
Waarom zijn kD -waarden rond pompstations altijd hoger?

Een nadere analyse

T.N. Olsthoorn

Onder bovenstaande titel sneed De Lange (1996) een onderwerp aan dat gezien twee heftige reacties in dit blad de gemoederen behoorlijk bezig hield. Het onderwerp is intrigerend, omdat het zou impliceren dat pompproeven verkeerde informatie leveren en we er dus fundamenteel anders naar zouden moeten gaan kijken. Omdat ik aanvankelijk ook niet precies wist wat ik van het verschijnsel moest denken, heb ik het effect nu maar eens zelf onderzocht met een eenvoudig spreadsheet-model. Dit model, in Excel 97, is voor iedereen beschikbaar via e-mail.

Het spreadsheet-model stelt een verticale doorsnede voor, verdeeld in 20 kolommen en 10 lagen. Ik koos 25 m voor de kolombreedte en 2,5 m voor de laaghoogte. Vervolgens gaf ik elke cel een willekeurige k -waarde tussen 0 en 20 m/d. Om de lensstructuur van de grond te simuleren heb ik de k -waarden daarna vervangen door het gemiddelde van 5 horizontaal aan elkaar grenzende kolommen. Dit geeft een horizontale correlatie, een lenskarakter.

Een vaste stijghoogte aan beide uiteinden van het model zorgt voor de stroming. Zoals verwacht varieert de uit- in instroming door de gelaagdheid aanzienlijk over de hoogte van het model. Vanwege de continuïteit is de totale horizontale volumestroom overal hetzelfde.

We kunnen nu het doorlaatvermogen zowel meten als berekenen. Het berekende doorlaatvermogen, kD , is eenvoudig de som van de kD 's van de afzonderlijke laagjes in een kolom. De gemeten kD is gelijk aan de stroming door het model gedeeld door de gemiddelde horizontale stijghoogtegradiënt over elke kolom. Dit laatste is als het ware het resultaat van een pompproef.

Als het nu waar is dat door de gelaagde bodem bij de pompput altijd een hogere kD -waarde wordt gemeten, dan zouden de 'gemeten' kD aan beide modelranden groter zijn dan de 'berekende'. Uit al mijn experimenten blijkt echter dat er geen verschil is.

De eerlijkheid gebiedt te vermelden dat De Lange (1996, zie zijn figuur 3) van een bijzondere doorlatendheidsstructuur uitgaat, waarbij steeds gebiedjes met een hoge doorlatendheid, zonder onderlinge verbinding, zijn ingebed in een matrix met een geringe doorlatendheid. Schematisch ziet de doorsnede er dan uit als een bakstenen muur, waarbij de bakste-

Dr.ir. T.N. Olsthoorn is werkzaam bij Gemeentewaterleidingen Amsterdam, Vogelenzangseweg 21, 2114 BA Vogelenzang; e-mail: t_olsthoorn@csi.com of: t.olsthoorn@gw.amsterdam.nl.

nen de gebiedjes met hoge K -waarde en de voegen de matrix voorstelt met geringe doorlatendheid k . Kenmerkend voor deze situatie is dat elk waterdeeltje verplicht afwisselend door goed en door slecht doorlatend materiaal stroomt.

Om te begrijpen hoe één en ander tot stand komt, grijp ik terug op het schematische plaatje van De Lange (1996, figuur 3), namelijk de bakstenen muur. Om gemakkelijk in te zien hoe het water van links naar rechts door zo'n bodem stroomt, stelle men zich de doorsnede als voldoende hoog voor, zodat we geen last hebben van boven- en onderranden. De stroming blijft echter gemiddeld horizontaal.

In deze situatie zijn de vlakken die de 'bakstenen' horizontaal middendoor snijden symmetrievlakken. Dit geldt ook voor de vlakken die de verticale voegen verticaal doorsnijden. Snijden we een stuk uit deze 'muur' tussen twee van zulke horizontale en verticale symmetrievlakken, dan krijgen we een basis-stroom'unit'. De hele doorsnede is opgebouwd uit dit soort units en de stroming is in elke unit dezelfde. Het is dan ook voldoende om de stroming in één zo'n unit te bestuderen.

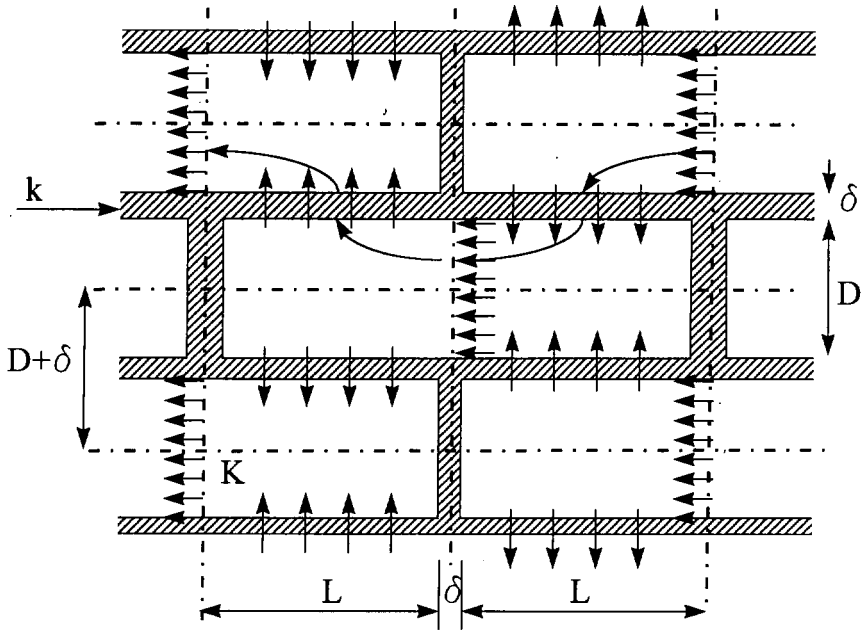
In figuur 1, voorstellende een stukje van de verticale doorsnede met baksteenstructuur, geven de horizontale pijlen de in- en uitstroming van de units aan. De verticale pijlen geven de gedwongen passage van de horizontale voeg in elk van de units aan. Naarmate L groter wordt ten opzichte van D dragen de verticale voegen minder bij aan de weerstand; het water stroomt eromheen als waren het obstakels met slechts een lokaal effect.

We zien dus dat, behoudens de verwaarloosde passage door de verticale voegen, de volledige volumestroom telkens de horizontale voeg moet passeren! Dit levert onvermijdelijk een zekere weerstand op, die de 'gemeten' kD verlaagt t.o.v. de 'berekende'. Deze weerstand wordt volledig verwaarloosd wanneer de kD wordt bepaald als de som van de bijdragen van de laagjes, zoals bij korrelanalyses op basis van boorprofielen.

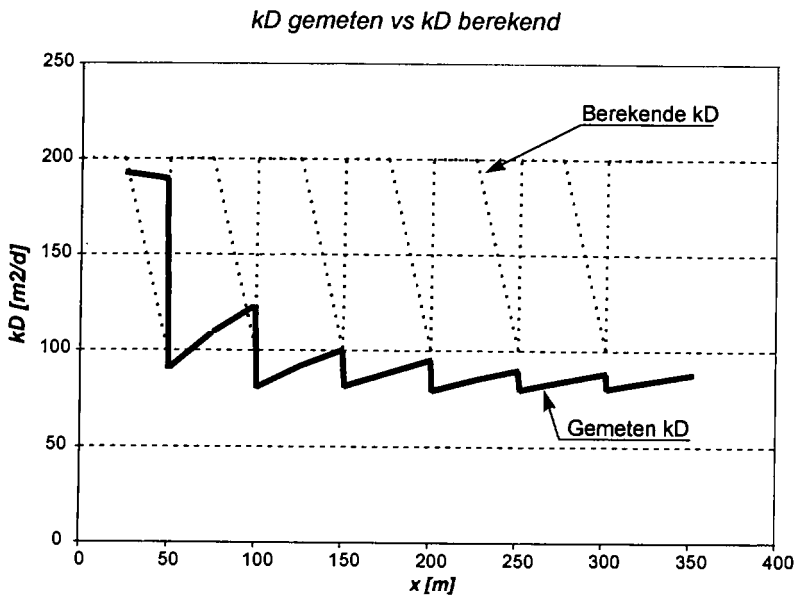
In tegenstelling tot de afleiding van De Lange (1996) zijn de (halve) units dus niet parallel geschakeld maar steeds in serie met een horizontale voeg ertussen (zie de stroomlijn in figuur 1). De verticale weerstand in het profiel mag niet worden verwaarloosd. *Dupuit gaat hier dus niet op!* Dit geeft tevens antwoord op de vraag van Van der Moot (1997a, pag 52).

De precieze stroming door zo'n unit is gemakkelijk met een spreadsheet of een geschikte analytische oplossing of ander model te simuleren. Hoe de stroomlijnen exact lopen hangt af van de verhouding tussen L , D , d , K en k met $k \ll K$. Om een idee te krijgen van de invloed van deze factoren, kunnen we ook een heel eenvoudige formule opschrijven voor het horizontale stijghoogteverlies over een basisunit. We verwaarlozen daartoe de stroming door de verticale voegen. (We nemen dus aan dat de doorlatendheid van de verticale voegen nul is.) We verwaarlozen voorts de verticale weerstand binnen de goed doorlatende 'bakstenen' (Dupuit) en de horizontale stromingscomponent in the horizontale voegen. Voor de stromingsweerstand van een basisunit geldt dan:

$$\frac{\Delta\phi}{Q} = \frac{L}{KD} + \frac{\delta}{kL}$$



Figuur 1: Deel van de doorsnede met baksteenstructuur. De 'bakstenen' hebben een grote doorlatendheid K (m/d) en afmetingen $2LD$. De 'voegen' hebben dikte δ (m) en kleine doorlatendheid k (m/d). Tussen elk paar met streepstippellijnen aangegeven symmetrielijnen bevindt zich een basisunit bestaande uit 'twee halve bakstenen boven elkaar'. De hoofdstroom is aangegeven met pijlen. Ook is schematisch een stroomlijn weergegeven.



Figuur 2: Verloop van het berekende doorlaatvermogen, 'kD', (als som van de bijdragende laagjes) en van het 'gemeten' doorlaatvermogen als in de tekst beschreven $Q/[(\phi_x - \phi_0)/x]$.

waarin Q de volumestroom door een basisunit, $\Delta\phi$ het stijghoogteverval over een basisunit en L , D en δ zoals in fig. 1 aangegeven. KD is dan het berekende doorlaatvermogen van de unit. Het 'gemeten' doorlaatvermogen, aangegeven door κD , bedraagt uiteraard $Q \frac{L}{\Delta\phi}$,

zodat

$$\frac{L}{\kappa D} = \frac{L}{KD} + \frac{\delta}{kL}$$

Na enig omwerken verkrijgen we de verhouding tussen de 'berekende' en 'gemeten' doorlatendheid als functie van drie verhoudingen, namelijk die tussen de twee materiaaldoorlatendheden en twee geometrische verhoudingen:

$$\frac{K}{\kappa} = 1 + \frac{K \delta D}{k L L}$$

Kiezen we bijvoorbeeld $K = 10$ m/d, $k = 0,1$ m/d, $\delta = 1$ m, $D = 20$ m en $L = 50$ m, dan wordt

$$\frac{K}{\kappa} = 1 + \frac{10 \cdot 1 \cdot 20}{0,1 \cdot 20 \cdot 50} = 1,8$$

Dit is een merkbaar verschil. Ieder kan voor zichzelf een tabel maken met waarden die hij/zij redelijk vindt om de gevoeligheid van de parameters te toetsen.

Deze situatie, de 'bakstenen muur', kan met hetzelfde spreadsheet worden nagebootst, namelijk door aanpassing van de doorlatendheden alsmede van de breedte en de hoogte van de rekencellen. Ik heb dat gedaan en krijg dan inderdaad altijd een gemeten doorlaatvermogen dat kleiner is dan het berekende. Voor de specifieke getallen die hierboven zijn gebruikt wordt in het spreadsheet de verhouding tussen het berekende en gemeten doorlaatvermogen 2,2 in plaats van de berekende waarde 1,8. Dit verschil is toe te schrijven aan de (sterke) vereenvoudigingen die voor bovenstaande afleiding zijn gemaakt.

Een put in deze doorsnede schakelt de nabijgelegen halve units parallel in plaats van serieel (plaats bijvoorbeeld de put precies door de verticale voegen). Dit is de kern van het artikel van De Lange (1996). De afstand waarover de kortsluiting van de laagjes door een put de stroming beïnvloedt, wordt aangegeven door de spreidingslengte, die in dit geval uitgedrukt moet worden in de eigenschappen van de unit:

$$\lambda = \sqrt{KD\delta/k}$$

Bij dezelfde waarden als hiervoor wordt dit $\lambda = \sqrt{10 \times 20 \times 1/0,1} = 45$ m. Dit impliceert dat het effect met een pompproef meetbaar zou moeten zijn, door de kD die is bepaald met waarnemingsputten binnen een straal van circa 50 m van de put te vergelijken met de kD die is bepaald met waarnemingsputten op grotere afstand. (Ik ga niet in op de vele mogelijke complicaties van een dergelijke pompproef en analyse.)

In het spreadsheet kunnen we het doorlaatvermogen meten als

$$\kappa D = Q \frac{x}{\phi_x - \phi_0}$$

Hierbij is Q de door het spreadsheet berekende volumestroom door het model, x de afstand tot de rand van het model met opgegeven stijghoogte ϕ_0 en ϕ_x de over de modelhoogte gemiddelde stijghoogte op afstand x van de modelrand.

Figuur 2 geeft hiervan het grafische verloop. De bovenste zaagtand is de som van de κD 's van de afzonderlijke laagjes. Dit is de berekende κD -waarde. De onderste zaagtand is het gemeten doorlaatvermogen als functie van de afstand tot de modelrand. De zaagtand in de grafiek is het gevolg van de κD -verdeling, die immers om de 50 m over de halve dikte een 1 m dikke verticale voeg heeft met een kleine k (zie figuur 1).

Figuur 2 laat zien dat vlakbij de modelrand (zeg de put) het gemeten doorlaatvermogen de berekende benadert, terwijl op grotere afstanden de gemeten waarde constant wordt en voldoet aan de benaderende formule die hierboven is afgeleid. De berekende verhouding van 1,8 komt goed overeen met het verloop van het 'gemeten' doorlaatvermogen in de grafiek.

Discussie en conclusies

Uit de gegeven analyse blijkt dat het door De Lange (1996) naar voren gebrachte verschijnsel zich voordoet, mits de structuur van het watervoerende pakket overeenkomt met zijn uitgangspunten, namelijk te beschrijven is als gebiedjes van hoge doorlatendheid die zijn ingebed in een matrix met lage doorlatendheid (die stilistisch is te schematiseren als goed doorlatende bakstenen ingebed in slecht doorlatende voegen).

Aangetoond kan worden dat het omgekeerde zich (zij het in zeer geringe mate) voordoet wanneer de structuur bestaat uit slechtdoorlatende bakstenen met goedgeoorlatende voegen.

Als het watervoerende pakket echter anders is opgebouwd, bijvoorbeeld uit gebiedjes met een willekeurig variërende doorlatendheid, dan treedt blijkens mijn spreadsheet-experimenten het verschijnsel niet op. Ik vermoed dat zo'n opbouw althans een watervoerend pakket beter beschrijft. De pakketopbouw (bakstenen of schubbenstructuur) volgens De Lange (1996) zou ik eerder verwachten bij slecht doorlatende pakketten en topsystemen. Ik ben daarom bang dat we de afgeleide verschijnselen in de praktijk niet vaak zullen aantreffen. Het zou althans een uitgebreide studie vergen, waarbij bijvoorbeeld pompproeven getoetst zouden moeten worden aan de resultaten van adequaat gekalibreerde modellen.

Van der Moot (1997, pag 52) geeft een eenvoudige, pragmatische verklaring van de door De Lange (1996) geconstateerde κD -eilandjes op geohydrologische kaarten, namelijk dat men de uit pompproeven bepaalde gemiddelde k -waarde te hoog achtte in vergelijking tot de korrelverdeling en dat men daarom, behalve rond de pompproeflocaties, een lagere waarde heeft gehanteerd.

Bij een watervoerend pakket met een 'baksteenstructuur' is het fundamenteel zo dat het doorlaatvermogen dat bepaald is uit een pompproef rond de put hoger is dan gemiddeld over een groter gebied, maar niet hoger dan de som van de bijdragen van de afzonderlijke laagjes. De verklaring van Van der Moot (1997a, pag 52) geeft dan ook geen antwoord op de vraag waarom de pompproeven een te hoge kD -waarde zouden hebben ten opzichte van de kD die bepaald of geschat werd uit korrelanalyses.

We moeten concluderen, dat je bij pakketten met een uitgesproken baksteenstructuur niet veel hebt aan pompproeven en korrelanalyses als het erom gaat een geschikte kD te vinden voor een groter gebied. Dit is dan het gevolg van de stroming door de slecht doorlatende horizontale voegen.

Met de verklaringen van Van der Moot (1997b, pag 70) waarom de doorlaatvermogens uit pompproeven dan wel zo hoog zouden zijn, ben ik het oneens. Als zij al te hoog zouden zijn, dan kan alleen een nadere analyse van de pompproef, de opzet, uitvoering en de uitwerking daarvan de oorzaak boven water tillen. Dit is wellicht iets voor een afstudeerder, die tegenwoordig veel meer analysemiddelen tot zijn of haar beschikking heeft dan in de vijftiger en zestiger jaren toen die pompproeven zijn uitgevoerd.

Het verdient aanbeveling om de vermeende baksteenstructuur te toetsen aan het nieuwe geologische werk van Bierkens (1994) en Weerts (1996). Het is van belang om te weten in welke omstandigheden bepaalde doorlatendheidsstructuren verwacht mogen worden.

Voorlopig houd ik het er maar op dat pompproeven zo gek niet zijn en dat het lang niet altijd zo zal zijn dat de kD rond een pompproeflocatie hoger is dan verderop. Ik ben benieuwd naar resultaten van toekomstig onderzoek op dit gebied.

Literatuur

- Bierkens, M. (1994)** Complex confining layers: A stochastic analysis of hydraulic properties at various scales; proefschrift Universiteit Utrecht.
- Lange, W. de (1996)** Waarom zijn kD -waarden rondom pompstations altijd hoger?; in: *Stromingen*, jrg 2, nr 3, pag 5–10.
- Moot, N.L van der (1997a)** Reactie op De Lange (1996); in: *Stromingen*, jrg 3, nr 3, pag 52–53.
- Moot, N.L. van der (1997b)** Reactie op De Lange (1996); in: *Stromingen*, jrg 3, nr 4, pag 69–70.
- Weerts J.T. (1996)** Complex confining layers; proefschrift Universiteit Utrecht.