

Een pompproef in een gelaagd freatisch pakket

- Piet Hein Spaans en Jeroen Lakeman Spaans Watermanagement B.V., Alkmaar (spaans@watermanagement.nu)
- Jet Lebbink Gemeente Hilversum, Hilversum (j.lebbink@hilversum.nl)
- Theo van Velzen Grondboortechniek en Bronbemaling Theo van Velzen B.V., Alkmaar (theo@theovanvelzen.nl)

Inleiding

De gemeente Hilversum werkt in hoog tempo aan de verbetering van de bereikbaarheid en de doorstroming van het verkeer. Hiervoor is onder meer een aanpassing van het kruispunt Soestdijkerstraatweg-Oostereind noodzakelijk. Deze aanpassing bestaat uit de aanleg van een tunnelbak met bovenliggende rotonde. De doorrijhoogte in de tunnel wordt 4,50 meter, zodat het vrachtverkeer er ook gebruik van kan maken. Voorbereidend op de uitvoering voert de gemeente diverse onderzoeken uit, waaronder een pompproef ter plaatse van het kruispunt. Het doel van de pompproef is het bepalen van de geohydrologische eigenschappen van de ondergrond. Deze zijn nodig voor een nauwkeurige berekening van het bemalingsdebiet met een numeriek grondwatermodel. De grondwaterstand dient namelijk voldoende te worden verlaagd om in combinatie met andere technieken de tunnelbak in den droge aan te kunnen leggen.

Pompproeven worden in Nederland regelmatig uitgevoerd om de eigenschappen van de ondergrond te bepalen, niet alleen ten behoeve van bemalingen, maar bijvoorbeeld ook voor het dimensioneren van saneringen en van koude-warmte opslagsystemen. De pompproef in Hilversum onderscheidt zich van de meeste andere proeven door de volgende eigenschappen: (1) zijn omvang in ruimte en tijd; het watervoerende pakket is meer dan 100 m dik en de proef duurde 20 dagen, (2) verticale stroming speelt een belangrijke rol omdat het pakket freatisch is en omdat met een onvolkomen bron uit een gelaagd pakket is onttrokken.

Tijdens de pompproef is de stijghoogteverlaging op verschillende afstanden van de onttrekking en op verschillende dieptes met peilbuizen gemeten. Hierdoor zijn voldoende gegevens beschikbaar gekomen voor een eenduidige kwantitatieve analyse, gebruikmakende van het computerprogramma MLU for Windows (Hemker, 2010). Opvallend aan deze pompproef is verder dat het heel duidelijk S-vormige verlaginglijnen laat zien, die typerend zijn voor freatische pakketten (hoofdstuk 5 in Kruseman en De Ridder, 2000).

Bodemopbouw, geohydrologie en modelschematisatie

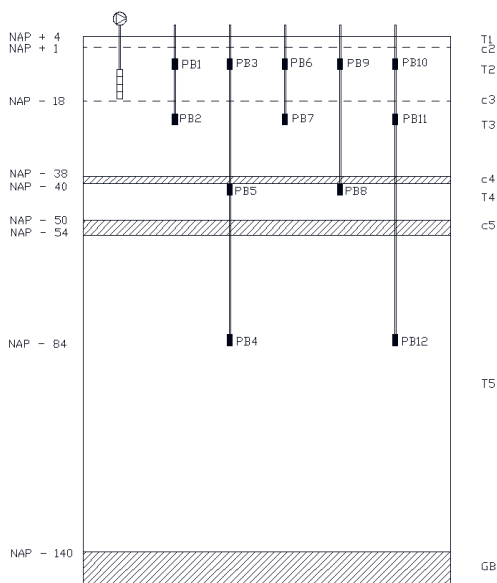
De planlocatie is gelegen aan de zuidoost zijde van Hilversum in een relatief groot infiltratiegebied. Op een afstand van circa 6 km worden aan de westzijde de Loosdrechtse Plassen aangetroffen. Verder bevindt zich op ruim 1 km aan de noordoostzijde het Laarder Wasmeer en op een kleine 1,5 km aan de zuidzijde het Hilversums Wasmeer. Voorts worden binnen 500 m een drietal kleine vijvers op de luchtfoto waargenomen.

Het neerslagstation Laren van het KNMI laat een gemiddelde neerslag van een kleine 900 mm per jaar zien. Betrouwbare gegevens van de lokale jaarlijkse verdamping zijn niet aangetroffen. Uit de tijdreeksen van vier peilbuizen (TNO, DINOLoket) vanaf 1970 tot heden blijkt de freatische grondwaterstand te variëren tussen NAP + 0 m en NAP + 2,4 m. Het maaiveld ligt op ongeveer NAP + 4 m.

Aan de hand van de Grondwaterkaart van Nederland (Cornelissen e.a., 2003) is inzicht verkregen in de geohydrologische bodemopbouw ter plaatse. In oostelijk Hilversum ontbreekt de slechtdoorlatende deklaag, waardoor een freatisch pakket wordt aangetroffen van enkele tientallen meters dik. Dit freatische pakket wordt aan de onderzijde begrensd door een marine kleilaag van de Eemformatie met een dikte van enkele meters.

De dikte van het onderliggende watervoerende pakket is in de orde van grootte van 10 m. De tweede scheidende laag, op ongeveer 50 m beneden maaiveld, bestaat uit bekkenklei van de Formatie van Drenthe. Het onderliggende watervoerende pakket heeft een dikte van bijna 100 m, en reikt tot aan de geohydrologische basis. De geohydrologische basis bestaat uit een accumulatie van twee formaties. Op circa 150 m beneden maaiveld wordt de kleiige afzetting van de Formatie van Tegelen en/of Formatie van Harderwijk aangetroffen, met daaronder de kleiige en fijnzandige (slibhoudende) afzetting van de Formatie van Maassluis.

Op de planlocatie zijn zes boringen uitgevoerd met een diepte variërend van NAP - 16 m tot NAP - 89 m. Het geohydrologisch bodemprofiel is weergegeven in figuur 1, waarin tevens de diepteligging van de peilfilters is aangegeven. De peilbuis "bron" betreft een peilbuis in de omstorting van de bron.



Figuur 1 Schematisatie bodemopbouw met peilbuizen.

De geohydrologische bodemopbouw is geschematiseerd tot drie watervoerende zandpakketten, gescheiden door weerstandbiedende kleilagen. Omdat de bemaling van de bouwput in het bovenste deel van het freatische pakket zal plaatsvinden, is dit deel voor de pompproef het belangrijkste en is het bronfilter daarom ook in de bovenste helft van dit pakket geplaatst. Tijdens de pompproef verlaagt de grondwaterspiegel, waardoor water aan de bovenzijde van het pakket vrijkomt, dat vervolgens met een zekere neerwaartse component in de richting van de bron stroomt. Om met de effecten van verticale stroming als gevolg van de onvolkomen bron en de verlagende grondwaterspiegel rekening te houden is het freatische pakket in het model in drie delen gesplitst: een bovenste, zeer dunne zone waarin het freatisch water vrijkomt, een middelste deel waar het bronfilter is geplaatst en de resterende diepere helft. Tussen deze drie delen bevinden zich in het model weerstandslagen. De geschematiseerde geohydrologische bodemopbouw bestaat daarmee uit de bovenste freatische zone (T1) en vier watervoerende lagen (T2 t/m T5), gescheiden door weerstandbiedende lagen (c2 t/m c5). Aan elke met een T gecodeerde laag wordt in het model een doorlaatvermogen (kD-waarde) en een bergingscoëfficiënt (S-waarde) toegekend en aan elke met een c gecodeerde laag een verticale weerstand (c-waarde).

		Grondsoort	Benaming	Laagaanduiding
+1	+1	-	Grondwaterspiegel	T1
+1	+1	-	Weerstandslaag	c2
+1	-18	Zand, matig tot grof	Bovenste deel freatisch pakket	T2
-18	-18	-	Weerstandslaag	c3
-18	-38	Zand	Onderste deel freatisch pakket	T3
-38	-40	Klei	Scheidende kleilagen	c4
-40	-50	Zand, matig tot grof	2 ^e W.V.P.	T4
-50	-54	Klei, weinig grind	Scheidende kleilaag	c5
-54	-140	Zand, fijn tot grof	3 ^e W.V.P.	T5
-140		Klei	Geohydrologische basis	

Tabel 1 Geohydrologische modelschematisatie.

Uitvoering pompproef en verwerking gegevens

Pompproeven zijn de meest geëigende methode om de hydraulische eigenschappen van watervoerende lagen (doorlaatvermogen, bergingscoëfficiënt) en slechtdoorlatende lagen (verticale weerstand) binnen een tientallen of honderden meters groot gebied te bepalen. Betrouwbare waarden voor deze eigenschappen zijn nodig om met modelberekeningen het te verwachten waterbezwaar van de bouwput en de capaciteit van de bemalingsinstallatie te berekenen. De pompproef en de bemaling brengen in feite een vergelijkbare grondwaterstroming op gang en dit maakt het aannemelijk dat met de pompproef ook alle relevante hydraulische eigenschappen voor de bemalingberekening kunnen worden bepaald.

De pompproef is uitgevoerd door Grondboorbedrijf & Bronbemaler Theo van Velzen B.V. Voor de pompproef is een diepwell geplaatst met een filter van NAP – 7,5 m tot NAP – 17,5 m. De boring is uitgevoerd door middel van de rotary zuigboormethode. De boorgatdiameter bedroeg hierbij 500 mm, bij een filterdiameter van 250 mm. Op verschillende afstanden zijn in totaal 12 peilbuizen geplaatst: 8 in het freatische pakket, 2 in het middelste en 2 in het diepste pakket. Tabel 2 toont een overzicht van de peilbuizen, terwijl de locaties ook schematisch in figuur 1 zijn aangegeven. Het peil in de bron en in de buizen is tijdens de pompproef gemeten met automatische drukopnemers. De grondwaterstanden en stijghoogten zijn daarbij automatisch gecorrigeerd voor de luchtdruk.

Tabel 2 Afstand peilbuizen tot bron en diepte van de peilfilters.

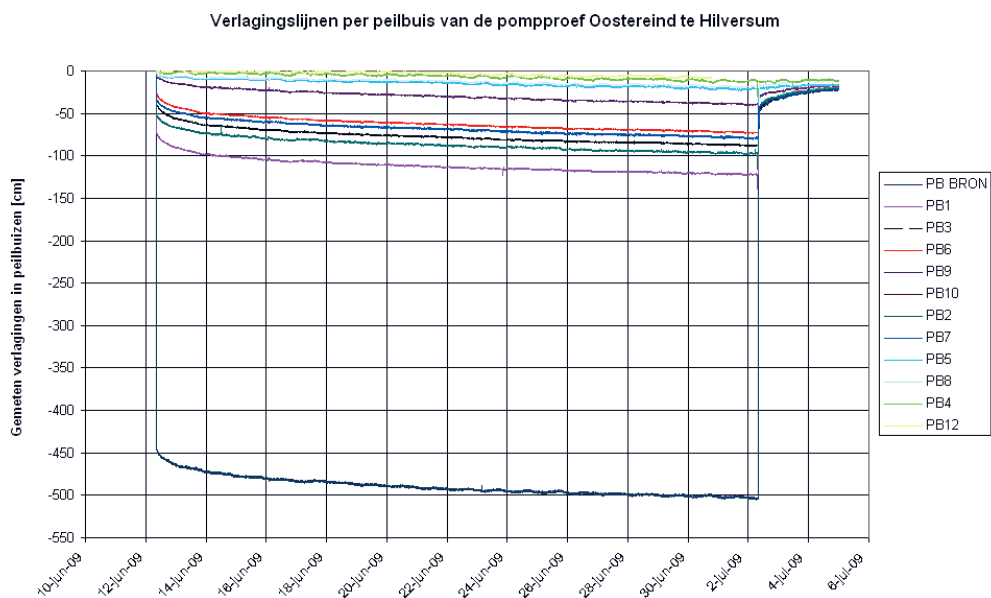
Peilbuis	Afstand tot bron [m]	Diepte filter t.ov. NAP (m)	Filter in modellaag
Peilbuis Bron	0,15	-17	T2
Peilbuis 1	2,0	-9	T2
Peilbuis 2	2,0	-24	T3
Peilbuis 3	10,05	-9	T2
Peilbuis 4	10,05	-84	T5
Peilbuis 5	10,05	-42	T4
Peilbuis 6	19,5	-9	T2
Peilbuis 7	19,5	-24	T3
Peilbuis 8	29,4	-42	T4
Peilbuis 9	29,4	-9	T2
Peilbuis 10	99,7	-9	T2
Peilbuis 11	99,7	-24	T3
Peilbuis 12	99,7	-84	T5

De pompproef is gestart op 12 juni 2009 om 8:16 uur en beëindigd op 2 juli 2009 om 7:40 uur. Het onttrekkingsdebiet van de onderwaterpomp is geregistreerd met een automatisch loggende watermeter. Het onttrekkingsdebiet is gedurende de gehele periode tussen 50,2 en 50,65 m³/uur gebleven. Bij de uitwerking van de pompproef is een gemiddeld debiet van 50,5 m³/uur aangehouden.

Ongeveer een maand voor aanvang van de pompproef is proefgedraaid voor een periode van één dag. Tijdens dit proefdraaien zijn fouten als gevolg van het installeren en meten met de drukopnemers geëvalueerd en gecorrigeerd. Ondanks deze voorzorgsmaatregel kon niet worden voorkomen dat ook de data-acquisitie tijdens de pompproef gepaard ging met enige ruis in de gemeten stijghoogten. Bij de analyse van de ruwe gegevens zijn diverse metingen als onbetrouwbaar of onjuist aangemerkt en uit het bestand verwijderd. Zo zijn bij enkele peilbuizen de eerste twee metingen genegeerd. De metingen in peilbuis 11 lieten zelfs zoveel fouten zien dat de hele meetreeks niet is meegenomen in de uitwerking van de pompproef. Ook bleek achteraf dat diverse drukopnemers niet op tijd liepen. Deze tijdfout kon echter naderhand alsnog per peilbuis worden vastgesteld, waarna de metingen zijn gecorrigeerd.

Uit de gemeten freatische grondwaterstanden en de stijghoogten in de diepere watervoerende pakketten zijn de verlagingen tijdens de onttrekking bepaald. In figuur 2 is het verloop tijdens de pompproef en kort daarna weergegeven voor de bron en de elf buizen.

Tijdens de pompproef is ook de neerslag gemonitord. In totaal is in de twintig dagen 28 mm regen geregistreerd. De helft hiervan is aan het einde van de pompproef als een forse bui van 14,6 mm gevallen. Deze neerslaggebeurtenis heeft echter slechts een zeer geringe invloed op de metingen. Bij de uitwerking van de pompproef is er daarom van uitgegaan dat het netto effect van de neerslag en verdamping kan worden verwaarloosd.



Pompproef-analyse met MLU

Bij de traditionele pompproefanalyse worden de gemeten verlagingen vergeleken met “type curves” of wordt gebruik gemaakt van een lineaire relatie voor een deel van de meetreeks. De beschikbare grafische analysemethoden gelden echter slechts voor pompproeven in één watervoerend pakket, of in een enkel geval voor twee pakketten (Kruseman en De Ridder, 2000). Tien jaar geleden is in Stromingen een artikel verschenen waarbij pompproeven in een afgesloten meerlagensysteem werden geanalyseerd met behulp van het DOS-programma MLPU (Nienhuis e.a., 1999). In 2008 kwam het computerprogramma “MLU voor Windows” beschikbaar (hierna MLU genoemd), dat op een verdere ontwikkeling van dezelfde analytische methode voor meerlagenstroming is gebaseerd (Hemker en Maas, 1987; Hemker, 1999; Hemker en Post, 2010; Hemker, 2010). In het artikel van Nienhuis e.a. (1999) wordt de theoretische achtergrond van de gebruikte analytische oplossingsmethode voor de berekening van stroming in meerlagensystemen kort beschreven.

Een berekening met MLU kan bestaan uit het tekenen van het verlagingverloop in peilbuizen, wanneer van een bepaalde gelaagde ondergrond en een bepaald onttrekkingsregime wordt uitgegaan. MLU is echter juist ook bedoeld voor de omgekeerde berekening waarbij bepaalde hydraulische eigenschappen van de lagen (de parameters) worden berekend op basis van gemeten stijghoogteverlagingen. Dit wordt inverse modellering genoemd.

Het met MLU gemaakte analytische grondwatermodel is in eerste instantie niets meer of minder dan de geschematiseerde bodemopbouw met a priori aangenomen grondconstanten voor alle lagen, plus de laag, debiet en duur van de onttrekking. Vervolgens wordt een geselecteerde groep grondconstanten (de parameters) geoptimaliseerd op basis van de gemeten stijghoogten. Het programma zoekt dan iteratief naar die combinatie van parameters die tot de kleinste kwadraten som van de restfouten leidt, waarbij de restfouten de verschillen zijn tussen de gemeten en de berekende verlagingen. De pomproefanalyse is in dit geval dus gelijk aan de automatische kalibratie van een analytisch grondwatermodel.

Hoewel alle hydraulische eigenschappen van de lagen (k_D -, S - en c -waarden) in het model homogeen worden verondersteld, kunnen de vele lagen tot een groot aantal parameters leiden, die vaak niet alle met behulp van de gemeten verlagingen kunnen worden bepaald. Bij het kalibreren is het daarom de kunst om juist die combinatie van te optimaliseren parameters te vinden, die leidt tot een model dat goed bij de metingen past. Het analyseren van een pompproef met MLU komt dus neer op het kiezen van een geschikt meerlagenmodel en het zoeken naar een optimale combinatie van parameters die op basis van de beschikbare metingen kan worden geoptimaliseerd. Voor grondconstanten die niet met de metingen kunnen worden bepaald, moeten de meest aannemelijke geschatte waarden worden gebruikt.

Uitwerking pompproef

Tijdens de pompproef zijn per peilbuis tienduizenden stijghoogteverlagingen gemeten, maar hiervan is slechts een klein deel in MLU ingevoerd (zie bijlage). Hierbij wordt de ruis uit de metingen gefilterd en bovendien verloopt het optimalisatieproces sneller met een geringer aantal metingen. Voor de berekening van de parameters zijn bovendien alle metingen in de bron en enkele eerste metingen van de overige peilbuizen buiten beschouwing gelaten. In de bijlage staan deze verlagingen tussen haakjes aangegeven. Nadat voor alle grondconstanten startwaarden zijn aangenomen, zijn in eerste instantie slechts twee parameters berekend: de k_D - en de S -waarde van de bovenste modellaag. Vervolgens is een steeds grotere groep parameters berekend, waarbij een steeds beter passend model werd verkregen. Uiteindelijk bleek het mogelijk om van acht verschillende parameters de waarden met vrij grote nauwkeurigheid te bepalen. Eigenlijk zijn negen parameters berekend, maar de bergingscoëfficiënten van de bovenste en onderste helft van het freatische pakket zijn aan elkaar gelijk gesteld en als één parameter in de berekening meegenomen.

De k_D -waarde van het derde watervoerende pakket (T_5) en de weerstand van de daarboven liggende kleilaag (c_5) konden niet met enige nauwkeurigheid worden berekend en hiervoor werden respectievelijk $1720 \text{ m}^2/\text{d}$ en 100 dagen aangehouden. Ook de bergingscoëfficiënten van het tweede en derde watervoerend pakket (S_4 en S_5) werden als bekend verondersteld: respectievelijk 0,0002 en 0,001.

Als resultaat van de optimalisatie zijn de in tabel 3 gegeven grondconstanten berekend. De in de laatste kolom vermelde waarden zijn de door MLU berekende standaardafwijkingen als percentage van de bijbehorende parameter waarde. De kleine percentages betekenen dus dat de parameters met vrij grote nauwkeurigheid kunnen worden vastgesteld.

Tabel 3 Berekende grondconstanten met MLU.

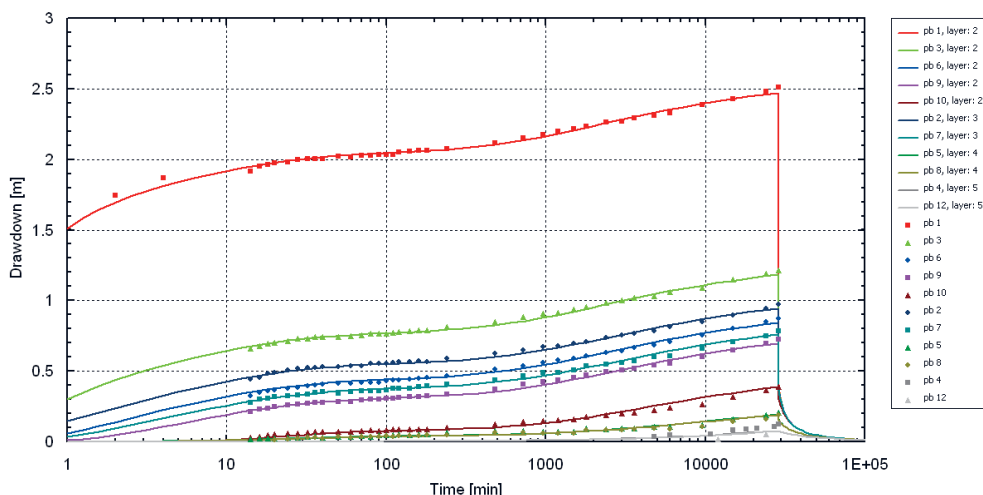
Laag	Code	Parameter	Berekende waarde	Standaard afwijking
grondwaterspiegel	S1	freatische bergingscoëfficiënt	0,060	4 %
weerstandslaag	c2	verticale weerstand	9,0 dag	3 %
bovenste deel freatisch pakket	T2	kD-waarde	206 m ² /dag	0 %
	S2	bergingscoëfficiënt	0,0014	4 %
weerstandslaag	c3	verticale weerstand	0,5 dag	1 %
onderste deel freatisch pakket	T3	kD-waarde	565 m ² /dag	1 %
	S3	bergingscoëfficiënt	0,0014	4 %
scheidende laag	c4	verticale weerstand	102 dag	9 %
2e w.v.pakket	T4	kD-waarde	321 m ² /dag	13 %

Als bijproduct van de berekening van de parameters geeft MLU ook een correlatiematrix, zie tabel 4. Daarin wordt aangegeven hoe de berekende waarden van alle parameters samenhangen met de overige berekende parameters. Waarden dichtbij +100% of -100% wijzen erop dat de betreffende parameters niet afzonderlijk kunnen worden berekend. Het percentage van -92% ligt hier het dichtst bij. Kennelijk wordt een nagenoeg even juiste oplossing gevonden als het doorlaatvermogen van het bovenste deel van het freatische pakket groter is en het doorlaatvermogen van het onderste deel kleiner, of andersom. Met de zeer kleine weerstand van 0,5 dag die tussen deze delen van hetzelfde pakket is gevonden, is een dergelijke zeer negatieve correlatie hydrologisch goed verklaarbaar.

Tabel 4 Correlatiematrix van de berekende grondconstanten, de waarden zijn in procenten.

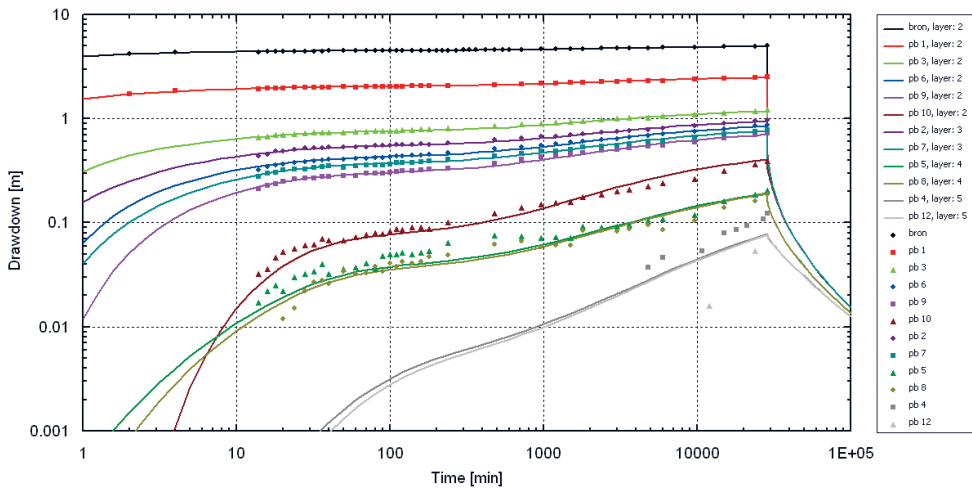
Laag	Parameter	S1	c2	T2	S2	c3	T3	c4	T4
grondwater spiegel	S1	100							
weerstandslaag	c2	-31	100						
bovenste deel freatisch pakket	T2	19	-63	100					
	S2	-15	72	-46	100				
weerstandslaag	c3	79	-33	20	-33	100			
onderste deel freatisch pakket	T3	-22	73	-92	54	-25	100		
scheidende laag	c4	18	-72	7	-51	32	-20	100	
2e w.v.pakket	T4	6	-27	11	10	15	-16	27	100

De meeste berekende grondconstanten hebben aannemelijke waarden gekregen, waarbij c3 wel erg klein is: de horizontale en de verticale doorlatendheid van het freatische pakket zijn ongeveer even groot. Ook opvallend is de kleine waarde voor de freatische bergingscoëfficiënt van 0,06, terwijl voor zand eerder een waarde van ongeveer 0,25 mag worden verwacht. Het is echter bekend dat pompproeven in freatische pakketten vaak veel te kleine freatische bergingscoëfficiënten opleveren (Kruseman en De Ridder, 2000, blz. 100 en 101).



Figuur 3 Berekende en gemeten stijghoogteverlagingen op een logaritmische tijdas.

In figuur 3 zijn de verlagingen tegen de logaritme van de tijd uitgezet, waarbij de gekleurde lijnen de met MLU berekende verlagingen laten zien en de driehoekjes, rondjes en andere symbolen de gemeten waarden. De metingen blijken opvallend goed bij het model te passen. Het verschil tussen de gemeten en berekende waarde is in de meeste gevallen minder dan 0,01 m. De kwadraten som is 0,0476 m². In figuur 4 is de bron toegevoegd en zijn de verlagingen op een logaritmische y-as uitgezet. Hoewel de metingen in de bron niet bij de bepaling van de parameters zijn gebruikt omdat eventuele extra weerstand op de putwand de resultaten zou kunnen verstoren, blijken de berekende verlagingen ook hier prima met de metingen overeen te stemmen.



Figuur 4 Gelijk aan figuur 3, maar nu op een logaritmische y-as en inclusief de stijghoogteverlagingen in de bron.

Opvallend in de figuren 4 en 5 zijn de zogenaamde “S-vormige verlagingcurves” die zo typerend zijn voor pompproeven in freatische pakketten en die worden verklaard door een vertraagde reactie van de grondwaterspiegel. Het pakket reageert in eerste instantie als spanningswater en door de verticale weerstand binnen het pakket gaat pas later de grondwaterspiegel zakken. In het model wordt dit effect verkregen door de weerstanden c2 en c3. Figuur 4 laat verder zien dat in de vier diepste peilbuizen (nummers 4 en 12 in het derde watervoerende pakket en nummers 5 en 8 in het tweede watervoerende pakket) er wel enige afwijking is tussen de metingen en het model. Daarbij moet echter worden opgemerkt dat de verlagingen in deze buizen ook veel kleiner zijn, zodat kleine fouten hier relatief veel effect hebben en dat de verschillen op de logaritmische schaal worden uitvergroot.

Validatie resultaten pompproef

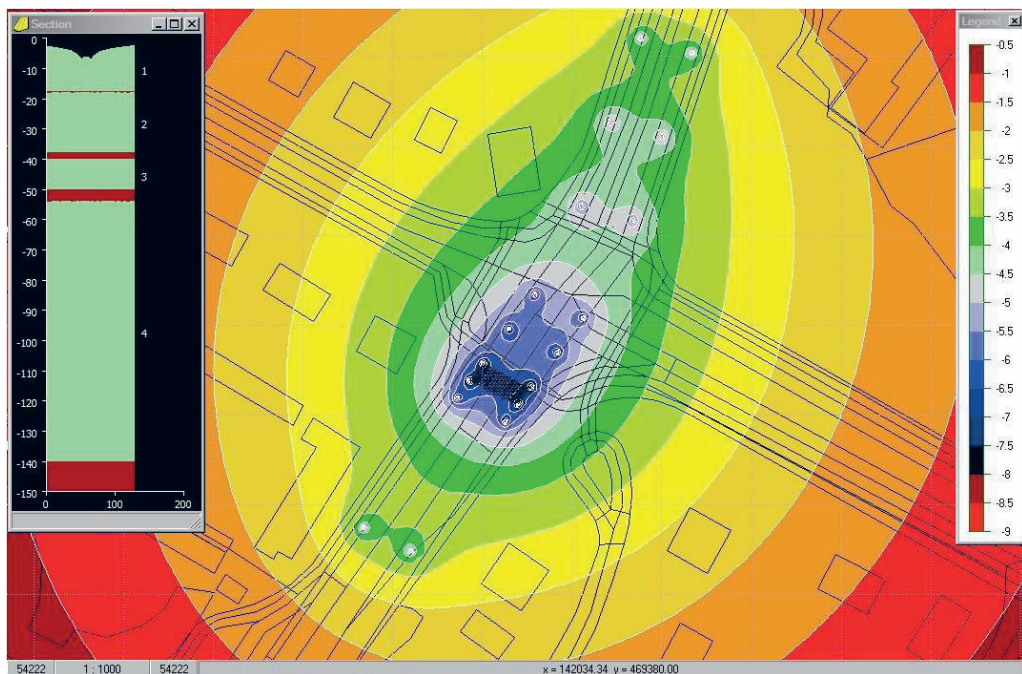
In 2007 heeft op circa 1,5 km afstand van de uitgevoerde pompproef een bemaling plaatsgevonden ten behoeve van de eerste fase (tracé 120 m) van de aanleg van een stamriool met een diameter van 2,8 m naar de RWZI te Hilversum. Met de empirische gegevens van deze bemaling, die niet eerder zijn gebruikt voor de ontwikkeling van het model of voor de kalibratie, zijn de resultaten van de pompproef gevalideerd.

De bemaling is uitgevoerd in een open sleuf. De initiële freatische grondwaterstand was ten tijde van bemaling hoog en bedroeg circa NAP + 1,6 m. De ontwateringsdiepte in de sleuf bedroeg NAP – 1,2 m. Het gemeten onttrekkingsdebiet bedroeg in het begin 320 m³/uur. Na 10 dagen was het onttrekkingsdebiet afgenomen tot 220 m³/uur.

Met MicroFEM is een numeriek grondwatermodel van deze bemaling gemaakt, waarbij de grondwaterstand ter plaatse van de bemaling met een vaste stijghoogte is gemodelleerd. De berekende onttrekkingsdebieten 2 dagen en 10 dagen na de aanvang van de bemaling komen hierbij goed overeen met de gemeten onttrekkingsdebieten. Dit numerieke grondwatermodel laat voldoende overeenstemming met de werkelijkheid zien om te spreken van een valide model (Spaans en Lakeman, 2010).

Toepassing resultaten pompproef

Aan de hand van de uit de pompproef verkregen waarden van de grondconstanten is met het eindige elementen programma MicroFEM een grondwatermodel opgesteld waarin dezelfde laagindeling als bij de pompproef is gebruikt. In dit model zijn verder de damwanden van de bouwkuip en de locatie van de te plaatsen deepwells opgenomen. Met het model zijn vervolgens de onttrekkingsdebieten vastgesteld en is het verlagingsspatroon in de omgeving berekend. Figuur 5 laat de grondwaterstand in de omgeving zien aan het einde van de bemalingsperiode van 181 dagen voor het scenario waarbij de hele bouwput met behulp van bemaling wordt drooggelegd. Een uitvoeriger beschrijving van de modelresultaten met meer uitvergroete figuren is vermeld in Spaans en Lakeman (2009).



Figuur 5 Berekende grondwaterstand in meter t.o.v. NAP in de omgeving van de bouwput aan het eind van de bemaling.

Conclusies

In de zomer van 2009 is in Hilversum een twintig dagen durende pomproef in een gelaagd freatisch systeem uitgevoerd. Op grond van de boorgegevens is een ondergrond met drie watervoerende pakketten aangenomen. De bron is in de bovenste helft van het freatische pakket geplaatst. De verlagingen van de freatische grondwaterstand en de stijghoogten van de watervoerende pakketten zijn op verschillende afstanden en op verschillende diepten met twaalf peilbuizen geregistreerd. Met het computerprogramma MLU voor Windows zijn de verlagingen geïnterpreteerd. Hierbij is een analytisch meerlagenmodel gemaakt, dat na kalibratie zeer goed bij de metingen aansluit. In totaal is een groep van acht grondconstanten bepaald. De resultaten van de pompproef zijn vervolgens gebruikt om een numeriek grondwatermodel op te stellen, waarmee het bemalingsdebiet is bepaald om in den droge te kunnen werken.

Referenties

- Cornelissen, C.M.L. en T.H.M. Doorn (2003)** Beschrijving van de gegenereerde digitale gegevens uit het REGIS project voor provincie Utrecht; TNO-NITG 02-161-B/GE 03-10.080.
- Hemker, C.J. (1999)** Transient well flow in layered aquifer systems: the uniform well-face drawdown solution; in: Journal of Hydrology, vol 225, pag 19-44.
- Hemker, C.J. en C. Maas (1987)** Unsteady flow to wells in layered and fissured aquifer systems; in: Journal of Hydrology, vol 90, pag 231-249.
- Hemker, Kick en Vincent Post (2010)** MLU for Windows: Well flow modeling in multilayer aquifer systems.
<http://www.microfem.com/download/mlu-user.pdf>
- Hemker, Kick (2010)** MLU for Windows: een integrale aanpak van putstroming voor de analyse van pompproeven; in: Stromingen, vol 16, pag 43-58.
<http://www.nhv.nu/artikelen-stromingen/2010>
- Kruseman, G.P. en N.A. de Ridder (2000)** Analysis and evaluation of pumping test data; in: ILRI publication, vol 47.
<http://www2.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub47/Pub47.pdf>
- Nienhuis, Philip, Tony Kok en Bert Sman (1999)** Analyse van pompproeven met onvolkomen putfilters in verticaal heterogene pakketten op basis van meerlagenstroming; in: Stromingen, vol 5, pag 39-54.
<http://www.nhv.nu/artikelen-stromingen/1999>
- Spaans, P.H. en J.W.A. Lakeman (2009)** Bemalingsadvies ten behoeve van de aanleg van een half open tunnel op de kruising Soestdijkerstraatweg en Oostereind te Hilversum.
<http://www.hilversumbeterbereikbaar.nl/files/12a%20Bemalingsadvies%20aug%202009.pdf>
- Spaans, P.H. en J.W.A. Lakeman (2010)** Bemalingsadvies ten behoeve van de aanleg van een stamriool nabij de rioolwaterzuivering (RWZI) te Hilversum, niet gepubliceerd.

Bijlage Geselecteerde verlagingen zoals gebruikt bij de pompproefanalyse.

Tijd	Bron	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5	PB6	PB7	PB8	PB9	PB10	PB12
[min]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
2	(4.23)	1.74	(0.16)	(0.47)		(0.03)	(0.16)	(0.16)	(0.01)	(0.12)	(0.10)	
4	(4.36)	1.87	(0.38)	(0.61)		(0.04)	(0.27)	(0.23)	(0.01)	(0.17)	(0.01)	
14	(4.39)	1.92	0.44	0.66		0.02	0.32	0.28	(0.00)	0.21	0.03	
16	(4.41)	1.95	0.46	0.68		0.02	0.35	0.30	(0.01)	0.23	0.04	
18	(4.41)	1.96	0.49	0.70		0.03	0.36	0.31	(0.01)	0.24	0.05	
20	(4.43)	1.97	0.49	0.70		0.02	0.37	0.32	0.01	0.25	0.05	
24	(4.45)	1.98	0.51	0.72		0.03	0.38	0.33	0.02	0.26	0.06	
28	(4.47)	2.00	0.52	0.73		0.03	0.39	0.33	0.02	0.27	0.06	
32	(4.47)	2.00	0.52	0.73		0.03	0.39	0.34	0.03	0.27	0.06	
36	(4.47)	2.00	0.53	0.74		0.04	0.40	0.35	0.03	0.28	0.07	
40	(4.47)	2.01	0.53	0.74		0.03	0.40	0.35	0.03	0.28	0.07	
50	(4.47)	2.02	0.53	0.74		0.04	0.41	0.34	0.03	0.28	0.07	
60	(4.49)	2.02	0.53	0.75		0.04	0.41	0.35	0.03	0.28	0.07	
70	(4.49)	2.03	0.54	0.76		0.04	0.42	0.36	0.03	0.30	0.08	
80	(4.49)	2.03	0.55	0.76		0.04	0.42	0.36	0.04	0.30	0.08	
90	(4.51)	2.03	0.55	0.77		0.05	0.42	0.36	0.03	0.30	0.08	
100	(4.50)	2.04	0.56	0.77		0.05	0.43	0.36	0.04	0.31	0.08	
110	(4.50)	2.04	0.56	0.77		0.05	0.44	0.38	0.04	0.31	0.09	
120	(4.51)	2.05	0.57	0.78		0.05	0.44	0.38	0.04	0.31	0.09	
140	(4.53)	2.06	0.56	0.79		0.05	0.44	0.38	0.04	0.32	0.09	
160	(4.53)	2.06	0.57	0.79		0.05	0.45	0.39	0.04	0.32	0.09	
180	(4.53)	2.07	0.57	0.79		0.05	0.45	0.39	0.05	0.33	0.09	
240	(4.55)	2.08	0.59	0.81		0.06	0.47	0.41	0.05	0.34	0.10	
480	(4.59)	2.12	0.63	0.85		0.08	0.51	0.44	0.06	0.37	0.12	
720	(4.61)	2.15	0.65	0.88		0.07	0.54	0.46	0.07	0.41	0.14	
960	(4.65)	2.18	0.67	0.91		0.07	0.56	0.49	0.06	0.43	0.15	
1200	(4.67)	2.20	0.68	0.92		0.07	0.58	0.49	0.06	0.44	0.16	
1500	(4.69)	2.22	0.70	0.94		0.07	0.59	0.51	0.06	0.45	0.16	
1800	(4.69)	2.23	0.71	0.96		0.09	0.61	0.54	0.08	0.47	0.18	
2400	(4.73)	2.26	0.74	0.99		0.09	0.63	0.55	0.08	0.50	0.19	
3000	(4.73)	2.27	0.75	1.00		0.09	0.64	0.56	0.08	0.50	0.20	
3600	(4.76)	2.29	0.77	1.02		0.10	0.67	0.57	0.09	0.52	0.21	
4800	(4.79)	2.31	0.78	1.03	0.04	0.10	0.69	0.60	0.10	0.54	0.22	
6000	(4.82)	2.33	0.81	1.06	0.05	0.11	0.71	0.61	0.09	0.55	0.24	
9600	(4.88)	2.39	0.85	1.09	0.05	0.12	0.75	0.66	0.11	0.60	0.27	(0.01)
15000	(4.92)	2.43	0.89	1.15	0.08	0.16	0.80	0.71	0.14	0.65	0.32	0.02
24000	(4.98)	2.48	0.94	1.19	0.10	0.19	0.85	0.75	0.16	0.70	0.37	0.05
28740	(5.04)	2.51	0.97	1.22	(0.13)	0.21	0.87	0.78	0.19	0.73	0.39	