
Doorlatendheidsmetingen: Absolute noodzaak of luxe uit het verleden ?

A.B. Pomper
H.J.T. Weerts

Zo lang hydrologen de stroming van het grondwater bestuderen, worden ze geconfronteerd met het probleem van de bepaling van de verzadigde doorlatendheid¹ van de ondergrond. Vele meetmethoden zijn in de loop van de jaren ontwikkeld en—vaak naast elkaar—toegepast.

*De frustratie waarmee menig hydroloog echter blijft zitten, is dat de metingen niet empirisch te toetsen zijn; de verkregen getallen kunnen niet worden gecontroleerd aan de werkelijkheid. De uitkomsten van verschillende bepalingmethoden vertonen vaak ook grote verschillen (wat des te verwarrender is). Het antwoord van menig hydroloog is dan ook een blind vertrouwen in de eigen metingen en znodig bijstellen. Vooral het in gebruik komen van steeds geavanceerdere computermodellen heeft dat laatste in de hand gewerkt. Het resultaat is dan vaak dat via **trial and error** de meest aanvaardbare waarden worden gezocht.*

Voor regionale studies zijn er geen bezwaren tegen een dergelijke werkwijze. Hier komt bij dat in Nederland in de loop van de laatste eeuw enorm veel gegevens beschikbaar zijn gekomen, die door moderne methoden van archivering—GIS, BIS, REGIS enz.—gemakkelijk beschikbaar zijn. Bovendien vragen de meeste regionale modellen globale informatie over hydrologische parameters. De ervaren (geo)hydroloog heeft daarvoor vaak al voldoende inzicht in de geohydrologische opbouw van een gebied. De rubriek 'Hatsi-kD' in 'STROMINGEN' geeft daaraan ook voeding.

Anders wordt het als er sprake is van lokale studies op perceelsniveau, waar in het kader van b.v. milieustudies steeds meer vraag naar is. Ook bij hydrologische systeemanalyse is er steeds meer behoefte aan detailinformatie over de geohydrologische grootheden in de ondergrond. Bij dit laatste komt de problematiek van de anisotropie en heterogeniteit van het sediment om de hoek kijken, waar bij veel regionale studies stilzwijgend aan voorbij wordt gegaan.

Dit artikel laat een aantal van de gebruikte methoden de revue passeren, uitmondend in een beschouwing over het bepalen van doorlatendheden van grondmonsters. Daarbij gaat het er vooral om of het uitvoeren van dergelijk onderzoek in de huidige tijd van bezuinigen wel absoluut nodig is of dat volstaan kan worden met eenvoudiger en vooral goedkoper onderzoek. De vraag is dan of met eenvoudiger onderzoek de kwaliteit wel gegarandeerd wordt. Doel is een discussie in gang te zetten over de toekomstige behoefte aan doorlatendheidsonderzoek en het maken van afspraken met betrekking tot standaardmethodes.

De doorlaatfactor k als fysische grootheid

1 Als verder over 'doorlatendheid', 'doorlaatfactor' e.d. wordt gesproken, wordt bedoeld verzadigde doorlatendheid etc.

Water beweegt zich in de ondergrond door de poriën die tussen de grondkorrels aanwezig zijn. Het ondervindt daarbij een weerstand die ontstaat als som van de krachten die het water ondergaat: cohesie tussen grondkorrel en water, wrijving van het oppervlak van de korrel, chemische interactie tussen water en mineraal (colloïdale kracht) enz.. Deze krachten te zamen vormen de hydraulische weerstand die het water door de grond ondervindt. De weerstandswaarde die wordt waargenomen is afhankelijk van bovengenoemde krachten en de door het water afgelegde afstand door het grondmateriaal. In de natuurlijke toestand is de weerstandswaarde meestal in de diverse richtingen verschillend: er treedt *anisotropie* op. De mate van anisotropie hangt sterk samen met de aard van het sediment: ligging van de korrels onderling (chaotisch versus geordend), laaghelling (horizontaal of hellend), enz.

Gemakshalve wordt—vaak onterecht—verondersteld dat in de horizontale richtingen *isotropie* bestaat; tussen de horizontale en verticale richting wordt wel verschil aangehouden.

Deling van de afgelegde weg van het water door de weerstand geeft een waarde die als *doorlaatfaktor* (k) wordt aangeduid, die dus ook in de verschillende richtingen *anisotropie* vertonen (k_x , k_y en k_z). Ook hier wordt gemakshalve alleen onderscheid gemaakt tussen k_v en k_h .

Een kort overzicht van bestaande methoden (voor bepaling van de verzadigde doorlatendheid)

Er is altijd behoefte geweest om deze waarden— k_h en k_v , dus—direkt aan bodemonsters te meten. In feite zou dat het best *in situ* gemeten kunnen worden maar dat is in de praktijk te omslachtig, zodat de monsters naar het laboratorium worden gebracht.

De diverse methoden voor bepaling van de verzadigde doorlatendheid die regelmatig toegepast worden, tonen nogal wat verschillen ten aanzien van de nauwkeurigheid en het invloedsgebied waarvoor de uitkomsten gelden. Tabel 1 geeft een overzicht. Bij de keuze van methoden speelt doel van het onderzoek en beschikbaar budget een belangrijke rol. In ieder geval geeft elke methode gemiddelde waarden binnen het invloedsgebied.

De verschillende methoden hebben gemeen dat er aparte antwoorden worden gegeven op verticale doorlatendheden (scheidende lagen) en/of horizontale doorlatendheden (watervorende pakketten).

Ten aanzien van **pompproeven** kan worden opgemerkt dat er, afhankelijk van de geohydrologische opbouw van een gebied, een grote variatie in inrichting en berekeningsmethoden bestaat. Kruseman en De Ridder (1990) geven een uitgebreid overzicht van bestaande analysemethoden van pompproefresultaten. De keuze van de inrichting van een pompproef en de berekeningsmethode wordt in belangrijke mate bepaald door de opbouw van de ondergrond. Door de zo verkregen kD -waarden te delen door de pakketdikte wordt een waarde verkregen voor de *gemiddelde* k_h -waarde.

De inrichting van grote pompproeven eist hoge investeringen door de benodigde diepboringen. Kostendrukkend is vaak dat tegenwoordig veel pompproeven worden gehouden rond nieuwe waterwinningsputten. Bovendien worden de waarnemingen automatisch en de berekeningen modelmatig verricht, wat zowel tijdbesparing als grotere nauwkeurigheid van de eindresultaten oplevert. Indien slechts informatie wordt vereist voor een lokaal probleem over een beperkte pakketdikte—bijvoorbeeld voor saneringen—kan volstaan worden met geringe onttrekkingsdebieten en ondiepe boringen die betrekkelijk beperkte investeringen vereisen (zgn. 'minipompproeven').

De voormalige Rijksdienst voor de Drinkwatervoorziening (thans RIVM) is ten behoeve van de drinkwatervoorziening in een vroeg stadium begonnen met het aanleggen van een archief, waarin de resultaten van pompproeven in Nederland werden verzameld. Vaak zijn de meetgegevens nog beschikbaar, zodat nieuwe berekeningsmethoden kunnen worden toegepast.

Waterbalansstudies vormen op het ogenblik de meest toegepaste methode, o.a. voor poldergebieden met een gesloten waterbalans en een homogene ondergrond. Met name door het toepassen van geavanceerde computermodellen kan een goede schematisatie worden verkregen van de geohydrologische opbouw van een gebied en zeker ook van de hydrologische parameters. Wel is—globale—informatie over de geohydrologische opbouw nodig, maar die kan tijdens de berekeningen worden bijgesteld, zodat geen nauwkeurige uitganggegevens nodig zijn. Dit temeer daar meestal sterk geschematiseerde geohydrologische informatie wordt gevraagd. Vaak wordt het onderzoeksgebied opgesplitst in subgebieden, waar een zekere homogene hydrologische situatie wordt verondersteld. De verkregen waarden zijn te onnauwkeurig voor toepassing in hydrologisch detailonderzoek, bij voorbeeld als sprake is van verspreiding van verontreiniging van de ondergrond.

De Boorgatenmethode (Hooghoudt, 1936; Van Beers, 1976) is zeer geschikt om in klein bestek te worden toegepast. Het betreft een methode die met eenvoudige middelen kan worden toegepast en een zeer klein invloedsgebied heeft. In feite betreft het een kleinschalige *recovery test*. Over het algemeen komen gegevens tot geringe diepte beschikbaar, vooral ook omdat de methode alleen in ondiepe (hand-)boringen redelijk betrouwbaar kan

Tabel 1: Veel toegepaste methoden van doorlatendheidsbepaling.

	invloedsgebied	meetresultaat
Pompproeven en recovery tests	max. 10 km rond de pompput	kD, c, L, S
Waterbalansstudies	afhankelijk van de oppervlakte van het studiegebied	kD, c, L, S
Boorgatenmethode	enkele meters rond het meetpunt	k_h en k_v
Voortplanting in de ondergrond van waterstandsveranderingen in het oppervlaktewater (Steggewentz-methode)	enkele kilometers landinwaarts vanaf de oever	kD, c, L, S
Metingen aan ongeroerde monsters	lengte van het monster	k_v en k_h
Metingen aan geroerde monsters	lengte van het monster	k_v
Berekeningen aan de hand van korrelanalyses	lengte van het boorgat	k_v
Berekeningen aan de hand van geschatte korrelsamenstelling	lengte van het boorgat	k_v
Schattingen aan de hand van boorbeschrijvingen	lengte van het boorgat	k_v

worden toegepast.

De Steggewentzmethode (Steggewentz, 1933) is geschikt voor toepassing langs de oevers van de zee en getijderivieren. Fluctuaties in waterniveau in het open water zetten zich—met vertraging—voort in de vorm van drukgolven in het grondwater. Uit de mate van vertraging, uitdemping en faseverschuiving van de drukgolf kunnen de hydrologische grootheden worden berekend. De methode beperkt zich tot situaties met één watervoerend pakket.

Deze methoden hebben gemeen dat zij voor de hydrologische grootheden *gemiddelde waarden* geven voor het gehele invloedsgebied en de betreffende pakketten. De overige in tabel 1 genoemde methoden geven plaatselijke waarden en worden gezamenlijk in de volgende hoofdstukken behandeld.

Monstername en transport van ongeroerde monsters

Het eerste probleem bij de methode van metingen aan ongeroerde monsters is: *hoe krijgt men een monster ongestoord in het laboratorium en hoe controleert men of men daarin geslaagd is*. Het probleem valt uiteen in een aantal delen:

- de monstername zelf;
- de mate van aansluiting van de monsterhouder aan het monster;
- het transport.

Stuyt (1992) loste dit op door de monsterhouders *hydraulisch* de grond in te drukken en daarna met een speciaal verend systeem naar het laboratorium te brengen. Uit CT-scanning (in het Amsterdams Medisch Centrum) bleek dat de oorspronkelijke ligging van de korrels goed bewaard was en dat de aansluiting aan de monsterhouders goed was. De methode is echter te bewerkelijk voor grootschalige toepassing maar is wel geschikt om als referentie te dienen voor andere methoden. De methode werd overigens toegepast in—bemen—profielkuilen en is derhalve alleen geschikt voor het steken van monsters nabij het grondoppervlak.

Bij het voormalige ICW is in de zestiger jaren een methode van monstersteken in gebruik genomen, waarbij monsterhouders met een pneumatische hamer de grond in werden gedreven (Wit, 1960; Wijnsma en Wit, 1970). Voor het transport werden de monsters aan onder- en bovenzijde afgesloten met een laagje parafine. Tijdens het transport werden de monsterkisten geplaatst op schokdempend materiaal (De Ridder en Wit, 1965). Het liet zich aanzien dat de monsters niet geheel ongestoord waren, hoewel uit lakprofielen van doorsneden van de monsters bleek dat de oorspronkelijke laagstructuur in het midden van de monsters, goed bewaard was gebleven (bij kleiige monsters was vaak langs de de wanden van de monsterhouders 'versmering' te zien). Nog steeds zijn er twijfels over de mate van aansluiting van de monsters aan de monsterhouders.

Bij de Vakgroep Fysische Geografie van de Universiteit Utrecht wordt gebruik gemaakt van een *Vibracore*-steekapparaat, dat oorspronkelijk door Rijkswaterstaat werd ontwikkeld voor het bemonsteren van de ondiepe zeebodem. Het apparaat is aangepast voor gebruik op land en is geschikt voor monstername van zand beneden de grondwaterspiegel tot een diepte van 5 m. Hierbij wordt een stalen buis met daarin een PVC-pijp trillend in de grond gedreven, waarbij aan de binnenzijden van de monsterhouder een nylon kous om het monster wordt aangebracht. Na de monstername wordt de PVC-pijp met inhoud in stukken van 30 cm gezaagd, die in vochtige gesloten toestand naar het laboratorium worden vervoerd. Uit lakprofielen die van deze monsterkernen zijn gemaakt, blijkt dat de oorspronkelijke

laagopbouw over het algemeen goed wordt bewaard. Daar dit echter niet altijd het geval is, blijft een controle op de laagopbouw na de doorlatendheidsmetingen altijd noodzakelijk. Omdat met deze boommethode slechts verticale monsters van zand kunnen worden genomen, worden daarnaast ook handmatig monsters genomen. Hierbij worden voor zand 30 cm lange PVC-pijpen voorzichtig in de wanden van bouwputten en profielkuilen geslagen. Deze worden naderhand uitgegraven en naar het laboratorium vervoerd. Ook bij deze methode blijft de gelaagdheid over het algemeen goed intact. Een monsterkous is hierbij niet nodig. Kleiige en venige monsters worden genomen door *Kopecky-ringen* handmatig in de wand van profielkuilen te steken (zowel horizontaal als verticaal) en deze vervolgens uit te graven. De boven- en onderzijde van het monster dienen met een nylon-draad te worden afgesneden, daar afsnijden met een mes het monster dicht smeert. Slijpplaatjes van op deze wijze gestoken monsters laten zien dat de gelaagdheid goed intact blijft.

Ten aanzien van het transport van de monsters bestaat geen eenstemmigheid tussen de verschillende onderzoekers. De één prefereert transport van met water verzadigde monsters, terwijl anderen meer de voorkeur geven aan transport van monsters waarvan vooraf het water is uitgezakt. Controle welke methode nu het best is heeft niet plaatsgehad. Het is wellicht te overwegen de monsters in bevroren toestand—in bevroren stikstof dus—te vervoeren. Bij het laatste bestaat echter wel de kans dat door uitzetting en inkrimping van het bodemvocht, juist beweging in de monsters ontstaat en de onderlinge ligging van de korrels verstoord wordt.

Doorlatendheidsmetingen in het laboratorium

In de meeste gevallen wordt gebruik gemaakt van de z.g. *doorlatendheidsbak van Wit*, die in de zestiger jaren bij het voormalige ICW is ontwikkeld (Wit, 1963). Hierbij worden de monsters na enige voorbehandeling in een bak geplaatst. Door aan de bovenzijde van de monsters water af te hevelen, wordt een potentiaalverschil tussen de boven- en onderzijde van de monsters tot stand gebracht. Uit het debiet, doorsnede en lengte van de monsters en genoemd potentiaalverschil kan dan de doorlaatfaktor worden berekend. Aanvankelijk werden de metingen met de hand gedaan, wat enige onnauwkeurigheid met zich mee bracht.

Inmiddels is in samenwerking met DLO-IMAG (voorheen Technische-Fysische Dienst voor de Landbouw (DLO-TFDL)) een meetbrug ontwikkeld waarmee de waarnemingen en berekeningen *automatisch* worden uitgevoerd. Het principe van de meting is dat uit de reflectie van een uitgezonden lichtbundel de hoogte van het waterniveau wordt bepaald. Dit geschiedt met een unit waarmee de metingen van het waterniveau binnen een grondmonster en daarbuiten worden uitgevoerd en automatisch verwerkt. Genoemde unit is gemonteerd in een meetbrug die boven de meetbak aanwezig is en de meetunit boven de in de meetbak aanwezige monsters brengt. Van elk monster wordt een hoeveelheid water afgezogen, waarna het rijzen van het waterniveau in de monsters met het optische systeem wordt geregistreerd. Het meetproces en de berekeningen worden met een PC gestuurd, respectievelijk uitgevoerd. Tijdens de meetperiode wordt behalve het stijgen van de waterspiegels in de monsters, de verdamping gemeten. Het resultaat hiervan wordt in de berekeningen van de *k*-waarden verdisconteerd. De metingen worden voortgezet tot enige tijd geen veranderingen in de resultaten optreden. Afgezien van tijdswinst wordt ook een grotere nauwkeurigheid bereikt dan in het verleden.

Om de reproduceerbaarheid van de meetresultaten te testen, werden met deze opstelling een aantal 'kunstmatige' monsters doorgemeten. Daarbij werd een willekeurig zandmonster door zeven in een aantal fracties opgesplitst: 50–75 μ , 75–105 μ , 105–150 μ , 150–210 μ en > 210 μ . Na het zeven werden eventueel achtergebleven slibdeeltjes weggespoeld. Met deze zee fracties werden een aantal monsterhouders gevuld waarna op een triltafel de compactie werd vergroot. Daarna werden de doorlatendheden gemeten. Het bleek dat van de fracties >75 μ éénduidige k -waarden naar voren kwamen:

75–105 μ $k = 2,7$ m/dag

105–150 μ $k = 4,6$ m/dag

150–210 μ $k = 10,5$ m/dag

> 210 μ $k = 27,0$ m/dag

Van het laatste monster (> 210 μ) kan opgemerkt worden, dat het 'een slag in de lucht' betreft omdat alleen de onderwaarde van de fractie bekend was en niet de bovenwaarde. Van het monster van 50–75 μ kwam een chaotisch beeld naar voren. Dit wordt ten dele veroorzaakt door het feit dat de toestroming van het water te traag was voor een nauwkeurige meting. De metingen werden een aantal keren herhaald, waarbij telkens dezelfde meetresultaten naar voren kwamen.

Metingen aan natuurlijke kleimonsters bleken door de trage toestroming van het water bij geringe potentiaalverschillen met automatische metingen onmogelijk te zijn. Daarom worden de metingen geheel anders ingericht: de waterstand in de bak wordt tot enkele centimeters boven de bodem verlaagd en het water wordt van boven met de hand aangevuld (*falling head* methode), waarna de daling met de meetbrug werd gevolgd. De meetbrug wordt daarbij handmatig bediend. Deze procedure leidt wél tot éénduidige meetresultaten.

Aan de Universiteit Utrecht wordt ook de doorlatendheidsbak van Wit gebruikt voor de meting van de doorlatendheid. De doorlatendheid van de zandmonsters wordt gemeten door een klein (2–3 cm) potentiaalverschil tussen de boven- en onderzijde aan te brengen en vervolgens het debiet door het monster te meten. Binnen enkele uren kan zo de doorlatendheid van vele monsters worden bepaald. Over de kleiige en venige monsters wordt een groter potentiaalverschil aangebracht (beginwaarde 7–8 cm). Vervolgens wordt handmatig het teruglopen van dit potentiaalverschil in de tijd gemeten, waarbij tegelijkertijd de verdamping in de bak wordt gemeten. Bij zeer ondoorlatende monsters kan de meetperiode oplopen tot twee maanden. Het verloop van de daling in potentiaalverschil die in de meetperiodes optreedt, wordt geplot teneinde mogelijke verstoringsbronnen zoals algengroei of monsterbreuk te kunnen opsporen. Bij een voldoende grote meetcapaciteit van de meethak (in Utrecht 50 monsters) kan ondanks de lange meetperiodes van grote aantallen monsters de doorlatendheid worden bepaald.

Bij de Rijks Geologische Dienst (RGD) afd. Hydrogeologie in Heerlen worden ongeroerde kleimonsters omhuld met een latexhuls, waarna aan de zijkant hoge druk wordt gezet in een triaxiaalcel. Hiermee wordt stroming langs de rand voorkomen. In het monster zelf is de druk in vergelijkbare mate verhoogd, met dien verstande dat een gering potentiaalverschil tussen boven- en onderkant van het monster wordt gehandhaafd. Hierdoor kan in een relatief korte tijd d.m.v. een *constant head* meting de doorlatendheid worden gemeten.

Algemeen kan worden gesteld dat naar het meten van doorlatendheden in het laboratorium nog veel studiewerk moet worden verricht, hoewel de resultaten van dergelijke metingen reeds veelvuldig worden toegepast. Uit dit laatste blijkt wel dat er kennelijk wel veel behoefte is aan dergelijk onderzoek. Belangrijk is dat er een standaardmethode wordt ontwikkeld en/of dat er tussen de verschillende methodes die worden toegepast, relaties

worden vastgesteld. Duidelijk is wel dat zandmonsters een geheel andere benadering vereisen dan klei- en kleirijke monsters.

Schattingen aan boormonsters

In de veertiger en vijftiger jaren is door Ernst en Hooghoud op het voormalig Landbouwproefstation-TNO in Groningen onderzoek verricht naar de mogelijkheid uit zeefanalyses van zandmonsters de k_h vast te tellen. Dit onderzoek is later door Ernst en Van Rees Vellinga bij het voormalige ICW voortgezet. Hoewel de resultaten nooit zijn gepubliceerd, werd de methode wel regelmatig bij regionale onderzoeken van het voormalige ICW toegepast. Ook andere instellingen hebben dergelijke methodes toegepast.

Nauwkeurige zeefanalyses van grondmonsters werden vergeleken met eerder aan dezelfde monsters in het laboratorium gemeten k_h -waarden. Hieruit onstond de volgende relatie:

$$kU^2 = C \quad (1)$$

waarin:

k	=	horizontale doorlaatfaktor (m/dag)
U	=	specifiek oppervlak van de drie grootste zandfrakties
C	=	een constante. Deze werd aanvankelijk empirisch vastgesteld op 27 000 m/dag en later bijgesteld op 54 000 m/dag

Hieruit kan de k -waarde worden berekend:

$$k = C/U^2 \quad (2)$$

Aan deze formule zijn correctiefactoren toegevoegd voor het slibgehalte, grindgehalte en de sorteringsgraad. Een slechte sortering van een monster kan enerzijds duiden op sterk wisselende sedimentatieomstandigheden of anderszijds op het feit dat in een monster van een bepaalde laag meerdere sublagen voorkomen. In het laatste geval wordt vaak over 'tweetoppig' of 'meertoppig' gesproken.

Het slibgehalte van een monster is sterk bepalend voor de doorlatendheid. Reeds bij zeer geringe slibgehalten van zandmonsters treedt een sterke daling van de doorlatendheid op. Een probleem is wel dat bij pulsmonsters een deel van het slib tijdens het boren verloren gaat. Bij *straight-flush* boringen treedt door de bij het boren noodzakelijke boorspoeling (waaraan klei of bentoniet is toegevoegd) verstoring van het waargenomen slibgehalte op. In ieder geval is ook hier weer sprake van verwarring over de vraag of het waargenomen slibgehalte het gevolg is van in het zand ingesloten slibdeeltjes of dat er sprake is van aparte kleilaagjes die tijdens het boren door de klei zijn gemengd. De waarnemingen van de boormeester zijn hierbij van vitaal belang. In de boorbeschrijving komt bij aparte kleilaagjes vaak de term 'kleibrokjes' voor.

Ernst heeft in de zestiger jaren—niet gepubliceerde—tabellen samengesteld, waarmee k -waarden op een eenvoudige wijze uit zeefanalyses konden worden vastgesteld.

Van Rees Vellinga maakte tijdens het beschrijven van boormonsters—aangevuld met waarnemingen van de boormeester—schattingen van U -cijfers en de bijbehorende slibge-

halten, grindgehalten en sorteringsgraad. Met de tabellen van Ernst werden *per laag* de k_h -waarden vastgesteld. Met deze ervaring achter de hand ontwikkelde hij een methode om uit *woordelijk* beschreven boringen genoemde grootheden te schatten en zo dus—weer per laag—schattingen uit te voeren van de k_h -waarden. Hoewel deze methode niet werd gepubliceerd, werd zij veelvuldig toegepast o.a. bij de regionale onderzoeken van Zeeland, Middenwest Nederland en Noord-Holland van het voormalige ICW.

Hoewel de methode wetenschappelijk de nodige twijfels oproept, is het toch een zeer waardevolle techniek om correlaties tussen ver van elkaar gelegen meetpunten (pompproeven e.d.) tot stand te brengen. In tegenstelling met metingen aan ongeroerde monsters is de methode geschikt voor het vaststellen van k_h -waarden tot grote diepten.

In een later nummer van 'Stromingen' zal een aparte publikatie aan deze methode worden gewijd (Pomper, in voorbereiding).

Aan de Universiteit Utrecht is ook onderzoek verricht naar het verband tussen de doorlatendheid en de korrelgrootte-samenstelling van de monsters (Bierkens, 1994a; Bierkens, 1994b; Weerts, 1995). Hierbij bleek dat het goed mogelijk is een aantal lithologische klassen op grond van verschillen in doorlatendheid te onderscheiden; bijvoorbeeld zand, zandige klei, klei en veen. Voor de zandmonsters kon een verband tussen korrelgrootteverdeling en doorlatendheid, zoals gesuggereerd door het *U*-cijfer, alleen worden vastgesteld voor *in het laboratorium gestoorde monsters*. Voor ongestoorde, *in situ* gestoken monsters geldt dit verband niet, wat wordt veroorzaakt door de sedimentaire gelaagdheid van de monsters (Bierkens, 1994a). Dit verschijnsel was reeds eerder door Pryor (1973) waargenomen.

Zowel voor schattingen aan boormonsters als voor doorlatendheidsmetingen in het laboratorium geldt dat op deze wijze verkregen doorlatendheden slechts geldig zijn voor de schaal van monsternamen (zie Tabel 1). Deze waarden mogen niet zondermeer in grondwatermodellen worden gebruikt; hiervoor is opschaling tot de gewenste schaal noodzakelijk. Bierkens (1994b) en Bierkens en Weerts (1994) geven hiervoor methoden aan.

Zeker is dat de waarde van de schattingsmethode toeneemt als de relatie met de sedimentaire omstandigheden in de berekeningen wordt opgenomen. Het is daarom dienstig dit aspect in nader onderzoek mee te nemen.

k_h versus k_v

Pogingen van o.a. Hooghoudt en Ernst om een relatie tussen de k_h en k_v van zandmonsters tot stand te brengen zijn op niets uitgelopen. Geconcludeerd werd dat er geen eenduidige relatie is.

Toch is het nuttig aan dit onderwerp aandacht te besteden. Het probleem is vooral dat het meten van horizontale doorlatendheden op grote diepten tot op heden op de nodige technische problemen stuit. Hoewel toegegeven moet worden dat de conclusies van Hooghoudt en Ernst volledig stand houden, is het de vraag of *binnen bepaalde sedimentatie-omstandigheden* wel tot een zekere relatie tussen beide grootheden gekomen kan worden. Het gaat hierbij voornamelijk over zandige sedimentpakketten. Bij kleipakketten is het verschil tussen k_h en k_v niet van belang—ook bij detailonderzoek—omdat in de praktijk meestal sprake is van betrekkelijk dunne lagen. Dikke kleipakketten zijn meestal vrijwel ondoorlatend. Alleen bij het volgen van chemische verschijnselen op zeer lange termijn (gedacht moet worden aan duizenden jaren) kan hier het verschil tussen k_h en k_v een rol spelen.

Overigens gaat dan ook chemische interactie tussen water en klei en veranderingen in het stromingspatroon van een gebied door b.v. geologische processen, mee spreken. Geirnaert (1969) heeft in het begin van de zeventiger jaren aanzet tot dergelijk onderzoek gegeven.

Voor een zandig sedimentpakket is het belangrijk om te weten op welke wijze het pakket ontstaan is. De genese is namelijk bepalend voor het soort gelaagdheden dat binnen het pakket aanwezig is. Onderzoek zou zich voor Nederland op de volgende sedimentatie-systemen moeten richten:

- fluviatiele sedimenten (verwilderd, meanderend, anastomoserend)
- eolische sedimenten
- lacustriene sedimenten
- mariene sedimenten
- glaciale sedimenten

Gezocht moet worden in hoeverre de verhouding k_h/k_v bij deze sedimenttypen binnen bepaalde grenzen liggen. Een apart probleem is natuurlijk het voorkomen van *hellende sedimentpakketten*. Bij de relatie k_h/k_v speelt derhalve de hellingshoek van de lagen een belangrijke rol.

Eén en ander betekent dat bij zandige pakketten voor detailonderzoeken beide grootheden— k_v en k_h —*onafhankelijk van elkaar* dienen te worden bepaald.

Doorgaan of stoppen met experimenteel onderzoek naar k -waarden

Dit vormt in wezen het hoofdonderwerp van dit artikel. Daarbij is het de vraag of de grote hoeveelheid werk wel verantwoord is voor een in wezen verouderde techniek. Er dient dus te worden aangetoond in welke mate behoefte bestaat aan detailgegevens over de doorlatendheid van de ondergrond. Een vraag daarbij is welke eisen aan de kwaliteit van het onderzoek moeten worden gesteld en of dit economisch verantwoord is. Indien vastgesteld wordt dat dergelijk onderzoek in de huidige tijd niet meer verantwoord is, dan zal bij elk onderzoek duidelijk moeten worden aangegeven, binnen welke grenzen de betrouwbaarheid van de informatie ligt. Aan grotere betrouwbaarheid 'hangt dan een duidelijk prijskaartje'.

Hiermee wordt tevens het accent van het fundamentele doorlatendheidsonderzoek verlegd van het wetenschappelijk aspect naar het kwaliteitsaspect. Vooraf dient er een discussie plaats te hebben over de eisen die aan de onderzoekskwaliteit dienen te worden gesteld om maatschappelijke vragen te beantwoorden tegen aanvaardbare kosten.

Een tussenweg daarbij is het zoeken naar wegen voor een beter gebruik van beschikbare kennis en gegevens.

Door de opschalingstechniek die Bierkens (1994a, 1994b) heeft toegepast, is de praktische toepasbaarheid van detailgegevens voor grootschalig onderzoek vergroot. De mogelijkheid bestaat zelfs dat hierdoor dure technieken als pompproeven op den duur beperkt kunnen worden of zelfs vaak overbodig worden. Een duidelijke winst zit dan in het feit dat beter gebruik gemaakt kan worden van archiefmateriaal en archiefgegevens.

In de inleiding werd al gesteld dat juist door de toenemende behoefte aan detailonderzoek, een goede kennis van de hydrologische grootheden van belang is. Dit is deels het gevolg van een verlegging van de onderzoeksvragen van economische toepassingen (drinkwatervoorziening, ontwatering e.d.) naar de effecten daarvan op—bij voorbeeld—het milieu. Bij dit laatste moet met name gedacht worden aan de toenemende invloed van menselijke activiteiten op de kwaliteit van het grondwater en behoud van toepassing als

grondstof voor de drinkwaterwinning. Verschillen in kwetsbaarheid voor dit aspect worden voor een belangrijke mate bepaald door de geohydrologische opbouw en de aanwezige waarden voor de doorlatendheid.

Daar staat tegenover dat veldwerk het 'ondergeschoven kind' dreigt te worden door de toenemende financiële druk op het onderzoek. Het is daarom van belang dat niet alleen de mogelijkheid van het verzamelen van nauwkeurige meetgegevens wordt gezien, maar vooral ook het vergroten van de *efficiency*. Samenwerken tussen de verschillende instellingen die zich met dergelijk onderzoek bezighouden, is daarbij nodig.

Het gaat daarom vooral om het ontwikkelen van standaardmethodes, zodat de gegevens die beschikbaar komen van vergelijkbare kwaliteit zijn en probleemloos uitgewisseld kunnen worden.

Het bovenstaande maakt wel duidelijk dat de vraag 'doorgaan met dit onderzoek of stoppen' niet éénduidig te beantwoorden is. De maatschappij zal daarbij moeten aangeven wat het haar daarbij waard is. Eén en ander zal afhangen van de vraag naar onderzoek en de mate van nauwkeurigheid die nodig wordt geacht. De ontwikkeling van het onderzoek in de richting van meer gebiedsgerichte implementatie van het Rijksbeleid met betrekking tot milieu en natuur (verdroging, mestproblematiek) betekent echter dat er ook meer aandacht gegeven zal moeten aan de nauwkeurigheid van het onderzoek. Om die reden is het wenselijk de expertise met betrekking tot het doorlatendheidsonderzoek op peil te houden en zo veel mogelijk te bundelen.

Als voorlopige conclusie uit dit overzicht wordt daarom gesteld dat het doorlatendheidsonderzoek moet doorgaan en zelfs geïntensiveerd. Daarbij moet ruime aandacht worden besteed aan uitbreiding van de kennis op het gebied van relatie tussen de sedimentologische kenmerken en de hydrologische grootheden van afzettingen, aangevuld met geostatistische methoden en de daaraan gekoppelde ruimtelijke variabiliteit.

Dankbetuiging

Dank aan de heren H.J.M. Pagnier en H.J. Simmelink van de Rijks Geologische Dienst, afdeling Hydro-geologie te Heerlen, voor hun waardevolle commentaar en suggesties voor dit artikel.

Literatuur

- Beers, W.F.J. van (1976)** The auger hole method; Int. Inst. for Land Reclamation and Improvement, Wageningen. Bulletin 1.
- Bierkens M.F.P. (1994a)** Complex Confining Layers. A stochastic analysis of hydraulic properties at various scales; Netherlands Geographical Studies 184, pag 1–263.
- Bierkens M.F.P. (1994b)** Blokdoorlatendheden; opschaling in de geohydrologie; in: *H₂O*, jrg 27, pag 674–684.
- Bierkens en H.J.T. Weerts (1994)** Block hydraulic conductivity of crossbedded fluvial sediments; in: *Water Resources Research*, jrg 30, pag 2665–2678.
- Hooghoudt, S.B. (1936)** Bepaling van den doorlaatfaktor (1) van den grond met behulp van pompproeven (z.g. Boorgatenmethode); Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen, no. 42(13)B; (Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den ondergrond; no. 4). 's-Gravenhage: Algemene Landsdrukkerij.

- Geirnaert, W. (1969)** Preliminary report on hydrochemical investigations in the Western Netherlands; in: *Geologie en Mijnbouw*, jrg 48, nr 2.
- Kruseman G.P. en N.A. De Ridder (1990)** Analysis and evaluation of pumping test data; Verweij.
- Pomper, A.B. (in voorbereiding)** Schatting van doorlaatfactoren (k-waarden) aan de hand van in boorarchieven aanwezige boorbeschrijvingen.
- Pryor, A. (1973)** Permeability-porosity patterns and variations in some Holocene sand bodies; Bull. Am. Ass. Petr. Geol. 57-1, pag 162–189.
- Ridder, N.A. de en K.E. Wit (1965)** A comparative study on the hydraulic conductivity of unconsolidated sediments; ICW, Technical Bulletin 42.
- Steggewentz, J.H. (1933)** De invloed van de getijdebewegingen van zeeën en getijderivieren op de stijghoogte van het grondwater; Proefschrift TH-Delft.
- Stuyt, L.C.P.M. (1992)** The water acceptance of wrapped subsurface drains; Proefschrift LUW, Wageningen.
- Weerts, H.J.T. (1995)** Meetschaaldoorlatendheden van een complexe deklaag; in: J.C. Hooghart (red.), *Onzekerheid in grondwatermodellering*. Rapport TNO Grondwater en GeoEnergie, pag 15–23.
- Wit, K.E. (1960)** Een apparaat voor het steken van ongeroerde monsters in diepe boorgaten, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Rapport nr. 10.
- Wit, K.E. (1963)** Meting van doorlatendheid in ongeroerde monsters, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Rapport nr. 17.
- Wijnsma, M. en K.E. Wit (1970)** Het nemen van ongestoorde grondkolommen; in: *Cultuurtechnisch Tijdschrift*, jrg 10, nr 3.

A.B. Pomper
 DLO-Staring Centrum
 Postbus 125
 6700 AC Wageningen
 Tel: (0317) 474308
 Fax: (0317) 424812
 E-mail: A.B.Pomper@sc.dlo.nl

H.J.T. Weerts
 RU Utrecht
 Vakgroep Fysische Geografie
 Postbus 80115
 3508 TC Utrecht
 Tel: (030) 2532183.

