

Veranderingen
in het
Hydrologisch Klimaat

585161

Uitgegeven en gedistribueerd door:

**Hydrologie en Waterhuishouding
Vakgroep Gezondheidstechniek & Waterbeheersing
Faculteit der Civiele Techniek
Stevinweg 1
2628 CN Delft**

ISBN 90-800089-5-8

De keuze en presentatie van de bijdragen van deze uitgaven vallen onder verantwoordelijkheid van de auteurs en hoeven noodzakelijkerwijs niet overeen te komen met de visie van de uitgevers.

Deze publicatie of delen ervan mogen niet, dan wel na toestemming van de uitgevers worden gereproduceerd.

Gedrukt door NIVO-Delft

***Veranderingen
in het
Hydrologisch Klimaat***

Symposium ter gelegenheid van het afscheid van de TUD van:

Prof.dr.ir. J.C. van Dam,

Hoogleraar Hydrologie en Waterhuishouding

Woensdag 26 mei 1993, 9.30 uur

**Technische Universiteit Delft
Congres Centrum (Aula-TUD), auditorium
Mekelweg 5
Delft**

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Auteurs	2
 Hydrologie en klimaat	3
Prof.dr.C.J.E. Schuurmans	
Samenvatting	3
Inleiding	4
Enkele kwantitatieve gegevens	5
GEWEX en BAHC	6
Het bucket model	6
GCM - resultaten	7
Waarnemingen	8
 Watertransport in de onverzadigde zone	9
Prof.dr.ir. R.A. Feddes et al.	
Introductie	9
Theorie van de waterdynamica in de onverzadigde zone	10
Modellering van de waterdynamica in de onverzadigde zone	16
Verzameling van data voor modelinvoer en modelverificatie	21
Preferente stroming en hysteresis	28
Voorbeelden van toepassingen	32
Voorbeeld 1: Kwel door een aarden dam	32
Voorbeeld 2: Watergebruik en opbrengst van aardappels	33
Voorbeeld 3: Watervoorzieningsplan	34
Voorbeeld 4: Integratie van remote sensing met een waterbalans-simulatiemodel	36
 Geohydrologie in dienst van mens en milieu	43
Prof.dr.ir.C. van den Akker	
 Klimaatveranderingen in het hydrologisch onderwijs	47
Prof.dr.ir.A. van der Beken	
Inleiding	47
De hydrologische wetenschap	47
Het hydrologisch onderwijs	48
De klimaatveranderingen	49
Besluit	50
Referenties	50

De vakgroep gezondheidstechniek en waterbeheersing als integraal waterbeheerder	51
Prof.ir. R.Brouwer	
Civiele Techniek	51
Hydrologie	53
Milieutechniek	53
Gezondheidstechniek	53
Polders en Irrigatie	53
Water-recht, beleid en bestuur	54
Integraal Waterbeheer	54
 Geld als water?	 55
Ir. N.A. Amesz	
Samenvatting	55
Darcy binnen de adviesbureaus	55
Bloedgroepen: tussen rekenmachine en wichelroede	56
Water als geld	57
 Grondwater kruipt waar het niet gaan kan	 59
Ir. W.Cramer	
Inleiding	59
Kennismaking en hoe het verder ging	59
Leermeesters op een rijtje	61
Tussen theorie en empirie	64
Hydrologie en beleid	66
Tot slot	68
Noten	69

Voorwoord

Na bijna 25 jaar als 'gewoon' hoogleraar Hydrologie en Waterhuishouding, verlaat Prof.dr.ir. J.C. van Dam de Technische Universiteit Delft.

In deze periode heeft hij de hydrologie zoals die in Delft wordt onderwezen en beoefend een eigen gezicht gegeven.

Veranderingen zijn er in die periode te over geweest. Op bestuurlijk vlak (Wet op de Universitair Bestuurshervorming), maar vooral ook op het vakgebied.

Eind zestiger jaren waren hydrologische problemen alleen analytisch of met behulp van analogons oplosbaar. Een decennium later zijn numerieke oplossingsmethoden al volop in gebruik, een ontwikkeling die nog steeds voortduurt.

Was de belangstelling in eerste instantie vooral gericht op de kwantiteit, de kwaliteit van het water bleek langzamerhand een zeker zo belangrijk onderwerp te zijn, terwijl nu vooral de samenhang en interactie in de ruimste zin, tussen de water voorkomens (noodgedwongen) volop in de belangstelling staan.

Professor van Dam heeft aan deze ontwikkelingen een belangrijke bijdrage geleverd. In eerste instantie door de enthousiasmerende wijze van het geven van onderwijs in de (geo)hydrologie, maar ook in ruimer verband door zijn grote rol in nationale en internationale organisaties, als voorzitter, initiator, stimulator etc.. Met name dient hier genoemd te worden zijn werk op het gebied van de zout water intrusie in delta en kustgebieden.

Kort samengevat het totaal van zijn activiteiten is en was volgens een oud hydrologisch gezegde een 'mer à boire'.

Voor de groep Hydrologie en Waterhuishouding, studenten en vakgenoten betekent het afscheid ongetwijfeld een grote verandering van het 'Hydrologisch Klimaat'. Hierin ligt een grote uitdaging voor zijn opvolger.

Dit symposium is dan ook bedoeld om de ontwikkelingen en trends op het vakgebied, zowel wat betreft onderwijs als onderzoek, aan de orde te stellen.

Wij hopen dat dit symposium bij het afscheid van de TU-Delft en in het bijzonder van de groep Hydrologie en Waterhuishouding, een succes wordt.

Wij hebben het graag gedaan.

De organisatiecommissie

Auteurs

- Prof.dr.ir. C.E.J. Schuurmans** Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
Postbus 201
3730 AE de Bilt
- Prof.dr.ir. R.A. Feddes** Landbouw Universiteit Wageningen
Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica
De Nieuwlanden
Nieuwe kanaal 11
6709 PA Wageningen
- Prof.dr.ir. C. van den Akker** RijksInstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne
Postbus 1
3720 BA Bilthoven
- Prof.dr.ir. A. van der Beken** Vrije Universiteit Brussel
Dienst Hydrologie
Pleinlaan 2
1050 Brussel
- Prof.ir. R.Brouwer** Technische Universiteit Delft
Vakgroep Gezondheidstechniek & Waterbeheersing
Stevinweg 1
2628 CN Delft
- Ir. N.A. Amesz** IWACO B.V.
Postbus 8520
3009 AM Rotterdam
- Ir. W. Cramer** Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en
Milieubeheer
Directie Drinkwater, Water en Bodem
Postbus 450
2260 MB Leidschendam

"Veranderingen in het hydrologisch klimaat"

Symposium t.g.v. het afscheid van Prof.dr.ir.J.C. van Dam van de TU-Delft

Hydrologie en klimaat

Prof.dr. C.J.E. Schuurmans
KNMI, De Bilt

Samenvatting. Klimaat en hydrologie onderhouden een innige relatie met elkaar: het klimaat bepaalt in belangrijke mate het gedrag van een gegeven hydrologisch systeem, terwijl omgekeerd de hydrologische cyclus een doorslaggevende rol speelt in het gedrag van het klimaatsysteem. In het klimaatsysteem draait alles om energie, maar het is vooral het water dat bepaalt hoe er met die energie wordt omgesprongen. Niet voor niets kent het World Climate Research Programme een apart onderdeel GEWEX (Global Energy and Water Experiment). Op een aantal processen waarin atmosferisch water een rol speelt wordt kort ingegaan, t.w. de invloed op de stralingshuishouding, het horizontale warmtetransport en de beïnvloeding van de oceaancirculatie.

Onderzoek leidt tot een verbetering van de beschrijving van het betreffende proces. Deze kan meestal onmiddellijk worden uitgetoetst in klimaatmodellen (GCM's). Een veel toegepaste beschrijving van de bodemvochthuishouding is bv. het bucketmodel van Budyko. Ook deze beschrijving kan echter nog verbeterd worden: bv. door de rol van de vegetatie erin op te nemen.

GCM's worden gebruikt om het klimaat te simuleren. Hydrologische grootheden, zoals neerslag, zijn vaak grillig en kleinschalig verdeeld. De numerieke simulatie levert dan ook nog grote problemen op. Door toepassing van 'limited area models', waarin bv. de topografie realistischer kan worden weergegeven, worden betere resultaten bereikt. Of deze aanpak ook kan worden gevolgd om klimaatgevoeligheden te bepalen, bv. voor verdubbeling van het CO₂-gehalte, staat nog niet vast. Grofmazige, mondiale klimaatmodellen geven nog steeds een breed scala te zien van mogelijke gevolgen voor de hydrologische cyclus, bij toeneming van het broeikaseffect.

Inmiddels is uit GCM-experimenten wel komen vast te staan dat de natuurlijke variabiliteit van het klimaatsysteem groter is dan voorheen werd aangenomen. Verreweg het grootste deel van de variabiliteit die uit waarnemingsreeksen kan worden afgeleid is vermoedelijk dan ook een vorm van natuurlijke variabiliteit. Zelfs in extreme situaties als de bekende Saheldroogte. Voor een deel is deze variabiliteit misschien wel voorspelbaar. Overigens laten de waarnemingen van de hydrologische cyclus nog steeds veel te wensen over.

Inleiding

De waterbalans van een bepaald gebied ziet er op het eerste gezicht altijd simpel uit:

$$P - E = A$$

Neerslag minus verdamping is gelijk aan de afvoer (of aanvoer als P-E negatief is). Dit geldt voor de langjarige balans, waarbij de opslag nul kan worden gesteld. Een interessant punt is verder dat aan- of afvoer A niet alleen bepaald kan worden uit afvoer van rivieren of grondwaterstromen, maar ook uit 'waterdampstromen' in de atmosfeer. Immers er geldt ook een waterbalans voor de atmosferische tak van de hydrologische cyclus. Die luidt

$$\text{div } W = E - P$$

waarin W gelijk is aan het vochttransport in de atmosfeer.

Blijkt dus dat $\text{div } W = -A$.

Voor Nederland geldt dat P - E positief is en dus ook A. D.w.z. door rivieren en ondergronds wordt meer water Nederland uitgevoerd, dan ingevoerd. Maar dat betekent ook dat div W negatief is. Met andere woorden door de atmosferische transporten van waterdamp treedt boven Nederland convergentie van waterdamp op: door de lucht voeren we dus meer water in dan er door de lucht weer uitgaat.

Hoe simpel deze redeneringen ook zijn, zij maken het probleem van de voorspelling er niet eenvoudiger op. Wie bv. wil weten hoe die waterbalans zou kunnen gaan veranderen als gevolg van het toenemend broeikaseffect van de atmosfeer heeft aan de eenvoud van de balansen in eerste instantie niets. Waar het dan om draait is hoe W verandert en dat vergt weer informatie over de veranderingen van het waterdampgehalte van de lucht en van de richting en sterkte van de luchtstroming. En om het nog ingewikkelder te maken: waterdamp vormt nu eenmaal geen passieve tracer in de luchtstroming. Statisch oefent de waterdamp al een invloed uit op de stralinghuishouding en op de verdamping, maar tijdens het transport door de atmosfeer komt er nog de niet geringe invloed van het transport van latente warmte bij.

Dat de ontwikkeling van weer en klimaat daarmee een ingewikkeld interactief proces wordt behoeft geen verder betoog. Waar het om gaat is of we de verschillende processen voldoende begrijpen om ze apart en in hun onderlinge samenhang te beschrijven.

Enkele kwantitatieve gegevens

1) Men kan zich afvragen hoeveel anders de temperatuur van de aarde zou zijn als er geen water aanwezig was. Dus ook geen water in de atmosfeer, noch als waterdamp, noch in de vorm van wolken. Stralingsconvectieve modellen waarin wel de normale overige samenstelling van de atmosfeer is opgenomen, inclusief CO₂ en ozon (er is dus wel een broeikaseffect) laten zien dat de gemiddelde temperatuur vrijwel 0 graad Celsius zou zijn. De behaaglijke + 15 graad Celsius danken we dus aan het water. Ook al is door de aanwezigheid van wolken en ijs het terugkaatsend vermogen veel groter dan op onze veronderstelde droge aardbol.

2) Om op aarde een thermisch evenwicht te handhaven worden grote hoeveelheden warmte in de richting van de polen getransporteerd, zowel door de atmosfeer als door de oceaan. Het maximum rond 30 graden noord en zuid bedraagt ca. 5 x 10 (15) Watt (jaargemiddeld). De atmosfeer en de oceanen leveren hierin een vergelijkbare bijdrage. Interessant is echter dat in de atmosfeer een relatief grote bijdrage wordt geleverd door de latente warmte van waterdamp. Speciaal op lage geografische breedten is deze bijdrage gelijk of zelfs groter dan de bijdrage van de normale voelbare warmte (de warmte dus die een gevolg van de temperatuur van de lucht). De opmerkelijkheid zit hem hierin dat de inhoud aan latente warmte slechts enkele procenten is van de inhoud aan voelbare warmte. De verklaring moet gevonden worden in het feit dat in de horizontale golfbewegingen waarin het transport plaats vindt de temperatuurverschillen klein zijn vergeleken met de absolute temperatuur die de warmteinhoud bepaalt. Bij het transport van latente warmte liggen de verhoudingen gunstiger.

3) De geologische episode tussen 10.000 en 11.000 B.P., Younger Dryass genoemd, heeft zich in Europa en het gebied van de Atlantische Oceaan gekenmerkt door temperaturen die tenminste 5 graden lager waren dan nu. Hoe kon die lage temperatuur, zolang na de eigenlijke ijstijd die bijna tienduizend jaar eerder zijn maximum had, nog ontstaan. Een van de verklaringen wordt gevormd door te wijzen op de rol van het zoutgehalte op de oceaancirculatie. Een verandering die tot gevolg heeft dat de Golfstroom ons gebied niet meer zou bereiken, zou inderdaad voldoende zijn om een temperatuurdaling van zo'n 5 graad Celsius te verklaren. Maar waar kan het zoutgehalte een drastische wijziging door ondergaan? Een van de mogelijkheden is een verandering in de hydrologische cyclus. Zowel verdamping, als neerslag, alsook afvoer van zoet water kunnen over grote gebieden het zoutgehalte van de oceaan veranderen. In het geval van de Younger Dryass wordt gedacht aan grote hoeveelheden smeltwater die vrij plotseling vanaf het Noordamerikaanse continent de Noord Atlantische Oceaan hebben bedekt.

GEWEX en BAHC

Bovenstaande voorbeelden laten zien dat de hydrologische factoren een enorme rol spelen in het klimaat en de veranderingen daarvan. Een systematische inzet om meer aan de weet te komen over de samenhang tussen hydrologie en klimaat is echter nog steeds nodig. Het verbaast dan ook niet dat de beide grote programma's van klimaatonderzoek, het World Climate Research Programme (WCRP) als het International Geosphere Biosphere Programme (IGBP) een hydrologisch gerichte component hebben. Bij het WCRP is dat GEWEX (Global Energy and Water Experiment), bij het IGBP BAHC (Biological Aspects of the Hydrological Cycle). GEWEX wil zowel het klimaat modelleren als het klimaat monitoren verbeteren, met de nadruk op hydrologische aspecten. Op modellergebied is een van de grote problemen nog de parametrisatie van de hydrologische processen. Ook al is een proces goed beschreven op lokale schaal (enkele tientallen meters tot kilometers, dan betekent dat nog niet dat deze beschrijving ook representatief is voor een groter gebied zoals het gebied van 250 bij 250 km waar een roosterpunt in een klimaatmodel een representatieve beschrijving voor moet geven. Het vertalen van kennis op schalen van kilometers tot schalen van honderden kilometers is iets dat d.m.v. grote veldexperimenten moet worden onderzocht. Het KNMI levert aan de ontwikkeling van dit soort kennis ook een bijdrage met haar TEBEX-project, een poging om de gehele energie- en waterhuishouding in een doos rond een modelroosterpunt te meten en te vergelijken met de berekening in een bepaald model. Bij afwijkingen kan de parameterisatie van bepaalde processen worden bijgesteld, enz.. GEWEX heeft ook een doelstelling op het gebied van de klimaatmonitoring. Het gaat dan om voor de handliggende zaken als de bepaling van de hoeveelheid neerslag over de gehele wereld gedurende een gegeven periode, bv. een maand. Boven land kan uit neerslagmetingen in regenmeters informatie worden verkregen, maar over de oceanen en ook grote gebieden op de continenten kennen geen regenmeters. Daar moeten satellietmetingen een uitkomst bieden.

Het bucket model

Als voorbeeld van de behandeling van de vochthuishouding in de bodem in GCM's moge dienen het zg. Bucket model, oorspronkelijk geïntroduceerd door Budyko. In het model wordt uitgegaan van een bodemvochtcapaciteit die boven land overal gelijk is aan 15 cm. In GCM's kan bv deze waarde als startwaarde worden genomen (B_{max}). Veranderingen in de hoeveelheid bodemvocht B worden berekend met:

$$dB/dt = \text{neerslag} + \text{smeltwater} - \text{verdamping} - \text{afvoer}$$

Er is alleen afvoer wanneer B groter is dan B_{max} . En wat de verdamping betreft: indien $B > 0,75 B_{max}$ geldt een normaal verdampingsschema; d.w.z. de verdamping is bv. gelijk aan de potentiële verdamping. Indien echter $B < 0,75 B_{max}$ wordt de verdamping evenredig genomen aan B/B_{max} . Dit model is uiterst simpel, reden waarom op diverse manieren aanpassingen worden onderzocht, zonder dat het model weer te ingewikkeld wordt om in GCM's te worden toegepast. Een alternatief is bv. dat de laag die het bodemvocht bevat in twee lagen worden gesplitst, een bovenlaag die echt kan uitdrogen, waardoor de

verdamping nul zou worden, plus een laag daaronder die vocht blijft behouden dat alleen voor verdamping kan worden aangesproken als er vegetatie is. Dit is slechts een manier waarop de vegetatie een rechtstreekse rol speelt in de hydrologische processen. Een ander voorbeeld waarbij de grootte van het beschikbare vochtreservoir door andere dan zuiver hydrologische processen wordt beïnvloed is permafrost. In arctische gebieden is de bodem soms tot grote diepte bevroren. In de zomer smelt de bovenlaag hiervan over een dikte van 0,5 tot 2 meter. Hierdoor verandert de voor verdamping beschikbare hoeveelheid bodemvocht vrijwel continu, afhankelijk o.a. van de energiebalans aan het aardoppervlak en het warmtegeleidingsvermogen van de bodem.

De precieze modelering van deze processen is in feite nog maar pas begonnen. Vaak zijn er wel procesbeschrijvingen beschikbaar voor zuiver hydrologische toepassingen, maar deze zijn vaak te gedetailleerd om in klimaatmodellen gebruikt te worden.

Zodra betere procesbeschrijvingen beschikbaar zijn en in GCM's getest kan ook de vraag worden beantwoord in hoeverre bepaalde hydrologische processen in staat zijn om klimaatveranderingen te versterken of te verzwakken (positieve of negatieve terugkoppelingen). Jaren geleden werd het droogteproces in de Sahel al aangemerkt als een mogelijk positieve terugkoppeling tussen de uitdrogende bodem en de algemene circulatie. Tegenwoordig hebben we echter de indruk dat de veranderingen in de algemene circulatie die de Saheldroogte veroorzaakten veeleer gestuurd werden door de temperatuurverdeling in de tropische oceaangebieden dan door de vegetatieveranderingen ter plekke.

GCM - resultaten

Ondanks minder realistische procesbeschrijvingen zijn de klimaatsimulaties die met GCM's zijn uitgevoerd op een aantal punten zeer succesvol. Dit geldt met name de simulatie van de mondiale aspecten van het klimaat zoals de luchtdrukverdeling, de temperatuurverdeling en in iets mindere mate zelfs de neerslagverdeling. Niet alleen de zg. zonale gemiddelden van neerslag en verdamping blijken realistische trekken te vertonen, maar zelfs de geografische verdeling van de neerslag. Een fraai voorbeeld van wat klimaatsimulaties met GCM's op kunnen leveren is de tamelijk succesvolle klimaat-simulatie van de zg. Köppenklimaten, een klimaatclassificatie gebaseerd op temperatuur en neerslag.

Toch vertonen klimaatsimulaties op meer gedetailleerde schaal vaak nog grote afwijkingen van de werkelijkheid. Dat geldt met name de simulatie van de neerslaghoeveelheden. Door verbetering van de bovengenoemde procesbeschrijvingen, maar ook door een groter oplossend vermogen van de modellen wordt getracht hierin verbetering te brengen. Een soort tussenweg die wel bewandeld wordt is het gebruik van 'limited area models' (LAM's). Hierbij worden modellen met hoge resolutie voor een beperkt gebied gedraaid met randgegevens, gebaseerd op waarnemingen. De klimaatsimulaties voor het binnengebied komen er dan veel realistischer uit te zien. Vooral in gebieden met grote hoogteverschillen, die in een LAM natuurlijk veel beter opgelost kunnen worden, worden de simulaties van bv. de neerslagverdeling veel beter.

Men probeert deze techniek nu ook toe te passen op de bepaling van klimaatveranderingen. Bv. de berekening van de mogelijke veranderingen in het regionale klimaat bij toeneming van het broeikaseffect. Natuurlijk kunnen dan op de randen geen waarnemingen meer worden

gebruikt, maar berekende gegevens verkregen met een grofmazig mondiaal klimaatmodel. De kwaliteit van het LAM-resultaat is daarmee toch weer afhankelijk geworden van de kwaliteit van de mondiale resultaten. Deze laten vooral voor de neerslag nog grote onzekerheden zien. In het algemeen neemt met het toenemend broeikaseffect de hoeveelheid neerslag op aarde toe, maar ook de verdamping neemt toe. Er zijn echter aanwijzingen dat over grote gebieden de neerslagtoename achterblijft bij de verdampingstoename, waardoor in bepaalde seizoenen de kans op droogte groter wordt. Een van die gebieden die in dit verband als kwetsbaar naar voren komt is Zuid-Europa in het zomerseizoen. De onzekerheid is echter groot. Wigley die een aantal modelresultaten heeft bewerkt laat zien dat bij eenzelfde mondiale temperatuurstijging (1,6 graad Celsius, te bereiken in het jaar 2050) de zomerneerslag in Zuid-Europa varieert van een afname van 15 % tot een toename van 5 %. Voor Noord Europa is het resultaat van diezelfde modellen (onder dezelfde temperatuurstijging mondiaal) een neerslagvermindering van 5 % tot een toename van 25 %.

Waarnemingen

Hoe goed kennen we nu de mondiale waterbalans, bv. als functie van de geografische breedte?

Eerder werd al aangegeven dat neerslagmeting over grote gebieden van de aarde te wensen overlaten en dat satellietmetingen uitkomst moeten bieden. Maar hoe zit het met de verdamping? Deze wordt vaak als residu bepaald uit de eerdergenoemde balansvergelijking

$$\text{div } W = E - P$$

Onlangs zijn twee bepalingen van E met elkaar vergeleken: 1) Oort en Peixoto (1983) gebaseerd op radiosonde metingen van W en P volgens de klimatologie van Jäger, 2) atmosferische analyses van het ECWMF en P uit satellietmetingen. De E's als functie van de geografische breedte verschillen nogal. Nu hebben de gegevens op verschillende jaren betrekking en een deel van de verschillen is zeker terug te voeren op reële natuurlijke variabiliteit. De auteurs vergelijken de resultaten ook nog met een rechtstreeks berekende E.

De laatste methode blijkt vooral in de winter veel hogere waarden op te leveren dan de residu-methode.

Conclusie is dus dat ook op het gebied van de klimaatmonitoring, en meer in het bijzonder de monitoring van de hydrologische cyclus, er nog veel werk aan de winkel is.

Watertransport in de onverzadigde zone

R.A. Feddes, P. Kabat, P. van Bakel, J. Bronswijk, J. Halbertsma en T. Rientjes

Introductie

Sinds Buckingham in 1907 het energie concept introduceerde om de toestand van het bodem-water te beschrijven en Richards (1931) de partiële differentiaalvergelijking formuleerde voor waterstroming in de onverzadigde zone, werd een kwantitatieve analyse van waterstroming mogelijk. Stroming van water in de bodem is echter bij uitstek niet-lineair omdat zowel de hydraulische geleidbaarheid als de drukhoogte van het bodemwater afhankelijk zijn van het vochtgehalte van de bodem. Exacte analytische oplossingen zijn slechts mogelijk voor gesimplificeerde stromingsgevallen onder beperkende aannames. Numerieke oplossingen van de stromingsvergelijking vormen een krachtig middel voor de beschrijving van waterstroming in de onverzadigde zone voor een grote variatie van bodemsystemen en externe randvoorwaarden.

De partiële differentiaalvergelijking kan numeriek geïnterpreteerd worden door een eindige differentie, een eindige elementen en een randelementen methode. Hierbij wordt een discretisatie schema voor een systeem van knooppunten toegepast om het bodemdiepte-tijd domein te beschrijven. Het implementeren van de juiste initiële- en randvoorwaarden geeft een set van (lineaire) algebraïsche vergelijkingen waarvoor verschillende oplossingstechnieken bestaan. De beschrijving van de handelingen van zo'n mathematisch model heet simulatie, terwijl het model zelf een simulatiemodel wordt genoemd.

De uitvoer van een simulatiemodel kan variabelen bevatten zoals drukhoogte, vochtgehalte en flux als functie van de bodemdiepte en de tijd. Meestal worden echter de termen van de waterbalans berekend, d.w.z. infiltratie, werkelijke bodemverdamping, werkelijke transpiratie, veranderingen in vochtberging en de netto flux over een gebiedsrand.

Het hoofddoel van het gebruik van dynamische simulatiemodellen ligt in de vaststelling van effecten van ingrepen in de waterhuishouding, zoals irrigatie, infiltratie vanuit waterlopen, drainage, bodemverbetering en regionale watervoorzieningsplannen, op de termen van de waterbalans van agrarische- en natuurgebieden. Het gebruik van waterbalanstermen maakt het in het algemeen mogelijk om effecten van waterbeheer te evalueren op de gewasopbrengst en het agrarisch inkomen. Een toepassing van het gebruik van simulatiemodellen in de civiele techniek kan worden gevonden in kwelberekeningen door een aarden dam en de berekening van kwelverliezen van kanalen.

Het transport van opgeloste stoffen vormt een ander aspect wat direkt gerelateerd is aan de simulatie van waterstroming in de onverzadigde zone d.w.z. de evaluatie van vervuiling van het grondwaterreservoir, verzouting e.d..

Ook is de opbrengst van een gewas, goed voorzien van nutriënten, direkt gerelateerd aan het waterverbruik in de vorm van transpiratie. Veelal geldt: 'hoe hoger het waterverbruik, hoe hoger de opbrengst'. Simulatie van verschillende irrigatie regimes met een gecombineerd waterbalans- en gewasgroeimodel stelt ons in staat het optimale regime vast te stellen. In zo'n geval moeten het gewas- en bodemsysteem gekoppeld zijn. Er zal, wat de gewasontwikkeling in de tijd betreft, een terugkoppeling moeten plaats vinden met het berekende werkelijke waterverbruik en de produktiesnelheid van het gewas.

In veel bodems worden watertekorten veroorzaakt door een te ondiepe wortelzone. Er zijn vele oorzaken voor een beperkte wortelzonediepte waaronder een slechte zuurstofvoorziening, bodemverdichting, e.d.. Door gebruik te maken van bodemvochtbalans/gewasgroeimodellen kunnen de effecten van veranderingen in een bodemprofiel op het waterverbruik en opbrengst van het gewas geëvalueerd worden.

Inadequate drainage resulteert in het algemeen in een afname van de berijdbaarheid en bewerkbaarheid van de bodem, waardoor landbouwwerkzaamheden niet tijdig mogelijk zijn. De lengte van het groeiseizoen wordt verkort met als gevolg een gereduceerde gewasopbrengst. Voor het geval dat de relaties tussen bodemvochtcondities met landbouwwerkzaamheden en gewasgroei bekend zijn, is het mogelijk om met bodem-gewas simulatiemodellen de effecten van drainage op de gewasproductie van dag tot dag te evalueren. Een dergelijke benadering is niet alleen mogelijk voor drainage studies, maar ook voor irrigatie, bodemverbetering, etc. en is daarom algemeen toepasbaar voor kwantitatieve landevaluatie studies.

De klassieke Richards-stromingstheorie, waarop de meeste simulatie modellen gebaseerd zijn, geldt alleen voor stabiele stromingsvoorwaarden. Toch is instabiliteit van stroming waargenomen onder een grote variatie van omstandigheden zoals abrupte en geleidelijke toenames van hydraulische doorlatendheid met de diepte, compressie van lucht voorafgaand aan het vochtfront en waterafstoting van de vaste fase (b.v. Raats, 1973). Een ander voorbeeld van de niet-Richards type stroming is de preferente stroming door niet-capillaire macroporiën. Met klassieke stromingstheorieën vinden dan onderschattingen van de snelheid en de diepte van het water/stoffentransport plaats.

Dit artikel bespreekt niet alle literatuur op het gebied van waterstroming in de onverzadigde zone. Transport van opgeloste stoffen wordt bijvoorbeeld niet besproken. Het hoofddoel van het artikel is: 1) het geven van de principes van de waterstroming in de onverzadigde zone; 2) het presenteren van enige simulatie benaderingen en 3) het geven van een beschrijving van recente ontwikkelingen. Enige voorbeelden van simulatie van stromingsproblemen van hedendaagse waterbeheersingsproblemen worden gegeven.

Theorie van de waterdynamica in de onverzadigde zone

Het feit dat water door de onverzadigde bodem beweegt werd door Buckingham (1907) onderkend die de stroomsnelheid relateerde aan de spanningsgradiënt. Buckingham introduceerde ook het begrip drukhoogte wat later gemeten werd door Gardner en Widtsoe (1921). Richards (1931) presenteerde de differentiaalvergelijking voor bodemwaterstroming in analogie met het warmtetransport in poreuze media. Tot op heden geldt deze vergelijking als de algemene mathematische uitdrukking welke ten grondslag ligt aan de beschrijving van stromingsfenomenen in de onverzadigde zone.

Het mechanische en het energie concept

In het mechanische concept worden alleen spanningsgradiënten beschouwd als de oorzaak van waterbeweging in de bodem. Water kan echter ook door de onverzadigde zone bewegen als gevolg van drijvende krachten zoals thermische, elektrische of concentratie-gradiënten. Daarom is het energie concept ontwikkeld met als uitgangspunt dat water zich in de richting van afnemende energie toestand beweegt.

Voor een gegeven temperatuur kan de energie status van het bodemwater gekarakteriseerd worden door Gibb's vrije toestandsgrrootheid, in het algemeen de water potentiaal genoemd. Fysisch drukt de potentiaal de capaciteit uit van een bepaalde massa water om een bepaalde

hoeveelheid arbeid te verrichten in vergelijking met een gelijke massa van puur vrij water met een potentiaal nul. De bodemwater potentiaal ϕ kan geschreven worden als:

$$\phi = \phi_m + \phi_{ex} + \phi_{ov} + \phi_{os} \quad (1)$$

waarin:

ϕ_m = de matrix potentiaal als gevolg van lokale interacties tussen bodemmatrix en water

ϕ_{ex} = de potentiaal ten gevolge van externe gasdruk

ϕ_{ov} = de 'overburden' potentiaal veroorzaakt door een externe belasting die gedeeltelijk wordt gedragen door de bodemwaterfase

ϕ_{os} = de osmotische potentiaal ten gevolge van de aanwezigheid van opgeloste stoffen in het bodemwater.

Indien water zich op een hoogte bevindt welke ongelijk is aan de referentie hoogte, moet de gravitatie potentiaal ϕ_g toegevoegd worden aan ϕ . De totale water potentiaal ϕ_t wordt nu:

$$\phi_t = \phi + \phi_g \quad (2)$$

Potentiaalen kunnen worden uitgedrukt op basis van massa, volume, of gewicht. In hydrologische studies wordt het gebruik van potentiaal op gewichtsbasis geprefereerd. Aan de potentiaal wordt gerefereerd d.m.v. een 'hoogte' h met als dimensie 'lengte'.

Kinetica van de stroming: Darcy's wet

Beschouwen we multi-dimensionale stroming onder anisotrope en niet-uniforme condities dan kan Darcy's wet worden geschreven als:

$$\vec{v}_i = -K_{ij} \nabla \phi, \text{ met } j \text{ (sommatie index) } = 1,2,3 \text{ voor elke waarde van } i \quad (3)$$

waarin:

$\vec{v}_i$ = de flux vector

K_{ij} = de hydraulische doorlatendheid geschreven als een tensor van de 2^e graad voor een anisotrope bodem

$\nabla \phi$ = de gradiënt van de bodemwater potentiaal als vector samengesteld, waarbij de potentiaal zelf een scalar is.

Door de uitdrukking van de potentiaal in termen van hoogte h zal, indien een systeemverandering ontstaat door interacties tussen bodemmatrix en water en/of door een verandering van de hoogte x_3 , vergelijking (2) reduceren tot:

$$h_t = h_m + x_3 \quad (4)$$

waarin:

h_t = stijghoogte

h_m = drukhoogte

x_3 = plaatshoogte.

Voor isotrope condities wordt Darcy's wet (3) geschreven als:

$$\vec{v}_i = -K \frac{\partial}{\partial x_i} (h_m + x_3) \quad (5)$$

Voor één-dimensionale verticale stroming geeft dit:

$$\vec{v} = -K \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \quad (6)$$

waarin voor de verticale coördinaat (positief omhoog gericht) de notatie z wordt gebruikt in plaats van x_3 .

Behoud van massa

Door de definiëring van de flux vector v kan de uitdrukking voor behoud van massa geschreven worden als:

$$\text{div } \vec{v} = -\frac{\partial \theta}{\partial t} - S \quad (7)$$

waarin:

θ = het volumetrisch bodemwater gehalte

t = de tijd

S = de sink van bodemwater (b.v. wateropname door wortels).

Voor één-dimensionale verticale stroming wordt verg.(7) gelezen als:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \theta}{\partial t} - S \quad (8)$$

Differentiaalvergelijking voor de stroming in de onverzadigde zone

Samenvoeging van de wet van behoud van massa en de wet van Darcy levert de partiële differentiaalvergelijking voor stroming in de onverzadigde zone, waarvoor een aantal alternatieve uitdrukkingen bestaan.

Combinatie van verg.(7) en (3) geeft:

$$\text{div } (K_y \nabla \phi) = \frac{\partial \theta}{\partial t} + S \quad (9)$$

of:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} + S \quad (10)$$

Vergelijking (10) beschrijft niet-stationaire, multi-dimensionale, anisotrope en niet-homogene stroming. Hierbij wordt opgemerkt dat K_{ij} niet alleen een parameter voor een anisotroop en heterogeen medium is, maar ook nog afhankelijk is van het bodemvochtgehalte θ . Substitutie van verg.(4) in verg.(10) en beperking tot isotrope bodems, reduceert verg.(10) tot:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[K(\theta) \frac{\partial h_m}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial x_3} - \frac{\partial \theta}{\partial t} + S \quad (11)$$

In verg.(10) en (11) betekenende herhaalde indexen sommatie aangaande deze indexen.

Beschouwen we het één-dimensionale geval van verticale stroming en introduceren we de differentiële bodemwater capaciteit $C(h_m) = \partial \theta / \partial h_m$, dan kan verg.(11) herschreven worden in termen van de drukhoogte h_m als:

$$\frac{1}{C(h_m)} \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h_m) \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right] - \frac{S}{C(h_m)} - \frac{\partial h_m}{\partial t} \quad (12)$$

Vergelijking (12) heeft het voordeel toepasbaar te zijn voor het gehele stroomgebied, inclusief stroming in de verzadigde en gedeeltelijk verzadigde bodemlagen. Het gebruik van h_m in plaats van θ als onafhankelijke variabele, heeft het voordeel dat verg.(12) toepasbaar is in gelaagde bodems omdat op laagovergangen h_m continu blijft en θ niet.

Zwellende bodems

De 'overburden' potentiaal zoals genoemd in verg.(1), speelt een rol in bodems waar een aanwezige belasting niet geheel gedragen wordt door de vaste bodemdeeltjes. In zwellende kleibodems kan de overburden potentiaal, resulterend van een belasting van bovenliggende bodemlagen, berekend worden volgens Groenevelt en Bolt (1972) als:

$$\phi_{ov} = \int_{P=0}^{P=P} \left(\frac{\partial e}{\partial \theta} \right)_{P,T} dP \quad (13)$$

of:

$$\phi_{ov} = \alpha P \quad (14)$$

waarin:

P = belasting

$\partial e / \partial \theta$ = helling van de krimp karakteristiek

T = temperatuur

e = poriën getal = volume van de poriën / volume van de vaste delen

θ = vocht ratio = $(1+e)\theta$ = volume van het water / volume van de vaste delen

α = belastingsfactor

θ = volumetrisch watergehalte = volume van het water / totaal volume.

Darcy's vergelijking en de continuïteits-vergelijking blijven geldig in zwellende bodems. De

samenstelling van de totale potentiaal verschilt echter van die van de niet-zwellende bodems, evenals het ruimtelijke coördinaatstelsel dat ook onderhevig is aan zwel en krimp. Dit probleem wordt echter opgelost door de definiëring van een materiaal coördinaat m volgens verg.(15) (Philip en Smiles, 1969):

$$\frac{dm}{dz} = \frac{1}{1 + e} \quad (15)$$

waarin m = materiaal coördinaat. De continuïteits-vergelijking, verg.(8), kan dan geconverteerd worden in:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial m} \right)_t = - \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_m = S \quad (16)$$

Duidelijk is dat genoemde processen niet alleen de berekening van het watertransport door de onverzadigde zone beïnvloeden, maar ook de algemene vergelijkingen waarmee infiltratie aan het bodemoppervlak wordt beschreven (Giraldez en Sposito, 1984).

Wateropname door wortels

Gradman (1928) en Van den Honert (1948) stelden dat onder stationaire voorwaarden waterstroming door het bodem-wortel-stengel-blad stelsel beschreven kan worden in analogie met de wet van Ohm. Sedert dien wordt de navolgende uitdrukking algemeen geaccepteerd:

$$T = \frac{h_m - h_r}{R_s} = \frac{h_r - h_l}{R_p} \quad (17)$$

waarin:

T = de transpiratie snelheid

h_m, h_r, h_l = de drukhoogte in respectievelijk de bodem, aan het worteloppervlak en in de bladeren

R_s, R_p = de vloeistof stromingsweerstand in respectievelijk de bodem en de plant.

Diffusiestroming van water naar een enkele wortel is beschouwd door Gardner (1960) die aantoonde dat R_s afhankelijk is van de wortelgeometrie, de worteldiepte en de hydraulische doorlatendheid van de bodem. Deze zogenaamde microscopische benadering wordt vaak gebruikt om de invloed van complexe bodem-wortel geometrieën op de water/nutriënt opname vast te stellen (b.v. De Willigen en Van Noordwijk, 1987; Zeller, 1987).

In het veld komen stationaire voorwaarden echter nauwelijks voor. Bovendien is het levende wortelsysteem een dynamisch geheel (afstervende wortels worden doorlopend vervangen door nieuwe), is de geometrie tijdsafhankelijk, en varieert de water-doorlatendheid met de positie langs de wortel en in de tijd. Wateropname door wortels is het meest effectief in jong wortelmateriaal, maar de lengte van jonge wortels is helaas niet direkt gerelateerd aan de totale wortellengte. Voorts geldt dat de experimentele bepaling van wortelkenmerken onpraktisch en vaak onmogelijk is.

Daarom kan, in plaats van de beschouwing van waterstroming naar een enkele wortel, de macroscopische benadering meer geschikt zijn. In zo'n benadering wordt een sink term S

toegevoegd aan de continuïteits-vergelijking, verg. (7), waarmee de wateronttrekking gerepresenteerd wordt uit een homogeen en isotroop element van het wortelsysteem (volume water per volume grond per eenheid van tijd). Feddes (1981), Molz (1981) en Campbell (1985) gaven een overzicht van mogelijke S -functies voor niet-uniforme drukhoogte potentialen. Dirksen (1985, 1987) onderzocht S -functies waarbij de invloed van zowel de osmotische als de matrix-potentiaal in aanmerking werd genomen.

Hoewel het onmogelijk en onpraktisch lijkt een complete fysische beschrijving van wateronttrekking door wortels te geven, beschrijven Feddes et al. (1978) S semi-empirisch door:

$$S(h_m) = \alpha(h_m) S_{\max} \quad (18)$$

waarin $\alpha(h_m)$ een voorgeschreven dimensieloze functie van de drukhoogte voorstelt en $S_{\max}$ de maximaal mogelijke wateropname door de wortels. Laatstgenoemde auteurs veronderstellen, in het belang van de praktische toepasbaarheid, een homogene wortel verdeling over het bodemvochtprofiel en definiëren $S_{\max}$ als (zie Fig.1):

$$S_{\max} = \frac{T_p}{|z_r|} \quad (19)$$

waarin T_p de potentiële transpiratie snelheid weergeeft en $|z_r|$ de diepte van de wortelzone is.

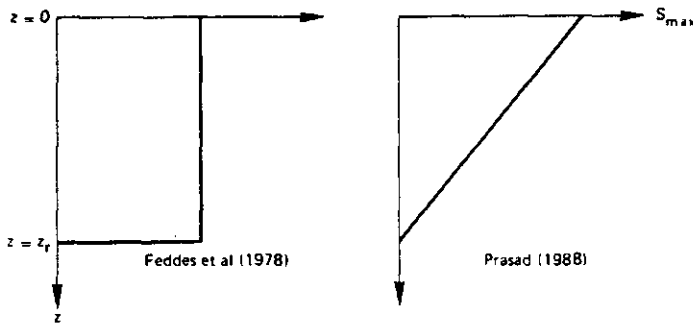


Fig.1: Schematische weergave van verschillende wateropname functies onder optimale bodemvocht condities, $S_{\max}$ als functie van de diepte $|z|$ zoals voorgesteld door Feddes et al. (1978) en Prasad (1988), $|z_r|$ = diepte van de wortelzone.

Prasad (1988) en Hayhoe en De Jong (1988) houden rekening met het feit dat bij een niet-homogene wortelverdeling (meer wortels boven in het profiel dan onderin) in een vochtige bodem wortels in principe meer water kunnen opnemen uit de bovenste bodemlagen dan uit de onderste lagen. De wateropname door wortels aan de onderkant van de wortelzone (z_r) wordt daarbij gelijk gesteld aan nul waardoor de navolgende oplossing wordt verkregen:

$$S_{\max}(z) = \frac{2T_p}{|z_r|} \left\{ 1 - \frac{|z|}{|z_r|} \right\} \quad (20)$$

Tot dusver is de wateropname door wortels beschouwd onder optimale bodemvochtcondities, d.w.z. $S_{\max}$. Onder niet-optimale condities, d.w.z. te droog of te nat, wordt $S_{\max}$ gereduceerd door een drukhoogteafhankelijke α -functie (zie verg.(18)). De vorm van deze functie is gegeven in Fig.2. De wateropname beneden $|h_{m1}|$ (zuurstofgebrek) en boven $|h_{m4}|$ (verwelkingspunt) wordt op nul gesteld. Tussen $|h_{m2}|$ en $|h_{m3}|$ (reductiepunt) is de wateropname maximaal, tussen $|h_{m3}|$ en $|h_{m4}|$ wordt een lineaire (Fig.2.) dan wel een hyperbolische afname aangenomen. De waarde van $|h_{m3}|$ is afhankelijk van de vraag van de atmosfeer en varieert derhalve met T_p .

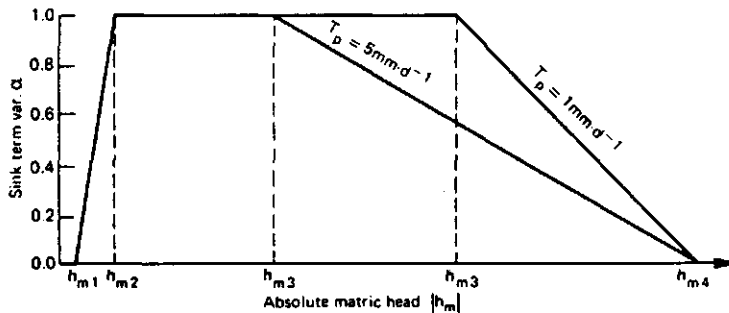


Fig.2: Dimensieloze sink term variabele α als functie van de absolute waarde van de drukhoogte van het bodemvocht $|h_m|$ (naar Feddes et al. 1978). De wateropname beneden $|h_{m1}|$ (zuurstof tekort) en boven $|h_{m4}|$ (verwelkingspunt) wordt gelijk gesteld aan nul, tussen $|h_{m2}|$ en $|h_{m3}|$ (reductie punt) is de wateropname maximaal. De waarde van $|h_{m3}|$ varieert met de potentiële transpiratie snelheid T_p .

Modellering van de waterdynamica in de onverzadigde zone

Mathematische modellen

In de voorafgaande secties is de dynamica van het bodemwater beschreven in de vorm van wiskundige vergelijkingen waarmee de hydrologische relaties binnen het systeem worden beschreven. Deze vergelijkingen beschrijven een mathematisch model. Het gehele model heeft gewoonlijk de vorm van een set partiële differentiaalvergelijkingen, voorzien van aanvullende condities (Remson et al., 1971; Hornung en Messing, 1980). Deze condities beschrijven de systeem-geometrie, de systeem-parameters, de randvoorwaarden en, in geval van niet-stationaire stroming ook de initiële condities. Het gebruik van een dergelijk mathematisch model wordt simulatie genoemd.

Indien de algemene vergelijkingen en de aanvullende randvoorwaarden simpel zijn, kan een exacte analytische oplossing gevonden worden, anders dient een numerieke benadering te worden toegepast. De numerieke simulatiemodellen zijn momenteel het meest in gebruik.

Numerieke benadering

Met het toenemende gebruik van digitale computers, is de nadruk drastisch verschoven van de klassieke analytische oplossingen naar de numerieke analyse. Momenteel zijn numerieke benaderingen mogelijk voor complexe, samendrukbare, niet-homogene, anisotrope stroomgebieden voorzien van wisselende randconfiguraties.

Numerieke methoden zijn gebaseerd op de opsplitsing van het stroomgebied in een eindig aantal segmenten, begrensd en weergegeven door een serie knooppunten, waarvoor een oplossing wordt verkregen. De oplossing hangt hierbij af van de oplossingen van de omliggende knooppunten en van de toegepaste set van aanvullende voorwaarden. In de afgelopen jaren zijn een aantal methoden geïntroduceerd. Methoden welke het best toepasbaar zijn voor het probleem van de waterdynamica zijn de eindige differentie, eindige elementen en randelementen methode.

Initiële en randvoorwaarden

Initiële condities moeten worden gedefinieerd indien niet-stationaire stroming wordt gemodelleerd. In het algemeen zijn op elk knooppunt waarden van de drukhoogte of het bodemwatergehalte in het bodemprofiel nodig. Indien deze data niet beschikbaar zijn hanteert men voor de initiële condities de beschikbare hoeveelheden water overeenkomend met veldcapaciteit, d.w.z. de watergehalten waarbij een evenwicht bestaat tussen de drukhoogte en de plaatshoogte boven de grondwaterspiegel.

Bovenrand-voorwaarde

Terwijl de potentiële evapotranspiratie snelheid van een bodem afhankelijk is van het gewas en van de atmosferische condities, wordt de werkelijke flux door het bodemoppervlak en de planten beperkt door het vermogen van de bodemmatrix om water te transporteren. Overeenkomstig geldt dat indien de potentiële infiltratiesnelheid groter wordt dan de infiltratiecapaciteit, een gedeelte van het water oppervlakkig afstroomt doordat de werkelijke flux door de toplaag beperkt wordt door de vochtcondities in de bodem.

Als gevolg hiervan is het niet mogelijk om, a-priori, de exacte randvoorwaarde aan het bodemoppervlak te schatten maar moet de juiste oplossing gevonden worden door het maximaliseren van de absolute flux (Hanks et al., 1969; Feddes et al., 1978) d.w.z.:

$$|v(K, h_m)| \leq |ET_p| \quad (21)$$

$$h_m^{\lim} \leq h_m \leq 0 \quad (22)$$

waarin:

$v(K, h_m)$ = de werkelijke opwaartse flux door de bodem-lucht interface

ET_p = de bekende potentiële oppervlakte flux (d.w.z. potentiële evapotranspiratie), tijdsafhankelijk

$h_m^{\lim}$ = de minimum toegestane drukhoogte aan het bodemoppervlak, tijd afhankelijk.

Methoden om ET_p te berekenen zijn elders gepubliceerd (b.v. Monteith, 1965; Priestly en Taylor, 1972; Feddes et al., 1974) en vallen buiten het aandachtsveld van dit artikel.

De waarde $h_m^{\lim}$ kan bepaald worden uit evenwichtscondities tussen bodemwater en atmosfeer:

$$h_m^{\lim} = \frac{RT}{Mg} \ln(f) \quad (23)$$

waarin:

R = universele gasconstante

T = absolute temperatuur

M = moleculair gewicht van water

g = zwaartekrachtveldsterkte

f = relatieve luchtvochtigheid

Het mogelijke effect van plasmavorming is tot dusver genegeerd. In dat geval wordt de hoogte van het water in het algemeen als functie van de tijd gegeven. Indien echter het bodemoppervlak verzadigd is, vormt de bepaling van de overgangsdiepte van het verzadigde naar het gedeeltelijk verzadigde bodemprofiel een probleem (Wooding, 1968).

Er zijn verschillende mogelijkheden van opsplitsing van de potentiële evapotranspiratie ET_p in potentiële transpiratie T_p en potentiële bodemevaporatie E_p . In het algemeen wordt E_p gescheiden van ET_p door dat gedeelte van de stralings-energie te beschouwen welke het bodemoppervlak bereikt na het passeren van de gewaslaag. Voor details zie Ritchie (1972) en Belmans et al. (1983). Feddes (1987) en Kabat et al. (1986a,b) presenteerden de opsplitsing van ET_p in potentiële transpiratie T_p en potentiële bodemevaporatie E_p als functie van de bladoppervlakindex. Het bleek dat de mate van vochtigheid van het bodemoppervlak een aanzienlijke invloed had op de verdelingsfunctie.

Boesten en Stroosnijder (1986) ontwikkelden een simpel parametrisch model voor de schatting van de dagelijkse bodemevaporatie uit de cumulatieve potentiële bodemevaporatie. Het voordeel van dit simpele model is dat de procedure tot maximalisatie van de flux, zie verg.(21), vervangen is door toepassing van empirische relaties.

Indien 'seepage faces' (uittreding van grondwater aan het grondoppervlak, in het bijzonder bij slootwanden e.d.) worden beschouwd, moet een ander soort atmosferische randvoorwaarde worden bepaald. Aan het front is de druk atmosferisch en de drukhoogte dus gelijk aan nul. Aangezien kwelffronten variëren met de tijd, is ook hier een a-priori voorspelling van dit fenomeen onmogelijk, waardoor een iteratieve oplossing noodzakelijk wordt.

In de meeste dynamische modellen wordt aan het oppervlakteknooppunt gedurende de eerste iteratie stap een flux randvoorwaarde toegekend waaruit de drukhoogte h_m wordt berekend. Indien h_m hierbij voldoet aan verg.(22), blijft de bovenrand-voorwaarde een fluxrand gedurende de gehele iteratie. Indien dit niet het geval is wordt in de volgende iteratiestap het oppervlakteknooppunt behandeld als een toegekende drukhoogte. In geval van infiltratie geldt dan $h_m = 0$ en voor evaporatie $h_m \approx h_m^{um}$. De werkelijke flux wordt expliciet berekend en is onderhevig aan de conditie van verg.(21).

Benedenrand-voorwaarde

Aan de benedenrand kan men drie verschillende condities onderscheiden; (a) Dirichlet-conditie, de drukhoogte is gespecificeerd; (b) Neumann-conditie, de flux is opgegeven; en (c) de Cauchy-conditie, de flux is een functie van een onafhankelijke variabele.

Het freatisch oppervlak (plaats, waar de drukhoogte gelijk is aan nul) wordt gewoonlijk als benedenrand van de onverzadigde zone genomen in het geval waarin waargenomen waterstandsfluctuaties a-priori bekend zijn. De flux door de onderkant van het systeem kan dan worden berekend. In regio's met een erg diepe grondwaterstand wordt een Neumann type randvoorwaarde gebruikt.

Dirichlet-voorwaarde

In het geval een grondwaterpeil aanwezig is, is het gemakkelijk waarnemen van veranderingen in het grondwaterpeil het hoofdvoordeel van het specificeren van een drukhoogte nul als benedenrand-voorwaarde. Moeilijk is echter de toepassing van ondiepe grondwaterstanden ($< 2\text{ m}$ beneden het landoppervlak), omdat de gesimuleerde effecten van veranderingen in het freatisch oppervlak extreem gevoelig zijn voor variaties in de hydraulische bodemdoorlatendheid.

Knooppunten in een bodemprofiel maken meestal gebruik van vaste posities waarbij, waarschijnlijk, geen van de knooppunten zal samenvallen met het grondwaterstandsniveau. Het knooppunt met de toegekende drukhoogte is vaak het knooppunt dat direct onder het freatisch niveau ligt. In geval van grote fluxen over de benedenrand, wordt bij deze benadering een fout geïntroduceerd. Het probleem van de mogelijke hydrodynamische omstandigheden die aan de benedenrand kunnen optreden is geanalyseerd door o.a. Jensen (1983).

Neumann-voorwaarde

Een flux als benedenrand-voorwaarde wordt in het algemeen toegepast in gevallen waar men een 'no-flow' rand (b.v. een ondoorlatende laag) definieert of daar waar sprake is van vrije drainage.

In het laatste geval is de flux altijd omlaag gericht en is de gradiënt $\delta h / \delta z = 1$, d.w.z. de Darcy flux is gelijk aan de hydraulische doorlatendheid aan de benedenrand.

Cauchy-voorwaarde

Dit type randvoorwaarde wordt gebruikt indien modellen voor de onverzadigde zone worden gecombineerd met modellen voor regionale grondwaterstroming, of indien de effecten van oppervlaktewater beheersmaatregelen moeten worden gesimuleerd. Wordt de benedenrand flux v_b geschreven als functie van het freatisch oppervlak, dan kunnen relaties tussen de flux naar/van het drainage systeem en de hoogte van het freatisch oppervlak in de benedenrand voorwaarde worden opgenomen. Deze flux-stijghoogte relaties kunnen verkregen worden uit drainage formules zoals die van Hooghoudt (1940) of Ernst (1962) (zie Skaggs, 1980) of van regionale grondwater-stromingsmodellen (b.v. Van Bakel, 1986).

Met de benedenrand-voorwaarde kan de verbinding met de verzadigde zone tot stand worden gebracht. Op deze wijze kunnen effecten van activiteiten, welke het regionale grondwatersysteem beïnvloeden (waaronder b.v. gewastranspiratie) worden gesimuleerd. De verbinding tussen de twee systemen is mogelijk indien men veronderstelt dat het freatisch oppervlak geldt als intern bewegende rand met één-richting of twee-richting relatie. Voor een overzicht hiervan wordt verwezen naar Van Bakel (1986).

De meest gebruikelijke vorm van de Cauchy conditie kan worden geschreven als:

$$v_b = v_d + v_a \quad (24)$$

waarin:

v_b = flux door de benedenrand

v_d = flux van/naar het drainage systeem

v_a = flux naar/van diepe aquifers (Fig.3).

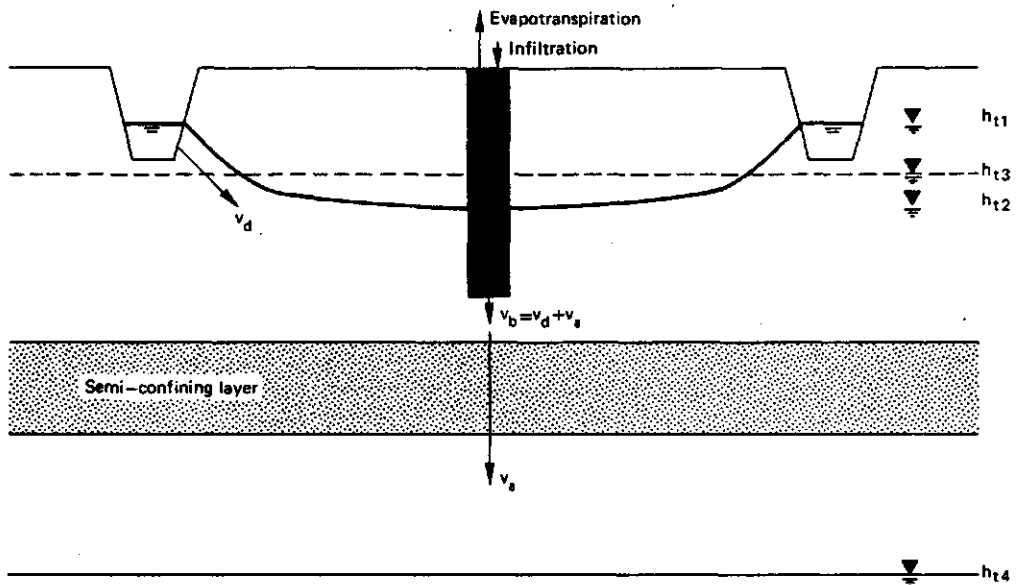


Fig.3: Representatie van een stromingssituatie [Cauchy onderrand-voorwaarde, zie verg.(24)], voor het geval van uitstroming van sloten en omlaag gerichte kwel naar de diepe aquifer; h_{t1} is het open waterpeil, h_{t2} is het freatisch grondwaterstandspeil, h_{t3} is het gebiedsgemiddelde freatisch grondwaterstandspeil en h_{t4} is het piëzometrisch niveau van de diepe aquifer.

De flux v_d kan worden geschreven als de som van drainage fluxen van verschillende orde (Ernst, 1978):

$$v_d = - \sum_{n=1}^N \frac{h_{t1,n} - h_{t2}}{\omega_n} \quad (25)$$

waarin:

$h_{t1,n}$ = open waterpeil (beneden het bodemoppervlak)

h_{t2} = freatisch oppervlak

ω_n = drainage weerstand van het drainage systeem van orde n .

De kweiflux v_a kan worden uitgedrukt in termen van een weerstandstroming:

$$v_a = - \frac{h_{i3} - h_{i4}}{c} \quad (26)$$

waarin:

h_{i3} = gebiedsgemiddelde freatisch grondwaterstandspeil

h_{i4} = het piëzometrisch niveau van de diepe aquifer

c = verticale hydraulische weerstand voor stroming tussen freatisch peil en de diepe aquifer.

Indien de Cauchy voorwaarde gehanteerd wordt in een één-dimensionaal vertikaal stromingsmodel dan kan men een dergelijke oplossing als quasi-twee-dimensionaal beschouwen, daar zowel de verticale als de horizontale stroming wordt berekend.

Verzameling van data voor modelinvoer en modelverificatie

Benodigde invoerdata

Simulering van de waterdynamica in de onverzadigde zone vraagt om invoerdata betreffende modelparameters, geometrie van het systeem, randvoorwaarden en, in geval van simulatie van niet-stationaire stroming, initiële condities. Met de geometrieparameters worden de dimensies van het probleemdomen bepaald. Met de fysische parameters worden de fysische eigenschappen van het beschouwde systeem beschreven. Voor de onverzadigde zone betreffen deze de bodemvocht karakteristiek $\theta(h_m)$, en de hydraulische doorlatendheid $K(\theta)$. Indien de wateropname door wortels ook gemodelleerd wordt, dienen parameters te worden gegeven welke de relatie tussen wateropname door de wortels en de energietoestand van het bodemwater beschrijven, waarna deze samengevoegd moeten worden met de gewasspecificaties. Voor het geval dat functionele flux-drukhoogte relaties worden gebruikt als benedenrandvoorwaarde moeten parameters gegeven worden welke de interactie beschrijven tussen het oppervlaktewater en het grondwater en, in geval van slecht doorlatende lagen, de verticale weerstand.

Bodemfysische eigenschappen

De belangrijkste bodemfysische eigenschappen voor waterbeweging in de onverzadigde zone zijn de relaties tussen de drukhoogte (h_m), het water gehalte (θ) en de hydraulische doorlatendheid (K).

Gedurende de laatste 50 jaar zijn vele methoden ontwikkeld voor de bepaling van deze relaties in het veld in situ, en aan bodemonsters in het laboratorium (zie Klute, 1986). Traditioneel vereisen deze methoden stationaire stromingsvoorwaarden of een evenwichtssituatie voor de verschillende drukhoogten. De procedures zijn zeer tijdrovend en leveren de $h_m(\theta)$ en de $K(h_m)$ -relaties voor de verschillende bodemonsters. Een veel snellere methode werd toegepast door Wind (1966) en Boels et al. (1978) voor de bepaling van $h(\theta)$ en $K(\theta)$ -relaties in een niet-stationair stromingsexperiment van een verdampend bodemonster.

Kool et al. (1987) geven een overzicht van recente ontwikkelingen in parameter schattings-

technieken voor stroming in de onverzadigde zone. De parameters van een a-priori geformuleerd model, welke de relaties $K-h_m-\theta$ beschrijven, worden geschat uit een niet-stationair stromingsexperiment met bekende initiële en randvoorwaarden. De waarnemingen van het experiment (b.v. drukhoogten, uitstroming) en de modeluitvoer worden met elkaar vergeleken. De geschatte parameters van het model worden geoptimaliseerd door minimalisering van de verschillen tussen de waarnemingen en de voorspelde uitvoer. Het voordeel van deze benadering is dat er geen beperkende initiële en randvoorwaarden nodig zijn. Daarom kan deze techniek ook in veldstudies gebruikt worden. Men dient zich echter te realiseren dat de hydraulische processen niet beter beschreven kunnen worden dan het gebruikte $K-h_m-\theta$ -model toestaat. Ander problemen zijn dat de geschatte parameters niet noodzakelijkerwijs de meest optimale zijn en dat een oplossing afhankelijk kan zijn van de initiële schattingen.

Software is ontwikkeld voor de schatting van de vijf parameters van het Van Genuchten model voor niet-stationaire stromingsexperimenten (Van Genuchten, 1980). Uitbreidingen voor het opnemen van hysteresis en luchtinsluitingen kunnen worden toegevoegd (Kool en Parker, 1987). In het laatste geval wordt de $K-h_m-\theta$ relatie beschreven met acht parameters. De huidige auteurs gebruiken het Wind-type evaporatie experiment en enige aanvullende informatie (b.v. het volumetrisch watergehalte bij verzadiging en bij een drukhoogte van -15.000 cm) om de $K-h_m-\theta$ relaties te bepalen voor parameter schattingen. De schattingen worden vergeleken met de meer directe berekeningen volgend uit de methode van Wind (Fig.4).

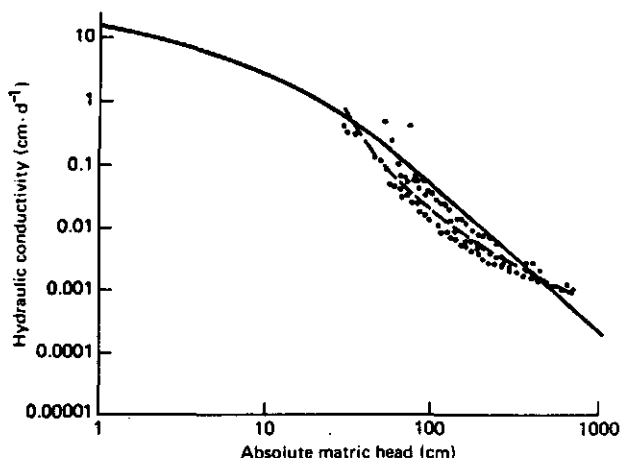


Fig.4: De hydraulische doorlatendheid K van een bodemonster als functie van de absolute drukhoogte $|h_m|$, in een laboratorium bepaald volgens de methode van Wind (Wind, 1966) en door parameter schatting. De punten geven de berekende doorlatendheden, de onderbroken lijn beschrijft deze punten met een tweede orde polynoom. De data van dit experiment, voorzien van watergehaltes met drukhoogten van -2500 en -15.800 cm, zijn gebruikt voor de schatting van de parameters van het Van Genuchten model (1980) met het SFTT programma (Kool en Parker, 1987). De geleidbaarheid wordt aangegeven door de continue curve (parameter schatting van Lafolie en Van Genuchten; pers.commun.)

Op deze wijze kan men de fysische karakteristieken van een bodemonster schatten en derhalve controleren of het gepostuleerde model met zijn geschatte parameters de waarnemingen afdoende kan beschrijven.

Een nieuwe methode voor de schatting van de verticale en horizontale hydraulische doorlatendheid, gebaseerd op inverse modellering, is ontwikkeld door Karvonen (1988). De

methode hanteert een simplificatie van de Kalman filter techniek (Mayback, 1979). Voor-
delen van de gesimplificeerde Kalman filter techniek zijn: (1) de techniek staat een schatting
toe van de onzekerheid betreffende de parameter schattingen; (2) het laat de afhankelijkheid
van de parameters van toestandsvariabelen zien; en (3) het biedt de mogelijkheid de tijds-
onafhankelijkheid van de parameters te testen.

Ruimtelijke variabiliteit en schalering

De meeste modellen voor de onverzadigde stroming zijn één-dimensionaal. Echter, de
stromingsproblemen die moeten worden gemodelleerd zijn dikwijls van lokale of regionale
aard. In dat geval worden we geconfronteerd met het probleem van ruimtelijke variabiliteit.
Dit verschijnsel heeft onlangs veel de aandacht getrokken (Nielson et al., 1973, Webster,
1984, 1985; Russo en Bresler, 1981; Jury et al. 1987a).

De basis veronderstelling is dat het poreuze medium grond kan worden beschouwd als een
macroscopisch continuüm (geheel) van eigenschappen die continue functies zijn van de
ruimtelijke coördinaten. Een set van gemeten waarden wordt daarbij geïnterpreteerd als de
realisatie van een ruimtelijk stochastische functie. Gewoonlijk worden semi-variogrammen
gebruikt om de ruimtelijke structuur te karakteriseren. De schatting van deze functies kan
zeer gecompliceerd zijn (Jury et al., 1987a).

Vooraf wat betreft de technieken van bemonstering is, zoals beschreven door de verschil-
lende auteurs, het nut van een geo-statistische benadering duidelijk. Maar ook is de toepas-
sing van geo-statistiek van belang voor de regionalisering van punt-simulaties. Een juiste
toepassing van de geo-statistische benadering zou veldeigenschappen kunnen opleveren die
niet voortkomen uit de conventionele statistische analyse.

Een fenomeen dat direct verband houdt met de regionale toepassing van één-dimensionale
simulatiemodellen is schalering. In principe is schalering een techniek waarmee de ruimtelijke
variabiliteit in bodemfysische karakteristieken kan worden gekwantificeerd. Overeenkomstig
de schaleringstheorie wordt een één-dimensionale schaalfactor α_r gedefinieerd als:

$$\alpha_r = \frac{l_r}{l_m} \quad (27)$$

waarin:

l_r = microscopische karakteristieke lengte van een bodem op lokatie r

l_m = idem van een gemiddelde bodem

De drukhoogte h_m en doorlatendheid K op iedere lokatie r worden dan aan de gemiddelde
bodem ('mean') gerelateerd volgens de relatie:

$$(h_m)_r = \frac{(h_m)_{mean}}{\alpha_r} \quad (28)$$

$$K_r = \frac{K_{mean}}{\alpha_r^2} \quad (29)$$

Deze vergelijkingen zijn geldig voor alle waarden van (h_m), en K , die gemeten zijn bij verschillende vochtgehalten (concept van gelijkvormige media). Teneinde de variatie in dichtheden van de bodems goed te kunnen verdisconteren worden h_m en K dikwijls uitgedrukt als een functie van de verzadigingsgraad θ/θ_s (i.p.v. θ). Op deze manier kan men een representatief gemiddelde waterretentie- en doorlatendheidscurves bepalen (Fig.5).

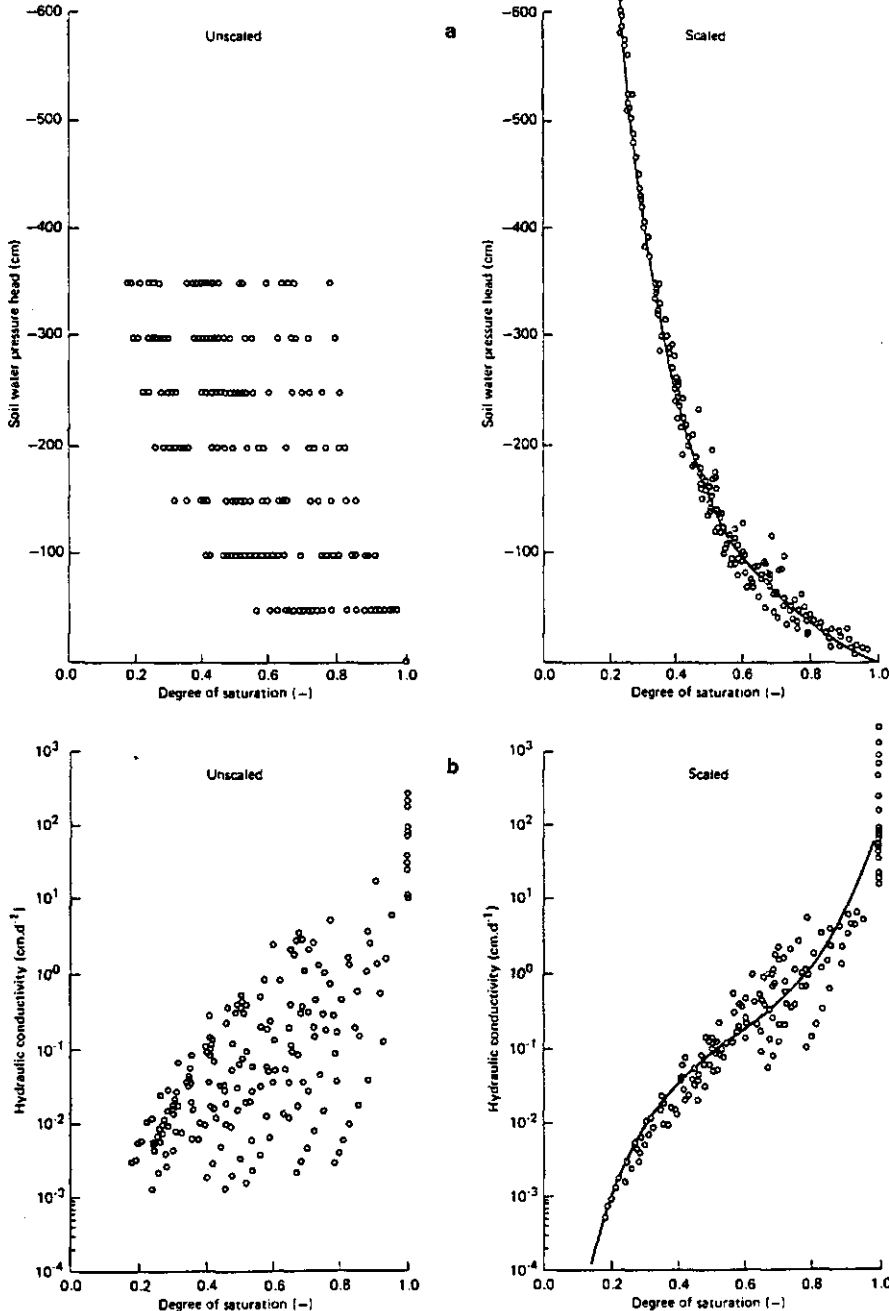


Fig.5: Relaties tussen drukhoogte h_m en de verzadigingsgraad θ/θ_s (a) en hydraulische doorlatendheid K en θ/θ_s (b) voor niet-gescaleerde en gescaleerde data voor de bepaling van een representatief gemiddelde waterretentie- en doorlatendheidscurve.

Vaak worden effecten van variabiliteit in bodemfysische karakteristieken op uitkomsten van modelberekeningen geëvalueerd via z.g. functionele eigenschappen zoals verblijftijden, kritische grondwaterstandsdiepten e.d. (zie Wösten, 1990).

Model-verificatie

Verificatie (of validatie) van een model omvat het controleren of een model acceptabel is als weerspiegeling van de werkelijkheid. Dit wordt gedaan door het vergelijken van waargenomen en gesimuleerde variabelen, zoals hoogte van het freatisch oppervlak, drukhoogte, watergehalten en werkelijke evapotranspiratie. De meting van deze variabelen zal nu in meer detail besproken worden.

De hoogte van het freatisch grondwateroppervlak

De hoogte van het freatisch oppervlak kan gemeten worden met piëzometers. Bij gebruik van drukopnemers is het gemakkelijk om niveaus automatisch waar te nemen. Grondwaterstand fluctuaties worden echter vaak waargenomen met mechanische aterstandsrecorders, die onderhevig zijn aan een trage respons in nogal ondoorlatende lagen.

Drukhoogte

In relatieve natte condities ($-800 < h_m < 0$ cm) kan de drukhoogte direct gemeten worden met behulp van een tensiometer die verbonden is met een drukopnemer. Beneden de tensiometer range kan de drukhoogte alleen bepaald worden door indirecte methoden.

Met behulp van elektrische weerstandsblokjes (met een range van $-10.000 < h_m < -20$ cm), gemaakt van gips of nylon, verkrijgt men een indicatie van de drukhoogte door het meten van de elektrische weerstand van deze blokjes. De weerstand hangt af van de hoeveelheid water in de blokjes en het elektrisch geleidingsvermogen van het water. Het voorgaande is afhankelijk van de vocht karakteristiek van het blokje en de drukhoogte. De drukhoogte moet hierbij in evenwicht zijn met de drukhoogte van de omliggende bodem. De geleidbaarheid van het water hangt af van de hoeveelheid elektrolyten in het water, die variëren met dat van de bodemoplossing. De weerstandsblokjes moeten gekalibreerd worden tegen de drukhoogte van de bodem.

De dampdruk van het bodemwater kan worden bepaald met behulp van psychrometers. Deze dampdruk is echter afhankelijk van zowel de drukhoogte als de zoutconcentratie van het bodemwater. De meting zelf is moeilijk en er moet thermisch evenwicht zijn tussen de sensor en de omliggende bodem. Redelijke resultaten kunnen alleen worden verkregen bij zeer lage drukhoogten, d.w.z. $h_m < -2000$ cm.

Veelbelovende ontwikkelingen zijn gebaseerd op het thermische geleidingsvermogen (Phene et al., 1971; Phene et al., 1987; range $-3000 < h_m < -100$ cm) en de diëlektrische eigenschappen (Hilhorst, 1986; range $-15000 < h_m < -10$ cm) van een materiaal dat in hydraulisch evenwicht is met de omliggende bodem.

Bodemwatergehalte

Het watergehalte van een bodem kan niet direct gemeten worden met automatische opname-systemen. Een eigenschap van het bodem-water-lucht mengsel wordt bepaald en vervolgens gerelateerd aan het watergehalte. Een gevolg is dat er altijd behoefte bestaat aan calibratie. Het relateren van het watergehalte aan de drukhoogte kan tot zeer grote fouten leiden ten gevolge van hysteresis.

De veelvuldig gebruikte neutronen sonde en gamma stralings-meettechnieken kunnen niet geïncorporeerd worden in automatische systemen vanwege de veiligheidsvoorschriften.

Goede resultaten zijn verkregen met de capacitieve methode (Hilhorst, 1984) die gebaseerd is op metingen van de capaciteit van een condensator met het bodem-water-lucht mengsel als het diëlektrisch medium. Het watergehalte kan bepaald worden na veldcalibratie met een nauwkeurigheid van ± 0.02 (Halbertsma et al., 1987). Veranderingen in het watergehalte kunnen gebruikt worden voor de berekening van de dagelijkse evapotranspiratie als de onbekende term van de waterbalans (Fig.6).

Een gelijksoortige methode die gebruik maakt van de diëlektrische eigenschappen is de tijd-domein reflektometrie (TDR), toegepast in de bodemfysica door Topp et al.(1980). De voortplantingstijd van een puls die zich evenwijdig aan een golf voortbeweegt wordt gemeten. Deze tijd is afhankelijk van de diëlektrische eigenschappen van de bodem die de golfgeleider omgeeft en derhalve ook van het watergehalte van de bodem. De bepaling van deze tijd is moeilijker dan de frequente metingen van de capacitieve methode. De nauwkeurigheid van beide methoden is vergelijkbaar. Opgemerkt wordt dat de TDR methode gebruikt kan worden voor vele bodems zonder calibratie, omdat de relatie tussen de schijnbare diëlektrische constante en het volumetrisch watergehalte slechts beperkt afhankelijk is van bodemtype, bodemdichtheid, bodemtemperatuur en zoutgehalte (Topp en Davis, 1985a,b,c). Topp et al.(1980) rapporteerden een gemeten volumetrisch watergehalte met een nauwkeurigheid van $\pm 0,02$.

Door de steeds toenemende computer rekencapaciteit kunnen numerieke simulatiemodellen de fysische processen met toenemende nauwkeurigheid beschrijven in ruimte en tijd. Dit onderstreept de toekomstige behoefte naar een meer continue en nauwkeurige data verzameling. Slechts automatische opnamesystemen kunnen dit bewerkstelligen.

Veel data acquisitie-eenheden zijn commercieel beschikbaar. Deze eenheden kunnen als computer gekoppelde eenheden gebruikt worden of als onafhankelijke eenheid met data opslag mogelijkheden. Het gebruik van deze eenheden legt geen beperking op aan het waarnemen en opslaan van metingen. Beperkingen echter, liggen vooral aan de kant van de sensoren die de bodemwater status moeten vertalen in elektrische signalen.

Toenemende belangstelling geniet de ruimtelijke distributie van meetlokaties voor het verkrijgen van statistisch representatieve data sets. Hier lijkt de link met 'remotely sensed' bodem-watergehalten van toplagen een nieuwe richting in te slaan (Gurney en Camillo, 1984).

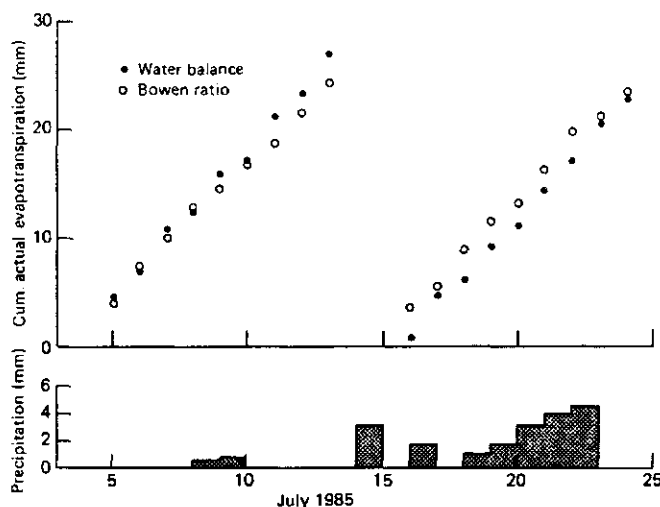


Fig.6: Cumulatieve evapotranspiratie van maïs voor twee 9-daagse perioden berekend met een waterbalans benadering en met de Bowen ratio-methode. De bergingsverandering van het profiel werd bepaald met de capaciteits bodemwatergehalte-meter met een nauwkeurigheid van 0,02 (naar Halbertsma et al., 1987).

Werkelijke verdamping

Er zijn drie potentiële plaatsen om de werkelijke evapotranspiratie ET in te meten: de bodem, de plant en de atmosfeer. Bodem-gebaseerde metingen, waar de evapotranspiratie direct geschat wordt als de restterm van de waterbalansvergelijking (30), zijn het meest populair.

De verandering in waterberging ΔW voor een gegeven tijdsperiode Δt , kan worden beschreven als het verschil van instroom, d.w.z. infiltratie I , netto opwaartse stroming door de onderkant van de wortelzone of het bodemprofiel Q , en uitstroom d.w.z. evapotranspiratie ET :

$$\Delta W = I + Q - ET \quad (30)$$

Het probleem met verg.(30) is dat het zeer moeilijk is om Q goed te schatten. Deze stroming is de resultante van capillaire opstijging en perkolatie.

Vanwege onzekerheden in de schatting van Q moet de periode voor berekening van de evapotranspiratie term verg.(30), lang genoeg zijn (Halbertsma et al.1987).

Een veel gebruikte techniek voor meting van ET via bodemwaterbalansen is het gebruik van lysimetrie. De precisie van een weegbare lysimeter voorziet in de standaard waartegen andere ET -meettechnieken worden beoordeeld. Er zijn echter wel problemen inherent aan het gebruik van lysimeters. Deze omvatten de kosten van installatie, het beperkte aantal lokaties die onderhouden kunnen worden, de tijd benodigd voor het testen van verschillende gewassen, en de zorg die genomen moet worden voor handhaving van lysimeter condities die representatief zijn voor het omliggende veld.

Een andere meetplaats is de plant zelf. Mogelijke benaderingen omvatten xyleem-stromingsmetingen en remote sensing technieken. Transpiratie metingen negeren echter de bodem-evaporatie component van ET .

Remote sensing kan voorzien in een indirecte meting van ET . Door het gebruik van thermisch-infrarood beelden van satellieten of luchtfotowaarnemingen worden oppervlakte-temperaturen verkregen. Deze worden dan met energiebalansmodellen getransformeerd in dagelijkse evapotranspiratie waarden. Nieuwenhuis et al. (1985) stelden voor om van instantane temperatuurverschillen, gemeten rond 12 uur 's middags, uit te gaan. De verschillen in temperatuur hebben hierbij betrekking op een gewas dat transpireert met een beperkte beschikbaarheid van bodemvocht en een gewas dat transpireert onder optimale bodemvocht condities: $(T_c - T_c^*)$. Genoemde auteurs relateerden daarbij de relatieve 24-uurs verdamping aan bovengenoemde gemeten stralings-temperatuurverschillen rondom het middaguur volgens de berekening:

$$\frac{ET}{ET_p} = 1 - B (T_c - T_c^*) \quad (31)$$

waarin ET en ET_p respectievelijk de werkelijke en potentiële 24-uurs evapotranspiratiesnelheid weergeven en B een gewasafhankelijke calibratieconstante is (Thunnissen, 1984; Nieuwenhuis et al., 1985).

De laatste groep van methoden wordt weergegeven door technieken voor atmosferische metingen van ET in de micro-omgeving van de plant. Deze omvatten o.a. de Bowen-ratio methode (Campbell Scientific Inc., 1987; Tanner en Greene, 1987) en de eddy-correlatie methode (Brutsaert, 1982; Kizer en Elliott, 1987).

Preferente stroming en hysteresis

Preferente stroming

De meeste simulatiemodellen voor de onverzadigde zone veronderstellen dat de bodem isotroop en homogeen is. Het feit dat beide veronderstellingen niet waar zijn werd in de 19^e eeuw al onderkend (Schumacher, 1864; Lawes et al., 1882, zoals aangegeven door Beven en Germann, 1982). In veldbodems is het watertransport vaak heterogeen waarbij hoeveelheden van het infiltratiewater zich sneller verplaatsen dan het gemiddelde vochtfront. Dit heeft belangrijke consequenties voor de simulering van de veldbodem-waterbalans en daarom ook voor de berekening van gewaswaterverbruik, gewasopbrengst, transport van opgeloste stoffen en vervuiling van grondwater en ondergrond. In sommige bodems vindt preferente stroming plaats door grote poriën in een onverzadigde bodemmatrix, een proces dat bekend staat als 'bypass flow' of kortsluiting (Hoogmoed en Bouma, 1980). In andere bodems variëren stroomsnelheden meer geleidelijk, terwijl de matrixporiën en preferente stroombanen niet gemakkelijk te onderscheiden zijn.

Preferente stroming van water door de onverzadigde bodem kan worden veroorzaakt door verschillende mechanismen waarvan de aanwezigheid van niet-capillaire macroporiën er één van is (Bouma, 1981; Bouma en De Laat, 1981; Beven en Germann, 1982). Dit type macroporositeit kan veroorzaakt worden door het krimpen en scheuren van de bodem door plantwortels, bodemfauna of grondbewerkingen. Het voorkomen van vochtfront instabiliteit, zoals veroorzaakt door luchtinsluiting voorafgaande aan het vochtfront of door waterafstoting van

de bodem (Raats, 1973; Hendrickx et al., 1988) kan ook beschouwd worden als preferente stroming. Ongeacht de oorzaak van preferente stroming, het resultaat is dat de basis partiële differentiaalvergelijkingen (10), welke de stroming in een het bodemmatrix-domein beschrijft, aanpassing behoeft.

Hoogmoed en Bouma (1980) ontwikkelden een model voor de simulatie van infiltratie in leibodems met krimscheuren, met inachtneming van preferente stroming. Het model combineert verticale en horizontale infiltratie. Het is fysisch gebaseerd maar werd slechts toegepast op 20 cm grote bodemmonsters; in veldbodems is het model (nog) niet toegepast. Van Aelst et al. (1986) maakten het SWATRE model geschikt voor gebruik in scheurende kleien voor berekening van waterstroming door scheuren die afhankelijk gesteld zijn van het watergehalte in de toplaag. Bronswijk (1988) introduceerde de krimpkarakteristiek in het simulatiemodel FLOWEX (Buitendijk, 1984). Dit model berekent zwel en krimp en corresponderende scheuring en inklinking in relatie tot veranderingen in het watergehalte. In deze benadering wordt preferente stroming door krimscheuren berekend in afhankelijkheid van zowel het scheuropervlak aan het bodemoppervlak als de maximale infiltratiesnelheid van de bodemmatrix tussen de scheuren. Een één-jarig veldexperiment liet goede overeenstemming zien tussen de simulatie en veldwaarnemingen van zowel de waterbalans, de scheuring als klink van een zware kleibodem.

De opsplitsing van bodemwater in bodemmatrix en macroporiën, en de voorbestemming van het water om door de macroporiën omlaag te stromen wordt in de diverse bovengenoemde modellen op verschillende wijze behandeld. Het algemeen gebruikte principe van al deze modellen vormt in hoofdzaak het twee-domein concept. Dit concept is echter afgewezen door Beven en Germann (1984) die de kinetische golftheorie toepassen om waterstroming te modelleren door bodems met grote aantallen wisselende macroporiegroottes. Hun benadering voorspelt wel de uitstroomsnelheden van het vocht uit onverzadigde bodemmonsters, maar niet de profielen van het bodemvocht.

Een belangrijk aspect van preferente stroming is de interactie tussen het water in de bodemmatrix en het water in de macroporiën. In sommige modellen wordt de totale preferente stroming geaccumuleerd op de bodem van de macroporiën en dan toegevoegd aan de onverzadigde zone op de desbetreffende diepte (Bronswijk, 1988; Peerboom, 1987; Van Aelst et al., 1986). Een meer algemeen model is voorgesteld door Kabat, Peerboom en Bronswijk (1988, pers. commun.) die preferente stroming koppelde aan matrix stroming m.b.v. een uitbreiding van verg.(12):

$$\frac{1}{C(h_m)} \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h_m) \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right] - \frac{S}{C(h_m)} + \frac{B}{C(h_m)} - \frac{\partial h_m}{\partial t} \quad (32)$$

waarin B een bron-term van bodemwater voorstelt t.g.v. horizontale infiltratie, of een sink-term voor evaporatie door de wanden van de macroporiën. Het resulterende model is weergegeven in Fig.7. Omdat deze benadering fysisch gebaseerd is lijkt deze veelbelovend en algemeen toepasbaar. De kwantificering van de B -term in verg.(32) is een moeilijk probleem en vraagt om een aantal simplificaties indien het gebruik van één-dimensionaal Richards type stromingsmodel wordt overwogen. Ook kan een quasi twee-dimensionaal deterministische benadering worden gevolgd voor een schatting van de B -term.

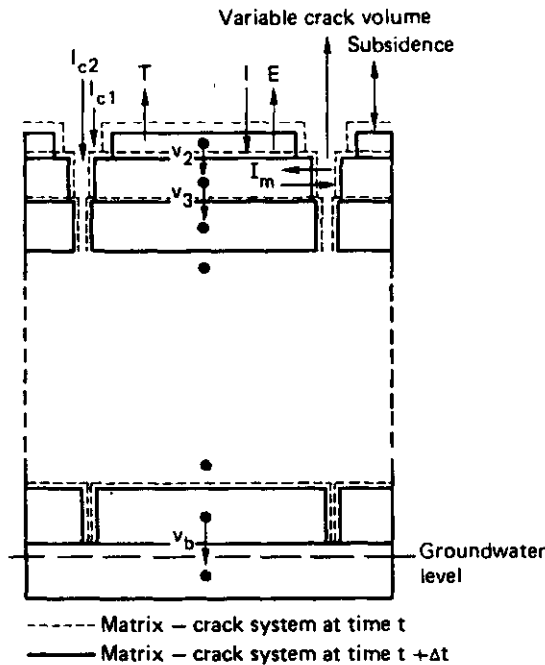


Fig.7: Schematische representatie van een simulatiemodel voor watertransport in onverzadigde, scheurende bodems. I Representeert de infiltratiesnelheid in de bodemmatrix, $I_{c,i}$ vormt het gedeelte van de totale scheur-infiltratie veroorzaakt door een neerslagintensiteit groter dan de infiltratiesnelheid van de bodemmatrix, $I_{c,2}$ het gedeelte van de totale scheur-infiltratie veroorzaakt door neerslag direct in de scheuren, I_m is de horizontale flux door de wanden van de macroporiën, E is de actuele evaporatie, T is de actuele transpiratie, v is de Darcy-flux tussen twee knooppunten en v_b is de flux aan de onderrand van het systeem (naar Bronswijk, 1991).

Hysteresis

De meeste simulatiemodellen negeren het effect van hysteresis. Het is echter al lange tijd bekend dat hysteresis in de bodemwater-retentiecurve, ook wel pF-curve genoemd, invloed heeft op de waterbeweging in de bodem, speciaal bij frequente wisselingen van bodembewochtiging en opdroging (Milly, 1982; Hopmans en Dane, 1986). Het fenomeen hysteresis beïnvloedt de $K(\theta)$ -relatie slechts weinig en wordt in het algemeen dan ook bij deze relatie genegeerd.

De hoofdoorzaken voor hysteresis in de Pf-curve zijn de complexiteit van de porieruimte-geometrie, de aanwezigheid van ingesloten lucht, krimp en zwel en thermische gradiënten. De eerste mathematische modellen voor modellering van hysteresis zijn gebaseerd op het zogenaamde onafhankelijke domein concept (Poulavassilis, 1962; Topp en Miller, 1966). De basis aannamen van dit concept zijn (1) een verschil in watervolume van elke porie hangt niet af van de drukhoogte en (2) de porieruimte is opgebouwd uit poriën of domeinen waarbij elke poriegrootte bepaald wordt door twee drukhoogten.

Topp (1971) testte het onafhankelijke domein concept en rapporteerde discrepanties indien

een hoog bodemwatergehalte werd beschouwd. Hij loste het probleem op (zie ook Poulavassilis en Childs, 1971) door de introductie van een domein afhankelijkheidsfactor, zodanig dat het opdrogen en bevochtigen van enkele poriën afhankelijk werd gemaakt van de omringende porie status. Mualem (1974) introduceerde een model om hysteresis te berekenen op basis van het onafhankelijke domein principe. In 1984 definieerde hij een domein afhankelijkheidsfactor als de ratio tussen het volume van poriën werkelijk geleegd tot het volume wat geleegd zou kunnen worden indien alle poriën voldoende lucht zouden ontvangen van de omliggende poriën. In Mualem's model wordt het volumetrisch watergehalte voor elke waarde van de drukhoogte berekend voor elk omslagpunt van de pF-curve. De voornaamste opdrogings en bevochtigingscurve evenals de domein afhankelijkheidsfactor dienen a-priori bepaald te worden (Mualem, 1974). Tussen de hoofdcurven liggen scanningcurven, volgend op elke verandering in externe condities. Hopmans en Dane (1986) incorporeerden het hysteresis model van Mualem in een bodem-water stromingsmodel waarmee zij het gecombineerde effect van hysteresis en temperatuur op de beweging van het bodemwater onderzochten.

Daar er oneindig veel scanningcurven bestaan kan de differentiële bodemwatercapaciteit [zie ook verg.(12)] niet eenduidig bepaald worden. Hier kan de differentiatie van Mualem's uitdrukking m.b.t. de drukhoogte op elk punt van de scanningcurve gebruikt worden. In het algemeen worden berekeningen van bevochtigings en opdrogings-scanningcurven uitgevoerd met een referentietemperatuur, met gebruikmaking van experimenteel verkregen relaties voor de conversie tot de actuele temperatuur (Hopmans en Dane, 1985).

Een gelijksoortige analyse zoals hierboven beschreven, werd gebruikt door Ghali (1986) die hysteresis en de simultane stroming van water en warmte beschouwde, waardoor het modelleren van multi-dimensionale niet-stationaire stroming mogelijk was. Door de hoge flexibiliteit van Ghali's model kunnen invloeden van de hysteresis termen op de verschillende niet-stationaire stromingssituaties onderzocht worden.

Vanuit modelleringsoogpunt zijn de resultaten van Hopmans en Dane (1986) interessant, daar bleek dat het effect van hysteresis op de bodemwater distributie afhankelijk was van het type bovenrandvoorwaarde.

Uitgezonderd de gegeven voorbeelden zijn succesvolle pogingen om hysteresis in dynamische niet-stationaire modellen in te bouwen slechts schaars. Echter, enige van de praktische problemen, b.v. lage druk/zeer frequente irrigatie of significante krimp/zwel, bepalen duidelijk een range van stromingssituaties waar hysteresis niet kan worden genegeerd. Voor het geval waterretentie niet waarneembaar wordt beïnvloed door hevige krimp/zwel en water adsorptie-desorptie, vallen de buitenste hysteresiscurven zelfs voor de hoogste drukhoogten niet samen (Shcherbakov, 1985). Onder dergelijke condities behoeven alle huidige hysteresismodellen aanpassingen.

Voorbeelden van toepassingen

Voorbeeld 1: Kwel door een aarden dam

Neuman et al.(1975) en Feddes et al.(1975) hebben het model UNSAT2 ontwikkeld voor het oplossen van niet-stationaire stroming in verzadigde-onverzadigde bodems door een Galerkin type eindige elementen benadering. Het model beschrijft stroomgebieden met ongelijke randen voor niet-uniforme bodems met een arbitraire mate van lokale anisotropie. Stroming kan verondersteld worden in een vertikaal vlak, een horizontaal vlak, of in een drie-dimensionaal gebied met radiale symmetrie. Een multi-dimensionale sink-term in het model voorziet in de wateropname door plantenwortels. UNSAT2 is toegepast in complexe veldstudies van agrarische en civieltechnische problemen. Davis en Neuman (1983) gebruiken UNSAT2 voor de berekening van infiltratie door een aarden dam.

De aarden dam in Fig.8 heeft een hellende klei kern, een zandige lenzen en is voorzien van een drainage doek. De volgende aannames zijn gemaakt: (1) er is geen mogelijkheid voor evaporatie of infiltratie aan het damoppervlak, (2) het drainage doek is vrij drainerend, (3) de onderkant van de dam vormt een ondoorlatende rand, en (4) op tijdstip nul is het water-niveau instantaan gestegen tot 4 m. boven de onderkant van de dam. Op $t = 184$ uur begint de waterspiegel met een constante snelheid te stijgen, op $t = 374$ uur is een hoogte van 12 m. bereikt. De hoogte blijft nadien constant.

Figuur 7a geeft een dwarsdoorsnede van de dam voorzien van het toegepaste eindige element mesh. Figuur 7b laat de gesimuleerde uitvoer zien, d.w.z. de in de tijd voortschrijdende waterspiegel in de dam. Een belangrijk aspect van dit probleem is b.v. het vaststellen van de stabiliteit van het benedenstroomse talud.

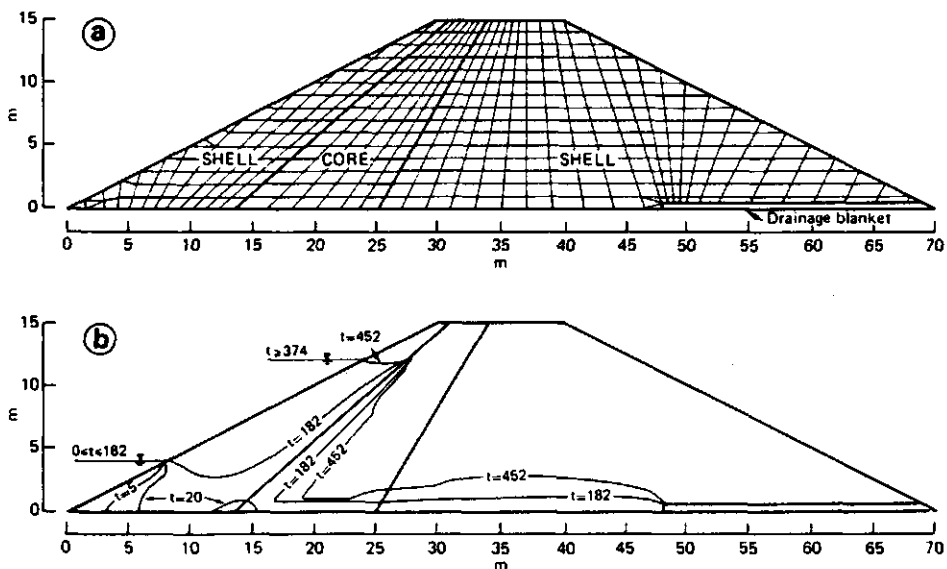


Fig.8: Kwel door een aarden dam zoals gesimuleerd met het model UNSAT2 (naar Davis en Neuman, 1983). Dwarsdoorsnede van de dam en het toegepaste eindige elementen grid (a) en de in de tijd voortschrijdende waterspiegel in de dam (b)

Voorbeeld 2: Watergebruik en opbrengst van aardappels

Niet stationaire stroming in een heterogeen bodem-wortel systeem dat, al dan niet, onder invloed staat van grondwater kan beschreven worden door het model SWATRE (Feddes et al., 1978; Belmans et al., 1983). De potentiële en actuele groeisnelheid van een aardappel-gewas met optimale nutriënt voorziening kan worden berekend met het model CROPR (Feddes et al., 1978). Feddes et al. (1984) combineerden beide modellen in één model, SWACRO, waarmee simulaties van de actuele aardappelgewasontwikkeling gegenereerd worden.

Met behulp van dit model zijn modelsimulaties van het waterverbruik en de droge stof opbrengst van aardappels. Voor details wordt verwezen naar Kabat et al. (1988b). Gedurende 1981 en 1982 werd een aardappelgewas verbouwd op een humeuze toplaag met een grof-zandige onderlaag. Gedurende beide groeiseizoenen werd een complete dataset verzameld bestaande uit meteorologische metingen, bodemfysische karakteristieken, vocht toestand in de gelaagde bodem en gewaskarakteristieken. De grondwaterstand was te diep om het plant - bodem systeem te kunnen beïnvloeden. Er werd berekening toegepast waarbij verschillende uitdrooggrenzen werden toegelaten. Zowel de gesimuleerde als gemeten waarden van de cumulatieve evapotranspiratie voor het groeiseizoen 1981 zijn geplot in Fig.9a. De waterberging in de wortelzone gedurende hetzelfde seizoen is weergegeven in Fig.9b. In Fig.9c. is met de plantverdamping als beperkende factor, de gedurende het groeiseizoen van 1981 gesimuleerde en gemeten opbrengst (zowel totale droge stof- en knolopbrengst) gepresenteerd.

Daarnaast werden nog aanvullende simulaties voor wisselende irrigatie regimes uitgevoerd om het optimale irrigatie regime vast te kunnen stellen (Fig.9d). Bij de simulaties voor de groeiseizoenen 1981 en 1982 bedroeg de natuurlijke neerslag respectievelijk 209 en 182 mm.

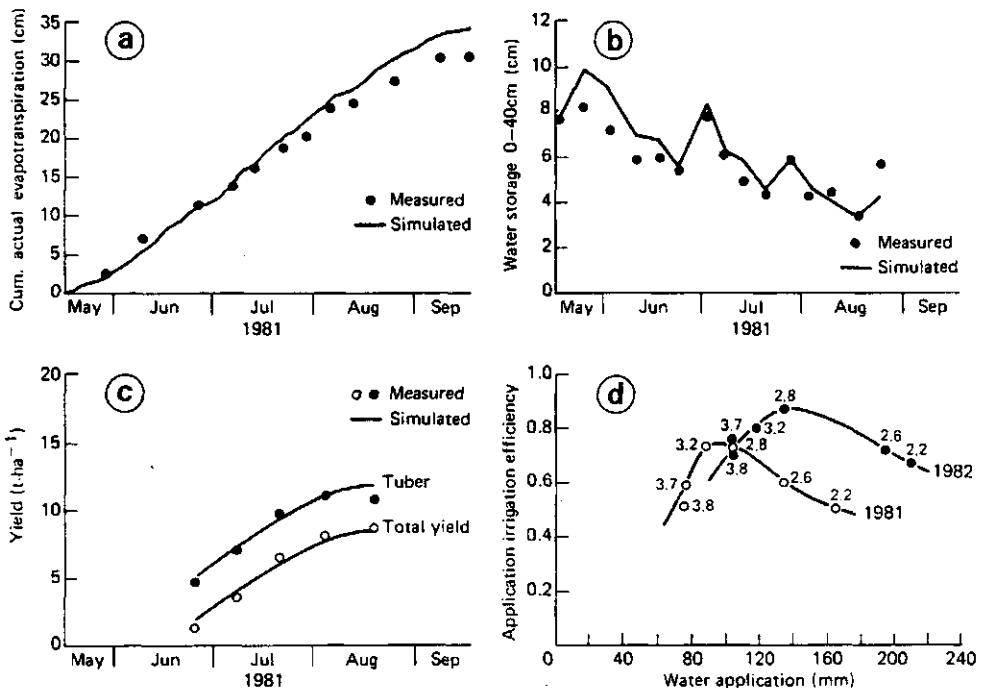


Fig.9: Waterverbruik en aardappelopbrengst zoals gesimuleerd met het model SWACRO (naar Kabat et al., 1988b). Gesimuleerde cumulatieve actuele evapotranspiratie (a) en waterberging in de wortelzone (b) gedurende het groeiseizoen 1981 vertonen goede overeenkomst met de in-situ gemeten waarden. Berekende en gemeten droge stof opbrengsten zijn gepresenteerd in (c). Wisselende irrigatie regimes zijn gesimuleerd voor droogtelimieten zoals aangegeven bij de lijnen (uitgedrukt in $pF = \log h_m$) zodat het optimale irrigatie regime kon worden vastgesteld (d).

De akuele transpiratie werd berekend en de toegepaste irrigatie-efficiëntie (de ratio van het verschil in transpiratie tussen geïrrigeerd en niet geïrrigeerd gewas / de gegeven hoeveelheid water) werd uitgezet tegen de netto totale irrigatiegift. De verkregen waterverbruiksefficiëntie curven representeren, ondanks hun afhankelijkheid van een bepaalde combinatie van gewas, bodem en klimaat, unieke informatie voor studies over irrigatie management (Kabat et al., 1988a).

Voorbeeld 3: Watervoorzieningsplan

De economische haalbaarheid van het vergroten van de wateraanvoer voor de landbouw in een regio in het noordoostelijk gedeelte van Nederland werd onderzocht. (Werkgroep TUS-1-PLAN, 1988).

Een range van watervoorzieningsplannen werd geëvalueerd door gebruik te maken van een modelbenadering welke als volgt samengevat kan worden: (1) de regio is onderverdeeld in 200 verschillende sets van combinaties van bodemtype, hydrologische eigenschappen en landgebruik; (2) elke set (zie Fig.10)

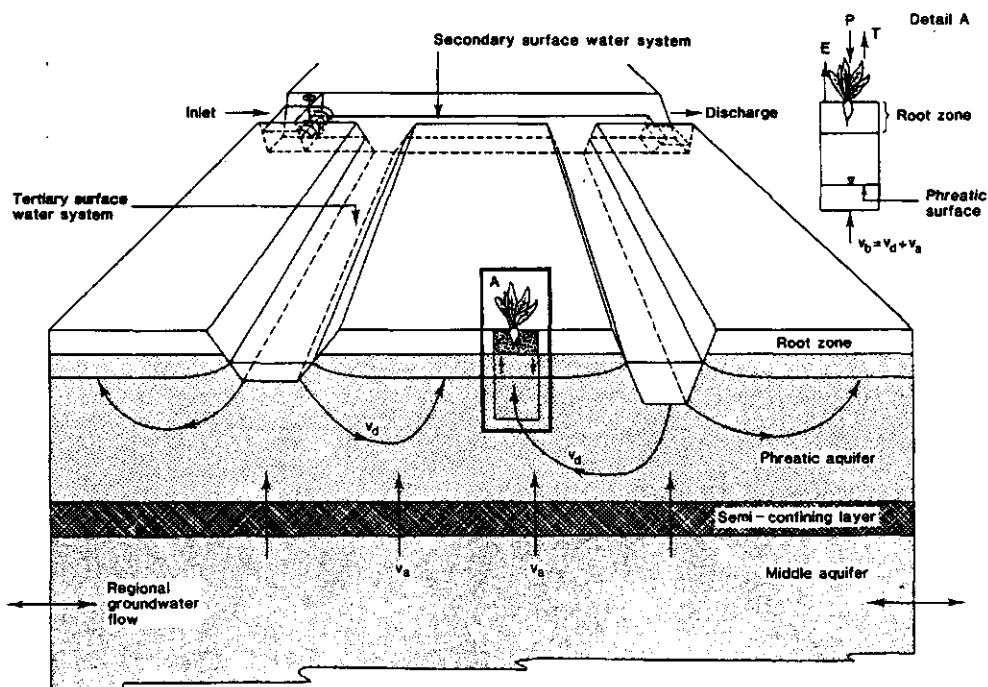


Fig.10: Schematische weergave van het gemodelleerde hydrologische systeem zoals gebruikt in het wateraanvoerplan (naar Van Bakel, 1966). Effecten van veranderingen van manipulatie van het oppervlaktewaterpeil op grondwaterstand en gewastranspiratie werden gesimuleerd. De bovenrand conditie bestaat uit transpiratie (T) en bodemevaporatie (E). Deze zijn berekend met standaard-meteorologische data, bodemfysische data en informatie over gewas. De beneden randvoorwaarde [Cauchy conditie, zie verg.(24)] is de volumefluxdichtheid door deze rand, v_b .

van het gebied werd gemodelleerd met een speciale versie van het SWATRE-model, d.w.z. uitgebreid met een module voor open waterpeil aanpassingen; operationele regels voor open waterpeil aanpassingen werden verkregen uit een case study; (3) met een historisch bestand van weercondities over 1954-1983 werd het effect van oppervlaktewateraanvoer op ondergrondse infiltratie en beregening op de actuele transpiratie berekend voor elke set; en (4) de resultaten werden vertaald in effecten op gewasopbrengst en agrarische opbrengsten (zie Fig.11). Op deze basis konden gunstige gebieden voor watervoorziening worden gelokaliseerd.

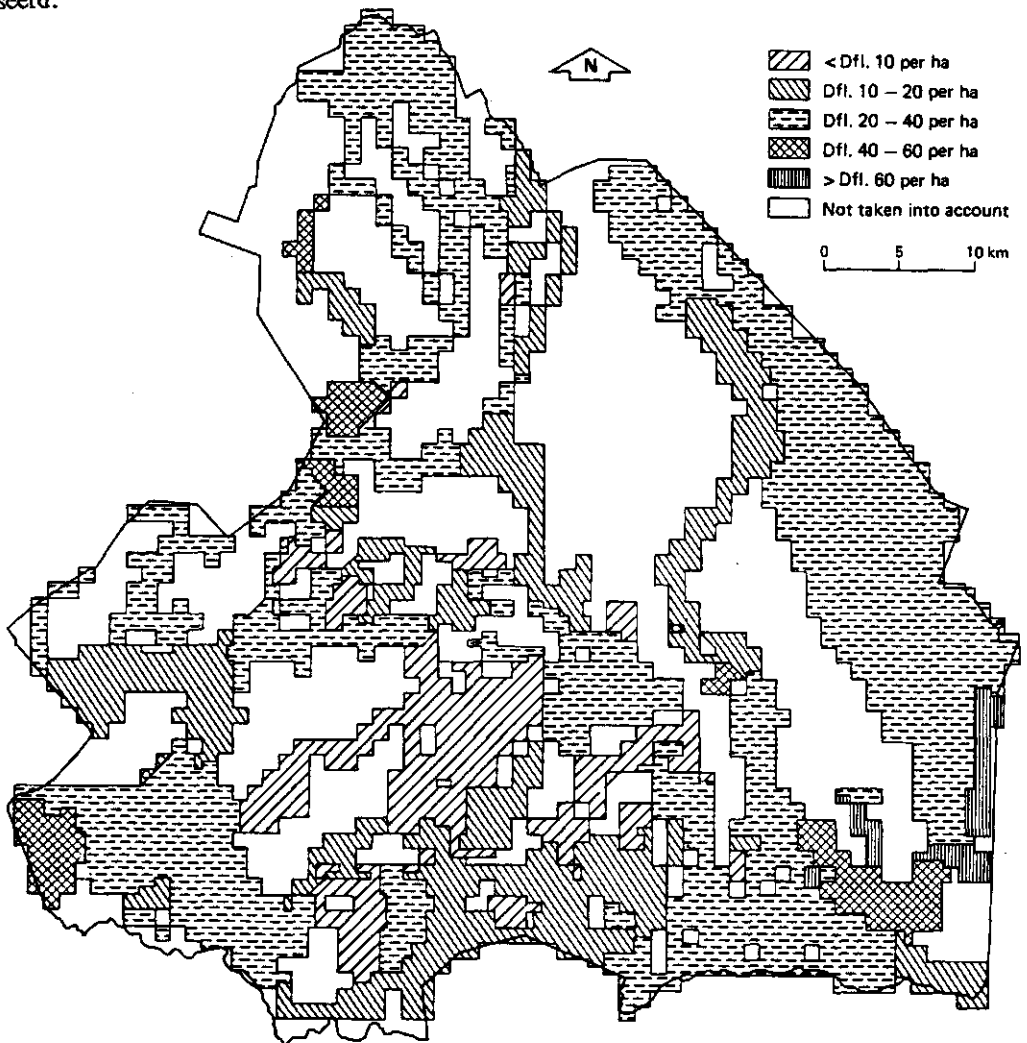


Fig.11: Agrarische opbrengsten ($f \text{ ha}^{-1}$) als gevolg van aanvoer van oppervlaktewater naar het proefgebied, zoals geëvalueerd met behulp van simulatie (naar Werkgroep TUS-10PLAN, 1988).

Voorbeeld 4: Integratie van remote sensing met een waterbalans-simulatiemodel

Een methode voor het automatisch karteren van evapotranspiratie uit digitaal opgeslagen reflectie en thermische beelden werd getest in combinatie met simulatiemodellen. Gewas-temperaturen verkregen van warmte beelden werden getransformeerd tot dagelijkse evapotranspiratie waarden door gebruik te maken van energiebalansmodellen (Soer, 1980; Nieuwenhuis et al., 1985). Deze waarden, echter, karakteriseren de hydrologische condities op slechts één dag, terwijl hydrologen meer geïnteresseerd zijn in de cumulatieve effecten gedurende het gehele groeiseizoen op de gewasopbrengst. Het SWATRE-model werd gebruikt om te onderzoeken in hoe verre de actuele evapotranspiratie, op de desbetreffende dag, representatief is voor het gehele groeiseizoen. De dagelijkse waarden van evapotranspiratie verkregen uit warmte beelden werden vergeleken met de gesimuleerde waarden op dezelfde dag, voor verschillende lokaties in het studiegebied. Twaalf van de veertien lokaties toonden goede overeenstemming (zie Fig.12). Geconcludeerd werd dat een belangrijke verbetering van de hydrologische beschrijving van een gebied kan worden bereikt door de combinatie van simulatie resultaten van een model voor de onverzadigde zone met remote sensing beelden (Nieuwenhuis, 1986).

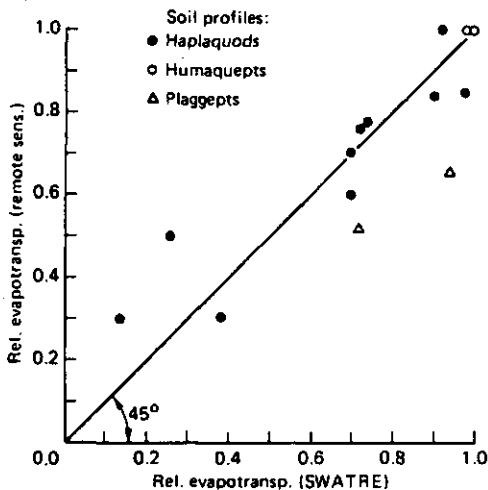


Fig.12: Relatieve 24-uurs evapotranspiratie snelheden ET/ET_0 , zoals verkregen uit de remote sensing benadering en zoals berekend met het SWATRE-model voor veertien graslandvelden op drie verschillende bodemprofielen. (bewerkt naar Nieuwenhuis, 1986).

- Amerman, C.R., 1976. Soil water modelling. I. A generalised simulator of steady two-dimensional flow. *ASAE Trans.* 19(3): 466-470.
- Belmans, C., Wesseling, J.G. and Feddes, R.A., 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: WATRE. *J. Hydroj.* 63: 271-286.
- Beven, K. and Germann, P., 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.*, 18: 1311-1325.
- Beven, K. and Germann, P., 1984. A distribution function model of channelling flow in soils based on kinematic wave theory. In: J. Bouma and P.A.C. Raats (Editors), *ISSS Symposium on Water and Solute Movement in Heavy Clay Soils*. ILRI Publ., 37: 89-100.
- Boels, D., Van Gils, J.B.H.M., Veerman, G.J. and Wit, K.E., 1978. Theory and system of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivities. *Soil Sci.*, 126: 191-199.
- Boesten, J.J.T.I. and Stroosnijder, L., 1986. Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate. *Neth. J. Agric. Sci.*, 34: 75-90.
- Bouma, J., 1981. Soil morphology and preferential flow along macropores. *Agric. Water Manage.*, 3: 235-250.
- Bouma, J. and De Laat, P.J.M., 1981. Estimation of the moisture supply capacity of some swelling clay soils in the Netherlands. *J. Hydrol.*, 49: 247-259.
- Braester, C., Dagan, G., Neuman, S.P. and Zaslavskv, D., 1971. A survey of the equations and solutions of unsaturated flow in porous media. *First Annual Rep. Hydraul. Eng. Lab., Technion, Haifa*, 176pp.
- Brebbia, C.A. and Walker, S., 1980. *Boundary element techniques in engineering*. Newnes-Butterworths, London, 210pp.
- Bronswijk, J.J.B., 1988. Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. *J. Hydrol.*, 97: 199-212.
- Bronswijk, J.J.B., 1991. Magnitude, modelling and significance of swelling and shrinking processes in clay soils. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, 145 pp.
- Brutsaert, W.H., 1982. *Evaporation into the atmosphere. Theory, history and applications*. Reidel, Dordrecht, 289 pp.
- Buckingham, E., 1907. Studies on the movement of soil moisture. *USDA Bur. Soils Bull.*, 38: 61 pp.
- Buitendijk, J., 1984. FLOWEX: een numeriek model voor simulatie van verticale stroming van water door onverzadigde gelaagde grond. Nota 1494, *Inst. Land Water Manage. Res.*, Wageningen, 61 pp.
- Campbell, G.S., 1985. Soil physics with basic: transport models for soil-plant systems. (Developments in soil science, 14.) Elsevier, Amsterdam, 150 pp.
- Campbell Scientific Inc., 1987. CSi eddy correlation and Bowen ration instrumentation. Preliminary version. Campbell Scientific Inc., II pp.
- Davis, L.A. and Neuman, S.P., 1983. Documentation and users guide: UNSAT2 - variably saturated flow model. Water, Waste and Land, Inc., Fort Collins, Colo., 133 pp.
- De Willigen, P. and Van Noordwijk, M., 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. Ph.D. Thesis, Agricultural University Wageningen, 282 pp.
- Dirksen, C., 1985. Relationship between root uptake-weighted mean soil water salinity and total leaf water potentials of alfalfa. *Irr. Sci.*, 6: 39-50.
- Dirksen, C., 1987. Water and salt transport in daily irrigated root zone. *Neth. J. Agric. Sci.*, 35: 395-406.
- Edwards, W.M., Van der Ploeg, R.R. and Ehlers, W., 1979. A numerical study of the effects of noncapillary-sized pores upon infiltration. *Soil Sci. Soc. Am.*, 43: 851-856.
- Ernst, L.F., 1962. Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen. Ph.D. Thesis. Rijksuniversiteit Utrecht, PUDOC, Wageningen.
- Ernst, L.F., 1978. Drainage of undulating soils with high groundwater tables, I. A drainage formula based on a constant head ratio. II. The variable head ratio. *J. Hydrol.*, 39: 14-50 and *Tech. Bull.* 106, *Inst. Land Water Manage. Res.*, Wageningen.
- Feddes, R.A., 1981. Water use models for assessing root zone modification. In: *Modifying the plant root environment*. ASAE, St. Joseph, Monogr. 4: 347-390.
- Feddes, R.A., 1987. Simulating water management and crop production with the SWACRO model. Third International Workshop on Land Drainage, Ohio State University, Columbus, Ohio, 14 pp.
- Feddes, R.A., Bresler, E. and Neuman, S.P., 1974. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems. *Water Resour. Res.*, 10(6): 1199-1206.
- Feddes, R.A., Neuman, S.P. and Bresler, E., 1975. Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots. 11. Field applications. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.*, 39: 231-237.

- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. PUDOC, Wageningen, 189 pp.
- Feddes, R.A., Wesseling, J.G. and Wiebing, W., 1984. Simulation of transpiration and yield of potatoes with SWACRO model. In: F.A. Winiger and A. Stockli (Editors), Ninth Tri-annual Conference of the European Association of Potato Research (EAPR), Interlaken, pp. 346-348.
- Gardner, W.R., 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, 85: 228-232.
- Gardner, W.R., 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.*, 89: 63-73.
- Gardner, W.R. and Widtsoe, J.A., 1921. The movement of soil moisture. *Soil Sci.*, 11: 215-232.
- Ghali Sami Ghali, 1986. Mathematical modeling of soil moisture dynamics in trickle irrigated fields. Ph.D. Thesis, University of Southampton, 322 pp.
- Giraldez, J.V. and Sposito, G., 1984. Rainfall infiltration into swelling soils. In: J. Bouma and P.A.C. Raats (Editors), ISSS Symposium on Water and Solute Movement in Heavy Clay Soils. ILRI Publ., 37: 137-151.
- Gradman, H., 1928. Untersuchungen über die Wasserverhältnisse des Bodens als Grundlage des Pflanzenwachstums. *Lehrb. Wiss. Bot.*, 69: 1-100.
- Groenevelt, P.H. and Bolt, G.H., 1972. Water retention in soil. *Soil Sci.*, 113: 238-245.
- Gurney, R.J. and Camillo, P.J., 1984. Modelling daily evapotranspiration using remotely sensed data. *J. Hydrol.*, 69: 305-324.
- Halbertsma, J.M., Przybyla, C. and Jacobs, A., 1987. Application and accuracy of a dielectric soil water content meter. *Proc. Int. Conf. Measurement of Soil and Plant Water Status*, Logan, Utah, Vol. i: ii-5.
- Hanks, R.J., Klute, A. and Bresler, E., 1969. A numeric method for estimating infiltration, redistribution, drainage, and evaporation of water from soil. *Water Resour. Res.*, 5(5): 1064-1069.
- Hayhoe, H.N. and De Jong, R., 1988. Comparison of two soil water models for soybeans. *Can. Agric. Eng.*
- Hendrickx, J.M.H., Dekker, L.W., Bannink, M.H. and Van Ommen, H.C., 1988. Significance of soil survey for agrohydrological studies. In: J.W. van Hoorn (Editor), *Proceedings Symposium Agrohydrology*, Wageningen.
- Hilhorst, M.A., 1984. A sensor for the determination of the complex permittivity of materials as a measure for the moisture content. In: P. Bergveld (Editor), *Sensors and Actuators*. Kluwer, Deventer, pp. 79-84.
- Hilhorst, M.A., 1986. Device for measuring moisture tension of a substrate. European patent pending no. 86202367.8.
- Hoogmoed, W.B. and Bouma, J., 1980. A simulation model for predicting infiltration into cracked clay soil. *Soil Sci. Soc. Am.*, J., 44: 458-461.
- Hopmans, J.W., 1987a. Scaling of soil hydraulic properties: a comparison of techniques. *Soil Sci. Soc. Am.*, J. (submitted).
- Hopmans, J.W., 1987b. Some major modifications of simulation model SWATRE. *Agricultural University Wageningen. Publ.* 79: 73 pp.
- Hopmans, J.W. and Dane, J.H., 1985. Effect of temperature dependent hydraulic properties on soil water movement. *Soil Sci. Soc. Am.*, J., 49: 51-58.
- Hopmans, J.W. and Dane, J.H., 1986. Combined effect of hysteresis and temperature on soil-water movement. *J. Hydrol.*, 83: 161-171.
- Hornung, U. and Messing, W., 1980. A predictor corrector alternating-direction implicit method for two-dimensional unsteady saturated-unsaturated flow in porous media. *J. Hydrol.*, 47: 317-323.
- Hornung, U. and Messing, W., 1981. Simulation of two dimensional saturated/unsaturated flows with an exact water balance. *Proc. Euromech. 143*, Delft, Balkema, Rotterdam, pp. 91-96.
- Jensen, K.H., 1983. Simulation of water flow in the unsaturated zone including the root zone. *Inst. Hydrodyn. Hydraul. Eng., Lundby*, Pap. 33.
- Jury, W.D., Russo, D., Sposito, G. and Elabo, H., 1987a. The spatial variability of water and solute transport properties in unsaturated soil. I. Analysis of property variation and spatial structure with statistical models. *Hilgardia* 55(4): 1-32.
- Jury, W.D., Russo, D. and Sposito, G., 1987b. The spatial variability of water and solute transport properties in unsaturated soil. II. Scaling models of water transport. *Hilgardia* 55 (4): 33-56.
- Kabat, P., Van Den Broek, B.J. and Wesseling, J.G., 1988a. Irrigation scheduling by use of water balance/crop production simulation model. *Rep. Inst. Land Water Manage. Res.*, Wageningen.
- Kabat, P., Feddes, R.A. and Van Den Broek, B.J., 1988b. Simulation of field water management, evapotranspiration and crop yield. 1. Field water use and potato crop yield. Report Institute for Land and Water

Management Research, Wageningen, 40 pp.

Kabat, P., Feddes, R.A. and De Jong, R., 1988c. Simulation of the soil water balance, crop growth and production with the integrated model SWACROP. Paper presented at the Int. Symp. Water Manage., Southampton. Water Resour. Manage.

Karvonen, T., 1988. A model for predicting the effect of drainage on soil moisture, soil temperature and crop yield. Ph.D. Thesis. University of Technology, Helsinki, 215 pp.

Kizer, M.A. and Elliott, R.L., 1987. Eddy correlation measurement of crop water use. Winter Meet. ASAE, Chicago, Pap. 87-2504: 13 pp.

Klute, A. (Editor), 1986. Methods of soil analysis. 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph 9, Am. Soc. Agron., Madison, 2nd ed.

Kool, J.B. and Parker, J.C., 1987. Estimating soil hydraulic properties from transient flow experiments: SFIT user's guide. (submitted).

Kool, J.B., Parker, J.C. and Van Genuchten, M.Th., 1987. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models. A review. J. Hydrol., 91: 255-293.

Lomen, D.O. and Warrick, A.W., 1978. Time-dependent solutions to the one-dimensional moisture flow equation with water extraction. J. Hydrol., 39: 59-67.

Maybeck, P.S., 1979. Stochastic models, estimation and control. Vol.I. Academic Press, New York, N.Y., 423 pp.

Milly, P.C.D., 1982. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: a matrix head-based formulation and a numerical model. Water Resour. Res., 18(3): 489-498.

Molz, F.J., 1981. Models of water transport in the soil-plant system. A review. Water Resour. Res., 17: 1245-1260.

Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. Proc. Symp. Soc. Exp. Biol., Cambridge Univ. Press, London, 19: 205-234.

Mualem, Y., 1974. A conceptual model of hysteresis. Water Resour. Res., 10(3): 514-520.

Neuman, S.P., 1973. Saturated-unsaturated seepage by finite elements. Proc. ASCE, J. Hydraul. Div. 99 (HY 12): 2233-2250.

Neuman, S.P., Feddes, R.A. and Bresler, E., 1975. Finite element analysis of two-dimensional flow soil considering water uptake by roots. 1. Theory. Soil Sci. Soc. Am., Proc., 39: 224-230.

Nielson, D.R., Biggar, J.W. and Erh, K.T., 1973. Spatial variability of field-measured soil water properties. Hilgardia 42(7): 215-259.

Nieuwenhuis, G.J.A., 1986. Integration of remote sensing with a soil water balance simulation model (SWATRE). In: Hydrologic Applications of Space Technology. IAHS-Publ. 160: 119-128 and Inst. Land Water Manage. Res., Wageningen, Tech. Bull. 59.

Nieuwenhuis, G.J.A., Smidt, E.M. and Thunnissen, H.A.M., 1985. Estimation of regional evapotranspiration of arable crops from thermal infrared images. Int. J. Remote Sensing, 6(8): 1319-1334.

Parlange, J.Y., 1971. Theory of water movement in soils. 11. One-dimensional infiltration. Soil Sci., 111: 170-174.

Parlange, J.Y., Starr, J.L. and Haverkamp, R., 1987. Research needs in infiltration theory. Winter Meet. ASAE, Chicago, Pap. 87-2537: 7 pp.

Peaceman, D.W. and Rachford, H.H., Jr., 1955. The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations. Soc. Ind. Appl. Math., J. 3: 28-41.

Peerboom, J.M.P.M., 1987. Aanpassingen aan het model SWATRE ten behoeve van de simulatie van het gedrag van zwellende en krimpende kleigronden. Inst. Land Water Manage. Res., Wageningen, Nota 1807: 104 pp.

Phene, C.J., Rawlins, S.L. and Hoffman, G.J., 1971. Measuring soil matrix potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body. 11. Experimental results. Soil Sci. Soc. Am., Proc., 35: 225-229.

Phene, C.J., Allee, Ch.P. and Pierro, J., 1987. Measurement of soil matrix potential and real time irrigation scheduling. Proc. Int. Conf. on Measurement of Soil and Plant Water Status, Logan, Utah, Vol. 2: 258-265.

Philip, J.R., 1957a. The theory of infiltration. Soil Sci., 83: 345-357.

Philip, J.R., 1957b. The theory of infiltration. Soil Sci., 83: 435-448.

Philip, J.R., 1958. The theory of infiltration. Soil Sci., 85: 278-286.

Philip, J.R., 1968a. The theory of absorption in aggregated media. Aust. J. Soil Res., 6: 1-19.

Philip, J.R., 1968b. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities. Water Resour. Res., 4(5): 1039-1047.

- Philip, J.R., 1970. Hydrostatics in swelling soils and soil suspension: unification of concepts. *Soil Sci.*, 109(5): 294-298.
- Philip, J.R. and De Vries, D.A., 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys. Union*, 38: 222-231.
- Philip, J.R. and Smiles, D.E., 1969. Kinetics of sorption and volume change in three-component systems. *Aust. J. Soil Res.*, 7: 1-19.
- Poulavassilis, A., 1962. Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domain. *Soil Sci.*, 93: 405-412.
- Poulavassilis, A. and Childs, E.E., 1971. The hysteresis of pore water: the non-independence of domain. *Soil Sci.*, 112: 301-312.
- Prasad, R., 1988. A linear root water uptake model. *J. Hydrol.*, 99: 297-306.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface flux and evaporation using large scale parameters. *Month. Weather Rev.*, 100: 81-92.
- Raats, P.A.C., 1973. Unstable wetting fronts in uniform and non-uniform soils. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 37: 681-685.
- Remson, I., Hornberger, G.M. and Molz, R.D., 1971. Numerical methods in subsurface hydrology. Wiley, New York, N.Y., 389pp.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1: 318-333.
- Ritchie, J.T., 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.*, 8(5): 1204-1213.
- Russo, D. and Bresler, E., 1981. Soil hydraulic properties as stochastic processes. 1. An analysis of field spatial variability. *Soil Sci. Soc. Am., J.*, 45: 682-687.
- Shcherbanov, R.A., 1985. Model of the hysteresis of water retention by soils. *Pochvovedeniye*, 8:54-60; translated in *Scripta Technica, Inc.*: 103-111.
- Skaggs, R.W., 1980. A water management model for artificially drained soils. *N. C. Agric. Res. Serv., Tech. Bull.*, 267: 54 pp.
- Slatyer, R.O., 1967. Plant-water Relationships. *Experimental Botany. Int. Ser. Monogr.*, Vol. II. Academic Press, New York, N.Y., 366pp.
- Soer, G.J.R., 1980. Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures. *Remote Sensing Environ.*, 9: 27-45 and *Inst. Land Water Manage. Res.*, Wageningen, *Tech. Bull.* 116.
- Taigbenn, A.E. and Liggett, J.A., 1985. Boundary element calculations of diffusion equation. *Proc. ASCE, J. Eng. Mech. Div.*, 11(3): 311-328.
- Tanner, B.D. and Greene, J.P., 1987. A Bowen ratio design for long-term measurements. *Winter Meet. ASAE*, Chicago, Pap. 87-2503: 6 pp.
- Taylor, S.A., 1968. Terminology in plant and soil water relations. In: T.T. Kozlowski (Editor), *Water Deficits and Plant Growth*. Vol. 1. 49-72. Academic Press, New York, N.Y., pp. 49-72.
- Thunnissen, H.A.M., 1984. Eenvoudige methode voor de bepaling van de regionals dagverdamping van een gewas met remote sensing. *Deelrapport 1. Remote sensing studieproject Oost-Gelderland. Inst. Land Water Manage. Res.*, Wageningen, *Nota* 1580: 39pp.
- Topp, G.C., 1971. Soil-water hysteresis: the domain model theory extended to pore interaction conditions. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.*, 35: 219-225.
- Topp, G.C. and Davis, J.L., 1985a. Measurement of soil water using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am., J.*, 49: 19-24.
- Topp, G.C. and Davis, J.L., 1985b. Comments on "Monitoring the unfrozen water content of soil and snow using time domain reflectometry" by Jean Stein and Douglas L. Kane. *Water Resour. Res.*, 21: 1059-1060.
- Topp, G.C. and Davis, J.L., 1985c. Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling. In: D. Hillel (Editor), *Advances in Irrigation* 3. Academic Press, New York, N.Y., pp. 107-127.
- Topp, G.C. and Miller, E.E., 1966. Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.*, 30: 155-162.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transient flowlines. *Water Resour. Res.*, 16: 574-582.

- Van Aelst, P., Ragab, R.A., Feyen, J. and Raes, D., 1986. Improving the irrigation timing of corn grown in Egyptian soil with shallow water table using simulation technique. Proc. Int. Symp. Water Manage. Agric. Dev., Athens, EWRA Publ., 1.
- Van Bakel, P.J.T., 1986. A systematic approach to improve the planning, design and operation of regional surface water management systems: a case study. Inst. Land Water Manage. Res., Wageningen. Rep. 13: 118pp.
- Van den Houert, T.H., 1948. Water transport in plants as a catenary process. Discuss. Faraday Chem. Soc., 3: 146-153.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Am., J., 44: 892-898.
- Vauclin, M., Vachaud, H. and Khani, I.J., 1975. Two dimensional numerical analysis of transient water transfer in saturated-unsaturated soils. In: G.C. van Steenkiste (Editor), Computer Simulation of Water Resources Systems. Proc. IFIP Working Conf. Comput. Simulation Water Resour. Syst. North Holland, Amsterdam, pp. 299-323.
- Wang, H.F. and Anderson, M.P., 1982. Introduction to groundwater modeling. Finite difference and finite element methods. Freeman, New York, N.Y., 237 pp.
- Watts, J.W., 1970. An iterative matrix inversion method suitable for anisotropic problems. Second symposium on numerical simulation of reservoir performance. Soc. Pet. Eng. AIME, Dallas, SPE Paper 2802.
- Webster, R., 1984. Elucidation and characterization of spatial variation in soil using regionalized variable theory. In: G. Verly, M. David, A.G. Journel and A. Marechal (Editors), Geostatistics for Natural Resources Characterization. Proc. NATO Adv. Stud. Inst. Stanford Sierra Lodge, South Lake Tahoe, Calif., Vol. 2: 903-913.
- Webster, R., 1985. Quantitative spatial analysis in the field. Soil Sci., 3: 1-70.
- Wind, G.P., 1966. Capillary conductivity data estimated by a simple method. Water in the unsaturated zone. Proc. UNESCO/IASH Symp., Wageningen, pp. 181-191.
- Wind, G.P., 1979. Analog modeling of transient moisture flow in unsaturated soil. Agric. Res. Rep., 894: 123 pp.
- Wooding, R.A., 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water Resour. Res., 4(6):1259-1273.
- Working Group TUS-10-PLAN, 1988. Water voor Drenthe. Rapp. Werkgroep TUS-10-PLAN, Prov. Best. Drenthe, Assen, 67 pp.
- Wösten, J.H.M., 1990. Use of soil survey data to improve simulation of water movement in soils. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, 103 pp.
- Zaslavsky, D. and Ravina, I., 1968a. Non-linear electrokinetic phenomena. Soil Sci., 106: 60-66.
- Zaslavsky, D. and Ravina, I., 1968b. Extension of thermodynamics of steady state by differential formulation of non-linear flow equations. Soil Sci., 107: 1-7.
- Zeller, B., 1987. Modelisation mecaniste et operationelle du bilan hydrique parcellaire. Validation sur des cultures de ble et de luzerne en conditions pluviales limitantes. Ph.D. Thesis, L'institut National Agronomique, Paris-Grignon, 96 pp.
- Zienkiewicz, O.C., 1971. The finite element method in engineering science. McGraw-Hill, London, 521 pp.
- Zienkiewicz, O.C. and Parekh, C.J., 1970. Transient field problems: two-dimensional three-dimensional analysis by isoparametric finite elements. Int. J. Num. Meth. Eng., 2: 61-71.
- Zienkiewicz, O.C., Mayer, P. and Cheung, Y.K., 1966. Solution of anisotropic seepage by finite elements. J. Eng. Mech., 92: 111-120.

"Veranderingen in het hydrologisch klimaat"

Symposium t.g.v. het afscheid van Prof.dr.ir.J.C. van Dam van de TU-Delft

Geohydrologie in dienst van mens en milieu

Prof.dr.ir. C. van den Akker
RIVM, Bilthoven

Toen ik werd gevraagd om ter gelegenheid van het afscheid van Prof. van Dam een inleiding te houden over geohydrologie, stond ik allereerst voor de opgave om een titel te bedenken. Nu werk ik bij het RIVM en ik word dagelijks geconfronteerd met het briefhoofd van het RIVM dat luidt: "RIVM, onderzoek in dienst van mens en milieu". Ik ben van mening dat ook het vakgebied van de geohydrologie bij uitstek past bij de begrippen mens en milieu. Ik zal proberen dit in deze lezing te verduidelijken. Hierbij zal ik mijn visie op de geohydrologie geven langs een chronologische weg.

Ik begin in de zestiger jaren, toendertijd als student bij Van Dam.

Met het aantreden van Prof. van Dam als hoogleraar die met name de geohydrologie in zijn onderwijs- en onderzoekspakket had, werd het belang van de wetenschap rond het voorkomen en gedrag van water in de bodem duidelijk gemaakt. Niet dat daarvoor geen belang aan het grondwater werd gehecht. In de diverse vakgebieden zoals drinkwatervoorziening, geotechniek en waterbeheersing werd natuurlijk al aandacht geschonken aan geohydrologie. Maar juist met de benoeming van Van Dam werd de geohydrologie expliciet als vakgebied in de studie van de Civiel Ingenieur in Delft gemaakt.

Uitgaande van fysische wetmatigheden zoals de Wet van Darcy en de continuïteitsvergelijking die voor elke rechtgeaarde civiel ingenieur boven alle twijfel waren verheven, werden naar hartelust geschematiseerde situaties doorgerekend op veranderingen in stijghoogte of grondwaterstand, specifieke debieten en wat dies meer zij. Karakteristiek was de veelal analytische aanpak, met gebruik van bodemgegevens zoals K_D -waarden, C -waarden en bergingscoëfficiënten verkregen uit pompproeven.

Noodzakelijkerwijs was veelal een beperking nodig in de ruimtelijke schaal; lokale problemen konden met analytische formules redelijk aangepakt worden. De ruimtelijke differentiatie in de bodemgegevens conform de werkelijkheid kreeg minder aandacht. In de analytische formules kon vaak toch alleen maar met homogene situaties rekening worden gehouden. Het rekenmodel was limitatief voor het doorrekenen van geohydrologische situaties. Wilde men toch rekening houden met inhomogeniteiten in complexere situaties, dan was men aangewezen op bijvoorbeeld elektronische analogons of Hele-Shawmodellen. Welke hydroloog van zeg boven de 40 jaar herinnert zich niet de soms forse bouwwerken van koperdraden, weerstanden, condensatoren en batterijen die de grondwaterstroming in één of meerdere watervoerende pakketten simuleerden? En dat alleen omdat zowel grondwaterstroming als elektriciteit voldoet aan de vergelijking van Laplace. Het is de tijd van de ontwikkeling van analytische formules via, voor eenvoudige civiel ingenieurs, ingewikkelde wiskundige

technieken. Ieder zichzelf respecterend onderzoeksinstituut op geohydrologisch gebied had wel een bolleboos in dienst die voor allerlei mogelijke schematisaties formules zat te ontwikkelen waarbij reeksontwikkelingen, transcendente functies en besselfuncties meer standaard dan uitzondering waren.

In het begin van de jaren zeventig werden de mogelijkheden voor het doen van geohydrologische berekeningen geweldig uitgebreid door de opkomst van de computer. In eerste instantie was het al een vooruitgang om de vaak ingewikkelde formules door te rekenen op rekenapparatuur waarop nog in machinetaal geprogrammeerd moest worden. Al spoedig kwamen de numerieke rekentechnieken zoals differentie- en eindige elementenmethode in zwang om op de grote rekensystemen zoals die van IBM, geohydrologische modellen te draaien. In die tijd was het een voorrecht om gedurende een deel van de nacht over een capaciteit van 512 kB, dat was zo om en nabij de gehele computerconfiguratie die in een grote zaal stond opgesteld, te mogen beschikken. Het werd mogelijk te rekenen met ruimtelijk gedifferentieerde geohydrologische parameters.

Was voordien de beperkende factor veelal de analytische formule waarmee men kon rekenen, nu werd de beperkte beschikbaarheid van geohydrologische parameters limitatief. De mogelijkheid om regionale grondwaterstromingsproblemen aan te pakken, was aanwezig, echter ontbrak het aan bodemparameters. Via bijvoorbeeld kostbare pompproeven, gecombineerd met geologische kennis en bestaande boorbeschrijvingen, werd gepoogd om de vaak ingewikkelde heterogene geohydrologische situatie te schematiseren. De mogelijkheid kwam binnen bereik om de regionale geohydrologische situatie te verbinden met de hydrologie in de onverzadigde zone. Het effect van randvoorwaarden, zoals polderpeilen en kanaal- of rivierstanden, werd in de berekeningen meegenomen zonder dat al te rigoureuze schematisaties nodig waren. Bekend zijn de toepassingen van de eerste numerieke rekenmodellen voor de berekening van landbouwschade als gevolg van de onttrekking van grondwater voor de openbare watervoorziening. Naar mijn mening lag zeker in die jaren niet de belangrijkste waarde van modellen in de betrouwbaarheid ten aanzien van de voorspelling van grondwaterstijghoogten en grondwaterstanden. Veeleer was het nut gelegen in het in samenhang kunnen doorrekenen van diverse geohydrologische processen waardoor het begrip ten aanzien van relatieve invloeden van de diverse processen en factoren toenam. Ook nu is dit laatste nog vaak het geval.

In de jaren zeventig lag het accent van de modelberekeningen op het vaststellen van stijghoogten en grondwaterstanden. Voordien was het kunnen optreden van een grondwaterverontreiniging zeker geen algemeen geaccepteerd feit. Veelal werd ervan uitgegaan dat grondwater voldoende was afgeschermd voor verontreiniging en dat afbraakprocessen in de bodem voldoende preventief werkten op een verontreiniging van het grondwater.

Toen in de loop van de zeventiger jaren op diverse pompstations voor de drinkwatervoorziening verontreinigingen in het drinkwater werden aangetroffen, dacht men daarom veelal in eerste instantie aan een beïnvloeding op het zuiveringsbedrijf. Het was voor met name de waterleidingwereld een schrik te moeten accepteren dat door lozingen, al dan niet opzette-

lijk, die vaak decennia geleden hadden plaatsgevonden, de grondwaterkwaliteit onacceptabel was aangetast. Naarmate duidelijk werd dat het grondwater ook onderhevig was aan kwaliteitsverandering, werd het noodzakelijk de stroming van grondwater met de daarin aanwezige stoffen te berekenen. Rekenmethoden om de verplaatsing van grondwater vast te stellen, werden uit de kast gehaald of werden ontwikkeld waarbij opnieuw de computer uitstekende diensten bewees. De vaststelling van beschermingszones rondom pompstations werd mogelijk op basis van berekeningen van de stromingspatronen en verblijftijden van het grondwater. De eerste ideeën voor het installeren van een grondwaterkwaliteitsmeetnet kwamen naar voren.

Sindsdien heeft de ontwikkeling van computerprogramma's voor de modellering van grondwater een enorme vlucht genomen. Allerlei fysische en fysisch-chemische processen zoals dispersie, diffusie, afbraak en dichtheidsstroming zijn in de rekenmethoden opgenomen. De beschikbaarheid van gegevens over de bodem en het grondwater blijft ver achter bij de beschikbaarheid van rekenmethodieken. Lange tijd is in de hydrologische wereld gedacht dat het onderzoeken en ontwikkelen ten behoeve van modellering van grondwaterstroming veel belangrijker en wetenschappelijk hoogwaardiger was dan het gestructureerd en in samenhang verzamelen van gegevens ten aanzien van waterkwantiteit en waterkwaliteit. Ik geloof dat thans alom wordt erkend dat het monitoren van het grondwater en het interpreteren en evalueren van de gegevens net zo belangrijk is. Zeker in combinatie met de informatica-technologie is het beschikken over de monitoringgegevens, in zowel ruimte als tijd, een noodzaak om geohydrologisch onderzoek goed uit te voeren. De ontwikkeling van Geografische Informatie-systemen (GIS) heeft een geweldige stap voorwaarts mogelijk gemaakt in het geohydrologische onderzoek. Nieuwe uitdagingen in het onderzoek zijn opgepakt om de gegevens uit de monitoringsystemen met behulp van GIS te combineren met de modeltechnieken.

Het voorafgaande was de, uiteraard onvolledige, historie van de geohydrologie. Belangrijk is echter ook de rol van de geohydrologie in de toekomst en dan met name de geohydrologie in dienst van mens en milieu.

Grondwater is en blijft van groot belang voor de drinkwatervoorziening, de landbouwwatervoorziening en de water- of vochtvoorziening van natuurlijke vegetaties.

Deze functies van het grondwater worden bedreigd door een aantal oorzaken. Ten eerste is er de aanslag op het grondwater waarbij door onttrekking en versnelde afvoer een verlaging van grondwaterstijghoogten en grondwaterstanden plaatsvindt. Dit resulteert in de bekende verdrogingsproblematiek waar een groot deel van Nederland mee te kampen heeft.

Ten tweede is er de voortdurende bedreiging van de bodem- en grondwaterkwaliteit. Deze bedreigingen worden gevormd door vuilstorten en lokale industriële activiteiten (puntbronnen), de emissie van schadelijke stoffen door het verkeer en het gebruik van wegzout en bestrijdingsmiddelen langs wegen (lijnbronnen) en de depositie van schadelijke stoffen vanuit de lucht en de toepassing van meststoffen en bestrijdingsmiddelen in de landbouw (diffuse bronnen).

De effecten van de aantasting van zowel de kwantiteit als de kwaliteit zullen hun invloed doen gelden op de functies die het grondwater vervult. Het is zaak dat de geohydrologie in samenhang met aanverwante wetenschappen zoals geologie, agrohydrologie, ecohydrologie, bodemkunde en meteorologie deze effecten in kaart brengt. Het gericht verzamelen van informatie via monitoring is daarbij essentieel. Gezien de kosten en menskracht die gemoeid zijn met monitoring, de kwaliteitsborging van de gegevens en de verwerking en opslag van de gegevens, is een goede afstemming tussen belanghebbenden van groot belang. Dat instituten elkaar vinden in een overlegstructuur als het SAG (Samenwerking Aardkundige Gegevens) is uiterst waardevol. Het toekomstige onderzoek naar de bodem- en grondwaterkwaliteit, waarin de geohydrologie een sleutelrol vervult, staat of valt met de beschikbaarheid van gestructureerde en betrouwbare gegevens, opgeslagen in informatiesystemen. Deze informatiesystemen werken met ruimtelijke gegevensstructuren en maken gebruik van moderne informatietechnologie. Hiermee is het mogelijk om in samenhang met mathematische modellen een goede stand van zaken te geven ten aanzien van de toestand van de grondwaterkwantiteit en -kwaliteit.

Binnen de universiteit zal fundamenteel onderzoek gedaan moeten worden naar de processen in de bodem waarbij het grondwater een rol speelt. Ook hier zal de nadruk liggen op onderzoek waarbij de geohydroloog aansluiting zoekt bij de kennis uit andere disciplines.

Dat ik in het voorgaande sterk de nadruk leg op het waarnemen, verzamelen, bewerken en opslag van gegevens in de geohydrologie, betekent niet dat de modelontwikkeling minder aandacht dient te krijgen. Wel ben ik van mening dat de modelontwikkeling meer gericht zou moeten zijn op de integratie van de geohydrologische modellen in een groter verband. Ik bedoel hiermee dat in de causaliteitsketen, dit is van ingreep in het geohydrologische systeem tot en met het effect op bijvoorbeeld het ecologische systeem, de modelontwikkeling in samenhang dient plaats te vinden. Ik kan mij niet aan de indruk onttrekken dat tot nu toe de diverse geohydrologische modellen teveel als stand-alone worden ontwikkeld.

De geohydrologie is een onmisbare (basis-)wetenschap voor het kwantificeren van de gevolgen van menselijk handelen op de functies van het grondwater. Immers de ingrepen in het hydrologische systeem worden vaak via het grondwatersysteem overgebracht naar andere plaatsen. Een lokale onttrekking van grondwater resulteert in een verlaging van stijghoogten en grondwaterstanden in het grondwatersysteem over vaak grote afstanden. Een lokale verontreiniging van de bodem wordt via het grondwater getransporteerd over relatief grote afstanden met daarbij behorende lange reistijden.

Zowel bij de verdrogingsproblemen met effecten voor de natuurlijke vegetatie en vermindering van de oppervlaktewaterafvoer via beken, sprengen en rellen als bij de vermestings- en verzuringsproblemen met effecten op de grondwaterkwaliteit en dus de drinkwatervoorziening is de geohydrologie als basis voor onderzoek onmisbaar.

"Veranderingen in het hydrologisch klimaat"

Symposium t.g.v. het afscheid van Prof.dr.ir.J.C. van Dam van de TU-Delft

Klimaatveranderingen in het hydrologisch onderwijs

Prof.dr.ir. A. van der Beken
Dienst Hydrologie, Vrije Universiteit Brussel

Inleiding

Het is mij een groot genoegen een bijdrage te leveren om onze collega en vriend Prof.Dr.ir. J.C. VAN DAM te vieren naar aanleiding van zijn op-rust-stelling.

Dit genoegen is bijzonder groot omdat Jan VAN DAM voor mij steeds een collega was met wie het aangenaam én leerzaam was om te gaan. Daarenboven gaf hij mij een grote steun toe hij aanvaardde op 11 oktober 1979 de openingsrede te houden bij de start van het voortgezet onderwijs in de hydrologie dat vlug nadien uitgroeide tot een tweejarige inter-universitair postgraduaat onderwijs. Wij hebben sindsdien onze contacten op velerlei formele en informele wijzen verdergezet: wederzijds gasthoogleraar in 1980-81 en 1981-82 in het kader van de Nederlands-Belgische culturele overeenkomst, doctoraatjuries waar Jan VAN DAM de wijze promotor was; gezamenlijk voorzitterschap (1985-1990) van de SWOM-Stuur-groep Wetenschappelijk onderzoek van de Maas; en uiteraard de ontelbare ontmoetingen en telefoons waar wij onze meningen aan elkaar toetsten hetgeen voor mij steeds een verrijking betekende.

Ik hoop dat de enkele bedenkingen hierna gebracht over hydrologisch onderwijs en onderzoek een gepaste wijze van dankbetuiging is van mijnentwege aan Jan VAN DAM.

De hydrologische wetenschap

Prof. VAN DAM (1979) heeft in de hiervoor vermeldde openingsrede in 1979 op zijn bekende haarfijne wijze de inhoud van de hydrologische wetenschap uiteengezet. De essentie van zijn bijdrage blijft vandaag nog steeds geldig. De bekende recente bijdragen van NASH et al. (1990) en van het Committee on Opportunities in the Hydrological Sciences (ANONYMOUS, 1991) hebben het onderwerp intussen sterk in discussie gebracht.

Voor ons hydrologen, moet de vraag of de hydrologie een zelfstandige wetenschap is en bijgevolg als dusdanig onderwezen moet worden, zelfs niet gesteld worden. Overigens, welke wetenschap is echt zelfstandig ? De wiskunde is wellicht de enige want alle andere wetenschappen hebben de wiskunde broodnodig als een dagelijks werktuig.

Over de vraag of de hydrologie een basiswetenschap dan wel een toegepaste wetenschap is, moet al evenmin gebakeleid worden: wie de hydrologische kringloop bestudeert zonder zich om de mogelijke toepassingen van zijn kennis te bekommeren, doet aan basiswetenschap. De hydrologische kringloop is een natuurverschijnsel dat even fundamenteel en complex is als, bijvoorbeeld, de koolstofcyclus of de kringloop van het bloed in levende wezens. Dat hydrologie ook een toegepaste wetenschap is zal wel niemand betwijfelen.

Of de hydrologische wetenschap echter goed beoefend wordt, is natuurlijk de kritische vraag. Hier spelen de "human factor" én het "klimaat" een rol. Beide factoren beïnvloeden elkaar.

Het hydrologisch onderwijs

Het "menselijk potentieel" wordt verdeeld over verschillende wetenschappen. Deze verdeling is een complex niet-controleerbaar maar wel beïnvloedbaar verschijnsel. De beïnvloeding gebeurt door het onderwijs en door de economie. Beiden, onderwijs en economie, zijn trouwens sterk aan elkaar gekoppeld en de discussie hieromtrent is nog maar eens opgeflakkerd door het beruchte "Memorandum over het Hoger Onderwijs in de Europese Gemeenschap" (ANONYMOUS, 1991).

Onder "klimaat" versta ik het geheel van factoren die van de wetenschap een goede wetenschap maakt en uiteraard heeft het onderwijs, i.c. het hydrologisch onderwijs, een primordiale rol in dit klimaat. Met andere woorden: levert een goed hydrologisch onderwijs goed hydrologisch onderzoek op? Indien ja, laat ons dus een uitstekend hydrologisch onderwijs uitbouwen! Zo eenvoudig is het antwoord evenwel niet, gelet op die schakel onderwijs-economie.

Onderwijs en wetenschappelijk onderzoek kosten geld, veel geld en de markteconomie dirigeert. Waarom wordt het "menselijk potentieel" in sterke mate naar de informatica gedrainéerd? Waarom naar de biotechnologie? Waarom naar de vaste-stof fysica? Het antwoord ligt voor de hand: het water heeft weinig marktwaarde in vergelijking tot vele andere "producten". Het hydrologisch onderzoek heeft wezenlijke bijdragen geleverd telkenmale economische belangen speelden: de irrigatie, de drainage, de hoogwaterbescherming, de hydro-energie, de watervoorziening, enz...

Het waren vooral ingenieurs die de problemen oplosten maar de diepere kennis van de hydrologische verschijnselen en het daaraan gekoppelde onderwijs ontwikkelt zich met mondjesmaat.

Ongetwijfeld heeft de milieuproblematiek zoals deze zich in de jaren '70 gemanifesteerd heeft, bijgedragen tot een uitbreiding van het onderwijs in de hydrologie.

In vele universiteiten werden voor het eerst specifieke cursussen hydrologie geïntroduceerd en werden ook vakgroepen of laboratoria opgericht. Slechts op enkele zeldzame plaatsen werd een volledig 2e cyclus-onderwijs in de hydrologie uitgebouwd. Veelal werd een postgraduaat-formule gekozen met als doel de technieken aan te leren om de typische hydrologische problemen op te lossen. Te weinig werd het accent gelegd op de "puzzle".

Ook de vraag naar "generalisten" in de milieuproblematiek doet de slinger van het hydrologisch onderwijs hellen naar de "probleem-oplossingen".

De vraag stelt zich overigens of men "generalisten" kan opleiden "ab ovo". Moeten generalisten niet groeien uit het "menselijk potentieel" na enkele jaren "praktijk"?

De klimaatveranderingen

In het hydrologisch onderwijs zijn er mijns inziens drie factoren die het klimaat van dit onderwijs grondig veranderen.

De eerste factor is de "global change" of de **studie van de klimaatveranderingen**. Zoals de milieuproblematiek s.s. (de waterverontreiniging) een stimulans geweest is en nog steeds is voor de hydrologie, kan "global change" eveneens een katalysator zijn voor diepgaand hydrologisch onderzoek. Logischerwijze moet dit leiden tot hernieuwd hydrologisch onderwijs en een herverdeling van het "menselijk potentieel" ten voordele van de hydrologie.

De tweede factor is de **internationalisering van het onderwijs en het onderzoek**, met name in Europa dankzij de programma's van de Europese Gemeenschap, maar ook wereldwijd.

Het lijkt mij een zeer belangrijke factor dat op voorheen ongekende schaal studenten en stagiairs in de hydrologie in andere landen tijdelijk gaan studeren. Zij zijn het "menselijk potentieel" en zij zullen het hydrologisch onderzoek en onderwijs in de toekomst uitbouwen. De uitwisseling van professoren en onderzoekers en de uitbouw van **netwerken** tussen universiteiten, administraties en bedrijven zijn buitengewone kansen en het is belangrijk dat de hydrologen daar in sterke mate aan deelnemen.

De derde factor is de **permanente opleiding**. Welke methodes en technieken bij deze opleiding, als onderdeel van het totale onderwijs-systeem, passen laat ik hier verder buiten beschouwing (UNESCO 1993). De nood aan permanente opleiding is weliswaar niet nieuw, maar de nieuwe vormen en samenwerking die deze opleiding met zich brengen, zijn zeker en vast van belang om de hydrologische wetenschap te verspreiden en het hydrologisch onderwijs nieuwe impulsen te geven.

Als voorbeeld vernoem ik de toepassingen van Computer-Aided-Learning(CAL) in de hydrologie. Hier opnieuw is de noodzaak tot internationalisering overduidelijk want geen enkele alleenstaande hydrologische groep kan CAL-technieken ontwikkelen, zoals die groep ook niet "global change"-onderzoek zou kunnen uitvoeren.

Het zijn factoren die een nieuw klimaat scheppen en ik ben ervan overtuigd dat dit nieuwe klimaat de hydrologie in het algemeen en het hydrologisch onderwijs in het bijzonder zal ten goede komen.

Besluit

Deze bedenkingen over het hydrologisch onderwijs - en onderzoek - en hun klimaatsveranderingen zijn uiteraard voor discussie vatbaar. Mochten zij evenwel mijn toehoorders tot nadenken aanzetten dan is mijn doel bereikt. In het bijzonder zal ik het op prijs stellen de mening van mijn vriend en collega Jan VAN DAM te kennen.

Ik ben ervan overtuigd - en ik hoop het zeer - dat wij onze meningen nog vele jaren onderling zullen toetsen.

Dank bij voorbaat, Jan!

Referenties

ANONYMOUS, 1991. Memorandum on higher education in the European Community. Con (91) 349. Brussels, 46 pp.

ANONYMOUS, 1991. Opportunities in the hydrological sciences. Report op the National Research Council.
National Academic Press, Washington DC.

NASH, J.E., P.S. EAGLESON, J.R. PHILIP and W.H. VAN DER MOLEN, 1990. The education of hydrologists. Hydrological Sciences Journal 35,6,12:597-607.

UNESCO, 1993. Continuing Education in hydrology,
Draft-report IHP-IV, project E4.1.

VAN DAM, J.C., 1979. Het werkkterrein van de hydroloog en zijn opleiding.
VUB-Hydrologie No. 4 - Brussel.

"Veranderingen in het hydrologisch klimaat"

Symposium t.g.v. het afscheid van Prof.dr.ir.J.C. van Dam van de TU-Delft

De vakgroep gezondheidstechniek en waterbeheersing als integraal waterbeheerder

Prof.ir. R.A. Brouwer
TU-Delft

Het onderwijs en onderzoek in de wetenschappelijk - technologische benadering van bouwbare waterbeheerssystemen, is bij de Faculteit der Civiele Techniek van de TU Delft de taak van de Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing.

Deze Vakgroep behandelt verschillende te onderscheiden vakdisciplines waarvan de hydrologie (zowel oppervlakte- als grondwaterhuishouding en de integratie daarvan) een belangrijke basiswetenschap levert. Daarnaast zijn te noemen de milieutechniek en ecologie, de drink-watersystemen, de afvalwatersystemen, landelijke waterbeheers-systemen met irrigatie-drainage- en polderstelsels, hoogwaterbescherming en verdrogingsbestrijding, waterrecht- en bestuur, en de beleidsvorming voor aanleg en beheer van waterbeheerssystemen.

Om een goed in de ingenieurspraktijk inzetbare waterbeheersingenieur af te leveren is het noodzakelijk dat het onderwijspakket alle aspecten van het bovengenoemde taakveld dekt, met daarbij een verdieping in de afstudeerspecialisatie.

Het is duidelijk dat niet alle kennisvelden op niveau door een persoon beheerd en onderwezen kunnen worden. Daarom is de Vakgroep ingedeeld in een aantal clusters, waarin een groep samenhangende kennisvelden als taakveld worden genomen.

Het belang van een goede afstemming en integratie van de onderwijspakketten en de bijbehorende onderzoeksprogramma's in de verschillende clusters is evident.

Om deze integratie te doorzien is de illustratie in figuur 1 ontwikkeld.

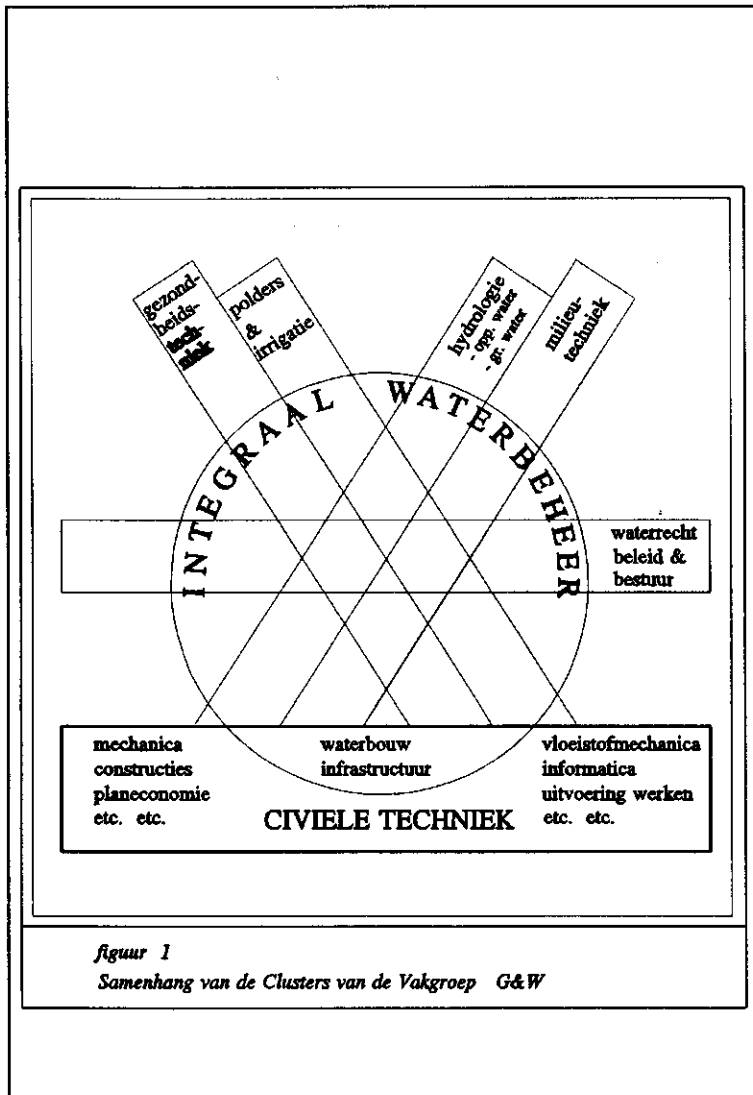
Civiele Techniek

De Vakgroep G & W is een onderdeel van de faculteit der Civiele Techniek en maakt voor haar onderwijs en onderzoek in ruime mate gebruik van de bij CT in overige vakgroepen aanwezige kennis zoals:

- * mechanica
- * constructies
- * vloeistofmechanica
- * verkeer en planologie
- * informatica
- * waterbouwkunde
- * wiskundige modellering
- * plan economie

en nog vele andere colleges en specialisaties.

Deze kennis uit de overige vakgroepen vormt de basis van waaruit de vakgroep G & W verder kan werken.



Hydrologie

Voor een waterbeheersingenieur moet deze kennis aangevuld worden met natuurwetenschappelijke kennis betreffende de hydrologie en waterhuishouding. Deze kennis omtrent het gedrag en voorkomen van grond- en oppervlaktewater wordt verzorgd door de cluster Hydrologie en wordt ook voor andere vakgroepen als noodzakelijk gezien en als ondersteunend basisvak gegeven.

De hydrologie is een onmisbaar kennisveld omdat immers geen kwaliteitsbeheersing mogelijk is zonder kennis omtrent de waterkwantiteit, en geen waterbeheerssysteem te analyseren en te ontwerpen is zonder de kennis van de hydrologie.

Naast het onderwijs in basis-hydrologie wordt gespecialiseerd onderwijs gegeven voor afstudeerders hydrologische ingenieur en wordt onderzoek verricht naar nieuwe ontwikkelingen en toepassingen.

Milieutechniek

Naast kennis over waterkwantiteit is basiskennis over waterkwaliteit, en over de beheersing daarvan noodzakelijk.

Dit veld wordt verzorgd door de cluster Milieutechniek, die de kennis betreffende chemische, ecologische en milieu-processen voor de civiel ingenieur toepasbaar maakt.

In de moderne wereld is geen waterbeheerssysteem zonder kwalitatieve component meer denkbaar.

Onderwijs in deze cluster gaat gepaard met onderzoek van milieutechnische toepassingen op civiel technisch gebied.

Gezondheidstechniek

Het beschikbaar stellen van consumptiewater aan de menselijke samenleving en industrie, en het beheersen van de kwaliteit en kwantiteit van de afvalwaterstromen is een kennisveld dat door de desbetreffende cluster wordt verzorgd. Daarnaast wordt ook de materiekennis omtrent vast vuilverwerkingssystemen beschikbaar gemaakt. Op het onderwijs sluit een belangrijk programma van onderzoek in deze systematieken aan, gericht op toepasbaar maken van zuiveringstechnieken en theoretische kennis van stoftransporten.

Polders en Irrigatie

De grootschalige waterbeheersing middels wateraanvoersystemen en drainagestelsels is het taakveld van de cluster polders en irrigatie. De wetenschappelijke materiekennis om dergelijke watersystemen te kunnen bouwen, besturen en beheren wordt hier verzorgd.

Daarnaast wordt de kennis uit de meet- en regeltechniek en automatisering toepasbaar gegeven voor toepassing in het operationeel waterbeheer.

Naast het onderwijs is een actief programma in sturingsoptimalisering en operationele sturingsalgorithmen voor waterbeheerssystemen gaande.

Water-recht, beleid en bestuur

Waterbeheerssystemen zijn er voor, en worden beheerd ten laste van, het maatschappelijk kader waarin zij geplaatst zijn. Het is belangrijk dat de afstuderend waterbeheersingenieur zich bewust is van het feit dat de technische systemen vorm krijgen naar aanleiding van beleidsprocedures, en beheerd kunnen worden dankzij een juridisch-bestuurlijke inkadering in de maatschappij die rekening houden met vele verschillende, en vaak conflicterende, belangen bij het waterbeheerssysteem.

De cluster WRBB verzorgt het onderwijs en onderzoek dat voor de toepassing in de civiele techniek noodzakelijk is.

Integraal Waterbeheer

De integratie van beleids- en bestuursvorming, met de kennis omtrent waterkwaliteits- en kwantiteitsparameters, met de kennis omtrent civiel technische systemen als drink- en afvalwater, polders en irrigatie met de civiel technische kennis omtrent infrastructuur en waterbouwkunde is het Integraal Waterbeheer waarin de gehele vakgroep een taak binnen de TUD heeft te vervullen.

Vanzelfsprekend kan niet alle noodzakelijke kennis voor het integraal waterbeheer binnen de vakgroep G & W zelf worden gegenereerd. Talrijk zijn dan ook de contacten met overheidsinstellingen die op dit terrein werkzaam zijn en met andere faculteiten binnen de TU Delft zoals Werktuigbouwkunde, Scheikunde, Technische Bestuurskunde en Wijsbegeerte en Maatschappijwetenschappen, zowel als bij andere Universiteiten zoals de LUW, RUG en VUA.

"Veranderingen in het hydrologisch klimaat"

Symposium t.g.v. het afscheid van Prof.dr.ir.J.C. van Dam van de TU-Delft

Geld als water?

Ir. N.A. Amesz

IWACO, Adviesbureau voor water en milieu

samenvatting

Mij werd gevraagd het symposiumthema te benaderen vanuit "de hoek van de commercieel opererende adviesbureaus". Alhoewel IWACO een actieve rol vervult binnen de branche-organisatie - de ONRI - zij uitdrukkelijk gesteld dat ik niet namens de branche spreek.

Het vraagteken doet het vermoeden rijzen dat de stelling, vervat in de titel, niet altijd en per definitie opgaat. Zeker niet als de "veranderingen in het economisch klimaat" zich doorzetten in het tempo van het afgelopen jaar.

Uiteraard valt er vanuit de hoek van de adviesbureaus veel over het thema te vertellen; ook wij zijn er immers dagelijks mee bezig. Doch gezien het feit dat de vorige sprekers ongetwijfeld ook al het nodige naar voren hebben gebracht, zal ik me beperken tot dié aspecten die mijzelf het meeste zijn bijgebleven gedurende de bijna 20 jaar dat ik in de adviessector werkzaam ben: het omgaan met geld en mét collega-hydrologen uit Wageningen en Amsterdam.

Darcy binnen de adviesbureaus

Om hoeveel hydrologen gaat het?

Ik beperk me even tot de wat grotere bureaus met een medewerkersbestand van minstens enkele tientallen. Van dat soort bureaus zijn er een paar honderd in Nederland, met een gezamenlijk medewerkersbestand van meer dan 20.000. Daarvan zijn ruim 200 bureaus met in totaal over de 10.000 medewerkers aangesloten bij onze branche-organisatie, de ONRI. De totale adviescapaciteit op het gebied van "water en milieu" is de afgelopen 10 jaar sterk gegroeid en bedraagt nu circa 3.000 man/vrouw. Hoeveel zich daarvan met (grond)water-beheer bezig houden is niet exact bekend, doch het zijn er zeker 400 à 500. Ze zitten verspreid over enkele tientallen bureaus, voor een niet onbelangrijk deel bij IWACO.

Is er wat bijzonders aan een hydroloog bij een adviesbureau?

Alhoewel er in het algemeen sprake is van een goede salariëring, verdienen ze "geen geld als water", zeker niet ten opzichte van hun collega's die elders werkzaam zijn. Doch geld speelt wel een belangrijke rol. Op twee manieren.

Het begint al bij het formuleren van de opdracht en de bijbehorende begroting. In deze fase moet de hydroloog zich zeer kritisch tegenover zichzelf opstellen (al dan niet "geholpen" door de opdrachtgever). In de ogen van de pas afgestudeerde hydroloog moeten er belangrijke concessies gedaan worden aan het wetenschappelijke niveau van zijn inbreng; het is dan vaak een schok om te ervaren dat de opdrachtgever niet zonder meer bereid is te betalen voor al hetgeen je hebt geleerd. Helemaal moeilijk wordt het als je je opdrachtgever moet uitleggen waarom het uurtarief van een pas afgestudeerde hydroloog hoger is dan dat van een loodgieter met meer dan 20 jaar ervaring.

En als je de opdracht hebt verworven dan gaat er plotseling nóg iemand kritisch met je meekijken: de baas van je afdeling, want die vindt (in jouw ogen om onverklaarbare redenen) dat je binnen de begroting moet blijven. Hij heeft maar al te vaak meegemaakt dat het "geld als water tussen je vingers doorglipt".

Uit het voorgaande mag overigens niet worden afgeleid dat het - wetenschappelijk gezien - allemaal kommer en kwel is in de adviessector. Integendeel zelfs. Veel opdrachtgevers zijn nog steeds bereid om een voldoende ruim budget uit te trekken voor een verantwoord en goed onderbouwd advies. En binnen de advies- en ingenieursbureaus is er doorgaans voldoende ruimte voor het noodzakelijke onderzoek & ontwikkeling.

Bloedgroepen: tussen rekenmachine en wichelroede

Ook bij adviesbureaus heb je geohydrologen in drie soorten: Delftenaars, Amsterdammers en Wageningers. Ze bedrijven het vak ieder vanuit hun eigen invalshoek; bij elkaar in een groep bleef er altijd sprake van een haat-liefde verhouding.

Ik ga wat karikaturen neerzetten.

De Delftenaar had een strak omkaderd denkraam. Je had halfdoorlatende lagen (doorgaans onder 45° gearceerd), een watervoerend pakket (gespikkeld), rustend op een ondoorlatende basis (ruitjespatroon). Bovenin was een polderpeil, onwrikbaar vast. Een scherpe lijn scheidde het zoete grondwater van het zoute. Slechts het invullen van een kD, c en S-waarde weerhield ons nog van een weergaloze rekenpartij waarmee we onze pas in Delft vergaarde kennis aan de omgeving konden tonen.

De Amsterdammer was meestal wat filosofischer van aard; ze konden absoluut niet rekenen. Ze spraken over formaties "zus en zo" zonder daarbij aan te geven of het nou zand (spikkels) of klei (arcering onder 45°) betrof. Zout grondwater had je plotseling in vele soorten. Hun denkraam was veel groter en minder vast omlijnd. Er was vaak sprake van een soort minachting voor de Delftse hydroloog. En zodra je dat pareerde door te stellen dat je ook nog geleerd had om spoorbruggen, verkeerspleinen en kaspanten te berekenen, daalde het vertrouwen tot een niet te evenaren dieptepunt.

De Wageningen hing er een beetje tussen in. Hij/zij kon ook rekenen (weliswaar niet met een "kromme d") terwijl het hydrologisch inzicht wat minder rechtlijnig was dan dat van de Delftenaar. Nieuw voor de Delftenaar was dat je ook nog water bóven de grondwaterspiegel had; de aandacht van de Wageningen richtte zich vooral op wat wij, Delftenaren, "teelaarde" of "geroerde grond" noemden (wee ons gebeente als wij dat zelf geroerd hadden).

Delft kende twee soorten "vast gesteente": baksteen en natuursteen, allebei ondoorlatend. Van de Amsterdammer kon de Delftenaar leren dat je natuursteen in vele verschijnings-vormen had en dat er vaak grote ondergrondse scheuren en spleten in zaten. Sterker nog: in sommige gebieden op onze aardbol bleek het vaak de enige plek te zijn waar je grondwater kon aantreffen.

Tijdens veldbezoeken met Amsterdammers, de laatste gewapend met luchtfoto, kompas, loep en hamertje, steeg geleidelijk aan de bewondering als de Amsterdammer tenslotte een paaltje in de grond prikte en zei: "Boor hier maar."

De Amsterdammer zat óók wel eens met de handen in het haar. Bijvoorbeeld als bij de uitvoering van een pompproef de stijghoogte op enige afstand stéég in plaats van te zakken, zoals het hoorde. De neiging bestond om deze waarnemingen maar op zij te leggen onder het motto van "foutje in de meetapparatuur" of, nog beter, "even Delft bellen". De geraadpleegde Delftenaar wist zich dan te herinneren dat een rekenwonder van de TUD dit fenomeen ooit eens diepgaand geanalyseerd had en dat er belangrijke geologische conclusies uitgetrokken konden worden.

Geleidelijk aan vervaagden de grenzen; we gingen gezamenlijk aan de slag. De bloedgroepen werden pas weer van stal gehaald 's avonds in de kroeg of op dagen als deze.

Water als geld

Er zijn gebieden op aarde waar men meer dan een kwart van het gezinsinkomen uitgeeft aan een relatief geringe hoeveelheid drinkwater van onbetrouwbare kwaliteit. Er wordt gehandeld in water, via tussenpersonen, en er wordt gehandeld in verkooprechten van water. De hydroloog staat hier machteloos.

Er zijn ook gebieden op aarde waar nu ogenschijnlijk nog niks aan de hand is, doch waarvan wij weten dat - bij ongewijzigd beleid - de situatie binnen een of meerdere decennia dezelfde wordt als hierboven geschetst. Het zal duidelijk zijn dat daar onze gezamenlijke uitdaging ligt.

"Veranderingen in het hydrologisch klimaat"

Symposium t.g.v. het afscheid van Prof.dr.ir.J.C. van Dam van de TU-Delft

Grondwater kruipt waar het niet gaan kan

Ir. W. Cramer

VROM, afdeling drinkwatervoorziening

Inleiding

Natuurlijk zijn er wel momenten geweest, dat ik dacht: waarom heb ik mij als civiel-ingenieur in spé niet bekwaamd in de aanleg van infrastructurele voorzieningen zoals dammen, tunnels, sluizen, wegen, bruggen e.d.? Of: waarom ben ik geen architect geworden? Maar steeds heb ik voor mijzelf weer kunnen vaststellen, dat ik vijftientwintig jaar geleden geen slechte keus heb gemaakt om mij te bekeren tot de leerstoel Hydrologie en Waterhuishouding.

Het is dan ook met bijzonder veel plezier dat ik als bijdrage aan het symposium ter gelegenheid van het afscheid van mijn afstudeerhoogleraar, Jan van Dam, enkele overdenkingen op papier zet. Dit tegen de achtergrond van het symposiumthema: "veranderingen in het hydrologische klimaat". Ik zal ingaan op een viertal aspecten:

- Jan van Dam als constante factor in mijn hydrologische microklimaat;
- lange termijn veranderingen in het hydrologische klimaat;
- het overwegend ongunstige onderzoeksklimaat;
- beleid als (instabiel) hoge drukgebied.

Als rode stroombaan loopt door mijn verhaal de notie dat grondwater kruipt waar het niet gaan kan.

Kennismaking en hoe het verder ging

Mijn eerste kennismaking met prof.dr.ir. J.C. van Dam dateert van 27 september 1968. Aangetrokken door het wetenschappelijk cachet van de hydrologie en door een nieuwe (en voor die dagen jeugdige) hoogleraar schoof ik die dag in de collegebanken om het eerste college geohydrologie (f15b) te volgen. Het enthousiasme van de jonge hoogleraar, de helderheid van zijn college en de interessante materie deden mij besluiten om dit college trouw te blijven volgen [1]. Na enkele maanden beviel het mij zo goed, dat voor mij mijn afstudeerrichting en afstudeerhoogleraar vaststonden.

Bij deze beslissing heeft de intrede van Van Dam [2], uitgesproken op 18 december 1968, ongetwijfeld een positieve rol vervuld. Het daarin geschetste lokkend perspectief voor het vakgebied van de waterhuishouding en hydrologie maakte mij enthousiast. De hooggeleerde Van Dam hield ons, de dames en heren studenten, aan het slot van zijn rede bovendien het volgende voor:

"Degenen onder u die zich de moeite getroosten om zich serieus in dit vak te verdiepen kan ik verzekeren dat hun moeite ruimschoots beloond zal worden door de voldoening van de praktijk of het onderzoek waarin zij zich zullen begeven".

Wat wil een student aan de TU-Delft anno 1968 nog meer? Het jaar overigens van de Nota Posthumus, waarin werd voorgesteld de cursusduur voor het wetenschappelijk onderwijs te beperken tot vier jaar, met de mogelijkheid voor een tweede fase [3].

De helderheid van de colleges van Van Dam maakte dat ik al snel enig inzicht kreeg in het ondergrondse traject van de hydrologische kringloop. Ik leerde helder zien in het donker, waar willekeurige stapelingen van sedimentaire deeltjes, bestaande uit mineralen en organisch materiaal, wonderwel bleken te kunnen worden ingedeeld in horizontale watervoerende pakketten en slechtdoorlatende lagen. Boormethoden, geofysisch onderzoek, stijghoogte-waarnemingen, pompproeven en zoet/zout-grensvlakken passeerden uitvoerig de revue. Bovendien leerde Van Dam mij de beginnelen van de mathematisch-fysische modelvorming van grondwaterstroming en van grondwater dat kruipt waar het, door kleilagen, niet gaan kan.

Nog voor einde van het eerste collegejaar van Van Dam werd de opdracht voor mijn afstudeerontwerp vastgesteld: de inrichting van het Limburgse grindgat Panheel als spaarbekken voor de drinkwatervoorziening [4]. Een onderwerp afkomstig uit de praktijk van Van Dam's vorige werkgever: het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening. Een project overigens dat nog steeds op de nominatie staat om uitgevoerd te worden [5].

Tijdens de begeleiding van mijn afstudeerontwerp ervoer ik niet alleen de talenten van Van Dam als leermeester, maar ontdekte ik ook de vriendelijkheid, de geïnteresseerdheid en de openheid van de persoon Van Dam. Van mede-studenten vernam ik wel andere ervaringen met hun afstudeerhoogleraar.

Al pratende over de start van mijn loopbaan deed hij de suggestie om te proberen als geohydroloog bij het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening (RID) aan de slag te gaan. Het instituut dat hij in 1968 had verlaten [6]; grondwater kruipt waar het niet gaan kan.

Ik heb zijn suggestie opgevolgd en ben in 1971 bij het RID in dienst getreden. Tot de tanden gewapend met de collegestof van Van Dam en natuurlijk ook van andere hoogleraren zoals Volker, Huisman, De Josselin de Jong en Bischoff van Heemskerck [7]. Aangevuld met kennis opgedaan uit de standaardwerken "Ground water hydrology" van Todd [8] en "Theory of groundwater flow" van Verruijt [9].

Bij het lange tijd op grondwatergebied toonaangevende RID [10] heb ik het geleerde in praktijk gebracht en al doende heb ik mij verder bekwaamd, omringd door collega's als Santing, Bruggeman, Romijn, Meinardi en kamergenoot Van den Akker. Ook de intensieve samenwerking met instituten als de Rijks Geologische Dienst, de Dienst Grondwaterverkenning TNO [11], de Directie Waterhuishouding en Waterbeweging van Rijkswaterstaat [12] en het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding droeg bij aan mijn scholing als "professional hydrologist" [13].

De contacten met Van Dam bleven. Ik ontmoette hem in mijn hoedanigheid als afnemer van afstudeerders, als begeleider van studenten en als extern examiner (voor f15b+c) [14]. En wij spraken elkaar regelmatig in CHO-verband en bij bijeenkomsten op hydrologisch gebied [15]. In al die jaren vormde Jan van Dam als het ware een constante factor in mijn hydrologische microklimaat. Tijdens onze contacten bleek telkens weer de belangstelling voor mijn werk en ervaringen, waarbij hij mij tegemoet trad als collega-hydroloog. Dit heeft mij het gevoel gegeven als leerling bij te dragen aan het weten van de leermeester. Geheel dus in overeenstemming met wat Jan van Dam in zijn intrede zei:

"Zowel in eigen land als in de veel wijdere wereld van ontwikkelingslanden wachten grote taken voor degenen aan wie ik mijn kennis mag overdragen. Gaarne zal ik omgekeerd mijn kennis verrijken en vernieuwen met de ervaringen die zij weer zullen opdoen".

Leermeesters op een rijtje

Kijken wij naar de geschiedenis van de hydrologie [16], dan valt op dat wetenschappers nogal wat conceptuele problemen hebben gehad met de hydrologische kringloop en met het voorkomen en bewegen van grondwater als onderdeel daarvan. Ons huidige concept, voor wat het waard is, kent een lange voorgeschiedenis. Geschiedenis geschreven door een reeks van leermeesters en leerlingen, die aan de lijve ondervonden hoe moeizaam het pad naar kennis is. Met zevenmijlslaarzen wil ik de lezer langs dit pad van lange termijn klimaatsveranderingen in de hydrologische wetenschap voeren [17].

Zo'n 2 à 3 duizend jaar voor Christus slaagde de mens er in om grondwater met behulp van gegraven putten te onttrekken. De aanleg van qanats in Armenië en Perzië is op dit terrein ongetwijfeld de meest indrukwekkende prestatie van de oudheid te noemen [18]. Niet voor niets memoreert Jan van Dam de qanats in zijn intrede. Zonder twijfel moeten de bedenkers en uitvoerders van de qanat een concept, een hypothese, voor ogen hebben gehad over het voorkomen en de beweging van grondwater.

De hydrologische wetenschap heeft zijn wortels in de **Griekse beschaving**. Vóór die tijd was de mens voornamelijk geïnteresseerd in de beheersing van de natuur. En niet zonder succes, zoals bijvoorbeeld blijkt uit de ingenieurswerken in de vlakten van de Nijl, Tigris, Eufraat, Indus en Huang Ho.

Tijdens de Griekse beschaving groeide de intellectuele behoefte om de natuur te begrijpen. Misschien kunnen we Thales (624-548 v. Chr.) beschouwen als de eerste hydroloog. Net als diverse andere Griekse filosofen bezocht hij Egypte. Onder de indruk van de Nijl en geïnspireerd door Egyptische theorieën over het ontstaan van het heelal formuleerde hij twee stellingen:

- de aarde drijft op het water
- water is de oorspronkelijke stof en de stoffelijke basis van alle dingen.

Xenophanes (500 v. Chr.) zat op het goede spoor met zijn uitspraak dat "wolken, regen, bronnen en rivieren uit de zee voortkomen". Ook Plato en Aristoteles hebben zich met het water en de hydrologische kringloop bezig gehouden.

Een van Plato's concepten voor het ontstaan van bronnen en rivieren was de aanwezigheid van het immense ondergrondse reservoir Tartarus, van waaruit, via ondergrondse kanalen, bronnen en rivieren hun water kregen. Dit water stroomde weer terug naar de Tartarus, zodat de cirkel werd gesloten. Aristoteles had grote bezwaren tegen deze zienswijze van zijn leermeester, omdat dit zou betekenen dat water ook omhoog zou stromen en omdat Plato geen rekening hield met de vorming van "nieuw" water. Bovendien zag hij niet in waarom rivieren naar Tartarus terug zouden stromen. Zijn observaties waren duidelijk: rivieren monden uit in andere rivieren of in de zee.

Aristoteles had drie verschillende verklaringen voor het ontstaan van rivieren:

- regen en infiltratie
- ondergrondse condensatie van lucht
- condensatie van stijgende damp.

In tegenstelling tot de Grieken waren de **Romeinen** meer de praktische ingenieurs in plaats van originele en onafhankelijke denkers. Een bijzondere plaats nam Marcus Vitruvius in, die tussen 27 en 17 v. Chr. het boek "De architectura libri decem" schreef.

Deel 8 van zijn boek gaat over water. Zo behandelt hij een aantal methoden om grondwater op te sporen. Interessant is de voorgestelde methode waarbij de onderzoeker vlak voor zonsondergang plat op de grond moet gaan liggen. In deze houding, met de kin op de grond, moet dan het gebied in ogenschouw worden genomen. Daar waar damp opstijgt is grondwater op bereikbare diepte aanwezig. Wanneer een veelbelovende plaats is gevonden, zo gaat Vitruvius verder, dan moet er een gat worden gegraven van tenminste 1 m in het vierkant en 1,50 m diep.

Vervolgens wordt vlak voor zonsondergang een bronzen of loden vat, aan de binnenzijde met olie ingesmeerd, omgekeerd in dit gat geplaatst. Het gat wordt verder opgevuld met biezen of bladeren en aarde. Indien er de volgende dag waterdruppels in het vat worden gevonden, dan is er zeker grondwater in de bodem aanwezig.

Geofysisch onderzoek "avant la lettre" dus.

Vitruvius was uiteraard bekend met het werk van Aristoteles en hij had een redelijk helder idee van de hydrologische kringloop. Maar van waterafvoer had hij, zoals de meeste Romeinen weinig kaas gegeten. Algemeen werd in die tijd aangenomen dat de afvoer alleen werd bepaald door de natte doorsnede van een stroom. Waarschijnlijk was Hero een van de weinige Romeinen die in de gaten had dat ook de stroomsnelheid bepalend was voor de afvoer.

De Romeinse watergedeputeerde Sextus Julius Frontinus (34-104) was een van zijn leerlingen, maar hij heeft tijdens college waarschijnlijk zitten slapen. Hij was dan ook niet in staat de waterbalans van Rome kloppend te maken. Hij zat daar niet zo mee, omdat de oorzaken wat hem betreft duidelijk waren: lekkage van leidingen en frauduleuze praktijken op het gebied van het aftappen van water.

Na het Romeinse Rijk is het op wetenschappelijk gebied lange tijd stil. In de donkere **middeleeuwen** is in Europa de wetenschap ondergeschikt aan theologie. Pas aan het eind van de zestiende eeuw komt er weer wat beweging in de wetenschap. Leonardo da Vinci en Bernard Palissy hielden zich op een niet onverdienstelijke wijze bezig met de hydrologie. Hun ideeën en concepten op hydrologisch gebied hadden echter niet al te veel invloed op de generaties direct na hun, omdat deze niet erg toegankelijk waren. Uit studies van de aantekeningen van Leonardo da Vinci is overigens later gebleken dat hij het voor wat betreft de hydrologische kringloop bij het verkeerde eind had. In zijn concept stroomt het water uit de zee via aderen in de aarde naar de bergtoppen. En blijft het zout onderweg achter.

In de **zeventiende eeuw** wordt veel vooruitgang op natuurwetenschappelijk terrein geboekt. Bijvoorbeeld in Cambridge, waar Newton in Trinity College zijn wetenschappelijke arbeid verrichtte. Enkele andere namen: Galileo, Harvey, Descartes, Leeuwenhoek, Huygens, Hook, Halley, ga zo maar door. En natuurlijk ook Johannes Kepler die stelde: meten is weten.

Ook op hydrologisch gebied werden in die zeventiende eeuw vorderingen gemaakt. Het feit dat er een zekere mate van consensus werd bereikt over het continuïteitsprincipe mag niet ongenoemd blijven. Dit is de grote verdienste van de Italiaan Benetto Castelli (1577-1644), een leerling en vriend van Galileo. Dezelfde Castelli staat ook te boek als de maker van de eerst regenmeter in Europa.

In de tweede helft van de zeventiende eeuw waren het met name Pierre Perrault, Edmé Mariotte en Edmond Halley die een grote bijdrage leverden aan de ontwikkeling van de kwantitatieve, experimentele, hydrologie. Zij waren de eerste hydrologische onderzoekers die meetresultaten gebruikten om hun hypothesen te toetsen. Belangwekkend is bijvoorbeeld het verdampingsonderzoek van Halley. Op grond hiervan maakte hij het onder meer aannemelijk dat er uit de oceanen genoeg water verdamt om de bronnen en rivieren op het land aan te vullen. Daarmee leverde hij een zeer belangrijk stuk bewijsvoering ten aanzien van de hydrologische kringloop.

In de **achttiende eeuw** gaat de belangstelling op hydrologisch gebied vooral uit naar het oppervlaktewater en met name naar de meting van snelheid en afvoer: Du Buat, Chézy, Woltman en Venturi. Natuurlijk mag ook de Zwitserse wiskundige Daniël Bernoulli (1700-1782) niet onvermeld blijven, een van de pioniers op het gebied van druk-snelheid relaties.

Een van de eerste toepassingen van de geologie in de analyse en oplossing van grondwaterproblemen komen wij tegen in de **negentiende eeuw**. In 1827 publiceerde de Engelsman William Smith een verhandeling over het gebruik van grondwater voor de watervoorziening van Scarborough. Als we al iemand zouden moeten aanwijzen, dan mogen we Smith misschien zien als de grondlegger van de geohydrologie.

Maar het waren Franse ingenieurs die al snel het voortouw overnamen. In de eerste plaats Henry Philibert Gaspard Darcy (1803-1858), die een reeks van hydraulische experimenten opzette. Een van die experimenten resulteerde in een empirische relatie voor de stroming van

water door zand: later de Wet van Darcy genoemd. Zo'n 300 à 400 jaar na de afleiding van het continuïteitsprincipe konden de geohydrologen eindelijk beschikken over een bewegingsvergelijking. Voor grondwater dat kruipt waar het niet gaan kan.

Geïnspireerd door Darcy gingen anderen aan het werk, zoals Dupuit en Thiem. Aan het einde van de 19e eeuw en aan het begin van de twintigste eeuw was de Oostenrijker Philip Forchheimer ongetwijfeld de belangrijkste onderzoeker op het gebied van grondwaterstroming. Hij was de eerste die de betekenis van de Laplace-vergelijking voor de oplossing van grondwaterstromingsproblemen onderkende en hij paste wiskundige technieken als conforme afbeeldingen en complexe variabelen toe. Hij was ook de eerste die de methode van spiegelpotten toepaste.

Terzaghi zei over hem dat hij op het gebied van grondwaterstroming meer had bereikt dan al zijn Europese tijdgenoten te zamen.

De klassieke handboeken van Muskat en Tolman en het werk van Theis op het gebied van niet-stationaire stroming in de dertiger jaren kunnen worden gezien als het sluitstuk van 2000 jaar pionieren in grondwaterhydrologie, maar ook als het begin van een nieuw tijdperk.

Ook in Nederland werd niet stilgezeten, getuige het zeer boeiende overzicht van De Vries, "Anderhalve eeuw hydrologisch onderzoek in Nederland" [19]. Hierin kan worden gelezen hoe het is gelopen met het hydrologisch onderzoek in Nederland.

Bij het afscheid van Van Dam komt de vraag op of het geen tijd wordt voor een tweede druk met een aanvullend hoofdstuk over de leermeester Van Dam.

Tussen theorie en empirie

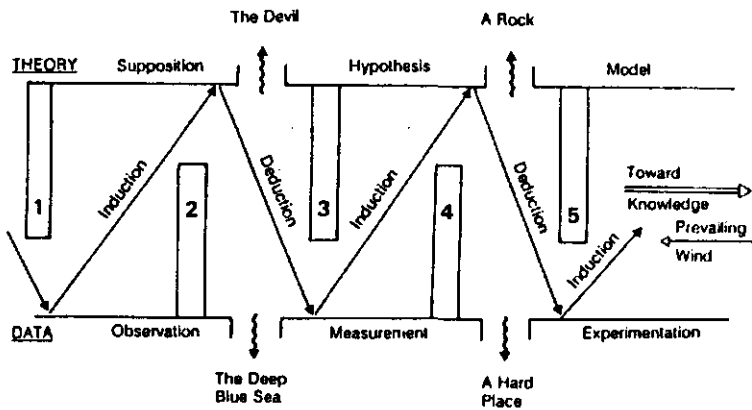
We schrijven nu 1993. Kennis van de hydrologie blijkt van toenemend belang te zijn voor de vraagstukken van nu en morgen. Hydrologen zijn nodig om bij te dragen aan de duurzame ontwikkeling van planeet aarde.

En juist nu klinken er twijfels over de kwaliteit van de hydrologen en van hydrologisch onderzoek. Vit Klemes, president van de International Association of Hydrological Sciences (IAHS), schreef nog niet zo lang geleden over "dilettantism in hydrology" [20]. De onlangs opgeheven Stichting Hydrologisch Centrum maakte zich in haar nota "Aqua quo vadis" (1988) ernstig zorgen over de kwaliteit van opleiding en onderzoek in Nederland [21].

Ondanks de lange geschiedenis van de hydrologie, is er twijfel of er wel sprake is van een wetenschappelijke traditie. Een traditie, waarbij het proces van wetenschappelijke kennisvorming opgevat kan worden als een onophoudelijke pendelbeweging tussen de ideeënwereld (de theorie) en de verschijnselenwereld (de empirie).

Als hoogleraar, als voorzitter van de Commissie Hydrologisch Onderzoek TNO [22], als voorzitter van de Raad van Advies van het Instituut voor Grondwater en Geo-energie TNO, als motor achter de Salt Water Intrusion Meetings (SWIM) [23] en in andere functies, heeft Jan van Dam zich ingezet om die pendelbeweging op gang te houden.

Maar de weg naar kennis is moeizaam, zoals we allemaal weten; de weg voert door een gevaarlijke zeeëngte tussen ruige kusten. De onderzoeker beschikt slechts over een klein zeilbootje en hij heeft overwegend wind tegen. Hillel [24] heeft de reis in kaart gebracht (figuur 1).



figuur 1.

De onderzoeker moet zijn boot zien te laveren tussen de twee kusten. De rechterkust met de data uit de verschijnselenwereld (empirie): achtereenvolgens waarnemingen, metingen en experimenten. En een linkerkust, de theorievorming, met de onderdelen: veronderstelling, hypothese en modelvorming. De slagen, die de zeiler-onderzoeker tussen beide kusten moet maken, vormen de pendelbeweging van inductie en deductie tussen empirie en theorie. Onderweg wordt hij geconfronteerd met omwegen en barrières die kunnen leiden tot grote vertragingen en zelfs tot een rampzalig en voortijdig einde van de reis. Er is sprake van een overwegend ongunstig onderzoeksklimaat.

Hillel geeft op zijn kaart de volgende omwegen aan:

- **The Devil**, de duivelse verleiding om steeds verder van de empirie te koersen en zich te ver te wagen in het gebied van voortijdige speculaties en onbewezen conclusies, in de onjuiste veronderstelling dat theorie op zich de waarheid is en dat er geen verdere feiten meer noodzakelijk zijn.
- **The Deep Blue Sea**; de tegenovergestelde neiging om te ver van de theorie af te drijven en terecht te komen in de diepten van eindeloze gegevensstromen zonder dat de onderzoeker beschikt over een structurerend theoretisch concept.

- **A Rock**; waar tegen de onderzoeker te pletter dreigt te varen, indien hij worstelt met hopeloos complexe mathematische formuleringen.
- **A Hard Place**; waar de onderzoeker verzeild kan raken indien hij probeert om uitgebreide, lange termijn veldexperimenten op te zetten terwijl wisselende klimatologische omstandigheden, heterogeniteit van het onderzoeksgebied, menselijke fouten, falen van de instrumentatie of invloed van buitenaf zelfs de beste plannen doen mislukken. Of in het beste geval alles twee keer zo lang duurt, zodat de onderzoeker snel is geneigd op te geven.

Er is echter nog meer! In mist gehulde riffen, zoals (1) conventionele wijsheid, (2) bureaucratie, (3) slinkende onderzoeksfondsen, (4) peer reviews en (5) publicatiebeleid. En verder, niet op de kaart aangegeven, mogelijke barrières zoals adviescommissies, interdisciplinaire scheidslijnen en de verlokkingen van een eigen adviesbureau of vervroegd pensioen.

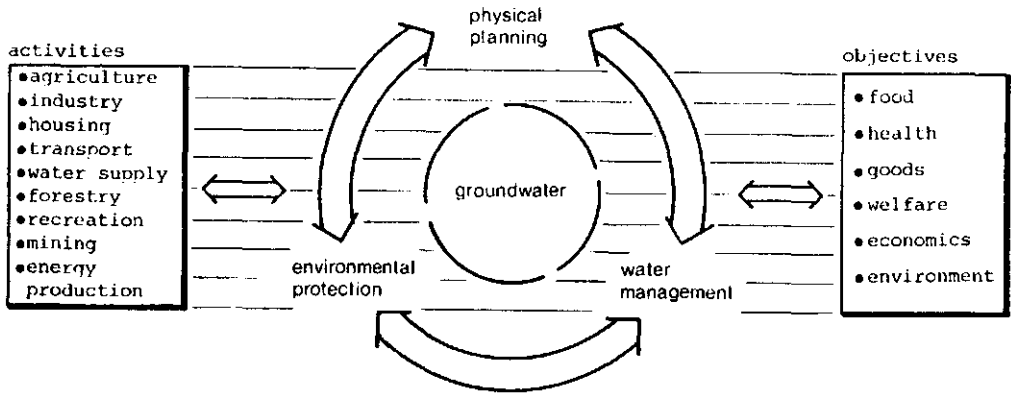
Deze kaart komt elke onderzoeker natuurlijk bekend voor. Ook Jan van Dam heeft in zijn lange wetenschappelijke loopbaan deze moeizame tocht meermalen ondernomen. Per saldo zonder twijfel succesvol, maar ik schat zo in dat hij regelmatig oog in oog heeft gestaan met de hiervoor geschetste gevaren, die zo kenmerkend zijn voor het vaak ongunstige onderzoeks-klimaat.

Hydrologie en beleid

Ondanks (of misschien wel dankzij) mijn grote belangstelling voor de hydrologie ben ik enkele jaren geleden in het beleid terecht gekomen. Als beleidsmaker houd ik mij nu bezig met de drinkwatervoorziening in Nederland. Een onderwerp met veel facetten, waaronder de dekking van de toekomstige waterbehoefte. Hetzelfde onderwerp dus, waarmee Jan van Dam gedurende zijn (korte) loopbaan bij het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening was belast. Het bloed (grondwater) kruipt waar het niet gaan kan.

In de afgelopen vijftientig jaren is het hydrologisch onderzoek steeds dichterbij het beleid komen te liggen. Toen ik bij het RID begon was bijvoorbeeld het geohydrologisch onderzoek vooral gericht op de inrichting van waterwingebieden en de bemaling van bouwputten. Onderwerpen als raming van de winbare hoeveelheid grondwater, grondwaterbeschermingsgebieden, grondwaterverontreiniging, bodemsanering, provinciale grondwaterplannen, integraal waterbeheer, verdroging en klimaatverandering hebben daarna belangrijke impulsen gegeven aan het hydrologisch onderzoek. Met niet alleen aandacht voor de mensgerichte functies van het fysieke leefmilieu, maar ook voor ecosystemen.

Beleidsmatige ontwikkelingen op genoemde terreinen hebben gezorgd voor een (instabiel) hoge drukgebied in het hydrologisch onderzoeksklimaat. Instabiel omdat het hydrologisch onderzoek, en zeker het grondwateronderzoek, zich de afgelopen vijftientig jaar steeds nadrukkelijker heeft voltrokken in het spanningsveld tussen maatschappelijke activiteiten en doelstellingen (figuur 2) [25].



figuur 2.

Een spanningsveld opgewekt door conflicterende belangen en beleidsmatig ingekaderd door de beleidsterreinen waterhuishouding, milieubeheer en ruimtelijke ordening. Ook institutionele competenties dragen aan dit spanningsveld bij. Als voorzitter van CHO-TNO heeft Jan van Dam dit ongetwijfeld van zeer nabij meegemaakt.

Zonder onderzoek geen beleid; zonder beleid geen onderzoek. Een twee-eenheid, die toepassingsgericht onderzoek genereert.

De mogelijkheden voor de verdere wetenschappelijke ontwikkeling van de hydrologie zijn echter, ondanks het hoge drukgebied, achtergebleven bij de toegenomen behoefte aan beleids-onderbouwend onderzoek. Het is jammer dat er in navolging van het Speerpuntprogramma Bodemonderzoek geen programma hydrologisch onderzoek is gestart. Wie weet komt het er nog eens van. De waterproblemen zijn in ieder geval belangrijk genoeg.

De haast van de beleidsmaker en de gretigheid van de hydroloog (en andere deskundigen) om beleidsrelevante conclusies en adviezen af te scheiden maken intussen echter dat de wetenschappelijke kwaliteit van het onderzoek niet altijd voldoende aandacht krijgt. Ik denk dan bijvoorbeeld aan het onderwerp verdroging. Vanuit de wetenschap bij de beleidsmakers als prioritair milieuprobleem op tafel gelegd, die vervolgens een beleidsdoelstelling formuleerden waarna bleek dat het probleem wetenschappelijk gezien nog slecht was gedefinieerd en feitelijk niet goed in kaart was gebracht. Daarom gaat er nu een landelijk onderzoekprogramma verdroging van start om lacunes in kennis op te vullen [26]. Intussen wordt op uiteenlopende wijze de geformuleerde beleidsdoelstelling gehanteerd en geïmplementeerd en heerst er een begripsverwarring. Bovendien is er bij verschillende beleidsmakers en de politiek een foutieve beeldvorming ontstaan, namelijk dat verdroging in Nederland het gevolg zou zijn van het meer onttrekken dan de natuurlijke aanvulling van het grondwater. Tegen die achtergrond is het niet verwonderlijk dat de politiek kiest voor een belasting op het onttrekken van grondwater [27].

Tot slot

In het voorgaande heb ik als oud-student enkele losse gedachten aaneengeregen. Gedachten die opkwamen bij het afscheid van een Delfts leermeester. Iemand die vijftientwintig jaar lang zijn zeer gewaardeerde stempel heeft gedrukt op het hydrologisch onderzoek in Nederland en op een hele generatie Delftse hydrologen. In die vijftientwintig jaar heeft hij aan een bijna onafzienbare rij studenten de beginselen van de waterhuishouding en hydrologie bijgebracht. Voor zo'n 200 afstudeerders is hij de wetenschappelijke coach geweest, resulterend in enkele strekkende meters afstudeerscripties. Met zijn vertrek van de TU-Delft wordt een tijdperk afgesloten.

Voor de TU-Delft en voor het hydrologisch onderzoek in Nederland hoop ik dat wij binnenkort een waardig opvolger van prof. Van Dam mogen verwelkomen.

Van Jan van Dam verwacht ik dat hij zijn kennis nog blijft inzetten voor de verdere ontwikkeling van het vakgebied en voor de professionele toepassing daarvan.

Noten

- [1]. College-aantekeningen geohydrologie, collegejaar 1968-1969, opgetekend in de collegebanken door W. Cramer, persoonlijk archief.
- [2]. Dam, J.C. van, 1968, Waterhuishouding en hydrologie. Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van gewoon hoogleraar in de waterbouwkunde aan de Technische Hogeschool te Delft. Waltman, Delft.
- [3]. De Eindhovense hoogleraar Posthumus stelde deze nota op als regerings-commissaris voor het wetenschappelijk onderwijs. In Delft onlokte de nota Posthumus relatief veel discussie en commentaar uit. Hoogleraren, leden van de wetenschappelijke staf en studenten beraadden zich maanden achtereen intensief over de voorstellen van Posthumus. (Zie "De lange weg naar de Technische Universiteit Delft" van H. Baudet).
- [4]. Cramer, W., 1971. De inrichting van het grindgat als spaarbekken voor de drinkwatervoorziening. Afstudeerontwerp, Technische Universiteit Delft.
- [5]. Zie ondermeer het eerste en tweede Structuurschema Drink- en Industriewater-voorziening (1972 resp. 1984) en het Beleidsplan Drink- en Industriewater-voorziening (1993).
- [6]. Medio 1967 trad Van Dam in dienst bij het Rijksinstituut voor Drinkwatervoor-ziening als technisch leider van het opstellen van basisplannen voor de toe-komstige drink- en industriewatervoorziening.
- [7]. Deze hoogleraren brachten mij de beginselen (en iets meer) bij van hun respectievelijke vakgebieden; hydrology of deltaic and coastal areas, drinkwaterbereiding, grondmechanica en vloeistofmechanica (getijden, lange golven, korte golven).
- [8]. Todd, D.K., 1959. Ground Water Hydrology, Wiley & Sons.
- [9]. Verruijt, A., 1970. Theory of Groundwater Flow. Macmillan.
- [10]. Cramer, W., 1984. Zeventig jaar grondwateronderzoek bij het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening in vogelvlucht. In: Jaarverslag 1983, Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening.
- [11]. Als voorzitter van de Raad van Bestuur (later de Raad van Advies) heeft Jan van Dam een belangrijke rol vervuld in de ontwikkeling van DGV-TNO (thans Instituut voor Grondwater en Geo-energie).

- [12]. Voordat Jan van Dam bij het RID in dienst trad, werkte hij onder leiding van prof. ir. A. Volker bij deze studiedienst van Rijkswaterstaat.
- [13]. Genoemde diensten werkten van 1970 tot en met 1986 met het RID intensief samen in de Stuurgroep Coördinatie Geohydrologisch Onderzoek, waarin ook de provincies participeerden. Bij de oprichting van SAMWAT werd dit samenwerkingsverband overbodig bevonden en opgeheven. In hoeverre hier sprake is geweest van een historische vergissing, is aan de geschiedschrijvers ter beoordeling.
- [14]. Het kwam voor dat ik mij verbaasde over een ruimhartig oordeel van Jan van Dam over de prestaties van een examenkandidaat. Ongetwijfeld een onterechte verbazing, omdat ik mij onvoldoende realiseerde dat ik met het toenemen van mijn ervaring steeds hogere verwachtingen koesterde ten aanzien van het kennisniveau van de student.
- [15]. Zo denk ik met veel plezier terug aan een UNESCO-symposium in Helsinki (1980), waar de Nederlandse delegatie er niet in slaagde om tijdens het symposiumdiner een Nederlands lied in te zetten en Henny Colenbrander onze eer trachtte te redden door uiteen te zettten dat voor de keuze van een passend lied eerst een adviescommissie aan de slag zou moeten. Ook aan het optreden van Jan van Dam als dagleider van het jubileumsymposium van de Hydrologische Kring (1985) bewaar ik goede herinneringen.
- [16]. Ook bij andere gelegenheden heb ik wel een historisch uitstapje gemaakt. Bijvoorbeeld bij het afscheid van oud-collega Ir. G.A. Bruggeman. De kans bestaat dat ik hierdoor een bepaald stempel krijg opgedrukt. Om dit te voorkomen wil ik wijzen op mijn toekomstgerichte bijdrage over grondwater aan de IAHS publicatie "Hydrology 2000" (IAHS Publication No. 171, 1987). Bij de voorbereiding van die publicatie heb ik uiteraard Jan van Dam geconsulteerd.
- [17]. Biswas, A.K., 1970. History of hydrology. North-Holland Publishing Company
- [18]. Een qanat is een gegraven ondergronds kanaal, dat water transporteert vanaf een natuurlijke bron of vanuit een watervoerend pakket. Qanats werden voor het eerst in Armenië aangelegd en met name in Perzië toegepast.
De totale tunnellenlengte van een qanat systeem kon oplopen tot enkele tientallen kilometers. Op sommige plekken werd een diepte bereikt van 120 m. In Iran schijnen qanats voor de watervoorziening nog steeds te worden gebruikt.
- [19]. Vries, J.J. de, 1982. Anderhalve eeuw hydrologisch onderzoek in Nederland. Rodopi.
- [20]. Klemes, V., 1986. Dilettantism in hydrology. Water Resources Research, vol. 22, nr. 9, p. 177-188.

- [21]. Op 18 mei 1973 vervoegden de heren J.C. van Dam, J.J. Meulenkamp en E. Romijn zich bij een notariskantoor te Delft om de Stichting Hydrologisch Centrum op te richten. In 1992 werd door het stichtingsbestuur vastgesteld dat de functies van de stichting feitelijk werden vervuld door de Commissie Hydrologisch Onderzoek TNO en de Nederlandse Hydrologische Vereniging en dat de stichting kon worden opgeheven (mission completed).
- [22]. De financiering van CHO-TNO, en daarmee haar toekomst, is onzeker geworden. Het is te hopen dat een oplossing voor de gerezen problemen wordt gevonden. Opheffen van CHO-TNO zou een historische vergissing zijn, met nadelige consequenties voor het hydrologisch onderzoek in Nederland.
- [23]. De eerste Salt Water Intrusion Meeting (SWIM) vond in 1967 in Hannover plaats. Sindsdien worden deze internationale wetenschappelijke bijeenkomsten regelmatig georganiseerd. Als moderator, mede-organisator, "discusser" en presentator van "scientific papers" heeft Jan van Dam zeer belangrijke bijdragen geleverd aan het welslagen van SWIM. In de voetsporen van Badon Ghijben (1889) en Edelman (1940).
- [24]. De hier gepresenteerde kaart trof ik in een stapel "diversen" aan zonder een adequate bronvermelding. De vermoedelijke auteur is Daniel Hillel, Dept. of Plant & Soil Sciences, University of Massachusetts (USA) en het tijdschrift zou kunnen zijn: N.Z. Soil News 37(6).
- [25]. Deze figuur is ontleend aan een bijdrage van mijn hand, met als titel "Exploitation and protection of groundwater resources in The Netherlands", aan het Seminar on Groundwater Protection, Policy and Management. Straatsburg, 1986, European Institute of Water.
- [26]. Dit programma start in de loop van 1993 en wordt gefinancierd door de ministeries van V&W, VROM en LNV.
- [27]. Ontwerp Wet op de verbruiksbelastingen op milieugrondslag (1993).

"Veranderingen in het hydrologisch klimaat"

Symposium t.g.v. het afscheid van Prof.dr.ir.J.C. van Dam van de TU-Delft

Deelnemerslijst

Ing. F.G. Aelmans, IGG-TNO
Prof.dr.ir. J.F. Agema, Consulting Hyd. and Civil Eng.
Prof.dr.ir. C. van den Akker, RIVM
Hanny van den Akker, -Zendingen Priveadres-
Ir. N.A. Amesz, IWACO
Frederik A. Bakker, TUD
Prof.ir J.P.A. van den Ban, LUW
G.J. Beckers, -Zendingen Priveadres-
Prof.ir. E. van Beek, WL-Delft
Prof.dr.ir. A. van der Beken, VU-Brussel
Simon Berdenis van Berlekom, TUD
Dr.ir. H.E.J. Berger, TUD
Mw.ir. L.A.M. Besselink, Grontmij Advies&Techniek BV.
Ing. G.P. Beugelink, RIVM
Ir. P.H. Beuse, RWS, Directie Noord-Holland
D.T. Biewinga, Adv. Geofysica&Geologie
Prof.ir. C. Bijkerk, -Zendingen Priveadres-
Ir. H.J.M. Bijnsdorp, Nederlandse Ver. Kust- en Oeverwerken
Drs. W. Bleuten, Univ-Utrecht
Dr. W.K. Boehmer, Euroconsult BV.
Ir. R.H. Boekelman, TUD
Ir. R. Bol, RIZA Dordrecht
Mw.drs. G. Bolier, TUD
Ir. P.H. Bon, -Zendingen Priveadres-
Dr.ir. J. Boonstra, ILRI
M. Bootsman, -Zendingen Priveadres-
Dr.ir. M.G. Bos, ILRI
Ir. J.A. Boswinkel, IGG-TNO
Ir. A.P. Bot, -Zendingen Priveadres-
Ir. Th. Brandsma, TUD
Ir. H.A.M. Bresser, RIVM
Dhr. J.H. Brinkman, Waterschap Regge en Dinkel
Wout Broere, TUD
Ir. A.P.M. Broks, Broks Adviezen BV.
Prof.ir. R. Brouwer, TUD
Dr.ir. Tj.A. Buishand, KNMI
Drs. F.A.M. Claessen, RWS-RIZA
Heer en Mevrouw J. Colenbrander, -Zendingen Priveadres-
Ir. J.G.A. Coppes, Raadg. In. Witteveen+Bos
Ir. W. Cramer, VROM
Drs. T. Csengő, Waterleidingmaatsch. Drenthe

Prof.dr.ir. J.C. van Dam, TUD
 Mw. M.S. van Dam-Mulder,-Zendingen Priveadres-
 Dr. J.H. Dewaide, Min. van VROM
 Ir. P. van Diepenbeek,WML-Maastricht
 Prof.ir. J.C. van Dijk,TUD
 Dr.H.W.J. van Dijk, Prov. Overijssel
 Ir. A.W. Dollee, RWS - RIZA
 Prof.dr. M. Donze, TUD
 Ir. G. van Ee,M&E/SCMO-TNO
 Prof.dr. G.B. Engelen,-Zendingen Priveadres-
 Mw. M. Evertman, TUD
 Prof.dr.ir. R.A. Feddes, LUW
 Ir. J.B.S. Gan, TUD
 A.J. van Ganswijk,-Zendingen Priveadres-
 Dhr. C.J. Gebraad, TUD
 Ing. J.H. Gerretsen, RWS Directie Limburg
 Dhr. P.J.A. Gijsbers, TUD
 Ir. P.S. Grashoff, WL-Delft
 Ir. J.A. Groen,Ingenieursbureau-Nederlandse Spoorwegen
 Ir. J.A.M. van der Gun, IGG-TNO
 Ir. I.J.G. Haagsma, TUD
 Ir. R.H.E. de Haan, Waterschap de Dommel
 Ing. G.A. den Hartogh, Provincie Utrecht: Dienst W & M
 Dr. G.P. Hekstra, Min. van VROM - PELS
 Ir. H. Herbermann, IHE
 Ir. H. Hiemstra, Prov. Drenthe
 Dr.ir. J. Hoeks, Staring Centrum
 Drs. J.H. Hoogendoorn, IGG-TNO
 Ing. J.C. Hooghart, CHO-TNO
 Ir. D. van Hoorn, RWS Directie Flevoland
 Ir. W.H.C. ten Hoorn,-Zendingen Priveadres-
 Ir. P. Huisman, Rijkswaterstaat/TUD
 Ir. G.J. Hunink, Int. Agr. Hogeschool Larenstein
 E.P.H. Jager, DCMR Milieudienst Rijnmond
 Prof.dr. J. de Jong, RIZA-Lelystad
 Marit de Jong, TUD
 Ir. H.G. de Jonge, NV Duinwaterbed. Zuid-Holland
 Ir. G. Jousma, IGG-TNO
 Ir. G.R. van de Kerk, Van de Kerk+van Venrooy Org.Adv.Bureau
 Ir. A.L.E. Ketelaars, Hogesch. 's-Hertogenbosch
 Dhr. D. Klopstra, Luchtmacht/B.M.
 Hr. A. Kocan, TUD
 Ir. A. de Koeijer, Dir. Sector Natuur en Milieu Gem. Haarlem
 Drs. G.H. van der Kolff, BCRS Programmabureau
 Ir. J.P. Koole, Int.Inst. Agr. Hoogsch. Larenstein 9001
 Dr.ir. R.W.R. Koopmans, LUW
 Drs. M. van Koten-Hertogs, RMNO
 Drs. D.A. van der Kroef, St. Aardwetensch. Onderzoek
 Ir. W.J. de Lange, RIZA Lelystad

Mw.ir. J.M. Leemhuis-Stout, Hoogh. van Schieland
 J.D. Leenen, Haskoning
 Ir. E.H. Leeuw, Grondmechanica Delft
 Ir. J.W. Leunk, Zuiveringsschap Oostelijk Gelderland
 Drs. A. Leusink, IWACO B.V.
 Ir. R. Lieste, RIVM
 Ir. A.H. Lobbrecht, TUD
 Prof.ir. J.H. van Loenen, Kon. Mil. Academie Breda
 Ir. I.G.J. van Lotringen, Ingenieursbureau Van Limborgh
 Ir. J. Luijendijk, IHE
 Ir. J. Luijendijk, BRON2 B.V. i.o.
 Ir. J.P.A. Luiten, RIZA
 Mw. I.R.M. Maassen, TUD
 Ir. J. van Malde, RWS Dienst Getijdewateren
 Ir. A. van Mazijk, TUD
 Prof.dr. A.M.J. Meijerink, I.T.C.
 Ir. A.J. Meulenbroek, SG Bouwconsult
 Prof.dr. W.G. Mook, Ned.Inst. Onderzoek der Zee(NIOZ)
 Ir. N.L. van der Moot, W.M.D.
 Ir. H.G.M. Mooy, Tjaden Adviesbureau BV.
 Ir. G.M. Moser, Hoogh. van Rijnland
 Prof.ir. L.J. Mostertman, TUD
 Ir. M.A.A. Mulder, -Zendingen Priveadres-
 Ir. J.H.C. Mülschlegel, RIVM
 Hr. Kamuanga Mwanza, Ambassade van Zaire
 Ing. H. de Niet, -Zendingen Priveadres-
 Ir. G.J.A. Nieuwenhuis, Staring Centrum
 Ir. M.H.A.M. Nijs, Oranjewoud B.V.
 Ir. A.N.M. Obdam, RGD-Haarlem
 Ir. N.E.G. Oei, Prov. Noord-Holland
 Ir. Th.N. Olsthoorn, Gemeente Waterleiding Amsterdam
 Hanneke Ooms, TUD
 Ir. G.A. Oosterbaan, Staring Centrum - DLO
 Ir. A. Oosterbroek, -Zendingen Priveadres-
 Hanneke Ossenkoppele, TUD
 Ir. G.H.P. Oude Essink, TUD
 Drs. H.J.M. Pagnier, RGD-Vestiging Heerlen
 Ir. M.J.H. Pastoors, RIVM
 Ing. A.A. Peeters, -Zendingen Priveadres-
 Ir. N.P. Pellenbarg, RIZA - Lelystad
 Leon Peute, Belgische & Nederlandse Paella Ver.
 Drs. A.B. Pomper, Staring-Centrum
 Ir. F.M. Post, Rijksluchtvaartdienst
 Ir. A.G. Posthumus, Witteveen + Bos
 Mw. C.W.S. Posthumus, CHO-TNO
 Ir. H.Th. Reitsma, TUD
 Ing. T.H.M. Rientjes, TUD
 Ir. H.L.M. Rolf, PWN
 Drs. E. Romijn, -Zendingen Priveadres-

Drs. Pieter van Rooijen, RGD - Heerlen
 Ir. E. Roosma, PWN
 Ir. W. Rosbergen, Oranjewoud B.V.,
 E. M.Sc. Rosbergen, TUD
 Mw. E.G. Rothfusz, TUD
 mevr.drs. J.C. de Ruiter-Peltzer, WMO
 Ir. F. Rutgers, RWS-RIZA
 Bart Rutten, TUD
 Dr. H.L.F Saeijs, RWS, Directie Zeeland
 Ir. H. Salz,-Zendingen Priveadres-
 Ir. G. Santing,-Zendingen Priveadres-
 Dr.ir. H.H.G. Savenije, IHE
 Ir. J.E. Schaapman, Haskoning
 L. Schipper, TUD
 Prof.dr.ir. E. Schultz, RWS-Directie Flevoland
 Prof.dr. C.J.E. Schuurmans, KNMI
 Dr.ir. H.H. Siebers, Oranjewoud BV
 Ir. H.J. Siefers, Waterschap de Aa
 Ir. G.N. Slat,Oranjewoud BV.
 Ir. M. Snijdelaar, Directie Flevoland RWS
 Mr. J.J. van Soest,-Zendingen Priveadres-
 Ir. W. Spaans, IHE
 Dr. H. Speelman, IGG-TNO
 Ir. R. Speets, IWACO B.V.
 Ir. J.H.A.M. Steenvoorden,Staring-Centrum
 Dr.ir. G.S. Stelling, TUD
 Ir. R. Stroet, BRON2
 Prof.ir. J. Stuij, Stichting CUR
 Marcel Taal, TUD
 Tiessens,-Zendingen Priveadres-
 Ir. H. Ton, Prov. Waterstaat Groningen
 Ir. D. van der Valk, Tauw Intra Consult
 M. van der Valk, TUD
 Johan Valstar, TUD
 Ir. P.W. Veel, Prov. Noord-Holland, Dienst M en W
 Prof.dr. A.W.L. Veen, RU-Groningen
 Ir. C. van der Veen, GWA
 Prof.dr.ir. P. van der Veer, TUD
 Prof.dr.ir. A. Verruijt, TUD
 Ir. G. Verwolf, Hoofddir. v/d Waterstaat Den-Haag
 Ir. J.E. Vink, Hoogheemraadschap Amstel en Vecht
 Ir. P. Volker, Planetenlaan 254
 Prof.ir. A. Volker,-Zendingen Priveadres-
 Ir. J.G. Voorhoeve,DHV Milieu en Infrastructuur BV.
 Prof.dr. C. Voute,Consultant
 Ir. P.W. de Vries,-Zendingen Priveadres-
 Ir. G.H. van Vuren,LUW
 Ir. J.M.J. Waals, NV. Waterw. Brabantse Biesbosch
 Ir. C.W. van der Wal, TNO Milieu en Energie

Heer en Mevrouw F. Walter, TUD
Prof.dr.ir. L. Wartena, Meteo-Consult
H. v.d. Weijer, RWS - Dir. Gelderland
Ir. L. Wentholt, STOWA
M. Werner, TUD
Prof.mr. J. Wessel, TUD
Prof.dr. J. Wieringa, LUW
Prof.ir. J.B.M. Wiggers, TUD
Ir. H.G.J.W.A. Wolfs, FUGRO BV.
Ir. J.J. van Wonderen, Mott Macdonald (UK)
mw.ir. S. Wuijts, WRK N.V.
Dr.ir. J. Wytzes, Q-Consult Adviesbureau
Dr.ir. W. Zijl, -Zendingen Priveadres-
Ir. J. Zweegman, NV. WAPROG

