
Flexibel geïntegreerd systeem voor regionale hydrologische modellering

Combinatie van MODFLOW en SIMGRO

P.E.V. van Walsum, A. Lourens, A.A. Veldhuizen,
J.J.J.C. Snepvangers, P.E. Dik, B. Minnema, P. Groenendijk

TNO en Alterra hebben een modellenstelsel gerealiseerd waarin het gecombineerde gebruik van MODFLOW- en SIMGRO-functionaliteiten mogelijk is. Het stelsel is modulair van opzet en daardoor gemakkelijk te onderhouden. Het gebruik van modelopties van MODFLOW en SIMGRO kan per rekeneenheid gevarieerd worden. Dat maakt het bijvoorbeeld mogelijk om in het aandachtsgebied van een studie meer gedetailleerde concepten toe te passen dan in de randzone. Het maakt het ook mogelijk om stap voor stap complexere concepten toe te voegen, passend bij dan benodigde functionaliteiten en/of beschikbare gegevens. Dit kan drempelverlagend werken bij de bouw en toepassing van een integraal model-instrumentarium.

Inleiding

De modelcode MODFLOW (Harbaugh e.a., 2000) heeft zijn oorsprong in de grondwaterwereld. Binnen de internationale MODFLOW-gemeenschap is een heel scala aan aansluitende rekenmodules ontwikkeld voor het schematiseren van het topsysteem, bijvoorbeeld in de vorm van vaste maar tijdsafhankelijke bovenrandvoorwaarden (grondwaterstanden en oppervlaktewaterpeilen) en grondwaterstandsafhankelijke grondwataanvullingsmodules, in concreto de Recharge Package ("RCH") en de Evapotranspiration Package ("EVT").

De Nederlandse waterschappen hebben zeer veel data over het oppervlaktewatersysteem beschikbaar (waterlopen, kunstwerken en peilgebieden, d.w.z. over het door de waterschappen beheerde deel daarvan). Samen met de recent sterk verbeterde schatting van de diepteligging van de niet-leggerwaterlopen (via AHN-filtering in combinatie met TOP10-waterlopen) kan met MODFLOW de grondwaterdynamiek steeds nauwkeuriger gesimuleerd worden. Om nog verder te komen kan het nodig zijn de conceptualisering van het topsysteem aan te passen. Binnen Nederland is veel expertise opgebouwd in het conceptualiseren van typisch Nederlandse hydrologische situaties met ondiepe grondwater-

P.E.V. van Walsum, A.A. Veldhuizen, P.E. Dik en **P. Groenendijk** zijn werkzaam bij Wageningen Universiteit en Research Centrum, Alterra, Postbus 47, 6700 AA Wageningen, paul.vanwalsum@wur.nl.

A. Lourens, J.J.J.C. Snepvangers en **B. Minnema** zijn werkzaam bij TNO Bouw en Ondergrond, Postbus 80015, 3508 TA Utrecht, aris.lourens@tno.nl.

standen (met gevolgen voor de bergingscoëfficiënten van het grondwater, de stroming in de onverzadigde zone en de evapotranspiratie) en subtiële netwerken van waterlopen en stuwtjes. Onder andere SIMGRO (Van Walsum e.a., 2004) en SWAP (Kroes en Van Dam (eds.), 2003) zijn uit deze behoefte aan een meer integrale systeembeschrijving voortgekomen.

Een integraal modelinstrumentarium model hoeft niet per definitie 'ingewikkeld' en gebruiksonvriendelijk te zijn. Als de opzet helder is kan ook het omgekeerde gelden: hoe meer het model op de werkelijkheid gaat lijken, hoe makkelijker het is in het gebruik, omdat er minder vaak vereenvoudigingen hoeven te worden toegepast bij o.a. het afleiden van randvoorwaarden en het definiëren van interactieregels (bijvoorbeeld de relatie tussen het grond- en oppervlaktewatersysteem).

Wel zullen er tegelijkertijd steeds hogere eisen worden gesteld aan de beschikbaarheid van invoerparameters die voldoen aan de gewenste ruimtelijke topologie samenhangend met de gebruikte schematisaties (zie onder). Maar dat bezwaar valt steeds meer weg door de opkomst van geavanceerde GIS-applicaties. Het is overigens een klassieke misvatting dat het gebruik van meer gedetailleerde modelconcepten zou leiden tot een steeds gevoeliger model dat in steeds minder situaties is toe te passen. Het is namelijk zo dat de aanwezige terugkoppelingen in het integrale model corrigerend werken ten aanzien van gebreken in de data. Bijvoorbeeld een te hoge waarde van de (door een externe bron aangeleverde) potentiële verdamping wordt gedeeltelijk weer gecorrigeerd door de in het model berekende verdampingsreductie. Ook bij de berekening van maatregelleffecten hebben de terugkoppelingen een corrigerende werking. Zonder die 'rem' kan al gauw een overschatting van effecten worden berekend. Los van dit alles zal zonder de deskundigheid en het gezonde verstand van de modelleur natuurlijk nooit een bruikbaar modelresultaat worden geproduceerd.

Om tot een meer flexibele conceptualisering van het topsysteem te komen (betreffende waterafvoer en -inlaat, ontwatering, verdamping en grondwateraanvulling, grondwaterbergingscoëfficiënten) hebben Alterra en TNO een koppeling tot stand gebracht tussen MODFLOW en SIMGRO. Er is eerst gekeken naar de recente ontwikkelingen op het gebied van modelkoppelingen. "Houd het simpel" is daarbij ons devies, en laat de koppelingssoftware voor jou werken en niet andersom. Zodoende zijn we uitgekomen op het gebruiken van principes die ten grondslag liggen aan de zogenaamde Open Modelling Interface – kortweg 'OpenMI' (HarmonIT, 2005). Maar de modelleurs van Alterra en TNO zien nog niet direct de toegevoegde waarde van het 'inpakken' van de modellen in wrappers door IT-specialisten als de volgende stap in het OpenMI-compliant maken. Het blijkt ook eenvoudiger te kunnen: de hier beschreven koppeling is tot stand gebracht door SIMGRO als een subroutine aan MODFLOW te hangen.

Natuurlijk is er wat betreft modelkoppelingen al het nodige werk verricht binnen Nederland. Bijvoorbeeld Pastoors en Kovar (2005) hebben een koppeling tussen LGM (Stoppelenburg e.a. 2005) en SWAP (Kroes en Van Dam (eds.), 2003) gerealiseerd. Additioeneel ten opzichte van deze koppelingsoptie denken wij dat er ruimte is voor een extra niveau van conceptualisering dat ligt tussen de MODFLOW RCH en EVT- packages aan de ene kant en het gebruik van een gedetailleerde modelcode als SWAP aan de andere kant. Tevens kan er vraag zijn naar een conceptualisering van het topsysteem waarin de rol van het oppervlaktewater in een integrale context volledig tot zijn recht komt. Het bij een bepaalde modeltoepassing gewenste niveau van topsysteemconceptualisering zou overigens het resultaat moeten zijn van een afweging die door een opdrachtgever wordt gemaakt.

Daartoe zou idealiter informatie moeten worden verstrekt over de te bereiken modelnauwkeurigheid (met name wat betreft de voorspelling van maatregelleffecten) versus de te maken modelleringskosten.

In het onderstaande wordt eerst ingegaan op de beschrijving en schematisatie van een regionaal hydrologisch systeem. Dan volgt een kort overzicht van de procesmodellering. Vervolgens wordt de koppeling van MODFLOW-SIMGRO nader uitgewerkt en worden de eerste voorlopige resultaten getoond. Tenslotte wordt een vooruitblik gegeven.

Systeemindeling

We gebruiken de term 'SVAT' (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer) voor het samengestelde topsysteem, exclusief het oppervlaktewater. De grens tussen het SVAT-subsysteem en het grondwater hebben we bij het freatische niveau gelegd. Daarboven kan zich ook eventueel een schijngrondwaterspiegel bevinden; vooralsnog wordt de verzadigde subzone die daarmee samenhangt beschreven binnen het SVAT-subsysteem. Het laten samenvallen van de grens SVAT/grondwater met het freatische niveau houdt natuurlijk in dat de grens op en neer beweegt.

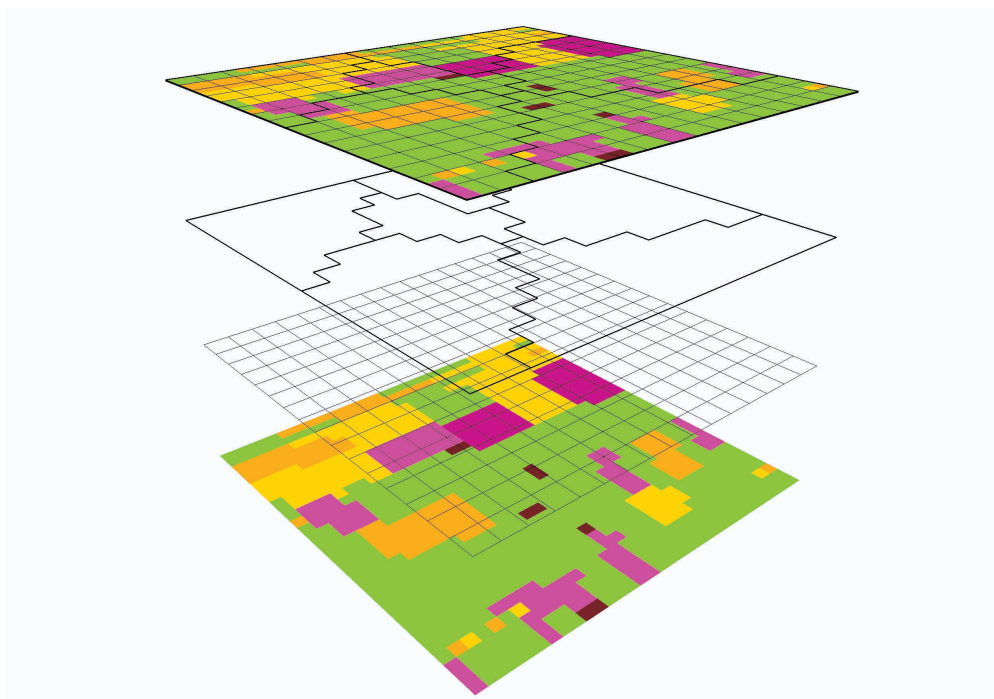
Ten aanzien van het water op het maaiveld kan men zich afvragen bij welk subsysteem het eigenlijk hoort: bij het SVAT-subsysteem, het grondwatersubsysteem, of het oppervlaktewatersubsysteem? Wij maken daar geen keuze in, en houden bij de modellering rekening met de driedovoudige indentiteit van dit water (Veldhuizen e.a., 2006).

Schematisatie

Ieder systeem heeft zijn eigen ruimtelijke schematisatie. In figuur 1 is een eenvoudig voorbeeld gegeven van hoe de schematisaties op elkaar aansluiten. De MODFLOW-schematisatie bestaat uit een grid dat bij voorkeur in het interessegebied een maximale resolutie heeft (b.v. 25 bij 25 meter). De grenzen van afwateringseenheden worden geschematiseerd zodat ze de gridlijnen van het MODFLOW-model volgen. Voor de ruimtelijke eenheden van het SVAT-domein wordt via een GIS-overlay gezocht naar eenheden met unieke combinaties van bodemtype, landgebruik en de relatieve hoogteligging van het maaiveld. Bij dat laatste kan men bijvoorbeeld denken aan klassen van 0,2 m. De grenzen van de ruimtelijke eenheden volgen die van de MODFLOW-cellen of vormen daar een verfijning van.

Het oppervlaktewater wordt gemodelleerd met trajecten. Afhankelijk van de manier waarop het model is geïmplementeerd kan dat zelfs de kleinste waterlopen betreffen. De schematisatie kan ook voortgezet worden tot op het maaiveld. In dat geval wordt de maaiveldafwateringsstructuur afgeleid uit het DTM (digitale hoogtekaart) binnen de randvoorwaarden van de oppervlaktewaterafwateringseenheden.

Om de systeemdynamiek op adequate wijze te kunnen beschrijven wordt voor de snelle processen een veel kortere tijdstap gebruikt dan voor het grondwater en bodemvocht. Gebruikelijk is een tijdstap van 1 uur voor de snelle processen in het topsysteem en 1 dag voor het grondwater. Tot de snelle processen worden gerekend: neerslag, interceptie, verdamping, doorval, infiltratie, oppervlakteafvoer en eventueel drainage.



Figuur 1: Voorbeeld van hoe een ruimtelijke schematisatie tot stand kan komen. De onderste laag betreft de SVAT-rekeneenheden van het topsysteem, dan volgt het MODFLOW-grid, en daarboven de afwateringseenheden. In de bovenste laag zijn de deelschematisaties gecombineerd.

Modellering van processen

In het navolgende wordt een kort overzicht gegeven van de procesmodellering. De hele opzet van het gecombineerde MODFLOW-SIMGRO modelinstrumentarium is zeer flexibel. De beschreven procesmodelleringen zijn derhalve slechts voorbeelden van opties waar een gebruiker uit kan kiezen. Er is een voortgaand proces van uitbouw van opties en modules gaande.

De modellering van de stroming in het grondwater wordt in MODFLOW gedaan met het zogenaamde block-centered schema. De oplossing van het stelsel vergelijkingen wordt gedaan met de PCG-solver (Harbaugh e.a. 2000).

Voor bijvoorbeeld de drainage heeft de modelleur de keuze om elke niet-leggerwaterloop (uit AHN-filtering en TOP10) apart in de drainpackage van MODFLOW onder te brengen, of op te laten gaan in de SIMGRO-ontwateringsfuncties. Indien van de MODFLOW-package gebruik wordt gemaakt dan wordt bij de procesmodellering de nadruk gelegd op de terugkoppeling vanuit het grondwater: de drainageflux wordt dan namelijk per MODFLOW-cel berekend binnen het impliciete schema van het grondwatermodel. Indien van de SIMGRO-ontwateringsfuncties gebruik wordt gemaakt, dan wordt bij de modellering de nadruk gelegd op de terugkoppeling vanuit het oppervlaktewater. De daarbij berekende drainagefluxen zijn per SVAT-eenheid.

Het water op het maaiveld neemt deel aan processen in alle drie de onderscheiden sub-

systemen:

- als 'plassenwater' in het SVAT-subsysteem van waaruit verdamping en infiltratie plaatsvindt;
- als oppervlaktewater dat ook eventueel kan 'meestromen' met de afvoer die via reguliere waterlopen plaatsvindt;
- als grondwater dat boven het maaiveld uitsteekt, indien sprake is van een volledig verzadigde grondkolom.

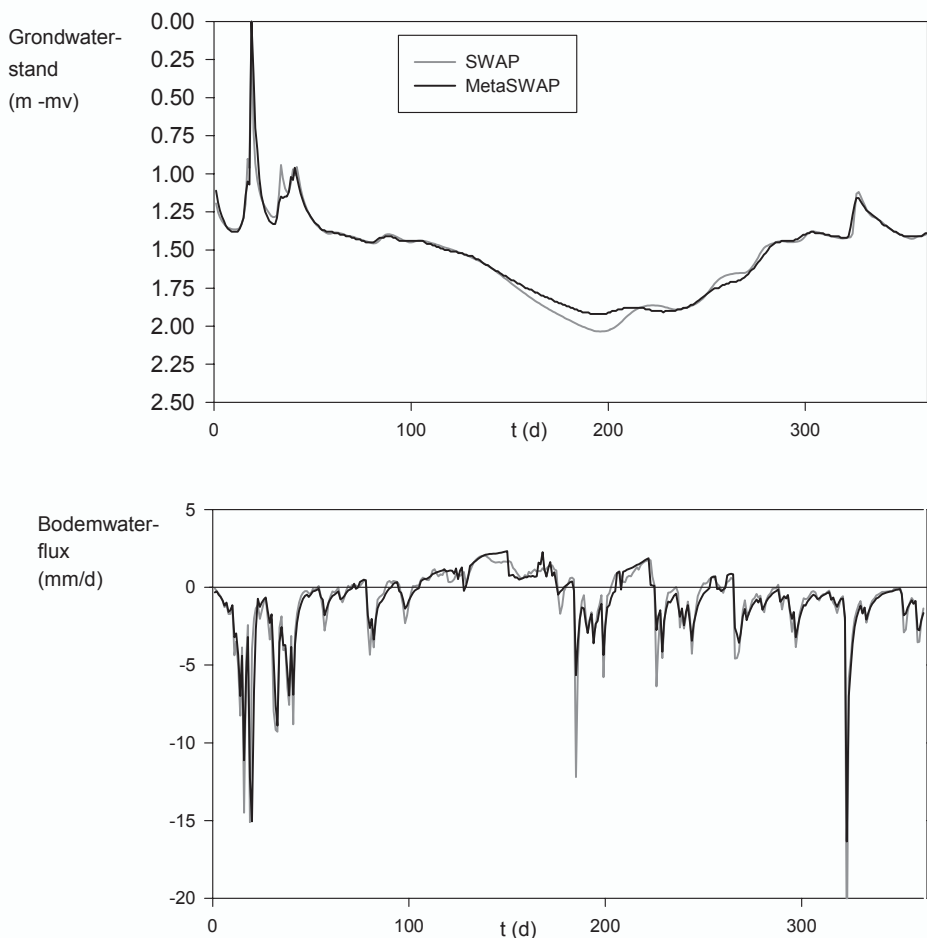
Modeltechnisch is dit op een simpele 'expliciete' wijze geïmplementeerd. Het water op het maaiveld wordt daarbij achtereenvolgens 'uitgeleend' aan de modules voor de betreffende deelsystemen. Na 'gebruik' worden de wederzijdse waterbalanseffecten in kaart gebracht en verwerkt in de toestandsvariabelen. Bijvoorbeeld de verdamping vanuit het plassenwater en de afvoer naar het oppervlaktewatersysteem worden aan het grondwatermodel doorgegeven via (reductie) van de aanvullingsterm.

Voor de berekening van verdamping wordt vooralsnog gebruik gemaakt van een (aangepaste) Makkink-methode. De aanpassing bestaat voornamelijk uit het maken van een combinatie met een eenvoudige methode voor de berekening van de interceptieverdamping (Rutter, 1968). Een dergelijke methode vereist dan wel de beschikbaarheid van uurwaarden voor de neerslag, eventueel met tussenkomst van een neerschalingmethode.

Voor de transpiratiereductie als gevolg van droogte wordt het drukhoogteconcept van Feddes e.a. (1978) toegepast, maar niet voor de reductie als gevolg van te natte omstandigheden. Het koppelen van de natschade aan de drukhoogte van de aparte modelcompartimenten houdt namelijk geen rekening met de mogelijkheid van de plant om de onttrekking binnen de wortelzone al naar gelang de omstandigheden te variëren. Daarom prefereren wij bij zeer ondiepe grondwaterstanden een eenvoudige grondwaterstandsafhankelijke reductie.

De modellering van gewasopname en stroming van bodemvocht wordt gedaan met een pseudo-stationair concept voor de onverzadigde zone, ook wel 'MetaSWAP' genoemd (Van Walsum en Groenendijk, 2006). Het gaat om een model dat gebruik maakt van rekenresultaten die afkomstig zijn van SWAP, en verdient daarom de betiteling 'metamodel'. Door gebruik te maken van (eenvoudige) hydrologische heuristieken is het gelukt om het algoritme 'expliciet' te houden bij een tijdstap van 1 dag. De heuristieken houden het volgende in: stel dat de grondwaterstand tijdens de huidige tijdstap tot in het maaiveld stijgt, dan zal de drukhoogte van de wortelzone toenemen tot een overdruk horend bij een evenwichtsprofiel. Omgekeerd zal vanuit een situatie met een ondiepe grondwaterstand de drukhoogte juist verlaagd worden indien er een daling van het freatische niveau gaat plaatsvinden. Door op deze manier te anticiperen op de invloed van de grondwaterstand (gedurende een dag) hoeft er wat betreft de onverzadigde zone zelf dus niet heen en weer geïtereerd te worden met het grondwatermodel, zoals nodig was voor het MUST-model van De Laat (1980). Wel wordt het grondwaterrekenschema verzwaard doordat een grondwaterstandsafhankelijke bergingcoëfficiënt 'rond' gerekend moet worden.

In figuur 2 wordt een rekenvoorbeeld gegeven van een lemige grond die geverifieerd is met het SWAP-model. Afwijkingen doen zich voornamelijk voor tijdens periodes met overgangen van capillaire opstijging naar percolatie. Onze eerste ervaringen met het metamodel geven aan dat de waterbalans goed wordt nagebootst. De komende maanden zal meer ervaring worden opgebouwd aan de hand van vergelijkingen met MODFLOW-SWAP.



Figuur 2: Voorbeeld van een verificatie van MetaSWAP met SWAP (Van Walsum en Groenendijk, 2006). Het betreft een lemige grond begroeid met gras, met een wortelzonedikte van 30 cm. De bodemwaterflux is voor het grensvlak tussen wortelzone en ondergrond (+ = capillaire opstijging).

De rekenuitkomsten van MetaSWAP kunnen tevens worden gedisaggregeerd tot fluxen, watergehaltes en drukhoogtes van de oorspronkelijke SWAP-schematisatie in compartimenten. Daarmee wordt het mogelijk om hydrologische informatie aan te leveren voor regionale uitspoelingsmodellen als ANIMO voor stikstof en fosfor (Groenendijk e.a., 2005) en PEARL voor bestrijdingsmiddelen (Tiktak e.a., 2000). Ook is het mogelijk om de drukhoogtes te gebruiken bij draagkrachtberekeningen en dergelijke.

Ook voor de schematisatie en parametrisatie van het oppervlaktewatersysteem in SIM-GRO kan gebruik worden gemaakt van een metamodel, in dit geval afgeleid uit rekenexperimenten met bijvoorbeeld SOBEK (WL|Delft Hydraulics, 2001). Een korte beschrijving van de afleidings-systeematiek wordt gegeven in Heijkers en Wendt (2005). De procesbeschrijving in het metamodel is gebaseerd op Q - h -relaties in combinatie met de bergingskenmerken. Door de 'bakjes' aan elkaar te koppelen en te voorzien van algoritmen voor 'terugstuwing', 'stroming in omgekeerde richting', 'waterinlaat', 'bifurcaties' en 'peilbeheer'

is een model verkregen dat in veel situaties goed voldoet. Het is vooral bedoeld voor de stroming in de bovenlopen waar de hydraulica eenvoudig is en waar droogval veel voorkomt (maaiveld, sloten). Droogval belast het metamodel namelijk helemaal niet, in tegenstelling tot hydraulische modellen, die daar juist heel hard voor moeten 'rekenen'.

Koppeling MODFLOW en SIMGRO

Het verband tussen de ruimtelijke schematisaties van de SVAT-eenheden en de MODFLOW-cellen wordt vastgelegd met een zogenaamde mapping table. Aangezien er meerdere SVAT-eenheden worden gekoppeld aan één MODFLOW-cel spreken we van een N:1 koppeling. Uiteraard biedt de N:1 koppeling ook de mogelijkheid om 1:1 te modelleren.

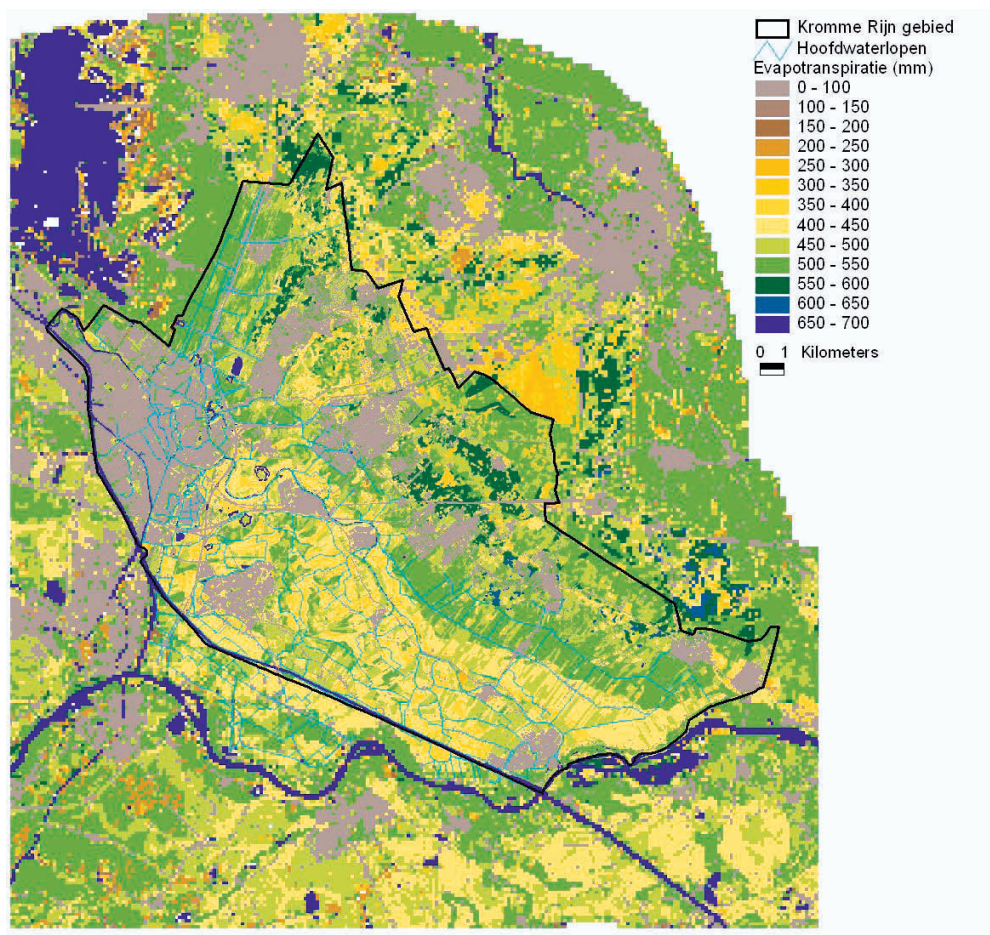
De werkvolgorde van het gekoppelde MODFLOW-SIMGRO-modellensysteem gaat per tijdstap als volgt:

- 1 MODFLOW stuurt informatie over de grondwaterstijghoogten naar SIMGRO;
- 2 SIMGRO kent de stijghoogten toe aan de individuele SVAT-eenheden (met behulp van de koppelingstabel);
- 3 SIMGRO doet de simulatie van snelle processen in het topsysteem met tijdstappen van 1 uur; daarbij worden o.a. de SIMGRO-ontwateringsflux, grondwateronttrekking voor beregening, infiltratie/verdamping aan het maaiveld, en de gewasonttrekking bepaald;
- 4 SIMGRO berekent nieuwe drukhoogten (wortelzone, bovenkant ondergrond) van het bodemvocht en tevens de netto grondwateraanvulling; aan de hand van de nieuwe drukhoogten (en eerder genoemde heuristieken) wordt dan een bergingstabel geprepareerd die het verband geeft tussen grondwaterstijghoogten en de totale hoeveelheid water in het bodemprofiel;
- 5 MODFLOW lost het stelsel grondwatervergelijkingen op met behulp van de iteratieve PCG solver; daarbij worden twee geneste loops gebruikt:
 - a per zogenaamde outer loop iteratie van het PCG-algoritme haalt MODFLOW een nieuwe bergingscoëfficiënt op bij SIMGRO, en past intern ook bepaalde coëfficiënten aan;
 - b met die nieuwe informatie berekent MODFLOW in de inner loop een nieuwe oplossing voor de grondwaterstijghoogten;
 - c een vergelijking wordt gemaakt met de oplossing van de vorige inner loop cyclus; indien er geen convergentie bereikt is wordt een nieuwe outer loop iteratie in gang gezet, enz.

Bij de uitwisselingen van informatie worden fluxen en bergingscoëfficiënten in SIMGRO vermenigvuldigd met de betreffende oppervlaktes van de SVAT-eenheden. Zodoende krijgt MODFLOW de waarden van fluxen in $\text{m}^3/\text{tijdstap}$ en die van bergingscoëfficiënten in m^3/m . Die kunnen vervolgens per MODFLOW-cel worden opgeteld door MODFLOW zelf, zonder de oppervlaktes van de SVAT-eenheden te kennen.

Per outer loop-iteratie van het grondwatermodel wordt de bergingscoëfficiënt bepaald aan de hand van het stijghoogtetraject tussen de oude waarde (vorige tijdstap) en de nieuwe waarde. Bij de vaststelling van de nieuwe bergingscoëfficiënt wordt een tussenstap ingelast waarin op basis van de netto grondwaterflux een aangepaste grondwaterstand wordt berekend. Niet de MODFLOW-grondwaterstand maar deze aangepaste grondwater-

stand wordt gebruikt voor het schatten van de nieuwe bergingscoëfficiënt. Deze aangepaste grondwaterstand wordt verkregen door de genoemde flux (in combinatie met andere waterbalanstermen) te gebruiken bij het opzoeken van het punt in de bergingstabel dat daar exact mee in overeenstemming is. In de geconvergeerde situatie is deze aangepaste grondwaterstand gelijk geworden aan de waarde zoals berekend door MODFLOW. Het voordeel van de ingelaste tussenstap is dat de netto grondwaterflux veel minder gevoelig is dan de grondwaterstand zelf. Door de netto grondwaterflux als ingang te gebruiken bij het bepalen van de nieuwe bergingscoëfficiënt wordt daarom een veel snellere convergentie verkregen dan weer de laatste MODFLOW-grondwaterstand daarvoor zou worden gebruikt. Zoals bij iedere iteratieve methode blijft er na het bereiken van het convergentie-criterium een kleine waterbalansfout over; deze fout wordt in de volgende tijdstap gerepareerd via een aanpassing van de netto grondwateraanvulling.



Figuur 3: Voorbeeld van de berekende actuele jaarverdamping in het Kromme-Rijn-gebied (som van interceptieverdamping, transpiratie, bodemverdamping en openwaterverdamping).

Voorbeeld van resultaten

Een eerste voorbeeld van resultaten verkregen met het gekoppelde model is gegeven in figuur 3. Het betreft een model gebouwd in opdracht van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden van het Kromme Rijn-gebied. Het gehele model beslaat circa 2.000 km², en is (in dit voorbeeld) gemodelleerd met een MODFLOW-grid van 250 m. In het buitengebied is voor de SVAT-eenheden een grid van 125 m toegepast, en in het aandachtsgebied van 25 m. In het aandachtsgebied zijn er dus 100 SVAT-eenheden gekoppeld aan 1 MODFLOW-cel. In het voorbeeld gaat het om ruim 700.000 SVAT-eenheden. Voor het oppervlaktewater wordt een schematisatie in 4.500 trajecten aangemaakt op basis van SOBEK-CF rekenexperimenten. Het gecombineerde model draait circa 3 uur per rekenjaar op een P4 3.0 GHz.

Vooruitblik

Een modelinstrumentarium zonder de beschikking over adequate kalibratie-mogelijkheden heeft relatief weinig praktische waarde. Reductie van de parameteronzekerheid en kwantificering van de modelnauwkeurigheid zijn zaken waar de komende jaren veel aandacht aan zal worden besteed.

De uitgevoerde koppeling geeft aan dat er volop perspectieven zijn om de samenwerking tussen TNO en Alterra verder uit te breiden. Zowel MODFLOW als SIMGRO zijn in hun oude hoedanigheid al aan SOBEK-CF (WL | Delft Hydraulics, 2001) gekoppeld. Het ligt voor de hand verder te gaan met koppelen en er een drie-eenheid van te maken. De gevolgde werkwijze maakt het eenvoudig om desgewenst de koppelingen volledig OpenMI-compliant te maken.

Literatuur

- Feddes, R.A., P.J. Kowalik en H. Zaradny (1978)** Simulation of field water use and crop yields; 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 Report 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.
- HarmonIT (2005)** The org.OpenMI.Standard interface specification. Part C of the OpenMI document Series. IT frameworks (HarmonIT). EC-FP5 Contract EVK1-CT-2001-00090.
- Heijkers, W.J.M. en T. Wendt (2005)** Stedelijk-hydrologische modellering; beleidsmatige problematiek, aanpak en eerste resultaten; in: *Stromingen*, jrg 11, nr 1, pag 43–56.
- Kroes, J.G. en J.C. van Dam (red) (2003)** Reference manual SWAP version 3.0.3; Alterra Report 773, Wageningen.
- Laat, P.J.M. de (1980)** Model for unsaturated flow above a shallow water table, applied to

- a regional subsurface flow problem; Proefschrift, Landbouwhogeschool Wageningen.
- Pastoors, M.J.H. en K. Kovar (2005)** Koppeling van dynamisch verzadigd en onverzadigd grondwatermodel; in: *Stromingen*, jrg 11, nr 4, pag 43–56.
- Rutter, A.J. (1968)** Water consumption by forests; in: T.T. Kozlowski (red) *Water Deficits and Plant Growth*, vol 2: pag 23–84, Academic Press, London.
- Stoppelenburg, F.J., K. Kovar, M.J.H. Pastoors en A. Tiktak (2005)** Modelling the interactions between transient saturated and unsaturated groundwater flow: Off-line coupling of LGM and SWAP; Report 500026001/2005, RIVM, Bilthoven.
- Tiktak, A., F. van den Berg, J.J.T.I. Boesten, D. van Kraalingen, M. Leistra en A.M.A. van der Linden (2000)** Manual of FOCUS PEARL version 1.1.1. RIVM Report 711401 008, Bilthoven.
- Veldhuizen, A.A., P.E.V. van Walsum, A. Lourens en P.E. Dik (2006)** Flexible integrated modelling of groundwater, soil water and surface water; in: Proceedings of MODFLOW 2006, IGWMC, Colorado School of Mines.
- 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 A.A.M.F.R. Smit (2004)** SIMGRO 5.0.2; Theory and model implementation; Alterra Report 913.1, Wageningen.
- Walsum, P.E.V. van en Groenendijk, P. (2006)** Dynamic metamodel for the unsaturated-saturated zone; in: Proceedings of MODFLOW 2006, IGWMC, Colorado School of Mines.
- WL|Delft Hydraulics (2001)** SOBEK Rural, managing your flow; Manual version 2.07, WL|Delft Hydraulics, Delft.