

DE BODEM HYDROLOGISCH GEANALYSEERD: VAN METEN NAAR MODELLEREN

ir. D. JACQUES, doctoraatstudent ILWB,
Dr. D. MALLANTS, wetenschappelijk
medewerker ILWB,
Prof. J. FEYEN, professor ILWB,
Katholieke Universiteit Leuven

THE SOIL HYDROLOGICALLY ANALYSED: FROM MEASUREMENT TO MODELLING

Since flow of water in soils is a crucial factor of solute leaching and groundwater contamination, a better control of groundwater quality begins by the accurate description of soil hydrological processes. However, the heterogeneity of soils, such as soil layering, macropores and the spatial variability, has a significant influence on water flow and on the transport of pollutants from the unsaturated zone to the groundwater. If one wants to minimize solute leaching and groundwater contamination, it is crucial to use simulation models which account for the variability of the soil properties. This can be done with the one-dimensional transport model WAVE (Vanclooster et al., 1994) within a stochastic framework based on a Monte-Carlo simulation. This methodology is illustrated with a field-scale drainage problem. The soil hydraulic properties of a multi-layered soil were determined on 180 soil cores (100 cm³) and described

with parametric analytical functions. The statistical distribution and moments (mean, standard deviation and correlation) of the parameters were used to generate 500 hypothetical soil profiles containing three soil layers. The drainage from an initial saturated soil was calculated using the WAVE-model. Average, variability and extremes of drainage curves were compared with measured drainage from 15 large soil columns (1 meter long, 30 cm diameter). Both mean drainage and variability of drainage is underestimated. Also the maximum drainage is significantly underestimated, which is probably due to the occurrence of macropores in the soil. If, however, models are adjusted to describe observed water flow and solute transport, the stochastic simulation can be a very useful tool for integral water management.

De waterbeweging in de bodem ligt aan de basis van het transport van polluenten naar het grondwater. Een betere controle van de grondwaterkwaliteit begint dan ook bij een betere beschrijving van de hydrologische processen die zich in de onverzadigde bodemzone afspelen. Genuanceerde voorspellingen omtrent de waterstroming en het transport van polluenten kunnen gedaan worden vanuit de integratie van computersimulaties en numerieke modellen met statistische technieken. Dit biedt nieuwe mogelijkheden voor fundamenteel milieugegericht bodemonderzoek en talrijke praktische toepassingen zoals milieu-impactstudies, beheersplannen voor drinkwaterwinningsgebieden en de sanering van vervuilde sites.

INLEIDING

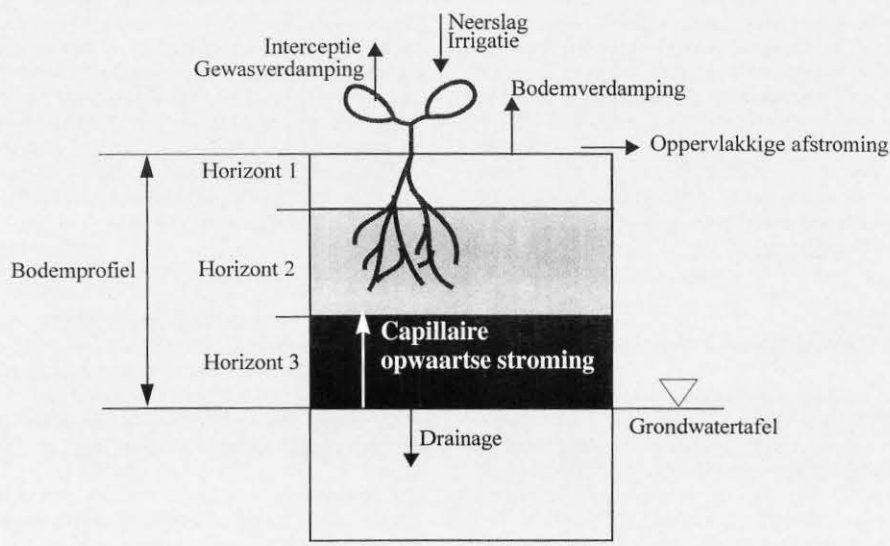
Steeds frequenter vinden we in wetenschappelijke publikaties alarmerende berichten terug over bodem- en grondwaterverontreiniging. Wetenschappelijk onderzoek toont aan dat nitraten, zware metalen, pesticiden, poly-aromatische koolwaterstoffen en andere organische en anorganische polluenten op talrijke plaatsen in te grote hoeveelheden voorkomen (V.M.M., 1994). Deze polluenten komen in het milieu terecht

onder andere door landbouwpraktijken, industrieel afvalwater, particuliere lozingen en accidentele calamiteiten. Elk van deze polluenten kan een potentiële bedreiging vormen voor bodem en grondwater en voor

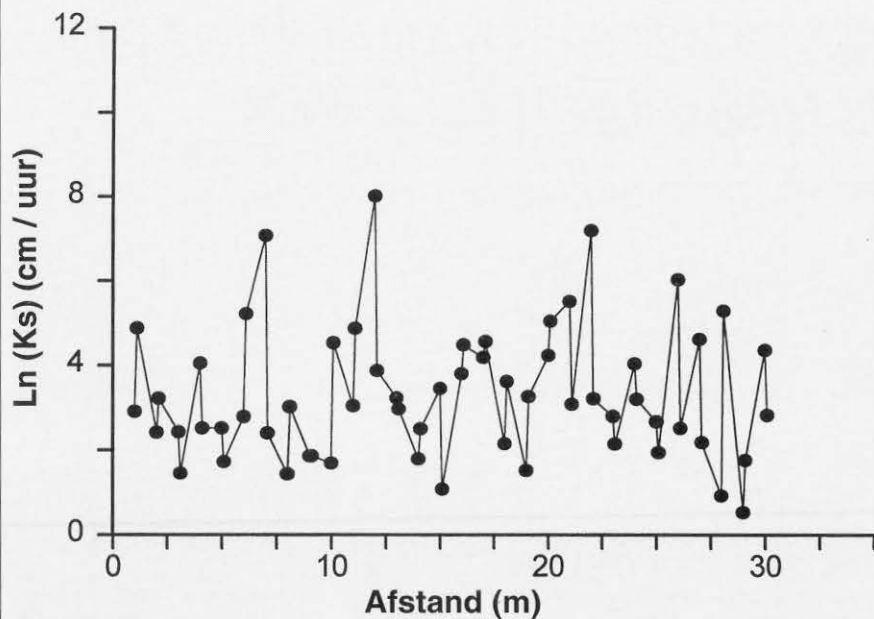
de verschillende levende componenten van het ecosysteem waaronder vispopulaties en tenslotte ook de mens.

Nemen we de stoffen die door landbouwpraktijken in het milieu zijn terechtgekomen

Figuur 1: De verschillende hydrologische processen in de bodem.



Figuur 2: Variabiliteit van de verzadigde waterdoorlatendheid langsheen een transect van 31 meter in een zandleembodem (Bekkevoort).



als voorbeeld, dan wordt het risico op bijvoorbeeld vervuiling van drinkwaterreserves bepaald door de snelheid van verspreiding van het pollutant in het bodem-grondwatersysteem. De zuivering van vervuild grondwater voor de productie van schoon drinkwater vereist in toenemende mate het gebruik van (steeds duurder) behandelingsstechnieken. Vrijwaring van voldoende reserves aan drinkbaar water is enkel mogelijk indien een halt wordt toegeroepen aan de doorsijpeling van pollutanten uit de bodem. Dit is enkel mogelijk door een aangepast beleid te voeren inzake mestnormering. Aangezien de doorsijpeling van pollutanten sterk afhangt van het bodemtype, dienen mestnormen en pesticidegebruik bodemspecifiek te zijn. Dit vereist uiteraard inzicht in de relatie tussen bodemtype en uitspoeling.

In dit artikel wordt dieper ingegaan op de mogelijkheden en beperkingen van simulatiemodellen om het transport van water en pollutanten in bodems te berekenen. De mate waarin de gesimuleerde stromingsprocessen overeenkomen met de reële situatie hangt sterk af van hoe we in staat zijn om de inherente variabiliteit van bodemeigenschappen, zoals de doorlatendheid, te beschrijven. Deze variabiliteit dwingt de wetenschapper tot het gebruik van geavanceerde simulatietechnieken en het verzamelen van grote hoeveelheden (dure) gegevens.

WATER: DE CARRIER VAN POLLUENTEN

Het transport van pollutanten in de onverzadigde zone van de bodem, dit is de bovenste laag van de aardkorst - meestal slechts enkele tientallen meter dik -, gebeurt hoofdzakelijk doordat de chemicaliën opgelost worden in het bodemwater dat in de diepere ondergrond infiltrert, het zogenaamd

convectief transport. Andere vormen van transport zijn het diffusief transport van opgeloste pollutanten of het transport van bodemcolloïden zoals kleideeltjes of organische stof waarop pollutanten geadsorbeerd zijn. Om het uitspoelingsgevaar voor pollutanten in het veld in te schatten, is het dus onontbeerlijk het watertransport op veldschaal en de herverdeling van aangevoerd regenwater nauwkeurig te beschrijven.

Bij de beschrijving van de waterbeweging op veldschaal is het noodzakelijk de verdeling van water over de verschillende componenten van de hydrologische kringloop te quantificeren. Om dit doel te bereiken definiëren we de waterbalans (figuur 1). Die stelt dat de verandering van de waterinhoud in een eenheidsvolume bodem gelijk is aan de hoeveelheid water die het volume binnenkomt, verminderd met de hoeveelheid water die het volume verlaat. De verschillende processen die verantwoordelijk zijn voor de aanvoer van water zijn de neerslag (P [mm]), de irrigatie (I [mm]) en de opwaartse capillaire waterstroming vanuit het grondwater (U [mm]). Water verlaat het eenheidsvolume door oppervlakkige afstroming (R [mm]), interceptie van regenwater door planten (F [mm]), gewasverdamming of transpiratie (T [mm]), bodemverdamming of evaporatie (E [mm]) en drainage (D [mm]). De wiskundige vergelijking van de waterbalans wordt dan:

$$\Delta W = (P + I + U) - (R + F + T + E + D) \quad [1]$$

met ΔW de verandering van waterinhoud of bodemwater [mm]. Het relatief belang van de verschillende termen van de waterbalans worden onder andere bepaald door klimaat, vegetatie en reliëf evenals door de hydrologische karakteristieken van de bodem.

De verschillende termen van de waterbalans kunnen ofwel rechtstreeks worden gemeten (zoals P , I en F) ofwel berekend met

behulp van empirische of op fysische wetten gebaseerde vergelijkingen (zoals D , E en T) ofwel als enige onbekende afgeleid uit vergelijking 1.

De drainage of percolatie (D) en capillaire opstijging (U) worden veelal berekend met behulp van de stromingsvergelijking die gebaseerd is op de fysische wetmatigheden. Deze vergelijking beschrijft de verticale waterflux doorheen een poreus medium onder invloed van een hydraulisch potentiaalverschil. Om deze vergelijking te kunnen oplossen, moet men de plaatsspecifieke hydraulische eigenschappen van de bodem kunnen karakteriseren. Een belangrijke bodemeigenschap is het bodemvochtgehalte: de verhouding van het volume water per volume-eenheid bodem. Een andere eigenschap is de lokale zuigspanning of matrix-potentiaal die uitdrukt welke onderdruk moet aangelegd worden om vocht aan de bodem te onttrekken. Die onderdruk is nodig omdat het water gebonden is aan de bodemmatrix. Als de bodem uitdroogt, moeten bijvoorbeeld planten een grotere zuigspanning aanleggen om water aan de bodem te onttrekken. Aldus is de eerste belangrijke relatie, nodig om het watertransport in de bodem te beschrijven, gedefinieerd, namelijk de vochtretentiecurve. Deze laatste legt het verband tussen de zuigspanning en het vochtgehalte in een bodem. De andere belangrijke relatie is het verband tussen de zuigspanning en de hydraulische doorlatendheid, d.i. de stroomsnelheid van het bodemwater. Wanneer de bodem verzadigd is, zijn alle poriën gevuld met water en is de doorlatendheid constant. Deze wordt dan de verzadigde hydraulische doorlatendheid genoemd. In onverzadigde toestand is een deel van de poriën niet beschikbaar voor waterstroming doordat ze met lucht gevuld zijn. De hydraulische doorlatendheid neemt dus af bij vermindering van het vochtgehalte of bij stijgende zuigspanning.

Deze beide relaties kunnen experimenteel worden bepaald in het laboratorium of in-situ. Analytische functies beschrijven de opgemeten gegevens en de parameters van deze functies worden gebruikt in analytische of numerieke modellen om de stromingsvergelijking van water op te lossen. Wanneer men echter de waterbeweging op veldschaal wil simuleren, moet rekening worden gehouden met de inherente ruimtelijke variabiliteit van primaire bodemkenmerken (textuur, structuur, organisch stofgehalte, macroporiën, ...) en hydraulische bodemeigenschappen (Nielsen et al., 1973; Mallants et al., 1996b). Dit houdt in dat lokale bodemeigenschappen sterk variëren van plaats tot plaats in een schijnbaar homogeen veld.

VARIABILITEIT VAN WATER- EN STOFTRANSPORT

Ruimtelijke variabiliteit van bodemprocessen, zoals de waterbeweging en het stoftransport, wordt veroorzaakt door onder andere de verticale profielontwikkeling van natuurlijke bodems ten gevolge van bodemgenese in verschillende horizonten die samen het hele bodemprofiel vormen. Een

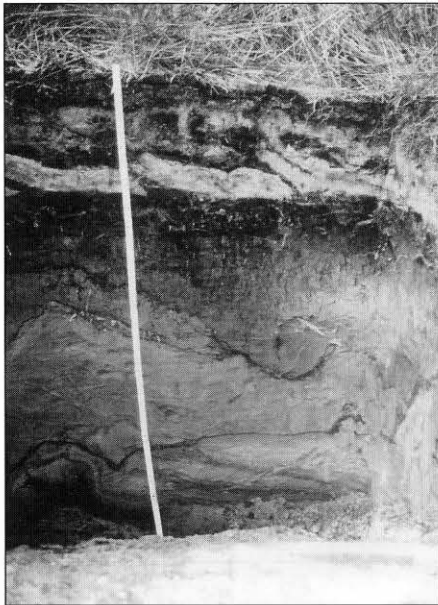


Foto 1: Vertikale heterogeniteit kan ontstaan ten gevolge van natuurlijke en artificiële bodemontwikkeling. Elk horizont is gekarakteriseerd door andere morfologische eigenschappen. De bovenste twee horizonten van dit bodemprofiel zijn een humuslaag bestaande uit naalden en verstoord materiaal aangebracht door de mens. Daaronder vinden we de typische kenmerken van een podzolbodem: een witte Eg-horizont, een B-horizont aangerijkt met humus vanuit de Eg-horizont en een C-horizont, waarbij enkel het bovenste deel van de C-horizont intens is doorworteld. Deze verschillende horizonten zullen aanleiding geven tot verschillende hydrologische eigenschappen.

bodemtype wordt gekenmerkt door een bepaalde sequentie van horizonten, elk met zijn eigen typische kenmerken (zie bijvoorbeeld foto 1). De horizonten worden op basis van geomorfologische kenmerken (kleur, percentage zand, leem, klei,...) van elkaar onderscheiden. Naast verschillende geomorfologische eigenschappen worden de verschillende horizonten ook nog gekarakteriseerd door verschillende hydrologische eigenschappen. Als gevolg hiervan moet bij de berekening van het watertransport in een vertikaal heterogene bodem rekening worden gehouden met specifieke watertransportparameters voor elke horizont afzonderlijk.

Een tweede oorzaak van variabiliteit zijn heterogene poriënstructuren, zoals het voorkomen van macroporiën in het veld (foto 2). Macroporiën ontstaan veelal onder invloed van biologische factoren, zoals het afsterven van plantenwortels en de aanwezigheid van regenwormen. Extracellulaire gommen van microorganismen en humusbestanddelen van organische stof werken de stabiliteit van bodemaggregaten in de hand waartussen er een netwerk van macroporiën ontstaat. Er liggen ook fysische oorzaken aan de basis van macroporositeit, zoals zwel- en krimphenomenen in kleibodems. Deze macroporiën hebben een grote invloed op de verzadigde doorlatendheid (Mallants et al., 1996c), de waterbeweging (Jacques et al., 1995b) en het transport van polluenten (Mallants et al., 1996d). Bijgevolg zijn macroporiën één van de oorzaken van versneld water- en stoftransport in een bodem (Bouma, 1991) en



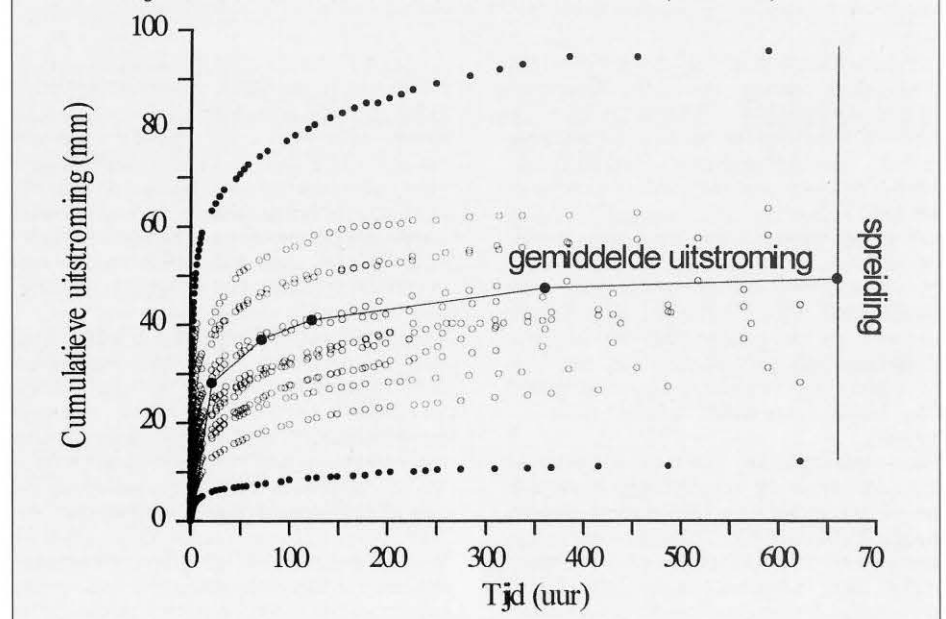
Foto 2: Methyleenblauw heeft de eigenschap te adsorberen op kleipartikels. Door het toevoegen van deze kleurstof aan het infiltrerende water worden macroporiën en preferentiële stroombanen zichtbaar doordat deze blauw gekleurd zijn. Deze foto toont het voorkomen van macroporiën in een horizontale coupe in een zandleembodem (Bekkevoort) op een diepte van 13 cm.

het voorkomen ervan verhoogt dus de kans op uitspoeling van polluenten zoals nitraten en pesticiden.

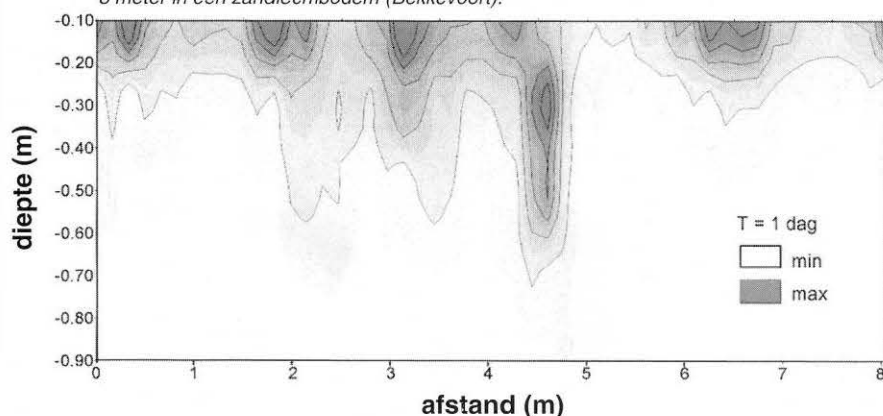
Horizonten en macroporiën zijn duidelijk te onderscheiden door visuele waarnemingen. Daarnaast variëren de bodemeigenschappen ook nog op een continue wijze in het horizontale vlak. Zo kan de verzadigde hydraulische doorlatendheid van de bodem variëren op korte afstand langsheen een transect, waarbij een groot aantal observatiepunten werden uitgezet langsheen een rechte lijn in het veld (figuur 2). In deze figuur wordt de waarde van de logaritme van de verzadigde hydraulisch doorlatendheid uitgezet in functie van de ruimtelijke positie

langsheen het transect. Waarden van de verzadigde hydraulische doorlatendheid verschillen soms één tot twee grootte-orde of logaritme-eenheden van elkaar over korte afstand, terwijl de verschillen over het gehele transect oplopen tot zes logaritme-eenheden. Deze variabiliteit kan een uitgesproken effect hebben op de waterstroming doorheen de bodem. Figuur 3 toont de variabiliteit van de totale hoeveelheid water die op 15 locaties langsheen hetzelfde transect uit een verzadigde bodem dreineert gedurende 30 dagen. In het begin van het uitstromingsproces zijn er grote verschillen, te wijten aan preferentiële waterstroming doorheen macroporiën. In fi-

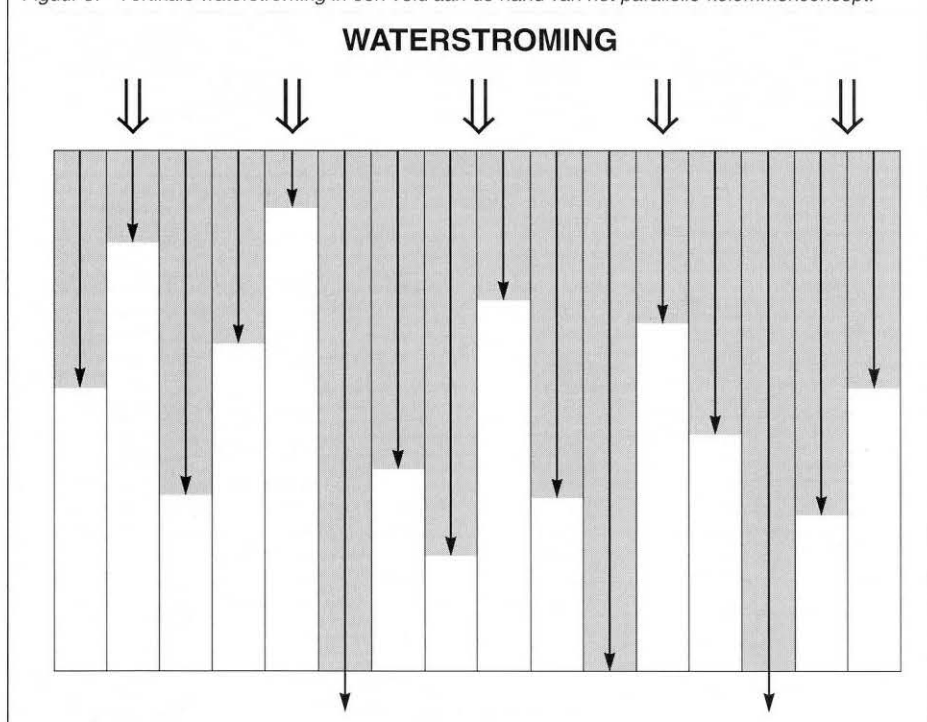
Figuur 3: Variabiliteit van de cumulatieve uitstroming uit verzadigde bodemkolommen genomen langsheen een transect van 31 meter in een zandleembodem (Bekkevoort).



Figuur 4: Variabiliteit van het transport van een inerte merkstof (Cloride) langsheen een transect van 8 meter in een zandleembodem (Bekkevoort).



Figuur 5: Vertikale waterstroming in een veld aan de hand van het parallelle-kolommenconcept.



guur 4 is duidelijk het effect van preferentiële waterstroming op het stoftransport langsheen hetzelfde transect te zien. De uniforme toegediende inerte (niet-adsorberende, niet-afbrekbare) merkstof verplaatst zich op een niet-uniforme wijze en vertoont zones van snel transport en zones van trager transport. Op één plaats bereikt de stofpluim na één dag al een diepte van 90 cm. Dit wijst op versneld stoftransport veroorzaakt door de talrijke macroporiën aanwezig in de bodem (foto 2). Bijgevolg verschillen de parameters, die het stoftransport in het veld beschrijven, aanzienlijk van plaats tot plaats (Jacques et al., 1995a).

Deze heterogeniteit van waterstroming en stoftransport in de onverzadigde bodemzone uit zich in de variabiliteit van de bodemhydraulische functies zoals de vochtretentiecurve en de hydraulische conductiviteitscurve. Deze variabiliteit kan met behulp van de klassieke statistiek worden beschreven.

Zo kunnen statistische parameters, waaronder het gemiddelde, de standaardafwijking, scheefheidscoëfficiënten,..., berekend worden. Hiermee wordt dan de vorm van de kansdichtheidsfunctie van een hydraulische parameter gekarakteriseerd. Een andere belangrijke parameter is de correlatiecoëfficiënt tussen de verschillende parameters. Deze parameter drukt uit in welke mate de ene hydraulische parameter gecorreleerd is met een andere parameter.

Indien men de waterstroming in bodems wil berekenen, dan dient men de stromingsvergelijking met behulp van de hydraulische parameters op te lossen. Voor sommige toepassingen, zoals het berekenen van de aanvulling van het grondwater door infiltratie van regenwater, is het voldoende het gemiddeld veldgedrag in te schatten. Figuur 3 en 4 illustreren duidelijk dat voor uitspoelingsproblemen het gemiddeld hydrologisch gedrag niet toereikend is indien men bijvoorbeeld de uitspoeling van pesti-

ciden naar het grondwater nauwkeurig wil inschatten. Pesticidemoleculen die terecht komen in preferentiële stroombanen zullen zeer snel het grondwater bereiken waardoor de kans op microbiële afbraak en adsorptie op de bodemmatrix sterk vermindert. Vermits de maximum toelaatbare pesticideconcentratie in het drinkwater zeer laag is ($0.1 \mu\text{g/l}$ per afzonderlijke stof; $0.5 \mu\text{g/l}$ voor het totaal van de pesticiden), kan deze grens relatief snel bereikt worden indien pesticiden via een beperkt aantal preferentiële stroombanen worden aangevoerd vanuit een heterogene bodem.

Om deze extremen in het water- en stoftransport te kunnen voorspellen, moet dus rekening worden gehouden met de grote ruimtelijke variabiliteit van de hydraulische kenmerken. Wenst men bovendien ook het watertransport in een veld onder natuurlijke randvoorwaarden te voorspellen, dan moet de stromingsvergelijking numeriek opgelost worden met een dynamisch mathematisch model. De integratie van statistische technieken met wiskundige modellen resulteert in een stochastische modelleringsprocedure.

NUMERIEK SIMULATIEMODEL

Omdat de waterbeweging in bodems hoofdzakelijk vertikaal plaatsvindt, volstaat een ééndimensioneel model waarin de ééndimensionele verticale stromingsvergelijking numeriek wordt opgelost met behulp van een mechanistisch simulatiemodel. Met de term mechanistisch wordt bedoeld dat de fysische, chemische en biologische processen in het model met wiskundige vergelijkingen, gebaseerd op proceskennis, worden beschreven. Een typisch voorbeeld van zo'n model is het WAVE model (Van clooster et al., 1994), dat de waterbeweging en het transport van polluenten zoals stikstof in het 'gewas-bodem' systeem beschrijft. Voor een uitgebreide beschrijving van het WAVE-model en zijn toepassingen wordt de lezer verwezen naar Feyen et al. (1996) en Feyen (1996).

In de stochastische modellering wordt de waterbeweging in de bodem berekend voor een groot aantal verschillende hydraulische functies, dit in tegenstelling tot het gebruik van één gemiddelde functie. Dit Monte-Carlo rekenen kan aanschouwelijk voorgesteld worden met het zogenaamde 'parallelle-kolommenconcept' (figuur 5), waarbij een hypothetisch veld, bestaande uit een groot aantal kolommen met identieke afmetingen, wordt opgebouwd. Basisveronderstellingen zijn dat het watertransport vertikaal in iedere kolom afzonderlijk plaatsvindt en dat er geen enkele uitwisseling van massa is tussen de verschillende kolommen. Aan iedere kolom wordt een reeks van hydraulische eigenschappen toegekend op een zodanige wijze dat hun frequentieverdeling en de bijkomende statistische momenten (gemiddelde, variantie,...) vrijwel identiek zijn aan de verdeling zoals deze werd opgemeten. De enige informatie die nodig is om de variabiliteit van de hydraulische eigenschappen van het bemonsterde veld na te bootsen is samengevat in statistische parameters, met name het gemiddelde, de variantie, het type van frequentieverdeling en de

correlatie tussen de hydraulische parameters. De stochastische simulatieprocedure omvat volgende fasen: probleemstelling, staalname, experimentele laboratoriumbepalingen, statistische analyse en Monte-Carlo simulatie. Elk van deze fasen zal kort worden toegelicht en de validatie van de procedure zal gebeuren aan de hand van een reeks laboratoriumexperimenten (Jacques, 1994; Mallants et al., 1996a).

ILLUSTRATIE: DRAINAGE VAN EEN VERZADIGD VELD

In dit artikel werd voor een boomgaard in de zandleemstreek (Bekkevoort) de gemiddeld drainage uit een verzadigde bodem berekend om een idee te krijgen van de gemiddelde aanvulling van het grondwater door infiltratie van regenwater. Omdat waterstroming zeer variabel kan zijn (figuur 3), is het ook nuttig de spreiding rond de gemiddelde drainage te berekenen. Uit figuur 3 en 4 blijkt dat er ook extreem snel water- en stoftransport kan plaatsvinden in een natuurlijke bodem met talrijke macroporiën (foto 2). Om de uitspoelingsgevoeligheid van een bodem te kwantificeren, is het belangrijk ook deze extreme gevallen te voorspellen.

Om representatieve waarden van de hydraulische functies te bekomen, wordt het perceel bemonsterd. De zandlemige bodem van de boomgaard bestaat uit drie horizonten met elk hun karakteristieke fysische en chemische kenmerken. Om die verticale heterogeniteit in rekening te brengen, werden in ieder van de drie horizonten 60 onverstoorde ringmonsters (met een volume van 100 cm³) verzameld met een alternerende tussenafstand van 10 en 90 cm langsheen een transect. Op deze 180 ringmonsters werden de hydraulische functies (vochttretentiekarakteristiek en waterdoorlatendheid) gemeten in het laboratorium en naderhand beschreven met behulp van eenvoudige wiskundige vergelijkingen met slechts vier onbekende parameters te schatten.

Van deze parameters wordt in een statistische analyse een representatief gemiddelde (μ) met bijhorende standaardafwijking (σ) bepaald. Voor iedere bodemhorizont zijn er dus vier sets van μ en σ , voor iedere parameter één. Tenslotte wordt de correlatie (ρ) tussen de parameters onderling berekend. Met behulp van deze sets van μ , σ en ρ wordt een Monte-Carlo simulatie uitgevoerd.

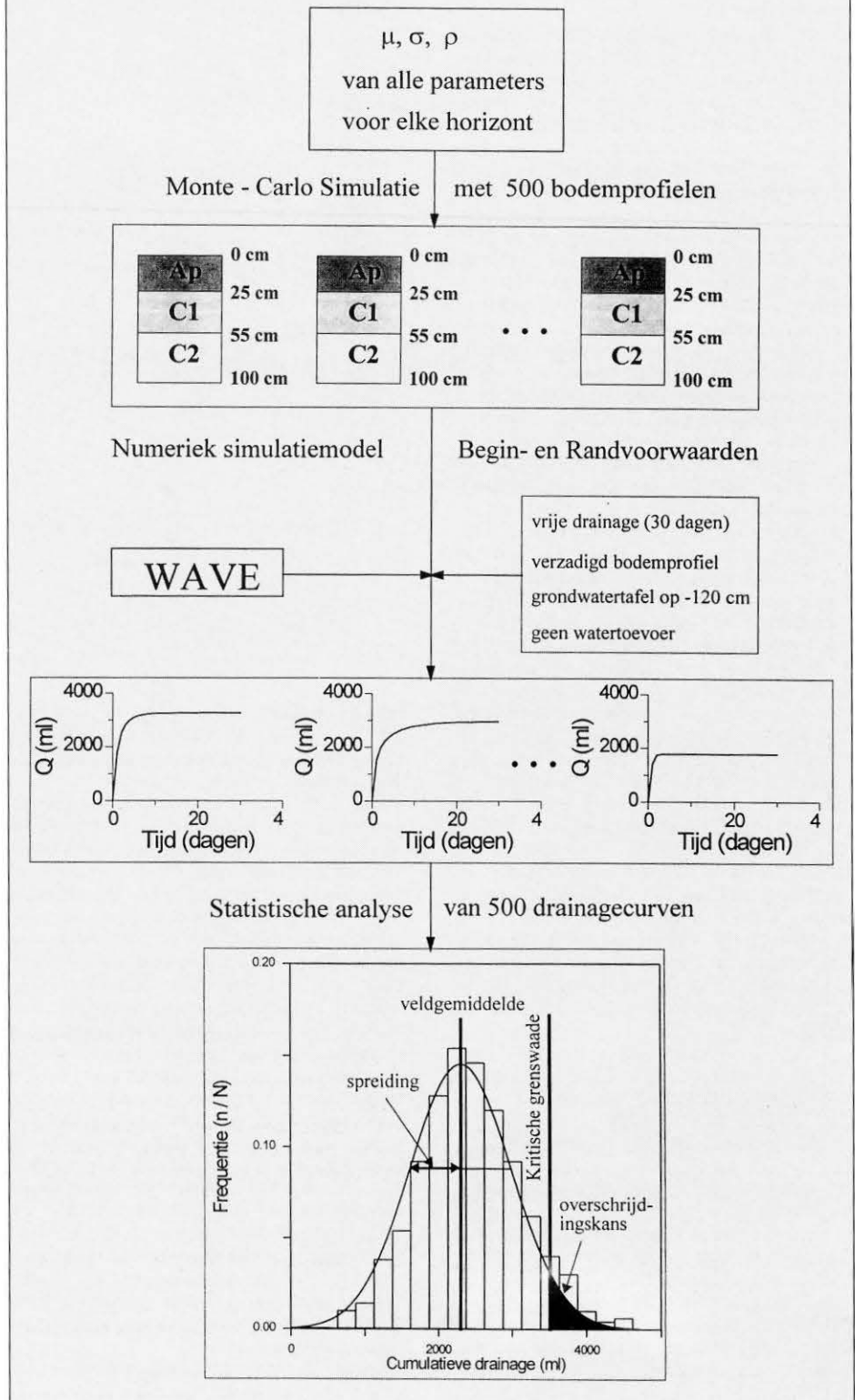
In figuur 6 is het Monte-Carlo rekenen schematisch weergegeven. De parameters van de hydraulische functies worden op een toevallige wijze getrokken uit hun theoretische kansverdelingen. Het aantal trekkingen is meestal zeer groot en varieert van enkele honderden tot meerdere duizenden. In dit voorbeeld werden 500 van elkaar onafhankelijke trekkingen gedaan. Iedere trekking levert voor elk van de drie horizonten 4 gecorrleerde parameters op. Voor elk van deze vijfhonderd parametersets wordt het simulatiemodel WAVE doorerekend. Dit resulteert in vijfhonderd verschillende cumulatieve drainagecurven. Deze Monte-Carlo simulatie houdt rekening met zowel de horizontale (het parallelle-ko-

lommen concept) als de verticale (bodemprofiel gekarakteriseerd door verschillende hydraulische functies per horizont) variabiliteit van de hydraulische bodemeigenschappen.

Het resultaat van de Monte-Carlo simulatie bestaat uit 500 drainagecurven waarop de klassieke statistische berekeningen kunnen worden toegepast. De frequentieverdeling van de cumulatieve drainage na één

maand wordt weergegeven in figuur 6. De vorm van de verdeling toont de karakteristieken van de Gauss-verdeling, waarvan statistische parameters zoals μ en σ , kunnen worden bepaald. Met behulp van de stochastische procedure kan de kans bepaald worden dat in het beschouwde veld de drainage een specifieke maximale waarde overschrijdt of een minimale waarde niet overschrijdt (figuur 6).

Figuur 6: Stroomschema van de Monte-Carlo simulatie.



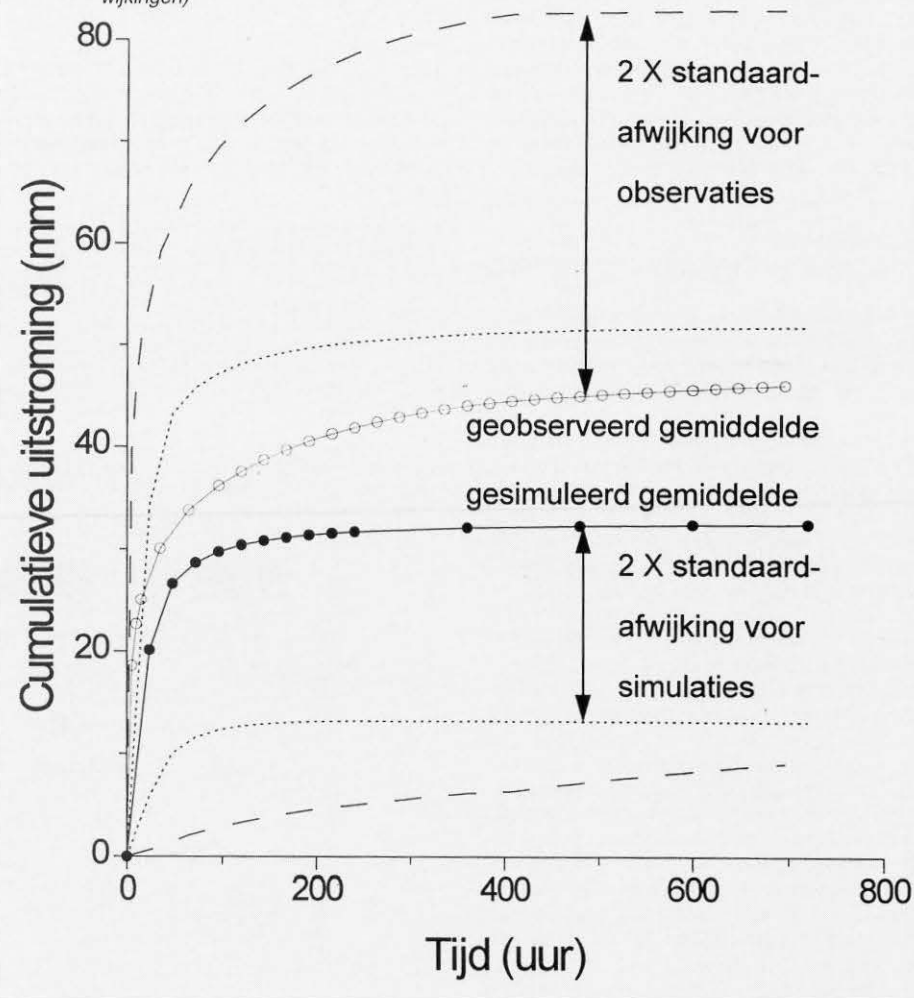
De validatie van de stochastische procedure gebeurde aan de hand van de gemeten drainage uit 15 ongestoorde en volledig verzadigde bodemkolommen (lengte 1 meter, diameter 0.3 meter) die onder invloed van de gravitatie vrij draineren gedurende een periode van 30 dagen. De ruimtelijke variabiliteit van de cumulatieve drainage op veldschaal is te zien in figuur 3. De grote variatie in drainage is onder meer te wijten aan de variatie van preferentiele stroombanen. Deze preferentiele stroombanen, veroorzaakt door macroporiën, zorgen voor een grotere en een snellere afvoer van water en polluenten.

De gemeten en berekende gemiddelde uitstroming en hun spreiding (gemiddelde $\pm$ twee maal de standaardafwijking) is weergegeven in figuur 7. De gemiddelde berekende uitstroming is steeds kleiner dan de gemiddelde gemeten uitstroming. Na ongeveer 30 dagen vrije drainage is het verschil tot 980 ml opgelopen of tot een onderschatting van de veld drainage met 30 %. Het betrouwbaarheidsinterval van de berekende drainage ligt praktisch volledig in dat van de gemeten drainage. Dit wijst erop dat de gemeten variabiliteit in uitstroming groter is dan de berekende variabiliteit. Verder wordt de maximale gemeten drainage gevoelig onderschat. Een mogelijke verklaring voor de onderschatting is dat het watertransport wordt beïnvloed door de talrijke macroporiën in de bodem. Het simulatiemodel WAVE is echter gebaseerd op fysische wetten die enkel opgaan als de waterstroming plaatsvindt in een homogeen medium zonder macroporiën. Verder werd bij de beschrijving van de hydraulische functies geen rekening gehouden met de macroporositeit. Het is dus noodzakelijk simulatiemodellen te verfijnen die de waterstroming nabij verzadiging in macroporeuze bodems kunnen beschrijven. Daarbij zijn kwantitatieve parameters, die de macroporositeit van de bodem, de vorm en de continuïteit van poriën beschrijven, van cruciaal belang. Bestaande modellen dienen ook gevalideerd en gecalibreerd te worden door middel van experimenten op laboratorium- en veldschaal. Tenslotte moeten er ook betere methoden ontwikkeld worden die het mogelijk maken de belangrijkste water- en stoftransportprocessen voldoende nauwkeurig te meten. Tijd domein reflectometrie is hiervoor de meest geschikte techniek, zoals reeds in enkele studies werd uitgetoond (Mallants et al., 1994; Vanclooster et al., 1994; Kim et al., 1995; Mallants et al., 1995).

STOCHASTISCHE MODELLERING ALS WERKINSTRUMENT IN EEN INTEGRAAL WATERBEHEER

De stochastische modellering heeft talrijke toepassingen voor landbouw en industrie en kan het overheidsbeleid ondersteunen. De grootste kracht van stochastisch rekenen is dat men de betrouwbaarheid van voorspellingen kan aangeven. Als men enkel rekent met gemiddelde parameters, dan kan bijvoorbeeld de uitspoelingsgevoeligheid van een specifieke bodem voor nitraten uitgedrukt worden in $x \text{ kg NO}_3/\text{ha}$. Met

Figuur 7: Gemeten gemiddelde cumulatieve uitstroming met spreiding ($\pm$ twee standaardafwijkingen) en gesimuleerde gemiddelde cumulatieve uitstroming met spreiding ($\pm$ twee standaardafwijkingen)



behulp van modellering wordt de uitspraak genuanceerder: "Er bestaat y % kans dat de nitraatuitspoeling voor die specifieke bodem groter is dan $x \text{ kg NO}_3/\text{ha}$."

Met behulp van simulatiemodellen kunnen experimentele resultaten geëxtrapoleerd worden naar situaties waar het uitvoeren van (veld)experimenten moeilijk of zelfs onmogelijk is, wegens te duur. Wanneer er een nieuw fytofarmaceutisch product op de markt wordt gebracht, moet het gedrag van het product in de bodem voldoende gekend zijn. Ter aanvulling van lysimeterexperimenten, waarbij de waterstroming en het stoftransport gedetailleerd wordt opgemeten in grote (diameter $> 30 \text{ cm}$, diepte $> 1 \text{ meter}$) onverstoorde bodemkolommen, kan de stochastische modellering procedure informatie verstrekken over het gedrag van een specifiek pesticide op perceelsniveau en dit voor een veel breder gamma aan bodems dan nu het geval is. Door bestaande gegevensbestanden met waterstromings- en stoftransportparameters te koppelen aan het ééndimensioneel water- en stoftransportmodel WAVE kan men het mobiliteitsgedrag van een polluent op een snelle, goedkope en een gemakkelijk interpreteerbare wijze bekomen.

Modellen kunnen ook gebruikt worden om scenario's van aangepast bodembeheer te

ontwerpen en te testen. Zo kan de invloed van irrigatie en bemesting op zowel de gewasgroei als op het milieu worden voorspeld. Met de stochastische procedure kan dan zowel het gemiddeld hydrologische veldgedrag als de variabiliteit van de waterstroming voor verschillende beheersscenario's met elkaar worden vergeleken en geëvalueerd.

De integratie van de stochastische modelleringstechniek met databanken en geografische informatiesystemen (GIS) kan als basis dienen voor het opstellen van kwetsbaarheidskaarten. Zo kan de databank AARDEWERK (Van Orshoven et al., 1988), die van de verschillende in België voorkomende bodemtypen een groot aantal bodemeigenschappen bevat, gebruikt worden om de noodzakelijke invoerparameters te leveren. Hiervoor wordt aan ieder bodemtype een set van modelparameters gekoppeld. GIS relateert de databank aan de locatie van een bodem in bijvoorbeeld een gemeente. GIS koppelt ook de resultaten van het simulatiemodel WAVE aan de databank. Met de stochastische modellering procedure bestaat nu de mogelijkheid om kaarten te produceren met naast de gemiddelde waarde ook de extreem hoge en extreem lage waarden voor een aantal kwantitatieve criteria zoals kwetsbaarheidsindi-

ces voor uitspoelingsgevoeligheid en hoeveelheid gedraineerd water. Deze toepassing kan vele nuttige werkdocumenten leveren aan overheidsinstanties om bepaalde beslissingen inzake milieubescherming wetenschappelijk en kwantitatief te onderbouwen en te staven.

Wiskundige modellen en computersimulaties zullen in de toekomst steeds meer de basis vormen voor het beheer van landbouwgronden, voor de ruimtelijke planning en voor de maatregelen die genomen worden door de overheid inzake de bescherming van het aquatisch milieu. Omdat bodems zeer heterogeen zijn met betrekking tot processen als waterbeweging en stoftransport, moeten statistische technieken, zoals Monte-Carlo rekenen, gebruikt worden om die variabiliteit in rekening te brengen bij het simuleren van complexe hydrologische processen in de bodem. Dankzij de Monte-Carlo methode krijgen we een idee over de gemiddelde waterbeweging, de spreiding rondom dit gemiddelde en de extremen. Deze laatste zijn van groot belang voor de predictie van de migratie van pollutanten naar het grondwater.

D. JACQUES
D. MALLANTS
J. FEYEN

Instituut voor Land- en Waterbeheer (ILWB)

*Departement Landbeheer
Faculteit van de Landbouwkundige en de toegepaste biologische wetenschappen
Katholieke Universiteit Leuven
Vital Decosterstraat 102
3000 Leuven*

REFERENTIELIJST

BOUMA, J., 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy* 46:1-37.

FEYEN, J., 1996. Bodem: Meten en modelleren. *Water* 90, 216-221.

FEYEN, J., K. CHRISTIAENS, S. DUCHEYNE en M. VANCLOOSTER, 1996. Transport van stikstof in het "gewas-bodem" systeem. *Agricontract* 280, 7-11.

JACQUES, D., 1994. Ruimtelijke variabiliteit van hydraulische bodemparameters en hun effect op de waterstroming. Eindwerk, K.U.Leuven, 115 pp.

JACQUES, D., D.-J. KIM and J. FEYEN, 1995a. Spatial variability of in-situ measured transport properties in multi-layered soils. In 'Proceedings of the 1995 fall meeting of the American Geophysical Union', 11-15 December, San Francisco, CA, USA, p 250.

JACQUES, D., D. MALLANTS, M. VANCLOOSTER and J. FEYEN, 1995b. Transect study of transient water flow in a macroporous soil. In 'Workshop on water and matter transport in soils at various scales', 18-19 May, Leuven, Belgium, p 4-7.

KIM, D.-J., J. DIELS, D. JACQUES, M. VANCLOOSTER and J. FEYEN, 1995. Field study of solute transport using time domain reflectometry (TDR). In 'Workshop on water and matter transport in soils at various scales', 18-19 May, Leuven, Belgium, p 30-36.

MALLANTS, D., M. VANCLOOSTER, M. MEDDAHI and J. FEYEN, 1994. Estimating transport parameters from undisturbed soil columns using TDR. *Journal of Contaminant Hydrology*, 17:91-109.

MALLANTS, D., J. VANDERBORGHT, D. JACQUES, M. VANCLOOSTER, A. TIMMERMAN, D.-J. KIM en J. FEYEN, 1995. Reflectometrie in het bodemkundig onderzoek. *Agricontract*, 275:9-16.

MALLANTS, D., D. JACQUES, M. VANCLOOSTER, J. DIELS and J. FEYEN, 1996a. A stochastic approach to simulate water flow in a macroporous soil. *Geoderma*, 70:299-313.

MALLANTS, D., B. MOHANTY, D. JACQUES and J. FEYEN, 1996b. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Science*, 161:167-181.

MALLANTS, D., B. MOHANTY, A. VERVOORT and J. FEYEN, 1996c. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technology (in druk)*.

MALLANTS, D., M. VANCLOOSTER and J. FEYEN, 1996d. Transect study on solute transport in macroporous soil. *Hydrological Processes*, 10:55-70.

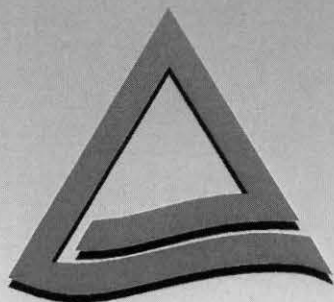
NIELSEN, D.R., J.W. BIGGAR and K.T. ERH, 1973. Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia*, 42:215-259.

VANCLOOSTER, M., D. MALLANTS, J. DIELS and J. FEYEN, 1994. Determining local-scale transport parameters using TDR. *Journal of Hydrology*, 148:93-107.

VANCLOOSTER, M., P. VIANE, J. DIELS and K. CHRISTIAENS, 1994. WAVE, a mathematical model for simulating water and agrochemicals in soil and vadose environment, Reference and user's manual, Release 2.0, december 1994. Institute for Land and Water Management, K.U.Leuven. 147 pp.

VAN ORSHOVEN, J., J. MAES, H. VERECKEN, J. FEYEN and R. DUDAL, 1988. A structured database of Belgian soil profile data. *Belgian Soil Science Society, Pedologie*, 38(2):191-206.

V.M.M. Vlaamse Milieumaatschappij, 1994. *Leren om te Keren. Milieu- en natuurrapport Vlaanderen. Vlaamse Milieumaatschappij en Garant Uitgevers N.V.* 823 pp.



**TÜV Rheinland
Belgium**

**Uw partner
voor
kwaliteitsborgings-
systemen
volgens
EN ISO 9000/QS 9000**



TÜV Rheinland Belgium • Weiveldlaan 41, bus 26 • B-1930 Zaventem
☎ (02) 725 73 10 • Fax (02) 725 75 51