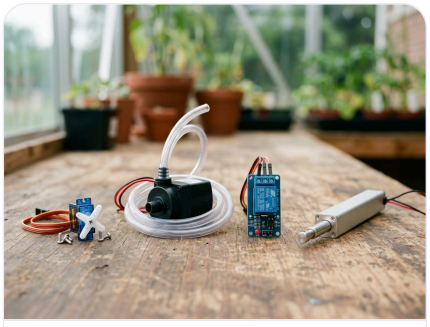
actuator	wat hij doet	hoe je hem aanstuurt	in de meetkas
duwstang (lineaire actuator)	schuift in of uit	twee relais (uit / in)	dakraam, K3 en K4

Een **relais** is een schakelaar die bediend wordt door een elektromagneet. Loopt er stroom door de **spoel**, dan trekt ze een ijzeren anker aan en sluit het **contact**. De stuurkring (5 V) en de werkkring (12 V) zijn elektrisch gescheiden: een fout in de pompkring kan de microcontroller niet beschadigen. De spoel van een klein relais van 5 V vraagt ongeveer 70 mA: te veel voor een pin. Daarom gebruik je een **relaismodule**, met een transistor die de spoelstroom levert en een diode die de chip beschermt als de spoel uitgeschakeld wordt (Intermediate, hoofdstuk 23 en 26).

> ⚠ **Actief hoog of actief laag?**
> Sommige relaismodules schakelen in als de pin HIGH is, andere als ze LOW is. Test je module eerst met een eenvoudig programma, en noteer het. In dit hoofdstuk schakelt HIGH het relais in.



In het schema verbindt een stippellijn de spoel met het contact dat ze bedient: geen elektrische verbinding, wel een mechanische.



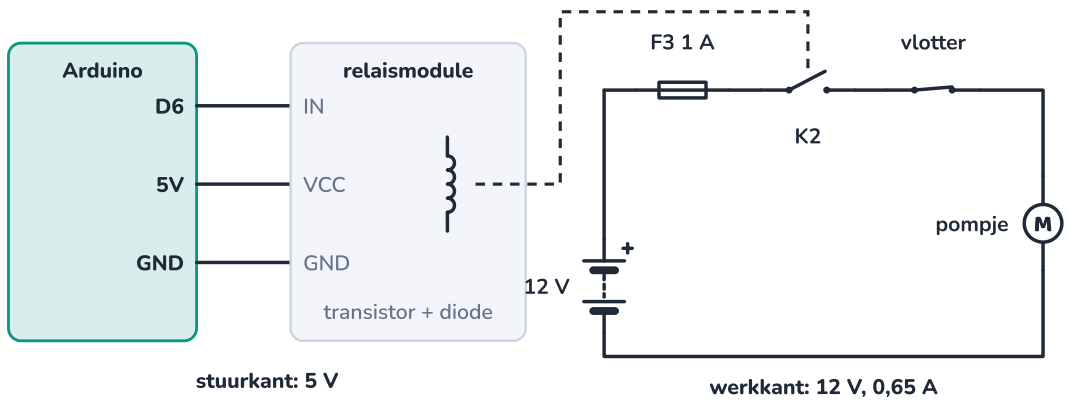
Een servo, een pompje, een relaismodule en een duwstang: vier manieren om iets te laten gebeuren.

UITGEWERKT VOORBEELD · 25.11

Habitat: automatisch water geven

11/16

Zet het algoritme 'water geven' (hoofdstuk 22, getest in de simulatie van hoofdstuk 23) om in een echte schakeling. Welke pinnen gebruik je, hoe schakel je het pompje van 12 V, hoeveel water geeft een beurt, en hoeveel energie kost het per dag?



Links de stuurkant (5 V), rechts de werkkant (12 V). De stippellijn is de mechanische koppeling tussen spoel en contact K2.

GEGEVEN

- bodemvochtsensor op A0, ijking: vocht = (600 – ruw) : 3
- drempel 30 %, wachttijd 15 min
- pompje 12 V, 0,65 A, 8,0 mL/s; verbruik ongeveer 1,8 L per dag
- 12 V-tak van de pomp met zekering 1 A en vlotterschakelaar (hoofdstuk 18 en 20)

GEVRAAGD

- pinplan en schema
- water per beurt en aantal beurten per dag
- energie van de pomp per dag

OPLOSSING

1. **Meten.** Sensor op A0 (analoog). Vlotter van het reservoir op D3 (digitaal, INPUT_PULLUP), zoals in opdracht 24.12.

2. **Doen.** De pomp trekt 0,65 A op 12 V: dat kan geen pin. Relaismodule op D6; het contact K2 komt in de 12 V-tak van de pomp, in serie met de zekering (1 A) en met de vlotterschakelaar. Zo zijn er twee beveiligingen: het programma pompt niet als D3 'leeg' meldt, en de vlotter in de pompkring breekt de stroom zelf als het peil te laag is.

3. **Beslissen.** Het programma leest A0, rekent om naar procent, en pompt 30 s als het vocht onder 30 % is en er water is. Daarna 15 minuten wachten: het water moet eerst naar de sensor zakken.

4. **Water per beurt.** $30\,\text{s} \times 8{,}0\,\text{mL/s} = 240\,\text{mL}$. Voor 1,8 L per dag: $1800/240 = 7{,}5$ beurten, of $7{,}5 \times 30 = 225\,\text{s}$ pompen per dag, zoals in het stationsdossier.

5. **Energie.** Het pompje: $P = 12 \times 0{,}65 = 7{,}8\,\text{W}$, 225 s per dag: $7{,}8 \times 225 = 1755\,\text{J}$, of 0,49 Wh per dag (hoofdstuk 21). De spoel van het relais (±0,35 W) staat alleen aan tijdens het pompen: verwaarloosbaar.

ANTWOORD

A0 sensor, D3 vlotter, D6 relais K2 (pomp), D10/D11 statuslampje. Per beurt 240 mL; 7,5 beurten (225 s pompen) per dag; de pomp gebruikt 0,49 Wh per dag.

Klopt dit? Test in drie stappen. (1) Zonder pomp: laat het programma de vochtwaarde naar de computer sturen en controleer droog/nat met de hand. (2) Met een led in plaats van het relais: gaat ze aan bij een droge sensor en uit bij een natte? (3) Met pomp, eerst met een korte beurt van 3 s. Test ook de rare gevallen: reservoir leeg, sensor uit de grond getrokken (lucht is 'droog': pompt de kas dan het reservoir leeg?).

CODE · 25.12

Automatisch water geven in code en in blokken

12/16

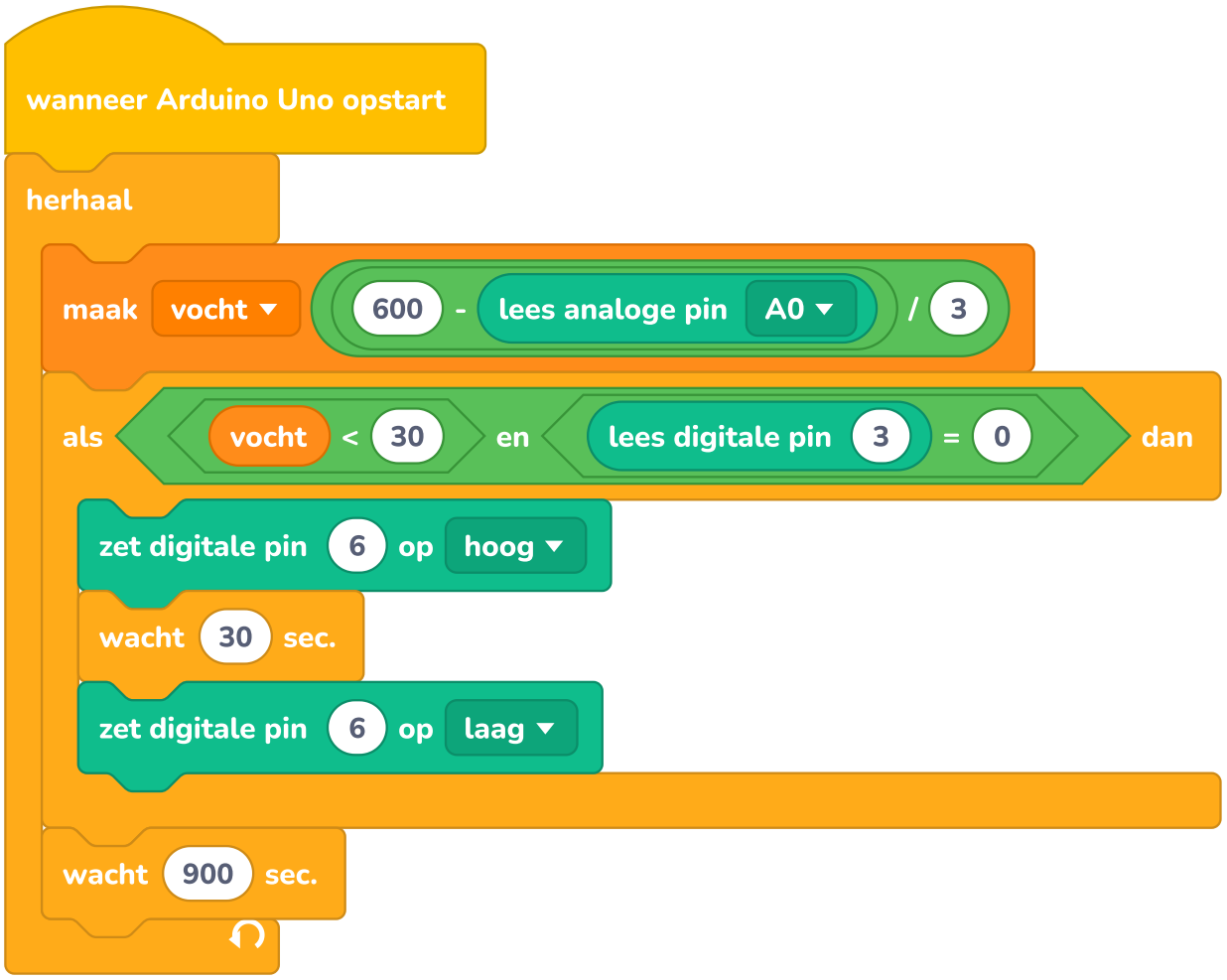
Het programma volgt het stroomdiagram van hoofdstuk 22. Nieuw zijn `analogRead()`, dat een getal van 0 tot 1023 geeft, en `map()`, dat een getal van het ene bereik naar het andere omrekent (hier van 600 → 300 naar 0 → 100). Met `Serial.println()` stuurt de Arduino elke meting naar de computer: handig om te testen en te ijken (Intermediate, hoofdstuk 29 en 30).

C++ (Arduino) **water_geven.ino** 38 regels

```cpp
// Automatisch water geven in de meetkas
const int SENSOR = A0;      // capacitieve bodemvochtsensor
const int VLOTTER = 3;      // vlotter naar GND: dicht (LOW) = er is water
const int POMP = 6;         // relais K2 van het pompje (HIGH = aan)
const int ROOD = 10;        // statuslampje
const int GROEN = 11;
const int DROOG = 600;      // ijkpunt: ruwe waarde in droge potgrond
const int NAT = 300;        // ijkpunt: ruwe waarde in natte potgrond
const int DREMPEL = 30;     // water geven onder 30 %

void setup() {
  pinMode(VLOTTER, INPUT_PULLUP);
  pinMode(POMP, OUTPUT);
  pinMode(ROOD, OUTPUT);
  pinMode(GROEN, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);                       // metingen volgen op de computer
}

void loop() {
  int ruw = analogRead(SENSOR);             // 0 tot 1023
  int vocht = map(ruw, DROOG, NAT, 0, 100);   // ruwe waarde -> procent
  Serial.println(vocht);
  bool water = (digitalRead(VLOTTER) == LOW);
  if (vocht < DREMPEL && water) {           // droog en er is water: pompen
    digitalWrite(ROOD, HIGH);
    digitalWrite(GROEN, LOW);
    digitalWrite(POMP, HIGH);
    delay(30000);                           // 30 s = 240 mL
    digitalWrite(POMP, LOW);
  } else if (vocht < DREMPEL) {             // droog, maar het reservoir is leeg
    digitalWrite(ROOD, HIGH);
    digitalWrite(GROEN, LOW);
  } else {                                  // vochtig genoeg
    digitalWrite(ROOD, LOW);
    digitalWrite(GROEN, HIGH);
  }
  delay(900000UL);                          // 15 min: het water moet eerst inzakken
}
```



Hetzelfde in blokken: het vocht wordt berekend uit de analoge waarde, dan beslist 'als … en …'.

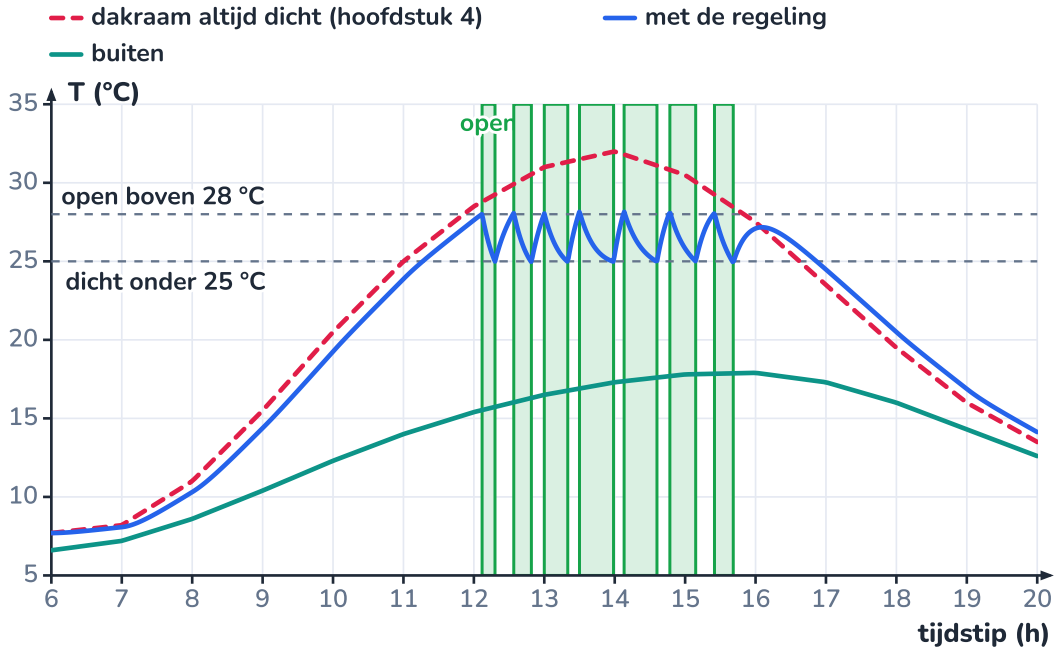
Een detail: `map()` rekent met gehele getallen en rondt naar beneden af. Ruw 511 wordt $(600 - 511)/3 = 29{,}7$, dus 29: net onder de drempel. Voor een kas maakt dat niets uit. Wel belangrijk: tijdens de 15 minuten `delay()` doet de Arduino niets anders. Het dakraam kan in dezelfde lus dus niet tussendoor reageren. Wie beide wil, meet in één lus alles en wacht korter, of gebruikt `millis()` (Intermediate, hoofdstuk 29).

UITGEWERKT VOORBEELD · 25.13

Habitat: het dakraam als thermostaat

13/16

Op een zonnige aprildag wordt het in de gesloten meetkas 32 °C (hoofdstuk 4). Boven 30 °C lijden de planten. De duwstang van hoofdstuk 12 kan het dakraam 20 cm openen. Ontwerp de regeling: wanneer gaat het raam open en dicht? Gebruik de simulatie om één drempel te vergelijken met twee.



Zonder regeling (stippellijn) 32 °C; met het automatische dakraam blijft het ongeveer tussen 25 en 28 °C. Groen: raam open.

GEGEVEN

- TMP36 op A1, geijkt (−1,5 °C)
- duwstang met eindschakelaars: relais K3 schuift uit, K4 schuift in
- model: open raam haalt de helft van het verschil met buiten weg; meten elke minuut

GEVRAAGD

- blokschema
- drempels
- aantal schakelingen en hoogste temperatuur

OPLOSSING

1. **Meten, beslissen, doen.** Sensor TMP36 → regelaar (Arduino) → K3 of K4 → duwstang → dakraam → de kas koelt af → de sensor meet dat.

2. **Eén drempel (28 °C).** Het raam gaat open zodra het warmer is dan 28 °C en dicht zodra het koeler is. De kas blijft onder 28,3 °C, maar in de simulatie schakelt de duwstang **166 keer** tussen 6 en 20 uur: bijna elke minuut. De duwstang en de relais zouden dat niet lang overleven.

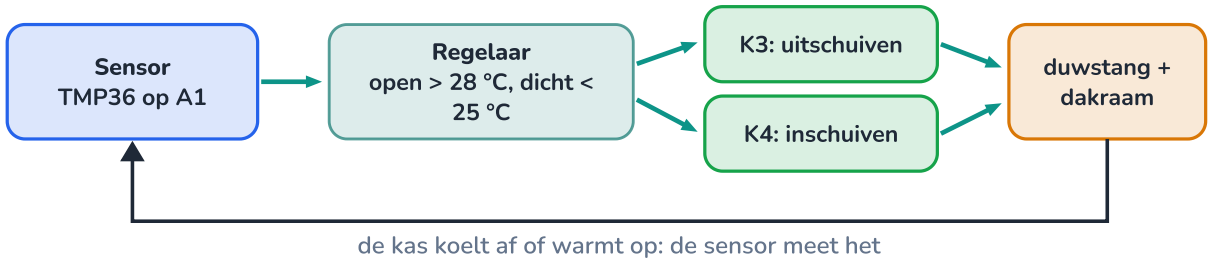
3. **Twee drempels.** Open boven 28 °C, dicht onder 25 °C. Nu schakelt het raam **14 keer**. Het eerste openen gebeurt om 12:07, het laatste sluiten om 15:41. De hoogste temperatuur is 28,2 °C.

4. **Waarom twee duwstangrelais?** Een duwstang schuift uit bij de ene polariteit en in bij de andere. Met twee relais kies je de richting; ingebouwde eindschakelaars stoppen de stang aan het einde van haar slag. Hoe je zo'n richtingsschakeling (een H-brug) veilig bouwt, zie je in Intermediate, hoofdstuk 26.

ANTWOORD

Open boven 28 °C, dicht onder 25 °C: de kas blijft onder 28,2 °C (zonder regeling 32 °C), met 14 schakelingen per dag in plaats van 166 met één drempel.

Klopt dit? De simulatie is een model: het echte raam, de wind en de zon kunnen het beeld veranderen. Wat het model wel betrouwbaar toont, is het verschil tussen één en twee drempels. Test in het echt eerst met een lamp op de sensor (warmte) en noteer hoe vaak het raam schakelt. Wat bij stroomuitval? Het raam blijft staan waar het staat; daarom moet het met de hand te openen zijn (hoofdstuk 12).



Het dakraam in blokken: één sensor, één regelaar, twee relais voor de twee richtingen.

CODE · 25.14

Het dakraam in code

14/16

Het programma onthoudt in de variabele `raamOpen` of het raam open is. Dat heb je nodig voor twee drempels: bij 26 °C moet het raam open blijven als het al open was, en dicht blijven als het dicht was. `float` is een variabele met cijfers na de komma; `!raamOpen` betekent 'niet raamOpen'.

C++ (Arduino) **dakraam.ino** 28 regels

```cpp
// Dakraam van de meetkas: open boven 28 graden, dicht onder 25 graden
const int SENSOR = A1;      // TMP36
const int UIT = 4;          // relais K3: duwstang schuift uit (raam open)
const int IN = 5;           // relais K4: duwstang schuift in (raam dicht)
bool raamOpen = false;

void setup() {
  pinMode(UIT, OUTPUT);
  pinMode(IN, OUTPUT);
}

void loop() {
  int ruw = analogRead(SENSOR);
  float u = ruw * 5.0 / 1023.0;              // spanning in volt
  float t = (u - 0.5) * 100.0 - 1.5;         // TMP36, met de ijkcorrectie van -1,5 graden
  if (!raamOpen && t > 28.0) {
    digitalWrite(UIT, HIGH);                 // uitschuiven tot de eindschakelaar
    delay(15000);
    digitalWrite(UIT, LOW);
    raamOpen = true;
  } else if (raamOpen && t < 25.0) {
    digitalWrite(IN, HIGH);                  // inschuiven tot de eindschakelaar
    delay(15000);
    digitalWrite(IN, LOW);
    raamOpen = false;
  }
  delay(60000);                              // een keer per minuut meten
}
```

De relais blijven 15 s aan: ruim genoeg om de duwstang (typisch 5 à 10 mm per seconde) de 4 cm van haar slag te laten afleggen; de eindschakelaar stopt ze. Kijk in het gegevensblad van je duwstang hoe snel ze is. Nooit K3 en K4 tegelijk aan: in dit programma kan dat niet, want ze staan in verschillende takken van het if-else-blok.

NASLAG · 25.15

Overzicht: sensoren, omrekenen, regelen en het pinplan

15/16

ruwe waarde naar spanning (Uno, 10 bits)

$$U = \text{ruw} \times \frac{5\,\text{V}}{1023}$$

symbool	betekenis	eenheid
ruw	ruwe waarde van analogRead	0 tot 1023
U	spanning	volt (V)

TMP36 (gegevensblad)

$$T = \frac{U - 0{,}5\,\text{V}}{0{,}010\,\text{V/°C}}$$

symbool	betekenis	eenheid
T	temperatuur	°C
U	uitgangsspanning	volt (V)

twee-punts-ijking

$$\text{vocht} = \frac{\text{droog} - \text{ruw}}{\text{droog} - \text{nat}} \times 100\,\%$$

symbool	betekenis	eenheid
droog, nat	ruwe waarde in droge en in natte grond	(getal)

regeling	kenmerk
open lus	geen terugkoppeling: tijd of gebeurtenis bepaalt de actie
gesloten lus	de sensor meet wat de actuator verandert
aan/uit met één drempel	houdt de waarde dicht bij de drempel, maar schakelt heel vaak
aan/uit met twee drempels (hysterese)	schommelt tussen de drempels, schakelt veel minder

pin	onderdeel	soort	hoofdstuk
A0	bodemvochtsensor (capacitief), ijkpunten 600 droog / 300 nat	analoge ingang	25
A1	temperatuursensor TMP36 (ijkcorrectie −1,5 °C)	analoge ingang	25
A2	lichtsensor (LDR met 10 kΩ)	analoge ingang	25
D2	drukknop (test / handbediening)	digitale ingang, INPUT_PULLUP	24
D3	vlotter reservoir (dicht = water)	digitale ingang, INPUT_PULLUP	24
D4 / D5	relais K3 / K4: duwstang uit / in (dakraam)	digitale uitgang	25
D6	relais K2: pompje	digitale uitgang	25
D7	relais K1: ledstrip (automaat, hoofdstuk 18)	digitale uitgang	25
D10 / D11	statuslampje rood / groen (220 Ω)	digitale uitgang	24

HET GEHEEL · 25.16

Waar regelen naartoe leidt

16/16

Met dit hoofdstuk begint de leerlijn **regelen en robotica**: meten, beslissen, doen, en opnieuw meten. Het bouwt op **programmeren** (de lus met een keuze) en **elektronica** (de pin, het relais), en raakt **onderzoeken en meten** (ijken met een referentie) en **leven en systemen**: ook je lichaam regelt zijn temperatuur met een gesloten lus.

F3 Meten: grootheden en eenheden
Nauwkeurigheid van een instrument en aflezen: waarom ijken nodig is.

F4 Tabellen, grafieken en verbanden
De dag in de meetkas (32 °C) en het aflezen van een grafiek, hier van een ijklijn.

F12 Hefbomen en mechanismen
De duwstang onder het dakraam: 29,5 N op 12 cm van het scharnier, 20 cm opening.

F22 Computationeel denken
Het algoritme 'water geven' dat hier op een microcontroller draait.

F24 De microcontroller
Pinnen, INPUT_PULLUP, het statuslampje en de vlotter op D3.

F29 Het lichaam als systeem
Homeostase: je lichaamstemperatuur is een gesloten regelkring met zweten en rillen als actuatoren.

I3 Verbanden in data
Een sensor kalibreren met de best passende rechte, met een rekenblad.

I22 De spanningsdeler en sensoren
Hoe een LDR of NTC met een tweede weerstand een spanning geeft.

I26 Motoren en actuatoren
Servo, relais en de H-brug om een motor of duwstang in twee richtingen te sturen.

I31 Regelsystemen
Hysterese goed kiezen, en een regeling beoordelen met een meting.

E39 PID-regeling
Niet aan of uit, maar precies zoveel als nodig: de PID-regelaar van het station.

Habitat
De meetkas regelt zichzelf. Sensor op A0 (ijkpunten 600 droog, 300 nat), drempel 30 %, 30 s pompen (240 mL) via relais K2 op D6, 15 minuten wachten; vlotter op D3. Het dakraam gaat open boven 28 °C en dicht onder 25 °C (TMP36 op A1, relais K3/K4 op D4/D5). In het integratieproject (hoofdstuk 33) bouw je alles samen en test je het een week lang. Opdracht 25.13 is het volledige ontwerp voor je portfolio.

SAMENVATTING
In het kort

- Een regelkring meet (sensor), beslist (regelaar) en doet (actuator), en meet dan opnieuw: dat is een gesloten lus met terugkoppeling. Zonder terugkoppeling is het een open lus.
- Sensoren zetten temperatuur (TMP36, NTC), licht (LDR) en bodemvocht (capacitieve sensor) om in een spanning of een weerstand.
- Een 10-bits ADC geeft 0 tot 1023; op een Uno is U ≈ ruw × 5 V / 1023, op een micro:bit met 3,3 V in plaats van 5 V.
- IJken: meet naast een betrouwbare referentie, zet de metingen in een ijklijn en corrigeer de sensor. Twee referentiepunten volstaan voor een lineaire schaal.
- Een aan/uit-regeling vergelijkt met een drempel; met twee drempels (hysterese) schakelt ze veel minder vaak, ten koste van een kleine schommeling.
- Grote verbruikers stuur je via een relais(module): een kleine stroom in de spoel schakelt een grote stroom in een gescheiden kring.
- De meetkas geeft 30 s water (240 mL) als het vocht onder 30 % zakt (ruw boven 510) en opent het dakraam boven 28 °C en sluit het onder 25 °C.

BEGRIPPEN
Wat je nu kent

sensor
Onderdeel dat een grootheid (temperatuur, licht, vocht) omzet in een elektrisch signaal, meestal een spanning.

actuator
Onderdeel dat een elektrisch signaal omzet in een actie: bewegen, pompen, verwarmen, licht geven.

analoog signaal
Signaal dat elke waarde binnen een bereik kan aannemen, zoals een spanning tussen 0 en 5 V.

ADC (analoog-digitaalomzetter)
Deel van de microcontroller dat een spanning omzet in een getal; bij 10 bits van 0 tot 1023.

ijken (kalibreren)
Een meetinstrument vergelijken met een betrouwbare referentie en zijn aanwijzing zo nodig corrigeren.

ijklijn
Grafiek die het verband geeft tussen de aanwijzing van een sensor en de echte waarde, gemaakt met een referentie.

regelkring
Systeem dat meet, beslist en ingrijpt, en daarna opnieuw meet wat het effect was (gesloten lus, terugkoppeling).

aan/uit-regeling
Regeling die een actuator helemaal aan of helemaal uit zet, afhankelijk van of een meting boven of onder een drempel ligt.

hysterese
Werken met twee verschillende drempels voor aan en uit, zodat een regeling niet voortdurend schakelt.

relais

Schakelaar die bediend wordt door een elektromagneet: een kleine stroom in de spoel schakelt een grote stroom in een aparte kring.

F FUNDAMENTAL · DEEL F7 · LEVEN EN SYSTEMEN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 26

Cellen en organismen

Waaruit alles bestaat wat leeft, en hoe je het te zien krijgt

Een slaplant, een regenworm, jijzelf: hoe verschillend ook, alles wat leeft is opgebouwd uit **cellen**. In dit hoofdstuk leer je wat leven eigenlijk is, hoe een plantencel en een dierencel eruitzien, en hoe je met een **microscoop** dingen bekijkt die duizend keer kleiner zijn dan een millimeter. Je rekent de vergroting uit, schat hoe groot een cel echt is, en plaatst alles van atoom tot vinvis op één schaal. En je bekijkt de bladeren van de planten in de meetkas van heel dichtbij.

7× uitleg · 2× uitgewerkt voorbeeld · 2× proef · 4× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

B Leven en systemen · O Onderzoeken en meten



Van plantenbak naar objectglaasje: de bladeren van de meetkas van heel dichtbij bekijken.

Na dit hoofdstuk

- Je kan de levenskenmerken noemen en ermee beslissen of iets leeft, dood is of nooit geleefd heeft.
- Je kan uitleggen dat alle organismen uit cellen bestaan en dat elke cel uit een andere cel ontstaat.
- Je kan in een tekening van een plantencel en een dierencel de onderdelen benoemen, hun taak geven en de verschillen uitleggen.
- Je kan een lichtmicroscoop correct en veilig gebruiken en een eenvoudig nat preparaat maken.
- Je kan de vergroting berekenen (oculair × objectief) en de werkelijke grootte van een cel bepalen in micrometer.
- Je kan eencelligen en meercelligen onderscheiden en de opbouw cel, weefsel, orgaan, orgaanstelsel, organisme toepassen.
- Je kan afmetingen van molecule tot organisme op een logaritmische schaal plaatsen en kiezen waarmee je ze kan zien.

VERHAAL · 26.1

Een kurkje, een lensje en een druppel slootwater

1/18

In 1665 verscheen in Londen een boek vol prachtige tekeningen: *Micrographia* van **Robert Hooke**. Hooke had met een zelfgebouwde microscoop een flinterdun schijfje kurk bekeken. Hij zag een patroon van kleine, lege kamertjes en noemde ze *cells*, naar de kleine kamertjes van monniken in een klooster. Wat hij zag, waren de wanden van dode plantencellen: de levende inhoud was er allang uit.

Een paar jaar later begon in Delft een lakenhandelaar zonder universitaire opleiding, **Antoni van Leeuwenhoek**, zelf piepkleine lensjes te slijpen. Zijn microscopen waren niet groter dan een hand: een koperen plaatje met één bolletje glas, dat je vlak voor je oog hield. De beste vergrootten ongeveer 270 keer, beter dan alles wat er toen bestond. In 1676 schreef hij aan de Royal Society in Londen dat hij in een druppel regenwater duizenden 'diertjes' zag zwemmen, veel te klein om met het blote oog te zien. In 1683 beschreef hij er nog kleinere, uit de aanslag tussen zijn tanden: het waren de eerste bacteriën die een mens ooit zag. Eerst geloofden de Londense geleerden hem niet; ze lieten zijn waarnemingen nakijken door getuigen.

Pas in de negentiende eeuw werd duidelijk hoe belangrijk die kamertjes en diertjes waren. De Duitse plantkundige **Matthias Schleiden** (1838) en de dierkundige **Theodor Schwann** (1839) besloten dat álle planten en dieren uit cellen bestaan. De arts **Rudolf Virchow** vulde in 1855 aan: elke cel ontstaat uit een andere cel. Samen heet dat de **celtheorie**, een van de pijlers van de biologie.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Hooke en Van Leeuwenhoek toonden dat een beter instrument een nieuwe wereld zichtbaar maakt. Dat is nog altijd zo: met een gewone schoolmicroscoop zie je meer dan Van Leeuwenhoek ooit zag. In dit hoofdstuk leer je die microscoop gebruiken, en bekijk je zelf de cellen van een ui, van je wang en van de bladeren in de meetkas.



Eén glazen bolletje in een koperen plaatje: zo zag een microscoop van Van Leeuwenhoek eruit.

Wat is leven?

Een kat leeft, een steen niet. Maar een zaadje in een zakje? Een vuur dat 'groeit' en 'zuurstof verbruikt'? Om te beslissen of iets leeft, kijken biologen naar de **levenskenmerken**. Een levend wezen, een **organisme**, heeft ze allemaal, minstens op een moment in zijn leven:

levenskenmerk	wat het betekent	bij een mens	bij een plant
voeding	stoffen opnemen als bouwstof en als bron van energie	eten en drinken	zelf suiker maken met licht (fotosynthese); water en mineralen opnemen
ademhaling	in elke cel energie vrijmaken uit voedingsstoffen, meestal met zuurstof	longen, maar vooral in elke cel	in elke cel, dag en nacht
groei	groter worden en nieuwe cellen maken	tot ongeveer 20 jaar in lengte	levenslang, aan de toppen van stengel en wortel
voortplanting	nieuwe individuen maken	kinderen	zaden, stekken, uitlopers
reageren op prikkels	veranderingen in de omgeving waarnemen en erop reageren	je hand wegtrekken van iets heets	naar het licht toe groeien
beweging	zelf van plaats of van vorm veranderen	stappen, ademen, hartslag	bladeren die zich naar het licht draaien, bloemen die sluiten
uitscheiding	afvalstoffen van de stofwisseling kwijtraken	urine, koolstofdioxide uitademen	zuurstof en waterdamp via de bladeren

Daarbovenop geldt: elk organisme **bestaat uit cellen** en heeft **erfelijk materiaal** (DNA) dat het doorgeeft aan zijn nakomelingen. Een vuur groeit en verbruikt zuurstof, maar het bestaat niet uit cellen en heeft geen erfelijk materiaal: het leeft niet. Een zaadje in een zakje leeft wel: het ademt heel traag, en in natte grond kiemt en groeit het.

Wat beweegt, leeft; wat stilstaat, niet

Een robotstofzuiger beweegt, reageert op obstakels en 'eet' zelfs stof, maar hij groeit niet, plant zich niet voort en bestaat niet uit cellen. Een eik beweegt nauwelijks en leeft wel. Beweging alleen zegt niets: je hebt de kenmerken *samen* nodig. En ook planten bewegen: het kruidje-roer-mij-niet vouwt zijn blaadjes dicht als je ze aanraakt, en een zonnebloem draait haar knop mee met de zon.

Een grensgeval: het virus

Een virus (zoals het griepvirus) is geen cel. Het heeft wel erfelijk materiaal, maar het voedt zich niet, ademt niet en kan zich alleen vermenigvuldigen *in* de cel van een ander organisme. Daarom rekenen de meeste biologen virussen niet tot de levende wezens. Je mag er in opdracht 26.16 over debatteren.



Ook planten reageren op prikkels: het kruidje-roer-mij-niet vouwt zich dicht bij een aanraking.

UITLEG · 26.3

De cel: de bouwsteen van al wat leeft

Een **cel** is het kleinste stukje dat zelf kan leven. Elke cel is een zakje, omgeven door een dun **celmembraan** en gevuld met **cytoplasma**, met erfelijk materiaal dat zegt wat de cel moet doen. Sommige organismen bestaan uit één enkele cel, jijzelf uit ongeveer 30 000 miljard cellen ($3 \cdot 10^{13}$), van honderden verschillende soorten.

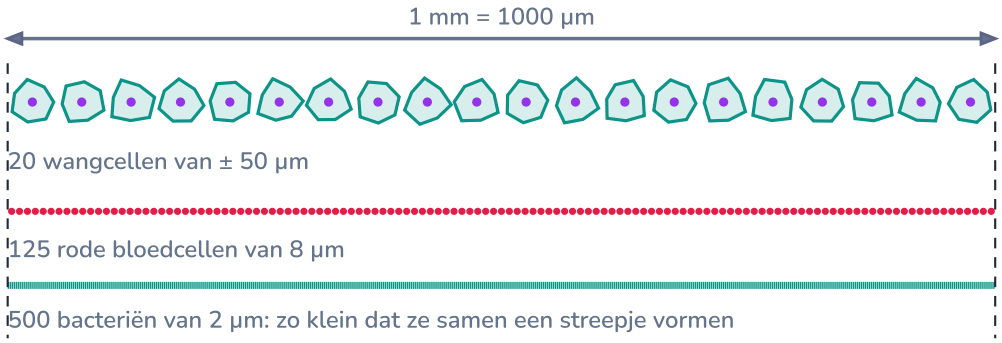
Cellen zijn klein. De meeste zijn 10 tot 100 **micrometer** groot. Een micrometer (µm) is een duizendste millimeter. Voor nog kleinere dingen, zoals moleculen en virussen, gebruik je de **nanometer** (nm): een duizendste micrometer.

eenheid	symbool	in meter	omzetten	voorbeeld
millimeter	mm	0,001 m	1 mm = 1000 µm	een zandkorrel, een mier (5 mm)
micrometer	µm	0,000 001 m	1 µm = 1000 nm	een cel (10-100 µm), een bacterie (2 µm)
nanometer	nm	0,000 000 001 m		een virus (100 nm), een eiwit (5 nm)

Omzetten gaat zoals op de eenhedentrap van hoofdstuk 3, maar met sprongen van 1000: van mm naar µm vermenigvuldig je met 1000, van µm naar mm deel je door 1000. Een wangcel van 0,05 mm is dus $0{,}05 \times 1000 = 50\,\mu\text{m}$.

Waarom µ?

De µ is de Griekse letter *mu*, de m van *micro*, wat 'klein' betekent. Je spreekt µm uit als 'micrometer'. Kan je geen µ typen, schrijf dan 'um'.



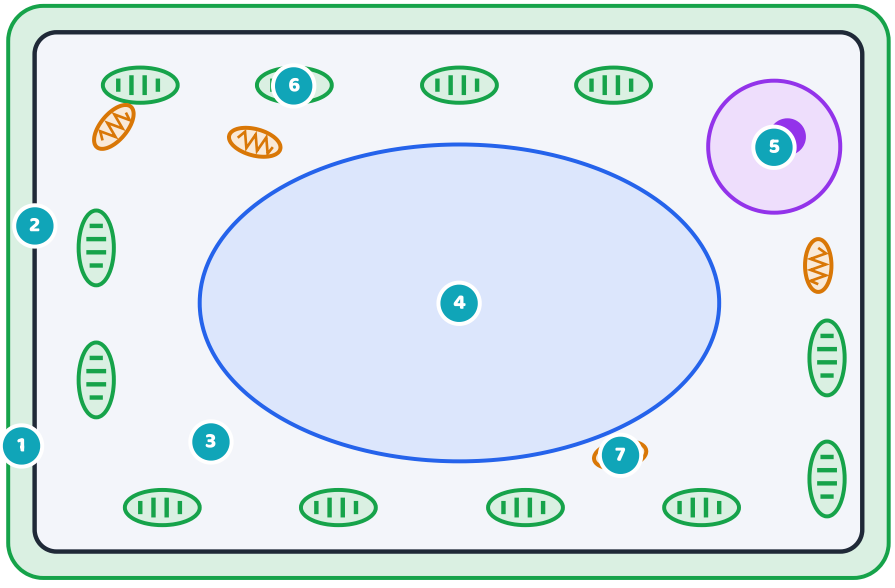
Op schaal: één millimeter biedt plaats aan 20 wangcellen, 125 rode bloedcellen of 500 bacteriën.

ONTLEED · 26.4

De plantencel

4/18

Zo ziet een typische cel uit het groene deel van een blad eruit, bijvoorbeeld van de sla in de meetkas. De cel is ongeveer 50 µm lang: twintig van zulke cellen naast elkaar zijn een millimeter. De onderdelen zijn niet helemaal op schaal getekend, zodat je ze goed ziet.



Schematische plantencel: een stevige doos met een grote vacuole, groene bladgroenkorrels en een kern tegen de rand.

1 Celwand
Stevige wand van **cellulose** rond de cel. Hij geeft de cel haar vaste, hoekige vorm en houdt de plant overeind. Water en opgeloste stoffen kunnen er vrij door.

2 Celmembraan
Dun vlies tegen de binnenkant van de wand. Het bepaalt welke stoffen de cel in en uit gaan. Elke cel heeft er een, ook een dierencel.

3 Cytoplasma
Geleiachtige vulling tussen het membraan en de vacuole. Daarin liggen de celonderdelen en gebeuren veel reacties.

4 Vacuole
Grote blaas met **celvocht** (water met opgeloste stoffen). Een volle vacuole duwt het cytoplasma tegen de wand, zoals een opgepompte binnenband: zo blijft de plant stevig. Een plant die water tekortkomt, verwelkt omdat haar vacuoles leeglopen.

5 Kern
Bevat het erfelijk materiaal (DNA) en stuurt de cel. Het donkere bolletje erin is het kernlichaampje.

6 Bladgroenkorrel
Groene korrel met bladgroen (chlorofyl). Hier maakt de plant met licht suiker uit water en koolstofdioxide: de **fotosynthese** van hoofdstuk 27. Een cel uit een blad heeft er tientallen.

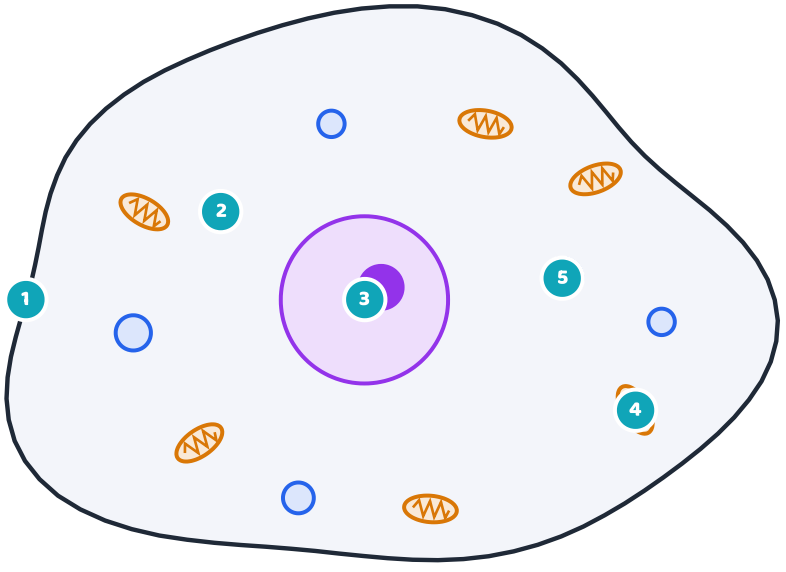
7 Mitochondrie
Maakt energie vrij uit suiker met zuurstof: de **celademhaling**. Die energie heeft de cel nodig om te leven en te groeien. Ook plantencellen ademen, dag en nacht.

ONTLEED · 26.5

De dierencel

5/18

Een cel van je wangslijmvlies, een spiercel of een levercel: dierencellen verschillen sterk van vorm, maar ze hebben dezelfde basisonderdelen. Een wangcel is plat en ongeveer 50 à 60 µm breed. Wat een dierencel *niet* heeft, is even belangrijk als wat ze wel heeft.



Schematische dierencel: geen wand, geen grote vacuole, geen bladgroenkorrels, wel een kern en mitochondriën.

1 Celmembraan
Het enige 'vel' rond de cel. Zonder stevige wand is een dierencel soepel en vaak rond of plat van vorm.

2 Cytoplasma
Vult de hele cel: er is geen grote vacuole die het opzij duwt.

3 Kern
Met het erfelijk materiaal, in het midden van de cel. Met methyleenblauw kleurt ze donkerblauw, zodat je ze onder de microscoop goed ziet.

4 **Mitochondrie**
Dezelfde energiecentrale als in de plantencel. Spiercellen, die veel energie nodig hebben, zitten er vol mee.

5 **Blaasje**
Kleine blaasjes vervoeren en bewaren stoffen. Ze zijn veel kleiner dan de grote vacuole van een plantencel.

UITLEG · 26.6

Plantencel en dierencel vergeleken

Planten- en dierencellen hebben veel gemeen: een membraan, cytoplasma, een kern en mitochondriën. Drie onderdelen heeft alleen de plantencel: de **celwand**, de grote **vacuole** en de **bladgroenkorrels**. Ze passen bij het leven van een plant: een plant loopt niet weg en moet toch rechtop staan (wand en vacuole), en ze maakt haar eigen voedsel met licht (bladgroenkorrels).

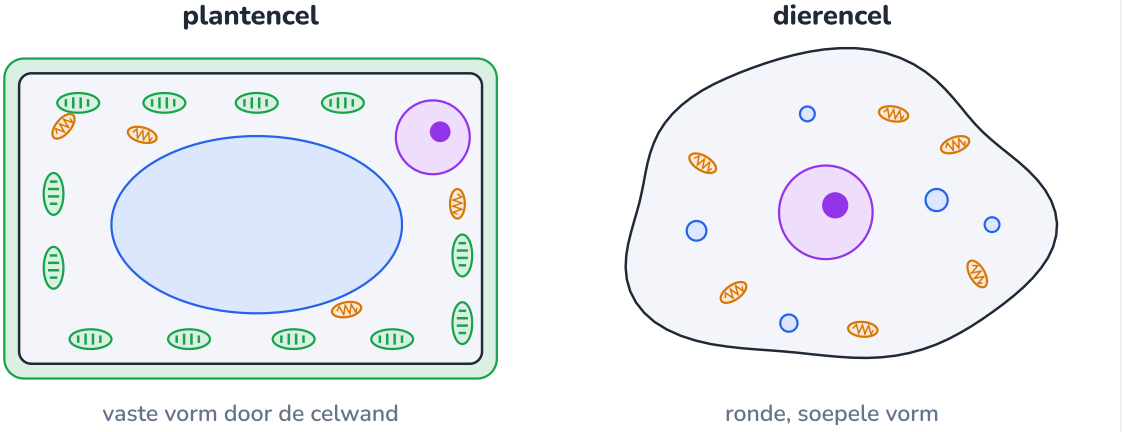
onderdeel	taak	plantencel	dierencel
celmembraan	dun vlies rond de cel; bepaalt wat erin en eruit gaat	ja	ja
cytoplasma	geleiachtige vulling waarin de onderdelen liggen en veel reacties gebeuren	ja	ja
kern	bevat het erfelijk materiaal (DNA); stuurt de cel	ja	ja
mitochondriën	maken energie vrij uit suiker (celademhaling)	ja	ja
celwand	stevige wand van cellulose buiten het membraan; geeft vorm en steun	ja	nee
grote vacuole	blaas met celvocht; houdt de cel stevig (als een opgepompte band)	ja, groot en centraal	nee (hoogstens kleine blaasjes)
bladgroenkorrels	maken suiker met licht (fotosynthese)	in de groene delen	nee

Elke plantencel is groen

Bladgroenkorrels zitten alleen in delen die licht krijgen. Een wortelcel of een cel uit de rok van een ui heeft er geen: onder de microscoop zie je in uivlies dan ook geen groene korrels. Ook het wit van een witloofkrop is plantenweefsel zonder bladgroen.

Planten hebben bladgroenkorrels in plaats van mitochondriën

Een plantencel heeft *beide*. De bladgroenkorrels maken suiker met licht, de mitochondriën halen er weer energie uit. 's Nachts, zonder licht, leeft de plant van de suiker die ze overdag maakte.



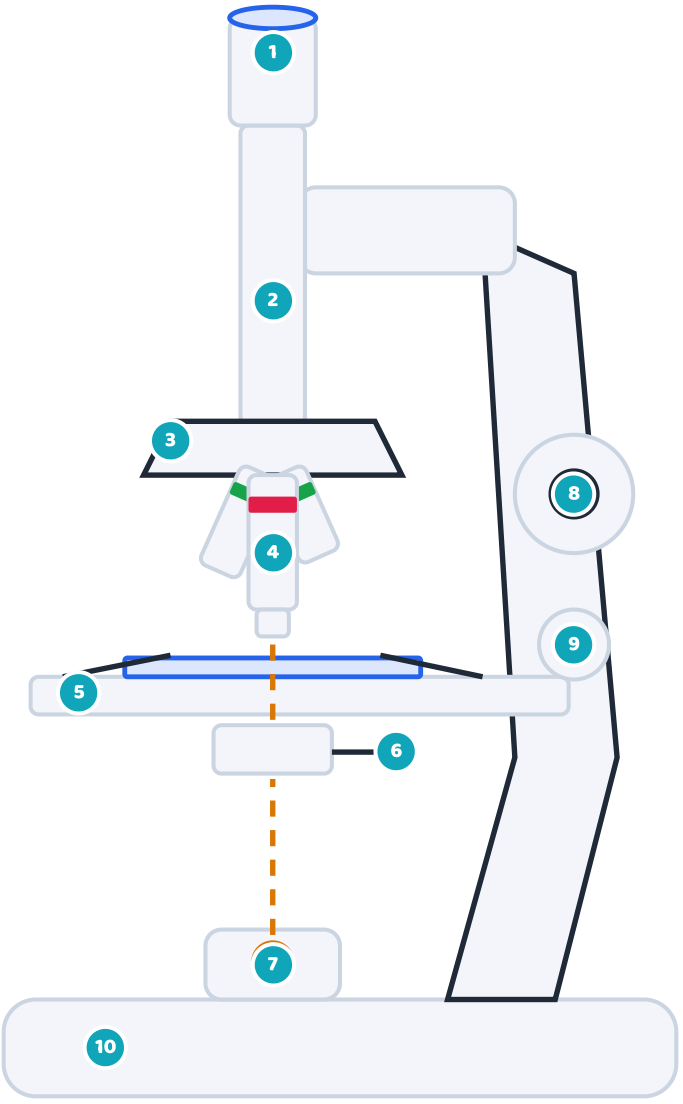
Dezelfde kern en mitochondriën, maar alleen de plantencel heeft een wand, een grote vacuole en bladgroenkorrels.

ONTLEED · 26.7

De lichtmicroscoop

7/18

Een schoolmicroscoop vergroot met twee lenzen na elkaar: het **objectief** vlak boven het preparaat en het **oculair** waar je in kijkt. Het licht komt van onderen, gaat *door* het preparaat en dan door beide lenzen naar je oog. Daarom moet wat je bekijkt dun en doorzichtig zijn.



Een lichtmicroscoop met drie objectieven op een draaibare revolver.

1 Oculair
De lens waar je in kijkt. Op de rand staat de vergroting, meestal **10×**.

2 Tubus
De buis tussen oculair en objectief. Het licht loopt erdoor van de ene lens naar de andere.

3 Revolver
Draaibare schijf met de objectieven. Draai tot hij hoorbaar klikt: dan staat het objectief recht boven het preparaat.

4 Objectief
De lens vlak boven het preparaat, meestal **4×, 10× en 40×**. Hoe sterker, hoe langer het objectief en hoe dichter het bij het glaasje komt.

5 Voorwerptafel en klemmen
Hierop leg je het objectglaasje, boven het gat in de tafel. De klemmen houden het vast.

6 Diafragma
Regelt hoeveel licht er door het preparaat gaat. Minder licht geeft vaak meer contrast: doorzichtige cellen worden beter zichtbaar.

7 Lamp
De lichtbron in de voet. Het licht moet door het preparaat heen.

8 Grote instelschroef
Beweegt de tafel (of de tubus) snel op en neer om grof scherp te stellen. Gebruik ze alleen bij de kleinste vergroting.

9 Kleine instelschroef
Voor het fijne scherpstellen, vooral bij 100× en 400×.

10 Statief en voet
Het stevige geraamte. Draag een microscoop altijd met twee handen: één aan het statief, één onder de voet.

UITLEG · 26.8

Werken met de microscoop

8/18

Een preparaat maken. Wat je bekijkt, moet dun zijn en in een druppel water liggen: een **nat preparaat**.

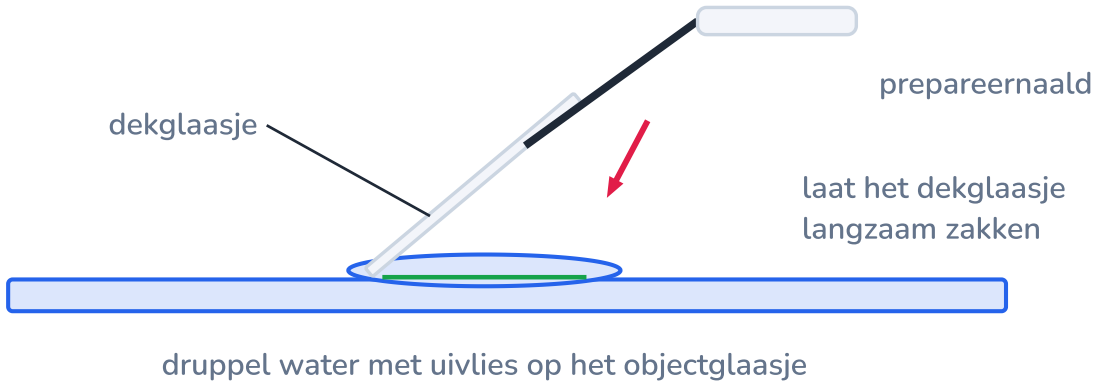
1. Leg een druppel water in het midden van een schoon objectglaasje.
2. Leg er een flinterdun stukje in, bijvoorbeeld het vliesje tussen twee rokken van een ui, of één blaadje waterpest. Zorg dat het niet plooit.
3. Zet het dekglaasje schuin met één rand in de druppel en laat het met een prepareernaald langzaam zakken (figuur). Zo duw je de lucht weg en krijg je geen luchtbellen.
4. Zuig overtollig water weg met een stukje filtreerpapier aan de rand.
5. Wil je meer contrast, kleur dan: een druppel jodiumoplossing (kleurt uivlies en zetmeel) of methyleenblauw (kleurt kernen blauw) aan de ene rand, en zuig het met filtreerpapier aan de andere rand onder het dekglaasje door.

Kijken.

1. Zet de lamp aan en draai het **kleinste objectief** (4×) boven het gat.
2. Leg het preparaat op de tafel, met het stukje boven het gat, en zet de klemmen vast.
3. Kijk **van opzij** en draai met de grote instelschroef het objectief zo dicht mogelijk bij het glaasje, zonder het te raken.
4. Kijk nu door het oculair en draai de tafel langzaam **weg** van het objectief tot het beeld scherp is. Zo kan het objectief nooit in het glaasje duwen.
5. Schuif het interessantste stukje naar het midden, draai naar 10× en stel bij met de kleine instelschroef. Pas dan naar 40×, en daar alleen nog de kleine schroef gebruiken.
6. Klaar? Terug naar 4×, glaasje eraf, lamp uit, en schoonmaken.

Glas, kleurstoffen en je eigen cellen
Objectglaasjes en vooral dekglaasjes breken makkelijk: gebroken glas in de glasbak, niet in de vuilnisbak. Jodiumoplossing en methyleenblauw vlekken en irriteren: werk met handschoenen en een bril. Wangcellen schraap je alleen bij jezelf, met een nieuw wattenstaafje, dat je daarna in het desinfectiemiddel legt.

Beeld op zijn kop
Een lichtmicroscoop keert het beeld om: links wordt rechts en boven wordt onder. Schuif je het glaasje naar links, dan beweegt wat je ziet naar rechts. Even oefenen met een krantenletter 'e' op een glaasje, en je bent eraan gewend.



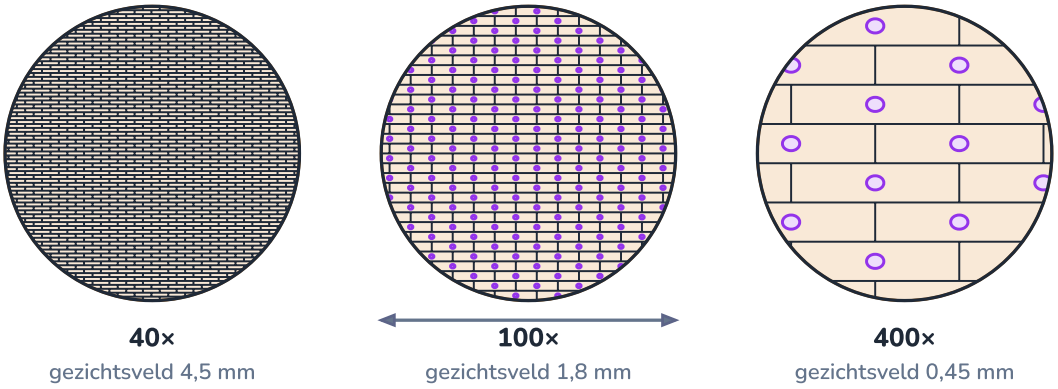
Het dekglaasje schuin laten zakken duwt de lucht opzij: zo vermijd je luchtbellen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 26.9

Hoe sterk vergroot de microscoop, en hoeveel zie je?

9/18

Op het oculair van een schoolmicroscoop staat **10×/18**: het vergroot 10 keer, en 18 mm is het *gezichtsveldgetal*. De objectieven zijn 4×, 10× en 40×. (a) Bereken de drie vergrotingen. (b) Hoe groot is het stukje preparaat dat je ziet (de diameter van het gezichtsveld)? Je vindt het door het gezichtsveldgetal te delen door de vergroting van het objectief. (c) Bij 100× zie je zeven uivliescellen achter elkaar over de volle breedte van het gezichtsveld. Hoe lang is één cel?



Links het hele vliesje, in het midden zeven cellen over 1,8 mm, rechts nog geen twee cellen, maar wel met hun kernen.

GEGEVEN

- oculair $10\times$, gezichtsveldgetal $18\,\text{mm}$
- objectieven $4\times$, $10\times$, $40\times$
- bij 100×: 7 cellen over de diameter

GEVRAAGD

- (a) de vergrotingen
- (b) de diameter van het gezichtsveld
- (c) de lengte van één cel in µm

OPLOSSING

1. (a) De twee lenzen vergroten na elkaar, dus je vermenigvuldigt: $10 \times 4 = 40\times$, $10 \times 10 = 100\times$ en $10 \times 40 = 400\times$.
2. (b) Diameter van het gezichtsveld $= 18\,\text{mm}$: objectief. Bij 4×: $18 : 4 = 4{,}5\,\text{mm}$; bij 10×: $18 : 10 = 1{,}8\,\text{mm}$; bij 40×: $18 : 40 = 0{,}45\,\text{mm}$.
3. Merk op: vier keer sterker vergroten (100× naar 400×) maakt het gezichtsveld vier keer smaller. Je ziet meer detail, maar van een veel kleiner stukje.

4 (c) Zeven cellen samen zijn 1,8 mm lang: één cel is $1{,}8 : 7 = 0{,}257\,\text{mm}$.

5 Omzetten naar micrometer: $0{,}257 \times 1000 \approx 260\,\mu\text{m}$.

ANTWOORD

(a) 40×, 100× en 400×. (b) 4,5 mm, 1,8 mm en 0,45 mm. (c) Een uivliescel is ongeveer $260\,\mu\text{m}$ lang (een kwart millimeter).

Klopt dit? Uivliescellen zijn grote, langwerpige cellen: je kan ze bijna met het blote oog zien als je het vliesje tegen het licht houdt. Een kwart millimeter klopt. Bij 400× (0,45 mm) moet je er dan nog net iets minder dan twee over de breedte zien: dat zie je in de figuur.

UITGEWERKT VOORBEELD · 26.10

Hoe groot is die cel echt?

10/18

Onder een foto van wangcellen staat: *vergroting 400×*. Op de afgedrukte foto meet je met een lat dat één cel 24 mm breed is. Hoe breed is de cel in werkelijkheid? En hoeveel van zulke cellen passen er naast elkaar op een millimeter?

GEGEVEN

- vergroting $400\times$
- breedte op de foto: $24\,\text{mm}$

GEVRAAGD

- werkelijke breedte in mm en in µm
- aantal cellen op 1 mm

OPLOSSING

1 Vergroten betekent: de foto is 400 keer groter dan de werkelijkheid. Terugrekenen doe je dus met delen:

2

WERKELIJKE GROOTTE

$$\text{werkelijke grootte} = \frac{\text{grootte op de foto}}{\text{vergroting}}$$

3 Invullen: $24\,\text{mm} : 400 = 0{,}06\,\text{mm}$.

4 Omzetten: $0{,}06\,\text{mm} \times 1000 = 60\,\mu\text{m}$.

5 Op 1 mm $= 1000\,\mu\text{m}$ passen $1000 : 60 \approx 17$ cellen.

ANTWOORD

De wangcel is $0{,}06\,\text{mm} = 60\,\mu\text{m}$ breed; ongeveer 17 cellen naast elkaar zijn één millimeter.

Klopt dit? Wangcellen zijn 50 à 60 µm: het klopt. Een vaak gemaakte fout is vermenigvuldigen in plaats van delen (24 × 400 = 9600 mm, bijna tien meter!). Vraag je altijd af: moet de werkelijke cel kleiner zijn dan op de foto? Ja, dus delen.

PROEF · 26.11

Cellen van een ui, van waterpest en van je wang

11/18

ONDERZOEKSVRAAG

Hoe zien echte plantencellen en dierencellen eruit, en welke celonderdelen kan je met een schoolmicroscoop zien?

MATERIAAL

microscoop, objectglaasjes, dekglaasjes, pincet, prepareernaald, filtreerpapier

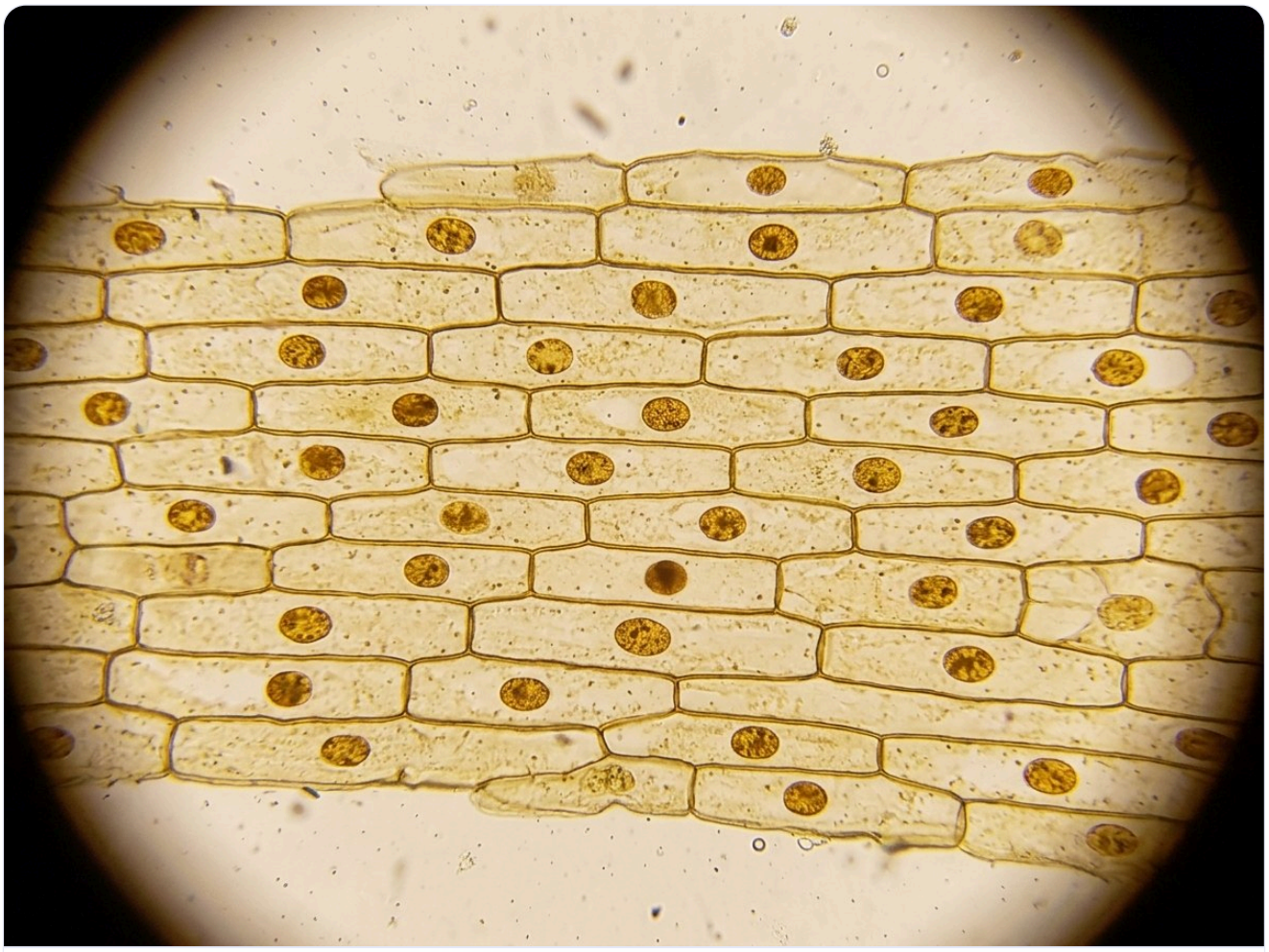
een ui, een takje waterpest (Elodea) uit een aquarium of vijver

jodiumoplossing (lugol) en methyleenblauw in druppelflesjes

een nieuw wattenstaafje, een bekertje met desinfectiemiddel

Veiligheid

Handschoenen en bril bij het kleuren. Wangcellen alleen van jezelf; het wattenstaafje na gebruik meteen in het desinfectiemiddel.



Uivlies gekleurd met jodium, bij 400 keer: celwanden als een metselverband en in elke cel een kern.

WERKWIJZE

1. **Uivlies.** Snij een ui in vieren en haal één rok los. Trek met een pincet het dunne vliesje van de binnenkant (de holle kant). Maak er een nat preparaat van en kleur met een druppel jodiumoplossing.
2. Bekijk bij 40×, 100× en 400×. Teken bij 400× twee cellen die tegen elkaar liggen, en noteer de vergroting.
3. **Waterpest.** Leg één heel blaadje in een druppel water, zonder kleuren. Bekijk bij 100× en 400×. Kijk een minuut naar dezelfde cel.
4. **Wangcellen.** Wrijf met het wattenstaafje een paar keer zacht over de binnenkant van je wang. Rol het staafje door een druppel water op een glaasje, leg een dekglaasje en kleur met methyleenblauw. Zoek bij 100× losse cellen en bekijk ze bij 400×.
5. Vergelijk de drie preparaten: welke onderdelen zie je telkens wel en niet?

WAARNEMING

Uivlies: een tapijt van langwerpige, 'gemetselde' cellen met duidelijke wanden. In elke cel een geelbruin gekleurde kern, vaak tegen de wand. Geen groene korrels.

Waterpest: rechthoekige cellen vol groene bolletjes (bladgroenkorrels) langs de randen. Kijk je lang genoeg, dan zie je ze langzaam rondschuiven, meegenomen door het stromende cytoplasma. De kern is moeilijk te zien.

Wangcellen: platte, onregelmatige cellen, vaak alleen of in kleine groepjes, soms geplooid. Een donkerblauwe kern in het midden. Geen wand, geen groene korrels.

VERKLARING

Uivlies en waterpest zijn plantencellen: ze hebben een **celwand**, die hun vaste, hoekige vorm geeft. Waterpest groeit in het licht en zit vol **bladgroenkorrels**; de rokken van een ui groeien onder de grond en hebben er geen. De grote vacuole zie je niet, omdat ze doorzichtig is: je merkt ze alleen doordat het cytoplasma en de korrels tegen de wand geduwd zijn. Wangcellen zijn dierencellen: zonder wand zijn ze soepel en onregelmatig van vorm. Mitochondriën zijn met een schoolmicroscoop te klein om goed te zien (ongeveer 1 µm).

UITLEG · 26.12

Eencelligen: een heel organisme in één cel

12/18

Van Leeuwenhoeks 'diertjes' waren **eencelligen**: organismen die uit één enkele cel bestaan. Die ene cel doet alles tegelijk: voedsel opnemen, ademen, bewegen, reageren en zich voortplanten door zich in tweeën te delen. Er zijn er veel meer van dan van alle andere organismen samen.

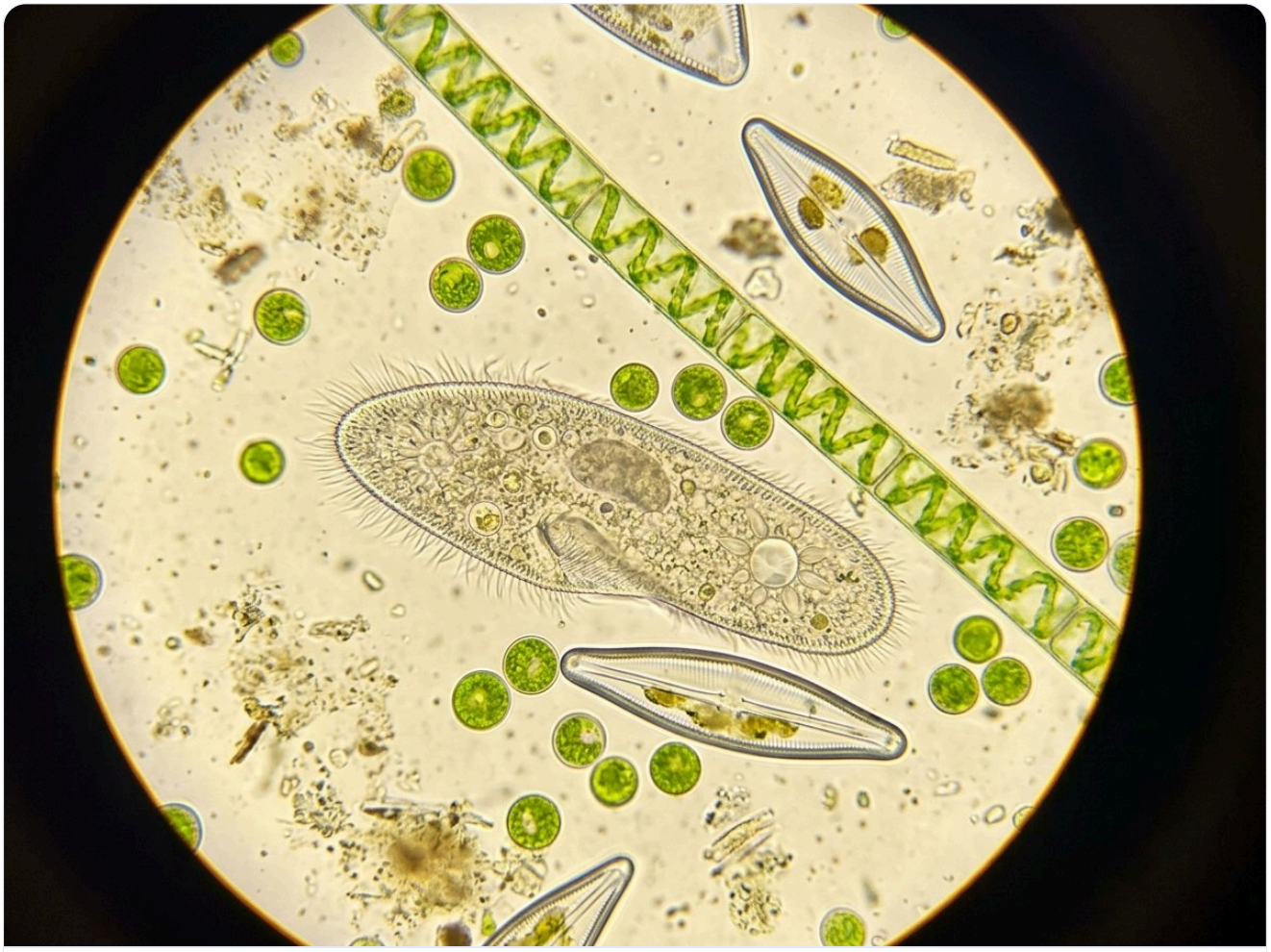
eencellige	groep	grootte (orde)	kern?	waar je hem vindt
bacterie (bv. *E. coli*)	bacteriën	2 µm	nee	overal: grond, water, je darmen
gistcel	schimmels	5 à 10 µm	ja	deeg, druiven, bier
groenwier *Chlamydomonas*	algen	10 µm	ja	plassen, groen water in een vat
pantoffeldiertje	protisten	0,2 mm	ja	slootwater
amoebe	protisten	0,5 mm	ja	slootwater, modder

Bacteriën zijn de kleinste en eenvoudigste: ze hebben zelfs geen kern, hun erfelijk materiaal ligt los in het cytoplasma. Sommige maken ons ziek, maar de meeste zijn nuttig of onmisbaar: ze breken dode resten af (hoofdstuk 28), maken yoghurt, en je darmen zitten er vol mee. **Gisten** zijn eencellige schimmels die brood doen rijzen. **Eencellige algen** hebben bladgroenkorrels en maken, net als planten, suiker met licht.

Meercelligen bestaan uit veel cellen die het werk verdelen: een spiercel trekt samen, een zenuwcel geeft signalen door, een bladcel doet aan fotosynthese. Zo'n cel kan niet meer alleen overleven: ze is afhankelijk van de rest van het lichaam.

Groen water in het reservoir

Laat je water met voedingszouten in het licht staan, dan wordt het na een tijd groen. Onder de microscoop zie je waarom: miljoenen eencellige algen. Ze verbruiken voeding, verstoppen druppelaars en maken het water troebel. Daarom is het reservoir van de meetkas donker afgedekt (hoofdstuk 9). In opdracht 26.14 tel je zelf algen.



Een druppel slootwater: een pantoffeldiertje, groene algen en kiezelwieren, allemaal eencellig.

UITLEG · 26.13

Van cel tot organisme

13/18

In een meercellig organisme werken cellen samen op vier niveaus:

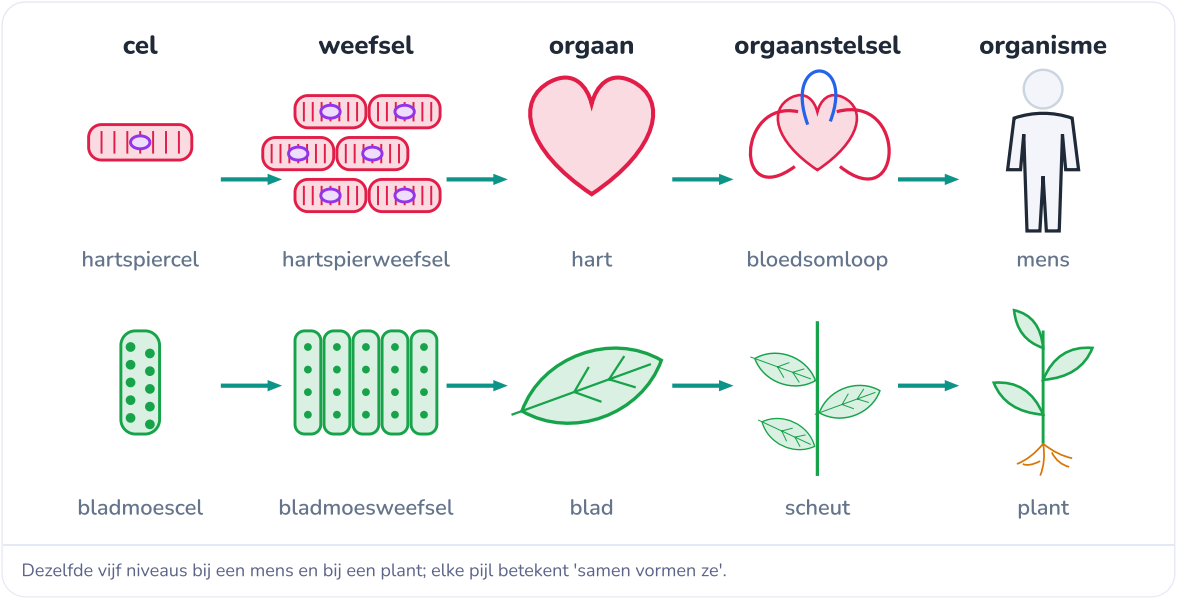
- Een **weefsel** is een groep gelijke cellen met dezelfde taak: hartspierweefsel, of het bladmoes van een blad.
- Een **orgaan** bestaat uit verschillende weefsels die samen één taak doen. Het hart heeft spierweefsel om te pompen, zenuwweefsel om het ritme te sturen en bindweefsel voor de kleppen. Een blad is een orgaan van een plant.
- Een **orgaanstelsel** is een groep organen die samenwerken: het hart en de bloedvaten vormen de bloedsomloop (hoofdstuk 29).
- Alle orgaanstelsels samen vormen het **organisme**.

	weefsel	taak	voorbeeld
mens en dier	dekweefsel	bekleden en beschermen	huid, wangslijmvlies, darmwand
	spierweefsel	samentrekken, bewegen	armspier, hartspier
	zenuwweefsel	signalen doorgeven	hersenen, zenuwen
	steun- en bindweefsel	steunen, verbinden, vervoeren	bot, kraakbeen, pees, bloed

	weefsel	taak	voorbeeld
plant	opperhuid	beschermen, gaswisseling via huidmondjes	boven- en onderkant van een blad
	bladmoes (palissade- en sponsweefsel)	fotosynthese	binnenkant van een blad
	vaatweefsel (hout- en bastvaten)	water en suiker vervoeren	nerven, stengel, wortel

Een ezelsbruggetje voor de volgorde

Van klein naar groot: **c**el, **w**eefsel, **o**rgaan, **o**rgaanstelsel, **o**rganisme. Elk niveau bestaat uit het vorige: een orgaan bestaat uit weefsels, niet rechtstreeks uit cellen.



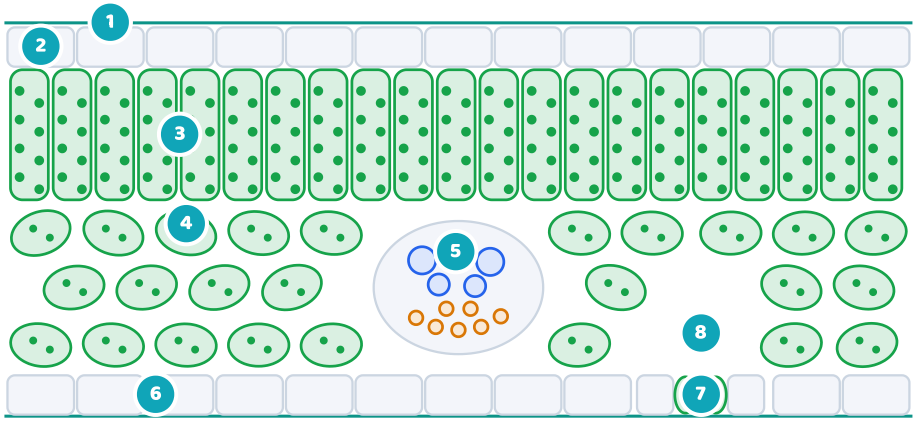
Dezelfde vijf niveaus bij een mens en bij een plant; elke pijl betekent 'samen vormen ze'.

ONTLEED · 26.14

Een blad als orgaan

14/18

Snij je een blad dwars door en bekijk je de snede bij 100×, dan zie je dat een blad uit verschillende weefsels bestaat, elk met een eigen taak. Het blad is zo'n 0,2 à 0,3 mm dik.



Doorsnede van een blad: bovenaan het licht, onderaan de huidmondjes waar de gassen in en uit gaan.

1 **Waslaag**
Een dun, doorzichtig waslaagje op de opperhuid. Het remt het verdampen van water en laat licht door.

2 **Bovenste opperhuid**
Eén laag doorzichtige cellen zonder bladgroenkorrels: ze beschermen het blad en laten het licht door naar binnen.

3 **Palissadeweefsel**
Lange cellen dicht tegen elkaar, vol bladgroenkorrels, waar het meeste licht valt: hier gebeurt de meeste fotosynthese.

4 **Sponsweefsel**
Losse, ronde cellen met veel lucht ertussen. Via die luchtholtes bereikt koolstofdioxide alle cellen.

5 **Nerf (vaatbundel)**
Houtvaten
(blauw) brengen water en mineralen aan,
bastvaten
(oranje) voeren de gemaakte suiker af naar de rest van de plant.

6 **Onderste opperhuid**
Net als bovenaan één laag beschermende cellen, maar hier met veel openingen.

7 **Huidmondje**
Een spleetje tussen twee boonvormige
sluitcellen
, die het open en dicht kunnen doen. Koolstofdioxide gaat erin, zuurstof en waterdamp gaan eruit (hoofdstuk 27).

8 **Luchtholte**
Een ruimte vlak boven het huidmondje, die aansluit op de lucht tussen de sponscellen.

PROEF · 26.15

Habitat: huidmondjes van een kasplant bekijken

15/18

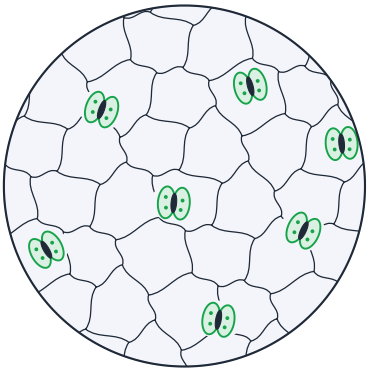
ONDERZOEKSVRAAG

Waar zitten de huidmondjes van de planten in de meetkas: aan de bovenkant of aan de onderkant van het blad? En hoeveel zijn het?

MATERIAAL

een blad van een plant uit de meetkas (bijvoorbeeld een boon, sla of basilicum) · doorzichtige nagellak, doorzichtig plakband, objectglaasjes · microscoop (oculair 10×/18)

Veiligheid
Nagellak is licht ontvlambaar en de damp is ongezond: werk aan een open raam, sluit het flesje meteen, geen vlammen in de buurt.



Zo ziet een nagellakafdruk eruit bij 400×: puzzelvormige opperhuidcellen met daartussen huidmondjes (twee groene sluitcellen rond een spleet).

WERKWIJZE

1. Pluk een volgroeid blad. Strijk een klein vlak (± 1 cm²) aan de onderkant in met nagellak, tussen twee nerven. Doe hetzelfde aan de bovenkant van een ander, gelijkaardig blad.
2. Laat de lak 5 à 10 minuten drogen tot ze niet meer plakt.
3. Druk een stukje plakband stevig op de lak en trek het in één beweging los: de lak komt mee, met een afdruk van het bladoppervlak.
4. Plak het band op een objectglaasje (het beschrijf je: 'onder' of 'boven') en bekijk bij 100× en 400×.
5. Tel bij 400× de huidmondjes in het hele gezichtsveld, op vijf verschillende plaatsen. Neem het gemiddelde.
6. Het gezichtsveld bij 400× heeft een diameter van 0,45 mm, dus een oppervlakte van 0,16 mm². Deel het gemiddelde door 0,16 om het aantal per mm² te vinden.

WAARNEMING

Je ziet de afdruk van de opperhuidcellen, die als puzzelstukjes in elkaar passen. Daartussen liggen de **huidmondjes**: twee boonvormige sluitcellen rond een spleetje. Een leerlinggroep telde bij een bonenblad (400×, vijf plaatsen):

kant	tellingen	gemiddelde	per mm²
onderkant	44, 39, 45, 40, 42	42	$42 : 0{,}16 \approx 260$
bovenkant	7, 5, 6, 4, 8	6	$6 : 0{,}16 \approx 40$

VERKLARING

Bij de meeste planten zitten de meeste huidmondjes aan de **onderkant** van het blad. Daar schijnt de zon niet rechtstreeks op en is het koeler: er verdampt minder water door de open spleetjes. Het aantal per mm² verschilt van soort tot soort en zelfs van blad tot blad: in de schaduw gegroeide bladeren hebben er vaak minder. Een waterlelie, waarvan de onderkant op het water ligt, heeft ze juist alleen bovenaan.

Een vierkante centimeter bonenblad heeft er dus zo'n 26 000 aan de onderkant (100 mm² × 260). Wat die huidmondjes doen, en waarom de plant ze kan sluiten, zie je in hoofdstuk 27. In opdracht 26.13 vergelijk je de planten in de meetkas.

UITLEG · 26.16

Van molecule tot organisme: de schaal

16/18

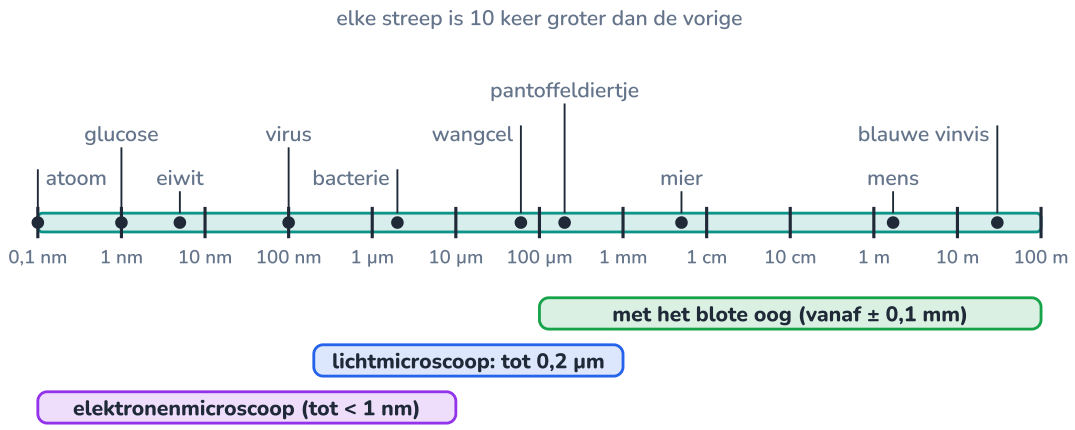
Een vinvis is ongeveer 300 miljard keer zo lang als een atoom. Op een gewone lat krijg je dat nooit samen: teken je het atoom als een stipje van 1 mm, dan wordt de vinvis 300 000 km lang, bijna de afstand tot de maan. Daarom gebruik je een **logaritmische schaal**: elke streep op de schaal is **tien keer** groter dan de vorige. Van 1 µm naar 10 µm is even ver als van 1 m naar 10 m.

De schaal toont ook **waarmee** je iets kan zien. Het blote oog onderscheidt twee puntjes tot ongeveer 0,1 mm van elkaar. Een lichtmicroscoop gaat tot ongeveer 0,2 µm: kleiner kan niet, hoe sterk je ook vergroot, omdat licht zelf niet fijner 'tekent'. Voor virussen en eiwitten heb je een **elektronenmicroscoop** nodig, die met elektronen in plaats van licht werkt en details kleiner dan een nanometer toont.

van … naar …	hoeveel keer groter?
bacterie (2 µm) naar wangcel (60 µm)	30 keer
wangcel (60 µm) naar mier (5 mm = 5000 µm)	ongeveer 80 keer
virus (100 nm) naar bacterie (2 µm = 2000 nm)	20 keer
mier (5 mm) naar mens (1,7 m = 1700 mm)	340 keer

Met een sterkere microscoop zie je alles

Een lichtmicroscoop die 2000 keer vergroot, toont niet meer detail dan een die 1000 keer vergroot: het beeld wordt alleen groter en vager. Wat kleiner is dan ongeveer 0,2 µm, zoals een virus, blijft onzichtbaar. Een beter instrument moet dus een ander soort 'licht' gebruiken.



Elke streep is tien keer groter dan de vorige. Onderaan: tot waar het oog, de lichtmicroscoop en de elektronenmicroscoop reiken.

NASLAG · 26.17

Overzicht: cellen, microscoop en maten

17/18

De rekenregels, de celonderdelen en de volgorde van werken op één blad.

vergroting van een microscoop (bv. 10 × 40 = 400 keer)

$$\text{vergroting} = \text{vergroting oculair} \times \text{vergroting objectief}$$

werkelijke grootte (beide groottes in dezelfde eenheid)

$$\text{werkelijke grootte} = \frac{\text{grootte op tekening of foto}}{\text{vergroting}}$$

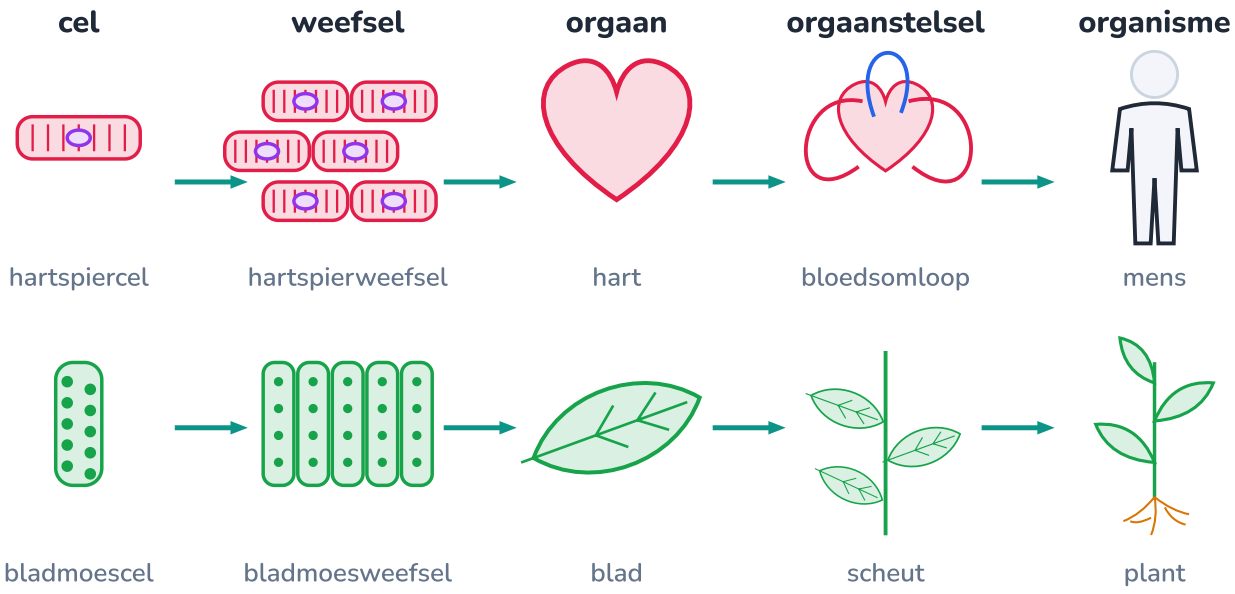
diameter van het gezichtsveld (gezichtsveldgetal op het oculair, bv. 10×/18)

$$\text{gezichtsveld} = \frac{\text{gezichtsveldgetal}}{\text{vergroting objectief}}$$

omzetten	
1 mm = 1000 µm	mm naar µm: × 1000
1 µm = 1000 nm	µm naar mm: : 1000
1 m = 1 000 000 µm	µm naar nm: × 1000

onderdeel	taak	plantencel	dierencel
celmembraan	dun vlies rond de cel; bepaalt wat erin en eruit gaat	ja	ja
cytoplasma	geleiachtige vulling waarin de onderdelen liggen en veel reacties gebeuren	ja	ja
kern	bevat het erfelijk materiaal (DNA); stuurt de cel	ja	ja
mitochondriën	maken energie vrij uit suiker (celademhaling)	ja	ja
celwand	stevige wand van cellulose buiten het membraan; geeft vorm en steun	ja	nee
grote vacuole	blaas met celvocht; houdt de cel stevig (als een opgepompte band)	ja, groot en centraal	nee (hoogstens kleine blaasjes)
bladgroenkorrels	maken suiker met licht (fotosynthese)	in de groene delen	nee

checklist microscoop
Dragen met twee handen; lamp aan; kleinste objectief (4×).
Van opzij kijken en het objectief dicht bij het glaasje brengen.
Door het oculair kijken en *wegdraaien* tot het beeld scherp is.
Detail in het midden, dan pas 10× en 40×; bij 40× alleen de kleine instelschroef.
Tekenen met potlood, grote duidelijke lijnen, onderdelen benoemen, vergroting noteren.
Achteraf: terug naar 4×, glaasje eraf, lamp uit.



Cel, weefsel, orgaan, orgaanstelsel, organisme.

HET GEHEEL · 26.18

Waar cellen terugkomen

18/18

De cel is het vertrekpunt van de leerlijn **Leven en systemen**. Wat je hier leerde, gebruik je in de volgende hoofdstukken meteen: de bladgroenkorrel is waar de fotosynthese gebeurt, de mitochondrie is waar je lichaam energie vrijmaakt, en bacteriën en schimmels zijn de opruimers van elk ecosysteem. In Intermediate kijk je naar wat er *in* de cel gebeurt (enzymen) en naar micro-organismen, in Expert naar het DNA in de kern. Het rekenwerk (vergroting, eenheden, de logaritmische schaal) is ook leerlijn **Onderzoeken en meten** en **Wiskundig modelleren**.

F3 Meten: grootheden en eenheden
Voorvoegsels en de eenhedentrap: nu met micro en nano erbij.

F6 Het deeltjesmodel
Robert Brown zag met zijn microscoop stuifmeelkorrels trillen: bewijs voor bewegende deeltjes. Diffusie brengt stoffen de cel in en uit.

F27 Planten: fotosynthese en groei
Wat er in de bladgroenkorrels gebeurt, en wat de huidmondjes doen.

F28 Ecosystemen en kringlopen
Bacteriën en schimmels als reducenten: zonder eencelligen geen kringloop.

F29 Het lichaam als systeem
Organen en orgaanstelsels van je eigen lichaam: longen, hart en bloed.

I5 Groei en verval: exponentiële modellen
Algen in het reservoir delen zich en groeien exponentieel.

I34 Enzymen en stofwisseling

I35 Micro-organismen en biotechnologie

E29 DNA, genen en eiwitten

De chemie in de cel: enzymen, celademhaling en fotosynthese als reactievergelijking.

Bacteriën, gisten en schimmels kweken en gebruiken.

Het erfelijk materiaal in de kern: hoe een cel weet wat ze moet maken.

E31 Bioprocestechniek

Eencellige algen op grote schaal kweken voor zuurstof en voedsel.

Habitat

In de meetkas kijk je voortaan ook met een microscoop naar je planten. Een nagellakafdruk toont de huidmondjes, waarlangs de planten koolstofdioxide opnemen en water verdampen: de vochtige kaslucht van hoofdstuk 6 komt grotendeels daarvandaan. En een druppel uit het reservoir toont of er algen groeien. In opdracht 26.13 maak je een huidmondjeskaart van de kasplanten voor je portfolio.

SAMENVATTING

In het kort

- Een organisme heeft de levenskenmerken: voeding, ademhaling, groei, voortplanting, reageren op prikkels, beweging en uitscheiding; het bestaat uit cellen en heeft erfelijk materiaal.
- Celtheorie: alle organismen bestaan uit cellen, en elke cel ontstaat uit een andere cel.
- Plantencellen en dierencellen hebben een celmembraan, cytoplasma, een kern en mitochondriën. Alleen plantencellen hebben een celwand, een grote vacuole en (in de groene delen) bladgroenkorrels.
- Vergroting van een microscoop = oculair × objectief; werkelijke grootte = grootte op de foto : vergroting.
- Cellen meet je in micrometer: 1 mm = 1000 µm; 1 µm = 1000 nm. De meeste cellen zijn 10 tot 100 µm.
- Eencelligen doen alles in één cel; bij meercelligen vormen cellen weefsels, organen, orgaanstelsels en het organisme.
- Op een logaritmische schaal is elke stap tien keer groter; het oog ziet tot 0,1 mm, de lichtmicroscoop tot 0,2 µm.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

levenskenmerken
De eigenschappen die alle levende wezens samen hebben: voeding, ademhaling, groei, voortplanting, reageren op prikkels, beweging en uitscheiding; ze bestaan uit cellen.

cel
De kleinste eenheid die zelf leeft: een zakje met een membraan, gevuld met cytoplasma, met erfelijk materiaal.

celtheorie
Alle organismen bestaan uit een of meer cellen, de cel is de bouwsteen van het leven, en elke cel ontstaat uit een andere cel.

celmembraan
Het dunne vlies rond elke cel dat bepaalt welke stoffen erin en eruit gaan.

celwand
Stevige wand van cellulose buiten het celmembraan van een plantencel; geeft vorm en steun.

cytoplasma
De geleiachtige vulling van een cel waarin de celonderdelen liggen.

kern
Het deel van de cel met het erfelijk materiaal (DNA) dat de cel stuurt.

vacuole
Grote blaas met celvocht in een plantencel; houdt de cel stevig.

bladgroenkorrel
Groen celonderdeel waarin de plant met licht suiker maakt (fotosynthese); ook chloroplast genoemd.

mitochondrie
Celonderdeel dat energie vrijmaakt uit suiker met zuurstof (celademhaling); in planten- én dierencellen.

vergroting
Hoeveel keer groter je iets ziet dan het is; bij een microscoop: vergroting oculair × vergroting objectief.

gezichtsveld
Het ronde stuk van het preparaat dat je door de microscoop ziet; hoe sterker de vergroting, hoe kleiner.

micrometer
Een duizendste millimeter: 1 µm = 0,001 mm. Cellen meet je in micrometer.

weefsel
Een groep gelijke cellen die samen dezelfde taak doen, zoals spierweefsel of bladmoes.

orgaan
Een deel van een organisme uit verschillende weefsels met een eigen taak, zoals het hart of een blad.

orgaanstelsel
Organen die samenwerken voor één grote taak, zoals de bloedsomloop.

eencellige
Een organisme dat uit één cel bestaat, zoals een bacterie, een gistcel of een pantoffeldiertje.

huidmondje
Opening tussen twee sluitcellen in de opperhuid van een blad, waardoor gassen in en uit gaan.

F FUNDAMENTAL · DEEL F7 · LEVEN EN SYSTEMEN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 27

Planten: fotosynthese en groei

Hoe een plant van lucht, water en licht een krop sla maakt

Een slaplant van 100 gram groeit uit een zaadje van een milligram. Waar komt al die massa vandaan? Niet uit de grond, zoals bijna iedereen denkt, maar grotendeels uit de **lucht**. In dit hoofdstuk leer je hoe een plant met licht suiker maakt (**fotosynthese**), wat ze daarvoor nodig heeft, welke factor haar groei afremt, hoe water van de wortels tot in de bladeren komt, en hoe je een eerlijke **groeiproef** opzet. Je ontwerpt de groeiproef voor de meetkas, en je kweekt sla zonder aarde.

7× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 2× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 8 lestijden

B Leven en systemen · O Onderzoeken en meten · E Energie



De groeiproef in de meetkas: twaalf bakjes pluksla, sommige onder een schaduwdoek.

Na dit hoofdstuk

- Je kan de fotosynthese als woordvergelijking schrijven en zeggen waar elke stof vandaan komt en naartoe gaat.
- Je kan uitleggen dat planten ook ademen, en fotosynthese en celademhaling vergelijken.
- Je kan opsommen wat een plant nodig heeft en waarom, en uitleggen dat mineralen geen voedsel zijn.
- Je kan met een grafiek of een situatie bepalen welke factor de fotosynthese beperkt.
- Je kan de rol van huidmondjes, verdamping, houtvaten en bastvaten beschrijven.
- Je kan een eerlijke groeiproef met één variabele ontwerpen, uitvoeren en de resultaten verwerken.
- Je kan uitleggen hoe telen zonder aarde (hydrocultuur) werkt, en wat de aarde normaal voor een plant doet.

VERHAAL · 27.1

Waar haalt een plant haar massa vandaan?

1/17

In hoofdstuk 2 las je hoe **Jan Baptist van Helmont** vijf jaar lang een wilg liet groeien in een pot met gewogen aarde. De boom werd 164 pond (ongeveer 80 kg) zwaarder, de aarde verloor nog geen 60 gram. Van Helmont besloot dat de boom uit *water* bestond. Zijn metingen waren goed, zijn besluit maar half juist: hij vergat de lucht.

Meer dan een eeuw later zette de Engelse dominee en scheikundige **Joseph Priestley** in augustus 1771 een takje munt samen met een kaars onder een glazen stolp. De kaars doofde al snel: de lucht was 'bedorven'. Zevenentwintig dagen later stak hij de kaars opnieuw aan met een brandglas, en ze brandde weer. De plant had de lucht 'hersteld'. Later deed hij hetzelfde met een muis.

Maar niet elke keer lukte het. De Nederlandse arts **Jan Ingenhousz** ontdekte in 1779 waarom: alleen de **groene** delen van een plant herstellen de lucht, en alleen in het **licht**. In het donker bederven planten de lucht, net als dieren. Daarmee had hij de twee helften van dit hoofdstuk gevonden: de fotosynthese, die alleen met licht werkt, en de ademhaling, die altijd doorgaat.

Vandaag weten we het precies. Droog hout bestaat voor ongeveer 50 % uit koolstof, 43 % uit zuurstof en 6 % uit waterstof. De koolstof komt helemaal uit de koolstofdioxide van de lucht, de waterstof uit het water. Uit de grond komt maar ongeveer 1 %: de mineralen.

Een plant eet aarde

Bijna iedereen denkt dat een boom zijn massa uit de grond haalt: 'hij voedt zich met aarde'. Van Helmonts pot bewijst het tegendeel, en een slaplant die zonder aarde groeit in water met wat zouten (dit hoofdstuk) ook. Het grootste deel van de droge massa van een plant is **koolstof uit de lucht**, vastgelegd met lichtenergie.



Een munttakje en een gedoofde kaars onder een stolp: na enkele weken brandt de kaars opnieuw.

UITLEG · 27.2

Fotosynthese: suiker maken met licht

2/17

In de bladgroenkorrels van een blad (hoofdstuk 26) maakt een plant uit twee eenvoudige stoffen een suiker. Dat heet **fotosynthese**: 'samenstellen met licht'.

FOTOSYNTHESE ALS WOORDVERGELIJKING

$$\text{koolstofdioxide} + \text{water} \xrightarrow[\text{bladgroen}]{\text{licht}} \text{glucose} + \text{zuurstof}$$

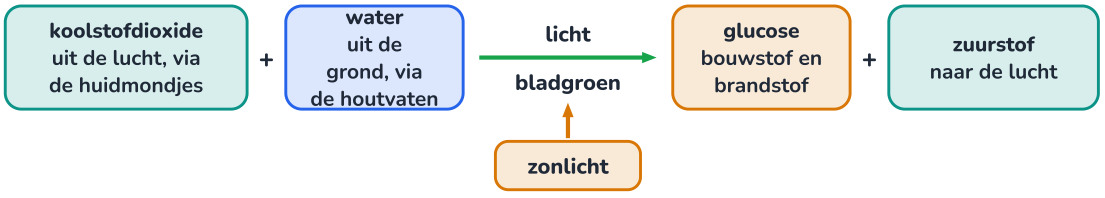
Links staan de stoffen die opgebruikt worden, rechts de stoffen die ontstaan. Licht en bladgroen staan bij de pijl: ze zijn nodig, maar worden geen deel van de producten.

- **Koolstofdioxide** (CO_2) komt uit de lucht, waar er maar 0,04 % van in zit. Het komt het blad binnen door de huidmondjes.
- **Water** komt uit de grond, via de wortels en de houtvaten.
- **Licht** levert de energie. Het bladgroen (chlorofyl) vangt vooral het rode en het blauwe licht op; het groene licht kaatst het grotendeels terug, daarom zie je bladeren groen.
- **Glucose** is een suiker, zoals druivensuiker. De plant maakt er **cellulose** van (voor de celwanden), bewaart ze als **zetmeel** (in bladeren, knollen, zaden) en verbrandt ze in haar cellen om energie te krijgen.
- **Zuurstof** is een 'afvalproduct' dat door de huidmondjes naar buiten gaat. Alle zuurstof die jij inademt, werd ooit door een plant, een alg of een bacterie gemaakt.

Energetisch is fotosynthese een omzetting van **stralingsenergie** in **chemische energie** (hoofdstuk 15). In de meetkas komt ongeveer 1 % van het zonlicht in de suiker terecht.

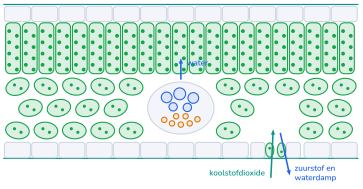
De zuurstof komt uit het water

Je zou denken dat de zuurstof die een plant afgeeft uit de koolstofdioxide komt. In 1941 gaven onderzoekers groene algen water met 'zware' zuurstofatomen, die ze konden herkennen. De zware zuurstof dook op in het gas dat de algen afgaven: de zuurstof komt uit het **water**. De zuurstofatomen van de koolstofdioxide komen in de suiker terecht.



stralingsenergie wordt chemische energie in de suiker (hoofdstuk 15)

Twee grondstoffen, twee producten, en licht als energiebron: de hele fotosynthese in één regel.



In het blad: koolstofdioxide komt binnen door de huidmondjes, water via de nerf; zuurstof en waterdamp gaan naar buiten.

Ook planten ademen

Een plant maakt glucose om die ook zelf te gebruiken. In elke levende cel, in de mitochondriën, wordt glucose met zuurstof 'verbrand' om energie vrij te maken: de **celademhaling**. Dat is precies hetzelfde proces als in jouw spiercellen (hoofdstuk 29).

CELADEMHALING ALS WOORDVERGELIJKING

$$\text{glucose} + \text{zuurstof} \longrightarrow \text{koolstofdioxide} + \text{water} + \text{energie}$$

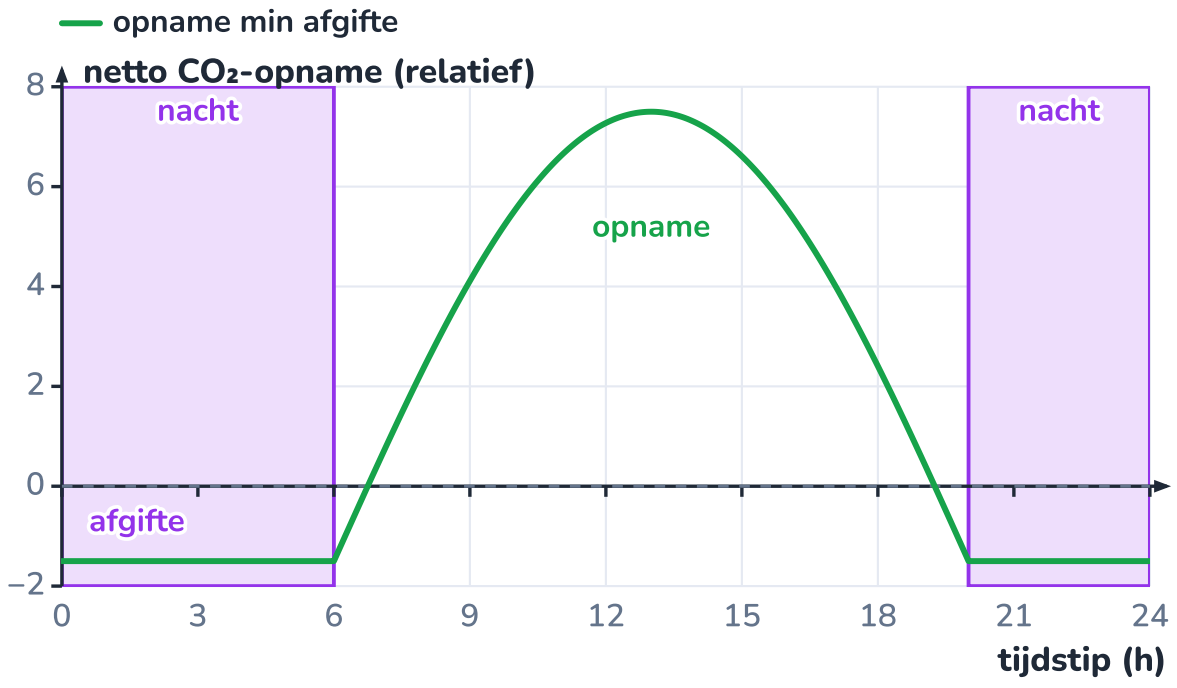
De omgekeerde richting van de fotosynthese: wat de ene opbouwt, breekt de andere af.

Het verschil zit in **wanneer**. Fotosynthese gebeurt alleen in het licht, ademhaling altijd. Overdag, bij genoeg licht, maakt een plant veel meer zuurstof dan ze verbruikt: ze neemt netto koolstofdioxide op. 's Nachts gaat alleen de ademhaling door: dan neemt ze zuurstof op en geeft ze koolstofdioxide af. Bij zwak licht, 's ochtends en 's avonds, heffen beide elkaar op.

	fotosynthese	celademhaling
waar	in de bladgroenkorrels (groene delen)	in de mitochondriën (alle levende cellen)
wanneer	alleen in het licht	altijd, dag en nacht
neemt op	koolstofdioxide en water	glucose en zuurstof
geeft af	glucose en zuurstof	koolstofdioxide en water
energie	lichtenergie wordt opgeslagen in suiker	energie uit suiker komt vrij voor de cel
wie	planten, algen, sommige bacteriën	alle organismen: planten, dieren, schimmels, bacteriën

Planten maken zuurstof, dieren maken koolstofdioxide

Planten ademen ook, dag en nacht, net als dieren. Het klopt alleen dat een groeiende plant over een hele dag méér koolstofdioxide opneemt dan ze afgeeft: het verschil zit vast in haar groei. De wortels, die nooit licht krijgen, doen alleen aan ademhaling.



Model van een zonnige dag: tussen zonsopgang en zonsondergang neemt de plant netto CO_2 op, 's nachts geeft ze het af.

PROEF · 27.4

Zetmeel in een blad: licht en bladgroen nodig?

4/17

ONDERZOEKSVRAAG

Maakt een blad ook zetmeel op plaatsen zonder licht, of op plaatsen zonder bladgroen?

MATERIAAL

- een plant met bonte bladeren (groen met witte randen), twee dagen in het donker gezet
- een strook aluminiumfolie en twee paperclips
- waterkoker, twee bekerglazen, pincet
- ethanol (brandalcohol), jodiumoplossing, een petrischaal

Veiligheid

Ethanol is licht ontvlambaar: verwarm het nooit met een vlam, alleen in een bekerglas dat in heet water uit de waterkoker staat. Bril op. Jodium vlekt: handschoenen.



Na de jodiumtest: blauwzwart waar het blad groen was en licht kreeg; licht waar het wit was of onder de folie zat.

WERKWIJZE

1. Na twee dagen donker is het zetmeel uit de bladeren verbruikt. Klem een strook folie aan beide kanten over een bont blad, zonder het blad te plooien.
2. Zet de plant een dag in de zon of onder een lamp.
3. Pluk het blad, haal de folie weg, en dompel het een minuut in kokend water: de cellen gaan dood en worden doorlaatbaar.

4 Leg het blad in een bekerglas met ethanol, dat in een groter bekerglas met heet water staat, tot het blad bijna wit is: de ethanol lost het bladgroen op.

5 Spoel het blad in lauw water (het wordt weer zacht), leg het in een petrischaal en druppel er jodiumoplossing op. Jodium kleurt zetmeel blauwzwart.

WAARNEMING

Alleen het deel van het blad dat **groen** was **én** niet onder de folie zat, kleurt blauwzwart. Het witte randje blijft geelbruin (de kleur van jodium), ook waar het licht kreeg. De strook die onder de folie zat, blijft geelbruin, ook waar het blad groen was.

VERKLARING

Zetmeel maakt de plant van de glucose uit de fotosynthese. Waar geen licht was, of geen bladgroen, werd er geen glucose gemaakt, en dus ook geen zetmeel. De proef toont dus dat de fotosynthese **licht** en **bladgroen** nodig heeft, zoals Ingenhousz al zag. Omdat de plant eerst twee dagen in het donker stond, weet je zeker dat het zetmeel *nieuw* is: dat is een gecontroleerde beginsituatie.

UITLEG · 27.5

Wat een plant nodig heeft

5/17

Een plant is een systeem (hoofdstuk 1): er gaan stoffen en energie in, er gebeurt iets mee, en er komt iets uit. Voor een gezonde groei heeft ze zes dingen nodig:

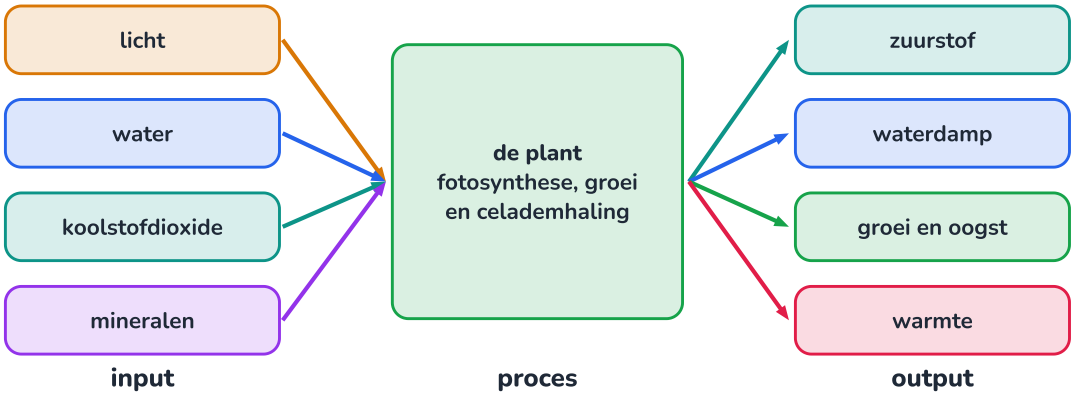
wat	waarvoor	in de meetkas
licht	energie voor de fotosynthese	zon door het polycarbonaat (±80 % gaat erdoor); ledstrip in de winter
water	grondstof van de fotosynthese; houdt de cellen stevig; vervoert stoffen; koelt door verdamping	druppelslang, water geven onder 30 % bodemvocht (hoofdstuk 25)
koolstofdioxide	grondstof: de koolstof van alle suiker, zetmeel en cellulose	uit de lucht (±0,04 %), via kieren en het dakraam
geschikte temperatuur	alle processen in de cel verlopen het best in een bepaald gebied	dakraam open boven 28 °C (hoofdstuk 25), 's nachts warmtebuffer (hoofdstuk 16)
mineralen	bouwstoffen: stikstof en zwavel voor eiwitten, magnesium in bladgroen, ijzer om bladgroen te maken, fosfor, kalium …	voedingsoplossing 1,0 g/L (hoofdstuk 8)
zuurstof bij de wortels	celademhaling in de wortelcellen	geen natte voeten: water geven met mate

Plantenvoeding is eten voor de plant

De fles 'plantenvoeding' bevat **mineralen**: opgeloste zouten met stikstof, fosfor, kalium en andere elementen. Die zijn bouwstoffen, zoals kalk voor jouw botten, maar ze leveren **geen energie**. Een plant maakt haar eigen voedsel (glucose) met licht. Zonder licht helpt de beste voeding niets. En te veel voedingszouten is schadelijk: de wortels verbranden.

Stikstof uit de lucht?

Lucht bestaat voor 78 % uit stikstof, maar een gewone plant kan die niet gebruiken: ze neemt stikstof alleen op als opgeloste zouten (nitraat) via de wortels. Alleen vlinderbloemigen zoals bonen en klaver krijgen hulp van bacteriën in knolletjes op hun wortels, die stikstof uit de lucht vastleggen.



Input, proces en output: de plant zet licht, water, koolstofdioxide en mineralen om in groei, zuurstof en waterdamp.

UITLEG · 27.6

Beperkende factoren

6/17

Een plant in fel licht groeit niet noodzakelijk sneller. Als er een ander ingrediënt ontbreekt, remt dat de fotosynthese. De factor die het minst voorhanden is, noem je de **beperkende factor**: die bepaalt hoe snel het proces gaat.

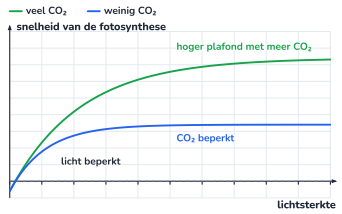
Denk aan een houten ton met duigen van verschillende hoogte: water loopt over de laagste duig weg. Zo bepaalt de 'kortste duig' hoe snel een plant groeit (de **ton van Liebig**, naar de Duitse scheikundige die zo over meststoffen dacht). Een langere duig (meer licht) helpt pas als de kortste (bijvoorbeeld CO_2) ook langer wordt.

In de grafiek zie je het. Bij weinig licht stijgt de fotosynthese met de lichtsterkte: **licht** is beperkend. Bij fel licht vlakt de lijn af: meer licht helpt niet meer, iets anders beperkt, meestal **koolstofdioxide**. Met meer CO_2 ligt het plafond hoger. Daarom blazen tuinders in hun serres extra koolstofdioxide in (tot 800 à 1000 ppm, hoofdstuk 14 van Intermediate).

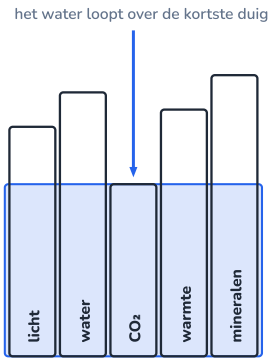
Ook de **temperatuur** speelt mee: de fotosynthese gebeurt met enzymen (hoofdstuk 34 van Intermediate) die het best werken rond een optimum. Voor veel planten van ons klimaat ligt dat tussen 20 en 30 °C; boven 35 à 40 °C valt het snel stil.

De vuistregel van de tuinders

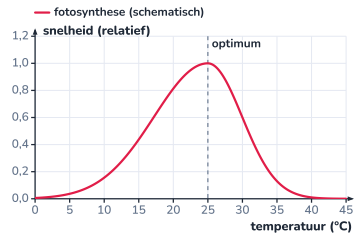
In de Nederlandse en Vlaamse glastuinbouw rekent men: in de winter en de lente, als licht de beperkende factor is, geeft 1 % meer licht ongeveer 0,5 à 1 % meer oogst. In de zomer is het effect kleiner: dan is er vaak licht genoeg en beperkt iets anders.



Schets: eerst beperkt het licht (beide lijnen stijgen samen), daarna de koolstofdioxide (elke lijn heeft haar eigen plafond).



De ton van Liebig: hier is CO_2 de kortste duig. Langere duigen voor licht of water helpen niet.



Schematisch: onder het optimum trager, erboven valt de fotosynthese snel terug.

UITGEWERKT VOORBEELD · 27.7

Welke factor remt de sla in de meetkas?

7/17

Bepaal telkens de beperkende factor voor de pluksla in de meetkas, en wat je eraan kan doen.

(a) Een grijze ochtend in maart, 9 uur: 8 °C in de kas, weinig licht.

(b) Een zonnige aprildag, 13 uur (hoofdstuk 4): de kas is dicht en 32 °C.

(c) Een zonnige dag in mei, 25 °C, dakraam open, maar de grond is uitgedroogd: de bladeren hangen slap.

GEGEVEN

- drie situaties in de meetkas
- de regelingen van hoofdstuk 25 (water geven onder 30 %, dakraam boven 28 °C)

GEVRAAGD

- de beperkende factor in elke situatie
- een maatregel

OPLOSSING

1 (a) Er is weinig licht én het is koud. Welke is het kortst? Om 9 uur in maart is het licht zwak: **licht** is hier de beperkende factor, met de temperatuur als tweede. De ledstrip aanzetten helpt (daarvoor is ze er), een warmtebuffer (hoofdstuk 16) houdt de kas 's nachts warmer.

2 (b) Licht is er genoeg. Maar in een dichte kas nemen de planten de koolstofdioxide sneller op dan er bijkomt: de lucht in de meetkas (576 L) bevat maar een halve gram CO_2. En 32 °C ligt boven het optimum van sla. **Koolstofdioxide** en **temperatuur** beperken; het dakraam openen lost beide op: verse lucht met CO_2, en afkoeling (dat doet de regeling van hoofdstuk 25 vanaf 28 °C).

3 (c) Slappe bladeren: de vacuoles zijn leeg, de plant heeft te weinig **water**. Om minder water te verliezen, sluit ze haar huidmondjes. Dan komt er ook geen CO_2 meer binnen, en stopt de fotosynthese, hoe fel de zon ook schijnt. Water geven, en de drempel van de vochtregeling nakijken.

ANTWOORD

(a) licht (en temperatuur); (b) koolstofdioxide en een te hoge temperatuur; (c) water, en daardoor ook koolstofdioxide.

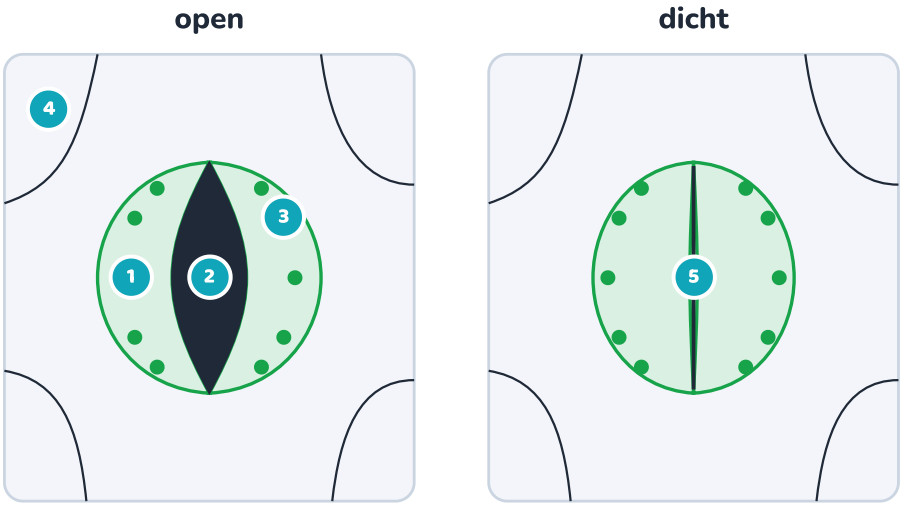
Klopt dit? Kijk of je maatregel de kortste duig verlengt. In (a) helpt extra CO_2 niets: het licht blijft beperkend. In (c) helpt het dakraam openen niets zolang de huidmondjes dicht zijn.

ONTLEED · 27.8

Huidmondjes: de poorten van het blad

8/17

Een blad moet koolstofdioxide binnenlaten, maar de waslaag laat geen gas door. De oplossing: honderden piepkleine poortjes per vierkante millimeter, de **huidmondjes** (hoofdstuk 26). Elke poort heeft twee **sluitcellen** die de spleet open en dicht kunnen doen.



Links open: de sluitcellen staan bol en buigen uit elkaar. Rechts dicht: slap, ze liggen tegen elkaar.

1 Sluitcel
Boonvormige cel met een dikke binnenwand. Neemt ze water op, dan zwelt ze op en buigt ze naar buiten: de spleet gaat open.

2 Spleet (open)
Hierlangs gaat koolstofdioxide naar binnen, en zuurstof en waterdamp naar buiten.

3 Bladgroenkorrels
Sluitcellen zijn de enige opperhuidcellen met bladgroenkorrels. Ze reageren op licht: bij licht gaan de huidmondjes open.

4 Opperhuidcel
Doorzichtige cellen zonder bladgroen, die als puzzelstukken in elkaar passen (zie de nagellakafdruk van hoofdstuk 26).

5 Gesloten huidmondje
In het donker, en bij droogte, verliezen de sluitcellen water en worden ze slap: de spleet sluit. De plant verliest dan bijna geen water meer, maar kan ook geen CO_2 opnemen.

UITLEG · 27.9

Verdamping en watertransport

9/17

Door de open huidmondjes ontsnapt er voortdurend **waterdamp**: de plant **verdampt** water (ook wel transpiratie genoemd). Dat lijkt verspilling, maar het is de motor van het watertransport:

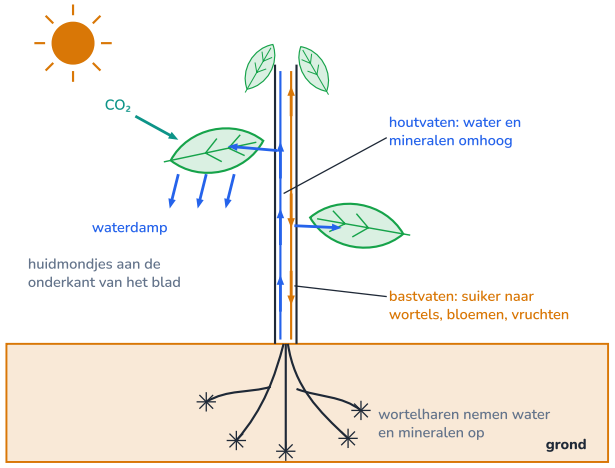
1. **Wortelharen**, heel fijne uitstulpingen van wortelcellen, nemen water en opgeloste mineralen op uit de grond. Ze vergroten het oppervlak van de wortel enorm.
2. Het water gaat omhoog door de **houtvaten**: lange buisjes van dode cellen, van de wortel door de stengel tot in de nerven van elk blad.
3. In het blad verdampt water uit de cellen in de luchtholtes, en ontsnapt het door de huidmondjes.
4. Waterdeeltjes trekken elkaar aan (hoofdstuk 6). Verdwijnt er bovenaan water, dan trekt dat de hele waterdraad in de houtvaten een stukje omhoog, als een ketting. Zo krijgen de hoogste bomen ter wereld, kustmammoetbomen van ruim 115 m, water tot in hun top, zonder pomp.

De glucose die in de bladeren gemaakt wordt, gaat via de **bastvaten** (levende cellen) naar alle delen die groeien of voorraad aanleggen: wortels, jonge bladeren, bloemen, vruchten, knollen. Dat kan naar beneden én naar boven.

Verdamping koelt ook het blad af (verdampen kost energie, hoofdstuk 6), en ze gaat sneller als het **warm**, **zonnig**, **droog** en **winderig** is. Van al het water dat een plant opneemt, blijft er maar een paar procent in de plant: de rest verdampt. Daarom is de lucht in een kas zo vochtig, en beslaat de wand 's nachts (hoofdstuk 6).

Water gaat door de plant zoals door een rietje dat je opzuigt

Niemand zuigt: de verdamping bovenaan trekt aan een ononderbroken draad van water. Zit er lucht in een houtvat (bijvoorbeeld als je een bloem lang droog laat liggen), dan breekt de draad. Daarom snij je bloemstelen onder water af voor je ze in een vaas zet.



Water gaat van de wortelharen door de houtvaten (blauw) naar de bladeren en verdampt; suiker gaat via de bastvaten (oranje) naar waar hij nodig is.



Selderij in blauw water: na een paar uur zie je in de dwarse snede de houtvaten als blauwe stipjes.

PROEF · 27.10

Welke kant van het blad verdampt het meest?

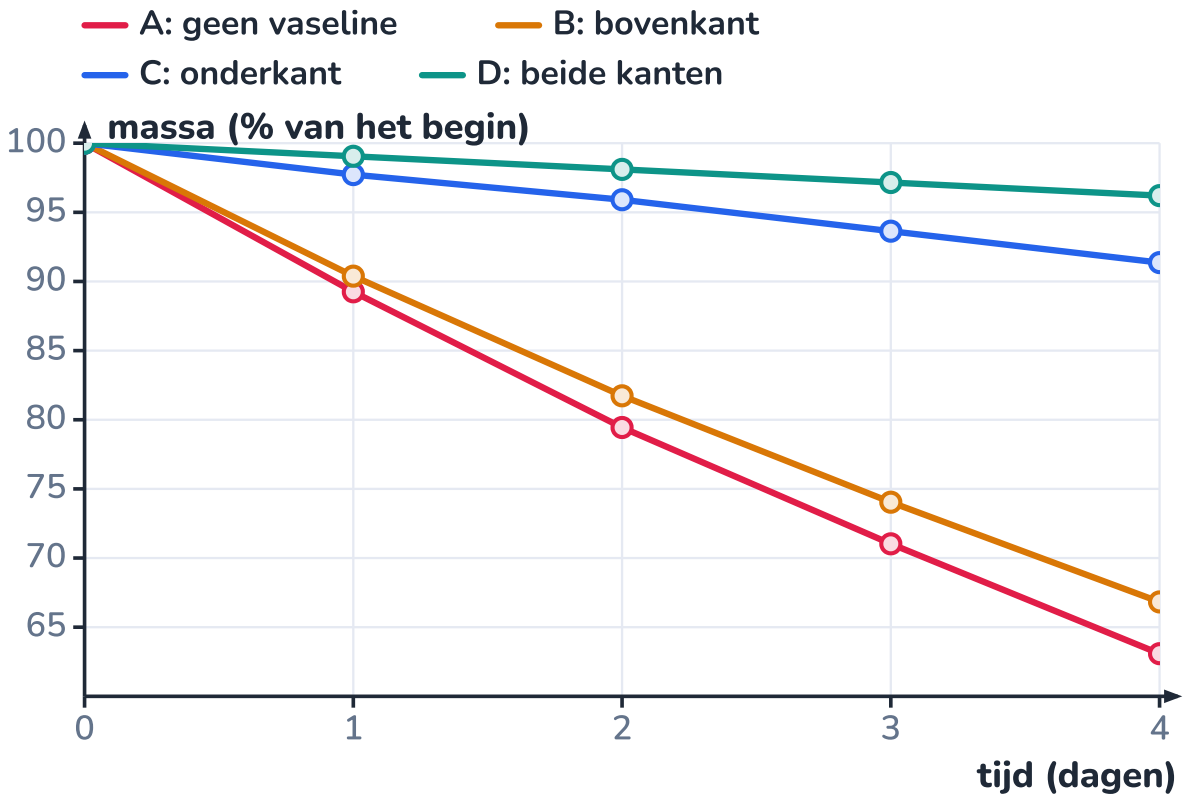
10/17

ONDERZOEKSVRAAG

Verliest een blad zijn water vooral langs de bovenkant of langs de onderkant?

MATERIAAL

vier ongeveer even grote bladeren van dezelfde plant (bijvoorbeeld laurier of klimop), met steel · vaseline · een balans tot op 0,01 g · touw en wasknijpers



Vaseline op de onderkant (C) remt het verdampen bijna even goed als op beide kanten (D).

WERKWIJZE

1. Blad A krijgt geen vaseline, blad B een dun laagje op de bovenkant, blad C op de onderkant, blad D op beide kanten. Vaseline laat geen waterdamp door.
2. Weeg elk blad en noteer de massa. Hang de vier bladeren naast elkaar aan een touw, op dezelfde plaats in het lokaal.
3. Weeg elke dag op hetzelfde tijdstip, vier dagen lang.
4. Bereken voor elk blad de massa als percentage van de beginmassa, en zet alles in één grafiek.

WAARNEMING

Een voorbeeld van resultaten:

blad	vaseline	dag 0 (g)	dag 1 (g)	dag 2 (g)	dag 3 (g)	dag 4 (g)	massaverlies
A	geen	2,14	1,91	1,70	1,52	1,	
B	bovenkant	2,08	1,88	1,70	1,54	1,	
C	onderkant	2,20	2,15	2,11	2,06	2,	
D	beide kanten	2,11	2,09	2,07	2,05	2,	

Blad A verliest het meest, B bijna evenveel, C veel minder en D bijna niets.

VERKLARING

De massa daalt doordat er water verdampt. Vaseline op de **onderkant** (C) remt het verdampen veel sterker dan op de [illegible] meeste huidmondjes zitten onderaan, zoals je in de nagellakafdruk van hoofdstuk 26 zag. D verliest nog een klein beetje, door de waslaag en door plekjes waar de vaseline dun was. Dat alle bladeren van dezelfde plant komen en op dezelfde plaats hangen, maakt de proef eerlijk: alleen de plaats van de vaseline verschilt. Nog beter: meerdere bladeren per groep.

UITGEWERKT VOORBEELD · 27.11

Hoeveel water verdampen de planten in de meetkas?

11/17

De meetkas verbruikt ongeveer 1,8 L water per dag (hoofdstuk 3), bijna allemaal door de planten. Na 6 weken oogst je in elk van de 12 bakjes ongeveer 100 g pluksla. Sla bestaat voor 94 % uit water. (a) Hoeveel water per bakje per dag? (b) Hoeveel water ging er in 6 weken door de kas? (c) Welk deel daarvan zit in de geoogste sla?

GEGEVEN

- verbruik $1{,}8\,\mathrm{L}$ per dag
- 12 bakjes, 6 weken = 42 dagen
- oogst $100\,\mathrm{g}$ per bakje, 94 % water

GEVRAAGD

- (a) water per bakje per dag
- (b) water in 6 weken
- (c) aandeel dat in de oogst zit

OPLOSSING

1. (a) $1{,}8\,\mathrm{L} : 12 = 0{,}15\,\mathrm{L} = 150\,\mathrm{mL}$ per bakje per dag.
2. (b) $1{,}8\,\mathrm{L} \times 42 = 75{,}6\,\mathrm{L}$ in 6 weken.
3. (c) Oogst: $12 \times 100\,\mathrm{g} = 1200\,\mathrm{g}$ sla, waarvan 94 % water: $0{,}94 \times 1200 = 1128\,\mathrm{g}$, ongeveer $1{,}1\,\mathrm{L}$ water.
4. Aandeel: $1{,}128 : 75{,}6 \approx 0{,}015 = 1{,}5\,\%$.
5. De andere 98,5 % is verdampt: ongeveer 1,8 L waterdamp per dag in 576 L kaslucht, die er bij 20 °C maar hoogstens een tiental gram kan bevatten (hoofdstuk 6). Het meeste verlaat de kas via kieren en het dakraam, de rest condenseert op de koude wanden.

ANTWOORD

(a) 150 mL per bakje per dag; (b) 75,6 L; (c) maar ongeveer 1,5 %: bijna al het water verdampt.

Klopt dit? Voor landbouwgewassen geldt hetzelfde: meer dan 95 % van het opgenomen water verdampt. En de droge stof? 1200 g – 1128 g = 72 g, gebouwd uit koolstofdioxide, water en een paar gram mineralen.

UITLEG · 27.12

Een eerlijke groeiproef

12/17

In hoofdstuk 2 leerde je een eerlijke proef opzetten: **één variabele veranderen, één meten, al de rest gelijk houden**, met herhalingen. Bij planten komen daar drie aandachtspunten bij.

1. Wat meet je? 'Groei' kan je op verschillende manieren meten:

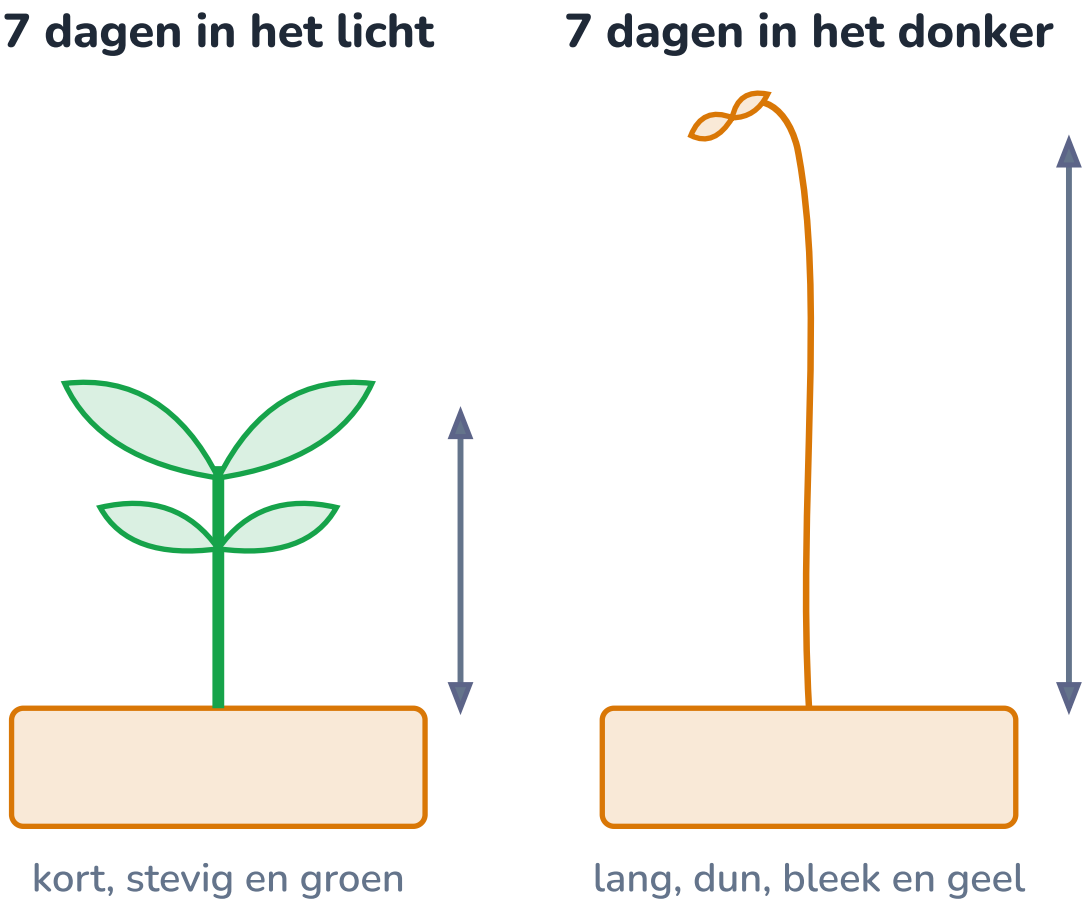
afhankelijke variabele	voordeel	nadeel
lengte of hoogte (mm)	snel, de plant blijft leven	langer is niet altijd beter (zie figuur)
aantal bladeren	eenvoudig tellen	zegt niets over de grootte
versgewicht (g)	wat je oogst en eet	de plant moet eraf; hangt af van hoeveel water ze net had
drooggewicht (g)	de echte opgebouwde massa	drogen in een oven, de plant is weg

2. Planten verschillen van nature. Geen twee zaadjes zijn gelijk: gebruik veel planten per groep en meerdere bakjes, en werk met gemiddelden.

3. De plaats telt. Vooraan in de kas is het lichter en warmer dan achteraan, vlak bij de wand kouder dan in het midden. Zet niet alle bakjes van één groep naast elkaar, maar **loot** hun plaats, zodat elke groep op goede en minder goede plaatsen staat.

Hoe langer de plant, hoe beter ze groeit

Zet tuinkers een week in een donkere doos, en ze wordt langer dan in het licht: lange, dunne, bleke stengeltjes met kleine gele blaadjes. De plant verbruikt de voorraad in het zaad om zo snel mogelijk licht te zoeken (**etiolement**). Ze is niet gezonder, wel uitgeput. Wie alleen de lengte meet, besluit dan dat licht de groei remt!



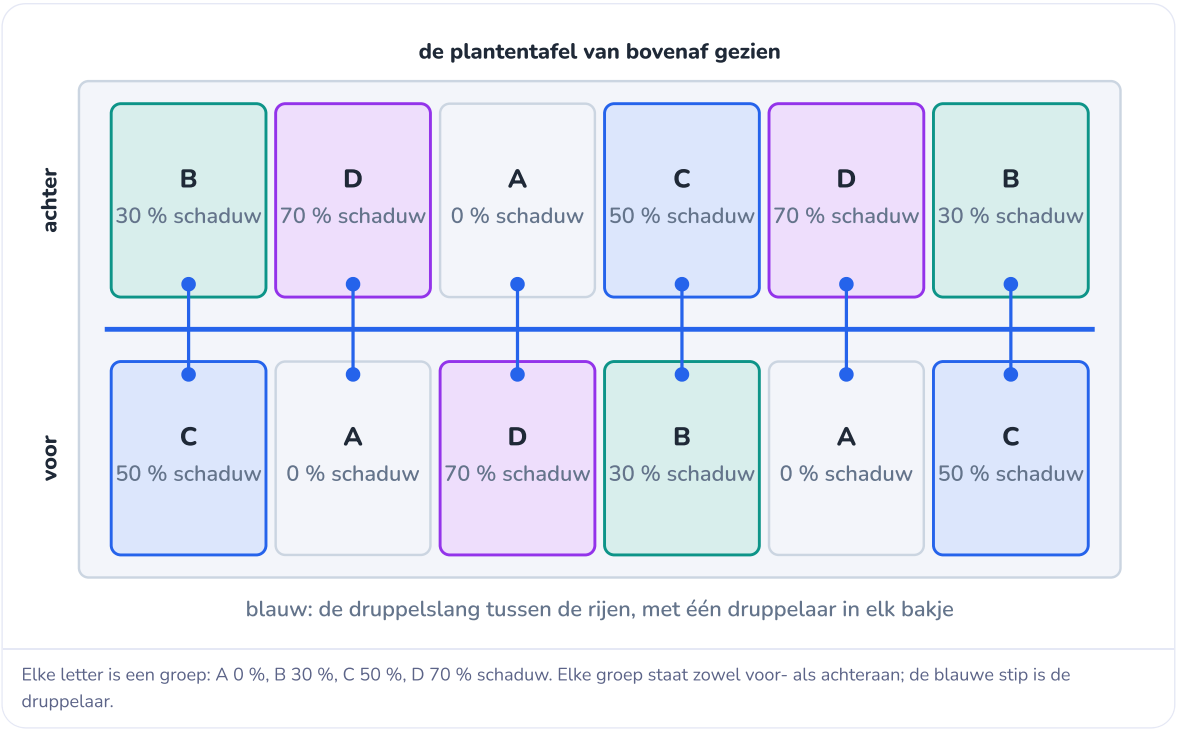
Tuinkers na een week: in het donker langer, maar dun, bleek en uitgeput. Lengte alleen is een misleidende maat.

UITGEWERKT VOORBEELD · 27.13

Habitat: de groeiproef in de meetkas ontwerpen

13/17

Groeit pluksla in de meetkas in april trager als ze minder licht krijgt, en hoeveel? Ontwerp een eerlijke proef met de twaalf bakjes van de kas.



Elke letter is een groep: A 0 %, B 30 %, C 50 %, D 70 % schaduw. Elke groep staat zowel voor- als achteraan; de blauwe stip is de druppelaar.

GEGEVEN

- 12 bakjes van 30 × 20 cm in twee rijen van zes, elk met een eigen druppelaar
- pluksla, zaad uit één pakje
- schaduwdoek van 30, 50 en 70 % (tuincentrum), houten raampjes
- lichtsensor (LDR) op de microcontroller (hoofdstuk 25)

GEVRAAGD

- onderzoeksvraag en hypothese
- variabelen
- de indeling van de bakjes
- het meetplan

OPLOSSING

1. **Vraag en hypothese.** 'Hoe hangt de oogst van pluksla na vijf weken af van de hoeveelheid licht?' Hypothese: 'Als de sla minder licht krijgt, dan wordt de oogst kleiner, omdat licht in april de beperkende factor is voor de fotosynthese.'

2. **Onafhankelijke variabele:** het licht, met een schaduwdoek op een raampje boven het bakje: 0 % (A), 30 % (B), 50 % (C) en 70 % (D) schaduw. Vier groepen van drie bakjes. Groep A is de **controlegroep**. **Afhankelijke variabele:** het versgewicht per bakje bij de oogst, gewogen op een keukenweegschaal (en van één bakje per groep ook het drooggewicht).

3. **Gecontroleerd:** zaad uit hetzelfde pakje, 30 zaadjes per bakje, na twee weken uitgedund tot 10 plantjes; dezelfde potgrond (hoofdstuk 7); water via de druppelslang, voor elk bakje dezelfde druppelaar en dus hetzelfde water; dezelfde voedingsoplossing; zaaidag en oogstdag gelijk; de ledstrip blijft uit. De raampjes staan 20 cm boven de grond, zodat de lucht onder het doek vrij kan stromen.

4. **Loten.** De plaats van de groepen wordt geloot, met de afspraak dat elke groep in beide rijen staat (zie het plan): zo krijgt geen enkele groep alleen de lichte voorkant.

5. **Meetplan.** Elke week: aantal bladeren en een foto van boven. Met de lichtsensor meet je onder elk doek hoeveel licht er echt overblijft (een doek van '50 %' laat niet altijd precies de helft door). De temperatuursensor noteert de kastemperatuur. Na vijf weken: alles oogsten op dezelfde hoogte (2 cm boven de grond), elk bakje apart wegen.

ANTWOORD

Vier groepen van drie bakjes (0, 30, 50 en 70 % schaduw), geloot over beide rijen; al de rest gelijk; versgewicht per bakje na vijf weken als afhankelijke variabele; licht en temperatuur gemeten met de sensoren van de kas.

Klopt dit? Loop de vraag uit hoofdstuk 2 na: 'Waarin verschillen de bakjes nog?' Het schaduwdoek maakt het er ook iets koeler. Dat is een tweede variabele die je niet volledig kan uitschakelen: meet ze, en vermeld het in je bespreking.

UITGEWERKT VOORBEELD · 27.14

De resultaten van de groeiproef verwerken

14/17

Na vijf weken weegt een klas de sla per bakje. Verwerk de resultaten en trek een besluit.

schaduwdoek	licht	bakje 1 (g)	bakje 2 (g)	bakje 3 (g)	gemiddelde (g)	bereik (g)	t.o.v. 100 % licht
0 %	100 %	98	106	101	101,7	8	100 %
30 %	70 %	74	69	78	73,7	9	72 %
50 %	50 %	51	57	49	52,3	8	51 %
70 %	30 %	29	33	26	29,3	7	29 %



Voorbeelduitkomst: de gemiddelden liggen dicht bij de stippellijn (recht evenredig met het licht).

GEGEVEN

- versgewicht van 3 bakjes per groep
- licht = 100 % min het percentage schaduw

GEVRAAGD

- gemiddelde en bereik per groep
- een grafiek
- een besluit

OPLOSSING

1. Gemiddelde van de controlegroep: $(98 + 106 + 101) : 3 = 101{,}7\,\text{g}$; bereik $106 - 98 = 8\,\text{g}$. Zo ook voor de andere groepen (tabel).
2. Zet het **licht** (onafhankelijke variabele) horizontaal en het versgewicht verticaal. Teken de afzonderlijke bakjes en het gemiddelde met het bereik als streepje.
3. Vergelijk met de controlegroep: bij 70 % licht nog $73{,}7 : 101{,}7 = 72\,\%$ van de oogst, bij 30 % licht nog maar 29 %.

4 De verschillen tussen de groepen (20 g en meer) zijn veel groter dan het bereik binnen een groep (7 à 9 g): het effect is echt, geen toeval (hoofdstuk 2).

5 De punten liggen dicht bij een rechte door de oorsprong: minder licht geeft ongeveer evenredig minder oogst. Per procent licht minder, ongeveer 1 % minder sla: dat past bij de vuistregel van de tuinders.

ANTWOORD

Hoe minder licht, hoe kleiner de oogst, ongeveer recht evenredig. De hypothese is bevestigd: in april is licht de beperkende factor voor sla in de meetkas.

Klopt dit? Zou hetzelfde gelden in juli? Dan is er veel meer licht en wordt de kas heet; een beetje schaduw kan dan zelfs helpen. Een besluit geldt alleen voor de omstandigheden waarin je het getest hebt.

UITLEG · 27.15

Telen zonder aarde

15/17

Wat doet de aarde eigenlijk voor een plant? Vier dingen: ze houdt de plant **overeind**, ze bewaart **water**, ze levert **mineralen**, en tussen de korrels zit **lucht** voor de wortels. Alle vier kan je ook anders regelen. Dan teel je zonder aarde: **hydrocultuur** of **hydroponie** (Grieks: 'werk met water').

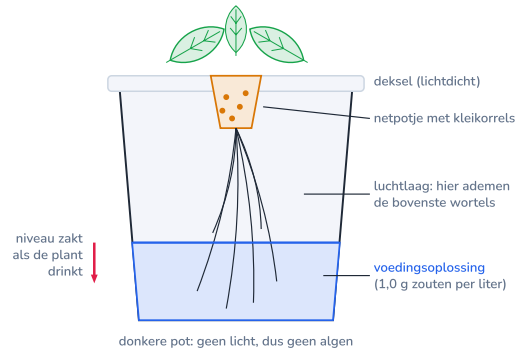
- De wortels staan in water met opgeloste voedingszouten, zoals de voedingsoplossing van de meetkas (1,0 g per liter, hoofdstuk 8).
- Steun komt van een netpotje met kleikorrels of steenwol, die zelf geen voeding geven.
- Lucht voor de wortels: door een luchtlaag, door luchtbellen (een aquariumpompje) of doordat de oplossing stroomt.

De eenvoudigste methode, bedacht door de Amerikaanse tuinbouwkundige Bernard Kratky, heeft zelfs geen pomp nodig. Een pot wordt gevuld met voedingsoplossing tot net onder het netpotje. Terwijl de plant drinkt, zakt het niveau en ontstaat er een luchtlaag waarin de bovenste wortels ademen; de onderste wortels blijven water opnemen. Voor één slaplant is een pot van ongeveer 5 liter genoeg voor haar hele leven (in de meetkas drinkt een bakje 150 mL per dag).

voordelen	nadelen
geen ziektes en onkruid uit de grond	algen als er licht bij de oplossing komt
minder water: niets zakt weg in de ondergrond	je moet zoutgehalte (EC) en zuurtegraad (pH) bewaken
snelle groei, veel planten op weinig plaats	pompen en lampen verbruiken elektriciteit
werkt ook waar geen goede grond is: op een dak, in een station	een fout (te sterk, geen lucht) treft meteen alle planten

Van Helmont, definitief

Een slaplant van 150 g die groeit zonder een korrel aarde, alleen in water met een paar gram zouten, is het sterkste bewijs dat een plant haar massa uit de lucht en het water haalt. In de klimaatmodule van Intermediate (hoofdstuk 36) bouw je een echt hydroponiesysteem, met een pomp, een EC- en een pH-meting.



Een Kratky-pot: geen aarde, geen pomp. De luchtlaag groeit mee terwijl de plant drinkt.



Sla zonder aarde: witte, gezonde wortels in voedingsoplossing, met een luchtlaag erboven.

NASLAG · 27.16

Overzicht: fotosynthese, ademhaling en groei

16/17

De twee woordvergelijkingen, wat een plant nodig heeft, en de checklist voor een groeiproef.

fotosynthese (in de bladgroenkorrels, alleen in het licht)

$$\text{koolstofdioxide} + \text{water} \xrightarrow[\text{bladgroen}]{\text{licht}} \text{glucose} + \text{zuurstof}$$

celademhaling (in de mitochondriën, altijd)

$$\text{glucose} + \text{zuurstof} \longrightarrow \text{koolstofdioxide} + \text{water} + \text{energie}$$

	fotosynthese	celademhaling
waar	in de bladgroenkorrels (groene delen)	in de mitochondriën (alle levende cellen)
wanneer	alleen in het licht	altijd, dag en nacht
neemt op	koolstofdioxide en water	glucose en zuurstof
geeft af	glucose en zuurstof	koolstofdioxide en water
energie	lichtenergie wordt opgeslagen in suiker	energie uit suiker komt vrij voor de cel
wie	planten, algen, sommige bacteriën	alle organismen: planten, dieren, schimmels, bacteriën

wat	waarvoor	in de meetkas
licht	energie voor de fotosynthese	zon door het polycarbonaat (±80 % gaat erdoor); ledstrip in de winter
water	grondstof van de fotosynthese; houdt de cellen stevig; vervoert stoffen; koelt door verdamping	druppelslang, water geven onder 30 % bodemvocht (hoofdstuk 25)
koolstofdioxide	grondstof: de koolstof van alle suiker, zetmeel en cellulose	uit de lucht (±0,04 %), via kieren en het dakraam
geschikte temperatuur	alle processen in de cel verlopen het best in een bepaald gebied	dakraam open boven 28 °C (hoofdstuk 25), 's nachts warmtebuffer (hoofdstuk 16)
mineralen	bouwstoffen: stikstof en zwavel voor eiwitten, magnesium in bladgroen, ijzer om bladgroen te maken, fosfor, kalium …	voedingsoplossing 1,0 g/L (hoofdstuk 8)
zuurstof bij de wortels	celademhaling in de wortelcellen	geen natte voeten: water geven met mate

transport	wat	richting	motor
houtvaten	water en mineralen	van de wortels naar boven	verdamping in de bladeren
bastvaten	suikers	van de bladeren naar alle delen, op en neer	levende cellen
huidmondjes	CO_2 in; O_2 en waterdamp uit	met de lucht	open bij licht en genoeg water

checklist groeiproef
Eén onafhankelijke variabele, met een controlegroep.
Veel planten per groep en meerdere bakjes; gemiddelde en bereik.
Plaatsen geloot; elke groep op goede en minder goede plaatsen.
Een zinvolle maat voor groei: versgewicht of drooggewicht, niet alleen de lengte.
Wat je niet kan gelijk houden, meet en vermeld je.

HET GEHEEL · 27.17

Waar fotosynthese terugkomt

17/17

Fotosynthese is het begin van bijna elke voedselketen en de bron van de zuurstof in de lucht: in het volgende hoofdstuk zie je hoe ze de energiestroom en de koolstofkringloop van elk ecosysteem aandrijft. Scheikundig is het een reactie (leerlijn **Materie en chemie**) die in Intermediate een kloppende reactievergelijking wordt, met getallen. Energetisch is het een omzetting van licht in chemische energie met een laag rendement (leerlijn **Energie**). En de groeiproef is zuiver **Onderzoeken en meten**.

F2 Onderzoeken: van vraag tot besluit
Van Helmonts wilg, de eerlijke proef en herhalen: de basis van elke groeiproef.

F6 Het deeltjesmodel
Verdampen en condenseren: de vochtige kaslucht komt uit de bladeren.

F8 Zuivere stoffen en mengsels
De voedingsoplossing: 1,0 g voedingszouten per liter.

F15 Energie: vormen en omzettingen
Van 1000 J zonlicht wordt ongeveer 10 J suiker in de plant.

F25 Sensoren en automatisch regelen
Water geven en het dakraam: regelingen die de beperkende factoren water en temperatuur bewaken.

F26 Cellen en organismen
Bladgroenkorrels, mitochondriën en huidmondjes: waar het allemaal gebeurt.

F28 Ecosystemen en kringlopen
Producenten aan het begin van de voedselketen; de koolstofkringloop.

I14 Reacties en stoichiometrie
De woordvergelijking wordt een kloppende reactie: hoeveel CO_2 een slaplant opneemt.

I34 Enzymen en stofwisseling
Waarom de temperatuur een optimum heeft: enzymen.

I36 Hydroponie en voedselproductie
Hydroponie op schaal: EC, pH, groeilampen en opbrengst per kWh.

E31 Bioprocestechniek
Algen kweken voor zuurstof en voedsel in een reactor.

Habitat
De meetkas bestaat om planten te laten groeien. Met wat je nu weet, kan je elke regeling verklaren: de ledstrip verlengt de 'duig' licht in de winter, het dakraam laat CO_2 binnen en houdt de temperatuur onder het te-warm-gebied, en de vochtregeling zorgt dat de huidmondjes open kunnen blijven. In opdracht 27.13 ontwerp je je eigen groeiproef voor de meetkas; in hoofdstuk 33 voer je ze uit en rapporteer je ze.

SAMENVATTING

In het kort

- Fotosynthese: koolstofdioxide + water → glucose + zuurstof, met licht als energiebron en bladgroen, in de bladgroenkorrels.
- De droge massa van een plant komt grotendeels uit de koolstofdioxide van de lucht; uit de grond komen alleen water en een klein beetje mineralen.
- Celademhaling (glucose + zuurstof → koolstofdioxide + water + energie) gebeurt in alle cellen, dag en nacht, ook bij planten.
- Een plant heeft licht, water, koolstofdioxide, een geschikte temperatuur, mineralen en zuurstof bij de wortels nodig. Mineralen zijn bouwstoffen, geen voedsel.
- De factor die het minst voorhanden is, beperkt de snelheid van de fotosynthese (de kortste duig).
- Huidmondjes laten CO_2 binnen en waterdamp buiten; de verdamping trekt water door de houtvaten omhoog. Suiker gaat via de bastvaten.
- Een eerlijke groeiproef: één variabele, veel planten, geloten plaatsen, en een zinvolle maat (versgewicht of drooggewicht).
- Hydrocultuur vervangt de aarde door water met voedingszouten, steunmateriaal en lucht voor de wortels.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

fotosynthese
Het proces waarbij een plant met lichtenergie en bladgroen koolstofdioxide en water omzet in glucose en zuurstof.

glucose
Een suiker die de plant bij de fotosynthese maakt; bouwstof (cellulose, zetmeel) en brandstof voor de cellen.

bladgroen (chlorofyl)
De groene kleurstof in de bladgroenkorrels die licht opvangt voor de fotosynthese.

celademhaling
Het vrijmaken van energie uit glucose met zuurstof, waarbij koolstofdioxide en water ontstaan; gebeurt in alle levende cellen, dag en nacht.

beperkende factor
De factor die het minst beschikbaar is en daardoor de snelheid van een proces bepaalt.

huidmondje
Opening tussen twee sluitcellen in de opperhuid, vooral aan de onderkant van het blad, waardoor koolstofdioxide, zuurstof en waterdamp gaan.

verdamping (transpiratie)
Het ontsnappen van waterdamp uit de bladeren via de huidmondjes; het trekt water van de wortels naar boven.

houtvaten
Buisjes van dode cellen die water en mineralen van de wortels naar de bladeren vervoeren.

bastvaten
Buisjes van levende cellen die suikers van de bladeren naar alle delen van de plant vervoeren.

mineralen
Opgeloste zouten (met stikstof, fosfor, kalium, magnesium ...) die een plant als bouwstof nodig heeft; ze leveren geen energie.

versgewicht
De massa van een plant zoals ze geoogst wordt, met al het water erin.

drooggewicht
De massa van een plant nadat al het water eruit gedroogd is.

hydrocultuur
Telen zonder aarde: de wortels staan in water met opgeloste voedingszouten, eventueel in een steunmateriaal zoals kleikorrels.

F FUNDAMENTAL · DEEL F7 · LEVEN EN SYSTEMEN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 28

Ecosystemen en kringlopen

Wie wie eet, waar de energie heen gaat, en waarom een gesloten wereld zo moeilijk is

Geen enkel organisme leeft alleen. Planten vangen het licht, dieren eten planten en elkaar, en schimmels en bacteriën ruimen alles op. Samen vormen ze met hun omgeving een **ecosysteem**. In dit hoofdstuk volg je de **energie**, die als een stroom door een ecosysteem gaat, en de **stoffen**, die in een kringloop rondgaan: water, koolstof, mineralen. Je leest de metingen van de koolstofdioxide in de lucht, je leert van gesloten werelden van een fles tot Biosphere 2, en je maakt de balans van de meetkas op.

7× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 2× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

B Leven en systemen · M Materie en chemie



Een gesloten fles met planten: licht gaat erin, warmte eruit, en al de rest gaat rond.

Na dit hoofdstuk

- Je kan de begrippen organisme, populatie, levensgemeenschap en ecosysteem gebruiken, en biotische en abiotische factoren onderscheiden.
- Je kan organismen indelen als producent, consument of reducent en hun rol uitleggen.
- Je kan voedselketens en een voedselweb tekenen en lezen, met de pijlen in de juiste richting, en voorspellen wat er gebeurt als een soort verdwijnt.
- Je kan uitleggen dat energie door een ecosysteem stroomt en stoffen in een kringloop gaan, en met de vuistregel van 10 % rekenen.
- Je kan de waterkringloop en de koolstofkringloop beschrijven met de processen die erin spelen.
- Je kan metingen van de koolstofdioxide in de lucht lezen en verklaren.
- Je kan uitleggen wat een gesloten ecosysteem nodig heeft, met voorbeelden van de flessentuin tot Biosphere 2, en de meetkas als ecosysteem beschrijven.

VERHAAL · 28.1

Een tuin in een fles

In 1960 deed de Engelsman **David Latimer** wat compost in een grote glazen fles, liet er met een ijzerdraad een stekje van een plant in zakken (een *Tradescantia*), goot er wat water bij en deed de fles dicht. In 1972 opende hij ze nog één keer om water te geven. Daarna bleef ze dicht. Meer dan vijftig jaar later stond de plant er nog altijd, groen en groot, en vulde ze de hele fles.

Hoe kan dat, zonder één druppel water of één korrel voeding van buiten? Alles wat de plant nodig heeft, gaat in de fles **rond**. Het water dat ze verdampt, condenseert tegen het koele glas en druppelt terug in de grond. De zuurstof die ze overdag maakt, gebruikt ze 's nachts weer om te ademen, net als de bacteriën en schimmels in de grond. Die bacteriën en schimmels breken afgevallen bladeren af, waarbij koolstofdioxide en mineralen vrijkomen: precies de grondstoffen die de plant weer nodig heeft. Het enige wat erin moet, is **licht**; het enige wat eruit gaat, is **warmte**.

Het idee is niet nieuw. Rond 1829 merkte de Londense arts **Nathaniel Ward** dat varens in een dichte glazen pot gezond bleven, terwijl ze in de vuile Londense lucht van zijn tuin doodgingen. Zijn gesloten glazen kasten werden vanaf de jaren 1830 gebruikt om levende planten maandenlang over zee te vervoeren, van continent naar continent.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Een flessentuin is een heel klein ecosysteem waarin je alle bouwstenen van dit hoofdstuk ziet: een producent, reducenten, een waterkringloop, een koolstofkringloop, en energie die binnenkomt als licht en vertrekt als warmte. Het station van Habitat moet ooit hetzelfde doen, maar dan met mensen erin. Dat dat veel moeilijker is, leer je van Biosphere 2.



Een flessentuin zoals die van Latimer: meer dan een halve eeuw dicht, en de plant leeft nog.

UITLEG · 28.2

Wat is een ecosysteem?

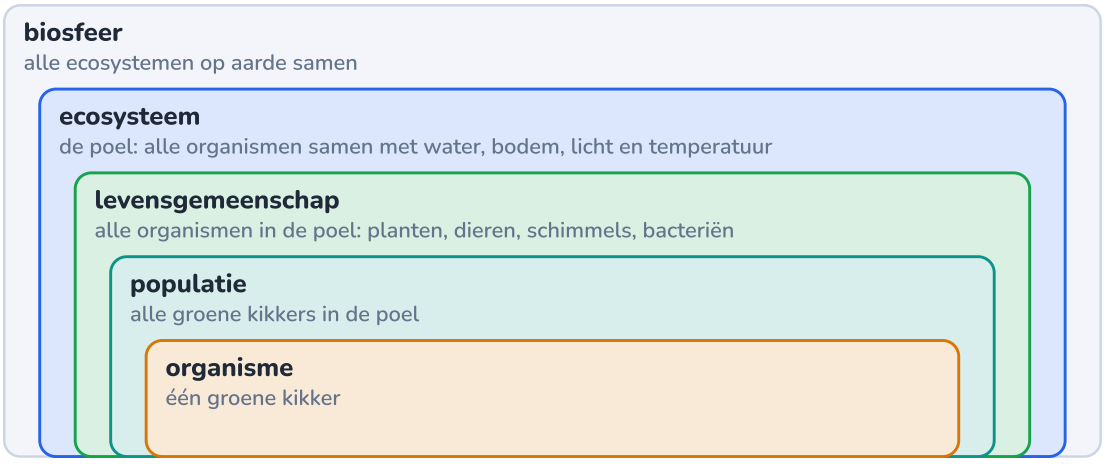
2/17

Biologen kijken naar de natuur op verschillende niveaus. Eén groene kikker is een **organisme**. Alle groene kikkers in dezelfde poel vormen een **populatie**. Alle populaties samen (kikkers, libellen, algen, waterplanten, bacteriën …) vormen de **levensgemeenschap**. Samen met het water, de bodem, het licht en de temperatuur is dat een **ecosysteem**. Alle ecosystemen op aarde samen zijn de **biosfeer**.

Wat een organisme beïnvloedt, deel je op in twee soorten factoren:

abiotische factoren (niet-levend)	biotische factoren (levend)
licht, temperatuur	voedsel (planten of prooien)
water, luchtvochtigheid	rovers die je opeten
bodem, mineralen, zuurgraad	concurrenten voor voedsel of plaats
wind, zuurstof, koolstofdioxide	ziekteverwekkers, bestuivers

Een ecosysteem kan groot zijn (een regenwoud, de Noordzee) of klein (een poel, een rottende boomstam, een flessentuin). Ook de meetkas is een klein ecosysteem, al is het een eenvoudig en door mensen gestuurd ecosysteem: jij kiest de planten, en jij levert water en voeding.



Elk niveau bevat het vorige: van één kikker tot alle leven op aarde.

UITLEG · 28.3

Producenten, consumenten en reducenten

3/17

In elk ecosysteem hebben de organismen een van drie rollen:

- **Producenten** maken zelf hun voedsel met licht (fotosynthese, hoofdstuk 27): planten, algen en sommige bacteriën. Ze vormen het begin van elke voedselketen op land en in het water.
- **Consumenten** eten andere organismen. *Planteneters* (bladluis, slak, konijn) eten producenten, *vleeseters* (lieveheersbeestje, sperwer) eten dieren, *alleseters* (merel, mens) eten allebei.
- **Reducenten**, schimmels en bacteriën, breken dode resten en uitwerpselen af tot koolstofdioxide, water en mineralen. Zo komen die stoffen terug in de bodem en de lucht, waar de producenten ze weer opnemen.

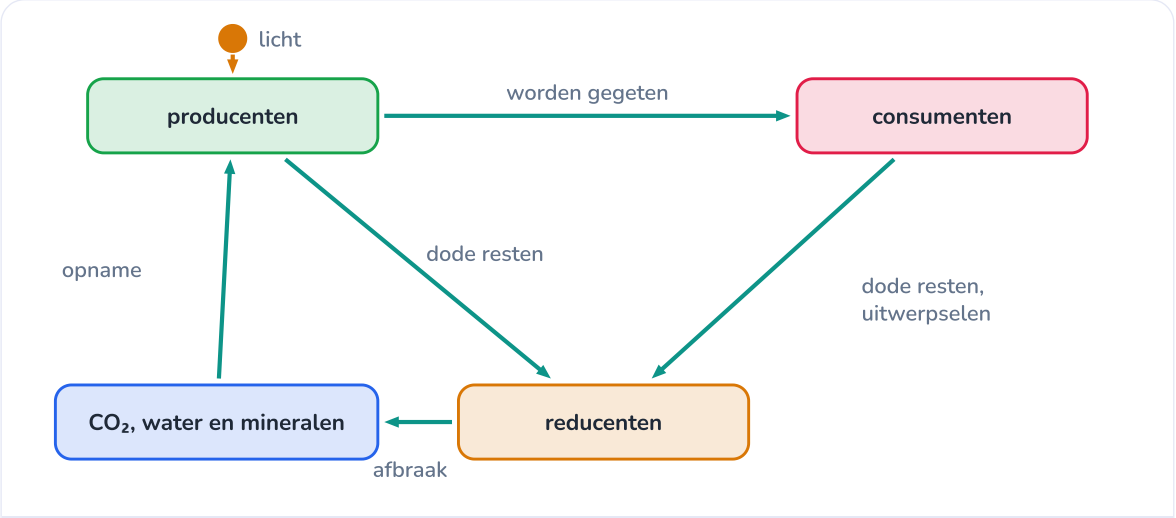
Tussen de consumenten en de reducenten zitten de **afvaleters**: regenwormen, pissebedden, miljoenpoten. Ze eten dode bladeren en verkruimelen ze, zodat schimmels en bacteriën er beter bij kunnen. Een regenworm is dus geen reducent in strikte zin, maar een onmisbare helper.

Paddenstoelen zijn planten

Een paddenstoel groeit wel uit de grond, maar hij heeft geen bladgroen en maakt geen voedsel met licht. Hij is het vruchtlichaam van een schimmel, die met draden door de bodem of het hout groeit en dode resten verteert. Schimmels vormen een eigen groep, naast planten en dieren; ze zijn zelfs nauwer verwant met dieren dan met planten.

Zonder reducenten

Stel dat alle schimmels en bacteriën verdwijnen. Dode bladeren, takken en dieren zouden zich opstapelen, en alle mineralen en koolstof zaten erin vast. Na een tijd zouden de planten geen voeding meer vinden. Reducenten maken van een ecosysteem een kringloop.



Producenten, consumenten en reducenten vormen samen een kringloop van stoffen; het licht komt van buiten.



Schimmels en afvaleters aan het werk: van deze boomstam blijven over enkele jaren alleen mineralen en humus over.

ONTLEED · 28.4

Voedselketen en voedselweb

Een **voedselketen** toont wie wie eet. De pijl wijst altijd van **wat gegeten wordt** naar **wie eet**: in de richting waarin het voedsel, en dus de energie, gaat.

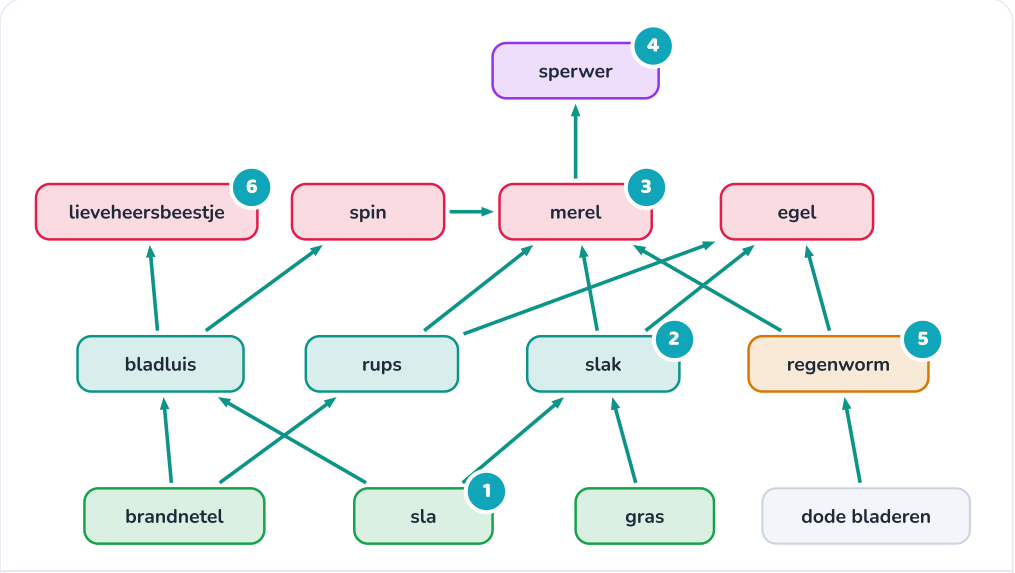
sla → slak → merel → sperwer

Een keten begint altijd bij een producent. Elke schakel is een **voedingsniveau**: producent, planteneter (consument van de eerste orde), vleeseter (consument van de tweede orde), enzovoort. Meer dan vier of vijf schakels zijn zeldzaam: waarom, zie je bij de energiepiramide.

In werkelijkheid eet een merel niet alleen slakken, maar ook rupsen, regenwormen en spinnen, en een slak eet sla én gras. Alle ketens samen, met hun vertakkingen, vormen een **voedselweb**. Hoe meer verbindingen, hoe stabieler het web: verdwijnt één prooi, dan eet een rover iets anders.

De pijl wijst naar wat opgegeten wordt

Veel mensen tekenen 'merel → slak', omdat de merel de slak eet. Maar de afspraak is omgekeerd: de pijl toont waar het voedsel *heen gaat*. 'slak → merel' betekent: de slak wordt voedsel voor de merel. Zo wijzen alle pijlen van het begin (de producenten) naar boven.



Een voedselweb in de tuin: groen de producenten, blauwgroen de planteneters, rood de vleeseters, paars de toprover.

1 Producent
Sla, gras en brandnetels maken hun voedsel met licht. Elke keten in het web begint bij hen.

2 Planteneter
De slak eet sla en gras: een consument van de eerste orde. Twee pijlen komen erin, twee gaan eruit.

3 Een knooppunt
De merel eet rupsen, slakken, regenwormen en spinnen, en in de herfst ook bessen: een alleseter. Verdwijnt één prooi, dan eet hij meer van de andere.

4 Toprover
De sperwer staat bovenaan: geen pijl vertrekt van hem. Toprovers zijn zeldzaam, omdat er bovenaan weinig energie overblijft.

5 Afvaleter
De regenworm eet dode bladeren. Wat hij niet verteert, breken schimmels en bacteriën verder af (niet getekend: ze horen bij elke soort).

6 Vleeseter
Het lieveheersbeestje en zijn larven eten bladluizen: tuinders zetten ze in als natuurlijke bestrijders.

UITGEWERKT VOORBEELD · 28.5

Wat als de lieveheersbeestjes verdwijnen?

5/17

Gebruik het voedselweb in de tuin. Een tuinier spuit tegen de bladluizen een gif dat ook alle lieveheersbeestjes doodt. Een paar weken later zijn er méér bladluizen dan ervoor. Hoe verklaar je dat? Wat gebeurt er met de andere soorten?

GEGEVEN

- het voedselweb in de tuin
- gif doodt bladluizen én lieveheersbeestjes

GEVRAAGD

- verklaring voor de extra bladluizen
- gevolgen voor andere soorten
- een beter alternatief

OPLOSSING

1 **Zoek de verbindingen van de verdwenen soort.** Lieveheersbeestjes eten bladluizen (pijl bladluis → lieveheersbeestje). Er zijn geen pijlen van het lieveheersbeestje naar een andere soort in dit web.

2 **Volg het effect naar onder.** Bladluizen planten zich enorm snel voort: een paar die het gif overleven, of die aanvliegen uit de buurt, hebben nu bijna geen vijand meer. Hun aantal stijgt snel, en ze zuigen meer aan de sla en de brandnetels.

3 **Volg het effect naar boven en opzij.** Spinnen hebben meer bladluizen te eten en kunnen toenemen; de merel, die spinnen eet, heeft er misschien iets meer voedsel bij. De sla lijdt het meest.

4 **Beter alternatief.** Tuinders in serres gebruiken **biologische bestrijding**: ze zetten natuurlijke vijanden uit, zoals lieveheersbeestjes, gaasvliegen of sluipwespen tegen bladluizen, en de sluipwesp *Encarsia* tegen witte vlieg.

ANTWOORD

Het gif doodt de rovers van de bladluizen. De overlevende bladluizen kunnen zich ongeremd vermeerderen, zodat hun aantal na enkele weken hoger is dan ervoor. Het web is uit evenwicht: een ingreep op één soort raakt ook andere.

Klopt dit? Kijk bij elke redenering of je de pijlen juist leest: een pijl ván A náár B betekent dat B van A leeft. Minder rovers betekent meer prooien, minder prooien betekent minder rovers.

UITLEG · 28.6

Energie stroomt, stoffen draaien rond

6/17

In een voedselketen wordt de energie doorgegeven, maar niet alles. Een slak die sla eet, gebruikt het grootste deel van de energie uit die sla om te leven: bewegen, warm blijven, ademen. Die energie wordt **warmte** en verdwijnt uit het ecosysteem. Een ander deel verlaat de slak onverteerd, als uitwerpselen. Maar een klein deel wordt nieuw slakkenweefsel, en alleen dat kan een merel eruit halen. Als vuistregel komt ongeveer **10 %** van de energie van een voedingsniveau terecht in het volgende (in werkelijkheid ergens tussen 5 en 20 %).

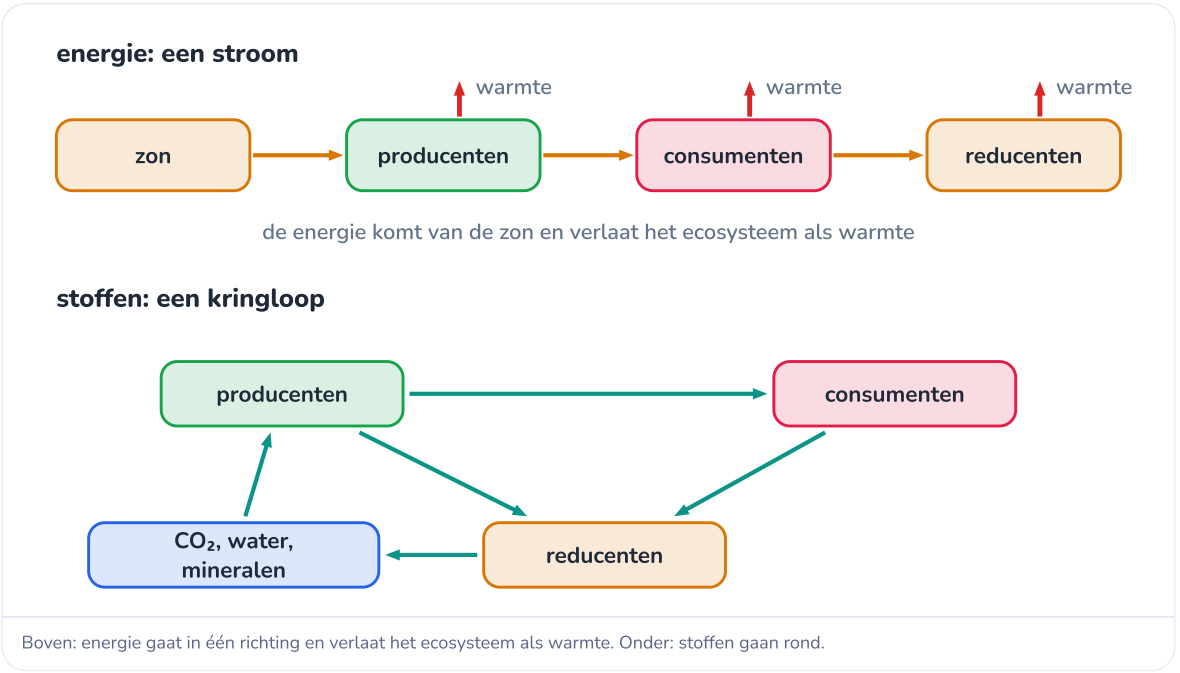
Dat verklaart waarom voedselketens kort zijn, en waarom er veel meer planten zijn dan planteneters, en veel meer planteneters dan rovers. Een **energiepiramide** toont het: elke laag bevat ongeveer tien keer minder energie dan de laag eronder.

Bij de **stoffen** is het helemaal anders. Koolstof, water, stikstof, fosfor: ze verlaten de aarde niet. Wat een plant opneemt, komt via dieren en reducenten weer vrij en wordt opnieuw opgenomen. Stoffen gaan in een **kringloop**, energie **stroomt** erdoor: van de zon naar warmte.

	energie	stoffen (koolstof, water, mineralen)
hoe beweegt het?	in één richting: stroom	rondgaand: kringloop
komt binnen als	zonlicht	blijft op aarde (op een heel klein beetje na)
verlaat het ecosysteem als	warmte	wordt hergebruikt door producenten
sleutelrol	producenten vangen het licht	reducenten maken de stoffen weer vrij
zonder zon	stopt alles	stapelen dode resten zich op zonder reducenten

In een ecosysteem wordt ook de energie gerecycleerd

Energie gaat niet verloren (hoofdstuk 15), maar ze wordt warmte, en uit warmte kan geen plant of dier nog voedsel maken. Daarom heeft elk ecosysteem een voortdurende toevoer van energie nodig: zonlicht. Alleen de stoffen worden hergebruikt.



Boven: energie gaat in één richting en verlaat het ecosysteem als warmte. Onder: stoffen gaan rond.



Vuistregel: bij elke stap in de voedselketen blijft ongeveer een tiende van de energie over.

UITGEWERKT VOORBEELD · 28.7

Rekenen met de energiepiramide

7/17

(a) De planten in een weiland leggen op een jaar 5 000 000 kJ vast in hun weefsel. Hoeveel energie komt terecht in de planteneters (konijnen), en hoeveel in de vossen die de konijnen eten? (b) Een mens heeft ongeveer 10 000 kJ per dag nodig (hoofdstuk 29). Hoeveel plantaardige energie is daarvoor nodig als hij alleen planten eet, en als hij alleen vlees eet van dieren die planten aten? Gebruik de vuistregel van 10 %.

GEGEVEN

- planten: $5\,000\,000\,\text{kJ}$ per jaar
- vuistregel: 10 % naar het volgende niveau
- een mens: $10\,000\,\text{kJ}$ per dag

GEVRAAGD

- (a) energie in konijnen en in vossen
- (b) plantaardige energie voor een mens

OPLOSSING

1. (a) Konijnen: 10 % van $5\,000\,000\,\text{kJ}$ is $0{,}10 \times 5\,000\,000 = 500\,000\,\text{kJ}$.
2. Vossen: 10 % daarvan: $0{,}10 \times 500\,000 = 50\,000\,\text{kJ}$. Dat is maar 1 % van de energie van de planten.
3. (b) Eet de mens rechtstreeks planten, dan is hij zelf de planteneter: hij heeft $10\,000\,\text{kJ}$ aan voedsel nodig. (Ook hij haalt er geen 100 % uit, maar dat telt voor beide gevallen.)
4. Eet hij vlees, dan zit er een stap tussen: het dier gaf maar 10 % door. Er was dus $10\,000 : 0{,}10 = 100\,000\,\text{kJ}$ aan planten nodig, tien keer meer.

ANTWOORD

(a) Konijnen $500\,000\,\text{kJ}$, vossen $50\,000\,\text{kJ}$ per jaar. (b) Rechtstreeks $10\,000\,\text{kJ}$ aan planten, via vlees ongeveer $100\,000\,\text{kJ}$.

Klopt dit? Daarom zijn er in een weiland veel meer konijnen dan vossen. En daarom heb je voor een vleesrijk dieet veel meer landbouwgrond nodig dan voor een plantaardig. De 10 %-is een vuistregel: voor kippen ligt het iets hoger, voor runderen lager.

UITLEG · 28.8

De waterkringloop

8/17

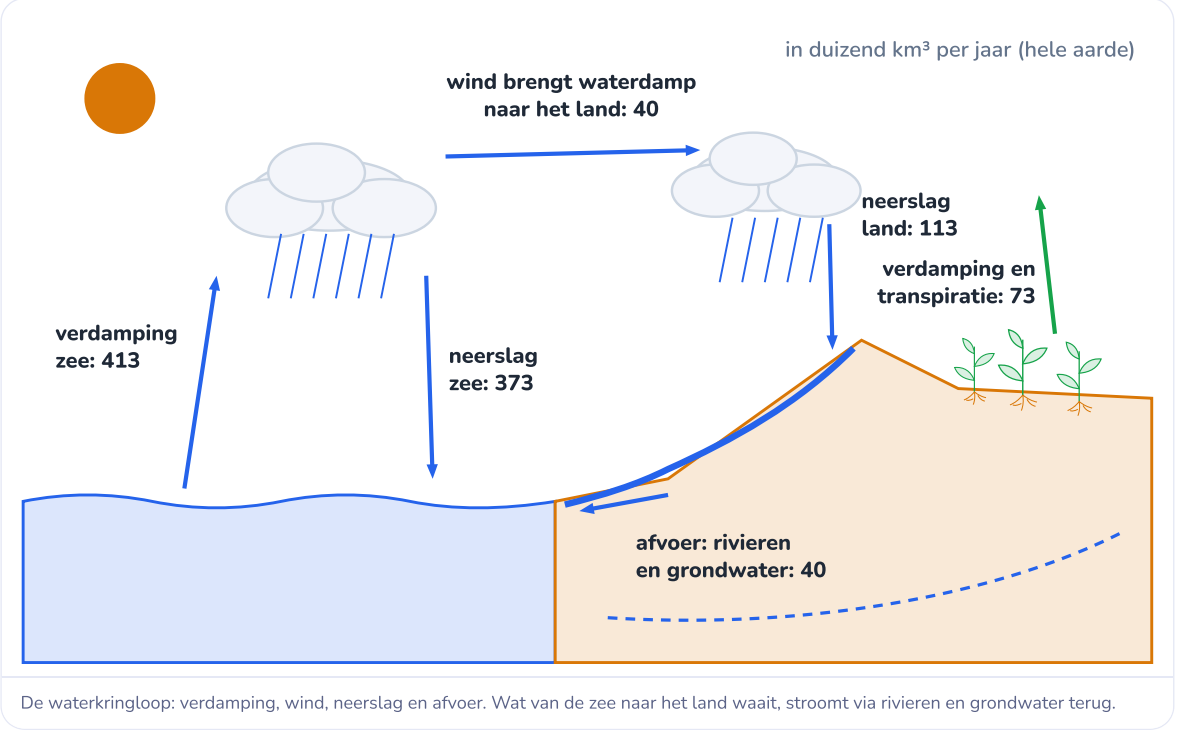
De zon verwarmt de oceanen, en water **verdampt** (hoofdstuk 6). De waterdamp stijgt, koelt af en **condenseert** tot druppeltjes: wolken. Die vallen als **neerslag** (regen, sneeuw, hagel) terug. Het grootste deel valt weer in zee. Een deel waait eerst naar het land. Daar zakt het water in de bodem (**grondwater**), wordt het door planten opgenomen en weer **verdampt** (transpiratie, hoofdstuk 27), of stroomt het via beken en rivieren terug naar zee.

De getallen op de figuur zijn schattingen voor de hele aarde, in duizend kubieke kilometer per jaar. Ze tonen dat de kringloop sluit: van zee naar land waait er per jaar 40 000 km³ waterdamp, en via de rivieren en het grondwater stroomt er precies evenveel terug.

De waterkringloop is ook een zuiveringsinstallatie: bij het verdampen blijven zout en vuil achter, zoals bij het destilleren (hoofdstuk 9). Regen is dus 'gedestilleerd' zeewater. En de verdamping door planten is op land een van de grootste bronnen van waterdamp: een bos 'maakt' een deel van zijn eigen regen.

Een kleine waterkringloop in de meetkas

In de meetkas zie je dezelfde kringloop in het klein: de planten verdampen water, dat 's nachts condenseert op de koude wanden (hoofdstuk 6) en naar beneden druppelt. Maar de meetkas is niet dicht: het meeste water ontsnapt door kieren en het dakraam, en daarom moet het reservoir elke dag 1,8 L leveren.



De waterkringloop: verdamping, wind, neerslag en afvoer. Wat van de zee naar het land waait, stroomt via rivieren en grondwater terug.

UITLEG · 28.9

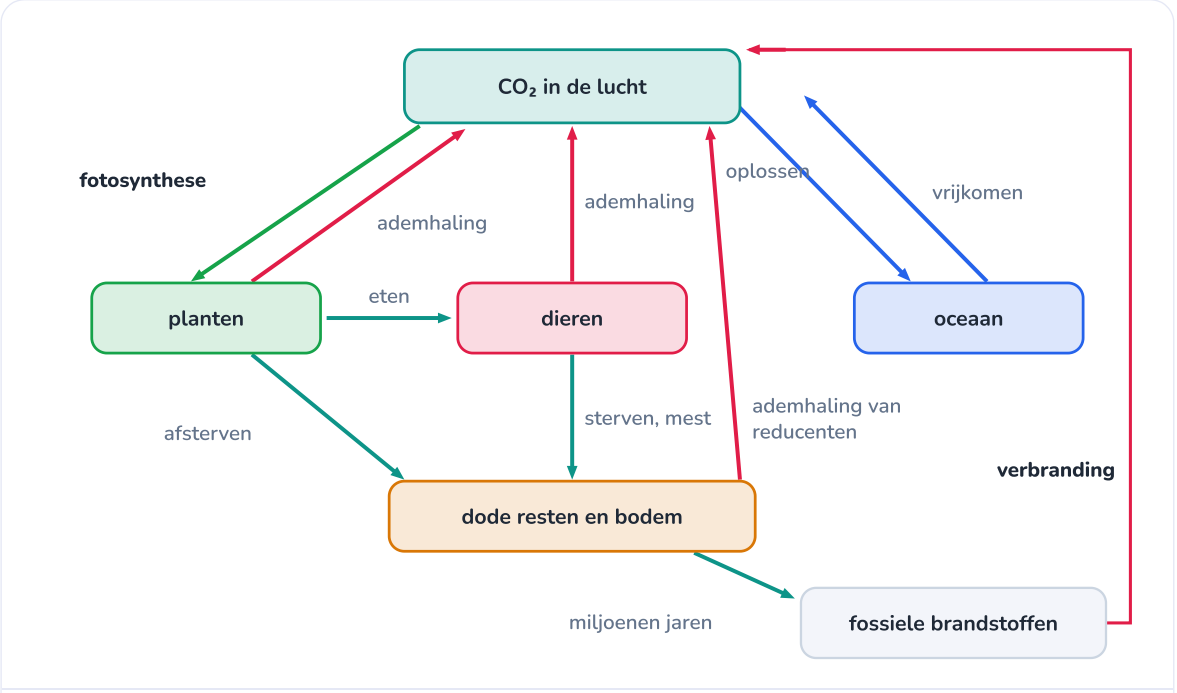
De koolstofkringloop

9/17

Koolstof is het element van het leven: ongeveer 18 % van je lichaam en de helft van droog hout. Het gaat rond tussen lucht, organismen, bodem en oceaan:

- Planten halen koolstofdioxide uit de lucht en maken er suiker van: **fotosynthese**.
- Dieren eten planten en elkaar: de koolstof gaat mee in de voedselketen.
- Planten, dieren en reducenten **ademen**: ze geven koolstofdioxide terug aan de lucht.
- Dode resten komen in de bodem, waar reducenten ze afbreken. Een deel blijft lang in de bodem als humus.
- Onder bijzondere omstandigheden (zonder zuurstof, onder druk) werden dode planten en plankton in miljoenen jaren **fossiele brandstoffen**: steenkool, aardolie, aardgas.
- Koolstofdioxide lost op in de oceaan en komt er weer uit.

Lange tijd was de kringloop ongeveer in evenwicht: wat de planten opnamen, kwam door ademhaling en rotting terug. Sinds de industriële revolutie halen mensen koolstof die miljoenen jaren onder de grond zat naar boven en **verbranden** ze: tegenwoordig ongeveer 37 miljard ton koolstofdioxide per jaar. Ongeveer de helft daarvan nemen de oceanen en de planten op, de rest blijft in de lucht. Daardoor stijgt het gehalte, zoals de metingen op het volgende blad tonen, en versterkt het broeikaseffect (hoofdstuk 16 en 17).



De koolstofkringloop: fotosynthese haalt koolstof uit de lucht, ademhaling en verbranding brengen ze terug.

PROEF · 28.10

Koolstofdioxide in en uit: waterpest in licht en donker

10/17

ONDERZOEKSVRAAG

Neemt een waterplant koolstofdioxide op of geeft ze die af? En hangt dat af van het licht?

MATERIAAL

drie proefbuizen met stop, een bekerglas met kraantjeswater · broomthymolblauw (een indicator: blauw bij weinig opgeloste CO_2, geel bij veel) · een rietje, twee even grote takjes waterpest, aluminiumfolie · een ledlamp of een lichte vensterbank

Veiligheid

Alleen blazen, nooit zuigen door het rietje. Bril op; de indicator vlekt.



Blauw, geel, geelgroen: de plant in het licht haalt CO_2 uit het water, de plant in het donker voegt er toe.

WERKWIJZE

1. Doe enkele druppels broomthymolblauw in het water: het wordt blauw. Blaas er met het rietje rustig lucht in tot de kleur geelgroen is: je hebt koolstofdioxide in het water gebracht.
2. Vul drie proefbuizen met dat water. Buis A: een takje waterpest. Buis B: een takje waterpest, en de buis helemaal in folie gewikkeld. Buis C: geen plant (controle).
3. Sluit de buizen en zet ze 2 à 3 uur naast elkaar in het licht, op dezelfde temperatuur (niet vlak bij een warme lamp).
4. Haal de folie weg en vergelijk de kleuren.

WAARNEMING

Buis A (plant in het licht) is weer **blauw**. Buis B (plant in het donker) is **geler** geworden. Buis C (zonder plant) is nog altijd **geelgroen**.

VERKLARING

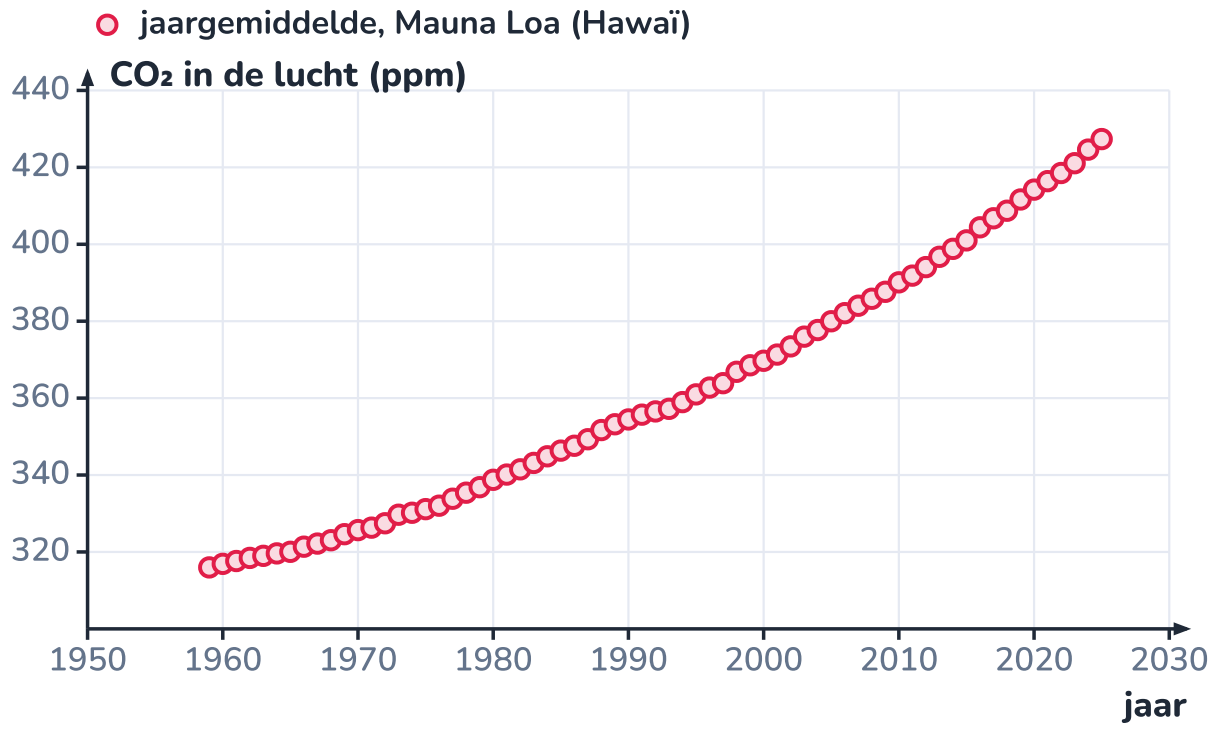
Opgeloste koolstofdioxide maakt water een beetje zuur, en broomthymolblauw kleurt dan geel. In het licht doet de waterpest meer fotosynthese dan ademhaling: ze haalt koolstofdioxide uit het water en de indicator wordt blauw. In het donker gaat alleen de ademhaling door: er komt koolstofdioxide bij, de indicator wordt geler. Buis C toont dat de verandering door de plant komt, en niet door het licht of de tijd. Zo zie je beide richtingen van de koolstofkringloop in één proef: opname door fotosynthese, afgifte door ademhaling.

UITGEWERKT VOORBEELD · 28.11

De aarde ademt: de Keelingcurve lezen

11/17

Sinds 1958 meet men op de vulkaan Mauna Loa (Hawaï), ver van steden en fabrieken, de koolstofdioxide in de lucht. De Amerikaanse onderzoeker **Charles David Keeling** begon ermee. De grafieken tonen de jaargemiddelden sinds 1959 en de maandgemiddelden van de laatste jaren (gegevens: NOAA). (a) Hoeveel steeg het gehalte van 1959 tot 2025? (b) Hoe snel steeg het per jaar in de jaren 1960 en tussen 2015 en 2025? (c) Waarom gaat het elk jaar eerst omhoog en dan omlaag?



Jaargemiddelden op Mauna Loa: elk jaar hoger, en steeds sneller.

GEGEVEN

- 1959: 315,98 ppm; 1960: 316,91 ppm; 1970: 325,68 ppm
- 2015: 401,01 ppm; 2025: 427,35 ppm
- maandgemiddelden 2025: hoogste in mei (430,51), laagste in september (424,37)

GEVRAAGD

- (a) stijging sinds 1959
- (b) stijging per jaar, toen en nu
- (c) verklaring van de schommeling

OPLOSSING

1 (a) $427{,}35 - 315{,}98 = 111{,}37\ \text{ppm}$, een stijging van $111{,}37 : 315{,}98 \approx 35\ \%$.

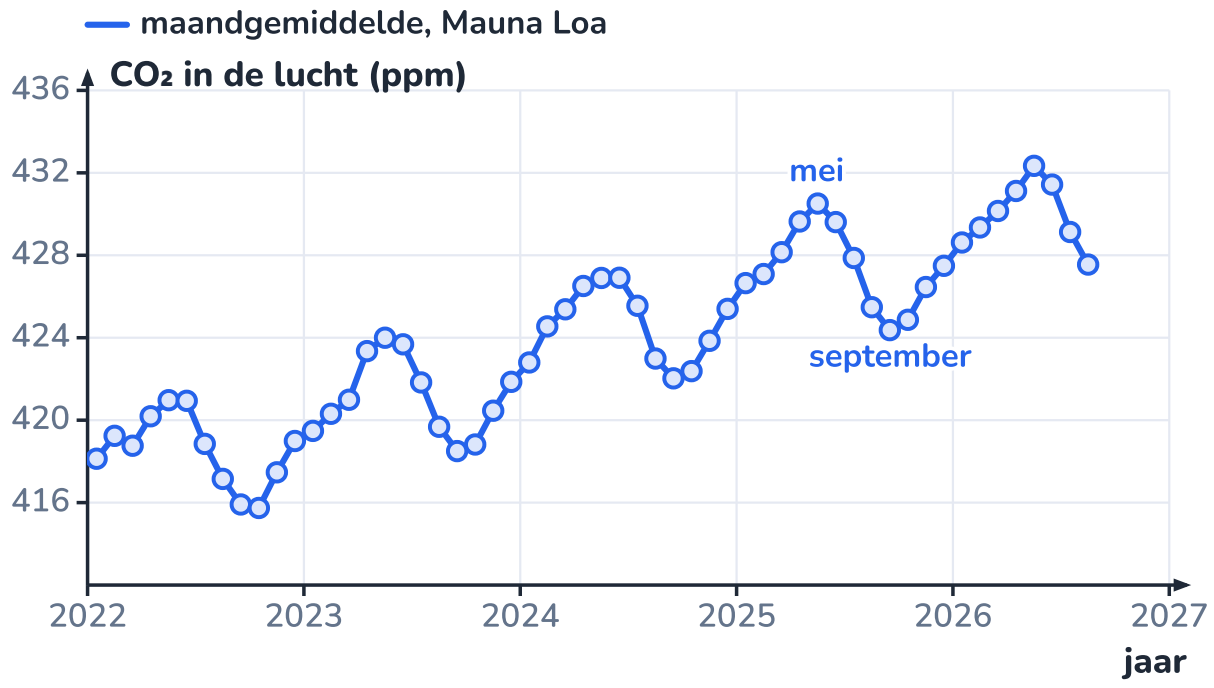
2 (b) 1960-1970: $(325{,}68 - 316{,}91) : 10 \approx 0{,}9\ \text{ppm}$ per jaar. 2015-2025: $(427{,}35 - 401{,}01) : 10 \approx 2{,}6\ \text{ppm}$ per jaar: bijna drie keer zo snel.

3 (c) In 2025 ligt het maximum in mei en het minimum in september, $6{,}1\ \text{ppm}$ lager. Het grootste deel van het land, en dus van de bossen en velden, ligt op het noordelijk halfrond. In de lente en de zomer groeien ze: de fotosynthese haalt meer koolstofdioxide uit de lucht dan de ademhaling teruggeeft. In de herfst en de winter vallen de bladeren, groeien de planten niet, en breken reducenten dode resten af: het gehalte stijgt weer.

ANTWOORD

(a) Meer dan 111 ppm, ongeveer een derde meer. (b) Van ongeveer 0,9 naar 2,6 ppm per jaar. (c) De planten van het noordelijk halfrond 'ademen in' in de zomer en 'ademen uit' in de winter.

Klopt dit? De stijgende trend komt van de verbranding van fossiele brandstoffen, de schommeling van de seizoenen. Ter vergelijking: vóór de industriële revolutie was het ongeveer 280 ppm, en in de meetkas rekenen we met 425 ppm (hoofdstuk 14 van Intermediate).



Per maand: elk jaar een maximum in mei en een minimum in september of oktober, bovenop de stijgende trend.

VERHAAL · 28.12

Biosphere 2: acht mensen onder glas

12/17

Op 26 september 1991 stapten acht mensen, vier vrouwen en vier mannen, een reusachtig bouwwerk van staal en glas binnen in de woestijn van Arizona, bij het stadje Oracle. **Biosphere 2** (de aarde zelf is 'Biosphere 1') besloeg 1,27 hectare en bevatte een regenwoud, een oceaan met een koraalrif, een mangrove, een savanne, een woestijn, een landbouwgebied en een woonst. De deuren gingen dicht voor twee jaar. Alle lucht, al het water en bijna al het voedsel moesten binnen rondgaan; alleen zonlicht en elektriciteit kwamen van buiten.

Het liep anders dan gepland. Het **zuurstofgehalte** daalde, maand na maand, van 20,9 % tot ongeveer 14,5 % na zestien maanden. De bewoners werden moe, sliepen slecht en konden moeilijk denken, zoals op een hoge berg. In januari 1993 werd er van buiten zuivere zuurstof bijgepompt. De **landbouw** leverde

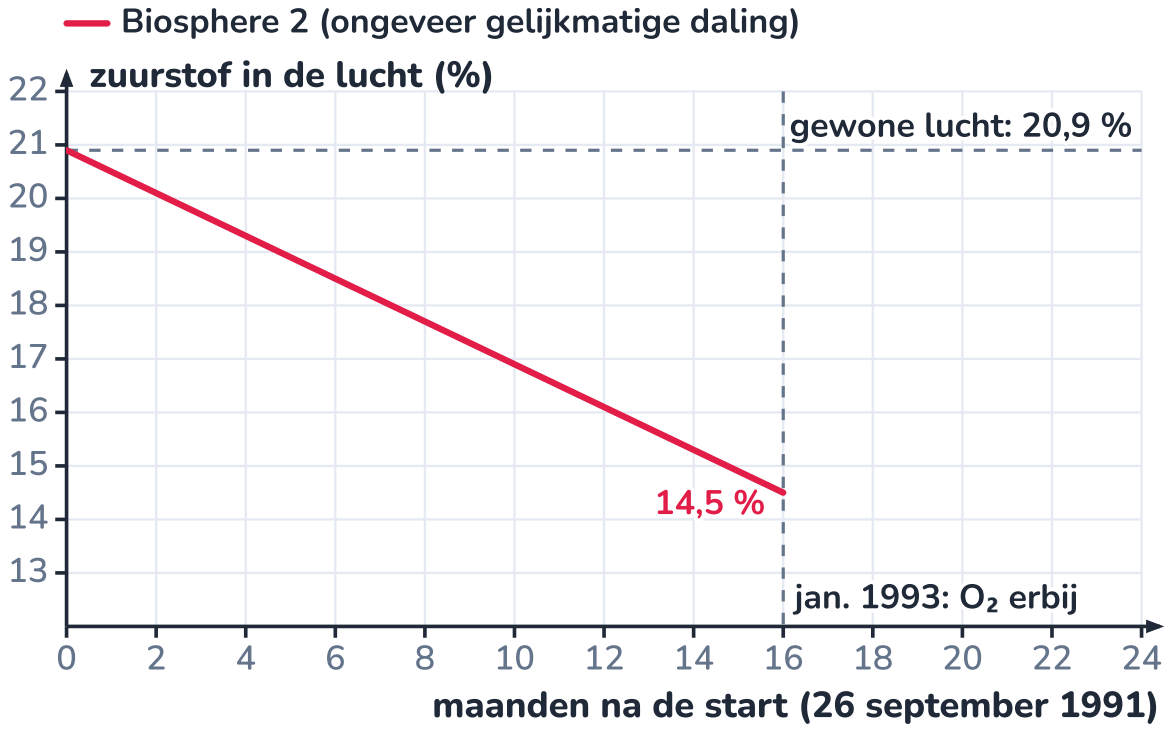
ongeveer 83 % van het voedsel: de bewoners hadden constant honger en verloren gemiddeld 16 % van hun gewicht. De meeste bestuivende insecten stierven, terwijl kakkerlakken en mieren zich enorm vermenigvuldigden.

Waar was de zuurstof naartoe? De bodem was rijk gemaakt met veel compost. De bacteriën en schimmels daarin braken die af en **ademden** daarbij veel meer zuurstof in dan de nog jonge planten konden maken. Normaal zou je dan evenveel extra koolstofdioxide zien. Maar die was er niet. De onderzoekers vonden ze uiteindelijk terug in het **beton** van het gebouw: de koolstofdioxide had gereageerd met de kalk in het beton, en zat daar vast, samen met de zuurstof die erin gebonden was.

Op 26 september 1993 kwamen de acht naar buiten. Biosphere 2 werd een onderzoekscentrum; sinds 2011 is het van de University of Arizona.

Wat Biosphere 2 ons leerde

Een gesloten ecosysteem is niet alleen een kwestie van genoeg planten. De **reducenten** moeten in evenwicht zijn met de producenten, er kunnen onverwachte 'lekken' zijn (zoals het beton), en in een klein systeem slaan veranderingen veel sneller uit dan op aarde. In hoofdstuk 32 van Expert simuleer je zo'n systeem met een computer.



Het zuurstofgehalte daalde ongeveer 0,4 procentpunt per maand, tot er in januari 1993 zuurstof bijgevoegd werd.

UITLEG · 28.13

Gesloten ecosystemen, van fles tot ruimtestation

13/17

Een **gesloten ecosysteem** wisselt geen stoffen uit met de buitenwereld, alleen energie. Om dat vol te houden, moeten alle kringlopen sluiten: wat de ene soort afgeeft, moet een andere opnemen, in dezelfde hoeveelheid en ongeveer op hetzelfde moment. Hoe meer mensen erin leven, hoe moeilijker: een mens verbruikt per dag ongeveer 0,84 kg zuurstof (hoofdstuk 29), en daarvoor zijn vele vierkante meters planten of algen nodig.

systeem	wanneer, waar	wie leeft erin	wat gaat rond	wat komt van buiten
flessentuin van Latimer	sinds 1960, Engeland	een plant, bodemdiertjes, schimmels, bacteriën	water, koolstof, zuurstof, mineralen	alleen licht (en warmte gaat eruit)
Biosphere 2	1991-1993, Arizona (VS)	8 mensen, duizenden soorten planten en dieren	lucht, water, voedsel (83 %)	licht, elektriciteit, later zuurstof
BIOS-3	1972-1984, Krasnojarsk (Sovjet-Unie)	tot 3 mensen, tot 180 dagen	lucht (algen), een groot deel van het water, een deel van het voedsel	licht, elektriciteit, de rest van het voedsel
ISS	sinds 2000, rond de aarde	meestal 6 à 7 astronauten	98 % van het water; zuurstof uit water gesplitst met elektriciteit	voedsel, een deel van het water, reserveonderdelen (vrachtschepen)
MELiSSA	sinds 1989, Europa (ESA)	bacteriën, algen, planten; in de proefinstallatie ratten	het doel: alles	licht en elektriciteit

Het ISS is dus **geen** gesloten ecosysteem: het is een technisch systeem. Zuurstof maakt het door water met elektriciteit te splitsen, koolstofdioxide filtert het uit de lucht, en voedsel komt met vrachtschepen. Het Europese project **MELiSSA** werkt sinds 1989 aan een echt biologische kringloop voor lange ruimtereizen, met bacteriën die afval afbreken, algen (spirulina) die zuurstof maken en planten voor voedsel. Belgische onderzoekers spelen er een grote rol in: het Studiecentrum voor Kernenergie SCK CEN en VITO in Mol, en de universiteiten van Gent en Bergen.



Biosphere 2 in Arizona: een regenwoud, een oceaan en een boerderij onder 1,27 hectare glas.

De mens als deel van het ecosysteem

Mensen zijn consumenten, en wel alleseters: we eten planten, dieren en schimmels. Maar we doen veel meer dan eten. We veranderen hele kringlopen:

- We halen koolstof uit de grond en verbranden ze (de **koolstofkringloop**).
- We maken bossen en graslanden tot akkers, wegen en steden.
- We strooien kunstmest: de **stikstof** en de **fosfor** die niet in de gewassen terechtkomen, spoelen naar sloten en de zee, waar algen explosief groeien.
- We pompen grondwater op en leiden rivieren om (de **waterkringloop**).

Tegelijk hangen we volledig af van ecosystemen. Ze leveren voedsel, zuiver water, hout, vezels, en diensten die we vaak niet zien: meer dan 75 % van de belangrijkste voedselgewassen heeft baat bij **bestuiving** door dieren (vooral bijen, hommels, zweefvliegen), bodemleven houdt akkers vruchtbaar, en wetlands houden overstromingen tegen.

Als het Amazonewoud verdwijnt, stikken we

Het Amazonewoud maakt veel zuurstof, maar de dieren, schimmels en bacteriën van datzelfde woud verbruiken er bijna evenveel: netto levert het nauwelijks zuurstof. De lucht bevat bovendien zo veel zuurstof (ongeveer 1,2 miljoen miljard ton) dat zelfs het verbranden van alle bossen en alle planten op aarde het gehalte maar van 20,95 % naar ongeveer 20,92 % zou doen zakken. Het verdwijnen van regenwoud is wel een ramp, maar om andere redenen: het stoot enorm veel koolstofdioxide uit, en ontelbare soorten verliezen hun leefgebied.

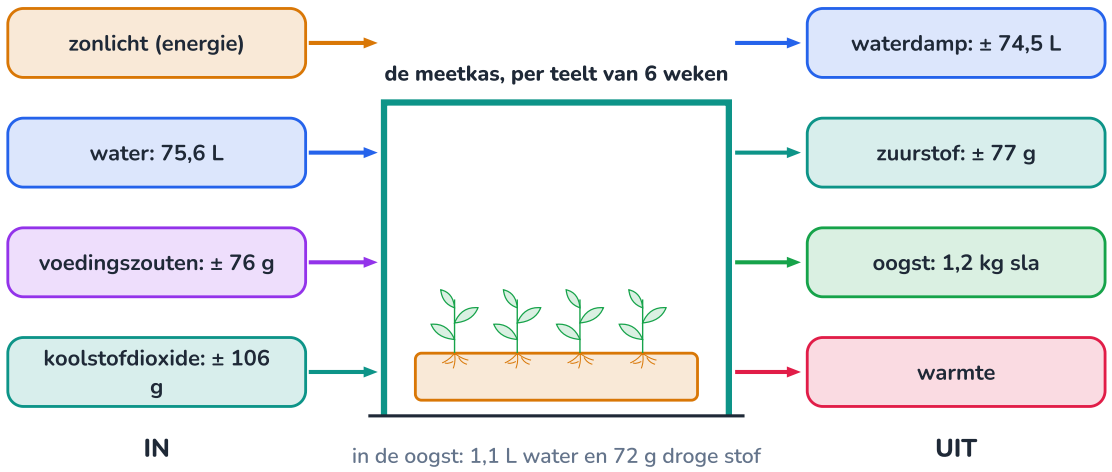


Zonder bestuivers geen appels: een dienst van het ecosysteem waarvoor niemand een factuur krijgt.

UITGEWERKT VOORBEELD · 28.15

Habitat: de meetkas als klein ecosysteem

Maak de balans op van de meetkas voor één teelt pluksla van zes weken (hoofdstuk 27). Wat gaat erin, wat komt eruit, en wat blijft in de sla? Is de meetkas een gesloten ecosysteem?



De balans van de meetkas voor één teelt: bijna al het water verdampt, en de koolstof van de sla komt uit de lucht.

GEGEVEN

- water: $1{,}8\,\mathrm{L}$ per dag, voedingsoplossing $1{,}0\,\mathrm{g/L}$ (hoofdstuk 8)
- oogst: $1{,}2\,\mathrm{kg}$ sla, 94 % water, droge stof voor 40 % koolstof
- kaslucht: $576\,\mathrm{L}$ met 425 ppm koolstofdioxide (0,45 g)
- 1 g koolstof zit in 3,67 g koolstofdioxide; per g opgenomen CO_2 komt 0,73 g zuurstof vrij

GEVRAAGD

- de stromen in en uit per teelt
- de rol van de kaslucht
- gesloten of niet?

OPLOSSING

1. **Water.** In: $1{,}8 \times 42 = 75{,}6\,\mathrm{L}$. In de oogst: $0{,}94 \times 1{,}2 = 1{,}1\,\mathrm{L}$. Uit als waterdamp: $75{,}6 - 1{,}1 \approx 74{,}5\,\mathrm{L}$, door kieren en het dakraam.
2. **Voedingszouten.** Met het water komen $75{,}6 \times 1{,}0 \approx 76\,\mathrm{g}$ zouten binnen. Wat de planten niet opnemen, blijft in de potgrond achter.
3. **Koolstofdioxide.** Droge stof: $1{,}2\,\mathrm{kg} - 1{,}1\,\mathrm{kg} = 0{,}072\,\mathrm{kg} = 72\,\mathrm{g}$, waarvan 40 % koolstof: $29\,\mathrm{g}$. Die kwam uit $29 \times 3{,}67 \approx 106\,\mathrm{g}$ koolstofdioxide.
4. **Zuurstof.** $106 \times 0{,}73 \approx 77\,\mathrm{g}$ zuurstof ging de kas uit.
5. **De kaslucht** bevat maar 0,45 g koolstofdioxide, terwijl de planten gemiddeld $106 : 42 = 2{,}5\,\mathrm{g}$ per dag opnemen. Zonder verse lucht zou de CO_2 in een zonnige ochtend in ongeveer een uur tot de groeigrens zakken (zoals in de kweekruimte van hoofdstuk 14 van Intermediate). De kieren en het dakraam zijn dus nodig.
6. **Energie.** Zonlicht gaat erin, bijna alles komt eruit als warmte. Een klein deel zit in de sla als chemische energie.

ANTWOORD

In: licht, 75,6 L water, ±76 g voedingszouten en ±106 g koolstofdioxide. Uit: ±74,5 L waterdamp, ±77 g zuurstof, warmte en 1,2 kg sla. De meetkas is geen gesloten ecosysteem: de oogst verlaat de kas, er zijn bijna geen reducenten die resten afbreken, en water, voeding en lucht komen van buiten.

Klopt dit? Massabalans van de sla: 1,1 kg water + 72 g droge stof = 1,2 kg. De droge stof is gebouwd uit koolstofdioxide (±106 g) en water, min de zuurstof die vrijkwam (±77 g), plus een paar gram mineralen: 106 − 77 = 29 g koolstof, de rest waterstof en zuurstof uit water en een beetje mineralen.

NASLAG · 28.16

Overzicht: ecosystemen en kringlopen

16/17

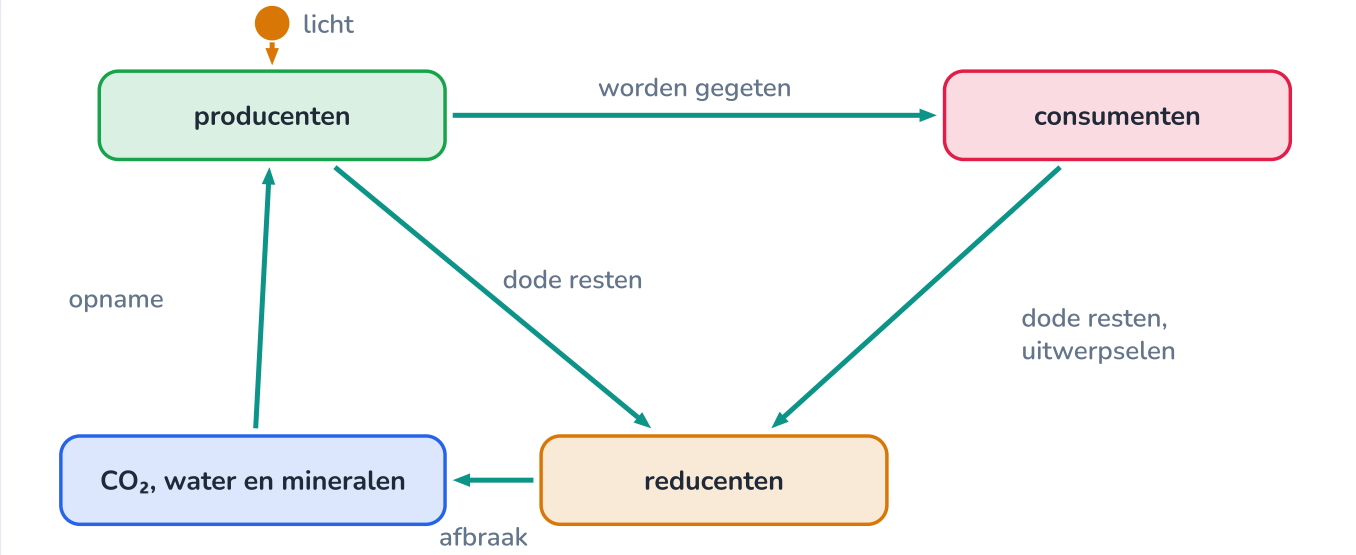
De rollen, de afspraken over pijlen, de vuistregel voor energie en de kringlopen op één blad.

rol	wat doet het?	voorbeelden
producent	maakt voedsel met licht	planten, algen
planteneter	eet producenten	bladluis, slak, konijn
vleeseter	eet dieren	lieveheersbeestje, spin, sperwer
alleseter	eet planten en dieren	merel, egel, mens
afvaleter	eet en verkruimelt dode resten	regenworm, pissebed
reducent	breekt dode resten af tot CO_2, water en mineralen	schimmels, bacteriën

afspraken en vuistregels
De pijl in een voedselketen wijst van wat gegeten wordt naar wie eet.
Elke keten begint bij een producent.
Van een voedingsniveau naar het volgende gaat ongeveer 10 % van de energie (5 tot 20 %).
Energie stroomt (van zonlicht naar warmte); stoffen gaan in een kringloop.

kringloop	processen
water	verdamping, transpiratie, condensatie, neerslag, infiltratie (grondwater), afvoer (rivieren)
koolstof	fotosynthese, voedselketen, ademhaling, afsterven, afbraak door reducenten, fossilisatie, verbranding, oplossen in de oceaan

	energie	stoffen (koolstof, water, mineralen)
hoe beweegt het?	in één richting: stroom	rondgaand: kringloop
komt binnen als	zonlicht	blijft op aarde (op een heel klein beetje na)
verlaat het ecosysteem als	warmte	wordt hergebruikt door producenten
sleutelrol	producenten vangen het licht	reducenten maken de stoffen weer vrij
zonder zon	stopt alles	stapelen dode resten zich op zonder reducenten



Producenten, consumenten en reducenten: de kringloop van stoffen.

HET GEHEEL · 28.17

Waar ecosystemen terugkomen

17/17

Dit hoofdstuk brengt samen wat je over planten en cellen leerde: de fotosynthese van de producenten drijft elk ecosysteem aan, de ademhaling van alle organismen sluit de koolstofkringloop, en eencellige reducenten maken er een kringloop van. De waterkringloop is het deeltjesmodel op wereldschaal (leerlijn **Materie**), de energiepiramide een toepassing van rendement (leerlijn **Energie**), en de Keelingcurve een lesje data lezen (leerlijn **Onderzoeken en meten**). In Expert maak je van voedselwebben en gesloten systemen wiskundige modellen.

F6 Het deeltjesmodel
Verdampen en condenseren: de motor van de waterkringloop.

F9 Mengsels scheiden
De natuur destilleert zeewater tot regen; regenwater opvangen voor de kas.

F15 Energie: vormen en omzettingen
Energie gaat niet verloren, maar wordt warmte: rendement in een voedselketen.

F17 Energie uit zon, wind en water
Fossiele brandstoffen, koolstofdioxide en het klimaat.

F27 Planten: fotosynthese en groei
De producenten en hun fotosynthese; de groeiproef in de meetkas.

F29 Het lichaam als systeem
De mens als consument: hoeveel zuurstof, water en voedsel één bewoner nodig heeft.

I14 Reacties en stoichiometrie
Hoeveel CO_2 een teelt opneemt, en waar die vandaan komt.

I35 Micro-organismen en biotechnologie
Reducenten aan het werk: een compostvat dat afval omzet in voeding.

I36 Hydroponie en voedselproductie
Aquaponie: vissen en planten in één kringloop, met de stikstofkringloop.

E31 Bioprocestechniek
Een algenreactor die CO_2 omzet in zuurstof, zoals in MELiSSA.

E32 Ecologische modellen
Prooi en predator, draagkracht en wat Biosphere 2 leerde, gesimuleerd.

Habitat
De meetkas is een klein, open ecosysteem: jij levert water en voeding, de lucht komt door de kieren, de oogst gaat eruit. Het station van Habitat moet steeds meer kringlopen zelf sluiten: water terugwinnen, afval composteren (Intermediate) en ooit zuurstof maken met algen (Expert). In opdracht 28.12 maak je de balans voor je eigen teelt, en in 28.14 reken je uit hoeveel meetkassen één bewoner zou nodig hebben.

SAMENVATTING

In het kort

- Een ecosysteem is een levensgemeenschap samen met haar niet-levende omgeving; organismen worden beïnvloed door biotische en abiotische factoren.
- Producenten maken voedsel met licht, consumenten eten andere organismen, reducenten (schimmels en bacteriën) breken dode resten af tot CO_2, water en mineralen.
- In een voedselketen wijst de pijl van wat gegeten wordt naar wie eet; alle ketens samen vormen een voedselweb.
- Energie stroomt in één richting, van zonlicht naar warmte; per voedingsniveau blijft ongeveer 10 % over. Stoffen gaan in een kringloop.
- Waterkringloop: verdamping en transpiratie, condensatie, neerslag, afvoer. Koolstofkringloop: fotosynthese, voedselketen, ademhaling, afbraak, verbranding.
- De koolstofdioxide in de lucht stijgt (van 316 ppm in 1959 naar 427 ppm in 2025) en schommelt met de seizoenen door de planten van het noordelijk halfrond.
- Een gesloten ecosysteem wisselt alleen energie uit; Biosphere 2 toonde hoe moeilijk dat is met mensen erin.
- De mens is een consument die kringlopen verandert, en die volledig afhangt van wat ecosystemen leveren.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

ecosysteem
Alle organismen in een gebied samen met hun niet-levende omgeving (water, bodem, lucht, licht, temperatuur).

populatie
Alle organismen van dezelfde soort in hetzelfde gebied.

levensgemeenschap
Alle populaties van verschillende soorten die samen in een gebied leven.

biotische factor
Een invloed van levende wezens: voedsel, rovers, concurrenten, ziekteverwekkers.

abiotische factor
Een invloed van de niet-levende omgeving: licht, temperatuur, water, bodem, lucht.

producent
Organisme dat zelf zijn voedsel maakt met licht (fotosynthese): planten, algen, sommige bacteriën.

consument
Organisme dat andere organismen eet: planteneters, vleeseters en alleseters.

reducent
Schimmel of bacterie die dode resten afbreekt tot koolstofdioxide, water en mineralen.

voedselketen
Een rij organismen waarin elk het vorige eet; de pijl wijst van wat gegeten wordt naar wie eet.

voedselweb
Alle voedselketens van een ecosysteem samen, met hun vertakkingen.

energiepiramide
Voorstelling van hoeveel energie elk voedingsniveau bevat; bij elke stap blijft ongeveer 10 % over.

kringloop
Een stof die steeds opnieuw gebruikt wordt: van de omgeving naar organismen en weer terug.

gesloten ecosysteem
Een ecosysteem dat geen stoffen uitwisselt met de buitenwereld, alleen energie (licht erin, warmte eruit).

HANDBOEK · HOOFDSTUK 29

Het lichaam als systeem

Hoe longen, hart en bloed je in leven houden, en wat een bewoner van het station nodig heeft

Je lichaam is een systeem: er gaan lucht, water en voedsel in, er komen koolstofdioxide, waterdamp, afval en warmte uit, en daartussen werken organen samen om elke cel te voorzien. In dit hoofdstuk volg je de zuurstof van je neus tot in je spieren, meet je je **hartslag** in rust en na inspanning, reken je met de **energie** op een voedingsetiket, en ontdek je dat je lichaamstemperatuur net zo geregeld wordt als de meetkas. Aan het eind weet je wat één bewoner van het station elke dag nodig heeft om te overleven.

6× uitleg · 6× uitgewerkt voorbeeld · 2× proef · 2× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

B Leven en systemen · O Onderzoeken en meten · E Energie



Twee vingers op de pols en een klok met secondewijzer: meer heb je niet nodig om je hart te meten.

Na dit hoofdstuk

- Je kan het lichaam beschrijven als een systeem van organen met input, proces en output.
- Je kan de weg van de lucht beschrijven en de gaswisseling in de longblaasjes uitleggen met diffusie.
- Je kan de dubbele bloedsomloop uitleggen, de delen van het hart benoemen en slagaders, aders en haarvaten onderscheiden.
- Je kan je hartslag meten, de resultaten in een grafiek zetten en rust, inspanning en herstel vergelijken.
- Je kan de energie van voeding berekenen met een voedingsetiket, in kJ en kcal, en vergelijken met wat je verbruikt.
- Je kan de regeling van je lichaamstemperatuur beschrijven als een gesloten regelkring met sensoren, regelaar en actuatoren.
- Je kan berekenen hoeveel zuurstof, water en voedsel een mens per dag nodig heeft, en wat dat betekent voor een station.

VERHAAL · 29.1

Een half jaar in een blikken doos

1/19

Eind mei 2009 vertrok de Belgische astronaut **Frank De Winne** voor de tweede keer naar de ruimte, voor een verblijf van ongeveer een half jaar in het Internationaal Ruimtestation (ISS). Op 11 oktober 2009 werd hij er commandant, als eerste Europeaan ooit.

Zo'n half jaar is een lange proef op het menselijk lichaam. Buiten het station is geen lucht, geen water en geen voedsel: alles wat de bemanning nodig heeft, moet aan boord zijn of gemaakt worden. Het ISS maakt zuurstof door water met elektriciteit te splitsen, filtert de uitgeademde koolstofdioxide uit de lucht, en wint vandaag 98 % van zijn water terug, ook uit zweet en urine. Voedsel komt met vrachtschepen.

Het lichaam zelf verandert ook. Zonder zwaartekracht verliezen astronauten spiermassa, en als ze niet genoeg trainen tot 1 à 1,5 % van de botmassa in hun heupen en benen per maand. Daarom sporten ze elke dag ongeveer twee uur, op een loopband met elastieken en een fiets zonder zadel. Artsen op aarde volgen hun hartslag, bloeddruk en gewicht op de voet.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Een ruimtestation toont heel scherp wat een lichaam nodig heeft: zuurstof, water, energie en een veilige temperatuur, elke dag opnieuw. Ook de bewoners van Habitat hebben dat nodig. In dit hoofdstuk ontdek je hoe je lichaam die stoffen gebruikt, en aan het eind reken je uit hoeveel het station per bewoner moet voorzien.



Sporten met elastieken om niet weg te zweven: twee uur per dag, om spieren en botten sterk te houden.

UITLEG · 29.2

Het lichaam als systeem

2/19

Je lichaam bestaat uit ongeveer 30 000 miljard cellen (hoofdstuk 26), en elke cel heeft hetzelfde nodig: glucose en zuurstof voor de **celademhaling**, die energie vrijmaakt, net als bij planten (hoofdstuk 27):

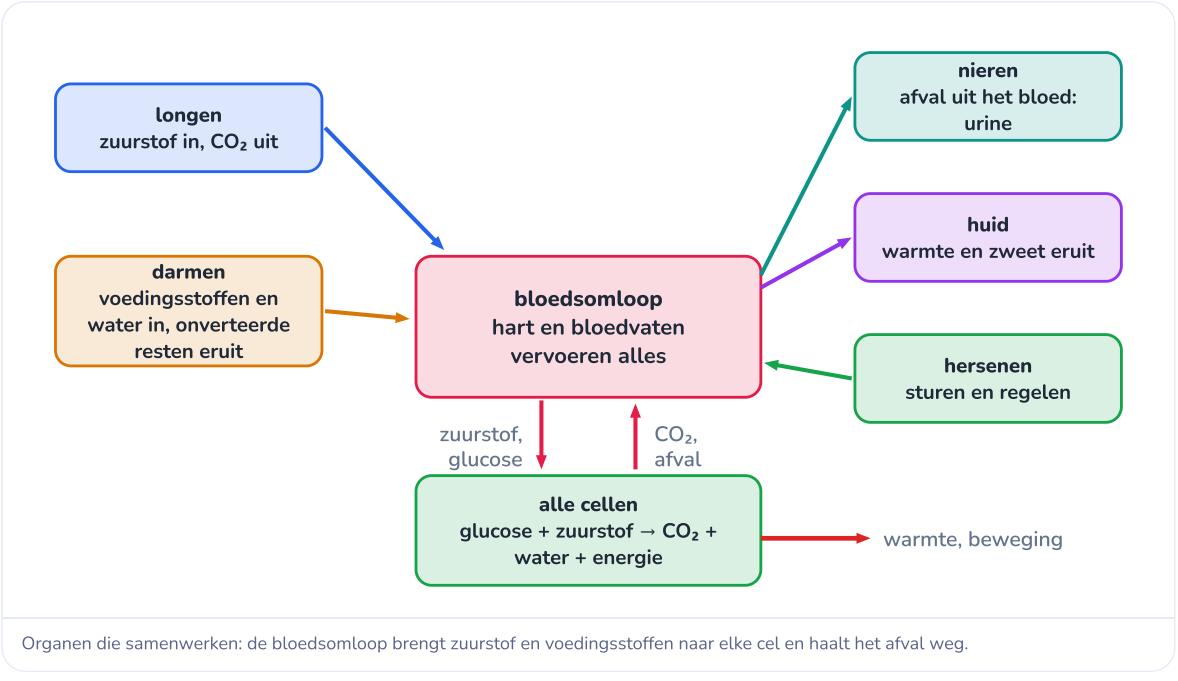
CELADEMHALING IN ELKE CEL

$$\text{glucose} + \text{zuurstof} \longrightarrow \text{koolstofdioxide} + \text{water} + \text{energie}$$

Die cellen liggen diep in je lichaam, ver van de lucht en het voedsel. Daarom werken je organen samen in **orgaanstelsels**, elk met een eigen taak:

orgaanstelsel	taak	input of output
ademhalingsstelsel (longen)	zuurstof opnemen, koolstofdioxide afgeven	in: zuurstof; uit: CO_2, waterdamp
spijsverteringsstelsel	voedsel afbreken tot kleine moleculen die in het bloed kunnen	in: voedsel en water; uit: onverteerde resten
bloedsomloop (hart en bloedvaten)	alles vervoeren tussen organen en cellen	(binnen)
uitscheiding (nieren, blaas)	afvalstoffen en overtollig water uit het bloed halen	uit: urine
huid	beschermen, temperatuur regelen	uit: warmte, zweet
zenuwstelsel en hormonen	meten, beslissen, sturen	(binnen)
spieren en skelet	bewegen, steunen	uit: arbeid en warmte

Net als bij de meetkas en de plant (hoofdstuk 1 en 27) kan je het lichaam dus zien als een systeem met input, proces en output. Het bijzondere: het houdt zijn binnenkant bijna constant, wat er buiten ook gebeurt. Dat heet **homeostase**, en je ontdekt verder in dit hoofdstuk hoe dat werkt.



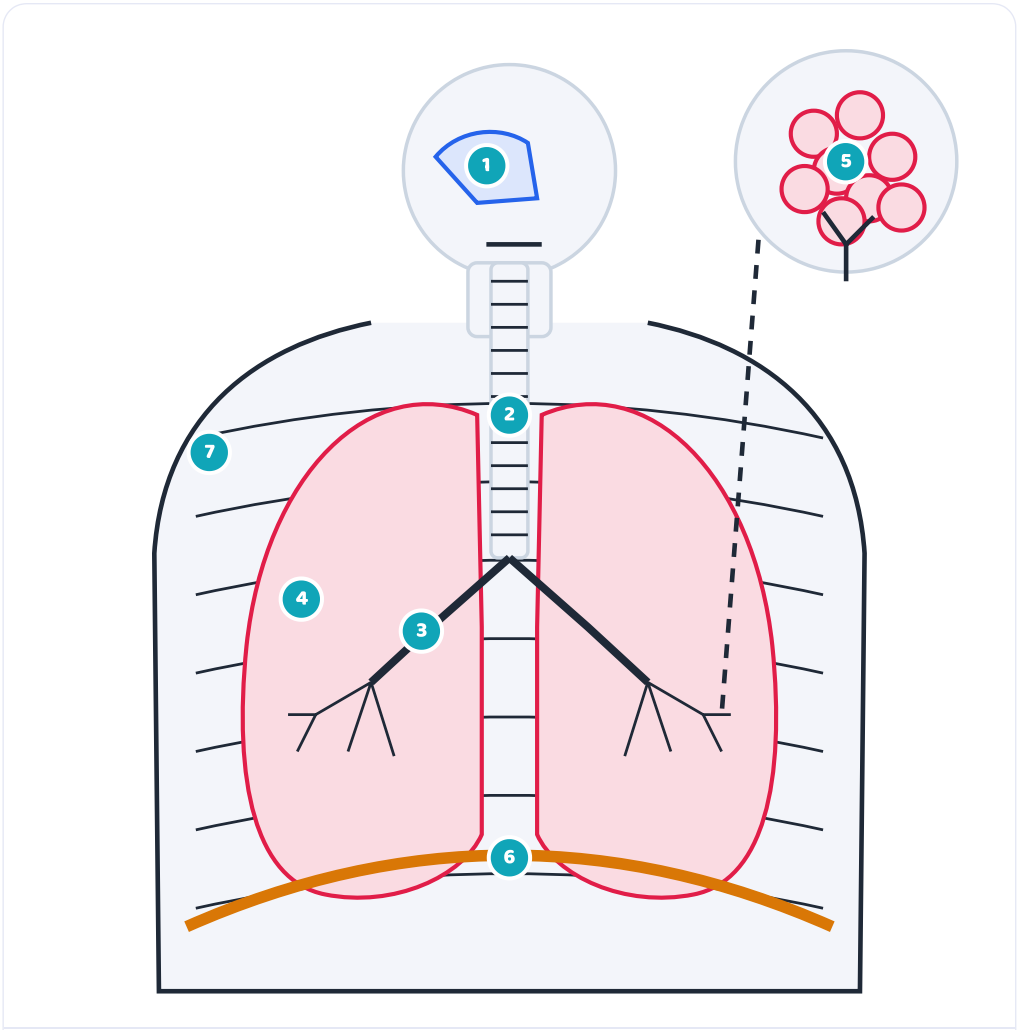
Organen die samenwerken: de bloedsomloop brengt zuurstof en voedingsstoffen naar elke cel en haalt het afval weg.

ONTLEED · 29.3

De ademhalingsorganen

3/19

Lucht gaat via de neus of de mond, de keelholte en de **luchtpijp** naar de longen. De luchtpijp splitst in twee **bronchiën**, die zich vertakken in steeds fijnere buisjes, de **bronchiolen**, tot ze eindigen in trosjes van piepkleine luchtzakjes: de **longblaasjes**. Een volwassene heeft er honderden miljoenen, met samen een oppervlakte van ongeveer 70 m² (schattingen lopen van 50 tot 100 m²): de vloer van een klaslokaal, opgevouwen in je borstkas.



De luchtwegen van neus tot longblaasjes (schematisch). Rechtsboven vergroot: een trosje longblaasjes.

1 Neusholte
Verwarmt en bevochtigt de lucht; haartjes en slijm vangen stof en ziektekiemen op.

2 Luchtpijp
Buis met ringen van kraakbeen, die ze openhouden. Trilhaartjes vegen slijm met stof naar boven.

3 Bronchie
Eén voor elke long. Ze vertakken zich meer dan twintig keer, tot heel fijne bronchiolen.

4 Long
Sponsachtig orgaan vol luchtwegen, longblaasjes en bloedvaten. De linkerlong is iets kleiner: er moet ook plaats zijn voor het hart.

5 Longblaasjes
Trosjes luchtzakjes met een wand van één dunne cellaag, omgeven door haarvaten. Hier gaat zuurstof het bloed in en koolstofdioxide eruit.

6 Middenrif
Koepelvormige spier onder de longen. Trekt hij samen, dan wordt hij platter, de borstkas groter en stroomt er lucht in. Ontspant hij, dan stroomt de lucht weer uit.

7 Ribben en tussenribspieren
Ze tillen de ribben op bij diep inademen, zodat de borstkas nog groter wordt.

UITLEG · 29.4

Gaswisseling: zuurstof erin, koolstofdioxide eruit

4/19

In een longblaasje zit verse lucht met veel zuurstof. In het haarvat eromheen stroomt bloed dat net van de cellen komt: met weinig zuurstof en veel koolstofdioxide. Tussen die twee zit een wand van samen minder dan een duizendste millimeter. Zuurstofdeeltjes bewegen, net als alle deeltjes, voortdurend kriskras (hoofdstuk 6). Waar er veel zijn, botsen er meer door de wand dan in de andere richting: zuurstof

gaat van het longblaasje naar het bloed. Koolstofdioxide gaat de omgekeerde weg. Dat heet **diffusie**: stoffen verspreiden zich van een plaats met een hoge naar een plaats met een lage concentratie, zonder dat er iets moet pompen.

In het bloed pakken de **rode bloedcellen** de zuurstof op, gebonden aan de rode kleurstof **hemoglobine**. In de haarvaten van je spieren en organen gebeurt het omgekeerde: daar is weinig zuurstof (de cellen verbruiken ze) en veel koolstofdioxide, dus zuurstof diffundeert naar de cellen en koolstofdioxide naar het bloed.

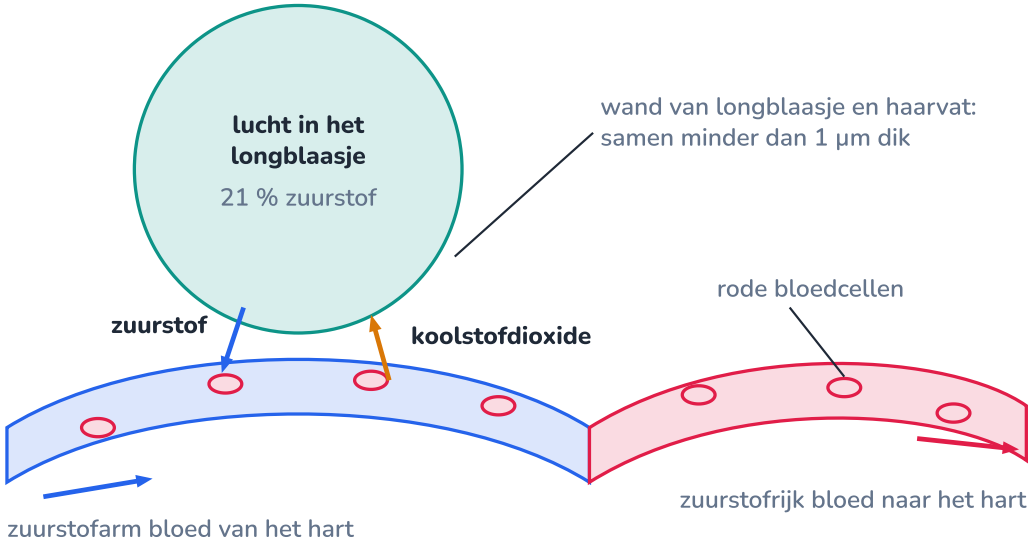
gas	ingeademde lucht	uitgeademde lucht
stikstof	78 %	78 %
zuurstof	21 %	± 16 %
koolstofdioxide	0,04 %	± 4 %
waterdamp	wisselend	veel (warm en vochtig)
temperatuur	die van de omgeving	± 34 °C

We ademen zuurstof in en koolstofdioxide uit

We ademen **lucht** in, die vooral uit stikstof bestaat, en we ademen lucht uit die nog altijd ongeveer 16 % zuurstof bevat. Van elke ingeademde liter houden we maar een klein deel van de zuurstof. Daarom werkt mond-op-mondbeademing: de lucht die de redder uitblaast, bevat nog genoeg zuurstof.

Je ademt sneller omdat je zuurstof tekortkomt

Je hersenen sturen je ademhaling vooral op het **koolstofdioxidegehalte** van je bloed. Tijdens inspanning maken je spieren meer CO_2; het gehalte stijgt, en je ademt sneller en dieper. Dat is ook een regelkring, zoals de temperatuurregeling verder in dit hoofdstuk.



Zuurstof diffundeert van de lucht naar het bloed, koolstofdioxide van het bloed naar de lucht.

UITGEWERKT VOORBEELD · 29.5

Hoeveel zuurstof verbruik je per dag?

5/19

In rust adem je ongeveer 12 keer per minuut, telkens een halve liter lucht. Van de ingeademde lucht neem je ongeveer 5 % (van de 21 %) als zuurstof op. Hoeveel liter en hoeveel gram zuurstof verbruik je op een dag in rust? Eén liter zuurstof weegt bij 20 °C 1,33 g.

GEGEVEN

- 12 ademhalingen per minuut
- $0{,}5\,\mathrm{L}$ per ademhaling
- 5 % van de lucht wordt opgenomen als zuurstof
- 1 L zuurstof = $1{,}33\,\mathrm{g}$ (20 °C)

GEVRAAGD

- liter lucht per minuut en per dag
- liter en gram zuurstof per dag

OPLOSSING

1. Lucht per minuut: $12 \times 0{,}5\,\mathrm{L} = 6\,\mathrm{L}$.
2. Een dag heeft $24 \times 60 = 1440$ minuten: $6 \times 1440 = 8640\,\mathrm{L}$ lucht per dag.
3. Zuurstof: 5 % daarvan, $0{,}05 \times 8640 = 432\,\mathrm{L}$.
4. Massa: $432 \times 1{,}33 \approx 575\,\mathrm{g}$, ongeveer 0,58 kg zuurstof.
5. Wie overdag beweegt, ademt sneller en dieper. Over een actieve dag rekent men met ongeveer 0,84 kg zuurstof (dat is $840 : 1{,}33 \approx 630\,\mathrm{L}$): dat is de rekenwaarde voor een bewoner van Habitat.

ANTWOORD

In rust ongeveer $430\,\mathrm{L}$ of $0{,}58\,\mathrm{kg}$ zuurstof per dag; met een normale actieve dag ongeveer $0{,}84\,\mathrm{kg}$.

Klopt dit? Ruimtevaartorganisaties rekenen met 0,8 à 0,9 kg zuurstof per astronaut per dag: het klopt. En de koolstofdioxide? Ongeveer 4 % van 8640 L = 346 L, of 630 g in rust, en ongeveer 1 kg over een actieve dag.

PROEF · 29.6

Wat zit er in je uitgeademde lucht?

6/19

ONDERZOEKSVRAAG

Bevat uitgeademde lucht meer koolstofdioxide dan de lucht in het lokaal?

MATERIAAL

twee proefbuizen met elk 5 mL helder kalkwater · een rietje · een fietspompje of ballonpompje met een slangetje · eventueel een CO_2-meter

Veiligheid

Kalkwater is bijtend voor de ogen: bril op. Alleen blazen, nooit zuigen door het rietje. Spoel gemorst kalkwater af met veel water.



Links kalkwater met lokaallucht, rechts na drie keer uitademen: de melkachtige kleur verraadt koolstofdioxide.

WERKWIJZE

1. Kalkwater wordt troebel (melkachtig) als er koolstofdioxide in komt: er vormt zich onoplosbare kalk. Hoe meer CO_2, hoe sneller.
2. Blaas met het rietje rustig uitgeademde lucht door de eerste proefbuis. Tel hoeveel keer je moet uitademen tot het kalkwater troebel is.
3. Pomp met het pompje lokaallucht door de tweede proefbuis, telkens een halve liter per pompslag, evenveel keer als je bij de eerste proefbuis uitademde. Tel verder tot het troebel wordt.
4. Met een CO_2-meter: meet de lokaallucht, en blaas dan één keer rustig uit vlak bij de sensor.

WAARNEMING

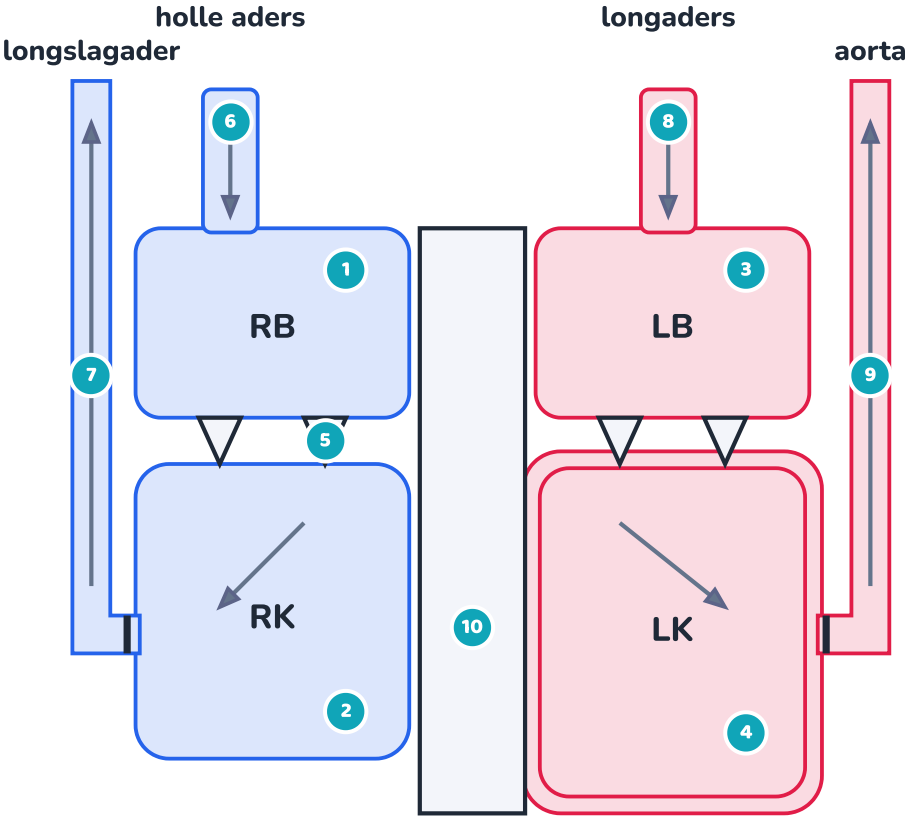
Het kalkwater met uitgeademde lucht wordt na twee à drie keer uitademen duidelijk melkachtig. Het kalkwater met lokaallucht blijft na hetzelfde aantal pompslagen helder, en wordt pas na tientallen slagen een beetje troebel. De CO_2-meter geeft in het lokaal bijvoorbeeld 600 à 800 ppm; na uitblazen schiet hij naar boven, tot buiten zijn meetbereik.

VERKLARING

Uitgeademde lucht bevat ongeveer 4 % koolstofdioxide, lokaallucht maar 0,04 à 0,08 %: honderd keer minder. Die koolstofdioxide komt uit de celademhaling in al je cellen, wordt door het bloed naar de longen vervoerd en daar afgegeven. Dat de lokaallucht in een volle klas hoger is dan buiten (425 ppm), komt ook van jullie ademhaling: daarom moet een klas verlucht worden.

Het hart

Je hart is een holle spier, ongeveer zo groot als je vuist. Het bestaat uit twee pompen naast elkaar, gescheiden door een wand: de **rechterhelft** pompt bloed naar de longen, de **linkerhelft** naar de rest van het lichaam. Elke helft heeft een **boezem** (die bloed ontvangt) en een **kamer** (die het wegpompt). In schema's teken je het hart zoals je het van voren ziet: de rechterhelft staat dus links op de tekening. Blauw is zuurstofarm bloed, rood zuurstofrijk.



Schema van het hart: RB en RK rechterboezem en -kamer, LB en LK linkerboezem en -kamer. De pijlen tonen de stroomrichting.

1 Rechterboezem
Ontvangt het zuurstofarme bloed dat uit het lichaam terugkomt via de holle aders.

2 Rechterkamer
Pompt dat bloed via de longslagader naar de longen, een korte weg: de wand is minder dik dan links.

3 Linkerboezem
Ontvangt het zuurstofrijke bloed uit de longen via de longaders.

4 Linkerkamer
Pompt het bloed via de aorta naar het hele lichaam, van hersenen tot tenen. Daarvoor heeft ze de dikste, sterkste spierwand.

5 Hartkleppen
Ze laten het bloed maar in één richting door: van boezem naar kamer, en van kamer naar slagader. Het 'boem-tak' van je hart is het geluid van kleppen die dichtklappen.

6 Holle aders
De twee grootste aders: ze brengen het bloed van het bovenlichaam en het onderlichaam terug naar het hart.

7 Longslagader
Voert bloed van de rechterkamer naar de longen. Een slagader met zuurstofarm bloed!

8 Longaders
Voeren het bloed uit de longen naar de linkerboezem. Aders met zuurstofrijk bloed.

9 Aorta
De grootste slagader, zo dik als een tuinslang. Ze vertakt zich naar alle organen.

10 Tussenschot
Stevige spierwand tussen de rechter- en de linkerhelft: zuurstofarm en zuurstofrijk bloed mengen niet.

De dubbele bloedsomloop

Volg een rode bloedcel. Van de linkerkamer gaat ze via de aorta en steeds kleinere slagaders naar, bijvoorbeeld, een beenspier. In de haarvaten van de spier geeft ze zuurstof af en neemt het bloed koolstofdioxide op. Via aders en de holle ader komt ze terug in de rechterboezem. Dat is de **grote bloedsomloop**. Dan pompt de rechterkamer haar naar de longen, waar ze nieuwe zuurstof opneemt, en komt ze via de longaders terug in de linkerboezem: de **kleine bloedsomloop**. Per rondgang passeert het bloed dus twee keer het hart: een **dubbele bloedsomloop**.

bloedvat	richting	wand	voorbeeld
slagader	van het hart weg	dik en elastisch: hoge druk, je voelt er de pols	aorta, longslagader, halsslagader
ader	naar het hart toe	dunner, met kleppen die terugstromen verhinderen	holle aders, longaders, aders op je handrug
haarvat	verbindt slagaders en aders	één cellaag dik: hier gebeurt de uitwisseling	in longen, spieren, alle organen

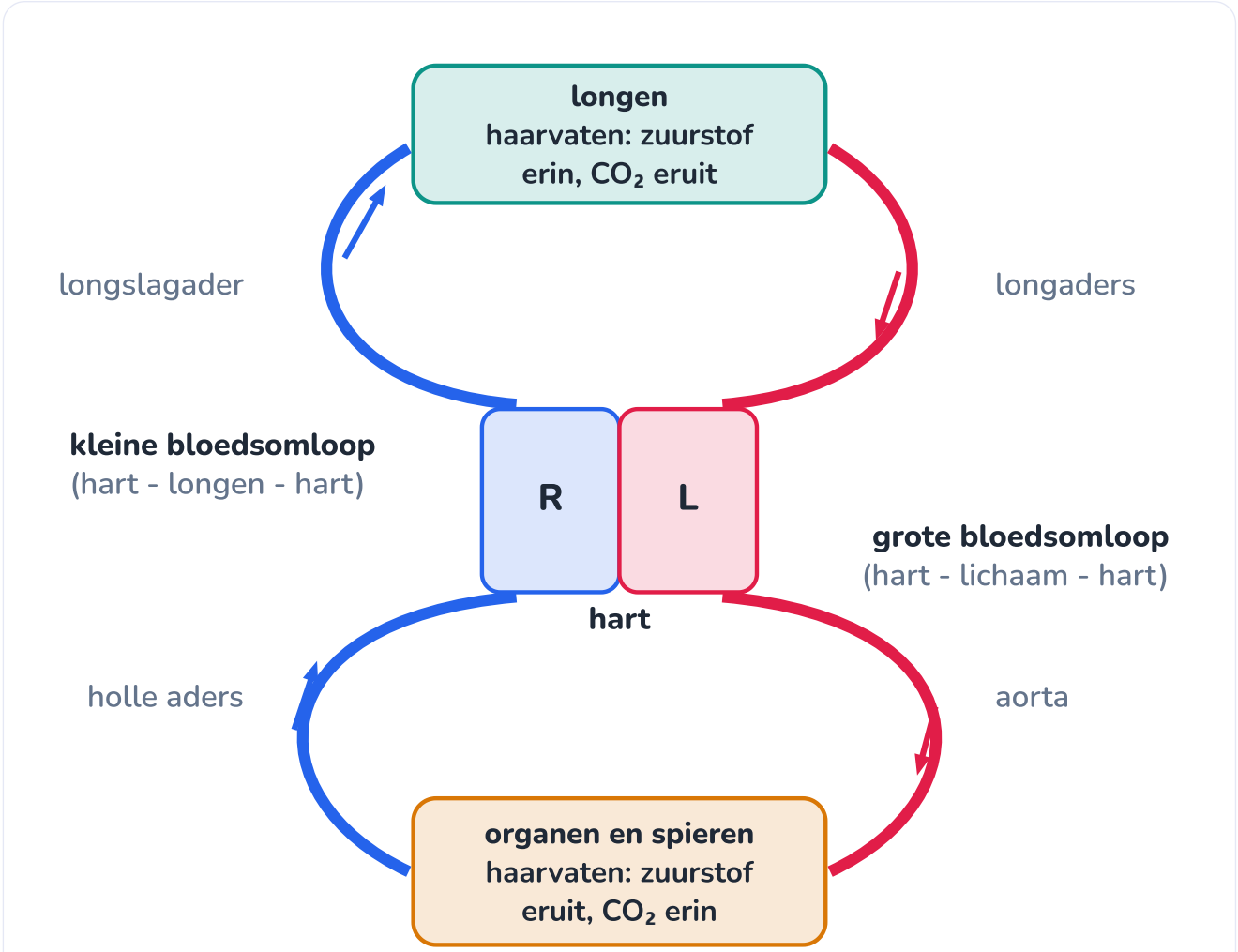
Een volwassene heeft ongeveer 5 liter bloed. In rust pompt het hart ongeveer 70 mL per slag, zo'n 70 keer per minuut: 5 liter per minuut. Al je bloed gaat dus ongeveer één keer per minuut rond. Bij zware inspanning kan dat vier à vijf keer sneller.

Een slagader vervoert altijd zuurstofrijk bloed

Slagaders worden genoemd naar de **richting** (van het hart weg), niet naar de zuurstof. De longslagader vervoert zuurstofarm bloed naar de longen; de longaders brengen zuurstofrijk bloed terug.

Bloed in je aders is blauw

Zuurstofarm bloed is donkerrood, niet blauw. Aders lijken blauw doordat de huid en het weefsel erboven het licht verschillend doorlaten en terugkaatsen. Het blauw in schema's is een afspraak om zuurstofarm bloed aan te duiden.



Twee kringen, één hart: de kleine bloedsomloop langs de longen en de grote langs het lichaam.

UITGEWERKT VOORBEELD · 29.9

Hoeveel werk doet je hart?

9/19

Een hart klopt in rust 70 keer per minuut en pompt 70 mL per slag. (a) Hoeveel liter bloed pompt het per minuut en per dag? (b) Hoeveel keer klopt het per dag, en in een leven van 80 jaar?

GEGEVEN

- 70 slagen per minuut
- $70\,\mathrm{mL}$ per slag
- 1 dag = 1440 minuten; 1 jaar = 365,25 dagen

GEVRAAGD

- (a) liter per minuut en per dag
- (b) slagen per dag en in 80 jaar

OPLOSSING

1. (a) Per minuut: $70 \times 70\,\mathrm{mL} = 4900\,\mathrm{mL} = 4{,}9\,\mathrm{L}$.
2. Per dag: $4{,}9\,\mathrm{L} \times 1440 \approx 7056\,\mathrm{L}$: ongeveer 7000 liter, zeventig volle badkuipen.
3. (b) Per dag: $70 \times 1440 = 100\,800$ slagen: ongeveer honderdduizend.
4. In 80 jaar: $100\,800 \times 365{,}25 \times 80 \approx 2{,}9 \cdot 10^9$: bijna drie miljard slagen, zonder pauze.

ANTWOORD

(a) 4,9 L per minuut, ongeveer 7000 L per dag. (b) Ongeveer 100 000 slagen per dag, bijna 3 miljard in 80 jaar.

Klopt dit? Het hele bloedvolume (5 L) gaat ongeveer één keer per minuut rond: 4,9 L per minuut klopt. Tijdens inspanning stijgen zowel de hartslag als het volume per slag.

PROEF · 29.10

Hartslag in rust en na inspanning

10/19

ONDERZOEKSVRAAG

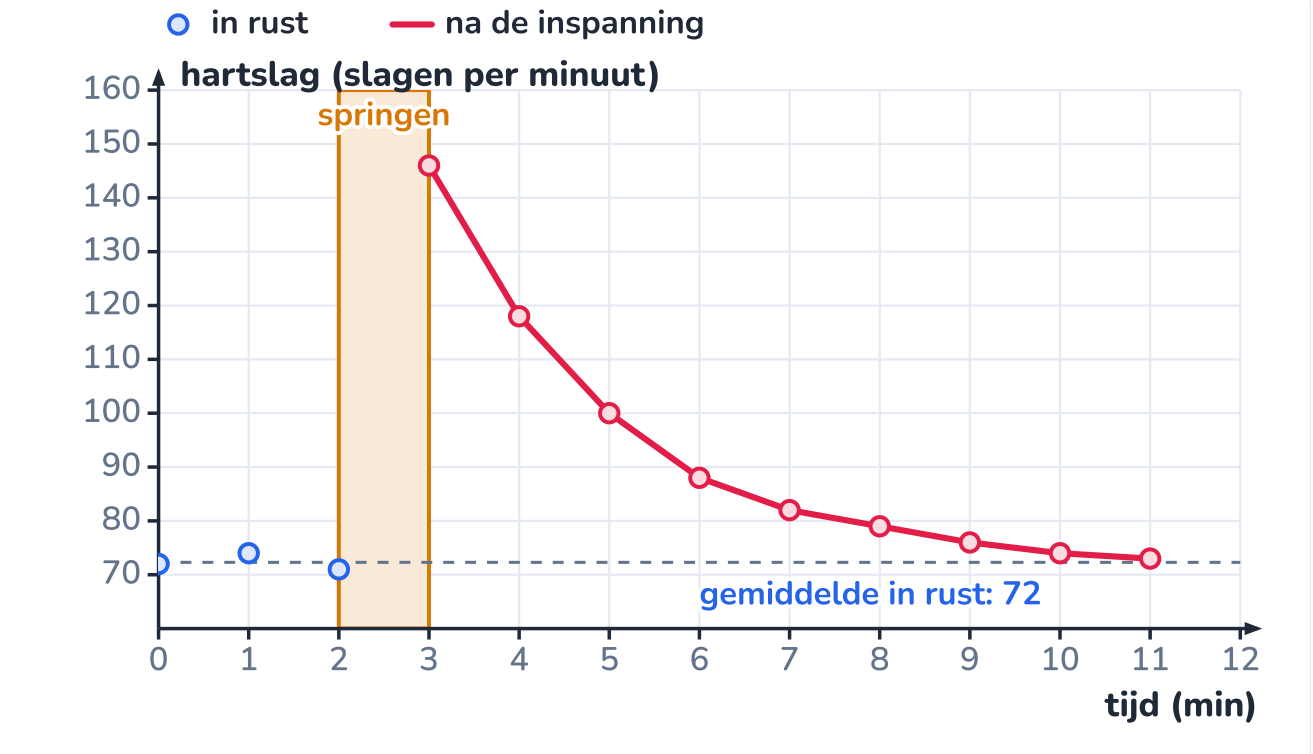
Hoe verandert je hartslag door een korte inspanning, en hoe snel komt ze terug op het rustniveau?

MATERIAAL

- een klok of stopwatch met seconden
- een springtouw (of een trede om op en af te stappen)
- een tabel en millimeterpapier

Veiligheid

Wie een hart- of longaandoening heeft, of zich duizelig voelt, doet de inspanning niet of stopt meteen.



Rust, inspanning (oranje band) en herstel: na 5 minuten is de hartslag bijna terug bij de rustwaarde.

WERKWIJZE

1. Zoek je pols: leg twee vingers (niet je duim, die heeft zelf een pols) aan de binnenkant van je pols, aan de kant van je duim, of opzij van je hals.
2. Zit 3 minuten rustig. Tel je hartslag telkens 15 seconden lang en vermenigvuldig met 4. Doe dat drie keer.
3. Spring één minuut stevig touwtje.

4. Ga meteen zitten en meet je hartslag direct, en daarna elke minuut opnieuw (15 seconden tellen, × 4), tot 8 minuten na de inspanning.

5. Zet alles in een grafiek: de tijd horizontaal, de hartslag verticaal.

WAARNEMING

Een leerling mat in rust 72, 74 en 71 slagen per minuut (gemiddeld 72). Na de minuut springen:

minuten na het springen	0	1	2	3	4	5	6	7	8
hartslag (per minuut)	146	118	100	88	82	79	76		

Ook de ademhaling ging van 14 naar ongeveer 30 keer per minuut, en ze had het warm.

VERKLARING

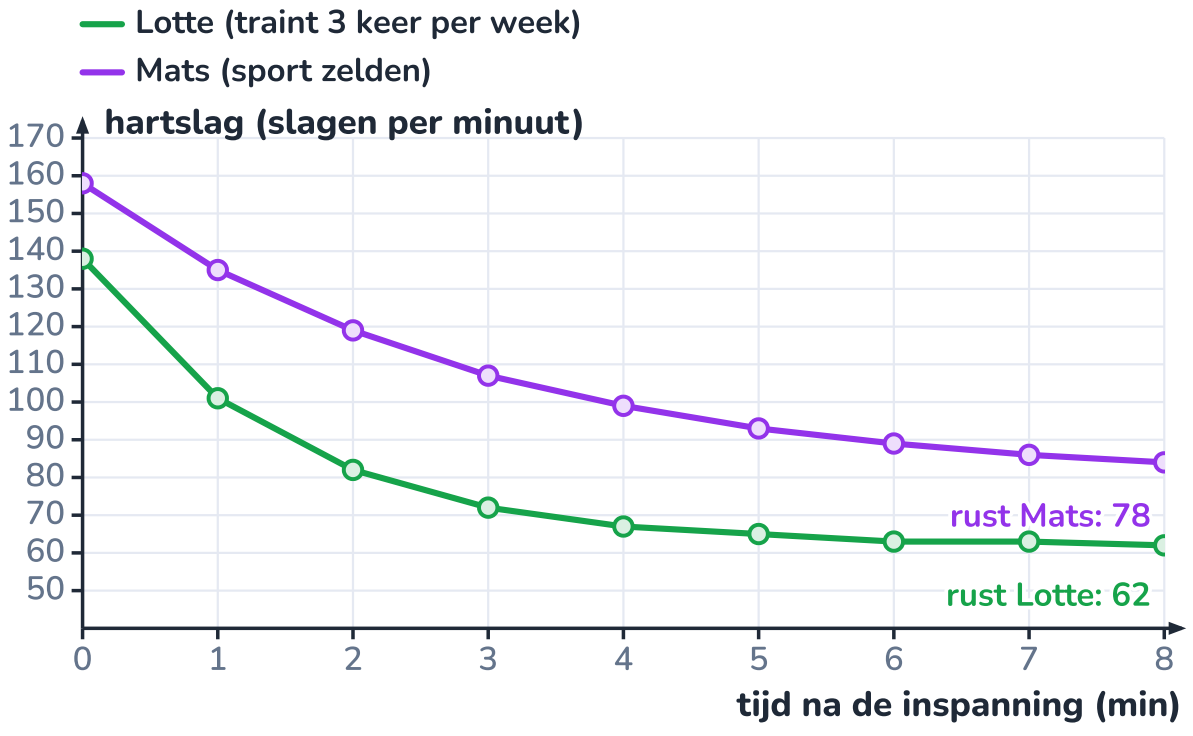
Tijdens het springen hebben de beenspieren veel meer energie nodig. Hun cellen verbruiken meer glucose en zuurstof en maken meer koolstofdioxide. Het hart klopt (en krachtiger) om meer bloed te sturen, en de ademhaling versnelt om meer zuurstof op te nemen en meer CO_2 af te geven. Na de inspanning daalt de hartslag eerst snel, dan steeds trager, naar het rustniveau. Wie getraind is, herstelt sneller. Dat je zo nauwkeurig 15 seconden telt en vermenigvuldigt, geeft wel een afrondingsfout: één slag te veel of te weinig is al 4 slagen per minuut.

UITGEWERKT VOORBEELD · 29.11

Twee herstelcurven vergelijken

11/19

Lotte en Mats deden dezelfde inspanning. Lees de grafiek. (a) Wat is hun hartslag in rust en direct na de inspanning? (b) Hoe lang duurt het tot ze binnen 10 slagen van hun rustwaarde zitten? (c) Wie is het best getraind, en waaraan zie je dat?



Dezelfde inspanning, twee harten: Lotte herstelt veel sneller dan Mats.

GEGEVEN

- de herstelcurven van Lotte en Mats
- rust Lotte 62, rust Mats 78 slagen per minuut

GEVRAAGD

- (a) rust en piek
- (b) hersteltijd
- (c) besluit

OPLOSSING

1. (a) Lotte: rust 62, direct na de inspanning 138 slagen per minuut. Mats: rust 78, direct na de inspanning 158.

2. (b) 'Binnen 10 slagen' betekent voor Lotte onder 72 en voor Mats onder 88. Lotte zit na 3 minuten op 72 en na 4 minuten op 67: na ongeveer 3 à 4 minuten. Mats zit na 6 minuten nog op 89 en na 7 minuten op 86: na ongeveer 6 à 7 minuten.

3. (c) Lotte heeft een lagere rusthartslag, een lagere piek bij dezelfde inspanning en herstelt twee keer zo snel. Een getraind hart pompt meer bloed per slag, en hoeft dus minder vaak te slaan.

ANTWOORD

Lotte (rust 62, piek 138, herstel in 3 à 4 min) is beter getraind dan Mats (rust 78, piek 158, herstel in 6 à 7 min).

Klopt dit? Vergelijk alleen curven van dezelfde inspanning, en meet in dezelfde omstandigheden (niet net na het eten, niet na koffie of cola). Eén meting per persoon is weinig: herhaal op een andere dag.

UITLEG · 29.12

Energie uit voeding

Voedsel levert bouwstoffen en **chemische energie** (hoofdstuk 15). Die energie komt vrij bij de celademhaling en gebruik je om te leven: je hart laten kloppen, je hersenen laten werken, je spieren bewegen en je lichaam op 37 °C houden. Op een voedingsetiket staat de energie in **kilojoule** (kJ) en in **kilocalorie** (kcal), een oudere eenheid: $1\,\text{kcal} = 4{,}184\,\text{kJ}$.

voedingsstof	waarvoor	energie per gram	zit veel in
koolhydraten (suikers, zetmeel)	snelle brandstof	17 kJ (4 kcal)	brood, pasta, rijst, aardappelen, fruit
vetten	brandstof, reserve, isolatie	37 kJ (9 kcal)	boter, olie, noten, kaas, chips
eiwitten	bouwstof (spieren, enzymen)	17 kJ (4 kcal)	vlees, vis, eieren, peulvruchten, zuivel
vezels	goede darmwerking	8 kJ (2 kcal)	volkoren, groenten, havermout
water, vitaminen, mineralen	nodig voor alle processen	0	groenten, fruit, drank

De Europese regels leggen vast hoe fabrikanten de energie berekenen: 17 kJ per gram koolhydraten en eiwitten, 37 kJ per gram vet en 8 kJ per gram vezels. Vet levert dus meer dan dubbel zoveel energie per gram als suiker.

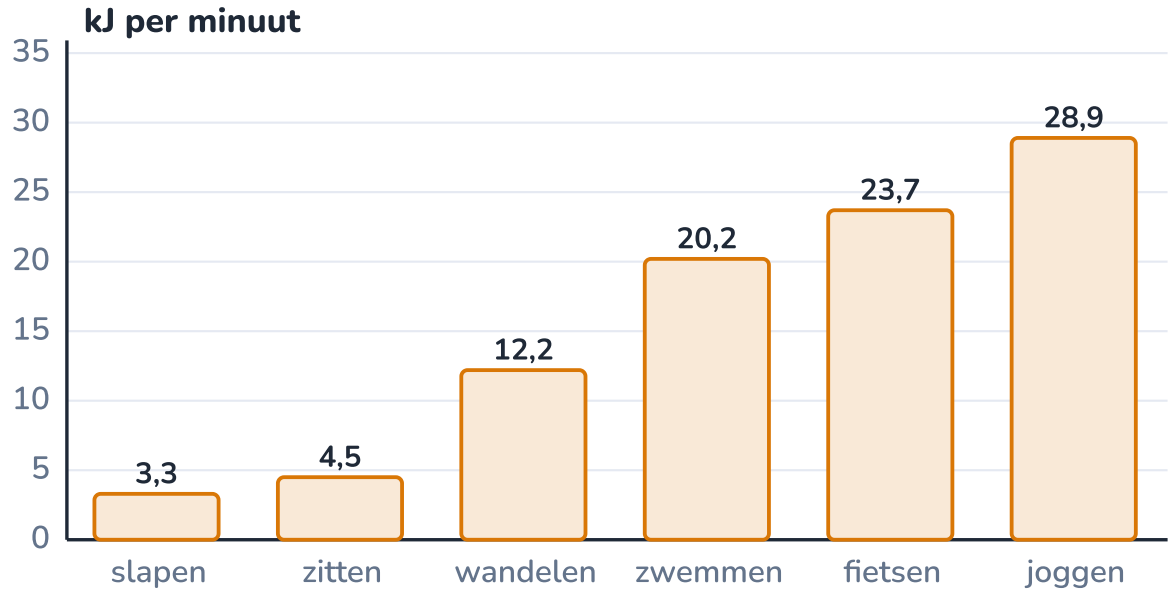
ENERGIE VAN VOEDSEL (EU-REGELS)

$$E = 17 \cdot m_{\text{koolhydraten}} + 17 \cdot m_{\text{eiwitten}} + 37 \cdot m_{\text{vetten}} + 8 \cdot m_{\text{vezels}}$$

E in kJ, de massa's m in gram, zoals ze op het etiket staan.

Hoeveel heb je nodig? Op etiketten staat de *referentie-inname* van een gemiddelde volwassene: 8400 kJ per dag. Tieners in de groei en mensen die veel bewegen hebben meer nodig, 10 à 12 MJ. Het grootste deel (ongeveer twee derde) gaat naar je **basisverbruik**: organen die werken, ook als je slaapt. Het andere deel hangt af van hoeveel je beweegt.

Uiteindelijk wordt bijna al die energie **warmte**. Wie 10 MJ per dag eet en even zwaar blijft, geeft gemiddeld $10\,000\,000\,\text{J} : 86\,400\,\text{s} \approx 116\,\text{W}$ af: een mens is een kachel van ongeveer 100 W (hoofdstuk 16).



Orde van grootte voor iemand van 50 kg (1 MET = 1 kcal per kg per uur). Joggen verbruikt zes keer zoveel als rustig zitten.

UITGEWERKT VOORBEELD · 29.13

Een voedingsetiket narekenen

13/19

Hieronder staat het etiket van havermout (typische waarden). (a) Controleer de energie per 100 g met de energiefactoren. (b) Hoeveel energie levert een portie van 50 g, en welk deel is dat van de referentie-inname? (c) Hoeveel procent van de energie komt uit vet?

HAVERMOUT

Voedingswaarde	per 100 g	per portie (50 g)
Energie	1563 kJ / 371 kcal	782 kJ / 186 kcal
Vetten	7,0 g	3,5 g
waarvan verzadigde vetzuren	1,3 g	0,7 g
Koolhydraten	59 g	30 g
waarvan suikers	1,0 g	0,5 g
Vezels	10 g	5,0 g
Eiwitten	13 g	6,5 g
Zout	0,02 g	0,01 g

Referentie-inname van een gemiddelde volwassene (8400 kJ / 2000 kcal)

Het voedingsetiket van havermout: per 100 g en per portie van 50 g.

GEGEVEN

- per 100 g: vetten 7,0 g, koolhydraten 59 g, vezels 10 g, eiwitten 13 g
- 17 kJ/g koolhydraten en eiwitten, 37 kJ/g vet, 8 kJ/g vezels
- referentie-inname 8400 kJ

GEVRAAGD

- (a) energie per 100 g
- (b) energie per portie en % van de referentie-inname
- (c) aandeel van het vet

OPLOSSING

1. (a) Koolhydraten $59 \times 17 = 1003\,\text{kJ}$; eiwitten $13 \times 17 = 221\,\text{kJ}$; vetten $7{,}0 \times 37 = 259\,\text{kJ}$; vezels $10 \times 8 = 80\,\text{kJ}$.
2. Samen: $1003 + 221 + 259 + 80 = 1563\,\text{kJ}$ per 100 g, precies wat op het etiket staat. In kcal: $1563 : 4{,}184 \approx 374$; het etiket rekent met 4, 4, 9 en 2 kcal per gram en komt op 371 kcal.
3. (b) 50 g is de helft: $1563 : 2 \approx 782\,\text{kJ}$. Deel van de referentie-inname: $782 : 8400 \approx 0{,}093 = 9\,\%$.
4. (c) Uit vet: $259 : 1563 \approx 0{,}17 = 17\,\%$ van de energie.

ANTWOORD

(a) 1563 kJ per 100 g, zoals op het etiket. (b) 782 kJ per portie, 9 % van de referentie-inname. (c) 17 % van de energie komt uit vet.

Klopt dit? Een ontbijt levert vaak 15 à 25 % van de energie van een dag: 50 g havermout (met melk en fruit erbij) past daar goed in. Zou je 12 % vet in gram zien en 17 % in energie? Ja: vet heeft meer dan dubbel zoveel energie per gram.

Homeostase: de thermostaat in je lichaam

Of je nu in de sneeuw staat of in de zon ligt, de temperatuur binnenin je lichaam, de **kerntemperatuur**, blijft ongeveer 37 °C (tussen 36,5 en 37,5 °C). Je enzymen (hoofdstuk 34 van Intermediate) werken het best bij die temperatuur. Boven 40 °C of onder 35 °C wordt het gevaarlijk.

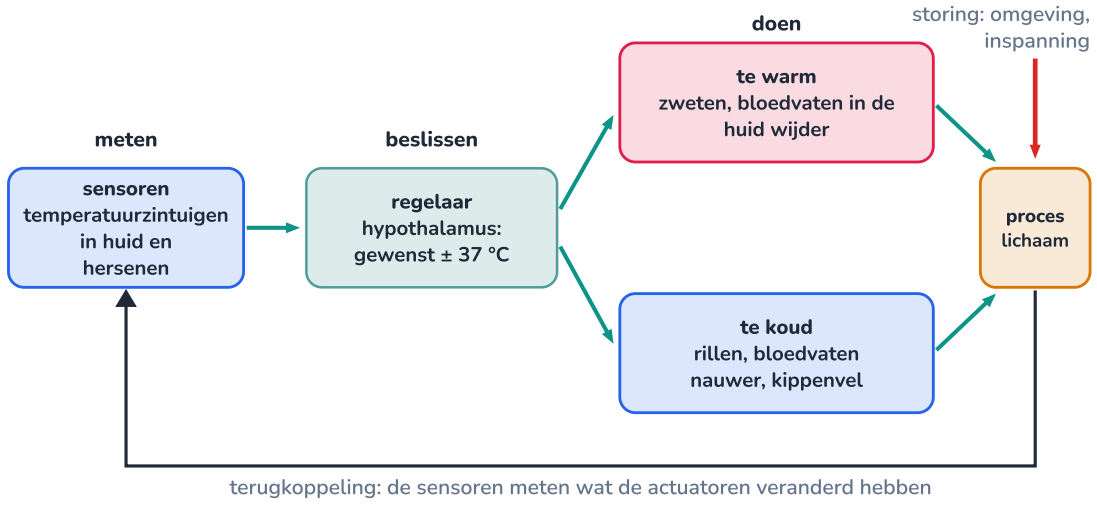
Dat constant houden gebeurt met een **gesloten regelkring**, net als het dakraam van de meetkas (hoofdstuk 25):

- **Sensoren**: zenuwcellen in je huid en in je hersenen meten de temperatuur.
- **Regelaar**: de **hypothalamus**, een klein deel van je hersenen, vergelijkt met de gewenste waarde van ongeveer 37 °C.
- **Actuatoren** bij te warm: **zweetklieren** (zweet verdampt en koelt, hoofdstuk 6) en **bloedvaten in de huid** die wijder worden: er gaat meer warm bloed naar de huid, die warmte afgeeft (je wordt rood).
- **Actuatoren** bij te koud: bloedvaten in de huid die nauwer worden (je wordt bleek, de warmte blijft binnen), **rillen** (spieren die snel samentrekken en warmte maken) en kippenvel.
- **Gedrag**: een trui aantrekken, de schaduw opzoeken. Ook dat is een actuator!

Het is **negatieve terugkoppeling**: wordt het te warm, dan zet de regelaar iets in gang dat afkoelt, en omgekeerd. Anders dan de aan/uit-thermostaat van hoofdstuk 25 stuurt je lichaam wel geleidelijk bij: een beetje warm geeft een beetje zweet, veel warmte veel zweet. Dezelfde soort regeling houdt ook je waterhuishouding (dorst en nieren), je ademhaling (op het CO_2-gehalte) en je bloedsuiker constant.

Koorts: een verschoven gewenste waarde

Bij een infectie zet de hypothalamus de gewenste waarde hoger, bijvoorbeeld op 39 °C. Je lichaam is dan 'te koud' in vergelijking met die nieuwe waarde: je rilt en hebt het koud, terwijl je temperatuur stijgt. Zakt de gewenste waarde terug naar 37 °C, dan is je lichaam 'te warm': je zweet. In opdracht 29.15 lees je zo'n koortsgrafiek.



Dezelfde bouw als de regelkring van de meetkas: meten, beslissen, doen, en terugkoppeling.

UITGEWERKT VOORBEELD · 29.15

Hoeveel zweet je bij het lopen?

15/19

Tijdens een loopwedstrijd maakt je lichaam 400 W meer warmte dan in rust. Neem aan dat je al die extra warmte kwijtraakt door zweet te laten verdampen. Om 1 g zweet te verdampen op je huid is ongeveer 2,4 kJ nodig (iets meer dan de 2,26 kJ bij 100 °C uit hoofdstuk 6). Hoeveel zweet verdampt er per uur?

GEGEVEN

- extra warmte: $400\,\mathrm{W} = 400\,\mathrm{J}$ per seconde
- $2{,}4\,\mathrm{kJ} = 2400\,\mathrm{J}$ per gram zweet

GEVRAAGD

- gram zweet per seconde en per uur

OPLOSSING

1. Per seconde: $400\,\mathrm{J} : 2400\,\mathrm{J/g} \approx 0{,}17\,\mathrm{g}$ zweet.
2. Per uur: $0{,}17 \times 3600 = 600\,\mathrm{g}$, dus ongeveer 0,6 liter.
3. In werkelijkheid druppelt een deel van het zweet af zonder te verdampen (dat koelt niet), en bij vochtig weer verdampt het slechter. Je zweet dan nog meer.

ANTWOORD

Ongeveer 600 g, of 0,6 L zweet per uur: dat moet je ook drinken.

Klopt dit? Sporters verliezen bij zware inspanning 0,5 tot 2 L zweet per uur: het klopt. Daarom verbruikt een bewoner die zwaar werkt ook veel meer drinkwater dan iemand die stilzit.

UITLEG · 29.16

Wat heeft een mens nodig om te overleven?

16/19

Een bekende vuistregel, de **regel van drie**, zet de noden op een rij: zonder lucht hou je het ongeveer 3 minuten vol, zonder water ongeveer 3 dagen, zonder voedsel ongeveer 3 weken. Het zijn ordes van grootte, geen exacte grenzen (het hangt sterk af van de temperatuur, je gezondheid en wat je doet), maar ze tonen goed wat eerst moet: **lucht**, dan een veilige **temperatuur**, dan **water**, dan **voedsel**.

wat	zonder hou je het ongeveer … vol (vuistregel)	per dag nodig (rekenwaarde)
zuurstof (lucht met ± 21 %)	3 minuten	0,84 kg zuurstof
een veilige temperatuur (kern ± 37 °C)	enkele uren in ijskoud water of extreme hitte	kleding, verwarming, koeling
water	3 dagen	2 à 2,5 L, bij warmte of zwaar werk meer
voedsel	3 weken (sterk verschillend)	± 10 MJ (8 à 12 MJ)

In een afgesloten ruimte komt er nog iets bij: de **afvalstoffen** moeten weg. Een mens ademt per dag ongeveer 1 kg koolstofdioxide uit. In een dichte kamer van 30 m³ stijgt het CO_2-gehalte daardoor met ongeveer 760 ppm per uur. Vanaf ongeveer 1000 ppm voelt de lucht bedompt en daalt je concentratie; op het werk mag het gemiddeld hoogstens 5000 ppm zijn. Ook de waterdamp die je uitademt en uitzweet (1 à 3 kg per dag) moet weg, anders beslaat alles, zoals de wanden van de meetkas.

Te weinig zuurstof merk je meteen

Een tekort aan zuurstof voel je nauwelijks aankomen: je wordt suf, je denkt trager en je oordeel wordt slechter, zonder dat je beseft wat er gebeurt. De bewoners van Biosphere 2 (hoofdstuk 28) werden maandenlang moe. Wat je wél voelt, is te veel CO_2: dan wil je sneller ademen. Daarom meet een station altijd zowel de zuurstof als de koolstofdioxide.



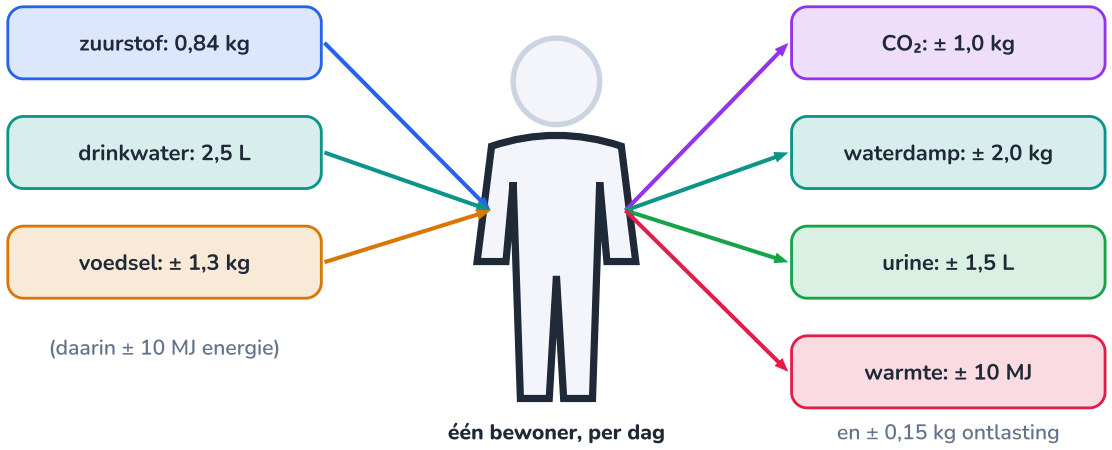
In een poolstation of een ruimtestation moeten lucht, water, warmte en voedsel elke dag verzekerd zijn.

UITGEWERKT VOORBEELD · 29.17

Habitat: levensondersteuning voor één bewoner

17/19

Een bewoner van het station verbruikt per dag 0,84 kg zuurstof, 2,5 L drinkwater (om te drinken en om voedsel te bereiden) en ongeveer 1,3 kg voedsel, waarvan 0,6 kg droge stof en 0,7 kg water, met 10 MJ energie. Hij geeft ongeveer 1,0 kg koolstofdioxide, 1,5 L urine, 2,0 kg waterdamp en 0,15 kg ontlasting af. (a) Klopt de massabalans? (b) Hoeveel moet er voor 30 dagen voorzien worden? (c) Hoeveel nieuw water is nodig als het station 98 % van het water terugwint? (d) Hoeveel warmte geeft de bewoner af?



Per dag gaat er ongeveer 4,6 kg in en komt er evenveel uit; de energie van het voedsel wordt warmte.

GEGEVEN

- in: 0,84 kg zuurstof, 2,5 L water, 1,3 kg voedsel (10 MJ)
- uit: 1,0 kg CO_2, 1,5 L urine, 2,0 kg waterdamp, 0,15 kg ontlasting
- 1 L water = 1 kg; waterterugwinning 98 %

GEVRAAGD

- (a) massabalans
- (b) voorraad voor 30 dagen
- (c) nieuw water per dag en per maand
- (d) warmte in watt

OPLOSSING

1 (a) In: $0{,}84 + 2{,}5 + 1{,}3 = 4{,}64\,\text{kg}$. Uit: $1{,}0 + 1{,}5 + 2{,}0 + 0{,}15 = 4{,}65\,\text{kg}$. Op afronding na gelijk: een volwassene die even zwaar blijft, geeft evenveel massa af als hij opneemt. Opvallend: de koolstof en de zuurstof van de koolstofdioxide komen uit het voedsel en de ingeademde zuurstof.

2 (b) Voor 30 dagen: zuurstof $30 \times 0{,}84 = 25{,}2\,\text{kg}$; water $30 \times 2{,}5 = 75\,\text{L}$; voedsel $30 \times 1{,}3 = 39\,\text{kg}$ (waarvan $18\,\text{kg}$ droog).

3 (c) Wordt 98 % van het water teruggewonnen (uit urine, zweet en adem), dan gaat 2 % verloren: $0{,}02 \times 2{,}5 = 0{,}05\,\text{L}$ per dag, $1{,}5\,\text{L}$ per maand in plaats van 75 L.

4 (d) $10\,000\,000\,\text{J} : 86\,400\,\text{s} \approx 116\,\text{W}$. In het station (hoofdstuk 39 van Expert: 50 W per °C verschil met buiten) houdt één bewoner het binnen $116 : 50 \approx 2{,}3$ °C warmer.

ANTWOORD

(a) 4,64 kg in, 4,65 kg uit: de balans klopt. (b) 25 kg zuurstof, 75 L water en 39 kg voedsel voor 30 dagen. (c) Met 98 % terugwinning maar 0,05 L nieuw water per dag. (d) Ongeveer 116 W warmte.

Klopt dit? Vergelijk met de planten: de hele slateelt in de meetkas geeft in zes weken maar 77 g zuurstof (hoofdstuk 28), minder dan een tiende van wat één bewoner op één dag inademt. De zuurstof van het station moet dus van elders komen: uit water gesplitst met elektriciteit, of uit een algenreactor.

NASLAG · 29.18

Overzicht: ademhaling, bloedsomloop, voeding en regeling

18/19

De belangrijkste getallen, formules en afspraken van dit hoofdstuk.

celademhaling (in elke cel)

$$\text{glucose} + \text{zuurstof} \longrightarrow \text{koolstofdioxide} + \text{water} + \text{energie}$$

energie van voedsel

$$E = 17 \cdot m_{\text{kh}} + 17 \cdot m_{\text{eiwit}} + 37 \cdot m_{\text{vet}} + 8 \cdot m_{\text{vezels}}$$

symbool	betekenis	eenheid
E	energie	kJ
m_{kh}	massa koolhydraten	g
m_{eiwit}	massa eiwitten	g
m_{vet}	massa vetten	g
m_{vezels}	massa vezels	g

hartslag per minuut uit een telling van 15 seconden

$$\text{hartslag} = \text{slagen in 15 s} \times 4$$

kilocalorie en kilojoule

$$1\,\text{kcal} = 4{,}184\,\text{kJ}$$

gas	ingeademde lucht	uitgeademde lucht
stikstof	78 %	78 %
zuurstof	21 %	± 16 %
koolstofdioxide	0,04 %	± 4 %
waterdamp	wisselend	veel (warm en vochtig)
temperatuur	die van de omgeving	± 34 °C

bloedvat	richting	wand	voorbeeld
slagader	van het hart weg	dik en elastisch: hoge druk, je voelt er de pols	aorta, longslagader, halsslagader
ader	naar het hart toe	dunner, met kleppen die terugstromen verhinderen	holle aders, longaders, aders op je handrug
haarvat	verbindt slagaders en aders	één cellaag dik: hier gebeurt de uitwisseling	in longen, spieren, alle organen

grootheid (volwassene, rust)	typische waarde
ademhaling	12 à 20 keer per minuut, ± 0,5 L per keer
hartslag	60 à 100 slagen per minuut
pompvolume van het hart	± 5 L per minuut
bloed	± 5 L
kerntemperatuur	36,5 à 37,5 °C
zuurstof per dag	± 0,84 kg (actief)
koolstofdioxide per dag	± 1,0 kg
energie uit voeding per dag	8 à 12 MJ; referentie-inname 8400 kJ
warmte	± 100 W gemiddeld

HET GEHEEL · 29.19

Waar het lichaam terugkomt

19/19

In dit hoofdstuk kwamen veel leerlijnen samen. Gaswisseling is **diffusie** uit het deeltjesmodel, energie uit voeding is de leerlijn **Energie**, de hartslaggrafiek is **Onderzoeken en meten**, en de temperatuurregeling is dezelfde regelkring als in de leerlijn **Regelen**. In Intermediate zie je de chemie achter de celademhaling (enzymen, ATP) en regelsystemen met hysterese; in Expert wordt het lichaam een regelsysteem met bloedsuikerregeling en biomedische sensoren.

F6 Het deeltjesmodel
Diffusie: zo gaan zuurstof en koolstofdioxide door de wand van de longblaasjes; verdampen van zweet koelt.

F15 Energie: vormen en omzettingen
Chemische energie in voedsel, en het rendement van je spieren (20 à 25 %).

F16 Warmte en temperatuur
Een mens geeft ongeveer 100 W warmte af: een kachel voor het station.

F25 Sensoren en automatisch regelen
Meten, beslissen, doen: de regelkring van het dakraam en die van je lichaamstemperatuur.

F27 Planten: fotosynthese en groei
Dezelfde celademhaling als in planten, maar zonder fotosynthese.

F28 Ecosystemen en kringlopen
De mens als consument; Biosphere 2 en zuurstof voor één bewoner.

I14 Reacties en stoichiometrie
Een bewoner ademt ongeveer 1 kg CO_2 per dag uit: een bron voor de planten van de kweekruimte.

I31 Regelsystemen
Regelkringen met hysterese, met de lichaamstemperatuur als voorbeeld uit de natuur.

I34 Enzymen en stofwisseling
Waarom 37 °C: enzymen en hun optimum; ATP als energiedrager.

E14 Gassen en de gaswetten
Partiële druk: zuurstof en koolstofdioxide in de lucht die je inademt.

E33 Het lichaam als regelsysteem
Homeostase en negatieve terugkoppeling in detail; hartslag, ECG en zuurstofsaturatie meten.

Habitat
Elke bewoner van het station heeft per dag ongeveer 0,84 kg zuurstof, 2,5 L drinkwater en 10 MJ voedsel nodig, en geeft 1 kg koolstofdioxide, 2 kg waterdamp en 116 W warmte af. Die getallen bepalen hoe groot de levensondersteuning moet zijn: in opdracht 29.13 stel je het levensondersteuningsplan voor één bewoner op. In Intermediate gebruiken de planten van de kweekruimte de koolstofdioxide van de bewoners, in Expert bewaakt een gezondheidsmonitor hun hartslag.

SAMENVATTING

In het kort

- Het lichaam is een systeem van organen: longen, darmen, bloedsomloop, nieren en huid zorgen samen dat elke cel glucose en zuurstof krijgt en haar afval kwijtraakt.
- Lucht gaat via luchtpijp en bronchiën naar de longblaasjes; daar diffundeert zuurstof naar het bloed en koolstofdioxide naar de lucht. Uitgeademde lucht bevat nog ±16 % zuurstof en ±4 % CO_2.
- Het hart heeft twee helften met elk een boezem en een kamer. De dubbele bloedsomloop: een kleine kring langs de longen, een grote langs het lichaam.
- Slagaders gaan van het hart weg, aders naar het hart toe, haarvaten verbinden ze; daar gebeurt de uitwisseling.
- Hartslag meet je door 15 s te tellen en × 4. Na inspanning daalt ze eerst snel en dan trager; wie getraind is, herstelt sneller.
- Energie van voeding: 17 kJ per gram koolhydraten en eiwitten, 37 kJ per gram vet, 8 kJ per gram vezels; 1 kcal = 4,184 kJ; een mens heeft 8 à 12 MJ per dag nodig en geeft ±100 W warmte af.
- Homeostase: je kerntemperatuur (±37 °C) wordt geregeld door een gesloten regelkring met sensoren, de hypothalamus als regelaar en zweten, bloedvaten en rillen als actuatoren.
- Eén bewoner heeft per dag ±0,84 kg zuurstof, ±2,5 L drinkwater en ±10 MJ voedsel nodig, en geeft ±1 kg CO_2, ±2 kg waterdamp en ±116 W warmte af.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

ademhaling
Het in- en uitademen van lucht (longademhaling); in elke cel gebeurt de celademhaling, waarbij zuurstof verbruikt wordt.

gaswisseling
Het uitwisselen van zuurstof en koolstofdioxide tussen de lucht in de longblaasjes en het bloed, door diffusie.

longblaasje
Piepklein luchtzakje aan het einde van de fijnste luchtwegen, omgeven door haarvaten; daar gebeurt de gaswisseling.

middenrif
Koepelvormige spier onder de longen; als hij samentrekt en afplat, stroomt er lucht in de longen.

dubbele bloedsomloop
Het bloed passeert per rondgang twee keer het hart: een kleine kring langs de longen en een grote kring langs het lichaam.

slagader
Bloedvat dat bloed van het hart wegvoert, met een dikke, elastische wand.

ader
Bloedvat dat bloed naar het hart terugvoert, met kleppen die het terugstromen verhinderen.

haarvat
Heel dun bloedvat met een wand van één cellaag, waar stoffen uitgewisseld worden.

hartslag
Het aantal keer dat het hart per minuut samentrekt; je voelt het als de pols.

kilojoule (kJ)
Eenheid van energie, 1000 J, gebruikt op voedingsetiketten; 1 kcal = 4,184 kJ.

homeostase
Het constant houden van de toestand in het lichaam (temperatuur, water, suiker, zuurstof) door regelkringen met terugkoppeling.

hypothalamus
Deel van de hersenen dat onder andere als 'thermostaat' van het lichaam werkt.

levensondersteuning
Alle systemen die mensen in een afgesloten ruimte (station, ruimteschip) zuurstof, water, voedsel en een veilige temperatuur geven, en afval verwerken.

F FUNDAMENTAL · DEEL F8 · ONTWERPEN EN MAKEN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 30

De ontwerpcyclus

Van een vaag probleem naar een oplossing die werkt, in rondes van proberen, meten en verbeteren

Ingenieurs bedenken zelden in één keer de juiste oplossing. Ze verkennen het probleem, leggen vast wat de oplossing moet kunnen, bedenken veel ideeën, kiezen onderbouwd, bouwen snel iets om te testen en leren uit wat misgaat. Dat is de **ontwerpcyclus**. In dit hoofdstuk leer je elke stap, en je stelt het **programma van eisen** van de meetkas op: de lat waarmee je in hoofdstuk 33 je eigen kas beoordeelt.

8× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 2× naslag · 2× verhaal · 1× het geheel · ± 6 lestijden

D Ontwerpen en maken



Karton, een breadboard en een veerunster: zo ziet ontwerpen er meestal uit, lang voor het product af is.

Na dit hoofdstuk

- Je kan de zeven stappen van de ontwerpcyclus noemen en uitleggen waarom je ze meer dan één keer doorloopt.
- Je kan een probleem verkennen met de vragen wie, wat, waar, wanneer en waarom, en de gebruikers leren kennen door te observeren en te interviewen.
- Je kan een programma van eisen opstellen met moet-eisen en wensen, meetbaar gemaakt met een grootheid, een grens met eenheid en een toets.
- Je kan een eis onderscheiden van een oplossing.
- Je kan ideeën genereren met een brainstorm, schetsen, bestaande oplossingen en een morfologisch overzicht.
- Je kan kiezen in twee stappen: zeven met de moet-eisen en wegen met een gewogen criteriatabel, en controleren of de keuze gevoelig is voor de gewichten.
- Je kan een prototype en een testplan maken, de resultaten evalueren en een verbetering voorstellen.

VERHAAL · 30.1

5127 keer opnieuw

1/19

Eind jaren 1970 ergerde de Britse uitvinder **James Dyson** zich aan zijn stofzuiger. Hoe voller de zak, hoe slechter hij zoog: het stof verstopte de poriën van de zak. In een zagerij had hij een **cycloon** gezien, een trechter waarin de lucht zo snel ronddraait dat het zaagsel naar de wand vliegt en naar beneden valt. Zou dat ook werken in een stofzuiger, zonder zak?

Van 1979 tot 1984 bouwde hij in zijn koetshuis het ene prototype na het andere, en hij nummerde ze allemaal. Telkens veranderde hij één ding: de vorm van de trechter, de breedte van de inlaat, de snelheid van de lucht. Hij testte, noteerde wat beter en wat slechter ging, en paste aan. Na ongeveer **5127 prototypes** werkte de cycloon zoals hij wou. Het gezin leefde in die jaren voor een deel van het loon van zijn vrouw, lerares beeldende kunst.

Geen enkele Britse fabrikant wou het toestel: stofzuigerzakken waren een goede handel. Een Japans bedrijf verkocht vanaf 1986 een versie onder de naam G-Force. Pas in 1993 bracht Dyson zijn eigen stofzuiger, de DC01, in Groot-Brittannië op de markt, en die werd daar al snel de best verkochte.

Waarom dit verhaal ertoe doet

5126 prototypes waren niet goed genoeg. Toch was geen enkel ervan verspild: elk toonde wat *niet* werkte. Zo werkt ontwerpen: niet in één rechte lijn van idee naar product, maar in **rondes** van bouwen, testen en verbeteren. Dat heet **iteratie**. In dit hoofdstuk leer je die rondes slim te organiseren, zodat je er geen vijf jaar over doet.



Elk prototype een genummerde les: wat werkt, wat niet, en wat de volgende keer anders moet.

UITLEG · 30.2

De ontwerpcyclus

2/19

In hoofdstuk 1 zag je het verschil tussen een **wetenschappelijke vraag** (hoe werkt het?) en een **technisch probleem** (hoe maken we iets dat werkt?). Voor een technisch probleem gebruik je de **ontwerpcyclus**. We delen hem op in zeven stappen:

1. **Probleem verkennen**: wat is het probleem eigenlijk, voor wie, waar en waarom?

2. **Programma van eisen**: waaraan moet de oplossing voldoen, meetbaar?
3. **Ideeën bedenken**: veel verschillende oplossingen, nog zonder te oordelen.
4. **Kiezen**: welke ideeën halen de moet-eisen, en welk scoort het best op de wensen?
5. **Prototype maken**: snel en goedkoop, net genoeg om te testen.
6. **Testen**: meten of het prototype de eisen haalt.
7. **Evalueren en verbeteren**: wat liep mis, wat kan beter, en wat doen we in de volgende ronde?

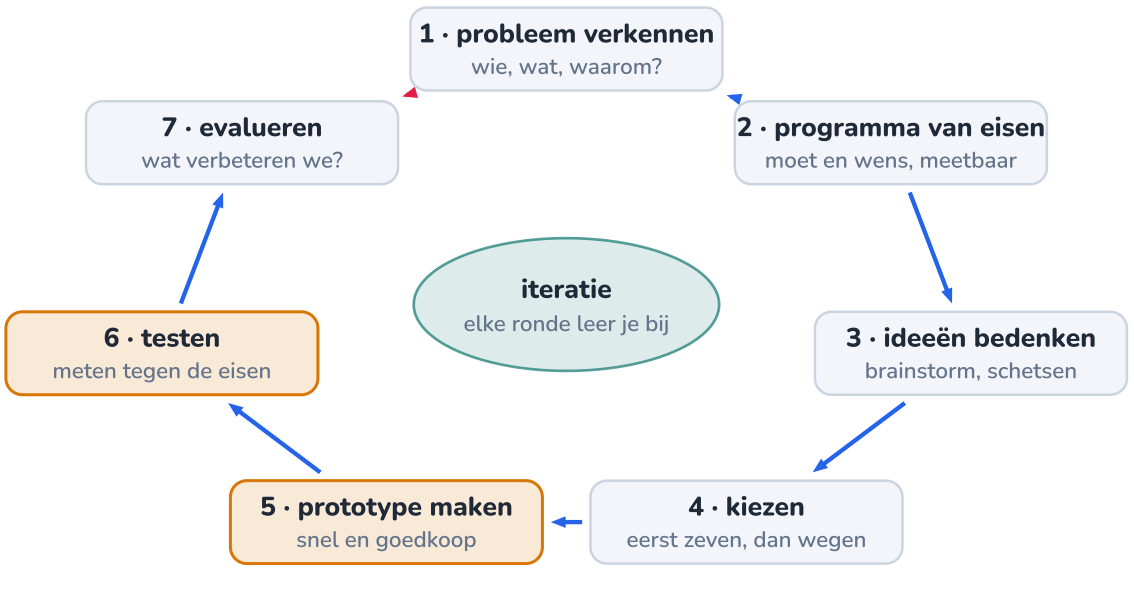
Na stap 7 begint een nieuwe ronde, maar niet altijd bij stap 1. Faalt een test, dan pas je het prototype aan (terug naar 5). Blijkt een idee niet te werken, dan kies je een ander (terug naar 3 of 4). En soms leert een test dat een eis zelf niet klopte (terug naar 2). Elke ronde levert kennis op.

Ontwerpen is geen rechte lijn

Op papier lijkt de cyclus een recept: stap 1, stap 2, klaar. In het echt spring je heen en weer. Wie tijdens het testen merkt dat de gebruiker iets anders nodig heeft, gaat terug naar de eisen. Dat is geen falen maar het doel van testen: fouten vinden terwijl ze nog goedkoop te herstellen zijn.

Dezelfde ruggengraat als onderzoeken

De onderzoekscyclus (hoofdstuk 2) en de ontwerpcyclus hebben iets gemeen: je probeert iets, je **meet** wat er gebeurt en je leert eruit. Een ontwerp zonder test is een gok, net als een besluit zonder proef.



Zeven stappen in een kring. De oranje stappen (prototype en testen) doorloop je het vaakst; de rode pijl start een nieuwe ronde.

UITLEG · 30.3

Het probleem verkennen

3/19

De grootste fout bij ontwerpen is een goed antwoord op de verkeerde vraag. Neem daarom de tijd om het probleem te **verkennen** voor je aan oplossingen denkt. Vijf vragen helpen:

vraag	voor de meetkas
Wie heeft het probleem, wie gebruikt de oplossing?	leerlingen die meten en verzorgen, de leerkracht, de technisch assistent, de planten

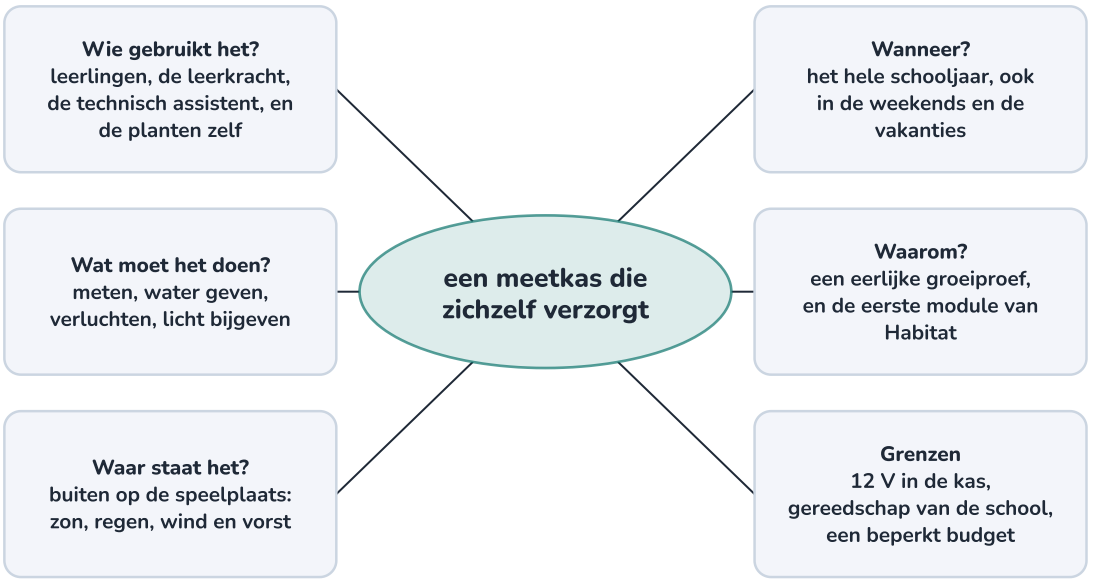
vraag	voor de meetkas
Wat moet er gebeuren?	meten, water geven, verluchten, licht bijgeven
Waar, in welke omgeving?	buiten, in zon, regen, wind en vorst
Wanneer, hoe lang?	het hele jaar, ook als niemand op school is
Waarom is het belangrijk?	een eerlijke groeiproef (hoofdstuk 27) en de eerste module van Habitat

Noteer ook de **grenzen**: wat ligt vast en kan je niet kiezen? Voor de meetkas: alleen 12 V in de kas (hoofdstuk 5), het gereedschap van de school, een beperkt budget.

Vat alles samen in een **probleemstelling**: één zin die zegt wat er opgelost moet worden, voor wie en waarom, *zonder* al een oplossing te kiezen. Een handige vorm is: *Hoe kunnen we … zodat …?*

Een goede probleemstelling laat ruimte

Slecht: *Hoe bouwen we een pomp met een sensor in de kas?* (de oplossing ligt al vast). Goed: *Hoe kunnen we de planten in de meetkas genoeg water geven, ook als er twee weken niemand is, zodat de groeiproef niet mislukt?* Die vraag laat een pomp toe, maar ook een wiek, een druppelzak of iets waaraan nog niemand dacht.



Een woordweb rond het probleem: zes vragen die je stelt voor je aan een oplossing denkt.

VERHAAL · 30.4

Een dunschiller voor stijve vingers

4/19

Eind jaren 1980 zag de Amerikaan **Sam Farber** zijn vrouw **Betsey** appels schillen voor een taart. Ze had artritis in haar handen, en de gewone metalen dunschiller met zijn dunne handvat deed pijn. Farber, die zijn loopbaan in keukengerei had doorgebracht, vroeg zich af waarom keukengerief zo weinig rekening hield met de handen die het vasthouden.

Samen met het ontwerpbureau **Smart Design** ging hij aan de slag. De ontwerpers praatten met mensen met artritis, met koks en met gewone gebruikers, en lieten hen allerlei proefmodellen van handvatten vastnemen. Het resultaat: een dik, ovaal handvat uit een zachte, rubberachtige kunststof, met kleine groeven waar je vingers en duim steun vinden. Het draait niet in je hand, ook niet als ze nat is. In 1990 kwam de reeks **OXO Good Grips** op de markt.

Het verrassende: niet alleen mensen met artritis kochten ze. Iedereen vond de dunschiller prettiger. Wat ontworpen was voor de moeilijkste gebruiker, bleek beter voor iedereen. Dat idee heet **inclusief ontwerpen**.

Wat je hieruit meeneemt

De ontwerpers vertrokken niet van hun eigen handen, maar van die van de gebruiker, en ze **keken** hoe mensen echt schillen in plaats van het te raden. Bij de meetkas is dat niet anders: leerlingen van 12 zijn kleiner dan hun leerkracht, en wie in het weekend water komt geven, heeft haast.



Een dik, zacht handvat met groeven: ontworpen voor stijve vingers, prettiger voor iedereen.

UITLEG · 30.5

De gebruiker leren kennen

5/19

Een ontwerp is pas goed als het werkt voor de mensen die het gebruiken, en die zijn bijna nooit precies zoals jij. Je leert ze kennen op drie manieren:

- **Observeren**: kijk hoe mensen het nu doen, zonder in te grijpen. Leerlingen die de klasplanten water geven: morsen ze? Vergeten ze het op vrijdag? Noteer wat je *ziet*, niet wat je denkt.
- **Interviewen**: stel **open vragen** (*Hoe doe je dat nu? Wat vind je lastig? Wat gebeurde er de laatste keer dat …?*). Een gesloten vraag (*Wil je een pomp?*) geeft maar ja of nee, en stuurt het antwoord.
- **Zelf ervaren**: probeer het zelf, liefst onder dezelfde omstandigheden: een bak van 4 kg optillen, of op een koude ochtend met handschoenen een klemhendel openen.

Vat wat je leerde samen in een **persona**: een verzonnen maar typische gebruiker, gebouwd uit je echte notities. Een persona helpt het team te blijven vragen: *zou Noor dit kunnen?*

Denk ook aan de **stille gebruikers** die niets kunnen zeggen. Voor de meetkas zijn dat de planten: hun 'wensen' (licht, water, niet boven 30 °C) haal je uit metingen en uit de biologie van hoofdstuk 27.

> **'Ik weet wel wat ze willen'**
> Ontwerpers die zichzelf als gebruiker nemen, maken toestellen voor mensen zoals zijzelf. Een knop op 1,70 m is voor een volwassene handig, voor een leerling van 12 niet. Vraag het, kijk het na, test het.



Een persona vat interviews samen in één persoon. Onderaan staat wat het voor het ontwerp betekent.

UITLEG · 30.6

Het programma van eisen: moet en wens

6/19

Het **programma van eisen** (PvE) is de lijst van alles waaraan de oplossing moet voldoen. Het is de lat waarmee je later elk idee en elk prototype meet. Je maakt twee soorten eisen:

- Een **moet-eis** is verplicht. Haalt een idee ze niet, dan valt het af, hoe goed het verder ook is. Voorbeeld: *in de kas alleen 12 V.*
- Een **wens** maakt de oplossing beter, maar is niet verplicht. Wensen gebruik je om ideeën te vergelijken. Voorbeeld: *het jaarverbruik is hoogstens 20 kWh.*

Een goede eis is **meetbaar**. Ze heeft drie delen:

1. een **grootheid** (temperatuur, kracht, massa, tijd, volume …);
2. een **grens met eenheid** (hoogstens 30 °C, minstens 15 cm);
3. een **toets**: hoe je nagaat of ze gehaald is.

vage wens	meetbare eis	toets
De kas mag niet te warm worden.	Op een zonnige aprildag hoogstens 30 °C in de kas.	temperatuur een dag lang loggen
Het raam moet makkelijk opengaan.	Hoogstens 10 N aan de voorrand.	trekken met een veerunster

vage wens	meetbare eis	toets
Genoeg water voor de vakantie.	Minstens 14 dagen zonder bijvullen bij 1,8 L per dag.	bruikbaar volume meten, verbruik volgen
De kas moet licht zijn.	Leeg hoogstens 25 kg.	wegen
Veilig voor leerlingen.	In de kas alleen 12 V; geen glas; geen scherpe randen.	checklist

Geef elke eis een **code** (M1, K2, W3 …) en noteer waar ze vandaan komt: van de gebruiker, van een wet of norm, van de natuur (de planten), of van een berekening. Een PvE is nooit af: als een test of een gebruiker iets nieuws leert, pas je het aan en geef je het een nieuw versienummer.

Een eis is geen oplossing

De kas moet een duwstang hebben is geen eis, maar al een gekozen oplossing. De eis erachter is: *het dakraam gaat automatisch open boven 28 °C*. Die eis laat ook andere oplossingen toe, zoals een wascilinder of een servo. Vraag bij elke eis: *zegt ze wát het moet doen, of al hoé?*

UITGEWERKT VOORBEELD · 30.7

Een vage wens meetbaar maken

7/19

Een leerling schrijft in het PvE van de meetkas: *De kas mag niet te warm worden.* Maak er een meetbare eis van, en zeg of het een moet-eis of een wens is.

GEGEVEN

- de vage wens: 'niet te warm'
- boven ongeveer 30 °C lijden de meeste kasplanten onder de hitte (hoofdstuk 4)
- op een zonnige aprildag werd het in een kas zonder verluchting 32,0 °C (hoofdstuk 4)

GEVRAAGD

- een meetbare eis met grootheid, grens, eenheid en toets
- moet of wens

OPLOSSING

1. **Waarom wil de gebruiker dit?** Te warm is slecht voor de planten, en de groeiproef mislukt als een deel van de planten door hitte beschadigd raakt. De 'gebruiker' hier is de plant.
2. **Welke grootheid?** De temperatuur van de lucht in de kas, in °C.
3. **Welke grens?** Uit de biologie: hoogstens 30 °C. Maar wanneer? Een eis die altijd moet gelden, ook bij een hittegolf van 38 °C buiten, haalt geen enkele kas zonder koeling. Kies een duidelijke situatie: een zonnige aprildag, zoals de dag die in hoofdstuk 4 gemeten werd.
4. **Welke toets?** Een dag lang elke 10 minuten de temperatuur in de kas meten (op planthoogte, in de schaduw) en het maximum aflezen.
5. **Moet of wens?** Een kas waarin de planten door hitte beschadigd raken, faalt: moet-eis.

ANTWOORD

K3 (moet): Op een zonnige aprildag is de luchttemperatuur in de kas (op planthoogte, in de schaduw) hoogstens 30 °C. ***Toets:*** **een dag loggen, elke 10 minuten, en het maximum aflezen.**

Klopt dit? Test je eis met twee vragen. Kan iemand anders nagaan of ze gehaald is, zonder jou te vragen wat je bedoelde? En laat ze meer dan één oplossing toe (een dakraam, een ventilator, schaduwdoek)? Twee keer ja: een goede eis. In hoofdstuk 25 haalde de meetkas met

haar automatische dakraam 28,2 °C op zo'n dag.

NASLAG · 30.8

Habitat: het programma van eisen van de meetkas (versie 1)

Dit is het PvE van de meetkas, opgebouwd uit wat je in de vorige hoofdstukken berekende en besliste. In de laatste kolom staat de **ontwerpwaarde**: wat het ontwerp volgens de berekening haalt, en in welk hoofdstuk dat staat. 'Te testen' betekent dat alleen een proef het kan uitwijzen. In hoofdstuk 33 bouw je de kas en toets je elke moet-eis. Codes: M maten, C constructie, K klimaat, W water, E energie, V veiligheid, G gebruik, P planten en onderzoek.

Probleemstelling. Hoe kunnen we een kleine kas bouwen die haar klimaat meet, de planten automatisch water geeft en op zonne-energie draait, zodat leerlingen er een eerlijke groeiproef in kunnen doen, ook als er twee weken niemand op school is?

Maten en constructie

code	eis	soort	toets	ontwerpwaarde (bron)
M1	binnenmaten 1,20 × 0,60 × 0,80 m (l × b × h), afwijking hoogstens 1 cm	moet	rolmeter	1,20 × 0,60 × 0,80 m (F3)
M2	12 plantenbakjes van 30 × 20 cm (bovenrand) op de plantentafel, 2 rijen van 6	moet	plaatsen	tafel 1,18 × 0,58 m (F10)
M3	reservoir onder de tafel, bruikbaar volume minstens 25,2 L	moet	vullen met maatbeker	26,4 L (F3)
C1	tafel met 12 volle bakken (471 N): doorbuiging hoogstens 3,0 mm	moet	belasten, meten	3,7 mm zonder middensteun: steun erbij (F11)
C2	bij een zijwaartse duw van 50 N bovenaan verschuift de bovenrand hoogstens 5 mm	moet	veerunster, lat	diagonalen en hoekplaatjes (F13); te testen
C3	de lege kas kantelt pas voorbij 30°	moet	berekening of kanteltest	40° (F13)
C4	verankerd: twee grondankers per lange zijde, elk minstens 100 N	moet	trekproef	te testen (Intermediate, H10)
C5	massa van de lege kas hoogstens 25 kg (twee personen dragen ze)	wens	weegschaal	± 19 kg (F7, F13)

Klimaat

code	eis	soort	toets	ontwerpwaarde (bron)
K1	meet temperatuur, licht en bodemvocht; temperatuur tot op 1 °C van een referentiethermometer	moet	vergelijken bij drie temperaturen	TMP36 met ijkcorrectie −1,5 °C (F25)
K2	dakraam automatisch open boven 28 °C, dicht onder 25 °C	moet	sensor opwarmen en afkoelen	geprogrammeerd (F25)
K3	op een zonnige aprildag hoogstens 30 °C in de kas	moet	dagverloop meten	28,2 °C, zonder raam 32 °C (F4, F25)
K4	opening van het dakraam aan de voorrand minstens 15 cm	moet	meten	20 cm (F12)
K5	bij stroomuitval met de hand te openen: hoogstens 10 N aan de voorrand	moet	veerunster	5,9 N (F12)
K6	het dichte raam blijft dicht bij een opwaartse kracht van 60 N	moet	trekken met veerunster	klemkracht 120 N (F12)
K7	's nachts minstens 1 °C warmer dan buiten	wens	nachtmeting binnen en buiten	0,8 °C; met nachtscherm 1,7 °C (F16)

code	eis	soort	toets	ontwerpwaarde (bron)
K8	extra licht van oktober tot maart: 4 uur per dag, automatisch bij weinig daglicht	wens	logboek, meting	ledstrip 4,8 W (F19-F21, F25)

Water en energie

code	eis	soort	toets	ontwerpwaarde (bron)
W1	automatisch water als het bodemvocht onder 30 % zakt: 30 s pompen (240 mL), dan 15 min wachten	moet	droge bak, kijken	geprogrammeerd (F25)
W2	minstens 14 dagen zonder bijvullen, bij 1,8 L per dag	moet	berekening + meting	14 dagen (F3)
W3	de pomp draait nooit droog	moet	reservoir leeg laten lopen	vlotterschakelaar in serie (F18)
W4	rood alarmlampje na 3 beurten zonder effect	moet	sensor uit de grond halen	geprogrammeerd (F24, F25)
W5	elk bakje een eigen druppelaar	moet	tellen, debiet per druppelaar	12 druppelaars (F14)
W6	minstens de helft van het water is regenwater	wens	jaarbalans	± 600 van 657 L (F9)
E1	van april tot september volledig op zonne-energie	moet	batterijspanning volgen	paneel 50 Wp; 43,7 Wh per dag nodig (F17, F21)
E2	batterij voor minstens 3 winterdagen zonder zon	moet	berekening, ontlaadtest	3,2 dagen (F21)
E3	jaarverbruik hoogstens 20 kWh	wens	energiemeter	19,4 kWh (F21)

Veiligheid, gebruik, planten en onderzoek

code	eis	soort	toets	ontwerpwaarde (bron)
V1	in de kas alleen 12 V en 5 V; de 230 V-adapter buiten, droog, hoger dan het water, achter een differentieel van 30 mA	moet	nazicht met checklist	zo ontworpen (F5, F18)
V2	elke 12 V-tak een eigen zekering, plus een hoofdzekering	moet	schema nakijken	0,5 / 1 / 0,25 A (F20)
V3	geen glas, geen scherpe randen of braampjes	moet	nazicht met de hand (handschoen)	polycarbonaat (F10)
G1	de voorkant kan open om de planten te verzorgen	moet	proberen	open voorkant met hoekplaatjes (F13)
G2	statuslampje: groen = alles in orde, rood = water nodig of alarm	moet	situaties nabootsen	D10/D11 (F24)
G3	reservoir bijvullen in hoogstens 5 minuten, zonder iets los te schroeven	wens	tijd opnemen	te testen
G4	materiaal hoogstens € 400 (zonder zonnepaneel en batterij)	wens	bonnetjes optellen	te berekenen (F33)
P1	groeiproef mogelijk: 12 bakjes, geloot over beide rijen, schaduwdoek per groep	moet	proefplan	zo gepland (F27)
P2	minstens 1 kg pluksla per teelt van 6 weken	wens	wegen	± 1,2 kg (F27)

Samen 34 eisen, waarvan 26 moet-eisen. Twee ervan haalt het ontwerp op papier nog niet: C1 (de tafel buigt 3,7 mm door, daarom komt er een steun in het midden) en de wens K7 (alleen met een nachtscherm). Zo'n tabel toont meteen waar het ontwerp nog werk vraagt.



Het programma van eisen hoort in het Habitat-portfolio: in hoofdstuk 33 vink je elke eis af met een meting.

UITLEG · 30.9

Ideeën bedenken

9/19

Het eerste idee is zelden het beste. Wie veel ideeën heeft, heeft meer kans dat er een goed tussen zit. Vier technieken:

1. Brainstormen. In groep, met een klok (bijvoorbeeld 10 minuten) en post-its. De regels: zoveel mogelijk ideeën; **geen kritiek** tijdens het brainstormen (oordelen komt later); voortbouwen op ideeën van anderen ('ja, en …'); gekke ideeën zijn welkom, want ze brengen je op nieuwe sporen. Variant: iedereen schrijft eerst alleen, in stilte, en daarna leg je alles samen. Zo komen ook de ideeën van stille groepsleden op tafel.

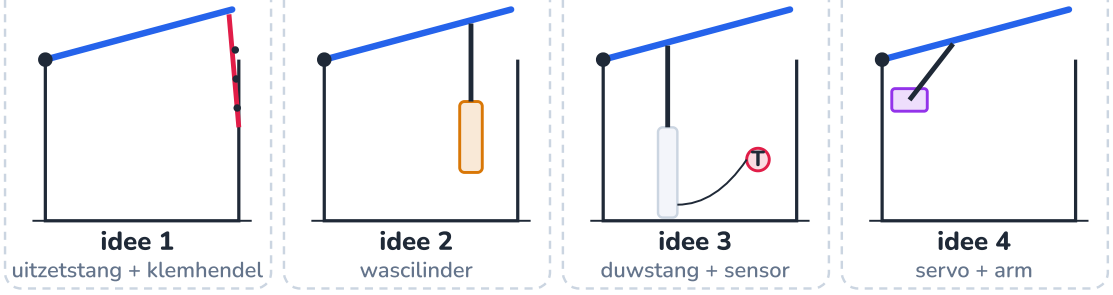
2. Schetsen. Een snelle schets zegt meer dan een zin, en toont meteen of iets kan passen. Maak *veel kleine* schetsjes van een halve minuut, geen mooie tekening (hoofdstuk 31 toont hoe).

3. Bestaande oplossingen. Bijna elk probleem is al eens (half) opgelost. Zoek in winkels, catalogi en op het internet, en ontleed wat je vindt: hoe werkt het, wat is er goed aan, wat niet? Kijk ook naar de natuur: een dennenappel gaat open als het droog is en sluit bij vocht, zonder motor.

4. Opdelen in functies. Een groot probleem heeft deelproblemen: water geven, verluchten, energie … Bedenk per deelfunctie oplossingen en combineer ze in een **morfologisch overzicht** (volgend voorbeeld).

Eerst verbreden, dan versmallen

Tijdens het bedenken maak je de stapel ideeën zo breed mogelijk. Pas bij het kiezen (stap 4) maak je hem smal. Wie beide tegelijk doet, schiet elk nieuw idee af voor het een kans kreeg.



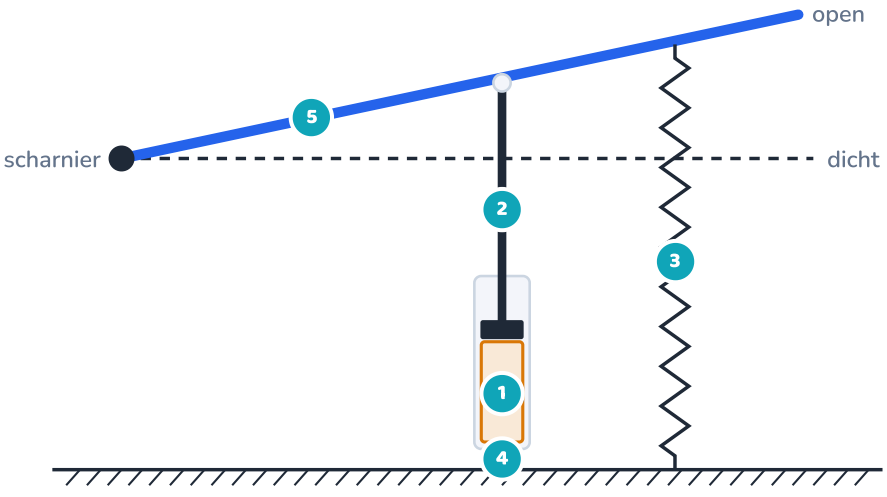
Vier ideeën om het dakraam van de meetkas te openen, elk in een halve minuut geschetst (zijaanzicht, scharnier achteraan).

ONTLEED · 30.10

Een bestaande oplossing: de automatische raamopener

10/19

In tuincentra vind je een raamopener voor serres die zonder stroom werkt. Het hart is een cilinder vol **was**. Was zet bij het smelten flink uit, 5 à 20 % van haar volume. Als de serre opwarmt, smelt de was en duwt ze een zuiger naar buiten die het raam openduwt. Koelt de serre af, dan stolt de was, krimpt ze, en trekt een veer het raam weer dicht. Bij veel modellen begint het raam rond 18 °C open te gaan en staat het rond 30 °C helemaal open. Een mooi voorbeeld om te ontleden voor je zelf iets bedenkt.



Werkingsschema, niet op schaal: de wascilinder staat op het vaste kader en duwt het raam open; de veer trekt het terug.

1 Cilinder met was
De sensor én de motor in één: de was voelt de temperatuur en levert de kracht. Geen draad, geen batterij, geen programma.

2 Zuiger en stang
Door het uitzetten van de was schuift de stang enkele centimeter uit. Via een hefboom (hoofdstuk 12) wordt dat een grotere opening aan de rand van het raam.

3 Terugtrekveer
Duwt de was niet meer, dan trekt de veer het raam dicht. Zonder veer zou het raam open blijven staan.

4 **Stelmoer**
Door de cilinder verder in of uit te draaien, kies je bij welke temperatuur het raam begint open te gaan.

5 **Raam met scharnier**
Draait rond het scharnier; de opener mag maar een beperkt gewicht optillen, dus het raam moet licht zijn.

UITGEWERKT VOORBEELD · 30.11

Een morfologisch overzicht voor de meetkas

11/19

De meetkas moet vijf dingen doen: water geven, het dakraam openen, energie leveren, de temperatuur meten en extra licht geven. Maak een morfologisch overzicht en stel drie verschillende concepten samen.

GEGEVEN

- vijf deelfuncties
- de ideeën uit de brainstorm en uit bestaande oplossingen

GEVRAAGD

- een morfologisch overzicht
- drie concepten (één oplossing per functie)

OPLOSSING

1 **Rijen: de functies.** Schrijf elke deelfunctie als werkwoord: water geven, dakraam openen … Zo denk je aan wat het moet *doen*, niet aan een voorwerp.

2 **Kolommen: oplossingen per functie.** Vul per rij drie of vier oplossingen in uit de brainstorm en uit wat bestaat. Een lege cel mag.

3 **Concepten: één cel per rij.** Trek een 'route' door de tabel. Concept A doet alles met de hand. Concept B werkt zonder elektronica: een wiek, een wascilinder, een min-maxthermometer. Concept C is de 'slimme' kas: sensoren en een microcontroller.

4 **Controleer of de keuzes samengaan.** Een pomp met vochtsensor heeft stroom en een microcontroller nodig: dat past bij 'zon + batterij', niet bij 'geen elektronica'. Een concept met onmogelijke combinaties schrap je.

5 **Tel de mogelijkheden.** Met $4 \times 4 \times 3 \times 4 \times 4 = 768$ combinaties is er veel meer mogelijk dan de drie concepten die je uitwerkt. Het overzicht toont dat je niet vastzit aan je eerste idee.

ANTWOORD

Drie concepten: A 'alles met de hand', B 'zonder elektronica' en C 'slimme meetkas'. Concept C is het ontwerp dat je in de vorige hoofdstukken uitwerkte: pomp met vochtsensor, duwstang met temperatuursensor, zonnepaneel met batterij en adapter als reserve, TMP36 en een ledstrip met lichtsensor.

Klopt dit? Een morfologisch overzicht kiest nog niet. Het zet de mogelijkheden naast elkaar zodat je bewust kiest. Dat doe je met de moet-eisen en een criteriatabel (volgende bladen).

functie	mogelijke oplossingen			
water geven	gieter met de hand (A)	katoenen wiek (B)	pomp + tijdschakelaar	pomp + vochtsensor (C)
dakraam openen	uitzetstang + klemhendel (A)	wascilinder (B)	duwstang + sensor (C)	servo + arm
energie	230 V-adapter (A)	zonnepaneel + batterij (B)	zon + batterij, adapter als reserve (C)	
temperatuur meten	thermometer aflezen (A)	min-maxthermometer (B)	TMP36 op de microcontroller (C)	NTC op de microcontroller
extra licht	geen	ledstrip met schakelaar (A)	ledstrip met tijdschakelaar (B)	ledstrip + lichtsensor (C)

A alles met de hand · B zonder elektronica · C slimme meetkas (gekozen)

Elke rij is een deelfunctie, elke cel een oplossing. De gekleurde letters tonen de route van drie concepten.

UITLEG · 30.12

Kiezen: eerst zeven, dan wegen

12/19

In hoofdstuk 10 koos je materialen met een **gewogen keuzetabel**: criteria, een gewicht per criterium, een score van 1 tot 5, score maal gewicht, optellen. Bij het kiezen tussen concepten doe je hetzelfde, met één stap ervoor.

Stap 1: zeven met de moet-eisen. Loop elk concept langs de moet-eisen. Haalt een concept er één niet, dan valt het af, ook al zou het op de rest hoog scoren. Een concept dat 's nachts 230 V in de kas brengt, kan geen enkele score redden.

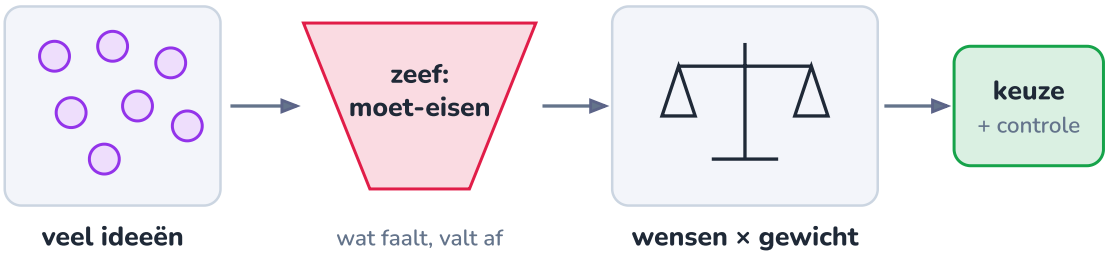
Stap 2: wegen met de wensen. De overgebleven concepten vergelijk je in een **gewogen criteriatabel**. De criteria zijn de wensen uit het PvE; het gewicht (1 tot 3) zegt hoe belangrijk elke wens is. Geef elke score met een reden, liefst een meting of een berekening.

Stap 3: controleren. Twee vragen, altijd:

- **Gevoeligheid**: verandert de winnaar als je de gewichten een beetje verschuift? Zo ja, dan is de keuze wankel en moet je de gewichten goed kunnen verdedigen.
- **Wat ziet de tabel niet?** Risico's, iets wat nog nooit getest werd, een gevoel van de gebruiker.

De tabel beslist niet, jij beslist

Een criteriatabel lijkt objectief, maar de criteria, de gewichten en de scores kies je zelf. Met andere gewichten wint soms een ander concept. De tabel dwingt je vooral om je keuze uit te leggen, en dat is haar grootste waarde.



Eerst vallen de concepten af die een moet-eis niet halen, daarna weeg je de rest met de wensen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 30.13

Habitat: welk watergeefsysteem?

13/19

Vijf concepten om de planten water te geven: A een katoenen wiek van het reservoir naar elk bakje, B een pomp met tijdschakelaar (elke dag even lang), C een pomp met vochtsensor, D een druppelzak met kraantje (zoals een infuus), E een klasgenoot die elke schooldag giet. Welk concept kies je?

GEGEVEN

- moet-eisen W2 (14 dagen zonder bijvullen), W5 (eigen druppelaar per bakje), V1 (alleen 12 V in de kas)
- de wensen uit het PvE

GEVRAAGD

- welke concepten de zeef halen
- een gewogen criteriatabel
- een controle van de keuze

OPLOSSING

1. **Zeven.** E haalt W2 niet: in weekends en vakanties geeft niemand water. E valt af. A tot D halen de drie moet-eisen (een wiek of een druppelzak per bakje voldoet aan W5; ook zonder stroom haal je V1).

2. **Criteria en gewichten.** Water naar behoefte (3: te veel en te weinig schaden de planten en de proef) en betrouwbaar (3: het moet twee weken alleen werken). Meetgegevens voor het onderzoek (2) en eenvoudig te bouwen (2). Energie (1) en prijs (1).

3. **Scores met redenen.** A: de wiek zuigt meer als de grond droog is (3), maar droogt uit of verslijmt, en het reservoir staat *onder* de tafel, te laag voor een wiek (2). B: elke dag evenveel, ook op een koele, bewolkte dag (2). C: water alleen als de grond droog is (5), de microcontroller weet wanneer en hoeveel (5), maar het is het moeilijkst om te bouwen (3). D: het debiet van een kraantje verloopt (1).

CRITERIUM (WENS)	GEWICHT	A: KATOENEN WIEK	B: POMP + TIJDSCHAKELAAR	C: POMP + VOCHTSENSOR	D: DRUPPELZAK MET KRAANTJE
geeft water naar behoefte	3	3 (9)	2 (6)	5 (15)	1 (3)
betrouwbaar, weinig onderhoud	3	2 (6)	4 (12)	4 (12)	2 (6)
levert meetgegevens voor het onderzoek	2	1 (2)	2 (4)	5 (10)	1 (2)
eenvoudig te bouwen en te herstellen	2	5 (10)	4 (8)	3 (6)	5 (10)
weinig energie	1	5 (5)	3 (3)	3 (3)	5 (5)
goedkoop	1	5 (5)	4 (4)	3 (3)	5 (5)
totaal (max. 60)		**37**	**37**	**49**	**31**

4. **Gevoeligheid.** Maak 'eenvoudig te bouwen' belangrijker dan 'naar behoefte' (gewichten 3 en 2): C 47, A 39, B 39, D 35. Laat de meetgegevens helemaal weg (gewicht 0): C 39, A 35, B 33, D 29. C blijft winnen, met minder voorsprong.

5. **Wat de tabel niet ziet.** C steunt helemaal op één sensor. Als die faalt (los, verkeerd geijkt), geeft de pomp te veel of niets. Daarom kreeg het ontwerp een alarm na drie beurten zonder effect (W4) en een vlotterschakelaar (W3).

ANTWOORD

Concept C, de pomp met vochtsensor, wint met 49 op 60 punten, ruim voor A en B (elk 37) en D (31). De keuze is robuust: ze blijft staan als je de gewichten verschuift.

Klopt dit? Vergelijk met hoofdstuk 25: daar werd dit concept uitgewerkt (30 s pompen onder 30 % vocht, 15 min wachten). De tabel verklaart *waarom* die keuze goed is, en toont ook haar zwakke plek: de sensor.

UITLEG · 30.14

Prototypes: snel, goedkoop, leerzaam

14/19

Een **prototype** is een voorlopige uitvoering van een idee, gemaakt om iets te **testen**. Het hoeft niet mooi te zijn, en ook niet af. De vraag is altijd: *wat wil ik met dit prototype leren?* Daarvan hangt af wat je maakt.

soort prototype	wat test je?	materiaal	voorbeeld in de meetkas
schetsmodel (ruw)	vorm, grootte, werkt het idee?	karton, papier, plakband, satéprikkers	kartonnen kas op schaal 1:5 met een scharnierend dak
functioneel prototype	werkt het mechanisme, de schakeling, het programma?	breadboard, losse onderdelen, 3D-print	pompje + vochtsensor op een breadboard in één bak
uitzichtmodel	hoe ziet het eruit, hoe voelt het?	3D-print, geverfd karton	de kast voor de elektronica
volledig prototype	alles samen, in de echte omgeving	de echte materialen	de meetkas zelf, op de speelplaats (F33)

Drie gewoontes van goede ontwerpers:

- **Snel en goedkoop eerst.** Een fout in karton kost een kwartier, een fout in aluminium een dag en geld. Dyson maakte zijn eerste cyclonen niet in de fabriek.
- **Eén vraag per prototype.** Wil je weten of de duwstang sterk genoeg is? Dan heb je geen planten en geen ledstrip nodig, alleen een raam van 1,2 kg en een stang.
- **Fouten zijn informatie.** Noteer wat mislukt en waarom. Dat is het materiaal voor de volgende ronde.

Ook een prototype is veilig

Snel werken betekent niet slordig werken met stroom of gereedschap. Een prototype met een pomp werkt ook op 12 V, en een breadboard met water in de buurt staat in een bak (hoofdstuk 5).



Een schetsmodel op schaal 1:5: in een kwartier weet je of het dakraam genoeg opengaat.

PROEF · 30.15

Drie rondes: een papieren tafel

15/19

ONDERZOEKSVRAAG

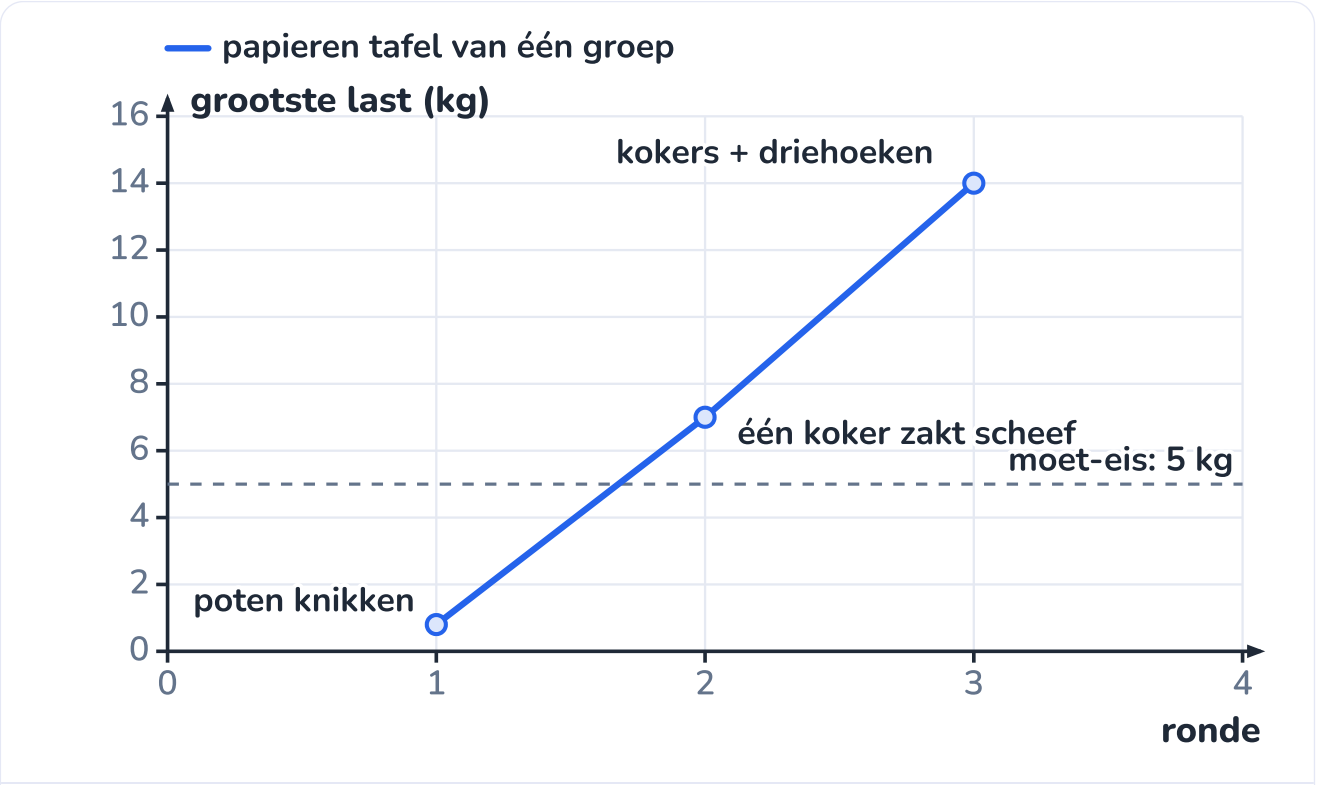
Hoeveel beter wordt een ontwerp als je het drie keer test en verbetert? Je bouwt een tafeltje uit papier dat een last moet dragen, en je doet drie rondes.

MATERIAAL

- per groep en per ronde: 4 vellen A4-papier, 50 cm plakband, schaar
- een plankje of stevig karton van 20 × 20 cm als tafelblad
- lasten van ongeveer 1 kg (pakken suiker of rijst, boeken)
- keukenweegschaal, lat, stopwatch

Veiligheid

Stapel de lasten niet hoger dan 30 cm en houd je voeten weg: als de tafel bezwijkt, valt alles tegelijk.



Elke ronde verhelpt de zwakke plek van de vorige. De stippellijn is de moet-eis van 5 kg.

WERKWIJZE

1. Het PvE: **moet**: minstens 15 cm hoog; het tafelblad van 20 × 20 cm ligt er vlak op; draagt minstens 5 kg gedurende 30 s; alleen het gegeven materiaal. **Wens**: zoveel mogelijk last.
2. Ronde 1: bedenk en bouw in 10 minuten een tafel. Belast ze stap voor stap met 1 kg tot ze bezwijkt. Noteer de grootste last die ze 30 s droeg en **hoe** ze bezweek.
3. Bespreek in de groep: waar begon het bezwijken? Wat verander je? Verander liefst één belangrijk ding.
4. Ronde 2 en 3: bouw met nieuw papier een verbeterde versie en test op dezelfde manier.
5. Zet de grootste last per ronde in een grafiek en schrijf bij elke ronde de oorzaak van het bezwijken.

WAARNEMING

Zo zagen de drie rondes van één groep eruit:

ronde	ontwerp	grootste last	zo bezweek ze	moet-eis 5 kg
1	vier stroken, in de lengte gevouwen tot een V	0,8 kg	de poten plooiden dubbel	niet gehaald
2	vier opgerolde kokers van ongeveer 3 cm doorsnede	7 kg	één koker stond scheef en knakte	gehaald
3	kokers met schuine papieren driehoeken ertussen, voetjes uit plakband	14 kg	het plakband boven op een koker scheurde	gehaald

VERKLARING

Elke test toonde de **zwakste plek** van het ontwerp, en de volgende ronde loste precies die op. Een gevouwen strook plooit makkelijk; een opgerolde koker is veel stijver (hoofdstuk 13: vorm telt meer dan materiaal). Een koker die scheef staat, knikt; driehoeken houden de kokers recht (de driehoek als stijf element). Na drie rondes droeg de tafel bijna twintig keer zoveel als na de eerste.

Merk op: de groep zocht in ronde 2 niet naar een totaal nieuw idee, maar naar de oorzaak van het bezwijken. Dat is iteratie. En wie niet had getest, had nooit geweten dat het plakband de volgende zwakke plek was.

UITLEG · 30.16

Testen en evalueren

16/19

Een test beantwoordt één vraag: **haalt het prototype de eis?** Maak daarom vooraf een **testplan**: per eis de test, het materiaal, het criterium en achteraf het resultaat. Zo weet je voor je begint wat 'gelukt' betekent, en kan je jezelf niets wijsmaken.

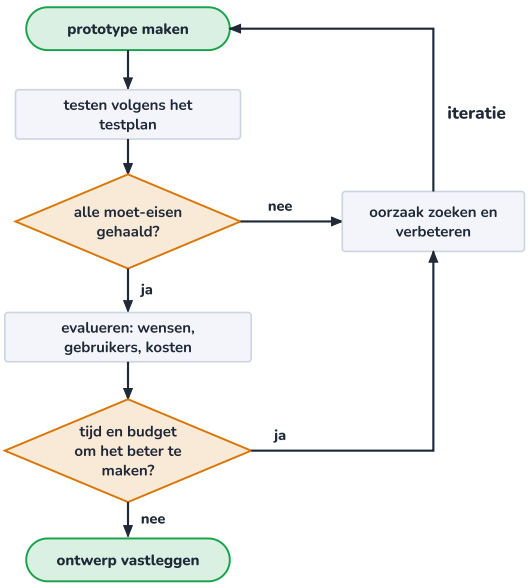
eis	test	criterium	resultaat	voldaan?
K4 opening ≥ 15 cm	duwstang helemaal uit, opening aan de voorrand meten met een lat	≥ 15 cm	20 cm	ja
K5 met de hand ≤ 10 N	duwstang los, veerunster aan de voorrand, langzaam optillen	≤ 10 N	6 N	ja
K2 open boven 28 °C	sensor met de hand opwarmen, temperatuur en raam volgen op het scherm	opent tussen 27,5 en 28,5 °C	28,0 °C	ja
K6 dicht bij 60 N	raam dicht en geklemd, 60 N omhoog trekken aan de voorrand	blijft dicht	blijft dicht	ja

Test zoveel mogelijk zoals het in het echt zal zijn. Een pomp die op de werkbank werkt, kan in de kas falen als het reservoir laag staat. En test ook met echte gebruikers: laat een leerling die het ontwerp niet kent het reservoir bijvullen, en kijk waar hij twijfelt.

Daarna **evalueer** je: welke eisen zijn gehaald, welke niet, en waarom? Wat vonden de gebruikers? Welke verbetering levert het meest op voor de minste moeite? En wanneer stop je? Als alle moet-eisen gehaald zijn en er geen tijd of geld meer is om de wensen beter te halen. Dan leg je het ontwerp vast: tekeningen (hoofdstuk 31), stuklijst en PvE met de testresultaten.

⚠ Eén keer meten is geen test

Net als bij onderzoek (hoofdstuk 2) herhaal je een test. Een dakraam dat één keer netjes opengaat, kan de tiende keer blijven haperen. Voor een eis als 'opent boven 28 °C' test je meerdere keren, en ook of het weer dichtgaat.



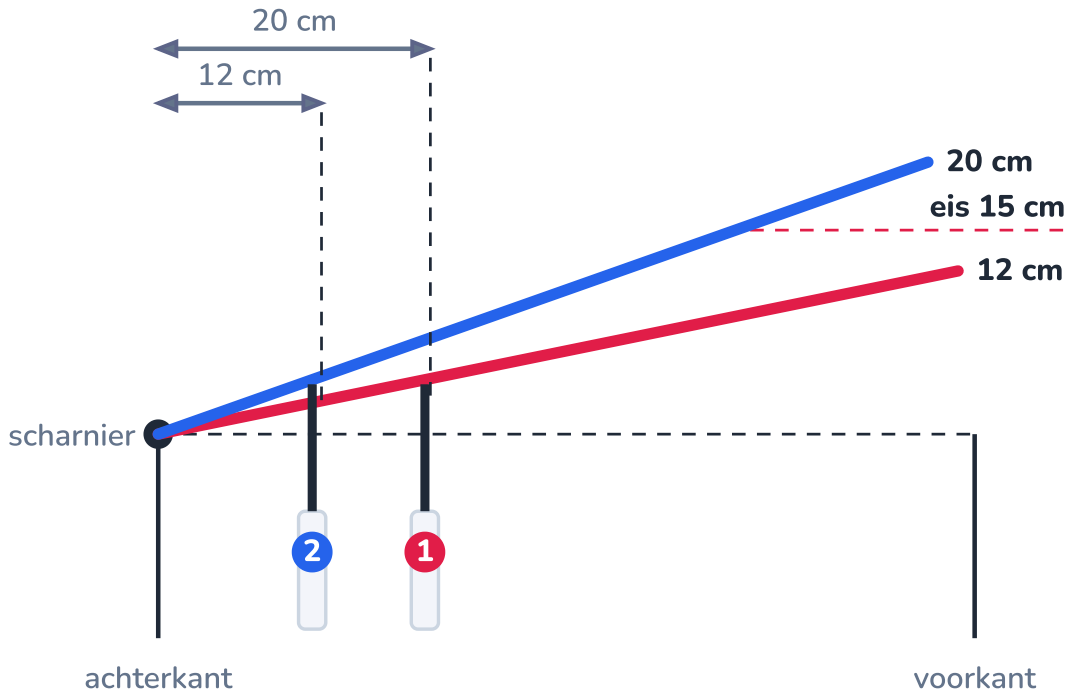
Testen en verbeteren als lus: een gefaalde moet-eis stuurt je terug; gehaalde eisen brengen je bij de evaluatie.

UITGEWERKT VOORBEELD · 30.17

Habitat: het dakraam getest en verbeterd

17/19

Het dakraam van de meetkas (0,60 × 0,60 m, 1,2 kg, scharnier achteraan) wordt geopend door een duwstang die hoogstens 40 N duwt en 4,0 cm uitschuift. In prototype 1 staat ze 20 cm van het scharnier. Volg de iteraties tot alle betrokken moet-eisen gehaald zijn: K2 (open boven 28 °C, dicht onder 25 °C), K3 (hoogstens 30 °C op een zonnige aprildag) en K4 (minstens 15 cm opening).



Prototype 1 (rood, stang op 20 cm) opent 12 cm en haalt de eis niet; prototype 2 (blauw, stang op 12 cm) opent 20 cm.

GEGEVEN

- zwaartekracht op het raam 11,8 N, aangrijpend op 0,30 m van het scharnier (hoofdstuk 12)
- duwstang: hoogstens 40 N, slag 4,0 cm
- metingen uit hoofdstuk 25

GEVRAAGD

- de testresultaten per ronde
- de verbetering per ronde

OPLOSSING

1. **Ronde 1, test K4.** Hoe dichter bij het scharnier, hoe kleiner de beweging: de voorrand stijgt $60/20 = 3$ keer zoveel als de stang, dus $3 \times 4{,}0 = 12\,\text{cm}$. De kracht is ruim genoeg: $11{,}8 \times 0{,}30/0{,}20 = 17{,}7\,\text{N}$. Maar 12 cm < 15 cm: **K4 niet gehaald**.

2. **Verbetering: de stang dichter bij het scharnier.** Op 12 cm wordt de opening $4{,}0 \times 60/12 = 20\,\text{cm}$ en de kracht $11{,}8 \times 0{,}30/0{,}12 = 29{,}5\,\text{N}$, onder de 40 N. **K4 gehaald**, met reserve voor de kracht (hoofdstuk 12, opdracht 12.12).

3. **Ronde 2, test K2.** Het eerste programma had één drempel: open boven 28 °C, dicht eronder. Op de gelogde aprildag schakelde de stang **166 keer**: rond 28 °C ging het raam open, de kas koelde een beetje af, het raam ging dicht, de kas warmde op … De stang zou snel verslijten. **Verbetering:** twee drempels (hysterese, hoofdstuk 25): open boven 28 °C, dicht pas onder 25 °C. Nog **14 schakelingen**.

4. **Ronde 3, test K3.** Op dezelfde zonnige dag bleef de kas onder **28,2 °C**, tegenover 32,0 °C zonder dakraam. K3 (hoogstens 30 °C) gehaald.

5. **Evaluatie.** Alle drie de moet-eisen zijn gehaald. Nieuw inzicht voor het PvE: bij stroomuitval moet het raam met de hand open kunnen (K5). Daarom maak je de stang met een pen los van het raam.

ANTWOORD

Drie rondes: (1) de stang verplaatst van 20 naar 12 cm van het scharnier: opening 12 → 20 cm, kracht 17,7 → 29,5 N; (2) één drempel vervangen door hysterese 28/25 °C: 166 → 14 schakelingen; (3) de kas blijft onder 28,2 °C. Eén nieuwe eis (K5) kwam uit de evaluatie.

Klopt dit? Merk op dat een verbetering een andere eis kan raken: dichter bij het scharnier geeft meer opening, maar vraagt meer kracht. Controleer na elke wijziging alle eisen die ze kan beïnvloeden, niet alleen de eis die faalde.

NASLAG · 30.18

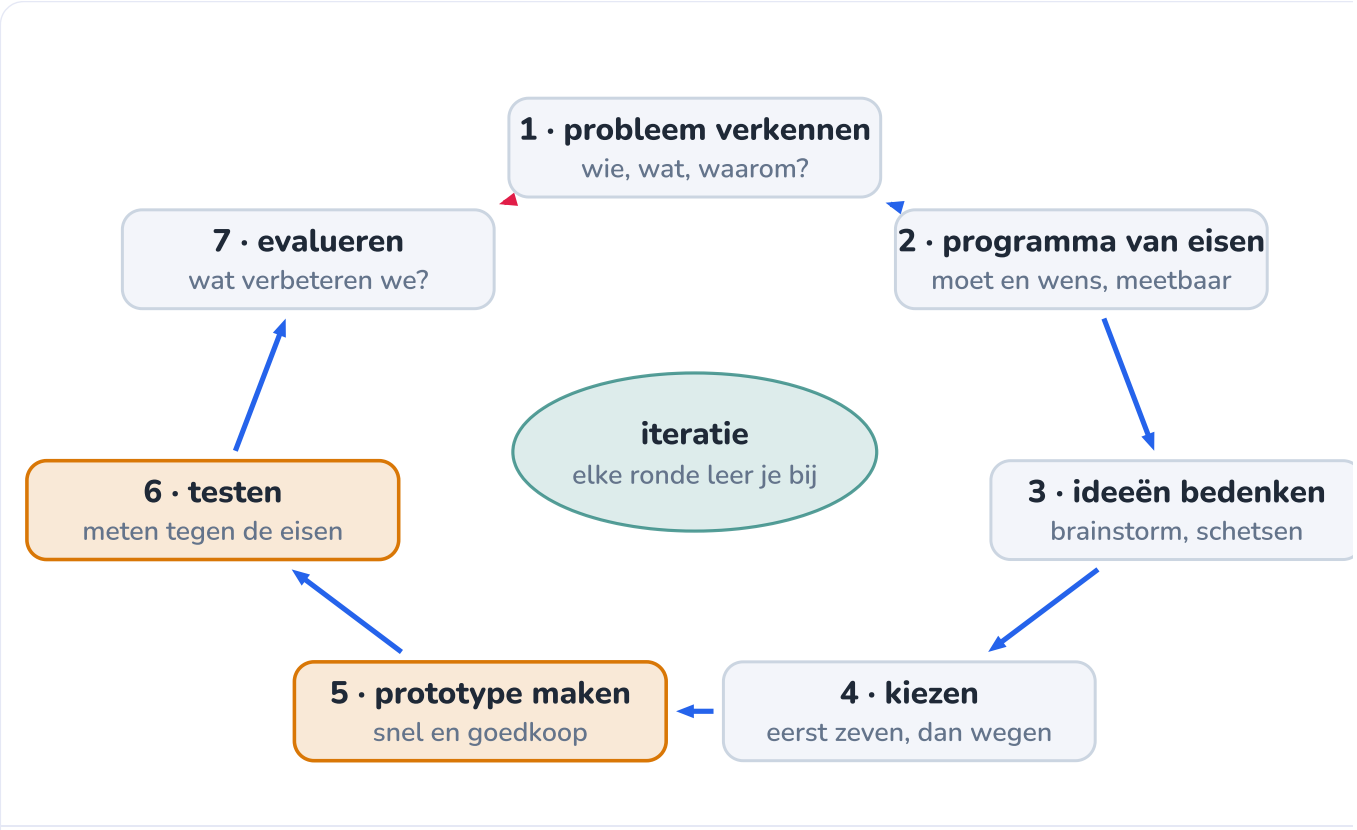
Overzicht: de ontwerpcyclus

De stappen, de regels en de sjablonen van dit hoofdstuk op één blad.

stap	wat je doet	resultaat
1 probleem verkennen	wie, wat, waar, wanneer, waarom, grenzen; observeren, interviewen, zelf ervaren	probleemstelling, persona
2 programma van eisen	moet-eisen en wensen, meetbaar, met code en bron	PvE (met versienummer)
3 ideeën bedenken	brainstorm, schetsen, bestaande oplossingen, morfologisch overzicht	veel ideeën, enkele concepten
4 kiezen	zeven met de moet-eisen, wegen met de wensen, gevoeligheid controleren	gekozen concept met motivatie
5 prototype maken	één vraag per prototype, snel en goedkoop eerst	testbaar prototype
6 testen	testplan: test, criterium, resultaat, herhalen	testrapport
7 evalueren en verbeteren	welke eisen gehaald, waarom niet, wat eerst verbeteren	volgende ronde of vastgelegd ontwerp

een meetbare eis heeft	voorbeeld
code en soort (moet of wens)	K4, moet
grootheid	opening aan de voorrand van het dakraam
grens met eenheid	minstens 15 cm
toets	stang helemaal uit, meten met een lat
bron	planten (verluchting), berekening in hoofdstuk 12

brainstormregels	gewogen criteriatabel
zoveel mogelijk ideeën	1. zeef: concepten die een moet-eis niet halen vallen af
geen kritiek tijdens het brainstormen	2. criteria = wensen, met een gewicht van 1 tot 3
voortbouwen op elkaars ideeën	3. score van 1 tot 5 per concept, met een reden
gekke ideeën mogen	4. score × gewicht, optellen
eerst alleen, dan samen (stille ideeën tellen ook)	5. gevoeligheid en 'wat ziet de tabel niet?'



De ontwerpcyclus.

HET GEHEEL · 30.19

Waar de ontwerpcyclus naartoe leidt

19/19

De ontwerpcyclus is de ruggengraat van de leerlijn **ontwerpen en maken**. Je gebruikte hem al zonder hem zo te noemen: bij de keuzetabel voor het kasframe, het dakraam met de hefboom, het schema van de verlichting en de regeling die water geeft. De volgende twee hoofdstukken geven je het gereedschap om een ontwerp vast te leggen (technisch tekenen) en te maken (CAD en 3D-printen). In Intermediate en Expert wordt de cyclus groter: parametrisch ontwerpen, duurzaamheid in cijfers, en in Expert het V-model van systems engineering, waarin elke eis traceerbaar is tot een test.

F1 Wat is STEM?
Wetenschappelijke vraag of technisch probleem; de ontwerpcyclus naast de onderzoekscyclus.

F2 Onderzoeken: van vraag tot besluit
Herhalen en eerlijk testen: een test is een kleine proef.

F10 Materialen en hun eigenschappen
De gewogen keuzetabel, hier gebruikt om concepten te kiezen.

F12 Hefbomen en mechanismen
De berekening van de duwstang die in het voorbeeld getest en verbeterd werd.

F25 Sensoren en automatisch regelen
De regeling met hysterese: een iteratie in de software.

F31 Technisch tekenen
Ideeën schetsen en een gekozen ontwerp vastleggen in een werktekening.

F32 Van idee tot object: CAD en 3D-printen
Een prototype snel maken met CAD en een 3D-printer.

F33 Integratieproject: de meetkas
Het PvE van dit hoofdstuk is de lat: elke moet-eis wordt getest.

I37 Parametrisch ontwerpen
Ontwerpen met parameters, zodat een verbetering een getal is in plaats van een nieuw model.

I38 Duurzaam ontwerpen
Duurzaamheid als criterium: levenscyclus en een keuzematrix met milieucriteria.

E45 Systems engineering en het V-model
Eisen functioneel en niet-functioneel, traceerbaar tot een test; het V-model; trade-

offstudies.

Habitat

Het programma van eisen van de meetkas (versie 1) telt 34 eisen, waarvan 26 moet-eisen, elk met een toets en een ontwerpwaarde. Bewaar het in je portfolio: in hoofdstuk 33 bouw je de kas en toets je elke moet-eis. In opdracht 30.13 vul je het aan voor de verlichting en de groeiproef.

SAMENVATTING

In het kort

- De ontwerpcyclus: probleem verkennen, programma van eisen, ideeën bedenken, kiezen, prototype maken, testen, evalueren en verbeteren. Je doorloopt hem in rondes: iteratie.
- Verken het probleem met wie, wat, waar, wanneer, waarom en de grenzen, en vat het samen in een probleemstelling zonder oplossing ('Hoe kunnen we ... zodat ...?').
- Leer de gebruiker kennen door te observeren, open vragen te stellen en het zelf te ervaren; een persona vat dat samen. Vergeet de stille gebruikers niet.
- Een programma van eisen bevat moet-eisen (verplicht) en wensen (om te vergelijken). Een goede eis is meetbaar: grootheid, grens met eenheid en toets. Een eis zegt wat, niet hoe.
- Ideeën: brainstorm zonder kritiek, veel kleine schetsen, bestaande oplossingen ontleden, en een morfologisch overzicht per deelfunctie.
- Kiezen: eerst zeven met de moet-eisen, dan wegen met een gewogen criteriatabel, en controleren of de keuze gevoelig is voor de gewichten.
- Een prototype beantwoordt één vraag, snel en goedkoop. Een testplan zegt vooraf wat 'gelukt' is. Elke test toont de zwakste plek voor de volgende ronde.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

ontwerpcyclus
Werkwijze om een technisch probleem op te lossen: probleem verkennen, eisen opstellen, ideeën bedenken, kiezen, prototype maken, testen, evalueren en verbeteren, zo nodig in meerdere rondes.

iteratie
Een ronde van de cyclus opnieuw doorlopen met wat je in de vorige ronde leerde.

probleemstelling
Een korte zin die zegt wat er opgelost moet worden, voor wie en waarom, zonder al een oplossing te kiezen.

persona
Een verzonnen maar typische gebruiker, opgebouwd uit echte interviews en observaties, die ontwerpers helpt aan de gebruiker te denken.

programma van eisen
De lijst van alles waaraan de oplossing moet voldoen (moet-eisen) en wat ze liefst ook kan (wensen), meetbaar geformuleerd.

moet-eis
Een eis waaraan elke oplossing moet voldoen; wie ze niet haalt, valt af.

wens
Een eis die de oplossing beter maakt maar niet verplicht is; wensen gebruik je om te vergelijken.

meetbare eis
Een eis met een grootheid, een grens met eenheid en een toets, zodat iedereen kan nagaan of ze gehaald is.

brainstorm
Snel en zonder kritiek zoveel mogelijk ideeën verzamelen, en voortbouwen op die van anderen.

morfologisch overzicht

gewogen criteriatabel

prototype

Tabel met de deelfuncties van een ontwerp en per functie enkele oplossingen; een concept is één keuze per rij.

Tabel waarin je concepten scoort op wensen met een gewicht; score maal gewicht, opgeteld per concept.

Een snelle, voorlopige uitvoering van een idee om iets te testen.

testplan

Per eis: hoe je test, met welk criterium, en wat het resultaat is.

F FUNDAMENTAL · DEEL F8 · ONTWERPEN EN MAKEN

HANDBOEK · HOOFDSTUK 31

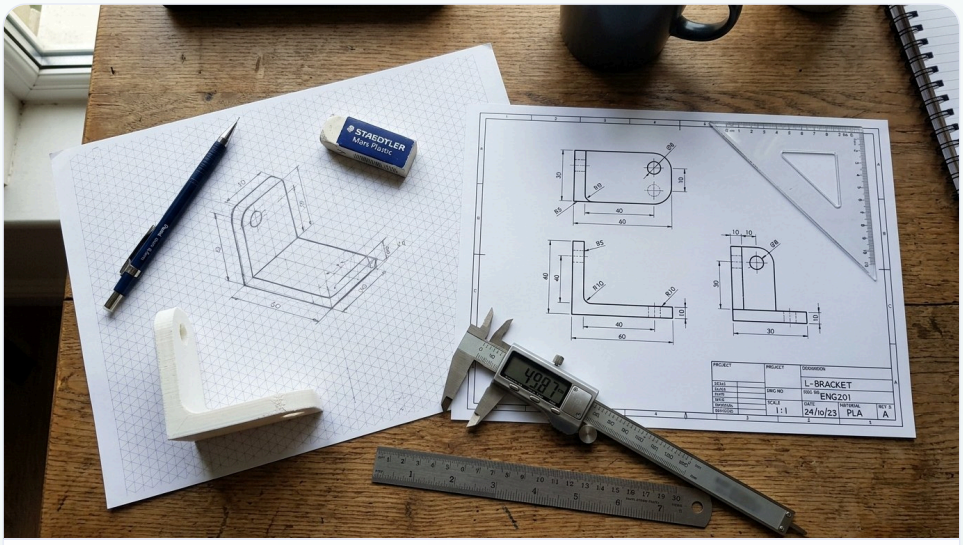
Technisch tekenen

Van een krabbel op papier naar een tekening waarmee iemand anders je onderdeel kan maken

Een idee dat alleen in je hoofd zit, kan niemand bouwen. Met een **schets** leg je het snel uit aan je team; met een **werktekening** kan iemand anders het exact maken, zonder één vraag te stellen. In dit hoofdstuk leer je schetsen uit de vrije hand, isometrisch tekenen, een voorwerp in drie aanzichten zetten volgens de Europese afspraak, en het bematen, op schaal, met de juiste lijnen en een stuklijst. Je eindigt met de werktekening van de plantenbak van de meetkas.

9× uitleg · 5× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · ± 7 lestijden

D Ontwerpen en maken · W Wiskundig modelleren



Schets, werktekening en het echte onderdeel: drie keer hetzelfde, elk voor een ander doel.

Na dit hoofdstuk

- Je kan een eenvoudig voorwerp uit de vrije hand schetsen, met lichte hulplijnen en goede verhoudingen, ook een cirkel.
- Je kan een voorwerp isometrisch tekenen op een isometrisch raster (assen onder 30°, ware lengte langs de assen), met cirkels als ellipsen.
- Je kan het vooraanzicht, het bovenaanzicht en het linkerzijaanzicht tekenen en correct plaatsen volgens de Europese projectie.
- Je kan zichtbare randen, verborgen randen en hartlijnen tekenen met de juiste lijnsoort.
- Je kan een tekening bematen volgens de afspraken: maatlijnen, maathulplijnen, maatgetallen in mm, elke maat één keer.
- Je kan rekenen met schaal (1:2, 1:5, 2:1) en een passende schaal kiezen.
- Je kan een titelblok en een stuklijst lezen en invullen.

VERHAAL · 31.1

Een tekenmethode als militair geheim

1/19

Rond 1765 kreeg de jonge Franse wiskundige **Gaspard Monge** aan de militaire school van Mézières een lastige opdracht: bereken hoe de muren van een vesting moeten staan zodat de soldaten erachter beschut zijn tegen vijandelijk vuur. Dat rekenwerk duurde normaal dagen. Monge loste het op met een **tekening**: hij tekende het terrein en de muren in twee aanzichten, van boven en van voren, op één blad,

zo dat elk punt in beide aanzichten precies op dezelfde lijn lag. Zo kon hij hoogtes en afstanden gewoon opmeten.

De commandant geloofde eerst niet dat het zo snel kon. Toen hij zag dat het klopte, werd de methode jarenlang als **militair geheim** bewaard. Pas in 1795 mocht Monge ze aan studenten doceren, en in 1799 verscheen zijn boek *Géométrie descriptive*. De aanzichten die je in dit hoofdstuk leert, komen rechtstreeks uit zijn werk.

Een tweede stap zette de Engelse professor **William Farish** in Cambridge. In 1822 beschreef hij hoe je een voorwerp in één tekening kan tonen, met drie assen onder gelijke hoeken en alle lengtes langs die assen op ware grootte: de **isometrie** (Grieks: gelijke maat). Hij gebruikte ze om de toestellen en machinemodellen uit zijn lessen nauwkeurig te tekenen.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Een goede tekening is een **taal**: wie de afspraken kent, leest ze zonder uitleg. In een fabriek in een ander land, of op een 3D-printer die jouw bestand print, moet de tekening alles zeggen. Daarom zijn de regels van technisch tekenen internationaal vastgelegd (in de ISO-normen), net zoals de SI-eenheden uit hoofdstuk 3.



Grondplan en vooraanzicht op één blad: zo rekende Monge vestingmuren uit met een tekening.

UITLEG · 31.2

Schets en werktekening

2/19

Technisch tekenen heeft twee gezichten.

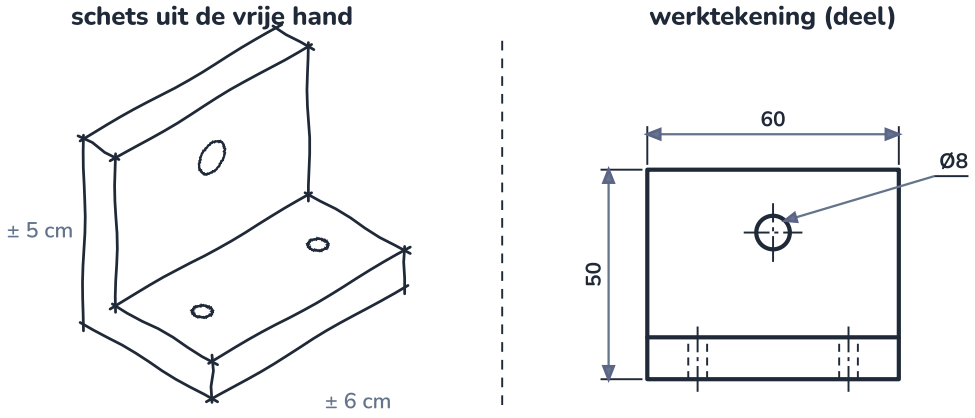
Een **schets** maak je uit de vrije hand, snel, zonder lat. Ze hoeft niet op schaal te zijn, maar de **verhoudingen** kloppen ongeveer. Je schetst om te denken (hoofdstuk 30: ideeën bedenken), om iets uit te leggen aan je team, of om een bestaand voorwerp op te meten. Maten mogen erbij, als ruwe waarden (± 6 cm).

Een **werktekening** is nauwkeurig en volledig. Ze bevat alle maten in millimeter, de juiste lijnsoorten, de schaal, en een titelblok en een stuklijst. Iemand die het voorwerp nooit gezien heeft, moet het ermee kunnen maken, of het nu met een zaag, een 3D-printer of een lasersnijder is.

	schets	werktekening
gereedschap	potlood, vrije hand	lat, geodriehoek of CAD
schaal	verhoudingen ongeveer juist	vaste schaal (1:1, 1:5, 2:1 …)
maten	ruw, soms geen	alle maten, elk één keer, in mm
doel	denken, uitleggen, onthouden	laten maken, controleren, bewaren
tijd	seconden tot minuten	een half uur tot uren

Het voorwerp van dit hoofdstuk

Als voorbeeld gebruiken we de **hoeksteun** van de duwstang die het dakraam van de meetkas opent (hoofdstuk 12 en 25): een L-vormig blok van 60 × 40 × 50 mm met twee gaten voor schroeven M4 en één gat voor de pen van de duwstang. Klein, maar met alles wat een tekening moeilijk maakt: gaten, een trede en verborgen randen.



Links een schets in isometrie, rechts een stuk van de werktekening (vooraanzicht) van dezelfde hoeksteun.

UITGEWERKT VOORBEELD · 31.3

Schetsen uit de vrije hand: de plantenbak

3/19

Schets de plantenbak van de meetkas in isometrie: bovenaan 30 × 20 cm, onderaan 28 × 18 cm, 12 cm hoog, bovenaan open.

GEGEVEN

- bovenrand 30 × 20 cm, bodem 28 × 18 cm, hoogte 12 cm
- potlood HB, gom, geen lat

GEVRAAGD

- een isometrische schets met goede verhoudingen

OPLOSSING

1. **Houding.** Houd het potlood losjes en een beetje verder van de punt dan bij het schrijven. Trek lijnen in korte, lichte streken, liefst naar je toe of van links naar rechts; draai het blad als het beter gaat.

2 **Stap 1: omhullende doos, licht.** Schets een doos van 30 × 20 × 12 in isometrie: een verticale lijn voor de hoek vooraan, twee lijnen onder ongeveer 30° voor de lengte en de breedte. Schat de verhoudingen: de lengte is anderhalve keer de breedte, de hoogte iets meer dan de helft van de breedte. Controleer door met je potlood te 'viseren': houd het op armlengte en vergelijk lengtes.

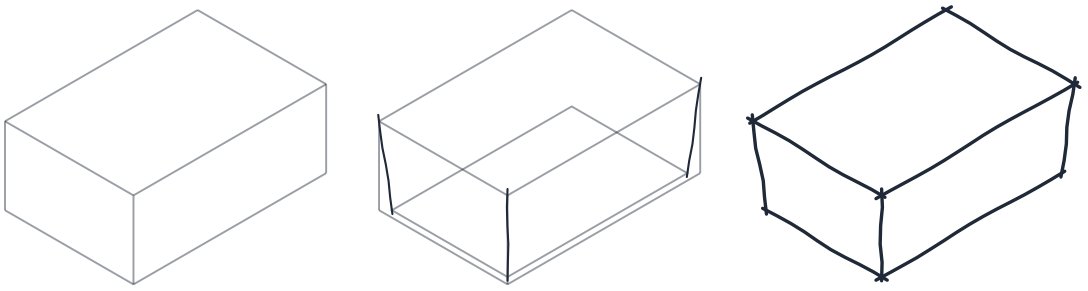
3 **Stap 2: de bodem en de schuine ribben.** De bodem is aan elke kant 1 cm kleiner. Duid op het grondvlak van de doos een rechthoek aan die 1 cm naar binnen ligt, en verbind de hoeken van de bovenrand met de hoeken van die bodem.

4 **Stap 3: zichtbare lijnen donker.** Trek de randen die je echt ziet donkerder: de bovenrand helemaal (de bak is open), de ribben vooraan en links, de bodemranden vooraan en links. Door de opening zie je ook de binnenkant van de achter- en de rechterwand. Hulplijnen laat je licht staan of gom je weg.

ANTWOORD

Een schets met drie laagjes: lichte hulplijnen voor de doos, schuine ribben naar een kleinere bodem, en donkere zichtbare randen.

Klopt dit? Vergelijk je schets met de figuur: klopt de verhouding lengte : breedte : hoogte (30 : 20 : 12)? Ook een cirkel schets je met hulplijnen: een vierkant, een kruis, de diagonalen met de straal erop, en dan korte boogjes door acht punten.

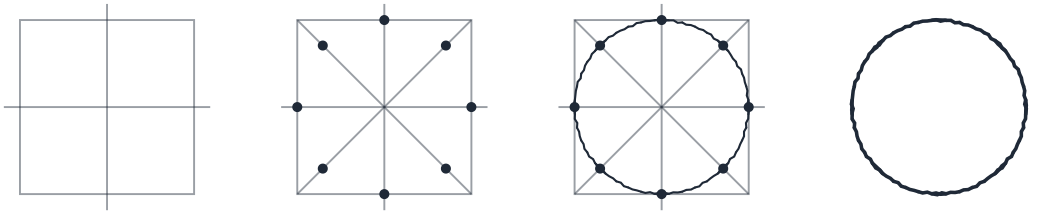


1 · omhullende doos, licht

2 · bodem 1 cm in, schuine ribben

3 · zichtbare lijnen donker

De plantenbak in drie stappen: doos, schuine ribben, donker aanzetten.



1 · kruis en vierkant

2 · diagonalen, straal afpassen

3 · boogjes door 8 punten

4 · donker aanzetten

Een cirkel uit de vrije hand: met een vierkant en acht punten wordt hij rond.

UITLEG · 31.4

Isometrisch tekenen

4/19

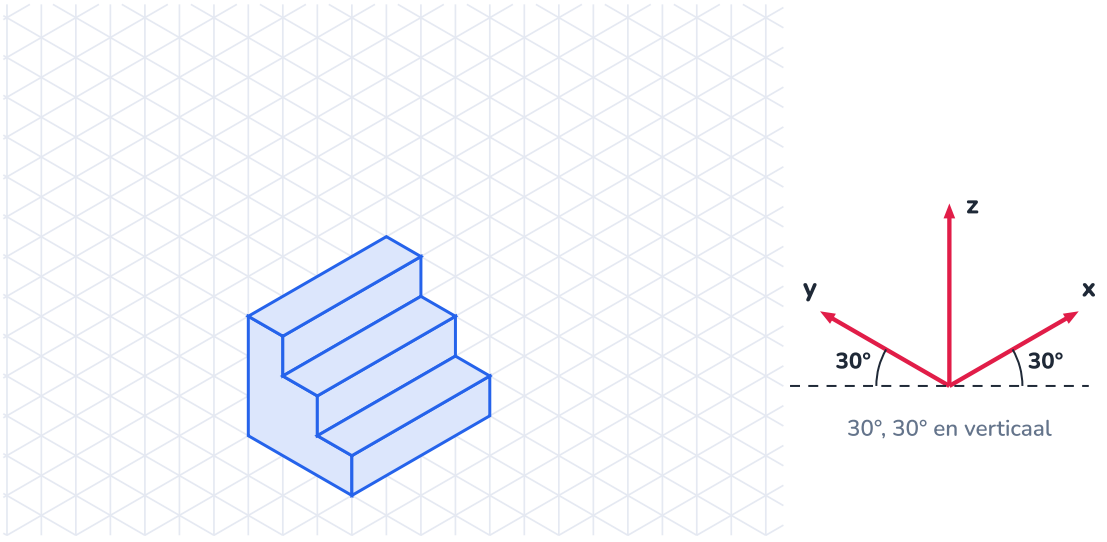
Een **isometrische tekening** toont een voorwerp in één beeld, met drie zijden tegelijk: de bovenkant, de voorkant en een zijkant. De afspraken:

- De drie assen staan onder **120°** van elkaar: één **verticaal** (de hoogte) en twee onder **30°** met de horizontale (de breedte en de diepte).
- Lengtes **langs** de assen teken je op **ware grootte** (of op schaal). Daarom kan je erop meten.
- Randen die in het echt evenwijdig zijn, blijven in de tekening evenwijdig. Er zijn geen verdwijnpunten zoals in een foto.
- Schuine randen (die niet evenwijdig aan een as lopen) teken je **niet** door te meten, maar door hun twee eindpunten langs de assen te zoeken en ze te verbinden.

Het makkelijkst teken je op **isometrisch rasterpapier**: een raster van lijnen onder 30°, 30° en verticaal. Elk hokje langs een rasterlijn is dan bijvoorbeeld 10 mm. Het trapblok in de figuur is 40 mm breed en 30 mm diep, met treden van 10 mm: je telt gewoon hokjes.

Isometrie is geen foto

Op een foto lijken verre dingen kleiner, en evenwijdige lijnen lopen naar elkaar toe. In isometrie niet: een rib achteraan is even lang getekend als dezelfde rib vooraan. Daardoor ziet een isometrische tekening er soms een beetje 'te lang' uit, maar je kan erop meten. Daarom gebruiken ingenieurs het, en kunstenaars liever perspectief.



Een trapblok van 40 × 30 × 30 mm op isometrisch raster (één hokje = 10 mm). Rechts de drie assen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 31.5

Stap voor stap: de hoeksteun isometrisch

5/19

Teken de hoeksteun isometrisch: een voet van 60 × 40 × 10 mm, achteraan een opstaande lip van 60 × 10 × 40 mm (samen 50 mm hoog), twee verticale gaten van Ø 4,5 mm in de voet en een gat van Ø 8 mm door de lip.

GEGEVEN

- breedte 60, diepte 40, hoogte 50 mm
- voet 10 mm dik, lip 10 mm dik
- gaten Ø 4,5 en Ø 8 mm

GEVRAAGD

- een isometrische tekening

OPLOSSING

1. **Omhullende doos.** Teken licht een doos van 60 × 40 × 50: vanuit de onderste hoek vooraan de breedte (60) onder 30° naar rechts, de diepte (40) onder 30° naar links, de hoogte (50) verticaal. Werk de doos af met evenwijdige lijnen.

2 **Uitsnijden.** Wat hoort er niet bij? Het blok boven de voet en vóór de lip: 60 breed, 30 diep, 40 hoog. Duid de trede aan: op 10 mm hoogte een lijn over de voorkant, op 30 mm diepte de voorkant van de lip.

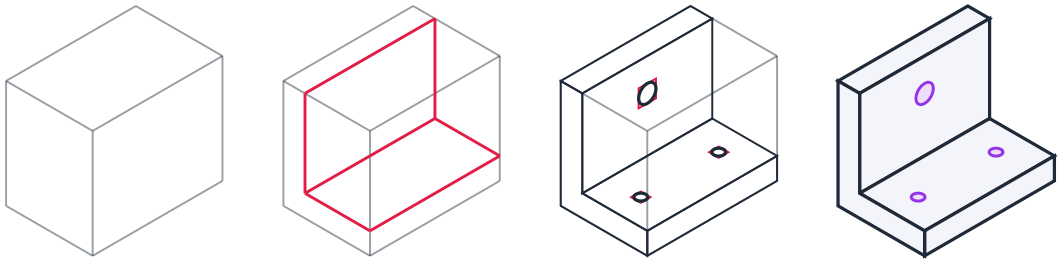
3 **Gaten.** Een cirkel wordt een ellips. Teken eerst het vierkant rond de cirkel als ruit (zijden evenwijdig aan de assen), duid de middens van de zijden aan en teken de ellips die de ruit in die vier punten raakt. Voor het gat van Ø 8 ligt de ruit in het vlak van de lip, voor de gaten van Ø 4,5 op de voet.

4 **Afwerken.** Trek alle zichtbare randen donker. Verborgen randen laat je in een isometrische tekening meestal weg: de tekening moet vooral duidelijk zijn.

ANTWOORD

Een L-vormig blok in isometrie met drie ellipsen: twee liggend op de voet, één rechtop in de lip.

Klopt dit? Tel de zichtbare vlakken: de voorkant van de voet, de bovenkant van de voet, de voorkant van de lip, de bovenkant van de lip en de L-vormige linkerzijde. Zie je er een vlak minder of meer, dan is er een rand verkeerd.



1 · omhullende doos 2 · uitsnijden 3 · gaten: ruit en ellips 4 · zichtbare lijnen donker

Doos, uitsnijden, ruiten en ellipsen, donker aanzetten.

UITLEG · 31.6

Cirkels in isometrie

6/19

Een cirkel op een vlak van het voorwerp zie je in isometrie schuin, en daardoor als een **ellips**. Je tekent ze in drie stappen:

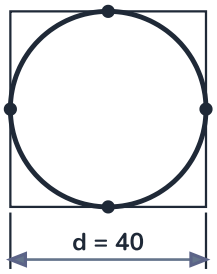
1. Teken het **vierkant** rond de cirkel (zijde = diameter) als **ruit** in het juiste vlak: de zijden lopen langs de twee assen van dat vlak.
2. Duid de **middens** van de vier zijden aan: daar raakt de cirkel het vierkant, dus raakt de ellips de ruit.
3. Teken de ellips door die vier punten, met de **lange as langs de lange diagonaal** van de ruit.

Hoe ellips-vormig? In een isometrische tekening met ware lengtes langs de assen is de lange as van de ellips ongeveer **1,22 keer** de diameter, de korte as ongeveer **0,71 keer** de diameter. Op het bovenvlak ligt de lange as horizontaal; op de zijvlakken staat ze schuin, onder 60° met de horizontale.

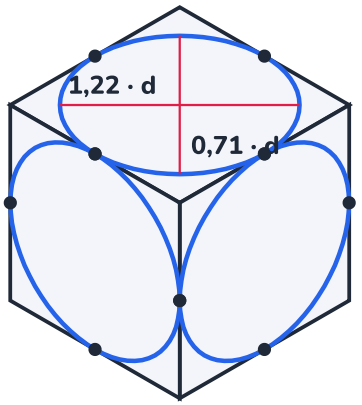
Sjablonen en CAD

Voor nette tekeningen bestaan er ellipssjablonen voor isometrie. In een CAD-programma (hoofdstuk 32) teken je gewoon een cilinder: de computer rekent de ellips uit.

cirkel in een vierkant



dezelfde cirkel op drie vlakken van een kubus



Links een cirkel van 40 mm in een vierkant, rechts dezelfde cirkel op de drie zichtbare vlakken van een kubus van 40 mm.

UITLEG · 31.7

Aanzichten: kijken door een glazen doos

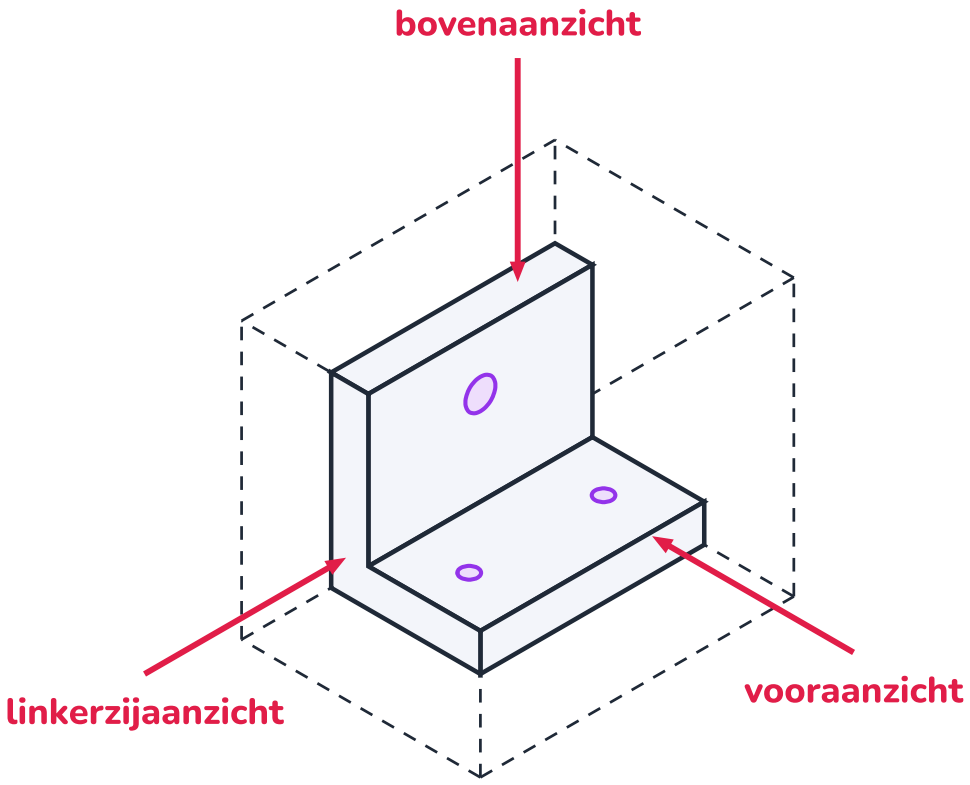
7/19

Een isometrische tekening toont hoe een voorwerp eruitziet, maar niet elke maat is er goed op te zien: schuine randen en cirkels zijn vervormd. Voor een werktekening gebruik je daarom **aanzichten**. Stel je het voorwerp voor in een **glazen doos**, en kijk **loodrecht** door één wand. Je ziet dan één zijde op ware grootte, zonder vervorming:

- het **vooraanzicht**: je kijkt van voren. Kies als voorkant de zijde die het meest vertelt over de vorm;
- het **bovenaanzicht**: je kijkt van boven;
- het **linkerzijaanzicht**: je kijkt van links.

Elk aanzicht toont twee van de drie afmetingen. Het vooraanzicht toont breedte en hoogte, het bovenaanzicht breedte en diepte, het zijaanzicht diepte en hoogte. Daarom heb je er meestal minstens twee, en vaak drie nodig.

Wat je in een aanzicht niet ziet omdat er materiaal voor zit, teken je toch, als **verborgen lijn** (streeplijn). Zo toont het vooraanzicht van de hoeksteun de twee gaten in de voet als streeplijnen.



Drie kijkrichtingen, telkens loodrecht op een wand van de denkbeeldige glazen doos.

PROEF · 31.8

Hoeveel aanzichten heb je nodig?

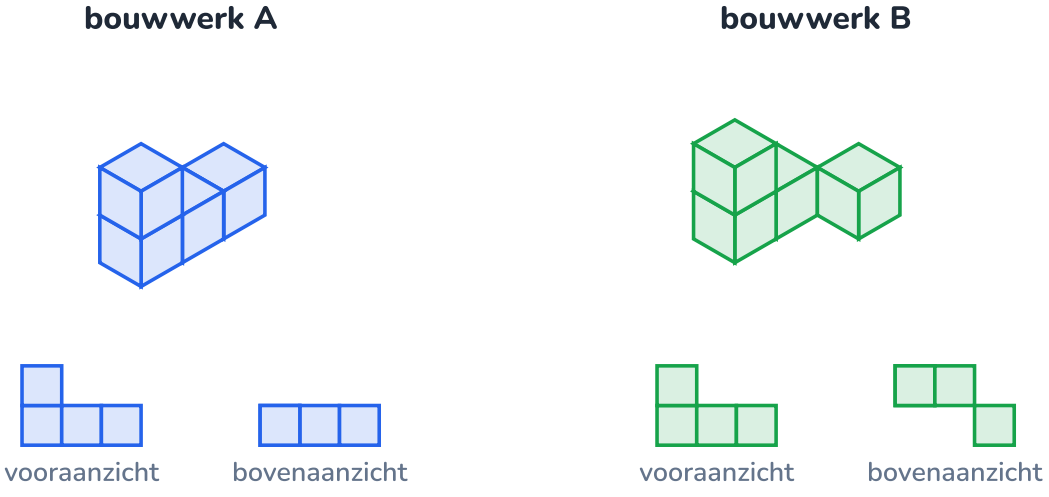
8/19

ONDERZOEKSVRAAG

Kan een klasgenoot een bouwwerk van kubusjes exact namaken als hij alleen jouw tekening ziet? Met hoeveel aanzichten lukt dat?

MATERIAAL

- 10 kubusjes per leerling (Multilink, LEGO-blokjes van 2 × 2 of suikerklontjes)
- een map als scherm
- ruitjespapier (1 hokje = 1 kubusje)
- potlood



Bouwwerk A en B: hetzelfde vooraanzicht, een ander bovenaanzicht.

WERKWIJZE

1. Leerling A bouwt achter het scherm een bouwwerk van 6 kubusjes. Elk kubusje steunt op de tafel of op een ander kubusje.
2. Ronde 1: A tekent op ruitjespapier **alleen het vooraanzicht**. B bouwt het na zonder te kijken. Vergelijk.
3. Ronde 2: nieuw bouwwerk; A tekent **vooraanzicht en bovenaanzicht**. Ronde 3: nieuw bouwwerk, **drie aanzichten**.
4. Wissel van rol en herhaal. Noteer per ronde of het nagebouwde werk juist was.
5. Verzamel de resultaten van de hele klas.

WAARNEMING

Zo zagen de resultaten van een klas van 12 duo's eruit:

ronde	tekening	juist nagebouwd
1	alleen vooraanzicht	3 van 12
2	voor- en bovenaanzicht	8 van 12
3	drie aanzichten	11 van 12

In ronde 3 ging het één keer mis: een kubusje zat verstopt achter andere kubusjes, en was in geen enkel aanzicht te zien.

VERKLARING

Eén aanzicht toont maar twee afmetingen: van de diepte weet je niets. De twee bouwwerken in de figuur hebben hetzelfde vooraanzicht, maar in B staan drie kubusjes naar achter. Pas het bovenaanzicht toont het verschil. Met drie aanzichten is bijna alles eenduidig; wat dan nog verborgen blijft, teken je met verborgen lijnen (bij een echt voorwerp) of met een extra aanzicht. Dat is precies waarom een werktekening meestal drie aanzichten heeft.

UITLEG · 31.9

Europese projectie: waar staat wat?

9/19

Hoe je de aanzichten op het blad legt, is een internationale afspraak. In België en de rest van Europa gebruik je de **Europese projectie**, ook **eerstehoeksprojectie** genoemd:

- het **bovenaanzicht** staat **onder** het vooraanzicht;
- het **linkerzijaanzicht** staat **rechts** van het vooraanzicht.

Dat lijkt omgekeerd, maar denk aan de glazen doos: je kijkt van links *door* het voorwerp heen naar de wand erachter, rechts. Klap je de wanden van de doos open tot één plat blad, dan belandt het beeld van links rechts, en het beeld van boven onderaan.

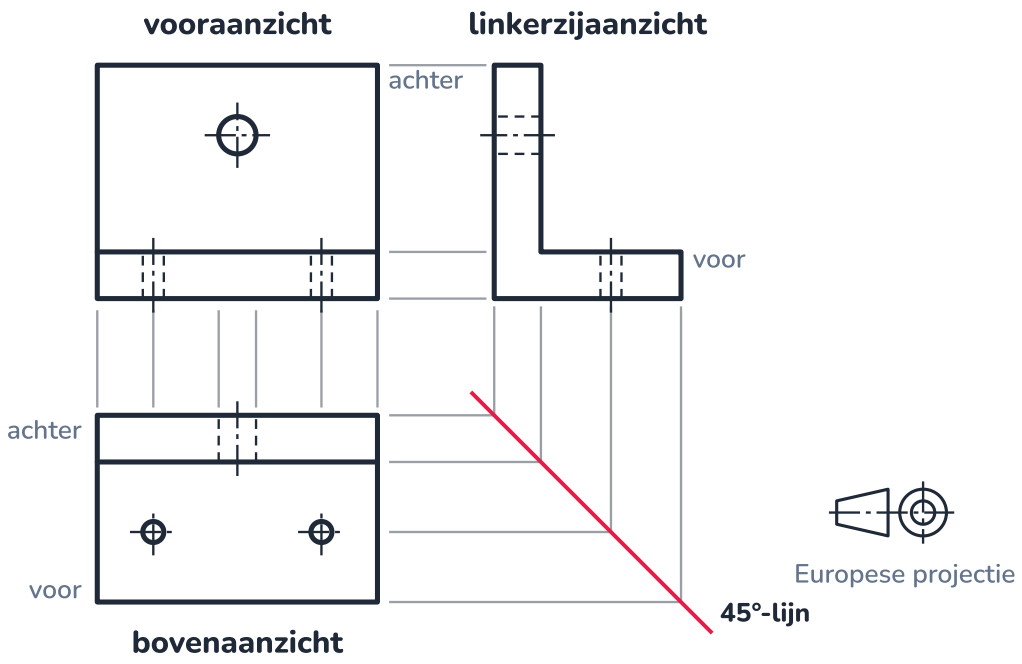
De aanzichten staan **uitgelijnd**:

- vooraanzicht en zijaanzicht naast elkaar: **dezelfde hoogte**, je trekt horizontale projectielijnen;
- vooraanzicht en bovenaanzicht onder elkaar: **dezelfde breedte**, verticale projectielijnen;
- bovenaanzicht en zijaanzicht: **dezelfde diepte**. Die breng je over met een hulplijn onder 45°.

Let op de diepte: zowel in het bovenaanzicht als in het linkerzijaanzicht ligt de **achterkant** van het voorwerp het dichtst bij het vooraanzicht, en de voorkant het verst ervan. Op elke werktekening staat het **projectiesymbool** in het titelblok: een afgeknotte kegel met twee cirkels. Bij de Europese projectie wijst de smalle kant van de kegel van de cirkels weg.

Amerikaanse projectie

Onder meer in de Verenigde Staten, Canada en Japan gebruikt men de **derdehoeksprojectie**: het bovenaanzicht staat boven, het rechterzijaanzicht rechts. Een tekening uit zo'n land lees je dus anders. Kijk altijd eerst naar het projectiesymbool; in de derdehoeksprojectie wijst de smalle kant van de kegel naar de cirkels.



Projectielijnen verbinden de aanzichten; de rode 45°-lijn brengt de diepte van het bovenaanzicht naar het zijaanzicht.

UITGEWERKT VOORBEELD · 31.10

De hoeksteun in drie aanzichten

10/19

Teken de hoeksteun in vooraanzicht, bovenaanzicht en linkerzijaanzicht, in Europese projectie, met zichtbare randen, verborgen randen en hartlijnen.

GEGEVEN

- de hoeksteun (isometrie, vorig voorbeeld)
- gaten Ø 4,5 op 12 en 48 mm van links, 15 mm van voren; gat Ø 8 op 30 mm van links, 35 mm hoog

GEVRAAGD

- drie aanzichten

OPLOSSING

1. **Vooraanzicht.** Een rechthoek van 60 × 50. De trede zie je als een lijn op 10 mm hoogte: daar gaat de bovenkant van de voet over in de voorkant van de lip. Het gat van Ø 8 zie je als een cirkel. De gaten in de voet zitten achter de voorkant: twee paar verticale streeplijnen van 0 tot 10 mm hoog, op $12 \pm 2{,}25$ en $48 \pm 2{,}25$ mm.

2. **Bovenaanzicht**, recht onder het vooraanzicht, even breed. Een rechthoek van 60 × 40. De lip is bovenaan 50 mm hoog, de voet 10 mm: de rand ertussen zie je als een lijn op 10 mm van de achterkant (die ligt boven, het dichtst bij het vooraanzicht). De gaten van Ø 4,5 zijn cirkels. Het gat van Ø 8 loopt horizontaal door de lip: van boven verborgen, dus twee streeplijnen op 26 en 34 mm.

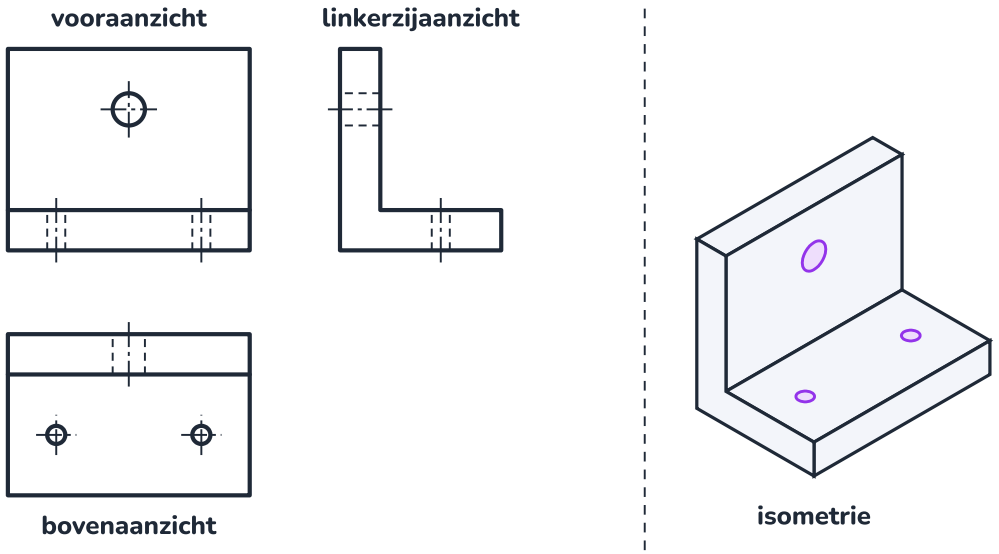
3 **Linkerzijaanzicht**, rechts van het vooraanzicht, even hoog. Een L: de lip links (de achterkant ligt het dichtst bij het vooraanzicht), de voet naar rechts. Beide gaten zijn verborgen: het gat van Ø 8 als twee horizontale streeplijnen in de lip, de gaten van Ø 4,5 (die in dit aanzicht samenvallen) als twee verticale streeplijnen in de voet.

4 **Hartlijnen** door het midden van elk gat: een kruis bij elke cirkel, een lijn langs de as van elk verborgen gat. Ze steken een paar millimeter buiten het gat uit.

ANTWOORD

Drie uitgelijnde aanzichten (zie figuur). Elk gat komt in twee aanzichten voor: één keer als cirkel, één keer als streeplijnen.

Klopt dit? Controleer met projectielijnen: elke rand in het vooraanzicht ligt recht boven dezelfde rand in het bovenaanzicht en op dezelfde hoogte als in het zijaanzicht. De cirkel van Ø 8 in het vooraanzicht ligt op dezelfde hoogte (35 mm) als de streeplijnen in het zijaanzicht.



De drie aanzichten links (Europese projectie) en de isometrische tekening rechts: dezelfde maten, andere taal.

UITLEG · 31.11

Lijnsoorten

11/19

Op een technische tekening vertelt elke **lijnsoort** iets anders. De belangrijkste vier (volgens de norm ISO 128):

lijn	gebruik
dikke volle lijn	zichtbare randen en contouren
dunne volle lijn	maatlijnen, maathulplijnen, verwijslijnen, arcering
dunne streeplijn	verborgen randen
dunne streep-stiplijn	hartlijnen: het midden van een gat of een symmetrie-as

Een dikke lijn is ongeveer twee keer zo dik als een dunne, bijvoorbeeld 0,5 mm en 0,25 mm. Met een potlood druk je harder voor de dikke lijn, of gebruik je een zachter potlood (2B).

Enkele gewoontes:

- Bij een **gat** kruisen de hartlijnen elkaar in het midden, op een **streepje** (niet op een stip), en ze steken 2 à 3 mm buiten de cirkel uit.

- Vallen twee lijnen samen, dan wint de belangrijkste: zichtbaar gaat voor verborgen, verborgen voor hartlijn.
- Een streeplijn begint en eindigt met een streepje, en raakt een zichtbare rand.



dikke volle lijn
zichtbare randen en contouren

dunne volle lijn
maatlijnen, maathulplijnen, verwijslijnen, arcering

dunne streeplijn
verborgen randen en contouren

dunne streep-stiplijn
hartlijnen van gaten, symmetrie-assen

De vier lijnsoorten en hun gebruik.

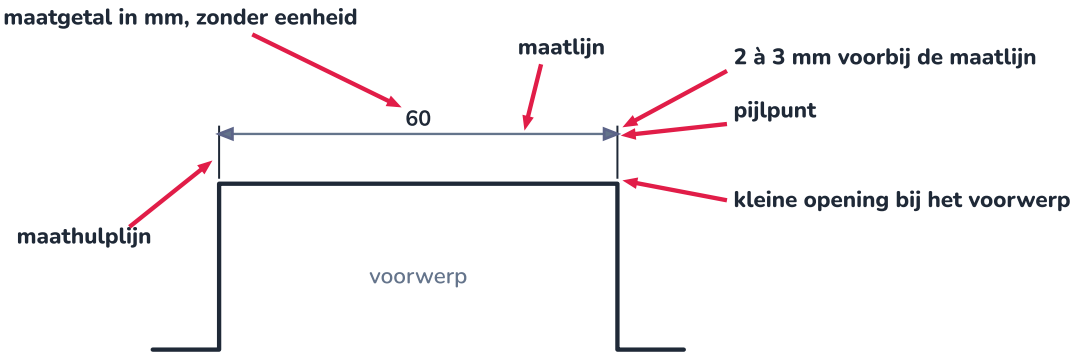
UITLEG · 31.12

Maatvoering: de regels

12/19

Een maat heeft vier onderdelen: twee **maathulplijnen** die de randen van het voorwerp doortrekken, een **maatlijn** met twee pijlpunten ertussen, en het **maatgetal**. De regels:

1. Maatgetallen zijn in **millimeter** en je schrijft er **geen eenheid** bij: 60, niet 60 mm. Staat er iets anders, dan vermeld je het in het titelblok.
2. Je schrijft altijd de **ware maat**, ook als de tekening op schaal is.
3. Het maatgetal staat **boven** de maatlijn, in het midden. Bij een verticale maat staat het links van de maatlijn en lees je het van rechts (het blad een kwartslag naar rechts draaien).
4. Elke maat staat **één keer** op de tekening, in het aanzicht waar de vorm het best te zien is.
5. Maat **niet naar verborgen lijnen**: meet een gat in het aanzicht waar het een cirkel is.
6. Maatlijnen staan **buiten** het voorwerp, liefst tussen de aanzichten; de kleinste maten het dichtst bij het voorwerp, de totaalmaten erbuiten, zodat maatlijnen elkaar niet kruisen.
7. Een **diameter** krijgt het teken Ø (Ø8), een straal een R (R5). Twee gelijke gaten: 2× Ø4,5.
8. De tekening is **volledig**: elke vorm ligt vast in breedte, diepte en hoogte, en elk gat met zijn diameter en de plaats van zijn middelpunt.



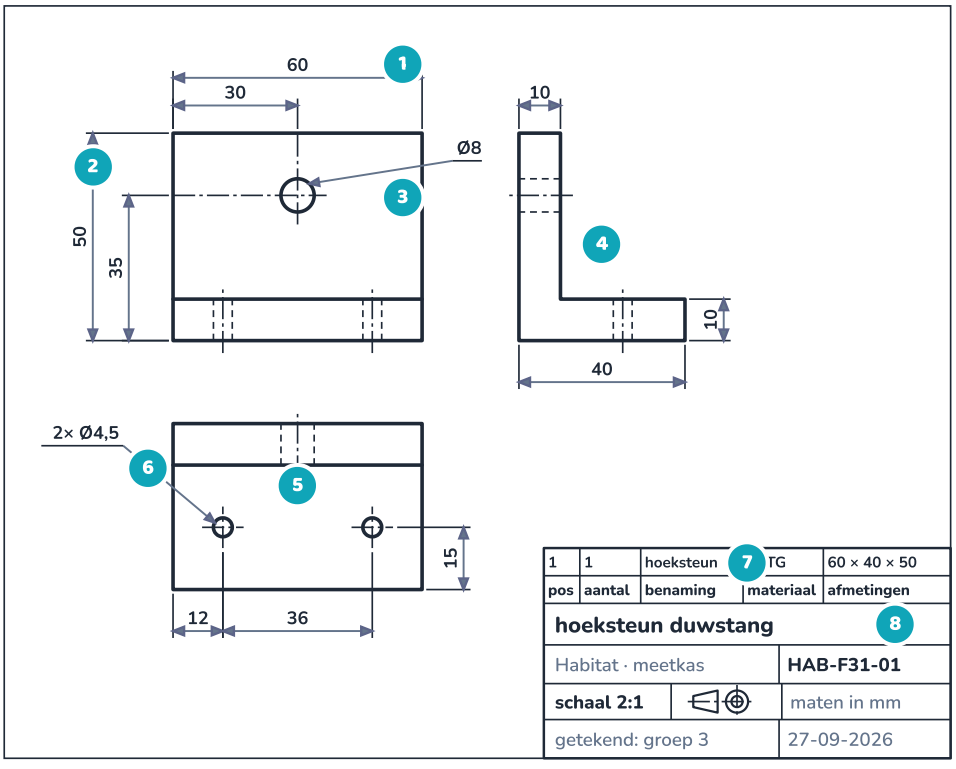
Maathulplijnen, maatlijn met pijlpunten en maatgetal: alles dun, behalve het voorwerp.

ONTLEED · 31.13

Een volledige werktekening

13/19

Dit is de werktekening van de hoeksteun, zoals ze naar de 3D-printer of de werkplaats gaat. Wijs de nummers aan en lees wat elk onderdeel van de tekening vertelt.



Werktekening van de hoeksteun op schaal 2:1: aanzichten, maten, stuklijst en titelblok.

1 **Totaalmaat en maat van het gat**
Buitenaan de totale breedte (60), dichter bij het voorwerp de plaats van het gat (30 vanaf links). Zo kruisen de maatlijnen elkaar niet.

2 **Verticale maten**
Gedraaid geschreven, leesbaar van rechts. De hoogte van het gat (35) meet je vanaf de onderkant, net als de totale hoogte (50).

3 **Diameter met verwijslijn**
Ø8: de pijl wijst naar de cirkel. Een gat meet je waar het een cirkel is, niet waar het een streeplijn is.

4 Zijaanzicht met verborgen lijnen
De streeplijnen tonen beide gaten. De diepte (40), de dikte van de lip (10) en van de voet (10) staan hier, omdat je ze hier het best ziet.

5 Bovenaanzicht
De twee gaten in de voet als cirkels, met hun plaats: 12 en 36 in de breedte (een maatketen), 15 vanaf de voorkant.

6 Twee gelijke gaten
'2× Ø4,5': je schrijft de maat één keer en zegt hoeveel keer ze voorkomt. Ø 4,5 is een ruim gat voor een schroef M4.

7 Stuklijst
Positienummer, aantal, benaming, materiaal en afmetingen. De koppen staan onderaan, vlak boven het titelblok.

8 Titelblok
Benaming, tekeningnummer, schaal 2:1, het projectiesymbool van de Europese projectie, 'maten in mm', tekenaar en datum.

UITLEG · 31.14

Schaal

Een voorwerp past zelden op ware grootte op een blad. De **schaal** zegt hoeveel keer kleiner of groter je tekent. Je schrijft ze als **tekening : werkelijkheid**:

SCHAAL

$$\text{tekeningmaat} = \text{ware maat} \times \text{schaalfactor}$$

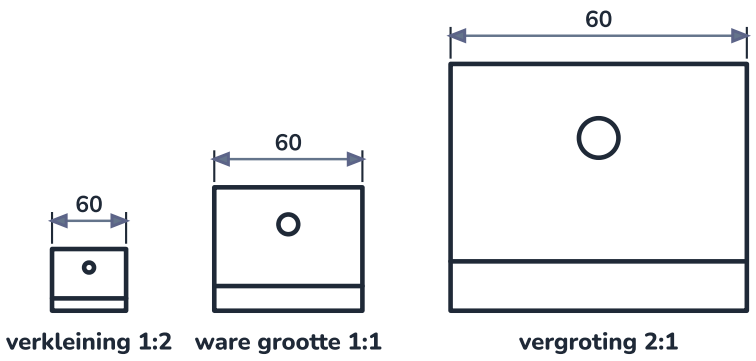
Bij schaal 1:5 is de schaalfactor 1/5, bij 2:1 is ze 2. Omgekeerd: ware maat = tekeningmaat gedeeld door de schaalfactor.

soort	schalen (NBN EN ISO 5455)	1 cm op papier is in het echt	gebruik
vergroting	2:1, 5:1, 10:1	5 mm, 2 mm, 1 mm	kleine onderdelen: de hoeksteun (2:1), een tandwieltje
ware grootte	1:1	1 cm	onderdelen tot ongeveer een handpalm
verkleining	1:2, 1:5, 1:10, 1:20, 1:50, 1:100	2 cm, 5 cm, 10 cm …	plantenbak (1:5), meetkas (1:10), lokaal (1:50)

Een blad A4 is 297 × 210 mm; na de rand en het titelblok hou je ongeveer 270 × 150 mm over voor de aanzichten. De meetkas (1200 × 600 × 800 mm) past in drie aanzichten op 1:10, de plantenbak op 1:5, en de kleine hoeksteun teken je groter, op 2:1, zodat de gaten duidelijk zijn.

Op schaal tekenen, niet op schaal bematen

Op een tekening op schaal 1:5 is de bak 60 mm breed getekend, maar het maatgetal is **300**: je schrijft altijd de ware maat. De maker mag nooit op de tekening meten en terugrekenen; alles wat hij nodig heeft, staat in de maatgetallen.



Kleiner, even groot, groter: de tekening verandert, het maatgetal niet.

UITGEWERKT VOORBEELD · 31.15

Rekenen met schaal

15/19

(a) Hoe groot teken je de plantenbak (300 mm lang) op 1:5? (b) De hoeksteun (60 mm breed) op 2:1? (c) Op een tekening van de meetkas meet je voor de lengte 120 mm. De ware lengte is 1200 mm. Welke schaal is het? (d) Op een tekening op 1:20 meet je 30 mm. Hoe groot is dat in het echt?

GEGEVEN

- ware maten 300 mm en 60 mm; schalen 1:5 en 2:1
- tekening 120 mm, werkelijk 1200 mm
- 1:20, tekening 30 mm

GEVRAAGD

- tekeningmaten (a, b)
- schaal (c)
- ware maat (d)

OPLOSSING

1. (a) Vijf keer kleiner: $300 \times \frac{1}{5} = 60\,\text{mm}$.
2. (b) Twee keer groter: $60 \times \frac{2}{1} = 120\,\text{mm}$.
3. (c) Tekening : werkelijkheid $= 120 : 1200 = 1 : 10$. De schaal is 1:10.
4. (d) Omgekeerd rekenen: ware maat $=$ tekeningmaat $\times 20 = 30 \times 20 = 600\,\text{mm}$. Dat is de breedte van de kas.

ANTWOORD

(a) 60 mm; (b) 120 mm; (c) 1:10; (d) 600 mm.

Klopt dit? Schat eerst: bij verkleining (1:...) wordt de tekening kleiner dan het voorwerp, bij vergroting (...:1) groter. En twee schalen samen: 1:5 en 2:1 verschillen een factor 10.

UITLEG · 31.16

Titelblok en stuklijst

16/19

Rechtsonder op elke werktekening staat het **titelblok**. Het bevat minstens: de **benaming** van het voorwerp, een **tekeningnummer** (om de tekening terug te vinden en naar te verwijzen), de **schaal**, het **projectiesymbool**, de eenheid (mm), de **tekenaar** en de **datum**.

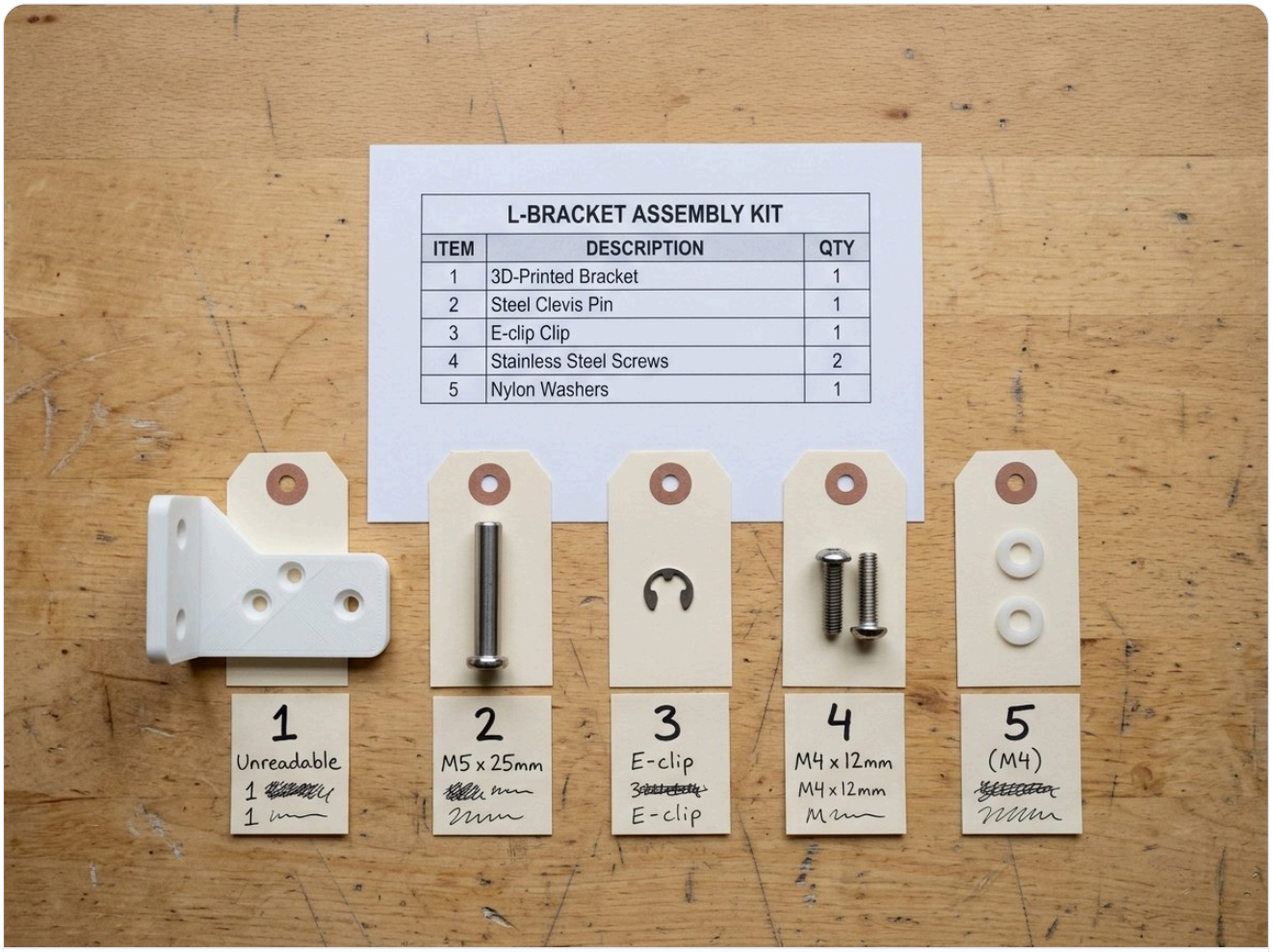
Bestaat een ontwerp uit meerdere onderdelen, dan staat er een **stuklijst** boven het titelblok. Elk onderdeel krijgt een **positienummer**; op de tekening wijst een cirkeltje met dat nummer het onderdeel aan. Gewone, gekochte onderdelen (schroeven, ringen) teken je niet apart: hun **normmaat** in de stuklijst volstaat, zoals M4 × 16 (schroefdraad M4, 16 mm lang).

Dit is de stuklijst van de bevestiging van de duwstang onder het dakraam:

pos	aantal	benaming	materiaal	afmetingen / norm	opmerking
1	1	hoeksteun	PETG	60 × 40 × 50	3D-print, tekening HAB-F31-01
2	1	pen	roestvast staal	Ø 8 × 30	door de lip en het oog van de duwstang
3	1	borgclip	verenstaal	voor pen Ø 8	houdt de pen op zijn plaats
4	2	lenskopschroef	roestvast staal	M4 × 16	door de gaten Ø 4,5
5	2	sluitring	nylon	M4 (Ø 4,3 / Ø 9)	tussen aluminium en roestvast staal (hoofdstuk 10)

De stuklijst is ook een **boodschappenlijst**: wie ze leest, weet wat er gekocht, geprint of gezaagd moet worden, en in welk materiaal. In hoofdstuk 33 tel je alle stuklijsten van de meetkas op.

> **Materiaal kiezen hoort erbij**
>
> De kolom 'materiaal' is geen detail. De hoeksteun is uit PETG, niet uit PLA, omdat hij in de warme kas staat (Intermediate, hoofdstuk 17). En de nylon ringen scheiden het roestvast staal van het aluminium (hoofdstuk 10).



De vijf posities uit de stuklijst, klaar om te monteren.

UITGEWERKT VOORBEELD · 31.17

Habitat: de werktekening van de plantenbak

17/19

Maak de werktekening van de plantenbak van de meetkas: bovenaan 300 × 200 mm, onderaan 280 × 180 mm, 120 mm hoog, wanden en bodem 2 mm, uit polypropeen (PP). De meetkas heeft er 12.

GEGEVEN

- buitenmaten boven 300 × 200, onder 280 × 180, hoogte 120 (mm)
- wanddikte 2 mm, PP
- 12 stuks

GEVRAAGD

- drie aanzichten, maten, schaal, stuklijst en titelblok

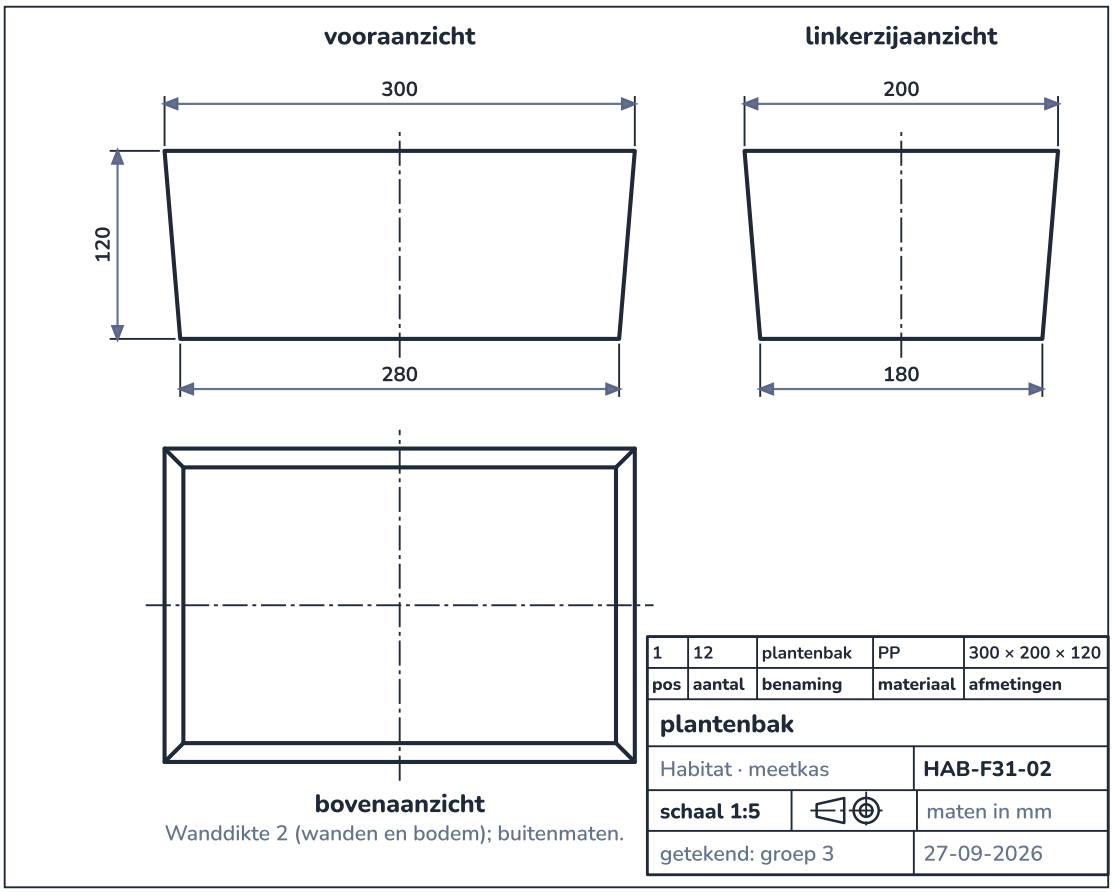
OPLOSSING

1. **Schaal kiezen.** Drie aanzichten van 300, 200 en 120 mm op een A4: op 1:5 wordt het vooraanzicht 60 × 24 mm, het bovenaanzicht 60 × 40 mm. Dat past ruim.
2. **Vooraanzicht.** De bak is taps: een trapezium, bovenaan 300, onderaan 280, 120 hoog. De symmetrie-as als hartlijn.
3. **Linkerzijaanzicht**, rechts ervan: ook een trapezium, 200 bovenaan, 180 onderaan, even hoog.
4. **Bovenaanzicht**, eronder: de bak is open, dus je kijkt erin. Je ziet de rand (300 × 200), de bodem aan de binnenkant (276 × 176) en de vier schuine binnenribben die ze verbinden. Hartlijnen in beide richtingen.
5. **Maten.** Breedte boven en onder in het vooraanzicht (300 en 280), de hoogte één keer (120), de diepte boven en onder in het zijaanzicht (200 en 180). De wand van 2 mm is op 1:5 maar 0,4 mm: te dun om te tekenen of te bematen. Je schrijft ze als **opmerking** onder de tekening.
6. **Stuklijst en titelblok.** Eén positie, aantal 12, materiaal PP, afmetingen 300 × 200 × 120. Schaal 1:5, Europese projectie, maten in mm.

ANTWOORD

De werktekening HAB-F31-02 in de figuur: drie aanzichten op 1:5, vijf maten, een opmerking over de wanddikte, stuklijst en titelblok.

Klopt dit? Een mooie controle van het dossier: zes bakken naast elkaar zijn aan de bovenrand 6 × 200 = 1200 mm lang, de binnenlengte van de kas. Hun bodems liggen aan elke kant 10 mm naar binnen, dus van 10 tot 1190 mm: precies 1180 mm, de lengte van de plantentafel. In de diepte: 2 × 300 = 600 mm bovenaan, 580 mm onderaan. En de massa: wanden en bodem samen zijn ongeveer 1660 cm² van 0,2 cm dik, 332 cm³ PP van 0,91 g/cm³, ongeveer 0,30 kg, de waarde die hoofdstuk 11 gebruikte.



Werktekening van de plantenbak op schaal 1:5. In het bovenaanzicht kijk je in de open bak.

NASLAG · 31.18

Overzicht: technisch tekenen

18/19

De afspraken van dit hoofdstuk op één blad.

schaal

$$\text{tekeningmaat} = \text{ware maat} \times \text{schaalfactor}$$

symbool	betekenis	eenheid
	schaal 1:5: schaalfactor 1/5	
	schaal 2:1: schaalfactor 2	

isometrie	aanzichten (Europese projectie)
assen: verticaal en twee onder 30°	bovenaanzicht onder het vooraanzicht
ware lengte langs de assen	linkerzijaanzicht rechts van het vooraanzicht
evenwijdig blijft evenwijdig	zelfde hoogte naast elkaar, zelfde breedte onder elkaar
cirkel wordt ellips in een ruit (1,22 d × 0,71 d)	diepte via een 45°-lijn; achterkant naar het vooraanzicht
verborgen randen meestal weggelaten	verborgen randen als streeplijn

lijnsoort	gebruik
dik vol	zichtbare randen
dun vol	maatlijnen, maathulplijnen, verwijslijnen

lijnsoort	gebruik
dun gestreept	verborgen randen
dun streep-stip	hartlijnen, symmetrie-assen

maatvoering in acht regels
1. maten in mm, zonder eenheid
2. altijd de ware maat, ook op schaal
3. getal boven de maatlijn; verticaal leesbaar van rechts
4. elke maat één keer
5. niet naar verborgen lijnen
6. buiten het voorwerp; klein binnen, groot buiten
7. Ø voor een diameter, R voor een straal, 2× voor twee gelijke
8. volledig: elke vorm en elk gat ligt vast

soort	schalen (NBN EN ISO 5455)	1 cm op papier is in het echt	gebruik
vergroting	2:1, 5:1, 10:1	5 mm, 2 mm, 1 mm	kleine onderdelen: de hoeksteun (2:1), een tandwieltje
ware grootte	1:1	1 cm	onderdelen tot ongeveer een handpalm
verkleining	1:2, 1:5, 1:10, 1:20, 1:50, 1:100	2 cm, 5 cm, 10 cm …	plantenbak (1:5), meetkas (1:10), lokaal (1:50)



dikke volle lijn
zichtbare randen en contouren

dunne volle lijn
maatlijnen, maathulplijnen, verwijslijnen, arcering

dunne streeplijn
verborgen randen en contouren

dunne streep-stiplijn
hartlijnen van gaten, symmetrie-assen

De vier lijnsoorten.

HET GEHEEL · 31.19

Waar technisch tekenen naartoe leidt

19/19

Technisch tekenen is de taal waarin ontwerpers en makers met elkaar praten. Je gebruikte al tekeningen: schakelschema's (hoofdstuk 18), krachtpijlen (hoofdstuk 11), een zijaanzicht van het dakraam (hoofdstuk 12). Nu kan je een voorwerp zelf volledig vastleggen. Het volgende hoofdstuk zet die tekening om in een 3D-model op de computer, en dat model in een geprint onderdeel. In Intermediate teken je met parameters (een maat verandert, het model past zich aan) en leer je toleranties en passingen; in Expert zijn tekeningen deel van de configuratie van een groot systeem.

F3 Meten: grootheden en eenheden

F12 Hefbomen en mechanismen

F13 Constructies: sterk en stabiel

Schuifmaat en rolmeter om een voorwerp op te meten; millimeter als eenheid van de tekening.

De duwstang en de klemhendel waarvan je hier de onderdelen tekent.

Het kasframe tekenen in aanzichten; profielen als doorsnede.

F30 De ontwerpcyclus

Schetsen om ideeën te bedenken; een werktekening legt het gekozen ontwerp vast.

F32 Van idee tot object: CAD en 3D-printen

Van tekening naar 3D-model, STL-bestand en print.

F33 Integratieproject: de meetkas

De werktekeningen en stuklijsten van alle onderdelen van de meetkas.

I6 Goniometrie en vectoren

Hoeken en schuine lengtes berekenen in plaats van ze op te meten.

I37 Parametrisch ontwerpen

Tekenen met parameters en beperkingen; toleranties en passingen.

E45 Systems engineering en het V-model

Tekeningnummers, versies en configuratiebeheer in een groot project.

Habitat

De plantenbak heeft nu een werktekening (HAB-F31-02, schaal 1:5): 300 × 200 mm bovenaan, 280 × 180 mm onderaan, 120 mm hoog, wand 2 mm, PP, 12 stuks. De hoeksteun van de duwstang kreeg tekening HAB-F31-01. In opdracht 31.12 teken je de plantentafel met haar stuklijst voor je portfolio.

SAMENVATTING

In het kort

- Een schets maak je snel uit de vrije hand om te denken en uit te leggen; een werktekening is volledig en nauwkeurig, zodat iemand anders het voorwerp kan maken.
- Isometrie: drie assen onder 120° (verticaal en twee onder 30°), ware lengtes langs de assen, evenwijdig blijft evenwijdig. Een cirkel wordt een ellips in een ruit.
- Aanzichten tonen één zijde loodrecht en onvervormd. In de Europese projectie staat het bovenaanzicht onder en het linkerzijaanzicht rechts van het vooraanzicht; de achterkant ligt telkens het dichtst bij het vooraanzicht.
- Lijnsoorten: dik vol voor zichtbare randen, dun gestreept voor verborgen randen, dun streep-stip voor hartlijnen, dun vol voor maatlijnen en maathulplijnen.
- Maten in mm zonder eenheid, altijd de ware maat, elke maat één keer, niet naar verborgen lijnen, buiten het voorwerp; Ø voor een diameter.
- Schaal = tekening : werkelijkheid. 1:5 is vijf keer kleiner, 2:1 twee keer groter.
- Titelblok (benaming, nummer, schaal, projectiesymbool, tekenaar, datum) en stuklijst (positie, aantal, benaming, materiaal, afmetingen) maken de tekening volledig.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

schets

Snelle tekening uit de vrije hand, niet op schaal, om een idee te tonen of te onthouden.

werktekening

Nauwkeurige tekening met alle maten, de schaal, de lijnsoorten, een titelblok en een stuklijst, zodat iemand anders het voorwerp kan maken.

isometrie

Tekenwijze waarbij de drie assen onder 120° van elkaar staan (twee onder 30° met de horizontale, één verticaal) en lengtes langs de assen op ware grootte getekend worden.

aanzicht

Europese projectie

verborgen lijn

Tekening van een voorwerp zoals je het ziet als je er loodrecht op één zijde naar kijkt.

Afspraak om aanzichten te plaatsen: het bovenaanzicht onder het vooraanzicht, het linkerzijaanzicht rechts ervan. Ook eerstehoeksprojectie genoemd.

Rand die je in een aanzicht niet ziet omdat er materiaal voor zit; getekend als dunne streeplijn.

hartlijn
Dunne streep-stiplijn door het midden van een gat of langs een symmetrie-as.

maatlijn
Dunne lijn met twee pijlpunten die aangeeft tussen welke punten een maat geldt.

maathulplijn
Dunne lijn die een rand van het voorwerp doortrekt tot voorbij de maatlijn.

maatgetal
De ware maat in millimeter, zonder eenheid, boven de maatlijn.

schaal
Verhouding tussen een lengte op de tekening en dezelfde lengte in het echt; 1:5 betekent vijf keer kleiner.

titelblok
Vak rechtsonder op een werktekening met de benaming, het tekeningnummer, de schaal, het projectiesymbool en de tekenaar.

stuklijst
Tabel met alle onderdelen: positienummer, aantal, benaming, materiaal en afmetingen.

HANDBOEK · HOOFDSTUK 32

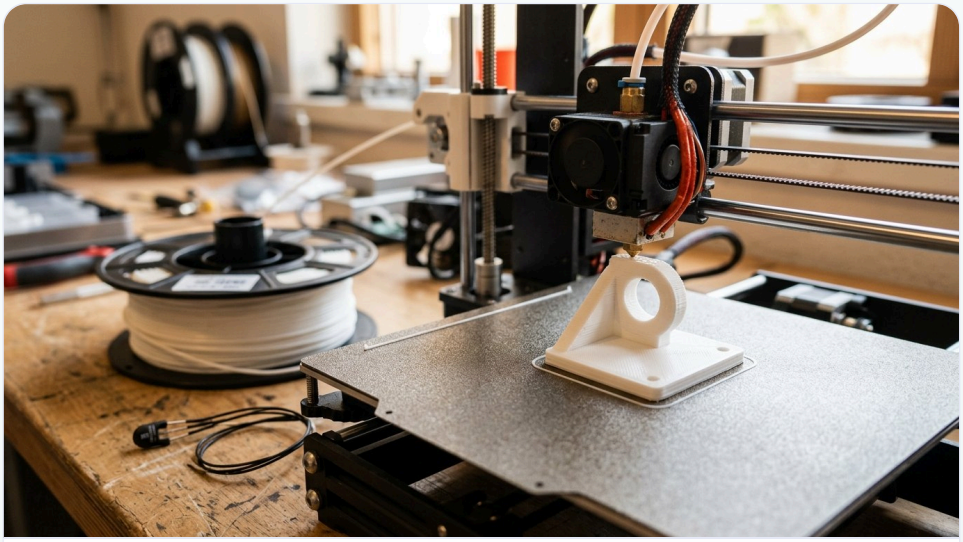
Van idee tot object: CAD en 3D-printen

Van een schets op papier naar een onderdeel dat je in je hand houdt, laag per laag

Een werktekening beschrijft een onderdeel; een 3D-printer maakt het. Daartussen zitten drie stappen: een **3D-model** tekenen op de computer (CAD), dat model omzetten in **driehoeken** (STL) en in **laagjes en banen** voor de printer (de slicer). In dit hoofdstuk ontwerp en print je een **sensorhouder** voor de meetkas, en leer je waarom een goed ontwerp voor de printer anders is dan een goed ontwerp op papier: overhang, printrichting, wanddikte en toleranties. Je rekent uit hoeveel filament en tijd een print kost, en je leert wanneer een lasersnijder of een zaag beter is dan een printer.

8× uitleg · 5× uitgewerkt voorbeeld · 1× proef · 1× ontleed · 1× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · 1× code · ± 7 lestijden

D Ontwerpen en maken · M Materie en chemie



Laag per laag groeit de sensorhouder voor de meetkas: 150 lagen van 0,2 mm.

Na dit hoofdstuk

- Je kan een eenvoudig onderdeel modelleren in een CAD-programma in de browser met basisvormen, gaten, verplaatsen, uitlijnen en groeperen.
- Je kan uitleggen hoe een model via een STL-bestand (driehoeken) en een slicer (lagen, G-code) een print wordt.
- Je kan de invloed van laaghoogte, wanden, vulling en supports op kwaliteit, sterkte, tijd en materiaal uitleggen.
- Je kan het materiaalverbruik van een print berekenen: volume, massa met de dichtheid, en de lengte filament.
- Je kan ontwerpen voor de printer: de 45°-regel voor overhang, bruggen, een goede printrichting, een voldoende wanddikte.
- Je kan toleranties toepassen: speling tussen onderdelen en de maatafwijking van je printer, gemeten met een testprint.
- Je kan lasersnijden en andere maakmethoden vergelijken en voor een onderdeel een passende methode kiezen.

VERHAAL · 32.1

Een moersleutel per e-mail

1/19

Op 24 november 2014 maakte een kleine printer aan boord van het internationale ruimtestation ISS het eerste voorwerp dat ooit in de ruimte geprint werd: een plaatje voor de behuizing van de printer zelf. Een

paar weken later volgde iets nuttigers. Ingenieurs op aarde ontwierpen een **ratelsleutel**, stuurden het bestand naar het station, en de astronaut Barry Wilmore kon het gereedschap enkele uren later vastnemen. Voor een station waar een bevoorrading maanden op zich laat wachten, is dat een revolutie: je stuurt geen onderdeel meer, je stuurt een **bestand**.

Het idee is ouder dan je denkt. In 1984 vroeg de Amerikaan **Chuck Hull** een octrooi aan op de **stereolithografie**: een laser die laagje na laagje vloeibare kunsthars uithardt. Zijn bedrijf bedacht er het bestandsformaat **STL** voor, dat vandaag nog elke printer begrijpt. In 1989 liet **Scott Crump** een andere methode vastleggen: gesmolten kunststof door een spuitmondje leggen, laag per laag. Dat is **FDM**, de techniek van bijna elke schoolprinter. Toen dat octrooi in 2009 afliep, en het open project **RepRap** (2005) van Adrian Bowyer al had getoond hoe je zo'n printer met eenvoudige onderdelen bouwt, werden 3D-printers plots betaalbaar.

Waarom dit verhaal ertoe doet

Habitat ligt ver van elke winkel. Een printer, een CAD-programma en iemand die kan ontwerpen, maken het station minder afhankelijk: een gebroken klem of een nieuwe sensorhouder maak je zelf. In dit hoofdstuk print je het eerste onderdeel van de meetkas.



Een onderdeel versturen als bestand: in 2014 werd voor het eerst gereedschap in de ruimte geprint.

UITLEG · 32.2

Van idee tot object

2/19

Een 3D-print begint niet bij de printer. De keten:

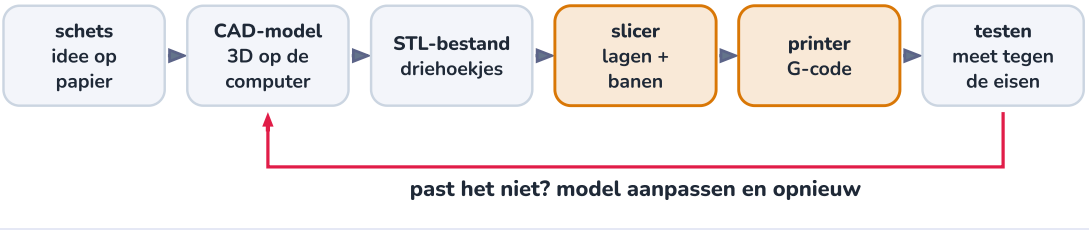
1. **Schets** en eisen (hoofdstuk 30 en 31): wat moet het onderdeel doen, hoe groot is het?

2. **CAD-model**: je bouwt het onderdeel in 3D op de computer, op ware grootte in millimeter.
3. **STL-bestand**: het model wordt geëxporteerd als een net van driehoekjes dat het oppervlak beschrijft.
4. **Slicer**: een tweede programma snijdt het model in horizontale laagjes en berekent voor elke laag de banen van de spuitmond. Hier kies je laaghoogte, wanden, vulling en supports.
5. **Printer**: de slicer bewaart zijn werk als **G-code**, een lange lijst opdrachten. De printer voert ze één voor één uit.
6. **Testen**: past het, is het sterk genoeg? Zo niet, dan pas je het model aan en print je opnieuw.

Een 3D-printer **bouwt op**: hij legt materiaal waar het moet komen. Dat heet **additief** maken. Een zaag, een boor of een lasersnijder nemen net materiaal **weg** (subtractief). Dat verschil verklaart waarom een printer holle, ingewikkelde vormen kan maken, maar ook waarom hij traag is.

Veilig printen

De spuitmond is ongeveer 200 tot 250 °C heet, het bed 60 °C of meer: raak ze niet aan tijdens of vlak na het printen. Een printer geeft fijne deeltjes en een geur af: zet hem in een verluchte ruimte, en laat hem niet onbewaakt werken.



Zes stappen van idee tot getest onderdeel; bij een fout ga je terug naar het model, niet naar de printer.

UITLEG · 32.3

CAD in de browser: vormen en gaten

3/19

Een eenvoudig CAD-programma in de browser, zoals **Tinkercad** (sinds 2011, gratis), werkt als bouwen met blokken. Op een **werkvlak** met een raster in millimeter zet je **basisvormen**: een doos, een cilinder, een wig, een kegel, een bol. Van elke vorm typ je de afmetingen in (lengte, breedte, hoogte, diameter) en verplaats je ze met de pijltjestoetsen, standaard in stappen van 1 mm.

Elke vorm is ofwel een **vorm** (vol materiaal) ofwel een **gat**. Een gat ziet eruit als een doorzichtige vorm. Zolang de stukken los staan, gebeurt er niets. Pas als je ze **groepeert** (in Tinkercad: Ctrl+G), smelten de vormen samen tot één onderdeel en snijdt elk gat weg wat het raakt. Zo maak je een plaat met een gat: een doos plus een cilinder als gat, gegroepeerd.

Nog vier handelingen gebruik je voortdurend:

- **uitlijnen**: vormen op één lijn zetten, bijvoorbeeld een gat precies in het midden van een plaat;
- **dupliceren**: een vorm met dezelfde maten kopiëren (twee gelijke gaten);
- **draaien**: een cilinder 90° kantelen voor een horizontaal gat;
- **werkvlak verplaatsen**: een nieuwe vorm op een schuin of hoger vlak zetten.

Een CAD-model is altijd op **ware grootte**: er is geen schaal zoals op een tekening. Een cilinder van 14 mm is 14 mm.

Het gat altijd iets groter dan nodig

Moet een gat door een plaat van 3 mm, maak de gatcilinder dan bijvoorbeeld 5 mm hoog en laat hem aan beide kanten uitsteken. Is hij precies 3 mm, dan blijft er door afrondingen soms een vliesje van nul millimeter over, en print de printer het gat dicht.



Links vier basisvormen (vol), rechts twee gaten: die snijden materiaal weg zodra je groepeert.

UITGEWERKT VOORBEELD · 32.4

Groeperen en uitlijnen: een etiketplaatje

Voor elk bakje van de meetkas wil je een etiketplaatje van 60 × 20 × 3 mm met twee gaten van Ø 3,5 mm (voor een kabelbindertje), elk 5 mm van de korte rand en in het midden van de breedte. Hoe bouw je het in CAD?

GEGEVEN

- plaat 60 × 20 × 3 mm
- 2 gaten Ø 3,5 mm, middelpunt 5 mm van de korte rand, midden in de breedte

GEVRAAGD

- de stappen in het CAD-programma

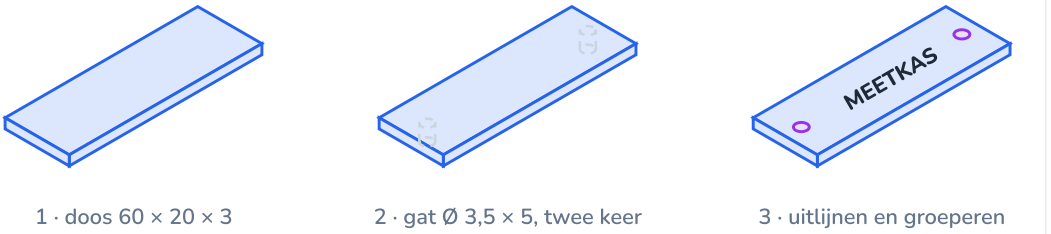
OPLOSSING

1. **Plaat.** Zet een doos op het werkvlak en typ de maten: 60 (lengte), 20 (breedte), 3 (hoogte).
2. **Eerste gat.** Zet een cilinder en maak er een *gat* van. Diameter 3,5 mm, hoogte 5 mm: hoger dan de plaat, zodat hij er zeker doorgaat. Verschuif hem 1 mm omlaag, zodat hij ook onderaan uitsteekt.
3. **Tweede gat.** Dupliceer het gat en verschuif de kopie 50 mm in de lengte ($60 - 2 \times 5 = 50$). Dupliceren is beter dan een nieuw gat tekenen: de maten blijven gelijk.
4. **Uitlijnen.** Selecteer alles en lijn uit op het midden in de breedte: de gaten komen precies op 10 mm van de lange randen. Controleer: het eerste gat op 5 mm van de korte rand.
5. **Groeperen** (Ctrl+G) en exporteren als `etiket.stl`. Wil je tekst, zet dan de letters als vorm van 0,6 mm hoog bovenop de plaat (reliëf) vóór je groepeert.

ANTWOORD

Een doos, twee gatcilinders (één gedupliceerd en 50 mm verschoven), uitlijnen op het midden, groeperen.

Klopt dit? Meet na in het programma: van hart tot hart van de gaten 50 mm, van hart tot rand 5 mm. Veel programma's tonen de afstand als je een vorm vastneemt. En denk aan het printen: het plaatje ligt plat, zonder overhang; de gaten zijn verticaal.



1 · doos 60 × 20 × 3 | 2 · gat Ø 3,5 × 5, twee keer | 3 · uitlijnen en groeperen

Doos, twee gaten (gestreept), uitlijnen en groeperen: het plaatje met gaten.

UITGEWERKT VOORBEELD · 32.5

Habitat: de sensorhouder modelleren

5/19

De temperatuursensor TMP36 van de meetkas (hoofdstuk 25) meet te hoog als de zon erop schijnt of als hij tegen het warme aluminium frame zit. Ontwerp een houder die hem **5 cm van het frame** houdt, **in de schaduw van een dakje**, met **één schroef M4** op een koker van 20 × 20 mm, en die zonder supports te printen is.

GEGEVEN

- het lijfje van onze TMP36 is 5,2 mm breed (gemeten met de schuifmaat)
- schroef M4 (4 mm dik)
- koker 20 × 20 mm
- printer maakt gaten ongeveer 0,2 mm kleiner (zie de proef verder)

GEVRAAGD

- een CAD-model in stappen, met maten en uitleg

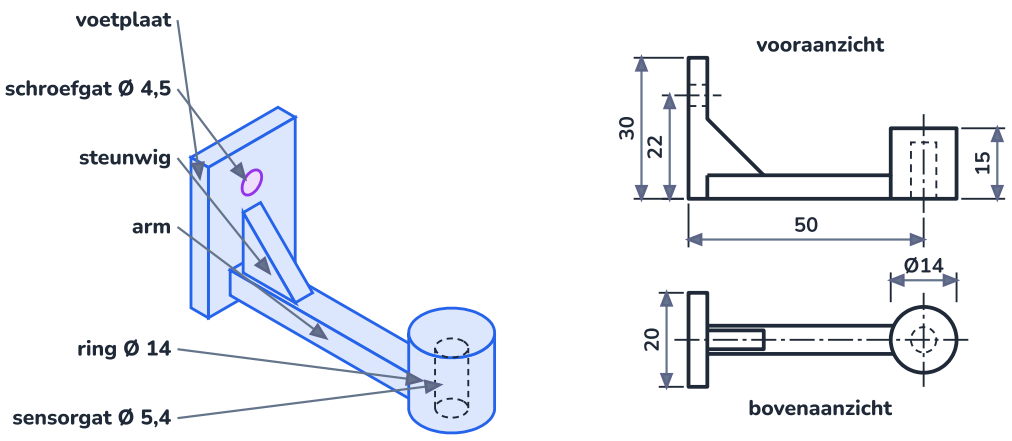
OPLOSSING

1. **Voetplaat.** Een doos van 20 × 4 × 30 mm (breed × dik × hoog): even breed als de koker, 4 mm dik is stevig genoeg.
2. **Schroefgat.** Een cilinder als gat, Ø 4,5 mm, 90° gekanteld, 10 mm lang (langer dan de plaat dik is), midden in de breedte en op 22 mm hoogte. Ø 4,5 is de gewone doorgaande boring voor M4: een halve millimeter speling.
3. **Arm.** Een doos van 6 × 42 × 5 mm, midden in de breedte, onderaan tegen de plaat. Laat ze 2 mm in de plaat steken, zodat ze bij het groeperen zeker één stuk worden.
4. **Steunwig.** Een wig van 4 × 12 × 12 mm op de arm, tegen de plaat. Ze maakt de hoek tussen plaat en arm stijver (hoofdstuk 13: de driehoek).
5. **Ring.** Een cilinder van Ø 14 × 15 mm met het midden 50 mm voor de achterkant van de plaat: de sensor zit 5 cm van het metaal.
6. **Sensorgat.** Een cilinder als gat, Ø 5,4 mm, 12 mm hoog, van onderen in de ring. Bovenaan blijft 3 mm dicht: het **dakje** dat de zon tegenhoudt. De sensor gaat er met zijn pootjes naar beneden in. Waarom 5,4? Het lijfje is 5,2 mm, en de printer maakt een gat ongeveer 0,2 mm kleiner: na het printen klemt de sensor.
7. **Uitlijnen en groeperen**: alles midden in de breedte, dan groeperen tot één onderdeel en exporteren als `SH-1.stl`.

ANTWOORD

Sensorhouder SH-1: voetplaat 20 × 4 × 30 met een gat Ø 4,5; arm 6 × 42 × 5; steunwig 12 × 12; ring Ø 14 × 15 met een sensorgat Ø 5,4 × 12 van onderen. Zes basisvormen, waarvan twee gaten.

Klopt dit? Kijk of het printbaar is zoals getekend: alles begint op het werkvlak (de onderkant van plaat, arm en ring is één vlak), de wig loopt schuin omhoog tegen de plaat, en het sensorgat heeft bovenaan een 'plafond' van 5,4 mm breed: een korte brug, dat lukt. Het schroefgat ligt horizontaal, maar is klein genoeg (verder in dit hoofdstuk).



De sensorhouder SH-1: isometrie met de zes onderdelen en twee aanzichten met de belangrijkste maten (mm). Streeplijnen: de verborgen gaten.

UITLEG · 32.6

STL: alles wordt driehoekjes

6/19

Een printer weet niets van dozen en cilinders. Bij het exporteren wordt je model omgezet in een **STL-bestand**: een lijst van **driehoekjes** die samen het oppervlak vormen, als een net. Van elke driehoek staan de drie hoekpunten (x, y, z) in het bestand en een pijltje (de normaal) dat naar buiten wijst. Kleur, materiaal en zelfs de eenheid staan er niet in: iedereen spreekt af dat het millimeter is.

Vlakke vormen zijn makkelijk: een kubus heeft 6 vlakken, elk opgedeeld in 2 driehoeken, dus 12. Een ronde vorm kan niet exact: een cilinder wordt een **veelhoek**. Met n zijden heeft hij $2n$ driehoeken op de zijkant en $n - 2$ op elk vlak boven en onder: samen $4n - 4$. Tinkercad geeft een cilinder standaard 20 zijden: 76 driehoeken.

Dat heeft een gevolg voor gaten. Liggen de hoekpunten van de veelhoek op de cirkel, dan liggen de vlakke zijden ertussen iets **naar binnen**. Een gat van Ø 5,4 mm met 20 zijden is tussen twee zijden maar $5{,}4 \times \cos(9^\circ) \approx 5{,}33\,\text{mm}$ breed. Met 64 zijden wordt dat 5,39 mm. Voor een passend gat zet je het aantal zijden dus hoger.

Een STL moet 'waterdicht' zijn

Het net van driehoeken moet overal gesloten zijn, zonder gaten of losse vlakken, anders weet de slicer niet wat binnen en buiten is. CAD-programma's maken dat zelf goed; bij modellen van het internet loopt het soms mis. De slicer waarschuwt dan.



kubus: 12 driehoeken

een cilinder met n zijden: 4n – 4 driehoeken

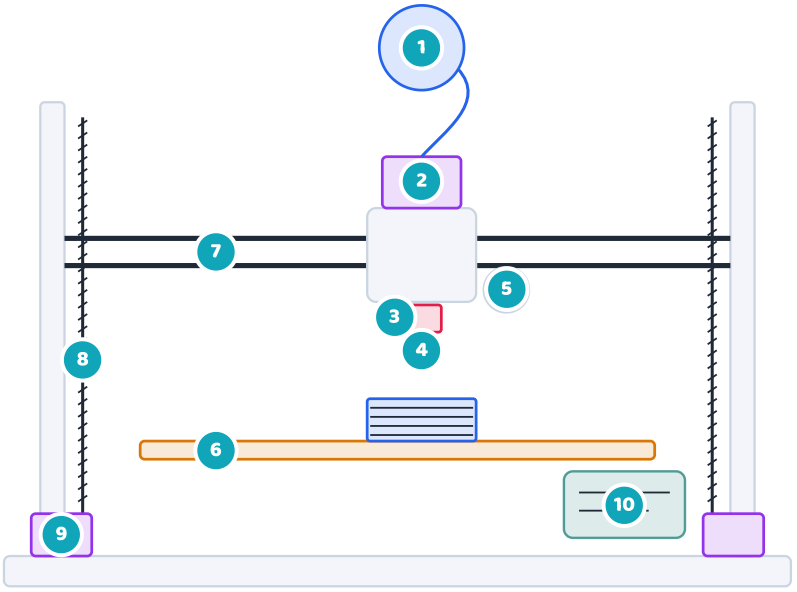
Een kubus uit 12 driehoeken, en een cirkel als veelhoek met 8, 20 en 64 zijden: hoe meer zijden, hoe ronder en hoe groter het bestand.

ONTLEED · 32.7

De 3D-printer

7/19

Bijna alle schoolprinters werken met **FDM**: een draad kunststof (het **filament**, 1,75 mm dik) wordt in een heet blok gesmolten en door een spuitmondje van 0,4 mm geduwd. Drie motoren bewegen de spuitmond ten opzichte van het bed in x, y en z. Wijs de nummers aan.



Schematische FDM-printer van voren: het bed schuift naar voor en naar achter (y), de spuitmond van links naar rechts (x), de brug op en neer (z).

1 Spoel filament
Een rol kunststofdraad van 1,75 mm, meestal 1 kg. Een kilo PLA is ongeveer 335 m draad.

2 Extruder
Een motor met een getand wieltje dat het filament vastgrijpt en naar de spuitmond duwt, precies zoveel millimeter als de G-code vraagt.

3 Hotend
Een verwarmd blok met een temperatuursensor: PLA print je bij ongeveer 210 °C, PETG bij ongeveer 240 °C. Een regelkring houdt de temperatuur constant (hoofdstuk 25).

4 Spuitmond
Het gaatje van 0,4 mm bepaalt de breedte van een lijn (ongeveer 0,4 mm) en dus het fijnste detail.

5 Ventilator
Koelt de vers gelegde laag zodat ze meteen stijf wordt: nodig voor overhang en bruggen.

6 Verwarmd printbed
De eerste laag moet goed kleven: het bed is ongeveer 60 °C voor PLA. Het bed schuift naar voor en naar achter (y-as).

7 x-as
Twee staven waarover de printkop van links naar rechts glijdt, aangedreven door een riem en een stappenmotor.

8 z-as met schroefspindel
Na elke laag draait de spindel en gaat de hele brug precies één laaghoogte (bv. 0,2 mm) omhoog.

9 Stappenmotor
Draait in kleine, vaste stapjes: zo weet de printer waar de kop is zonder het te meten (sturen, niet regelen: hoofdstuk 1).

10 Scherm en geheugenkaart
Hier kies je het G-codebestand en volg je temperatuur en voortgang. Binnenin zit een microcontroller, zoals in de meetkas.

UITLEG · 32.8

De slicer: lagen, wanden en vulling

De slicer 'snijdt' het model in horizontale plakjes, en berekent per plakje de weg die de spuitmond aflegt. Een massief blok print hij niet massief: dat zou veel materiaal en tijd kosten. Hij maakt er een **holle schil met een vulling** van:

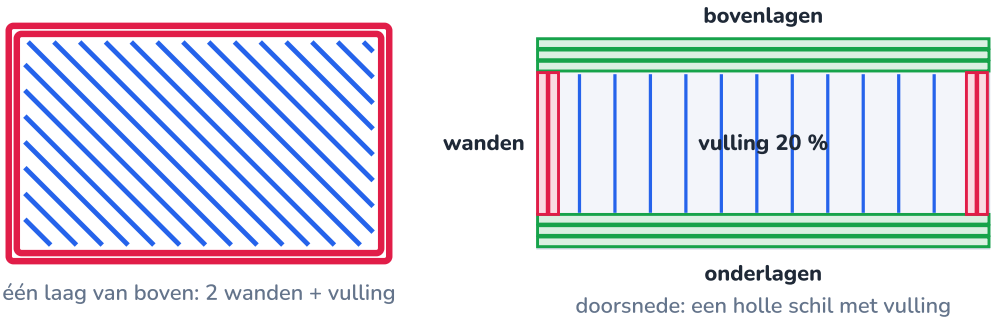
- **wanden** (perimeters): de buitenrand van elke laag, meestal twee of drie lijnen naast elkaar;
- **boven- en onderlagen**: een paar volledig gevulde lagen, zodat boven- en onderkant dicht zijn;
- **vulling** (infill): binnenin een open raster, bijvoorbeeld 20 %: een vijfde van de binnenkant is plastic.

instelling	typische waarde (PLA, spuitmond 0,4 mm)	wat het doet
laaghoogte	0,2 mm (0,1 fijn, 0,3 snel)	dikte van één laag: detail tegenover tijd
wanden (perimeters)	2 à 3 lijnen van 0,4 mm	de buitenkant; bepaalt het meest de sterkte
boven- en onderlagen	4 à 5 lagen	een dichte huid boven en onder
vulling (infill)	15 à 20 % (sterk: 40 %)	een raster binnenin: sterkte tegenover materiaal en tijd
supports	alleen waar het moet	tijdelijke steunen onder overhangen, achteraf weg te breken
temperatuur spuitmond / bed	PLA ± 210 °C / 60 °C; PETG ± 240 °C / 80 °C	het filament smelt; de eerste laag kleeft
rok of rand (skirt, brim)	rok: 1 lus; rand: 5 mm	de spuitmond vullen; een rand houdt hoeken op het bed

Na het snijden toont de slicer een voorbeeld laag per laag, de geschatte printtijd en hoeveel filament er nodig is, in meter en in gram. Kijk dat voorbeeld altijd na voor je print: daar zie je lagen die in de lucht hangen, of een gat dat verdwenen is.

Meer vulling is niet de beste weg naar sterkte

De sterkte van een geprint onderdeel zit vooral in de **wanden**, zoals bij een koker (hoofdstuk 13: vorm telt meer dan materiaal). Van 20 naar 100 % vulling gaan kost veel meer materiaal en tijd, maar maakt een onderdeel veel minder sterker dan een extra wand.



één laag van boven: 2 wanden + vulling

doorsnede: een holle schil met vulling

Links één laag van boven: twee wanden (rood) en een schuin raster als vulling (blauw). Rechts een doorsnede. Beide vergroot.

CODE · 32.9

Wat de slicer schrijft: G-code

9/19

De slicer bewaart zijn werk als **G-code**: een tekstbestand met duizenden regels, één opdracht per regel. De belangrijkste: `G1` is 'beweeg in een rechte lijn' naar de gegeven X, Y en Z (in mm), `E` is hoeveel millimeter filament de extruder erbij duwt, en `F` de snelheid in millimeter per minuut. Codes met een M regelen de machine: temperaturen, ventilator. Alles na een puntkomma is uitleg voor mensen. Zo begint het bestand van de sensorhouder:

tekst **SH-1.gcode** 16 regels

```
; SH-1 sensorhouder, PLA, laaghoogte 0,2 mm (begin van het bestand)
M140 S60          ; bed naar 60 graden
M104 S210         ; spuitmond naar 210 graden
M190 S60          ; wacht tot het bed warm is
M109 S210         ; wacht tot de spuitmond warm is
G28               ; alle assen naar hun nulpunt
M83               ; E-waarden zijn relatief: filament per beweging
G1 Z0.2 F3000     ; spuitmond 0,2 mm boven het bed
G1 X90 Y80 F6000  ; verplaatsen naar de hoek van de voetplaat (zonder te printen)
G1 X110 Y80 E0.67 F1800   ; lijn van 20 mm, 0,67 mm filament erin
G1 X110 Y84 E0.13         ; 4 mm naar achter
G1 X90 Y84 E0.67          ; 20 mm terug
G1 X90 Y80 E0.13          ; en dicht: de eerste wand van de voetplaat
; ... nog 149 lagen ...
M104 S0           ; spuitmond uit
M140 S0           ; bed uit
```

Reken één E-waarde na. Een lijn van 20 mm lang, 0,4 mm breed en 0,2 mm hoog is ongeveer $20 \times 0{,}4 \times 0{,}2 = 1{,}6\,\text{mm}^3$ kunststof. Het filament heeft een doorsnede van $\pi \times 0{,}875^2 \approx 2{,}405\,\text{mm}^2$, dus de extruder moet $1{,}6 / 2{,}405 \approx 0{,}67\,\text{mm}$ filament duwen: de E0.67 in de code. Een printer is dus een machine die rekent met volumes.

UITLEG · 32.10

Laaghoogte, kwaliteit en tijd

10/19

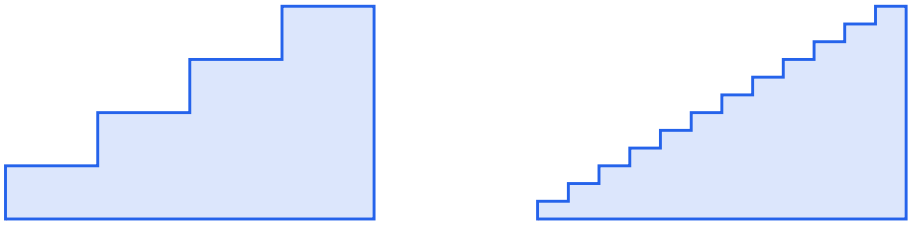
De **laaghoogte** is de dikte van één laag. Ze bepaalt twee dingen tegelijk:

- **Kwaliteit.** Schuine en ronde vlakken worden trapjes. Hoe dunner de lagen, hoe kleiner de trapjes. Verticale wanden merken er weinig van.
- **Tijd.** Het aantal lagen is de hoogte gedeeld door de laaghoogte. De sensorhouder is 30 mm hoog: $30 / 0{,}2 = 150$ lagen, of 300 lagen op 0,1 mm. Twee keer zoveel lagen is ongeveer twee keer zo lang printen: de tijd is ongeveer omgekeerd evenredig met de laaghoogte.

De laaghoogte moet ook passen bij de spuitmond: hoogstens ongeveer drie kwart van haar diameter, dus met een spuitmond van 0,4 mm niet meer dan 0,3 mm. Voor de meeste onderdelen is 0,2 mm een goed compromis; 0,1 mm gebruik je voor fijne details, 0,3 mm voor een snel prototype.

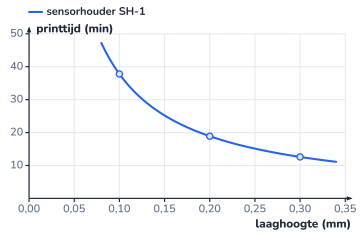
Wat de printtijd nog meer bepaalt: de snelheid, hoeveel materiaal er gelegd moet worden (wanden en vulling), en de verplaatsingen zonder printen. Als vuistregel legt een gewone schoolprinter gemiddeld ongeveer **3 mm³ kunststof per seconde**, de verplaatsingen meegerekend. Kleine, hoge onderdelen zijn trager dan je zou denken: een kleine laag moet even afkoelen voor de volgende komt.

rood: de schuine rand in het model; blauw: wat de printer bouwt (sterk vergroot)



laaghoogte 0,3 mm **laaghoogte 0,1 mm**

Dezelfde helling van 30°, vergroot: op 0,3 mm zie je grove trapjes, op 0,1 mm bijna een gladde lijn.



Printtijd van de sensorhouder: halveer je de laaghoogte, dan verdubbelt de tijd ongeveer.

UITGEWERKT VOORBEELD · 32.11

Habitat: hoeveel filament en tijd kost de sensorhouder?

11/19

Hoeveel filament (in gram en in meter) kost de sensorhouder SH-1 in PLA, hoe lang duurt de print en wat kost het materiaal? De slicer gebruikt 2 wanden van 0,4 mm, 4 boven- en onderlagen van 0,2 mm en 20 % vulling.

GEGEVEN

- de maten van SH-1 (vorig voorbeeld)
- PLA: $\rho = 1{,}24\,\mathrm{g/cm^3}$; filament Ø 1,75 mm
- schil (alles tot 0,8 mm onder het oppervlak): $2{,}79\,\mathrm{cm^3}$, binnenkant $3{,}04\,\mathrm{cm^3}$ (uitgerekend met de computer)
- gemiddeld debiet van de printer: $3\,\mathrm{mm^3/s}$; filament € 20 per kg

GEVRAAGD

- het volume massief
- het geprinte volume, de massa en de lengte filament
- printtijd en kostprijs

OPLOSSING

1 **Volume als het massief was**, stuk per stuk (in mm³). Voetplaat $20 \times 4 \times 30 = 2400$, min het schroefgat $\pi \times 2{,}25^2 \times 4 \approx 64$: 2336. Arm (het deel buiten de plaat) $6 \times 40 \times 5 = 1200$. Ring $\pi \times 7^2 \times 15 \approx 2309$, min het sensorgat $\pi \times 2{,}7^2 \times 12 \approx 275$: 2034. Wig $\frac{1}{2} \times 12 \times 12 \times 4 = 288$. Samen $5858\,\mathrm{mm^3}$; het stukje arm dat in de ring steekt (± 23 mm³) telt maar één keer: $V \approx 5835\,\mathrm{mm^3} \approx 5{,}8\,\mathrm{cm^3}$.

2 **Massief geprint** (100 % vulling) zou dat $5{,}8 \times 1{,}24 \approx 7{,}2\,\text{g}$ zijn. Maar de slicer maakt een schil met vulling: $V_{\text{print}} = 2{,}79 + 0{,}20 \times 3{,}04 \approx 3{,}40\,\text{cm}^3$.

3 **Massa**: $m = \rho \cdot V = 1{,}24 \times 3{,}40 \approx 4{,}2\,\text{g}$.

4 **Lengte filament.** De doorsnede van de draad is $A = \pi \times 0{,}875^2 \approx 2{,}405\,\text{mm}^2$. Volume = doorsnede × lengte, dus $L = V/A = 3401/2{,}405 \approx 1414\,\text{mm} \approx 1{,}4\,\text{m}$.

5 **Printtijd**: $t = V/\text{debiet} = 3401/3 \approx 1134\,\text{s} \approx 19\,\text{min}$. **Kostprijs**: $4{,}2\,\text{g} \times €0{,}02\ \text{per g} \approx €0{,}08$.

ANTWOORD

De sensorhouder kost ongeveer 4,2 g PLA of 1,4 m filament, ongeveer 19 minuten printen en 8 cent materiaal. Een rol van 1 kg (ongeveer 335 m) is goed voor meer dan 200 houders.

Klopt dit? Vergelijk met de slicer: die toont na het snijden de massa en de lengte filament, en een tijd. Kleine verschillen zijn normaal: de slicer kent de echte banen, de rok rond het onderdeel en de snelheden. Wie een definitieve houder in PETG print (1,27 g/cm³, Intermediate hoofdstuk 17), rekent op 1,27 in plaats van 1,24: ongeveer 2 % zwaarder.

UITLEG · 32.12

Ontwerpen voor de printer

12/19

Een printer bouwt van onder naar boven, en elke laag moet op iets rusten. Dat geeft vier regels voor je ontwerp:

1. Overhang: de 45°-regel. Een wand die schuin naar buiten loopt, kan de printer bouwen zolang de hoek met de verticale hoogstens ongeveer **45°** is. Elke laag steekt dan hoogstens een halve lijnbreedte uit over de laag eronder, en rust dus nog voor de helft op iets. Steiler (60°, horizontaal) hangt de lijn in de lucht: dan heb je **support** nodig, of een ander ontwerp. Een afschuining van 45° in plaats van een horizontale rand lost veel op.

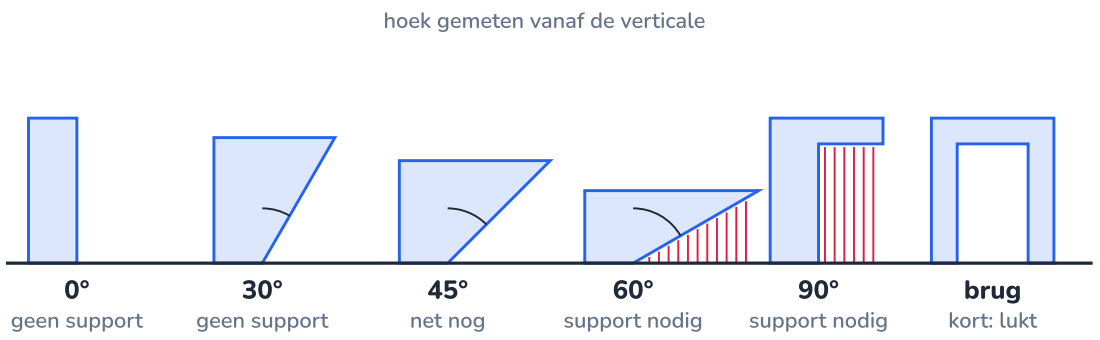
2. Bruggen. Een horizontale overspanning tussen twee steunen (het plafond van een gat, een brug) lukt als ze kort is: de printer trekt de lijn strak van steun naar steun. Een paar millimeter tot ongeveer een centimeter lukt meestal; bij langere bruggen hangen de lijnen door.

3. Printrichting. Kies hoe het onderdeel op het bed ligt: met een groot vlak vlak onderaan, met zo weinig mogelijk overhang, en zo dat de lagen niet uit elkaar getrokken worden. Tussen twee lagen is een print het zwakst: een arm die op buiging belast wordt, print je liefst liggend, met de lijnen in zijn lengte (Intermediate, hoofdstuk 17).

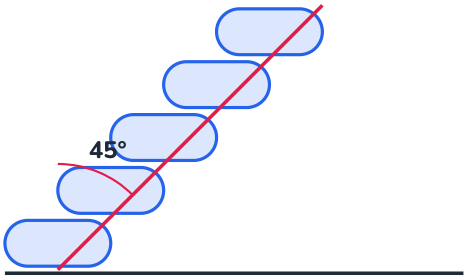
4. Wanddikte en details. Een wand moet minstens twee lijnbreedtes dik zijn: 0,8 mm met een spuitmond van 0,4 mm, liefst meer. Dunnere wanden en details laat de slicer weg. Scherpe hoeken op het bed trekken bij het afkoelen soms omhoog (*warping*): afronden of een rand (brim) helpt.

Supports: het laatste redmiddel

Supports kosten materiaal en tijd, laten ruwe plekken na en zijn soms moeilijk weg te halen. Een goede ontwerper verandert eerst de vorm of de printrichting. Een horizontaal gat van Ø 4,5 mm lukt meestal zonder support; bij grotere horizontale gaten helpt een druppelvorm met een puntje van 45° bovenaan.



Vijf wanden met toenemende overhang, en een korte brug. Rood: supports die de slicer zou toevoegen.



elke laag steekt een halve lijnbreedte uit:
0,2 mm opzij per 0,2 mm hoogte = 45°

lijnbreedte 0,4 mm, laaghoogte 0,2 mm

Vergroot: elke laag schuift een halve lijnbreedte op. Bij 0,2 mm lagen en 0,4 mm lijnen is dat 45°.

UITGEWERKT VOORBEELD · 32.13

Habitat: in welke richting print je de sensorhouder?

13/19

De sensorhouder SH-1 kan op drie manieren op het bed: A zoals getekend (onderkant van plaat, arm en ring op het bed), B met de voetplaat plat op het bed, C ondersteboven. Welke kies je?

GEGEVEN

- de vorm van SH-1
- de 45°-regel, bruggen, de zwakke richting tussen lagen

GEVRAAGD

- een oordeel over A, B en C
- een keuze

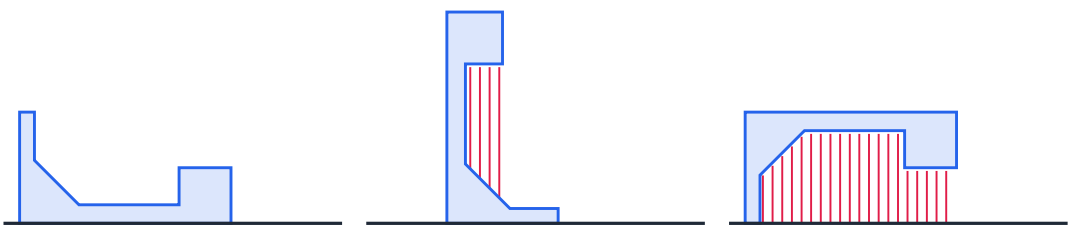
OPLOSSING

1. **A, zoals getekend.** Plaat, arm en ring beginnen allemaal op het bed. De wig loopt schuin omhoog tegen de plaat, maar rust met haar hele onderkant op de arm: geen overhang. Het sensorgat heeft een plafond van 5,4 mm: een korte brug. Het schroefgat ligt horizontaal, klein genoeg. De arm ligt plat: de lijnen lopen in zijn lengte, sterk bij buigen.
2. **B, plaat op het bed.** De arm staat nu rechtop: de lagen liggen dwars op de arm. Buig je de arm, dan trek je de lagen uit elkaar: zwak. De ring steekt opzij uit, 10 mm verder dan de arm: een horizontale overhang die support vraagt.
3. **C, ondersteboven.** De arm hangt 25 mm boven het bed tussen plaat en ring, met niets eronder: overal support. Het sensorgat staat wel open naar boven, maar dat weegt niet op.
4. **Besluit.** A: geen supports, de sterkste arm, een vlakke onderkant die goed kleeft.

ANTWOORD

Printrichting A, zoals getekend. Het model werd bewust zo ontworpen dat alles op één vlak begint.

Klopt dit? Een goede vuistregel: ontwerp je onderdeel meteen in de printrichting, met het grootste vlakke vlak op het werkvlak. Dan zie je overhang al tijdens het tekenen.



A zonder support; B en C met support (rood) en, bij B, een arm met de lagen dwars op zijn lengte.

UITLEG · 32.14

Toleranties: past het?

14/19

Een geprint onderdeel is nooit precies de maat uit het model. Een **tolerantie** zegt hoeveel het mag afwijken. Bij onderdelen die in elkaar moeten, speelt nog iets: **speling**.

Speling tekenen. Een pen van 5 mm past niet in een gat van precies 5 mm. Voor een onderdeel dat moet schuiven, teken je het gat groter: bijvoorbeeld 0,2 mm per kant, dus 5,4 mm. Voor een schroef M4 is Ø 4,5 mm gebruikelijk.

GAT MET SPELING

$$D_{\text{gat}} = d_{\text{pen}} + 2 \times \text{speling}$$

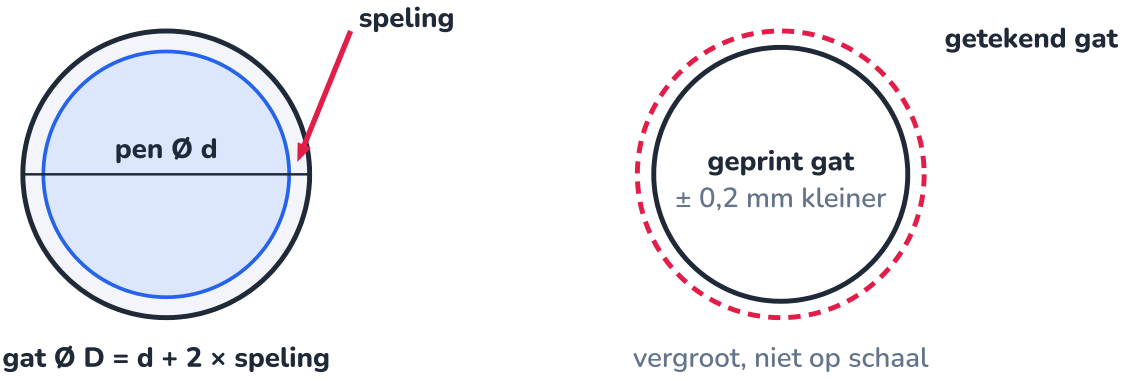
Bijvoorbeeld een pen van 5,0 mm met 0,2 mm speling per kant: $5{,}0 + 2 imes 0{,}2 = 5{,}4\,\text{mm}$.

De printer wijkt af. Een FDM-printer maakt gaten meestal iets **kleiner** en pennen iets **dikker** dan getekend: de gesmolten lijn wordt een beetje platgedrukt en puilt uit. Vaak is dat 0,1 à 0,2 mm, maar het verschilt per printer, filament en instelling. Daarom meet je het één keer met een **testprint** (volgende blad), en houd je er rekening mee in je ontwerp.

In de sensorhouder gebeurde dat twee keer: het schroefgat is Ø 4,5 (een halve millimeter speling rond de schroef), het sensorgat Ø 5,4 voor een lijfje van 5,2 mm (0,2 mm groter getekend, omdat de printer het gat 0,2 mm kleiner maakt: de sensor klemt).

'Het model klopt, dus de print klopt'

Het CAD-model is exact, de print niet. Tussen die twee zitten de veelhoek van de STL (een gat met 20 zijden is al 0,07 mm kleiner), de breedte van de lijn en het krimpen bij het afkoelen. Wie passende delen ontwerpt, test.



Links: de speling tussen pen en gat. Rechts: het geprinte gat valt kleiner uit dan het getekende.

PROEF · 32.15

Hoe nauwkeurig is onze printer?

15/19

ONDERZOEKSVRAAG

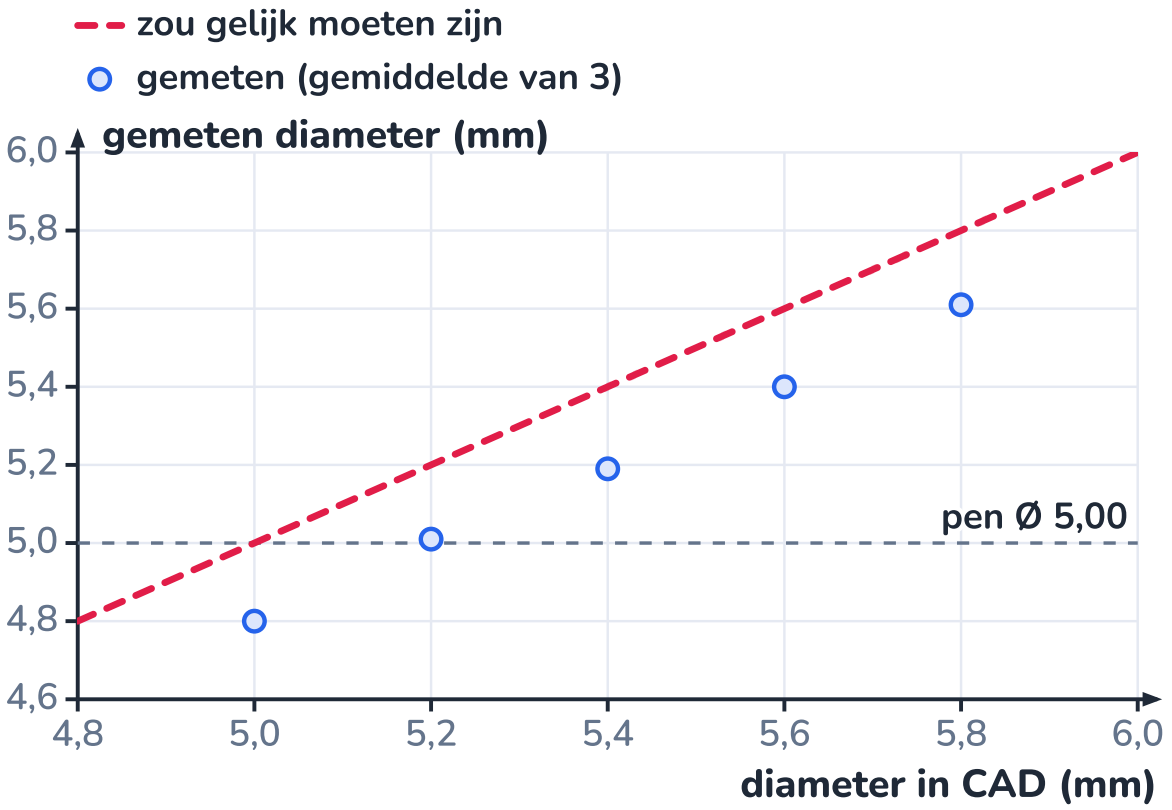
Hoeveel wijkt een geprint gat af van zijn maat in het model, en welk gat moet je tekenen voor een pen van 5,00 mm?

MATERIAAL

- 3D-printer met PLA
- testplaatje: 60 × 15 × 4 mm met vijf gaten van Ø 5,0 / 5,2 / 5,4 / 5,6 / 5,8 mm (64 zijden)
- schuifmaat (0,01 of 0,05 mm)
- metalen pen van 5,00 mm (de schacht van een boor van 5 mm)

Veiligheid

Neem het plaatje pas van het bed als het afgekoeld is. Braampjes verwijder je met een vijl, niet met je vingers.



Alle punten liggen ongeveer 0,2 mm onder de stippellijn: de printer maakt elk gat evenveel kleiner.

WERKWIJZE

1. Teken het testplaatje in CAD (een doos en vijf gatcilinders), zet het aantal zijden van de cilinders op 64 en print het plat, met 0,2 mm lagen.
2. Meet elk gat drie keer met de binnenbekken van de schuifmaat, telkens in een andere richting. Noteer het gemiddelde.
3. Probeer de pen in elk gat en noteer: past niet, past met duwen, schuift, rammelt.
4. Zet de gemeten diameter uit tegen de diameter in het model.

WAARNEMING

diameter in CAD (mm)	gemeten (mm)	verschil (mm)	pen van 5,00 mm
5,0	4,80	−0,20	past niet
5,2	5,01	−0,19	past met du
5,4	5,19	−0,21	schuift, wein speling
5,6	5,40	−0,20	schuift ruim
5,8	5,61	−0,19	rammelt

Elk gat is ongeveer 0,2 mm kleiner dan getekend, voor alle maten even veel.

VERKLARING

Een lijn gesmolten kunststof wordt bij het leggen iets breder dan de spuitmond en puilt aan de binnenkant van een gat uit: het gat krimpt met een vaste hoeveelheid, hier gemiddeld 0,20 mm. Omdat de afwijking voor elke maat gelijk is, kan je ze eenvoudig verrekenen: wil je een pen van 5,00 mm met weinig speling laten schuiven, teken dan 5,4 mm; wil je dat ze klemt, teken 5,2 mm.

Deze uitkomst geldt voor *deze* printer met *dit* filament. Een andere printer of PETG geeft een andere afwijking: daarom hoort een testprint bij elk nieuw ontwerp dat moet passen.

Lasersnijden en andere maakmethoden

Een 3D-printer is niet altijd de beste keuze. Maakmethoden vallen in drie families: **additief** (opbouwen, zoals printen), **subtractief** (wegnemen: zagen, boren, frezen, lasersnijden) en **vormend** (een materiaal in vorm brengen: buigen, vacuümvormen, gieten).

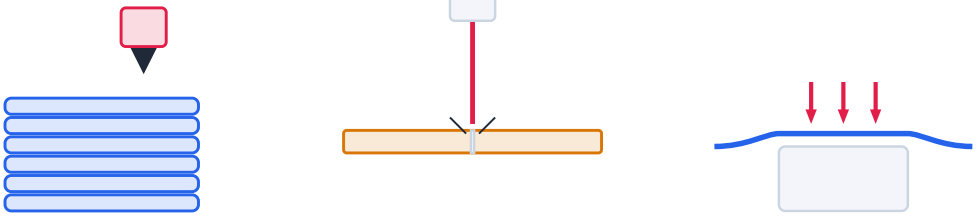
Een **lasersnijder** stuurt een krachtige, onzichtbare laserstraal (bij schooltoestellen meestal een CO_2-laser) over een plaat. Waar de straal komt, verbrandt of verdampt het materiaal: hij snijdt vlakke vormen uit, of graveert tekst en tekeningen. Hij werkt met een **2D-tekening** (lijnen), niet met een 3D-model. Een plaat van 3 mm multiplex snijdt hij in enkele minuten; een print van dezelfde plaat duurt uren. Met vingerlassen (tandjes die in elkaar grijpen) bouw je van vlakke delen een doos.

Ook de laser neemt materiaal weg: de **snede** (kerf), ongeveer 0,1 à 0,2 mm breed. Een uitgesneden stuk wordt daardoor iets kleiner, een uitgesneden gat iets groter, telkens met een halve snede aan elke rand.

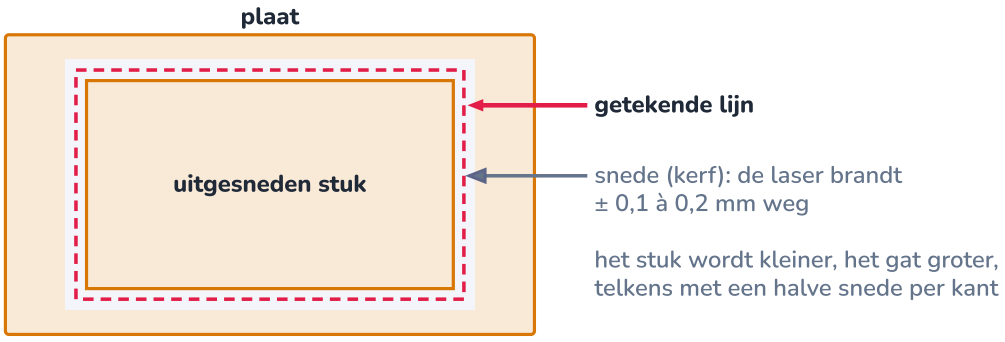
methode	soort	materiaal	vormen	nauwkeurigheid	goed voor
3D-printen (FDM)	additief	PLA, PETG, ASA …	bijna alles, ook hol	± 0,2 mm	één stuk of enkele, prototypes, sensorhouders
lasersnijden	subtractief (2D)	multiplex, MDF, karton, acryl (PMMA)	vlakke delen, in elkaar te steken	± 0,1 mm, snede 0,1-0,2 mm	platen, etiketten, dozen, sjablonen
CNC-frezen	subtractief	hout, kunststof, aluminium	vlakke en 3D-vormen	± 0,05 mm	sterke delen, metaal
zagen, boren, vijlen	subtractief	bijna alles	eenvoudige vormen	± 0,5 mm (hand)	profielen op lengte, gaten in het frame
vacuümvormen	vormend	dunne kunststofplaat (PS, PETG)	schalen, kapjes over een mal	volgt de mal	bakjes, afdekkapjes in serie
spuitgieten	vormend	PP, PE, ABS …	alles wat uit een mal kan	± 0,05 mm	duizenden gelijke stukken (de plantenbakjes)

Wat nooit onder de laser mag

Snij nooit **PVC** of vinyl: het geeft chloorhoudende gassen die je longen en de machine aantasten. Ook **polycarbonaat** (de wanden van de meetkas) snijdt slecht: het verkleurt, brandt en geeft schadelijke rook. Weet je niet wat een kunststof is, dan snij je het niet. Een lasersnijder werkt altijd met afzuiging, met het deksel dicht, en nooit onbewaakt: het materiaal kan vuur vatten. Een CO_2-laser van school snijdt ook geen metaal.



Opbouwen, wegnemen of vormen: elke familie heeft haar eigen sterktes.



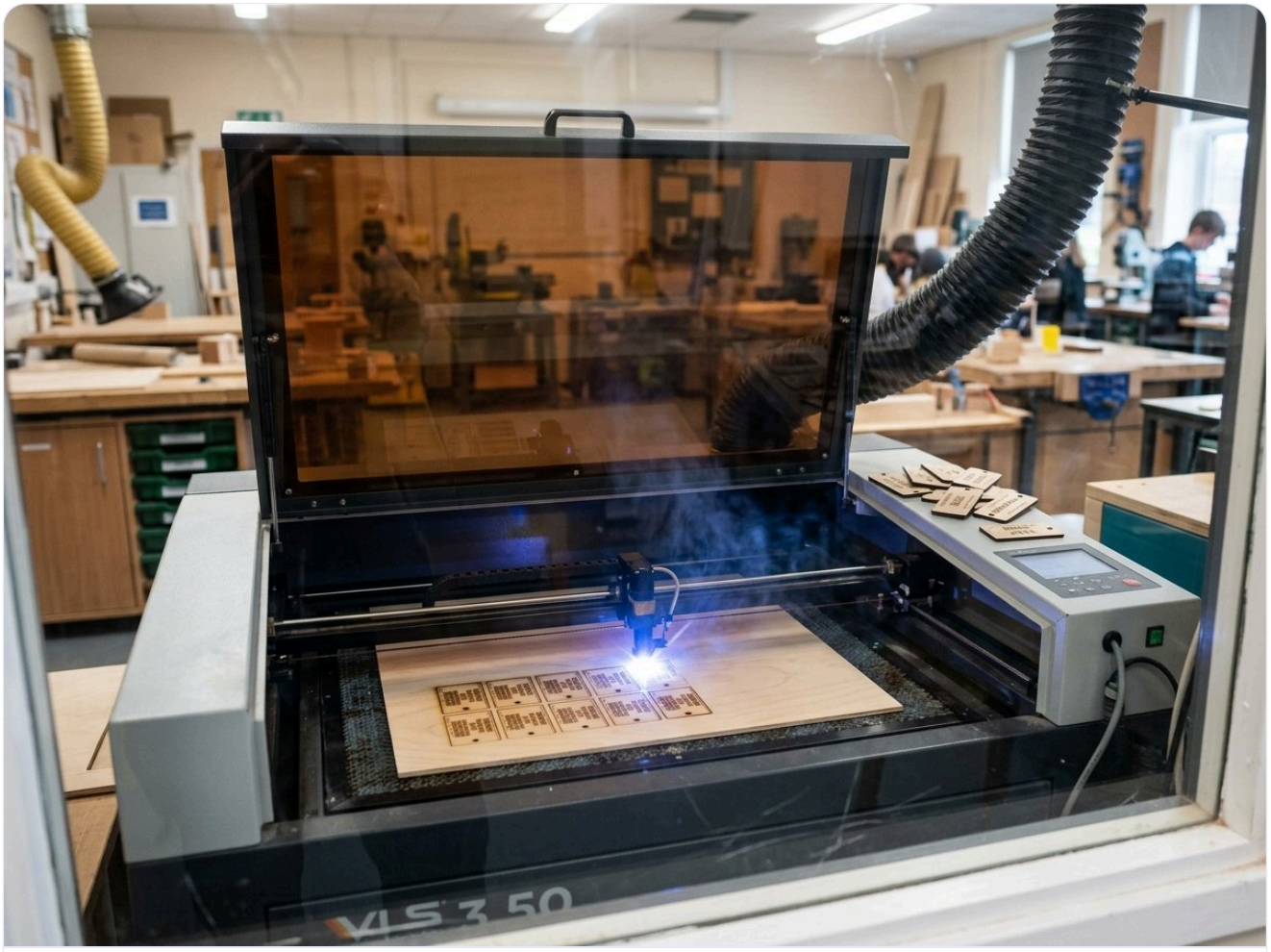
De snede: wat de laser wegbrandt, zit voor de helft aan het stuk en voor de helft aan de plaat.

UITGEWERKT VOORBEELD · 32.17

Printer, laser of zaag?

17/19

Kies voor drie onderdelen van de meetkas een maakmethode: (a) de sensorhouder SH-1; (b) twaalf etiketten van 60 × 20 mm voor de bakjes; (c) acht hoekplaatjes van aluminium voor de open voorkant van het frame (hoofdstuk 13).



Twaalf etiketten in enkele minuten: voor vlakke delen is een lasersnijder veel sneller dan een printer.

GEGEVEN

- 3D-printer, lasersnijder (CO_2) met multiplex en acryl, zaag en boormachine
- de eisen van elk onderdeel

GEVRAAGD

- een methode per onderdeel, met reden

OPLOSSING

1. **(a) Sensorhouder: 3D-printen.** Een 3D-vorm met een ring, een blind gat en een wig: dat kan een laser niet (hij snijdt alleen vlak) en met de hand is het lastig. Eén of enkele stuks: een printer is ideaal. Prototype in PLA, de definitieve houder in licht PETG.
2. **(b) Twaalf etiketten: lasersnijden.** Vlakke plaatjes, twaalf keer hetzelfde, met gegraveerde tekst: de laser snijdt en graveert ze in enkele minuten uit één plaat multiplex of acryl. Printen kan ook (zie het voorbeeld van het etiket), maar duurt ruim tien minuten per stuk.
3. **(c) Hoekplaatjes in aluminium: zagen, boren en vijlen.** Een CO_2-laser van school snijdt geen metaal, en een printer print geen aluminium. Een strip aluminium op lengte zagen, de gaten boren (Ø 4,5 voor M4) en de braampjes wegvijlen gaat snel.

ANTWOORD

Sensorhouder printen, etiketten lasersnijden, hoekplaatjes zagen en boren.

Klopt dit? Stel bij elke keuze drie vragen: kan de methode deze vorm maken, in dit materiaal, en hoeveel stuks tegen welke tijd? Bij duizenden gelijke stukken wint een heel andere methode: de plantenbakjes zelf worden in een fabriek spuitgegoten.

NASLAG · 32.18

18/19

Overzicht: CAD en 3D-printen

De rekenregels, de instellingen en de ontwerpregels van dit hoofdstuk.

massa van de print

$$m = \rho \cdot V$$

symbool	betekenis	eenheid
m	massa	g
ρ	dichtheid (PLA 1,24; PETG 1,27)	g/cm³
V	geprint volume	cm³

lengte filament

$$L = \frac{V}{A} \quad \text{met} \quad A = \pi \cdot r^2$$

symbool	betekenis	eenheid
L	lengte filament	mm
V	volume	mm³
A	doorsnede van het filament (1,75 mm: 2,405)	mm²

lagen

$$\text{aantal lagen} = \frac{\text{hoogte}}{\text{laaghoogte}}$$

symbool	betekenis	eenheid
	printtijd is ongeveer omgekeerd evenredig met de laaghoogte	

passend gat

$$D_{\text{gat}} = d_{\text{pen}} + 2 \times \text{speling} + \text{afwijking van de printer}$$

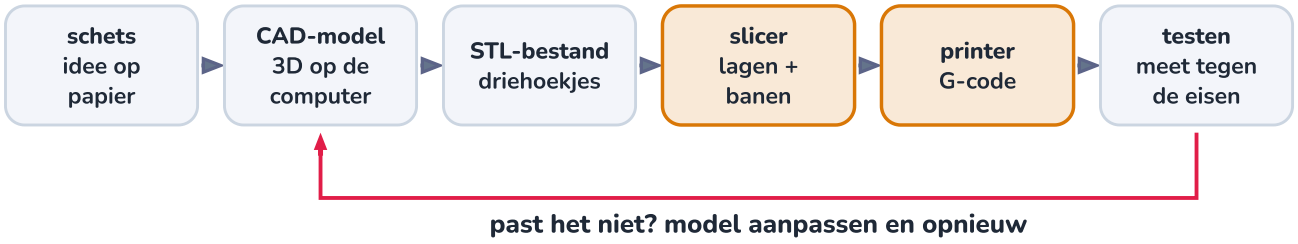
symbool	betekenis	eenheid
	speling bv. 0,2 mm per kant; afwijking meten met een testprint (hier 0,2 mm)	

instelling	typische waarde (PLA, spuitmond 0,4 mm)	wat het doet
laaghoogte	0,2 mm (0,1 fijn, 0,3 snel)	dikte van één laag: detail tegenover tijd
wanden (perimeters)	2 à 3 lijnen van 0,4 mm	de buitenkant; bepaalt het meest de sterkte
boven- en onderlagen	4 à 5 lagen	een dichte huid boven en onder
vulling (infill)	15 à 20 % (sterk: 40 %)	een raster binnenin: sterkte tegenover materiaal en tijd
supports	alleen waar het moet	tijdelijke steunen onder overhangen, achteraf weg te breken
temperatuur spuitmond / bed	PLA ± 210 °C / 60 °C; PETG ± 240 °C / 80 °C	het filament smelt; de eerste laag kleeft
rok of rand (skirt, brim)	rok: 1 lus; rand: 5 mm	de spuitmond vullen; een rand houdt hoeken op het bed

ontwerpregel	waarom
overhang hoogstens ± 45° van de verticale	elke laag rust nog voor de helft op de vorige
bruggen kort houden (tot ± 1 cm)	langere lijnen hangen door
groot vlak vlak op het bed	goede hechting, geen support
belaste delen liggend printen	tussen de lagen is een print het zwakst
wanden minstens 0,8 mm (2 lijnen)	dunnere wanden laat de slicer weg
gatvormen iets langer dan de plaat	geen vliesje in het gat
speling tekenen en testen	de print is nooit exact de maat van het model

methode	soort	materiaal	vormen	nauwkeurigheid	goed voor
3D-printen (FDM)	additief	PLA, PETG, ASA …	bijna alles, ook hol	± 0,2 mm	één stuk of enkele, prototypes, sensorhouders
lasersnijden	subtractief (2D)	multiplex, MDF, karton, acryl (PMMA)	vlakke delen, in elkaar te steken	± 0,1 mm, snede 0,1-0,2 mm	platen, etiketten, dozen, sjablonen
CNC-frezen	subtractief	hout, kunststof, aluminium	vlakke en 3D-vormen	± 0,05 mm	sterke delen, metaal
zagen, boren, vijlen	subtractief	bijna alles	eenvoudige vormen	± 0,5 mm (hand)	profielen op lengte, gaten in het frame

methode	soort	materiaal	vormen	nauwkeurigheid	goed voor
vacuümvormen	vormend	dunne kunststofplaat (PS, PETG)	schalen, kapjes over een mal	volgt de mal	bakjes, afdekkapjes in serie
spuitgieten	vormend	PP, PE, ABS …	alles wat uit een mal kan	± 0,05 mm	duizenden gelijke stukken (de plantenbakjes)



De keten van idee tot object.

HET GEHEEL · 32.19

Waar CAD en 3D-printen naartoe leiden

19/19

Met dit hoofdstuk sluit het deel Ontwerpen en maken van Fundamental af: je kan een idee bedenken en kiezen (hoofdstuk 30), vastleggen (hoofdstuk 31) en maken (hier). Maken raakt de leerlijn **materie**: welk filament, hoe dicht, hoe warm. In Intermediate leer je waarom PLA in de zon slap wordt en PETG niet, en teken je **parametrisch**: maten als variabelen, zodat een aangepaste speling één getal is in plaats van een nieuw model. In Expert komen sterkteberekeningen en de levenscyclus van wat je maakt.

F7 Massa, volume en dichtheid
Massa uit volume en dichtheid: hoeveel filament een print kost.

F10 Materialen en hun eigenschappen
Kunststoffen als materiaalfamilie; kiezen met een keuzetabel.

F13 Constructies: sterk en stabiel
Vorm telt meer dan materiaal: waarom de wanden de sterkte van een print bepalen.

F25 Sensoren en automatisch regelen
De TMP36 die in de houder komt, en waarom hij uit de zon moet.

F30 De ontwerpcyclus
Prototype, testen, verbeteren: printen maakt de rondes snel.

F31 Technisch tekenen
Van werktekening naar model: dezelfde maten, dezelfde taal.

F33 Integratieproject: de meetkas
De sensorhouders en andere geprinte onderdelen in de echte kas.

I17 Polymeren en composieten
Welk filament in de warme, vochtige kas: licht PETG, ASA in de volle zon; waarom een print tussen de lagen zwak is.

I37 Parametrisch ontwerpen
Ontwerpen met parameters en beperkingen; passingen, snap-fits en ontwerpen voor montage.

I38 Duurzaam ontwerpen
Hoeveel afval en energie een print kost, en of repareren beter is dan opnieuw printen.

E12 Sterkteleer
Spanning en doorbuiging: hoe dik moet de arm van een houder zijn?

Habitat
De meetkas krijgt sensorhouder SH-1 voor de TMP36: voetplaat 20 × 4 × 30 mm met een gat Ø 4,5 voor een schroef M4, arm 6 × 42 × 5 mm met steunwig, ring Ø 14 × 15 mm met een sensorgat Ø 5,4 × 12 mm van onderen (dakje van 3 mm), de sensor 5 cm van het frame. Printrichting zoals getekend, 0,2 mm lagen, 2 wanden, 20 % vulling: ± 4,2 g PLA (1,4 m) en ± 20 minuten voor het prototype; de definitieve houder in wit of lichtgrijs PETG. In opdracht 32.13 ontwerp je een houder voor de bodemvochtsensor.

SAMENVATTING

In het kort

- Van idee tot object: schets, CAD-model, STL-bestand (driehoeken), slicer (lagen en banen), G-code, printer, testen.
- In CAD bouw je met basisvormen en gaten; groeperen voegt samen en snijdt de gaten weg; uitlijnen en dupliceren houden maten gelijk. Een model is altijd op ware grootte.
- Een STL beschrijft het oppervlak met driehoeken; een cilinder wordt een veelhoek (4n − 4 driehoeken), en een gat met weinig zijden valt iets kleiner uit.
- De slicer maakt een schil (wanden, boven- en onderlagen) met een vulling. De sterkte zit vooral in de wanden.
- Printtijd is ongeveer omgekeerd evenredig met de laaghoogte. Materiaal: $m = \rho \cdot V$ en $L = V / A$ (1 kg PLA van 1,75 mm is ongeveer 335 m).
- Ontwerp voor de printer: overhang hoogstens 45° van de verticale, korte bruggen, een groot vlak op het bed, belaste delen liggend, wanden minstens 0,8 mm.
- Teken speling (bv. 0,2 mm per kant) en meet met een testprint hoeveel je printer afwijkt (hier: gaten 0,2 mm kleiner).
- Lasersnijden is snel voor vlakke delen (snede 0,1 à 0,2 mm; nooit PVC); zagen en boren voor metaal; spuitgieten voor duizenden stuks.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

CAD
Computer-aided design: ontwerpen met de computer, hier een 3D-model van een onderdeel.

basisvorm
Eenvoudige 3D-vorm waarmee je bouwt: doos, cilinder, wig, kegel, bol.

gat (in CAD)
Een vorm die bij het groeperen wegsnijdt uit de vormen waarmee ze overlapt.

groeperen
Vormen en gaten samenvoegen tot één onderdeel; gaten worden er dan uitgesneden.

uitlijnen
Vormen netjes ten opzichte van elkaar zetten: links, midden of rechts in een richting.

STL
Bestandsformaat dat het oppervlak van een 3D-model beschrijft als een net van driehoeken.

slicer
Programma dat een 3D-model in lagen snijdt en de banen van de spuitmond berekent; het resultaat is G-code.

G-code
Lijst met opdrachten voor de printer: waar naartoe, hoe snel, hoeveel filament, welke temperatuur.

FDM
Fused deposition modeling: 3D-printen door gesmolten kunststof laag per laag door een spuitmond te leggen.

laaghoogte
Dikte van één geprinte laag, meestal 0,1 tot 0,3 mm.

vulling (infill)
Het open raster waarmee de slicer de binnenkant van een onderdeel vult, in procent.

support
Tijdelijke steun die de printer bouwt onder delen die anders in de lucht zouden hangen.

overhang
Deel van een model dat verder uitsteekt dan de laag eronder; tot ongeveer 45° van de verticale print het zonder support.

tolerantie
Hoeveel een maat mag afwijken; bij passende onderdelen ook de speling die je bewust tekent.

snede (kerf)
Breedte van het materiaal dat een lasersnijder of zaag wegneemt.

HANDBOEK · HOOFDSTUK 33

Integratieproject: de meetkas

Van programma van eisen tot presentatie: je team bouwt, programmeert, test en presenteert de eerste module van Habitat

Tweeëndertig hoofdstukken lang leerde je telkens één bouwsteen van de meetkas: een maat, een kracht, een schakeling, een programma, een plant. Nu zet je ze samen. In dit integratieproject bouwt je team de meetkas echt, laat je ze een week alleen draaien, toets je haar aan het programma van eisen, voer je de groeiproef uit en presenteer je het resultaat. Het handboek is je **projectgids**: per fase wat je doet, met de waarden die je al berekende. Het werkboek is je **projectmap**.

8× uitleg · 4× uitgewerkt voorbeeld · 2× proef · 1× ontleed · 6× naslag · 1× verhaal · 1× het geheel · 1× code · ± 30 lestijden

D Ontwerpen en maken · O Onderzoeken en meten · L Elektriciteit en elektronica · P Programmeren en computationeel denken · B Leven en systemen · E Energie



De meetkas af: ze meet, geeft water, verlucht en draait op de zon. De eerste module van Habitat werkt.

Na dit hoofdstuk

- Je kan met een team van drie of vier een project van tien weken plannen, de taken verdelen en een logboek en een portfolio bijhouden.
- Je kan het programma van eisen van de meetkas herbekijken, aanvullen en per eis een toets met een meetbaar criterium kiezen.
- Je kan de meetkas bouwen volgens de werktekeningen en haar stijfheid en stabiliteit meten en narekenen.
- Je kan de elektrische kring van de meetkas veilig aansluiten volgens het aansluitschema, met een zekering per tak, en systematisch meten waar een fout zit.
- Je kan het volledige programma van de meetkas lezen, met een tabel naspelen, uploaden en stap voor stap testen.
- Je kan het energiebudget van de meetkas narekenen met gemeten stromen en de opbrengst van het zonnepaneel per maand.
- Je kan de groeiproef uitvoeren, de resultaten verwerken in een tabel en een grafiek, en rapporteren in een onderzoeksverslag.
- Je kan je project voorstellen met een poster, een pitch en een demo, en je eigen werk en dat van je teamgenoten eerlijk beoordelen met een rubric.

VERHAAL · 33.1

Alles werkt apart. Werkt het ook samen?

Op 23 september 1999 verdween de **Mars Climate Orbiter**, een ruimtesonde van meer dan honderd miljoen dollar, bij aankomst aan Mars. Het onderzoek vond de oorzaak. De software van het ene team gaf de stoten van de kleine stuurraketten door in een Amerikaanse eenheid (pound-force-seconde), terwijl de navigatiesoftware van een ander team newton-seconde verwachtte. Elk programma werkte zoals het ontworpen was. Het liep mis op de plaats waar ze elkaar raakten: een factor 4,45 die niemand omrekende.

Zo'n plaats heet een **interface**: een stekker, een pin, een maat, een eenheid, een afspraak tussen twee delen. De meetkas heeft er tientallen. De 12 V van de batterij en de 12 V van het pompje. Pin D6 in de code en de draad op D6. De 1180 mm van de tafel en de 1200 mm tussen de kokers. 'Droog = 600' in het programma en de potgrond in jouw bakje. Het stationsdossier van Habitat is eigenlijk een lijst van zulke afspraken: elke waarde staat er één keer in, en iedereen gebruikt dezelfde.

Integreren is daarom meer dan alles in elkaar schuiven. Bij elke stap controleer je of wat je koppelt echt past: in maat, in spanning, in eenheid, in tijd. En je test het **geheel**, want sommige fouten bestaan alleen in het geheel: het dakraam dat niet reageert terwijl het waterprogramma 15 minuten wacht (hoofdstuk 25), de ledstrip die de lichtsensor verblindt, of het zonnepaneel op het dak dat de planten beschaduwt (hoofdstuk 17).

Zo werk je met dit hoofdstuk

Het handboek is je **projectgids**: per fase wat je doet en waarom, met de waarden uit de vorige hoofdstukken en uitgewerkte voorbeelden van een voorbeeldteam (Noor, Sem, Lina en Arne). Het werkboek is je **projectmap**: per fase de opdrachten, met ruimte om in te vullen en een rubric. Houd beide open naast je logboek, en bewaar alles in je Habitat-portfolio.



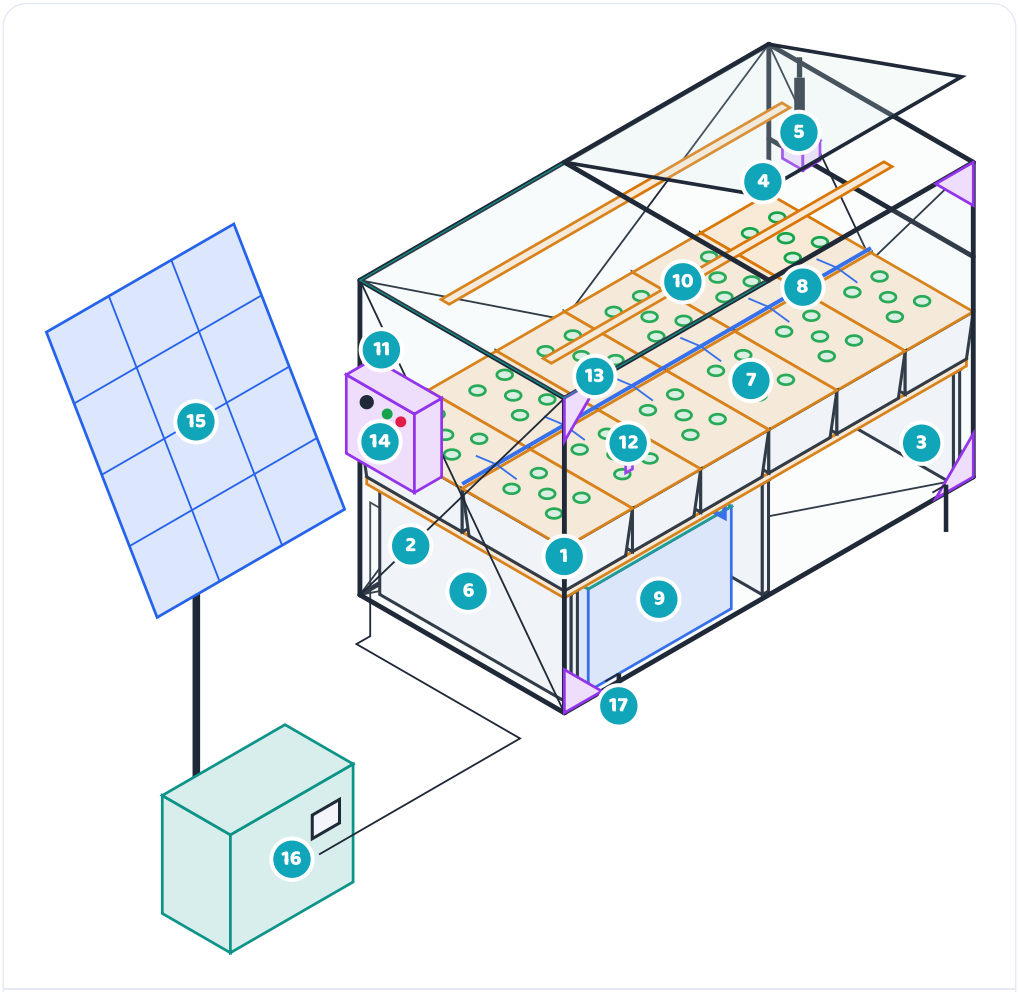
Vier rollen, één kas: bouwen, meten, solderen en bijhouden wat er gebeurt.

ONTLEED · 33.2

De meetkas: alle onderdelen samen

2/24

Zo ziet de afgewerkte meetkas eruit. De binnenmaten zijn 1,20 × 0,60 × 0,80 m (hoofdstuk 3); het frame van 20 mm valt erbuiten. Bij elk nummer staat het hoofdstuk waar je het onderdeel koos, berekende of tekende. Het zonnepaneel staat op een paal naast de kas, niet op het dak zoals in de eerste schets van hoofdstuk 1: een ontwerp verbetert al terwijl je het ontwerpt. De wanden zijn hier doorzichtig getekend, zodat je de tafel, de bakjes en het reservoir ziet.



De meetkas in isometrie (hoofdstuk 31), met links het zonnepaneel op zijn paal en de zonnekast aan de voet.

1 Frame
Aluminium kokerprofiel 20 × 20 × 1,5 mm, 10,4 m, 3,1 kg (hoofdstuk 10). RVS-schroeven M4 met nylon ringen: geen rechtstreeks contact tussen de twee metalen.

2 Gekruiste kabels
RVS-kabel in de achterwand, de zijwanden en de bodem: 4,78 m diagonalen maken van elke rechthoek twee driehoeken (hoofdstuk 13). De open voorkant krijgt hoekplaatjes.

3 Wanden en dak
Kanaalplaat polycarbonaat 4 mm, 3,60 m², laat ±80 % licht door, UV-kant naar buiten, kanalen verticaal (hoofdstuk 10). In het midden vast, sleufgaten aan de uiteinden: de plaat zet meer uit dan het frame (hoofdstuk 6). De voorkant kan open (eis G1).

4 Dakraam
De rechterhelft van het dak, 0,60 × 0,60 m, 1,2 kg, scharnier achteraan. Met de hand 5,9 N aan de voorrand; open 20 cm (hoofdstuk 12).

5 Duwstang
12 V, slag 4,0 cm, hoogstens 40 N, op 12 cm van het scharnier: ze moet 29,5 N duwen (hoofdstuk 12). Relais K3 en K4 kiezen de richting (hoofdstuk 25). De hoeksteun HAB-F31-01 zit op een extra regel in de rechterzijwand.

6 Plantentafel
Watervast multiplex: blad 1180 × 580 × 18 mm op drie steunen met een achterregel (HAB-F31-03). De middelste steun houdt de doorbuiging onder de 3,0 mm van eis C1 (hoofdstuk 11 en 13).

7 Plantenbakjes
12 bakjes van 30 × 20 cm in PP, twee rijen van zes, taps naar onder (HAB-F31-02). Vol 4,0 kg of 39 N per bakje (hoofdstuk 11). Pluksla (hoofdstuk 27).

8 Druppelslang
Tussen de twee rijen, met een eigen druppelaar per bakje (eis W5). Binnendiameter 8,0 mm; in de aanvoer stroomt het water 16 cm/s (hoofdstuk 14).

9 Reservoir en pompje
Binnen 40 × 30 × 25 cm, donker afgedekt tegen algen, onder de tafel tussen twee steunen (hoofdstuk 3, 9 en 31). Pompje 12 V, 0,65 A, 8,0 mL/s (hoofdstuk 4 en 19), met twee vlotterschakelaars: B1 in de pompkring, B2 op pin D3.

10 Ledstrip
Twee helften van 60 Ω, één boven elke rij: samen 0,40 A en 4,8 W (hoofdstuk 19 tot 21). Alleen van oktober tot maart, 4 uur per avond.

11 Temperatuursensor
TMP36 in de sensorhouder SH-1, 5 cm van de koker, in de schaduw van een dakje (hoofdstuk 32). Geijkt: 1,5 °C aftrekken (hoofdstuk 25).

12 Bodemvochtsensor
Capacitieve sensor in houder SH-2, altijd even diep in hetzelfde bakje. IJkpunten 600 (droog) en 300 (nat) (hoofdstuk 25 en 32).

13 Lichtsensor
LDR met 10 kΩ, bovenop het frame: ze ziet het daglicht, maar niet de ledstrip (hoofdstuk 25).

14 Elektronicakast
Waterdichte kast buiten tegen de linkerwand: Arduino Uno, relaismodule, omvormer 12 → 5 V, zekeringen F1 tot F5, het statuslampje (rood en groen) en de knop (hoofdstuk 18 tot 25).

15 Zonnepaneel
50 Wp, ±0,65 × 0,55 m, op het zuiden onder 60°, op een paal naast de kas zodat het de planten niet beschaduwt (hoofdstuk 17).

16 Zonnekast
Batterij 12 V van ±250 Wh met zekering F6 en de laadregelaar (hoofdstuk 17 en 21). Van november tot januari blijft de 230 V-adapter reserve: buiten de kas, droog, hoger dan het water, achter een differentieel van 30 mA (hoofdstuk 5).

17 Grondankers
Twee per lange zijde, elk minstens 100 N (eis C4): een lege kas is licht en vangt veel wind (Intermediate, hoofdstuk 10).

UITLEG · 33.3

De meetkas als één systeem

3/24

In hoofdstuk 1 beschreef je de meetkas als een systeem met input, proces en output, nog zonder te weten hoe ze vanbinnen zou werken. Nu ken je elk deelsysteem. Het systeemschema toont hoe ze samenhangen:

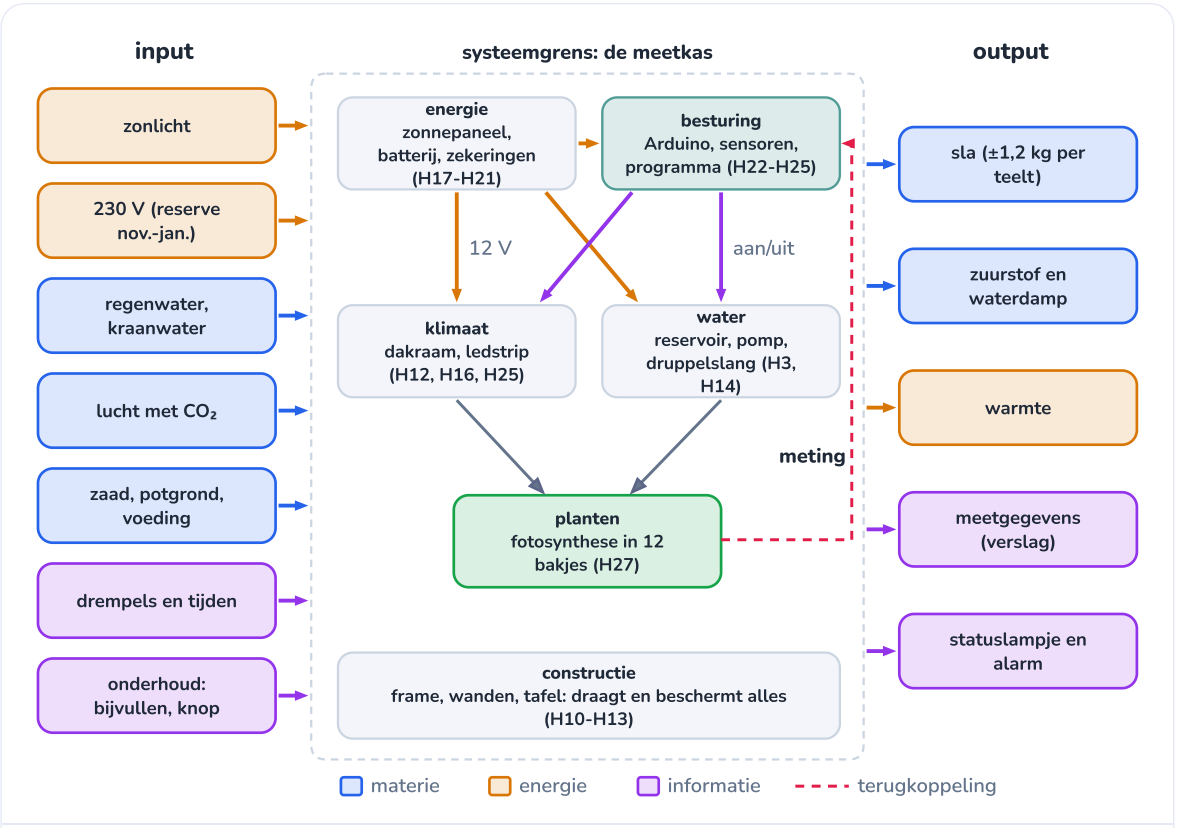
- **input**: zonlicht, water, lucht, zaad en potgrond, en informatie (de drempels, het onderhoud);
- **zes deelsystemen**: energie, besturing, klimaat, water, planten, en de constructie die alles draagt;
- **output**: sla, zuurstof en waterdamp, warmte, en meetgegevens.

Twee lussen maken van de meetkas een systeem dat zichzelf regelt. De bodemvochtsensor meet wat de pomp veranderde, de temperatuursensor meet wat het dakraam veranderde: dat is **terugkoppeling** (hoofdstuk 1 en 25). De ledstrip werkt anders: de lichtsensor meet het daglicht, niet het licht van de ledstrip, en de ledstrip brandt een vaste tijd. Dat is een open lus die door een gebeurtenis (het donker) gestart wordt.

Kijk ook naar de pijlen tussen de deelsystemen. De energie gaat naar de besturing en via de relais naar klimaat en water; de besturing stuurt alleen informatie (aan of uit). Elke pijl is een interface, en dus een plaats waar je bij het testen gaat kijken.

Een schema om mee te zoeken

Loopt er iets mis, volg dan de pijlen terug. Geen water in de bakjes? Kijk bij *water* (slang, pomp), bij *besturing* (sensor, relais K2) en bij *energie* (zekering F3). Het foutzoekblad verderop werkt precies zo.



Blauw is materie, geel energie, paars informatie; de rode stippellijnen zijn de terugkoppeling van de sensoren.

UITLEG · 33.4

Werken als projectteam: rollen, planning en logboek

4/24

Een project van tien weken met vier mensen loopt niet vanzelf. Drie gewoonten maken het verschil.

1. Vaste rollen. Elk teamlid is verantwoordelijk voor één deel, en is de tweede verantwoordelijke voor een ander deel: zo ligt het werk niet stil als iemand ziek is. Met drie voeg je projectleider en onderzoeker samen. Iedereen soldeert, test en presenteert mee.

rol	verantwoordelijk voor	vooral in fase	steunt op hoofdstuk
projectleider	planning, logboek, contact met de leraar; bewaakt de tijd en het programma van eisen	alle	30
bouwer	tekeningen, constructie, stijfheid en stabiliteit, afwerking	2, 3	10-13, 31, 32
elektronicus-programmeur	kring en veiligheid, code, energiebudget	4, 5, 6	18-25
onderzoeker	ijken, testplan, groeiproef, verslag	5, 7, 8	2-4, 27

2. Een planning met mijlpalen. Het voorbeeldteam kreeg tien weken van drie lestijden. Sommige fasen lopen parallel: terwijl de bouwer de wanden plaatst, test de programmeur de code op tafel. De groeiproef start in week 5, zodra de kas staat, en duurt vijf weken. Een **mijlpaal** is een moment waarop iets af moet zijn en getoetst wordt; het voorbeeldteam koos er negen, van 'PvE versie 2' in week 1 tot de presentatie in week 10. Heb je maar acht weken, zaai dan in week 3 en geef tot de pomp werkt met de hand 150 mL per bakje per dag (hoofdstuk 27).

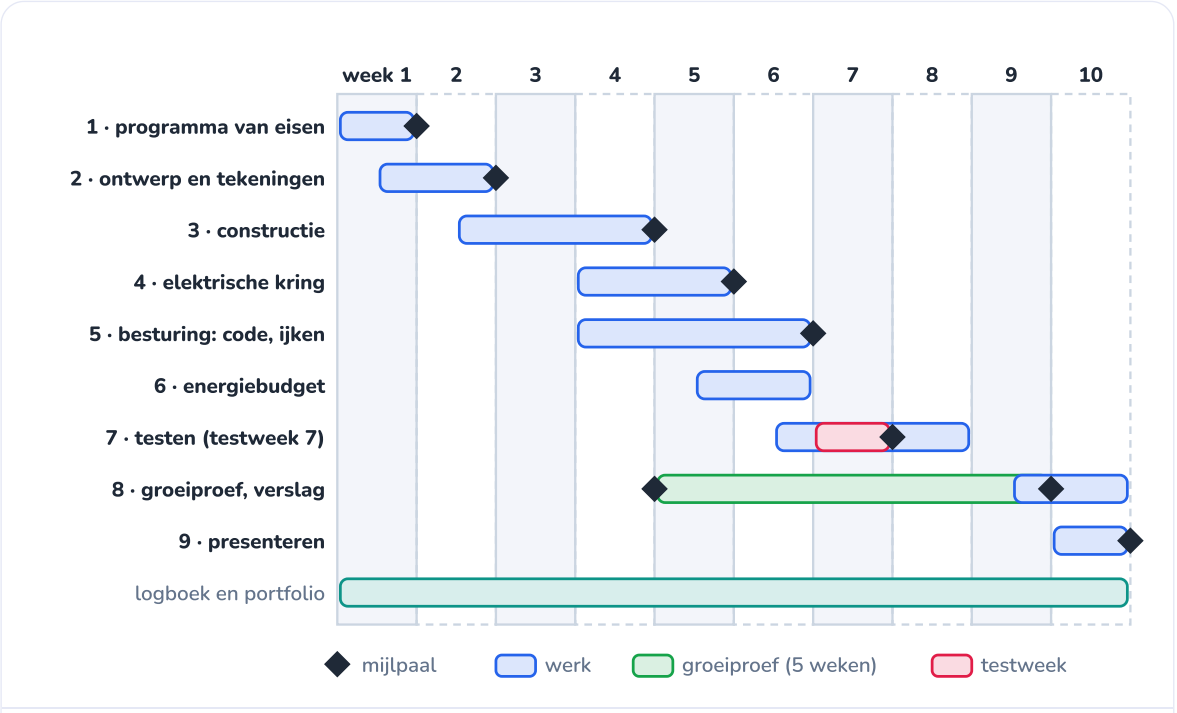
3. Een logboek en een portfolio. Het logboek houdt bij wie wat deed, welke problemen er waren, wat er beslist werd en wat de volgende stap is: vijf minuten aan het einde van elke les. Het portfolio bundelt

alles: de Habitat-opdrachten van hoofdstuk 1 tot 32, het programma van eisen, de tekeningen, het testrapport, het verslag, de poster en je reflectie.

datum	wie	wat gedaan	probleem of beslissing	volgende stap
week 3, di	Sem, Lina	frame gemonteerd	achterwand scheef: diagonalen 1446 en 1438 mm	kabels spannen tot beide 1442 mm
week 5, do	Arne	eerste keer 12 V, keuring	zekering F2 van de ledstrip ontbrak	F2 geplaatst, opnieuw gekeurd: in orde
week 5, vr	Arne, Noor	programma geüpload	pomp sloeg aan in natte grond: DROOG en NAT omgewisseld	constanten verbeterd, test herhaald

Het kritieke pad

Sommige taken moeten af voor een andere kan beginnen: zonder frame geen wanden, zonder gekeurde kring geen besturing in de kas, zonder werkende pomp geen testweek. Loopt zo'n taak uit, dan schuift alles op. Het voorbeeldteam hield week 8 vrij als buffer.



De planning als Gantt-diagram: elke balk is een fase, elk ruitje een mijlpaal; groen is de groeiproef, rood de testweek.

NASLAG · 33.5

Fase 1: het programma van eisen, versie 2

5/24

Het programma van eisen van hoofdstuk 30 (versie 1: 34 eisen, waarvan 26 moet-eisen) is de lat waarmee je de kas beoordeelt. Voor je bouwt, herbekijk je het met je team, eis per eis, met drie vragen:

1. Klopt de eis nog met wat we nu weten? De tafel kreeg in hoofdstuk 31 bijvoorbeeld een steun in het midden.
2. Is ze toetsbaar: wie toetst, waarmee, wanneer, en met welk criterium?
3. Ontbreekt er iets? Samenzetten brengt eisen boven die je voor één onderdeel niet zag.

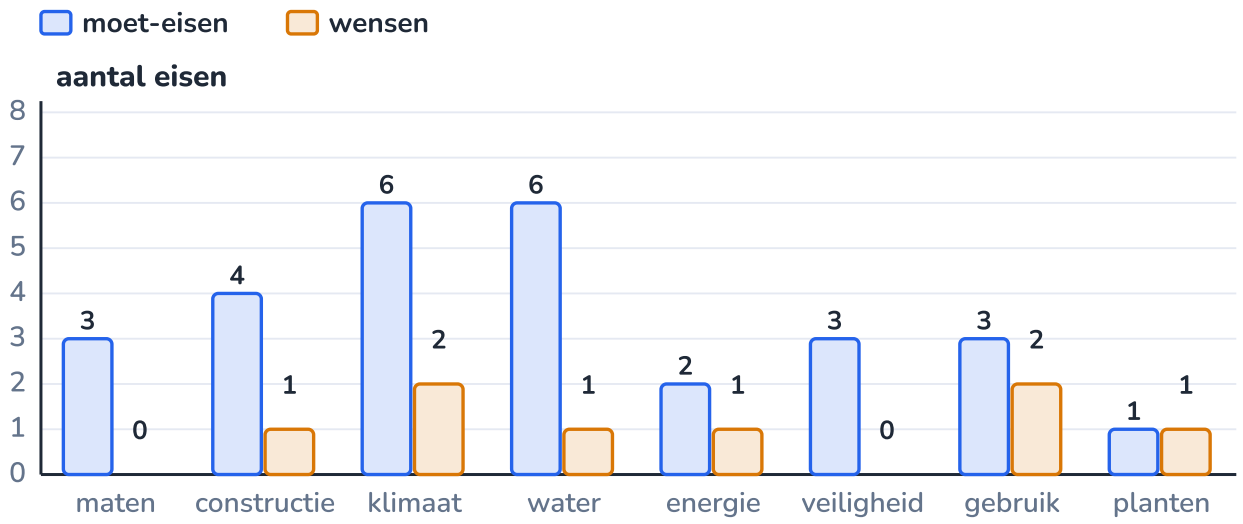
Het voorbeeldteam voegde twee moet-eisen toe en paste drie ontwerpwaarden aan. Versie 2 telt 36 eisen, waarvan 28 moet-eisen. Het volledige testrapport staat verderop (fase 7).

Wat er veranderde

code	wijziging	waarom
G5	nieuw (moet): na een stroomuitval start de besturing vanzelf, met het raam dicht en pomp en ledstrip uit	in tien weken valt de stroom zeker eens weg; het programma weet dan niet meer of het raam open stond
W7	nieuw (moet): een onmogelijke waarde van de vochtsensor (ruw onder 250 of boven 620) geeft geen pompbeurt maar een alarm	een sensor die uit de grond getrokken is, meet 'droger dan droog' en zou elk kwartier pompen (hoofdstuk 25)
C1	ontwerpwaarde: tafel op drie steunen (HAB-F31-03)	de middensteun uit hoofdstuk 31 lost de doorbuiging van 3,7 mm op
C5	'leeg' = zonder tafel en bakjes	met de steunen en de regel weegt de tafel zelf 15,1 kg (hoofdstuk 13 telde alleen het blad)
E1-E3	ontwerpwaarden met relaisspoelen en duwstang: 43,9 en 64,6 Wh per dag	het budget van hoofdstuk 21 telde die nog niet

Wanneer toets je welke eis?

fase	welke eisen toets je dan?
3 · constructie	M1, M2, M3, C1, C2, C3, C4, C5, V3, G1
4 · elektrische kring	V1, V2, W3 (vlotter B1)
5 · besturing	K1, K2, K8, W1, W4, W7, G2, G5
6 · energie	E1, E2, E3 (berekening; E1 ook in de testweek)
7 · testweek	K3, K4, K5, K6, K7, W2, W5, G3, G4
8 · groeiproef	P1, P2
na een jaar	W6 (regenwaterbalans)



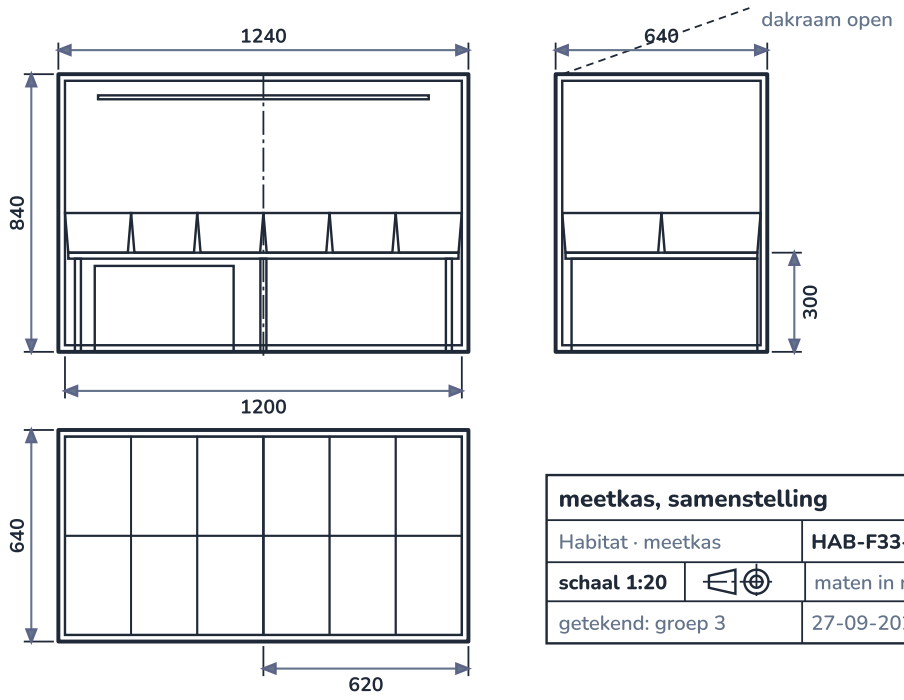
Klimaat en water tellen de meeste eisen: de kas moet vooral zichzelf verzorgen.

UITGEWERKT VOORBEELD · 33.6

Fase 2: de samenstellingstekening

6/24

Maak de **samenstellingstekening** van de meetkas: het geheel in drie aanzichten met de hoofdmaten, met een verwijzing naar de werktekeningen van de onderdelen. Welke schaal kies je, welke maten zet je erop, en welke tekeningen horen in de tekeningenlijst?



Samenstellingstekening HAB-F33-01: het frame dik, wat je door de platen ziet dun, het open dakraam gestreept.

GEGEVEN

- binnenmaten 1200 × 600 × 800 mm, frame van 20 mm erbuiten (hoofdstuk 3 en 10)
- tafel 300 mm hoog, bakjes 120 mm, reservoir 420 × 320 × 260 mm buiten (hoofdstuk 3, 31)
- dakraam: de rechterhelft van het dak
- papier: A4 liggend (297 × 210 mm)

GEVRAAGD

- schaal
- aanzichten en hoofdmaten
- tekeningenlijst

OPLOSSING

1. **Buitenmaten.** $1200 + 2 \times 20 = 1240\,\text{mm}$ lang, $600 + 40 = 640\,\text{mm}$ diep, $800 + 40 = 840\,\text{mm}$ hoog.

2. **Schaal.** Op 1:20 wordt het vooraanzicht $1240/20 = 62\,\text{mm}$ breed en $42\,\text{mm}$ hoog, het zijaanzicht $32 \times 42\,\text{mm}$, het bovenaanzicht $62 \times 32\,\text{mm}$. Met ruimte voor maten en het titelblok past dat ruim op een A4. Op 1:10 kan het ook, maar dan is er weinig plaats over voor de maten.

3. **Aanzichten** in Europese projectie (hoofdstuk 31): het bovenaanzicht onder, het linkerzijaanzicht rechts van het vooraanzicht. Door de doorzichtige platen zie je de tafel, de bakjes en het reservoir: teken ze met een dunnere lijn dan het frame, zodat het frame de vorm blijft bepalen. Het open dakraam teken je in het zijaanzicht met een dunne streeplijn.

4. **Alleen hoofdmaten**: de buitenmaten, de binnenlengte 1200, de tafelhoogte 300 en de breedte van het dakraam. De maten van een onderdeel staan op zijn eigen werktekening; twee keer dezelfde maat geeft fouten als je er één verandert.

5. **Tekeningenlijst.** HAB-F33-01 samenstelling (deze tekening); HAB-F31-01 hoeksteun; HAB-F31-02 plantenbak; HAB-F31-03 plantentafel; SH-1 houder temperatuursensor en SH-2 houder bodemvochtsensor (hoofdstuk 32); het aansluitschema van de 12 V-kant en van de besturing (fase 4 en 5).

ANTWOORD

Schaal 1:20, drie aanzichten in Europese projectie, zeven hoofdmaten en een titelblok met nummer HAB-F33-01. De tekeningenlijst verwijst naar vijf werktekeningen van onderdelen en twee aansluitschema's.

Klopt dit? Een samenstellingstekening is de plaats om interfaces na te kijken. Past de tafel? 1180 mm in 1200 mm: 10 mm speling per kant. Past het reservoir onder de tafel? 420 × 320 × 260 mm in een ruimte van 543 × 562 × 282 mm tussen twee steunen (hoofdstuk 31). Is het dakraam de helft van het dak? 600 van 1200 mm. Drie keer ja.

NASLAG · 33.7

De stuklijst als bestellijst en kostenraming

7/24

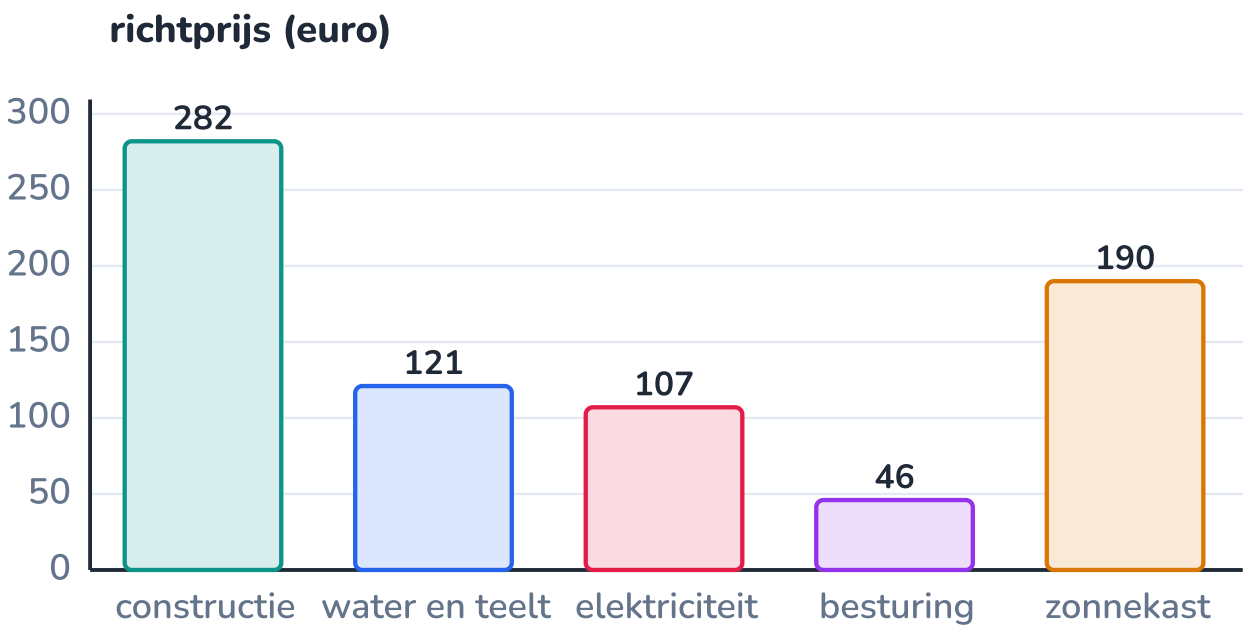
De stuklijst van de samenstelling telt de stuklijsten van alle onderdelen op (hoofdstuk 31) en is meteen de bestellijst. De prijzen zijn **richtprijzen** van een bouwmarkt en een elektronicawinkel (2026, afgerond): zoek zelf de echte prijzen op, want ze verschillen per winkel en per jaar. De laatste kolom toont wat de school van het voorbeeldteam al had.

Eis G4 (een wens) vraagt hoogstens € 400 aan materiaal, zonder het zonnepaneel en de batterij. Alles nieuw kopen kost € 556: te veel. Met wat de school al had, moest het team nog voor € 388 kopen: de wens is gehaald, met weinig speling.

pos	onderdeel	deelsysteem	richtprijs	school heeft het
1	aluminium koker 20 × 20 × 1,5 mm, 12 m (10,4 m + zijregel + zaagverlies)	constructie	€ 66	
2	hoekplaatjes, RVS-schroeven M4, moeren, nylon ringen	constructie	€ 28	
3	RVS-kabel 2 mm (10 m) met 8 spanners	constructie	€ 24	
4	kanaalplaat polycarbonaat 4 mm (4,2 m² voor 3,60 m²)	constructie	€ 67	
5	scharnieren (dakraam, voorkant) en klemhendel	constructie	€ 14	
6	watervast multiplex 18 mm, halve plaat 1,25 × 1,25 m	constructie	€ 60	ja
7	15 RVS-schroeven 4 × 40, 4 grondankers	constructie	€ 22	
8	PETG voor hoeksteun, SH-1 en SH-2 (±15 g)	constructie	€ 1	ja
9	12 plantenbakjes PP 30 × 20 cm	water en teelt	€ 30	
10	reservoir 30 L met deksel, lichtdicht	water en teelt	€ 12	
11	pompje 12 V, 0,65 A	water en teelt	€ 12	
12	slang 8 mm, druppelslang, 12 druppelaars, aanzuigfilter	water en teelt	€ 15	
13	2 vlotterschakelaars (B1, B2)	water en teelt	€ 8	
14	potgrond 80 L, zaad pluksla, plantenvoeding	water en teelt	€ 20	
15	schaduwdoek 30/50/70 % en latjes (groeiproef)	water en teelt	€ 24	ja
16	ledstrip 12 V (2 helften) met profiel	elektriciteit	€ 15	
17	duwstang 12 V, slag ≥ 40 mm, ≥ 40 N, eindschakelaars	elektriciteit	€ 35	
18	zekeringen en houders, stekker X1, S1, W1, knop, snoer 0,75 mm²	elektriciteit	€ 30	ja
19	waterdichte kast (IP65) voor de elektronica	elektriciteit	€ 15	
20	12 V-adapter 2 A (reserve)	elektriciteit	€ 12	ja
21	Arduino Uno R3	besturing	€ 25	ja
22	relaismodule 4 kanalen 5 V	besturing	€ 8	ja
23	omvormer 12 → 5 V (1 A)	besturing	€ 5	
24	TMP36, LDR + 10 kΩ, bodemvochtsensor, 2 leds + 220 Ω	besturing	€ 8	ja
	totaal (zonder zonnekast)		**€ 556**	**te kopen: € 388**

zonnekast (niet in eis G4)	richtprijs
zonnepaneel 50 Wp	€ 60

zonnekast (niet in eis G4)	richtprijs
PWM-laadregelaar 12 V, 10 A	€ 15
batterij LiFePO4 12,8 V, 20 Ah (256 Wh)	€ 90
kast, zekering F6, paal	€ 25
samen	**€ 190**



Bijna de helft van de waarde zit in de constructie; de besturing is het goedkoopste deel.

UITLEG · 33.8

Fase 3: de constructie, sterk, stijf en stabiel

8/24

Bouw in deze volgorde, dan staat elk onderdeel meteen op zijn plaats:

1. **Frame.** Zaag de kokers op maat volgens je eigen hoekverbindingen, ontbraam elke snede (eis V3) en boor de gaten Ø 4,5 voor M4. Monteer de bodem, dan de staanders, dan de bovenkant. Meet in elk vlak de twee diagonalen: zijn ze even lang, dan is het vlak haaks. Voor de achterwand is dat $\sqrt{1{,}20^2 + 0{,}80^2}$, ongeveer 1,44 m (hoofdstuk 13).
2. **Diagonalen en hoekplaatjes.** Span de gekruiste kabels in de achterwand, de zijwanden en de bodem tot de diagonalen gelijk zijn; hoekplaatjes aan de open voorkant.
3. **Tafel.** Blad op drie steunen met de achterregel, 15 schroeven 4 × 40 (HAB-F31-03). Ze schuift in de kas.
4. **Wanden en dak.** Platen met de UV-kant naar buiten en de kanalen verticaal; in het midden vast, sleufgaten aan de uiteinden. Tussen −5 en 45 °C zet een plaat van 1,20 m 3,9 mm uit, het frame maar 1,4 mm (hoofdstuk 6). Het dakraam krijgt scharnieren achteraan en de klemhendel (hoofdstuk 12).
5. **Verankeren.** Twee grondankers per lange zijde: een lege kas is licht en vangt veel wind.

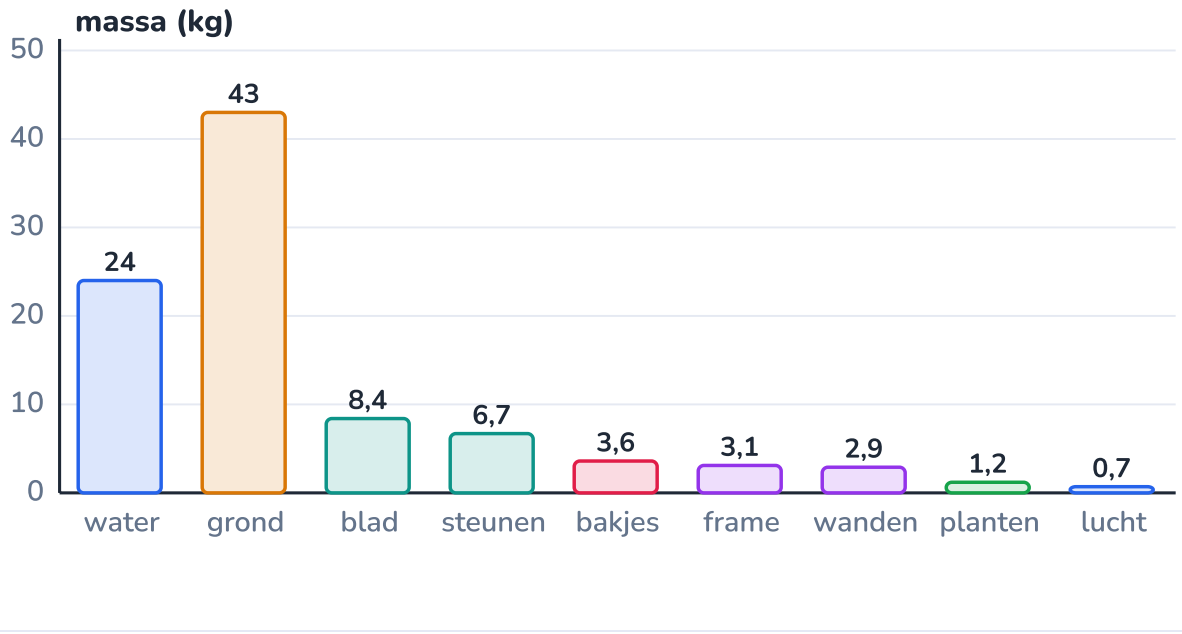
Massa en stabiliteit. Het meeste gewicht zit laag: water en potgrond samen 67 kg van de 87 kg (figuur). Daardoor ligt het zwaartepunt van de volle kas op 0,28 m en kantelt ze pas bij 47° (hoofdstuk 13).

	massa	zwaartepunt	kantelhoek
vol (model hoofdstuk 13)	86,9 kg	0,28 m	47°
leeg (model hoofdstuk 13)	18,7 kg	0,36 m	40°
vol, met steunen en regel	93,6 kg	0,27 m	48°
kas zonder tafel en bakjes	±6 kg + elektronica		

Het rekenmodel van hoofdstuk 13 telde voor de tafel alleen het blad (8,4 kg). Met de drie steunen en de regel van hoofdstuk 31 komt er 6,7 kg bij, heel laag: het zwaartepunt zakt en de kas wordt nog iets stabieler. Voor eis C5 (de lege kas hoogstens 25 kg) is dat wel een probleem: met de tafel erin weegt ze 25,4 kg. Daarom verplaats je de kas in twee delen: de tafel schuift eruit (15,1 kg), en frame en platen wegen samen maar ±6 kg.

Sterk is niet hetzelfde als stijf

Een frame kan sterk genoeg zijn (het breekt niet) en toch te slap (het vervormt te veel). Eis C2 gaat over stijfheid: bij een zijwaartse duw van 50 N bovenaan mag de bovenrand hoogstens 5 mm opzij gaan. Diagonalen maken een frame vooral stijf (hoofdstuk 13); de proef op het volgende blad meet het.



Water (24 kg) en potgrond (43 kg) zijn samen driekwart van de massa, en ze zitten laag: een stabiele kas.

PROEF · 33.9

Fase 3: hoe stijf is het frame?

9/24

ONDERZOEKSVRAAG

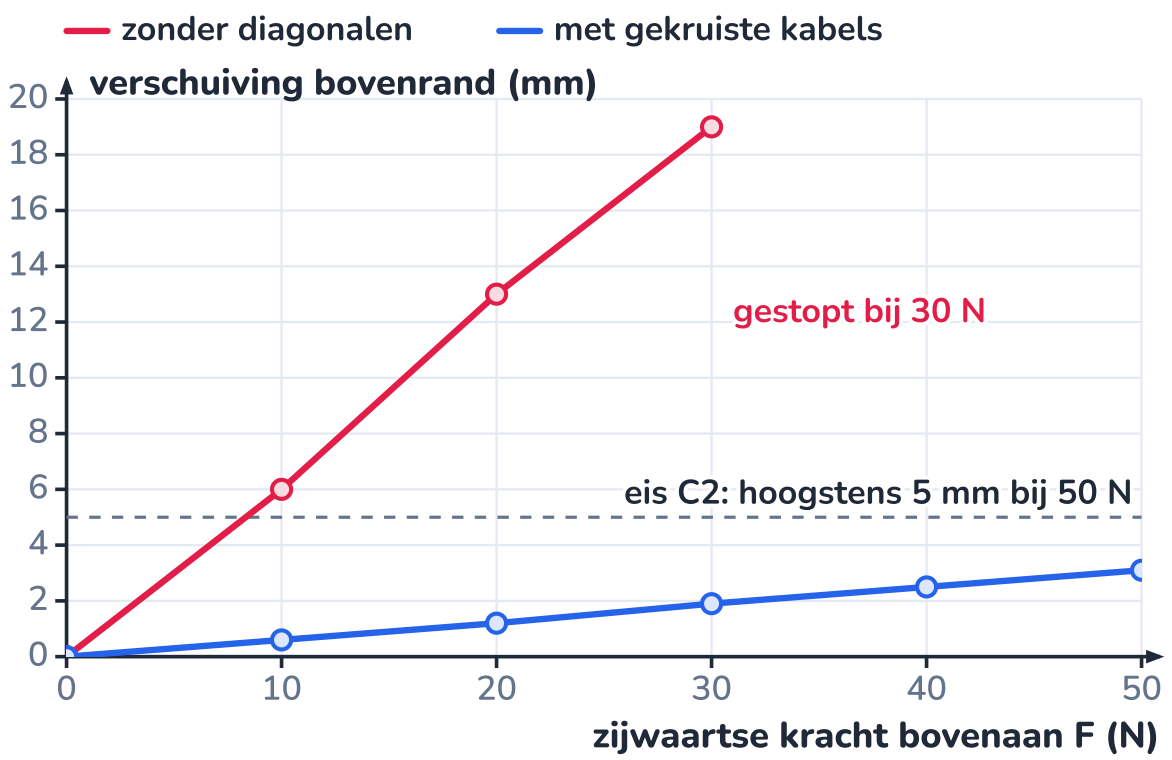
Haalt het frame eis C2: verschuift de bovenrand hoogstens 5 mm als je er bovenaan zijwaarts met 50 N tegen duwt? En wat doen de gekruiste kabels?

MATERIAAL

- het frame zonder platen, met en zonder de kabels in de zijwand
- veerunster tot 50 N (of 100 N)
- stalen lat met mm-verdeling en tape
- een vaste referentie naast de kas (een zware kast, een paal)
- twee lijmklemmen

Veiligheid

Trek nooit harder dan 50 N en stop als een verbinding kraakt of zichtbaar wijkt. Houd je voeten uit de buurt van de onderkant van het frame.



Met kabels is het frame ongeveer tien keer zo stijf, en de lijn blijft recht: het frame vervormt veerkrachtig.

WERKWIJZE

1. Zet het frame op een vlakke vloer en klem de onderkant vast, zodat het niet kan verschuiven.
2. Kleef de lat verticaal tegen de vaste referentie, vlak naast de bovenste hoek van de zijwand: niet tegen de kas zelf, want die beweegt mee.
3. Trek met de veerunster horizontaal aan de bovenste hoek, in stappen van 10 N, en lees telkens af hoeveel de hoek opzij gaat. Laat los: komt de hoek terug op 0?
4. Doe de proef eerst zonder de kabels in de zijwand, daarna met de kabels gespannen.
5. Zet de metingen in een grafiek: de kracht horizontaal, de verschuiving verticaal.

WAARNEMING

F (N)	zonder diagonalen (mm)	met gekruiste kabels (mm)
0	0	0,0
10	6	0,6
20	13	1,2
30	19	1,9
40	(gestopt)	2,5
50	(gestopt)	3,1

Zonder diagonalen wijkt de hoek al 19 mm bij 30 N; het team stopte, omdat een verbinding begon te kraken. Met de gekruiste kabels gaat de hoek bij 50 N maar 3,1 mm opzij, en na het loslaten komt ze terug op 0 (voorbeeldmetingen van één team).

VERKLARING

Zonder diagonaal is de zijwand een rechthoek met hoeken die kunnen draaien: de schroefverbindingen houden een hoek maar slecht vast. Met een kabel wordt de rechthoek twee driehoeken, en een driehoek kan niet vervormen zonder dat een zijde langer wordt (hoofdstuk 13). Bij een duw naar rechts staat de ene kabel op trek; de andere hangt slap. Duw je naar links, dan neemt de andere kabel het over: daarom zijn ze gekruist.

De verschuiving is recht evenredig met de kracht, ongeveer 0,06 mm per newton, zoals een veer (hoofdstuk 11). Eis C2 is gehaald met ruime reserve: 3,1 mm tegenover 5 mm.

UITLEG · 33.10

Fase 4: de elektrische kring van de meetkas

10/24

De meetkas heeft twee kringen die elkaar alleen raken via de relais (hoofdstuk 25): de **werkkring** op 12 V, voor alles wat vermogen vraagt, en de **stuurkring** op 5 V, voor de Arduino, de sensoren en de spoelen van de relais. Het aansluitschema van de 12 V-kant brengt samen wat je in hoofdstuk 17 tot 21 en 25 leerde.

- **De bron.** Zonnepaneel en batterij hangen aan een laadregelaar, in een kast aan de voet van de paal. De laadregelaar laadt de batterij veilig en schakelt de verbruikers af als de batterij te leeg wordt. Stekker X1 verbindt de kas met die zonnekast, of van november tot januari met de 12 V-adapter. Een stekker zit maar in één contactdoos tegelijk: zo hangt de kas nooit aan twee bronnen.
- **Hoofdzekering F1** (2 A) vlak na de stekker, en per tak een eigen zekering (hoofdstuk 18 en 20).
- **Vier takken parallel** op 12 V: de ledstrip (W1 kiest tussen S1 met de hand en relais K1), het pompje (K2 in serie met vlotter B1: de pomp kan niet droog draaien), de duwstang (K3 en K4) en de omvormer naar 5 V voor de besturing.

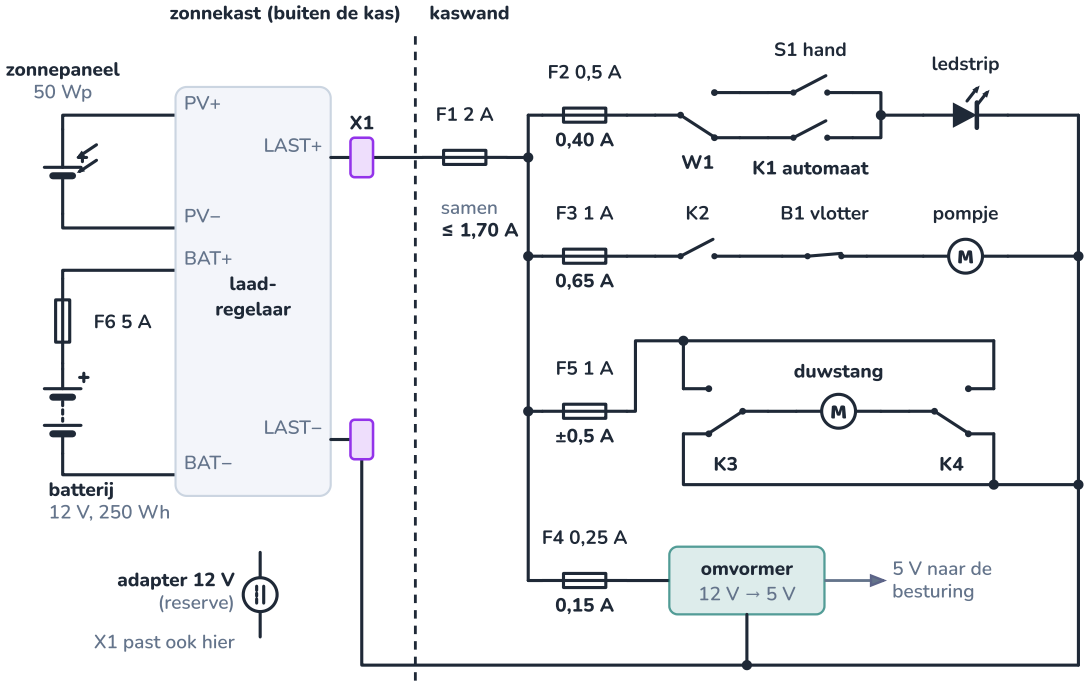
tak	verbruiker	stroom	zekering	geschakeld door	hoofdstuk
1	ledstrip, 2 × 60 Ω parallel	0,40 A	F2 0,5 A	W1: S1 (hand) of K1 (automaat)	18-20
2	pompje 12 V	0,65 A	F3 1 A	K2, in serie met vlotter B1	19, 25
3	duwstang 12 V	±0,5 A (rekenwaarde)	F5 1 A	K3 (uit) en K4 (in)	12, 25
4	omvormer 12 → 5 V	0,15 A	F4 0,25 A	altijd aan	20, 21
	alles samen	1,70 A	F1 2 A		20

Staat alles tegelijk aan, dan levert de bron $0{,}40 + 0{,}65 + 0{,}50 + 0{,}15 = 1{,}70\ \text{A}$: minder dan de 2 A van de adapter en van F1. In werkelijkheid draaien het pompje en de duwstang nooit samen, want het programma doet het ene na het andere. De stroom van de duwstang is een rekenwaarde: meet die van jouw duwstang (hoofdstuk 19).

De omkeerschakeling. Een duwstang schuift uit bij de ene polariteit en in bij de andere. K3 en K4 hebben elk een wisselcontact. In rust verbinden ze beide aansluitingen van de duwstang met de min: de stang staat stil. K3 aan: aansluiting A komt aan de plus en de stang schuift uit. K4 aan: nu B aan de plus, en de stang schuift in. Zouden K3 en K4 samen aan gaan, dan liggen beide kanten aan de plus: geen kortsluiting, de stang staat gewoon stil. De eindschakelaars in de duwstang stoppen haar aan het einde van de slag.

Een batterij levert veel meer dan een adapter

Een adapter van 2 A levert bij een kortsluiting niet veel meer dan 2 A. Een batterij kan in een fractie van een seconde tot honderden ampère leveren: draden worden gloeiend heet en kunnen brand veroorzaken. Daarom zit zekering F6 zo dicht mogelijk bij de pluspool van de batterij, en werk je aan de zonnekast pas als F6 eruit is.



De 12 V-kant: links de zonnekast buiten de kas, rechts de vier takken. K1 tot K4 zijn de contacten van de relais; hun spoelen zitten op de 5 V-kant.

NASLAG · 33.11

Fase 4: risico's en de keuring

11/24

Voor de eerste keer spanning op de kas komt, keurt de leraar de kring: dat is de mijlpaal van week 5. Maak vooraf de risicotabel van de bouw (hoofdstuk 5): risico = kans × ernst, telkens van 1 tot 3, en kies maatregelen volgens STOP (substitutie, technisch, organisatorisch, persoonlijk). Het restrisico mag nergens hoog zijn.

Risicotabel van het voorbeeldteam

taak	gevaar	kans × ernst	maatregel (STOP)	restrisico
aluminium zagen en boren	snijden, spaanders in het oog	2 × 2 = 4	koker in de bankschroef, kolomboor (T); ontbramen (O); bril (P)	1 × 2 = 2
polycarbonaat snijden	diepe snijwonde	2 × 2 = 4	metalen lat, van je af snijden (O); snijbestendige handschoen (P)	1 × 2 = 2
solderen	brandwonde, dampen	2 × 2 = 4	loodvrij tin (S); houder, afzuiging (T); bril (P)	1 × 2 = 2

taak	gevaar	kans × ernst	maatregel (STOP)	restrisico
batterij aansluiten	kortsluiting, brand	2 × 3 = 6	zekering F6 bij de pool (T); eerst F6 eruit, dan werken (O)	1 × 3 = 3
230 V-adapter	elektrische schok	2 × 3 = 6	adapter buiten, droog, hoger dan het water, differentieel 30 mA, druppellus (T, O)	1 × 3 = 3
reservoir plaatsen (30 kg vol)	rug, uitglijden op water	2 × 2 = 4	leeg plaatsen en ter plaatse vullen (O)	1 × 2 = 2

Keuringslijst: pas als alles in orde is, gaat de Arduino erop

1. alleen 12 V en 5 V in de kas; de adapter buiten, droog, hoger dan het water, achter een differentieel van 30 mA (V1)
2. zekering F6 bij de pluspool van de batterij, F1 na stekker X1, en per tak F2 tot F5 met de juiste waarde (V2)
3. rood = plus, zwart = min; geen blanke draadeinden; elke verbinding trekvast (lasklem, of soldeer met krimpkous)
4. vlotter B1 in serie met het pompje, vlotter B2 alleen op D3: geen contact dat 12 V en 5 V verbindt
5. de kabels komen met een druppellus van onderen in de elektronicakast; de kast is dicht
6. eerst meten, dan pas de Arduino aansluiten: 12 à 13,5 V na F1, 5,0 V aan de uitgang van de omvormer

UITLEG · 33.12

Fase 5: de besturing aansluiten en ijken

12/24

Op de 5 V-kant hangt alles aan de Arduino Uno (hoofdstuk 24): drie analoge sensoren, twee digitale ingangen en zes digitale uitgangen. Het **pinplan** is een interface-afspraak. Het staat in het stationsdossier, in het schema en bovenaan in de code, en het moet op de drie plaatsen hetzelfde zijn.

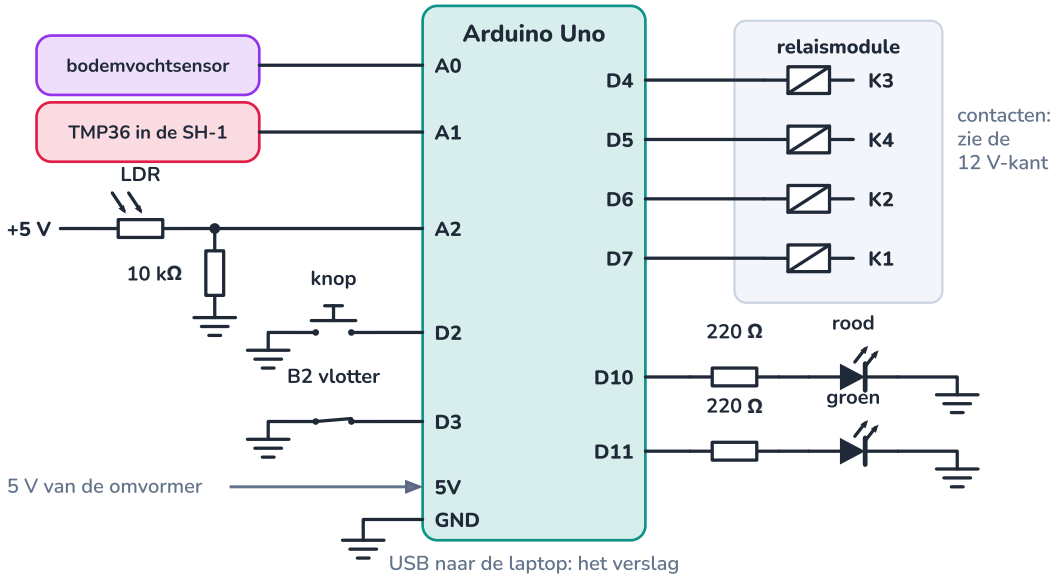
pin	onderdeel	soort	instelling of ijking	hoofdstuk
A0	bodemvochtsensor (capacitief)	analoog	600 droog, 300 nat; geloofwaardig tussen 250 en 620	25
A1	TMP36 in SH-1	analoog	T = (ruw · 5 / 1023 − 0,5) · 100 − 1,5	25, 32
A2	LDR met 10 kΩ	analoog	donker onder 300, dag boven 400	25
D2	drukknop	INPUT_PULLUP	ingedrukt = LOW: alarm wissen	24
D3	vlotter B2	INPUT_PULLUP	dicht (LOW) = er is water	24
D4 / D5	relais K3 / K4	uitgang	duwstang uit / in, 15 s	25
D6	relais K2	uitgang	pompje, 30 s = 240 mL	25
D7	relais K1	uitgang	ledstrip (W1 op automaat)	18, 25
D10 / D11	led rood / groen	uitgang	220 Ω, 13,6 mA	24

IJken in de kas. In hoofdstuk 25 ijkte je op tafel. In de kas herhaal je het met de echte sensoren, de echte potgrond en de echte draden:

- de TMP36 in de SH-1 naast een referentiethermometer, bij drie temperaturen (eis K1: binnen 1 °C);
- de bodemvochtsensor in een bakje met droge en met natte potgrond uit dezelfde zak: noteer de twee ruwe waarden en zet ze in de code als DROOG en NAT;
- de LDR: noteer de ruwe waarde bij valavond (het moment dat je extra licht wil) en bij daglicht. Dat worden DONKER en DAG. Houd de lichtsensor uit het licht van de ledstrip.

Twee vlotters, twee kringen

Vlotter B1 zit in de 12 V-kring van het pompje, vlotter B2 op pin D3 op 5 V. Gebruik nooit één contact voor beide: dan komt er 12 V op een pin die hoogstens 5 V verdraagt, en de Arduino is stuk. Hang B1 iets lager dan B2. Zakt het water, dan geeft B2 eerst alarm (de kas knippert rood) en pas daarna maakt B1 de pomp stroomloos.



De besturing op 5 V. De sensoren krijgen ook 5 V en GND; de drie symbolen onderaan zijn de massa (GND).

CODE · 33.13

Fase 5: het volledige programma

13/24

Dit programma voegt samen wat in hoofdstuk 24 en 25 in aparte programma's zat: water geven, het dakraam en het statuslampje, met het extra licht en de foutcontrole erbij. Bij het samenvoegen moest één probleem opgelost worden. In hoofdstuk 25 wachtte het waterprogramma 15 minuten met `delay()`, en in die tijd kon het dakraam niet reageren. Daarom meet dit programma **elke minuut alles**, en onthoudt het in **tellers** hoe lang het nog moet wachten (hoofdstuk 23): na een pompbeurt telt `wachtMinuten` af van 15 naar 0. Nieuw zijn ook twee **eigen blokken** (functies): `beweegRaam()` en `wachtEenMinuut()`. Je roept ze op met hun naam, zoals een zelfgemaakt blok in Scratch.

C++ (Arduino) **meetkas.ino** 161 regels

```cpp
// Meetkas van Habitat: het volledige programma (hoofdstuk 33)
// Elke minuut: meten, dakraam, water geven, extra licht, statuslampje, verslag.
// Pinplan en ijking: hoofdstuk 24 en 25. Drempels: programma van eisen (hoofdstuk 30).

// ---------- pinnen
const int VOCHT = A0;        // capacitieve bodemvochtsensor
const int TEMP = A1;         // temperatuursensor TMP36
const int LICHT = A2;        // LDR met 10 kOhm: donker = lage waarde
const int KNOP = 2;          // drukknop naar GND: alarm wissen
const int VLOTTER = 3;       // vlotter B2 naar GND: dicht (LOW) = er is water
const int RAAM_UIT = 4;      // relais K3: duwstang schuift uit (raam open)
const int RAAM_IN = 5;       // relais K4: duwstang schuift in (raam dicht)
const int POMP = 6;          // relais K2: pompje
const int LEDSTRIP = 7;      // relais K1: ledstrip (W1 op 'automaat')
const int ROOD = 10;         // statuslampje, elke led met 220 ohm
const int GROEN = 11;

// ---------- instellingen
```

```ino
const int DROOG = 600;           // ijkpunt: ruwe waarde in droge potgrond
const int NAT = 300;             // ijkpunt: ruwe waarde in natte potgrond
const int VOCHT_MIN = 30;        // water geven onder 30 %
const float T_OPEN = 28.0;       // dakraam open boven 28 graden
const float T_DICHT = 25.0;      // dakraam dicht onder 25 graden
const bool EXTRA_LICHT = false;  // true van oktober tot maart
const int DONKER = 300;          // ledstrip mag aan onder deze lichtwaarde
const int DAG = 400;             // boven deze lichtwaarde begint een nieuwe dag
const int LED_MINUTEN = 240;     // 4 uur extra licht per dag

// ---------- geheugen
bool raamOpen = false;
int wachtMinuten = 0;        // minuten tot de volgende controle van het vocht
int mislukt = 0;             // pompbeurten na elkaar zonder effect
bool ledstripAan = false;
bool vandaagGedaan = true;   // na een herstart eerst een dag afwachten
int ledMinuten = 0;
long minuut = 0;             // minuten sinds de start
int beurten = 0;             // pompbeurten sinds de start

void beweegRaam(int pin) {   // relais 15 s aan; de eindschakelaar stopt de stang
  digitalWrite(pin, HIGH);
  delay(15000);
  digitalWrite(pin, LOW);
}

void wachtEenMinuut(bool knipper) {   // 60 keer 1 s, en ondertussen de knop bekijken
  for (int s = 0; s < 60; s++) {
    if (knipper) {                    // alarm: rood knippert
      digitalWrite(ROOD, HIGH);
      delay(500);
      digitalWrite(ROOD, LOW);
      delay(500);
    } else {
      delay(1000);
    }
    if (digitalRead(KNOP) == LOW) {   // knop ingedrukt: alarm wissen
      mislukt = 0;
    }
  }
}

void setup() {
  pinMode(KNOP, INPUT_PULLUP);
  pinMode(VLOTTER, INPUT_PULLUP);
  pinMode(RAAM_UIT, OUTPUT);
  pinMode(RAAM_IN, OUTPUT);
  pinMode(POMP, OUTPUT);
  pinMode(LEDSTRIP, OUTPUT);
  pinMode(ROOD, OUTPUT);
  pinMode(GROEN, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("minuut;T;licht;vocht;raam;beurten;mislukt");
  beweegRaam(RAAM_IN);        // na een stroomuitval eerst het raam dicht: een veilige beginstand
}

void loop() {
  // 1. meten
  int ruwVocht = analogRead(VOCHT);
  float t = (analogRead(TEMP) * 5.0 / 1023.0 - 0.5) * 100.0 - 1.5;   // TMP36, geijkt
  int licht = analogRead(LICHT);
  int vocht = map(ruwVocht, DROOG, NAT, 0, 100);                     // procent
  bool water = (digitalRead(VLOTTER) == LOW);
  bool sensorFout = (ruwVocht < 250 || ruwVocht > 620);              // onmogelijke waarde

  // 2. dakraam: open boven 28 graden, dicht onder 25 graden
  if (!raamOpen && t > T_OPEN) {
    beweegRaam(RAAM_UIT);
    raamOpen = true;
```

```
  } else if (raamOpen && t < T_DICHT) {
    beweegRaam(RAAM_IN);
    raamOpen = false;
  }

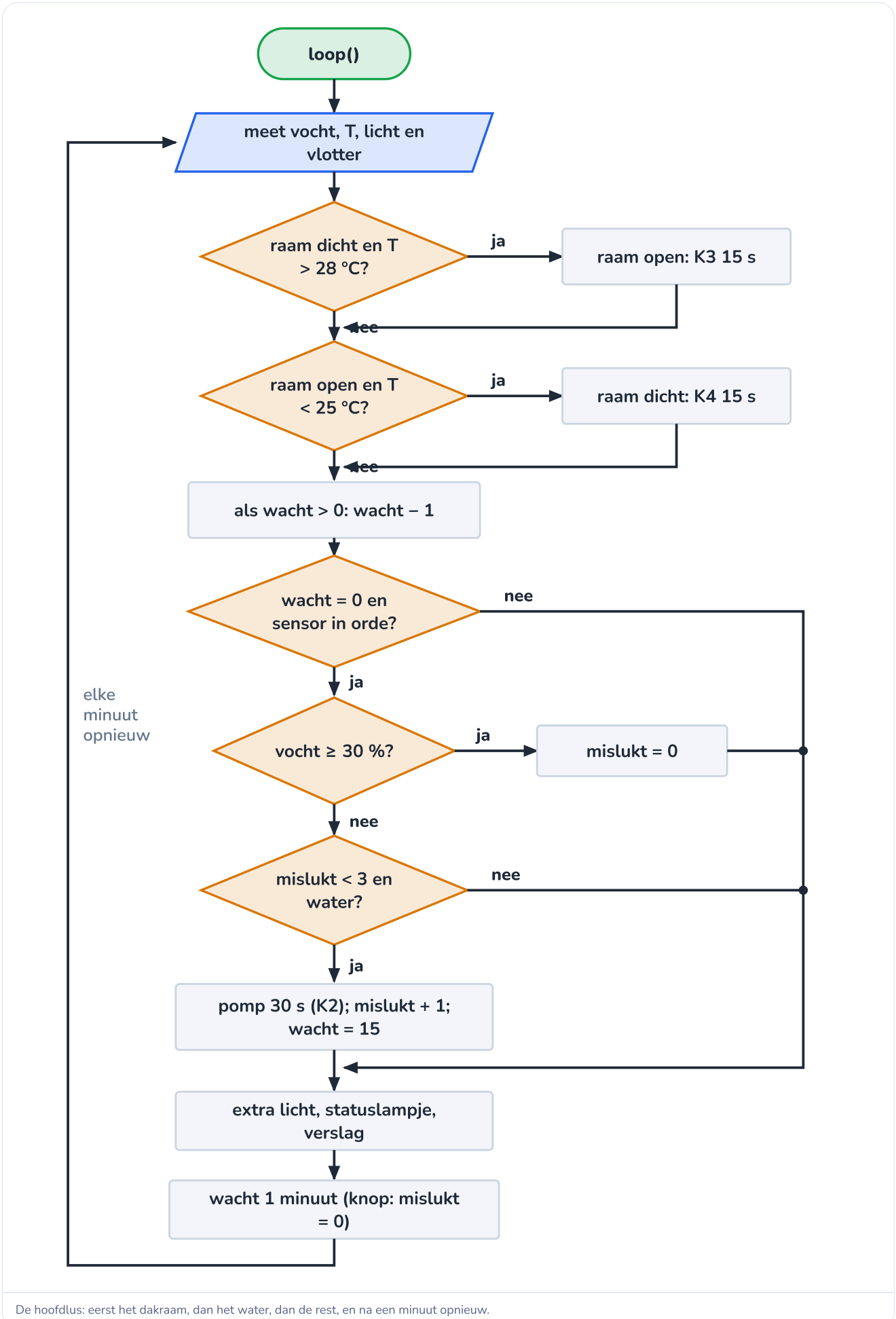
  // 3. water geven: onder 30 % een beurt van 30 s, dan 15 minuten wachten
  if (wachtMinuten > 0) {
    wachtMinuten = wachtMinuten - 1;
  }
  if (wachtMinuten == 0 && !sensorFout) {
    if (vocht >= VOCHT_MIN) {
      mislukt = 0;                    // de grond is vochtig genoeg
    } else if (mislukt < 3 && water) {
      digitalWrite(POMP, HIGH);       // 30 s = 240 mL
      delay(30000);
      digitalWrite(POMP, LOW);
      beurten = beurten + 1;
      mislukt = mislukt + 1;          // wordt terug 0 zodra het vocht gestegen is
      wachtMinuten = 15;
    }
  }

  // 4. extra licht: 4 uur zodra het donker wordt, een keer per dag
  if (licht > DAG) {
    vandaagGedaan = false;            // het is dag: vanavond mag het opnieuw
  }
  if (EXTRA_LICHT && !ledstripAan && !vandaagGedaan && licht < DONKER) {
    ledstripAan = true;
    ledMinuten = 0;
  }
  if (ledstripAan) {
    ledMinuten = ledMinuten + 1;
    if (ledMinuten > LED_MINUTEN) {
      ledstripAan = false;
      vandaagGedaan = true;
    }
  }
  if (ledstripAan) {
    digitalWrite(LEDSTRIP, HIGH);
  } else {
    digitalWrite(LEDSTRIP, LOW);
  }

  // 5. statuslampje: groen = in orde, rood = droog, rood knippert = alarm
  bool alarm = sensorFout || !water || (mislukt >= 3 && wachtMinuten == 0);
  if (alarm) {
    digitalWrite(GROEN, LOW);         // het knipperen gebeurt tijdens het wachten
  } else if (vocht < VOCHT_MIN) {
    digitalWrite(ROOD, HIGH);
    digitalWrite(GROEN, LOW);
  } else {
    digitalWrite(ROOD, LOW);
    digitalWrite(GROEN, HIGH);
  }

  // 6. verslag naar de computer (als die aan de USB-kabel hangt)
  Serial.print(minuut);
  Serial.print(";");
  Serial.print(t, 1);
  Serial.print(";");
  Serial.print(licht);
  Serial.print(";");
  Serial.print(vocht);
  Serial.print(";");
  Serial.print(raamOpen);
  Serial.print(";");
  Serial.print(beurten);
  Serial.print(";");
  Serial.println(mislukt);
```

```
157
158     // 7. wachten tot de volgende minuut
159     minuut = minuut + 1;
160     wachtEenMinuut(alarm);
161   }
```



De hoofdlus: eerst het dakraam, dan het water, dan de rest, en na een minuut opnieuw.

Enkele keuzes uitgelegd:

- **Een veilige beginstand.** `setup()` sluit eerst het raam: na een stroomuitval weet het programma niet meer of het open stond (eis G5). Om dezelfde reden begint `vandaagGedaan` op `true`. Start de kas 's nachts, dan brandt de ledstrip niet midden in de nacht vier uur lang, maar pas de volgende avond.
- **Het alarm.** Het rode lampje knippert bij een onmogelijke sensorwaarde (eis W7), een leeg reservoir (W3), of als het vocht na drie beurten na elkaar nog altijd onder 30 % is (W4). Wie het probleem opgelost heeft, drukt op de knop: `mislukt` wordt 0 en de kas probeert opnieuw.
- **Het extra licht.** Zodra het donker wordt (lichtwaarde onder 300), brandt de ledstrip 240 minuten, één keer per dag. Pas als het weer dag is geweest (boven 400), mag het de volgende avond opnieuw: twee drempels, zoals bij het dakraam. Zet `EXTRA_LICHT` in oktober op `true` en in april op `false`; tijdens de groeiproef blijft het `false`.
- **De klok loopt achter.** Een lus duurt 60 s plus de tijd van de acties: 15 s voor het raam, 30 s voor de pomp. Op de testdag telde het programma daardoor 1433 minuten in plaats van 1440. Voor de kas maakt dat niets uit; wie op de seconde wil werken, gebruikt `millis()` (Intermediate, hoofdstuk 29).

Het programma is getest. Het compileert zonder fouten, en in een simulatie van de kas (hetzelfde model als in hoofdstuk 23 en 25) draaide het een hele dag, met een leeg reservoir, een losse slang, een sensor uit de grond, een winteravond en een stroomuitval. Het stroomdiagram hiernaast toont de hoofdlus.

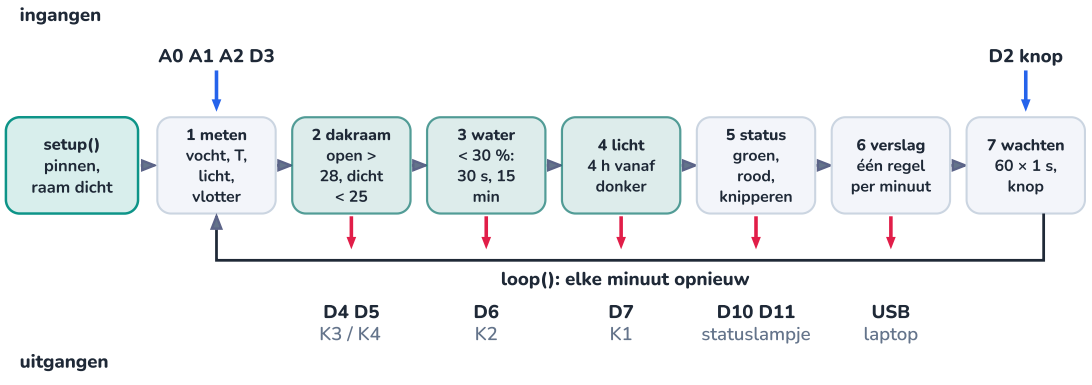
UITGEWERKT VOORBEELD · 33.14

Het programma naspelen voor je het vertrouwt

14/24

Voor het team de kas een week alleen laat, speelt het het programma na, zoals in hoofdstuk 22: welke acties doet `loop()` bij zes opeenvolgende metingen? Bij de start staat het raam dicht, is `wacht` 0 en `mislukt` 0, en er is water in het reservoir. De ruwe waarden zijn:

meting	1	2	3	4	5	6
A1 (TMP36)	162	163	164	161	156	155
A0 (vocht)	505	508	511	462	470	473



Het programma in blokken: setup() één keer, dan elke minuut zeven taken, met hun ingangen (blauw) en uitgangen (rood).

GEGEVEN

- $T = (\text{ruw} \cdot 5/1023 - 0{,}5) \cdot 100 - 1{,}5$ (TMP36, geijkt)
- vocht = map(ruw, 600, 300, 0, 100): gehele getallen, de rest valt weg
- de regels uit de code: raam open boven 28 °C, dicht onder 25 °C; water onder 30 %, dan wacht = 15

GEVRAAGD

- per meting: T, vocht, wat het programma doet, en de toestand erna

OPLOSSING

1. **Omrekenen.** Meting 1: $162 \cdot 5/1023 = 0{,}792\,\text{V}$, dus $T = (0{,}792 - 0{,}5) \cdot 100 - 1{,}5 = 27{,}7\,^\circ\text{C}$. Het vocht: $(600 - 505) \cdot 100/300 = 31{,}7$, en map() houdt 31 over.

2. **Meting 1.** 27,7 °C is niet boven 28: het raam blijft dicht. Het vocht (31 %) is niet onder 30 %: niets te doen.

3. **Meting 2.** 28,2 °C: het raam gaat open (K3, 15 s). Vocht: ruw 508 geeft $92 \cdot 100/300 = 30{,}7$, dus 30: niet onder 30 %, geen beurt.

4. **Meting 3.** 28,7 °C: het raam is al open, niets te doen. Vocht 29 %: pompbeurt van 30 s, mislukt = 1, wacht = 15.

5. **Meting 4 tot 6.** Het vocht springt naar 46 %, maar het programma kijkt pas weer als wacht op 0 staat: het telt af (14, 13, 12). De temperatuur daalt: bij 27,2 °C blijft het raam open (niet onder 25), bij 24,7 °C gaat het dicht.

METING	A1	T (°C)	A0	VOCHT (%)	WAT HET PROGRAMMA DOET	RAAM, WACHT, MISLUKT ERNA
1	162	27,7	505	31	niets	dicht, 0, 0
2	163	28,2	508	30	raam open (K3, 15 s)	open, 0, 0
3	164	28,7	511	29	pomp 30 s (K2)	open, 15, 1
4	161	27,2	462	46	niets	open, 14, 1
5	156	24,7	470	43	raam dicht (K4, 15 s)	dicht, 13, 1
6	155	24,3	473	42	niets	dicht, 12, 1

ANTWOORD

Meting 2 opent het raam (28,2 °C), meting 3 geeft een pompbeurt (29 %) en start het aftellen, en meting 5 sluit het raam weer (24,7 °C). Een kwartier na de beurt kijkt het programma opnieuw naar het vocht: staat het dan boven 30 %, dan wordt mislukt weer 0.

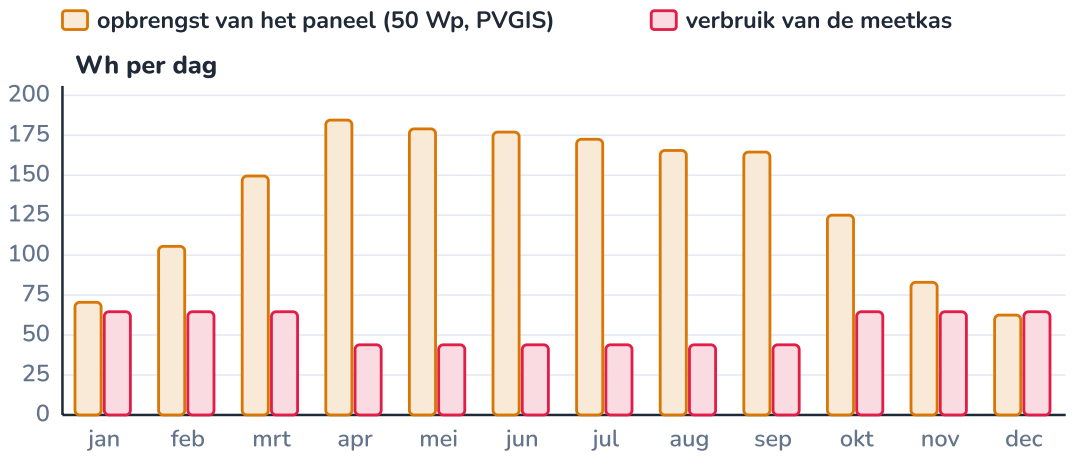
Klopt dit? Let op drie dingen die je in de tabel ziet. Ruw 508 geeft 30 %, niet 30,7 %: map() rekent met gehele getallen, dus pas vanaf ruw 511 geeft de kas water. Bij 27,2 °C sluit het raam niet: dat is de hysterese. En het vocht van meting 4 tot 6 telt niet mee zolang wacht niet 0 is. Zo'n tabel is meteen een testplan: dezelfde situaties kan je in het echt nabootsen, met je hand op de sensor en een bakje droge potgrond.

UITGEWERKT VOORBEELD · 33.15

Fase 6: het energiebudget nagerekend

15/24

Het voorbeeldteam meet de stromen van de afgewerkte kas en rekent het energiebudget van hoofdstuk 21 na, met de opbrengst van het zonnepaneel per maand uit hoofdstuk 17. Volstaan paneel en batterij? En wat telde het budget van hoofdstuk 21 nog niet mee?



Van maart tot oktober levert het paneel twee tot vier keer wat de kas nodig heeft; in december is het krap.

GEGEVEN

- omvormer (Arduino en sensoren) 0,15 A aan de 12 V-kant, 24 h per dag
- ledstrip 0,40 A, 4 h per dag, van oktober tot maart; pompje 0,65 A, 225 s per dag
- relaisspoel ±70 mA bij 5 V (hoofdstuk 25); omvormer 83 % (hoofdstuk 21)
- duwstang ±0,5 A, op een zonnige dag 14 bewegingen van ±8 s (4,0 cm aan ±5 mm/s)
- paneel 50 Wp: van 1,25 (december) tot 3,69 Wh per Wp per dag (april), PVGIS (hoofdstuk 17)
- batterij 250 Wh, waarvan 80 % bruikbaar

GEVRAAGD

- verbruik per dag in zomer en winter
- overschot of tekort per maand
- aantal winterdagen op de batterij

OPLOSSING

1 **Het budget van hoofdstuk 21.** Besturing $12 \times 0{,}15 = 1{,}8\ \text{W}$, 24 h: $43{,}2\ \text{Wh}$. Pompje $7{,}8\ \text{W} \times 225\ \text{s} = 1755\ \text{J} = 0{,}49\ \text{Wh}$. Ledstrip $4{,}8\ \text{W} \times 4\ \text{h} = 19{,}2\ \text{Wh}$. Zomer 43,7 Wh, winter 62,9 Wh per dag.

2 **Wat er nog bij komt.** Relais K1 staat 4 uur aan: $0{,}070 \times 5 = 0{,}35\ \text{W}$ aan de 5 V-kant, $0{,}35 \times 4 = 1{,}4\ \text{Wh}$, en door de omvormer $1{,}4/0{,}83 = 1{,}7\ \text{Wh}$ aan de 12 V-kant. De duwstang: $12 \times 0{,}5 \times 14 \times 8\ \text{s} = 672\ \text{J} = 0{,}19\ \text{Wh}$. De relais K2, K3 en K4 samen: $0{,}05\ \text{Wh}$. Zomer $43{,}9\ \text{Wh}$, winter $64{,}6\ \text{Wh}$ per dag.

3 **Per maand** (gemiddeld per dag, opbrengst = $50\ \text{Wp} \times$ Wh per Wp):

MAAND	JAN	FEB	MRT	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC
opbrengst (Wh/dag)	70,5	105,5	149,5	184,5	179,0	177,0	172,5	165,5	164,5	125,0	83,0	62,5
verbruik (Wh/dag)	64,6	64,6	64,6	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	64,6	64,6	64,6
verschil	5,9	40,9	84,9	140,6	135,1	133,1	128,6	121,6	120,6	60,4	18,4	**−2,1**

Alleen december komt tekort: $62{,}5 - 64{,}6 = -2{,}1\ \text{Wh}$ per dag. Januari (+5,9 Wh) is krap.

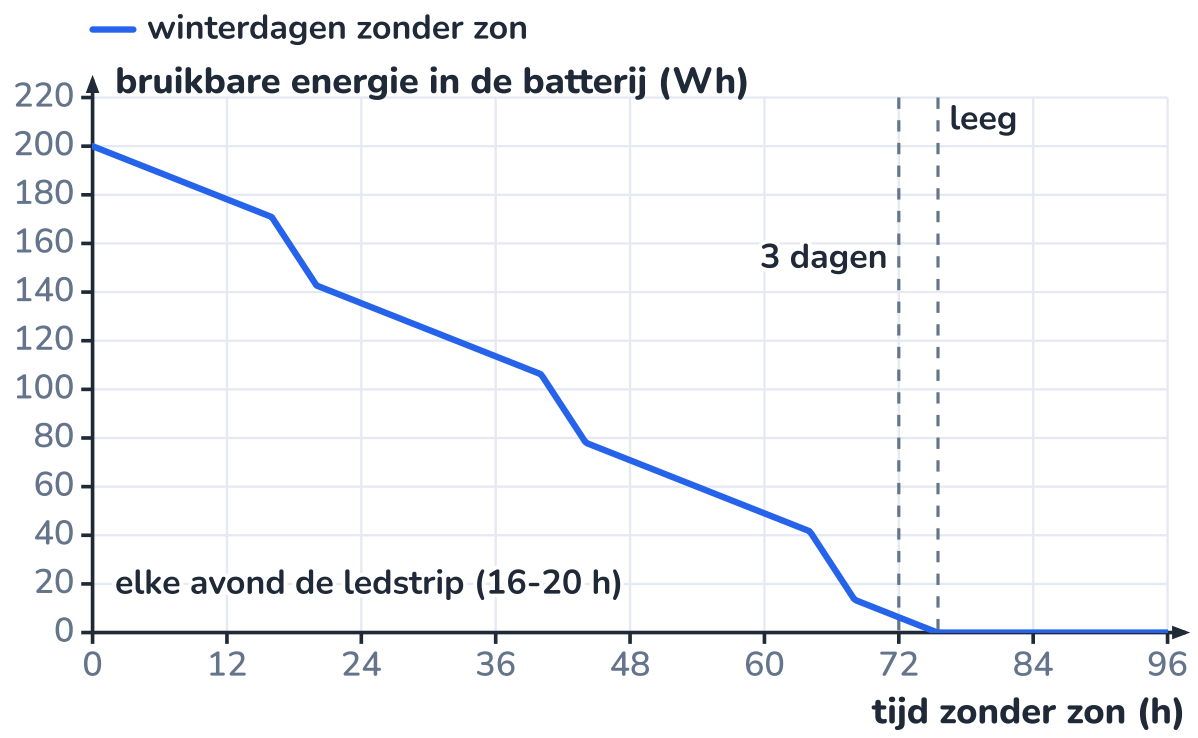
4 **Batterij.** $250 \times 0{,}8 = 200\ \text{Wh}$ bruikbaar, dus $200/64{,}6 = 3{,}1$ winterdagen zonder zon (eis E2: minstens 3).

5 **Per jaar.** $183 \times 43{,}9 + 182 \times 64{,}6 \approx 19\,796\ \text{Wh} = 19{,}8\ \text{kWh}$ (eis E3: hoogstens 20 kWh).

ANTWOORD

Het paneel van 50 Wp volstaat van januari tot november. In december is er gemiddeld 2,1 Wh per dag te weinig, en rond de kortste dagen meer: de adapter blijft reserve van november tot januari, zoals in hoofdstuk 17. De batterij houdt 3,1 winterdagen vol: eis E2 gehaald, net. Het budget van hoofdstuk 21 miste 1,7 Wh per winterdag (vooral de spoel van K1).

Klopt dit? Een budget met gemiddelden verbergt de slechte weken: een donkere week in december levert veel minder dan 62,5 Wh per dag. Laden en ontladen kost ook wat energie. Meet daarom in de testweek elke dag op hetzelfde uur de batterijspanning. En let op vorst: een lithiumbatterij mag je niet laden onder 0 °C (Intermediate, hoofdstuk 16). Kies er een met een beveiliging tegen laden bij vorst, of haal ze in de winter binnen.



Zonder zon zakt de batterij elke avond sneller (ledstrip); na ruim drie dagen schakelt de laadregelaar af.

UITLEG · 33.16

Fase 7: testen tegen het programma van eisen

16/24

Testen doe je in drie rondes, van klein naar groot:

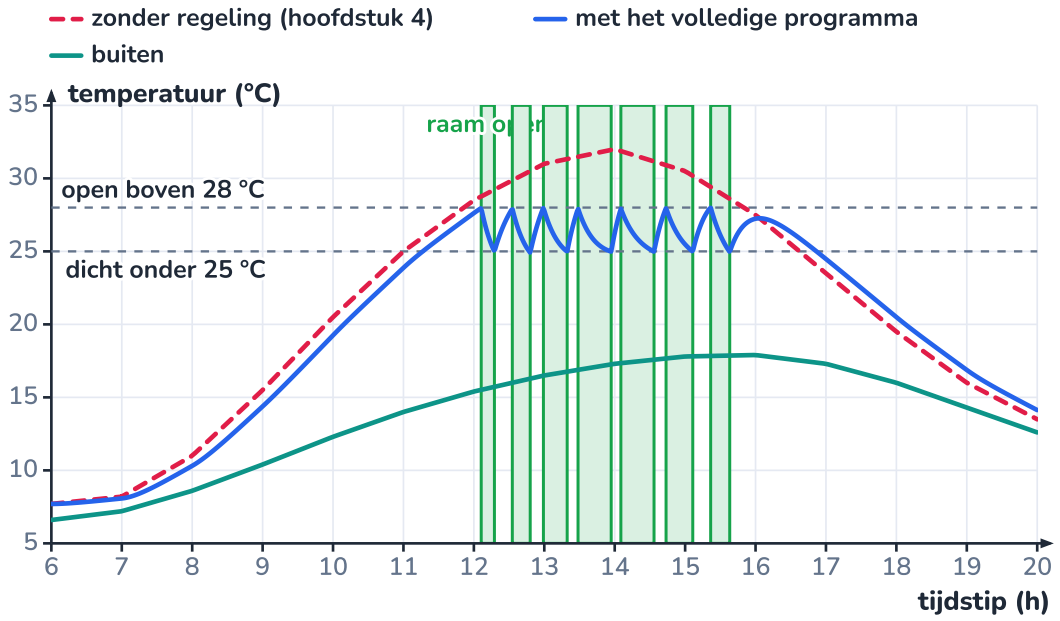
1. **Deeltests** tijdens de bouw: elk onderdeel apart, zodra het klaar is. De maten, de stijfheid, de kring vóór de keuring, elke sensor, elk relais met een ledje in plaats van de pomp of de duwstang.
2. **Systeemtest** op één dag: de hele kas samen, met nagebootste situaties. Sensor opwarmen met je hand, droge potgrond, het reservoir laten leeglopen, de slang los, de stekker eruit en er weer in.
3. **Testweek**: de kas een week alleen. Een laptop (of later een datalogger) bewaart het verslag van het programma, en elke dag doet één teamlid dezelfde controle: batterijspanning, waterpeil, temperatuur naast de referentiethermometer.

Elke test hoort bij een eis, en het criterium ligt vast vóór je test: anders ga je het resultaat goedpraten. Faalt een test, dan zoek je de oorzaak, verbeter je en test je opnieuw: de lus van hoofdstuk 30.

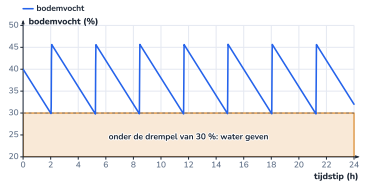
De simulatie als generale repetitie. Voor het programma de kas in ging, liet het voorbeeldteam het een dag draaien in een simulatie: hetzelfde model van de kas als in hoofdstuk 23 en 25, met de zonnige aprildag van hoofdstuk 4. Het raam ging 7 keer open en 7 keer dicht, voor het eerst om 12:06 en voor het laatst om 15:38. De kas werd hoogstens 28,0 °C (zonder regeling 32 °C). Het pompje gaf 7 beurten, elke 3 uur en 12 minuten: 1,68 L die dag, want de grond begon op 40 %. Op lange termijn zijn het 7,5 beurten of 1,8 L per dag, zoals in het stationsdossier.

Voorlopig gehaald is ook een uitkomst

Eis K3 (hoogstens 30 °C op een zonnige aprildag) kan je alleen testen op een zonnige aprildag. Komt die niet tijdens het project, dan schrijf je 'voorlopig: simulatie 28,0 °C' en test je later opnieuw. Eerlijk rapporteren wat je (nog) niet weet, hoort bij testen.



Zonder regeling 32 °C, met het programma hoogstens 28,0 °C; groen zijn de periodes met het raam open.



De zaagtand van het vocht: elke keer als het onder 30 % zakt, volgt een beurt van 30 s (+16).

NASLAG · 33.17

Het testrapport van het voorbeeldteam

17/24

Zo ziet een ingevuld testrapport eruit: per eis de toets, het criterium dat vooraf vastlag, het resultaat en het besluit. Alle 28 moet-eisen zijn gehaald, twee daarvan voorlopig (K3 en E1: ze vragen een zonnige aprildag en een hele zomer). Van de acht wensen zijn er vijf gehaald (C5 alleen als je de kas in twee delen draagt), twee niet (K7 en P2), en één kan je pas na een jaar toetsen (W6).

De niet-gehaalde wensen wijzen de weg naar versie 2. K7: een nachtscherm maakt de kas 's nachts 1,7 °C warmer dan buiten in plaats van 0,7 °C (hoofdstuk 16). P2: de groeiproef en de oogst botsen, want negen van de twaalf bakjes stonden in de schaduw (771 g). Zonder schaduwdoek geeft de kas 12 × ±100 g = ±1,2 kg (hoofdstuk 27).

code	eis	soort	toets	criterium	resultaat	voldaan?
M1	binnenmaten 1,20 × 0,60 × 0,80 m	moet	rolmeter	afwijking ≤ 1 cm	1,201 × 0,598 × 0,802 m	ja
M2	12 bakjes, 2 rijen van 6 op de tafel	moet	plaatsen	passen zonder klemmen	passen	ja

code	eis	soort	toets	criterium	resultaat	voldaan?
M3	reservoir: bruikbaar ≥ 25,2 L	moet	vullen met maatbeker	≥ 25,2 L	26,0 L tot de vlotter	ja
C1	tafel vol (471 N): doorbuiging ≤ 3,0 mm	moet	belasten, lat + schuifmaat	≤ 3,0 mm	kleiner dan 0,5 mm (middensteun)	ja
C2	50 N zijwaarts bovenaan: ≤ 5 mm	moet	veerunster, lat	≤ 5 mm	3,1 mm	ja
C3	lege kas kantelt pas voorbij 30°	moet	berekening	> 30°	40° (hoofdstuk 13)	ja
C4	grondankers: ≥ 100 N per anker	moet	trekproef	≥ 100 N	150 N, anker houdt	ja
C5	lege kas ≤ 25 kg	wens	weegschaal	≤ 25 kg	kas 7,1 kg + tafel 15,1 kg apart	ja, in delen
K1	temperatuur tot op 1 °C	moet	3 temperaturen, referentie	|verschil| ≤ 1 °C	0,3 / 0,4 / 0,6 °C	ja
K2	raam open boven 28 °C, dicht onder 25 °C	moet	sensor opwarmen, afkoelen	27,5-28,5 en 24,5-25,5 °C	28,2 en 24,8 °C	ja
K3	zonnige aprildag: ≤ 30 °C	moet	dagverloop loggen	≤ 30 °C	simulatie 28,0 °C; zonnige dag nog niet gehad	voorlopig
K4	raamopening ≥ 15 cm	moet	lat	≥ 15 cm	20 cm	ja
K5	raam met de hand ≤ 10 N	moet	veerunster	≤ 10 N	6 N	ja
K6	dicht raam blijft dicht bij 60 N	moet	trekken	blijft dicht	blijft dicht	ja
K7	's nachts ≥ 1 °C warmer dan buiten	wens	nachtmeting	≥ 1 °C	0,7 °C	nee
K8	extra licht okt.-mrt., 4 h bij donker	wens	LDR afdekken, tijd opnemen	4 h ± 5 min	240 min	ja
W1	water onder 30 %: 30 s, dan 15 min wachten	moet	droge bak	1 beurt, 240 mL	235 mL	ja
W2	≥ 14 dagen zonder bijvullen	moet	berekening + verbruik 7 dagen	≥ 14 d	26,0 L / 1,76 L = 14,8 d	ja
W3	pomp draait nooit droog	moet	reservoir leeg laten lopen	pomp stopt	stopt (B1 en B2)	ja
W4	alarm na 3 beurten zonder effect	moet	slang losmaken	alarm na 3 beurten	alarm na 3 beurten	ja
W5	elk bakje een eigen druppelaar	moet	debiet per druppelaar	20 mL per beurt ± 20 %	17-23 mL	ja
W6	≥ helft regenwater	wens	jaarbalans	≥ 50 %	pas na een jaar	later
W7	onmogelijke sensorwaarde: geen beurt, alarm	moet	sensor uit de grond	geen beurt, rood knippert	zo	ja
E1	apr.-sep. op zonne-energie	moet	batterijspanning loggen	nooit afgeschakeld	testweek en week 8: in orde	voorlopig
E2	batterij ≥ 3 winterdagen	moet	berekening	≥ 3 d	3,1 d	ja
E3	jaarverbruik ≤ 20 kWh	wens	berekening, energiemeter	≤ 20 kWh	19,8 kWh	ja

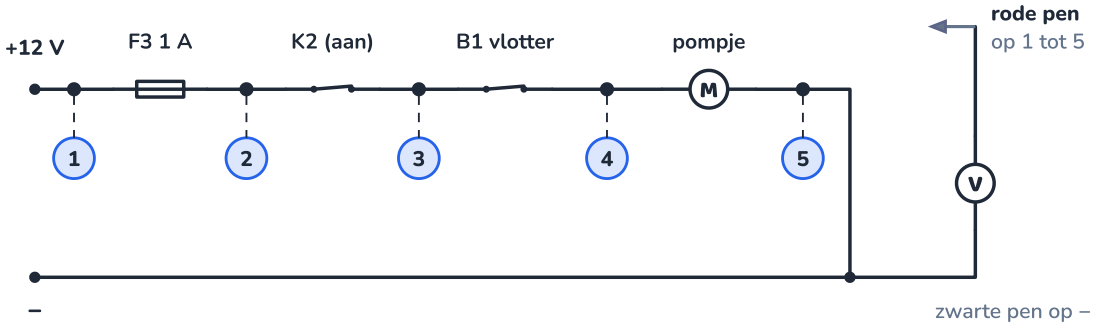
code	eis	soort	toets	criterium	resultaat	voldaan?
V1	in de kas alleen 12 V en 5 V; adapter buiten, achter 30 mA	moet	checklist	alles in orde	in orde	ja
V2	zekering per tak + hoofdzekering	moet	schema, zekeringen tellen	F1-F6 aanwezig	in orde	ja
V3	geen glas, geen scherpe randen	moet	nazicht met handschoen	niets gevonden	1 braam aan een koker, weggevijld	ja, na herstel
G1	voorkant kan open	moet	proberen	open in minder dan 1 min	20 s	ja
G2	statuslampje groen / rood	moet	situaties nabootsen	juiste kleur	juist	ja
G3	reservoir bijvullen ≤ 5 min	wens	tijd opnemen	≤ 5 min	3 min 40 s	ja
G4	materiaal ≤ € 400 (zonder zonnekast)	wens	bonnetjes	≤ € 400	€ 388 gekocht (waarde € 556)	ja
G5	na stroomuitval herstart in veilige stand	moet	stekker 1 min uit	raam dicht, pomp uit	zo	ja
P1	groeiproef mogelijk (12 bakjes, geloot)	moet	proefplan	plan klopt	zo	ja
P2	≥ 1 kg sla per teelt	wens	wegen	≥ 1 kg	771 g (9 bakjes in de schaduw)	nee

UITGEWERKT VOORBEELD · 33.18

Foutzoeken: het pompje draait niet

18/24

Tijdens de systeemtest zet een leerling de bodemvochtsensor in droge potgrond. Het rode lampje brandt continu, maar het pompje draait niet. Waar zit de fout? Werk van de bron naar de verbruiker, met één meting tegelijk.



De pompkring met vijf meetpunten. De zwarte pen blijft op de min, de rode pen schuift van punt 1 naar punt 5.

GEGEVEN

- pompkring: +12 V → F3 → K2 → vlotter B1 → pompje → min
- multimeter op V⎓, zwarte pen op de min
- statuslampje: rood continu (niet knipperend)

GEVRAAGD

- een meetplan
- de oorzaak en de oplossing

OPLOSSING

1. **Lees eerst wat het programma zegt.** Rood continu, niet knipperend: het programma vindt de grond droog en ziet geen alarm, dus B2 op D3 meldt 'water'. Het meten werkt. Het probleem zit in het doen.

2. **Maak meten mogelijk.** Het programma pompt maar 30 s per kwartier. Zet daarom tijdelijk een testprogramma op de Arduino dat D6 aan zet. Luister: klikt relais K2? Ja.

3. **Meet van bron naar verbruiker.** De rode pen gaat van punt 1 naar punt 5; zolang je 12 V meet, is de weg tot daar in orde (hoofdstuk 18).

MEETPUNT	LIGT	VERWACHT (POMP AAN)	GEMETEN	BESLUIT
1	voor F3	12 à 13,5 V	12,9 V	spanning komt aan
2	na F3	zelfde als 1	12,9 V	zekering F3 is heel
3	na K2	zelfde als 1	12,9 V	relais K2 sluit (je hoort het klikken)
4	na vlotter B1	zelfde als 1	0 V	**hier verdwijnt de spanning: B1 is open**
5	na het pompje	0 V	0 V	(normaal: over het pompje staat de volle spanning)

4. **Besluit.** De spanning verdwijnt tussen punt 3 en 4: vlotter B1 is open. In het reservoir zie je waarom: B1 hangt 3 cm hoger dan B2, en het water staat ertussen. Voor B1 is het reservoir 'leeg', voor B2 niet.

5. **Oplossen en hertesten.** Hang B1 onder B2. Voeg een test toe aan het testplan: laat het reservoir langzaam leeglopen. Eerst moet het rode lampje knipperen (B2), pas daarna mag de pomp stroomloos worden (B1).

ANTWOORD

De spanning verdwijnt na vlotter B1: die hing hoger dan B2, zodat de pomp stroomloos was terwijl het programma nog water zag. B1 onder B2 hangen lost het op.

Klopt dit? Waarom van bron naar verbruiker? Je volgt de weg van de stroom: waar de spanning verdwijnt, zit de onderbreking. Verander telkens maar één ding, en schrijf elke meting in het logboek. En meet nooit weerstand in een kring die onder spanning staat (hoofdstuk 19).

NASLAG · 33.19

De foutzoektabel

19/24

Een foutzoektabel zet bij elk symptoom de mogelijke oorzaken, van de waarschijnlijkste naar de minst waarschijnlijke, met een test die telkens maar één ding controleert. Begin altijd bij wat de kas zelf vertelt: het statuslampje en het verslag op de laptop. Voeg je eigen fouten toe: zo groeit de tabel met je kas mee.

symptoom	mogelijke oorzaak	test	oplossing
niets werkt, geen lampje op de Arduino	F1 of F4 doorgebrand; stekker X1 los; batterij leeg (laadregelaar schakelde af)	12 V na F1? 5 V na de omvormer?	oorzaak van de doorgebrande zekering zoeken, dan vervangen; batterij laden of adapter
rood continu, pompje draait niet	vlotter B1 open (hangt hoger dan B2); relais K2; zekering F3	meet van bron naar pompje (voorbeeld hierboven)	B1 onder B2 zetten; relais of zekering vervangen
pompje draait, geen water in de bakjes	slang los; lucht in de pomp; aanzuigfilter verstopt	slang volgen; pomp onder water?	slang vastzetten; filter spoelen
pompt elk kwartier, grond kletsnat	sensor in een ander bakje dan de druppelaar; DROOG en NAT omgewisseld	verslag: vocht en ruwe waarde; sensor in een glas water	sensor verplaatsen; constanten verbeteren en opnieuw ijken
rood knippert	reservoir leeg; 3 beurten zonder effect; sensor uit de grond (vocht onder 0 %)	verslag lezen: vocht, mislukt; vlotter B2	probleem oplossen, dan de knop indrukken
raam gaat niet open bij 30 °C	K3 of F5; duwstang klemt; eindschakelaar; TMP36 meet te laag	verslag: T? relaisledje K3 aan?	mechaniek vrijmaken; zekering; sensor ijken

symptoom	mogelijke oorzaak	test	oplossing
raam klappert open en dicht	T_OPEN en T_DICHT gelijk; sensor in de luchtstroom van het raam	code nakijken; sensor verplaatsen en opnieuw kijken	twee drempels (28 en 25 °C); sensor in de SH-1 midden in de kas
temperatuur overdag enkele graden te hoog	TMP36 in de zon, zonder dakje	referentiethermometer in de schaduw ernaast	houder SH-1 met dakje, in licht PETG (hoofdstuk 32)
vocht leest 0 of 1023, of springt wild	draad los, slecht contact, kortsluiting	draden wiebelen terwijl je het verslag bekijkt	verbindingen solderen of vervangen
ledstrip brandt niet in de winter	EXTRA_LICHT nog false; W1 op hand; F2; LDR ziet een straatlamp	code; stand van W1; ruwe lichtwaarde 's avonds	EXTRA_LICHT = true; W1 op automaat; LDR afschermen
Arduino herstart als het pompje aanslaat	spanningsdip; gedeelde massadraad	5 V meten tijdens het aanslaan	aparte massadraden in een sterpunt (Intermediate, hoofdstuk 21)
één bakje groeit veel slechter	druppelaar verstopt; bakje in de schaduw van de paal	debiet per druppelaar meten (W5)	druppelaar reinigen; in het verslag vermelden
batterij 's morgens leeg in december	paneel te klein, vuil of beschaduwd	opbrengst per dag tegenover verbruik	paneel reinigen; adapter als reserve (november-januari)



groen
alles in orde

rood
grond droog:
de pomp is bezig

rood knippert
alarm: reservoir leeg,
slang los of sensor fout
na herstel: knop indrukken

Drie toestanden van het statuslampje: in één oogopslag zie je of de kas je nodig heeft (eis G2).

PROEF · 33.20

Fase 8: de groeiproef uitvoeren

20/24

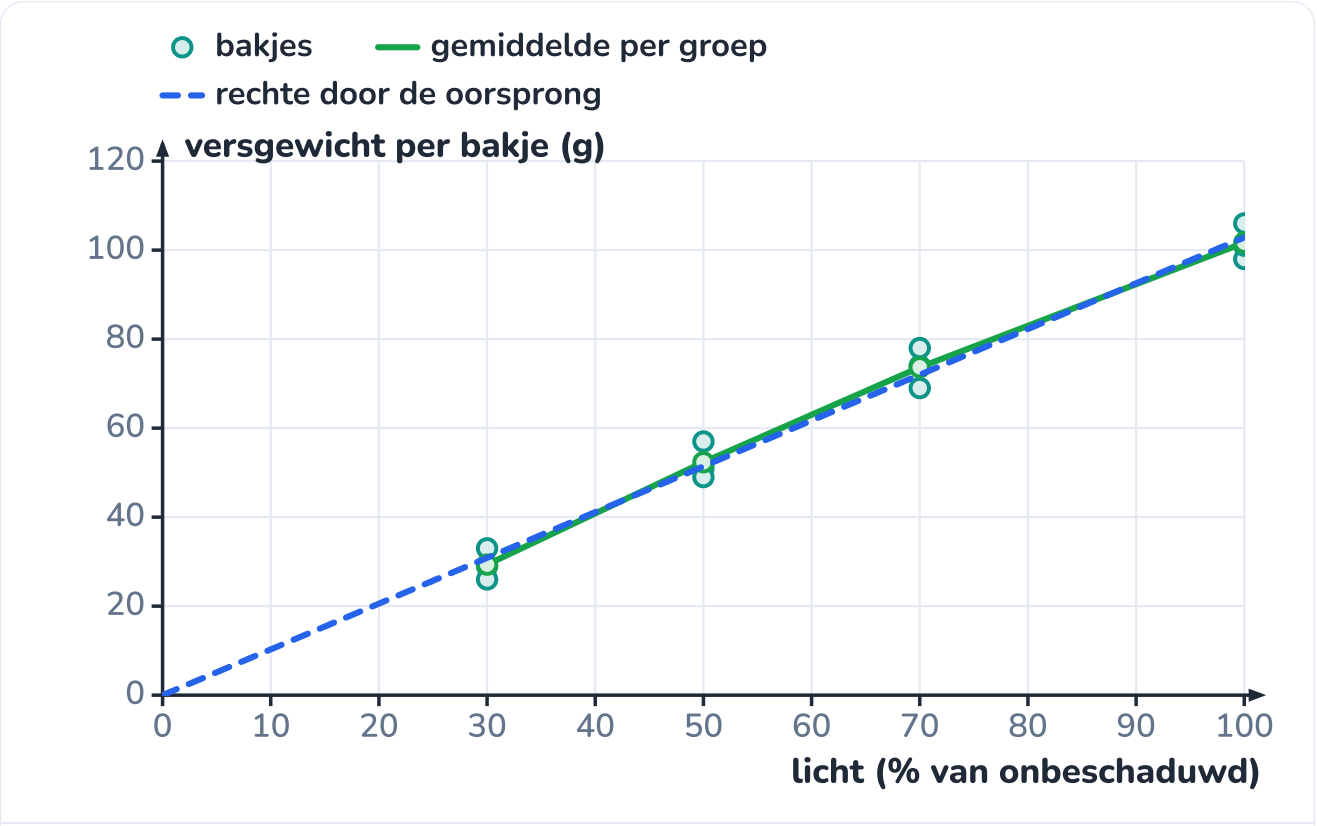
ONDERZOEKSVRAAG

Groeit pluksla in de meetkas trager als ze minder licht krijgt, en hoeveel? (Het proefplan komt uit hoofdstuk 27.)

MATERIAAL

- 12 bakjes met potgrond uit dezelfde zak, zaad pluksla uit één pakje
- 9 raampjes met schaduwdoek: 3 × 30 %, 3 × 50 % en 3 × 70 %
- keukenweegschaal (op 1 g), schaar, lat
- de sensoren van de kas of een luxmeter; fototoestel; logboek

Veiligheid
Was je handen na het werken met potgrond. Oogst met een schone schaar, niet met een cutter.



Elk bakje een puntje, per groep het gemiddelde: de oogst is bijna recht evenredig met het licht.

WERKWIJZE

1. Loot de plaats van de groepen (A 0 %, B 30 %, C 50 %, D 70 % schaduw) zo dat elke groep in beide rijen staat, bijvoorbeeld voor C A D B A C en achter B D A C D B (hoofdstuk 27). Label elk bakje.
2. Zaai 30 zaadjes per bakje en dun na twee weken uit tot 10 plantjes. De ledstrip blijft uit: EXTRA_LICHT staat op false en W1 op 'hand' met S1 open.
3. Elke week: het aantal bladeren per bakje, een foto van boven, en rond de middag het licht onder elk doek.
4. Controleer elke week de druppelaars: krijgt elk bakje ongeveer 20 mL per beurt (eis W5)?
5. Na vijf weken oogst je alles op dezelfde dag, 2 cm boven de grond, en weeg je elk bakje apart. Van één bakje per groep bepaal je ook de droge stof (hoofdstuk 27).
6. Zet de resultaten in een tabel en een grafiek, en schrijf het verslag.

WAARNEMING

groep	licht	bakje 1 (g)	bakje 2 (g)	bakje 3 (g)	gemiddelde (g)	bereik (g)	t.o.v. 100 % licht
A (0 % schaduw)	100 %	98	106	101	101,7		
B (30 % schaduw)	70 %	74	69	78	73,7		
C (50 % schaduw)	50 %	51	57	49	52,3		
D (70 % schaduw)	30 %	29	33	26	29,3		

De gemiddelden liggen bijna op een rechte door de oorsprong: ongeveer 1,03 g per procent licht. Binnen een groep liggen de bakjes 7 tot 9 g uit elkaar; tussen twee groepen scheelt het 21 g of meer. Samen woog de oogst 771 g.

VERKLARING

bijna recht evenredig. In april ofdstuk 27): met minder licht maken de planten minder suiker, en dus minder blad. Omdat de spreiding binnen een groep veel kleiner is dan het verschil tussen de groepen, is het verschil geen toeval van één bakje.

Toch blijft er een tweede variabele die je niet kon uitschakelen: onder het doek is het ook iets koeler en waait het minder. Meet ze (de TMP36 onder een doek), en vermeld ze in de bespreking. Met maar drie bakjes per groep is het besluit ook voorzichtig: een tweede teelt maakt het sterker.



Oogstdag: elk bakje apart wegen, op dezelfde dag en op dezelfde hoogte geknipt.

UITLEG · 33.21

Fase 8: het onderzoeksverslag

21/24

Een onderzoeksverslag vertelt een ander wat je deed, wat je vond en wat het betekent, zo dat die de proef kan herhalen. De vaste onderdelen ken je uit hoofdstuk 2:

onderdeel	wat erin staat	voorbeeld uit de groeiproef
titel	de vraag of de boodschap, kort	Minder licht, minder sla: een groeiproef in de meetkas
onderzoeksvraag	één vraag met de twee variabelen	Hoe hangt het versgewicht van pluksla na vijf weken af van de hoeveelheid licht?
hypothese	als … dan …, omdat …	Als de sla minder licht krijgt, dan is de oogst kleiner, omdat licht in april de beperkende factor is.
materiaal en methode	zo dat een ander de proef kan herhalen: variabelen, groepen, loting, metingen	12 bakjes, 4 groepen (0, 30, 50, 70 % schaduw), geloot over beide rijen; gewogen na 5 weken
resultaten	tabel en grafiek met eenheden, zonder uitleg	tabel met de 12 gewichten, gemiddelde en bereik; grafiek gewicht tegenover licht
besluit	antwoord op de vraag, met getallen; klopt de hypothese?	Het versgewicht daalt bijna recht evenredig met het licht: ±1 g per procent licht.
bespreking	wat kan het resultaat beïnvloed hebben, wat doe je beter?	onder het doek ook koeler; maar 3 bakjes per groep; een tweede teelt in de zomer
bronnen en logboek	waar komen gegevens en methode vandaan	hoofdstuk 27, logboek weken 5-9

Drie regels maken een verslag sterk:

- **Waarneming en interpretatie apart** (hoofdstuk 2). Bij de resultaten staat wat je gemeten hebt; wat het betekent, staat in het besluit en de bespreking.
- **Getallen met eenheden, figuren met een titel** en assen met grootheid en eenheid (hoofdstuk 4). Een grafiek zegt meer dan een alinea.
- **Eerlijk over de grenzen**: hoeveel bakjes, wat je niet kon uitschakelen, wat je anders zou doen.

> **Een verworpen hypothese is geen mislukt onderzoek**
> Klopt je hypothese niet, dan heb je iets geleerd dat je niet wist. Schrijf dat eerlijk op, en zoek een verklaring. Een onderzoek mislukt alleen als de proef niet eerlijk was, of als je de resultaten verbergt.

UITLEG · 33.22

Fase 9: presenteren met poster, pitch en demo

22/24

Het project eindigt met een presentatie, bijvoorbeeld op een infomarkt voor ouders en andere klassen. Drie vormen vullen elkaar aan.

De poster (A1 of A0) leest iemand die voorbijloopt. De titel is leesbaar van op een paar meter, de tekst van op een meter. Weinig tekst, één grote grafiek, de kas op een foto en in het systeemschema. Een goede titel is een vraag of een boodschap: 'Minder licht, minder sla', niet 'Project meetkas'.

De pitch duurt twee minuten en heeft een vaste opbouw:

tijd	deel	voorbeeld
0:00-0:20	het probleem	Hoe houd je planten twee weken in leven als er niemand op school is?
0:20-0:50	onze oplossing	de meetkas: meten, beslissen, doen (systeemschema, kort)
0:50-1:20	het bewijs	28 van de 28 moet-eisen gehaald; de grafiek van de groeiproef

tijd	deel	voorbeeld
1:20-1:45	wat we leerden	de vlotter die te hoog hing; wat versie 2 beter doet
1:45-2:00	afsluiter	een vraag aan het publiek, of: 'kijk, nu geeft ze water' (demo)

De demo toont de kas aan het werk: de sensor in droge potgrond, en de pomp slaat aan; een hand op de temperatuursensor, en het raam gaat open; de sensor uit de grond, en het lampje knippert. Oefen de demo, en houd een plan B klaar (een filmpje) voor als iets niet lukt. Ook dat is eerlijk: vertel wat er misging en waarom.

Laat de kas het woord doen

Een regeling die je live ziet werken, overtuigt meer dan tien slides. Het testrapport met getallen ('28 van de 28 moet-eisen') overtuigt meer dan 'het werkt goed'.



Een posterindeling: de resultaten krijgen de meeste plaats, de titel is een boodschap.



De demo op de infomarkt: droge sensor, en de pomp geeft water.

NASLAG · 33.23

Beoordeling: de eindrubric

23/24

De leraar beoordeelt het project met deze rubric; jullie gebruiken dezelfde voor de zelfevaluatie (werkboek). Per criterium kies je het niveau dat het best past, met bewijs: een opdracht, een meting, een regel in het logboek. De eindscore is de som van niveau × gewicht, gedeeld door 4. Het voorbeeldteam haalde niveau 3 op alles en niveau 4 voor de constructie: 79 op 100.

Daarnaast beoordeelt elk teamlid zichzelf en de anderen (peer-evaluatie) op vier punten: afspraken nakomen, kwaliteit in de eigen rol, anderen helpen, meedenken. Grote verschillen tussen zelf- en peer-evaluatie bespreek je in een kort teamgesprek.

criterium	gewicht	1 · begint	2 · op weg	3 · goed	4 · uitstekend
programma van eisen en testen	15 %	PvE niet herbekeken; weinig getest	de meeste moet-eisen getest; criteria soms vaag	alle moet-eisen getest met een vooraf vastgelegd criterium; testrapport volledig	ook: gefaalde eisen geanalyseerd, verbeterd en hertest; nieuwe eisen uit de integratie
ontwerp en tekeningen	10 %	schets zonder maten	tekening met fouten in projectie of maten	samenstellingstekening en tekeningenlijst volgens de regels	ook: interfaces gecontroleerd, keuzes onderbouwd
constructie	15 %	onvolledig of wiebelt	staat, maar niet haaks of met scherpe randen	maatvast, stijf (C2), stabiel, veilig afgewerkt	ook: netjes, onderhoudsvriendelijk, gemeten en verbeterd
elektrische kring en veiligheid	10 %	niet volgens het schema of zonder zekeringen	werkt, maar pas na herstel van ernstige fouten gekeurd	volgens het schema, zekering per tak, keuring in één keer	ook: nette bekabeling, spanningen en stromen gemeten en genoteerd
besturing en code	15 %	het programma werkt niet in de kas	werkt, maar niet alle situaties getest	alle tests uit het testplan in orde; sensoren in de kas geijkt	ook: een eigen verbetering in de code, getest en uitgelegd
energiebudget	10 %	niet gemaakt	met de waarden uit het boek, niets gemeten	met gemeten stromen, vergeleken met de opbrengst per maand	ook: een zuiniger voorstel, doorgerekend
groeiproef en verslag	15 %	proef niet volgens plan	uitgevoerd; verslag onvolledig	eerlijke proef; verslag met alle onderdelen; besluit met getallen	ook: storende factoren gemeten en besproken
presentatie en samenwerking	10 %	geen poster of demo; logboek leeg	poster en pitch, maar niet voorbereid; logboek onvolledig	poster, pitch en demo voorbereid; iedereen spreekt; logboek bijgehouden	ook: overtuigend, eerlijk over wat niet lukte, vragen goed beantwoord

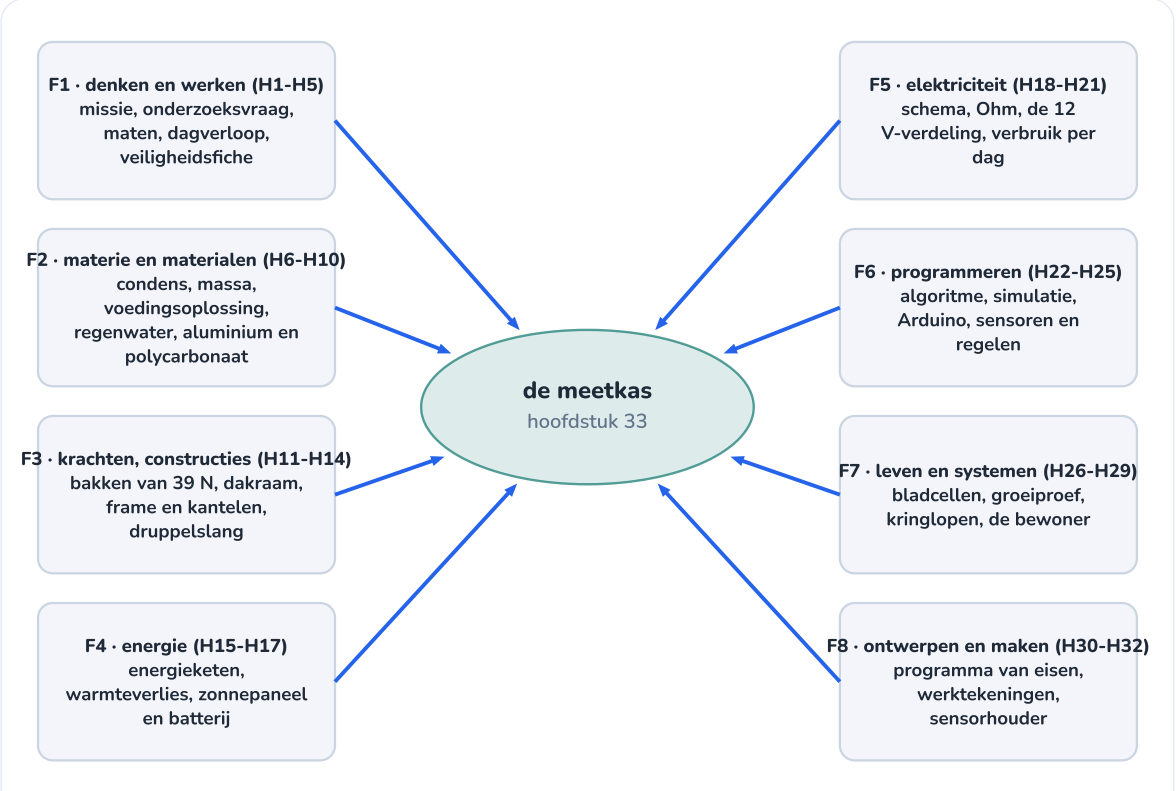
HET GEHEEL · 33.24

De eerste module is af: alles samen, en verder

24/24

De meetkas is het eerste stuk van Habitat dat echt werkt. Elk deel van Fundamental leverde er iets aan, en in dit hoofdstuk kwam alles samen. Kijk je terug, dan zie je de leerlijnen: onderzoeken (ijken, de groeiproef), wiskundig modelleren (verhoudingen, grafieken, het energiebudget), materie (materialen, voedingsoplossing), krachten en constructies (frame, dakraam), energie, elektriciteit, programmeren en regelen (de code), ontwerpen en maken (programma van eisen, tekeningen, prints) en leven (de planten). Data en AI zag je nog maar even (hoofdstuk 22); in Intermediate worden het echte hoofdstukken.

Wat er in Intermediate mee gebeurt. De meetkas blijft staan, buiten op het terras van het station, met haar Uno. In laag 2 bouw je de klimaat- en energiemodule: een kweekruimte met hydroponie (hoogstens 48 plantplaatsen), 1,40 kWp zonnepanelen en twee LiFePO4-batterijen, een Arduino Mega die pH, EC, CO_2 en temperatuur bewaakt, en een datalogger. De meetkas levert daarvoor de eerste echte data: hoe betrouwbaar haar goedkope sensoren zijn (I1), een ijklijn met een rekenblad (I3), de kas bij storm (I10), haar warmteverlies nagerekend (I19), een week sensordata in Python (I28) en een beslisboom die voorspelt of de planten water nodig hebben (I39). Het integratieproject van Intermediate (I40) volgt dezelfde fasen als dit hoofdstuk, maar met meer rekenwerk, een datalogger en een technisch rapport.



Acht delen, drieëndertig hoofdstukken, één meetkas.

F1 Wat is STEM?
De missie van Habitat en de meetkas als systeem: hier sluit de cirkel.

F2 Onderzoeken: van vraag tot besluit
De onderzoekscyclus en het verslag, voor de groeiproef.

F5 Veilig werken in labo en werkplaats
Risicotabel, STOP en de 230 V-adapter buiten de kas.

F13 Constructies: sterk en stabiel
Diagonalen, zwaartepunt en kantelen: de constructie van de kas.

F17 Energie uit zon, wind en water
Het zonnepaneel van 50 Wp en de batterij van 250 Wh.

F21 Elektrisch vermogen en energie
Het energiebudget dat je hier nagerekend en aangevuld hebt.

F25 Sensoren en automatisch regelen
Water geven en het dakraam: de regelingen die hier samen in één programma zitten.

F27 Planten: fotosynthese en groei
Het proefplan van de groeiproef.

F30 De ontwerpcyclus
Het programma van eisen, en testen, evalueren en verbeteren als lus.

F31 Technisch tekenen
Werktekeningen, stuklijsten en isometrie.

I1 Meetfouten en nauwkeurigheid
Hoe betrouwbaar zijn de goedkope sensoren van de meetkas?

I10 Moment en evenwicht
De meetkas bij storm, en waarom de grondankers nodig zijn.

I20 Zonne-energie dimensioneren
Zonnepaneel en batterij voor een groter systeem, met energiebeheer.

I29 Microcontrollers programmeren in C++
Programmeren met millis() in plaats van delay(), en code in functies en modules.

I30 Datalogging en communicatie
Een datalogger die het verslag van de kas zelf bewaart.

I32 Toestandsmachines
Dag, nacht, alarm en onderhoud als toestanden: de volgende stap na tellers en vlaggen.

I40 Integratieproject: de klimaatmodule
Het integratieproject van Intermediate: de tweede laag van Habitat.

E45 Systems engineering en het V-model
Het V-model: eisen en tests zoals hier, maar voor het hele station.

Habitat
De eerste module van Habitat is af: een meetkas die haar klimaat meet, zelf water geeft en verlucht, en op zonne-energie draait. Nieuw in het portfolio: het programma van eisen versie 2 (36 eisen, 28 moet), de samenstellingstekening HAB-F33-01, de

kostenraming, het volledige programma (getest), het aangevulde energiebudget (43,9 Wh per zomerdag, 64,6 Wh per winterdag), het testrapport en de resultaten van de groeiproef. In Intermediate bouw je erop verder.

SAMENVATTING

In het kort

- Integreren is meer dan samenvoegen: je controleert elke interface (maat, spanning, pin, eenheid) en test het geheel, want sommige fouten bestaan alleen in het geheel.
- Een project plan je in fasen met mijlpalen (Gantt-diagram), met vaste rollen, een logboek en een portfolio; taken op het kritieke pad bepalen het tempo.
- Het programma van eisen (versie 2: 36 eisen, 28 moet) is de lat: elke eis krijgt vooraf een toets en een criterium, en het testrapport zegt per eis of ze gehaald is.
- De constructie: een aluminium frame met gekruiste kabels (3,1 mm bij 50 N, eis C2), een tafel op drie steunen, een laag zwaartepunt (0,28 m, kantelhoek 47°).
- De 12 V-kant: zonnekast of adapter via stekker X1, hoofdzekering F1 en vier takken met elk een zekering (samen hoogstens 1,70 A). De 5 V-kant: de Arduino met drie sensoren, knop, vlotter, vier relais en het statuslampje.
- Het programma meet elke minuut alles en onthoudt met tellers hoe lang het moet wachten; het start in een veilige stand en geeft alarm bij een leeg reservoir, drie beurten zonder effect of een onmogelijke meting.
- Het energiebudget met relais en duwstang: 43,9 Wh (zomer) en 64,6 Wh (winter) per dag. Het paneel van 50 Wp volstaat behalve in december; de batterij houdt 3,1 winterdagen.
- Foutzoeken: van symptoom naar oorzaak, van bron naar verbruiker, één meting tegelijk, en alles in het logboek.
- De groeiproef toont een oogst die bijna recht evenredig is met het licht (±1 g per procent); je rapporteert met vraag, hypothese, methode, resultaten, besluit en bespreking, en presenteert met poster, pitch en demo.

BEGRIPPEN

Wat je nu kent

integratie
Deelsystemen die elk apart werken samenvoegen tot één systeem, en nagaan of ze ook samen werken.

interface
De plaats en de afspraken waar twee deelsystemen elkaar raken: een stekker, een pin, een maat, een eenheid.

Gantt-diagram
Planning waarin elke taak een balk is over de weken waarin ze loopt, met de mijlpalen als ruitjes.

mijlpaal
Een moment in een project waarop iets af moet zijn en getoetst wordt, zoals 'de kas staat' of 'de kring is gekeurd'.

kritiek pad
De reeks taken die elk af moeten zijn voor de volgende kan beginnen: loopt er één uit, dan schuift het hele project op.

logboek
Dagboek van het project: wie deed wat, welke problemen en beslissingen er waren, en wat de volgende stap is.

samenstellingstekening
Werktekening van een geheel, met de hoofdmaten en een verwijzing naar de werktekeningen van de onderdelen.

testplan
Lijst van tests die per eis zeggen hoe, waarmee en met welk criterium je toetst, vastgelegd vóór je test.

testrapport
Het ingevulde testplan: per eis het resultaat en het besluit (gehaald, niet gehaald, voorlopig).

laadregelaar
Schakeling tussen zonnepaneel, batterij en verbruikers die de batterij veilig laadt en de

energiebudget
Vergelijking van wat een systeem per dag aan energie gebruikt met wat de bron per dag levert.

naspelen (trace)
Een programma met de hand stap voor stap uitvoeren voor gekozen invoer, om na te gaan wat het doet.

verbruikers afschakelt als de batterij te leeg wordt.

foutzoeken
Systematisch de oorzaak van een fout vinden: van symptoom naar mogelijke oorzaak, met tests die telkens één ding controleren.

rubric
Beoordelingstabel met criteria en per criterium een beschrijving van elk niveau.

peer-evaluatie
Beoordeling van je teamgenoten met dezelfde criteria als je zelfevaluatie, eerlijk en met een concrete tip.