Hatsi-kD

Vuistregels in de hydrologie

Kees Maas

Het is alweer een poos geleden dat de vorige Hatsi-kD verscheen, maar de rubriek is niet opgeheven! Wie een handige vuistregel kent kan hem nog steeds naar de redactie sturen. Zelf liep ik onlangs tegen twee compacte formules aan om in te schatten hoeveel water er lekken kan via:

Lekkende peilbuizen en slecht afgedichte kleilagen

Diepere aquifers zijn van nature redelijk beschermd tegen verontreiniging door menselijk handelen. Ze kunnen echter geïnfecteerd raken via bijvoorbeeld lekkende peilbuizen. Bij het plaatsen van diepe peilfilters is het daarom voorschrift om kleilagen die tijdens het boren gepasseerd worden goed af te dichten. Lekkage treedt soms toch nog op door de moffen van stijgbuizen of via beschadigingen. Om hoeveel water zou het kunnen gaan? Het hangt er natuurlijk vanaf hoe groot het gaatje in de stijgbuis is, en dat is in het algemeen niet bekend. Maar het zou toch wel nuttig zijn om onder een aanname van de grootte van het lek de orde van het lekdebiet te kunnen inschatten. Gaat het om liters of om kuubs per dag?

Vuistregel 76:

De grootte-orde van het lekdebiet door een lekke stijgbuis kan geschat worden met

$$Q_{lek} \approx \Delta\varphi\, k \phi \qquad (1)$$

Q_{lek}	lekdebiet (m^3/d)
$\Delta\varphi$	stijghoogteverschil tussen de aquifer waarin het peilfilter staat en de aquifer waarin het lek zich bevindt (m)
k	doorlatendheid van de aquifer waarin het lek zich bevindt (m/d)
ϕ	diameter van het (cirkelvormig gedachte) lek (m)

Het afdichten van kleilagen gebeurt overigens ook niet altijd even netjes, om het netjes uit te drukken. Voor gaten in kleilagen geldt een iets andere regel:

Vuistregel 77:

De grootte-orde van het lekdebiet door een gat in een scheidende laag kan geschat worden met

$$Q_{lek} = \frac{1}{2}\Delta\varphi\, \bar{k} \phi \qquad (2)$$

Q_{lek}	lekdebiet (m^3/d)
$\Delta\varphi$	stijghoogteverschil tussen de aquifers die door het gat kortgesloten worden (m)
$\bar{k}$	harmonisch gemiddelde van de doorlatendheden van de twee aquifers die door het lek worden kortgesloten (m/d)

$$\overline{k} = 2\frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$

ϕ diameter van het (cirkelvormig gedachte) lek (m)

Aan deze formules liggen allerlei aannamen te grondslag. Twee ervan moet de gebruiker wel kennen: (1) de anisotropie, dat is de verhouding tussen horizontale en verticale doorlatendheid, van de aquifer(s) is 10:1. (2) het lek van de lekke peilbuis zit niet pal naast een sloot.

Hoe kom ik eraan?

Ik behandel eerst de lekke stijgbuis. Een lek in een stijgbuis is een piepklein putje. Omdat het zo klein is, is een omgeving van zeg een paar meter rondom het lek naar verhouding al heel erg groot. Buiten die omgeving heeft het lek haast geen invloed meer op de stijghoogte. Zo'n lek lijkt daardoor net een puntbron in een eindeloos driedimensionaal poreus medium. Dat is een heel bruikbare constatering. Een eigenschap van een puntbron in een eindeloos 3D-medium is namelijk dat er een stationaire stromingstoestand mogelijk is zonder dat er voedende grenzen aan te pas komen (als je een constant debiet onttrekt aan een put in een uitgestrekte 2D-aquifer zonder voedende grenzen treedt er nooit een stationaire verlaging op; de stijghoogte blijft eeuwig dalen). Ik mag dus verwachten dat een formule voor het lekdebiet geen parameters nodig heeft die iets te maken hebben met de ligging en afmetingen van sloten, drains, et cetera.

Het water dat instroomt via het lek moet er weer uitstromen via het waarnemingsfilter. Ik kan er wel van uitgaan dat de uitstroomweerstand van het waarnemingsfilter, met zijn veel grotere oppervlakte, verwaarloosbaar is ten opzichte van de instroomweerstand van het lek. Parameters van het waarnemingsfilter spelen dus ook geen rol, evenmin als de hydraulische eigenschappen van het pakket waar het water naartoe stroomt.
Welke parameters kunnen wel van belang zijn? Vanzelfsprekend het lekdebiet Q_{lek} zelf, en het verschil in stijghoogte $\Delta\varphi$ tussen de aquifers die door het lek worden kortgesloten. Verder de diameter van het lek en natuurlijk de doorlatendheid k van de aquifer waarin het lek zich bevindt. Meer kan ik niet bedenken. Met zo weinig parameters moet er wel iets eenvoudigs uitkomen...

Om verder te komen beschouw ik de stijghoogte rondom een hypothetisch bolvormig putfiltertje in een oneindig uitgestrekt poreus medium. Op afstand r van het middelpunt van de bol is het specifieke debiet

$$q(r) = -\frac{Q}{4\pi r^2} \qquad (5)$$

Dit is met een minteken omdat een onttrekking Q een stroming tegen de richting van r in veroorzaakt. Volgens Darcy is

$$q(r) = -k\frac{d\varphi}{dr} \qquad (6)$$

waarin φ de stijghoogte is. Eliminatie van $q(r)$ geeft

$$\frac{Q}{4\pi r^2} = k\frac{d\varphi}{dr} \tag{7}$$

waaruit volgt dat

$$\varphi = -\frac{Q}{4\pi kr} + C \tag{8}$$

C is een integratieconstante. Dit is natuurlijk een bekend resultaat, dat ik ook ineens had kunnen presenteren. Er blijkt uit dat er bij een constante onttrekking inderdaad een stationaire verlagingstoestand bestaat, ook al vindt er in de verre omtrek geen voeding plaats. Op "grote" afstand van de bron is de eerste term in het rechterlid dus 0. De stijghoogte φ is daar gelijk aan de stijghoogte φ_1 van de aquifer waar het lek in zit, dus $C = \varphi_1$. Met φ_1 bedoel ik de stijghoogte die in een peilbuis waargenomen zou kunnen worden. Laat het bolvormige filtertje straal R hebben, dan is de stijghoogte binnen het filter

$$\varphi = -\frac{Q}{4\pi kR} + \varphi_1 \quad (r < R) \tag{9}$$

Omdat de weerstand tegen uitstroming verwaarloosbaar is, is dit tevens de stijghoogte φ_2 van het pakket waarin het lekwater verdwijnt. Ik krijg dus

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi = -\frac{Q}{4\pi kR} \tag{10}$$

waarin $\Delta\varphi$ het stijghoogteverschil is tussen de twee aquifers die door het lek worden kortgesloten. Omdat er geen misverstand zal bestaan over de richting van de lekstroom kan ik het minteken in (10) wel weglaten. Ik krijg dan

$$Q = 4\pi\Delta\varphi kR \tag{11}$$

Een lek zal waarschijnlijk niet bolvormig zijn, maar hoe het er wel uitziet weet ik niet. Laat me aannemen dat het een cirkel is met doorsnede ϕ; dat is wellicht wat realistischer. De oppervlakte $\frac{1}{4}\pi\phi^2$ van de cirkel neem ik gelijk aan de oppervlakte $4\pi R^2$ van het bolvormige filtertje, zodat $\phi = 4R$. Dit in (11) geeft

$$Q = \pi\Delta\varphi k\phi \tag{12}$$

Hier staat de eerste vuistregel al, maar met een factor π ervoor. Die laat ik weg, om rekening te houden met anisotopie. Mijn onderbouwing is als volgt:

Tot hier toe ging ik uit van een isotroop medium, wat wil zeggen dat de doorlatendheid geen richtingafhankelijkheid kent. Vuistregel 33 (Stromingen 4/4, 1998) geeft aan hoe een formule voor een isotroop 3D-medium gecorrigeerd kan worden voor anisotropie. De correctie is in dit geval niet helemaal eenduidig, omdat de oriëntatie van het lek (horizontaal dan wel verticaal) ook meespeelt, maar uitgaande van een horizontaal lek komt het erop neer dat (12) vervangen moet worden door

$$Q = \pi \Delta\varphi \sqrt{k_h k_v} \phi \tag{13}$$

waarin k_h en k_v de horizontale, resp. verticale doorlatendheid zijn. Over de anisotropie van Nederlandse aquifers is bedroevend weinig bekend, maar het ligt voor de hand dat de verticale doorlatendheid kleiner is dan de horizontale.
Bij gebrek aan beter wordt vaak aangenomen dat $k_h : k_v = 10 : 1$. Dat komt mooi uit, want $\sqrt{10} \approx \pi$, zodat $\pi \sqrt{k_h k_v} \approx 1$. Dit verklaart het verdwijnen van de factor π uit (12).

Hiermee is de eerste vuistregel onderbouwd. Resteert nog om aannemelijk te maken dat ik van een oneindig medium mag uitgaan. Dit volgt gevoeglijk uit (8). Stel dat het hypothetische bolvormige filtertje een straal van een centimeter heeft. Voor een lekkende mof lijkt me dat overigens al vrij groot. Laat $\Delta\varphi$ een meter zijn. Dan is op een meter afstand nog maar 1 centimeter over van de verlaging die door de lekkage veroorzaakt wordt. Zolang er binnen die afstand geen drain of sloot te bekennen is, is de benadering dus wel te rechtvaardigen. Het gaat pas mis als het lek zich werkelijk pal naast een sloot bevindt. In dat geval onderschat de vuistregel het lekdebiet.

De tweede vuistregel, die voor een lek in een kleilaag geldt, is eenvoudig uit de eerste af te leiden. Het lek zit nu op de bodem van de aquifer waar het water uit weglekt. Ik neem hem weer cirkelvormig met diameter ϕ. Op grond van (12) weet ik meteen dat

$$Q = \frac{1}{2} \pi \Delta\varphi_1 k_1 \phi \tag{14}$$

$\Delta\varphi_1$ is het verschil tussen de stijghoogte in het lek en stijghoogte op enige afstand in de aquifer waar het water uit weglekt, k_1 is de doorlatendheid van die aquifer en de factor 1/2 komt erin doordat ik nu met een half-oneindig medium te maken heb. In tegenstelling tot de lekke peilbuis heb ik deze keer aan de uitstroomkant wel een weerstand om rekening mee te houden. Het stromingspatroon is weer radiaal, dus overeenkomstig (14) kan ik zeggen dat

$$Q = \frac{1}{2} \pi \Delta\varphi_2 k_2 \phi \tag{15}$$

$\Delta\varphi_2$ is het verschil tussen de stijghoogte in het lek en de stijghoogte op enige afstand in de aquifer die het lekwater ontvangt, terwijl k_2 de doorlatendheid van die aquifer is. Uit (14) en (15) volgt dat

$$\Delta\varphi_1 k_1 = \Delta\varphi_2 k_2 \tag{16}$$

Als ik het stijghoogteverval in het lek zelf verwaarloos, zijn $\Delta\varphi_1$ en $\Delta\varphi_2$ samen gelijk aan het stijghoogteverschil $\Delta\varphi$ tussen de kortgesloten aquifers, dus

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 \tag{17}$$

Uit(14) , (16) en (17) volgt dan dat

$$Q = \frac{1}{2}\pi\Delta\varphi\frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}\phi \tag{18}$$

De factor π vervalt weer, om te corrigeren voor anisotropie.

Dit onderbouwt de tweede vuistregel. In het algemeen zal een gat in een kleilaag wel een grotere lekkende doorsnede hebben dan een lek in een peilbuis, dus de aanname van een oneindig 3D-medium is twijfelachtiger. Laat de straal van het hypothetische bolvormige filter bijvoorbeeld 10 centimeter zijn in plaats van 1, terwijl het stijghoogteverschil weer een meter is. Dan is de stijghoogte pas op 10 meter afstand van het lek gereduceerd tot 1 centimeter. 10 meter is al in de grootte-orde van de diktes van aquifers... Maar goed, het is maar een vuistregel.

Verslag van het NHV-symposium 29 april 2010: 'Meten is weten, en weet wat je moet meten'

■ Matthijs Bonte (KWR Watercycle Research Institute)

Op 29 april 2010 werd op het provinciehuis van Overijssel de NHV-voorjaarsbijeenkomst gehouden met als thema ‘hydrologische monitoring’. Het was een druk bezochte dag met een volledig volgeboekt symposium. Monitoring in hydrologie is blijkbaar een onderwerp dat leeft. Het symposium bestond uit een ochtend- en middagdeel met elk twee parallelle sessies. De sessies gingen in op a) hoogfrequent meten, b) meten voor de kaderrichtlijn water, c) meten van de freatische grondwaterstand, en d) verdrogingsmonitoring.

Hoogfrequente monitoring

De sessie over hoogfrequente monitoring werd ingeleid door Frans van Geer (Universiteit Utrecht) die terugkeek naar het begin van de grondwatermonitoring in Nederland. Eind negentiende eeuw werd in toenemende mate het belang van een goede waterhuishouding voor de landbouw en een veilige drinkwatervoorziening ingezien. Een leger vrijwilligers trok op (of rond) de 14e en 28ste van de maand ten velde om de grondwaterstand te meten zodat het hydrologische systeem gekarakteriseerd kon worden. Het handmatig tweemaandelijks meten was in vrijwel de gehele 20ste eeuw dé standaard methode, maar de laatste jaren worden steeds vaker drukopnemers en dataloggers gebruikt om hoogfrequent grondwaterstanden te meten.

De eerste spreker, Mark Emke (Royal Haskoning), ging in op wat hoogfrequente data aan meerwaarde bieden ten opzichte van de traditionele tweemaandelijkse serie. Aan de hand van voorbeelden van Groot Zandbrink, de uiterwaarden van de IJssel, de Bethunepolder en de provincie Utrecht illustreerde hij dat je informatie mist als je 14-daags meet. Een vraag die Mark hierbij stelt is hoe we deze data moeten verwerken en interpreteren. Moet er niet een nieuwe standaardwijze van data-interpretatie komen, analoog aan de GxG benadering, voor hoogfrequente reeksen?

Jos von Asmuth (KWR Watercycle Research Institute) ging in zijn presentatie in op de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van drukopnemers. Aanleiding van zijn onderzoek was een te hoog ingehangen (dus droge) drukopnemer. Jos vroeg zichzelf af hoe nauwkeurig drukopnemers nou eigenlijk zijn en vergeleek de meetreeks van de ‘droge’ drukopnemer met een barometrische drukopnemer op dezelfde locatie én luchtdrukdata van het KNMI. Hieruit bleek het verschil tussen de door het KNMI gemeten luchtdruk en de beide drukopnemers met de tijd toe te nemen. Naast dit verloop blijken er maar liefst zeven andere typen fouten in de drukmeting op te kunnen treden, die samen op kunnen lopen tot enkele decimeters. Peter Westerhuis, algemeen directeur van Schlumberger Water Services Nederland en leverancier van de Diver, gaf aan dat hij graag samen met de NHV de problemen verder in beeld wil brengen en op zoek wil gaan naar oplossingen. Uitgebreide informatie over deze materie te vinden in het recent verschenen rapport 'Over de kwaliteit, frequentie en validatie van druksensorreeksen'. Uitgebreide informatie over deze materie is te vinden in het recent verschenen rapport is te vinden op www.menyanthes.nl onder 'publications'.

Monitoring voor de Kaderrichtlijn Water (KRW)

De eerste spreker, Esther Wattel (RIVM), ging in op het monitoringsprogramma grondwaterkwaliteit ten behoeve van de KRW. Esther liet in haar presentatie zien dat voor een goede toestand van oppervlaktewateren juist de kwaliteit van het ondiepe grondwater cruciaal is. Dit terwijl het huidige KRW-meetnet peilbuizen bevat die op 10 en 25 meter onder maaiveld meten. Haar eerste conclusie was dan ook dat het freatische grondwater moet worden meegenomen in KRW-monitoring. Vervolgens liet ze zien dat meer meetpunten nodig zijn dan nu worden gebruikt om een betrouwbare uitspraak te doen over de grondwaterkwaliteit.

De volgende presentatie, door Martin Knotters (Alterra), ging in op de verschillen tussen de Monitoring Clean Water Act (USA) en de KRW (EU). Als je deze twee meetprogramma’s naast elkaar zet, valt op dat het KRW-monitoringprogramma niet is opgezet volgens een kanssteekproef. Dit betekent dat je geen zuivere schatting kan geven over de toestand van het grondwatersysteem. Om een statistisch onderbouwde schatting van de toestand van een watersysteem te kunnen geven die een bekende nauwkeurigheid heeft, moet een meetprogramma opgezet worden aan de hand van een kanssteekproef.

De discussie na de presentaties bevestigde de noodzaak om meer statistiek in te bouwen in monitoringsprogramma’s dan nu vaak het geval is. Wanneer de actuele toestand en trend uit waterkwaliteitsvariabelen bepaald moet worden, is een kanssteekproef een vereiste.

Monitoring van de freatische grondwaterstand

In 2008, 2009 en 2010 vond in H_2O en Stromingen een interessante discussie plaats over het meten van de freatische grondwaterstand. Het leek erop dat verdroging in veel gevallen verkeerd berekend was doordat peilbuizen te diep waren geplaatst. Bas Worm (Waterschap Regge en Dinkel) illustreerde de impact van deze discussie, die leidde tot Kamervragen. Jan van Bakel (de Bakelse Stroom) ging in zijn presentatie in op het effect van variaties in de bodemopbouw en verticale gelaagdheid op het potentiaalverloop in de ondiepe ondergrond. Hieruit leidde hij af wat het effect is van de plaatsingsdiepte van een freatische peilbuis op de meetwaarde en het verschil tussen de waarde die met deze peilbuis wordt gemeten en de werkelijke freatische grondwaterstand. Significante verschillen (>0,05 m) zijn volgens Jan te verwachten in gebieden waar de drainageweerstand boven de ontwateringsbasis groter is dan 25 dagen en waar sprake is van een aanzienlijke flux. Bram de Vos gaf een overzicht van een interessant project dat bij Alterra is gestart waarin de juiste meting van freatische grondwaterstanden onder de loep wordt genomen.

Wiebe Borren (Deltares) beschreef in zijn presentatie mogelijke alternatieven voor ‘harde’ metingen van de freatische grondwaterstand. Hij pleitte voor het meer gebruik maken van ‘zachtere’ data van de freatische grondwaterstanden in combinatie met peilbuismetingen. Een voorbeeld hiervan zijn vlakdekkende GxG kaarten, gebaseerd op een GxGs geschat uit hydromorfe kenmerken (roest- en reductievlekken) in boringen gecombineerd met de lokale maaiveldhoogte en intensiteit van sloten of begreppeling.

Monitoring van verdroging

Dick Brus (Alterra) en Han Runhaar (KWR Watercycle Research Institute) gaven presentaties over het ontwerp van monitoringsnetwerken. Beide heren beschreven hun eigen aanpak bij het ontwerp van een meetprogramma: Dick Brus gebruikt statistiek om een meetnet te ontwerpen middels een kanssteekproef terwijl Han Runhaar de processen probeert te begrijpen die verdroging veroorzaken en gericht bepaalde parameters wil meten. Uit de discussie achteraf kan worden geconcludeerd dat er geen sprake is van een ‘scholenstrijd’, en dat de keuze voor een bepaalde benadering mede afhangt van de situatie en meetvraag. Als je het areaal van een bepaald natuurdoeltype wilt karteren of de chemische staat van het grondwater wilt karakteriseren, is een statistisch onderbouwd meetnetontwerp geschikt. Maar als je wilt weten waarom een bepaald gebied verdroogt, kun je meestal niet volstaan met een ruimtelijke steekproef van metingen aan één relevante variabele. Je zult dan rekening moeten houden met meerdere variabelen die elkaar onderling beïnvloeden (stijghoogte, freatische grondwaterstanden, waterkwaliteit, standplaatscondities, vegetatiesamenstelling).

Uit de discussie na de presentaties kwam verder naar voren dat provinciale bestuurders vaak een onrealistische verwachting hebben van verdrogingsmonitoring. Het liefst zien zij van hun natuurgebieden ieder jaar een vlakdekkende verdrogingskaart , met schaal 1:10.000 en gebaseerd op peilbuismetingen. Gezien de complexiteit van het verdrogingsprobleem is dat echter niet haalbaar en zal ofwel de ambitie verlaagd moeten worden ofwel de meetinspanning moeten worden vergroot.

Samenvattend

Uit de presentaties komt duidelijk naar voren dat zowel proceskennis als statistiek moet worden meegenomen bij het ontwerp van een meetnet. Proceskennis is nodig om te weten welke parameters je moet meten (bijvoorbeeld bij verdroging) of hoe diep je een peilbuis moet plaatsen (freatische grondwaterstand of kwaliteit). Statistiek is nodig om te zorgen dat je meetnet voldoende meetpunten bevat om een betrouwbare uitspraak te doen en om de betrouwbaarheid te kwantificeren. Verder worden nieuwe meetvormen zoals drukopnemers tegenwoordig massaal ingezet. Ondanks dat in principe veel meer informatie uit hoogfrequente dan uit tweemaandelijkse reeksen te halen valt, blijkt de nauwkeurigheid van de verzamelde data in de praktijk soms nog flink tegen te vallen.

U wordt vriendelijk uitgenodigd om op onze LinkedIn-groep over dit onderwerp verder te discussiëren.

Mandelbrot en Darcy

■ Harry Boukes

Als we over 2010 een lijstje opmaken van belangrijke personen die ons dat jaar zijn ontvallen, mag de naam van de wiskundige Benoît Mandelbrot daarin niet ontbreken.

De naam Mandelbrot zal in ons collectief geheugen vooral verbonden worden met de door hem benoemde fractals. Het denken over fractals begon met de vraag hoe groot de omtrek van Groot-Brittannië was. Het blijkt dat het antwoord afhankelijk is van de lengte van de maatlat. Wie grofweg vanaf een kaart meet met een maatlat die tientallen kilometers groot is, meet een kleinere omtrek dan degene die elk inhammetje bij de meting betrekt. Hoe gedetailleerder men kijkt, des te groter de omtrek. Mandelbrot vroeg zich af waar dat eindigde. Uiteindelijk kan de kustlijn om de randen van alle zandkorrels heen worden getrokken en opgemeten, met als praktische beperking dat die kustlijn met de golfslag elke seconde een andere vorm heeft.

Mandelbrot heeft processen bestudeerd en wiskundig benaderd waarbij het (meet)resultaat afhankelijk is van de schaal waarop er naar gekeken wordt. Hij kwam tot formuleringen waarbij vormen zich oneindig herhalen: als een bloemkool, op het eerste gezicht een witte bol, maar bij nadere beschouwing opgebouwd uit stronken die zelf ook weer uit soortgelijke substronken zijn opgebouwd.

In de jaren tachtig was Mandelbrot wetenschappelijk hot. Computers konden zijn berekeningen niet alleen uitvoeren, maar ook nog eens prachtig grafisch weergeven. Met mijn toenmalige KIWA-collega's hebben we ook eerst zitten spelen met plaatjes en vervolgens lopen filosoferen in hoeverre een k-waarde een fractale parameter is.

De k-waarde is uitgevonden door Darcy. Bij zijn stromingsproeven beschouwde hij een kolom grond, waarover hij een potentiaalverschil aanbracht. Door de stroming te meten, kon er een weerstandswaarde worden berekend, of in het geval van Darcy: een geleidingsvermogen, zijnde de reciproke van de weerstand. Door met één potentiaalverschil te werken, één flux te meten, werd de k-waarde een integrale beschrijving van alle kronkelwegen waarlangs de waterdeeltjes zich binnen die betreffende kolom grond tussen de zandkorrels door moeten worstelen. Als een watermolecuul pal langs de wand van een zandkorrel stroomt, zal het watermolecuul hierbij weerstand ondervinden. Hoe verder van de wand, hoe geringer die weerstand. Water stroomt door een dikke buis makkelijker dan door een smal rietje. Zo is ook voor te stellen dat water door de grote poriën van grind makkelijker stroomt dan door de kleine poriën van fijn zand of (nog erger) kleiplaatjes. Het poriënvolume zelf hoeft daarbij niet eens verschillend te zijn: bepalend is de nabijheid van de 'buis'wand.

Op deze manier kunnen we voor alle mogelijke grondkolommen Darcy-metingen doen. In de praktijk van de waterleiding-hydrologie is dit een wat te kleinschalige meting. We hebben te maken met zandpakketten van vaak tientallen meters dik, en dan is het moeilijk om daar één grote of een combinatie van kleinere kolomproeven omheen te bouwen. Nu konden we daar vrij pragmatisch mee omgaan, ervan uitgaande dat al die Darcy-kolommen eenduidige weerstanden voorstelden. Een pakket is dan te beschouwen als een stelsel parallel en/of in serie geschakelde weerstanden. Op die manier kan de doorlatendheid van een watervoerend pakket beschreven worden met een kD-waarde. Zo'n kD-waarde kan middels een pompproef in één keer worden bepaald zonder de k-waarden van alle afzonderlijke zandlaagjes te hoeven kennen. Deze werkwijze heeft er toe bijgedragen dat we veel over onze bodemopbouw en grondwaterstromingen te weten zijn gekomen.

Alleen: in werkelijkheid is er natuurlijk geen sprake van homogeniteit. Sowieso is dat niet het geval op het schaalniveau van afzonderlijke bodemdeeltjes. Als bodemdeeltjes bij benadering bolletjes zijn, stroomt het water niet door kanaaltjes, maar hopt het van de ene ruimte tussen de bodemdeeltjes naar de andere. Juist om al dit soort details buiten beschouwing te laten is het slim geweest van Darcy om te denken in termen van een k-waarde.

Maar wat gebeurt er nu als Darcy een zandmonster had gestoken waar, zonder dat hij het waarnam, een leemlaagje in zat? Onvermijdelijk wordt dan de weerstand van het monster gedomineerd door het leemlaagje, maar toegewezen aan het zandige materiaal. En wat als dit leemlaagje nu eens niet over de hele oppervlakte van de kolom aanwezig is, maar bijvoorbeeld alleen in de linkerhelft? Op dat niveau moet het water zich vooral door de rechterhelft heen wurmen. Dus ook op het niveau van de Darcy-kolommen kunnen zich heterogeniteiten voordoen.

Op het niveau van watervoerende pakketten zien we ook heterogeniteiten. Iedereen die ooit een pompproef heeft uitgewerkt op basis van meerdere waarnemingsbuizen, kent de teleurstelling dat een waarde voor de ene buis lang niet altijd wordt bevestigd door een bij een andere buis bepaalde waarde. Ooit heb ik een uitwerking voor een pompproef moeten teruggeven, omdat ik er helemaal niet uitkwam. Van eind 1996 tot eind 1998 werd in Stromingen een door Wim de Lange geïnitieerde discussie gevoerd of een uitwerking van een pompproef nabij de pompput een hogere kD-waarde oplevert dan op grotere afstand. In de uiteindelijk afsluitend gebleken bijdrage van Theo Olsthoorn wordt aangegeven dat er bodemstructuren te verzinnen zijn waarbij het fenomeen zich voordoet, maar dat het lang niet overal zo zal zijn. Theo noemt als voorbeeld een baksteen-structuur die inderdaad zeker in Nederland niet erg vaak zal voorkomen, maar een structuur van gelaagde sediment-bedden geeft volgens mij een zelfde effect als de baksteen-structuur. In een land wat opgebouwd is uit zee- en riviersedimenten lijkt me zo'n opbouw allerminst theoretisch.

Dus op de niveaus van afzonderlijke korrels, van kolomproeven en van watervoerende pakketten hebben we te maken met heterogeniteiten, die qua aard wel eens hetzelfde zouden kunnen zijn. In dat geval zouden we die heterogeniteit, en niet zozeer de k-waarde zelf, kunnen beschouwen als een fractale parameter. Die heterogeniteit speelt bijvoorbeeld bij het bepalen van een dispersielengte voor een kwaliteitsmodellering. In mijn ervaring is dat inderdaad een schaal-afhankelijke parameter. Onderzoekers aan kolommen vinden dispersielengtes in de orde van millimeters tot centimeters, terwijl ik bij een modelstudie met cellen van 100 bij 100 meter een dispersielengte van tientallen meters bepaalde. Zodra ik vervolgens in vertikale richting de laagopbouw binnen het watervoerend pakket ging differentiëren, liep de benodigde dispersielengte met sprongen terug.

Verder dan dit gedachtenexperiment is het idee nooit gekomen. Mandelbrot kreeg overigens de nodige oppositie tegen zijn ideeën, onder meer omdat de fysieke neerschaalbaarheid eindig is, en de wiskundige niet. In het geval van de k-waarde, is het niet mogelijk om kleiner te kijken dan de schaal van afzonderlijke water-atomen, terwijl de wiskundige benadering ervan ook dan nog heterogeniteiten berekent. Dit was voor fysici een aanleiding om de Mandelbrot-theorie als onwaar af te schieten. Het lijkt me productiever om de schaalniveaus te definiëren waarbij het fractale denken als schematisatie een werkbare benadering van de werkelijkheid is. Eigenlijk net zoals we bij de k-waarden erg profiteren van de schaalniveaus waarop het wel werkt.

Een recent college van Mandelbrot kunt u bekijken via:
http://www.ted.com/talks/lang/dut/benoit_mandelbrot_fractals_the_art_of_roughness.html