

MLU for Windows: een integrale aanpak van putstroming voor de analyse van pompproeven

■ Kick Hemker Zelfstandig hydroloog te Amsterdam (hemker@microfem.nl)
Elandsgracht 83, 1016 TR Amsterdam T: 020 6228711

Door het gebruik van de computer worden pompproeven steeds minder vaak volgens de traditionele grafische methoden geanalyseerd. In plaats daarvan worden geautomatiseerde optimalisatiemethoden gebruikt, maar deze blijken nog steeds op dezelfde analytische formules voor eenvoudige modellen te zijn gebaseerd. Waar dit te eenvoudig is, grijpt men naar numerieke modellen en (automatische) kalibratie. Speciaal voor putstroming is er echter een gulden middenweg die de voordelen van een analytische oplossing combineert met de mogelijkheden van een numeriek model.

Een 30 jaar geleden uitgevoerde pompproef in Lexmond vormde het begin van een onderzoek naar putstroming in gelaagde systemen. Latere ontwikkelingen zijn gebaseerd op het streven naar één algemene analytische oplossing voor de analyse van alle soorten pompproeven. Recentelijk heeft dit geresulteerd in een nieuw computerprogramma: MLU for Windows.

Inleiding

Alle grondwaterhydrologen hebben verstand van putstroming. Alle leerboeken over de stroming van grondwater besteden in minstens één hoofdstuk aandacht aan dit onderwerp. Daarna wordt uitgelegd hoe een pompproef werkt. Hoe door middel van een putonttrekking en gemeten stijghoogteverlagingen in nabijgelegen peilbuizen de belangrijkste hydraulische eigenschappen van het watervoerende pakket in situ kunnen worden bepaald. Hoewel in de wetenschappelijke bladen nog zeer regelmatig publicaties verschijnen over putstroming en pompproeven, is de theoretische basis goed verankerd en zijn alle gebruikelijke technieken om pompproeven in de praktijk te analyseren uitvoerig beschreven.

In Nederland houdt men zich al honderd jaar met putstroming en pompproeven bezig (De Vries, 1982). De ondergrond, die voor een belangrijk deel uit door kleilagen begrensde zandpakketten bestaat, leent zich dan ook goed voor toepassing van de eenvoudige analytische modellen die aan de putstromingstheorie ten grondslag liggen. Het zal ook geen toeval zijn dat verreweg het beste en wereldwijd meest gebruikte pompproevenboek veertig jaar geleden in Nederland werd uitgegeven (Kruseman en De Ridder, 1970). Twintig jaar later werd een volledig herziene en sterk uitgebreide editie uitgebracht, waaraan weinig meer valt toe te voegen. In vijftien jaargangen *Stromingen* is het aantal artikelen over pompproeven in ieder geval op één hand te tellen.

Kruseman en De Ridder hebben zich beperkt tot grafische analyse methoden en laten de mogelijkheden van de computer bewust buiten beschouwing. Voor het analyseren van pompproeven wordt de computer echter steeds vaker gebruikt. Men zou verwachten dat dit nieuwe mogelijkheden biedt die tot een fundamentele verbetering leiden, maar tot dusverre blijkt dit slechts beperkt het geval te zijn. Toch zijn er wel degelijk nieuwe ontwikkelingen die de beperkingen van de gebruikelijke aanpak kunnen opheffen. Om van deze nieuwe ontwikkelingen gebruik te kunnen maken werd een nieuw computerprogramma ontwikkeld: MLU for Windows.

In dit artikel worden eerst de belangrijkste beperkingen van de 'traditionele' aanpak om pompproeven te analyseren beschreven. Vervolgens komen enkele kenmerken van bestaande computerprogramma's aan de orde. Daarna wordt ingegaan op de kern, namelijk hoe de huidige pompproefanalysepraktijk kan worden vervangen door een alternatieve methode die gebaseerd is op één enkele algemene analytische oplossing voor putstroming. Tenslotte wordt de pompproef 'Vennebulten' uit het boek van Kruseman en De Ridder (2000) nader beschouwd om een indruk te geven van de nieuwe mogelijkheden.

Beperkingen van de grafische methoden om pompproeven te analyseren

Met het begrip 'pompproef' wordt meestal een proef bedoeld waarbij met een constant debiet grondwater wordt onttrokken en waarbij de stijghoogteverlagingen in peilbuizen buiten de put worden gemeten. Hier wordt het begrip echter in zijn ruimere betekenis gebruikt (Engels: 'aquifer test') en betreft het ook putproeven (waar alleen in de put wordt gemeten) stopproeven, step-drawdown tests, slugtests en alle andere veldproeven waarbij door middel van het meten van de effecten van putstroming grondconstanten kunnen worden bepaald.

Oorspronkelijk werden pompproeven altijd grafisch geanalyseerd. In vrijwel alle gevallen komt dat in grote lijnen neer op de volgende procedure. De gemeten stijghoogteverlagingen worden tegen de tijd uitgezet. Het verlagingverloop van de tijdreeks geeft aanwijzingen over de opgetreden stromingsprocessen. Net als bij het maken van een numeriek grondwatermodel dient vooraf een bepaald (conceptueel) model te worden gekozen. Bij dit model hoort een bepaalde analytische oplossing. Het eenvoudigste model is een volkomen put met constant debiet in een oneindig uitgestrekt homogeen pakket volkomen spanningswater. Door vergelijking van het gemeten verlagingverloop met berekende verlagingen volgens het gekozen model, kunnen de parameters (waarden van de grondconstanten) worden bepaald. In het eenvoudigste geval is dat het doorlaatvermogen (KD) en de bergingscoëfficiënt (S) van het watervoerende pakket. Deze manier van werken heeft de volgende bezwaren:

1. Het gekozen model is noodzakelijkerwijs eenvoudig

Van de werkelijke grondwaterstroming wordt een model gemaakt. Het model moet zo eenvoudig zijn dat er niet alleen een analytische oplossing voor bestaat, maar er ook een grafische analysemethode voor beschikbaar is. De keuze van het model betreft niet alleen het type watervoerend pakket (volkomen of semi-spanningswater, freatisch), maar ook eigenschappen van de pompput (volkomen of onvolkomen filter, met of zonder putberging en/of skinfactor) en de wijze van onttrekking (constant debiet, stopproef, variabel debiet, slug). Het aantal beschikbare grafische methoden is beperkt. De mogelijkheid bestaat dat een te eenvoudig model moet worden gekozen, met als gevolg dat de berekende grondconstanten veel van de werkelijkheid afwijken.

2. Niet alle waarnemingen kunnen worden gebruikt

Afhankelijk van het gekozen model en de analysemethode worden de metingen op enkel- of dubbel-logaritmisch papier geplot. Een bepaald deel van de metingen moet een lineair verloop vertonen of kan worden gepast op één van de standaardkrommen ('type curves'). De periode met metingen die hiervoor mag worden gebruikt moet aan bepaalde criteria voldoen. Met deze metingen kunnen dan twee, drie, of in enkele gevallen vier parameters worden bepaald. De beperking hangt samen met het eerstgenoemde punt: tijdens de betreffende periode moet de stroming aan het model voldoen. Wanneer bijvoorbeeld het effect van putberging geen onderdeel van het model uitmaakt, dienen de metingen die meer dan verwaarloosbaar door de putberging worden beïnvloed buiten de analyse te blijven. Slechts een deel van de waarnemingen kan worden gebruikt. Bij een voldoende lange meetreeks is het in bepaalde gevallen mogelijk dat er verschillende perioden zijn af te bakenen waarbij verschillende modellen horen, zodat ze afzonderlijk kunnen worden geanalyseerd. Een nadeel blijft dat de metingen in elke overgangsfase van het ene naar het andere model niet voor de analyse kunnen worden gebruikt.

3. Weinig inzicht in de nauwkeurigheid van het resultaat

De grafische procedures leveren in principe maar één waarde voor elke te bepalen grondconstante op. Soms zijn er verschillende grafische analysemethoden mogelijk en kan een vergelijking van de verschillende resultaten een globale indruk van de nauwkeurigheid geven. De grafische methoden zijn enigszins subjectief zodat men ook een indruk van de nauwkeurigheid kan krijgen door de procedure diverse malen, eventueel door verschillende personen, te herhalen. Deze informatie kan worden gebruikt om de berekende resultaten op een zinnige manier af te ronden. De resultaten worden altijd als één waarde per grondconstante gepresenteerd, of als een tabel indien verschillende analysemethoden zijn gebruikt.

De grafische methoden stammen uit de tijd dat we geen computers gebruikten. Inmiddels zijn we ruim twintig jaar verder en zouden we mogen verwachten dat er voor bovengenoemde nadelen oplossingen zijn gevonden.

Beperkingen van bestaande computerprogramma's om pompproeven te analyseren

Wie via Internet zoekt naar 'aquifer test' of 'pumping test software' vindt al gauw een tiental namen van computerprogramma's die speciaal bedoeld zijn om pompproeven te analyseren. Het blijken voornamelijk programma's te zijn die op analytische oplossingen zijn gebaseerd. Bij nadere inspectie komt bij elk van deze programma's dezelfde indeling naar voren als bij de grafische methoden. De gebruiker moet uit één van de geïmplementeerde analytische oplossingen kiezen (Theis, Hantush, Neuman, Papadopoulos, Warren-Root, Bouwer-Rice, etc.). Hoewel door gebruik van de computer veel handwerk wordt geautomatiseerd en de keuze uit beschikbare modellen bij sommige programma's groot is, blijven de eerder genoemde nadelen 1. en 2. bestaan.

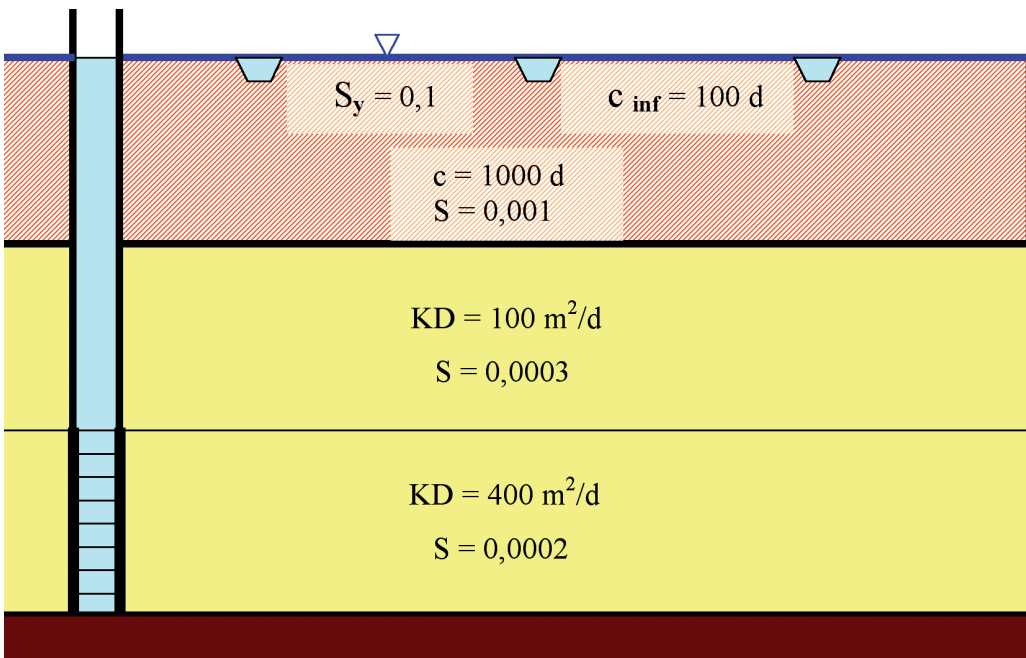
Soms worden de grondconstanten net als bij de grafische methode bepaald door de metingen handmatig op de 'type curves' te passen. Er kan meestal ook van een automatische optimalisatietechniek gebruik worden gemaakt. Dit is een statistische techniek (niet-lineaire regressie) die de optimale waarden van de parameters zoekt (invers modelleren). De oplossing wordt optimaal genoemd wanneer daarbij de kleinste kwadraten som wordt gevonden van de verschillen tussen de gemeten en de met het model (de formule) berekende stijghoogteverlagingen. Een voordeel van deze methode is dat er naast elke optimale waarde van een grondconstante ook statistische informatie beschikbaar komt. Zo kan bij elke parameter een standaardafwijking worden berekend, die een maat is voor de nauwkeurigheid waarmee de optimale waarde kan worden bepaald.

Behalve op basis van analytische formules bestaan er ook programma's die met de eindigedifferentie- of eindigeelementenmethode werken. Meestal zijn dit modellen voor radiaal-symmetrische stroming. Een belangrijk voordeel is dat het model niet tot een enkel homogeen watervoerend pakket beperkt hoeft te blijven, maar dat een complexere laagopbouw mogelijk is, waarbij elke laag een radiale en verticale doorlatendheid en een bergingscoëfficiënt kan krijgen. Ook bij gebruik van numerieke modellen is een combinatie met een automatische optimalisatietechniek gebruikelijk. In dat geval vervallen alle eerder genoemde nadelen van de grafische methode. Het model hoeft zelfs niet radiaal symmetrisch te zijn. In principe kan elk numeriek grondwatermodel worden gebruikt, waarbij grondconstanten door kalibratie kunnen worden bepaald. Numerieke modellen hebben echter ook belangrijke nadelen ten opzichte van analytische modellen. Afhankelijk van het beschouwde probleem moet een

geschikt eindige-differentie- of eindige-elementennetwerk worden opgesteld en ook een geschikt tijdstappenschema worden gekozen. Dit brengt persoonlijke keuzes en numerieke onnauwkeurigheden met zich mee, maar er zijn meer nadelen, zoals we later zullen zien.

Een aaneenschakeling van processen

Sinds de publicatie van de formule van Theis in 1935 kan het niet-stationaire verloop van de stijghoogteverlaging rond een putonttrekking worden geanalyseerd. Dat is handig omdat het vaak vele dagen duurt voordat de stroming (bijna) stationair is. De duur van een pompproef varieert in het algemeen van minder dan een uur (slugproef, putproef) tot tientallen dagen. Tijdens een pompproef kan de wijze waarop het grondwater toestroomt geleidelijk veranderen. Dat wordt veroorzaakt door de uitbreiding van het gebied waarin de putstroming plaatsvindt. Behalve een uitbreiding in laterale zin is er ook een verticale uitbreiding. Naarmate het invloedsgebied in verticale zin groter wordt, worden er nieuwe reservoirs aangetapt die elk een deel van het onttrokken water leveren.

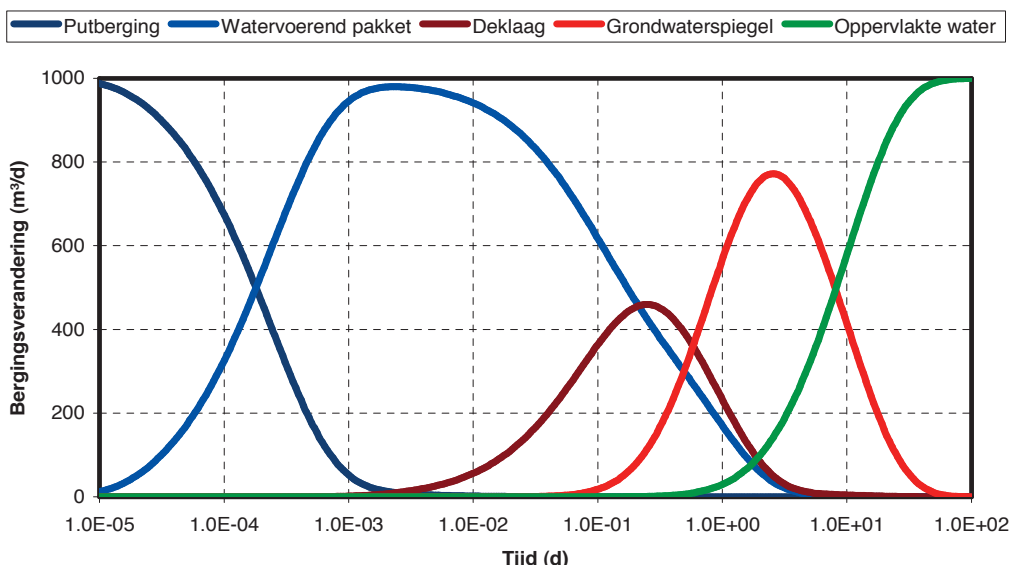


FIGUUR 1: ONVOLKOMEN PUT IN EEN PAKKET SEMI-SPANNINGSWATER.

Stel dat een pompproef wordt uitgevoerd in een poldergebied. Om het eenvoudig te houden gaan we uit van één watervoerend pakket met ondoorlatende basis. Op het watervoerende pakket ligt een deklaag met een ondiepe grondwaterspiegel (**figuur 1**). We beschouwen alleen de stromingsprocessen die het gevolg zijn van de putonttrekking. Het onttrokken water is dan uit de volgende bergingsgebieden (reservoirs) afkomstig, die achtereenvolgens worden aangesproken:

- Putberging: Het water dat uit de pompput zelf moet worden weggepompt om het waterpeil in de put te verlagen.
- Elastische berging in het watervoerende pakket: Door de samendrukbaarheid van het korrelskelet en, in mindere mate, door de elasticiteit van water komt water vrij wanneer de stijghoogte afneemt.
- Elastische berging in de deklaag: Net als bij het watervoerende pakket komt ook in de deklaag water vrij wanneer de stijghoogte daar afneemt.
- Ondiep freatisch water in de deklaag: Water komt vrij wanneer de grondwaterspiegel daalt.
- Oppervlaktewaterstelsel: Een verlaging van de grondwaterspiegel leidt tot infiltratie van oppervlaktewater vanuit de sloten.

Tijdens de putonttrekking treedt er een geleidelijke verschuiving op van de processen die het water moeten leveren: sommige stoppen voordat de stroming stationair is, andere beginnen pas enige tijd na het starten van de onttrekking. Verschillende processen treden tegelijkertijd op. Om een kwantitatief beeld te krijgen van hoe een dergelijke opeenvolging van processen eruit kan zien, is een eenvoudig eindige-elementenmodel gemaakt met het programma MicroFEM. Het watervoerende pakket is 20 m dik en bestaat uit een goeddoorlatende onderste helft ($KD = 400 \text{ m}^2/\text{dag}$, $S = 0,0002$) en een minder goeddoorlatende bovenste helft ($KD = 100 \text{ m}^2/\text{dag}$, $S = 0,0003$). De put met een straal (r_c) van 0,2 m onttrekt met een constant debiet van 1000 m^3/dag alleen aan het goeddoorlatende deel van het watervoerende pakket. Het verzadigde deel van de deklaag is 10 m dik (verticale weerstand $c = 1000$ dagen, bergingscoëfficiënt $S' = 0,001$). De opbrengstcoëfficiënt (S_v , specific yield, freatische bergingscoëfficiënt) is 0,1. De infiltratieweerstand is 100 dagen.



FIGUUR 2: BIJDRAGE VAN DE VERSCHILLENDE RESERVOIRS AAN EEN PUTONTTREKKING VAN 1000 m^3/d IN EEN POLDERGEBIED. DE LOGARITMISCHE TIJDSCHAAL LOOPT VAN CIRCA 1 SECONDE (10^{-5} d) TOT 100 DAGEN.

Uit figuur 2 kan worden afgelezen dat de putberging ongeveer 1 minuut van belang is. De elastische berging van het watervoerende pakket is maar enkele uren dominant, daarna levert de berging uit de deklaag evenveel op. Van circa 0,6 tot 8 dagen wordt het meeste water geleverd door verlaging van de grondwaterspiegel. In dezelfde periode neemt de infiltratie toe, maar het duurt wel 50 dagen voordat de grondwaterspiegel overal zijn lagere stand heeft bereikt en al

het water van oppervlaktewater afkomstig is. Pas dan is de putstroming stationair. Voor de bovengenoemde situatie is geen analytische oplossing bekend waarbij met alle verschillende reservoirs rekening wordt gehouden. Grafische analysetechnieken houden maar met twee (in een enkel geval drie) reservoirs rekening, bijvoorbeeld: alleen elasticiteit van het pakket en van de deklaag (Hantush's curve fitting method), of alleen elasticiteit van het pakket en voeding vanaf het oppervlak (Walton's method). Ze mogen alleen worden gebruikt voor perioden waarin alle buiten beschouwing gelaten processen geen noemenswaardige rol spelen. Daarvoor zijn vaak tijdcriteria gegeven. Het effect van putberging is bijvoorbeeld verwaarloosbaar indien $t > 25 r_c^2/KD$, in dit geval: $t > 0,002$ dag (3 minuten). Hantush's curve fitting method (1960) mag alleen worden gebruikt zolang de stijghoogteverlaging zich nog niet door de gehele dikte van de slechtdoorlatende laag heeft voortgeplant: $t < 0,1$ cs'. In bovenstaand voorbeeld betekent dit $t < 0,1$ dag. Beide criteria kloppen uitstekend met figuur 1. Hantush's curve fitting method mag in dit geval alleen worden gebruikt voor metingen tussen 3 en 144 minuten.

Wanneer niet van een grafische analysetechniek, maar van inverse modellering gebruik gemaakt wordt, dan blijven de beperkingen van het gekozen analytische model en de daarbij behorende tijdcriteria van belang. Omdat een rechte-lijnbenadering of type curve niet meer nodig is, is men bij een dergelijke aanpak het meest gebaat bij een analytische oplosmethode waarin alle mogelijk van belang zijnde stromingsprocessen kunnen worden betrokken. In dat geval vervallen de tijdcriteria en kunnen alle metingen worden gebruikt.

Stapsgewijze ontwikkeling van een breed toepasbare analytische oplossing

In 1979 en 1980 werden pompproeven uitgevoerd bij Langerak en bij Lexmond, Zuid-Holland. Uit diepe proefboringen was bekend dat hier minstens vier watervoerende pakketten boven elkaar voorkomen, gescheiden door slechtdoorlatende kleilagen. De onttrekkingen vonden plaats in het tweede pakket. In verschillende peilbuizen in dit pakket, maar ook in het bovenste en in het 3^e en 4^e pakket werden stijghoogteverlagingen gemeten. Deze pompproeven gaven de aanzet voor een zoektocht naar analytische oplossingen voor putstroming in gelaagde systemen. Dit leidde tot een serie artikelen die werd afgesloten met een publicatie van Hemker en Maas (1987). De daarin beschreven analytische oplossing geldt voor niet-stationaire putstroming in een multi-aquifersysteem, d.w.z. een ondergrond bestaande uit een afwisseling van een (willekeurig) aantal watervoerende pakketten en slechtdoorlatende lagen. De onttrekking met een constant debiet vindt plaats in één van de watervoerende pakketten. Bij deze oplossing wordt rekening gehouden met de samendrukbaarheid van (en dus ook de niet-stationaire stroming in) de slechtdoorlatende lagen. Deze meerlagen-oplossing werd o.a. toegepast bij een pompproef in Wijster (Nienhuis e.a., 1999).

In een volgende fase werd de meerlagen-oplossing uitgebreid voor putonttrekkingen uit meerdere pakketten tegelijk (Hemker, 1999). Deze oplossing kan daarmee ook worden toegepast bij volkomen en onvolkomen putfilters in gelaagde watervoerende pakketten, d.w.z. heterogene watervoerende pakketten die uit een verticale opeenvolging van een willekeurig aantal homogene lagen bestaan. Bovendien wordt rekening gehouden met effecten van putberging, een eindige putstraal en een skinfactor (weerstand op het putfilter of de boorgatwand). Daarmee is de oplossing ook geschikt voor berekening van de peilverandering in de put zelf, zoals bij putproeven en slugtests.

De laatste uitbreiding vond plaats in 2008 toen de oorspronkelijke computercode van de analytische meerlagen-oplossing werd omgebouwd tot het computerprogramma 'MLU for

Windows'. Hierin staat 'MLU' voor 'Multi-Layer Unsteady state'. Door gebruik te maken van het superpositieprincipe in ruimte en in tijd werd het mogelijk om tegelijkertijd met vele onttrekkings- en/of infiltratieputten te rekenen, die elk ook een variabel debiet mogen hebben. Zo kan bijvoorbeeld het door Boukes (2007) beschreven complexe stijghoogteverloop binnen een puttenveld met vele aan- en uitschakelende pompen worden gemodelleerd en geanalyseerd, mits de ondergrond kan worden gemodelleerd als een opeenstapeling van homogene en isotrope lagen. Voor een beknopte beschrijving van de mogelijkheden en beperkingen van MLU wordt verwezen naar de handleiding (Hemker en Post, 2009).

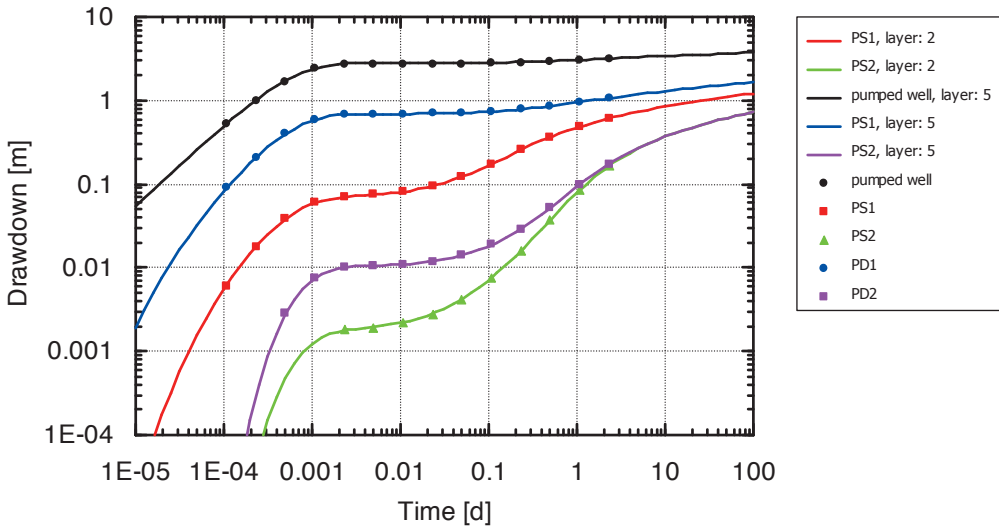
De basisgedachte achter deze ontwikkelingen is het streven naar één algemene analytische oplossing voor de analyse van zoveel mogelijk soorten pompproeven. Dus niet alleen vanaf de eerste seconde tot stationaire stroming is bereikt, maar ook voor elke vorm van laagopbouw, puttype en onttrekkingsregime. Vele pompputten mogen daarbij betrokken zijn en de metingen in alle putten en peilbuizen kunnen tegelijkertijd worden geanalyseerd.

Verificatie van MLU for Windows

Om aan te tonen dat MLU niet door tijdcriteria wordt beperkt, maar voor elke periode na het starten van de pomp de stijghoogtes kan berekenen, zijn diverse tests uitgevoerd. Dit betreft het reproduceren van de resultaten van gepubliceerde analytische en numerieke putstromingsmodellen. Van de uitgevoerde verificatietests zijn de volgende gedocumenteerd (Hemker en Randall, 2010):

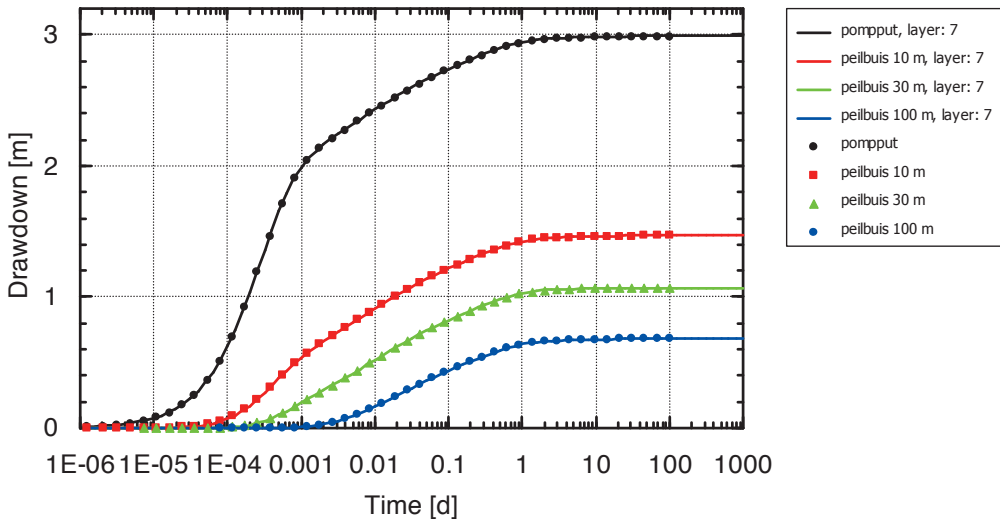
- Analytisch model met onvolkomen putfilter in verticaal anisotroop freatisch pakket (Barlow en Moench, 1999);
- Eindige-differentiëmodel met twee watervoerende pakketten, waarvan het bovenste freatisch is en waarbij bergingsveranderingen en horizontale stroming in de slechtdoorlatende tussenlaag optreden (Lebbe en De Breuck, 1995);
- Eindige-elementenmodel van een rechthoekig begrensd watervoerend pakket spanningwater (Ségol, 1994).

Zo is het model van Barlow en Moench bijvoorbeeld met een MLU-model met zes lagen vergeleken. Het homogene watervoerende pakket is in MLU gediscrètiseerd tot vijf lagen die samen het watervoerende pakket vormen, terwijl een extra laag aan de bovenzijde de grondwaterspiegel vertegenwoordigt. De dikten zijn zo gekozen dat het putfilter zich in de drie diepste lagen bevindt. Tussen de lagen zijn weerstanden aanwezig om de bij de verticale stromingscomponent optredende verticale stijghoogteverschillen te berekenen. Deze weerstanden volgen onmiddellijk uit de laagdiktes en de verticale doorlatendheid. De vier peilbuizen staan op twee verschillende afstanden met een ondiep (PS1, PS2) en een diep filter (PD1, PD2). In figuur 3 zijn de resultaten van beide modellen weergegeven.



FIGUUR 3: DOOR BARLOW EN MOENCH BEREKENDE STIJGHOOGTEVERLAGINGEN (PUNTEN) VERGELEKEN MET DE DOOR MLU BEREKENDE RESULTATEN (LIJNEN).

Ook het MicroFEM-model dat als voorbeeld is gebruikt om de bijdrage van verschillende reservoirs aan een putonttrekking in een poldergebied te berekenen (figuur 1) kan voor de verificatie worden gebruikt. In figuur 4 worden de berekende stijghoogteverlagingen in de pompput en in drie peilbuizen in de goeddoorlatende onderste helft van het watervoerende pakket vergeleken.



FIGUUR 4: VERGELIJKING VAN NUMERIEK (MICROFEM, PUNTEN) EN ANALYTISSCH (MLU, LIJNEN) BEREKENDE STIJGHOOGTEVERLAGINGEN IN DE POMPPUT EN IN PEILBUIZEN OP 10, 30 EN 100 m AFSTAND VAN DE POMPPUT. HET MODEL IS WEERGEGEVEN IN FIGUUR 1.

Pompproefanalyse met MLU for Windows

Een groot aantal tests is uitgevoerd om te zien in hoeverre de opzet geslaagd is om tot een breed toepasbare analytische oplossing te komen. Er is geprobeerd om zoveel mogelijk uiteenlopende pompproeven met MLU te analyseren. Van deze tests zijn de volgende gedocumenteerd (Hemker en Randall, 2010):

- Pompproef Korendijk: eenvoudige pompproef in een pakket spanningswater (Kruseman en De Ridder, 2000);
- Pompproef Dalem: pompproef in een pakket semi-spanningswater, geanalyseerd met en zonder bergingsveranderingen in de deklaag (Kruseman en De Ridder, 2000);
- Putproef Hardinxveld-Giessendam: bepaling KD en skinfactor met een korte putproef;
- Pompproef in een afgesloten systeem met twee watervoerende pakketten (Schroth en Narasimhan, 1997);
- Pompproef Vennebulten: pompproef in een freatisch pakket (Kruseman en De Ridder, 2000);
- Pompproef in een dik pakket vulkanisch gesteente met dubbele porositeit (Moench, 1984);
- Step-drawdown test in een pakket spanningswater (Kruseman en De Ridder, 2000);
- Slugtest in een pakket spanningswater (Cooper e.a., 1967);
- Slugtest met waarnemingen in een nabijgelegen peilbuis (Butler en Liu, 1997).

De pompproef Dalem is een goed voorbeeld van hoe de beperkende voorwaarden en de tijdcriteria van de verschillende grafische analyses kunnen worden vermeden door een integrale analyse met MLU. Om enkele mogelijkheden van MLU te demonstreren zullen we ons hier echter tot één voorbeeld beperken. We kiezen daarvoor de pompproef Vennebulten.

De pompproef Vennebulten

Kruseman en De Ridder gebruiken de pompproef Vennebulten als voorbeeld van een pompproef in een freatisch pakket. Voor de grafische analyse is in eerste instantie (1970) de 'delayed yield'-oplossing (Boulton, 1963) gebruikt, maar later is gekozen voor de 'delayed response'-oplossing (Neuman, 1975). In beide gevallen wordt rekening gehouden met de elastische bergingscoëfficiënt van het pakket en met de opbrengstcoëfficiënt. Kenmerkend voor deze oplossingen is de S-vormige verlagingscurve, dat wil zeggen dat na een aanvankelijk snelle stijghoogteverlaging als gevolg van de elastische bergingscoëfficiënt en een tussentijdse stabilisatie, er een tweede verlagingstraject optreedt waarbij ook de grondwaterspiegel gaat dalen. Later heeft Moench (1995) laten zien hoe beide methoden tot één analytisch model kunnen worden gecombineerd.

Tegenover het relatief grote aantal artikelen dat over putstroming in freatische pakketten is verschenen staat een opvallend klein aantal gepubliceerde pompproeven die het daarbij behorende S-vormige stijghoogteverloop duidelijk laten zien. Ook bij Vennebulten is het karakteristieke verloop nauwelijks herkenbaar, wat vermoedelijk kan worden verklaard door de te korte duur van de proef. Van het Vennebulten-pakket is verder bekend dat het grofzandige onderste deel naar boven toe steeds fijner wordt en eindigt met lemig dekzand. Het putfilter bevindt zich alleen in het grofzandige deel van het pakket en de onttrekking duurt 25 uur.

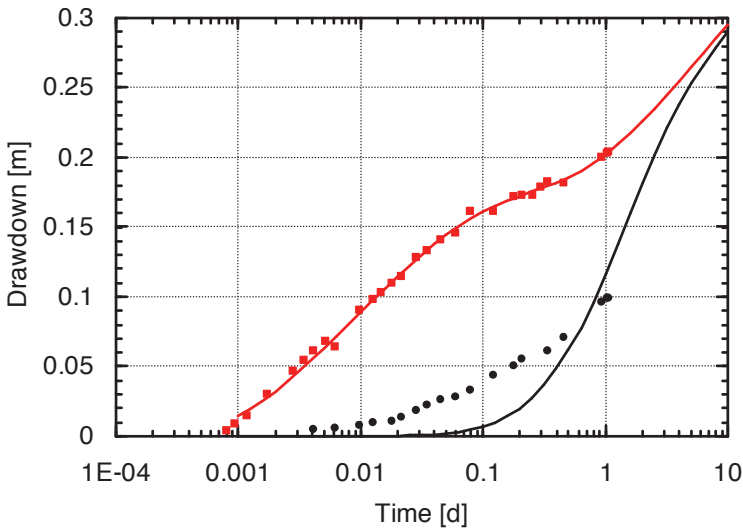
Tijdens de pompproef zijn stijghoogteverlagingen gemeten op 10, 30, 90 en 280 m van de pompput, zowel in het grove diepe deel als op ongeveer 3 m diepte. Daarvan worden door Kruseman en De Ridder alleen de verlagingen op 90 m afstand gegeven. Van deze metingen

worden alleen de diepe verlagingen gebruikt bij de grafische analyse volgens de methode van Neuman. Wanneer we dezelfde metingen met MLU analyseren en de resultaten vergelijken, blijken de berekende grondconstanten ongeveer gelijk te zijn.

Neuman:	KD = 1447 en 1616 m ² /d;	S = 0,00052;	K _v = 0,04 m/d;	S _y = 0,0049
MLU:	KD = 1569 m ² /d (4%);	S = 0,00058 (4%);	c = 182 d (16%);	S _y = 0,0050 (18%)

Met de Neuman-methode wordt het doorlaatvermogen (KD) tweemaal berekend, namelijk met het eerste en met het laatste deel van de curve. Het percentage achter elk MLU-resultaat is de 'coefficient of variation', dat is de berekende standaardafwijking als percentage van de berekende parameter. Verder berekent MLU de verticale weerstand van het bovenste deel van het pakket dat bij een geschatte dikte van 10 m van de fijnzandige laag overeenkomt met een verticale doorlatendheid van ongeveer 0,055 m/d. Het MLU-model met een goeddoorlatend pakket en weerstandbiedende deklaag lijkt meer op het lithostratigrafisch profiel dan het Neuman-model, omdat Neuman uitgaat van een homogeen verticaal anisotroop pakket.

De pompproefanalyse wordt ingewikkelder wanneer we ook de metingen van de ondiepe peilbuis erbij betrekken. Deze verlagingen blijken namelijk in het geheel niet op de berekende verlaging van de grondwaterspiegel te lijken (figuur 5) en het opnieuw optimaliseren met de gegevens van beide peilbuizen leidt niet tot een model met reële waarden voor de grondconstanten.



FIGUUR 5: NA OPTIMALISATIE VAN HET MODEL MET DE VERLAGINGEN IN DE DIEPE PEILBUIS (ROOD) BLIJKEN DE GEMETEN ONDIEPE VERLAGINGEN (ZWARTE STIPPEN) NIET MET DE BEREKENDE VERLAGING VAN DE GRONDWATERSPIEGEL (ZWARTE LIJN) OVEREEN TE KOMEN.

Omdat aanpassing van de grondconstanten alleen niet helpt, moet het modelconcept zelf worden veranderd. Het is duidelijk dat het probleem aan de bovenkant van het pakket optreedt. Een nadere analyse van het gegeven lithostratigrafisch profiel doet vermoeden dat de drie meter diepe peilbuizen niet de verlaging van de grondwaterspiegel weergeven, maar de stijghoogte in de fijnzandige deklaag.

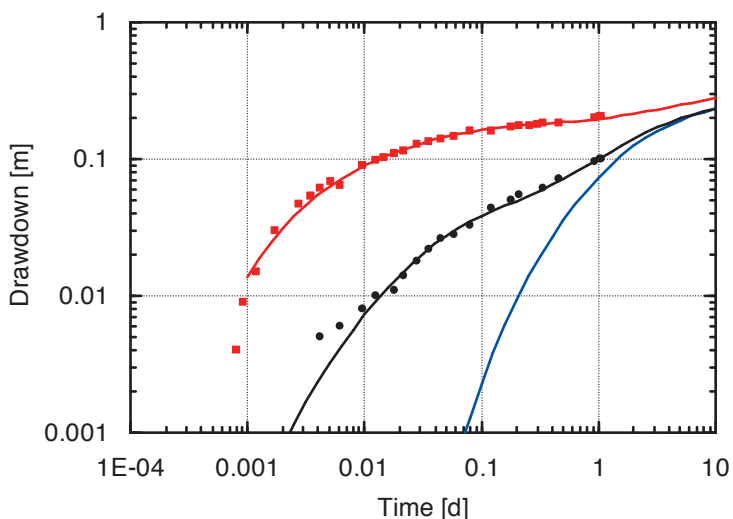
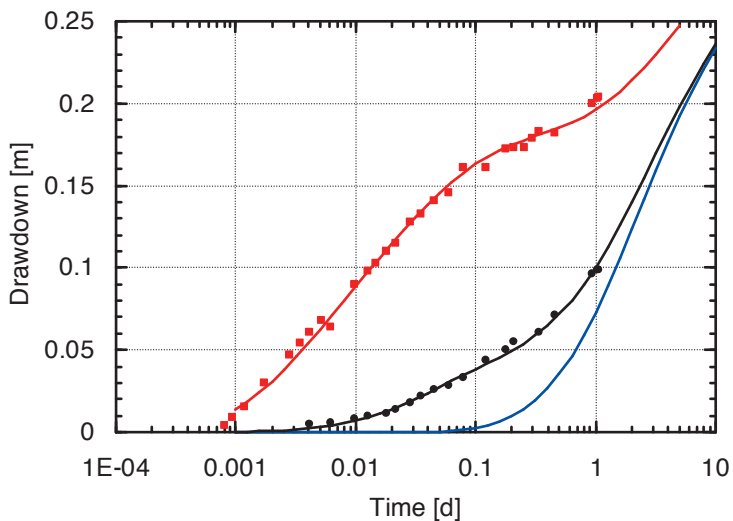
In MLU kan de noodzakelijke aanpassing eenvoudig worden uitgevoerd door toevoeging van een extra laag. Er zijn dan drie modellagen waarvoor het verlagingsverloop wordt berekend:

1. Een zeer dunne laag bij de grondwaterspiegel. In deze laag komt het water vrij bij een dalende grondwaterspiegel. Aan deze laag wordt de opbrengstcoëfficiënt toegekend, maar het doorlaatvermogen is verwaarloosbaar.
 2. Een laag op het niveau van de ondiepe peilfilters binnen het fijnzandige pakket. De laag is nodig om de stijghoogteverandering op dit niveau te berekenen, maar het doorlaatvermogen en de bergingscoëfficiënt zijn gering.
 3. De grofzandige laag waarin het putfilter en de diepe peilbuizen zijn geplaatst.
- Tussen deze drie lagen bevinden zich twee lagen die de weerstand tegen verticale stroming in het fijnzandige bovenste deel van het pakket representeren.

Door het toegenomen aantal modellagen bevat het model nu zoveel grondconstanten dat deze niet alle met de metingen in de twee peilbuizen kunnen worden berekend. Er blijken nu veel verschillende modellen mogelijk te zijn die alle een even goede kleinstekwadratenoplossing opleveren. Daaruit kan een subjectieve keuze worden gemaakt door voor enkele grondconstanten een geschatte vaste waarde te gebruiken. Eén van de mogelijke oplossingen ziet er dan als volgt uit (tabel 1, figuur 6):

TABEL 1: VENNEBULTEN-MODEL MET ZES BEREKENDE PARAMETERS.

KD1	0,01 m ² /d		S1	0,0047	18%	grondwaterspiegel
c2	81 d	21%	S'2	0,0017	39%	
KD2	50 m ² /d		S2	0,0001		fijnzandige laag
c3	188 d	14%	S'3	0		
KD3	1616 m ² /d	4%	S3	0,00057	4%	grofzandige laag



FIGUUR 6: VERGELIJING VAN GEMETEN EN MET MLU BEREKENDE STIJGHOOGTEVERLAGINGEN IN EEN DIEP (ROOD) EN ONDIEP (ZWART) PEILFILTER OP EEN LINEAIRE (BOVEN) EN EEN LOGARITMISCHE Y-AS (ONDER). DE BLAUWE KROMME LAAT DE BEREKENDE VERLAGING VAN DE GRONDWATERSPIEGEL ZIEN.

Deze en alternatieve oplossingen met enigszins andere waarden voor KD_2 en S_2 laten verlagingscurves zien die alle evengoed bij de metingen passen. In alle gevallen is de kwadratensom $0,0005 \text{ m}^2$. Het doorlaatvermogen van het pakket ($1616 + 50 = 1666 \text{ m}^2/\text{dag}$) en de weerstand van de fijnzandige deklaag ($188 + 81 = 269 \text{ dag}$) blijken nu wat hoger dan oorspronkelijk berekend.

De berekende waarde van S_1 is veel kleiner dan wat voor de opbrengstcoëfficiënt mag worden verwacht, zelfs als S_1 en S_2 samen worden genomen. Dit is een gebruikelijk verschijnsel bij de analyse van freatische pompproeven, vooral wanneer de grondwaterspiegel zich in fijn sediment bevindt en de pompproef niet lang duurt. De veel te kleine waarde wordt geweten aan een tijdelijke dikteverandering van de capillaire zoom: tijdens de pompproef kan de grondwaterspiegel tijdelijk sneller dalen dan de grens tussen de verzadigde en de onverzadigde zone (Nwankwor, e.a., 1992).

Zelfs bij een betrekkelijk eenvoudige bodemopbouw als bij Vennebulten blijkt een meerlagenmodel nodig te zijn om de stijghoogteverlagingen in de ondiepe en de diepe peilbuis te berekenen. Naast MLU is het enige alternatief een vergelijkbaar gelaagd numeriek model. Weliswaar kunnen niet alle grondconstanten van de verschillende lagen worden bepaald, maar daar staat tegenover dat alleen metingen op 90 m van de pompput beschikbaar zijn en de proef betrekkelijk kort heeft geduurd.

Discussie en conclusies

In tegenstelling tot de grafische analysemethoden bij pompproeven, waarbij vrijwel altijd van één homogeen watervoerend pakket wordt uitgegaan, heeft de door MLU gebruikte oplossing als belangrijkste voordeel dat het model uit een willekeurig aantal lagen mag bestaan. Deze verticale discretisatie kan nuttig worden toegepast bij:

- multi-aquifersystemen (gescheiden watervoerende pakketten)
- gelaagde watervoerende pakketten (verticale heterogeniteit)
- verlaging grondwaterspiegel (toplaag met opbrengstcoëfficiënt)
- verticale stroming binnen watervoerende pakketten (bijvoorbeeld bij onvolkomen putten).

Waar de traditionele grafische methoden tekortschieten wordt tegenwoordig vaak gebruik gemaakt van numerieke modellen. Daarbij kan dezelfde verticale discretisatie worden toegepast als bij MLU. De meerlagenoplossing van MLU heeft echter enkele belangrijke voordelen ten opzichte van numerieke modellen:

- Er is geen eindige-elementen- of eindige-differentienetwerk nodig.
- Er is geen berekening met tijdstappen vanaf het begin van de onttrekking nodig.
- De verlaging in pompputten houdt rekening met de putstraal, putberging en skinfactor.
- Bij een onttrekking met een pompfilter in meer dan één laag wordt het debiet per laag berekend.
- Er wordt rekening gehouden met de vertraagde reactie van peilputten (door peilputberging).
- Puttenvelden zijn eenvoudig te ontwerpen.
- Geen numerieke fouten als gevolg van netwerken, tijdstappen en iteratieve berekeningen.
- Vergelijkbare berekeningen zijn veel (factor 100 of meer) sneller.

Als beperking van de MLU-oplossing kan worden genoemd:

- Alle lagen worden homogeen, isotroop en oneindig uitgestrekt verondersteld.
- Alleen grondwaterstroming als gevolg van onttrekkings- en injectieputten wordt beschouwd.

De flexibiliteit die een analytische meerlagenoplossing geeft bij het analyseren van pompproeven, putproeven, stopproeven, step-drawdown tests, slugtests, etc. kan niet met één of twee voorbeelden worden duidelijk gemaakt. Voor een vollediger beeld wordt daarom verwezen naar Hemker en Randall (2010) waar uiteenlopende testmodellen en pompproeven zijn beschreven.

Naast pompproefanalyse kan MLU for Windows ook op een snelle en eenvoudige manier worden gebruikt voor het berekenen van stijghoogte- en grondwaterstandveranderingen, bijvoorbeeld bij het ontwerpen van pompproeven, bemalingsproeven en van puttenvelden, met vele putten en wisselende debieten. Op Internet (www.microfem.nl) is een volledig werkende lichte versie van MLU beschikbaar, waarmee berekeningen kunnen worden uitgevoerd en pompproeven kunnen worden geanalyseerd voor systemen met één of twee watervoerende pakketten. Voor meer informatie: <http://www.microfem.nl/download/mlu.pdf>.

Referenties

- Barlow, P.M. en A.F. Moench (1999)** WTAQ - A computer program for calculating drawdowns and estimating hydraulic properties for confined and water-table aquifers; U.S.G.S Water-Resour. Inv. Rep. 99-4225, 74 p.
- Boukes, H. (2007)** Het uitwerken van een pompproef die nooit is uitgevoerd; Stromingen, jrg 13, nr 3, pag 27-33.
- Boulton, N.S. (1963)** Analysis of data from nonequilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage; Proc. Inst. of Civil Engineers 26, pag 469-482.
- Butler, J.J.Jr. en W.Z. Liu (1997)** Analysis of 1991-1992 slug test in the Dakota aquifer of central and western Kansas; Kansas Geological Survey. Open-File Rep. 93-1c.
- Cooper, H.H., J.D. Bredehoeft en S.S. Papadopoulos (1967)** Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water; Water Resour. Res. 3, pag 263-269.
- Hantush, M.S. (1960)** Modification of the theory of leaky aquifers; J. Geophys. Res., 94, pag 1921-1932.
- Hemker, C.J. (1999)** Transient well flow in layered aquifer systems: the uniform well-face drawdown solution; Journal of Hydrology, 225, pag 19-44.
- Hemker, C.J. en C. Maas (1987)** Unsteady flow to wells in layered and fissured aquifer systems; Journal of Hydrology, 90, pag 231-249.
- Hemker, Kick en Vincent Post (2009)** MLU for Windows: well flow modeling in multilayer aquifer systems; MLU User's guide, 29 p. <http://www.microfem.nl/download/mlu-user.pdf>
- Hemker, Kick en Jeff Randall (2010)** Modeling with MLU: applying the multilayer approach to aquifer test analysis. Tutorial; 66 p. <http://www.microfem.nl/download/mlu-tutorial.pdf>
- Kruseman, G.P. en N.A. de Ridder (1970)** Analysis and evaluation of pumping test data; ILRI Bulletin 11, Wageningen, 200 p.
- Kruseman, G.P. en N.A. de Ridder (2000)** Analysis and evaluation of pumping test data; ILRI publication 47, Wageningen, 377 p. <http://www2.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub47/Pub47.pdf>
- Lebbe, L. en W. De Breuck (1995)** Validation of an inverse numerical model for interpretation of pumping tests and the study of factors influencing accuracy of results; Journal of Hydrology, 172, pag 61-85.
- Moench, A.F. (1984)** Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin; Water Resour. Res. 20, pag 831-846.
- Moench, A.F. (1995)** Combining the Neuman and Boulton models for flow to a well in an unconfined aquifer; Ground Water 33, pag 378-384.
- Neuman, S.P. (1975)** Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response; Water Resour. Res. 11, pag 329-342.
- Nienhuis, P.R., A.G. Kok en H.T. Sman (1999)** Analyse van pompproeven met onvolkomen putfilters in verticaal heterogene pakketten op basis van meerlagenstroming; Stromingen, jrg 5, nr 1, pag 39-54.
- Nwankwor, G.I., R.W. Gillham, G. van der Kamp en F.F. Akindunni (1992)** Unsaturated and saturated flow in response to pumping of an unconfined aquifer: field evidence of delayed drainage; Ground Water 30, pag 690-700.
- Schroth, B. en T.N. Narasimhan (1997)** Application of a numerical model in the interpretation of a leaky aquifer test; Ground Water 35, pag 371-375.
- Ségoal, G. (1994)** Classic groundwater simulations: Proving and improving numerical models; Prentice-Hall. 531 p.
- Theis, C.V. (1935)** The relation between lowering of the piezometric surface and rate and duration of discharge of a well using groundwater storage; Trans. Amer. Geophys. Union, 16, pag 519-524.
- Vries, J.J. de (1982)** Anderhalve eeuw hydrologisch onderzoek in Nederland; Rodopi, Amsterdam, 195 p.