
Aquapodium promovendis

De invloed van preferente stroming in onverzadigde zone op de waterbalans — van processchaal naar stroom- gebiedsschaal

door *Loes van Schaik**

Inleiding

In STROMINGEN, jaargang 11, nr 4 gaf Franck Hoogervorst al een korte inleiding over preferente stroming in het kader van zijn AIO-onderzoek (over snelreagerende grondwaterstanden in zandgronden als gevolg van preferente stroming en lucht-insluiting). Preferente stroming in de onverzadigde zone is stroming van water en opgeloste stoffen via enkele snelle stroombanen waarbij slechts een deel van de poreuze media deelneemt aan de stroming en de rest relatief droog blijft. Preferente stroming kan ontstaan door o.a. macroporiën, scheuren in kleigronden, waterafstotendheid en bodemheterogeniteit (Beven, 1982; De Rooij, 2000; Doerr, 2000). Over de hele wereld, in verschillende klimaten, verschillende bodemtypes, en verschillende landgebruiken, zijn oorzaken voor het voorkomen van preferente stroming te vinden. De veronderstelling van redelijk homogene verticale stroming in de onverzadigde zone en het gebruik van de Richards-vergelijking blijkt hiermee vaak niet te voldoen voor het vocht- en stoffentransport in de bodem. Zoals Keith Beven (2001) zegt: “only a correct simulation and prediction of flow pathways leads to a correct description of the

internal hydrological behaviour in a catchment”. Volgens Blöschl (2006) wordt het gedrag van hydrologische systemen waar preferente stroming voorkomt gedomineerd door extremen. Reden dus om te kijken naar de rol van preferente stroming op verschillende schalen: van proces schaal tot stroomgebiedsschaal.

Op de kleine schaal is bekend dat preferente stroming een grote invloed kan hebben op ruimtelijke verdeling van infiltratie, percolatie en runoff. Hierdoor kan een grote ruimtelijke variatie in bodemvocht optreden en een snelle reactie van het grondwater op neerslag worden veroorzaakt. Afhankelijk van de horizontale doorlatendheid in de ondergrond zal de snelle grondwaterreactie nog doorspelen op grotere schaal. Zeker in hellend gebied is vaak gebleken dat het meenemen van preferente stroming (als een versnellingsfactor waarmee een deel van de infiltratie via grondwater naar de beek wordt vervoerd) verbetering geeft van de gebiedsafvoercurves. Ook is gebleken dat een deel van de stormafvoer vaak ‘oud’ water is, dus niet de neerslag die direct wordt afgevoerd, maar water dat al door de grond heeft gereisd.

Het onderwerp van mijn onderzoek is dus de invloed van preferente stroming in de onverzadigde zone op de waterbalans te bekijken, van de processchaal tot de stroomgebiedsschaal. Het gaat hierbij om de invloed op de verschillende componenten van de waterbalans; dus niet slechts de invloed op infiltratie en afvoer, maar ook op bodemvochtverdeling, percolatie van bodemvocht en grondwateropbouw/schommeling. Hiertoe is al een groot aantal veldmetingen verricht en met behulp van een fysisch-deterministisch stroomgebiedsmodel zal de invloed van preferente stroming op verschillende schalen worden gekwantificeerd.

* **Loes van Schaik** is assistent in opleiding (AIO) bij Fysische Geografie aan de Universiteit Utrecht, e-mail: l.vanschaik@geo.uu.nl.

Stroomgebied

Als proefgebied is een klein stroomgebiedje (ongeveer 1 km²) in de buurt van Cáceres (Extremadura, Spanje) geselecteerd. Dit is al sinds 2000 een proefgebied van de Universiteit van Extremadura in Cáceres en van 1990 tot 1997 heeft deze groep ook veel kennis opgedaan in de hydrologie van soortgelijke gebieden in een nabijgelegen stroomgebiedje. Het ligt in een dehesa-landschap: dat is een semi-natuurlijk landschap. De dehesa's worden al van oudsher extensief begraasd, waardoor een heel open eikenbos (vooral steeneiken en kurkeiken) ontstaat. Er heerst een mediterraan, semi-aride, klimaat. De bodems zijn zeer arm. De dehesa's beslaan meer dan zes miljoen ha. van het Iberische schiereiland en in andere mediterraane landen worden zeer vergelijkbare landschappen aangetroffen.

Het proefgebied ligt in de *Penillanura de Cáceres*, deel van de grote Centro-Extreemse anticlinaal. Vanaf het Precambrium tot aan het Boven-Carboon werden in dit gebied sedimenten afgezet, onder mariene omstandigheden. Gedurende de Hercynische gebergtevorming vonden de meest drastische fysiografische veranderingen voor dit gebied plaats: Laurazië en Gondwana werden tegen elkaar aangeduwd, de oerzee Thetys werd gesloten en het land werd omhoog geduwd. De eerder afgezette sedimenten werden hierbij omhooggestuwd en gevouwen (schisten, grauwackes en kwartsieten). Sinds het Perm is het gebied aan continue, langzame erosie onderhevig. Gedurende het Plioceen–Pleistoceen werd het land onderworpen aan intensieve fluvia-tiele erosie (veroorzaakt door droge omstandigheden met sporadisch zeer intensieve neerslag). Dit had het afzetten van een zeer slecht gesorteerd sediment, *Raña* genoemd, tot gevolg (afgeronde kwartsieten in een zandige-kleiige matrix, veel voorkomend op de heuveltoppen in het gebied). Het eindresultaat is het huidige landschap

van bergruggen (met o.a. kwartsieten) en de peneplain (met schisten en grauwackes).

Het landschap is licht glooiend, met steeds diepere insnijdingen richting de grote rivieren (het gebied watert af op de Taag). Het proefgebied ligt op gemiddeld 400 meter boven zeeniveau. De bodems zijn ondiep: op de bovenrand zo'n 70–80 cm, langs de helling plaatselijk slechts 25–45 cm en in de valleien zeer grillig, lokale ontsluitingen van schist, maar ook wel bodemdieptes tot 90 cm. De textuur varieert grof gezegd van lemig zand en zandige leem op de bovenrand tot siltige leem in het dal. Het mediterraane klimaat heeft warme droge zomers tot gevolg en gematigde winters. De gemiddelde jaarlijkse neerslag is 514 mm, maar de neerslagvariabiliteit is groot, zowel binnen het jaar als tussen verschillende jaren (de standaard afwijking van de jaarlijkse neerslag is 155 mm). De gemiddelde temperatuur is 16 °C.

Mogelijke oorzaken voor preferente stroming in deze gebieden zijn macroporiën (oude wortelgangen en bodemleven zoals mieren, spinnen en wormen), heterogeniteit (grauwackes) en mogelijk waterafstotendheid. De gevolgen van preferente stroming kunnen door de zeer ondiepe bodems, hellingen en de vaak korte intensieve neerslag groot zijn.

Door de zeer dunne bodems op vrij ondoorlatend materiaal en het duidelijke reliëf lijken de grenzen van het stroomgebied vrij duidelijk. Daar komt bij dat het gebied jaarlijks eind augustus/ begin september zo ver is uitgedroogd dat er van uit gegaan kan worden dat het gebied over een vol jaar (september tot september) een redelijk sluitende waterbalans heeft: de evapotranspiratie is dan de gevallen neerslag minus de gebiedsafvoer (er van uitgaande dat de onderrand vrijwel ondoorlatend is).

Meetmethoden

In het proefgebied worden al sinds het jaar 2000 verschillende metingen verricht (zie figuur 1 voor de locaties van alle metingen). Er is een meteorologisch stationnetje waar neerslag, temperatuur, luchtvochtigheid, netto instraling en globale instraling en windsnelheid en -richting gemeten worden. Verder wordt op nog twee locaties in het gebied neerslag gemeten. De afvoer wordt gemeten van het hele gebied en van een subgebiedje en er zijn 16 Time Domain Reflectometers (TDR's) (Dirksen, 1999) ingegraven in twee naast elkaar gelegen verticale profielen. Alle metingen worden met een resolutie van 5 minuten gedaan en opgeslagen, alleen de vochtmeters in de bodem worden slechts eens in de twee weken handmatig afgelezen.

In dat stroomgebied heb ik in het najaar van 2004 (met de hulp van een aantal studenten) sproeioproeven gedaan, waarbij we met hoge intensiteit een blauwe tracer hebben opgebracht. Daarna hebben we verticale en horizontale profielen afgegraven waar we foto's van hebben genomen. Op iedere locatie waar we gesproeid hebben, hebben we ook aanvullende metingen verricht:

- Locatiebeschrijving:
 - vegetatie
 - helling
 - stenigheid van oppervlak
- Neerslag simulaties kleine schaal (30 × 30 cm, voor metingen van infiltratie/runoff)
- Profielbeschrijvingen
- Tension Disk Infiltrometer (infiltratiemetingen bij verschillende onderdrukken nabij verzadiging)
- Bodembemonstering, voor:
 - k-sat bepaling
 - porositeit
 - bulk density
 - Multi Step Outflow-proeven

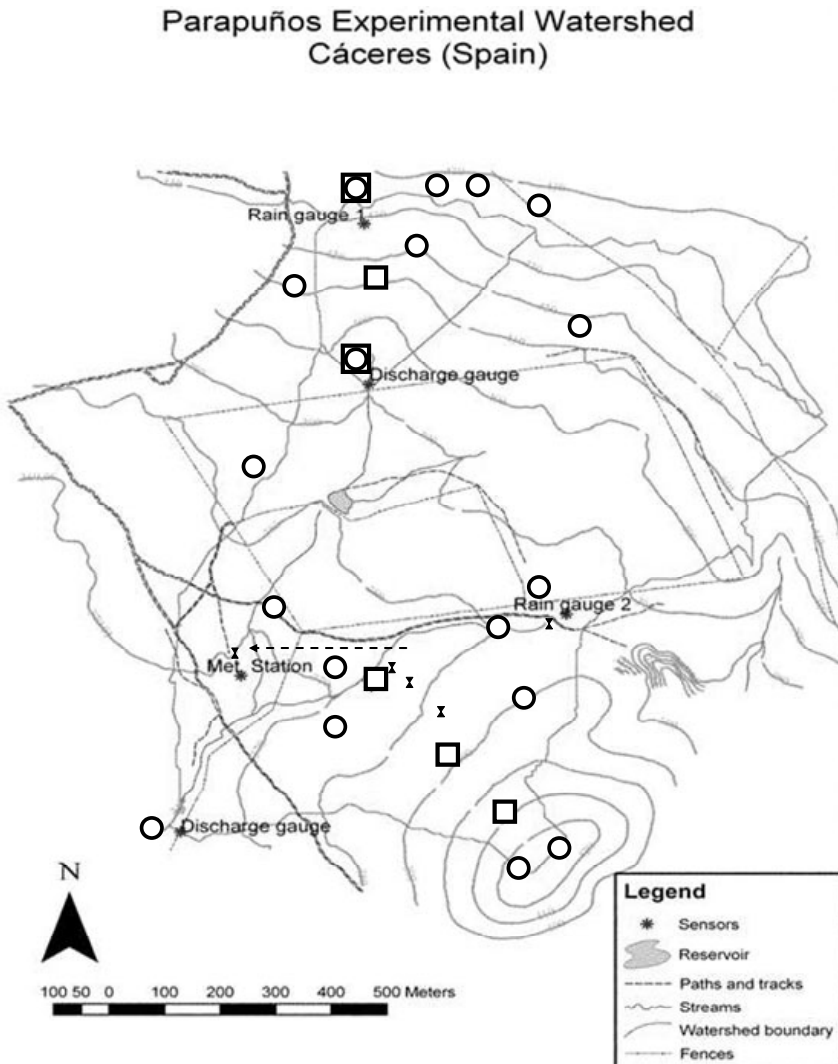
– textuur, pH en organische-stofbepaling
Behalve bovenstaande intensieve metingen die we op 18 verschillende locaties hebben uitgevoerd hebben we ook een vijftal grondwaterbuizen geplaatst om de grondwaterschommelingen te kunnen volgen. De grondwaterstandmetingen werd met een resolutie van 10 minuten opgeslagen. In september 2005 zijn in het proefgebied 6 kuilen gegraven, waarvan de wanden zijn volgestopt met TDR's (in totaal 67). Tijdens de overgang van nat naar droog is de opbouw van bodemvocht onder natuurlijke omstandigheden gevolgd door het dagelijks aflezen van de TDR's (na neerslag tweemaal per dag). Naast iedere TDR-kuil is een grondwaterbuis geïnstalleerd, met automatische grondwatermeters erin, met een resolutie van 30 minuten.

Sproeioproeven

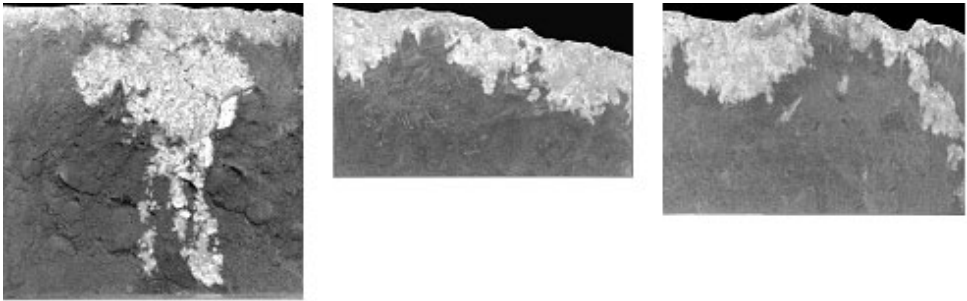
Sproeioproeven met tracers worden de laatste jaren met veel succes uitgevoerd om in het veld de continuïteit en hydrologische effectiviteit van preferente stroombanen te visualiseren (Weiler, 2001). De sproeioproeven hebben wij uitgevoerd met de voedingskleurstof Briljant Blue FCF (CI 42090). Wij hebben een uur lang beregend met een hoge intensiteit van 44 mm/h (met een standaardafwijking van 2,8 mm/h) en een concentratie Briljant Blue van 4 g/l (uit literatuur een goede concentratie gebleken voor dit soort proeven). Door verticale profielen onder het besproeide oppervlak af te graven en te fotograferen kan het infiltratiepatroon van het water worden verkregen. Per locatie hebben wij 1 m² oppervlak (het midden van het besproeide oppervlak 2,25 m²), afgegraven. Om te beginnen hebben wij drie verticale profielen achter elkaar afgegraven (10–15 cm afstand van elkaar). Het resterende oppervlak hebben wij horizontaal

afgegraven, om nog drie tot vijf horizontale profielen te krijgen en zo een zo goed mogelijk drie dimensionaal beeld te verkrijgen

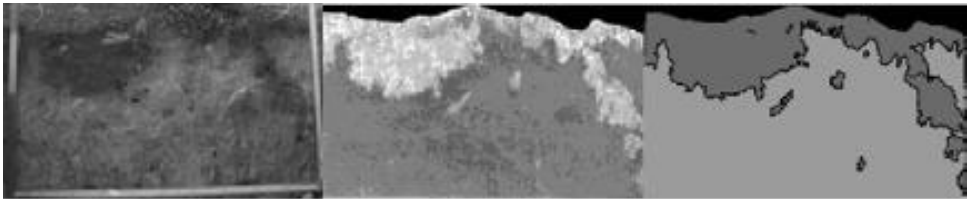
van het infiltratiepatroon. Een aantal voorbeelden van infiltratiepatronen zijn te zien in figuur 2.



Figuur 1: Locaties van metingen in het proefgebied: ○ locaties van sproeierven najaar 2004 (twee van deze locaties vallen samen met de kuilen van het volgende najaar), X locaties van piëzometers najaar 2004, □ locaties van TDR-kuilen (naast iedere kuil ook een piëzometer) najaar 2005.



Figuur 2: Enkele voorbeelden van infiltratieprofielen na neerslagsimulaties met hele hoge intensiteit. a) bovenop heuvelrand, b) langs de helling, c) in het dal.



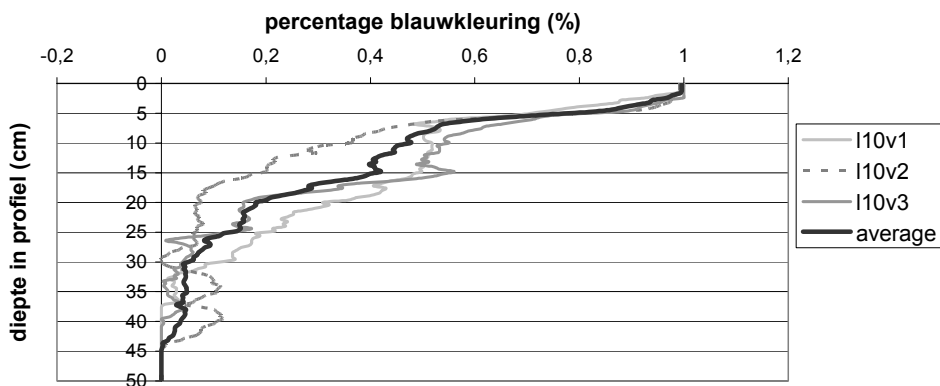
Figuur 3: Verschillende stadia in de fotoverwerking: a) onbewerkte profielfoto, b) geometrisch gecorrigeerd profiel, c) geclassificeerde foto.

Uit de sproeioproeven bleek dat preferente stroming op de meeste locaties in het gebied potentieel aanwezig is. Hierbij is de opmerking potentieel aanwezig wel belangrijk aangezien de sproeioproef met een hele hoge neerslagintensiteit is uitgevoerd. In een natuurlijke situatie met veel lagere neerslagintensiteiten zal de mate van preferente stroming kleiner zijn.

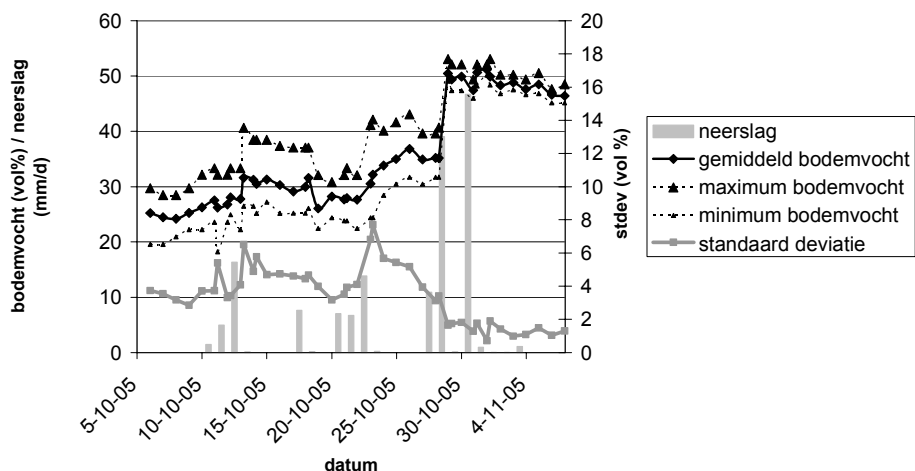
Hoewel op het eerste zicht de resultaten van de sproeioproeven per locatie duidelijk verschillen en er ook een ruimtelijk verband lijkt te zijn, is dit niet direct aantoonbaar. Simpele statistische methoden, zoals lineaire regressies tussen de verschillende locatievariabelen en de eigenschappen van de tracervlekken geven geen goede resultaten. De volgende stap is het uitvoeren van een (niet-lineaire) multi-pele regressie om de locatie eigenschappen te vinden die de mate van preferente stroming beïnvloeden. Wanneer er een verband gevonden wordt tussen

de preferente stroming en de locatiegegevens van de sproeioproeven, kan dit met behulp van ruimtelijke informatie uit het gebied worden gebruikt om de parameters te extrapoleren naar een gebiedskaart.

Om te zorgen dat de afgegraven profielen gelijke groottes hadden en geometrische correcties van de foto's uit te kunnen voeren is een stalen frame van 1m² gebruikt. Dit frame is op de profielen gelegd/ er tegenaan gezet voor de foto. In figuur 3 is een voorbeeldfoto te zien met het resultaat na respectievelijk de geometrische correctie en de classificatie. De classificatie is uitgevoerd door eerst een 'object-based' classificatiestap te doen, waarbij de foto in vlakjes wordt verdeeld. De vlakjes moeten vrij homogeen van kleur zijn en een redelijk compacte vorm hebben (beide criteria zijn door de gebruiker in te stellen). Vervolgens is aan die vlakjes een klasse toegekend.



Figuur 4: Percentage blauwkleuring met de diepte voor drie verschillende verticale profielen van één locatie en gemiddelde waarden.



Figuur 5: Neerslag en gemiddelde, maximum, minimum en standaard deviatie van het bodemvochtgehalte van vijf TDR's in een horizontale bodemlaag (20–25 cm diep; afstand tussen TDR's: 15–20 cm)

Parametrisatie van preferente stroming

De foto's geven een heel duidelijk beeld van het infiltratiepatroon van het water. De informatie van de foto's is uiteindelijk omgezet tot een grafiek van percentage blauwkleuring met de diepte (figuur 4). Uit de grafieken zijn gegevens af te lezen als de diepte van het homogene infiltratiefront, maximale diepte tot waar de infiltratie gekomen is en oppervlak van preferente

stroming. Het kwantificeren van de infiltratie is hiermee echter nog niet eenvoudig, aangezien oppervlak blauwkleuring niet gelijk is aan vochtgehalte. Het is mijn bedoeling met behulp van SWAP de gemiddelde matrixeigenschappen van de profielen te schatten met behulp van de diepte van het homogene infiltratiefront. De matrixeigenschappen zijn van belang voor de interactie tussen preferente stroombanen en matrix. In een tweede slag kunnen de

parameters voor preferente stroombanen worden gevonden, met gebruik van de tracer profielen en de matrixeigenschappen.

Validatie van de parametrisatie

De TDR-gegevens van de bodemvocht-opbouw in het najaar van 2005 tonen aan dat ook onder natuurlijke omstandigheden preferente stroming plaatsvindt in dit gebied. De gemeten variatie in bodemvocht binnen een bodemlaag ligt tussen de 4 en 8 vol%, tijdens de periode van droog naar nat (zie figuur 5). Deze variatie neemt toe nadat het geregend heeft en neemt tussen de buien door weer af (redistributie). Wanneer de bodem in de buurt van verzadiging komt, daalt deze variatie naar rond de 2 vol% (wat gelijk is aan de meetfout van de TDR's). Het meetvolume van de TDR's is ongeveer 1 dm³ en ze werden slechts een a twee keer op een etmaal afgelezen. Het is niet bekend welk deel van het meetvolume preferente stroombaan is of matrix en of het tijdstip van meten tijdens of tussen de hoogste variatie in bodemvocht valt.

Deze bodemvochtgegevens (gemiddelde en variatie in bodemvochtgehalte bijvoorbeeld) kunnen gebruikt worden om te controleren of de eerder bepaalde parameters van preferente stroming (gebaseerd op de infiltratie patronen van de sproeiproeven) onder natuurlijke omstandigheden ook nog gelden. Hellingprocessen, zoals runoff/runon en grondwaterstroming, spelen onder natuurlijke omstandigheden ook een rol en moeten hier dus worden meegenomen.

Preferente stroming op stroomgebiedsschaal

Een grote uitdaging is het een kennelijk zo belangrijk proces mee te nemen in een fysisch deterministisch stroomgebieds-model, om de invloed ervan op de water balans te kwantificeren. Skovdal Christian-

sen e.a. (2004) hebben een waardevolle stap geleverd in dit opzicht. Zij hebben een koppeling gemaakt tussen MIKE-SHE en Daisy, waarin ze een macroporiënconcept hebben verwerkt dat gebaseerd is op MACRO (Larsbo en Jarvis, 2003). Voor de parametrisatie van het macroporiën deel hebben ze echter moeten werken met literatuurgegevens, aannames en simpele schattingen met behulp van matrixmetingen. De parametrisatie van preferente stroming blijft moeilijk.

Het opschalen van de concepten en parameters van preferente stroming naar een grotere schaal is natuurlijk bijzonder ingewikkeld, maar dit geldt vooral voor het meenemen van preferente stroming in een lumped hydrological model. In het geval van een distributed model blijft het een uitdaging, maar daar zijn de gridcellen slechts iets groter dan de processchaal, daardoor wordt het gebruik van de concepten voor preferente stroming en de parameters zoals deze bijvoorbeeld in SWAP zitten makkelijker. Met het resulterende stroomgebieds-model zullen vervolgens simulaties worden gedaan om de invloed van preferente stroming op verschillende schalen te kwantificeren.

Literatuur

- Beven, K. (2001)** Rainfall-runoff modeling: the Primer; John Wiley & Sons Ltd.
- Beven, K. en P. Germann (1982)** Macropores and water flow in soils; in: *Water Resources Research*, vol 18, nr 5, pag 1311–1325.
- Blöschl, G. (2006)** Hydrologic Synthesis: across processes, places and scales; in: *Water Resources Research*, vol 42.
- Ceballos, A. en S. Schnabel (1998)** Hydrological behaviour of a small catchment in the Dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain); in: *Journal of Hydrology*, 210, pag 146–160.

- Cerdà, A., S. Schnabel, A. Ceballos en D. Gomez-Amelia (1998)** Soil hydrological response under simulated rainfall in the dehesa land system (extremadura, SW Spain) under drought conditions; in: *Earth surface processes and Landforms*, vol 23, pag 195–209.
- Dam, J. C. van (2000)** Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation, and case studies; Department of environmental sciences, Wageningen University, Wageningen, 167 pag.
- Dirksen, C. (1999)** Soil Physical Measurements; Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.
- Doerr, S. H., R. A. Shakesby en R. P. D. Walsh (2000)** Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance; in: *Earth-Science Reviews*, 51, pag 33–65.
- Larsbo, M. en N. Jarvis (2003)** MACRO 5.0. A model of water flow and solute transport in macroporous soil, Technical description; Department of Soil Science, Swedish University of Agricultural Science, Uppsala Sweden.
- Roij de, G. H. (2000)** Modeling fingered flow of water in soils owing to wetting front instability: a review; in: *Journal of Hydrology*, 231–232, pag 277–294.
- Skovdal Christiansen, J., M. Thorsen, T. Clausen, S. Hansen en J. Christian Refsgaard (2004)** Modelling of macropore flow and transport processes at catchment scale; in: *Journal of Hydrology*, 299, pag 136–158.
- Weiler, M. (2001)** Mechanisms controlling macropore flow during infiltration, Dye tracer experiments and simulations; Swiss federal institute of technology, ETHZ, Zürich, 151 pag.