
Poriewaterstroming en -transport op perceelschaal

Quasi-2D versus 2D benadering

Lies Peters en Jasper Griffioen

Inleiding

In toenemende mate worden er eisen gesteld aan de kwaliteit van het oppervlaktewater, bijvoorbeeld vanuit de Kader Richtlijn Water. Een belangrijk punt van zorg daarbij is de belasting van het oppervlaktewater met diffuse verontreinigingen, zoals nutriënten. Om de effecten van belasting-beperkende maatregelen te evalueren zijn modellen een onmisbaar instrument. De aard van het probleem stelt hierbij hoge eisen aan de te gebruiken modellen: een belangrijke eis is dat de modellen op landelijke of regionale schaal toegepast kunnen worden, en voldoende ruimtelijk en temporeel detail hebben om de toekomstige belasting naar het oppervlaktewater goed te voorspellen.

Op dit moment wordt landsdekkend de belasting van het oppervlaktewater met nutriënten berekend met het modelpakket stone (Wolf e.a., 2003). In deze benadering wordt het transport in de onverzadigde zone en het ondiepe grondwater via puntmodellen gesimuleerd. Het model swap (Dam e.a., 1997; Kroes en van Dam, 2003) wordt gebruikt voor het watertransport en animo (Goenendijk en Kroes, 1999) voor het stoftransport. De horizontale afvoer uit de bodem naar het oppervlaktewater wordt via simpele relaties tussen de grondwaterstand en de ontwateringsdiepte gesimuleerd in een quasi-2D benadering.

Er bestaat een uitgebreide onderbouwing voor het quasi-2D concept bij stationaire stroming op perceelschaal voor de verzadigde zone (Ommen, 1986; Duffy en Lee, 1992; Groenendijk en Eertwegh, 2004). Het is belangrijk dat de verdeling van de reistijden van het uittredende poriewater goed gesimuleerd wordt om stoftransport correct te kunnen simuleren. Groenendijk (ingestuurd) laat aan de hand van analytische oplossingen zien dat de quasi-2D benadering de reistijden in de verzadigde zone goed kan benaderen. Als gevolg in de analytische benadering kon echter maar een beperkt aantal stromingssituaties bekeken worden en in het bijzonder alleen situaties met stationaire afvoer. stone en meer specifiek animo zijn ook uitgebreid gevalideerd met veldmetingen naast de theoretische verificatie (o.a. Overbeek (red), 2002; Reiniger e.a., 1990; Groenendijk en Kroes, 1999; Horst en Wolf, 2002; Salm en Schoumans, 2000). Een nadeel van het vergelijken met veldmetingen

Lies Peters en Jasper Griffioen zijn werkzaam bij het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Divisie Grondwater & Bodem, Postbus 80015, 3508 TA Utrecht, tel (030) 256 43 57, fax (030) 256 48 55, lies.peters@tno.nl, jasper.griffioen@tno.nl.

is dat het moeilijk kan zijn om te achterhalen wat de oorzaak van eventueel gevonden afwijkingen is.

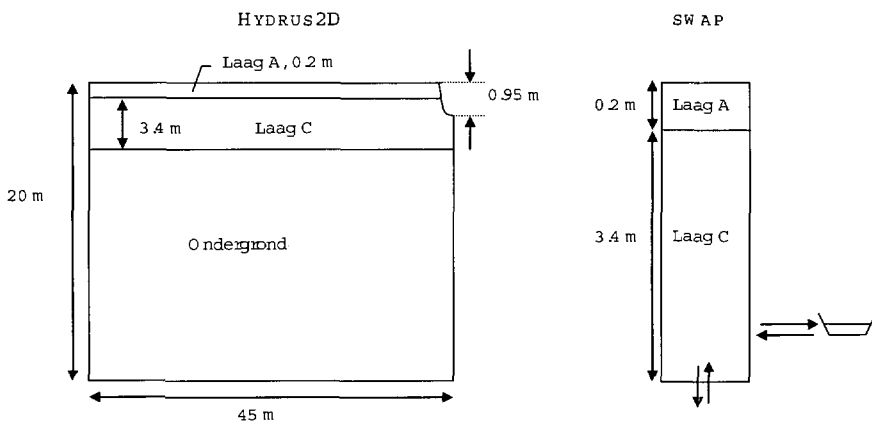
Om een beter inzicht te krijgen in de gevolgen van de quasi-2D benadering voor het voorspellen van de belasting van oppervlaktewater, worden hier modelresultaten voor de perceelschaal vergeleken tussen swap/animo en Hydrus2D (Šimunek e.a., 1999). Hydrus2D kent een meer fysisch gebaseerde benadering, waarmee wisselend verzadigde en onverzadigde stroming en stoftransport gesimuleerd worden in twee dimensies.

In deze studie wordt uitsluitend gekeken naar stoftransport op perceelschaal met niet-lineaire adsorptie, waarbij de nadruk ligt op hydrologisch niet-stationaire situaties. Bemesting, opname door planten en chemische processen anders dan niet-lineaire adsorptie, worden niet in beschouwing genomen, om de relatie tussen fysisch transport en chemische reacties eenvoudig te houden. Daarom wordt niet het transport van NO_3 en PO_4 gesimuleerd, maar van cadmium (Cd). De algemene opzet is een homogeen zandig profiel met vrije afwatering en kwel. Er zijn de volgende scenario's bekeken:

- Constante neerslag (met en zonder adsorptie) en 1 drainageniveau:
 - Doorbraakcurve
 - Uitspoeling van bestaande vervuiling
- Variabele neerslag (met adsorptie) en 1 drainageniveau:
 - Uitspoeling van bestaande vervuiling (gedurende 90 jaar, het basismodel)
 - Variaties van de onderrandvoorwaarde
 - Anisotropie
 - Afwisselend drainage naar en infiltratie vanuit de sloot
- Variabele neerslag en afwatering naar 2 drainageniveaus

Beschrijving Hydrus2D en swap/animo

Tabel 1 geeft een summier beschrijving van de beide modellen. Voor een meer uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar Dam e.a. (1997) voor swap (versie 2.07), naar Groenendijk en Kroes (1999) voor animo (versie 3.5) en Šimunek e.a. (1999) voor Hydrus2D.



Figuur 1: Overzicht van het perceel en de schematisaties van de beide modellen (niet op schaal).

Tabel 1: Kort overzicht voor swap/animo en Hydrus2D.

	swap/animo	Hydrus2D
Dimensionaliteit	Quasi-2D: onverzadigde zone 1D kolom, met afvoer naar oppervlaktewater via conceptuele relaties	2D
Watertransport	Verzadigd/onverzadigd Richards' vergelijking	Verzadigd/onverzadigd Richards' vergelijking
Stoftransport	Convectie-dispersie vergelijking	Convectie-dispersie vergelijking
Oplossingsmethode	Eindige differenties in ruimte en tijd	Eindige elementen (Galerkin, driehoekige elementen) in ruimte, eindige differenties in tijd
Drainage	Conceptuele relaties van de vorm: $q = \frac{h_{avg} - h_d}{\gamma}$ waarbij h_{avg} en h_d de gemiddelde stijghoogte en het ontwateringniveau zijn en γ de drainageweerstand. Bij drainage naar meerdere niveaus wordt het stromingsdomein opgedeeld.	Via randvoorwaarden (constante of variabele stijghoogte, of seepage face)
Reactief transport	N, C en P cyclus Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen permanent grasland en wisselende bebouwing	Niet-evenwicht sorptie, niet-lineaire adsorptie, 1e-orde afbraak

Modelinvoer

De modellen worden vergeleken voor een geschematiseerd perceel gebaseerd in Noord-Brabant (Rozemeijer en Griffioen, 2004). Het betreft een perceel op een homogene zandgrond met vrije afwatering. De dimensies van het perceel staan weergegeven in figuur 1. Voor sommige scenario's wordt afgeweken van dit basismodel. Voor de beide modellen is een groot deel van de invoer identiek, zoals hieronder aangegeven:

- In het geval van variabele neerslag worden dagwaarden gebruikt van neerslag en potentiële verdamping (voor gras) van meteorostation De Bilt van 1906 tot 1995. Voor de kalibratie worden de gegevens van 1992 gebruikt.
- De relatie tussen de drukhoogte, bodemvochtgehalte en doorlatendheid wordt beschreven met het Van Genuchten model waarvoor de waarden in tabel 2 zijn gegeven.
- De niet-lineaire adsorptie van Cd wordt beschreven met de Langmuir isotherm. De reden hiervoor is dat in animo de Freundlich isotherm niet beschikbaar is, aangezien dit model alleen bedoeld is voor NO_3 en PO_4 . Zolang het Langmuir-sorptiemaximum niet bereikt wordt, geven beide isothermen vergelijkbare resultaten. De gebruikte waarden worden in tabel 2 gegeven.
- Droge bulkdichtheid is 1500 kg/m^3 .

- De slootdiepte is 95 cm en de waterdiepte 0 cm zodat er geen infiltratie vanuit de sloot kan optreden (met uitzondering van het scenario met infiltratie vanuit de sloot).
- De achtergrondconcentratie van Cd is $0.0004 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ in het grondwater, het kwelwater en het water dat vanuit de sloot infiltreert. De concentratie in de neerslag is $0.0003 \mu\text{g}/\text{cm}^3$. De initiële concentratie in het bodemvocht is een lineaire gradiënt van $0.025 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ aan maaiveld tot $0.0004 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ op 1 m diepte.
- Er wordt aangenomen dat er geen interceptie plaatsvindt en dat het gewas geen Cd opneemt.
- Worteldiepte is 50 cm met een uniforme verdeling over de diepte.

Tabel 2: Parameters van het Van Genuchten model (θ_r is het residuele vochtgehalte, θ_s is het vochtgehalte bij verzadiging, α en n zijn parameters, K_s is de doorlatenheid bij verzadiging) en Langmuir sorptie-isotherm (k is de adsorptie constante van de Langmuir isotherm en S_{max} de maximale adsorptie).

Bodemlaag	θ_r (-)	θ_s (-)	α (-)	n (-)	K_s (cm/d)	k (m ³ /g)	S_{max} (mg/kg)
Laag A	0.0556	0.3815	0.0304	2.0051	400	121	0.599
Laag C	0.0638	0.4576	0.0256	1.475	400	121	0.151
Ondergrond*	0.068	0.38	0.008	1.09	0.1	121	0.151

* alleen in Hydrus2D

Naast deze identieke invoer, zijn enkele onderdelen anders. Dit hangt deels samen met het modelconcept:

- Voor de drainage in swap is een slootafstand van 90 m aangenomen. In Hydrus2D worden sloten expliciet gesimuleerd via een “seepage face”. De drainageweerstanden worden gekalibreerd in swap (zie volgende paragraaf).
- De onderrandvoorwaarde in swap is gesimuleerd door de flux naar een diepe aquifer te simuleren. De stijghoogte in de diepe aquifer is 270 cm in geval van kwel en -400 cm in geval van wegzijging met een weerstand van 10 000 d. In Hydrus2D is ervoor gekozen om aan de onderrand een slecht doorlatende laag te definiëren met aan de onderrand een vaste stijghoogte. In geval van kwel is de drukhoogte aan de onderrand 2500 cm en bij wegzijging 1420 cm.
- De dispersie wordt in animo gesimuleerd door middel van numerieke dispersie en wordt dus bepaald door de verticale discretisatie in swap. In de nieuwste versie van animo zal echter de verticale discretisatie aangepast kunnen worden. Volgens Groenendijk en Kroes (1999) is de dispersiviteit voor de hier gebruikte modelopzet ongeveer 1 à 2 cm aan de bovenzijde tot ongeveer 25 cm aan de onderzijde van het modeldomein. In Hydrus2D treedt er bij een goede ruimtelijke discretisatie vrijwel geen numerieke dispersie op en wordt de hydrodynamische dispersie apart opgegeven. De longitudinale dispersiviteit is 5 cm en de transversale 0.5 cm.
- De zijranden zijn in Hydrus2D als no-flow grenzen opgegeven.

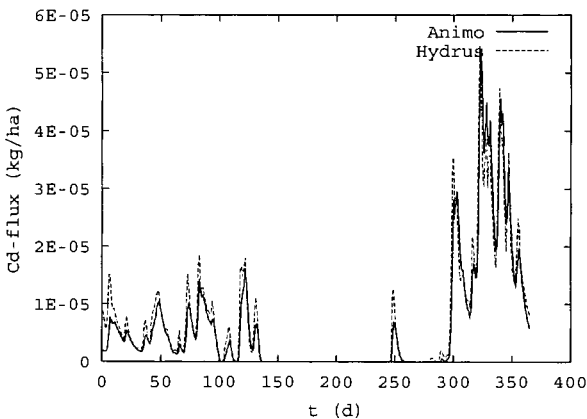
Kalibratie van de drainageweerstanden in SWAP

De waterafvoer moet zo gelijk mogelijk zijn voor beide modellen, om vergelijking in stoftransport mogelijk te maken. Daarom zijn de drainageweerstanden in swap gekali-

breed aan de hand van de modelresultaten van Hydrus2D. De kalibratie is uitgevoerd met PEST (Watermark Numerical Computing, 2002) aan de hand van de afvoer naar de sloot, de zuigspanning aan het landoppervlak en de Cd-flux naar de sloot. De totale drainageweerstand in swap is opgebouwd uit 2 componenten: drainageweerstand en entreeweerstand. Vanwege de hoge correlatie tussen de entreeweerstand en de drainageweerstand is er voor gekozen de entreeweerstand constant op 0.1 d te houden en is alleen de drainageweerstand gekalibreerd. De kalibratie is niet-stationair gedaan voor de periode van 1 jaar. De calibratie van de drainageweerstand is 50.75 d met een 95% betrouwbaarheidsinterval van 49.37 tot 52.12 d. De Nash-Suthcliffe efficiency voor de gekalibreerde run was 0.990 voor de zuigspanning, 0.974 voor de afvoer en 0.967 voor de Cd-flux in de afvoer. In tabel 3 is de massabalans voor de kalibratieperiode gegeven. Figuur 2 geeft het verloop van de afvoer van Cd naar de sloot. Aangezien beide modellen voor de kalibratie vergelijkbare modelresultaten opleveren, is een nadere uitwerking van het conceptuele verschil tussen beide modellen goed mogelijk.

Tabel 3: Massabalans voor water en Cd van het basismodel voor de kalibratieperiode van 1 jaar (positief is het model in).

	swap/animo		Hydrus2D		Verschil	
	Water cm	Cd kg/ha	Water cm	Cd kg/ha	Water %	Cd %
Neerslag	82.56	2.48E-03	82.59	2.48E-03	-0.07	-0.07
Actuele verdamping	-56.96	0	-56.66	0	0.21	
Onderrand	13.48	5.38E-04	13.66	5.45E-04	-1.38	-1.62
Sloot	-38.52	-2.28E-03	-38.96	-2.55E-03	-0.74	-11.01



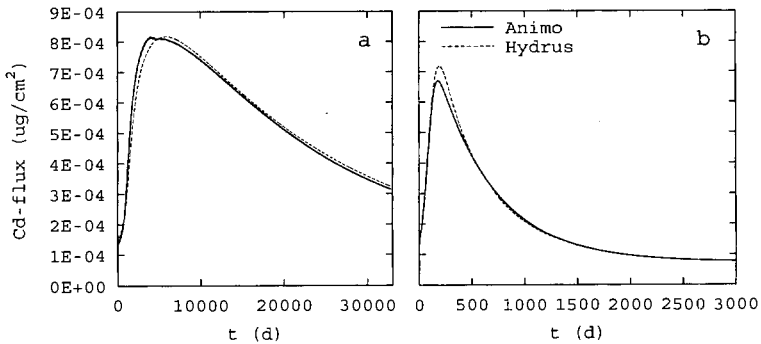
Figuur 2: Afvoer van Cd naar de sloot voor de kalibratie data.

Resultaten

Scenario's met constante neerslag

De verschillen tussen Hydrus2D en swap/animo bij constante neerslag zijn onderzocht voor de volgende scenario's: doorbraakcurve met en zonder adsorptie en uitspoeling van de aanwezige vervuiling met en zonder adsorptie. Voor de doorbraakcurve zonder adsorptie was de fout in de berekende eindconcentratie voor beide modellen klein: 1% voor Hydrus2D en 0.1 % voor swap/animo. Het maximale verschil in concentratie tussen de twee modellen is 10% in situatie zonder adsorptie en 5% met adsorptie, waarbij Hydrus2D steeds iets hoger lag. Het maximale verschil trad in beide gevallen ongeveer halverwege de doorbraak op.

In figuur 3 is de uitspoeling van de in het bodemprofiel aanwezige verontreiniging door een constante neerslag weergegeven. Ook hier zijn de verschillen tussen de beide modellen klein. Omdat het erg lang duurt voordat de volledige vervuiling is afgevoerd, is de afvoer van Cd ook berekend voor het geval er geen adsorptie is (figuur 3b). Hieruit blijkt dat het verschil in de staart gering is. Voor het geval zonder adsorptie blijkt dat bij Hydrus2D 1.5% teveel Cd wordt afgevoerd ten opzichte van de werkelijke hoeveelheid. Bij animo is de fout verwaarloosbaar klein. De resultaten van de beide modellen zijn zeer vergelijkbaar bij stationaire stroming. Het is de vraag of dit bij variabele neerslag ook het geval is.



Figuur 3: Afvoer van Cd naar de sloot door uitspoeling van de in het bodemprofiel aanwezige Cd door een constante neerslag met (a) en zonder (b) adsorptie.

Basisscenario's met variabele neerslag

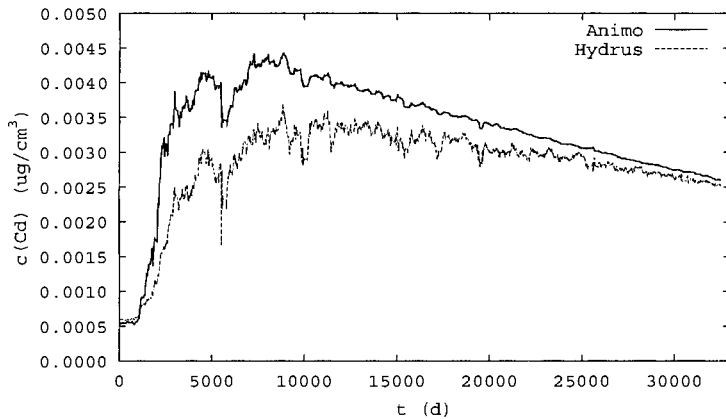
Allereerst is de uitspoeling van een bestaande verontreiniging gesimuleerd voor een periode van 90 jaar met variabele neerslag. Dit wordt vanaf nu het basismodel genoemd. In tabel 4 is de cumulatieve massabalans op 3 tijdstippen weergegeven. Door animo wordt in dit geval duidelijk meer Cd afgevoerd naar de sloot dan door Hydrus2D, met name in de eerste 30 jaar.

Tabel 4: Cumulatieve massabalans voor water en cadmium na 30, 60 en 90 jaar (positief is het model in) voor basismodel gerund met 90 jaar historische neerslag.

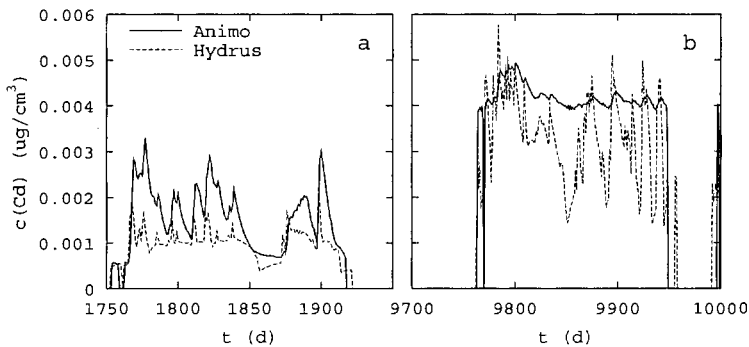
	swap/animo		hydrus		Verschil	
	Water	Cd	Water	Cd	Water	Cd
	cm	kg/ha	cm	kg/ha	%	%
Na 30 jaar:						
Neerslag	2285	0.069	2286	0.069	-0.05	-0.12
Actuele verdamping	-1571		-1566		0.37	
Onderrand	404	0.016	409	0.016	-1.36	-1.34
Sloot	-1116	-0.407	-1133	-0.323	-1.48	23.21
Na 60 jaar:						
Neerslag	4647	0.139	4651	0.140	-0.08	-0.15
Actuele verdamping	-3160		-3149		0.34	
Onderrand	807	0.032	818	0.0327	-1.37	-1.34
Sloot	-2293	-0.845	-2326	-0.745	-1.47	12.55
Na 90 jaar:						
Neerslag	7038	0.211	7048	0.211	-0.14	-0.22
Actuele verdamping	-4732		-4714		0.39	
Onderrand	1212	0.049	1229	0.049	-1.36	-1.34
Sloot	-3522	-1.20	-3578	-1.11	-1.59	7.94

De relatieve fout in de massabalans voor Cd in animo wordt niet groter dan 1%. In Hydrus2D varieert de relatieve fout van 2.5% na 30 jaar, tot 2.9% na 60 jaar en 90 jaar. De relatieve fout in Hydrus2D is hierbij uitgedrukt ten opzichte van de totale hoeveelheid getransporteerd Cd. Ten opzichte van de hoeveelheid Cd afgevoerd naar de sloot is de relatieve fout duidelijk groter, namelijk 7% na 90 jaar. De fouten zijn negatief, wat betekent dat er massa verdwijnt. Een deel van het verschil tussen Hydrus2D en animo kan hieruit verklaard worden. Een grotere nauwkeurigheid van de Hydrus2D simulatie zou bereikt kunnen worden door het gebruik van een fijner netwerk, echter het gebruikte aantal elementen (30 000) is dicht bij het huidige maximum aantal elementen in Hydrus2D.

Het verloop van de concentratie in de tijd (als voortschrijdend gemiddelde over 365 dagen) laat zien dat de Cd concentratie in de afvoer naar de sloot hoger is voor animo dan voor Hydrus2D (figuur 4). Het grootste verschil treedt op in de eerste 30 jaar. Dit verschil wordt niet alleen veroorzaakt door de hierboven genoemde fout in de massabalans in Hydrus2D, maar ook doordat het front in animo sneller verplaatst is (figuur 6). De concentratie tijdens individuele gebeurtenissen (bijv. piekafvoer) kan hoger zijn bij Hydrus2D dan bij animo. Dit is te zien in figuur 5 waar het verloop van de concentratie voor twee tijdsintervallen uit figuur 4 gegeven is. Aangezien bij toetsing aan normen voor oppervlaktewaterkwaliteit niet het gemiddelde maar het 90-percentiel genomen wordt, is een goede voorspelling van de piekconcentratie erg belangrijk. Het zijn immers de pieken die het 90-percentiel uitmaken. Tabel 5 geeft ter illustratie de 90-percentiel waarden volgens de twee modelbenaderingen. Deze blijken opmerkelijk genoeg minder te verschillen dan de gemiddelde concentratie, ondanks dat de concentratie van de uitvoer van Hydrus2D meestal piekeriger is. De oorzaak hiervoor is niet nader achterhaald.



Figuur 4: Verloop van de Cd concentratie (als voortschrijdend gemiddelde over 365 dagen) in de afvoer naar de sloot voor het basisscenario.

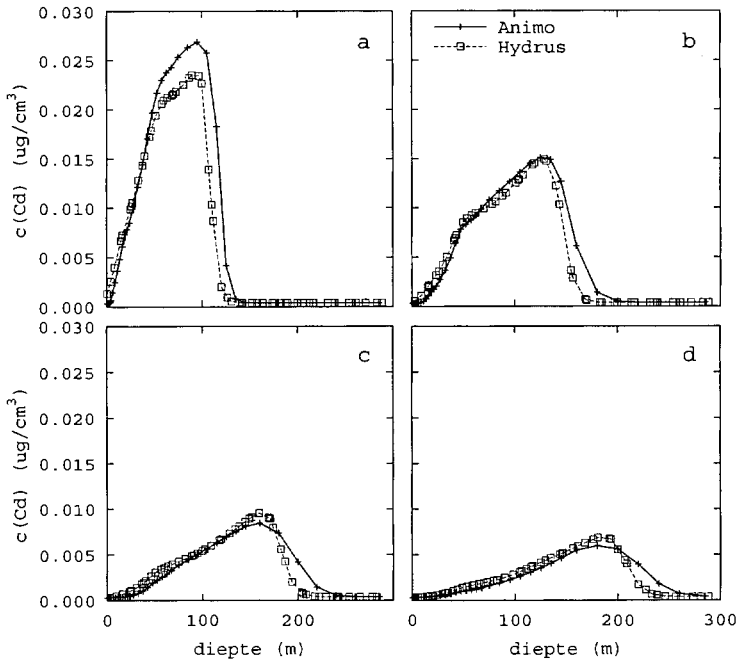


Figuur 5: Voorbeelden van de verschillen in de concentratie tussen Hydrus2D en animo tijdens twee verschillende tijdsintervallen binnen het basisscenario.

Tabel 5: Gemiddelde en 90-percentiel van de concentratie ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$) in de afvoer naar de sloot.

	swap/animo		hydrus2D	
	gemiddelde	90-%	Gemiddelde	90-%
periode 0-30 jaar	0.0033	0.0045	0.0024	0.0040
periode 30-60 jaar	0.0037	0.0040	0.0032	0.0040
periode 60-90 jaar	0.0029	0.0032	0.0028	0.0030

Het diepteverloop van de Cd-concentratie in het bodemvocht op verschillende tijdstippen laat zien dat het front zich sneller verplaatst bij animo dan bij Hydrus2D (figuur 6), wat consistent is met de sterkere stijging van de concentratie in de afvoer. De totale massa onder de curves verschilt maar weinig. Na 60 en 90 jaar lijkt de dispersie in animo groter te zijn dan in Hydrus2D. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de grotere lengte van de modelcellen op deze diepte. Aanpassing van de verticale discretisatie zou dit kunnen voorkomen. Overigens heeft dit verschil in dispersie maar een beperkte invloed op het verloop in de tijd van de hoeveelheid Cd, die naar de sloot afgevoerd wordt.



Figuur 2: Diepteverloop van de Cd-concentratie in het bodemvocht midden tussen de sloten na a) 10, b) 30, c) 60 en d) 90 jaar.

Alternatieve scenario's

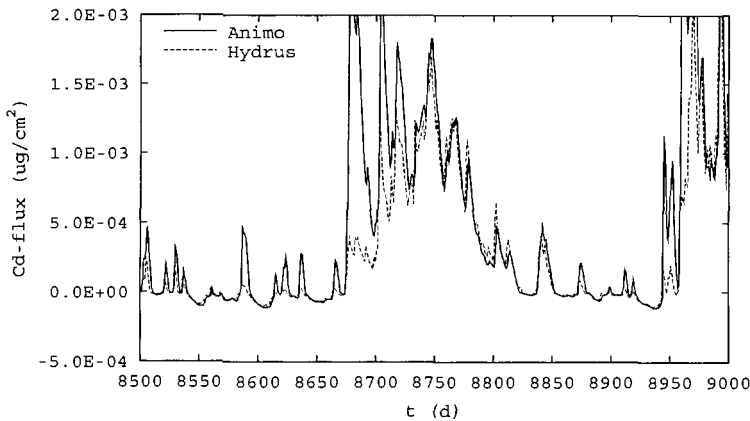
Om de gevoeligheid voor de onderrandvoorwaarde te controleren zijn twee alternatieve scenario's voor de onderrand gesimuleerd: wegzijging in plaats van kwel en vervuilde in plaats van schone kwel. In tabel 6 staat de cumulatieve massabalans na 30 jaar gepresenteerd voor de alternatieve scenario's. In het geval dat er wegzijging in plaats van kwel optreedt, blijkt er niet zoveel te veranderen (vergelijk tabel 4). Het verschil in afgevoerde Cd is iets kleiner, maar dat wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de afvoer bij swap in het geval van wegzijging iets onderschat is. Het tweede scenario met vervuilde kwel is gekozen omdat het mogelijk is dat er verschillen tussen 1D en 2D benadering bestaan voor deze situatie. In een 2D situatie zal de vervuilde kwel geconcentreerd onder de sloot opkwellen als een soort up-coning, terwijl in een 1D situatie het water in het hele compartiment moet mengen. Dezelfde verschillen tussen swap/animo en Hydrus2D komen hier naar voren als bij het basismodel.

Indien er infiltratie vanuit de sloot naar de ondergrond optreedt (bijvoorbeeld bij waterafvoer of in zomersituatie in een droog laaggelegen gebied), is er een duidelijk conceptueel verschil tussen de modellen. In Hydrus2D wordt de zone rond de sloot expliciet gesimuleerd, waardoor een zone van geïnfiltriseerd slootwater opgebouwd wordt rond de sloot in perioden dat infiltratie uit de sloot optreedt. Wanneer vervolgens weer drainage optreedt, moet eerst het geïnfiltrierde water afgevoerd worden. In swap/animo daarentegen wordt het infiltrerende water instantaan gemengd met het reeds aanwezige poriewater voor de

gridcellen binnen het betreffende diepte-interval. Deze verschillen zijn duidelijk terug te vinden in de modelresultaten (figuur 7): na een droge periode is de concentratie van het afgevoerde water veel lager bij Hydrus2D dan bij swap/animo. Ook het verschil in de totaal afgevoerde hoeveelheid Cd loopt iets op. Na 30 jaar is er door animo netto 27% meer Cd afgevoerd, hetgeen een kleine 4% meer is dan bij het basisscenario (vergelijk tabel 4).

Tabel 6: Massabalans na 30 jaar voor water en Cadmium (Cd) na 30, 60 en 90 jaar voor een model met wegzijging ipv kwel en met vervuilde kwel ($c(\text{Cd})=0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^3$) (positief is het model in).

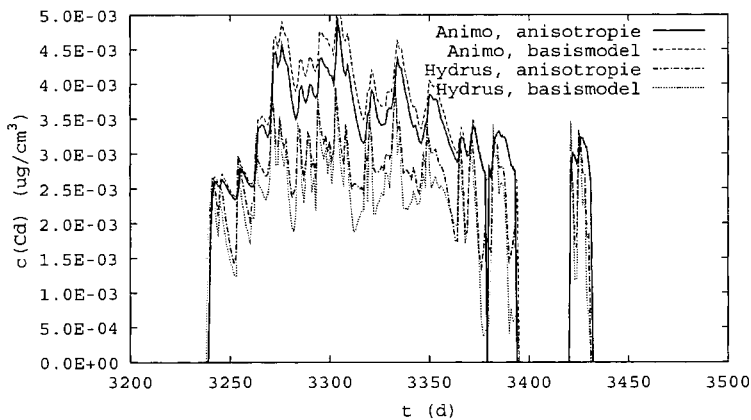
	swap/animo		hydrus		Verschil	
	Water cm	Cd kg/ha	Water cm	Cd kg/ha	Water %	Cd %
<i>Model met wegzijging ipv kwel</i>						
Neerslag		0.068		0.068		
	2285	5	2286	6	-0.03	-0.11
Actuele verdamping	-1570		-1569		0.10	
Onderrand	-307	-0.012	301	-0.012	2.08	2.05
Sloot	-407	-0.163	420	-0.132	-3.08	20.87
<i>Model met $c(\text{Cd})=0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ in de kwel</i>						
Neerslag		0.068		0.068		
	2285	5	2286	6	-0.05	-0.12
Actuele verdamping	-1571	n.v.t.	-1566	n.v.t.	0.37	
Onderrand	404	0.404	409	0.409	-1.36	-1.34
Sloot	-1116	-0.446	-1132	-0.347	-1.47	24.84



Figuur 3: Voorbeeld van het verloop van de Cd flux naar de sloot voor het scenario waarbij eerst infiltratie vanuit de sloot naar de ondergrond plaats vindt.

Een situatie die intrinsiek moeilijk met een quasi-2D model te simuleren is, is het optreden van anisotropie. De verticale doorlatendheid kan direct opgegeven worden, maar de horizontale doorlatendheid moet verdisconteerd worden via de drainageweerstand.

Daarom is een scenario doorgerekend waarbij laag C (figuur 1) een anisotropiefactor van 4 heeft. Ten opzichte van het basismodel is de verticale doorlatendheid gehalveerd en de horizontale verdubbeld. De drainageweerstand voor SWAP is voor dit scenario opnieuw gekalibreerd aan de hand van Hydrus2D-uitvoer, met als resultaat een weerstand van 34.4 d. Ook in dit geval blijkt dat de verschillen tussen het gesimuleerde watertransport van beide modellen klein zijn. Wat betreft het stoftransport neemt bij animo de afvoer van Cd in de eerste 30 jaar af ten opzichte van het basismodel (figuur 8). Bij Hydrus2D neemt de afvoer van Cd juist toe ten opzichte van het basismodel. Het verschil in afgevoerd Cd is na 30 jaar nog maar 13.7%. De afname bij animo is het gevolg van een lagere grondwaterstand. De toename bij Hydrus2D is het gevolg van een toename in de concentratie, met name in periodes met een relatief lage afvoer (figuur 8). Hoewel bij Hydrus2D ook sprake is van een lagere grondwaterstand wordt dit blijkbaar gecompenseerd door veranderingen in het stromingspatroon rond de sloot.



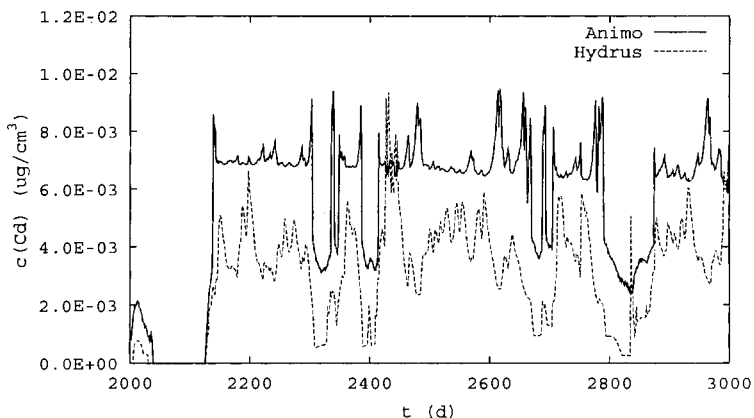
Figuur 4: Voorbeeld van het verloop van de Cd concentratie in de afvoer naar de sloot voor het scenario met anisotropie en voor het basismodel.

Drainage naar meerdere niveaus

Als een eerste stap richting opschaling van perceelschaal naar regionale schaal is in dit scenario bekeken of swap/animo drainage met meerdere drainageniveaus goed kan simuleren. Daarvoor is het basismodel met 2 drainageniveaus gesimuleerd met een respectievelijke drainafstand van 18 (greppels) en 90 m (sloot), en bijhorende diepte van 0.5 en 0.95 m. Voor de ondergrond is hierbij gekozen voor sandy loam (laag A) en sandy clay loam (laag C) uit de Hydrus2D bodem-bibliotheek. Verder is het model identiek aan het basismodel.

Bij Hydrus2D is de fout in de massabalans van Cd beduidend groter voor dit scenario: 6.8% na 30 jaar. In dit scenario wordt de actuele verdamping sterk gereduceerd als gevolg van een hoge grondwaterstand (natschade). Dit gebeurt meer (ruim 8%) bij swap dan bij Hydrus2D. Het verschil wordt veroorzaakt doordat de kromming van de grondwaterspiegel in het perceel in dit geval niet goed benaderd kan worden door het quasi-2D modelconcept. De afvoer van water naar de sloot is daardoor ongeveer 8% groter bij swap dan bij Hydrus2D. Het verschil in de afgevoerde hoeveelheid Cd is voor dit scenario ook iets gro-

ter: 36% na 30 jaar. De concentratie is gemiddelde 28.6% hoger bij animo. De Cd concentratie van het water dat wordt afgevoerd naar de greppels is veel hoger dan van de afvoer naar de sloot. Daardoor daalt de concentratie sterk als de greppels droogvallen (figuur 9). Bij Hydrus2D is deze overgang minder scherp dan bij swap/animo, doordat de twee expliciet gesimuleerde greppels niet tegelijkertijd droogvallen als gevolg van de kromming van de waterspiegel tussen de sloten.



Figuur 5: Voorbeeld van het verloop van de Cd concentratie in de totale afvoer naar het drainagestelsel voor een scenario met 2 drainageniveaus.

Conclusies

De modelvergelijkingen laten een duidelijke tendens zien. Voor het simpele geval van stationaire stroming in een homogeen perceel blijken swap/animo en Hydrus2D praktisch identieke resultaten te geven, zowel wat betreft water- als stoftransport. De resultaten van de stationaire modellen geven echter geen goede aanwijzingen voor de verschillen die voor meer complexe situaties, zoals variabele neerslag, tussen de modellen optreden. Wat betreft de waterstroming blijven de verschillen tussen Hydrus2D en swap/animo in bijna alle scenario's klein. Alleen in het geval van meerdere drainageniveaus ontstonden verschillen in de simulatie van de actuele verdamping (8%). Naarmate echter de situatie complexer wordt, nemen de verschillen tussen beide modellen wat betreft stoftransport toe. Daarvoor zijn meerdere oorzaken aan te wijzen. In Hydrus2D neemt de fout in de massabalans van Cd toe als gevolg van variabele neerslag, bij een toenemend aantal concentratie-fronten en bij meer sloten/greppels. De verschillen tussen beide modellen zijn echter groter dan uit de fout in de massabalans van Hydrus2D kan worden verklaard. Het verschil moet dus ook veroorzaakt zijn door het verschil in dimensionaliteit: 2D versus quasi-2D. Bij swap/animo is sprake van snellere verplaatsing van het reactiefront en een snellere stijging in de Cd-concentratie in de afvoer naar de sloot dan bij Hydrus2D (~25% in eerste 30 jaar). Dit verschil wordt groter in het geval van infiltratie van water vanuit de sloot naar de ondergrond en bij meerdere drainageniveaus.

De verschillen die optreden op korte tijdschalen in de vorm van pieken en dalen in de concentratie, waren aanzienlijk groter dan de verschillen in cumulatieve stoffluxen. Het meest extreem trad dit op in het geval van infiltratie vanuit de sloot. Wanneer drainage

optreedt na een periode van infiltratie in Hydrus2D, wordt de concentratie van het afgevoerde water voornamelijk bepaald door de concentratie van het water dat daarvoor geïnfiltrerd is. Het verschil met de concentratie in animo kan daardoor extreem zijn, namelijk praktisch nul voor Hydrus2D en piekconcentratie voor animo.

Uit de resultaten blijkt dat er zeker ruimte voor verbetering is wat betreft de quasi-2D benadering, met name wat betreft fluctuaties op korte tijdschalen (dagen tot maanden). Overigens moet hierbij opgemerkt worden dat animo ontwikkeld is om uitspoeling van N en P te simuleren. Het is de verwachting dat N en P meestal minder sterke gradiënten vertonen dan de hier gesimuleerde situatie met Cd, waardoor de verschillen tussen beide modellen kleiner zullen zijn. Verder is een nadeel van een conceptuele benadering zoals in swap/animo dat het empirische procesparameters bevat die in veel gevallen op historische gegevens gekalibreerd zullen worden. In toekomstscenario's hoeft de waarde van deze gekijkte procesparameters niet altijd geldig te zijn en levert de modelbenadering in als prognose-instrument. Het effect van ingrepen wordt dan moeilijker vast te stellen. Het is echter ook duidelijk dat het gebruik van Hydrus2D op grote schaal nog niet praktisch haalbaar is door de vereiste discretisatie en de daaruit volgende lange rekentijden, vanwege wezenlijke fouten in de massabalans en numerieke instabiliteit.

Dankwoord

Toon Leijnse en Piet Groenendijk worden hartelijk bedankt voor de verschillende discussies naar aanleiding van de resultaten.

Referenties

- Dam, J.C. van, J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk en C. A. van Diepen (1997)** Theory of SWAP, simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. Wageningen. Report 71 Department of Water Resources, WAU, Technical document 45 DLO Winand Staring Centre.
- Duffy C.J. en D.-H. Lee (1992)** Base flow response from nonpoint source contamination: simulated spatial variability in source, structure, and initial condition. *Water Resources Research* 28(3), pag 905–914.
- Groenendijk, P. en J.G. Kroes (1999)** Modelling the nitrogen and phosphorous leaching to groundwater and surface water with ANIMO 3.5; Winand Staring Centre, Wageningen; rapport 144.
- Groenendijk, P. en G.A.P.H. van den Eertwegh (2004)** Drainage-water travel times as a key factor for surface water contamination; in: R.A. Feddes, G.H. de Rooij, J.C. van Dam (red) *Unsaturated-Zone Modeling: Progress, Challenges and Applications*; Papers for the Frontis Workshop on Unsaturated-Zone Modeling: Progress, Challenges and Applications, Wageningen, The Netherlands 3-5 October 2004. Series: Wageningen Ur Frontis Series, Vol 6, XXII, 364 pag.
- Groenendijk, P.** (ingestuurd) Conceptualisation of groundwater travel time in point models; in: *Water Resources Research*.
- Horst, M.M.S. en J. Wolf (2002)** Toetsing van STONE 2.0; Vergelijking van simulatiere-

- sultaten van STONE en ANIMO met meetgegevens van veldexperimenten. Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, rapport 723., 178 pag.
- Kroes, J.G. en J. Roelsma (1998)** ANIMO 3.5; user's guide for the ANIMO version 3.5 nutrient leaching model. Wageningen, SC-DLO. Techn. Doc. 46
- Kroes, J.G. en J.C. van Dam (2003)** Reference manual SWAP version 3.0.3. Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, rapport 773, 210 pag.
- Ommen, H.C. van (1986)** Influence of diffuse sources of contamination on the quality of outflowing groundwater including non-equilibrium adsorption and decomposition; in: *Journal of Hydrology*, vol 88, pag 79–95.
- Overbeek, G.B.J. (2002) (red)** Plausibiliteitsdocument STONE 2.0. Globale verkenning van de plausibiliteit van het model STONE versie 2.0 voor de modellering van uit- en afspoeling van N en P. RIVM rapport 718501001/2002.
- Reiniger, P., J. Hutson, H. Jansen, J. Kragt, H. Piehler, M. Swarts en H. Vereecken (1990)** Evaluation and testing of models describing nitrogen transport in soil: a European project; Transaction of 14th ICSS, Kyoto, Japan, pag 56–61.
- Rozemeijer, J.C. en J. Griffioen (2004)** De effecten van waterconservering op de waterkwaliteit in Noord-Brabant en Limburg; Fase 3: Modellering van de invloed van waterconservering op water- en stoftransport door de bodem; TNO-rapport NITG 05-059-B.
- Salm, C. van der en O.F. Schoumans (2000)** Phosphate losses on four grassland plots used for dairy farming; Measured Phosphate losses and calibration of the model ANIMO; Alterra, Green World Research, Wageningen, The Netherlands, report 083.
- Šimunek J., M. Šejna en M.Th. van Genuchten (1999)** The HYDRUS-2D Software Package for Simulating the Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media; Version 2.0. U.S. salinity laboratory agricultural research service U.S. department of agriculture Riverside, California.
- Watermark Numerical Computing (2002)** PEST, Model Independent Parameter Estimation; Users Manual.
- Wolf J., A.H.W. Beusen, P. Groenendijk, T. Kroon, R.Rötter en H. van Zeijts (2003)** The integrated modeling system STONE for calculating nutrient emissions from agriculture in the Netherlands; in: *Environmental Modelling & Software*, vol 18, pag 597–617.