

Reactie op 'Analyse van pompproeven met onvolkomen putten in verticaal hete-rogene pakketten op basis van meerla- genstroming'

Leuk, weer eens een wat andere pompproef, eentje die wordt uitgewerkt met analytische oplossingen voor meerdere lagen nog wel. Ik heb er een tijdje naar zitten kijken, omdat het kennelijk is gelukt om uit de beide pompproeven aan de hand van 31 peilfilters maar liefst 17 parameters te bepalen. (Filters in de omstorting van de onttrekkingsput zijn niet meegeteld, wegens de storende invloed van de filterkoek op de boogwand.) Deze parameters zijn bovendien bepaald door 'gissen en missen'. Ik heb al vaker betoogd, dat het onmogelijk is om met de hand meer dan enkele parameters tegelij- kertijd (eenduidig) te optimaliseren (Olsthoorn, 1998), maar 17 stuks is echt een hoogstandje. Zelfs geavanceerde mathema- tische optimalisatieprogramma's lukt dat niet vaak, omdat veel van de filters niet onafhankelijk van elkaar reageren en dus weinig informatie toevoegen die bruikbaar is voor de interpretatie van de pompproef. Met andere woorden: het relevante aantal peilfilters is veel kleiner dan de 31 uit de proef. Ik wil dat op een eenvoudige manier toelichten, daarbij verwijzend naar de figu- ren uit bovengenoemd artikel.

Bekend is dat op een afstand groter dan zeg één à anderhalf maal de pakketdikte de stijghoogte over de hele dikte van het water- voerende pakket dezelfde waarde krijgt. Dit is goed te zien in put P3 op 130 m van de pompput (zie figuur 7b). Deze zes filters in het watervoerende pakket tellen derhalve slechts voor één. Het verlagingenbeeld in een aangrenzend pakket heeft altijd een

vlak verloop in de buurt van de put, het gaat daarvan pas afwijken op een afstand groter dan zeg 0,3 maal de spreidingslengte van het aangrenzende pakket die, blijkens de resultaten van de pompproef meer dan

$$\sqrt{k D c} = \sqrt{(700 + 800) \times 700} \approx 1000 \text{ m}$$

bedraagt. Ergo moet de verlaging in het onderliggende pakket in alle waarnemings- filters binnen een afstand van enkele hon- derden meters gelijk zijn. Dit blijkt inder- daad het geval (zie de filters in laag 7, figuur 6a, 6c en 7b). De 4 diepe filters tellen derhalve gezamenlijk voor één. Waarne- mingsput P2 bevindt zich op een afstand van circa $\frac{2}{3}$ maal de pakketdikte. Op deze afstand zijn de peilverschillen tussen filters in hetzelfde pakket al voor een groot deel verdwenen, zoals blijkt uit figuur 6c. Ook deze filters geven dus geen onafhankelijke informatie. De 8 filters in het watervoe- rende pakket van waarnemingsput P2 tel- len naar mijn inschatting gezamenlijk voor 2 of hoogstens 3 onafhankelijke filters. De verlaging aan de top (laag 1) van het pakket blijkt eveneens vlak, de filters in laag 1 in putten PPA1, P1 en P2 (figuren 6a, 6b en 6c) geven praktisch dezelfde verlaging en dus dezelfde informatie. Ook hier moeten we, wat de informatiebijdrage betreft, 2 fil- ters in mindering brengen. Verder mogen we ervan uitgaan dat wanneer meerdere fil- ters op dezelfde plek in een en dezelfde deel- laag zitten, hun gezamenlijke informatiebij- drage niet meer dan 1 kan zijn. Dit is het geval voor peilput P1, in de modellagen 3 en 5 en voor PPB in modellaag 3. Rekenen we zo alles bij elkaar, dan houden we van de 31 waarnemingsfilters bijvoorbeeld de vol- gende over: PPA: filters 2 en 3; PPB: de numers 2, 3 en 4; van P1: filters 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7; van P2: filters 3, 4, 5, 6 en van P3 alleen filter 3. Deze filters genereren althans in potentie wezenlijk informatie over de ondergrond. Bij het interpreteren hoeft dan ook alleen maar naar deze 17 te worden gekeken. Uiteraard zijn ook deze 17 filters voor een groot deel aan elkaar gecor-

* door Philip Nienhuis, Tony Kok en Bert Sman; in: STROMINGEN, jrg 5, nummer 1, pag 39-54.

releerd, maar de mate waarin dit het geval is kan niet zomaar op het oog worden bepaald. Zeg dat er netto 10 onafhankelijke waarnemingsputten overblijven. In theorie zou je daarmee maximaal 10 bodemparameters kunnen berekenen. (Hoezeer de stijghoogten van elkaar afhankelijk zijn, is bijvoorbeeld prachtig te zien aan figuur 8, die de verlagingsverschillen aangeeft tussen de afzonderlijke peilfilters. Deze verschillen zijn na een uur of 10 constant. Dit impliceert, dat het vanaf dat moment voldoende zou zijn om nog slechts in één van de waarnemingsputten het tijdsafhankelijke verloop te meten. De verlaging in alle andere filters ligt daarmee vast.)

Omdat de doorlatendheid ook binnen de als homogeen beschouwde lagen ruimtelijk zal variëren en door onnauwkeurigheden zoals niet perfect verticaal gerichte boringen, verstoringen door het verloop van de barometerdruk, variërend peil van het oppervlaktewater en neerslag (freatische grondwaterstanden), passen de metingen nooit perfect op het analytische bodemmodel. Het werkelijke aantal parameters dat eenduidig kan worden bepaald uit de pompproef is derhalve kleiner dan 10. Om erachter te komen hoeveel kleiner zou de pompproef moeten worden uitgewerkt met een mathematisch optimalisatiepakket zoals PEST (Olsthoorn, 1998). De daarbij verkregen statistische resultaten geven aan wat de onzekerheid is van de bepaalde parameters.

Het zal duidelijk zijn, dat met hetzelfde model als waarmee de pompproef is uitgewerkt vooraf kan worden uitgezocht wat de meest optimale plek en diepte van de peilfilters is en bovendien hoeveel parameters vervolgens kunnen worden teruggewonnen uit de (gesimuleerde) meetreeksen. Het gebruik van een model om een pompproef voor te bereiden wil ik dan ook gaarne aanbevelen evenals een optimalisatie van de parameters met een programma zoals bijvoorbeeld PEST, omdat daarmee behalve de

parameters de essentiële informatie over hun onzekerheid wordt verkregen.

Uitwerking

Hieronder volgt een deels met de hand uitgevoerde analyse van de pompproef op basis van de figuren in het artikel (let op dat PPA en PPB zijn verwisseld in figuren 6b en 7a):

Het blijkt dat alle peilbuizen in de lagen 2 t/m 6 tussen $t = 0,001$ en $0,1$ d dalen met $0,195$ m/logcyclus (modellaag 1 is slecht doorlatend en wordt buiten beschouwing gelaten). Ergo geldt Theis voor dit traject en dus volgt met $Q = 4896$ m³/d dat $kD = 4600$ m²/d. Peilput 2, op 40 m afstand, kan mooi dienst doen om de bergingscoëfficiënt te berekenen (figuur 6c). We nemen de rechte door het gemiddelde van de curven van modellagen 3, 4, 5 en 6 tussen $t = 0,001$ en $0,1$ d. Deze rechte snijdt verlaging $s = 0$ op $t_0 = 1,3 \cdot 10^{-4}$ d. Hieruit volgt met $kD = 4600$ m²/d dat $S = 2,25 kD t_0/r^2 = 8,4 \cdot 10^{-4}$ [-].

De verlaging in het onderliggende pakket hangt alleen af van de spreidingslengte. Hierdoor kunnen kD en c van dit pakket niet afzonderlijk worden bepaald, laat staan dat op grond van de pompproef onderscheid kan worden gemaakt tussen modellagen 7 en 8.

Aangezien de verlagingslijnen op semilogaritmisch papier na circa 0,1 dag afbuigen, is er lek. Het bempompte pakket is dus zeker niet volledig gespannen. De spreidingslengte van dit watervoerende pakket kan echter niet worden bepaald, omdat de pompproef geen stationaire eindfase heeft bereikt. Wel kan enige informatie worden verkregen over het effect van gelaagdheid van de lagen die samen het watervoerende pakket vormen. Hier was het de auteurs om te doen.

Tussen $t = 0,001$ en $t = 0,1$ d gedragen lagen 2 t/m 6 zich volgens Theis (volkomen spanningswater). Voorts is het verlagings-

Tabel 1: Positie filters en verlagingen, s , op $t = 0,1$ d. Analytische berekening van de residuen (res A = Δg , Th = Theis, Δpp = onvolkomenheid, $kD = 4600$ m²/d, $S = 0,0084$). Residuen van het uitgangsmodel (0) en na de 4 kalibraties (1 t/m 4) en zoals afgelezen uit de grafieken van Nienhuis e.a. (1999). Gemiddelde afwijking ds . Onderste deel tabel geeft de horizontale respectievelijk de verticale doorlatendheden na de kalibraties en de kD .

Peilfilter, verlaging				Analytisch				Kalibratie					Nienh.
Filter (nr)	r (m)	z (m)	S (m)	Dpp (m)	Th (m)	Th + Δpp (m)	Res A (m)	Res 0 (m)	Res 1 (m)	Res 2 (m)	Res 3 (m)	Res 4 (m)	Res (m)
PPA_1	20	69	0,42	-0,11	0,67	0,57	0,15	0,15	0,112	0,051	-0,014	-0,005	0,00
PPA_2	20	57	0,56	-0,09	0,67	0,58	0,02	0,03	-0,013	-0,070	-0,045	-0,015	0,01
PPA_3	20	45	0,61	-0,05	0,67	0,63	0,02	0,02	-0,025	-0,067	-0,049	-0,020	-0,01
P1_1	10	69	0,44	-0,21	0,79	0,58	0,14	0,15	0,106	0,037	-0,031	-0,022	0,00
P1_2	10	57	0,58	-0,19	0,79	0,6	0,02	0,03	-0,014	-0,082	-0,054	-0,020	0,00
P1_3	10	48	0,63	-0,14	0,79	0,65	0,02	0,03	-0,024	-0,088	-0,065	-0,030	-0,02
P1_3	10	42	0,63	-0,1	0,79	0,69	0,06	0,08	0,022	-0,035	-0,015	0,023	-0,02
P1_4	10	28	0,94	0,14	0,79	0,94	0	0,00	-0,075	-0,020	-0,014	0,014	-0,10
P1_5	10	20	1,22	0,27	0,79	1,06	-0,16	-0,15	-0,237	-0,038	-0,050	-0,031	0,04
P1_6	10	3	0,65	0,09	0,79	0,88	0,23	0,24	0,174	0,143	0,156	-0,014	-0,01
P2_1	40	65	0,39	-0,03	0,56	0,53	0,14	0,14	0,103	0,063	0,029	0,039	0,00
P2_3	40	47	0,49	-0,01	0,56	0,54	0,05	0,06	0,018	-0,005	0,010	0,025	-0,01
P2_4	40	32	0,52	0,01	0,56	0,56	0,04	0,05	0,009	0,018	0,026	0,031	-0,01
P2_5	40	22	0,53	0,02	0,56	0,58	0,05	0,05	0,011	0,040	0,043	0,039	0,00
P2_6	40	8	0,53	0,03	0,56	0,59	0,06	0,06	0,019	0,050	0,053	0,021	0,03
Gemiddelde afwijking, ds (m)								0,106	0,093	0,063	0,056	0,025	0,03
Laagdikte				Doorlatendheid:									
D1	(m)	12		kr_1	m/d	63,9	73,4	70,1	69,8	69,9	5		
D2	(m)	10		kr_2	m/d	63,9	73,4	70,1	69,8	69,9	7		
D3	(m)	10		kr_3	m/d	63,9	73,4	70,1	69,8	69,9	135		
D4	(m)	15		kr_4	m/d	63,9	73,4	70,1	69,8	69,9	56		
D5	(m)	10		kr_5	m/d	63,9	73,4	70,1	69,8	69,9	105		
D6	(m)	15		kr_6	m/d	63,9	73,4	70,1	69,8	69,9	44		
KD (m²/d)								4600	5283	5049	5028	5032	4039
D1	(m)	12		kz_1	m/d	63,9	73,4	29,3	1,3	1,2	(nvt)		
D2	(m)	10		kz_2	m/d	63,9	73,4	29,3	30,4	40,5	0,4		
D3	(m)	10		kz_3	m/d	63,9	73,4	29,3	30,4	40,5	4,0		
D4	(m)	15		kz_4	m/d	63,9	73,4	29,3	30,4	40,5	37,5		
D5	(m)	10		kz_5	m/d	63,9	73,4	29,3	30,4	40,5	33,3		
D6	(m)	15		kz_6	m/d	63,9	73,4	29,3	30,4	8,4	5,0		

verschillen tussen de peilfilters vanaf circa $t = 0,1$ d constant (figuur 8), en dus gelijk aan dat in de stationaire eindsituatie. De verlaging in elk filters op $t = 0,1$ d is derhalve de som van die van een volkomen put volgens Theis, plus het effect van de onvolkomen-

heid, Δpp , plus het effect van gelaagdheid en verticale anisotropie, Δg :

$$s = \frac{Q}{4\pi kD} W\left(\frac{r^2 S}{4kDt}\right) + \Delta pp + \Delta g$$

Tabel 2: Onzekerheid van de 4 gekalibreerde parameters (standaarddeviatie in % van parameterwaarde) en de correlatiematrix in %.

Toevoegen van parameters blijkt geen enkele verbetering op te leveren. Ofwel de residuen nemen niet verder af, danwel de correlatie tussen parameters wordt te groot. Uit het experimenteren hiermee blijkt dat het onmogelijk is om onderscheid te maken tussen de horizontale doorlatendheden van de afzonderlijke lagen. Dit komt omdat deze parallel zijn geschakeld. Zij zijn daarom perfect gecorreleerd in de ijking en dus niet uniek te bepalen. Alleen de totale kD (dus één waarde voor k_f) blijkt kalibreerbaar. Tussen de verticale doorlatendheden van de lagen kan wel enig onderscheid worden gemaakt, althans voor de bovenste en de onderste modellaag. Dit komt omdat hier een soort serieschakeling geldt: het water moet achtereenvolgens door verschillende lagen heen stromen. Meer dan in totaal drie verticale doorlatendheden onderscheiden blijkt echter niet mogelijk met pompproef PBB. Aan deze conclusie zullen de niet in het artikel gegeven resultaten van de pompproef op PPA niets afdoen. Opvallend is dat met eenvoudig gereedschap een uitgebreide uitwerking van een gecompliceerde niet-stationaire pompproef kan worden gegeven. Het bovenstaande is een van de voorbeelden die ik op de Pato-cursus modelleren in november a.s. wil gebruiken.

Betrouwbaarheid k-waarden			Correlatiematrix			
	k (m/d)	Stdev (%)	k_r	k_z(2...5)	k_z1	kz_6
k_r	69,9	1%	100%	4%	2%	-13%
k_z(2...5)	40,5	4%	4%	100%	-3%	-4%
kz_1	1,3	17%	2%	-3%	100%	-2%
kz_6	8,4	8%	-13%	-4%	-2%	100%

De derde term is het gezochte effect dat informatie geeft over de gelaagdheid en anisotropie van het watervoerende pakket en deze kan dus uit de metingen worden geïsoleerd door de eerste twee termen van het rechterlid van de gemeten verlagingen af te trekken (zie tabel 1). Deze twee termen zijn immers bekende analytische oplossingen terwijl kD en S reeds boven zijn berekend (Kruseman en De Ridder, 1970).

Het vaststellen van de gelaagdheid en anisotropie kan met een stationair radiaal model met een radius van 130 m, de plek van PP3, waar immers de verlaging over de volle hoogte dezelfde waarde heeft (figuur 7b). Aangezien de verlagingverschillen tussen de peilfilters vanaf $t = 0,1$ d constant zijn, zijn die gelijk aan die van het geijkte stationaire model, mits we op de buitenomtrek van het model de verlaging volgens Theis op $t = 0$ d opleggen. Gemakkelijk is te berekenen dat de verticale voeding vanuit aangrenzende pakketten volstrekt verwaarloosbaar binnen deze straal van 130 m. Dit

eenvoudige model voldoet dus voor de analyse van deze pompproef.

Kalibratie geschiedt door minimalisatie van een doelfunctie (ds , tabel 1), zijnde het gemiddelde van de kwadraten van de residuen in de peilfilters (Olsthoorn, 1995). De vraag is alleen welke parameters kiezen we voor optimalisatie. We kunnen beginnen met alleen k_r [m/d]. Vervolgens kalibreren we twee parameters k_r en k_z tegelijk, zodat het effect van anisotropie zichtbaar wordt. De afwijkingen in de top van het pakket, laag 1, blijkt in alle filters groot is heeft dezelfde waarde. Dit duidt op een kleine verticale doorlatendheid van laag 1. Hierdoor is $k_z(1)$ ook een goede parameterkandidaat, voor de derde kalibratierun. Ook onderin PP1 blijkt de afwijking groot. We kiezen daarom $k_z(6)$ als extra parameter in de vierde kalibratierun. Let wel, we kalibreren altijd alle parameters tegelijk. Het totale aantal parameters ligt dan al op 4.

De resultaten staan in tabel 1. De gemiddelde afwijking van kalibratie 4 blijkt 2,5 mm. De grootste afwijking is 3,9 cm.

Gezien de afwijkingen in modellaag 4 en 5 van respectievelijk 12 en 5 cm in het artikel van Nienhuis e.a., (ds = 3,5 cm) zijn de hier verkregen resultaten minstens even plausibel. De getalswaarden van de afzonderlijke bodemlagen wijken echter af door een te groot aantal vrijheidsgraden bij Nienhuis e.a., waardoor hun oplossing niet uniek is. De standaarddeviatie van de op 1 genormaliseerde parameters voor de vierde kalibratierun staat in tabel 2. De grootste correlatie is beperkt tot 13%. Dit betekent dat deze oplossing uniek is. De standaardafwijking (onzekerheid) van de 4 gekalibreerde parameters staat ook in tabel 2.

Ik daag de geachte collega's gaarne uit om ook middels hun covariantie- en correlatiematrix te laten zien hoe eenduidig hun resultaten zijn.

Literatuur

Kruseman, G.P. en N.A. de Ridder

(1970) Analysis and evaluation of pumping test data; ILRI, Wageningen.

Olsthoorn (1995) IJking van grondwatermodellen met Monte Carlo en mathematische optimalisatie; in: *H₂O*, jrg 28, nr 10, pag 310-315.

Olsthoorn (1998) Kalibratiegereedschappen; in: M.R. van der Valk en H. Boukes (red) *Modelkalibratie: Het automatisch ijken van grondwatermodellen*; Bundel van lezingen die op 7 november 1997 gehouden zijn tijdens een bijeenkomst van de Nederlandse Hydrologische Vereniging; NHV-special nummer 2; Nederlandse Hydrologische Vereniging, Utrecht.

Theo Olsthoorn
E-mail: t_olsthoorn@csi.com

Reactie van de auteurs op ingezonden mededeling door Theo Olsthoorn

Algemeen

Olsthoorn beziet de beschreven pompproef primair uit het perspectief van het oplossen van het met de pompproef samenhangende wiskundige probleem. Ons doel was echter te illustreren dat het gebruik van analytische meerlagenoplossingen meer inzicht kan bieden in verticale heterogeniteit, in aanvulling op simpeler oplosmethodes en andersoortige gegevens als boorbeschrijvingen, verbreiding van tracers etc.

Bij het benadrukken van de uitwerkingsmethodiek hebben wij nauwelijks aandacht geschonken aan hoe de verkregen resultaten het beste kunnen worden geïnterpreteerd. Olsthoorn's reactie geeft aanleiding tot een verduidelijking op dit punt. Zijn inhoudelijke kritiek blijkt echter te draaien om maar enkele kernpunten. Een paar kunnen wij meteen weerleggen, andere betreffen verschillen van inzicht waarvan de tijd zal moeten leren wie het meeste gelijk heeft.

1 Interpretatie van de resultaten

De uitkomst van de pompproef in de vorm van tabel 1 is achteraf wat kort door de bocht weergegeven. We hadden er bij moeten schrijven dat voor de in de tabel genoemde parameterwaarden het beste naar een gemiddelde waarde over een aantal lagen kan worden gekeken. De aangehouden laagindeling is namelijk nogal arbitrair. De genoemde individuele transmissiviteiten en verticale weerstanden voldoen op zich goed bij de gegeven indeling. Echter, bij elke andere laagindeling moet je na omrekening van de k-waarden equivalente resultaten verkrijgen. De waarden in onze tabel 1 staan er derhalve te 'hard'. Dat heeft echter weinig te maken met aantallen onaf-

hankelijke metingen, maar meer met de manier van verticale discretisatie.

De aangehouden verticale discretisatie van het watervoerend pakket werkt net zo als de horizontale discretisatie in een numeriek model: je weet van de individuele lagen ('cellen') nooit heel zeker de juiste parameterwaarden, maar gemiddeld over een aantal lagen wordt de werkelijkheid (hopelijk) goed benaderd. Op die manier is de uitkomst ook gebruikt (in een numeriek lagenmodel).

2 Meer dan enkele parameters tegelijk optimaliseren zou niet betrouwbaar kunnen

Olsthoorn redeneert naar ons idee teveel vanuit de ervaringen met regionale grondwatermodellen. Daarin is de drijvende kracht achter de grondwaterstroming de voeding uit het neerslagoverschot en drainage naar beken, rivieren en polders etc. Deze voeding en drainage is niet alleen lateraal zeer heterogeen, maar wordt meestal erg simplistisch gemodelleerd en is qua grootte vaak slecht bekend. Vaak staan peilputten ook nog eens op plaatsen waar de 'kalibratiegevoeligheid' niet zo groot is. In een grondwatermodel is het aantal voor kalibratie bruikbare, onafhankelijke meetpunten dan ook beperkt. Dit alles maakt het moeilijk om tegelijkertijd veel parameters zinvol te kalibreren.

Daarentegen speelt bij veel pompproeven – ook bij de onderhavige – laterale heterogeniteit nauwelijks mee. De uitkomsten zijn bruikbaar op een schaal van enkele honderden meters. Wij wisten vooraf dat de pakketopbouw over een nog grotere afstand niet significant varieert. De drijvende kracht achter de grondwaterstroming betreft een plotselinge grondwateronttrekking, een hydraulisch en wiskundig goed bekend en beschreven proces, dat exclusief en in superpositie gekalibreerd wordt. Daarnaast zijn

parameter-bandbreedtes veelal bekend uit neveninformatie. Peilbuislocaties kunnen vaak vooraf worden gekozen. Olsthoorn's pessimisme delen wij daarom niet zo.

3 Het aantal onafhankelijke meetpunten zou te klein zijn

Olsthoorn ziet het een en ander over het hoofd. Bij een stationair model kun je uit 10 meetpunten hooguit 10 parameters afleiden. Maar neem nu eens een niet-stationaire pompproef in één watervoerend pakket met een slechtdoorlatend afdekkend pakket. Als je hier maar één meetpunt (peilfilter) hebt, kun je op basis van herhaalde metingen in principe drie parameters afleiden (bergingsfactor, doorlaatvermogen en verticale weerstand). Dat komt omdat de tijd–stijghoogtelijn voor zo'n schematisatie volkomen wordt vastgelegd door deze drie parameters. Die tijd–stijghoogtelijn moet je dus voldoende nauwkeurig meten. Correlatie tussen parameters speelt zeker een rol, maar lang niet zo erg als Olsthoorn suggereert (zie Indelman e.a. (1996) voor een analyse van de situatie bij meerlagensystemen).

Wij hebben de tijdstijghoogtelijnen beschreven met 4 à 6 meetpunten per logcyclus, hetgeen voor pompproeven in het algemeen voldoende nauwkeurig is. Het aantal duidelijk verschillende tijd–stijghoogtelijnen per proef bedraagt circa 15. Bovendien is de eindoplossing mede verkregen door validatie aan beide, onderling verschillende, pompproeven. Het totaal aantal 'onafhankelijke' metingen kunnen wij hiermee nog niet berekenen, maar zal veel meer zijn dan het aantal afgeleide parameters.

4 *Optimalisatie van meerdere parameters kan alleen goed met wiskundige middelen*

Wij zouden liever zeggen: automatische parameter-optimalisatie is in pincipe beter. Uiteraard hebben we dat ook eerst geprobeerd. Echter, consequent kregen we uitkomsten die gezien de lithologie uiterst onwaarschijnlijk waren, en bovendien vaak extreem verschillend voor de onderscheiden peilputten en voor beide pompproeven en stopproeven. De oorzaken liggen voor de hand: zo'n wiskundige optimalisatietechniek werkt alleen goed als (a) de metingen voldoende representatief zijn voor de modellen waar je de parameters wilt weten én (b) alleen als die lagen goed gedefinieerd kunnen worden. Bij de pompproeven was geen van beide het geval.

Ad (a): Welke laagindeling je ook kiest, altijd zullen er peilfilters ver van het midden van de laag staan afgesteld. Voorbeeld: in figuur 1 van ons artikel is te zien dat filter 4 van P1 onderin de betreffende laag 4 is afgesteld. Tijdens de pompproef in PP-B kun je daarin dus een verlaging verwachten die groter is dan gemiddeld ('representatief') voor laag 4, en tijdens PP-A juist kleiner. Dit blijkt dan ook uit figuren 6a en 7a.

Ad (b): De laagdiktes zijn arbitrair en dus kunnen die lagen niet exact gedefinieerd worden.

De systematische maar verklaarbare afwijkingen kunnen bij automatische kalibratie slechts worden verdisconteerd met schematisaties en optimalisaties per peilput. Alleen al gevoelsmatig is duidelijk dat (op de schaal van de pompproef) uitkomsten per peilput altijd minder betrouwbaar zullen zijn dan één overall uitkomst voor alle beschouwde peilputten. Een eveneens 'objectieve' automatische methode om alle zo verkregen uitkomsten te combineren is ons niet bekend, laat staan als die uitkomsten ook nog eens verschillende pompproeven in hetzelfde pakket betreffen.

Een visueel-grafische uitwerking mag dan 'tweede keus' zijn, toch kan er bij een pompproef meer mee dan Olsthoorn misschien denkt. Wij konden er niet alleen makkelijk systematische verschillen mee verdisconteren, maar ook rekening houden met de totale transmissiviteit van alle lagen bij elkaar en de gemeten stijghoogteverschillen tussen de onderscheiden lagen ('relatieve fit').

5 *De opzet van de pompproef zou veel eenvoudiger hebben gekund*

Bij veel onderzoek blijkt achteraf dat het eenvoudiger had gekund. Andersom, dat achteraf blijkt dat voor een betrouwbare uitwerking te weinig en/of verkeerd is gemeten, hebben wij echter ook herhaaldelijk gezien, en soms bij gerenommeerde partijen. Moeder Natuur heeft nog wel eens verrassingen in petto.

Laten wij volstaan met aan te geven dat er voorafgaande aan de pompproef weinig zeker was over geohydrologische opbouw, laterale verbreiding van kleilagen en verticale stroming binnen de onderscheiden pakketten. Voorberekeningen met diverse schematisaties gaven aan dat we maar beter goed voorbereid konden zijn. Dat we veel moesten meten en 'dubbele' gegevens zouden verkrijgen was derhalve vooraf bekend. Het aardige is nu dat die redundante informatie bij een handmatige (visueel-grafische) uitwerking niet in de weg zit (bij een automatische wel). Inrichting, verloop en duur van de pompproef werden mede bepaald door organisatorische en technische aspecten waarmee we het lezerspubliek niet willen vermoeien.

6 Commentaar op uitwerking door Olsthoorn

In de titel van onze figuur 7a staat inderdaad een foutje: PP-A moet PP-B zijn. Lagen 7 en 8 zijn onderscheiden op basis van lithologie en metingen in diepe peilputten op 275 m en verder uit de pompput. De parameters van deze lagen zijn relatief onzeker, maar voor de beheersmaatregel in het pakket tussen 8 en 80 m diepte maakt dat weinig uit. Terzijde: in een meerlagensysteem wordt de stijghoogteverlaging in een pakket bepaald door een lineaire combinatie van functies van spreidingslengtes van *alle* onderscheiden pakketten (formule 4 in ons artikel). De door ons gebruikte spiegelpuut diende om bij automatische optimalisatie-pogingen de systematische afwijking tijdens late pomptijden te neutraliseren. De parameters van die put zijn dus voornamelijk van cosmetisch belang.

Dat Olsthoorn maar enkele parameters goed kan afleiden komt simpelweg doordat hij een stationaire uitwerking gebruikt: dan geldt hetgeen wij al aangaven onder punt 3 ('aantal onafhankelijke meetpunten'). Olsthoorn baseert daarbij zijn uitwerking op een selectie van metingen uit ons artikel, terwijl wij veel meer metingen en andere informatie hebben gebruikt.

Er staan eveneens enkele onjuistheden in Olsthoorn's stuk: tijdens de pompproeven hebben wij in P3 in de verticaal wel degelijk verschillende verlagingen gemeten (bijvoorbeeld tijdens pompproef 1: tussen 35 en 75 m diepte 2 à 3 cm op een totale verlaging

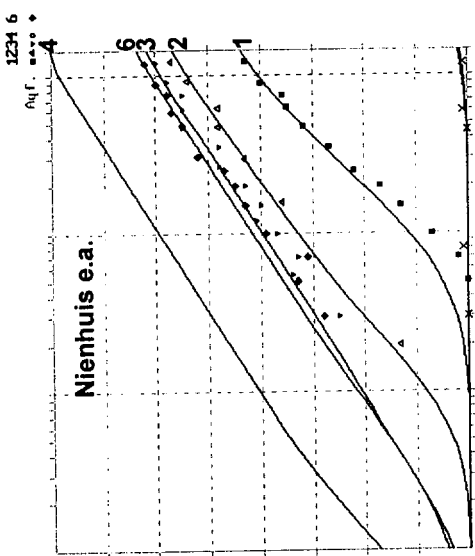
van 0,5 m). De genoemde afstand van 1,5 maal de pakketdikte klopt dan ook alleen maar voor isotrope pakketten (waarbij de horizontale en verticale permeabiliteit gelijk is) en dat zijn er maar weinig. Resultaten van de tweede pompproef (PP-A) staan in figuren 7a en 7b. Daarnaast komen de laagdiktes in zijn tabel 1 niet overeen met onze figuur 2, maar dat is gezien de arbitraire laagindeling geen probleem. Wel zijn de doorlatendheden van onze uitkomst, die hij vermeldt in zijn tabel 1, daardoor onjuist. Onze k_p -waarden voor de grove lagen 3 t/m 6 (66 à 70 m²/d) komen goed overeen met die van Olsthoorn voor alle lagen 1 t/m 6.

Nieuwsgierig geworden naar de uitkomst hebben wij Olsthoorn's oplossing samen met de metingen geplot met behulp van MLPU. Omdat dat programma werkt met verticale weerstanden tussen de watervoerende lagen zijn de k_z 's van Olsthoorn's tabel 1 (onderaan, op één na laatste kolom) omgerekend naar verticale weerstanden en verdeeld over de onder- en bovenliggende scheidende laag.

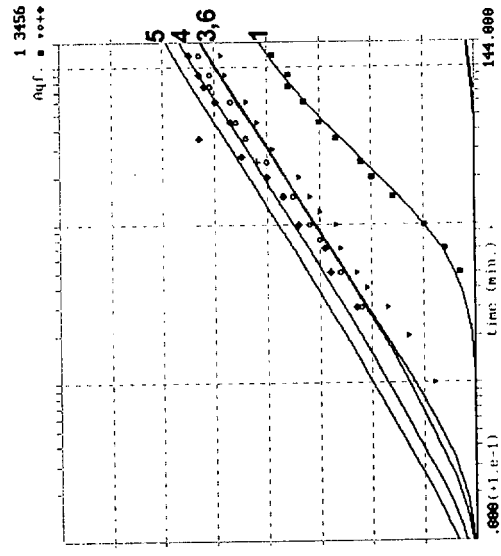
Een vergelijking van Olsthoorn's en onze resultaten in P1 en P2 voor de eerste uren van de pompproef (wanneer niet-stationaire effecten het meest meetellen) in PP-B zijn weergegeven in figuur I. Olsthoorn's fit van de fijnkorrelige lagen 1 en 2 blijkt matig; gezien de lithologie (fijne zanden) en de desondanks berekende hoge doorlatendheid lijkt ons dat niet verwonderlijk. Ook voor de grovere lagen 3 t/m 6 is de gemiddelde fit

Tabel 1: Omgerekende verticale doorlatendheden en weerstanden en overige parameters

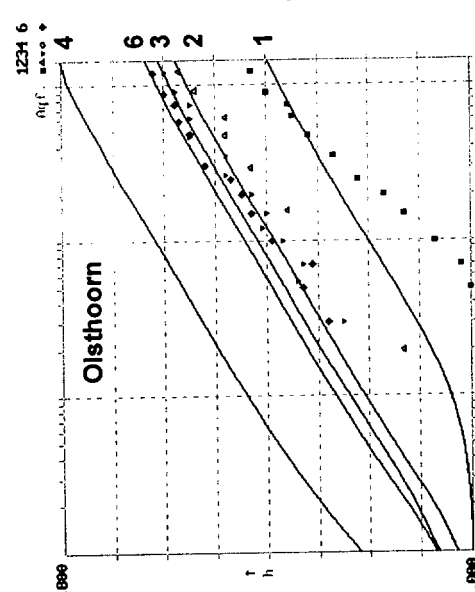
Modellaag:	1	2	3	4	5	6
dikte cf. Olsthoorn (m)	12	10	10	15	10	15
K_z cf. Olsthoorn (m/d)	1,2	40,5	40,5	40,5	40,5	8,4
weerstand / meter dikte	0,0833	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247	0,119
$C_{\text{bovenliggende laag}}$ (d)	n.v.t	5,1	0,25	0,3	0,3	1,6



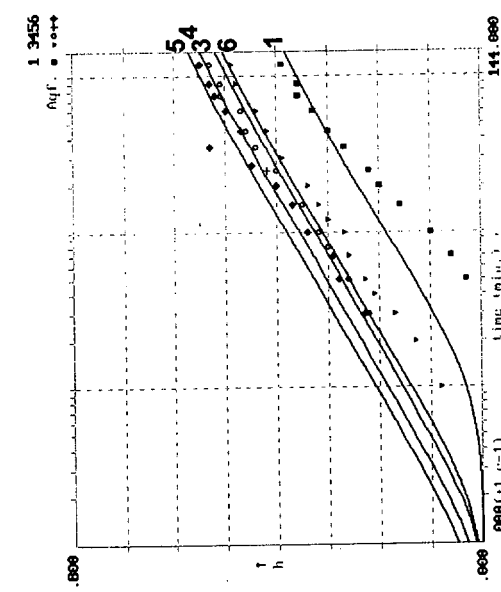
P1
(r = 10 m)



P2
(r = 40 m)



P1
(r = 10 m)



P2
(r = 40 m)

Figuur 1: Vergelijking van gemeten en berekende stijghoogteverlagen (m) voor de pompproef in PP-B gedurende de eerste 0,1 dag (144 minuten) pomptijd.

voor de eerste uren slechter dan die van ons. Dit zal maar voor een gering deel verband houden met de niet-representatieve filterstellingen. Een betere fit voor alle peilfilters en proeven, die ook overeenstemt met de lithologie, lukt alleen met een flink lagere transmissiviteit en hogere berging voor lagen 1 t/m 6 dan die waar Olsthoorn op uitkomt. Dit ondanks het feit dat zijn uitkomst op 0,1 dag pomptijd klopt (stationair).

Conclusies:

- Teveel nadruk op metingen en negeren van de lithologische informatie leidt tot onbetrouwbare uitkomsten;
- Het is zonde en zoals hier blijkt: riskant, om de niet-stationaire informatie te negeren. Die houdt meer onbekende parameters in maar levert wel veel meer onafhankelijke metingen op, waarmee een niet te verwaarlozen verfijning en validatie mogelijk wordt.

Samenvatting

- Ook wij menen dat automatische kalibratie op basis van bijvoorbeeld Levenberg-Marquardt de voorkeur heeft. Aan de andere kant moet je zo'n methode niet te veel verabsoluteren. De invoer is veel-eisend, de uitkomsten zijn primair wiskundig en niet zozeer (geo)hydrologisch verantwoord, en bovendien manipuleerbaar. Als het op automatische wijze niet goed wil lukken, kun je met gezond verstand en inzicht ook nog ver komen, zeker bij een goed modelleerbare ingreep als een pompproef.
- Bij een niet-stationaire pompproef kan het aantal onafhankelijke waarnemingen veel groter zijn dan het aantal onafhankelijke peilfilters; dit geldt des te sterker voor een meervoudige pompproef in verschillende putfilters. Veel geohydrologen willen pompproeven het liefst stationair uitwerken om van die lastige bergings-

factor af te komen; uit het bovenstaande blijkt dat je dan veel informatie negeert en soms zelfs het kind met het badwater weggooit!

- Vanzelfsprekend zijn wij het helemaal met Olsthoorn eens dat voorberekeningen bij een pompproef essentieel zijn. Aanvullend raden wij aan om bij die voorberekeningen ook eens andere randvoorwaarden en schematisaties in te vullen dan die welke van toepassing worden gedacht; dat kan heel inzichtelijk uitpakken.

Wij danken Theo Olsthoorn hartelijk voor zijn reactie en moeite, en hopen dat met deze discussie belangrijke onduidelijkheden zijn weggenomen.

Literatuur

Indelman, P., G. Dagan, A.H.D. Cheng en D. Ouazar (1996) Sensitivity analysis of flow in multiple leaky aquifer systems; in: *Journal of Hydraulic Engineering*; jrg 122, nr 1, pag 41-45.

Olsthoorn, T.N. (1999) Reactie op 'Analyse van pompproeven met onvolkomen putten in verticaal heterogene pakketten op basis van meerlagenstroming'; in: *Stromingen*, dit nummer.

*Philip Nienhuis
Tony Kok
Bert Sman*

