
Analyse van pompproeven met onvolkomen pufilters in verticaal heterogene pakketten op basis van meerlagenstroming

Philip Nienhuis
Tony Kok
Bert Sman

Aan de hand van analyse van pompproeven met onvolkomen putten kan inzicht worden verkregen in de verticale verdeling van hydraulische parameters binnen een watervoerend pakket. Deze analyse is gebaseerd op medio jaren '80 beschikbaar gekomen analytische oplossingen voor stroming in meerlagensystemen. De theorie wordt kort beschreven, de methodiek wordt geïllustreerd aan de hand van een pompproef die is uitgevoerd in Midden-Drenthe.

Inleiding

Geohydrologen worden veelal geconfronteerd met stromingsproblemen in dikke watervoerende pakketten, waarbij het grondwater in slechts een beperkt deel van de dikte van zo'n pakket van belang is, maar desondanks de stroming in het gehele watervoerend pakket moet worden beschouwd. Voorbeelden zijn pluimen met verontreinigd grondwater die slechts een deel van de dikte van een watervoerend pakket beslaan, bemalingen in dikke pakketten, of het optrekken van brak/zout grondwater. De situatie wordt vaak bemoeilijkt doordat in een dik pakket veelal lagen met verschillende doorlatendheden voorkomen. Voor sanering of beheersing van verontreinigingspluimen is het gebruik van onvolkomen putten het efficiëntst vanwege het beperken van debieten (minder energiegebruik en minder aanslag op watervoorraden) en/of vergroten van vracht. Om putten op de juiste wijze te kunnen plaatsen en benodigde debieten goed te kunnen afleiden is optimaal inzicht nodig in de ruimtelijke verdeling van diverse hydraulische parameters.

Bij gebrek aan gegevens en aan adequate onderzoeksmethodes wordt vaak impliciet uitgegaan van verticale homogeniteit van hydraulische parameters binnen een watervoerend pakket. De praktijk is dat de meeste watervoerende pakketten een zekere gelaagdheid vertonen. De aanname van in de verticaal homogene hydraulische condities lijkt derhalve maar zelden afdoende onderbouwd in geval van onvolkomen putten. Horizontale inhomogeniteit wordt in dit artikel buiten beschouwing gelaten.

P.R. Nienhuis en A.G. Kok zijn werkzaam bij DHV Milieu en Infrastructuur B.V., Postbus 1076, 3800 BB Amersfoort, E-mail: Philip.Nienhuis@mi.dhv.nl.

H.T. Sman is werkzaam bij DHV Water BV, Postbus 484, 3800 AL Amersfoort.

Verticale heterogeniteit van hydraulische parameters kan worden afgeleid met behulp van geofysica, boorbeschrijvingen en sonderingen. De resultaten hiervan zijn echter maar representatief voor een klein volume rond de boring. Over methodes voor het afleiden van verticale heterogeniteit op de schaal van het invloedsgebied van een grondwateronttrekking is tot nu toe weinig gepubliceerd.

Door Hemker (1984, 1985) en Székely (1990, 1995) is aangegeven dat verticale stroming in een watervoerend pakket kan worden gemodelleerd door het verticaal opdelen van het pakket in subpakketten, gescheiden door weerstandbiedende lagen waarmee de verticale weerstand van de subpakketten wordt gemodelleerd. In de subpakketten is de stroming overwegend horizontaal en worden Dupuit-aannames aangehouden. Voorzover de weerstandbiedende scheidende lagen niet oneindig dun worden gemodelleerd, wordt daarin alleen verticale stroming verondersteld. Maas (1987) heeft met behulp van een volledig driedimensionale oplossing voor stationaire putstroming gevonden dat bovengenoemde verticale discretisatie in de meeste gevallen voldoende nauwkeurig zal zijn, vooropgesteld dat de schematisatie met enig hydrologisch inzicht wordt opgezet. Door Hemker (1997) is deze opzet voor niet-stationaire putstroming geverifieerd aan een aantal analytische en numerieke oplossingen uit de literatuur.

Deze benadering is dus niet nieuw, maar wel relatief onbekend en wordt maar weinig toegepast. Misschien leeft daarnaast het denkbeeld dat model-aquitards alleen maar mogen worden gebruikt voor het modelleren van echt bestaande slechtdoorlatende lagen. Recentelijk is in Groundwater (Leake en Mock, 1997) nog eens een lans gebroken voor verticale discretisatie van watervoerende pakketten ten behoeve van het modelleren van verticale stroming

In het onderstaande wordt kort ingegaan op de analytische benadering van meerslagenstroming; de geïnteresseerde lezer wordt verwezen naar de betreffende literatuur. Aan de hand van een in 1996 uitgevoerde pompproef (DHV, 1997) wordt vervolgens geïllustreerd hoe deze analytische benadering kan worden gebruikt bij het verkrijgen van inzicht in de verticale verdeling van hydraulische parameters. Omdat de theorie ruim voldoende beschreven is in de literatuur, wordt in dit artikel vooral de praktische gang van zaken benadrukt.

Meerslagenstroming - algemeen

In figuur 1 is een deel van een systeem van watervoerende pakketten en scheidende lagen getoond. Uitgaande van de methode-Hemker (1984) kan voor elk watervoerend pakket in figuur 1 de volgende vergelijking worden opgesteld:

$$\nabla^2 h_i = -\frac{1}{T_i c_i} \cdot h_{i-1} + \left(\frac{1}{T_i c_i} + \frac{1}{T_i c_{i+1}} \right) \cdot h_i - \frac{1}{T_i c_{i+1}} \cdot h_{i+1} \quad i=1 \dots n \quad (1)$$

waarin:

- n = aantal watervoerende pakketten
- h_i = stijghoogte in watervoerend pakket i
- ∇^2 = Laplace operator
- T_i = doorlaatvermogen (transmissiviteit) van watervoerend pakket i
- c_i = verticale weerstand van scheidende laag i

Voor alle beschouwde watervoerende pakketten ontstaat zo een gekoppeld stelsel vergelijkingen, dat gemakkelijk in matrixvorm kan worden genoteerd:

$$\nabla^2 \mathbf{h} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{h} \tag{2}$$

waarin:

- \mathbf{h} = vector met stijghoogten
- \mathbf{A} = tridiagonale niet-symmetrische vierkante matrix met elementen van de vorm $1/(T_i c_i)$, i en j indices van laagnummers.

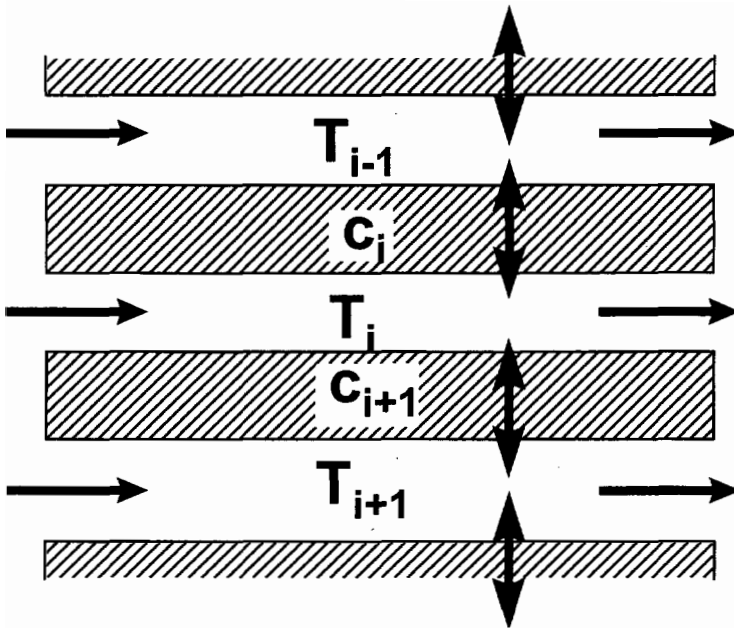
Dit stelsel vergelijkingen kan worden ontkoppeld met behulp van eigenwaarde-analyse (Kreyszig, 1988), waarbij de volgende vergelijkingen ontstaan:

$$\nabla^2 = \mathbf{V} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{h} \tag{3a}$$

$$\Leftrightarrow \nabla^2 \mathbf{t} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{t} \tag{3b}$$

waarin:

- \mathbf{t} = $\mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{h}$
- \mathbf{V} = matrix met eigenvectoren
- \mathbf{W} = diagonale matrix met eigenwaarden w_i



Figuur 1: Schematische weergave van een meerlagensysteem

Meerlagenstroming - putstroming

In geval van stroming naar putten leidt verdere analyse tot een oplossing van de vorm:

$$\mathbf{s} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{g} \quad (4)$$

waarin:

\mathbf{s}	=	vector met stijghoogteverlagingen op afstand r uit put
\mathbf{K}	=	diagonale matrix met elementen $\mathbf{K}_0(r/+w_i)$
\mathbf{K}_0	=	Bessel-functie
r	=	radiale afstand tot put
w_i	=	eigenwaarde
\mathbf{g}	=	vector met putdebieten

Door Hunt (1986) is een alternatieve afleiding gegeven, die leidt tot een symmetrische matrix \mathbf{A} . Deze dient dan via een gegeneraliseerde eigenwaarde-analyse te worden opgelost (zie daarvoor Strang, 1976). Hemker (1984) geeft aan hoe \mathbf{A} in (2) symmetrisch kan worden gemaakt.

Maas (1986, 1997) geeft gegeneraliseerde (meerlagen-)oplossingen voor een aantal standaard situaties op basis van matrixrekening. Zijn notatie leent zich vooral voor implementatie via gespecialiseerde wiskunde-pakketten op de PC als MATLAB, Mathematica en dergelijke. Overigens zijn alle genoemde afleidingen wiskundig volkomen equivalent.

Niet-stationaire putstroming in meerlagensystemen

Voor niet-stationaire putstroming is, net als bij de Theis-oplossing, een Laplace-transformatie van de tijdvariabele nodig. Uit de daarna verkregen oplossing kunnen vervolgens met behulp van een inverse transformatie de stijghoogteveranderingen worden verkregen. Door Hemker & Maas (1987) is in detail ingegaan op de voors en tegens van enkele potentieel bruikbare numerieke inversiemethodes; de methode van Stehfest (1970) bleek in de praktijk het meest geschikt.

Praktijkvoorbeeld: Pompproef te Wijster (Dr.)

Achtergrond en bodemopbouw

In 1996 is door DHV een pompproef uitgevoerd te Wijster; de resultaten van deze pompproef dienden om een nauwkeuriger inzicht te krijgen in het debiet dat nodig is voor beheersing van chloridehoudend grondwater afkomstig van een stortplaats (DHV, 1997). In de onderstaande beschrijving van die pompproef ligt de nadruk op de methodiek en niet op de feitelijke resultaten.

De geohydrologische opbouw, afgeleid uit een aantal boringen en de Grondwaterkaart (TNO, 1989) is globaal weergegeven in figuur 2. De belangrijkste eenheden zijn: een laag keileem die fungeert als afdekkend pakket en uitwigt op een afstand van circa 1 km van de pompputten; een ruim 130 m dik overwegend grofzandig watervoerend pakket; waarin op

diverse niveaus kleilenzen en/of kleilagen voorkomen; en een kleilaag op circa 80 m -mv, die het watervoerend pakket vermoedelijk in tweeën deelt. De bovenste 15 à 20 m van het watervoerende pakket bestaan uit fijnzandige afzettingen. Daarnaast bevindt zich boven de keileem een dunne laag fijnzandige afzettingen. Afgezien van enkele kleine, relatief ondiepe bedrijfsonttrekkingen bevinden zich in de wijde omgeving geen grondwateronttrekkingen. Oppervlaktewateren in de omgeving betreffen het VAM-kanaal op minimaal circa 1000 m en het Oude Diep op 1400 m (figuur 3). De chloridepluim is ter plaatse van de pompputten geconcentreerd rond een diepte van 30 à 40 m -mv; uit boringen is afgeleid dat zich op die diepte een wat grovere laag bevindt. De intentie was om de putten voor de beheersing in deze grovere laag af te stellen.

Opzet van de pompproef

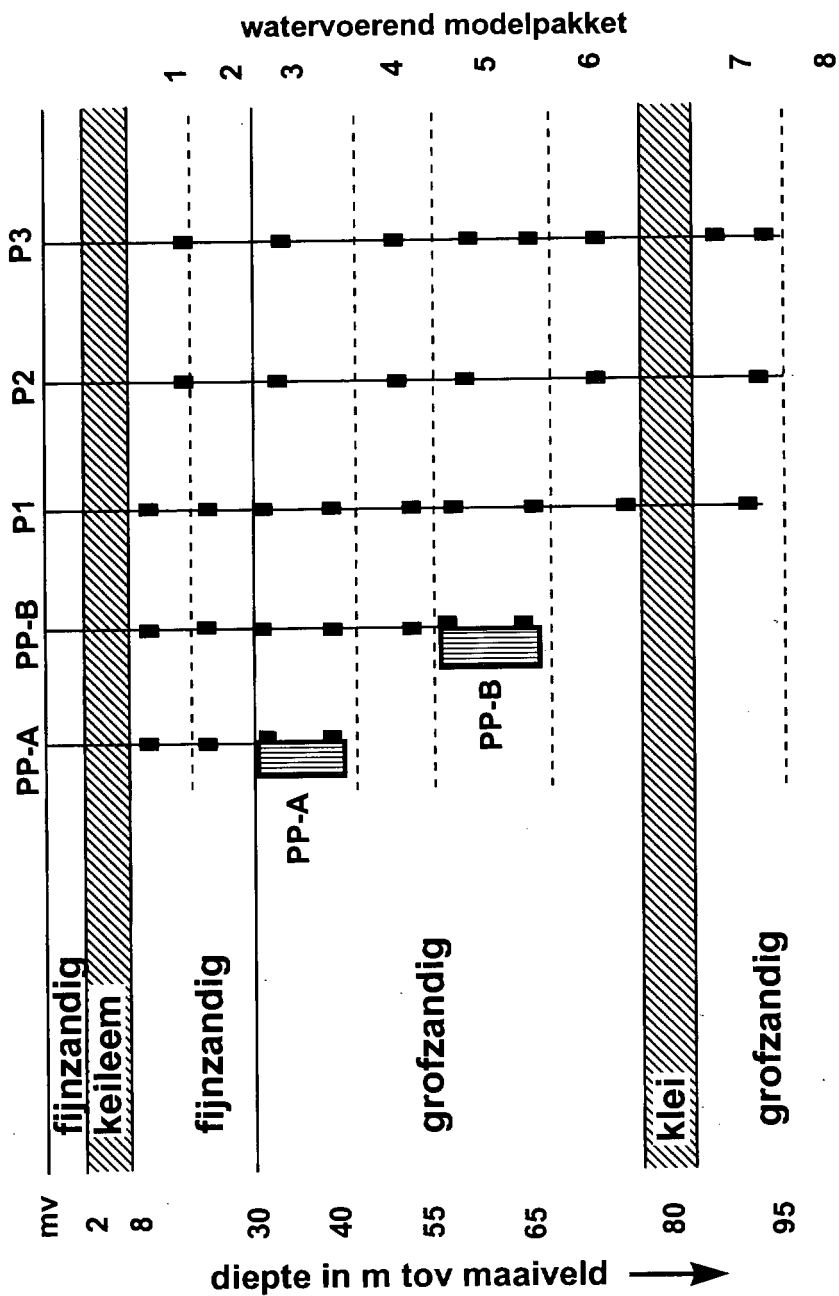
De pompproef is uitgevoerd als dubbele pompproef; één proef is uitgevoerd in een voorziene toekomstige onttrekkingsput, de andere in een dieper afgestelde put. De bedoeling van deze laatste is om meer inzicht te krijgen in de hydraulische parameters op wat grotere diepte in het watervoerend pakket. Vanwege de dikte en goede doorlatendheid zal naar verwachting een groot deel van het met de beheersmaatregel onttrokken grondwater vanaf grotere diepte worden aangevuld. Een groot voordeel is verder dat de twee pompproeven gebruikt konden worden voor onderlinge validatie, waardoor de betrouwbaarheid van de resultaten groter is dan bij een enkele proef.

De opzet van de pompproef is in detail weergegeven in figuur 4. De pompputten PP-A (30–40 m -mv) en PP-B (55–65 m -mv) zijn in aparte boringen afgesteld met een onderlinge afstand van 20 m. Peilput P1, tot 90 m -mv, is voorzien van peilfilters op diepte-intervallen van circa 10 m. In de boringen van de pompputten zijn eveneens om de 10 m peilfilters geplaatst. Peilputten P2 en P3 liggen circa 45 m westelijk respectievelijk circa 130 m oostelijk van P1. Daarnaast bevindt zich nog een aantal peilputten op grotere afstanden, waarvan een enkele tot 140 m diepte (figuur 3).

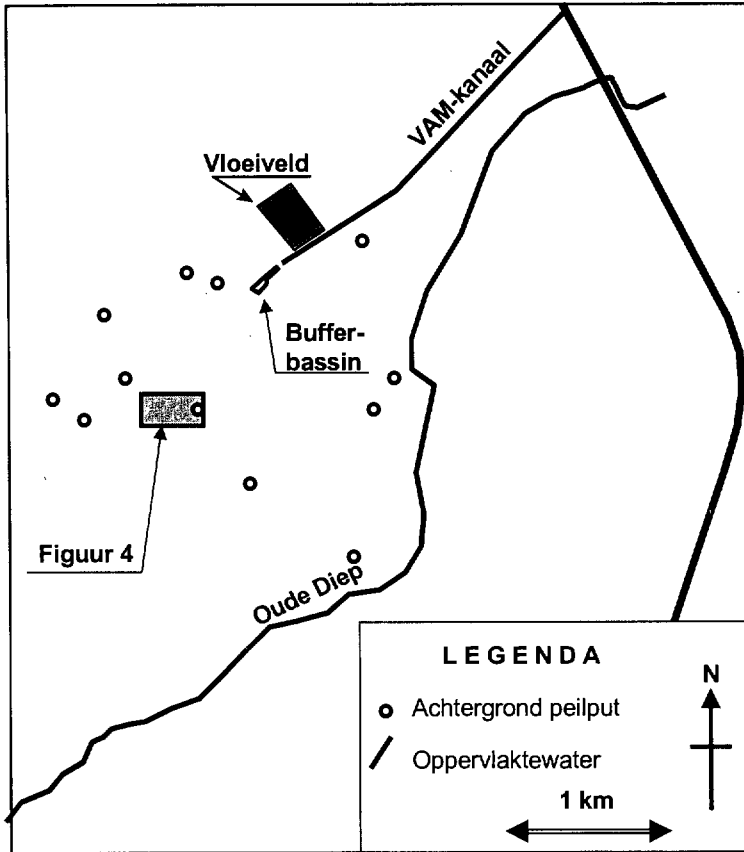
Het opgepompte grondwater werd via een persleiding, een tussenbassin op 900 m afstand en nog een persleiding, na behandeling geloosd op een vloeiveld op 1200 m afstand (figuur 3).

Verloop van de proeven

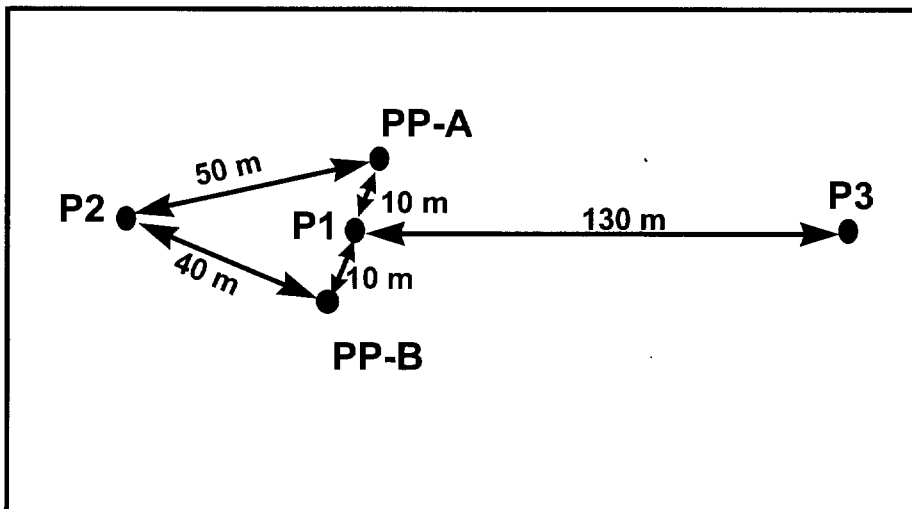
Voorafgaande aan de eerste pompproef (in PP-B) is in 12 peilfilters automatische peilregistratie-apparatuur aangebracht. Daarnaast zijn dagelijks handmatige peilrondes uitgevoerd in een groot aantal peilfilters binnen een straal van 1400 m. Enkele dagen voor de pompproef is het pompdebiet ingesteld op 204 m³/uur. Beide pomp- en stopproeven duurden 7 dagen en zijn vrijwel identiek gemonitord. Gestart werd met een nulmeting vlak voor de start. Tijdens de eerste uren na de start is in alle peilfilters van PP-A, PP-B, P1 en P2 gepeild, aanvankelijk elke minuut, later met toenemend tijdsinterval; ook de debietmeterstand werd met dit interval opgenomen. Na vier uur werd vertrouwd op de dagelijkse peilronde. Twee weken na de stopproef in PP-B startte de pompproef in PP-A, aanvankelijk eveneens 204 m³/uur. Bij deze tweede pompproef is het debiet enkele malen geknepen vanwege overlopen van het tussenbassin.



Figuur 2: Schematische opbouw van de ondergrond, filterstellingen en modelschematisatie



Figuur 3: Overzicht van de locatie



Figuur 4: Lay-out van de pompproeven

Correctie van de gemeten stijghoogteverlagingen

In figuur 5 is het verloop tijdens de voorpeilingen weergegeven van de stijghoogtes en de luchtdruk in het bovenste en diepste filter van peilbuis P2, op circa 45 m afstand van de pompput. Het watervoerend pakket blijkt een barometrische efficiency te hebben van circa 0,2. Uit deze barometrische efficiency is met behulp van een door Jacob (1940) aangegeven methode:

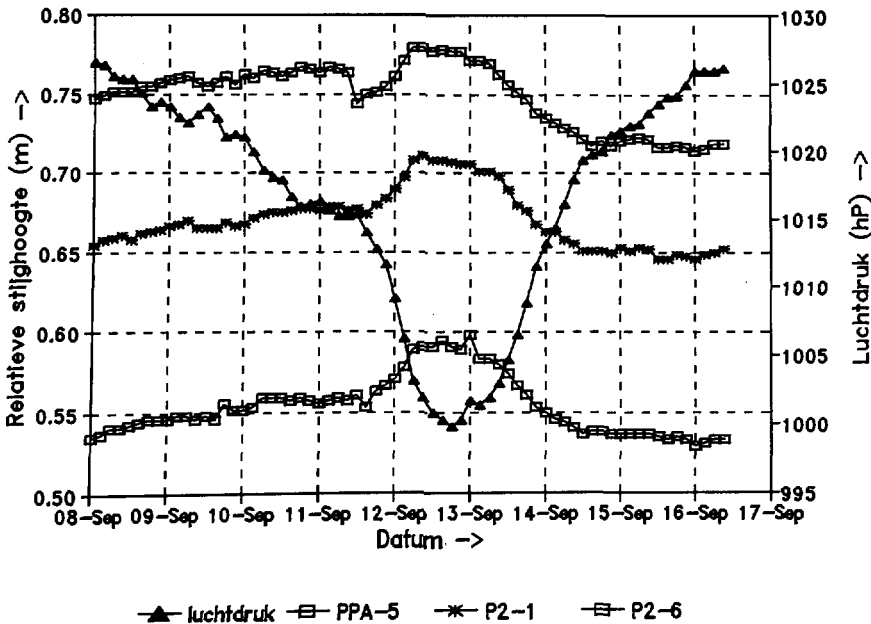
$$S = n \cdot h \cdot \rho \cdot g \cdot c_w / BE \tag{5}$$

waarin:

- S = bergingscoëfficiënt
- n = porositeit
- h = dikte van het watervoerend pakket (120 m),
- r = dichtheid van water
- g = versnelling van de zwaartekracht
- BE = barometrische efficiency
- c_w = compressibiliteit van water,

een eerste schatting afgeleid voor de elastische bergingscoëfficiënt van het afgepompte pakket van circa $5 \cdot 10^{-4}$.

De pompproeven zijn uitgevoerd in een relatief droge periode. Het dunne freatische pakketje boven de keileem stond gedurende de gehele meetperiode droog. Gedurende één middag tijdens de pompproef in PP-A viel lichte motregen; hiervan is op de tijd–stijghoogtelijnen niets significant merkbaar. Het piëzometrisch vlak van het watervoerend pakket bevond zich gemiddeld ergens de keileemlaag.



Figuur 5: Verloop van luchtdruk en stijghoogten tijdens voorpeilingen

Ofschoon het peil in het VAM-kanaal soms 0,4 m kon variëren, is hiervan evenmin veel te merken; dit komt door de grote afstand. Het waterpeil in het Oude Diep is gestuwd en varieerde nauwelijks.

Er waren afspraken gemaakt dat naburige bedrijfsonttrekkingen gedurende de pomp-proeven stilgelegd dan wel op een zo constant mogelijk debiet zouden worden gehouden.

Al met al bleek alleen correctie noodzakelijk te zijn voor luchtdrukvariaties; deze correctie bleek maximaal circa 0,07 m te bedragen.

Analyse van de ruwe tijd-stijghoogtelijnen van de pompproef

In figuur 6a – 6c en 7a - 7b is een selectie geplot van tijdens de pompproeven gemeten stijghoogteverlagingen. Automatisch en handmatig gemeten verlagingen zijn door elkaar geplot, waardoor af en toe sprongen optreden. De stijghoogteschalen van deze figuren verschillen onderling.

Allereerst is uit het feit dat ook na een week de stijghoogteverlagingen nog steeds toenamen, afgeleid dat voor de uitwerking van de pompproef kan worden uitgegaan van vrijwel volkomen spanningswater ('confined'). Ofschoon de stijghoogteverlagingen bleven toenemen, blijken de gemeten verschillen tussen de onderscheiden lagen vanaf circa 8 à 12 uur na de start min of meer constant.

De knik in de curves na circa 2 uur pomptijd wordt door ons toegeschreven aan een onvolledig voedende randvoorwaarde. Met behulp van analytische formules (Zijl, 1990; Chapuis, 1994) kan worden afgeleid dat deze 'voeding' in wiskundige zin geconcentreerd is op een afstand van 900 à 1200 m. Dit zou kunnen samenhangen met het oppervlaktewater (VAM-kanaal, Oude Diep), maar ook met het vloeiveld en/of de uitwiggende keileem (overgang naar overwegend freatische i.p.v. alleen elastische berging).

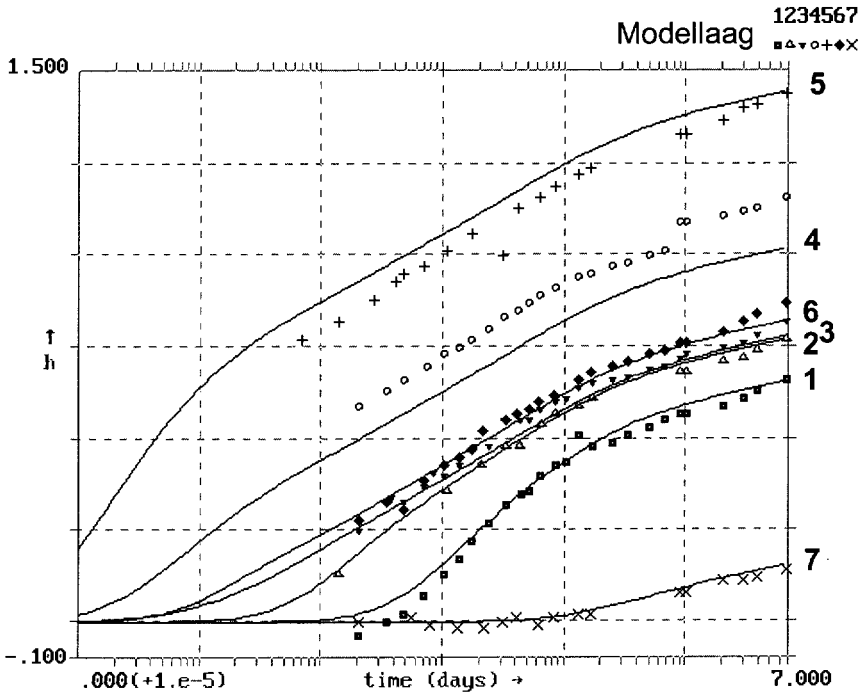
Uit het stijghoogteverloop in de verderaf gelegen peilbuizen volgt dat de kleilaag op 80 m –mv een duidelijk scheidende werking heeft.

Voor korte pomptijden is een duidelijk Noordbergum-effect zichtbaar, dat zijn negatieve stijghoogteveranderingen vlak na starten respectievelijk stoppen van de pomp.

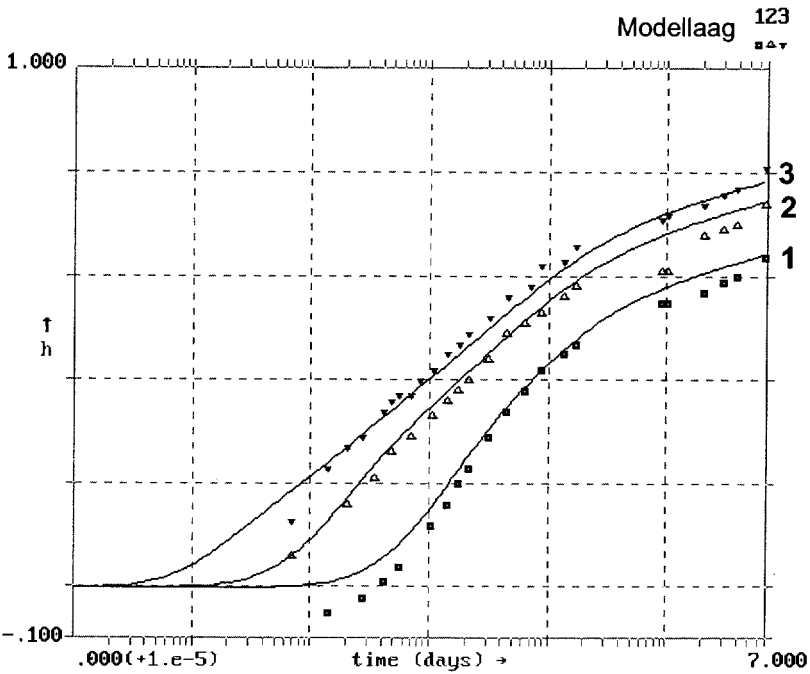
Uitwerking

De partiële voeding op 900 à 1200 m afstand is in eerste instantie gemodelleerd met een imaginaire injectieput op 1500 à 2000 m afstand in de bovenste modellaag, met een debiet van 60 % van het werkelijke pompdebiet.

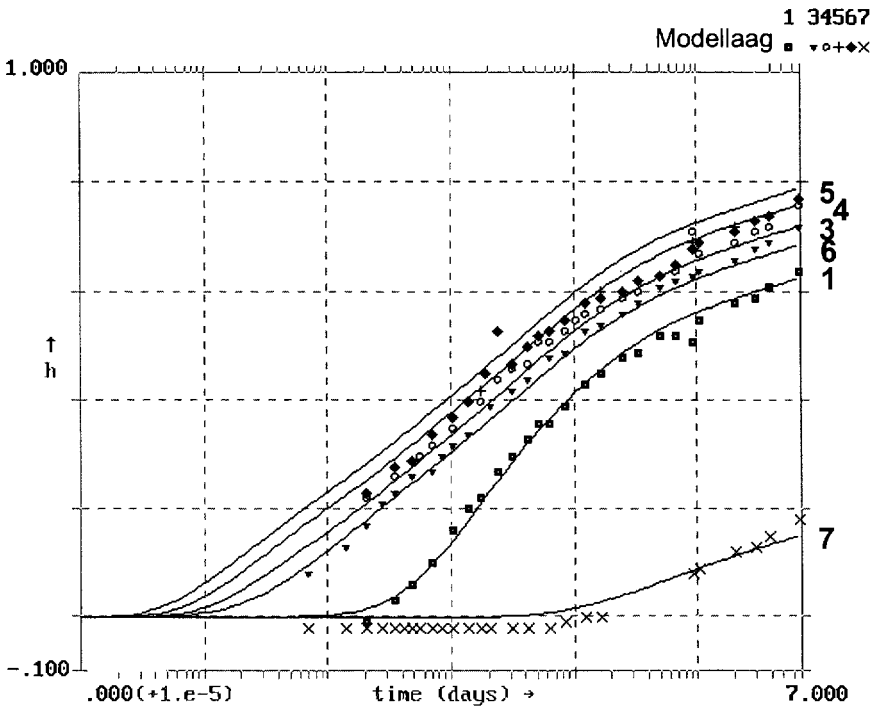
De pompproeven zijn uitgewerkt met het analytisch meerlagenmodel MLPV (Nienhuis, 1995). Op basis van de filterstelling van beschikbare peilfilters en het vóórkomen van kleilagen/-lagen in de boringen is een schematisatie opgezet waarbij het gehele watervoerende pakket tot 140 m –mv is opgedeeld in acht watervoerende lagen met zeven scheidende lagen. Boven- en onderzijde van het model zijn ondoorlatend. De schematisatie is in grote lijnen weergegeven in figuur 3. Zoals uit deze figuur blijkt, staan niet alle peilfilters precies in het midden van de onderscheiden lagen afgesteld.



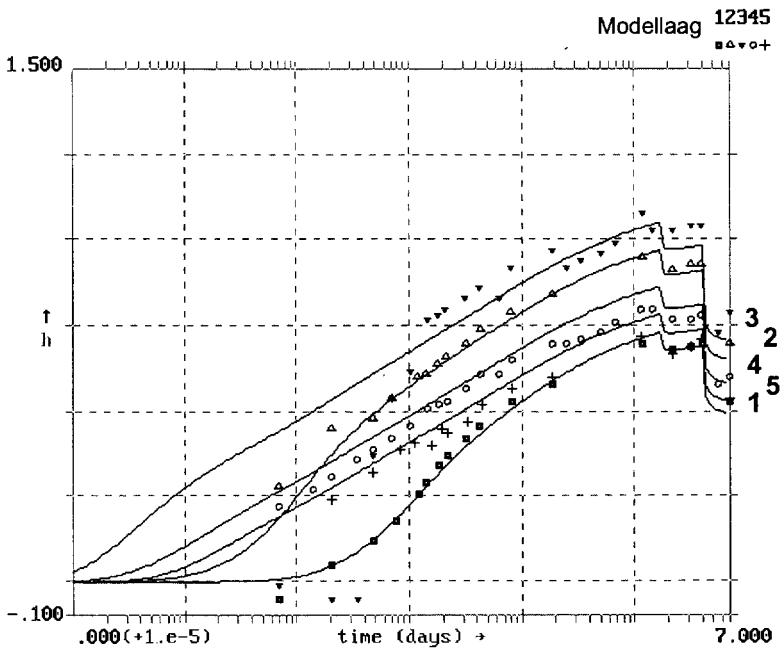
Figuur 6a: Gemeten en berekende stijghoogteverlagingen in P1 tijdens pompproef 1 (m)



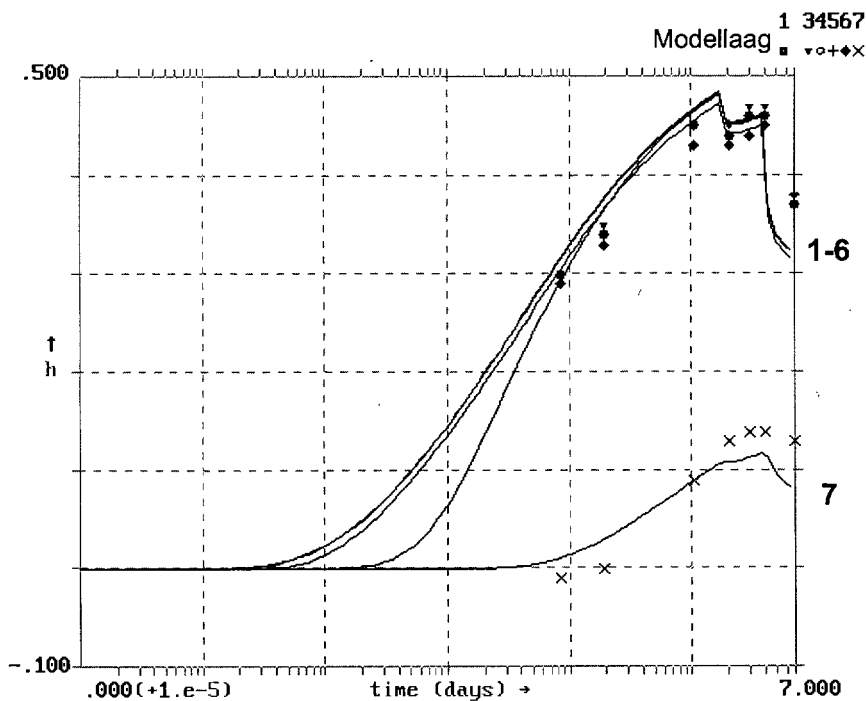
Figuur 6b: Gemeten en berekende stijghoogteverlagingen in PP-B tijdens pompproef 1 (m)



Figuur 6c: Gemeten en berekende stijghoogteverlagingen in P2 tijdens pompproef 1 (m)



Figuur 7a: Gemeten en berekende stijghoogteverlagingen in PP-A tijdens pompproef 2 (m)



Figuur 7b: Gemeten en berekende stijghoogteverlagingen in P3 tijdens pompproef 2 (m)

Vanwege het grote aantal onbekende parameters (acht doorlaatvermogens, zeven verticale weerstanden en acht bergingsfactoren) en omdat de vier proeven (twee pomp- en twee stopproeven) uiteindelijk in één set parameters dienden te resulteren, is de uitwerking in een aantal systematische stappen geschied.

Stap 1 Allereerst is op basis van de verlagingen in de verder weg gelegen peilputten (> 100 m afstand) met behulp van de éénlaagsoplossing van Theis een eerste schatting gemaakt van het doorlaatvermogen van het gehele watervoerend pakket. Vervolgens is dit doorlaatvermogen verdeeld over de modellagen, primair evenredig met de gemodelleerde diktes en daarnaast ietwat aangepast aan de uit boorbeschrijvingen bekende lithologie. Voor de verticale weerstanden is één dag ingevoerd. Zo werden startwaardes verkregen voor alle modellagen.

Stap 2 Daarna is, voor elke pomp- en stopproef apart, gestart met handmatig door trial-and-error optimaliseren van de afgepompte laag en direct boven- en onder gelegen lagen. Geleidelijk aan werden verticaal 'verder weg' gelegen lagen meegenomen. Op deze manier werd voor elke proef (twee pompproeven en twee stopproeven) een grove uitwerking verkregen. De metingen in de eerste vijf minuten van elke proef zijn genegeerd i.v.m. Noordbergum-effecten.

Stap 3 Deze vier grove parametersets zijn gemiddeld, waarna een verdere optimalisatie volgde aan alle proeven: aanpassing van parameters diende voor alle proeven te leiden tot een verbeterde 'fit', niet alleen voor één individuele proef. Op deze manier zijn de beide pompproeven gebruikt voor onderlinge validatie.

Stap 4 Tot slot zijn nog enkele 'flankerende' optimalisaties uitgevoerd. Tijdens stappen 1-3 is geëxperimenteerd met de afstand en het debiet van de imaginaire injectieput; een afstand van 1250 m en de aanvankelijke waarde van 60 % van het pompdebiet bleken goed te voldoen. Verder is nog geëxperimenteerd met niet-stationaire nalevering uit de keileemlaag met behulp van een 'top-aquitard' (een slechtdoorlatende deklaag met aan de bovenkant een ondoorlatende rand, in tegenstelling tot bij een polder waarbij de bovenkant doorlatend is). Dit bleek echter niet significant bij te dragen tot een betere fit.

Resultaten

In figuren 6a – 6c en 7a – 7b zijn berekende en gemeten stijghoogteverlagingen weergegeven voor de pompproeven in PP-B respectievelijk PP-A; die van de stopproeven zijn hier weggelaten omdat die voor dit artikel geen aanvullende informatie bieden.

In het algemeen blijken de berekende en gemeten stijghoogteverlagingen goed overeen te komen. De berekende stijghoogteverlagingen in zeer dicht bij het afgepompte putfilters gelegen peilfilters (in verticale zowel als horizontale zin) kunnen echter niet in goede overeenstemming worden gebracht met de gemeten verlagingen. Dit zou kunnen liggen aan: (1) een niet-homogene verdeling van de instroom over de hoogte van het pompfilter; (2) te sterke verticale stromingscomponenten, waardoor in onvoldoende mate werd voldaan aan de Dupuit-Forcheimer condities die aan de analytische meerlagen-methode ten grondslag liggen; (3) fouten in de radiale afstand (er is van uitgegaan dat alle putten exact verticaal staan. Eén graad afwijking kan op een diepte van 50 m al een afwijking van bijna 1 m geven); (4) het feit dat peilfilters die aan een modellaag zijn 'toegekend', niet alle op hetzelfde niveau binnen die laag staan afgesteld. Hierdoor kan de gemeten stijghoogte in die peilfilters afwijken van de berekende 'representatieve' stijghoogteverlaging in die laag.

De uiteindelijk geoptimaliseerde set parameters is weergegeven in tabel 1. Dit gecombineerde resultaat omvat alle pomp- en stopproeven. In verband met laterale heterogeniteit is deze parameterset uiteraard een gemiddelde voor alle beschouwde peilputten.

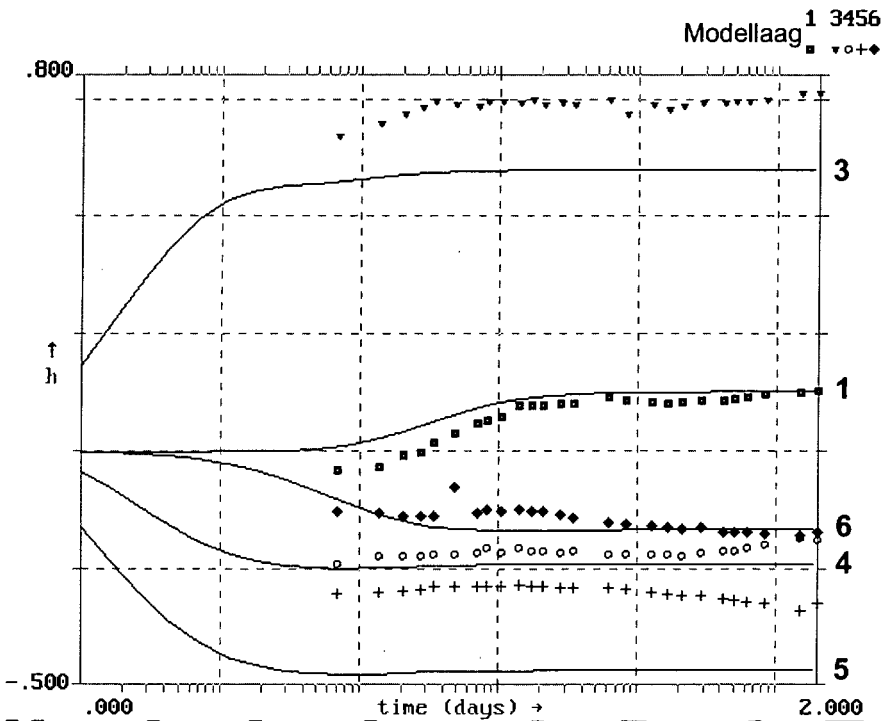
Uitgaande van laagdiktes kunnen horizontale en verticale doorlatendheden worden afgeleid. Omdat laagdiktes niet direct in de meerlagenoplossing voorkomen, moeten globale laagdiktes enigszins arbitrair worden afgeleid uit de schematisatie. Het grove deel van het watervoerend pakket blijkt een verticale anisotropiefactor te hebben van orde grootte 3; het bovenste fijnzandige deel circa 7. Dit zijn waarden die goed overeenkomen met literatuurwaarden voor zandige ongeconsolideerde aquifers (Van Wee, 1990).

Tabel 1: Afgeleide hydraulische parameters van de pomp- en stopproeven

Modellaagnummer	Verticale weerstand bovenliggende laag (d)	Transmissiviteit (m ² /d)	Bergingsfactor (-)
1	-	65	0.0003
2	25	70	
3	2.5	1350	0.0002
4	0.4	840	
5	0.3	1050	
6	3	665	
7	700	630	
8	10	700	

Bij de hier beschreven pompproef is de analyse uitgevoerd aan de hand van de gemeten stijghoogteverlagingen. Het kan echter handig zijn om de oplossing verder te optimaliseren aan de hand van som- en/of verschilverlagingen van beide pompproeven (uiteraard uitgaande van de som- en verschilonttrekkingen) of aan andere combinaties van de proeven. Als voorbeeld zijn in figuur 8 berekende en gemeten (niet-gecorrigeerde) verschilverlagingen uitgezet tegen de pomptijd. Duidelijk zichtbaar is dat de verschil-pompproef al na enkele uren stationair wordt, hetgeen impliceert dat zo'n verschil-pompproef in principe stationair zou kunnen worden uitgewerkt. Een van de twee pompproeven zou dus minder lang hoeven te duren.

De verschilverlagingen zijn uiteraard het grootst ter plaatse van de peilfilters die het dichtst bij de pompfilter liggen. Dit zijn echter de peilfilters waar verstoringen door bijvoorbeeld inhomogene stroming naar het pompfilter de grootste rol spelen. De effecten van systematische fouten in individuele pompproeven, zoals peilfilters die niet precies midden in een subpakket staan afgesteld, zullen elkaar bij een verschilpompproef tot op zekere hoogte compenseren dan wel maskeren. Ofschoon er dus de nodige voorzichtigheid geboden is, kan uitwerking van een synthetische verschil-pompproef nuttig zijn omdat minder variabelen een (storende) rol spelen.



Figuur 8: Gemeten en berekende stijghoogteverlagingen in P1 van 'verschil'-pompproef (m)

Discussie en conclusies

Verticale heterogeniteit in watervoerende pakketten hoeft niet te worden genegeerd, maar kan uitstekend worden geëxploreerd op basis van analytische meerlagenoplossingen zoals gegeven door Hemker en Maas (1987). Weliswaar moeten stijghoogteverlagingen in een groot aantal peilfilters worden gemeten, maar het risico van 'verzuipen in de gegevens' kan eenvoudig worden vermeden door een systematische aanpak van de uitwerking.

Bij veel pompproeven met onvolkomen putten worden gemeten stijghoogteverlagingen pas betrouwbaar verondersteld als de afstand van de gebruikte peilputten tot de pompput minimaal 1,5 à 2 keer de pakketdikte bedraagt. Stijghoogteverlagingen gemeten in dichterbij gelegen peilputten kunnen echter wel degelijk veel waardevolle informatie geven. Daarbij komt dat 1,5 à 2 maal de pakketdikte bij de onderhavige pompproef nu juist de schaal was waarop de beheersmaatregel diende te worden ontworpen. Zo'n situatie, waarbij de schaal van het probleem qua ordegrootte overeenkomt met de pakketdikte, is zeker niet uniek.

Belangrijk aandachtspunt is een goede afdichting en afwerking van gebruikte peilputten. Omdat bij deze pompproeven verticale stroming een grote rol speelt, mag de opvulling van de boringen (tussen de kleipropen t.p.v. de blinde stukken van de peilbuizen) zeker niet beter doorlatend zijn dan de formatie zelf, teneinde afvlakking van verticale gradiënten via hydraulische kortsluiting in de peilput zoveel mogelijk te voorkomen. Opvullen met filtergrind, zoals vaak gebeurt, is niet aan te bevelen. Opvullen met kleibrokken, zand-bentoniet of grout is te verkiezen. Dit geldt natuurlijk des te sterker indien het onderhanden probleem bijvoorbeeld een grondwaterverontreiniging met VOC's betreft, waarbij groot risico bestaat voor verticale verspreiding via boringen.

Dit soort pompproeven, waarbij de uitvoering en analyse zijn gebaseerd op een splitsing van het watervoerend pakket in een aantal subpakketten, zijn duurder en vereisen meer inspanning dan een klassieke pompproef. De verantwoording hiervan ligt in de mogelijkheid om met de extra verkregen informatie bijvoorbeeld een beheers- of saneringsmaatregel of een bemaling zoveel nauwkeuriger te dimensioneren, dat op den duur door een lager debiet de efficiency van zo'n ingreep hoger is. Dit vertaalt zich in lagere investeringen en exploitatiekosten en een hoger milieurendement.

Dankwoord

Wij willen graag VAM N.V., in het bijzonder de heren A. Smits en H. Woelders, danken voor hun toestemming om dit artikel te publiceren. Meteo Consult gaf toestemming voor het publiceren van luchtdrukgegevens. J. Timmerman was van onschatbare waarde vanwege het nauwgezet en plichtsgetrouw uitvoeren van peilrondes en voorbereiding van de gegevens. C.J. Hemker gaf enkele waardevolle aanwijzingen voor de inhoud van het artikel.

Literatuur

- Chapuis, R. (1994)** Assessment of methods and conditions to locate boundaries I One or two straight impervious boundaries & II One straight recharge boundary; in: *Groundwater*, jrg 32, nr 4, pag 576–590.
- DHV (1997)** VAM Wijster: Pompproeven en optimalisatie beheersmaatregel; Intern rapport VAM N.V.
- Hemker, C.J. (1984)** Steady groundwater flow in multiple leaky aquifer systems; in: *Journal of Hydrology*, nr 72, pag 355–374.
- Hemker, C.J. (1985)** Unsteady groundwater flow in multiple leaky aquifer systems; *Journal of Hydrology*, nr 81, pag 111–126.
- Hemker, C.J. (1997)** Transient well flow in vertically heterogeneous aquifers; Proc. Analytic-based Modeling of Groundwater flow, Nunspeet, 7–10 april 1997, pag 297–315.
- Hemker, C.J. en C.Maas (1987)** Transient well flow in layered and fissured aquifer systems; in: *Journal of Hydrology*, nr 90, pag 231–249.
- Hunt, B. (1986)** Solutions for steady groundwater flow in multi-layer aquifer systems; in: *Transport in Porous Media*, nr 1, pag 419–429.
- Jacob, C.E. (1940)** On the flow of groundwater in an elastic artesian aquifer; in: *Am. Geophys. Union Trans.* 21, pag 574–586.
- Kreyszig, E. (1988)** Advanced engineering mathematics; Wiley, N.Y., 1294 pag.
- Leake, S.A. en P.A. Mock (1997)** Dimensionality of ground water flow models; Technical Commentary; in: *Groundwater*, jrg 35, nr 6, pag 930.
- Maas, C. (1986)** The use of matrix differential calculus in problems of multiple aquifer flow; in: *Journal of Hydrology*, nr 88, pag 43–67.
- Maas, C. (1987)** Groundwater flow to a well in a layered porous medium 1. Steady flow & 2. Non-steady multiple-aquifer flow; in: *Water Resources Research*, jrg 23, nr 8, pag 1675–1681 en pag 1683–1688.
- Maas, C. en T.N. Olsthoorn (1997)** Snelle oudjes gaan MATLAB. Syllabus 2e workshop Waterwinning en Hydrologie; GWA / KIWA OA N.V., Nieuwegein, rapport nr SWI 97.161.
- Nienhuis, P.R. (1995)** MLPU User's manual. Amsterdam, 63 pag.
- Stehfest, H. (1970)** Numerical inversion of Laplace transforms. in: *Commun. ACM*, nr 13, pag 47–49.
- Strang, G. (1976)** Linear algebra and its applications; Academic Press, N.Y., 374 pag.
- Székely, F. (1990)** Drawdown around a well discharging a heterogeneous, elastic, multiple aquifer-aquitard system. Poster, Proc. Int. Conf. on Calibration and Reliability in Groundwater Modeling, Den Haag, 1990, pag 355–364.
- Székely, F. (1993)** Estimation of unsteady, three-dimensional drawdown in single, vertically heterogeneous aquifers; in: *Groundwater*, jrg 33, nr 4, pag 669–674.
- TNO (1989)** Grondwaterkaart van Nederland, Bladen Steenwijk en Emmen (160, 17W)
- Wee, T. H. van (1990)** De invloed van anisotropie bij putstromingen; Scriptie LUW/DHV.
- Zijl, W. (1990)** Natuurlijke grondwaterstroming in sedimentaire bekkens; Collegedictaat, VU Amsterdam.