Kriging-techniek als hulpmiddel bij modelcalibratie

Samenvatting
Het is gebruikelijk en aanbevelenswaardig om grondwaterstromingsmodellen te ijken, alvorens ze te gebruiken voor het berekenen van bijvoorbeeld veranderingen in de hydrologische situatie in een gebied.
Bij de ijking gaat het erom het in een model nagebootste hydrologische systeem voor een bepaald gebied, zo goed mogelijk in overeenstemming te brengen met het werkelijke hydrologische systeem in dat gebied. De vergelijking tussen beide systemen geschiedt veelal aan de hand van grondwaterstijghoogten, die mede het karakter van het geo-hydrologische systeem bepalen. Is de overeenkomst tussen werkelijke en berekende stijghoogten onbevredigend, dan worden de modelparameters (bijvoorbeeld het doorlaatvermogen) aangepast, hetgeen in het algemeen een verandering in de berekende stijghoogten veroorzaakt.
Bij deze vergelijking kan slechts worden beschikt over een beperkt aantal stijghoogtewaarnemingspunten, terwijl de vergelijking vaak over meer punten (namelijk de knooppunten van een netwerk) moet worden uitgevoerd. Daarom is interpolatie nodig van stijghoogten, vanuit waarnemingspunten naar de modelknooppunten.
De Kriging-techniek maakt een objectieve interpolatie mogelijk naar ieder gewenst punt binnen het onderzoeksgebied, uitgaande van de gemeten waarden. Naast een zo goed mogelijke schatting van de stijghoogten wordt tevens de mogelijke fout erin berekend. Hiermee kan de toetsing van de modelrespons aan het werkelijke gedrag van het beschouwde hydrologische systeem worden uitgebreid naar willekeurig te kiezen punten binnen het onderzoeksgebied en kan tevens de mate van overeenstemming kwantitatief (via een calibratiecriterium) worden aangegeven. Aan de hand hiervan kan beoordeeld worden of het model in voldoende mate het werkelijke hydrologische systeem representeert, met andere woorden of het zinvol is om de ijkingsberekeningen al dan niet voort te zetten.

IR. M. J. H. PASTOORS
Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne

ING. H. SNELTING
Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne

DR. IR. J. W. DE KWAADSTENIET
Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne

IR. G. J. HEIJ
Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne

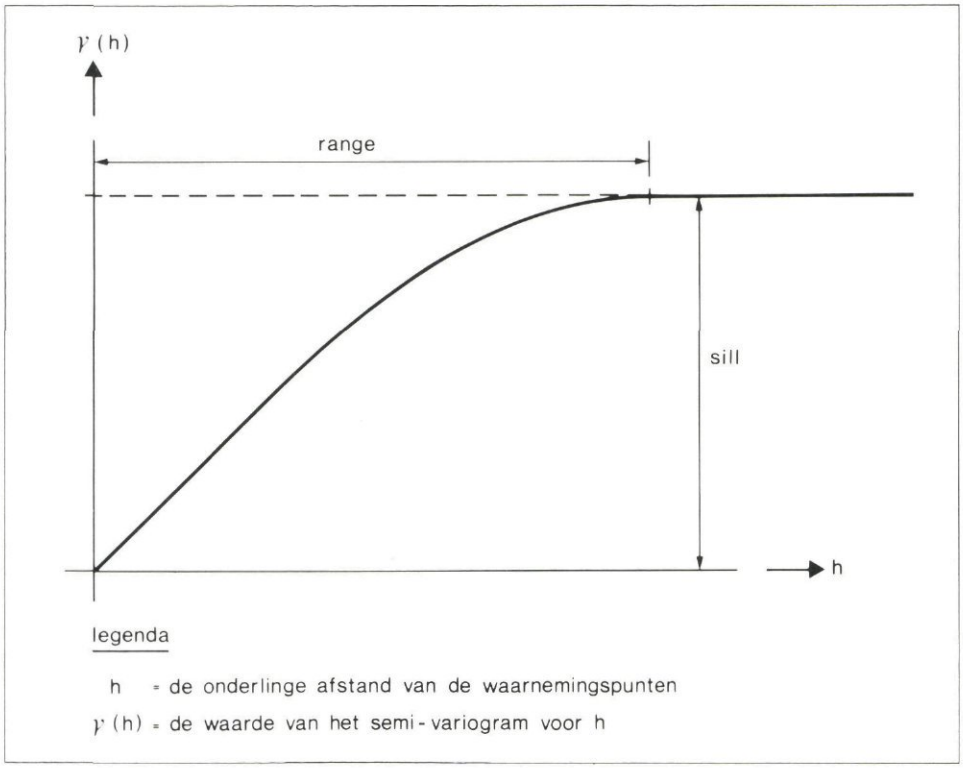
1. Inleiding

De problemen van de laatste jaren rond de kwaliteit van het grondwater zijn zo langzamerhand genoegzaam bekend. Menselijke activiteiten vormen steeds meer een bedreiging van de grondwaterkwaliteit. Lokale verontreinigingen (bijvoorbeeld vuilstorten) alsmede ook meer diffuse verontreinigingsbronnen doen hun invloed op de grondwaterkwaliteit steeds meer gelden.
Om inzicht te verkrijgen in de stroming van het grondwater en de verspreiding van verontreinigingen in de ondergrond is onderzoek aan het hydrologische systeem, op lokale en vaak ook op regionale schaal, noodzakelijk. In de regel is hierbij een rekenmodel nodig, waarmee de grondwaterstroming kan worden gesimuleerd en waarmee veranderingen in het systeem kunnen worden berekend. De schaal waarop en de mate van detail waarmee met name bij regionale studies moet worden gewerkt maken het noodzakelijk om rekening te houden met van plaats tot plaats variërende hydrologische eigenschappen; het gebruik van numerieke rekenmodellen is hierbij onontbeerlijk.
Voordat van een operationeel rekenmodel kan worden gesproken, dient ondermeer een calibratiefase, ook wel ijkingsfase genoemd, doorlopen te worden. Hierin dient de vraag te worden beantwoord wanneer het model voldoende aansluit bij de werkelijkheid.
Er bestaat daarbij behoefte aan een calibratiecriterium dat er voor zorgt dat modelverfijningen en/of aanpassingen van parameterwaarden in overeenstemming zijn met het beschikbare waarnemingsmateriaal, in die zin dat uiteindelijk het model niet ongepast grof, maar ook niet ongepast gedetailleerd en fijnzinnig is. De mate van aansluiting van een model bij de werkelijke situatie, te beoordelen via voorhanden zijnde waarnemingen, dient daarbij te worden bekeken ten opzichte van een meetschaal die in de waarnemingen zelf aanwezig is.
De vraag naar een passend calibratiecriterium moet, afhankelijk van de context, verschillend worden beantwoord. Als voorbeeld wordt hierna ingegaan op de vraag in welke mate de stijghoogten die met een model in een bepaald gebied worden berekend mogen afwijken van de in werkelijkheid in het gebied gemeten stijghoogten en de daaruit naar andere plaatsen in het gebied geïnterpoleerde stijghoogten. De situatie is, dat stijghoogten slechts op een beperkt aantal punten in een bepaald onderzoeksgebied worden gemeten. De betrouwbaarheid van de voor andere punten van het gebied geïnterpoleerde stijghoogten hangt dan ten nauwste samen met het aantal waarnemingspunten in het gebied, de ruimtelijke verdeling ervan over het gebied en de betrouwbaarheid van de waarnemingen zelf. De betrouwbaarheid van een geïnterpoleerde stijghoogte in een willekeurig punt in het gebied zal derhalve van plaats tot plaats kunnen verschillen en het is onmogelijk om zonder hulpmiddelen op een objectieve wijze vanuit de waarnemingen schattingen van de stijghoogten te geven en uitspraken te doen over de betrouwbaarheid van de schattingen. Er is dan ook behoefte aan rekenprogramma's waarmee naast de beste schatting van de stijghoogte, ook de spreiding ervan kan worden berekend.
In dit artikel wordt ingegaan op de rol die de Kriging-techniek bij de interpolatie van stijghoogten en bij de calibratie van hydrologische rekenmodellen kan vervullen, met het accent op de toepassing. Voor de theoretische achtergronden wordt verwezen naar de literatuur [zie bijv. voor een overzicht Delhomme, 1978]. Er wordt hier niet ingegaan op de theorie die aan de betrouwbaarheidsanalyse ten grondslag ligt.
De voorbeelden die ter verduidelijking van de werkwijze worden gegeven zijn afkomstig uit het onderzoek aan de Utrechtse Heuvelrug, dat als onderdeel van het project 'Winning en bescherming van grondwater in Oost-Utrecht' wordt uitgevoerd door het Laboratorium voor Bodem- en Grondwateronderzoek (LBG) van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne, in samenwerking met de Provinciale Waterstaat van Utrecht, het Waterleidingbedrijf Midden-Nederland en de Regionale Inspectie van de Volksgezondheid voor de Hygiëne van het Milieu voor Utrecht.

2. De Kriging-techniek

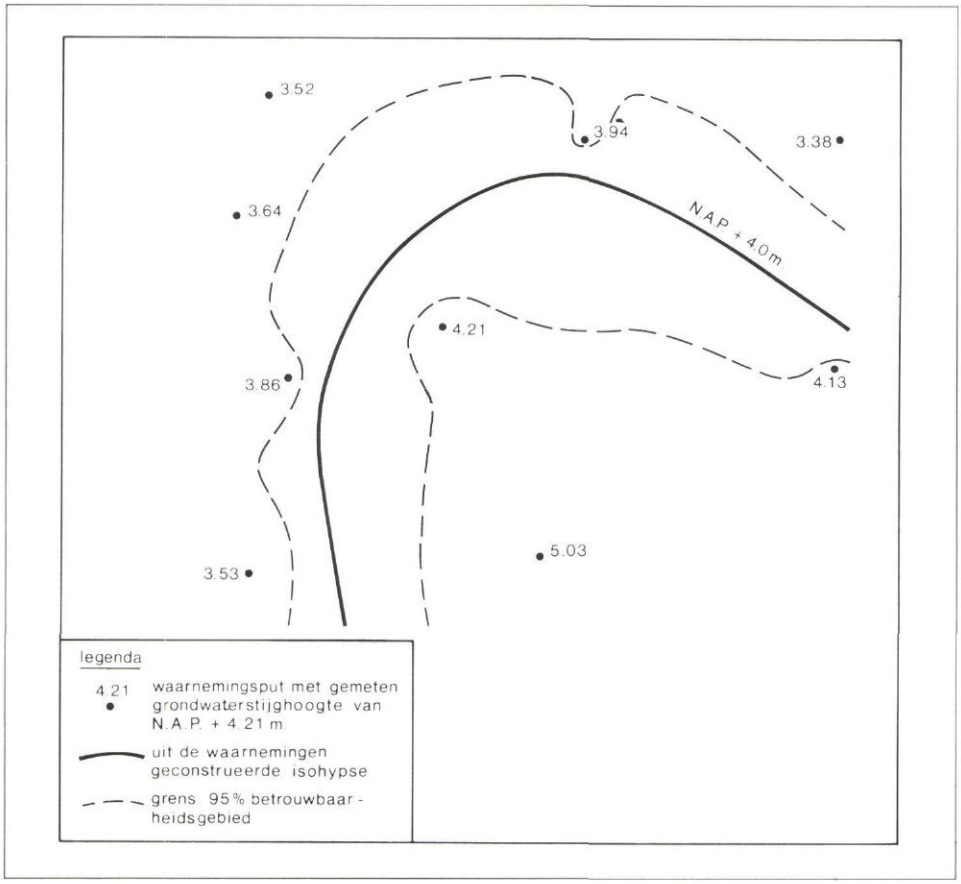
In het algemeen zullen de waarden van parameters en stijghoogten op een aantal plaatsen in een gebied bekend zijn en soms ook is informatie over de betrouwbaarheid van de betreffende waarden beschikbaar. Om naast de energietoestand van het grondwater ook de richting en de snelheid van de grondwaterstroming van plaats tot plaats te kunnen bepalen zal echter informatie bekend moeten zijn op punten van een roosternetwerk dat bijna altijd veel fijner is dan het waarnemingsnetwerk. In de meeste

gevallen kunnen deze waarden niet zonder meer worden aangegeven. De onderzoeker zal de beschikbare gegevens naar eigen inzicht moeten rangschikken en verwerken om de benodigde invoergegevens in model-knooppunten en -elementen te verkrijgen. Vaak worden hiertoe contourkaarten, bijvoorbeeld isohypsenkaarten, geconstrueerd waarbij moet worden bedacht, dat het hier interpretaties betreft die in vele gevallen niet geheel objectief zijn. Hedentendage zijn ook geautomatiseerde methoden beschikbaar, waarmee interpolaties met wiskundige hulpmiddelen (polynomen, gewichten en dergelijke) op snelle en systematische wijze kunnen worden uitgevoerd. Deze technieken geven in het algemeen geen informatie omtrent de betrouwbaarheid van de geïnterpoleerde waarden.
De Kriging-techniek echter is een ruimtelijke interpolatietechniek waarmee, uitgaande van een aantal bekende waarden in het gebied, voorspellingen kunnen worden gedaan voor iedere gewenste locatie in het gebied waarbij tevens de betrouwbaarheid van elke voorspelling wordt gekwantificeerd in de vorm van een standaardafwijking. In de theorie van de Kriging-techniek wordt ervan uitgegaan, dat de waarden realisaties zijn van kansvariabelen. Dit houdt in, dat de waarden een toevalscomponent bezitten (een ruiscomponent). In het ruimtelijke gedrag van de parameters en de stijghoogte kan men naast een ruisdeel ook een deterministisch deel onderscheiden. Het is noodzakelijk om in analyses beide delen te onderscheiden en te beschrijven.



Afb. 2.

Afb. 1.



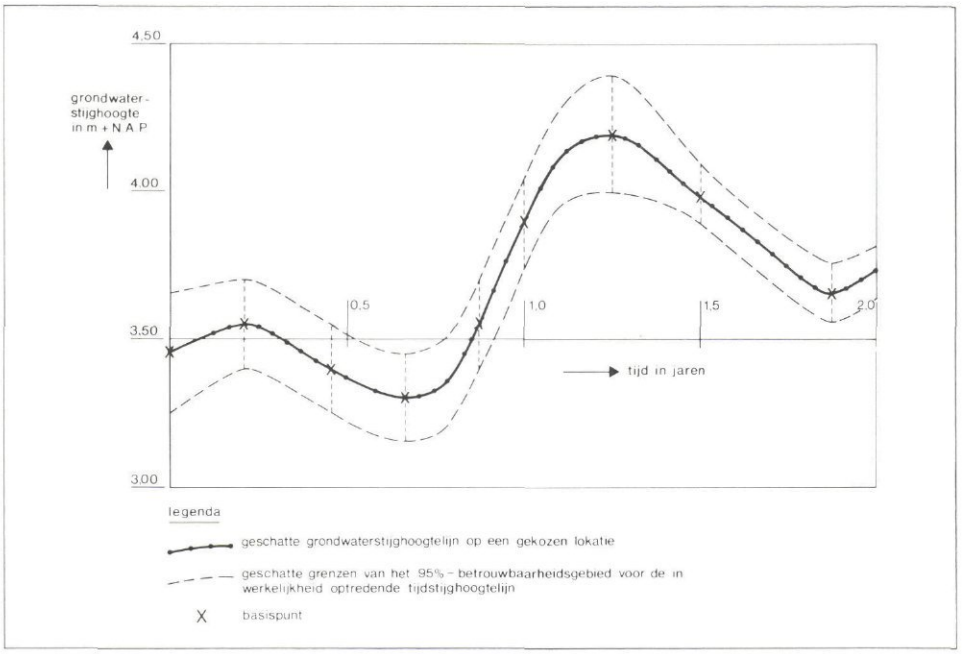
Voor de beschrijving van het ruimtelijke gedrag van het deterministische deel (de zogenaamde ruimtelijke trend) wordt vaak een polynoom gebruikt. De coëfficiënten van de polynoom worden uit de opgegeven waarden van de betreffende grootheid berekend met behulp van de methode der kleinste kwadraten.
De betrouwbaarheid waarmee het trendvlak is berekend kan eveneens worden bepaald.
De afwijkingen ten opzichte van het trendvlak (de residuen) kunnen worden beschouwd als realisaties van het ruisdeel.
De ruiscomponent blijkt niet 'wit' te zijn: in het algemeen zijn ruiswaarden op geringe afstand sterk gecorreleerd. In de Kriging-techniek wordt de ruimtelijke correlatie van de ruiscomponent op een willekeurig tweetal gekozen locaties vastgelegd met een zogenaamd semi-variogram. In feite wordt daarbij verondersteld, dat de correlatie in de ruis een functie is van de onderlinge afstand van de gekozen locaties.
De waargenomen corrrelaties in de residuen worden gebruikt voor (a) de keuze van de vorm van een theoretisch functieverband voor het semi-variogram (een aantal standaard-functies is gangbaar, zie onder andere Delhomme [1978]) en (b) het schatten van voor de situatie relevante waarden van de parameters in het betreffende functieverband. Voor interpretatie-doeleinden is het van belang, dat de semi-variogram-functies na een zekere afstand (de

'range' of de invloedsafstand) een plafondwaarde (de 'sill') hebben bereikt. Dit betekent, dat de residuen voorbij een zekere afstand (de betreffende range) niet meer gecorreleerd zijn, terwijl met de grootte van de sill een maat voor de optredende ruis wordt gegeven (de variantie van de ruis). In afb. 1 is een voorbeeld gegeven van een semi-variogram.

3. Interpolatie van stijghoogten

Het is niet mogelijk om met behulp van een polynoom op regionale schaal een beschrijving te geven van de trend in een stijghoogtebeeld indien ook afpompingskegels in de omgeving van grondwaterwinningen in het trendvlak moeten worden verwerkt en de graad van het trendvlak niet buitensporig hoog gekozen mag worden. Indien toch met een niet buitensporig polynoom-trendvlak wordt gewerkt, zullen de residuen ten opzichte van het trendvlak in de omgeving van winningen niet alleen ruis representeren, maar ook een deterministische component in zich hebben (de afwijking van een afpompingskegel tot het polynoomvlak). Daarom is het ongeoorloofd om (a) laatstgenoemde residuen te betrekken in de schatting van een variogram, (b) deze residuen bij het interpoleren van stijghoogten op dezelfde wijze te gebruiken als residuen buiten de onttrekkingsgebieden en (c) zonder aanvullende maatregelen geïnterpoleerde stijghoogten te bepalen in de onttrekkingszones. Er zijn echter diverse mogelijkheden om de directe invloed van een grondwateronttrekking op het isohypsenpatroon wel te verwerken bij toepassing van de Kriging-techniek. De wiskundige beschrijving van het trendvlak kan bijvoorbeeld zodanig worden uitgebreid, dat de invloed van de grondwateronttrekking (de afpompingskegel) kan worden meegenomen. Het aantal coëfficiënten van de functie waarmee het trendvlak dan moet worden beschreven neemt daarbij toe. Verder kan worden overwogen om per deelgebied van het onderzoeksgebied een ander semivariogram op te leggen. Binnen de invloedssfeer van een grondwateronttrekking wordt dan het semi-variogram opgelegd dat het beste past bij de waarnemingen in dat gebied.

In onze toepassingen zijn de onttrekkingszones echter tot nog toe voor de bepaling van het trendvlak en de bijbehorende residuen buiten beschouwing gelaten, dat wil zeggen slechts die waarnemingsputten zijn geselecteerd die min of meer buiten de directe invloed van de grondwateronttrekking (buiten de afpompingskegel) zijn gelegen. Op deze wijze is een isohypsenbeeld gegenereerd, dat correspondeert met de regionale stroming van het grondwater. Consequent verder redenerende moet het directe invloedsgebied van de winningen dan ook buiten de modelcalibratie worden gehouden.



Afb. 3.

4. Het calibratiecriterium

Uitgaande van de gemeten stijghoogte in een aantal over het gebied verspreide meetpunten en de van daaruit met behulp van de Kriging-techniek naar de knooppunten van een modelnetwerk geïnterpoleerde stijghoogten h_i $(i = 1,2,\ldots,n)$ met hun bijbehorende standaarddeviaties s_i $(i = 1,2,\ldots,n)$, kan het volgende calibratiecriterium worden gedefinieerd. Voor de met een model berekende stijghoogten h_i $(i = 1,2,\ldots,n)$ moet gelden:

$$-1 < \frac{h_i - h_i}{2\,s_i} < 1 \quad (i = 1,2,\ldots,n) \qquad (1)$$

[zie onder andere Delhomme, 1978].

In woorden: de met het model berekende stijghoogte moet altijd liggen binnen het betrouwbaarheidsinterval $[h_i - 2s_i, h_i + 2s_i]$ voor de werkelijk optredende stijghoogtewaarde.

Bij de vaststelling van de betrouwbaarheidsintervallen is (naast de Kriging-veronderstellingen) verondersteld, dat de stijghoogte een normaalverdeelde variabele is en is als betrouwbaarheidsdrempel de gebruikelijke 5% aangehouden.

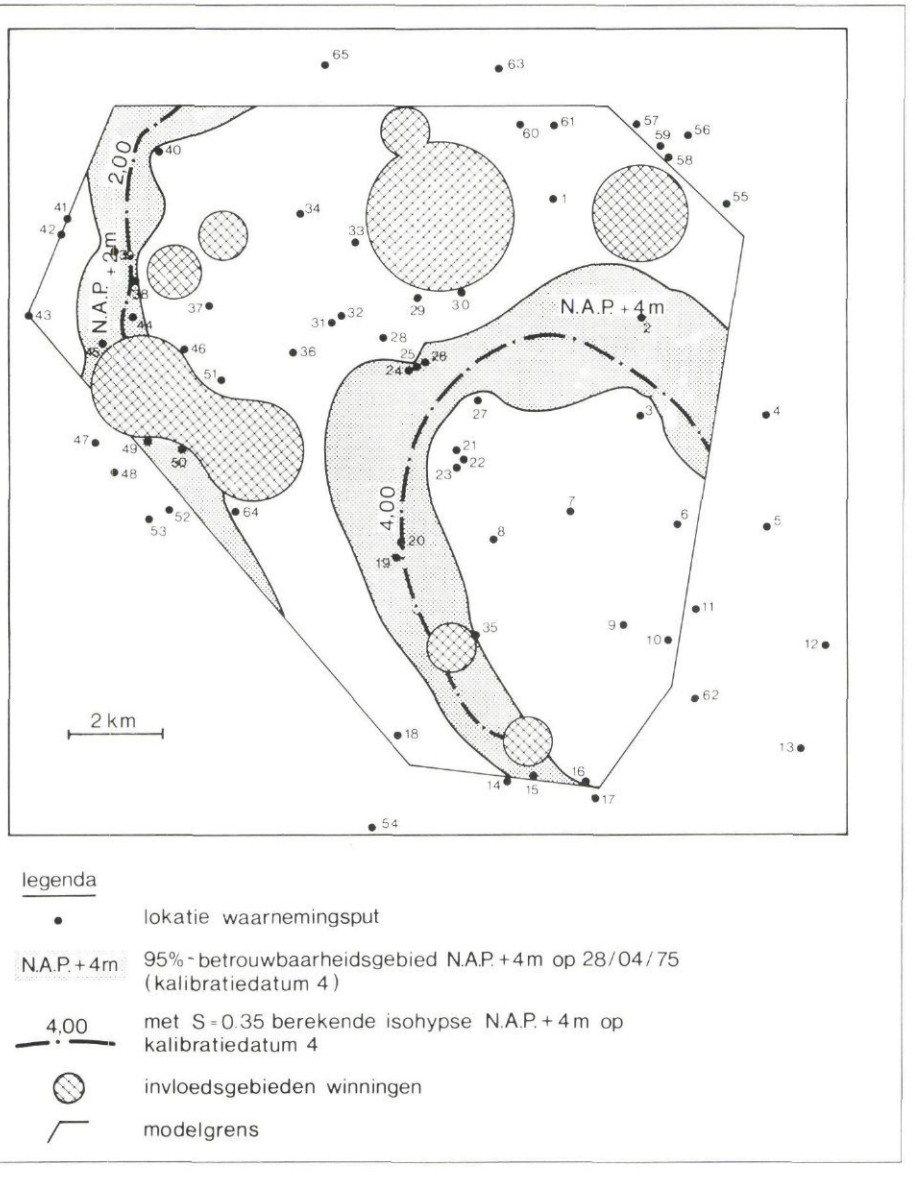
5. Uitgewerkte vormen van het calibratiecriterium

In de waarnemingsputten, waarvan de gegevens in het grondwaterstandenarchief van DGV-TNO zijn opgeslagen, wordt de stijghoogte meestal viermaal per jaar of tweemaal per maand gemeten. Het verloop van de grondwaterstijghoogte in de tijd wordt op deze wijze gediscretiseerd vastgelegd. Verspreid over de periode, die met een model wordt beschreven (de rekenperiode), dient uit deze reeksen van waarnemingen een aantal tijdstippen als calibratiedata te worden gekozen. Vervolgens dient per calibratiedatum de Kriging-techniek te worden toegepast op de stijghoogtewaarnemingen verkregen in het puttenbestand dat voor het onderzoeksgebied relevant is. Dit resulteert dan per calibratiedatum in de stijghoogtewaarde met de bijbehorende standaarddeviatie in ieder gewenst punt van het modelgebied, bijvoorbeeld de knooppunten van een modelnetwerk.

Een op de praktijk gerichte vorm van het in hoofdstuk 4 geformuleerde calibratiecriterium kan als volgt worden uitgewerkt. Met de geïnterpoleerde grondwaterstijghoogten op een gekozen tijdstip wordt een isohypsenkaart geconstrueerd. (Deze kaart geeft de meest waarschijnlijke ligging van de isohypsen). Eveneens wordt een kaart gemaakt van de geïnterpoleerde waarden minus tweemaal de standaardafwijking en een kaart van de waarden plus tweemaal de standaardafwijking. Deze kaarten geven een beeld van respectievelijk de onderste en de bovenste grenswaarden voor de ligging van de isohypsen op het gekozen tijdstip. Door deze kaarten te combineren, kan voor iedere gewenste isohypse het 95%-betrouwbaarheidsgebied worden bepaald. In afb. 2 is hiervan een voorbeeld gegeven. De met het rekenmodel bepaalde isohypse moet nu, om te voldoen aan het calibratiecriterium, binnen het betreffende betrouwbaarheidsgebied liggen. De beoordeling van de mate van overeenkomst tussen de modelberekeningen en de waarnemingen kan op deze

wijze voor het gehele modelgebied op een efficiënte manier plaatsvinden, per calibratietijdstip.
De via de Kriging-techniek beschikbaar gekomen informatie (stijghoogte met bijbehorende standaarddeviatie) op de calibratiedata kan ook worden gebruikt om het stijghoogteverloop van het grondwater in de tijd op een willekeurig gekozen locatie nader vast te leggen. Daarbij worden op de betreffende locatie de berekende stijghoogten en standaarddeviaties behorende bij de verschillende calibratiedata gebruikt voor de constructie van basispunten van de tijdstijghoogtelijn met betrouwbaarheidsintervallen (basiswaarde ± 2s). Ruwe schattingen van de overige punten van de tijdstijghoogtelijn en het betrouwbaarheidsgebied worden in eerste instantie via grafische interpolatie verkregen. Afb. 3 geeft een voorbeeld van een dergelijke benadering. Volgens het calibratiecriterium van hoofdstuk 4 moeten de modelwaarden zoals berekend voor de betreffende locatie op ieder tijdstip binnen het 95%-betrouwbaarheidsgebied voor de tijdstijghoogtelijn liggen. Bij de calibratie van een model dient nog het volgende te worden opgemerkt. De Kriging-techniek reproduceert op plaatsen waar een interpolatiepunt samenvalt met een waarnemingsput de gemeten stijghoogte in deze put. De gemeten waarde is echter behept met onnauwkeurigheden als gevolg van (a) het meten van de stijghoogte zelf en (b) de waterpassing van het meetpunt ten opzichte waarvan de meting plaatsvindt. Statistisch gezien zijn de waarnemingen dus geen ruisvrije grootheden maar grootheden met hun eigen standaarddeviatie. Deze ruiscomponent kan op eenvoudige wijze als een verfijning in de Kriging-techniek worden verwerkt. De aangepaste betrouwbaarheidsbanden die ontstaan voor het grondwaterstijghoogtebeeld geven aan het model een realistische ruimte om op waarnemingslocaties van de waargenomen waarden af te wijken.

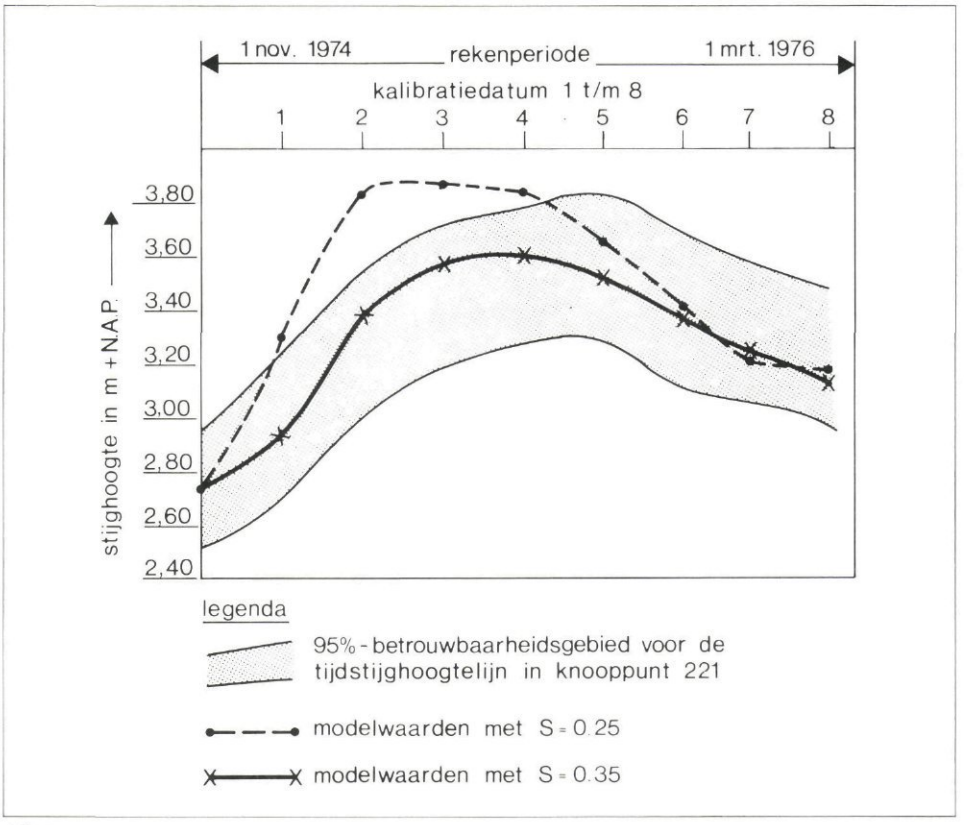
Afb. 4.



6. Een toepassing in het regionaal-geohydrologische onderzoek Oost-Utrecht

Het onderzoeksgebied van de Utrechtse Heuvelrug beslaat een gebied van ca. 15.000 ha, waarbij de stroming van het grondwater in het verzadigde systeem kan worden geschematiseerd tot horizontale stroming in één watervoerend pakket terwijl oppervlaktewater ontbreekt. Het neerslagoverschot infiltreert in de bodem door een onverzadigde zone, die plaatselijk 30 à 40 m dik is, en komt uiteindelijk vertraagd en afgevlakt ten goede aan het verzadigde grondwatersysteem. De grondwateraanvulling varieert in de loop van de tijd als gevolg van seizoensinvloeden zodat voor de beschrijving van het verzadigde grondwatersysteem over periodes die enige seizoenen beslaan een model voor niet-stationaire grondwaterstroming moet worden gebruikt. Modelberekeningen over de periode 1-11-'74 tot 1-3-'76 werden in tijdstappen van 10 dagen uitgevoerd met het eindige-elementenprogramma TRINS [Leijnse, 1979]. Daarbij werden 543 modelknooppunten in het gebied onderscheiden. De keuze van het eindige-elementennetwerk gaf de mogelijkheid om verschillen in grondwateraanvulling, verschillen in doorlaatvermogen en de gevolgen van onttrekkingen in enig detail te verwerken en te bestuderen.
Opdat het eindige-elementenprogramma voor de verzadigde grondwaterstroming kan worden gebruikt ter beschrijving van het verzadigde grondwatersysteem (en ten behoeve van de voorspelling van de gevolgen van ingrepen) in een bepaald gebied is onder andere een eenduidige vastlegging van doorlaatvermogen, grondwateraanvulling en bergingscoëfficiënt noodzakelijk.
Het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket is ten behoeve van deze studie bepaald door middel van extrapolatie van voornamelijk uit pompproeven verkregen informatie. Uit de pompproefwaarden voor het doorlaatvermogen werd de gemiddelde doorlatendheid (k) van het pakket bepaald. Met deze waarde en met behulp van een voornamelijk uit boorgegevens geconstrueerde diktekaart van het watervoerende pakket kon door extrapolatie een schatting van het doorlaatvermogen voor het gehele gebied worden gemaakt.
Om de grondwateraanvulling te kwantificeren is allereerst het neerslagoverschot (= neerslag – verdamping) berekend aan de hand van meteorologische gegevens en gegevens over bodemgebruik en bodemgesteldheid en werd vervolgens de stroming in de onverzadigde zone gesimuleerd en

kwantitatief vastgelegd met behulp van bodemfysische gegevens [Van Lanen, 1978]. In het model waarmee ten behoeve van deze studie werd gewerkt, werd verder op elke lokatie eenzelfde waarde voor de bergingscoëfficiënt (S) aangehouden. Uit voorstudies blijkt dat het model in het bijzonder gevoelig is voor kleine veranderingen in de S-waarde. In deze studie zal S als de enige te calibreren parameter worden beschouwd. Eenvoudigheidshalve wordt hier dus onder andere verondersteld dat het via interpolatie verkregen beeld van het doorlaatvermogen exact met de werkelijkheid overeenstemt. (In toekomstige studies zal meer realistisch worden gewerkt met een regionaal beeld van het doorlaatvermogen inclusief betrouwbaarheidsbanden, zoals dat volgt uit lokale voorinformatie over doorlaatvermogen, stijghoogtewaarnemingen en betrouwbaarheid ervan). Opgemerkt dient te worden dat er ook in het geschetste gesimplificeerde voorbeeld rekening mee moet worden gehouden dat de grootte van de grondwateraanvulling in de tijd een functie is van S: in modelberekeningen met een gewijzigde S-waarde moet de grondwateraanvulling worden aangepast.
De modelcalibratie komt nu neer op het zoeken van een S-waarde waarbij de modelresultaten niet in tegenspraak zijn met de waarnemingen. In het bijzonder wordt de calibratie hier toegespitst op het regionale grondwaterstijghoogtebeeld buiten de onttrekkingszones en het tijdsgedrag van dit beeld. Relevante waarnemingen daartoe zijn beschikbaar in 65 waarnemingsputten waarvan de locaties in afb. 4 zijn weergegeven. Op een gekozen tijdstip wordt vanuit de 65 waarnemingsputten met de Krigingtechniek een regionaal stijghoogtebeeld geconstrueerd, inclusief betrouwbaarheidsmarges. Daarbij is het deterministische deel



Afb. 5.

van het stijghoogtebeeld (zie hoofdstuk 2) beschreven met een tweedegraads polynoom (dat wil zeggen $h_{det} = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2$ met x en y locatie-coördinaten) en het ruisdeel met een variogram met een range en sill (zie afb. 1) van de orde van grootte van resp. 5 km en 0,09 m² (de standaarddeviatie van de overall-ruis in de stijghoogtewaarnemingen is derhalve van de orde van grootte van $\sqrt{0{,}09} = 0{,}3$ m). Waardebepaling (in enige iteratiestappen) van a_0 t/m a_5, de sill en de range en de feitelijke inter/extrapolatie van de waarnemingen in de putten naar de punten van een fijnmazig netwerk over de regio, is uitgevoerd met behulp van het Krigingprogramma K603 van de USGS [Skrivan en Karlinger, 1980]. Voorbeelden van betrouwbaarheidsbanden voor isohypsen die langs deze weg werden gevonden zijn weergegeven in afb. 4.
Naast het aanvangstijdstip (waarop de stijghoogte in elk knooppunt aan het rekenmodel moet worden opgegeven) werd een achttal data (de calibratiedata) geselecteerd als tijdstip waarop de Kriging-techniek werd toegepast. Bij de keuze van de calibratiedata werd rekening gehouden met tijdstippen in de bestudeerde periode waarop de stijghoogtewaarnemingen maximaal en minimaal waren en tijdstippen waarop sprake was van een opgaande lijn in het tijdstijghoogteverloop of van een neergaande lijn.
Een eerste modelberekening werd uitgevoerd met een S-waarde van 0,25.
De beoordeling van de aansluiting van de modelresultaten bij de waarnemingen kan in getalsvorm plaatsvinden aan de hand van een tabel. Een stuk van de beoordelingstabel is hiernaast afgedrukt als tabel I(a). Het model bleek in het algemeen voor de calibratiedata 1 t/m 4 niet te voldoen: de met het model voorspelde stijghoogten zijn voor die data te hoog. Dit heeft geleid tot een aanpassing van de S-waarde van 0,25 naar 0,35. In dat geval sluiten de modelresultaten veel beter aan bij

TABEL I – *Tabel voor de beoordeling van de aansluiting van het illustratiemodel bij het geïnterpoleerde stijghoogtebeeld in een aantal modelknooppunten (no's 220 t/m 225) op de acht calibratiedata, uitgaande van het criterium in hoofdstuk 4. In (a) is het model gebaseerd op een S-waarde van 0,25. In onder andere knooppunt 221 blijkt het model op de eerste vier calibratiedata slecht te passen. In (b) is het model gebaseerd op een S van 0,35. Het model sluit dan in de weergegeven knooppunten voldoende goed aan bij de waarnemingen.*

(a)

kp	1	2	3	4	5	6	7	8
220	– 1,03	– 1,83	– 1,71	– 0,92	– 0,28	– 0,17	0,27	0,25
221	– 1,26	– 2,07	– 1,52	– 1,29	– 0,31	– 0,10	0,46	0,18
222	– 0,60	– 1,13	– 1,17	– 0,43	– 0,19	– 0,03	0,20	0,47
223	– 0,66	– 0,22	– 0,17	– 0,19	– 0,78	– 0,18	0,25	– 0,30
224	– 1,33	– 1,95	– 1,06	– 1,35	– 0,22	0,14	0,66	0,17
225	– 1,03	– 1,40	– 0,75	– 0,88	– 0,15	0,21	0,59	– 0,11

(b)

	1	2	3	4	5	6	7	8
220	0,29	– 0,31	– 0,69	– 0,07	0,14	– 0,07	0,14	0,27
221	0,20	– 0,42	– 0,39	– 0,32	0,19	0,02	0,31	0,38
222	0,34	0,09	– 0,40	0,16	0,09	0,01	0,08	0,34
223	– 0,06	0,53	0,40	0,11	– 0,84	– 0,46	– 0,11	– 0,28
224	0,00	– 0,31	0,13	– 0,35	0,31	0,26	0,48	0,53
225	0,02	– 0,05	0,41	0,02	0,30	0,27	0,37	0,10

de waarnemingen. Een stuk van de beoordelingstabel voor S=0,35 is weergegeven in tabel I(b).
Beoordeling van de mate van overeenstemming kan ook grafisch plaatsvinden. In afb. 5 zijn de via het model verkregen tijdstijghoogtelijnen in een knooppunt weergegeven naast een uit de waarnemingen geconstrueerde betrouwbaarheidsband voor de tijdstijghoogtelijn in dat knooppunt.
In afb. 4 zijn voor calibratiedatum 4 betrouwbaarheidsbanden voor isohypsen weergegeven en tevens de met het model met S=0,35 berekende isohypsen.
Voor de rapportage van het onderzoek aan de Utrechtse Heuvelrug, waarin de hier geïntroduceerde techniek is toegepast, wordt verwezen naar Snelting en Pastoors [1984].

Nawoord
De auteurs bedanken ir. J. Koster en ir. A. N. M. Obdam voor hun betrokkenheid bij en inbreng in het onderzoek.

Literatuur
Delhomme, J. P. (1978). *Advances in Water Resources.* Vol. 1, pp. 251-266.
Leijnse, A. (1979). *TRINS, een eindige-elementenprogramma voor niet-stationaire grondwaterstroming.* RIVM, Leidschendam.
Skrivan, J. A. and Karlinger, M. R. (1980). *Semi-variogram estimation and universal Kriging, program number K603.* United States Geological Survey, Water Resources Division, Tacoma, Washington.
Van Lanen, H. A. J. (1978). *Nuttige neerslag, vertraging en afvlakking in het gebied van de Utrechtse Heuvelrug voor de periode 1973 t/m 1976.* Interne notitie, RIVM, Leidschendam.
Snelting, H. en Pastoors, M. J. H. (1984). *Systeemverkenning van de Utrechtse Heuvelrug.* Deelrapport in het kader van het project 'Winning en bescherming van grondwater in Oost-Utrecht'. RIVM, Leidschendam.

● ● ●

STORA-rapporten

In de periode juli 1983 tot en met december 1984 heeft de STORA de volgende rapporten uitgebracht:

1. *Hydraulische en technologische aspecten van het nabezinkproces*
– deel 3. Rechthoekige nabezinktanks (Inventarisatie en praktijkonderzoek)
(juni 1983)
Gegevens over ontwerp en functioneren van rechthoekige nabezinktanks op elf rioolwaterzuiveringsinrichtingen zijn geïnventariseerd, terwijl op drie rioolwaterzuiveringsinrichtingen in praktijkexperimenten diverse ontwerp-richtlijnen waaronder de STORA-ontwerprichtlijn voor ronde nabezinktanks, zijn getoetst.
Op basis van de experimenten en de STORA-ontwerprichtlijnen voor ronde tanks (toelaatbare slibvolumebelasting) konden richtlijnen worden opgesteld voor rechthoekige nabezinktanks.
(110 pagina's, *f* 27,–).

2. *Analyse van zuiveringsslib op organochloorverbindingen en polychloorbiphenylen*
– deel 2. Minimalisering van foutenbronnen en analysevoorschrift
(januari 1984)
Bij de analyse van zuiveringsslib op organochloorverbindingen en polychloorbiphenylen vormen extractie, 'clean-up' van de extracten en gaschromatografische scheiding de voornaamste foutenbronnen. Het rapport verschaft een analysevoorschrift waarmee het effect van deze foutenbronnen zoveel mogelijk is geminimaliseerd.
(57 pagina's, *f* 15,–).

3. *Windenergie op rioolwaterzuiveringsinrichtingen*
– deel 1. Mechanische toepassingen
(januari 1984)
De voornaamste toepassingsmogelijkheid van windturbines bij de zuivering van afvalwater is tot nu de opwekking van de elektriciteit. In principe kunnen windturbines werktuigen ook direct mechanisch aandrijven. Het rapport behandelt de technische en economische aspecten van de directe koppeling van windturbines aan werktuigen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen.
(53 pagina's, *f* 12,50).

4. *Milieu-effecten van afvalwaterbehandeling*
(januari 1984)
Het streven naar een zo goed mogelijk resultaat bij het verzamelen, transporteren en behandelen van afvalwater kan leiden tot situaties waarin het milieu als geheel nadeliger wordt beïnvloed dan bij minder vergaande maatregelen. Het rapport licht alle deelprocessen bij de behandeling van afvalwater door op hun milieu-effecten.
(71 pagina's, *f* 18,–).

5. *Zuurstoftoevoervermogen in beluchtingssystemen*
– deel 2. De heliummeetmethode
(november 1984)
Het rapport beschrijft een nieuwe, milieuvriendelijke en betrekkelijk eenvoudige methode om het zuurstoftoevoervermogen van beluchtingssystemen onder normale bedrijfsomstandigheden te bepalen.
De methode kan ook worden gebruikt voor controle op het functioneren van beluchtingselementen. De nauwkeurigheid is groot; de totale fase van de methode wordt geschat op drie à vier procent.
(134 pagina's, *f* 25,–).

6. *Kenmerken van niet rechtstreeks door afvalwater beïnvloed binnenwater*
(interimverslag)
(mei 1984, beperkt verspreid)
In het Indicatief Meerjaren Programma Water 1980-1984 wordt aan de hand van circa veertig, overwegend fysische en chemische parameters, een basiswaterkwaliteit gedefinieerd.
Het rapport geeft het resultaat van één jaar bepalen van deze parameters aan vierentwintig, niet rechtstreeks door afvalwaterlozingen beïnvloede binnenwateren.
Dit onderzoek zal uiteindelijk twee jaar beslaan; het is bedoeld gegevens te verschaffen voor het toetsen van de realiteitswaarde van het gestelde niveau van de diverse parameters van de basiswaterkwaliteit uit het IMP '80-'84.

7. *Het inwonerequivalent getoetst*
(interimrapport)
(augustus 1984, beperkt verspreid)
Onderzoek naar het gemiddelde totale zuurstofverbruik van de verontreinigende stoffen in het afvalwater dat per inwoner van Nederland per etmaal in de privé-sfeer wordt geloosd.

Verdere inlichtingen:
Stichting Toegepast Onderzoek Reiniging Afvalwater (STORA), Postbus 414, 2280 AK Rijswijk, tel.: 070 - 98 02 87.

● ● ●