

Monitoren van waterkwantiteit en -kwaliteit in de onverzadigde zone van de bodem

De staalname van bodemwater vereist het aanbrengen van een 'representatieve' zuigkracht. Met representatief wordt bedoeld een zuigspanning zo dicht mogelijk bij de heersende bodemmatrixpotentiaal. Dit is essentieel om waterfluxen en contaminatieconcentraties, kortweg de contaminatieflux, correct te kunnen meten. Volgend artikel geeft een beknopt overzicht van de verschillende systemen voor het bemonsteren van het bodemwater, waarna het ontwerp, de installatie en evaluatie van een experimentele pilotinstallatie voor het online bemonsteren van het bodemwater wordt beschreven. In deze pilotopstelling wordt bodemwater onttrokken met behulp van Passive Capillary Wick Samplers of PCAPS. PCAPS maken gebruik van de capillaire eigenschappen van een glasvezelwiel als leverancier van de vereiste negatieve druk. De eerste resultaten van deze pilotinstallatie tonen aan dat PCAPS goedkoop, robuust en gemakkelijk te installeren zijn en dus uitermate geschikt om onder natuurlijke omstandigheden het percolerend bodemwater te monitoren. In de besluiten worden de mogelijkheden van PCAPS voor het monitoren van contaminantfluxen, o.a. voor het monitoren van de nitraatflux uit de wortelzone ten behoeve van de validatie en bijsturing van de regelgeving in het MestAcitePlan, toegelicht.

Inleiding

Het kwantificeren van de uitspoeling van nitraat, zware metalen, pesticiden en andere contaminanten uit de wortelzone vereist het in-situ meten van deze fluxen. Traditioneel worden contaminantfluxen in de onverzadigde zone geschat op basis van concentratiemetingen in bodemstalen. Hierbij worden twee belangrijke processen over het hoofd gezien, namelijk: (i) de afhankelijkheid van de contaminantconcentratie in het bodemstaal aan de techniek die gebruikt wordt voor de extractie van het bodemwater, en (ii) de contaminatieconcentratie in een bodemstaal bevat geen informatie over de mobiliteit van de contaminant. Met andere woorden het schatten van contaminantfluxen, als het product van bodemcontaminantconcentraties met ramingen van waterfluxen uit de wortelzone naar het grondwater kan leiden tot grote onder-, resp. overschattingen van de mobiele contaminantfluxen.

Omwille van deze reden is rechtstreekse staalname van het bodemwater onder natuurlijke omstandigheden en het bepalen van de concentratie aan opgeloste stoffen in het bemonsterd bodemwater essentieel. Het cruciale hierbij is dat het bodemwater op correcte manier dient bemonsterd, hetgeen bemonsteren bij een representatieve zuigkracht vereist. Het bodemwater wordt doorgaans opgevangen in een poreuze kaars of plaat. De zuigkracht die in de kaars en aan de onderkant van de plaat wordt aangelegd dient gelijk te zijn aan de in de bodem heersende matrixpotentiaal op het ogenblik van bemonstering. Verschillen tussen de aangelegde zuigkracht en de omgevingsmatrixpotentiaal leiden tot foute fluxmetingen. Reden hiervoor is dat bij hoger aangelegde zuigkracht dan de omgevingsmatrixpotentiaal lateraal bodemwater wordt aangezogen, waardoor hogere fluxen worden gemeten dan in het profiel optreden (Brye et al., 1999, Mertens et al., 2005). Tweede reden waarom de aangelegde zuigkracht gelijk moet zijn aan de

omgevingsmatrixpotentiaal is de afhankelijkheid van de contaminantconcentratie aan de aangelegde zuigkracht. De aangelegde zuigkracht bepaalt welke poriën bemonsterd worden. Zo zal een te hoge zuigkracht leiden tot het bemonsteren van contaminant aanwezig in zeer kleine en dus mobiele poriën (Landon et al., 1999, Flury et al., 1999, Kosugi and Katsuyanma, 2004).

De staalname van bodemwater in onverzadigde bodems gebeurt traditioneel bij middel van een poreuze kaars. Het grote nadeel verbonden aan deze is dat ze niet in staat zijn fluxen te meten. Redenen zijn de kleine opvangoppervlakte van de kaars en het moeilijk te definiëren bodemvolume dat bemonsterd wordt (Weihermuller et al., 2005). Daarom zijn alternatieven ontwikkeld op basis van poreuze plaatsystemen waarbij geen ('zero tension systems') of een constante zuigkracht ('constant tension systems') wordt aangelegd. Normaliter wordt de zuigkracht die varieert tussen -100 en -300 cm waterkolom onderhouden door een vacuumpomp. De keuze van het vacuumniveau is erg bepalend daar dit het volume bepaalt dat wordt opgevangen. Een relatief nieuwe en conceptueel aantrekkelijke bemonsteringstechniek is de 'Automatic Equilibrium Tension Plate Lysimetry' (AETPL). Hierbij wordt de aangelegde zuigkracht afgesteld op basis van de omgevingsmatrixpotentiaal (Brye et al., 1999, Masarik et al., 2004, Kasteel et al., 2006, Mertens et al., 2007b). De AETPL systemen laten toe het bodemwater te bemonsteren bij een zuigkracht gelijk aan de omgevingsmatrixpotentiaal, met andere woorden deze systemen meten theoretisch exact de water- en contaminantfluxen die in de bodem optreden. Het grote nadeel van deze systemen is de kostprijs, als gevolg van vrij dure onderdelen als een vacuumpomp, tensiometers, controle-eenheid

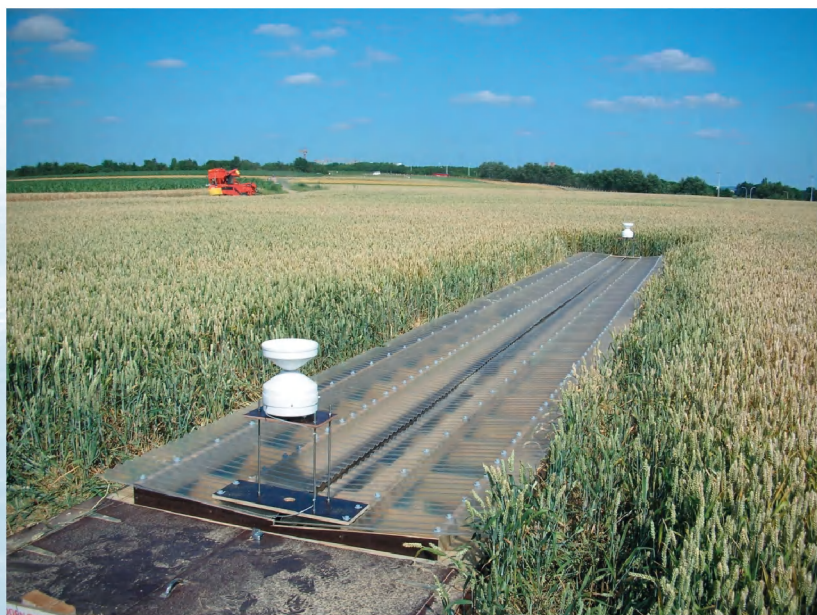
Afkortingen: AETPL, Automatic Equilibrium Tension Plate Lysimeter; DOM, Dissolved Organic Matter; PCAPS, Passive Capillary Wick Samplers, TDR, Time Domain Reflectometry

voor het sturen van de vacuumpomp zodanig dat de zuigkracht die aan de poreuze plaat wordt aangelegd gelijk is aan de omgevingsmatrix-potentiaal, en anderen.

Als alternatief voor de 'zero tension', 'constant tension' en 'AETPL' systemen wordt in dit artikel de Passive-CAPillary wick Samplers (PCAPS, Brown et al., 1986) beschreven. Dit systeem bestaat reeds twee decennia (Knutson and Selker, 1994, Gee et al., 2002, 2003) en gebruikt voor het creëren van de zuigspanning en het geleiden van de waterflux een glasvezelwiek die gebruikt worden in warmteisolatie opstellingen. Aan één uiteinde wordt de glasvezel wiek ontrafeld en opengespreid op een plaat die geperst wordt tegen de bodem. De zuigkracht in het ontrafeld gedeelte van de wiek wordt ontwikkeld door de hangende waterkolom in de glasvezelwiek. Het niet ontrafelde uiteinde van de wiek draineert vrij in een opvangcontainer. De wiek dient dus als leverancier van de zuigkracht en transportmedium van het bemosterd bodemwater naar de collector. Belangrijke voordelen van dit systeem zijn dat noch een poreuze plaat, noch een vacuumpomp vereist zijn. Het systeem is gemakkelijk te installeren en eenvoudig van onderhoud en energiegebruik. Uiteraard cruciaal voor een goede werking is de lengte van de wiek aangezien deze bepalend is voor de lengte van de hangende watertafel en dus voor de aangelegde zuigkracht.

Uit een discussie tussen een aantal onderzoekers (Gee, 2005, Norman et al., 2005) blijkt dat de keuze tussen PCAPS en AETPLs niet evident is en functie van de beschikbare middelen en vereiste accuraatheid. In theorie zijn AETPLs en PCAPS in staat fluxen correct te meten. AETPLs zijn duur en fragiel, terwijl PCAPS eenvoudig en robuust zijn. Via numerische analyse kon worden aangetoond dat artefacten gecreëerd tijdens de installatie van

Figuur 1: Bovenaanzicht van de experimentele piloetopstelling 'Ter Munck' (Heverlee)



beide systemen aanleiding geven tot fouten in gemeten fluxen die aanzienlijk groter zijn dan de verschillen in flux die beide systemen onder gelijke omgevingsomstandigheden meten (Mertens et al., 2005, 2007a).

Met dit artikel geven de auteurs een korte beschrijving van (i) bestaande systemen voor het monitoren van het mobiele bodemwater (inleiding), (ii) het ontwerp, de installatie en de evaluatie van PCAPS opgesteld in het proefveld 'Ter Munck' in Heverlee (materiaal en methoden, resultaten en bespreking), en (iii) de potentiële mogelijkheden van PCAPS voor het meten van contaminantfluxen die uit de wortelzone percoleren (besluiten).

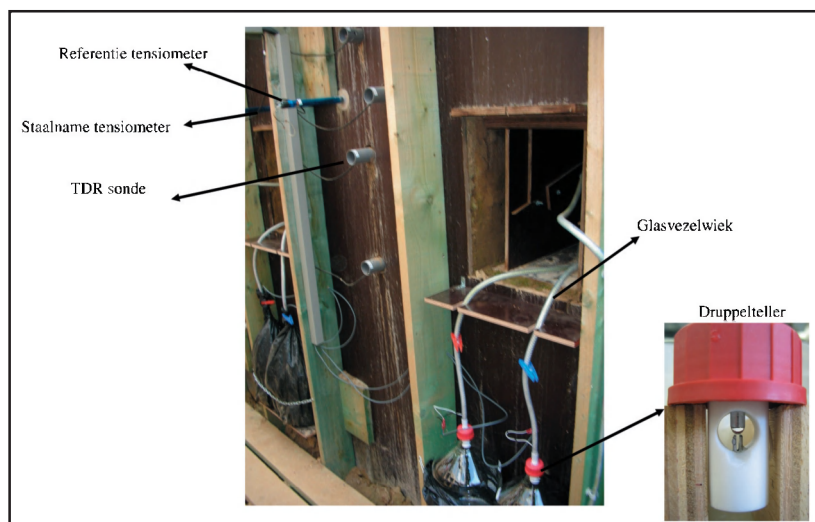
Materiaal en methoden

Voor een experimenteel onderzoek in het kader van de analyse van de invloed van verhoogde opgeloste organische stof (Dissolved Organic Matter, kortweg DOM) op de uitspoeling van koper en pesticiden naar het grondwater werden op het proefveld 'Ter Munck' (Heverlee) 16 PCAPS geïnstalleerd aan beide kanten van een 16 m lange sleuf, 2,5 m diep en 2 m breed. De PCAPS werden geplaatst op een diepte van 45 cm beneden maaiveld (Figuur 1). Loodrecht op de sleuf werden 4 behandelingen in tweevoud (8 proefvelden met 2 PCAPS per proefveld) aangelegd, respectievelijk de toepassing van drijfmest, irrigatie met organisch aangerijkt afvalwater, verminderde bodembewerking ('reduced tillage') en controle. Het bodemwater dat via de PCAPS wordt opgevangen wordt tweewekelijks verzameld en chemisch geanalyseerd.

Voor het bepalen van de uitspoeling en de numerische analyse van de water- en contaminantfluxen worden uurlijks de metingen van volgende variabelen opgeslagen: (i) het bodemvochtgehalte met behulp van 'Time Domain Reflectometry' probes (TDR-probes), (ii) de omgevingsmatrixpotentiaal gemeten met behulp van tensiometers, en (iii) de waterflux gemeten met een druppelteller (Figuur 2). Acht van de 16 PCAPS (1 PCAPS per proefveld) werd uitgerust met een tensiometer 5 cm boven de wick sampler, hetzij op een diepte van 40 cm beneden maaiveld. De matrixpotentiaal gemeten door deze tensiometer wordt in volgende de staalnamepotentiaal genoemd. Tussen de twee PCAPS in elk proefveld wordt ook de matrixpotentiaal gemeten in de bodem en deze wordt aangeduid als referentiepotentiaal. Verschillen in de matrixpotentialen gemeten door de tensiometer net boven de PCAPS (staalname) en door de tensiometer in de onverstoorde bodem (referentie) laten toe het effect van de staalname op de waterhuishouding in de buurt van de PCAPS te evalueren en artefacten te identificeren.

Discrepancie tussen de referentie- en de staalnamepotentiaal wijst op lokale verschillen in bodemvochttoestand boven de PCAPS en de

Figuur 2: Foto van 2 PCAPS met bijhorende TDR-sondes, tensiometers en druppeltellers



onverstoorde bodem. Deze verschillen kunnen aanleiding geven tot verschillen in chemische en microbiologische omstandigheden en dus tot verschillen in contaminantconcentraties in het opgevangen bodemwater. Wanneer contaminantconcentraties nauwkeurig moeten gemeten worden is overeenkomst tussen referentie- en staalnamepotentiaal een vereiste.

Tussen de 2 PCAPS in elk veldje werden verticaal in het profiel 4 TDR probes geïnstalleerd, resp. op 20, 40, 60 en 100 cm diepte, om de bevochtiging en uitdroging van het profiel te monitoren. Verder werden druppeltellers geïnstalleerd om het uit de wick percolerend water in functie van de tijd te meten (fluxmeting). Ingevolge de ontwikkeling en kalibratie van de druppeltellers, werden deze pas recentelijk in de pilootinstallatie geïnstalleerd, en zijn er alsnog onvoldoende gegevens beschikbaar voor de analyse van hun performantie. Een gedetailleerde beschrijving van de druppeltellers en de resultaten van de kalibratie van deze in het laboratorium is beschikbaar in Mertens et al., 2007c. De neerslag op de site wordt gemeten bij middel van twee regenmeters (resolutie van 0,2 mm per 10 minuten; ARG-100 Environmental Measurements Ltd., Verenigd Koninkrijk), opgesteld aan de twee uiteinden van de 16 m lange sleuf. Het geheel van metingen wordt gestuurd en opgeslagen door middel van een CR10X datalogger (Campbell Scientific Inc., UT, USA) die via een 12 V batterij, aangeschakeld aan een zonnepaneel, gevoed wordt. Aan de hand van een CS-GSM (Campbell Scientific Inc., UT, USA) modem worden de data dagelijks verzonden naar een netwerkschijf).

Resultaten en discussie

Vóór de installatie van de PCAPS werd de retardatie van contaminanten (koper en pesticiden) in de wick onderzocht bij middel van sortieproeven in het laboratorium. Er werd geen significante retardatie van koper en de pesticiden atrazine en

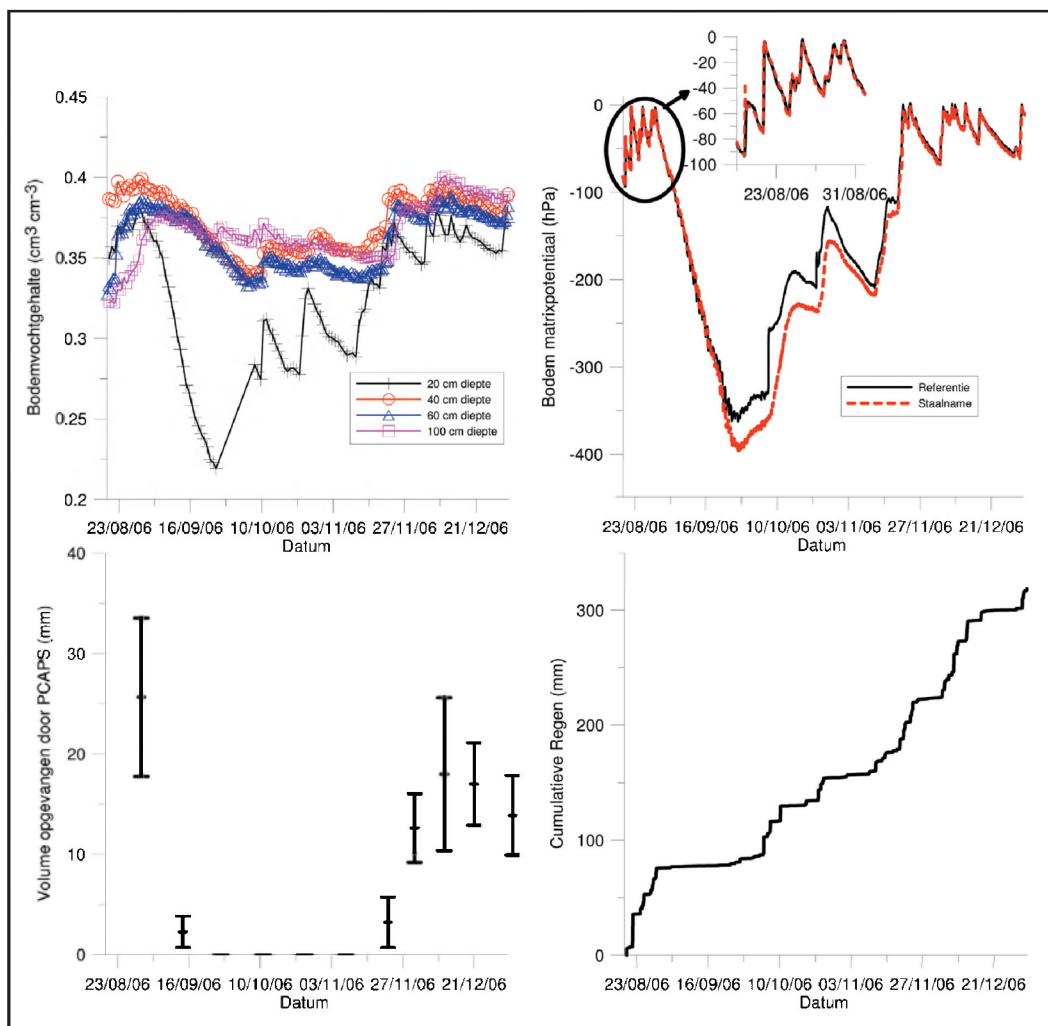
trifluralin waargenomen indien de wicken gedurende 4 u verhit werden op 400°C.

Figuur 3 toont de bodemvochtgehalten, referentie- en staalnamepotentialen gemeten in proefveld 1, de gemiddelde standaardafwijking van de watervolumes gemeten door de 16 PCAPS, als ook de cumulatieve neerslag tussen 19 augustus en 31 december 2006. De lengte van de wick werd gedurende deze periode constant gehouden op 100 cm. Figuur 3 illustreert dat het bodemvochtgehalte op 20 cm diepte snel reageert op regen, terwijl een aanzienlijke vertraging waargenomen wordt op grotere diepte. Zowel de referentie- als de staalnamepotentiaal reageren vrij gelijkmatig op regen zonder significante vertraging in de tijd.

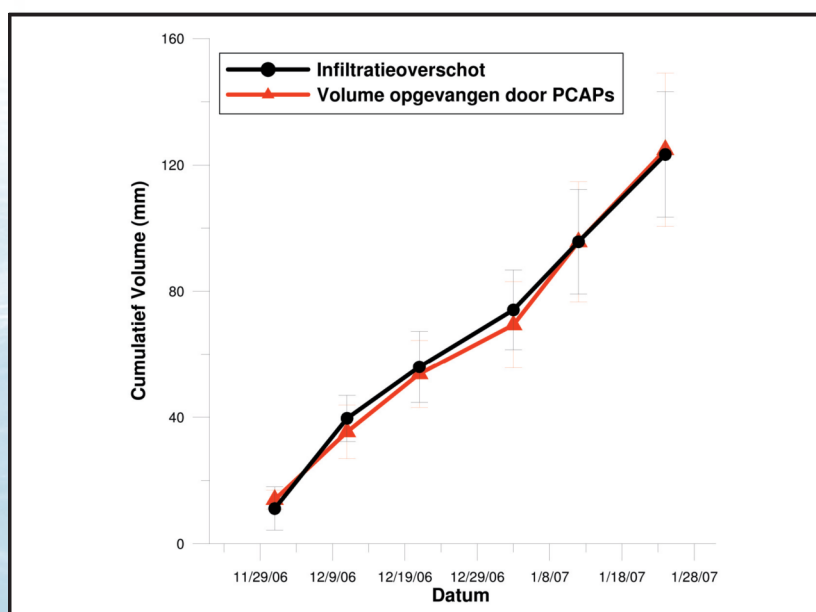
Ondanks de constante wicklengte van 100 cm werd een zeer goede overeenkomst waargenomen tussen de referentie- en staalnamepotentiaal in alle proefveldjes, analoog aan de resultaten voor proefveld 1 weergegeven in Figuur 3. Tijdens natte perioden, wanneer de matrixpotentiaal groter is dan 100 cm waterkolom, is het verschil tussen de referentie- en staalnamepotentiaal bijzonder klein. Tijdens droge periode worden boven de PCAPS meer negatieve matrixpotentialen opgetekend dan in de onverstoorde bodem tussen de PCAPS. Het verschil wordt toegeschreven aan het uitdrogen van de bodem omheen de tunnel waar de PCAPS geïnstalleerd werden. Het effect van deze verschillen op de gemeten fluxen zal klein tot verwaarloosbaar zijn ingevolge de lage waarde van de waterflux bij droogte. De aandacht van de lezer wordt getrokken op het feit dat overeenkomst tussen de referentie- en staalnamepotentiaal niet automatisch leidt tot identieke fluxen gemeten door de PCAPS en deze die in de onverstoorde bodem optreden. Eerder uitgevoerde numerische analyses hebben namelijk aangetoond dat de wicklengte een marginaal klein effect heeft op de matrixpotentiaal boven een PCAPS, terwijl het een groot effect heeft op het volume bodemwater dat door de PCAPS wordt gecapteerd (Mertens et al., 2007a). De modelanalyse voor de bodem- en klimaatsomstandigheden van de pilootinstallatie 'Ter Munck' (Heverlee) gaf een overschatting van de opgevangen waterflux met 100% bij een constante wicklengte van 100 cm, terwijl dit nagenoeg niet leidde tot een verschil in gesimuleerde matrixpotentiaal boven de PCAPS en in de onverstoorde bodem. Uit voorgaande dient geconcludeerd dat overeenkomst tussen referentie- en staalnamepotentiaal niet automatisch resulteert tot een opgevangen waterflux welke overeenstemt met de werkelijke waterflux in de onverstoorde bodem.

In Figuur 4 is het opgevangen bodemwater door de PCAPS voor de periode 22 november 2006 tot 24 januari 2007 cumulatief uitgezet, alsook het cumulatief infiltratieoverschot. Het cumulatief infiltratieoverschot werd uit de waterbalans afgeleid. Daar het bodemvochtgehalte bij het begin van de observatie periode nagenoeg gelijk is aan het bodemvochtgehalte op het einde van de pe-

Figuur 3: Bodemvochtgehalte op 20, 40, 60 en 100 cm diepte, referentie- en staalnamepotentialen op 40 cm diepte in proefveld 1, gemiddelde en standaarddeviaties van de opgevangen bodemwatervolumes door de 16 PCAPS en de cumulatieve neerslaghoeveelheid tussen 19 augustus en 31 december 2006



Figuur 4: Cumulatief gemiddelde en standaardafwijking van het infiltratieoverschot (regen van 10 nabijgelegen weerstations min de geschatte gewasverdamping) en gemiddelde en standaardafwijking van het cumulatief volume opgevangen bodemwater door de 16 PCAPS in de periode 22 november 2006 tot 24 januari 2007



riode, mag worden gesteld dat het infiltratieoverschot kan worden afgeleid uit het verschil tussen de cumulatieve neerslag en de cumulatieve verdamping. De referentie evapotranspiratie (ET₀) gemeten te Ukkel (gelegen op een afstand kleiner dan 25 km) werd gebruikt om de gewas-evapotranspiratie voor winter tarwe te berekenen, op basis van de FAO-56 voorschriften (Allen et al., 1998). Aangezien problemen met de lokale neerslagmetingen werd voor de berekening van het cumulatief infiltratieoverschot gebruik gemaakt van de gemiddelde dagneerslagsom van 10 nabijgelegen meetstations (gelegen op een afstand tussen 2 en 20 km van het proefveld). Figuur 4 toont aan dat het gemiddeld cumulatief opgevangen volume bodemwater door de 16 PCAPS overeenstemt met het berekend infiltratieoverschot, hetgeen wijst op een accurate bemonstering van de bodemwaterflux.

Dit is echter in tegenstelling met de modelvoorspellingen die een 100% overschatting van de natuurlijke waterflux voorspelden bij een constante wielengte van 100 cm (Mertens et al., 2007a). Reden voor deze contradictie ligt in het verschil in staalname-efficiëntie tussen de gemiddelde PCAPS en de echte PCAPS na installa-

tie. In het model wordt een perfecte overgang en een perfect contact verondersteld tussen bodem en wick. Dit kan in realiteit minder ideaal zijn als gevolg van (i) niet genoeg opengespreid wickmateriaal op de plaat en/of (ii) mogelijke compactie van de bovengelegen bodem als gevolg van de installatie. Bijkomende reden voor de discrepantie tussen modelvoorspellingen en de geobserveerde waterfluxen zijn de onzekerheden in de hydraulische wickparameters gebruikt in het model (gebaseerd op een studie van Knutson and Selker, 1994). Verder dient men ook voorzichtig te zijn met het interpreteren van korte waterbalansen ten gevolge van de onzekerheid intrinsiek verbonden aan de schatting van gewasevapotranspiratie en het meten van neerslaghoeveelheden. Vandaar dat een toekomstige gedetailleerde studie gebaseerd op een combinatie van een langere waterbalans met de uurlijkse metingen van bodemvochtgehalte en bodemmatrixpotentiaal tot betere schattingen van de PCAPS-efficiëntie zal leiden.

Conclusies

Op basis van preliminaire resultaten verzameld op het proefveld 'Ter Munck' (Heverlee) kan besloten worden dat PCAPS goedkope en robuuste systemen zijn voor het bemonsteren onder natuurlijke omstandigheden van de waterflux. Verschillen in matrixpotentiaal boven PCAPS en de omgeving zijn beperkt waaruit mag worden besloten dat verschillen in chemische en microbiologische processen boven PCAPS en de omgeving klein tot verwaarloosbaar zijn en dat de contaminantconcentraties gemeten op de opgevangen waterflux representatief zijn voor de onverstoorde bodem. Verschillen in opgevangen en gesimuleerde volumes suggereren dat deze met de nodige kritische ingesteldheid dienen te worden gevalideerd aan de resultaten van eenvoudige waterbalansberekeningen.

Voor het monitoren van de nitraatflux uit de wortelzone naar het grondwater ter ondersteuning bv. van het mestbeleid in Vlaanderen wordt gedacht aan een meer compacte uitvoering van de PCAPS die op het proefveld 'Ter Munck' (Heverlee) werden geïnstalleerd. De vereenvoudigde versie zou kunnen bestaan uit een opengespreide wick gemonteerd op een inoxplaat en uitmondend in een plastic container. Dit systeem is makkelijk te installeren vanuit een ondiepe put (bv. PCAPS op 40 cm diepte en wicklengte 1 meter, of een totale diepte van 1.4 m), die na installatie terug wordt opgevuld, zodanig dat aan de bodemoppervlakte slechts twee slangetjes zichtbaar zijn, nl. één slangetje voor het bemonsteren van het water opgevangen in de container, en een tweede slangetje voor luchttoevoer tijdens het opzuigen van het percolatiewater. Een aantal van deze vereenvoudigde uitvoeringen kunnen op verschillende locaties met verschillend bodem-landgebruik geplaatst worden, waardoor het mogelijk wordt een reëel beeld te krijgen van de nitraatuitspoeling uit de wortelzone. PCAPS zouden ook kunnen wor-

den ingezet voor het verzamelen van de nodige gegevens voor het vastleggen van de dynamiek van de uitspoeling van pesticiden en andere contaminanten.

Referenties

- Allen, R., L. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Rome, Italy, 297p
- Brown, K.W., J. C. Thomas and M.W. Holder, 1986. Development of a capillary wick unsaturated zone water sampler. Environmental Monitoring System Laboratory, United States Environmental Protection Agency, Las Vegas
- Brye, K.R., J.M. Norman, L.G. Bundy and S.T. Gower, 1999. An equilibrium tension lysimeter for measuring drainage through soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 536-543
- Flury M., M.V. Yates and W.A. Jury, 1999. Numerical analysis of the effect of the lower boundary condition on solute transport in lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 1493-1499
- Gee, G.W., 2005. Comments on "Improvements to Measuring Water Flux in the Vadose Zone" (K.C. Masarik, J.M. Norman, K.R. Brye and J.M. Baker). *J. Environ. Qual.*, 33: 1152-1158). *J. Environ. Qual.*, 34: 408-409
- Gee, G.W., A.L. Ward, T.G. Caldwell and J. C. Ritter, 2002. A vadose zone water fluxmeter with divergence control, *Water Resour. Res.*, 38: DOI 10.10129/2001WR000816
- Gee, G.W., Z.F. Zhang and A.L. Ward, 2003. A modified vadose-zone fluxmeter with soil collection capability. *Vadose Zone J.*, 2: 627-632
- Kasteel, R., T. Pütz and H. Vereecken, 2006. An experimental and numerical study on flow and transport in a field soil using zero tension lysimeters and suction plates. *European Journal of Soil Science*, 58:632-645
- Knutson, J.H. and J.S. Selker, 1994. Unsaturated hydraulic conductivities of fiberglass wicks and designing capillary wick pore-water samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 721-729
- Kosugi, K. and M. Katsuyama, 2004. Controlled-suction period lysimeter for measuring vertical water flux and convective chemical fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68: 371-382
- Landon, M.K., G.N. Delin, S.C. Komor and C.P. Regan, 1999. Comparison of the stable-isotopic composition of soil water collected from suction lysimeters, wick samplers, and cores in a sandy unsaturated zone. *J. Hydr.*, 224: 45-54

Masarik, K.C., J.M. Norman, K.R. Brye and J.M. Baker, 2004. Improvements to measuring water flux in the vadose zone. *J. Environ. Qual.*, 33: 1152-1158

Norman, J.C., K.C. Masarik, K.R. Brye, and J.M. Baker, 2005. Reply. *J. Environ. Qual.*, 34: 409-410

Mertens, J., G.F. Barkle and R. Stenger, 2005. Numerical analysis to investigate the effects of the design and installation of equilibrium tension plate lysimeters on leachate volume. *Vadose Zone J.*, 4: 488-499

Mertens, J., J. Diels, J. Vanderborght and J. Feyen. 2007a. Numerical Analysis of Passive Capillary Wick Samplers prior to Field Installation, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71: 35-42

Mertens J., J. Vanderborght, R. Kasteel, T. Pütz, R. Merckx, J. Feyen and E. Smolders, 2007b. Dissolved Organic Carbon Fluxes under Bare Soil. *J. Environ. Qual.*, 36: 597-606

Mertens, J., V. Tuts, J. Diels, J. Vanderborght, J. Feyen and R. Merckx, 2007c. Design and testing of a drop counter for use in vadose zone water samplers, *Vadose Zone J.*, in press

Weihermuller, L., R. Kasteel, J. Vanderborght, T. Pütz and H. Vereecken, 2005. Soil water extraction with a suction cup: Results of numerical simulations. *Vadose Zone J.*, 4: 899-907

J. Mertens, F. Amery, K. Cheyns, F. Degryse, I. De Troyer, J. Diels, J. Feyen, R. Merckx, E. Smolders, D. Springael en J. Vanderborght*

*Bodem- en Waterbeheer
K.U. Leuven,
Celestijnenlaan 200E,
3001 Heverlee,*

** Tel.: +32 16 32 97 56; Fax: +32 16 32 97 60;
e-mail: mertensja@yahoo.co.nz*