

# Boekbespreking

**Sedimentary Heterogeneity and Flow towards a Well; Assessment of Flow Through Heterogeneous Formations**, door: J.C. Herweijer

Op dinsdag 7 januari 1997 promoveerde Joost Christiaan Herweijer (Utrecht, 1957) aan de Vrije Universiteit op een proefschrift met de bovenstaande titel. Het promotie-onderzoek had ten doel om methoden te ontwikkelen voor het beschrijven van heterogene aquifers en van de invloed van heterogeniteit op de stroming van grondwater. Met name is onderzocht of het mogelijk is om op basis van pompproeven modellen te bouwen waarmee betrouwbare voorspellingen gedaan kunnen worden over het transport van verontreinigingen in sterk heterogene aquifers. Promotor was prof. J.J. de Vries; prof. G. de Marsily van de Université Pierre et Marie Curie, Paris VI en prof. G. Teutsch van de Universität Tübingen traden op als referenten.

Herweijer is geoloog; hij studeerde exploratiegeologie aan de Rijksuniversiteit Utrecht en hydrogeologie aan de VU. Hij werkte eerst enige tijd zelfstandig en daarna als research-petroleum-geoloog bij Shell, als grondwaterhydroloog bij GeoTrans Inc. (VS), als exchange scientist bij Elf Aquitaine (Fr) en momenteel als group modeling manager en principal hydrogeologist bij Water Management Consultants (VS).

Hoewel de serieuze belangstelling voor contaminant transport nog maar zo'n vijftien jaar geleden ontwaakte, is naar mijn inschatting aan geen ander onderdeel van de grondwaterhydrologie zoveel geld en aandacht besteed. De literatuur over het onderwerp is haast onafzienbaar. Dit is een sterke aanwijzing dat de theorie van het

stoftransport a) voor de praktijk erg belangrijk is, en b) rammelt. Voor een onderzoeker is dat weliswaar een uitdaging, maar het is moeilijk om nog een originele bijdrage te leveren, en dat is toch de eis die aan een promotie-onderzoek gesteld wordt.

Herweijer heeft de uitdaging aanvaard en hij is er inderdaad in geslaagd om een nieuw idee te lanceren en toepasbaar te maken: hij toont een verband aan (althans in freatische aquifers) tussen de snelheid waarmee een verstoring van de stijghoogte zich in de ondergrond voortplant en de snelheid waarmee een stof getransporteerd wordt. Hierdoor kan uit nauwkeurige stijghoogtewaarnemingen tijdens een pompproef informatie afgeleid worden over voorkeurswegen van grondwaterstroming. Dit idee is in het proefschrift ingebed in een meer algemene filosofie over het omgaan met veelsoortige gegevens om tot een zo klein mogelijke onzekerheid te komen. Met name benadrukt Herweijer - van een geoloog verwachten we ook niet anders - het belang van sedimentologische kennis en het gebruik daarvan om modellen van een heterogeen aquifer te bouwen. (Het woord aquifer is bij Herweijer consequent geslachtelijk onzijdig.)

De presentatie van het promotie-onderzoek is erg formeel: in een inleidend hoofdstuk begint Herweijer met het formuleren van een nulhypothese die - gesteld dat hij verworpen moet worden - drie andere hypothesen uitlokt die voldoende stof opleveren voor het verdere onderzoek. Zo'n opzet doet mij als technisch opgeleide hydroloog wat gekunsteld aan, vooral omdat de nulhypothese bij voorbaat tot falsificatie gedoemd was. In het eigenlijke proefschrift komen de hypothesen trouwens nauwelijks meer aan bod; dat gebeurt pas weer in een concluderend hoofdstuk, waardoor het vermoeden rijst dat ze wellicht naderhand opgesteld zijn. Is dit misschien de wetenschappelijke methode, die aan technische universiteiten

niet onderwezen wordt? Hoe het ook zij, ik zet me graag over zulke cultuurverschillen heen, want het proefschrift als geheel is zeer lezenswaardig.

Het onderzoek van Herweijer speelt zich af op de Columbus test site in Mississippi, die deel uitmaakt van een militair vliegveld. Onder contaminant hydrologen is deze locatie berucht, al is het niet om zijn buitensporige verontreiniging. (Protocollair werden Amerikaanse militaire vliegtuigen volgetankt tot ze overliepen. Hoe zou het met de voormalige Amerikaanse luchtmachtbasis Soesterberg gesteld zijn)? Zijn faam dankt Columbus aan het feit dat de stochastische theorieën voor stoftransport, die op bekende proeflocaties als Borden en Cape Cod heel behoorlijk werkten, hier volstrekt onderuit gingen. De reden is dat de ondergrond in Columbus veel heterogener is dan in Borden of Cape Cod. Stochastische theorieën moeten het hebben van ergodiciteit, wat wil zeggen dat de statistische eigenschappen op iedere plaats gelijk moeten zijn. In Columbus is een duidelijke geologische structuur aanwezig, zoals mooi blijkt op een luchtfoto (pagina 83). Aan de oppervlakte is een voormalige riviermeander te zien, met alle bijbehorende structurelementen. Op enige diepte (niet op de foto, dus) bevindt zich een ouder alluvium, dat opgebouwd is door een vlechtende rivier. Dit is het punt waarop de sedimentoloog van pas komt. Herweijer begint hoofdstuk 2 met een kort overzicht van sedimentologische kennis en begrippen die gebruikt kunnen worden om uit een beperkte hoeveelheid boringen een goed ruimtelijk beeld van een gebied op te bouwen. Deze kennis is vooral ontwikkeld binnen de olie-industrie. Het idee is dat sedimenten niet ad random afgezet worden, maar volgens systematische patronen, die in afgezwakte vorm als patronen in de hydraulische doorlatendheid worden teruggevonden. De geometrische wetmatigheden van zulke patronen zijn uitgebreid bestudeerd op plaatsen waar de sedimenten van

nature of in groeven dagzomen. Er zijn onder meer empirische formules afgeleid die een relatie leggen tussen de breedte en de diepte van een opgevlude rivierbedding. Zulke sedimentologische modellen zijn vanzelfsprekend onvolledig, maar ze bevatten toch veel te veel detail om een eenvoudige statistische karakterisering van de doorlatendheid te billijken. Hoofdstuk 2 gaat voort met een korte beschrijving van geostatistische methoden waarmee uit de sedimentologische gegevens driedimensionale modellen van de ondergrond opgebouwd kunnen worden. Aan de orde komen onder meer het werken met variogrammen, het genereren van Gaussische velden en het omgaan met geometrische objecten. Daarna komen bestaande technieken aan bod waarmee effectieve parameters voor stroming en transport geschat kunnen worden. Doorlatendheden, dus, en dispersiecoëfficiënten. Tenslotte beschrijft hoofdstuk 2 het gebruik van pompproeven onder heterogene omstandigheden. Dit is een belangrijke opmaat voor het feitelijke promotie-onderzoek. Herweijer wijst er terecht op dat juist de verschillen tussen gemeten tijd-stijg-hoogtelijnen en standaardkrommen voor het interpreteren van pompproeven interessante informatie opleveren over de heterogene aard van de ondergrond. Vooral aan de tijdafgeleide van de verlagingslijnen valt veel te zien. Het duurde even voordat ik het kon appreciëren. Ik heb heel wat pompproeven onder ogen gehad, maar het tijdafhankelijke deel van de waarnemingskrommen heb ik altijd gezien als een vervelende complicatie; een hindernis die je nu eenmaal moest nemen omdat er anders geen  $kD$ - en  $c$ -waarden berekend konden worden. Bergingscoëfficiënten beschouwde ik als afval, dat verder nergens toe diende. Herweijer grijpt juist de berekende bergingscoëfficiënten (en dan vooral onwaarschijnlijke uitkomsten) aan om conclusies te trekken over de heterogeniteit van de ondergrond. In afwijking van de klassieke toepassing van

pompproeven is dus niet het latere deel, maar juist het begin van de proef van groot belang. Naarmate een pompproef langer duurt betast hij een groter deel van zijn omgeving, waardoor lokale effecten uitdempenen. De verlagingslijnen gaan zich dan volgens de 'homogene' theorie gedragen, maar de informatie over heterogeniteiten verdwijnt.

We zijn inmiddels op een derde van het proefschrift, en tot nu toe is alleen reeds bestaande kennis gereproduceerd. Is dat erg? In een recent nummer van een engels-talig tijdschrift verbaasde de recensent van het proefschrift van Marc Bierkens zich over deze opzet van Nederlandse dissertaties. Het is in de Angelsaksische wereld kennelijk geen gebruik om eerst het werk van anderen te presenteren. Laten we dit nationale trekje vooral blijven koesteren! Een promovendus is jarenlang intensief bezig met zijn vak. Tegen de tijd dat hij zijn werk succesvol afrondt hoort hij tot de autoriteiten binnen zijn specialisme. Per definitie is zijn werk dan nog niet tot de studieboeken doorgedrongen. Wie anders dan juist hij is in staat om zo'n monografie te schrijven, waardoor het eigenlijke promotiewerk voor een breed publiek toegankelijk wordt? De afzonderlijke onderdelen van hoofdstuk 2 zijn niet nieuw, maar de manier waarop ze zijn samengebracht is dat wel. Door zijn overzichtelijke opzet en zijn schat aan referenties naar sleutel literatuur zou dit deel van Herweijers proefschrift zo als een syllabus voor een cursus over heterogene media kunnen dienen. Ik beveel dit hoofdstuk van harte ter lezing aan.

De rest van het proefschrift, de eigenlijke dissertatie, beschrijft in detail hoe de theorie van hoofdstuk 2 is toegepast op het proefterrein. De proeflocatie van Herweijer is niet de MADE-locatie waarover inmiddels veel gepubliceerd is in Water Resources Research. Het is een aangrenzend blok van

100 bij 100 m, dat dan ook heel prozaïsch aangeduid wordt als de 1-HA test site. Op basis van een uitgebreide sedimentologische beschrijving is een ruimtelijk netwerk van 37 waarnemingsfilters ontworpen volgens een door Herweijer geschreven computerprogramma, dat gebruik maakt van geostatistische technieken. De opzet was om het effect van heterogeniteiten maximaal in de waarnemingen tot uiting te laten komen. De filters werden in verschillende configuraties onderworpen aan pomp-, injectie-, flowmeter- en tracerproeven.

Hoofdstuk 4 is gewijd aan het interpreteren van de pompproeven en de tracerexperimenten. Hier demonstreert Herweijer hoe pompproeven gebruikt kunnen worden om mogelijke overgangen in doorlatendheid en voorkeurspaden voor grondwaterstroming op te sporen. Het is daarbij belangrijk om met meer dan één aquifermodel te werken. Herweijer gebruikt formules voor een homogene aquifer, voor vertraagde uitlevering, en voor cirkelvormige en rechte grenzen tussen gebieden met verschillende doorlatendheden. Verschillende formules kunnen perfecte fits opleveren, ook al vertegenwoordigen ze tegenstrijdige aannamen over de bodemopbouw. Vaker echter is de fit slecht. Dat moet niet als een mislukking gezien worden, maar juist als een interessante aanwijzing over heterogeniteiten. Vooral formules voor gezoneerde aquifers leveren, samen met sedimentologisch inzicht, veel informatie op over laterale heterogeniteit en voorkeurspaden. Herweijer laat zien dat de conclusies die hij uit de pompproeven trekt, consistent zijn met de resultaten van de tracerproeven. Dat is van praktische betekenis, want tracerexperimenten zijn veel moeilijker uitvoerbaar dan pompproeven, en ze duren véél langer. Intussen blijft het inzicht dat op deze manier verkregen wordt nog in belangrijke mate kwantitatief; er komt geen eenduidig beeld over de bodemopbouw tevoorschijn,

maar het scala van mogelijke beelden wordt sterk ingeperkt.

Als men een saneringssysteem moet ontwerpen voor een aquifer waarvan de opbouw onvoldoende bekend is, kan men op grond van statistische kentallen van de doorlatendheid alternatieve numerieke modellen bouwen om de pompstrategie te kiezen die de grootste kans van slagen heeft. Dit is vaker vertoond (al ken ik in Nederland geen praktische voorbeelden; alleen theoretische. Je zou toch denken dat het voor een bedrijf als de NS van economisch belang is om de pompstrategie bij saneringsoperaties te optimaliseren). Herweijer wil dit ook doen, maar dan rekening houdend met alle informatie die hij vergaard heeft. Dit werk wordt voorbereid met een geostatistische analyse van de data (hoofdstuk 5). Om bestaande opschalings-theorieën te mogen toepassen, moet uitgegaan worden van een verzameling 'puntgegevens' die statistisch gesproken stationair zijn. De verzameling data als geheel voldoet zeker niet aan de stationariteitseis; zoveel is op grond van geologisch inzicht bij voorbaat duidelijk. Herweijer verdeelt zijn data in subsets, overeenkomstig de verschillende sedimentologische eenheden. Logischerwijs is de kans dat nu aan de eis voldaan is veel groter, maar er is geen definitief bewijs voorhanden. De data zijn ook zeker geen puntgegevens: flowmetertests geven weliswaar een behoorlijk gedetailleerd inzicht in doorlatendheidscontrasten, maar ze hebben toch betrekking op een gebied van misschien wel 25 meter rondom de putten. Niettemin worden op deze basis kansverdelingen en variogrammen van de puntdoorlatendheid vastgesteld, waarna met verschillende alternatieve opschalingstechnieken effectieve stromings- en transportparameters voor de 1-HA test site berekend worden.

De tot nu toe beschreven werkzaamheden waren voorbereidingen voor het modelonderzoek, dat in hoofdstuk 6 gepresenteerd wordt. Hier bouwt Herweijer met MODFLOW vier verschillende numerieke modellen die 'geïnspireerd' zijn door de verzamelde gegevens. Het doel van deze exercitie is om na te gaan of op basis van de uitkomsten van de pompproeven het aantal mogelijke voorstellingen van de werkelijkheid sterk ingeperkt kan worden. Jammer genoeg blijkt het niet haalbaar te zijn om de gemeten verlagingslijnen en tracerdoorbraken te simuleren; Herweijer vermeldt althans dat hij daartoe geen poging gedaan heeft, omdat de beschikbare set gegevens daarvoor ontoereikend is (!). In de plaats daarvan komt een gestileerde voorstelling van de werkelijkheid, die toch wel veel trekken met de onderzoekslocatie gemeen heeft. De vier modellen zijn: een deterministisch model dat schematische versies van de belangrijkste sedimentologische eenheden bevat, ieder met een constante doorlatendheid; een eenvoudig geostatistisch 'objectmodel', waarin verschillende rechtehoekige elementen met een relatief hoge doorlatendheid willekeurig in afmetingen en richting kunnen variëren; een Gaussisch model waarin de doorlatendheid van modelblok tot modelblok varieert; en een genest Gaussisch model, feitelijk het deterministische model, maar nu met variërende doorlatendheden binnen de sedimentologische eenheden. Met deze modellen worden pompproeven en tracerexperimenten nagebootst en de reacties worden kwalitatief vergeleken met de veldwaarnemingen. Het eerste, deterministische, model blijkt het karakter van de gemeten verlagingslijnen goed na te bootsen. Het toevoegen van doorlatendheidsvariaties binnen de sedimentologische eenheden (vierde model) levert niet veel extra op. In de praktijk zal het vaak ontbreken aan gegevens die nodig zijn voor een deterministisch model. In die situatie is men wel aangewezen op modellen

van het type twee en drie. In het geval van de 1-HA test site blijkt het objectmodel, dat toch enigszins rekening houdt met de sedimentologische opbouw, het meest realistisch. Het Gaussisch model biedt een zeer grote variatie aan mogelijkheden, waarvan sommige wel en andere niet kwalitatief overeenstemmen met de bemeeten werkelijkheid. In principe zou men het aantal mogelijke Gaussische modellen moeten kunnen inperken door de modelresultaten te vergelijken met de metingen, maar dat blijkt toch niet goed te lukken. Verder blijkt het begrip dispersie in de gegeven heterogene omstandigheden van weinig nut te zijn. De moraal is dat de onzekerheid sterk afneemt naarmate er meer geologische informatie in het model verwerkt wordt, ook al is die niet zo precies. Zonder op het werk van Herweijer te willen afdingen moet ik zeggen dat ik dit resultaat niet verrassend vind. Wat me wel hevig intrigeert is dat er in alle modellen, realistisch of niet, een duidelijke relatie bestaat tussen het eerste moment waarop de verlaging in een peilbuis 'doorbreekt' en het moment waarop het front van de tracer aankomt. (Ik haalde dat aan het begin van deze boekbespreking al naar voren.) In Herweijers woorden: "It can be concluded that detailed multi-well pumping tests are a useful tool to predict tracer transport and/or to characterize preferential flowpaths for a large ensemble of model realizations. The only measurement required is the time when drawdown due to pumping exceeds a given threshold. For all heterogeneity models analyzed, it is shown that early drawdown breakthrough coincides with early tracer breakthrough". Deze claim gaat me wel wat te ver, of ik lees het verkeerd. De eerste doorbraak van de verlaging is een kwestie van seconden tot minuten, terwijl de eerste doorbraak van de tracer enkele tot vele dagen vergt. Ik denk dat men het zo moet opvatten: als in peilbuis A de verlaging  $x$  maal zo laat begint als in peilbuis B, dan zal de tracerdoorbraak in

peilbuis A ook  $x$  maal zo lang op zich laten wachten als de doorbraak in peilbuis B. Ik vind dit helemaal niet vanzelfsprekend. Hoe komt het? Is dit een toevallig resultaat voor de 1-HA test site of gaat dit overal op? Ik brand van nieuwsgierigheid naar een mathematisch onderbouwde verklaring, want dan vertrouw ik het pas. Maar waarschijnlijk ligt dat minder in de aard van een geoloog. Is het misschien iets voor een promovendus in een exactere discipline? Hoe dan ook, dit onderzoek werpt nieuwe vragen op, en dat is een betrouwbaar kenmerk van baanbrekend werk.

Het proefschrift heeft geen ISBN-nummer, maar vermeldt wel Herweijers e-mailadres: [jcherw@worf.omn.com](mailto:jcherw@worf.omn.com).

*Kees Maas*