

---

# Diskussie: dispersie bestaat niet

Harry Boukes

---

*Zo af en toe hoor je een hydroloog nog wel eens vertellen dat als gevolg van dispersie een bepaalde stof zich naar een bepaalde lokatie heeft verplaatst. In dit artikel zal worden aangegeven dat dispersie geen fysieke grootte of proces is, maar een modelparameter, waarmee verdisconteerd wordt dat een hydroloog met homogene lagen en stationaire stroming rekent. De werkelijkheid is echter heterogeen en instationair.*

*Omdat dispersie geen fysiek proces is, is de mate van dispersie nooit in het veld te meten. De mate van dispersie is immers afhankelijkheid van de wijze van modelleren. Naarmate er meer heterogeniteit en instationariteit in het model is opgenomen, hoeft er minder 'aanvullende ruis' in het model opgenomen te worden om een goede overeenkomst tussen gemeten en berekende waarden te bereiken.*

## Inleiding

Hydrologen praten graag over hun werk en daar is niks mis mee. Enkele jaren geleden vertelde een kollega mij dat hij had moeten uitrekenen hoe dik een afsluitende kleilaag onder een vuilstort moest zijn. Aan de ene kant moest worden voorkomen dat het onderliggende watervoerend pakket verontreinigd zou raken, aan de andere kant hoefde de afsluitende kleilaag ook niet onnodig dik te zijn. Hij had al het stoftransport in beeld gebracht, en hij had uitgerekend dat diffusie verwaarloosbaar was. Zijn eindconclusie luidde vervolgens dat de vereiste dikte van de kleilaag afhankelijk zou zijn van de mate van dispersie.

Gevoelsmatig deugde er iets niet met die conclusie. Maar hoe ik ook nadacht, ik kon op dat moment geen argumenten bedenken wat er niet goed zou zijn. Nu na enkele jaren komt mijn tegenwerping: dispersie bestaat niet. Waarschijnlijk is de betreffende kleilaag al aangebracht, en waarschijnlijk functioneert die naar behoren, maar graag gebruik ik bovengestand voorbeeld om de verwarring tussen model-denken en werkelijkheid te illustreren.

## Hydrologie in het verleden

Voordat de computer voor hydrologische berekeningen beschikbaar was, kwam het er vooral op aan om de hoeveelheid berekeningen te beperken. De beste hydrologen waren degenen die met behulp van integralen en benaderingen de complexe werkelijkheid in één of enkele formules wisten te gieten, zodat met een relatief beperkt aantal handelingen (eerst met de hand, later met de zakrekenmachine) een antwoord op de gestelde vraag kon worden verkregen.

De rekenkundige prestaties die in dit verband zijn geleverd, mogen niet onderschat worden. Maar toch ontkwam men er niet aan om de werkelijkheid te schematiseren. Uit die periode stammen de aannamen dat:

- de bodem uit homogene watervoerende pakketten en slechtdoorlatende lagen bestaat;
- de bodem horizontaal gelaagd is;
- water door watervoerende pakketten uitsluitend horizontaal stroomt, en de potentiaal in verticale richting constant is;
- water door slechtdoorlatende lagen uitsluitend vertikaal stroomt.

In de zeventiger jaren en in het begin van de jaren tachtig voldeed deze schematisatie uitstekend. De hydrologische vragen van die tijd hadden voornamelijk betrekking op de te verwachten daling van de grondwaterstand bij een bepaalde winning, en die vragen konden uitstekend beantwoord worden.

Juist omdat deze aanpak zo goed aansloot bij de vraagstelling van dat moment, werden ook de meetgegevens bepaald uitgaande van bovengenoemde schematisaties. Als er pompproeven werden uitgevoerd, werd er vooraf al vastgesteld hoeveel watervoerende pakketten er zouden zijn, en hoeveel slechtdoorlatende lagen. Vervolgens werden op basis daarvan de verlagingen geanalyseerd, en er kwamen altijd wel resultaten uit. Men was tevreden als er kD-waarden, c-waarden en bergingscoëfficiënten bepaald konden worden.

Maar als er uitkomsten zijn, wil dit echter nog niet zeggen dat de schematisatie klopt. Zo is er nooit rekening gehouden met heterogeniteiten van een watervoerend pakket of van afdekkende lagen. Heterogeniteiten werden op die manier uitgesmeerd over het volledige invloedsgebied van de onttrekking. Omdat de invoer van een pompproef (verlagingen) ook het doel is van verlagingsberekeningen, zullen in de meeste gevallen de gevolgen van eventuele afwijkingen beperkt zijn. Dat de meetwaarden die op deze wijze zijn verkregen vooral op lokaal niveau niet altijd een juiste beschrijving van de werkelijkheid geven, komt onder meer naar voren in de brief van Maarten Smits in dit nummer van 'Stromingen'.

## **De komst van de computer**

In de tachtiger jaren kwam de computer geleidelijk beschikbaar voor de hydrologen. Het is natuurlijk niet vreemd dat in eerste instantie de complexe analytische formules in de computer werden geprogrammeerd, ook al blijkt de computer minder geschikt voor berekeningen met e-machten, logaritmen en Bessel-functies. Nieuwe technieken als de eindige-elementen- en eindige-differentie-methode blijken voor de computer handzamer, terwijl met iteratie-technieken een goede benadering van de gewenste resultaten kan worden verkregen.

## **Veranderende vragen**

De komst van de computer viel ongeveer samen met het besef dat verlaging van de grondwaterstand niet het enige probleem van een winning is. Ook de kwaliteit van het onttrokken water kan bedreigd worden door vervuiling. De instelling van beschermingszones maakte het nodig om ook berekeningen uit te voeren naar de stroming en verblijftijden van grondwater.

Nu is dat in principe niet zo moeilijk, want als je de potentialen hebt berekend, en de doorlatendheden van de bodem kent, kun je ook uitrekenen hoe het water door de bodem stroomt. De doorlatendheid van de bodem hadden we met pompproeven bepaald. De  $kD$ -waarde is echter een gemiddelde waarde voor het hele pakket. Dat betekent dat er binnen een 25-jaarszone water is met een langere verblijftijd dan 25 jaar, maar ook met een verblijftijd korter dan 25 jaar. Voor stoffen die in een lage concentratie bedreigend zijn voor de drinkwaterwinning, betekent dit dat er per definitie minder dan 25 jaar bescherming wordt geboden.

Hetzelfde geldt ten aanzien van de slechtdoorlatende lagen. Ten eerste zijn de weerstandswaarden van deze lagen in pompproeven sowieso al minder nauwkeurig te bepalen dan  $kD$ -waarden. Ten tweede wordt er van uitgegaan dat de hoeveelheid water die door een slechtdoorlatende laag heen zakt, homogeen over de hele oppervlakte is verdeeld. Wanneer dit niet het geval zou zijn, maar de gehele voeding plaats zou vinden door een beperkt aantal gaten/scheuren in de laag, heeft dit vooral tot gevolg dat de verblijftijd in de slechtdoorlatende laag aanzienlijk korter is dan met een homogene schematisatie wordt berekend.

Dat dit niet louter theorie is, bewijst een onderzoek dat in 1989 is uitgevoerd op pompstation Borteldonk, inmiddels geëxploiteerd door Waterleidingmaatschappij Noord-West Brabant. Voor dit pompstation werd op basis van potentialen, diepte van de winning en weerstand van de slechtdoorlatende laag berekend dat het jongste water (nl. dat ter plaatse van het pompstation infiltreert) tenminste honderd jaar oud moest zijn. Dit stelde het bedrijf gerust, maar omdat het onderzoeksbudget nog ruimte bood, is besloten dit resultaat met behulp van tritium-datering te controleren. Hieruit bleek echter dat er al significante hoeveelheden tritium in het onttrokken water werd aangetoond, met andere woorden, dat een significante hoeveelheid water op het pompstation na 1950 geïnfilteerd is.

Doorgaans worden dergelijke controles op verblijftijdberekeningen niet uitgevoerd. Ten onrechte heeft men de afgelopen jaren veel vertrouwen aan dergelijke berekeningen toegekend. Het lijkt wel of het vastleggen van een 25-jaarszone op zich belangrijker was dan de betrouwbaarheid er van.

## **Kwaliteitsmodellering**

De bedreiging door vervuiling leidde er toe dat beheerders van pompstations ook vragen gingen stellen over de ontwikkeling van de kwaliteit van het onttrokken water. En in principe was dat natuurlijk uit te rekenen, want we waren in staat om de stroming uit te rekenen. Voor de meest bedreigende stoffen geldt dat ze met dezelfde of een vergelijkbare snelheid met het grondwater meestromen.

In eerste instantie werd er gerekend aan één-dimensionale stroming: stroming door bijvoorbeeld een zandkolom in een laboratorium. Wanneer we voor het gemak even uitgaan van een stof die niet afbreekt, en niet aan het bodemmateriaal adsorbeert, is convectie (het meestromen) het meest bepalende stromingsmechanisme. Het bleek echter dat een scherpe scheiding tussen verontreinigd en niet-verontreinigd water tijdens bodempassage geleidelijk vervaagde. Hiervoor werden twee processen verantwoordelijk voor geacht: diffusie en dispersie. Moleculaire diffusie (de zogenaamde Brownse bewegingen) kon maar in beperkte mate bijdragen aan deze vervaging van het front. En dus moest het verschijnsel met behulp van dispersie worden verklaard.

De achtergrond van dispersie is logisch en dus waarschijnlijk: in het model wordt uitgegaan van een homogene  $k$ -waarde, maar in feite bestaat de bodem uit een systeem van

gangetjes tussen de bodemdeeltjes door. Dat betekent dat snelheden in de verschillende poriën zullen verschillen, en zelfs binnen één porie zullen snelheidsverschillen optreden. Wanneer sommige deeltje door relatief snelle poriën stromen, en andere door relatief langzame, ontstaat er een spreiding in de tijd. Uit metingen volgt dat deze spreiding de normale verdeling volgt, wat in overeenstemming is met de achterliggende theorie.

Voor toepassing op pompstation-schaal bleek de ééndimensionale benadering niet voldoende. En dus werden tweedimensionale modellen ontwikkeld. Vervolgens bleek dat in deze modellen de mate van dispersie, uitgedrukt in de dispersielengte, aanzienlijk groter was dan bij de kolomproeven in het laboratorium. De verklaring hiervoor lag in het feit dat niet alleen verschillen in doorlatendheid van de poriën voor 'frontvervaging' zorgden, maar ook de heterogeniteiten in het watervoerend pakket.

Geleidelijk komen nu ook de eerste driedimensionale kwaliteitsmodellen beschikbaar. Daarbij blijkt vervolgens dat de mate van dispersie weer een orde lager is dan bij de tweedimensionale modellen. Sterker nog, bij het kwaliteitsmodel Vierlingsbeek, waar het watervoerend pakket in een aantal sublagen is onderverdeeld, bleek het ontbreken van dispersie in het model zeer aanyaarbare resultaten op te leveren.

### **Dat stemt tot nadenken...**

Op zich hoeft dat geen verbazing te wekken, omdat de voornaamste oorzaak van dispersie in de 2-D situatie de gelaagdheid van het watervoerend pakket betreft. Door deze gelaagdheid in het model op te nemen, is het belangrijkste deel van de 2-D-dispersie in het 3-D-model gemodelleerd. Wanneer we op deze manier doordenken, zal de resterende dispersie dus verdwijnen, als alle heterogeniteiten (in de ruimte en in de tijd) van de bodem in het model zijn opgenomen. Met andere woorden, de mate van dispersie geeft dus aan in hoeverre we de heterogeniteiten (of andere verschillen tussen model en werkelijkheid) in het model hebben opgenomen. De mate van dispersie geeft aan in hoeverre de homogene schematisatie verschilt van de heterogene werkelijkheid. Dus is dispersie geen gebiedseigen parameter. In feite is het een soort van mats-factor op ons model, die moet verhullen dat we alleen maar met homogene lagen en/of elementen kunnen rekenen, terwijl de bodem en het stromingsbeeld een veel grotere diversiteit vertonen. En dus is dispersie niet meer dan een reken-truc, die bij toepassing in het model een aanzienlijke verbetering van de resultaten geeft, maar dispersie treedt niet als fysiek proces in de bodem op. Daarmee hoort dispersie tot de model-wereld, en niet tot de werkelijke wereld.

### **Terug naar de inleiding**

Terug nu naar de stortplaats uit de inleiding van dit artikel. Wanneer je dispersie beschouwt als een rekenmethode om de onnauwkeurigheid van schematiseren mee te nemen, kun je natuurlijk nooit stellen dat de dikte van de afdeklaag afhankelijk is van de dispersie. Wat de betreffende hydroloog heeft willen zeggen, is dat de dikte wat hem betreft afhangt van de mate waarin de werkelijkheid afwijkt van zijn ideale model-schematisatie. Of in plotseling heel duidelijk Nederlands: hoe onnauwkeuriger de laag wordt aangebracht, des te dikker moet ie zijn. Maar kwantitatief bood zijn conclusie geen enkel houvast: als de dispersie geen gebiedseigen parameter is, is de dikte dus ook niet uit te rekenen.

Dat neemt niet weg dat dispersie goed in modellen kan worden toegepast. Zolang je als hydroloog maar begrijpt dat het niet meer is dan een black-box, waarin alle onzekerheden zitten met betrekking tot heterogeniteiten, sublagen, enz. Maar dispersie is te allen tijde een modelproces, dat overeenkomsten vertoont met de werkelijkheid, maar niet meer dan dat. Dispersie als fysiek proces bestaat niet.

### **Hoe hier mee om te gaan?**

In dit nummer van 'Stromingen' geven Louise Wipfler e.a. aan dat het noodzakelijk is om meer doorlatendheidsmetingen te doen om toe te passen binnen hun wijze van modelleren. Ook A.B. Pomper en H.J.T. Weerts geven aan dat er meer behoefte is aan meer detailinformatie over geohydrologische parameters in de ondergrond.

Uiteraard onderschrijf ik de behoefte om de heterogeniteit in de bodem in kaart te brengen. Juist bij kwaliteitsstudies blijken de 'oude' hydrologische homogeen-verklaringen tot ongewenste afwijkingen te leiden. Dat kun je corrigeren door dispersie in het model op te nemen, maar dan wil je die dispersie ook kunnen meten. In mijn beleving is het beter om de heterogeniteit te vertalen naar variatie in  $k(D)$ - en  $c$ -waarden in een numeriek model, omdat je de heterogeniteit dan ook op de plaats houdt waar het in werkelijkheid ook zit, namelijk in de bodemparameters. Dispersie verplaatst die heterogeniteit van de bodem naar de afgeleide van de bodemparameters, naar het stoftransport.

Wanneer je heterogeniteit al direkt vertaalt naar dispersie, maak je je afhankelijk van het gekozen model-concept, en over tien of twintig jaar zouden we wel eens heel andere model-concepten kunnen hebben. Bovendien moeten we ons realiseren dat dispersie ook 'ontstaat' als gevolg van heterogeniteiten in de tijd: stationaire modellen nemen niet mee dat sloten soms hele delen van het jaar droog staan, en dus niet functioneren. Als zo'n sloot een verontreinigingsbron is, is er dus al geen sprake van een continue stofstroom, en ook dat kun je vertalen naar dispersie. En zo zijn er legio voorbeelden te bedenken waar instationariteit dispersie-achtige resultaten geeft. Ook dan geldt dat nauwkeuriger modelleren de voorkeur heeft boven het opleggen van modelruis. Persoonlijk denk ik dat numerieke technieken hiervoor meer mogelijkheden bieden dan analytische methoden.

### **Tenslotte**

Ooit heb ik geschreven dat een hydroloog die in zijn modelparameters gelooft als feitelijke waarheden, te beschouwen is als een schrijver van kindersprookjes die zelf in het bestaan van feeën en heksen is gaan geloven. Persoonlijk ben ik niet tegen feeën en heksen, maar ik geloof niet meer dat ze bestaan. Op een zelfde manier geloof ik ook niet in het bestaan van dispersie, hoewel het van tijd tot tijd best een handige manier kan zijn om een complexe werkelijkheid te leren begrijpen.

Harry Boukes  
Rosweydelaan 29  
3454 BL De Meern  
tel. 030-6666128 (tevens fax)  
e-mail: H.Boukes@inter.nl.net