

---

# Nogmaals: is de $kD$ -waarde rondom pompstations altijd hoger?

Michael Blokland  
Kees Maas

---

## Inleiding

Naar aanleiding van opmerkingen van De Lange (1996) in dit tijdschrift en onderzoek van Indelman (1996) dat elders gepubliceerd werd, is het vermoeden gerezen dat het doorlaatvermogen van een aquifer nabij een pompput afwijkt van de waarde op enige afstand van de put. Waarnemingen aan een fysiek model van een pompproef in een heterogeen medium door Silliman en Caswell (1998) bevestigen dit vermoeden. In het bijzonder blijkt dat de  $kD$ -waarde afneemt met toenemende afstand tot de put. Een model van Olsthoorn (1998) bevestigt eveneens dat de  $kD$ -waarde kan variëren, mits men uitgaat van een structuur van het aquifer die voor te stellen is als bakstenen van hoge doorlatendheid met daartussen voegen van lage doorlatendheid.

Bij gevolg kan men zich afvragen of de  $kD$ -waarde die uit een pompproef berekend kan worden wel bruikbaar is voor regionale grondwatermodellen. Gezien het veelvuldig gebruik van zulke modellen voor effectenstudies zouden de gevolgen van een eventueel noodzakelijke herijking niet gering zijn. In het kader van zijn afstuderen aan de TU Delft heeft de eerste auteur deze kwestie onderzocht. Daartoe heeft hij een aantal in het verleden uitgevoerde pompproeven aan een nadere analyse onderworpen.

## Verklaring van het verschijnsel; hypothese

Met behulp van de inzichten van Indelman (1996) geven we eerst de volgende verklaring voor het verschijnsel: In een aquifer zijn de heterogeniteiten vaak horizontaal georiënteerd. Met andere woorden, een aquifer vormt een min of meer gelaagd systeem, meestal van lenzen van verschillende doorlatendheid die in elkaar overlopen. Dikte en lengte van deze lenzen variëren, afhankelijk van de geologische geschiedenis en het ontstaan van het aquifer. Indien er sprake is van horizontale stroming kent men – afhankelijk van de geometrische structuur van de heterogeniteiten – twee regels om de effectieve doorlatendheid te berekenen (Journel e.a., 1986):

- 1 Bij een gelaagd systeem en stroming parallel aan die gelaagdheid gebruikt men het rekenkundig (arithmetisch) gemiddelde om de effectieve  $k$ -waarde te bepalen:

---

Michael Blokland, Boomsluiterskade 60, 2511 VL Den Haag en Kees Maas, TU Delft sectie Hydrologie en Ecologie, en Kiwa Onderzoek en Advies, kmaas@kiwaoa.nl.

→	$d_1, k_1$	→
→	$d_2, k_2$	→
→	$d_3, k_3$	→
→	$d_4, k_4$	→

$$k_A = \frac{\sum_{i=1}^n k_i d_i}{\sum_{i=1}^n d_i}$$

2 Bij een heterogeen systeem gebruikt men het meetkundig (geometrisch) gemiddelde om de  $k$ -waarde te bepalen:

→	$k_{1,1}$			→
→				→
→				→
→			$k_{i,1}$	→

$$k_G = \sqrt[n]{\prod_{i=1, j=1}^n k_{i,j}}$$

Als men een pompproef verricht in een heterogeen medium, dan lijkt het aquifer in de nabijheid van de put op een gelaagd systeem. Als resultaat verwacht men dus een effectieve  $k$ -waarde die lijkt op het rekenkundig gemiddelde. Als men hetzelfde aquifer over een grotere horizontale schaal beschouwt, lijkt het op een heterogeen systeem. Op die schaal zou men dus het meetkundig gemiddelde moeten toepassen om de effectieve  $k$ -waarde te vinden. Het rekenkundig gemiddelde is altijd groter dan het meetkundig gemiddelde. De  $kD$ -waarde neemt dus af met toenemende afstand tot de put. Belangrijke factoren zijn de schaal en geometrie van de heterogeniteiten ten opzichte van de stromingsrichting.

Het onderzoek was ingericht op het toetsen van de volgende

**Hypothese:**

*Het doorlaatvermogen  $kD$  neemt af, als functie van de afstand tot de pompput.*

**Aanpak van het onderzoek**

Na bestudering van de relevante literatuur is besloten om, met behulp van een aantal pompproeven uit de praktijk, het verschijnsel eerst te valideren. De gedachte is dat een systematisch afnemende  $kD$ -waarde tijdens een pompproef tot uiting moet komen in een systematische afwijking tussen waargenomen verlagingen en theoretische verlagingen. We hebben voor het onderzoek gebruik kunnen maken van het pompproefarchief van TNO-NITG, dat ongeveer 400 gedocumenteerde pompproeven bevat. Om het aantal onzekerhe-

den te beperken is ervoor gekozen om alleen aquifers te bestuderen die freatisch of afgesloten zijn. Hierbij vindt er dus geen voeding plaats van boven of onder, hetgeen een extra onzekerheid zou kunnen introduceren. Er valt een onderscheid te maken tussen het stationaire en het niet-stationaire geval, Thiem respectievelijk Theis (ook wel: Jacob). We bespreken in de volgende subparagrafen kort de aannamen die aan de formules ten grondslag liggen, en de wijze waarop de formules gebruikt kunnen worden om de  $kD$ -waarde te berekenen. Vervolgens gaan we in op de selectie van een aantal pompproeven uit het archief.

*Thiem, stationaire situatie*

Aannamen en randvoorwaarden:

- freatisch aquifer;
- het aquifer is schijnbaar oneindig uitgestrekt;
- er heerst een stationaire of quasi-stationaire stromingsituatie;
- vóór aanvang van de pompproef heerste er een stationaire stromingssituatie;
- het aquifer is constant van dikte;
- het pompdebiet is constant;
- de pompput is volkomen;
- het aquifer is homogeen van samenstelling.

De oplossing volgens Thiem luidt dan:

$$kD = \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

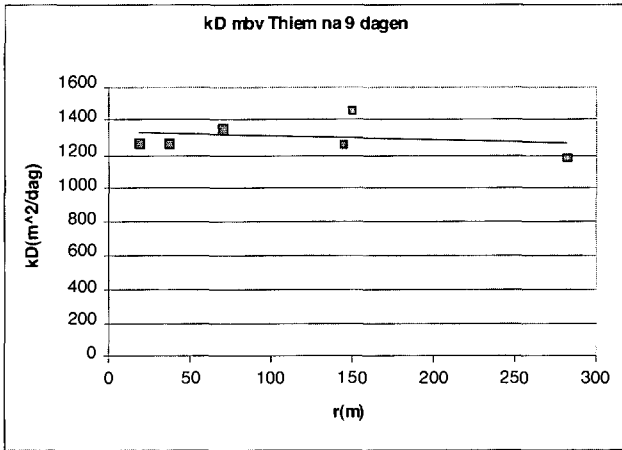
met:

$kD$	=	doorlaatvermogen	[m <sup>2</sup> /dag]
$r_1, r_2$	=	afstanden van twee peilputten tot de pompput	[m]
$s_1, s_2$	=	verlagingen in de twee peilputten	[m]
$Q$	=	pompdebiet	[m <sup>3</sup> /dag]

*Analyse met de formule van Thiem*

Om de  $kD$ -waarde te bepalen heeft men dus twee stijghoogtemetingen op verschillende afstanden  $r$  nodig. De  $kD$ -waarde die met Thiem wordt bepaald, wordt toegekend aan het punt dat midden tussen de twee gebruikte peilputten ligt. Zo kan men een diagram construeren met daarin de  $kD$ -waarde uitgezet tegen de afstand vanaf de pompput.

Met behulp van de kleinste-kwadraten-methode kan men door die punten een lijn fitten. De richting van die lijn kan zijn: negatief ( $kD$  neemt af), positief ( $kD$  neemt toe) of nul. De volgende grafiek geeft een voorbeeld van een proef die op deze manier is uitgewerkt.



Figuur:  $kD$  uitgezet tegen  $r$ , bepaald met behulp van de formule van Thiem (locatie: Wouw-Altena)

Voor de berekening van een  $kD$ -waarde met behulp van Thiem zijn twee verlagingsmetingen nodig op verschillende afstanden van de put. Hiermee kent men een  $kD$ -waarde toe aan een andere plaats in de ruimte dan waar gemeten is. Men middelt dus tussen twee punten. Daarnaast 'verliest' men een meetpunt, dat wil zeggen: men vindt één  $kD$ -waarde minder dan het aantal peilbuizen. Om Thiem te kunnen toepassen moet er zekerheid bestaan omtrent het stationair zijn van de stroming. Met name in freatische aquifers kan het lang, soms wel maanden, duren alvorens de stationaire verlagings situatie wordt bereikt. Indien er echter een zogenaamde quasi-stationaire stromingsfase heerst, dan mag Thiem weer wel gebruikt worden. Die fase, waarin de grondwaterstanden in alle bemeeten peilbuizen even snel dalen, wordt meestal veel eerder bereikt dan een volledig stationaire situatie.

#### *Jacob, niet-stationaire situatie*

De formule van Jacob is een vereenvoudiging van de oplossing volgens Theis voor niet-stationaire stroming in afgesloten en freatische aquifers. De randvoorwaarden en aannamen zijn:

- het aquifer is afgesloten of freatisch;
- het aquifer is schijnbaar oneindig uitgestrekt;
- vóór aanvang van de pompproef heerst er een stationaire stromingssituatie;
- het aquifer is constant van dikte, homogeen en isotroop;
- het pompdebiet is constant;
- de pompput is volkomen.

Extra aannamen voortvloeiend uit het niet-stationaire karakter:

- water dat vrijkomt uit de berging wordt instantaan vrijgelaten bij enige verlagings van de stijghoogte;
- de diameter van de put is klein, zodat de berging in de put verwaarloosbaar is.

De oplossing volgens Theis is:

$$s = \frac{Q}{4\pi kD} W(u)$$

met:

$$\begin{aligned}
 kD &= \text{doorlaatvermogen} && [\text{m}^2/\text{d}] \\
 Q &= \text{debiet in de pompput} && [\text{m}^3/\text{d}] \\
 W(u) &= \text{putfunctie van Theis:} \\
 W(u) &= -0,577 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots \\
 u &= \frac{r^2 S}{4kDt} \\
 S &= \text{freatische bergingscoëfficiënt} && [-]
 \end{aligned}$$

In niet-stationaire gevallen hebben we gebruik gemaakt van de formule van Theis, volgens de benadering van Jacob. Dit is toegestaan mits  $u$  klein genoeg is. De benadering luidt:

$$s = \frac{2.30Q}{4\pi kD} \log \frac{2.25kDt}{r^2 S}$$

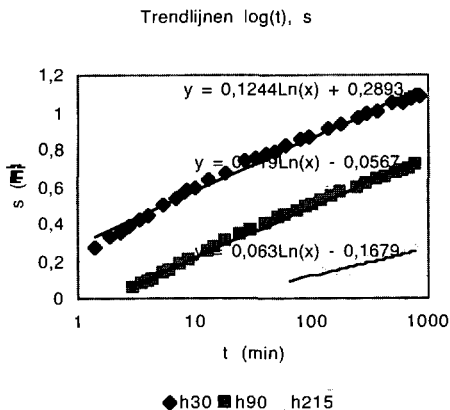
#### Analyse met de formule van Jacob

Het analyseren van data met behulp van Jacob gaat als volgt:

- zet de verlaging  $s$  uit tegen de tijd  $t$  op logaritmisch papier;
- trek een rechte lijn door de punten;
- het verschil van die lijn over één log-cyclus ( $\Delta s$ ) bepaalt de  $kD$ -waarde:

$$kD = \frac{2,3Q}{4\pi \Delta s}$$

De  $kD$ -waarde is dus omgekeerd evenredig met de helling van de getrokken rechte in het  $(\log(t), s)$ -diagram. De volgende grafiek geeft een voorbeeld van een proef die volgens Jacob is uitgewerkt.



**Figuur:** Data van de pompproef Oude Korendijk, uitgewerkt volgens Jacob

Voor elk meetpunt kan men zo een  $kD$ -waarde bepalen. Ook deze methode levert dus de  $kD$ -waarde op als functie van de afstand  $r$  tot de pompput.

### *Selectie van de pompproeven*

Het pompproefarchief van NITG-TNO bevat ongeveer 400 gedocumenteerde pompproeven. Helaas is maar een klein deel van die proeven geschikt om te gebruiken bij het onderzoek. De geohydrologische situatie in het veld bepaalt welke methode mag worden gebruikt bij de analyse van verlagingsgegevens.

Het belangrijkste selectie criterium is de overeenkomstigheid van de heersende omstandigheden tijdens de proef met de randvoorwaarden en aannamen waaronder de theorie is opgesteld. Men moet dus een uitspraak doen over de betrouwbaarheid van bepaalde data en aannamen en randvoorwaarden. Dat kan alleen met behulp van aanvullende informatie. Of een aquifer afgesloten is of freatisch, bijvoorbeeld, is van groot belang voor het uitwerken van de gegevens. Controle daarvan kan alleen als er per pompproef een beschrijving van de geohydrologische omstandigheden is toegevoegd. Die controle kon niet altijd kwantitatief geschieden. Subjectieve uitspraken over de betrouwbaarheid waren dan ook onvermijdelijk. Het resultaat van de selectie was een groep van uiteindelijk slechts 18 pompproeven.

## **Resultaten**

### *Analyse van de pompproefdata*

Het analyseren van de data kende twee onderdelen. Ten eerste moest voor elke pompproef de  $kD$ -waarde worden bepaald op verschillende afstanden tot de pompput. Indien er stationaire data beschikbaar waren, gebeurde dat met de methode van Thiem. Bij niet-stationaire data is gebruik gemaakt van de methode van Jacob. Bij sommige pompproeven waren gegevens beschikbaar waarmee beide methoden konden worden toegepast.

Vervolgens kon de  $kD$ -waarde worden uitgezet tegen de afstand  $r$  vanaf de pompput. Op basis van dit profiel waren er drie uitspraken mogelijk over het verloop van de  $kD$ -waarde:

$kD$ neemt toe met $r$	⇒	negatieve conclusie, hypothese is niet juist;
$kD$ neemt af met $r$	⇒	positieve conclusie, hypothese is juist;
Onduidelijk verloop $kD$ met $r$	⇒	geen conclusie.

Als blijkt dat de  $kD$ -waarde trendmatig afneemt met de afstand tot de pompput, is het overigens niet zeker dat dat verband houdt met de heterogene structuur van het aquifer. Dus, als de  $kD$ -waarde bij het merendeel van de pompproeven vanaf de pompput afneemt, dan komt dat *vermoedelijk* door de heterogene structuur van de ondergrond. Tevens kan de spreiding van de  $kD$ -waarden wat zeggen. Zo kan bijvoorbeeld een schijnbare toename van

de  $kD$ -waarde met de afstand tot de put het gevolg zijn van een verkeerde meting. Een extreme anomalie kan de trend ten onrechte doen afbuigen. Er dient echter voorzichtigheid te worden betracht bij het trekken van deze conclusies. Een toename van de  $kD$ -waarde kan immers ook op andere factoren duiden, die bij de selectie wellicht over het hoofd werden gezien. Voorbeelden daarvan zijn:

- dikte van het aquifer neemt toe of af;
- het aquifer verandert van samenstelling en structuur (anisotropie) in een richting;
- onbekende afwijking van de randvoorwaarden;
- alle overgebleven foutenbronnen tezamen overschaduwden het te onderzoeken effect. Het te toetsen verschijnsel is dan van de orde-grootte van de 'ruis' ten gevolge van onzekerheden en onnauwkeurigheden.

Bij de eerste analyse zijn alle pompproeven uitgewerkt met behulp van Thiem en Jacob. Daarbij kwam het geregeld voor dat er tegenspraak was tussen de twee berekeningen. De afweging die werd gemaakt om één van de twee methoden te laten prevaleren bij het trekken van een conclusie, is gebaseerd op de duur van het pompen in combinatie met de  $kD$ -waarde:

freatisch + korte pompduur + hoge  $kD$   $\Rightarrow$  Jacob

afgesloten + lange pompduur + lage  $kD$   $\Rightarrow$  Thiem

Deze criteria zijn enigszins subjectief. Het bleek moeilijk om hiervoor grenzen te kwantificeren.

De op deze wijze uitgevoerde analyse van vijftien pompproeven leverde het volgende op:  
5 pompproeven gaven een positief resultaat;  
6 pompproeven gaven een negatief resultaat;  
4 pompproeven gaven een neutraal resultaat.

*Conclusie: Er is geen trendmatige toe- of afname van de  $kD$ -waarde met de afstand tot de put geconstateerd.* Het effect van de heterogene structuur, dat theoretisch te verwachten is, is dus met behulp van een gecombineerde Thiem / Jacob analyse niet waarneembaar.

Overige opmerkingen:

- er waren meer freatische dan afgesloten aquifers geselecteerd.
- soms is het  $kD$ -verloop op basis van slechts drie punten bepaald, hetgeen onzeker is.
- de uitkomsten van de analyse volgens Jacob zijn enigszins subjectief. Dat hangt samen met afbakening van het domein in de tijd. Zo kan men bijvoorbeeld de eerste 100 minuten van een pompproef benutten of juist de verlagingsgegevens veel later. Met name bij een freatische aquifer kan dat problemen opleveren, daar het  $(\log(t),s)$ -diagram meerdere trajecten kent. Zou men alle gegevens gebruiken, dan ontstaat er ook een onjuist beeld. De methode van Jacob geeft dus bij met name freatische aquifers veel onzekerheden.

Omdat de eerste analyse geen duidelijk resultaat gaf, zijn alle pompproeven nogmaals kritisch bekeken. Daarbij zijn de volgende selectiecriteria gebruikt:

- de aquifers moesten bij voorkeur afgesloten zijn;
- om een versturende invloed van anisotropie te vermijden moesten de meetpunten in dezelfde richting staan ten opzichte van de pompput;
- er moesten meer dan drie meetpunten beschikbaar zijn;

- er moest voldoende lang gepompt zijn of de proef moest overtuigend quasi-stationair zijn (omdat in tweede instantie alleen de methode van Thiem toegepast zou worden);

Na deze selectie bleven er slechts acht pompproeven over, die het volgende opleverden:

- 3 pompproeven gaven een positief resultaat;
- 5 pompproeven gaven een negatief resultaat.

*Conclusie: Ook in tweede instantie is er geen trendmatige toename of afname van de  $kD$ -waarde met de afstand geconstateerd.*

Daarbij moeten de volgende kanttekeningen gemaakt worden:

- het aantal resultaten is te klein om een gedegen uitspraak over de onzekerheid van de conclusie te kunnen doen;
- gebruik van Thiem in een freatisch aquifer blijft twijfelachtig, gezien de lange tijd die nodig is voordat zich een werkelijk stationaire situatie voordoet.

## Evaluatie

Voor toekomstige validatie van het verschijnsel met behulp van metingen uit het veld moet men nauwkeurig kunnen vaststellen aan welke randvoorwaarden een gegeven radiaal stromingsgeval onderhevig is. Tevens dient men voldoende pompproeven te hebben om een statistische uitspraak te kunnen doen over de betrouwbaarheid.

Van de groep pompproeven die voor de tweede analyse (louter Thiem) geselecteerd werden, werden alle positieve conclusies getrokken voor afgesloten aquifers. Gebruik van Thiem in een freatisch aquifer blijft twijfelachtig, gezien de lange tijd die nodig is voordat zich een stationaire of quasi-stationaire situatie voordoet. Het valt overigens op dat er in de Nederlandse geohydrologische situatie relatief weinig afgesloten of freatische aquifers bestaan.

Bij een analyse van de beide berekeningsmethoden stuitte we op een tegenstrijdigheid, waarvoor we geen goede verklaring hebben gevonden:

Jacob maakt gebruik van de helling van het  $(\log(t), s)$ -diagram. Daarbij geldt de volgende relatie:  $kD = (2,3Q)/(4\pi\Delta s)$ . De  $kD$ -waarde is bij een constant debiet omgekeerd evenredig met de verandering van het  $(\log(t), s)$ -diagram over één logcyclus ( $\Delta s$ ). Indien de  $kD$ -waarde afneemt met de afstand  $r$  tot de put, dan moet de helling van de lijn door de meetpunten in het  $(\log(t), s)$ -diagram voor peilputten met grotere  $r$  groter worden. Met andere woorden; hoe verder de peilput van de pompput, hoe steiler het  $(\log(t), s)$ -diagram, want dan neemt de  $kD$ -waarde af.  $\Delta s$  neemt dus toe met de afstand tot de put. Dus: Afname van  $kD$  met  $r$  impliceert toename van  $\Delta s$  met  $r$ .

Thiem mag men ook gebruiken voor een quasi-stationaire stromingssituatie. Een quasi-stationaire situatie houdt in dat de stijghoogte of grondwaterstand wel varieert, maar de gradiënt van het verloop van de stijghoogte of grondwaterstand in de ruimte niet meer. Met andere woorden: de verlagingskegel is vormvast. Als men de verlaging van een vormvaste verlagingskegel voor verschillende plaatsen  $r$  zou uitzetten tegen de logaritme van de tijd,



dan moeten de lijnen die voor verschillende plaatsen (putten)  $r$  ontstaan evenwijdig lopen. Dus: Quasi-stationair impliceert constante  $\Delta s$  voor verschillende  $r$ .

Voor een quasi-stationaire stroming lijken Jacob en Thiem dus met elkaar in tegenspraak te zijn, zodat ze niet tegelijkertijd gebruikt kunnen worden om de hypothese te toetsen.

## Conclusie en aanbevelingen

Het vermoeden dat de  $kD$ -waarde nabij pompstations groter is dan op enige afstand, kon aan de hand van vijftien zorgvuldig geselecteerde pompproeven bevestigd noch ontkend worden. De orde-grootte van het verschijnsel is waarschijnlijk zodanig dat het wegvalt in de ruis van andere onzekerheden en afwijkingen van de randvoorwaarden en aannamen. Vooral nog is er dus voor grondwatermodelbouwers geen reden om de  $kD$ -waarden uit pompproeven te wantrouwen of naar boven toe te corrigeren. De bestaande theorie over de interpretatie van pompproeven is goed genoeg voor het schatten van de  $kD$ -waarde van een gebied en behoeft niet te worden herzien.

Verder onderzoek naar genoemd verschijnsel is alleen zinvol indien men alle randvoorwaarden en aannamen voldoende kan toetsen en afwijkingen ervan precies kan kwantificeren. Tevens moet er een groot aantal pompproeven beschikbaar zijn uit verschillende aquifers, om ook een statistische uitspraak te kunnen doen over de betrouwbaarheid van de uitkomsten van een dergelijk onderzoek.

Tot slot is het misschien goed om op te merken dat dit onderzoek zich beperkte tot de schaal van een pompproef, dus tot gebieden van hooguit een paar honderd meter in diameter. Op basis van dit onderzoek is dus niet uit te sluiten dat het verschijnsel – dat theoretisch wel bestaat – op meer regionale schaal beschouwd van betekenis is.

## Nawoord

Behalve door de tweede auteur is dit onderzoek ook begeleid door Chris te Stroet en Wim de Lange. Afstudeerhoogleraar was prof. C. van den Akker, sectie Hydrologie en Ecologie, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU Delft.

## Literatuur

- Indelman, P., A. Fiori en G. Dagan (1996)** Steady flow toward wells in heterogeneous formations: Mean head and equivalent conductivity; in: *Water Resources Research*, 32(7), 1975–1983.
- Journel, A.G., C.V. Deutsch en A.J. Desbarats (1986)** Power averaging for block effective permeability; SPE paper 15128.
- Kruseman, G.P. en N.A. de Ridder (1990)** Analysis and Evaluation of Pumping Test Data; ILRI, publicatie nr 47, Wageningen.

- Lange, W. de (1996)** Waarom zijn  $kD$ -waarden rondom pompstations altijd hoger?; in: *Stromingen*, jrg 2, nr 4, pag 5–10.
- Moot, N.L. van der (1997)** Reactie op “Waarom zijn de  $kD$ -waarden rondom pompstations altijd hoger?”; in: *Stromingen*, jrg 3, nr 3, pag 52–53.
- Moot, N.L. van der (1997)** Tweede reactie op “Waarom zijn de  $kD$ -waarden rondom pompstations altijd hoger?”; in: *Stromingen*, jrg 3, nr 4, pag 69–70.
- Olsthoorn, T.N. (1998)** Waarom zijn de  $kD$ -waarden rond pompstations altijd hoger? Een nadere analyse; in: *Stromingen*, jrg 4, nr 4, pag 21–26.
- Silliman, S.E. en S. Caswell (1998)** Observations of measured hydraulic conductivity in two artificial, confined aquifers with boundaries; in: *Water Resources Research*, 34(9), pag 2203–2213.

## Appendix

Deze appendix geeft een korte bespreking van enkele relevante artikelen, waarnaar in de tekst verwezen is.

**Indelman, Fiori en Dagan (1996)** *Steady flow towards wells in heterogeneous formations: Mean head and equivalent conductivity.*

De auteurs formuleren de volgende uitdrukking voor de equivalente doorlatendheid ( $K_{eq}$ ), voor stationaire stroming in een afgesloten heterogene aquifer:

$$K_{eq} = K_A (1-\lambda) + K_{efu} \lambda \quad [L/T]$$

$K_A$  = rekenkundig gemiddelde van de doorlatendheid.  
 $K_{efu}$  = effectieve doorlatendheid. Doorlatendheid van hetzelfde medium bij horizontale uniforme stroming.  
 $\lambda$  = gewichtsfactor afhankelijk van  $e$ ,  $r_w/I$ ,  $r/I$ . [-]

waarbij:

$$e = I_v/I \quad [-]$$

$I_v$  = verticale integratieschaal. [m]  
 $I$  = horizontale integratieschaal. [m]  
 $r_w$  = straal van de pompput. [m]  
 $r$  = plaats ten opzichte van de pompput. [m]

$K_{eq}$  is dus niet louter afhankelijk van de eigenschappen van het aquifer, maar ook van de aanwezigheid van een pompput en de plaats van observatie (peilput). Merk ook op dat  $K_{efu} \approx K_G$ . Bepalend voor de gewichtsfactor is dus de geometrie van de heterogeniteiten en de aanwezigheid van een pompput (met bepaalde grootte) en de plaats van observatie.  $\lambda$  neemt toe met toenemende  $r/I$ . Bij een bepaalde  $I$  neemt, bij toenemende  $r$ , het aandeel  $K_{efu}$  in  $K_{eq}$  toe.  $e$  speelt hierin een kleine rol (zie artikel).

De volgende factoren zijn dus volgens Indelman e.a. van belang voor het verschijnsel dat de  $k$ - (of  $kD$ -) waarde toeneemt met toenemende  $r$ :

- het voorkomen van een heterogene min of meer gelaagde structuur;

- de aanwezigheid van een pompput;
- de verhouding  $r/l$ .

De verklaring hiervoor (volgens Indelman et.al.) is dat op kleine schaal ( $r_w$ ) het aquifer gelaagd lijkt ( $r \rightarrow 0 = l \rightarrow \infty$ ). Voor grotere  $r$  is de non-uniformiteit van de stroming zwak, en nijgt de stroming naar een uniform beeld,  $K_{eq} \rightarrow K_{efu}$ .

Er wordt ook vermeld dat voor vertikaal zeer anisotrope media  $K_{efu} \approx K_A$  en dat het verschijnsel dus moeilijk tot niet waarneembaar zal zijn.

**Silliman en Caswell (1998)** *Observations of measured hydraulic conductivity in two artificial, confined aquifers with boundaries.*

In een fysiek model (laboratoriumproef) en een numeriek model worden pompproeven in een afgesloten aquifer nagebootst. Het experiment vindt plaats in twee verschillende heterogene aquifers: een aquifer met een bepaalde heterogene structuur en één met een willekeurig heterogene structuur. De  $kD$ -waarde wordt berekend met behulp van Thiem.

De voornaamste waarneming is dat de  $kD$ -waarde (in het willekeurig gestructureerde medium) voor grotere afstanden van de pompput de waarde van hetzelfde veld onder uniforme horizontale stroming benadert. In het geval van het 'gelaagd geordend' medium daalt de  $kD$ -waarde vanaf de pompput naar een waarde iets onder het geometrisch gemiddelde verder van de pompput. De afstand waarover dit gebeurt (ca. 10 horizontale integratieschalen) is in overeenstemming met de bevindingen van Indelman, Fiori, Dagan (zie boven).

**Lange, W. de (1996)** *Waarom zijn  $kD$ -waarden rondom pompstations altijd hoger?*

De berekeningen die volgen uit het baksteenmodel van de Lange zijn op zich juist. Het model doet de werkelijkheid echter geen recht aan; het gaat uit van een 'te mooie' structuur. In werkelijkheid zullen de deelgebieden veel minder fraai zijn afgebakend. Wat dat betreft zijn alle pogingen om een heterogeen aquifer op dergelijke wijze te modelleren (zie ook Olsthoorn, hieronder) uiteindelijk ontoereikend. Alleen een analytische oplossing (Indelman) volstaat, daar de werkelijkheid van heterogene aquifers vaak zeer complex (onregelmatig) is. Wellicht is dit de reden waarom de orde van grootte van het verschijnsel bij De Lange ( $> 6000 \text{ m}^2/\text{dag}$  nabij de put tot 3000–4000 verder weg) niet in overeenstemming is met de theorie van Indelman (1996), die een veel kleiner verschil voorspelt.

**Olsthoorn, T.N. (1998)** *Waarom zijn de  $kD$ -waarden rond pompstations altijd hoger? Een nader analyse.*

Het model van Olsthoorn is een andere variatie op het thema van middeling van  $kD$ -waarden van verschillende gebieden en de geometrie van de stroming. Het moet daarbij dan ook worden opgemerkt dat als men een voldoende smalle kolom uit een willekeurig heterogeen pakket 'snijdt', deze altijd gelaagd is.