

Het modelleren van de ondergrond door simulatie van sedimentatieprocessen; een instrument voor het bepalen van stromingsparameters

Inleiding

Doel van het proces-gebaseerd modelleren

Proces-gebaseerde modellen reconstrueren de ruimtelijke variabiliteit van de ondergrond vanuit de fysische processen die hieraan ten grondslag hebben gelegen. Zij geven een kwantitatieve beschrijving van de structuur van de ondergrond in elk punt, uitgaande van de fysische processen van sedimentatie. Proces-gebaseerde modellen relateren dus de geometrie van de facies aan de processen waardoor ze gevormd zijn. Drie doeleinden komen hierbij naar voren.



J. M. T. STAM
IGG-TNO Delft



W. ZIJL
IGG-TNO Delft



J. C. VAN DAM
TU Delft

1. Simulatie van sedimentatieprocessen van een betrekkelijk korte tijdsduur, in de orde van tientallen jaren, die in waterbouwkundige studies (bijvoorbeeld kustwaterbouwkunde, rivier-reguleringswerken etc.) vaak van toepassing zijn.
2. Als interpolatie-instrument tussen meetpunten (bijvoorbeeld kernboringen) om een ruimtelijk beeld van de heterogeniteit van de ondergrond en de daarmee samenhangende eigenschappen te genereren. Het is dan een aanvullend instrument op de huidige generatie van stochastische simulatiemodellen en geofysische methoden. Op deze manier kan inzicht worden gekregen in de ruimtelijke variabiliteit van deze eigenschappen; bijvoorbeeld als door een simulatie de korrelverdeling binnen een structuur bepaald is, kunnen hieruit conclusies voor de plaatselijke porositeit en doorlatendheid getrokken worden en met behulp van andere factoren (bijvoorbeeld hoekigheid van de korrels, graad van cementatie) ook berekend worden.
3. Als een 'artificieel testgebied'
 - a. Om inzicht te krijgen in de gevoeligheid van stromingsparameters (doorlatendheid, porositeit en specifieke berging) voor de geologische structuur.

Samenvatting

Proces-gebaseerde modellen simuleren de ondergrond door de fysische processen van sedimentatie te reconstrueren. Zij vinden hun toepassing in de exploratie en exploitatie van grondwater, olie, gas en andere natuurlijke grondstoffen. Ook kunnen zij van belang zijn voor het realistisch modelleren van de verspreiding van grondwaterverontreiniging. De ontwikkeling van proces-gebaseerde modellen is nog in een beginstadium. In dit onderzoek wordt een twee-dimensionaal fluviaal model gebruikt om kunstmatige voorbeelden van sedimentaire pakketten met verschillende karakteristieken te genereren. Deze pakketten dienen als basis om inzicht te krijgen in de vele factoren die het geohydrologische modelleren beïnvloeden. Hierbij komt vooral het probleem naar voren hoe geschikte waarden voor de gemiddelde doorlatendheid te verkrijgen zijn uit de heterogene doorlatendheidsverdeling van de ondergrond. Deze studie is een voorbeeld van de vele mogelijkheden en toepassingen in de aardwetenschappen van proces-gebaseerde modellen.

b. Als basis om technieken te ontwikkelen voor het modelleren van deze stromingsparameters, om zo tot een verbeterd inzicht te komen in de modellering van vloeistofstroming door poreuze media. Deze toepassing ligt zowel op de lokale schaal van bijvoorbeeld pompproeven als op de schaal van regionale grondwaterstudies.

In het kader van grondwaterkwaliteitsstudies gaat de interesse van proces-gebaseerde modellen vooral uit naar dit laatste doel; als een numerieke beschrijving van de ondergrond om inzicht te krijgen in de gevolgen van menselijke ingrepen op het geohydrologische systeem, bijvoorbeeld waterwinning, lozing van verontreiniging [zie Abbott *et al.*, 1986a en b]. Het gesimuleerde heterogene model kan worden gebruikt in een numeriek stromingsmodel om de verspreiding (convectie en dispersie) van grondwaterverontreiniging te berekenen. In het kader van de olie- en gaswinning, waarbij het gaat om gesteentes op grote diepte, waarvan de ontginning met hoge kosten gepaard gaat, worden zij vooral ontwikkeld als interpolatie-instrument om inzicht te krijgen in de heterogeniteiten van de geologie van de ondergrond op verschillende schalen (van een gradatie in de korrelstapeling tot tektonische invloeden). De ontwikkeling van proces-gebaseerde modellen verkeert in een beginstadium en is nog maar weinig in de praktijk toegepast. De eerste onderzoeken om dit soort simulatoren te ontwikkelen [Tetzlaff en Harbaugh, 1989; Martinez, 1992; Wendenbourg en Ulmer, 1992] en deze studie, tonen aan dat deze simulatoren een waardevol instrument kunnen zijn.

Stappen van het proces-gebaseerd modelleren
In een hydrogeologische modelleringsstudie worden verschillende fasen doorlopen. Voor proces-gebaseerde modellen

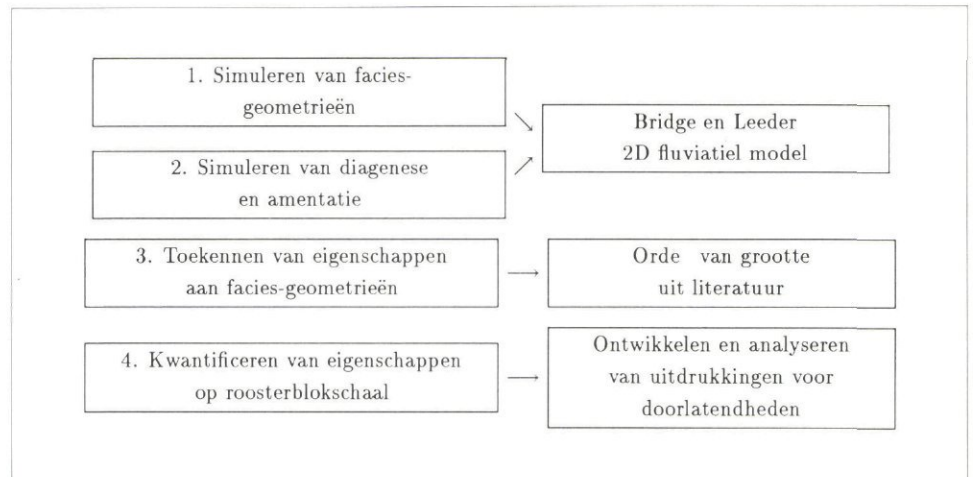
kunnen die als volgt worden samengevat.

1. Het simuleren van facies-geometrieën, gebaseerd op de sedimentatieprocessen waardoor ze gevormd zijn. Om praktische redenen wordt hierbij uitgegaan van de fysische processen zoals die zich in huidige sedimentaire afzettingen afspelen, zowel fluviaal [Lee en Harbaugh, 1992], deltaïsch [Tetzlaff en Harbaugh, 1989; Martinez, 1992] en eolisch [Stam, 1992b]. Dit kan op heel gedetailleerde schaal geschieden, op een vrijwel korrel-tot-korrel basis, zodat de ondergrond op een schaal van enkele centimeters zeer nauwkeurig nagebootst kan worden. Om echter efficiënt op grotere schaal te simuleren zullen vereenvoudigingen nodig zijn, zodat in vrijwel elk fysisch-gebaseerd model empirische of stochastische relaties zullen verschijnen (voor een overzicht van de problemen, zie [Stam, 1992a]). Behalve het beschrijven van de processen zelf is het analyseren en kwantificeren van de relatieve invloed van pre-, syn- en post-sedimentaire effecten op de afzettingsstructuur een extra moeilijkheid.
2. Als de vorm van de verschillende strata van moderne afzettingen gesimuleerd zijn, moeten de processen die plaatsvinden door diagenese gemodelleerd worden: compactie (zetting), cementatie (verkitting) en spanningsbreuken.
3. Hiermee heeft men een verdeling van de geometrie van de facies verkregen. Aan deze geometrieën moeten eigenschappen worden toegekend (porositeit, permeabiliteit en specifieke berging). In de theorie zijn hiervoor uitdrukkingen ontwikkeld die de eigenschappen van de korrels van het sediment (grootte, vorm, hoekigheid etc.) relateren aan eigenschappen van de afzettingen als permeabiliteit en porositeit, bijvoorbeeld de Carman-vergelijking [Carman, 1937]. Deze relaties zijn meestal empirisch of bevatten empirische parameters die voor specifieke omstandigheden afgeleid zijn.

4. Om een vloeistofstromingssimulator te kunnen toepassen moeten de eigenschappen gekwantificeerd worden op de schaal van de roosterblokken, zoals die in grondwater- of olie-simulators gebruikt worden. Dit houdt in dat een variërende eigenschap, die van punt tot punt een verschillende waarde heeft, gemiddeld moet worden tot één waarde per roosterblok. De voornaamste parameters die een rol spelen bij vloeistofstroming zijn de porositeit, de doorlatendheid en de specifieke bergingscoëfficiënt. Van deze drie parameters is de blokschalige doorlatendheid het meest belangrijk. Deze is ook het moeilijkst te bepalen door de variatie van de lokale waarde van de doorlatendheid en door het gebrek aan inzicht en kennis over het effect en de interactie van de kleinschalige heterogeniteiten op een grotere schaal. Op het gebied van middeling van doorlatendheden naar blokschalige waarden die als invoer voor een stromingsmodel kunnen dienen is echter veel onderzoek gedaan.

De theorieën en technieken kunnen als volgt verdeeld worden:

- Methoden gebaseerd op eenvoudige algebraïsche berekeningen. De eerste en meest voor de hand liggende methoden zijn gebaseerd op rekenkundige, harmonische en meetkundige gemiddelden [Cardwell en Parson, 1945; Warren en Price, 1961]. Ook meer gecompliceerde combinaties behoren tot deze categorie, zoals de renormalisatietechniek [King, 1989]. Praktische algebraïsche uitdrukkingen zijn gebaseerd op de geometrie van bepaalde type afzettingen, waarbij een bijbehorende stroomlijnlengte wordt berekend [Haldorssen, 1989]. Ofschoon gebaseerd op vereenvoudigde principes, vormt deze categorie een eerste benadering om de geologische structuur van de ondergrond in de bepaling van de stromingsparameters te betrekken.
- Methoden gebaseerd op statistische theorieën. De onzekerheid over de distributie van de permeabiliteit wordt dan statistisch gemodelleerd [Gelhar, 1986; Dagan, 1989]. Hierbij worden meestal bepaalde aannamen gedaan over de eigenschappen van de ondergrond, bijvoorbeeld ergodiciteit en stationariteit.
- Methoden gebaseerd op de feitelijke fysische principes van vloeistofmechanica op de schaal van korrelgrootte [Quintard en Whitaker, 1987]. Deze methoden worden voor het algemene geval ontwikkeld, maar ze zijn vaak te theoretisch van aard om in de praktijk te worden toegepast.
- Uiteindelijk kunnen concrete randvoorwaarden worden opgesteld voor het



Afb. 1 - Schema van het proces van fysisch-gebaseerd modelleren, en toepassing daarvan in deze studie.

toepassen van het vloeistofstromingsmodel op het gebied.

Als voorbeeld van deze procedure dient de volgende twee-dimensionale studie. Het schema in afb. 1 is een samenvatting hiervan en van de toepassing in deze studie.

Het genereren van synthetische stratigrafieën

Het Bridge en Leeder Model

Het Bridge en Leeder model is ontwikkeld voor de beschrijving van fluviatiele afzettingen [Bridge, 1979; Bridge en Leeder, 1979]. Het is in opzet een proces-gebaseerd model, waarin enkele processen beschreven zijn met behulp van empirische en stochastische functies. Het systeem is vereenvoudigd tot een dal of bekken van kleiachtig materiaal, waarin één enkele rivier stroomt die zand afzet. Van tijd tot tijd verlegt deze rivier haar bedding naar een ander deel van het bekken. Het model genereert zo twee-dimensionale secties van al of niet onderling verbonden zandlenzen in een kleimatrix.

Het model (geïmplementeerd in een computerprogramma) is gebaseerd op de volgende aannamen en processen [Bridge, 1979; Bridge en Leeder, 1979]:

- De dimensies van het bekken zelf en van het rivierbed (breedte en diepte) moeten als conceptuele gegevens uit bijvoorbeeld veldwerk worden ingevoerd.
- Na een zekere tijd verlegt de rivier haar bedding. Deze tijd wordt door een stochastische functie beschreven onder de aanname dat de waarschijnlijkheid van verspringsing met de tijd groter wordt. In de parameters van deze stochastische functie zit ook een willekeurig computer-gegenereerd getal, waardoor secties met dezelfde invoerparameters verschillen in de geometrie en ligging van de zand-

lenzen vertonen. De combinatie van rivierbed-dimensies en de tijd tussen verspringsing bepaalt het meanderende karakter (relatief smalle en diepe rivierbedding met een lange verspringsingstijd) of vlechtende karakter (relatief brede rivierbedding met korte verspringsingstijd) van de rivier.

3. De sedimentatie (vereenvoudigd tot verticale aggradatie) wordt beschreven door een exponentiële vergelijking. Dit is gebaseerd op de aanname dat, als de rivier buiten haar oevers treedt, er meer zand wordt afgezet dicht bij de rivieroever dan op grotere afstand hiervan.

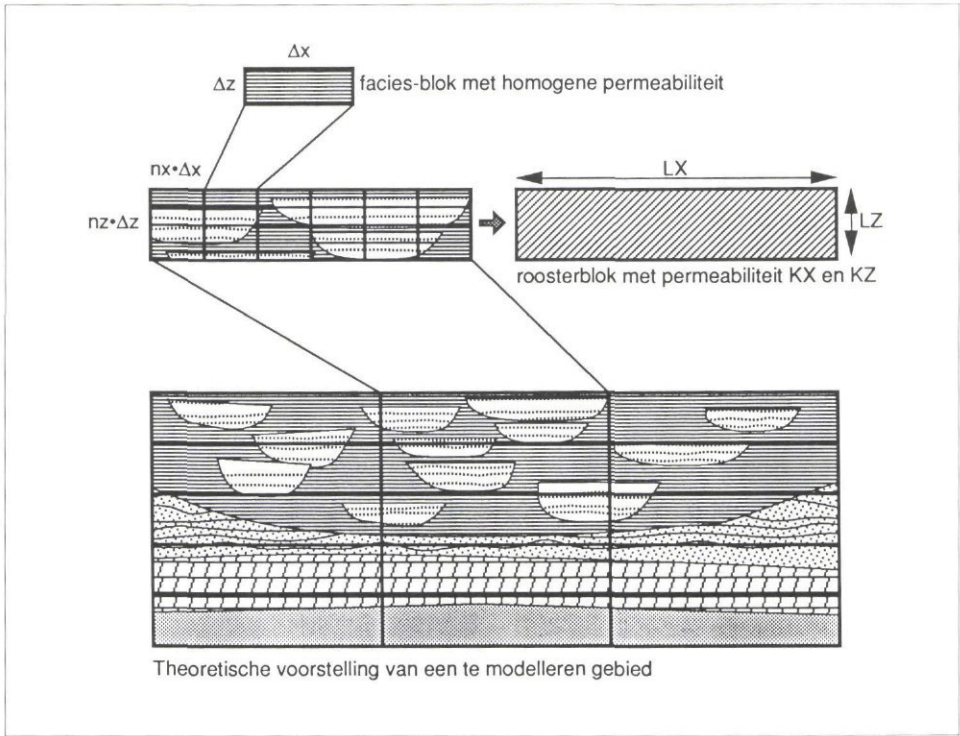
4. Onder de aanname dat compactie voor klei veel groter is dan voor zand, wordt er op het klei-gedeelte van de sectie een compactie-functie toegepast.

5. Tectonische inwerking op het bekken kan gemodelleerd worden als een relatieve beweging van één zijde van het bekken ten opzichte van de andere.

Gebruik als basis voor het genereren van karakteristieke stratigrafieën

Het Bridge en Leeder model is gebruikt om verschillende stratigrafieën met karakteristieke, uiteenlopende eigenschappen te genereren en de consequenties hiervan voor vloeistofstroming te bestuderen. De volgende gevallen van verschillende morfologieën werden gegenereerd.

- Een doorsnede met brede en ondiepe zandafzettingen, zoals veroorzaakt door een zich snel verleggende, vlechtende rivier. Op de schaal van het bekken ziet men een hoofdzakelijk horizontale gelaagdheid, zodat de bekkenschaal-doorlatendheid in de x-richting (de horizontale richting, evenwijdig aan de gelaagdheid) beduidend hoger is dan in de z-richting (de verticale richting, loodrecht op de gelaagdheid). Dit sectie-type zal in het vervolg aangeduid worden



Afb. 3 - Terminologie voor het kwantificeren van doorlatendheden.

gemiddelde over de diepte worden genomen, resulterende in $\langle k_z \rangle$ (uitdrukking 4a), en vervolgens wordt weer het harmonisch gemiddelde over de breedte genomen, resulterend in $\langle k_z \rangle$ (uitdrukking 4b).

$$\langle k_x \rangle (x) = \frac{1}{LZ} \int_0^L k_x(x,z) dz \quad (3a)$$

$$\langle\langle k_x \rangle\rangle = \left[\frac{1}{LX} \int_0^L \frac{dx}{\langle k_x \rangle (x)} \right]^{-1} \quad (3b)$$

$$\langle k_x \rangle (x) = \left[\frac{1}{LZ} \int_0^L \frac{zx}{k_z(x,z)} \right]^{-1} \quad (4a)$$

$$\langle\langle k_z \rangle\rangle = \left[\frac{1}{LX} \int_0^L \frac{dx}{\langle k_z \rangle (x)} \right]^{-1} \quad (4b)$$

Deze theorie komt voort uit de drie-dimensionale uitwerking van de continuïteitsvergelijking en de wet van Darcy met de zogenaamde storingstechniek. Hieruit worden uitdrukkingen verkregen voor de roosterblokgemiddelden van de negen componenten van de permeabiliteitstensor (drie componenten $\langle k_{xx} \rangle$, $\langle k_{yy} \rangle$ en $\langle k_{zz} \rangle$ voor de hoofdasen, en zes kruistermen $\langle k_{xy} \rangle$, $\langle k_{xz} \rangle$ etc.). De oplossingen hebben de vorm van een reeks waarvan de nulde-orde termen $\langle k_x \rangle$ en $\langle k_y \rangle$ overeenkomen met de rekenkundige gemiddelden van k_x (zie

uitdrukking 3a) en k_y , en het harmonische gemiddelde van k_z (zie uitdrukking 4a). De overige termen van de reeks geven de kruistermen en de correcties ten gevolge van de horizontale heterogeniteiten die in de lagen voorkomen. Tot slot, de grondslag achter het harmonisch middelen in de horizontale richting, voor zowel $\langle k_x \rangle$ als $\langle k_z \rangle$, is dat de vloeistofstroming door een blok hoofdzakelijk bepaald wordt door de stroming in zijn omgeving en bijna onafhankelijk is van de doorlatendheid van het blok zelf. Een uitgebreide verantwoording hiervan is te vinden in [Zijl en Stam, 1992].

Gevoeligheid voor rooster-dimensies

De bovenstaande uitdrukkingen berekenen de doorlatendheid op de schaal van een roosterblok. De kleinschalige heterogene doorlatendheden worden dus tot één blokschalige waarde gemiddeld. Voor praktische toepassing van bovenstaande formules moet daarom het blok door een rooster verdeeld worden. Het is hierbij van belang om een zo groot mogelijk rooster te gebruiken, maar toch fijn genoeg zodat het effect van de heterogeniteiten niet 'weggemiddeld' wordt. Om dit te bestuderen worden de secties met een steeds fijner rooster verdeeld in kleinere facies-eenheden. Voor de hele sectie worden de doorlatendheden steeds berekend met formules (3a,b) en (4a,b). Hiermee is aangenomen dat de gehele sectie één roosterblok vormt. Binnen deze

facies-eenheden worden de doorlatendheden ook met uitdrukkingen uit de vorige paragraaf berekend. Op deze manier ontstaat een opschalingsprocedure in twee stappen; van puntgewijze doorlatendheden naar de facies-eenheid, en van de facies-eenheid naar het roosterblok (zie ook afb. 3). Door het theoretische karakter van deze studie zijn voor de doorlatendheden van beide materialen, zand en klei, geen waarden uit actuele voorkomens genomen, maar waarden uit de literatuur, die slechts een orde van grootte aangeven. De aangenomen waarden voor de doorlatendheden zijn: 1 m/dag voor zand en 10^{-6} m/dag voor klei.

Een voorbeeld van de resultaten van de gelaagde sectie is grafisch weergegeven in afb. 4. Hier ziet men de variatie van de blokschalige doorlatendheden $\langle k_x \rangle$ en $\langle k_z \rangle$, per roosterbreedte (Δx), voor steeds kleinere roosterhoogte (Δz). De vorm van de afb. is zeer vergelijkbaar met die van de discontinue sectie. Uit afb. 4 is het volgende de concluderen.

1. De grootschalige doorlatendheden $\langle k_x \rangle$ en $\langle k_z \rangle$ bereiken pas een vaste waarde als inderdaad de minimum afmetingen van de oorspronkelijke heterogeniteiten zijn bereikt (deze worden gegeven in tabel II). De bereikte waarde kan beschouwd worden als de karakteristieke waarde voor dat concrete type sectie.

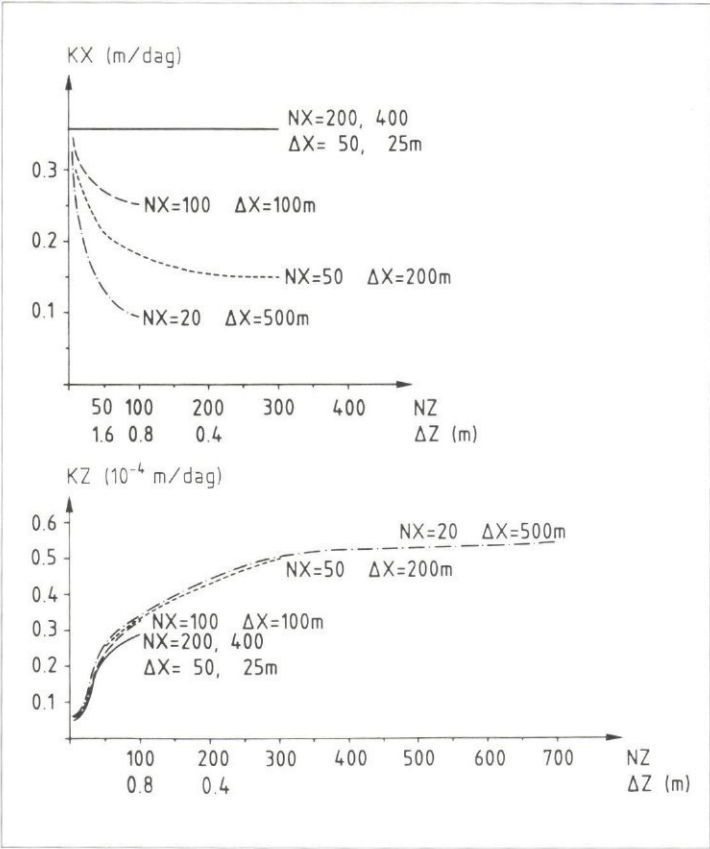
TABEL II - Blokschalige doorlatendheden en facies-afmetingen.

Sectie	KX [m/dag]	KZ [m/dag]	Δx [m]	Δz [m]
Horizontale	0,35	$0,55 \cdot 10^{-4}$	50	0,27
Discontinue	0,22	$1,00 \cdot 10^{-4}$	50	8,0

2. Voor de waarde van de grootschalige doorlatendheid in de x-richting, $\langle k_x \rangle$, blijkt de keuze van de roosterbreedte van het grootste belang te zijn, terwijl de uiteindelijke waarde voor $\langle k_z \rangle$ al snel bereikt wordt.

3. Voor de waarde van de grootschalige doorlatendheid in de z-richting, $\langle k_z \rangle$, blijkt voornamelijk de keuze van de roosterhoogte van belang te zijn, terwijl de waarde van de roosterbreedte praktisch geen invloed heeft.

De uiteindelijke waarden voor de secties (tabel II) tonen aan dat de grootschalige doorlatendheid de visuele karakteristieken van de stratificatieën weergeven. Zo is bij de 'horizontale sectie' de waarde van $\langle k_x \rangle$ veel groter dan de waarde van $\langle k_z \rangle$. Bij de 'discontinue sectie' is de waarde van $\langle k_x \rangle$ veel kleiner dan die van de 'horizontale sectie', maar niet zo veel kleiner als verwacht kan worden als de



Afb. 4 - Afhankelijkheid van KX en KZ voor grootte van facies-blokken. Resultaten voor horizontaal discontinue sectie.

stratigrafieën van afb. 2a en b worden vergeleken (er kan nog opgemerkt worden dat beide secties vergelijkbare zandpercentages hebben, zie tabel I). Dit is ook toe te schrijven aan de grote dimensie in de x-richting (10.000 m) ten opzichte van de z-richting (enkele honderden meters).

Bepaling van de oppervlakte waarover de blokschalige waarden van toepassing zijn
In het voorafgaande zijn de waarden van de blokschalige doorlatendheid voor twee verschillende sectietypen bepaald. Deze waarden staan vermeld in tabel II. Het belang om inzicht te krijgen in de grootte van het gebied waarvoor deze waarden geldig zijn is al vermeld. Hiertoe dienen de volgende twee proeven:

1. «kx» en «kz» worden over een steeds kleiner gebied berekend. Zodra de waarden te veel beginnen af te wijken van de waarden in tabel II, betekent dit dat de plaatselijke waarden de doorlatendheid bepalen en dat het gebied te klein is voor toepassing van deze blokschalige waarden. Meestal vertonen «kx» en «kz» ook afwijkingen als zij over de volle oppervlakte genomen worden. Dit kan toegeschreven worden aan de randeffecten van het simulatiemodel. Voor de 'horizontale sectie' is een maximale afwijking van 10% gehanteerd voor de horizontale doorlatendheid. Voor de 'discontinue

sectie', die een veel meer heterogene structuur heeft, is een ruimere marge van 25% genomen voor de horizontale doorlatendheid. De verticale doorlatendheid vertoont veel grotere variaties, zodat er ook geen marge aan gesteld kon worden.
2. Het dusdanig bepaalde minimum roosterblok wordt voor verschillende gebieden van het domein berekend (in het onderhavige geval respectievelijk linkerbovenhoek, rechterbovenhoek, linkeronderhoek en rechteronderhoek).

Een te groot verschil tussen de waarden betekent dat het verschillende gedeelte een afwijkende structuur heeft en met een andere parameter gekarakteriseerd moet worden.

De resultaten voor beide secties zijn in tabel III weergegeven. Hierin ziet men de minimale oppervlakte waarvoor de bepaalde blokschaalwaarde voor «kx» en «kz» geldig is, en het gemiddelde en de standaarddeviatie van zowel «kx» als «kz» als deze over verschillende gebieden van het oorspron-

kelijke domein worden genomen. Aan de waarde van de standaarddeviatie is vooral te zien dat voor «kx» een redelijk constante waarde te bepalen is. Voor «kz» is dit echter veel moeilijker.

Evaluatie en conclusies

Deze studie geeft de mogelijkheden aan om door proces-gebaseerde sedimentatiemodellen inzicht te krijgen in de invloed van de geologische structuur van de ondergrond op het modelleren van de stromingsparameters, vooral de doorlatendheid. De volgende algemene conclusies kunnen hieruit opgemaakt worden.

1. Wanneer men gemiddelde stromingsparameters bepaalt voor roosterblokken in grondwaterstromingsmodellen is het van groot belang om rekening te houden met de geologische structuur van de ondergrond. Als de ondergrond een overwegend gelaagde structuur heeft, kunnen blokschalige doorlatendheden met een grotere zekerheid bepaald worden dan wanneer de ondergrond een meer variabele structuur heeft.
2. Er is meer onzekerheid bij het bepalen van een blokschalige verticale doorlatendheid, dan bij het bepalen van een blokschalige horizontale doorlatendheid. Dit is waarschijnlijk toe te schrijven aan de veel grotere horizontale afmetingen van de roosterblokken ten opzichte van de verticale afmetingen.
3. De gemiddelde blokschalige doorlatendheden worden aanzienlijk beïnvloed door de roosterbreedte en -hoogte. Voor de horizontale doorlatendheid is de roosterbreedte van belang, terwijl voor de verticale doorlatendheid de roosterhoogte bepalend is.
4. Voor de hier gebruikte uitdrukkingen voor het krijgen van blokschalige doorlatendheden, kan worden opgemerkt dat zij nog behoren tot de categorie van 'algebraïsche uitdrukkingen', zoals aangeduid in de inleiding. Derhalve houden zij maar in beperkte mate rekening met de geologische structuur van de ondergrond, omdat zelfs op facieschaal een min of meer willekeurige verdeling in rechtehoeken met homogene doorlatendheid gemaakt moet worden. In deze studie is dit opgelost door in twee stappen te middelen (van puntsgewijze verdeling naar facieschaal, en van facieschaal naar roosterblokschaal).

TABEL III - Geldigheidsgebied van grootschalige doorlatendheidswaarden.

Sectie	Geldig oppervlakte Min	KX		KZ	
		gemiddelde	stand.deviate	gemiddelde	stand.deviate
Gelaagde	50,0	0,38	9,0	$0,71 \cdot 10^{-4}$	77,0
Discontinue	64,0	0,16	24,2	0,33	93,0

Literatuurreferenties

- Abbot, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. and Rasmussen, J. (1986a). *An introduction to the European hydrological system – système hydrologique européen, 'SHE', I: history and philosophy of a physically-based distributed modelling system*. Journal of Hydrology 87, pp. 45-49.
- Abbot, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. and Rasmussen, J. (1986b). *An introduction to the European hydrological system – système hydrologique européen, 'SHE', II: structure of a physically-based distributed modelling system*. Journal of Hydrology 87, pp. 61-77.
- Bridge, J. S. (1979). *A Fortran IV program to simulate alluvial stratigraphy*. Computers and Geosciences, Vol. 5, pp. 335-348.
- Bridge, J. S. en Leeder, M. R. (1979). *A simulation model of alluvial stratigraphy*. Sedimentology, Vol. 26, pp. 617-644.
- Cardwell, W. T. en Parson, R. L. (1945). *Average permeabilities of heterogeneous oil sands*. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers.
- Carman, P. C. (1937). *Fluid flow through granular beds*. Transactions-Instituut of Chemical Engineers, no. 15, pp. 150-166.
- Dagan, G. (1989). *Flow and transport in porous formations*. Springer-Verlag.
- Gelhar, L. W. (1986). *Stochastic subsurface hydrology, from theory to application*. Water Resources Research, August; v. 22 no. 9, pp. 135S-145S.
- Haldorssen, H. H. (1989). *On the modeling of vertical permeability barriers in single-well simulation models*. Society of Petroleum Engineers; Formation Evaluation, September, pp. 349-358.
- Kasap en Lake (1990). *Calculating the effective permeability tensor of a grid block*. Society of Petroleum Engineers; Formulation Evaluation, June, pp. 192-200.
- King, P. R. (1989). *The use of renormalization for calculating effective permeability*. Flow and transport in Porous Media, No. 4, pp. 37-58.
- Lee, Y.-H. and Harbaugh, J. W. (1992). *Stanford's SEDSIM project: dynamic three-dimensional simulation of geologic processes that affect clastic sediments*, in 'Computer Graphics in Geology. Three-dimensional Computer Graphics in Modelling Geological Structures and simulating Geologic Processes' Lecture Notes in Earth Sciences no. 41, ed. R. Pflug en J. W. Harbaugh. Springer-Verlag.
- Martinez, P. A. (1992). *Three-dimensional simulation of litoral transport*, in 'Computer Graphics in Geology. Three-dimensional Computer Graphics in Modelling Geological Structures and simulating Geologic Processes' Lecture Notes in Earth Sciences no. 41, ed. R. Pflug en J. W. Harbaugh. Springer-Verlag.
- Quintard, M. et Whitacker, S. (1987). *Écoulement monophasique en milieux poreux: effet des hétérogénéités locales*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 6, No. 5, pp. 691-726.
- Stam, J. M. T. (1992a). *A process based model for the aeolian environment at the dune scale*. (In voorbereiding).
- Stam, J. M. T. (1992b). *Process based modelling of sedimentation as a basis for fluid flow modelling*. Koninklijk Nederlands Chemische Vereniging Symposium series.
- Stam, J. M. T., Zijl, W. and Turner, A. K. (1989). *Determination of hydraulic parameters from the reconstruction of alluvial stratigraphy*, in *Computers and Experiments in Fluid Flow, Proceedings of the Fourth International Conference on Computational Methods and Experimental Measurements*. Capri, May, ed. G. M. Carlomagno en C. A. Brebbia. Springer-Verlag.
- Stam, J. M. T. and Zijl, W. (1992). *Modelling permeability in imperfectly layered porous media II: A two-dimensional application of block-scaled permeability*. Te verschijnen in *Mathematical Geology*.
- Tetzlaff, D. M. and Harbaugh, J. W. (1961). *Flow in heterogeneous porous media*. Society of Petroleum

Engineers, September.

Weber, K. J. (1986). *How heterogeneity affects oil recovery*, in *Reservoir Characterisation*, ed. Carol en Lake.

Wendebourg, J. and Ulmer, J. W. D. (1992). *Modeling compaction and isostatic compensation in SEDSIM for basin analysis and subsurface fluid flow*, in 'Computer Graphics in Geology. Three-dimensional Computer Graphics in Modelling Geological Structures and simulating Geologic Processes' Lecture Notes in Earth Sciences no. 41, ed. R. Pflug en J. W. Harbaugh. Springer-Verlag.

Zijl, W. and Stam, J. M. T. (1992). *Modelling permeability in imperfectly layered porous media I: derivation of block-scale permeability tensor for thin grid blocks*. Te verschijnen in *Mathematical Geology*.

Zijl, W. (1990). *Natuurlijke grondwaterstroming in sedimentaire bekkens*. College-dictaat Vrije Universiteit Amsterdam, Faculteit der Aardwetenschappen, 650/1010/1, September.

Zijl, W. (1991). *De anisotrope transmissiviteit van heterogene aquifers*. H₂O (24) 1991, nr. 19, pp. 534-536.

• • •

Cursussen waterbeheer

Het Prof. H. C. van Hall Instituut, Rijks Agrarische hogeschool in Groningen, organiseert een aantal cursussen op het gebied van waterbeheer. In 1993/1994 worden de cursussen 'Waterverontreiniging', 'Waterzuivering' en 'Integraal Waterbeheer' gehouden. Nadere inlichtingen: Prof. H. C. van Hall Instituut, Rijks Agrarische hogeschool Groningen, mw drs. I. Zeekaf, Postbus 17, 9700 AA Groningen, tel. 050-25 58 90 / 26 59 58.

TCB: Aparte aanpak fosfaat-verzadigde gronden toch noodzakelijk

De Technische Commissie Bodem-bescherming (TCB) heeft in een advies aan de ministers Bukman (LNV) en Alders (VROM) geschreven dat zij het niet eens is met het voorstel om een speciale regeling voor fosfaatverzadigde gronden te vervangen door een versnelde aanscherping van de landelijk geldende normen voor de maximale toediening van dierlijke mest.

Door de ministers zijn herhaaldelijk pogingen gedaan om binnen het mest-beleid een regeling van de grond te krijgen waarbij op fosfaatverzadigde gronden geen overbesteding meer mag plaatsvinden. Fosfaatverzadigde gronden zijn in het verleden al zo zwaar overbested dat de bodem geen fosfaat meer kan binden. Bij doorgaan met de overbesteding zal er veel fosfaat naar het grondwater uitspoelen. Daarom was het de bedoeling in de regeling te verbieden om op fosfaatverzadigde gronden meer fosfaat via dierlijke mest toe te dienen, dan door het gewas kan worden opgenomen.

Dit beleid wordt uiteindelijk ook op landelijke schaal nagestreefd. Maar om de boeren de tijd te geven aan de normen te wennen, zal in een aantal stappen naar de evenwichtsbemesting worden toegewerkt. Op gronden die al met fosfaat zijn verzadigd, kan daar echter niet op worden gewacht. (Persbericht TCB)



Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO (CHO-TNO)

Publikatie CHO-TNO verschenen

Onlangs is het verslag van de 10e CHO-Studiebijeenkomst 'Schaalproblemen in de hydrologie' verschenen. In het verslag zijn ook de schriftelijke bijdragen van de deelnemers aan de studiebijeenkomst verschenen. Dit verslag is uitgekomen als nr. 31 in de serie Rapporten en Nota's van de CHO-TNO. Exemplaren van het verslag zijn te bestellen bij CHO-TNO, mw. C. W. S. Posthumus, Postbus 6067, 2600 JA Delft, telefoon 015-69 72 81. De kosten bedragen f 30,- inclusief verzendkosten.



Nederlandse Vereniging voor Afvalwaterbehandeling en Waterkwaliteitsbeheer

NVA-Basiscursus Riolering 1993/1994

De Nederlandse Vereniging voor Afvalwaterbehandeling en Waterkwaliteitsbeheer (NVA) organiseert voor de 11e keer de 'Basiscursus Riolering'. De cursus is bedoeld voor medewerkers van alle instellingen en bedrijven die belast zijn met de planning, ontwerp, aanleg of beheer van riolering, danwel een controlerende (toezichthoudende) taak hebben, danwel bij de vergunningverlening zijn betrokken.

Lesstof

In de cursus komen de volgende onderwerpen aan de orde:

- inleiding
- wetten en verordeningen
- rioolstelsels en -systemen
- ontwerp-grondslagen