

## **Onzekerheid in grondwatermodellering**

Verlag van de lezingendag op 19 januari 1995 in De Reehorst te Ede

### **Inleiding**

TNO Grondwater en Geo-Energie heeft, in overleg met de Landelijke Studiegroep Statistiek in de Aardwetenschappen, de lezingendag met als thema 'Onzekerheid in grondwatermodellering' georganiseerd in samenwerking met de Universiteit Utrecht en de Technische Universiteit Delft.

De lezingendag was een vervolg op de lezingendagen die in het kader van de voormalige Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO (CHO-TNO) werden georganiseerd. Deze lezingendagen waren:

- 'Tijdreeksen in bodem en water' in 1989.
- 'Ruimtelijke statistiek in bodem en water' in 1991.
- 'Proceskennis en statistiek in bodem en water' in 1993.

De aanleiding voor het organiseren van deze lezingendag was het feit dat er binnen een kort tijdsbestek van ruim één jaar een aantal promotiestudies zijn/worden afgerond die zijn gerelateerd aan het onderwerp 'Onzekerheid in grondwatermodellering'.

Deze promotiestudies zijn uitgevoerd aan de Universiteit Utrecht en de Technische Universiteit Delft in nauwe samenwerking met TNO Grondwater en Geo-Energie. De rode draad door de lezingendag liep vanuit het beschrijven en modelleren van de geologie naar de onzekerheden in grondwatermodellen. Voor het analyseren van de onzekerheden zijn hierbij de begrippen heterogeniteit en schalen van cruciaal belang. Case studies in de holocene Rijn-Maas delta en het stuwvallengebied van Overijssel werden hierbij als voorbeelden gebruikt. Dagleider was F.C. van Geer van TNO Grondwater en Geo-

Energie, die nauw betrokken was als begeleider bij de promotiestudies.

Ondanks het gespecialiseerde thema van de bijeenkomst werd er door ruim 160 personen deelgenomen.

Hierna volgt per lezing een samenvatting en eventuele conclusies.

### **Hydrologische modellering**

P.A. Burrough – Universiteit Utrecht

De fysische basis van grondwaterstroming is al lang bekend door werk van Darcy, Richards en anderen. De uitwerkingen van hun theorieën hebben tot vele computermodellen geleid. Voor de implementatie van de stromingsvergelijkingen delen computermodellen de bodem in blokken op. Eindige-elementenmodellen gebruiken onregelmatige blokken van diverse vorm en grootte: eindige-differentiemodellen werken met regelmatige, vierkante blokken van vergelijkbare omvang en vorm. Het verbeteren van grondwatermodellen komt niet door betere fysica, maar door een betere karakterisering van de modelblokken. Natuurlijke variabiliteit in neerslagoverschot, intreeweerstand en vooral  $k_{sat}$  zijn de grootste oorzaken van onnauwkeurigheid en onzekerheden in modelresultaten. Kennis van de geologie, sedimentologie en geostatistiek is van groot belang bij het opschalen van metingen van  $k_{sat}$  in boorkernen tot bruikbare waarden van  $k_{sat}$  voor modelblokken.

### **De geologie van de holocene Rijn-Maas delta**

T. E. Törnqvist – Universiteit Utrecht

De veranderingen van klimaat en zeespiegelniveau gedurende het laatste deel van het Pleistoceen en het Holoceen hebben in hoge mate de riviersedimentatie in de Rijn-Maas delta bepaald, hetgeen op zijn beurt

belangrijke geohydrologische consequenties heeft. De vlechtende rivieren van het Weichselien bouwden het eerste watervoevende pakket op, terwijl de holocene meanderende en anastomoserende rivieren de deklaag vormden. Door de aanwezigheid van zandlichamen is deze deklaag echter beslist niet 'waterdicht'. Met name in de gebieden waar meanderende rivieren gedurende het grootste deel van het Holoceen actief zijn geweest (in het bijzonder ten oosten van Geldermalsen) bestaan er grote zandlichamen die in verbinding staan met de pleistocene ondergrond en tot dicht aan het oppervlak doorlopen. In het westelijke deel, waar anastomoserende rivieren een groot deel van het holocene pakket hebben opgebouwd, is de gemiddelde permeabiliteit van de deklaag veel geringer.

Er bestaat een duidelijke systematiek in de ruimtelijke en temporele verspreiding van de sedimenten van deze riviertypen. Omdat de geohydrologische karakteristieken van de afzettingen van elk riviertype

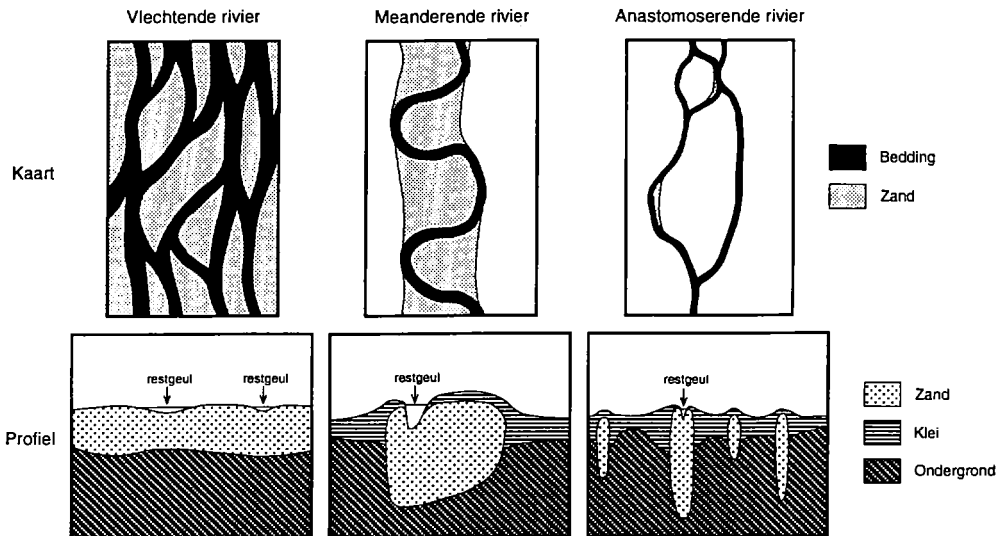
sterk verschillen, heeft dit belangrijke consequenties voor grondwaterstroming in de holocene Rijn-Maas delta.

Niet een makkelijk gebied om  $k_{sat}$  te bepalen!

### Meetschaaldoorlatendheden van een complexe deklaag

H.J.T. Weerts – Universiteit Utrecht

Weerts behandelde de resultaten van een onderzoek naar de koppeling van geologische data aan geohydrologische data. Doel van dit onderzoek is het minimaliseren van onzekerheid bij grondwatermodellering die voortvloeit uit onbekendheid met de geohydrologische eigenschappen van complexe deklaagen. In Nederland wordt de top van het geohydrologisch systeem veelal gevormd door een complex opgebouwde deklaag. Onbekendheid met de geohydrologische eigenschappen van de deklaag is een grote bron van onzekerheid bij grondwatermodellering.

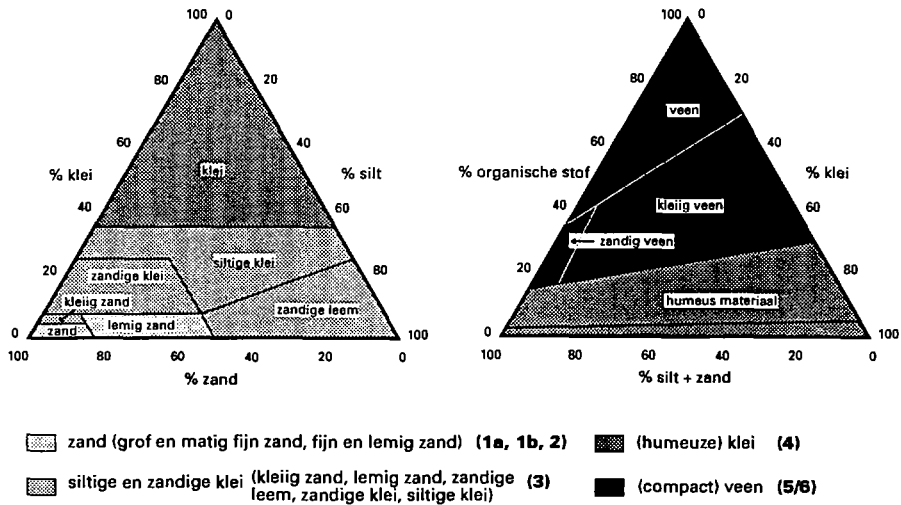


**Figuur 1:** Ruimtelijk patroon van vlechtende, meanderende en anastomoserende rivieren en schematische doorsnede door afzettingen van deze riviertypen.

Beschrijving en modellering van de grondwaterstroming door de complexe deklaag op gedetailleerde schaal is slechts mogelijk als de geohydrologische eigenschappen en de ruimtelijke verdeling van de afzettingen in de deklaag voldoende bekend zijn. Dit is vaak niet het geval. Wel zijn vaak geologische data (boringen, kaarten) voorhanden. Door de beschikbare geologische data te koppelen aan harde geohydrologische data kan de onzekerheid bij grondwatermodellering die voortvloeit uit de onbekende geohydrologische eigenschappen van de deklaag worden geminimaliseerd. Hiervoor zijn drie stappen noodzakelijk:

- 1 Gedetailleerde beschrijving van de afzettingen in de deklaag alsmede inzicht in de ontstaanswijze van die afzettingen;
- 2 Koppeling van de afzettingen in de deklaag aan eenvoudig in het veld herkenbare lithologische klassen;
- 3 Bepaling van de geohydrologische eigenschappen (verdelingen van meetschaal-doorlatendheid ( $k_{sat}$ ) en effectieve porositeit) van de lithologische klassen.

De verschillende typen afzettingen in de complexe deklaag in de Rijn-Maas delta werden besproken. Deze deklaag kan als voorbeeld voor andere complexe deklagen worden beschouwd. Aan enkele honderden ongestoorde sedimentkernen van de afzettingen in de Rijn-Maas delta zijn de korrelgrootteverdeling en een structuurbeschrijving bepaald. Aan de hand hiervan is een aantal lithologische klassen onderscheiden dat eenvoudig in het veld herkend kan worden en waarin de verschillende typen afzettingen eenvoudig kunnen worden ondergebracht. Tenslotte zijn de verdelingen van meetschaal-doorlatendheden en effectieve porositeiten binnen de onderscheiden lithologische klassen bepaald. De verzadigde doorlatendheden en porositeiten zijn gemeten aan in het veld gestoken kerntjes met een diameter van 5–7 cm en een lengte van 5–30 cm, al naar gelang het type sediment.



**Figuur 2:** Benaming van textuurklassen volgens NEN 5104 (Nederlands Normalsatie Instituut, 1989) en indeling in lithologische klassen 1–6 (naar Blerkens, 1994).

Het blijkt mogelijk om op deze wijze de afzettingen binnen een complexe deklaag lithologisch en geohydrologisch goed te karakteriseren. Hiervoor is het nodig dat de ontstaanswijze van de deklaag voldoende bekend is, voldoende gedetailleerde lithologisch/geologische kaarten beschikbaar zijn, voldoende metingen van meetschaal-doorlatendheid en porositeit zijn of worden ver richt aan ongestoorde sedimentkernen, en groepering tot zinvolle lithologische/doorlatendheidsklassen mogelijk is. De onderscheiden lithologische/doorlatendheidsklassen kunnen, na opschaling, worden gebruikt als invoer voor grondwaterstromingsmodellen. Hierbij moet niet uit het oog worden verloren dat er, ondanks de gedetailleerde karakterisatie, een aantal onzekerheden overblijft:

- 1 De contrasten in doorlatendheid op de meetschaal tussen verschillende typen afzettingen in de Rijn-Maas delta zijn groot. Onjuiste of onnauwkeurige kartering van de afzettingen kan grote gevolgen voor het grondwatermodel hebben.
- 2 De textuurklasse 'fijn en lemig zand' is in het veld niet goed te schatten. Afzettingen die korrelgroottes binnen (of net buiten) deze klasse hebben worden makkelijk verkeerd ingeschat.
- 3 Bij zandige beddingafzettingen is het belangrijk om te weten of deze zijn afgezet door meanderende of anastomoserende rivieren, daar beide typen afzettingen een verschillende opschalingmethode vergen. Bij anastomoserende rivieren kan de opschalingmethode van Indelman en Dagan (1993a, b) worden gebruikt. Bij meanderende rivieren moet rekening worden gehouden met de scheefstaande kleilaagjes binnen de zandlichamen. Bij opschaling van doorlatendheden van deze sedimenten kan de methode van Bierkens en Weerts (1994b) gevolgd worden. Gebruik van verkeerd opgeschaalde doorlatendheden leidt tot een ernstige over- of onderschatting van de doorla-

tendheden van de zandige bedding-afzettingen in verticale richting.

### **Opschaling van geohydrologische eigenschappen: van meetschaal tot regionale schaal**

M.F.P. Bierkens – Staring Centrum DLO

Bierkens besprak het gebruik van geostatistische methoden voor het opschalen van geohydrologische eigenschappen van de bodem (waaronder  $k_{sat}$ ) van de meetschaal naar de schaal waarop modelresultaten worden gevraagd. Hij liet ons zien hoe informatie uit de geologie, pompproeven en boorkernen aan elkaar gekoppeld worden, met als doel het zo goed mogelijk bepalen van de juiste waarden van de geohydrologische eigenschappen op de modelschaal.

Wanneer een numeriek grondwatermodel wordt gebruikt voor de modellering van stroming en advectief transport door heterogene media (bijvoorbeeld de lokale stroming door deklagen), dienen de geohydrologische eigenschappen verkregen uit kleinschalige metingen zoals boorkernen eerst te worden opgeschaald naar representatieve geohydrologische eigenschappen voor de blokken of elementen van dit numerieke model. Hiervoor is kennis van de doorlatendheid en porositeit op de meetschaal en van hun correlatielengten noodzakelijk. Een overzicht werd gegeven van de eigenschappen van opgeschaalde geohydrologische eigenschappen. Een aantal praktische resultaten uit de opschalingstheorie werd gepresenteerd. Opschalingstheorie wordt toegepast bij de modellering van de grondwaterstroming door een zeer complexe deklaag. Deze toepassing toont de noodzakelijkheid van opschaling aan. De vanuit metingen aan boorkernen opgeschaalde geohydrologische eigenschappen zijn ook op regionale schaal consistent.

Uit de opschalingstheorie van geohydrologische eigenschappen en de gepresenteerde toepassing volgen de onderstaande conclusies:

- 1 In de meeste gevallen kan opschaling alleen plaatsvinden onder de aanname van een model van ruimtelijke variabiliteit, zoals het stochastisch veldmodel. Gegeven dit model geldt:
  - a De effectieve porositeit op blokschaal is bij benadering deterministisch en gelijk aan de verwachting (verdelingsgemiddelde) van de effectieve porositeiten op meetschaal.
  - b Ingeval van statistisch isotrope media (bijvoorbeeld tweedimensionale stroming in het vlak) en blokken met zijden die veel groter zijn dan de correlatielengte ( $> 3x$ ), maar klein genoeg om uniforme stroming door het blok aannemelijk te maken, volstaat als blokdoorlatendheid het geometrisch gemiddelde van de doorlatendheden op puntschaal.
  - c Wanneer de blokzijden niet veel groter zijn dan de correlatielengte van de meetschaal-doorlatendheden en klein genoeg om uniforme stroming aan te nemen, kan men analytische oplossingen gebruiken zoals die van Rubin en Gómez-Hernández (1990) voor statistisch isotrope media (bijvoorbeeld tweedimensionale stroming in het vlak) en die van Indelman en Dagan (1993b) voor statistisch anisotrope media (bijvoorbeeld driedimensionale stroming in gelaagde afzettingen).
- 2 Wanneer men slechts geïnteresseerd is in de regionale grondwaterstroming zonder rekening te houden met transport van opgeloste stoffen via de deklaag, kan de deklaag als homogeen worden gemodelleerd
- 3 Voor lokale grondwaterstromingsproblemen en transport dient de deklaag als heterogeen te worden gemodelleerd. In dat geval is opschaling van doorlatendheden gemeten aan boorkernen tot blokdoorlatendheden absoluut noodzakelijk.

Het is dan in principe mogelijk de geohydrologische eigenschappen consistent te beschrijven voor schaalniveaus die variëren tussen de schaal van boorkernen tot de regionale schaal.

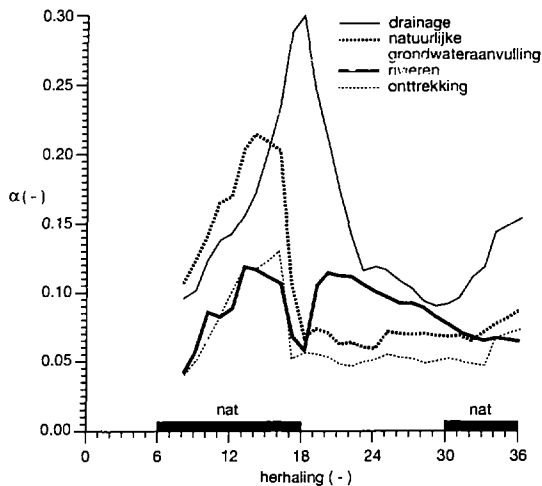
- 4 Voor afzettingen bestaande uit textuurklassen met contrasterende doorlatendheden is, wanneer voor elke textuurklasse de correcte gemiddelde horizontale en verticale blokdoorlatendheden worden berekend, de variatie van de blokdoorlatendheden binnen één textuurklasse van ondergeschikt belang voor de grondwaterstroming en het advectief transport op lokale en regionale schaal.

### **Calibratie van een stochastisch grondwaterstromingsmodel**

C.B.M. te Stroet – TNO Grondwater en Geo-Energie

Tenslotte analyseerde Te Stroet op een stochastische wijze de discrepanties tussen modelvoorspellingen en de werkelijkheid. Ook al wordt overal gemeten, een model kan nooit de werkelijkheid exact weergeven, omdat het nooit op alle schalen alle aspecten van het probleem kan beschrijven. De spreiding in mogelijke uitkomsten en de oorzaken achter de belangrijkste verschillen kunnen ook bruikbare informatie opleveren voor het optimaliseren van meetnetten en modelopzet. Het is veel beter de omvang en de oorzaken van onzekerheid te weten dan te verkeren in de veronderstelling dat alles exact is uitgerekend. Er is geen gouden regel die zegt dat "because prolonged and accurate mathematical calculations have been made, the application of the result to some fact of nature is absolutely certain" (Whitehead, 1953).

Bij de voorafgaande twee lezingen zijn we gekomen tot de invulling van blokeffectieve parameterwaarden voor een regionaal model. Bij het bepalen van deze parameter-



**Figuur 3:** Bijdragen in de tijd aan de modelonzekerheid van de verschillende drijvende krachten voor het model Wierden.

waarden is gebruik gemaakt van alle (harde en zachte) informatie die vooraf bekend is. Bij het modelleren van grondwaterstroming kunnen de stijghoogtemetingen worden gebruikt om de blokeffectieve geohydrologische variabelen (bergingscoëfficiënt, transmissiviteit, verticale weerstand) en drijvende krachten (natuurlijke grondwateraanvulling, interactie met oppervlaktewater) in het model verder te verbeteren. Doordat het model een schematisatie van de werkelijkheid is, zal er altijd een discrepantie blijven tussen werkelijkheid en modelresultaten. Deze discrepantie vormt het stochastische deel van het model en kan nooit weggecalibreerd worden, ook al meten we nog zo veel. Dit uitgangspunt is gehanteerd bij de modellering van een model rond Wierden. Net als de modelparameters moet ook het stochastische deel van het model worden geïjkt.

Daarna is bepaald in hoeverre het incorporeren van dit stochastische deel andere geïjkte modelparameters oplevert bij calibratie. Vooral in de toplaag, waar vaak veel onzekerheid zit in een regionaal model, werden over orden van grootte verschillende

parameterwaarden gevonden voor een deterministisch en stochastisch model.

De conclusie uit het voorgaande is dat het doel van een calibratie niet zozeer een minimalisering van de calibratiefout is, als wel het verkrijgen van een parameterset die het geohydrologisch systeem zo goed mogelijk beschrijft. De calibratie is verzonken in het identificatieprobleem, hetgeen eerst moet worden opgelost. De gebruikte schematisatie hiervoor introduceert intrinsieke modelfouten die niet meer weggecalibreerd kunnen worden. Deze modelfouten leveren de basis voor de modelonzekerheid. Er zijn twee hoofdpunten met betrekking tot deze modelonzekerheid die in deze bijdrage aan de orde komen:

- 1 Indien de modelfouten worden gekoppeld aan bepaalde bronnen - en de bijdrage van deze bronnen kunnen worden gekwantificeerd - kan worden aangegeven wat de totale modelonzekerheid ruimtelijk gezien is en in hoeverre een bepaalde bron bijdraagt aan de modelonzekerheid. Hiermee kan worden aangegeven met welke informatie het model het meest efficiënt is te verbeteren.

2 Indien de modelfouten worden veronachtzaamd, dan ontstaat bij ijking van de parameters een significante afwijking (een bias over orden van grootte). Dit kan desastreuze gevolgen hebben voor bijvoorbeeld het uitrekenen van scenario's. Bovenstaande punten werden aangetoond aan de hand van het model Wierden.

### **Wat doen wij als hydrologen met deze kennis?**

T.N. Olsthoorn – Gemeentewaterleidingen Amsterdam

De praktische aspecten van de gepresenteerde wetenschappelijke ontwikkelingen voor de hydrologische praktijk werden door T.N. Olsthoorn besproken in reactie op de door de wetenschappers opgestelde stellingen. De gepresenteerde kennis is voor de dagelijkse hydrologie in Nederland van blijvende betekenis, dit impliceert dat hydrologen niet alleen veel aandacht voor gedetailleerde geologische en bodemvariabiliteit moeten hebben, maar ook veel geostatistische kennis in huis moeten hebben. Dit heeft niet alleen consequenties voor de opleiding en bijscholing van hydrologen maar ook voor alle anderen die met hydrologische kennis in hun dagelijkse werkzaamheden worden geconfronteerd.

Onderstaand volgen de conclusies van de bijeenkomst, die op de dag als stellingen werden geponeerd en met de deelnemers werden bediscussieerd.

- *Gezien het hydrologische belang van de deklagen van een grondwatersysteem heeft de hydroloog een gedegen kennis van de verschillende afzettingmilieus nodig. Het verdient dan ook sterke aanbeveling bij de verschillende hydrologen-opleidingen meer aandacht te besteden aan sedimentatieprocessen.*
- *Doorlatendheid van een materiaal kan alleen aan ongeroerde monsters worden ge-*

*meten. Alleen doorlatendheden binnen een faciëseenheid vormen een populatie met een duidelijke unimodale statistische verdeling. Het is dan ook alleen zinvol om doorlatendheden op puntschaal van boor monsters te verzamelen wanneer hun herkomst en ruimtelijke spreiding bekend is (Weerts, 1994).*

- *De opschaalmethodiek lijkt mogelijkheden te bieden om het schatten van  $kD$ -waarden vanuit boorstaten systematisch te verbeteren voor het hele land. Hiervoor zou de kennis van het afzettingmilieu van de verschillende lagen moeten worden gecombineerd met hun textuurklasse en puntschaaldoorlatendheden voor elk van deze textuurklassen. Deze methodiek zou door TNO in het kader van REGIS ter hand moeten worden genomen en worden toegepast op het hele land.*
- *Eén van de voorwaarden voor een succesvolle toepassing van dergelijke  $kD$ - en  $c$ -bepalingen is de vorming van een database met eerste en tweede orde statistieken van de geohydrologische eigenschappen voor sedimenten (textuurklassen) op verschillende schaalniveau's (Bierkens, 1994).*
- *Het zou interessant zijn de opschalingsmethode van Bierkens nader te onderbouwen via opschaling van boorstaten op lokaties waar pompproeven en flowmetingen zijn gehouden.*
- *Een opdrachtgever zou terecht kunnen zeggen tegen een hydroloog die zijn modelrapportage komt toelichten: "Gij spreekt niet over onzekerheid, ergo, gij zijt onbetrouwbaar."*
- *Voordat de behandelde methoden ingang vinden bij al die hydrologen die dagelijks problemen op moeten lossen, zal er nog heel wat missie nodig zijn. Eén en ander zal moeten beginnen met de opleiding op de verschillende universiteiten waar hydrologie wordt onderwezen. Voor al degenen die nu werkzaam zijn, is het echter noodzakelijk dat voorbeelden worden gepubliceerd die overtuigend en begrijpelijk*

*zijn. Olsthoorn doet dan ook een oproep aan degenen die tijdens de lezingendag hun werk hebben voorgedragen, om behalve verhalen in Water Resources Research ook verhalen te schrijven in H<sub>2</sub>O en het vakblad voor hydrologen dat nu opgezet wordt door de Nederlandse Hydrologische Vereniging, die begrijpelijk zijn voor ons allen.*

## **Tenslotte**

De bijeenkomst heeft aan zijn doel voldaan, namelijk het uitdragen van nieuwe kennis van belang voor de praktizerende hydroloog. De reeks lezingendagen zoals in de inleiding aangegeven moet dan ook worden voortgezet met een lezingendag in januari 1997 over: "dat is nog onzeker"!

Van de bijeenkomst is een 80 pagina's tellend verslag met als titel "Onzekerheid in grondwatermodellering" verschenen, dat voor f 31,80 (incl. 6% BTW) is aan te vragen bij TNO Grondwater en Geo-Energie, mw. M.E. van Hoeken, tel. 015-697206.

Een kort verslag van deze lezingendag is verschenen in H<sub>2</sub>O (28) 1995, nr.7, pag 199.

*Hans Hooghart*

TNO Grondwater en Geo-Energie  
Postbus 6012  
2600 JA Delft