
Koppeling van dynamisch verzadigd en onverzadigd grondwatermodel

Compleet en haalbaar

ir. M.J.H. Pastoors
ir. K. Kovar

Deze studie beschrijft een modelkoppeling om de onverzadigde en verzadigde grondwaterstroming in samenhang dynamisch te simuleren, rekening houdend met de onderlinge afhankelijkheid van beide systemen. De rol van de bergingscoëfficiënt in het transiënte verzadigde grondwatermodel is van essentieel belang. De berekening van de bergingscoëfficiënt, als invoer voor het verzadigde model, is minder eenvoudig gebleken dan we op grond van onderzoeken in het verleden hebben verwacht. We geven aan hoe het probleem van de freatische bergingscoëfficiënt bij deze modelkoppeling is opgelost. Een modeltoepassing in het gebied van de Beerze en de Reusel over de periode 1981-1990 demonstreert dat de koppeling succesvol is.

Inleiding

Voor nationale beleidsevaluaties is er behoefte aan landsdekkende modellen waarmee effecten van belastingen van bodem en grondwater en verschillende scenario's van landinrichting op (bodem)gebruiksfuncties kunnen worden aangegeven. Integrale studies, zowel binnen de thema's (vermesting, verzuring, verdroging) als over de thema's heen zullen meer en meer deel uitmaken van deze evaluaties. Voor het efficiënt uitvoeren van dergelijke (integrale) studies is een consistente set van modellen en databases nodig. Een landsdekkend hydrologisch model ten behoeve van waterkwantiteits- en waterkwaliteitsstudies maakt een belangrijk onderdeel hiervan uit. In dat kader is gewerkt aan een koppeling van onverzadigd en verzadigd grondwatersysteem, dat rekening houdt met de onderlinge afhankelijkheid.

De waterflux uit de onverzadigde zone naar de bovenzijde van het verzadigde grondwatersysteem is, in samenhang met de freatische bergingscoëfficiënt de dominante drijfkracht voor de dynamiek van de grondwaterstroming. In het verleden werd bij verzadigde grondwatermodellen vaak een eenvoudige voorstelling van de onverzadigde zone genomen, in de vorm van reservoirs voor de wortelzone en de dieper gelegen onverzadigde ondergrond. De hieruit afgeleide fluxrelatie was eenzijdig, dat wil zeggen gericht op het van tevoren éénmalig berekenen van de grondwateraanvulling van het verzadigde grondwater-

Rien Pastoors en Karel Kovar zijn werkzaam bij MNP, Postbus 303, 3720 AH Bilthoven,
rien.pastoors@mnt.nl, karel.kovar@mnt.nl.

systeem. De bergingscoëfficiënt voor het verzadigde grondwatermodel werd hierbij constant verondersteld of als een functie van de grondwaterstand genomen. Nu steeds vaker dynamische modellen worden ingezet voor de simulatie van de verzadigde grondwaterstroming is een dynamische koppeling van beide modeldomeinen nodig. De terugkoppeling tussen onverzadigd en verzadigd grondwatersysteem is vooral belangrijk bij grondwaterstanden tot enkele meters beneden maaiveld, en wel omdat dan de capillaire opstijging van grondwater van invloed is op de grootte van de grondwateraanvulling (Stoppelenburg e.a., 2002; figuur 2).

Terugblik in tijd

Voordat we onze methode gaan beschrijven, willen we eerst in tijd terugkijken met betrekking tot (a) de toepassing van onverzadigde modellen voor het leveren van invoer van grondwateraanvulling en, eventueel de bergingscoëfficiënt aan regionale verzadigde grondwatermodellen, en (b) de koppelingen van een onverzadigd model met een verzadigd grondwatermodel. Deze terugblik, deze geschiedenis, beperkt zich tot alleen de Nederlandse situatie.

De eerste keer, naar ons beste weten, dat het effect van de grondwaterstand, de ondiepe verlaging, de verdampingsreductie en de grondwateraanvulling modelmatig werd benaderd was door Van Lanen en Heij (1978, sectie 3.3.3). Een nadere uitwerking van de problematiek is te vinden in Meinardi e.a. (1980, hoofdstuk 3, figuur 15). In Van Lanen (1982, figuur 10) wordt het verloop van de grondwaterstandsverlaging gegeven in relatie tot de verdampingsreductie (extra grondwateraanvulling).

In de periode 1976-1980 is in het kader van de Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland het model GELGAM ontwikkeld (De Laat en van den Akker, 1976). Daarin werd voor het eerst een tweezijdige koppeling tussen een onverzadigd model, model MUST (De Laat, 1980) en een verzadigd grondwatermodel (Kovar, 1981a, 1981b) gerealiseerd. Het bijzondere van de temporele aanpak was dat het om een opeenvolging van stationaire situaties (decaden) ging:

- a de verzadigde grondwaterstroming werd stationair gemodelleerd, dus zonder een bergingsverandering in tijd. De gemengde (Cauchy) randvoorwaarde gaf de flux tussen de onverzadigde en de verzadigde zone als functie van de grondwaterstandsverandering (t.o.v. de vorige decade). De waarde van grondwateraanvulling, ook constant beschouwd gedurende een decade, volgde uit een geconvergeerde oplossing voor een grondwaterstand langs de Cauchy relatie;
- b het onverzadigde model is, ook per decade, een stationaire oplossing van de stroming in de wortelzone en de onverzadigde ondergrond (m.a.w. een stationaire variant van Richards-vergelijking). Bij de afleiding van de gemengde (Cauchy) randvoorwaarde t.b.v. verzadigd model wordt echter rekening gehouden met de verandering van de grondwaterstand ten opzichte van de vorige decade.

De GELGAM-oplossing voor een decade volgde uit een convergentie van een reeks iteratieslagen van beide modellen, daarna kwam de volgende decade aan de beurt. De kennis over de extra verdampingsreductie en de extra grondwateraanvulling ten gevolge van een grondwaterstandsverlaging en de bergingscoëfficiënt om onverzadigde en verzadigde modellen te koppelen werd ontleend aan de ervaringen met het model SUM-2 (Van Lanen, 1981).

Het model GELGAM was zijn tijd vooruit. Het draaien van GELGAM (b.v. Awater en de Laat, 1980) was echter zeer rekenintensief. Daarom heeft men in de praktijk naar andere, simpeler oplossingen gezocht om de in tijd variabele grondwateraanvulling en, eventueel ook de bergingscoëfficiënt als invoer voor grondwatermodellen te kunnen bepalen. Een uitgebreide beschrijving van een rekenmethodiek als alternatief voor GELGAM, werd gepresenteerd door Van Lanen (1983). De methodiek werd geïntroduceerd om berekening uit het grondwater op hogere gronden en het effect daarvan op niet-beregende gronden te bepalen. Van Lanen berekende op een losgekoppelde manier (a) met een onverzadigd stromingsmodel per knooppunt de grootte van de beregeningsgift (d.w.z. hoeveelheid onttrokken grondwater), de bergingscoëfficiënt en de toename van de grondwateraanvulling en (b) vervolgens met een niet-stationair verzadigd grondwaterstromingsmodel het grondwaterstandsverloop in knooppunten. Het onverzadigde en het verzadigde grondwatermodel worden enkele malen doorgerekend (iteraties) om consistente resultaten te verkrijgen. Enkele andere voorbeelden van dit type werk, inclusief toepassing in regionale modellering zijn Van Drecht (1983), Snelling en Pastoors (1985), Van Bakel (1986), Van Drecht (1986), en Mülschlegel en Thunnissen (1986).

Om de afhankelijkheid tussen onverzadigde en verzadigde stroming bij ondiepe grondwaterstanden te kunnen modelleren heeft het Staringcentrum (nu Alterra) het model SIMGRO ontwikkeld (Querner en van Bakel, 1989). Vergelijkbaar met GELGAM werd daarin op benaderende wijze "tweezijdig" rekening gehouden met de afhankelijkheid tussen de onverzadigde zone en verzadigde zone. Ook hier varieert de bergingscoëfficiënt per knooppunt en tijdstap, in samenhang met de diepte van de grondwaterstand. In tegenstelling tot GELGAM werd in SIMGRO de verzadigde regionale grondwaterstroming als transiënt opgelost. Net als in GELGAM werd de niet-stationaire verticale stroming in de onverzadigde zone echter niet als zodanig opgelost.

Het gebruik van tweezijdig gekoppelde modellen is in de jaren negentig geen gemeengoed geworden. Naast de aanpak zoals in SIMGRO was de gangbare benadering (a) het bepalen van de grondwateraanvulling m.b.v. een onverzadigd model, en (b) deze flux vervolgens als invoer voor het verzadigde grondwatermodel gebruiken. De stroming in de onverzadigde zone werd benaderd d.m.v. de stationaire variant van Richards-vergelijking, een soort waterbalans-aanpak, soms met een mogelijkheid om rekening te houden met de tijd voor stroming (nalevering) tussen de wortelzone en het freatische vlak in dikke onverzadigde zones (zoals KIWA, 1996; IWACO, 1997). Pas halverwege jaren negentig werd de volgende vernieuwende stap gezet, en wel door het RIZA, waar men MOZART (transiënt) en NAGROM (stationair) aan elkaar ging koppelen.

Gebruikte modellen

De koppeling van verzadigde en onverzadigde grondwatermodellen kan, naar de mate van toenemende rekenintensiteit, in vier groepen worden onderverdeeld:

- 1 een volledig geïntegreerd, driedimensionaal, dynamisch verzadigd en onverzadigd grondwatermodel, gebaseerd op de Richards-vergelijking, als één vergelijking voor onverzadigd en verzadigd grondwatersysteem. Deze benadering is, in theorie, slechts voor kleine modelgebieden toepasbaar;
- 2 gekoppeld dynamisch verzadigd en onverzadigd grondwatermodel, simultaan eenmalig in de tijd opgelost;

- 3 gekoppeld dynamisch verzadigd en onverzadigd grondwatermodel, niet simultaan eenmalig in de tijd, maar als een opeenvolging van tijdseries telkens berekend voor de gehele rekenperiode, afzonderlijk voor verzadigd en onverzadigd grondwatermodel (b.v. LGM-SWAP);
- 4 dynamisch verzadigd grondwatermodel met relaties (tabellen) tussen grondwaterstand en freatische bergingscoëfficiënt. De relaties worden tevoren met een onverzadigd grondwatermodel gegenereerd, of worden gedurende het rekenproces (her)berekend (b.v. SIMGRO).

In ons geval hebben we de koppeling uitgevoerd volgens de onder punt drie omschreven procedure, vanwege het operationeel zijn van de modellen LGM en SWAP bij het MNP. Het onverzadigde grondwatermodel genereert tijdseries van de grondwateraanvulling en freatische bergingscoëfficiënt. Omgekeerd is het bodemvocht in de onverzadigde zone mede afhankelijk van de grondwaterstand in het verzadigde grondwatersysteem. Het verzadigde grondwatermodel levert tijdseries van grondwaterstijghoogten die als onderrandvoorwaarde gelden voor het onverzadigde grondwatermodel.

Het onderzoek is uitgevoerd met het model SWAP en het Landelijk Grondwater Model (LGM). Het model SWAP (Van Dam, 2000) is een dynamisch model om de stroming van het grondwater in de onverzadigde zone en het freatische watervoerende pakket te beschrijven. Aangezien de waterstroming in het model alleen verticaal is beschouwd, wordt de wateropname van de plant en de drainage afvoer met sink-termen beschreven. Het model houdt rekening met verticale heterogeniteiten: de bodemopbouw kan per laag variabel worden opgegeven. De bovenrandvoorwaarde van het model wordt gevormd door de neerslag en verdamping, die op dagbasis worden ingevoerd. Daarnaast heeft SWAP bodemfysische en waterhuishoudkundige gegevens nodig. De uitvoer wordt standaard op dagbasis gegenereerd. SWAP gebruikt de eindige differentiemethode om de Richards-vergelijking op te lossen.

Het LGM (Stoppelenburg e.a., 2005) is ontwikkeld om de grondwaterstroming te beschrijven in een quasi-driedimensionaal meerlagen systeem, waarin de stroming in het watervoerende pakket overheersend horizontaal is en de stroming in de slechtdoorlatende lagen verticaal. De differentiaalvergelijking is gebaseerd op de bewegingsvergelijking (de wet van Darcy) en de continuïteitsvergelijking. Een belangrijke factor die de grondwaterstand in het bovenste watervoerende pakket sterk beïnvloedt, is het aanwezige oppervlaktewater. Grote waterlopen, zoals rivieren, kanalen of grote beken, worden gemodelleerd als individuele lijnelementen met infiltratie of drainage, afhankelijk van het verschil tussen de grondwaterstijghoogte in het bovenste watervoerende pakket en het peil in de waterloop. Daarnaast zijn er gebieden met een dicht stelsel van sloten en greppels. Dit systeem van oppervlaktewater speelt een belangrijke rol bij het beheersen van de grondwaterstand in het bovenste watervoerende pakket. In grootschalige modellen, zoals het LGM, kan een dergelijke mate van detail in dit oppervlaktewater systeem niet als individuele waterlopen in het model verwerkt worden. Het effect van het klein-oppervlaktewater wordt daarom ruimtelijk gelumpd beschreven door een grondwaterstand-afhankelijke infiltratie- of drainage-relatie.

Voor het berekenen van de grondwaterstijghoogte in en de grondwaterstroming tussen de watervoerende pakketten is in LGM gebruik gemaakt van een numerieke benadering door middel van de eindige-elementenmethode. Het rekenprogramma lost langs iteratieve weg de differentiaalvergelijking op die het stromingsproces beschrijft van, in dit geval, een transiënte grondwaterstroming. De in- en uitvoer van de modelparameters alsmede de

berekeningsresultaten (stijghoogten, freatische vlak en grondwaterfluxen) verlopen via de knooppunten van het eindige-elementennetwerk. Rondom elk knooppunt wordt een zogenaamd *invloedsoppervlak* onderscheiden, berekend op basis van de grootte van de elementen waarvan het knooppunt deel uitmaakt. De parameterwaarden worden voor deze invloedsoppervlakken afgeleid, zowel voor LGM als SWAP.

Koppelingsconcept

Voor de koppeling van SWAP (1-D verticaal, onverzadigd) en LGM (quasi 3-D horizontaal, verzadigd) wordt van het navolgende concept uitgegaan:

- De bovenrand van LGM wordt gevormd door het freatische vlak. Met andere woorden, het bovenste watervoerende pakket in LGM is een freatisch pakket waarvan het doorlaatvermogen een functie is van de grondwaterstand en daarmee ook van de watervoerende dikte. De onderrand voor SWAP wordt gevormd door de eerste (al dan niet fictieve) slechtdoorlatende laag. In LGM komt deze SWAP-onderrand overeen met de onderkant van het bovenste freatische watervoerende pakket. Als gevolg van deze keuze bestaat er een "overlap" tussen LGM en SWAP. De consequentie daarvan is dat er in de waterbalans van beide modellen "identieke" fluxtermen voorkomen. Die kunnen deels worden gebruikt om te toetsen of de koppeling consistent gebeurt.
- Eén van de termen in de waterbalans is de afstroming naar het klein-oppervlaktewater (drainagemiddelen). In SWAP en LGM worden die op verschillende manieren gedefinieerd. Deze definities zijn echter niet strijdig met elkaar en kunnen één op één worden vertaald, zodat een consistente overeenstemming van deze balansterm verwacht mag worden.
- Voor de afvoer/toevoer van water naar/van de drainagemiddelen wordt uitgegaan van de drainagemiddelen die zich binnen het beschouwde invloedsoppervlak bevinden (oppervlak van de kolom in SWAP, dat gelijk is aan het invloedsoppervlak van knooppunt binnen LGM). De regionale interactie van het drainagesysteem met zijn omgeving vindt plaats via LGM. Tevens zijn de ruimtelijke uitgestrektheid van SWAP en LGM voor elk knooppunt hetzelfde (één op één relatie), waarop ook de parameterisatie is gebaseerd.
- LGM rekent in het freatische watervoerende pakket een (regionale) horizontale flux uit. Deze flux kan aanzienlijk zijn bij grondwateronttrekkingen uit het freatische watervoerende pakket en bij waterlopen (rivieren, kanalen). SWAP berekent deze flux echter niet. Om de invloed ervan op de resultaten van SWAP in rekening te kunnen nemen is er bij de koppeling voor gekozen om deze flux bij wijze van compensatie als een extra (kunstmatige) flux door de onderrand van SWAP te plaatsen.
- In LGM worden grote waterlopen door middel van een fluxrelatie langs elementranden gemodelleerd. Om de invloed van de rivier-lijnsegmenten op de resultaten van SWAP te compenseren, hebben wij er voor gekozen (analoog aan de hiervoor genoemde horizontale flux) om deze flux als een extra (kunstmatige) flux door de onderrand van SWAP te plaatsen.
- De hydraulische weerstand tussen het freatische en het hieronder gelegen watervoerende pakket in LGM is gelijk genomen aan de weerstand aan de onderkant van de SWAP-kolom. Echter, in SWAP zelf is er ook sprake van een verticale weerstand tussen het freatische vlak en de onderkant van de SWAP-kolom (orde van grootte: enkele dagen tot wel een honderdtal dagen). Deze weerstand ten gevolge van de verticale stroming in

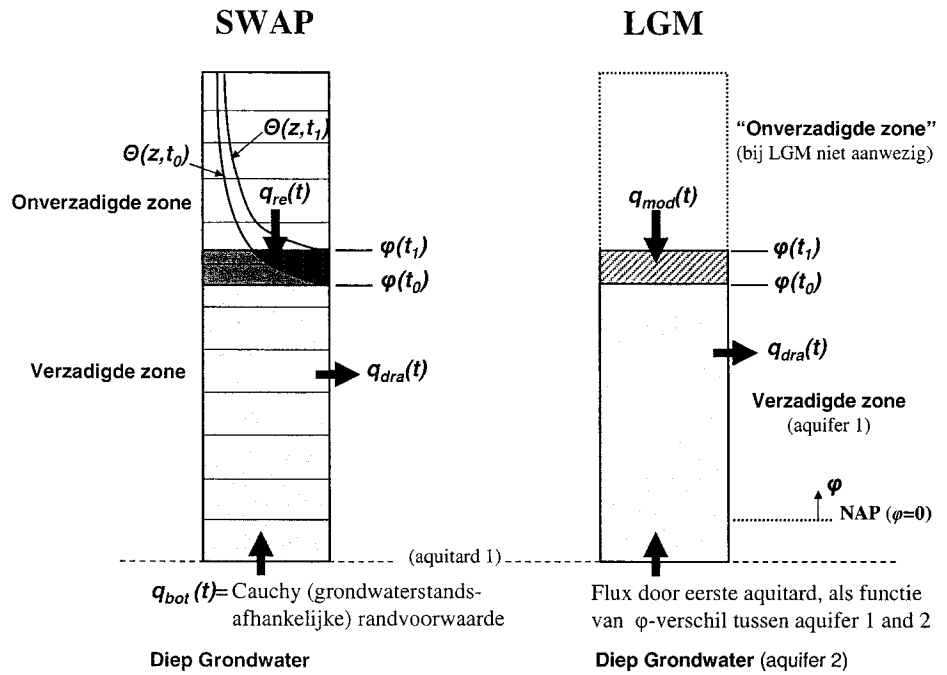
SWAP is in LGM niet in rekening gebracht.

- De modellen LGM en SWAP worden (repetitief) na elkaar gebruikt waarbij telkens de hele tijdserie wordt doorgerekend. In ons geval wordt gestart met LGM, die voor een initiële situatie van de geschatte waarde van grondwateraanvulling (sinusvormig) en freatische bergingscoëfficiënt de simulatieperiode (b.v. 10 jaar) doorrekent. LGM levert vervolgens per decade aan SWAP de onderrandvoorwaarden voor de SWAP-kolom (grondwaterstijghoogte in het tweede watervoerende pakket van LGM). Daarna levert SWAP aan LGM een flux over het freatische vlak en een bergingscoëfficiënt, waarna de volgende iteratie weer met een LGM-run start.

Vooruitlopend op de discussie van de resultaten willen wij nu alvast opmerken dat de verwerking in SWAP van de horizontale flux in het freatische watervoerende pakket en van de grote waterlopen een benadering is van deze grondwaterfluxen in LGM. Eveneens is het een benadering dat in LGM niet de weerstand ten gevolge van de verticale stroming in SWAP is verwerkt. Vanwege deze drie conceptuele verschillen zullen kleine en ruimtelijk lokale verschillen ontstaan tussen het freatische vlak berekend door LGM enerzijds en SWAP anderzijds.

Twee methoden voor koppeling LGM-SWAP

Het freatische watervoerende pakket wordt in beide modellen in de berekening meegenomen. In de waterbalans van het freatische vlak komen bij LGM en SWAP identieke termen voor. De parameterisering van de relatie tussen grondwater en oppervlaktewater is voor LGM en SWAP op dezelfde wijze uitgevoerd. Daarom moeten uiteindelijk in de geconvergeerde situatie overeenkomstige termen bij benadering gelijke waarden hebben bereikt. Een te groot verschil zou een teken zijn van een fout in (de uitwerking van) het koppelingsconcept. De freatische grondwaterstand speelt in het koppelingsconcept een cruciale rol, omdat de fluxtermen (drainageflux naar klein-oppervlaktewater, flux door onderrand van SWAP) er een directe relatie mee hebben. Figuur 1 geeft hiervan een schematisch overzicht. Nu wordt de freatische grondwaterstand niet direct door SWAP berekend, maar is wel uit de berekening van de vochtspanning af te leiden. Het is het vlak waarbij de vochtspanning gelijk is aan de atmosferische druk. Wil men de waterbalans van het verzadigde deel van de SWAP-kolom opstellen, dan moet de waterflux over het vlak bekend zijn. Deze flux wordt hier als de grondwateraanvulling (q_n) aangeduid. De flux door het freatische vlak wordt niet expliciet in SWAP berekend maar is, als nabewerking van SWAP-uitvoer, benaderend (interpolatie) te bepalen uit de verticale waterflux over de laagscheidingen in de SWAP-kolom. Voor de koppeling hebben we twee aanpakken gevolgd, hierna aangeduid als methode 1 en methode 2.



Figuur 1: Koppelingsschema LGM-SWAP.

Methode 1: Koppeling met tijdsafhankelijke bergingscoëfficiënt en grondwateraanvulling

Bij deze methode verandert de bergingscoëfficiënt in de tijd. De waarde van de bergingscoëfficiënt is, volgens de definitie, gelijk aan de hoeveelheid water die tijdens een tijdstap geborgen wordt, gedeeld door verandering in het freatische vlak. Bij een verandering (in tijd) van de freatische grondwaterstand behoort een hoeveelheid water (bodenvocht) die nodig is om deze verandering te realiseren. Die hoeveelheid water (bergingsverandering) is uit de waterbalans van het verzadigde deel van de SWAP-kolom af te leiden. De bergingsverandering gedeeld door het verschil in de grondwaterstijghoogte, tussen het begin en eind van de tijdstap, levert de waarde van de bergingscoëfficiënt. De formule voor de berekening van de bergingscoëfficiënt volgt uit de waterbalans van het verzadigde deel van de SWAP-kolom (verg. 1).

$$S(t) = (q_{bot}(t) + q_{re}(t) - q_{dra}(t)) \Delta t / \Delta \varphi(t) \quad (1)$$

Hierin is, per eenheid van oppervlak,

- S = bergingscoëfficiënt (-)
- q_{bot} = grondwaterflux aan onderrand SWAP-kolom (m/d)
- q_{re} = grondwateraanvulling, flux door het freatische vlak (m/d)
- q_{dra} = grondwaterflux naar klein-oppervlaktewater (m/d)
- Δt = tijdstap (d)
- $\Delta \varphi$ = verandering van grondwaterstand ($\varphi_{eind} - \varphi_{begin}$) (m)

De bergingscoëfficiënt S is dus afhankelijk van de grondwaterfluxen en de verandering van het freatische vlak en is een in de tijd variërende grootte. Om S te kunnen berekenen moet gedeeld worden door de verandering van het freatische vlak $\Delta\varphi$. Dit levert numerieke problemen op bij kleine veranderingen in het freatische vlak, waardoor (schijnbaar, ten onrechte, numerieke ruis) grote variaties in de freatische bergingscoëfficiënt kunnen optreden. Daarnaast moet men bedenken dat de grondwaterflux door het freatische vlak, q_{re} , een benadering is vanwege interpolatie binnen verticale lagen, vaak met grove stappen, en dus behept is met afwijkingen.

Methode 2: Koppeling met constante bergingscoëfficiënt en tijdsafhankelijke surrogaat grondwateraanvulling

Daarom is bij de koppeling SWAP-LGM voor een andere aanpak gekozen, door aan te nemen dat S constant in tijd is en gelijk is aan de maximale bergingscoëfficiënt (θ_{sat}) van de bodemlaag in de SWAP-kolom waarin het freatische vlak ligt. θ_{sat} levert de maximaal mogelijke hoeveelheid (niet aan korrelstructuur gebonden) water die aan de kwantitatieve grondwaterstroming mee kan doen ($\theta_{sat} \times \Delta\varphi$). Om de waterbalans kloppend te krijgen is, in plaats van q_{re} , een modelflux q_{mod} nodig (verg. 2). De modelflux q_{mod} is een fictieve grondwateraanvulling (een surrogaat variabele). Het is niet meer de flux door het freatische vlak gedurende tijdstap Δt .

$$q_{mod}(t) = -q_{bot}(t) + q_{dra}(t) + \theta_{sat} \Delta\varphi(t) / \Delta t \quad (2)$$

In de vergelijking 2 is θ_{sat} constant en afhankelijk van de bodemfysische eigenschappen van de grondlaag. Dit heeft ontegenzeggelijk numerieke voordelen. De modelflux q_{mod} is nu de enige onbekende grootte in de waterbalans, in plaats van de bergingscoëfficiënt S en de grondwaterflux q_{re} in vergelijking 1. De flux q_{mod} varieert beduidend minder in de tijd dan de flux q_{re} . Theoretisch leveren de methoden 1 en 2 dezelfde resultaten, omdat we van dezelfde berekeningsresultaten van SWAP uitgegaan. Dat hebben we kunnen constateren toen we beide methoden naast elkaar gebruikten. Echter de stabiliteit en robuustheid van methode 2 hebben ertoe geleid dat uiteindelijk alleen voor methode 2 een volledig geconvergeerde berekening is gedaan.

Toepassing in het gebied van de Beerze en de Reusel

De koppeling is toegepast voor het stroomgebied van de Beerze en de Reusel. Het studiegebied is gebruikt om modelconcepten van Alterra (SIMGRO), RIZA (NAGROM-MOZART) en MNP (LGM/SWAP) te vergelijken. Het stroomgebied van de Beerze en de Reusel ligt in het Brabantse dekzandgebied. Het gebied helt van het zuiden (de Kempen) naar het noorden (rivierengebied). Het gebied bevat beekdalen, die in het landschap zijn ingesneden. Het modelgebied is ongeveer 45000 ha groot. Voor dit onderzoek is een netwerk gegeneerd van 3241 knooppunten en 3697 elementen. De gemiddelde elementgrootte is circa 25 ha. Geohydrologisch is de ondergrond van het modelgebied geschematiseerd tot vier watervoerende pakketten, waarvan het bovenste pakket freatisch is, met het doorlaatvermogen als functie van de grondwaterstand. De Beerze en de Reusel zijn in het model verwerkt als

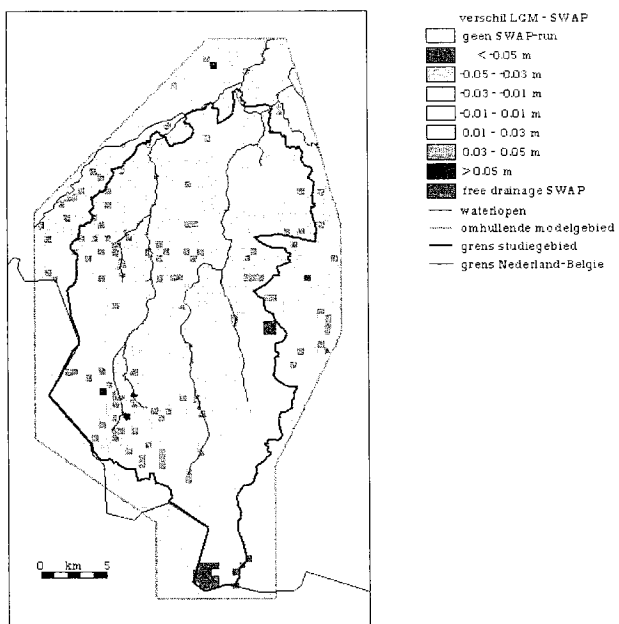
grondwaterstandsafhankelijke source/sink lijnsegmenten, die samenvallen met de randen van de elementen van het netwerk. Het overige klein-oppervlaktewater en de drains zijn gedefinieerd als een diffuse (gelumpte) grondwaterstand-afvoer relatie, gebaseerd op de ontwateringsbasis en de drainageweerstand.

De berekening van SWAP en LGM is uitgevoerd voor de periode van 1981-1990 (10 jaar). De eerste vier jaren zijn als inloopjaar voor beide modellen gezien. De analyse van de resultaten heeft betrekking op de resterende zes jaren (1985-1990).

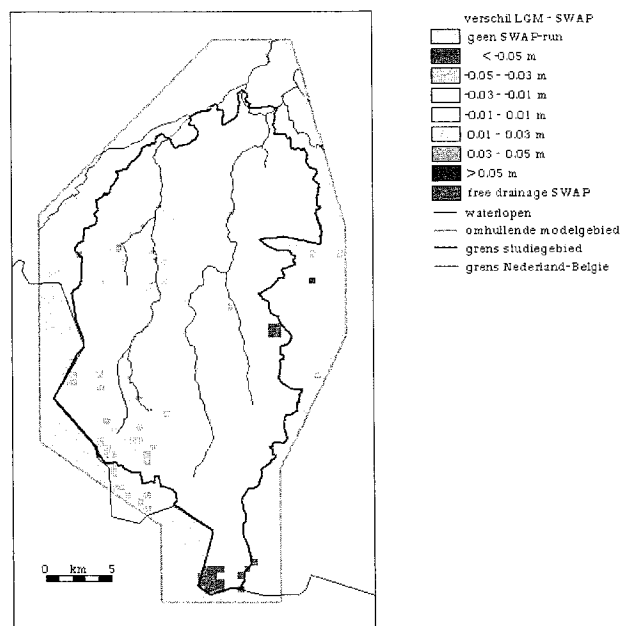
De beoordeling van de koppeling gebeurt in eerste instantie door het vergelijken van de freatische grondwaterstand berekend door zowel SWAP als LGM. SWAP berekent de freatische grondwaterstand op dagbasis. De dagwaarden worden daarna omgezet naar een gemiddelde per decade. LGM levert de uitvoer van de freatische grondwaterstand als een gemiddelde per decade. Van de berekende grondwaterstanden wordt zowel voor SWAP als LGM voor de periode 1985-1990 een gemiddeld-hoogste grondwaterstand (GHG) en gemiddeld-laagste grondwaterstand (GLG) afgeleid. Hiervoor worden per kalenderjaar de drie meest extreme decade waarden (hoogste, resp. laagste) freatische grondwaterstanden genomen. Het feit dat onze definitie van de GHG en GLG anders is dan de uit metingen afgeleide GHG en GLG is niet belangrijk voor de uitkomsten van dit onderzoek. Na elke gekoppelde LGM-SWAP iteratie wordt per model de convergentie bekeken. Hiervoor wordt per model het verschil van zowel de GHG als de GLG uit de voorlaatste en laatste run genomen.

Voor 452 (uit 3241) knooppunten van het modelgebied zijn geen SWAP-berekeningen uitgevoerd. Dit zijn de randknooppunten van het modelgebied en knooppunten waarvoor geen data van de onverzadigde zone (België) beschikbaar waren. Bij 22 knooppunten ligt de grondwaterstand dieper dan 6 meter beneden maaiveld. Voor deze knooppunten is in SWAP de "free drainage" optie aangezet. SWAP berekent dan alleen de grondwateraanvulling en geen grondwaterstand, waardoor er geen GHG en GLG uit de SWAP-resultaten berekend kunnen worden. Het verschil tussen de GHG van LGM en SWAP geeft een beeld van de systeemfout, anders gezegd de fout ten gevolge van de "onoverbrugbare" conceptuele verschillen tussen LGM en SWAP.

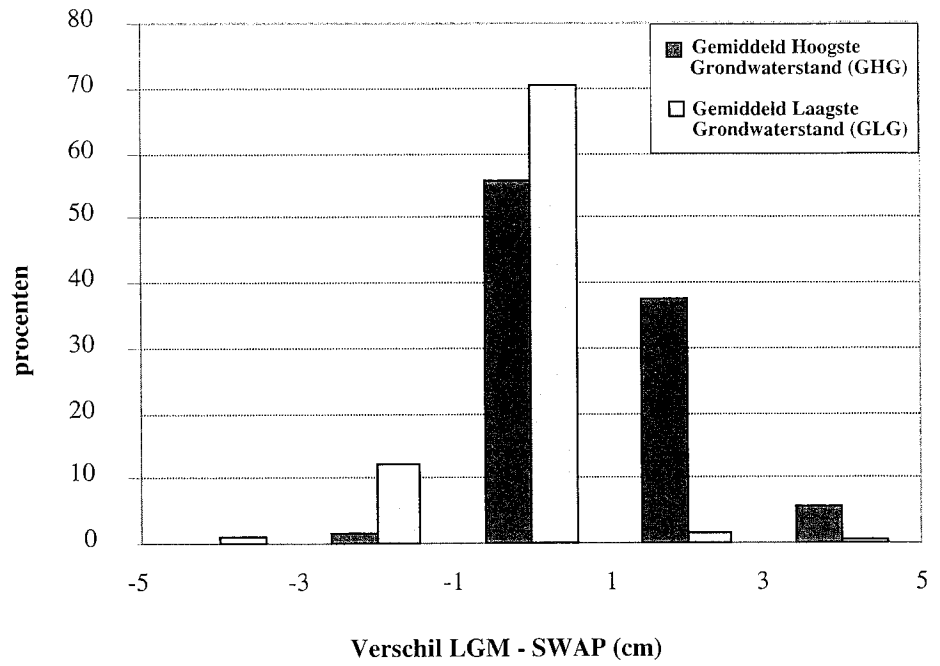
In figuur 2 is het ruimtelijke beeld van het verschil in GHG weergegeven. Hieruit is af te leiden dat GHG van LGM dieper beneden maaiveld ligt dan van SWAP. Een tweede indicatie van de systeemfout is het verschil tussen de GLG van LGM en SWAP. Het ruimtelijke beeld van dit verschil is in figuur 3 weergegeven. De GLG komt over het algemeen iets meer overeen dan de GHG. Het aantal knooppunten waarvan het verschil minder is dan 1 cm is groter. De GLG van LGM ligt overwegend minder diep beneden maaiveld dan van SWAP. Het blijkt dat fluctuatie van de grondwaterstand in LGM minder groot is dan in de naar decade omgerekende gemiddelde grondwaterstanden van SWAP. Dit is te verklaren uit het feit dat SWAP de tijdsafhankelijke data (a) op dagbasis invoert, (b) met heel korte tijdstappen rekent (< 1 dag) en (c) de grondwaterstand op dagbasis uitvoert. LGM werkt met tijdsafhankelijke data, die op decadebasis zijn gegenereerd en ingelezen. De berekende grondwaterstand wordt in LGM als decadegemiddelde berekend, waardoor ten opzichte van SWAP een afvlakking optreedt. De verschillen van GHG en GLG uit LGM en SWAP zijn in figuur 4 in een histogram uitgezet. De overeenkomst is zeer goed, m.a.w. het effect van de conceptuele verschillen tussen LGM en SWAP is klein.



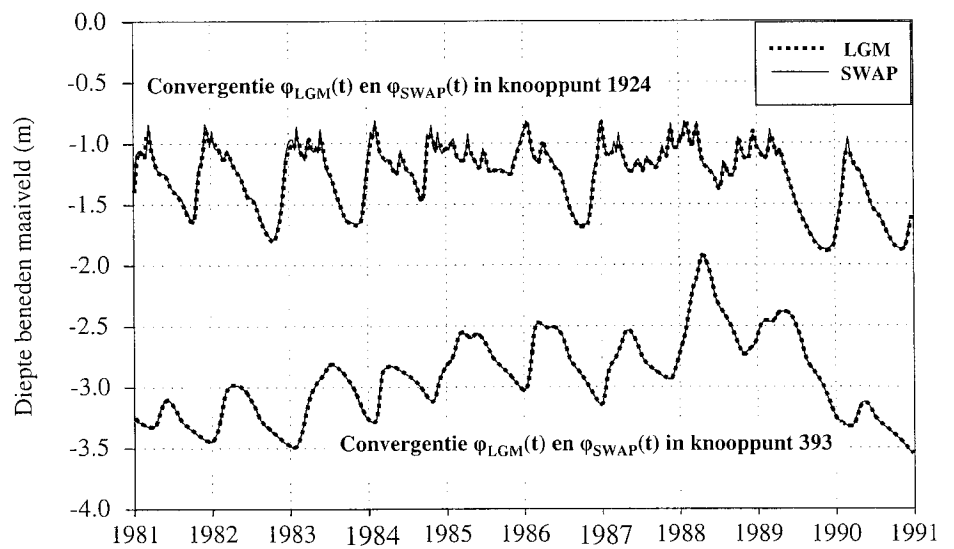
Figuur 2: Vershil Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) van LGM en SWAP, voor periode 1985-1990.



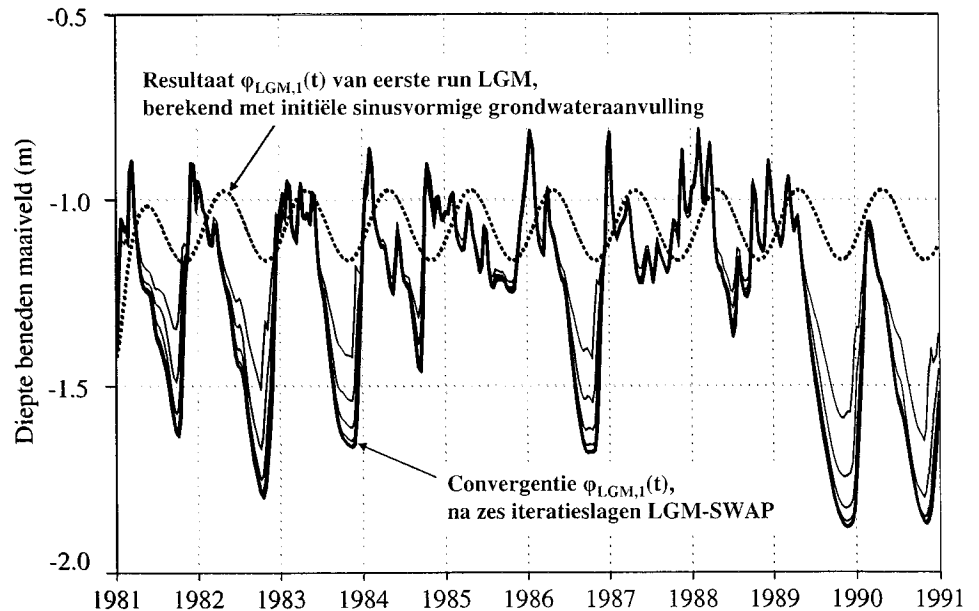
Figuur 3: Vershil Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) van LGM en SWAP, voor periode 1985-1990.



Figuur 4: Histogram van verschillen tussen LGM en SWAP, voor periode 1985-1990.



Figuur 5: Tijdstijghoogtelijn $\phi(t)$ van LGM en SWAP in twee knooppunten, voor geconvergeerde iteratierun.



Figuur 6: Verloop van convergentie voor tijdstijghoogtelijn $\phi(t)$, in knooppunt 1924.

Daarnaast is voor een tweetal knooppunten van het model de tijdstijghoogtelijn (decadegetallen) van SWAP en LGM van de laatste modelrun weergegeven (figuur 5). De verschillen in de grondwaterstand zijn gering, wat aangeeft dat beide modellen dezelfde dynamiek in de grondwaterstand hebben. Tot slot is in figuur 6 te zien hoe de convergentie in LGM verloopt voor knooppunt 1924, uitgaande van een initiële, geschatte beginsituatie van de koppelingsflux q_{mod} . Ondanks een weinig realistische beginsituatie convergeert het systeem naar de eindoplossing.

Binnen het modelgebied ligt het studiegebied, waar voor bijna alle knooppunten SWAP-berekeningen zijn uitgevoerd. Omdat het freatische watervoerende pakket in beide modellen wordt meegenomen, hebben we overeenkomstige waterbalanstermen met elkaar vergeleken. De totale drainageflux naar het topsysteem (q_{dra}) en de grondwaterflux over de eerste slechtdoorlatende laag (q_{bot}) waren in beide modellen gelijk.

Toepassing op landelijke schaal

Het gekoppelde LGM-SWAP model is ook toegepast om actuele grondwaterstanden in Pleistoceen Nederland te berekenen. In een twee-stap benadering is voor het gebied (circa 60% van Nederland) een relatief grof netwerk gemaakt, met lokaal verfijningen ter plaatse van waardevolle natuurgebieden. Het invloedsoppervlak van een knooppunt lag tussen de 1 en 6,5 km². De met het gekoppelde model uitgevoerde berekening is gedaan voor de periode 1986–2000 (15 jaar). De ruimtelijke resolutie van het gekoppelde model is te grof om resultaten van de berekening te kunnen inzetten in ecologisch gerelateerde vraagstukken. In een vervolgstap zijn daarom detailmodellen van LGM gemaakt (invloedsgebied knooppunt circa 0,0625 km²), die voor dezelfde rekenperiode 1986–2000 de grondwaterberekening uitvoeren. De resultaten (grondwateraanvulling, bergingscoëfficiënt) van het grove gekop-

pelde LGM-SWAP model zijn hierbij gebruikt als invoer van het detailmodel van LGM. De resultaten van de detailmodellen leverden ruimtelijke beelden met de gemiddeld hoogste, laagste en voorjaars-grondwaterstand (GHG, GLG en GVG).

Discussie en conclusies

SWAP en LGM vertonen enkele conceptuele verschillen. Zo kunnen de horizontale grondwaterstroming in het freatische watervoerende pakket en lijnvormige rivierelementen van LGM niet in SWAP worden gemodelleerd. We hebben deze LGM-fluxen daarom modelmatig als een extra (kunstmatige) grondwaterflux aan de onderkant van de SWAP-kolom opgenomen. Dankzij deze aanpassing werkt de koppeling van beide modellen goed. Een ander conceptueel verschil betreft de verticale stromingsweerstand in het verzadigde deel van de SWAP-kolom, de weerstand die niet in LGM is meegenomen. Echter omdat de dikte van het freatische watervoerende pakket meestal slechts enkele meters is, zal de bijbehorende verticale stromingsweerstand gering zijn en dus slechts kleine verschillen tussen LGM en SWAP tot gevolg hebben.

Met de gepresenteerde methode is een goede koppeling verwezenlijkt tussen een transient onverzadigd-zone model (SWAP) en een transient verzadigd grondwatermodel (LGM). Het koppelen van LGM en SWAP, beide stand-alone “op afstand” draaiend, is geslaagd. De verschillen tussen de berekende grondwaterstanden van SWAP en LGM zijn gering en verklaarbaar. De dynamiek van de grondwaterstanden, berekend in beide modellen, is vergelijkbaar. In het artikel is vooral aandacht gegeven aan de rol die de freatische bergingscoëfficiënt bij de koppeling van LGM en SWAP speelt. De koppeling is uitgevoerd zonder concessies te doen aan de mathematisch-fysische beschrijving van de grondwaterstroming in LGM en SWAP en de dynamische randvoorwaarden voor beide modellen. Het gebruik van het gekoppelde LGM-SWAP model is in de praktijk haalbaar gebleken.

Dankbetuiging

Diverse (ex-)MNP-ers hebben aan het koppelingsonderzoek meegewerkt. Wij bedanken Frederik Stoppelenburg voor zijn grote bijdrage aan de eerste versie van de koppeling, Aaldrik Tiktak voor discussies over het koppelingsconcept, de implementatie van SWAP en het aanpassen van het programma GeoPearl (de schil waarbinnen SWAP draait), en Toon Leijnse voor de inspirerende discussies met betrekking tot de koppeling. Tot slot gaat onze dank naar Henny van Lanen voor zijn bijdrage aan de terugblik in de tijd.

Literatuur

- Awater, R.H.C.M. en P.J.M. de Laat (1980)** Groundwater flow and evapotranspiration, a simulation model. Part 2, applications; Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland, Arnhem.
- Bakel, P.J.T. van (1986)** Planning, design and operation of surface water management systems, a case study; proefschrift, Landbouwhogeschool Wageningen.
- Dam, J.C. van (2000)** Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies; proefschrift, Wageningen University, Wageningen.

ningen, the Netherlands.

- Drecht, G. van (1983)** Bepaling van de freatische bergingscoëfficiënt en de grondwateraanvulling in zandgrond met een vrij diepe grondwaterspiegel; RID-mededeling 83-27.
- Drecht, G. van (1986)** De freatische bergingscoëfficiënt en de grondwateraanvulling in het gebied van de Utrechtse Heuvelrug; RIVM rapport 840345003.
- IWACO (1997)** Documentatie FLUZO; IWACO B.V., Rotterdam.
- KIWA (1996)** MUNSFLOW gebruikershandleiding; KIWA, rapport SWI 96.121.
- Kovar, K. (1981a)** Model study Over-Betuwe, a model for groundwater flow and evapotranspiration. Volume 2, description of model for saturated groundwater flow; Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland, Arnhem.
- Kovar, K. (1981b)** Introductie cursus GELGAM. Werking 1: verzadigde zone; Syllabus, Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening.
- Laat, P.J.M. de en C. van den Akker (1976)** Simulatiemodel voor grondwaterstroming en verdamping; in: Modelonderzoek 1971-1974. Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland.
- Laat, P.J.M. de (1980)** Model for unsaturated flow above a shallow water-table; proefschrift, Landbouwhogeschool Wageningen.
- Lanen, H.A.J. van en G.J. Heij (1978)** De tijdsafhankelijkheid van de verlagingen als gevolg van grondwaterwinning nabij Glindhorst (Gelderse Vallei); RID-mededeling 78-5.
- Lanen, H.A.J. van (1981)** Enige ervaringen opgedaan met een niet-stationair model voor grondwaterstroming en verdamping (SUM 2) in de Gelderse Vallei; RID-rapport hy.h. 81-18.
- Lanen, H.A.J. van (1982)** Verschillen tussen permanente geconcentreerde en niet-permanente grondwaterwinningen in relatie tot de winbare hoeveelheid grondwater; RID-mededeling 82-5.
- Lanen, H.A.J. van (1983)** Berekening uit het grondwater op de hogere gronden en het effect daarvan op de lagere gronden; in: *H₂O*, jrg 16, pag 369-375.
- Meinardi, C.R., H.A.J. van Lanen en G.J. Heij (1980)** Hydrologisch onderzoek naar de winningsmogelijkheden van grondwater; RID-mededeling 80-6.
- Mülschlegel, J. en H. Thunnissen (1986)** Hydrologische effecten van berekening uit grondwater in een studiegebied in Midden en West Noord-Brabant. Model verzadigde grondwaterstroming; RIVM rapport 840358001.
- Pastoors, M.J.H., K. Kovar, F.J. Stoppelenburg, A. Tiktak en A. Leijnse (2004)** Interaction between transient saturated and unsaturated groundwater flow: Off-line iterative coupling of LGM and SWAP. Poster at the Int. Conf. FEM_MODFLOW held 13-16 September 2004 in Karlovy Vary, Czech Republic.
- Querner, E.P. en P.J.T. van Bakel (1989)** Description of the regional groundwater flow model SIMGRO; Report 7, DLO-Winand Staring Centre, Wageningen.
- Snelting, H. en M.J.H. Pastoors (1985)** Verkenning van het hydrologische systeem van de Utrechtse Heuvelrug met behulp van het model TRINS; RIVM rapport 840345001.
- Stoppelenburg, F.J., K. Kovar, M.J.H. Pastoors, A. Tiktak, A. Leijnse (2002)** Two-way coupling of 1-D unsaturated-saturated flow model SWAP with 3-D saturated regional groundwater flow model LGM: Time-average coupling approach; in: *Acta Universitatis Carolinae, Geologica*, 46(3-4), pag 575-580.
- 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; RIVM report 500026001/2005.