
MetaSWAP meet zich met SWAP

Simulatie van de onverzadigde zone voor regionale en nationale modellen

Joris Schaap en Pim Dik

Inleiding

Als gevolg van grotere ambities voor de kwaliteit van het landelijke gebied (betere waterkwaliteit, betere risicobeheersing, grotere waarde van landschap en natuur) is er een toenemende vraag naar modellen die het regionale hydrologische systeem als een integraal geheel beschrijven. In het kader van deze ambities zijn te noemen de Kaderrichtlijn Water, GGOR, de WB21-doelstellingen en de Droogtestudie. Mede onder de druk van de klimaatverandering is het water stevig op de politieke agenda gezet.

Recent hebben Alterra, MNP, RIZA, STOWA, TNO en WL besloten een nationaal hydrologisch instrument te ontwikkelen, dat het waterbeheer en de ruimtelijke ordening kan ondersteunen en informatie kan verschaffen voor milieu-evaluaties en landelijke beleidsvragen (Kroon e.a., 2006). Het model zal een in eerste instantie een detailniveau hebben van 250 x 250 m² en zowel de compartimenten oppervlaktewater, grondwater als onverzadigde zone omvatten. De volgende technische innovaties maken het mogelijk om op deze schaal landsdekkend te rekenen:

- voortschrijdende ontwikkelingen in de computertechnologie: steeds snellere computers en steeds krachtiger software voor het bewerken van grote hoeveelheden data;
- grotere beschikbaarheid van data die vaak via remote sensing technieken zijn verkregen (bijvoorbeeld maaiveldhoogte, landgebruik, verdamping, op radar gebaseerde neerslagvelden).

De wisselwerking tussen wat nodig is en wat technisch mogelijk is, heeft natuurlijk deze ontwikkeling in een stroomversnelling heeft gebracht .

De onverzadigde zone speelt een sleutelrol in de hydrologische kringloop en vormt een belangrijke component in een integraal hydrologisch modelinstrumentarium. Deze zone is via neerslag en verdamping de link met de atmosfeer en bepaalt de grondwateraanvulling. Ook zijn in belangrijke mate de mogelijkheden van landgebruik en natuur afhankelijk van de condities in de onverzadigde zone. Voor regionale en nationale vraagstukken is er daarvoor vraag naar een onverzadigde zone model dat:

- nauwkeurige resultaten geeft;
- snel genoeg rekent;
- aan andere modellen gekoppeld kan worden.

Op het ogenblik is het gebruik van SWAP (Kroes en Van Dam, 2003) als geavanceerd model

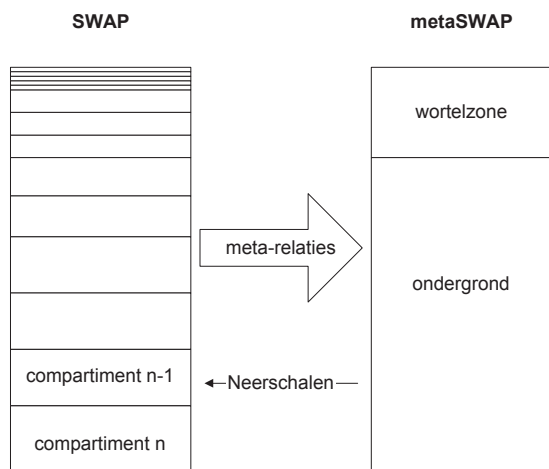
Joris Schaap en Pim Dik zijn werkzaam bij Wageningen Universiteit en Research Centrum, Alterra, Postbus 47, 6700 AA Wageningen, e-mail: joris.schaap@wur.nl.

niet snel genoeg voor toepassingen met meer dan 20.000 rekeneenheden. Voor een landsdekkende resolutie van 250 x 250 m² zijn meer dan 500 000 eenheden nodig. Daarom is gezocht naar een alternatief. Bij Alterra is hiervoor een metamodel van SWAP ontwikkeld, genaamd MetaSWAP. Dit nieuwe model is samen met MODFLOW (Harbaugh e.a., 2000) in het integrale modelsysteem SIMGRO geïmplementeerd (Van Walsum e.a., 2006). Het model is niet bedoeld als vervanging van SWAP. Hoofddoelstelling van de modelontwikkeling is vooral het verminderen van de rekeninspanning van het regionale (of nationale) hoofdmodel ten opzichte van een koppeling met SWAP.

In dit artikel willen we het concept op hoofdlijnen beschrijven en tevens ingaan op de mogelijkheden en onmogelijkheden. Dat doen we door de uitkomsten van MetaSWAP te vergelijken met die van het moedermodel SWAP.

Concept MetaSWAP

MetaSWAP beschrijft de niet-stationaire stroming van water in de onverzadigde zone. MetaSWAP is gebaseerd op rekenexperimenten met een stationaire versie van SWAP, vandaar het voorvoegsel ‘meta’ in de naam. SWAP zelf is een deterministisch model, dat de stroming van water op basis van de Richards-vergelijking beschrijft (Kroes en Van Dam, 2003).



Figuur 1: Schematisering van SWAP en MetaSWAP. MetaSWAP berekent het vochtgehalte voor beide lagen met de bijbehorende flux. Deze resultaten kunnen worden neergeschaald naar een stationair profiel met vochtgehalte en drukhoogten voor alle SWAP bodemlagen.

In SWAP is de bodem geschematiseerd tot een aantal rekencompartimenten, allen met hun eigen bodemfysische karakteristieken. SWAP houdt voor ieder rekencompartiment de drukhoogte en het vochtgehalte bij, en berekent de fluxen tussen de verschillende compartimenten op basis van de opgelegde randvoorwaarden en berekende verschillen in drukhoogte. Om tot een vereenvoudiging te komen gaat MetaSWAP standaard uit van een bodemprofiel met twee lagen: de wortelzone en de ondergrond (figuur 1). Voor deze lagen zijn metarelaties gedefinieerd voor de:

- totale berging in de wortelzone als functie van de gemiddelde drukhoogte in de wortelzone en de grondwaterstand;
- totale berging in de ondergrond als functie van de gemiddelde drukhoogte in de wortelzone en de grondwaterstand;
- flux tussen de wortelzone en de ondergrond, eveneens als functie van de gemiddelde drukhoogte in de wortelzone en de grondwaterstand.

Deze metarelaties zijn afgeleid door het doen van rekenexperimenten met een stationaire versie van SWAP voor:

- 21 bodemprofielen;
- 29 diktes van wortelzones: van 5 tot 300 cm;
- 52 grondwaterstanden: van 2 tot 10000 cm –mv;
- 91 fluxen: van 15 mm/d verdamping tot 500 mm/d percolatie.

In totaal zijn dus 2.881.788 stationaire SWAP-berekeningen uitgevoerd en geconverteerd naar een database, die als invoer dient voor MetaSWAP.

MetaSWAP berekent de onverzadigde stroming in de bodem op basis van de metarelaties. Voor de reductie van de evapotranspiratie als gevolg van droogte maakt MetaSWAP gebruik van het concept van Feddes (Feddes e.a., 1978). Daarnaast zijn in het model deterministische concepten opgenomen voor verschillende andere processen, zoals oppervlakkige afvoer, verdamping vanuit plassen, infiltratie in de bodem, interceptie en beregening. Voor een uitgebreide beschrijving van de theorie en de numerieke oplossingsmethodiek verwijzen we naar Veldhuizen e.a. (2006) en Van Walsum e.a. (2007).

Een belangrijke eigenschap van de werkwijze is dat de resultaten van MetaSWAP op ieder moment kunnen worden neergeschaald naar een gedetailleerd profiel ten aanzien van het verloop van de drukhoogten en de vochtverdeling. Het neerschalen kan plaatsvinden doordat er een eenduidige relatie bestaat tussen de toestandsvariabelen van MetaSWAP en het vocht- en drukhoogteprofiel uit de stationaire SWAP-berekeningen. De toestandsvariabelen van MetaSWAP bestaan uit vochtgehalte in wortelzone en ondergrond, grondwaterstand en flux. De stationaire vocht- en drukhoogteprofielen van SWAP uit de voorbereiding zijn vastgelegd in een database.

Aanpak modelvergelijking

Drie criteria zijn bij de beoordeling van MetaSWAP van belang. Ten eerste dienen de resultaten van het metamodel overeen te komen met die van het moedermodel. Daarmee is te zien of het dynamisch doorrekenen in MetaSWAP op basis van stationaire evenwichtsprofielen de berekeningen van SWAP goed benadert. Natuurlijk is het aan te bevelen om simulaties ook te vergelijken met meetgegevens, maar in dit artikel beperken we ons tot een modelvergelijking. Ten tweede dienen de niet-stationaire berekeningen van MetaSWAP stabiel te zijn voor toepassing in regionale en nationale studies. Ten derde moet de rekentijd van MetaSWAP ten minste een orde grootte kleiner zijn dan die van SWAP, om voordeel te hebben van een dergelijk modelconcept.

Om een voldoende representatieve analyse uit te kunnen voeren, hebben we de 21 bodemeenheden uit de PAWN-studie doorgerekend (Wösten e.a., 1988). Deze bodems zijn getest met diktes voor de wortelzone van 30 en 100 cm en drainagedieptes van 75, 150 en

1000 cm. Voor de drainage- en infiltratieweerstand hebben we 100 dagen genomen bij de ondiepe drainagedieptes en 10.000 dagen bij een drainagediepte van 1000 cm. Als referentiegewas is voor gras gekozen en voor de neerslag en Makkink-referentieverdamping zijn de dagwaarden van meteostation Wageningen gebruikt. De simulatieperioden behelsden de perioden 1976 (zeer droog jaar), 1981-1990 en 1995 (nat voorjaar, droge zomer en gemiddelde jaarlijkse neerslag). Deze periodes zijn met een variabele (SWAP) en vaste tijdstap van 1 dag (MetaSWAP) doorgerekend. Voor de initiële toestand hebben we een grondwaterstand van 1,0 m beneden maaiveld genomen, met daarboven een hydrostatisch profiel zonder flux. MetaSWAP is ingebed in SIMGRO 6.0 (Van Walsum e.a., 2007), dat direct gekoppeld is met MODFLOW (Harbaugh e.a., 2000). Om de invloed van laterale stroming in MODFLOW te minimaliseren, is de verzadigde doorlatendheid in MODFLOW zeer laag gezet ($1,0 \times 10^{-7}$ m/d). In de beide modellen SIMGRO en SWAP is de onderrand dichtgezet, zodat het verzadigde systeem alleen af kan voeren via de drainagemiddelen.

De resultaten van MetaSWAP zijn vergeleken met die van SWAP ten aanzien van:

- de actuele cumulatieve verdamping;
- de grondwaterstand;
- de flux aan de onderkant van de wortelzone;
- het watergehalte in de wortelzone en ondiepe ondergrond.

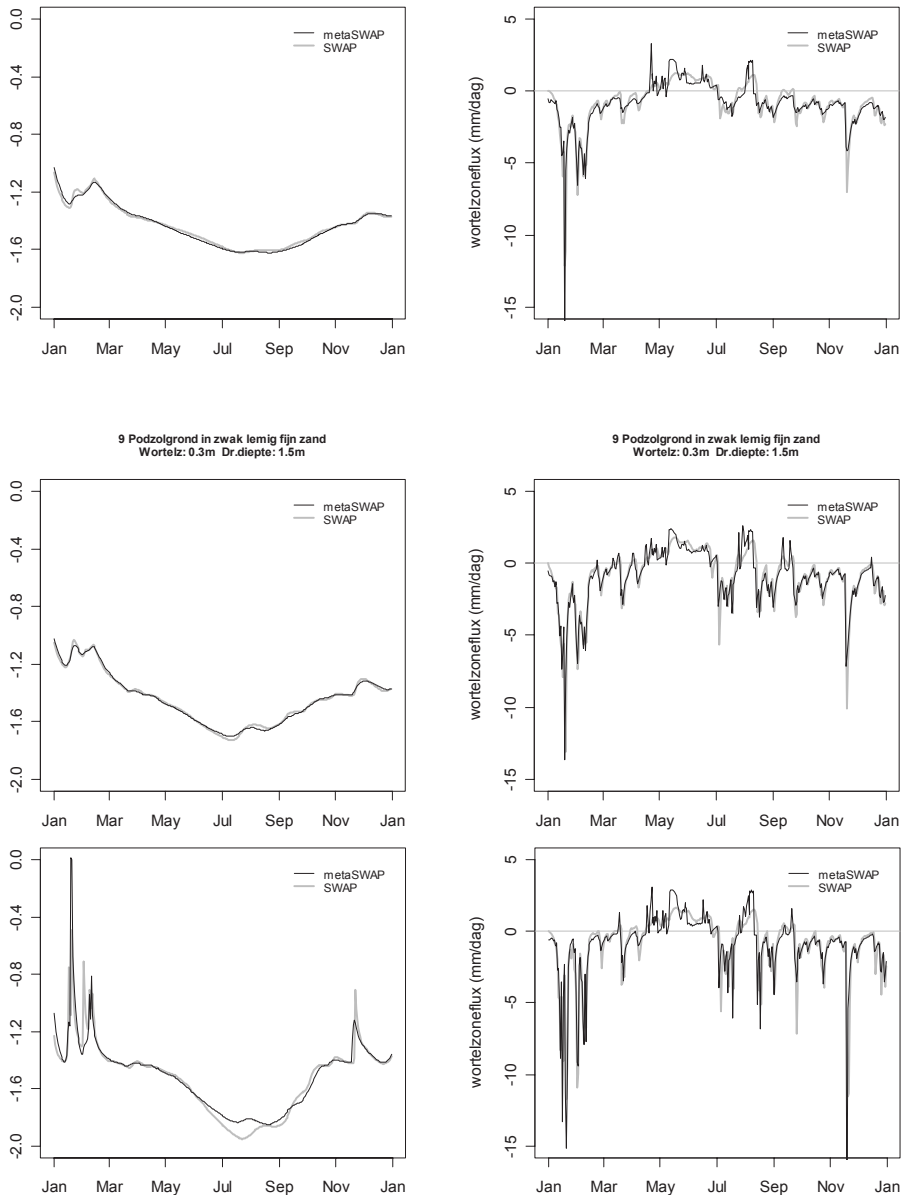
De uitkomsten hebben we visueel beoordeeld, aan de hand van de cumulatieve jaarwaardes en met een objectieve vergelijkingsparameter, de Nash-Sutcliffe model-efficiëntie (ME) (Nash en Sutcliffe, 1970):

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

waarbij O_i en P_i respectievelijk de waarneming (SWAP) en de verwachting (MetaSWAP) op tijdstap i zijn, en \bar{O} de gemiddelde waarneming (SWAP). De ME varieert van $-\infty$ tot 1 met de optimale waarde 1 voor een 'perfect model'. De waarde $ME = 0$ geeft aan dat het model (MetaSWAP) net zo goed vervangen kan worden door gemiddelde waarneming \bar{O} als modelverwachting P_i .

Resultaten

Figuur 2 laat de grondwaterstanden en wortelzonefluxen van SWAP en MetaSWAP van drie veel voorkomende bodemeenheden in Nederland zien: een veen-, podzol- en kleigrond. Het is duidelijk dat de MetaSWAP-berekeningen bij deze gronden nauwelijks afwijken van de resultaten van SWAP, met ME's van ruim boven de 0,90. Alleen de lichte kleigrond vertoont verschillen, waarbij de hoge grondwaterstandspieken in het winterseizoen verschillen en de grondwaterstanden in het zomerseizoen met maximaal 15 cm onderschat worden. Deze verschillen zijn te verklaren door de kleine bergingscapaciteit van klei, waardoor kleine veranderingen in berging een grote invloed hebben op de grondwaterstand. Ook de waterflux aan de onderkant van de wortelzone simuleert MetaSWAP over het algemeen nauwkeurig; met name de seizoenswaarden worden goed voorspeld. Voor korte tijdvakken kunnen er significante afwijkingen voorkomen, waarbij MetaSWAP hogere pieken in de capillaire opstijging berekent.



Figuur 2: Grondwaterstanden en daggemiddelde fluxen door de onderkant van de wortelzone van simulaties in MetaSWAP en SWAP van het jaar 1995. Drie karakteristieke bodems in Nederland zijn weergegeven: een veen-, podzol en een kleigrond. De model-efficiëntie ME van de grondwaterstanden is respectievelijk 0,93, 0,98 en 0,87.

Het resultaat van grondwaterstandsimulaties van de overige bodemtypes staat weergegeven in tabel 1. Deze tabel geeft een overzicht van de ME's van grondwaterstanden van alle 21 bodemtypes in het jaar 1995, met verschillende diktes van de wortelzone en drainageptes. Over het algemeen komen MetaSWAP-resultaten goed overeen met die van SWAP.

Gemiddeld genomen geldt voor 18 van de 21 bodemtypen een ME > 0,85. Deze 18 bodems vertegenwoordigen 90% van het Nederlandse bodemoppervlakte. Voor bodems met wortelzones van 30 cm is de overeenkomst met SWAP nog groter. Bodems die opmerkelijk afwijken zijn 'Veengrond en moerige grond op ongerijpte klei' en 'Kleigrond met een zware tussenlaag of ondergrond', die met name bij diepe drains en dikke wortelzones slecht overeenkomen met SWAP. Dit is wederom te verklaren door de geringe bergingscapaciteiten van deze bodemlagen, waardoor pieken moeilijk te simuleren zijn. Over het gehele assortiment aan bodemtypen benadert het MetaSWAP-model de grondwaterstanden van SWAP echter goed.

Tabel 1: Nash-Sutcliffe model-efficiëntie tabel van de grondwaterstandsberekening van SWAP en MetaSWAP van alle 21 bodemeenheden van Nederland. De drie omlijnde waarden betreffen de simulaties die weergegeven zijn in figuur 2.

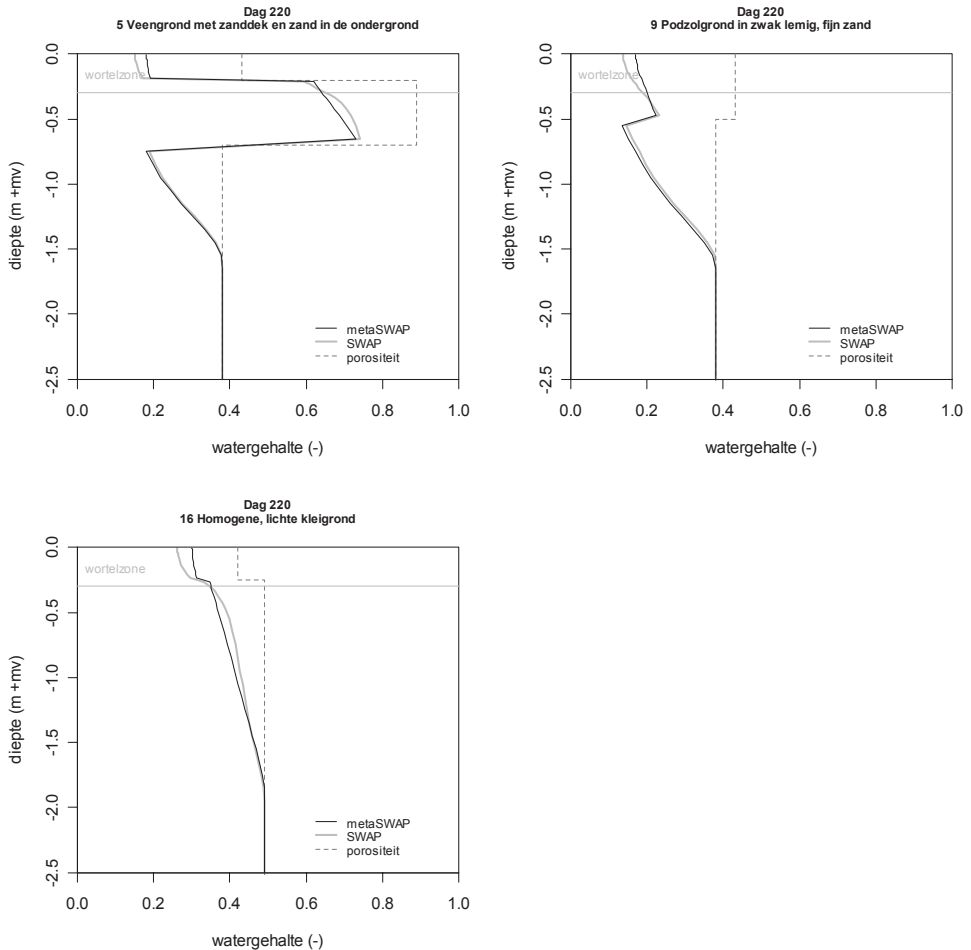
Bodemtype	Opv. (%)	Wortelzone 30 cm		Wortelzone 100 cm	Gemiddelde
		Drain -75 cm	Drain -150 cm	Drain -150 cm	
1 Veengrond met veraarde bovengrond	3,2	0,974	0,900	0,763	0,879
2 Veengrond met veraarde bovengrond en zand in de ondergrond	3,8	0,994	0,991	0,872	0,952
3 Veengrond met een kleidek	3,1	0,946	0,683	0,818	0,816
4 Veengrond met kleidek en zand in de ondergrond	0,7	0,960	0,987	0,907	0,951
5 Veengrond met zanddek en zand in de ondergrond	5,4	0,988	0,986	0,802	0,925
6 Veengrond en moerige grond op ongerijpte klei	1,0	0,903	0,512	0,299	0,571
7 Stuifzandgrond	4,9	0,996	0,990	0,784	0,923
8 Podzolgrond in leemarm fijn zand	1,3	0,995	0,993	0,906	0,965
9 Podzolgrond in zwak lemig fijn zand	17,6	0,995	0,995	0,948	0,979
10 Podzolgrond in zwak lemig fijn zand op grof zand	1,4	0,994	0,994	0,967	0,985
11 Podzolgrond in sterk lemig fijn zand op kelleem of leem	4,3	0,991	0,937	0,909	0,946
12 Enkeerdgrond in zwak lemig fijn zand	5,8	0,995	0,993	0,953	0,980
13 Enkeerdgrond in sterk lemig fijn zand	4,5	0,997	0,996	0,977	0,990
14 Podzolgrond in grof zand	3,5	0,968	0,985	0,835	0,929
15 Homogene zavelgrond	11,0	0,986	0,965	0,937	0,963
16 Homogene lichte kleigrond	11,1	0,972	0,853	0,786	0,870
17 Kleigrond met een zware tussenlaag of ondergrond	5,9	0,875	0,513	0,222	0,536
18 Kleigrond op veen	3,4	0,921	0,853	0,800	0,858
19 Klei op zandgrond	5,7	0,991	0,994	0,954	0,980
20 Klei op grof zand	0,6	0,989	0,994	0,867	0,950
21 Leemgrond	1,6	0,985	0,963	0,944	0,964
	100,0	0,972	0,909	0,821	0,901

Om de verdampingsreductie van beide modellen goed te vergelijken, is het zeer droge jaar 1976 met een totale referentie-gewasverdamping van 617 mm doorgerekend. Voor grasland is een gewasfactor van 1,0 verondersteld voor het hele jaar, zodat de potentiële gewasverdamping eveneens 617 mm is. De verschillen tussen de actuele en de potentiële gewasverdamping staan weergegeven in tabel 2. Bij diktes van de wortelzone van 30 cm is er weinig verschil tussen de absolute verdampingsreducties van SWAP en MetaSWAP, ook al berekent MetaSWAP een iets lagere verdamping (grotere verdampingsreductie). Met name bij dikke wortelzones van 100 cm berekent MetaSWAP een lagere verdamping. SWAP berekent bij sommige veenbodems zelfs potentiële verdamping, waarbij MetaSWAP deze verdamping nog reduceert.

Tabel 2: Verschil tussen potentiële en actuele gewasverdamping (in mm) van het zeer droge jaar 1976. De cumulatieve referentie gewasverdamping in dit jaar bedroeg 617 mm.

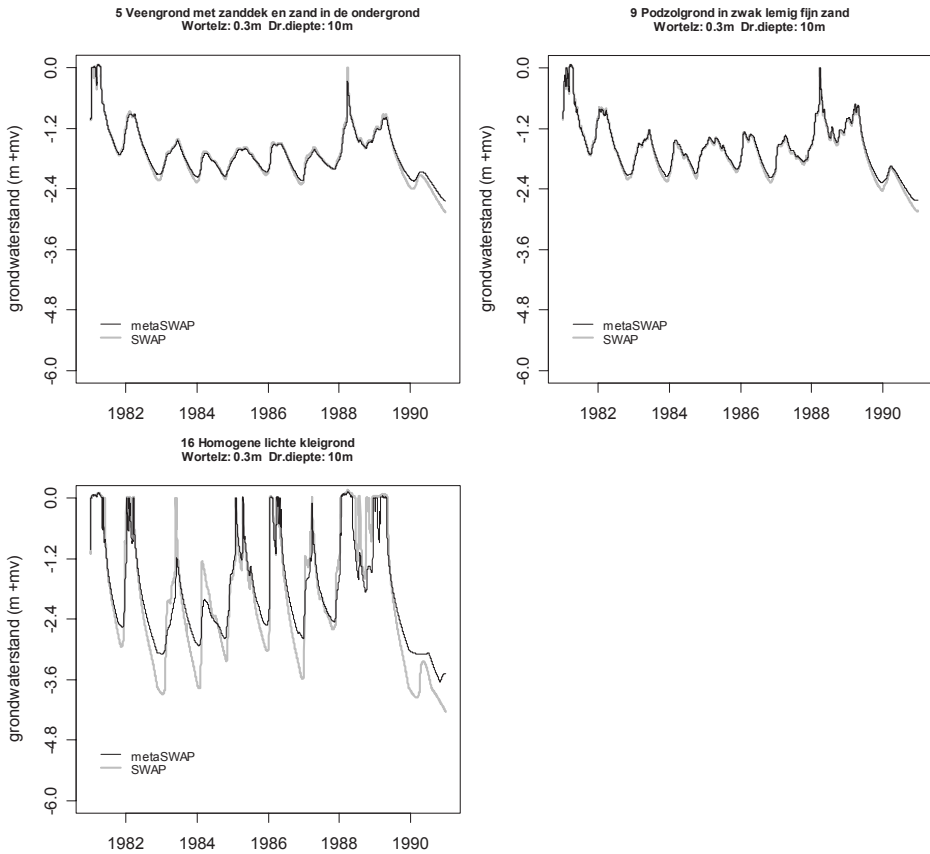
Bodemtype	Wortelzone Drainagediepte Model	30 cm 75 cm		30 cm 150 cm		100 cm 150 cm	
		SWAP	mSWAP	SWAP	mSWAP	SWAP	mSWAP
		1	Veengrond met veraarde bovengrond	87	112	128	127
2	Veengrond met veraarde bovengrond en zand in de ondergrond	25	42	68	87	0	9
3	Veengrond met een kleidek	124	147	157	150	3	47
4	Veengrond met kleidek en zand in de ondergrond	117	145	152	169	2	54
5	Veengrond met zanddek en zand in de ondergrond	59	73	107	118	0	23
6	Veengrond en moerige grond op ongerijpte klei	150	164	168	163	65	95
7	Stuifzandgrond	107	118	219	228	64	135
8	Podzolgrond in leemarm fijn zand	75	84	188	193	58	111
9	Podzolgrond in zwak lemig fijn zand	41	48	122	133	17	63
10	Podzolgrond in zwak lemig fijn zand op grof zand	29	36	125	136	73	91
11	Podzolgrond in sterk lemig fijn zand op keileem of leem	40	41	116	130	60	97
12	Enkeerdgrond in zwak lemig fijn zand	50	57	115	125	3	41
13	Enkeerdgrond in sterk lemig fijn zand	25	31	107	115	21	56
14	Podzolgrond in grof zand	205	215	281	272	195	232
15	Homogene zavelgrond	61	61	89	88	6	19
16	Homogene lichte kleigrond	101	106	129	125	19	50
17	Kleigrond met een zware tussenlaag of ondergrond	211	219	226	210	123	164
18	Kleigrond op veen	192	202	216	207	16	106
19	Klei op zandgrond	44	47	94	100	8	33
20	Klei op grof zand	63	70	163	163	110	140
21	Leemgrond	116	127	138	148	37	70
gemiddelde verdampingsreductie		91	102	148	152	42	79

Om meer inzicht te geven in de verdeling van het water in de bodem, zijn drie profielen met watergehalte weergegeven in figuur 3. Deze geven de watergehalteverdeling weer op 8 augustus 1995, een dag volgend op een 10-daagse tijdsperiode zonder neerslag en met veel verdamping (potentiële verdamping in die periode van 32 mm). In alle gevallen is sprake van een capillair opstijgingsprofiel met een onverzadigde zone tot ongeveer 150 cm diepte (drainagediepte). Ook hier is te zien dat MetaSWAP de berekeningen van SWAP goed benadert. Ten op zichten van SWAP overschat MetaSWAP in alle gevallen het watergehalte in de wortelzone licht, terwijl daaronder het watergehalte vrijwel gelijk is aan SWAP of licht wordt onderschat.



Figuur 3: Neergeschaalde watergehalteverdeling (in $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) in drie karakteristieke bodemprofielen met een dikte van de wortelzone van 30 cm en drainagediepte van 150 cm. Dit is een verdeling op 8 augustus 1995 (dag 220), na een 10-daagse periode zonder neerslag met veel verdamping (capillair opstijgingsprofiel).

Figuur 4 geeft de simulatieperiode 1981–1990 weer, waarbij de drainagediepte 10 meter en drainageweerstand 10.000 dagen bedraagt. Beide modellen berekenen in natte jaren water op het maaiveld. De simulaties laten zien dat MetaSWAP ook bij het berekenen van meerdere opeenvolgende jaren stabiel is. Bij de veen- en podzolgrond is te zien dat SWAP iets lagere grondwaterstanden simuleert in de zomerperiode, met name als de grondwaterstand verder uitzakt zoals in 1990. Bij de kleigrond is de overeenkomst minder nauwkeurig; over het algemeen mist MetaSWAP de grote uitschieters van SWAP. Vooral met de diepe grondwaterstanden in de zomerperiode heeft MetaSWAP moeite.



Figuur 4: Grondwaterstanden van SWAP en MetaSWAP over een langere rekenperiode: 1981–1990.

De rekentijd van MetaSWAP is lastig te vergelijken met die van SWAP, omdat MetaSWAP een regionaal model met grondwatermodel vereist. MetaSWAP is gekoppeld aan MODFLOW, welke geïntegreerd is in het integrale modelsysteem SIMGRO (Veldhuizen e.a., 2006). Als SIMGRO draait met MetaSWAP-MODFLOW, dan is de rekentijd 0,3 seconde per jaar en per profiel (op een Pentium-4 met kloksnelheid 2,3 GHz en intern geheugen van 512 MB). Voor SWAP stand-alone bedraagt de rekentijd 6.6 seconde per jaar en per profiel, dus minimaal 22 keer zo langzaam als MetaSWAP mét grondwatermodule. Een off-line koppeling tussen SWAP en MODFLOW waarbij beide modellen herhaaldelijk worden gedraaid binnen een iteratiecyclus (Stoppelenburg e.a., 2005), zou ongeveer een factor 100 keer trager zijn.

Discussie

Daar waar MetaSWAP verschilt van SWAP worden de beperkingen van het concept zichtbaar. Bij droge bodems, zoals in figuur 3, blijkt dat het watergehalte in de wortelzone overschat wordt, terwijl die in de ondergrond enigszins onderschat wordt. In dit voorbeeld berekent MetaSWAP kennelijk meer capillaire flux dan SWAP. Dergelijke verschillen gedurende korte tijdvakken zijn inherent aan het gebruikte modelconcept. Uit de seizoenswaarde voor

1976 blijkt dat dit echter geen systematische effect is. Ook bij diepere grondwaterstanden en grotere grondwaterstandsfluctuaties vertoont MetaSWAP een beperking: het model dempt de percolatie-pulsen vanwege het gebruik van slechts één metarelatie voor de gehele ondergrond. Dit is waarschijnlijk te verbeteren door in MetaSWAP een extra simulatielaag toe te voegen tussen de wortelzone en de (diepe) ondergrond.

De verschillen tussen de resultaten van SWAP en MetaSWAP liggen zoals gezegd besloten in beide modelconcepten. Daar waar SWAP dynamische berekeningen per gedetailleerde laag berekent, rekent MetaSWAP met stationaire metarelaties voor slechts twee lagen. Hierdoor zal MetaSWAP een grotere vereffening van vochtgehalten berekenen en geen golfachtige verwerking van neerslaggebeurtenissen laten zien. Gelukkig kunnen de MetaSWAP-resultaten wel neergeschaald worden naar profielen met een variabel vochtgehalte (zoals te zien is in figuur 3) en drukhoogten. Deze verschillen in vochtverdeling kunnen een rol spelen bij het gebruik in waterkwaliteitsstudies. MetaSWAP kan bijvoorbeeld gebruikt worden om als basis voor waterkwaliteitsberekeningen te dienen, zoals voor het nutriëntenmodel ANIMO (Groenendijk e.a., 2005) of het pesticidenmodel PEARL (Leistra e.a., 2000). Nader onderzoek hierop moet nog volgen.

Dat MetaSWAP met stationaire metarelaties werkt, legt mogelijk ook beperkingen aan de tijdstapgrootte. Uit de getoonde resultaten blijkt dat dagwaarden goede resultaten opleveren, maar het effect van kleinere en grotere tijdstappen zal verder onderzocht moeten worden.

Het is belangrijk om de plaats van MetaSWAP in het 'hydrologische model-landschap' van Nederland te kennen. Zoals eerder al opgemerkt, is MetaSWAP niet ontwikkeld om SWAP te vervangen. Zo zijn verschillende concepten uit SWAP niet opgenomen in MetaSWAP. We noemen concepten voor gewasontwikkeling, preferente stroming, temperatuur en ijsvorming. Daarnaast vertoont MetaSWAP de eerdergenoemde beperkingen ten aanzien van diepe grondwaterstanden met percolatiepulsen en grondwaterstandsfluctuaties bij kleine bergingscapaciteiten. Bij de toepassing van MetaSWAP dienen deze beperkingen in acht genomen te worden.

Conclusie

Uit de resultaten blijkt dat over de gehele linie de uitkomsten van MetaSWAP weinig verschillen van die van het moedermodel SWAP voor situaties met ondiepe grondwaterstanden. Alleen bij bodems met kleine bergingscapaciteiten is er significant verschil tussen beide modellen, veroorzaakt doordat kleine veranderingen in waterberging een grote invloed hebben op de grondwaterstand. Over het algemeen laat MetaSWAP echter zien dat het mogelijk is om met metarelaties van de wortelzone en de ondergrond, nauwkeurige simulaties van stroming in de onverzadigde zone uit te voeren. Door de kortere rekentijden kan MetaSWAP goed gebruikt worden in regionale en nationale modelstudies, met name in studies die een integrale benadering van onverzadigde en verzadigde zone vereisen. Een hoge resolutie van de ruimtelijke eenheden is daarbij mogelijk. Op deze vlakken kan MetaSWAP zich zeker meten met SWAP.

Referenties

- Feddes, R.A., P.J. Kowalik en H. Zaradny (1978)** Simulation of field water use and crop yield; in: Simulation Monographs; Pudoc, Wageningen.
- Groenendijk, P., L.V. Renaud en J. Roelsma (2005)** Prediction of Nitrogen and Phosphorus leaching to groundwater and surface waters; Process descriptions of the Animo4.0 model, Alterra-rapport 983, Wageningen.
- Harbaugh, A.W., E.R. Banta, M.C. Hill en M.G. McDonald (2000)** MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process; U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 pag.
- Kroes, J.G. en J.C. van Dam (2003)** SWAP version 3.0.3 Reference manual; Report 773, Alterra, Wageningen.
- Kroon, T., B. Minnema, A. Tiktak, A.A. Veldhuizen en A.J.J. Vergroesen (2006)** Een nieuw landelijk hydrologisch instrumentarium; in: *Stromingen*, jrg 12, nr 2, pag 49–50.
- Leistra, M., A.M.A. van der Linden, J.J.T.I. Boesten, A. Tiktak en F. van den Berg (2000)** PEARL model for pesticide behaviour and emissions in soil-plant systems. Bilthoven, MNP-rapport 711401009.
- Nash, J.E. en J.V. Sutcliffe (1970)** River flow forecasting through conceptual models-PT 1; in: *Journal of Hydrology* 10 (3), pag 282–290.
- Stoppelenburg, F.J., K. Kovar, M.J.H. Pastoors en A. Tiktak (2005)** Modeling the interactions between transient saturated and unsaturated groundwater flow: Off-line coupling of LGM and SWAP; RIVM -rapport 500026001, Bilthoven.
- Veldhuizen, A.A., P.E.V. van Walsum, A. Lourens en P.E. Dik (2006)** Flexible integrated modeling of groundwater, soil water and surface water; Proceedings of MODFLOW 2006, IGWMC, Colorado.
- Walsum, P.E.V. van, A. Lourens, A.A. Veldhuizen, J.J.J.C. Snepvangers, P.E. Dik, B. Minnema en P. Groenendijk (2006)** Flexibel geïntegreerd systeem voor regionale hydrologische modellering; in: *Stromingen*, jrg 12, nr 2, pag 19–28.
- Walsum, P.E.V. van, A.A. Veldhuizen, P.J.T. van Bakel, F.J.E. van der Bolt, P.E. Dik, P. Groenendijk, E.P. Querner en M.F.R. Smit (2007, in druk)** SIMGRO 6.0.3, Theory and model implementation; Alterra, Wageningen.
- Wösten, J.H.M, F.de Vries, J. Denneboom en A.F. van Holst (1988)** Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, 1:250 000, ten behoeve van de PAWN-studie; Rapport 2055, Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.