

---

## Boeken

---

### **Groundwater Level Fluctuations**

door Hans Gehrels; proefschrift, Vrije Universiteit Amsterdam, 270 pag, 1999, ISBN 90-75739-04-4

Op 3 juni promoveerde Johannes Christiaan Gehrels aan de Vrije Universiteit te Amsterdam op een proefschrift waarvan de titel al bijna een samenvatting is: *Groundwater Level Fluctuations: Separation of natural from anthropogenic influences and determination of groundwater recharge in the Veluwe area, the Netherlands*. Het gaat dus feitelijk om twee verschillende studies: enerzijds het ontrafelen van natuurlijke en kunstmatige oorzaken van grondwaterstandsfluctuaties van een groot grondwatersysteem en anderzijds een onderzoek naar de aanvulling van het grondwater, dat op enkele locaties is uitgevoerd. Hans Gehrels doet in zijn proefschrift een manmoedige poging om ze te integreren, maar het lijkt me binnen de beperkte ruimte van een boekbespreking het beste om ze na elkaar te behandelen. Uiteraard begint het proefschrift met een beschrijving van de Veluwe, maar voor de lezers van Stromingen kan ik die wel overslaan.

*I Het scheiden van natuurlijke en kunstmatige oorzaken van grondwaterstandsfluctuaties*

Voor dit doel is de Veluwe een uitstekend onderwerp van studie: door het zeer lange geheugen van het grondwatersysteem is de huidige grondwaterstand het resultaat van natuurlijke en kunstmatige invloeden van de afgelopen tientallen jaren. De kunstmatige ingrepen zijn niet gering: behalve door grondwaterwinning en cultuurtechnische maatregelen is het grondwatersysteem van de Veluwe beïnvloed door de grootste hydrologische ingreep uit de Nederlandse geschiedenis: de inpoldering van delen van het IJsselmeer. Om het verloop van de grondwaterstand te analyseren maakt Gehrels gebruik van drie verschillende technieken: (1) tijdreeksanalyse, (2) eendimensionale modellering van het bodemvocht en (3) driedimensionale numerieke grondwatermodellering. Alle drie de methoden worden in de praktijk veel gebruikt. Op het eerste gezicht verschillen ze sterk, en het is dan ook interessant om ze naast elkaar toegepast te zien om dezelfde vraag te beantwoorden: welk deel van de fluctuaties van de grondwaterstand is toe te schrijven aan natuurlijke variaties, en welk deel is door de mens veroorzaakt? Of eigenlijk: hoe geschikt zijn de verschillende methodes om zo'n vraag te beantwoorden? (Het is tenslotte een academisch proefschrift; de methode is belangrijker dan de uitkomst).

#### (1) TIJDREEKSANALYSE

De *tijdreeksanalyse* is uitgevoerd met *transfer-ruis-modellering* volgens Box en

Jenkins. Deze methode is louter data-georiënteerd, dat wil zeggen: hij legt een verband tussen twee of meer gemeten tijdreeksen die op één of andere manier met elkaar te maken hebben, zonder een poging te doen om dat verband nader te verklaren. Hij wordt daarom wel getypeerd als *black-box*-methode, en Gehrels volgt die opvatting. Je kunt daar heel anders tegenaan kijken, maar ik neem Gehrels zijn standpunt niet kwalijk, want hij had andere zaken aan zijn hoofd.

Gehrels neemt drie mogelijke invoerreeksen in beschouwing: het verloop van de grondwateraanvulling, de geschiedenis van de drooglegging van het IJsselmeer en het verloop van de grondwaterwinning. Enkele tientallen tijdreeksen afkomstig van waarnemingsbuizen die verspreid staan over de Veluwe modelleert hij eerst met de grondwateraanvulling als enige invoerreeks. Natuurlijk mag men dan in het algemeen niet verwachten dat de *residueeks* (verschil tussen gemeten en berekende grondwaterstandsreeks) opgevat kan worden als het resultaat van een witte-ruis-proces. Deze aanpak druist daarom in tegen het uitgangspunt van transfer-ruis-modellering, maar Gehrels gebruikt de residueeks juist om erachter te komen of er nog andere invloeden dan de natuurlijke grondwateraanvulling een rol spelen. Of het theoretisch helemaal in de haak is overzie ik niet, maar het is intuïtief wel aantrekkelijk en het werkt ook. In een aantal gevallen althans is aan de residueeksen feilloos te zien wanneer de IJsselmeerpolders droogvielen. In zulke gevallen modelleert Gehrels de reeksen opnieuw met twee invoerreeksen, om de invloed van de droogmakerijen op de grondwaterstand nauwkeuriger vast te stellen. Het komt vast niet als een verrassing dat de invloed van de droogmakerijen blijkt af te nemen naarmate de geanalyseerde buis verder van de randmeren af ligt, maar het is geruststellend om te zien dat theoretische uitkomsten niet strijdig zijn met het

gezonde verstand. De vastgestelde verlagingen verlopen van ca 1 meter aan de noordrand van de Veluwe tot ca 35 cm op een afstand van 14 km naar het zuidoosten. Om de uitkomsten nog plausibeler te maken worden ze vergeleken met een simplistisch analytisch model van de Veluwe, namelijk een variant op een bekende formule uit het proefschrift van Edelman. Daar houd ik van. Op deze manier kun je immers aan de resultaten van een tijdreeksanalyse een fysische interpretatie geven. Gehrels laat het laatste achterwege, maar ik wil niet suggereren dat hij daarmee een kans laat liggen, want zijn proefschrift is zo al dik en interessant genoeg. Gehrels ziet als belangrijkste voordeel van een analytische formule dat de resultaten van de tijdreeksanalyse ermee geëxtrapoleerd kunnen worden naar punten waar geen peilbuizen stonden.

De grondwaterwinning wordt op eenzelfde manier behandeld als de droogmakerijen; modellen met drie invoerreeksen worden overbodig geacht. De verlaging van de grondwaterstand door grondwaterwinning wordt geschat op 10 tot 40 cm, behalve nabij pompstations, waar hij groter is.

De invloed van de natuurlijke grondwateraanvulling op de grondwaterstand kon in het algemeen bevredigend gemodelleerd worden, behalve in het centrale deel van de Veluwe, waar de onverzadigde zone meer dan 15 meter dik is. De manier waarop de grondwateraanvulling uit neerslag- en verdampingsgegevens werd afgeleid is voor deze omstandigheden waarschijnlijk te simplistisch. Gehrels beveelt aan om voor dit soort gebieden een gedetailleerder model voor de onverzadigde zone te gebruiken. Misschien is het zelfs nodig om in een heuvelachtig gebied ook een verzadigde zone-model te hulp te roepen, omdat het ongelijktijdig arriveren van regenbuien bij de grondwaterspiegel tot horizontale verzadigde stroming kan leiden, die natuurlijk ook weer invloed heeft op het verloop van de

grondwaterstand. Die aanbevelingen (die in het vervolg van het onderzoek uitgewerkt worden) lijken me wel logisch, maar de methode van tijdreeksanalyse verliest daarmee veel van zijn élegance, die toch vooral in zijn eenvoud schuilt.

## (2) 1D-MODELLERING VAN EEN DIKKE ONVERZADIGDE ZONE

Het doel van het modelleren van de onverzadigde zone is: de gegeven tijdreeksen voor neerslag en verdamping om te werken in een realistische tijdreeks voor de aanvulling van het grondwater. Een grondwateraanvullingsreeks alleen is natuurlijk niet toereikend om het verloop van de grondwaterstand te simuleren. Daarvoor is tevens een model van de verzadigde zone nodig. Gehrels kiest voor het laatste een heel eenvoudig model, bestaande uit een drainageweerstand, op grond waarvan er water wegzijgt in afhankelijkheid van de hoogte van de grondwaterspiegel ten opzichte van één of andere drainagebasis. Verder benut hij de gelegenheid om niet één, maar twee verschillende modellen voor de onverzadigde zone te testen: een relatief eenvoudig model en een meer ingewikkeld. Het ingewikkelde model is het hier te lande welbekende SWAP (Soil Water Atmosphere Plant). Het eenvoudige model, EARTH, is door Gehrels zelf ontwikkeld. Het verschil tussen beide zit vooral in het gedeelte dat het transport in de onverzadigde zone beschrijft. SWAP lost de vergelijking van Richards numeriek op, wat een hele heisa is, terwijl EARTH een eenvoudige transferfunctie gebruikt die is afgeleid uit een gelineariseerde vorm van de vergelijking van Richards. Deze aanpak is al eens eerder toegepast door Marette Zwamborn. Hij spreekt me wel aan, omdat in dit soort gebieden het vochtgehalte van de onverzadigde zone (in het traject beneden de wortelzone) vast niet erg wild zal fluctueren, zodat de onverzadigde doorlatendheid, die welis-

waar niet-lineair van het vochtgehalte afhangt, in de praktijk toch wel min of meer als een lineaire functie van het vochtgehalte opgevat mag worden. Voor beide modellen (SWAP en EARTH) wordt de bruto neerslag omgerekend naar een netto neerslag via een formule van Gash, die interceptieverliezen beschrijft.

Een probleem met dit type modellen is het grote aantal parameters dat gemeten dan wel proefondervindelijk vastgesteld moet worden, terwijl er maar weinig gegevens zijn om het model mee te kalibreren. Gehrels doet veel moeite om naast de gebruikelijke grondwaterstandsreeks ook het verloop van het vochtgehalte vast te stellen in een aantal locaties op de Veluwe. Dat biedt (voor die locaties dan) extra kalibratiemogelijkheden. Voor een promotieonderzoek is dat haalbaar, maar in de praktijk zal die luxe doorgaans niet beschikbaar zijn. Desondanks blijken de modellen sterk overgeparameteriseerd te zijn. Het lukt dan ook redelijk om het grondwaterstandsverloop te simuleren. (Kennelijk spelen er op deze locaties geen andere oorzaken dan de natuurlijke neerslag.) Het interessante is m.i. dat het relatief ingewikkelde SWAP het niet beter doet dan EARTH, en de vraag dringt zich op of het dan niet nog eenvoudiger kan. De uitgevoerde tijdreeksanalyse was in elk geval wat al te eenvoudig, want die leverde in het centrum van de Veluwe een duidelijk slechter resultaat. Enkele saillante bevindingen geven volgens mij wel aanwijzingen voor verdere vereenvoudiging. Ten eerste vindt Gehrels – heel opmerkelijk – dat de jaargemiddelde gewasverdamping vrijwel onafhankelijk is van de vraag of een jaar nat of droog was. Elk jaar verdampen er ongeveer evenveel millimeters. De jaarlijkse percolatie (de flux aan de onderzijde van de wortelzone) is dus vrijwel lineair gecorreleerd aan de jaarlijkse bruto neerslag. Ten tweede blijkt dat de jaarlijkse aanvulling van het grondwater (de flux ter plaatse van de grondwaterspiegel) nauwe-

lijks gecorreleerd is aan de jaarlijkse bruto neerslag, en dat lijkt me alleen verklaarbaar als er in de onverzadigde zone een enorme uitsmering van fluctuaties plaatsvindt, zodat seizoensfluctuaties en zelfs jaarlijkse fluctuaties geen belangrijke rol spelen. Je zou dus verwachten dat je met een simpeler invoerreeks toe kunt (namelijk alleen de bruto neerslag plus een constante voor de verdamping) en met grote tijdstappen. Opvallend genoeg beveelt Gehrels juist aan om de methode van tijdreeksanalyse te verbeteren door hem aan te vullen met een gedetailleerder model voor de verdamping, dus met een kleinere tijdstap. Ik moet hem toch eens vragen hoe dat zit.

Het scheiden van natuurlijke en antropogene invloeden is met een eendimensionale modellering van de onverzadigde zone niet mogelijk. Hooguit zou men kunnen vermoeden dat een eventueel systematisch verschil tussen een gemeten en een berekende tijdreeks van de grondwaterstand op een bepaalde locatie het gevolg is van niet-natuurlijke oorzaken, maar daarmee moet men natuurlijk heel voorzichtig zijn. Beter lijkt het om een realistischer model van de verzadigde zone te gebruiken. Dat is dan ook de derde stap in het promotieonderzoek.

### (3) 3D-MODELLERING VAN DE VERZADIGDE ZONE

Het (quasi) 3D-model van de verzadigde zone is ronduit indrukwekkend. Het is gebouwd met Micro-Fem en omvat het gehele gebied van de Veluwe, de Gelderse Vallei, de Utrechtse Heuvelrug en de Flevo-polders met een ruime rand er omheen, samen bijna 25.000 elementen. Eigenlijk is het geen losstaand alternatief voor de hierboven beschreven 1D-modellering, want het model incorporeert een variant op EARTH. Het is daarom opmerkelijk dat de resultaten – althans voor wat betreft het simuleren van het verloop van de grondwaterstand op de Veluwe – duidelijk minder zijn. Maar ik

loop vooruit op de gang van zaken. Het proefschrift geeft in betrekkelijk compacte vorm een complete beschrijving van de modelopzet – inclusief de onverzadigde zone, dus – en de vele invoergegevens die aan zo'n grootschalig en gecompliceerd model te pas komen. In die zin is het ook heel leerzame kost voor wie voor het eerst een regionaal grondwatermodel gaat bouwen. De kalibratie is uitgevoerd met Fem-Invs, eerst stationair en daarna instationair. Van het enorme aantal modelparameters kan maar een kleine deelverzameling via kalibratie 'geoptimaliseerd' worden, want het aantal optimaliseerbare parameters hangt samen met het aantal onafhankelijke meetgegevens. Welke parameters in de prijzen vallen hangt af van de gevoeligheid van de modelresultaten voor variaties van de parameters, maar dat houdt tevens in dat het afhangt van het type meetgegevens dat beschikbaar is. Als er bijvoorbeeld afvoermetingen bestaan, dan zal de selectie anders uitpakken dan wanneer er alleen grondwaterstanden bekend zijn. Ik weet het wel, wat Gehrels doet is *state of the art*, maar ik kan het niet helpen dat ik maar niet onder de indruk raak van het grootschalig modelleren. Van de geoptimaliseerde parameters is weliswaar heel precies aan te geven hoe gevoelig het model is voor kleine variaties, en het is ook mogelijk om de samenhang tussen deze parameters te beschrijven, maar dat geldt toch allemaal onder de aanname dat alle niet-geoptimaliseerde parameters (en niet te vergeten de begin- en randvoorwaarden van het model en de opbouw van de ondergrond) correct zijn ingeschat. Ik zou mijn handen daarvoor niet in het vuur steken. Omdat het praktisch gesproken uitgesloten is dat er voor een afdoende kalibratie van modellen van deze omvang ooit voldoende meetgegevens beschikbaar komen, denk ik dat hydrologen moeten erkennen dat deze weg ten einde loopt. Er moet een fundamenteel andere aanpak voor in de plaats komen, en het

resultaat van Gehrels wijst ook wel in die richting: de 1D-modellering doet het beter dan dit ingewikkelde model, hoeveel aandacht er ook aan gegeven is. Het aardwetenschappelijke besef dat alles met alles samenhangt is een groot goed, maar het moet niet te ver doorgevoerd worden. We moeten ook problemen durven isoleren, en meer conceptueel durven denken. Die hele ingewikkelde verzadigde zone van het Veluwemassief, die kun je blijkbaar gewoon simuleren door een drainageweerstand. Natuurlijk hangt die wel af van  $kD$ ,  $c$  en wat dies meer zij, maar dat zijn allemaal parameters die op een ander niveau hun werking doen gelden dan het niveau waarop het probleem zich afspeelt. We zijn al meer dan honderd jaar af van het idee dat je de stroming tussen zandkorrels apart zou moeten beschrijven om iets te kunnen zeggen over bijvoorbeeld de verlaging ten gevolge van een grondwaterwinning. Het effect van al die korrels samen stoppen we in een enkel getal, de  $kD$ -waarde, en daarmee wordt het schaalverschil tussen zandkorrels en watervoerende lagen effectief en afdoende overbrugd. Waarom kost het ons toch zo'n moeite om het schaalverschil tussen afzonderlijk watervoerende lagen en hele hydrologische systemen te overbruggen? In elk geval is het resultaat van Gehrels een aanmoediging om in deze richting verder te denken.

#### VERGELIJKING VAN DE DRIE METHODEN

Ik heb het al verklaard: de 1D-modellering presteert het best, althans wat betreft het simuleren van de reactie van de grondwaterspiegel op de natuurlijke aanvulling. Goed beschouwd heeft elke methode wel bepaalde sterke punten, en dat maakt het lastig om uit zo'n onderzoek als dit algemeen geldende conclusies te trekken. Natuurlijk bespreekt Gehrels ook de uitkomst van het onderzoek voor wat het scheiden van natuurlijke en antropogene

invloeden aangaat, en hij gebruikt de modellen om een aantal scenario's door te rekenen, maar dat lijkt met uit wetenschappelijk oogpunt meer een bijproduct.

#### II *Locatie-onderzoek naar de aanvulling van het grondwater*

Behalve het op zich al zeer uitgebreide modelonderzoek heeft Gehrels ook experimenteel veldonderzoek gedaan aan de processen verdamping, bodemwaterbeweging en aanvulling van het grondwater, op vijf locaties (wel alle op de Veluwe) met verschillende vegetaties. In feite bouwt het proefschrift op heel veel meetresultaten die de afgelopen jaren vooral verzameld zijn door een aantal afstudeerders van de Vrije Universiteit.

Om te beginnen is in Radio Kootwijk de verdamping van Molinea grasland bepaald met een micrometeorologische methode, de *Bowen ratio energy balance (BREB)* in een variant die toegeschreven wordt aan Tilman. Er komt erg veel meet- en rekenwerk aan te pas waarvan ik geen kaas gegeten heb, maar wat er uitkomt is ook voor mij interessant: Gewoonlijk wordt de potentiële verdamping van een vegetatie berekend door de van het KNMI gekochte referentieverdampingscijfers (volgens Makink) met een gewasfactor  $f$  te vermenigvuldigen. Doe je dat voor Molinea, dan kun je het best  $f = 0,95$  aanhouden. Een beter resultaat wordt echter bereikt met een gewasfactor van 0,75 en een interceptwaarde (dat is de gewasverdamping op het moment dat de referentieverdamping nul is) van 0,17. Er is dus ook in de winter nog enige verdamping. (Voor een beter begrip verwijs ik naar figuur 4.11 op pagina 77 van het proefschrift.) De beschreven meetmethode schijnt wel eenvoudig uitvoerbaar maar arbeidsintensief te zijn.

Enkele indirecte methoden om de verdamping te meten zijn gebaseerd op het

analyseren van bepaalde chemische componenten in de neerslag en in bodem- en grondwatermonsters. Gehrels onderzoekt de bruikbaarheid van respectievelijk chloride en zuurstof-18.

In de wortelzone, waar bodemvocht selectief door planten kan worden opgenomen, vindt indamping plaats. Het blijkt dat de chlorideconcentraties in de wortelzone duidelijk hoger zijn dan op grotere diepte, waaruit Gehrels concludeert dat een deel van de neerslag onaangeroerd door plantenwortels de wortelzone passeert via preferente stroompaden. Het chloridegehalte in neerslagwater vertoont voorts een seizoensfluctuatie, waaruit in principe afgeleid kan worden in welk seizoen het bemosterde bodemvocht geïnfiltrerd is. Hoewel uit waterbalansberekeningen blijkt dat er in de zomer geen bruto percolatie plaatsvindt, blijkt een deel van de zomerneerslag toch door te dringen tot onder de wortelzone. Chloridemetingen zijn eenvoudig uit te voeren en goedkoop. Helaas is het chloridegehalte van het bodemvocht niet eenduidig te herleiden tot wat er via neerslag aangevoerd wordt. Er vindt namelijk ook droge depositie plaats en die is moeilijk te bepalen, althans niet goedkoop, vooral als het om bossen gaat. Hoewel in Nederland over droge depositie vrij veel bekend is, leverde het chloride-onderzoek hogere verdampingswaarden op dan de BREB.

Zuurstof-18 is één van de natuurlijke isotopen die gebruikt kunnen worden om de beweging van bodemvocht te bestuderen. Het zuurstof-18-gehalte van regenwater vertoont een seizoensfluctuatie met pieken in de zomers en dalen in de winters, die in de bodem gevolgd kan worden. De hoeveelheid bodemwater tussen twee seizoenspieken is natuurlijk juist de hoeveelheid die in de verlopen tijdsduur tussen de twee pieken percoleerde. Gehrels gebruikte ook nog twee andere methoden, die naar mijn smaak geclassificeerd kunnen worden als verbeteringen van de voorgaande. Het zuurstof-18-

profiel in de bodem kan op allerlei manieren vervormd raken, waardoor het traceren van de pieken bemoeilijkt wordt. Twee voor de hand liggende mechanismen zijn preferente stroming en het feit dat verdamping vooral in het groeiseizoen optreedt. Het eerste proces treedt inderdaad op, maar het tweede leidt opvallend genoeg niet tot gemiddeld lagere zuurstof-18-concentraties in het bodemwater, vergeleken met regenwater. Bij nader inzien is dit toch niet verbazingwekkend, want de wortelzone wordt 's winters gevuld met regenwater, dat nog een groot deel van het groeiseizoen beschikbaar is voor verdamping. Opvallender is dat desondanks zomerwater de percolatiezone bereikt, wat dus op preferente stroming zou kunnen duiden. Tenslotte blijkt dat onder bossen nauwelijks seizoenspieken terug te vinden zijn. Gehrels leidt daaruit af dat onder bossen preferente stroming tot op grotere diepte optreedt dan onder andere vegetaties. Al met al acht Gehrels zuurstof-18 voor deze toepassing minder geschikt dan chloride.

Tenslotte worden de verschillende methoden om de aanvulling te bepalen met elkaar en met de 1D-modellering vergeleken. Het komt erop neer dat geen van de methoden zaligmakend is, maar dat ze elkaar ondersteunen. O ja, de verdamping van Molinea grasland wordt geschat op 435–485 mm/j. Gemiddeld over de Veluwe schat Gehrels de aanvulling van het grondwater op 360 mm/j, een getal dat gemakkelijk te onthouden is (namelijk 1 mm/d), en dat eerder al eens door Meinardi werd gepresenteerd; laatst nog in dit tijdschrift.

Ik beveel u van harte aan om het proefschrift zelf te lezen. Het is een interessant en mooi uitgegeven boek. In vergelijking met de energie en de kosten die gewoonlijk aan een proefschrift besteed worden, vind ik het altijd zonde dat er in het algemeen maar een heel beperkte kring van vakgenoten

mee bediend wordt. Maar de echte beloning voor de auteur is natuurlijk de doctorstitel, en die heeft Hans Gehrels zeker verdiend.

*Kees Maas*

### **Fresh Water**

door E.C. Pielou; The University of Chicago Press, Chicago, 1998, gebonden, 275 pagina's, ISBN 0-226-66815-0, \$ 24,00, £ 19,95, f 70,85.

Volgens de omslag van het boek is de in Canada woonachtige auteur, E.C Pielou, een gepensioneerd hoogleraar in de ecologie en is zij reeds haar leven lang een naturalist. Op mijn vraag aan een Amerikaanse kennis of we onder die term een ecooloog danwel fysisch geograaf moesten verstaan, kreeg ik een ontkenkend antwoord. Wat het dan wel was, kon hij ook niet precies uitlegen maar wel dat bijvoorbeeld Charles Darwin, Frederick van Eeden en Paul Theroux het ook waren. Je zou dus kunnen zeggen dat een naturalist een meer dan gemiddelde natuurliefhebber is, die er ook nog proza over schrijft.

E.C. Pielou is echter van huis uit een gerenommeerd ecologe, met natuur en landschap in het Canada en noorden van de Verenigde Staten als werkveld. In haar geval geeft de term wellicht aan dat zij van hetgeen zij bestudeerd heeft ook kan genieten en het daarnaast via geschriften voor een breed publiek toegankelijk kan maken.

*Fresh Water* is dan ook bedoeld voor een breed publiek, variërend van de geïnteresseerde leek en amateur-natuurvorser tot professionals in andere vakgebieden. Voor de gemiddelde lezer van STROMINGEN valt er vakinhoudelijk weinig nieuws van op te steken, maar zij behoren dan ook niet tot de doelgroep die Pielou wil bereiken.

Het boek vult de leemte tussen de wetenschappelijke literatuur op het vakgebied van de hydrologie en de kleurenfolder van het waterschap of de drinkwaterleiding-

maatschappij die als bijsluiters bij de acceptgirokaart is aan te treffen.

Onderwerp van het boek is de kringloop van het zoete water, en de wijze waarop de verschillende fasen van die kringloop zich in het Noord-Amerikaanse landschap manifesteren.

In elk hoofdstuk worden de onderwerpen op onderhoudende, vaak anekdotische wijze beschreven. E.C. Pielou beheerst het vakgebied dat zij graag onder de aandacht van haar publiek wil brengen. Zij weet een goede balans aan te brengen tussen een theoretische behandeling van bijvoorbeeld grond- of oppervlaktewaterstroming en een praktische aanpak die de lezer in staat stelt allerlei hydrologische verschijnselen buiten in het veld te herkennen en te kwantificeren. Op heldere wijze wordt bijvoorbeeld uitgelegd hoe het debiet van een beek met simpele middelen te schatten valt en welke stromingsprocessen ten grondslag liggen aan slierten drijvende blaadjes in een stromend beekje.

De auteur omzeilt behendig het gebruik van formules, door simpelweg de wet van Darcy of een waterbalans in woorden uit te leggen. Al het vakjargon staat cursief in de tekst afgedrukt zodat het voor de oplettende lezer duidelijk wordt in welke taal de hydrologen elkaar toespreken, en hij of zij bij een

---

#### **Fresh Water**

- 1 The Water Cycle
  - 2 Water below the Ground: Groundwater
  - 3 Groundwater in Use
  - 4 Water below the Ground: Vadose Water
  - 5 Flowing Water: Rivers and Streams
  - 6 Rivers at Work
  - 7 Lakes
  - 8 When Water Freezes
  - 9 Dams, Diversions and Reservoirs
  - 10 Wetlands
  - 11 Microscopic Life
  - 12 Water in the Atmosphere: Vapor, Clouds, Rain, and Snow
-