

Computerondersteund modelleren
biologie

Hollen of stilstaan

2^e editie



Universiteit Utrecht
Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen
Ontwikkelgroep Dynamisch Modelleren

Voorwoord

Dit lesmateriaal is een onderdeel van het onderwijsproject *Computerondersteund modelleren*. Dit project bestaat uit vier modules. De eerste drie modules zijn voor achtereenvolgens de vakken natuurkunde, scheikunde en biologie. In die drie modules leer je hoe je het programma Powersim kunt gebruiken voor het modelleren van dynamische verschijnselen. Met ‘modelleren’ wordt bedoeld: het ontwerpen, bouwen en testen van een computermodel. En ‘dynamische verschijnselen’ zijn situaties waarbij verschillende grootheden in de loop van de tijd veranderen, maar daarbij ook elkaar beïnvloeden.

In de derde module – voor het vak biologie – gaat het om het handhaven van bepaalde waarden als waterhoeveelheid, zoutconcentratie en temperatuur in het lichaam van de mens. Door veranderingen in het externe milieu dreigen die waarden verstoord te worden. Met behulp van een regelmechanisme (*homeostase*) slaagt het lichaam erin, die verstoringen tegen te gaan. Aan homeostase zijn echter grenzen en we kunnen onderzoeken waar die liggen.

Na afronding van de eerste drie modules kun je modellen van dynamische verschijnselen ontwerpen, bouwen en testen. Deze vaardigheden gebruik je in de vierde en laatste module. Deze module is een vakoverstijgend project over het *Systeem Aarde*. Met ‘Systeem Aarde’ bedoelen we alle verschijnselen en processen die samen ertoe leiden dat er op aarde een leefbaar klimaat ontstaat.

Naast dit lesmateriaal is er ook nog een *basishandleiding* voor gebruik van het computerprogramma *Powersim*. Deze handleiding geeft een overzicht van de basishandelingen waarmee je in de computer modellen bouwt. Aanvullende informatie over het project Computerondersteund modelleren vind je op www.cdbeta.uu.nl/model. Daar vind je ook de benodigde software en de modellen waarnaar in de tekst verwezen wordt.

De Ontwikkelgroep Dynamisch Modelleren bestaat uit:

Rob Burer
Kees Hooyman
Frans Huijsmans
Koos Kortland
John Meyer
Ad Mooldijk
Gjalt Prins
Elwin Savelsbergh
Marijke Thijssen
Joop van Well
René Westra
Robert Wielinga

De homepage van de ontwikkelgroep: <http://www.cdbeta.uu.nl/model>

Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen
Universiteit Utrecht
Postbus 80.000
3508 TA Utrecht

Computerondersteund modelleren, Biologie: Hollen of stilstaan, 2^e editie

René Westra, Elwin Savelsbergh en de Ontwikkelgroep Dynamisch Modelleren

© 2002 Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen, Universiteit Utrecht

Deze publicatie mag in ongewijzigde vorm worden verveelvoudigd en verspreid ten behoeve van niet commercieel gebruik in het onderwijs, mits met vermelding van deze bepaling en van het bovenstaande copyright. Voor alle andere vormen van openbaarmaking is schriftelijke toestemming van de Universiteit Utrecht vereist.

Powersim en *Powersim Constructor* zijn geregistreerde handelsmerken van Powersim. Constructor Lite versie 2.51 mag kosteloos verspreid worden t.b.v. niet-commercieel schoolgebruik. Powersim levert echter geen technische ondersteuning bij deze versie van de software.

Dit onderwijsmateriaal kwam tot stand met financiële ondersteuning van het Ministerie van OC&W.

Inhoud

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Inleiding | 1 |
| Water in het lichaam | 6 |
| Buitentemperatuur en zelfregulatie..... | 9 |
| Waarden en formules in je model invullen | 11 |
| De grenzen van regeling door terugkoppeling..... | 13 |
| Er is meer dan water..... | 17 |
| Zouten in het lichaam..... | 17 |
| Lichaamstemperatuur en water | 20 |
| Synthese | 26 |
| Modellen, machines en mensen: verschillen en overeenkomsten | 29 |
| Keuzestof..... | 32 |
| Bijlage: Water en zout in cijfers | 35 |
| Typische waarden | 35 |
| Bijzondere omstandigheden..... | 36 |

Inleiding

Er zijn in Nederland heel wat joggers, renners en hardlopers. Een aantal daarvan waagt zich ook aan de marathon, waarbij een afstand van 42 kilometer en 195 meter afgelegd moet worden. Terwijl de loper zich inspant om zo snel mogelijk vooruit te komen, doet het lichaam zijn uiterste best om het inwendig milieu constant te houden. In deze module onderzoek je de processen en problemen die daarbij een rol spelen.



Figuur 1– De marathon van Keulen in 2001

Het lopen van een marathon vraagt veel van een mens en lang niet alle deelnemers halen zonder problemen de eindstreep. Het is dan ook niet verrassend dat allerlei deskundigen artikelen schrijven met meningen en adviezen over de beste aanpak. Hieronder vind je fragmenten uit drie van zulke artikelen.

Hardlopen in de hitte

Het is met reden dat de grote stadsmarathons in voor - en najaar worden gelopen.

Warmte en lang hardlopen gaan niet goed samen. Er zijn atleten, zoals eertijds de eigenwijze Belg Vincent Rousseau, die zelfs weigeren te starten als de thermometer meer dan 16 graden aangeeft. Geef ze eens ongelijk: vijf jaar geleden werd in Athene tijdens de WK een marathon gelopen en het finishgebied leverde memorabele beelden op. Tientallen elitelopers lagen, volledig uitgedroogd, aan het infuus.

De organisatie van de marathon van Londen deed een onderzoek naar het verband tussen temperatuur en marathontijden. In 1996 werd het 21 graden. Volgens Dan Tunstall Pedoe, medisch directeur van het evenement, zochten op die dag 4696 lopers EHBO -hulp. Negentig dravers moesten in het St. Johns ziekenhuis worden opgenomen. Winnaar Ceron finishte in 2.10, een magere tijd.

Tunstall Pedoe: “In warme omstandigheden kan het lichaam de warmte niet langer kwijt, met soms fatale gevolgen. Ik raad lopers aan niet te beginnen als het warmer is dan 25 graden. Doe je het toch, dan wordt het een overlevingstocht.”

Kou heeft ook invloed op de prestaties, maar dan zijn de gevolgen minder extreem. De ‘koudste’

marathon van Londen werd in 1999 gelopen (8 graden), de winnaar kwam over de meet na 2.07.57. De uitval onder de recreanten was klein.

Wereldrecordhouder Khalid Khannouchi liep in 1999 in Chicago naar zijn vorige wereldrecord, 2.05.42. Het was die dag 4 graden, maar de gevoels temperatuur lag, dankzij de wind, rond het vriespunt. Bij zijn nieuwe wereldrecordrace liep hij onder ideale omstandigheden (12–14 graden, nagenoeg windstil) slechts 4 seconden sneller. Kou hoeft dus geen al te grote handicap te zijn.

Bewerkt naar een artikel van Rolf Bos in *De Volkskrant*

Marathon en het weer

Marathonlopers die meedraaien in de top, halen een kruissnelheid die maar liefst 85 procent bedraagt van de maximumsnelheid die ze over een traject van één kilometer kunnen bereiken. De hele afstand leggen ze af in tijden die variëren van 2 uur en 6 minuten tot 2 uur en 12 minuten. Om zulke prestaties te kunnen leveren ontwikkelt het lichaam grote hoeveelheden warmte, die het overigens ook weer kwijt moet. Vandaar dat uitdroging en uitputting ten gevolge van warmte tijdens een marathon altijd op de loer liggen.

Succesvolle marathonatleten bezitten twee belangrijke eigenschappen. Allereerst kunnen ze grote hoeveelheden zuurstof opnemen, door het lichaam transporteren en benutten. Daarnaast zijn ze bestand tegen een energieverbruik dat ongeveer 20 maal hoger ligt dan het verbruik in rust. Het vermogen dat die tijdens de race geleverd wordt (1 kiloWatt), is goed voor een stijging van de lichaamstemperatuur van 0,2 graden per minuut. Voor een hele wedstrijd van ruim twee uur komt dat neer op een temperatuurstijging van 26 graden, overigens een theoretische waarde, omdat de betrokkene bij een lichaamstemperatuur van 42 of 43 graden buiten bewustzijn zou raken.

In de meeste gevallen stijgt de temperatuur echter slechts met een of hooguit twee graden, wat de effectiviteit aantoont van het mechanisme waarmee het lichaam de overvloedige warmte weet kwijt te raken. Dit afvoeren van warmte gaat bij sommige weersomstandigheden (droge lucht, wind) gemakkelijker dan bij andere. Vandaar dat het weer een belangrijk stempel kan drukken op het koersverloop en op de behaalde tijden.

Bewerkt naar een artikel van Kees Floor in *De Volkskrant*

Sportdrank: Energiedrank of dorstlesser?

Tijdens het sporten gaat je lichaamstemperatuur omhoog. Om te voorkomen dat deze temperatuur te hoog wordt en daardoor je prestatievermogen sterk vermindert, gaat je lichaam "zweeten". Zweeten, het uitscheiden van vocht via je poriën, geeft een afkoelend effect: een liter zweet onttrekt bij verdamping 2,4 MJ aan warmte aan het lichaam. Alleen, doordat de hoeveelheid vocht in je lichaam omlaag gaat, zal je prestatievermogen verminderen. Je lichaam reageert hierop door een "dorstgevoel" te geven.

Om nu te zorgen dat de vloeistof die je drinkt zo snel mogelijk wordt opgenomen in de bloedbaan (daar is het tenslotte nodig), moet deze "isotoon" zijn. Oftewel: de concentratie van vitamines, mineralen en suikers (uitgedrukt in milliOsmol/liter) moet overeenkomen met die van het bloed (300 milliOsmol/l). Hoe meer die concentratie afwijkt van die van het bloed, hoe langer het duurt voordat de vloeistof is opgenomen en dus hoe langer het ook duurt voordat je dorstgevoel afneemt.

Bewerkt naar een artikel van Gerben Rodts op de internetsite van de sportvereniging Dynamica

- 1 Er komt in deze fragmenten een aantal uitwendige factoren aan de orde die invloed hebben op de prestatie van een marathonloper. Noteer drie van die factoren. Zet bij iedere factor erachter hoe die factor invloed heeft op de prestatie.

Factor 1:

Factor 2:

Factor 3:

In de teksten wordt ook beschreven hoe het lichaam probeert gedurende de marathon een aantal inwendige factoren constant te houden. In de biologielessen heb je dit verschijnsel leren kennen als *homeostase* (zie ook Nectar biologie 1 blz. 287-289).

2 Welke factoren moet het lichaam volgens de artikelen constant proberen te houden?

Factor 1:

Factor 2:

Factor 3:

Om iets preciezer te zien hoe dat tijdens de marathon verloopt, kun je de videofilm 'Homeostase' bekijken. Hierin wordt de Britse Martina McColl gevolgd tijdens een marathon (TELEAC -BBC).

3 Beantwoord met behulp van de video de volgende vragen.

a Op welke twee manieren verliest Martina gewicht tijdens de marathon?

b Martina transpireert. Leg uit hoe ze daarmee warmte kwijtraakt. Welke twee stoffen geeft ze daarbij bovendien af?

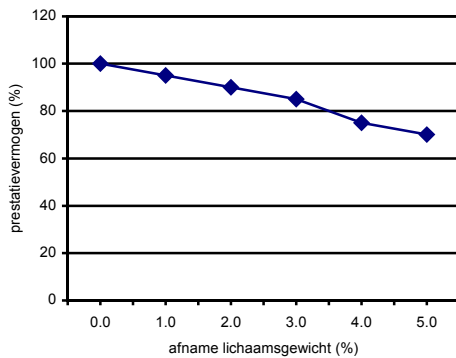
c Noem twee andere mechanismen waardoor Martina warmte afgeeft.

d Welke maatregelen kan ze nemen om te voorkomen dat ze oververhit raakt?

e Op welke wijze zorgen de nieren ervoor dat Martina niet te veel water verliest?

f Hoeveel water is ze uiteindelijk kwijt aan het eind van de marathon?

Bij het lopen van een marathon worden zware eisen gesteld aan de homeostase. Als het lichaam er niet in slaagt de bovengenoemde grootheden binnen nauwe grenzen te handhaven heeft de prestatie al snel te lijden of wordt het zelfs onmogelijk de marathon uit te lopen. Zoals je in het tweede artikel kon lezen, leidt een lichaamstemperatuur tot 42 graden tot bewusteloosheid. En in Figuur 2 zie je dat de prestaties al te lijden hebben bij een vochtverlies van slechts enkele procenten.



Figuur 2 – De invloed van vochtverlies op het prestatievermogen.

Bedenk dat bij zware inspanning of in een warme omgeving het lichaam per uur 1.5 liter aan zweet kan verliezen; bij combinatie van die twee kan dat oplopen tot 2.25 liter per uur. (Onder normale omstandigheden is de totale waterafgifte via urine, ontlasting, zweet en uitademing 1.5 liter per dag). Bovendien verlies je met het zweet niet alleen water, maar ook opgeloste organische en anorganische stoffen, vooral natriumchloride (keukenzout). De totale concentratie hiervan in zweet is niet bij iedereen gelijk, maar altijd lager dan in het bloed (gemiddeld de helft van de bloedconcentratie).

4 Leg uit dat een lichaam met minder water, een lagere zoutconcentratie of een hogere temperatuur dan normaal niet goed kan presteren.

Minder water:

Lagere zoutconcentratie:

Hogere temperatuur:

In de aangehaalde artikelen werd al genoemd dat de toptijden van een marathon sterk afhangen van de weersomstandigheden. Je zou dus kunnen proberen de te verwachten toptijden te voorspellen op basis van de weersomstandigheden. Het zou ook handig zijn als je kon voorspellen hoe intensief de deelnemers zullen zweeten en hoeveel drinkposten je dus onderweg nodig zult hebben. Je kunt daarvoor echter niet simpelweg uitgaan van een lineaire relatie: het is bijvoorbeeld niet zo dat je iedere

graad stijging van de buitentemperatuur direct een procent langzamer loopt De beïnvloeding verloopt indirect, en pas na verloop van tijd zal een hogere buitentemperatuur, via meer zweten, leiden tot een watertekort en een verminderde prestatie. Hetzelfde geldt voor de zoutconcentratie en de lichaamstemperatuur. Bovendien kunnen die grootheden elkaar weer beïnvloeden.

Om dus iets te kunnen zeggen over de te verwachten eindtijden, het drinkwaterverbruik etc. is het nodig een goed begrip te hebben van alle lichaamsprocessen die daar een rol bij spelen en hun onderlinge relaties. Je moet dus een model hebben van de homeostase in het menselijk lichaam. Omdat je ook wilt weten hoe al die processen verlopen in de tijd is het handig een computermodel te maken waarmee je het hele proces kunt doorrekenen. Je kunt dan ook snel zien wat het effect zou zijn van veranderende omstandigheden.

Bij het bouwen van het model is het handig om met een eenvoudige situatie te beginnen. Je gaat uit van een rustsituatie. Als je die situatie goed in het model beschreven hebt, kun je meer details toevoegen. Daarmee ga je door totdat je model goed genoeg is om te beschrijven wat er tijdens de marathon gebeurt. In een rustsituatie kost het handhaven van de hoeveelheid water, de lichaamstemperatuur en de zoutconcentratie een mens niet al te veel moeite. We ontwerpen, bouwen en testen drie modellen. Steeds staat één van de drie grootheden (*water in het lichaam, lichaamstemperatuur en zoutconcentratie*) centraal. Via die modellen onderzoeken we nu wat er gebeurt als een mens vanuit een rustsituatie overgaat naar zware inspanning. Aan het eind koppelen we de drie modellen aan elkaar. Dan proberen we ook tot de beantwoording van onze centrale vraag te komen. *Onder welke omstandigheden (bij welke combinatie van uitwendige factoren) kan een loper optimaal presteren bij de marathon?*

Water in het lichaam

Om te bedenken welke onderdelen in het eerste model van het lichaam moeten worden opgenomen is het handig het lichaam te vergelijken met een polder. Het is voor de bewoners van een polder van het grootste belang dat de grondwaterstand in de buurt van een gewenst peil blijft, bijv. 50 cm onder het maaiveld. Wordt de waterstand lager, dan verdroogt het gewas en gaat het slecht met de weidevogels. Wordt de waterstand hoger, dan verrotten de aardappels op het veld.



Figuur 3- polder

Het is daarom nuttig een model te hebben waarmee de waterstand voorspeld kan worden. Voor zo'n model moet je een aantal dingen weten: hoeveel water zit er in het begin in de polder, hoeveel stroomt er binnen en hoeveel wordt er afgevoerd. De aanvoer van water kan uit allerlei bronnen komen (regenwater, kwelwater, irrigatie) en ook de afvoer kan uit allerlei bijdragen bestaan.

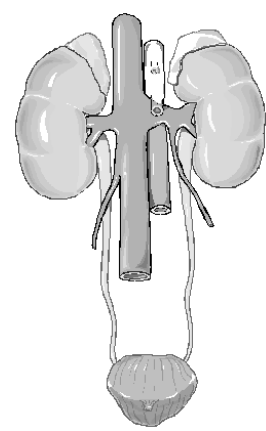
- 5 Terug naar het water in het menselijk lichaam. Welke factoren zou je kunnen opnemen in een eerste model van de waterhuishouding bij de mens?



Fig. 4 – drinken tijdens de marathon is belangrijk



Figuur 5 – ontlasting komt soms ongelegen



Figuur 6 – nieren en blaas, waar aanmaak en opslag van urine plaatsvinden

Voor de voorspellende waarde van je model zijn de grote bijdragen natuurlijk belangrijker dan de kleine, maar bovendien zijn de sterk wisselende bijdragen interessanter dan bijdragen die nauwelijks veranderen: zulke constante bijdragen kun je eenvoudig optellen en in je model opnemen als “overige”, terwijl je van de veranderlijke bijdragen gedetailleerd studie moet maken om een goede voorspelling te doen.

- 6 Zoek in de bijlage de hoeveelheden in liter (per dag) van de bovenstaande factoren in een rustsituatie. Gebruik voor je model één wateropnamepost en twee waterafgifteposten. Geef argumenten voor je keuze van deze grootheden in het model.

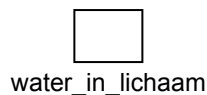
De hoeveelheid *water_in_lichaam* bedraagt onder normale omstandigheden: _____ L

De belangrijkste factor voor wateropname is _____, deze bedraagt gemiddeld: _____ L/dag. Ik kies deze factor omdat _____

De belangrijkste factoren voor waterafgifte zijn _____, deze bedraagt gemiddeld _____ L/dag en _____, deze bedraagt gemiddeld _____ L/dag. Ik kies deze factoren omdat _____

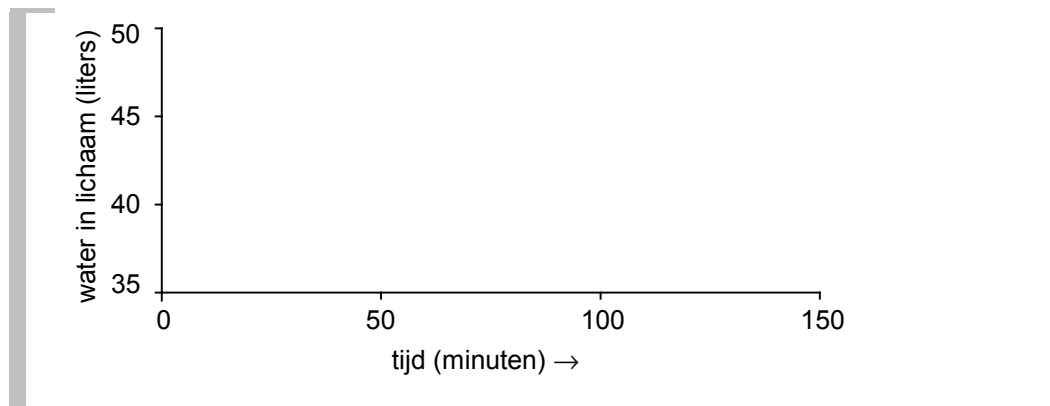
Bespreek je keuze met je docent. voordat je verder gaat.

- 7 Schets een Powersim-model met de gekozen factoren.



- 8 Een marathon duurt voor snelle lopers tussen 2 uur 10 minuten en 2 uur 30 minuten. Het is het handigst om voor deze periode de minuut als eenheid van tijd te nemen. Het model moet dan 150 minuten doorrekenen om de hele marathon te beschrijven. Als de tijd is uitgedrukt in minuten, dan moeten ook de opname en afgifte in hoeveelheden per minuut worden uitgedrukt. Als je de waarden in L/dag naar L/min omrekent, worden het wel erg kleine getallen. Zet ze daarom om in mL/min en vul de gevonden waarden hieronder in. Vergeet niet ook *water_in_lichaam* om te rekenen in mL.

- 9 Bouw nu dit model in Powersim. Om te controleren wat er met *water_in_lichaam* gebeurt, laat je het model vervolgens doorrekenen. Voeg een grafiek in om *water_in_lichaam* weer te geven. Teken de grafiek die je krijgt hieronder.



- 10 Als *water_in_lichaam* niet op het gewenste niveau blijft, wat is dan de oorzaak daarvan?

- 11 Pas je model zodanig aan dat *water_in_lichaam* op het gewenste niveau blijft. Noteer wat je hebt veranderd. Sla dit model op onder de naam water1.

- 12 Welke waarde(n) is (zijn) in de marathon anders dan in de 'normale' situatie? Leg je antwoord uit.

- 13 Geeft dit model een goed beeld van hoe homeostase werkt? Waarom wel of niet?

Buitemtemperatuur en zelfregulatie

Omdat de buitemtemperatuur een belangrijke invloed heeft op de waterhuishouding (zie de eerste twee artikelen) voegen we deze aan het model toe. Het verbeterde model dat je nu gaat maken, noemen we *water2.sim*.

- 14 Begin met het ontwerpen van *water2*, met het eerste model als basis. Bedenk eerst op welke modelgrootheid de buitemtemperatuur het meest direct invloed heeft. Leg je keuze uit.

Ik verbind de factor buitemtemperatuur met:

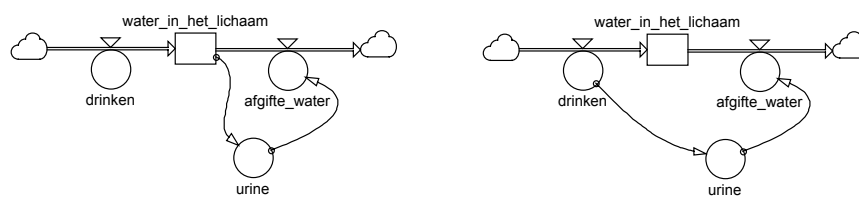
Dat doe ik omdat:

Als de buitemtemperatuur verandert, leidt dat dus tot een verandering van de waterhuishouding. Vervolgens zal het lichaam proberen om de andere grootheden zo aan te passen dat de homeostase gehandhaafd blijft.

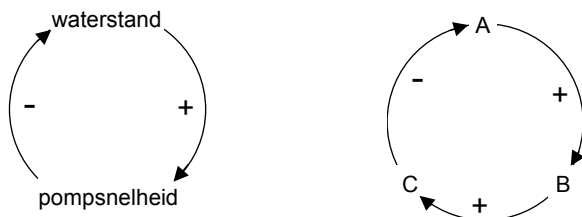
- 15 Welke grootheid probeert het lichaam daarbij constant te houden?

Om deze zelfregulatie van het lichaam weer te geven in het model kun je een of meer van de grootheden *drinken*, *transpiratie* en *urine* afhankelijk maken van andere grootheden in het model. Dat kan op verschillende manieren.

- 16 Hieronder zie je een deel van het model met daarin twee manieren om de urineproductie te reguleren. Welke klopt beter met de werkelijkheid, waarom?



Een belangrijk regelmechanisme voor homeostase is de *negatieve terugkoppeling*. Daarmee wordt bedoeld dat bijvoorbeeld factor A een positieve invloed heeft op factor B, maar dat een grotere B op zijn beurt een negatieve invloed heeft op A. De polder kan hier weer dienen als voorbeeld: hoe hoger de waterstand, hoe harder de polderbeheerder zal pompen; maar daardoor daalt de waterstand, zodat de beheerder weer minder hard gaat pompen, enzovoort (Figuur 7). Er ontstaat zo een zeker evenwicht. In dit voorbeeld spelen slechts twee grootheden een rol, maar het kan ook via meer tussenstappen, bijvoorbeeld: meer A leidt tot meer B, meer B leidt tot meer C, en meer C leidt weer tot minder A.



Figuur 7- Negatieve terugkoppeling. Links: bij de regulatie waterstand in de polder. Rechts: er kunnen ook tussenstappen zijn.

17 Bij de homeostase spelen meerdere negatieve terugkoppelingsrelaties een rol. Geef hieronder aan tussen welke grootheden negatieve terugkoppelingsrelaties bestaan, en geef deze terugkoppelingen weer op de manier van Figuur 7. Gebruik in ieder geval de volgende grootheden: *water_in_lichaam*, *drinken*, *dorst*, *transpiratie*, *urine*. *Dorst* wordt als nieuwe grootheid geïntroduceerd, omdat je immers pas gaat drinken als er eerst door verlaging van *water_in_lichaam* een dorstgevoel is ontstaan (zie het derde artikel op bladzijde 2). Als je geen dorst hebt, is de waarde van dorst nul; als je maximale dorst hebt, is de waarde van dorst één.

18 Schets hieronder een Powersimmodel waarin de nieuwe relaties verwerkt zijn.

Waarden en formules in je model invullen

Het ontworpen regulatiemodel beschrijft hoe de hoeveelheid water in het lichaam op aanvaardbaar niveau gehouden kan worden. Of het door jou ontworpen model goed werkt kun je pas zien als je dit model laat doorrekenen. Daarvoor moet je eerst waarden en formules in het model invullen. Sommige waarden en formules kun je opzoeken. Voor andere moet je zelf een redelijke schatting maken.

Omdat in de biologie voor veel relaties geen exacte formule beschikbaar is, moet je vaak 'schatten' hoe een relatie ongeveer verloopt. Hoe je dat doet, vind je uitgebreid in de basishandleiding. Daar wordt ook uitgelegd wat je moet doen als een relatie van meerdere factoren tegelijk afhangt. Hier een voorbeeld. Stel dat *urine* alleen afhangt van *water_in_lichaam*. Hoe meer water er aanwezig is, hoe meer je plast, dus het is een oplopend verband; als er geen water aanwezig is kun je ook niet plassen. Een eenvoudige formule is dan: $y = c \times x$, oftewel:

$$\text{urine} = \text{constante} \times \text{water_in_lichaam}$$

Als je eenmaal weet welke vorm de relatie heeft, kun je de waarden voor de constante bepalen uitgaande van de normale waarden voor *urine* en *water_in_lichaam*. Je weet dat er bij een normale hoeveelheid water in het lichaam een normale hoeveelheid urine geproduceerd wordt. Kies de constante dus zo dat dit het geval is, bijvoorbeeld:

$$0.8 = \dots \times 42000$$

Deze aanpak werkt goed voor een lineaire relatie. Soms is de relatie die je wilt invullen ingewikkelder, bijvoorbeeld eerst langzaam oplopend en dan steeds steiler. Dan kan het lastig zijn om hier een formule voor te verzinnen. In dat geval is het handiger de relatie te beschrijven door een grafiek te tekenen (≡ p. 22 Een grafiek tekenen).

Als de gezochte grootte afhangt van meerdere factoren wordt het nog lastiger. Je kunt dan geen grafiek meer tekenen. In de formule die je maakt, moet je meerdere grootheden met elkaar verbinden. Er doen zich drie situaties voor:

Meerdere factoren dragen ieder hun steentje bij. Zulke factoren zul je optellen. Bijv. urine en transpiratie stellen allebei waterverlies voor, je telt ze op om de totale waterafgifte te berekenen.

Het resultaat hangt af van het verschil tussen twee factoren. In dat geval zul je aftrekken. Bijv. warmteafgifte door geleiding treedt alleen op als er een verschil is tussen buitentemperatuur en lichaamstemperatuur. Als beide aan elkaar gelijk zijn is de verschiltemperatuur nul. Je moet er wel rekening mee houden dat als je twee positieve getallen van elkaar aftrekt het resultaat eventueel negatief kan zijn. Als dat niet de bedoeling is, dan is delen een betere oplossing.

Stimulerende en remmende factoren bepalen samen het resultaat. In dat geval zul je vermenigvuldigen (bij stimulerende factoren) of delen (remmende factoren). Stel dat je de transpiratie verbonden hebt met de buitentemperatuur en de hoeveelheid water in het lichaam. Meer water in het lichaam leidt tot meer zweten, en een hogere temperatuur ook (recht evenredig):

$$\text{transpiratie} = \text{constante} \times \text{buitentemperatuur} \times \text{waterhoeveelheid}.$$

Als je een rekgrootheid die afhankelijk is van meerdere stimulerende en meerdere remmende grootheden dan ziet de algemene formule er als volgt uit:

$$\text{rekgrootheid} = \text{constante} \times \frac{\text{stimulans}_1 \times \text{stimulans}_2 \times \text{stimulans}_3 \times \dots}{\text{remmer}_1 \times \text{remmer}_2 \times \dots}$$

Ook hier moet je weer geschikte waarden voor de constanten vinden. Dat gaat net als in de paragraaf over één beïnvloedende grootheid. Je weet bijvoorbeeld inmiddels hoeveel je bij normale omstandigheden ongeveer zweet. Je kent ook de typische waarden voor de hoeveelheid water en de buitentemperatuur. Kies nu de constante zo dat de hoeveelheid zweet onder normale omstandigheden een redelijke waarde aanneemt:

$$\text{transpiratie} = \dots \times \text{buitentemperatuur} \times \text{waterhoeveelheid}.$$

19 Vul waarden of formules in voor *buitentemperatuur*, *urine*, *transpiratie*, *drinken* en *dorst*. Maak daarbij gebruik van de volgende aanwijzingen:

- Een dorstgevoel ontstaat bij een gewichtsverlies (door waterafgifte) van 1.5–2%, dus ongeveer 1050–1400 mL water. Ga er vanuit dat dorst volgens een alles-of-niets effect werkt: als de hoeveelheid water in het lichaam te laag is heb je wel dorst (waarde 1) en anders niet (waarde 0). Je kunt voor dorst dus de functie *IF* gebruiken (≡ p. 23 Overzicht functies en formules).
- Als je dorst hebt drink je één beker water. Dit kun je in het model opnemen door voor drinken de PULSEIF-functie in te vullen. Deze functie ziet er als volgt uit:

$$\text{PULSEIF}(\text{conditie}, \text{volume})$$

Als “conditie” vervuld is drink je “volume” aan water.

20 In een normale rustsituatie is het lichaam goed in staat de waterhoeveelheid constant te houden, niet alleen de eerste 150 minuten, maar ook gedurende langere tijd. Als het goed is lukt dat dankzij de ingebouwde terugkoppelingen ook in je model. Laat je model doorrekenen over een periode van enkele dagen (kies bijvoorbeeld 10000 minuten). Bekijk de hoeveelheid water met behulp van een grafiek. Verander zonodig ingevulde getallen of relatievormen totdat de waterhoeveelheid constant wordt.

21 Constant zijn op zich is niet voldoende. Als *water in lichaam* in het model constant wordt, maar op een waarde van bijvoorbeeld 30 of 80 liter, dan is dat biologisch niet acceptabel. Leg uit wat er gebeurt met bijvoorbeeld de osmotische waarde van het bloed en de bloeddruk bij te weinig of teveel water in je lichaam.

te weinig:

te veel:

- 22 In extreme situaties zouden zulke waarden bereikt kunnen worden, je raakt dan buiten bewustzijn en de marathon is voor jou voorbij. Pas het model daarom zo aan dat het stopt met rekenen als de hoeveelheid water in het lichaam een levensgevaarlijke minimale waarde bereikt (zoek die waarde op in de bijlage). Gebruik hiervoor de functie *STOPIF* (≡ p. 25 Overzicht functies en formules). Dit is de eindversie van model 2. Sla deze versie op als *water2*.
- 23 Mensen overleven in heel verschillende omstandigheden: zomer en winter, tropen of toendra, ze houden onder al die omstandigheden de hoeveelheid water in hun lichaam vrijwel constant. Onderzoek of dat ook in je model zo is:

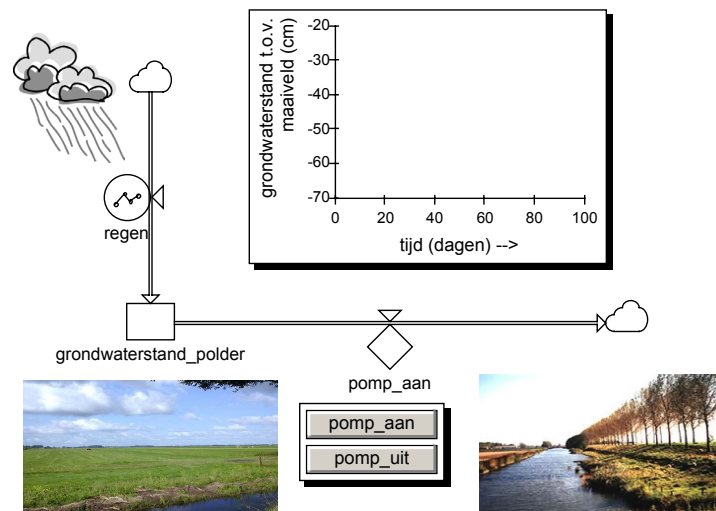
| | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Temperatuur | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| Eindhoeveelheid water | | | | | | | | | |

Water2 gaat uit van een normale situatie: door een afnemende hoeveelheid *water_in_lichaam* ontstaat dorst; zodra je dorst voelt drink je naar behoefte. Het zal blijken dat dit mechanisme niet gevoelig genoeg is voor optimale prestaties in de marathon. Bovendien is tijdens de marathon niet op ieder moment drinken beschikbaar. Er zijn dus aanvullende maatregelen nodig.

De grenzen van regeling door terugkoppeling

- 24 In het eerder aangehaalde artikel van Gerben Rodts staat verderop ook nog deze zin: “Op het moment dat je dorst krijgt, ben je al wat te laat met drinken. Probeer juist dit dorstgevoel te voorkomen!”. Dorstgevoel ontstaat bij een gewichtsverlies van 1.5–2% van het lichaamsgewicht. Leg uit waarom het niet verstandig is te wachten tot je dorst krijgt. Gebruik daarbij Figuur 2.

De regeling door terugkoppeling schiet hier dus tekort. Om preciezer te begrijpen waar het mis gaat en om te zien wat mogelijke oplossingen zijn, kijken we weer naar de polder. In de polder wordt de grondwaterstand door een beheerder van het Waterschap op een gewenst niveau (norm) gehandhaafd. De grondwaterstand kan hoger worden door regen. Als de grondwaterstand hoger wordt dan gewenst, zet de beheerder een pomp aan, waardoor het overtollige water wordt afgevoerd. Dat is dus regeling door terugkoppeling. Dit is nagebouwd in het model *polder1.sim*, waarin je zelf de rol van polderbeheerder speelt (Figuur 8).



Figuur 8 – een Powersim poldermodel

De bedoeling is, dat de grondwaterstand in de buurt van de -50 cm blijft. Wordt hij te laag, dan verdroogt het gewas en gaat het slecht met de weidevogels. Wordt hij te hoog, dan verrotten de aardappels op het veld. De beheerder heeft een peilstok om de grondwaterstand te bepalen. Hij houdt rekening met zijn metingen en met het gewenste niveau. Daarop baseert hij zijn beslissing, de pomp al of niet aan te zetten.

25 Waarmee kun je de onderdelen “regen”, “pomp” en “peilstok” vergelijken bij de regeling van de waterhoeveelheid in het lichaam? Welke verschillen zijn er?

Regen is te vergelijken met _____ Verschil met regen:

Pomp is te vergelijken met _____ Verschil met pomp:

Peilstok is te vergelijken met _____ Verschil met peilstok:

26 Laad nu *polder1.sim*¹. Laat het model doorrekenen en probeer de grondwaterstand 100 dagen lang “op peil” te houden door gedurende de looptijd op de knoppen “pomp aan” en “pomp uit” te klikken. In welke situaties lukt het je wel, de grondwaterstand op peil te houden? Wanneer lukt het niet?

Het blijkt best lastig te zijn om het waterpeil op niveau te houden als je alleen de huidige stand kent. Daarvoor zijn tenminste twee mogelijke oorzaken: 1) tegen de tijd dat je het gestegen peil op de peilstok kunt aflezen is er al heel wat water gevallen; 2) als het echt hard regent schiet de capaciteit van de pompen tekort.

¹ De modelbestanden waarnaar verwezen wordt staan op de floppy disk die bij het lesmateriaal hoort. De bestanden zijn ook te vinden op <http://www.cdbeta.uu.nl/model>

27 Wat is de overeenkomst met de problemen van de marathonloper?

Als er langdurige regen aankomt zou je eigenlijk al bij voorbaat moeten pompen, zodat je tegen de tijd dat het echt gaat regenen enige speling hebt. In werkelijkheid gebeurt dat ook: de polderbeheerder anticipeert op toekomstige regenval door de weersverwachting mee te laten wegen bij zijn beslissingen.

28 Dit is ingebouwd in *polder2.sim*. Laat dit model doorrekenen en probeer de grondwaterstand 100 dagen lang “op peil” te houden door gedurende de looptijd op de knoppen “pomp aan” en “pomp uit” te klikken. In welke situaties lukt het je wel de grondwaterstand op peil te houden? Wanneer lukt het niet?

Terug naar de marathon: bij de marathon wordt niet voortdurend gedronken, maar is er ongeveer om de 5 km een drinkpost (voor toppers ongeveer 15 minuten lopen). Daarbij wachten de lopers niet tot ze dorst hebben. Ze anticiperen op mogelijke dorst en de nadelige gevolgen daarvan. In het eerder aangehaalde artikel van Rolf Bos staat verderop: ‘Topatleten kunnen nog enigszins worden voorbereid op warme omstandigheden. Ze kunnen, zoals de Spaanse lopers doen, “trainen in drinken”. De Spanjaarden kunnen nu tijdens het lopen grote hoeveelheden vocht innemen, cruciaal voor een goed resultaat.’

29 In hoeverre komen deze maatregelen overeen met het polderbeheer?

30 Hoort dergelijk gedrag ook bij homeostase? Vind je dat dit thuishoort in een model van homeostase tijdens de marathon?

31 Om nu in de marathon ‘anticiperend’ te drinken, in plaats van op de stijgende dorst te reageren, kun je in je model de optie *PULSE* gebruiken (≡ p. 24 Overzicht functies en formules). Pas je model aan voor de marathon.

- 32** Laat je aangepaste model nu doorrekenen voor de marathon (150 minuten) bij verschillende buitentemperaturen. Lukt het om *water_in_lichaam* constant te houden op een aanvaardbaar niveau? En bij alle temperaturen? Onderzoek verschillende pulsfrequenties en -volumes voor inname van water.



Er is meer dan water

Je hebt nu een model van de waterhuishouding tijdens de marathon. Om de marathon uit te lopen moet het lichaam echter niet alleen de hoeveelheid water constant houden maar ook de zoutconcentratie, de temperatuur, etc. In dit hoofdstuk worden enkele van die processen nader uitgewerkt. Daarbij speelt water opnieuw een rol. In eerste instantie gaan we ervan uit dat de problemen met de waterhuishouding zijn opgelost en dat de hoeveelheid water dus stabiel blijft. In werkelijkheid is dat niet zo; de temperatuurhandhaving, de zoutregeling en de waterhuishouding beïnvloeden elkaar wederzijds. Hoe dat in zijn werk gaat komt echter pas in het volgende hoofdstuk aan de orde.

Zouten in het lichaam

Er is misschien de suggestie gewekt dat er sprake is van puur water in het lichaam van de mens. Niets is minder waar, in het lichaam is sprake van een *oplossing* van allerlei stoffen, zoals zouten en suikers, in water. Behalve het *volume* van water dient ook de *osmolariteit*, afhankelijk van de concentratie aan opgeloste deeltjes constant gehouden te worden. Die concentratie hangt niet alleen af van de hoeveelheid water in het lichaam, maar ook van de totale hoeveelheid opgeloste deeltjes. De belangrijkste opgeloste stof is NaCl (keukenzout).

- 33** Beschrijf wat er gebeurt met de cellen als de NaCl-concentratie, en daarmee de osmolariteit, in het bloed en het weefselvocht toeneemt.



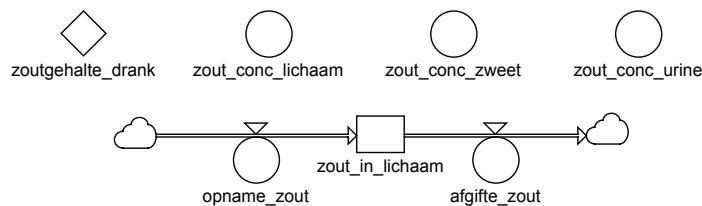
| Merksnaam | Type | Koolhydraten | Osmolariteit <i>overeenkomend met een NaCl-oplossing van</i> |
|-----------|--------------|--------------|---------------------------------------------------------------------|
| AA Drink | dorstlesser | 6.8 gram/L | 9.2 gram/L |
| Extran | dorstlesser | 8.6 gram/L | 10.5 gram/L |
| Gatorade | dorstlesser | 6.0 gram/L | 11.3 gram/L |
| Isostar | dorstlesser | 6.9 gram/L | 8.4 gram/L |
| Maxim | dorstlesser | 7.7 gram/L | 10.2 gram/L |
| AA Drink | energiedrank | 16.5 gram/L | 25.9 gram/L |
| Extran | energiedrank | 15.1 gram/L | 23.7 gram/L |
| Dextro | energiedrank | 13.0 gram/L | 36.1 gram/L |
| Born | energiedrank | 11.5 gram/L | 15.6 gram/L |
| Maxim | energiedrank | 13.3 gram/L | 18.0 gram/L |

Figuur 9- Sportdranken

- 34 De osmolariteit van de dorstlessende dranken in Figuur 9 ligt steeds dicht in de buurt van een NaCl-oplossing van 9 gram/L (= 9 mg/mL) Leg uit dat dit functioneel is.

- 35 De osmolariteit van de energiedranken in Figuur 9 ligt veel hoger. Leg uit in welke situatie zulke dranken gebruikt worden.

Om de regeling van zout op te nemen in het model moet een aantal onderdelen en relaties worden toegevoegd:



- In het lichaam is een bepaalde *hoeveelheid zout* aanwezig. Samen met de hoeveelheid water bepaalt deze de *zoutconcentratie*;
- Zoutopname tijdens de marathon vindt plaats door drinken van vloeistoffen met een bepaald *zoutgehalte*;
- Zoutafgifte vindt plaats door uitscheiding via de urine en via transpiratie
 - De *zoutconcentratie_in_urine* is vrijwel gelijk aan de zoutconcentratie in het lichaam: normaal is die 9 mg/mL lichaamsvloeistof.
 - De *zoutconcentratie in zweet* wisselt per persoon, maar is gemiddeld ongeveer de helft van die in de lichaamsvloeistof.

In de bovenstaande beschrijving van de zouthuishouding kwam je een factor tegen die je al kende uit het vorige model: de hoeveelheid water in het lichaam. Ook de processen die een rol spelen (drinken, zweten, en urinevorming) komen overeen met het vorige model. Het ligt dus voor de hand de zouthuishouding als uitbreiding aan het vorige model toe te voegen.

36 Schets het nieuwe model met de zouthuishouding en de waterhuishouding.

De volgende stap is dit model in Powersim te bouwen, alle benodigde waarden in te vullen en vervolgens te kijken of met het nieuwe model ook een stabiele zoutconcentratie kan worden bereikt. Er is alleen één probleem: als de zoutconcentratie zich niet op een aanvaardbare waarde stabiliseert, dan kan dat zowel veroorzaakt worden door problemen bij de waterhuishouding als bij de zouthuishouding. Het is daarom handig te zorgen dat de waterhoeveelheid in het lichaam tijdelijk niet verandert. Dit kun je eenvoudig bereiken door de opname en afgifte van water voorlopig ‘los te koppelen’ van de waterhoeveelheid (zie Figuur 10). Als je dat gedaan hebt kun je drinken wat je wilt, dat heeft voorlopig geen effect op *water_in_lichaam* (idem voor zweet en urine). Tegen de tijd dat het model voor de zouthuishouding naar behoren functioneert kun je dan de opname en afgifte van water weer koppelen met *water_in_lichaam*, om te zien hoe beide processen op elkaar inwerken.



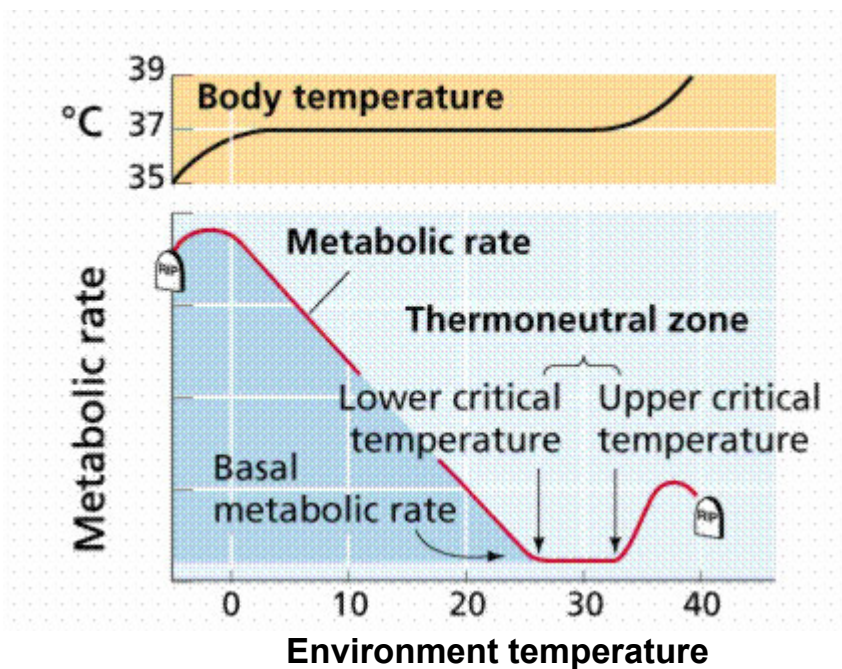
Figuur 10 – Het loskoppelen van de in- en uitstroom van water (links vóór het loskoppelen, rechts ná het loskoppelen).

- 37** Bouw het model in Powersim en vul waarden en formules in. Onderzoek of de zoutconcentratie constant blijft als je het model laat doorrekenen bij een buitentemperatuur van 15 graden. Leg uit dat er problemen ontstaan als de buitentemperatuur te ver stijgt.

- 38** In model 3 hebben we *water_in_het_lichaam* constant gehouden. Nu ga je in model 4 water en zout allebei laten variëren. Koppel de opname en afgifte van water weer aan de waterhoeveelheid. Laat het model doorrekenen en onderzoek of zowel *water_in_het_lichaam* als *zoutconc_lichaam* constant gehouden kunnen worden en zo ja, tot welke buitentemperatuur dat lukt. Sla je model op.

Lichaamstemperatuur en water

In het menselijk lichaam hangt de waterhuishouding ook samen met de lichaamstemperatuur. Immers, via verdamping van zweet hebben we een mogelijkheid, warmte te verliezen als de lichaamstemperatuur dreigt te stijgen. Afgifte van zweet blijkt zelfs geheel in dienst te staan van de temperatuurregeling en niet van de regeling van de hoeveelheid water. En die temperatuurregeling is heel belangrijk (zie Figuur 11).



Figuur 11 – De relatie tussen de stofwisselingsnelheid (metabolic rate), de temperatuur van de omgeving en de temperatuur in het lichaam bij een muis

39 Waarom zouden in Figuur 11 gegevens van een muis gebruikt zijn en niet van een mens? Noem twee verschillen die je zou zien in de grafiek als dit onderzoek met mensen gedaan zou worden.

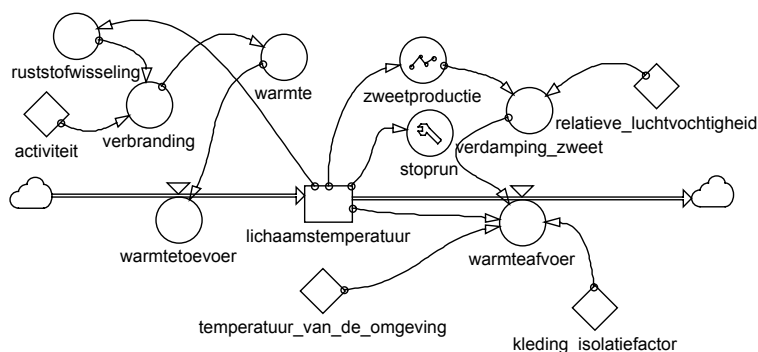
40 Waarom wordt het gebied tussen 25 en 33°C de thermoneutrale zone genoemd?

41 De stofwisselingsnelheid neemt toe als de omgevingstemperatuur onder de 25°C zakt, of als de temperatuur stijgt boven de 33°C. Leg uit welke functie dit heeft.

42 Verklaar het intreden van de dood bij onderkoeling en oververhitting.

Ook van het handhaven van de lichaamstemperatuur bij de mens kunnen we een model maken. Zo'n model is nogal ingewikkeld. Het lichaam produceert warmte en staat warmte af. Bij de warmteproductie speelt de verbranding in de cellen een belangrijke rol. Die verbranding hangt af van je activiteit. Maar ook als je helemaal 'niets doet' is er verbranding: je hart klopt, je ademhaling gaat door, enzovoorts.

Bij warmteafgifte is zweetproductie heel belangrijk. Die heeft vooral te maken met de buitentemperatuur. Maar pas als zweet verdampt, kun je warmte afgeven. Dus moeten in het model ook de relatieve luchtvochtigheid (hoeveelheid waterdamp in de lucht / maximale hoeveelheid waterdamp in de lucht) en het type kleding (hoe isolerend werkt die kleding?) worden opgenomen. We gaan een model bestuderen waarin met al deze zaken rekening is gehouden.



Figuur 12 — een Powersimmodel van temperatuurregeling

43 In Figuur 12 staat een afbeelding van *thermo1.sim*. Laad dit model. Bij verbranding zie je warmte ontstaan. Bij verbranding ontstaan ook twee stoffen. Welke? En waarom zijn die niet in het model opgenomen?

44 Wat wordt bedoeld met ruststofwisseling?

45 In het model staat de relatieve luchtvochtigheid ingesteld op 50%. Relatieve luchtvochtigheid kan waarden aannemen van 0–100%. Wat houdt een relatieve luchtvochtigheid van 0% in en wat een relatieve luchtvochtigheid van 100%?

46 Bekijk de formule waarmee *verdamping_zweet* wordt berekend. Leg die formule uit.

47 Bekijk de grafiek die het verband tussen *zweetproductie* en *temperatuur_in_het_lichaam* aangeeft. Verklaar de vorm van de kromme.

48 Zoals je ziet, wordt warmteafvoer van het lichaam niet alleen bepaald door *verdamping_zweet*. Ook een ander proces speelt een rol. Dit proces kan afgeremd worden door bepaalde types kleding. Welk proces wordt hier bedoeld? Noem een type kleding waarbij de isolatiefactor vrijwel 1 is en een type met een veel hogere isolatiefactor.

Proces:

Kleding met factor 1:

Kleding met hogere factor:

49 Kijk in de formule voor warmteafvoer. Kan het lichaam nog wel warmte afvoeren als de omgevingstemperatuur hoger of gelijk is aan de lichaamstemperatuur, zo ja, hoe?

50 Laat het model nu doorrekenen. Blijft *de temperatuur_in_het_lichaam* constant en in de buurt van 37°C?

- 51 Varieer nu achtereenvolgens de temperatuur van de omgeving, de relatieve luchtvochtigheid en de kleding-isolatiefactor. Noteer wat de veranderingen voor invloed hebben op de temperatuur in het lichaam.

temperatuur van de omgeving:

relatieve luchtvochtigheid:

kleding-isolatiefactor:



Figuur 13 – soms is de relatieve luchtvochtigheid erg hoog

- 52 Nu gaan we dit model toepassen op de marathon. Bij toplopers is de activiteit tijdens de marathon $20 \times$ zo hoog is als in rust. Onderzoek systematisch in hoeverre kleding, buitentemperatuur en relatieve vochtigheid invloed hebben op de lichaamstemperatuur. Als de lichaamstemperatuur gaat afwijken van de optimale temperatuur van ongeveer 37°C , daalt de prestatie van de looper. Zie de bijlage voor effecten van onderkoeling en oververhitting.

Invloed kleding:

Invloed buitentemperatuur:

Invloed relatieve vochtigheid:

53 Lees de onderstaande tekst.

Een marathonloopster in de problemen



5 augustus 1984. Olympische marathon in Los Angeles. Extreme hitte. De Zwitserse Gabriele Andersen-Schiess zwalkt het Olympisch Stadion binnen. De laatste paar honderd meter zijn een martelgang. Gabriele haalt volkomen gedesoriënteerd de eindstreep, ze wordt onmiddellijk per brancard afgevoerd.

Bewerkt naar *Runners, Maandblad voor de Loopsport*, oktober, 1984

54 Laat met behulp van het model zien wat er met Gabriele gebeurd is. Leg uit.

A large, empty rectangular box with a thin grey border, intended for a student to draw a model explaining the runner's condition.

Synthese

We hebben nu drie belangrijke factoren in het lichaam van de mens (water, zoutconcentratie en lichaamstemperatuur) met behulp van modellen bestudeerd. Om de marathon succesvol uit te lopen moet je alle drie de factoren tegelijkertijd in de gaten houden. Omdat de factoren elkaar onderling beïnvloeden moet een betrouwbaar model met alledrie deze factoren tegelijk rekening houden.

55 Leg uit hoe de drie factoren elkaar beïnvloeden.

Water beïnvloedt zoutconcentratie door:

Lichaamstemperatuur beïnvloedt water door:

Lichaamstemperatuur beïnvloedt zoutconcentratie door:

56 Probeer nu het model over de water- en zoutregeling (zout.sim) te koppelen aan het model van de temperatuurregeling (thermo1.sim). Bedenk eerst via welke grootheid de koppeling moet worden gemaakt.

57 Onderzoek na de koppeling binnen welke grenzen je de uitwendige factoren moet houden om het lichaam in staat te stellen water, zoutconcentratie en temperatuur op niveau te houden. Sla dit eindmodel op als totaal.sim.

58 Test nu dit eindmodel voor de marathonsituatie. De loper heeft dus weer een $20 \times$ zo hoge activiteit als in rust en drinkt om de 15 minuten (*PULSE-functie*). Onderzoek verschillende waarden voor relatieve vochtigheid en temperatuur van de omgeving. Zet je resultaten in een tabel, waarbij je aangeeft wat er met de drie grootheden *water_in_het_lichaam*, *zoutconcentratie* en *temperatuur_in_lichaam* in de verschillende situaties gebeurt na 150 minuten. Trek conclusies over de optimale combinatie van factoren voor het leveren van een topprestatie bij de marathon. Bedenk daarbij welke waarden de drie grootheden dan moeten bereiken en handhaven.

| rel. vochtigheid | temp. omgeving | water in lichaam | zoutconc. | temp. lichaam |
|------------------|----------------|------------------|-----------|---------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Conclusie:

59 Bij de marathon doet zich soms een merkwaardig probleem voor met verschijnselen die lijken op die van uitdroging. De looper is duizelig, misselijk en verward en geeft soms over. Het probleem ontstaat als het warm weer is en de looper heel veel zweet. Als hij nu veel water drinkt om uitdroging te voorkomen en geen sportdrank waarin allerlei suikers en zouten zijn opgelost gebruikt kan hyponatriëmie (zouttekort) ontstaan. Dit kan zelfs levensbedreigend worden. Laat met behulp van het eindmodel zien wat er fout gaat in deze situatie.

60 Bij warm weer worden soms bij de marathon meer drinkposten ingezet. Onderzoek of een verdubbeling van drinkposten bij een temperatuur van 30⁰ C graden ervoor zorgt dat de prestatie op hoog niveau kan blijven.

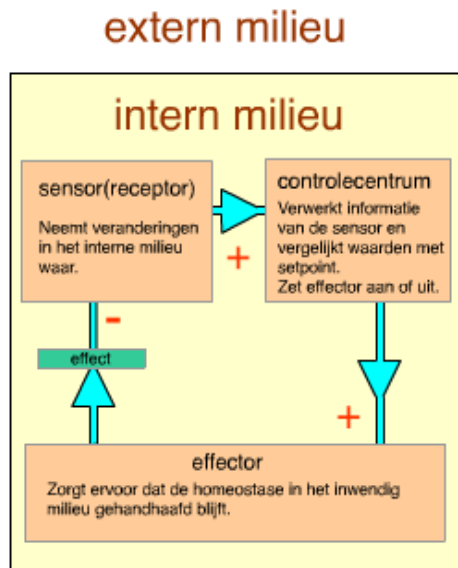
- 61** Hebben we nu een model dat betrouwbare voorspellingen kan doen over prestaties bij de marathon? Geef aan waar, naar jouw mening, nog verbeteringen in het model kunnen worden aangebracht. Noem een mogelijk nadeel van het aanbrengen van zulke verbeteringen.

Verbeteringen:

Nadeel:

Modellen, machines en mensen: verschillen en overeenkomsten

Aan het eind van deze module staan we even stil bij de waarde van onze modellen in vergelijking met andere modellen en met het menselijk lichaam zelf.



Figuur 14 - een homeostasemodel uit een biologieboek

62 In Figuur 14 zie je een model uit een biologieboek. Noteer de overeenkomsten en verschillen tussen dit model en de Powersimmodellen die je in dit lesmateriaal hebt gebruikt.

63 Waar komen metingen, gewenste niveau en waarschuwingen samen in het lichaam? Komt alle informatie daar bij elkaar?

64 In het watermodel heb jij het gewenste niveau vastgelegd. Bovendien heb je aangegeven welke afwijkingen nog getolereerd worden. Geef aan hoe je dat hebt

vastgelegd in je model. Is er in werkelijkheid ook sprake van het vastleggen van een gewenst niveau en van getolereerde afwijkingen? Zo ja, hoe?



- 65 We hebben in onze modellen gebruik gemaakt van bepaalde constant te houden waarden, bijvoorbeeld 42 liter water, 37°C als lichaamstemperatuur. Gelden die waarden voor iedereen, in elke cel en op elk moment van zijn of haar leven? Leg je antwoord uit.



Figuur 15 – René Descartes (1596-1650)



Figuur 16 – Johann Wolfgang van Goethe (1749-1832)

- 66 De Franse filosoof René Descartes (Figuur 15) zag een lichaam als een zeer ingewikkelde machine, die je zou kunnen begrijpen door alle onderdelen precies te beschrijven. Daarmee legde hij, zou je kunnen zeggen, de grondslag voor wat wij in deze lessenserie hebben gedaan: het lichaam in modelvorm nabouwen. Vind je dat Descartes' idee in principe klopt of vind je, net als de Duitse romanticus Johann Wolfgang von Goethe (Figuur 16), dat je een organisme alleen kunt begrijpen door het als geheel te bekijken? Geef argumenten voor je standpunt.

67 Geef commentaar op de volgende stellingen:

- I Een grote polder is toch wel veel ingewikkelder dan één zo'n menselijk lichaam.
- II De stethoscoop van een arts is niet veel meer dan de peilstok van een polderbeheerder.
- III Een machine kan zich veel minder precies aanpassen dan een menselijk lichaam.
- IV Een machine is veel beter te modelleren dan een menselijk lichaam.
- V Polderbeheer is heel wat overzichtelijker dan homeostase.

Keuzestof

Er zijn natuurlijk veel mogelijkheden om verder op dit onderwerp in te gaan. Je kunt bijvoorbeeld proberen een situatie uit de praktijk in het model te testen of het model verder uit te bouwen. Je kunt kiezen uit de volgende mogelijkheden.

1 Lees het volgende fragment.

Een zweetprobleem

Er wordt in Nederland flink gezweet met het mooie augustusweer. Daling van de temperatuur lost dit probleem voor de meesten onder ons op. Voor een aantal mensen heeft dat helaas weinig effect. Zij hebben last van hyperhidrosis ofwel overmatig vochtverlies in de oksels, aan de handen en voeten. Een kwaal die niet te genezen is en waarvoor de bestaande behandelmethoden matig succes opleveren. Wel is er uitzicht op een nieuw medicijn: de anti-zweetprik.

Bij hyperhidrosis is er sprake van een verstoorde wisselwerking tussen de zenuwen en de zweetklieren. Er zijn twee soorten zweetklieren, apocriene (waar de bekende zweetgeur vandaan komt) en eccriene. De eccriene klieren krijgen bij stijging van de lichaamstemperatuur signalen van de zenuwen om transpiratievocht af te scheiden. Als de lichaamstemperatuur is hersteld, stopt dit proces. Bij hyperhidrosis gebeurt dit niet. (...) Een betrekkelijk nieuw medicijn is botuline-toxine (botox). Dit botulinegif heeft een spierverlammende werking en wordt onder meer gebruikt tegen spasticiteit en rimpels. Botox wordt op de zweetplek geïnjecteerd. Het blokkeert de prikkeloverdracht van de zenuwen naar de zweetklieren, waardoor de patiënt minder gaat zweten.



Uit “Een prik tegen zweet” van Vera Ros in *De Volkskrant*, 25 augustus 2001

- a Welk onderdeel moet je in het model veranderen bij een persoon met hyperhidrosis? Laat het model nu doorrekenen.
 - b Pas nu het door jou veranderde model verder aan om te laten zien wat er gebeurt als iemand op een groot aantal plaatsen in zijn huid botox-injecties zou krijgen. Laat het model weer doorrekenen.
- 2 Test het eindmodel uit in een situatie, waarbij de te handhaven waarden van water, zout en temperatuur alle drie zeer ernstig verstoord dreigen te worden. Het volgende fragment geeft een suggestie.

Verdwaald in de woestijn

In april 1994 werd in het zuidoosten van Marokko de *Marathon des Sables* gehouden. Hierbij wordt in zes dagelijkse etappes hardgelopen over een totale afstand van 200 km in een kurkdroog woestijngebied bij temperaturen tussen 35 en 45⁰ C. Een van de deelnemers was de Italiaan Mauro Prosperi. Op de vierde dag van deze tocht kwam hij bij M’Hamid, op 8 km voor een verversingspost, in een verblindende zandstorm terecht en verdwaalde. Water had hij nauwelijks meer, omdat hij vrijwel alles had opgedronken in de overtuiging vlak bij de verversingspost te zijn, toen de storm opstak. Het bodempje van drie centimeter in zijn drinkfles was net genoeg om nog een dag zijn lippen vochtig te houden. Ook voedsel had hij niet meer. Hij dacht na over de beste strategie om in leven te blijven. Hij dronk zijn eigen urine, zocht naar

planten en liep alleen 's nachts. Na negen dagen werd hij gevonden door Berbers.

Bewerkt naar "De dood verslaan" door Jan van der Putten, in het tijdschrift *Runners*

- a Bouw de gegevens die je hier leest in het model en kijk hoe lang het duurt totdat er problemen ontstaan (pas de tijdschaal aan).
- b Lees onderstaande tekst.

Schipbreuk in de VOC -tijd

Het volk begon al zout water te drinken, tegen mijn waarschuwing aan. Ik zeide tegen haar (*hen*): "Mannen, en drinkt geen zout water; gij zult de loop (*diarree*) daarvan krijgen en daaraf (*daaraan*) sterven."

Bewerkt naar *Journalen van de Gedenckwaerdige Reijzen* van Willem IJsbrantz. Bontekoe uit de 17^e eeuw

Onderzoek met het eindmodel of de bewering van de ik-figuur klopt. Bedenk welke veranderingen je moet aanbrengen om deze situatie te simuleren. De mannen hadden schipbreuk geleden en zaten in een sloep op volle zee. Er was geen drinkwater en het voedsel van de mannen bestond uit droge scheepsbeschuit.

- 3 Lees het onderstaande fragment. Neem de factoren bedekkingsgraad en natte-boltemperatuur op in het model en onderzoek of de ontdekkingen van Trapasso en Cooper in het model bevestigd worden.

Het belang van de natte-bol-temperatuur

Marathonlopers en hun coaches gaan er gewoonlijk van uit dat temperatuur en relatieve vochtigheid de prestaties in belangrijke mate beïnvloeden. Andere weerelementen, zoals zonneshijn en de zogeheten natte-boltemperatuur, blijken echter veel bepalender. Dat schrijven L.M. Trapasso en J.D. Cooper van de universiteit van Kentucky in het *International Journal of Biometeorology*.

De temperaturen varieerden bij dertig door hen bestudeerde marathons in Boston van nog geen 3 tot ruim 21 graden Celsius; de relatieve vochtigheid liep uiteen van 17 (extreem droog) tot 100 procent (zeer vochtig). Ze bekeken echter ook andere weerelementen, zoals bedekkingsgraad, neerslag en natte-boltemperatuur.

Bij veel zon wordt extra stralingswarmte ontvangen, wat het moeilijker maakt om het lichaam op temperatuur te houden.

De natte-boltemperatuur is de temperatuur die de thermometer na enige tijd aanwijst als er om het kwikreservoir een natte lap is gewikkeld. De natte-boltemperatuur is meestal lager dan de 'gewone' temperatuur; gelijke waarden voor de beide temperaturen treden op bij een relatieve vochtigheid van 100 procent. Hoe groter het verschil tussen temperatuur en natte-boltemperatuur, des te lager is de relatieve vochtigheid van de lucht. Kennelijk gedraagt een bezweet lichaam of een lichaam in door zweet of lichte regen nat geworden kleren zich net zo als een met een natte lap omwikkelde thermometer; De natte-boltemperatuur bleek namelijk een hoge voorspellende waarde te hebben.

In het onderzoek werden alleen de prestaties van de nummers 1, 2 en 3 betrokken. Daarbij werden drie groepen onderscheiden: snelle tijden, normale tijden en trage tijden. De laatste groep bevat 24 gevallen, waarin de tijd meer dan 4.5 minuut boven het op dat moment bestaande record lag. Het aantal snelle tijden bedroeg 31. Zowel de temperatuur als de relatieve vochtigheid vertoont daarbij een grote spreiding, respectievelijk van 3 tot 18 graden en van 17 tot 93 procent, maar de natte-boltemperatuur bedroeg steeds 7,8 graad of minder.

Verder was het in 24 van de 30 gevallen geheel bewolkt; in de zes overblijvende gevallen was de lucht ondanks de bewolking extreem droog met een relatieve vochtigheid van 28 procent of minder. Wat lichte regen vormt kennelijk geen bezwaar; die trad in meer dan de helft van de

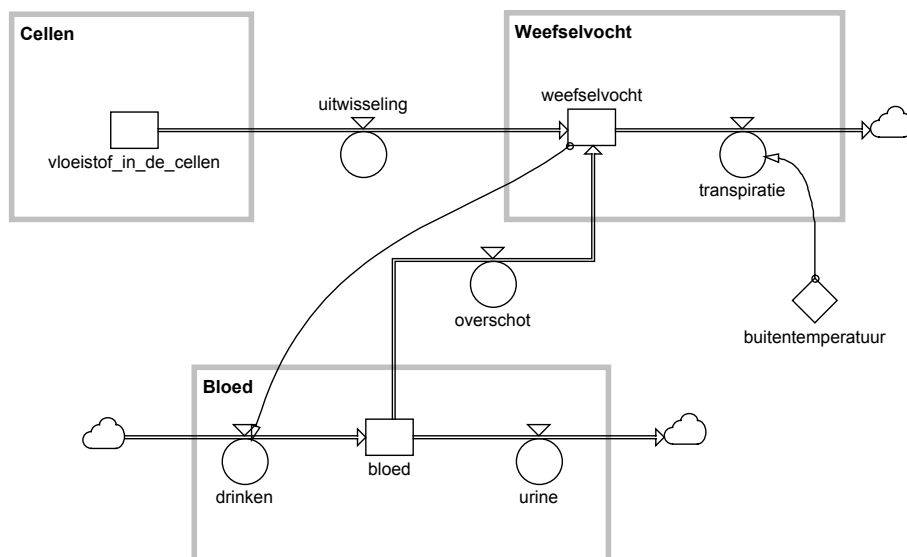
gevallen op. Kennelijk weegt het voordeel van betere warmteafvoer ruimschoots op tegen de hinder die van natte kleding en schoeisel wordt ondervonden.

Vergelijken we de weergegevens van de snelle tijden met die van prestaties beneden de maat, dan blijken temperatuur en relatieve vochtigheid ook daar sterk uiteen te lopen. In 22 van de 24 gevallen was de natte-boltemperatuur echter 7,8 graad of hoger. Negentien keer was de bedekkingsgraad 50 procent of minder. In de vijf resterende gevallen was het weliswaar geheel bewolkt, maar de natte-boltemperatuur had extreem hoge waarden. Lichte regen kwam niet voor tijdens de trage marathons; wel viel er tweemaal meer dan 13 millimeter tijdens de race.

Hoewel deze gegevens al duidelijk in een bepaalde richting wijzen, voerden Trapasso en Cooper er nog een statistische analyse op uit, die hun vermoeden bevestigde. Met de natte-boltemperatuur liggen de tijden van de marathon al voor bijna 55 procent vast; weet men tevens de bedekkingsgraad dan kunnen de prestaties voor bijna 70 procent geduid worden. Relatieve vochtigheid maar vooral neerslag en temperatuur voegen daaraan nog maar weinig toe.

Bewerkt naar een artikel van Kees Floor in *De Volkskrant*

- 4 Als we de lichaamsvloeistof verdelen in drie afdelingen: celvloeistof, weefselvocht en bloed, kunnen we een model maken met drie cellen (zie Figuur 17).



Figuur 17 – drie afdelingen met vloeistof in het lichaam van de mens.

Zoek in de bijlage de verdeling van de vloeistof op. Ga van de volgende veronderstellingen uit:

- *Bloed* neemt water op door drinken en staat water af door urine en door een eventueel overschot aan bloed (bloed - normale waarde bloed).
- *Weefselvocht* neemt water op door een overschot aan bloed of aan celvloeistof (celvloeistof – normale waarde celvloeistof) en staat water af door transpiratie en een eventueel overschot aan weefselvocht (weefselvocht – normale waarde weefselvocht); als er een tekort is, stijgt de behoefte aan drinken.
- *Vloeistof_in_de_cellen* neemt water op door een eventueel overschot aan weefselvloeistof en geeft water af via een eventueel overschot aan celvloeistof (celvloeistof – normale waarde celvloeistof).

Bouw het model en onderzoek of de hoeveelheden water in de drie afdelingen constant blijven bij verschillende buitentemperaturen.

Bijlage: Water en zout in cijfers

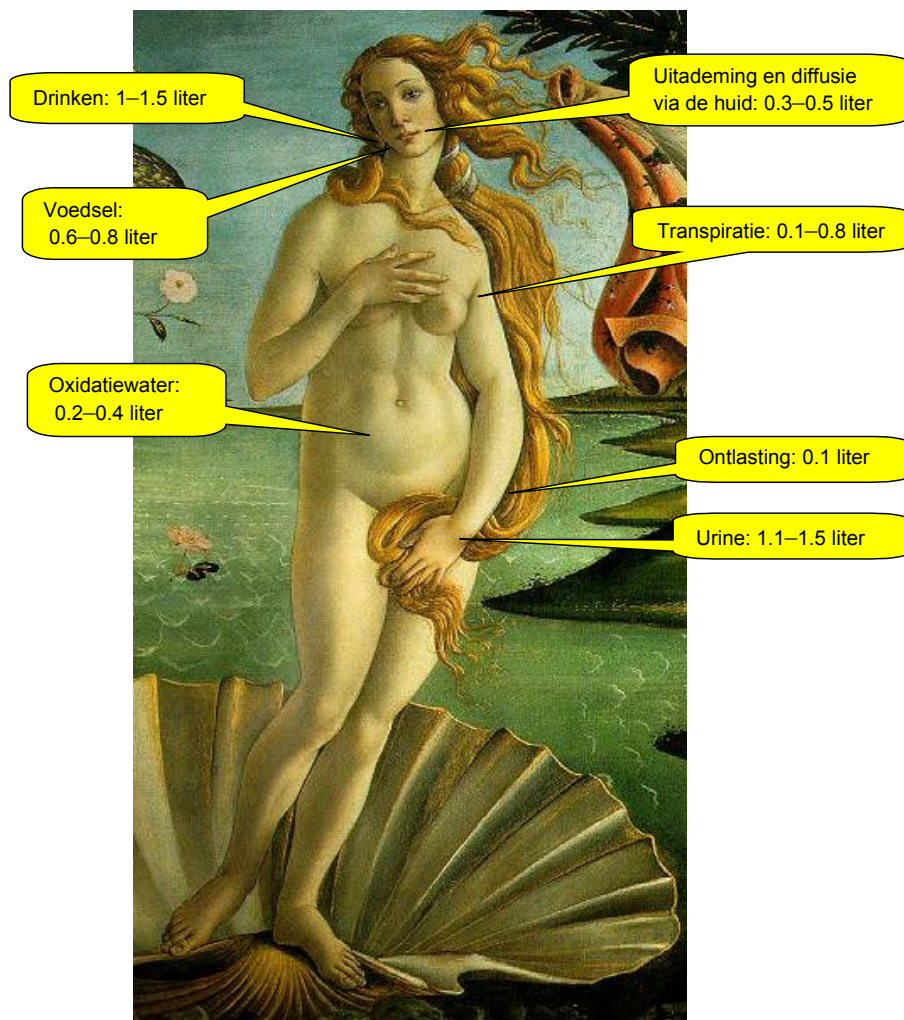
Typische waarden

Het lichaam van een mens van 70 kg bestaat voor ongeveer uit 60% water, hetgeen dus overeenkomt met 42 liter.

Die 42 liter is als volgt verdeeld:

- 26,5 liter in de cellen;
- 12,6 liter in weefselvocht en lymfe
- 2,9 liter in bloed

Onder normale omstandigheden wordt door een mens elke dag ongeveer 1,5–2 liter water opgenomen en afgestaan. In Figuur 18 vind je welke waarden de verschillende opname - en verliesposten (in liter/dag) onder normale omstandigheden aannemen.



Figuur 18 – de waarden voor de verschillende hoeveelheden opgenomen en afgegeven water (liter/dag) — fragment uit 'De geboorte van Venus' van Sandro Boticelli

De zoutconcentratie in het lichaam van de mens is ongeveer 9 gram per liter. Als iemand vocht krijgt toegediend via een infuus, gebruikt men vaak een zoutoplossing van die concentratie (fysiologische zoutoplossing).

Bijzondere omstandigheden

- Mensen eten te veel zout:

Mythes over zout zijn talrijk. Zo is er het niet weg te branden verhaal dat keukenzout nóóit als nieuw voedingsmiddel zou worden toegelaten op de westerse markt, omdat het te sterk verslavend is en bij langdurig gebruik aantoonbare risico's heeft voor de gezondheid. Welnu, dat verhaal is waar, meldt Sijmons op het gezag van voedingsexperts van de Universiteit Wageningen. Zout is gevaarlijk spul. Meer dan 9 gram keukenzout heeft een mens per dag niet nodig. Dat is minder dan twee theelepeltjes en de meeste mensen eten méér, vooral de snackers onder ons.

Uit een recensie van "Etenschap" van Rob Sijmons, door Jeroen Trommelen. *De Volkskrant*, 6 oktober 2001

- Als de omstandigheden veranderen, heeft dat grote gevolgen. Zo kan iemand in de tropen op één dag wel 8–10 liter zweet op een dag verliezen. Tijdens de beklimming van een redelijk hoge berg kan een fietser of bergbeklimmer wel 4–5 liter vocht per dag verliezen.
- Niet elke vochtopname is even geschikt om de hoeveelheid water aan te vullen. Zo zijn koffie en bier vochtafdrijvend. Zeer sterk vochtafdrijvend is zeewater. Het drinken van een liter leidt tot afgifte van 1,35 liter urine.
- Gevolgen van oververhitting en onderkoeling:

Bij een stijging van de lichaamstemperatuur boven 38°C gaat het prestatievermogen met 2% omlaag. Dat effect neemt bij verdere verhoging toe. Boven de 40°C wordt de grens tussen "koortsachtige inspanning" en "warmtestuwing" overschreden. Er ontstaan stuip trekkingen, bij 42°C worden allerlei enzymen vernietigd en treedt vrij snel de dood in.

Bij afkoeling leidt een daling tot 35°C tot extreem rillen en gebrek aan coördinatie. Bij elke halve graad verdere daling zakt de stofwisseling (en dus het prestatieniveau) 3–5%. Bij 33°C treedt apathie op, bij 32°C bewusteloosheid en bij 24°C treedt gewoonlijk de dood in.

Bewerkt naar "Heet aanvoelen: warmtestuwing" en "Wie bevriest, herinnert zich de sneeuw: onderkoeling" in het boek *De laatste adem* van Peter Stark, een verhalenbundel met belevenissen in extreme situaties)

- Gevolgen van waterverlies:
 - 2 % verlies van lichaamsgewicht door waterafgifte zorgt al voor negatieve effecten op fysieke en mentale prestaties: een atleet presteert ongeveer 20% minder.
 - 10 % verlies leidt tot ernstige stoornissen.
 - 20 % verlies leidt tot de dood.
- Aanvullende informatie over de waterhuishouding en homeostase in het menselijk lichaam kun je vinden op de volgende websites:
 - <http://www.bioplek.org/animaties/homeostase/homeostasestart.html>
 - <http://www.physique.nl/bergsport.htm>
 - <http://www.nicevzw.be/html/NUTRINEWSONLINE/NNwaterART.htm>
 - http://www.stst.nl/gezond_drinken.htm#Dorst
 - http://gin.uibk.ac.at/gin/freihhtml/trinken_im_sport.htm