

MNP-rapport 500123003/2007

**Het gekoppelde grondwater- en  
bodemwatermodel (LGM-SWAP)**

Een toepassing voor de Werkgroep Consensus  
Hydrologie

M.J.H. Pastoors, A. Tiktak en K. Kovar

Contact:

Naam : M.J.H. Pastoors

Afdeling : MNP/LDL

e-mail : [Rien.Pastoors@mnp.nl](mailto:Rien.Pastoors@mnp.nl)

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van de directie van het MNP, in het kader van project M500123, Kennisbasis Bodem en Water.



## Rapport in het kort

### **Het gekoppelde grondwater- en bodemwatermodel (LGM-SWAP). Een toepassing voor de Werkgroep Consensus Hydrologie**

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. 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, omdat dan de capillaire opstijging van grondwater van invloed is op de grootte van de grondwateraanvulling. De studie moet aangeven of het gecombineerde model de hydrologische basis kan leveren voor verdrogingstudies en waterkwaliteitsberekeningen, zoals door het Milieu- en Natuurplanbureau worden uitgevoerd.

In de studie is het Landelijk Grondwatermodel (LGM) gekoppeld aan een model van de hydrologie van de onverzadigde zone (SWAP). Dit gecombineerde model kan de hydrologische invoer voor studies naar de belasting van grond- en oppervlaktewater met nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen leveren. Het model kan ook de variatie van de grondwaterstand als functie van de tijd leveren. Om dit correct te doen, worden zowel LGM als SWAP dynamisch toegepast. De prestaties van het model zijn getoetst in een studie in het Beerze-Reusel-gebied. Er is een nagenoeg perfecte overeenkomst tussen de grondwaterstand die is berekend door SWAP en de grondwaterstand die is berekend door LGM. De resultaten van deze studie zijn ingebracht in een vergelijkstudie van de modellen LGM/SWAP, MOZART/NAGROM, SIMGRO en STONE.

**Trefwoorden:** hydrologie; SWAP; LGM; grondwater; oppervlaktewater; koppeling; model



## Abstract

### **Coupled groundwater and unsaturated zone model (LGM-SWAP). Application for the Working Group on National Consensus for Simulations in Groundwater Hydrology**

The water flux from the unsaturated zone to the upper side of the saturated groundwater system is, together with the phreatic storage coefficient, the dominant driving force for the dynamics of the groundwater flow. A dynamic coupling of both model domains becomes increasingly necessary for the use by dynamic models. Under conditions of shallow groundwater table the interdependence between the unsaturated and saturated zone flow may strongly influence the value of the groundwater recharge. Results from this study can be used to conclude upon the applicability of the adopted methodology for both ecohydrological studies and water quality assessments as required by the Netherlands Environmental Assessment Agency.

The groundwater flow model for the Netherlands (LGM), and a one-dimensional model of soil water flow (SWAP) were coupled. With this combined model, it is possible to calculate fluxes and residence times of nutrients and pesticides in both the unsaturated zone and the saturated phreatic aquifer. The model can also predict the seasonal dynamics of the groundwater table. In order to correctly simulate these seasonal dynamics, both LGM and SWAP are used in transient mode. The performance of the model was tested in a regional-scale model application. The correspondence between the groundwater heads simulated by SWAP and the groundwater heads simulated by LGM were nearly perfect. Results from this study have been used in a comparison study of the models LGM/SWAP, MOZART/NAGROM, SIMGRO and STONE.

**Key words:** hydrology; groundwater; surface-water; LGM; SWAP; modelling; coupling; transient



# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>9</b>
<b>1. Inleiding</b>	<b>13</b>
1.1 <i>Aanleiding</i>	13
1.2 <i>Leeswijzer</i>	14
<b>2. Beschrijving van het hydrologisch modelinstrumentarium van het MNP</b>	<b>15</b>
2.1 <i>De modellen</i>	15
2.1.1    Het Landelijk Grondwater Model (LGM)	15
2.1.2    Het model SWAP	16
2.2 <i>Koppelingsconcept</i>	18
2.3 <i>Twee methoden voor koppeling LGM-SWAP</i>	18
2.3.1    Methode 1: koppeling met tijdsafhankelijke bergingscoëfficiënt en grondwateraanvulling	19
2.3.2    Methode 2: koppeling met constante bergingscoëfficiënt en tijdsafhankelijke surrogaat grondwateraanvulling	20
2.4 <i>Uitwisseling van data tussen LGM en SWAP (randvoorwaarden)</i>	21
2.4.1    Onderrandvoorwaarde van SWAP, berekend met LGM	21
2.4.2    Bovenrandvoorwaarde van LGM, berekend door SWAP	23
2.4.3    Aspecten met betrekking tot tijd middeling	24
2.5 <i>Convergentieprocedure</i>	25
<b>3. Beschrijving van het stroomgebied van de Beerze en de Reusel</b>	<b>27</b>
3.1 <i>Inleiding</i>	27
3.2 <i>Geohydrologie</i>	29
3.3 <i>Oppervlaktewater</i>	33
3.3.1    Rivieren en beken	33
3.3.2    Sloten en greppels	33
3.4 <i>Drains</i>	35
3.5 <i>Maaiveld drainage</i>	36
3.6 <i>Grondwateronttrekkingen</i>	36
3.7 <i>Neerslag</i>	36
3.8 <i>Bodemfysische eenheden</i>	37
<b>4. Berekeningsresultaten</b>	<b>39</b>
4.1 <i>Inleiding</i>	39
4.1.1    Ruimtelijke resolutie van de rekenresultaten	39
4.1.2    Gekozen modeluitvoerparameters	39
4.1.3    Scenario's	40
4.2 <i>Beoordeling van de convergentiemethode</i>	41
4.3 <i>Basisrun</i>	45
4.3.1    Grondwaterstanden	45

---

4.3.2	Grondwaterstroming	45
4.3.3	Waterbalansen	46
4.3.4	Afvoerdynamiek van het stroomgebied	48
4.3.5	Grondwaterdynamiek in een aantal knooppunten	50
4.4	<i>Scenario 1: effect van verondiepen van tertiair systeem in landbouwgebied</i>	53
4.5	<i>Scenario 2: effecten dempen van waterlopen tertiair systeem in landbouwgebied</i>	54
4.6	<i>Scenario 3: effecten van klimaatverandering</i>	55
4.7	<i>Effecten op waterbalans</i>	55
<b>5.</b>	<b>Discussie en conclusies</b>	<b>59</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>61</b>



## Samenvatting

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. Nu steeds vaker dynamische modellen worden ingezet voor de simulatie van de verzadigde grondwaterstroming, bijvoorbeeld bij de berekening van de ecologische effecten van verdroging, 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. De studie moet aangeven of het gecombineerde model de hydrologische basis kan leveren voor verdrogingstudies en waterkwaliteitsberekeningen, zoals door het Milieu- en Natuurplanbureau worden uitgevoerd. Dit rapport beschrijft de koppeling tussen het Landelijk Grondwatermodel (LGM) en een model van de hydrologie van de onverzadigde zone (SWAP). Met dit gecombineerde model kunnen de waterstromen in het bodem- en grondwatersysteem, evenals de stromingen vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater, berekend worden. Het model kan de hydrologische invoer leveren voor studies naar de belasting van grond- en oppervlaktewater met nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen. Een andere mogelijke toepassing van het model is de voorspelling van de variatie van de grondwaterstand in de tijd, bijvoorbeeld gedurende het jaar. Informatie over deze jaarlijkse fluctuaties is van belang in studies naar de effecten van verdroging op ecosystemen. Om de seizoensdynamiek correct te kunnen berekenen, worden zowel LGM als SWAP dynamisch toegepast. De uitvoer van het model kan met een hoge ruimtelijke resolutie worden aangeleverd. Door de benodigde effectieve modelparameters rechtstreeks uit de hydrologische basisgegevens af te leiden, is het mogelijk de ruimtelijke schematisering aan te passen aan de onderzoeksvraag. De prestaties van het model zijn getoetst in een studie in het Beerze-Reusel-gebied. De overeenkomst tussen de grondwaterstand die is berekend door SWAP en de grondwaterstand die is berekend door LGM is nagenoeg perfect. De resultaten van de studie zijn ingebracht in een vergelijkende studie van andere landsdekkende hydrologische modellen.



## Summary

The water flux from the unsaturated zone to the upper side of the saturated groundwater system is, together with the phreatic storage coefficient, the dominant driving force for the dynamics of the groundwater flow. A dynamic coupling of both model domains becomes increasingly necessary for the use by dynamic models. Under conditions of shallow groundwater table the interdependence between the unsaturated and saturated zone flow may strongly influence the value of the groundwater recharge. Results from this study can be used to conclude upon the applicability of the adopted methodology for both ecohydrological studies and water quality assessments as required by the Netherlands Environmental Assessment Agency. An offline coupling was established between the groundwater flow model for the Netherlands, LGM, and a one-dimensional model of soil water flow, SWAP. With this combined model, it is possible to calculate fluxes and residence times of chemicals (particularly nutrients and pesticides) in both the unsaturated zone and the phreatic aquifer. Because the model considers interactions with local surface-water systems, the model can be used to predict fluxes of these chemicals into surface waters as well. Another possible application of the model is the prediction of the seasonal dynamics of the groundwater table, which is particularly important in ecohydrological studies, where the depth of the groundwater table at the start of the growing season is an important indicator of water availability. In order to correctly simulate these seasonal dynamics, both LGM and SWAP are run in transient mode, with a coupling time-step of 10 days. Procedures have been implemented to make the final results available at a very high spatial resolution, which is a requirement for ecohydrological studies. Regardless the grid size, GIS procedures convert the basic model parameters available in the LGM database into effective model input parameters. The performance of the combined model was tested in a regional-scale model application. The correspondence between the groundwater heads simulated by SWAP and the groundwater heads simulated by LGM were nearly perfect. Results from this study are used in a comparison study of the models LGM/SWAP, MOZART/NAGROM, SIMGRO and STONE with a view to improve and to harmonize the hydrological models for application on a national or supra-regional scale.



# 1. Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In verschillende integrale beleidsstudies die door het Milieu- en Natuurplanbureau (MNP) worden uitgevoerd, speelt de hydrologie een belangrijke rol. Het gaat hierbij onder andere om studies naar de belasting van het grond- en oppervlaktewater met nutriënten (MNP, 2004; Willems et al., 2005) en gewasbeschermingsmiddelen (MNP, 2006a), de effecten van anti-verdrogingsbeleid op de natuurkwaliteit (MNP, 2006b) en studies naar de gevolgen van klimaatverandering (MNP, 2005c). Aangezien het grondwatersysteem in Nederland veel interacties heeft met de bodem en het oppervlaktewater, spelen grondwatermodellen een belangrijke rol in de hydrologische keten. Daarom is het voor het MNP van belang dat er goede grondwatermodellen beschikbaar zijn.

Ook Alterra, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) en Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (TNO) doen integrale beleidsanalyses. Het doel en de ruimtelijke dekking van deze studies is vaak anders dan de studies die door het MNP worden uitgevoerd. Toch overlappen de uitspraken van de vier instituten elkaar met regelmaat. Op dit moment maken de vier instituten echter gebruik van verschillende hydrologische modellen. Dit kan leiden tot verschillen in modeluitkomsten. Omdat een dergelijke situatie als onwenselijk wordt gezien, is al in het begin van de jaren negentig van de vorige eeuw begonnen met het afstemmen van de hydrologische modellen. Een eerste stap is door Alterra, RIZA en (toen nog) RIVM gezet, door gezamenlijk het STONE-model te ontwikkelen (STONE staat voor ‘Samen Te Ontwikkelen Nutriënten Emissiemodel’).

Voor STONE is een ruimtelijke indeling gemaakt, op basis van hydrologische, bodemchemische en bodemfysische eigenschappen. De indeling bestaat uit een set van 6405 ruimtelijke eenheden (in jargon worden deze eenheden *plots* genoemd). De 6405 plots dekken gezamenlijk het Nederlandse landelijke gebied. Een plot bestaat uit een aantal gridcellen van 250x250 m<sup>2</sup>, die dezelfde unieke combinatie van bodem- en hydrologische eigenschappen hebben. De gridcellen hoeven niet aan elkaar te grenzen en kunnen verspreid liggen binnen een regio. Per plot wordt slechts één keer het onverzadigdezonemodel gedraaid, zodat er dus geen één-op-één koppeling is tussen beide modellen. De plotbenadering is voortgekomen uit de wens om de rekentijd van één STONE-run te beperken tot maximaal 24 uur. In de tijd dat STONE ontwikkeld is, was grid computing namelijk science fiction. Inmiddels is het accent van het beleid verschoven van generiek landelijk beleid naar beleid dat een regionale of zelfs lokale component heeft. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de (deel)stroomgebiedsvisies, die voor de EU-Kaderrichtlijn Water moeten worden ontwikkeld. Voor analyses met een regionale component is de plotbenadering minder geschikt. Ruimtelijke eenheden kunnen immers niet goed aan één bepaalde plaats worden gekoppeld. Er is daarom veel draagvlak om gezamenlijk één hydrologisch modelinstrumentarium te definiëren, waarin de plotbenadering verlaten wordt. In deze nieuwe benadering wordt het model

van de onverzadigde zone één-op-één gekoppeld aan het model van de verzadigde zone (met andere woorden: voor iedere gridcel van het grondwatermodel wordt ook één berekening met het onverzadigde model uitgevoerd).

In de workshop Hydrologie (25 november 1997) is de wens geuit om de hydrologische modellering van Alterra, RIZA en RIVM verder te harmoniseren. Om deze reden is toen besloten om een werkgroep 'Consensus Hydrologie' in het leven te roepen. De werkgroep had als doel:

*Het vergelijken van modelconcepten, schematisering en parameterisering, uitgewerkt voor een studiegebied, met het oog op een verbeterde modellering van de hydrologie van Nederland.*

De deelnemende instituten (Alterra, MNP en RIZA) hebben het voor landelijke of regionale modellering gebruikte modelinstrumentarium op het studiegebied Beerze-Reusel toegepast. In afzonderlijke rapportages wordt hiervan verslag gedaan (onder andere Van Walsum en Massop, 2003). In dit rapport worden de resultaten van het MNP-modelinstrumentarium LGM-SWAP gepresenteerd. De resultaten zijn gebruikt voor de eindrapportage van de werkgroep (Van der Giessen, 2005), waarin de resultaten zijn vergeleken in termen van concepten, schematisering, parameterisering en berekeningsresultaten. Het bevat tevens overkoepelende conclusies en aanbevelingen voor het nieuw te ontwikkelen Nationaal Hydrologisch Model.

## 1.2 Leeswijzer

In dit rapport wordt de koppeling van het MNP-instrumentarium voor de verzadigde en onverzadigde ondergrond besproken. Met dit gekoppelde model kunnen de waterstromen in het bodem- en grondwatersysteem, evenals de stroming vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater, berekend worden. In hoofdstuk 2 wordt een korte omschrijving van beide modellen gegeven. Hoofdstuk 3 beschrijft het concept van de koppeling. In dit hoofdstuk zal uitgebreid worden ingegaan op de dataoverdracht tussen beide modellen. Vervolgens is het gekoppelde instrumentarium toegepast voor het onderzoeksgebied van de Beerze-Reusel. Een globale beschrijving van de modelparameters is weergegeven in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 behandelt de modelberekeningen van zowel de basisrun als enkele scenario's. Het rapport wordt afgesloten met een discussie over sterke en zwakke punten van het gekoppelde instrumentarium en de toegepaste parameterisering van modeldata.

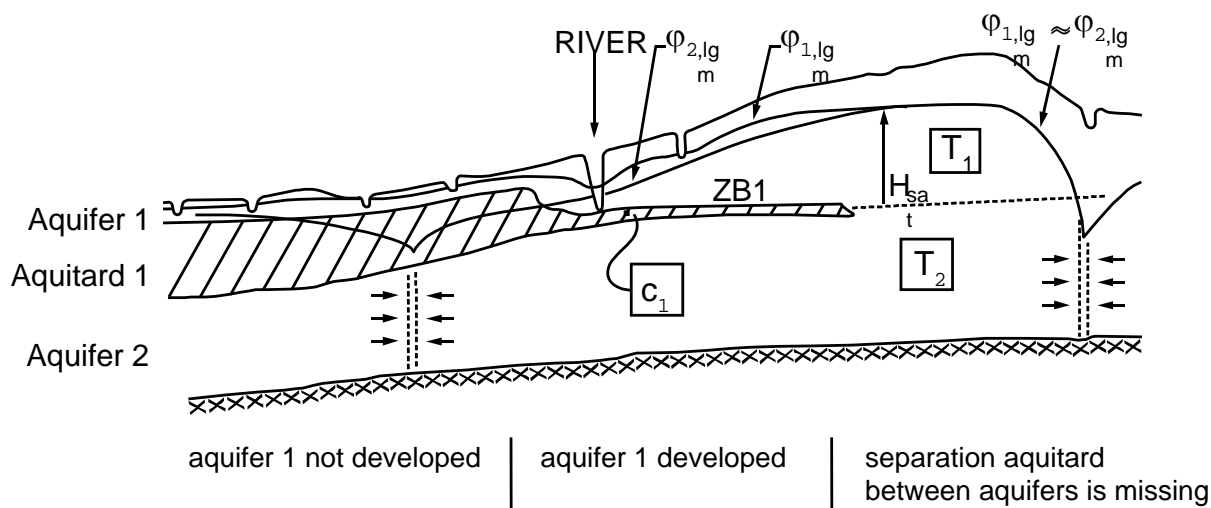
## 2. Beschrijving van het hydrologisch modelinstrumentarium van het MNP

De studie beschrijft de modelkoppeling tussen het Landelijk Grondwater Model (LGM) voor de verzadigde zone en het Soil Water Atmosphere Plant (SWAP)-model voor de onverzadigde zone. De modellen worden gekoppeld gebruikt. Dit hoofdstuk beschrijft eerst de individuele modellen en daarna hoe de koppeling gerealiseerd is.

### 2.1 De modellen

#### 2.1.1 Het Landelijk Grondwater Model (LGM)

Het Landelijk Grondwater Model (LGM) beschrijft de hydrologie van het Nederlandse grondwater (Stoppelenburg et al., 2005). De grondwaterstroming wordt in LGM berekend voor een systeem dat uit meerdere watervoerende pakketten (aquifers) en slecht doorlatende lagen (aquitards) bestaat. De stroming wordt in het watervoerende pakket overheersend horizontaal verondersteld en in de slecht doorlatende lagen verticaal. Figuur 2-1 toont de geohydrologische opbouw in het Landelijk Grondwater Model. Voor de landsdekkende studies wordt de ondergrond van Nederland geschematiseerd tot vijf watervoerende pakketten. Voor de eenvoud is de schematisatie in Figuur 2-1 beperkt tot twee watervoerende pakketten.

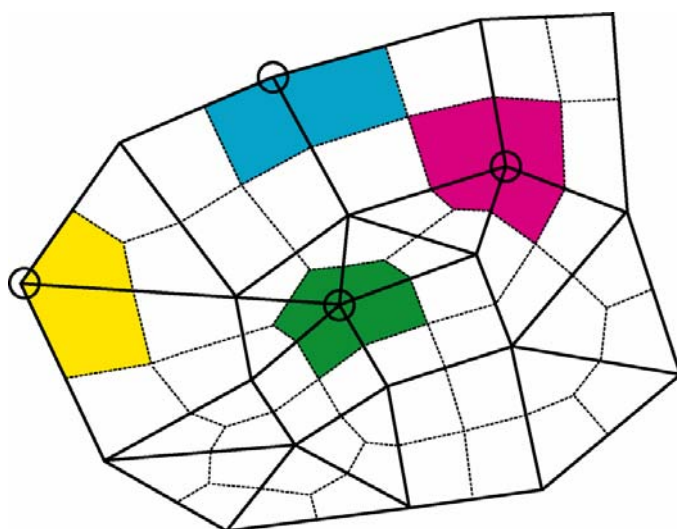


Figuur 2-1: Schets van het geohydrologische systeem van LGM.  $c_1$  is de hydraulische weerstand van de aquitard,  $T_1$  en  $T_2$  zijn het doorlaatvermogen van de watervoerende pakketten

Het bovenste watervoerende pakket (de freatische aquifer) heeft sterke interacties met het aanwezige oppervlaktewater. In LGM worden grote waterlopen, zoals rivieren, kanalen en grote beken, gemodelleerd als individuele lijnelementen. De infiltratie of drainage naar deze waterlopen is afhankelijk van het verschil tussen de grondwaterstijghoogte in het bovenste watervoerende pakket en het peil in de waterloop. Kleine waterlopen zoals sloten en greppels kunnen in grootschalige

grondwatermodellen niet individueel beschreven worden. Het effect van het klein oppervlaktewatersysteem wordt daarom beschreven door een grondwaterstandsafhankelijke infiltratie- of drainagerelatie.

De grondwaterstijghoogte en de grondwaterstroming worden berekend met behulp van een numeriek rekenprogramma, dat is opgezet volgens het principe van de eindige elementenmethode. Een dergelijk rekenprogramma lost langs iteratieve weg de differentiaalvergelijking op, die het stromingsproces beschrijft van een niet-stationaire grondwaterstroming. De differentiaalvergelijking is gebaseerd op de bewegingsvergelijking (de wet van Darcy) en de continuïteitsvergelijking. Om deze methode te kunnen toepassen is over het beschouwde gebied een netwerk gelegd, bestaande uit knooppunten en elementen. De vorm van de elementen kan zowel rechthoekig als driehoekig zijn. De hoekpunten van de elementen vormen de knooppunten van het model. De in- en uitvoer van de modelparameters en de berekeningsresultaten (stijghoogten, freatisch vlak en grondwaterfluxen) verlopen via de knooppunten van het netwerk. Rondom elk knooppunt wordt een zogenaamd *invloedsoppervlak* onderscheiden (Figuur 2-2). Alle parameterwaarden worden voor deze invloedsoppervlakten afgeleid. De waterlopen zijn geschematiseerd tot rechte lijnstukken en langs de elementgrenzen van het netwerk verwerkt.



**Figuur 2-2:** Voorbeeld van een eindige-elementennetwerk van LGM, bestaande uit knooppunten, elementen en invloedsgebieden. Invloedsgebieden zijn voor vier knooppunten ingekleurd

Een groot voordeel van een numeriek rekenprogramma is de zeer grote mate van flexibiliteit. Zo is bij de opzet van het model rekening gehouden met verschillende omstandigheden, bijvoorbeeld de waterstaatkundige situatie, de topografie, de geologische gesteldheid en het stijghoogteverloop in de ondergrond. De flexibiliteit is nog vergroot door de basisdata in het Geografisch Informatie Systeem onafhankelijk van het eindige-elementennetwerk op te slaan, waardoor bij een toepassing teruggevallen kan worden op de basisdata.

### 2.1.2 Het model SWAP

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. Het model is de opvolger van het Swatre-model, waarvan de eerste versie

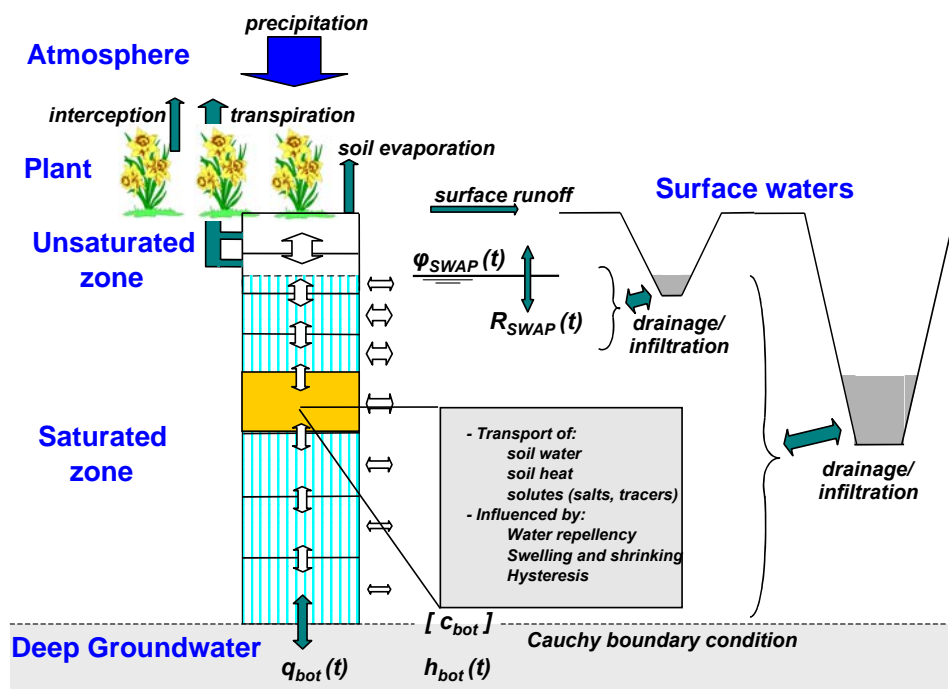


in 1978 is verschenen (Feddes et al., 1978). SWAP beschrijft de waterstroming in een eendimensionale, verticale kolom (Figuur 2-3). De waterstroming naar het oppervlaktewater (drainage) en naar de vegetatie wordt beschreven door zogenaamde sink-terminen. Het model houdt rekening met verticale heterogeniteiten: de bodemopbouw kan per laag worden opgegeven. De bovenrandvoorwaarde van het model wordt gevormd door neerslag en verdamping, die op dagbasis worden ingevoerd. De onderrandvoorwaarde van het grondwatersysteem is gebruikt om de interactie met het regionale grondwatersysteem vast te leggen. SWAP kent verschillende opties om deze onderrandvoorwaarde uit te rekenen:

- De Neuman-voorwaarde: hierbij wordt de grondwaterflux aan de onderrand opgelegd.
- De Dirichlet-voorwaarde: hierbij wordt de stijghoogte aan de onderrand opgelegd.
- De Cauchy-randvoorwaarde: hierbij wordt de grondwaterflux aan de onderrand berekend op basis van de grondwaterstijghoogte in het diepe grondwater.
- De vrije-drainagevoorwaarde: hierbij wordt het water aan de onderrand verondersteld vrij uit te stromen. De randvoorwaarde is feitelijk een speciale vorm van de Neuman-voorwaarde, die gebruikt wordt in systemen met zeer diepe grondwaterstanden.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van een combinatie van de Cauchy-voorwaarde en de Neuman-voorwaarde. Deze optie is speciaal voor dit onderzoek in SWAP-versie 2.09d ingebouwd. Deze versie is gedocumenteerd door middel van een theoretische beschrijving (Van Dam, 2000 en Van Dam et al., 1997).

Daarnaast heeft SWAP bodemfysische en waterhuishoudkundige gegevens nodig. De uitvoer wordt standaard op dagbasis gegenereerd. SWAP gebruikt de eindigedifferentiemethode om de Richards-vergelijking op te lossen.



Figuur 2-3: Processen en schematisering SWAP

## 2.2 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 freatisch 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) slecht doorlatende 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.
- Een van de termen in de waterbalans is de afstroming naar het kleinoppervlaktewater (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 het knooppunt binnen LGM). De regionale interactie van het drainagesysteem met zijn omgeving vindt plaats via LGM. Tevens is de ruimtelijke uitgestrektheid van SWAP en LGM voor elk knooppunt hetzelfde (één-op-éénrelatie), waarop ook de parameterisatie is gebaseerd.
- LGM rekent in het freatisch watervoerende pakket een (regionale) horizontale flux uit. Deze flux kan aanzienlijk zijn bij grondwateronttrekkingen uit het freatische watervoerende pakket en bij waterlopen (rivieren, kanalen) die als lijnsegment in LGM zijn aangebracht. 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 onttrekking in de onderste laag van SWAP te plaatsen.

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 en freatische bergingscoëfficiënt de simulatieperiode (bijvoorbeeld 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 freatisch vlak en een bergingscoëfficiënt, waarna de volgende iteratie weer met een LGM-run start.

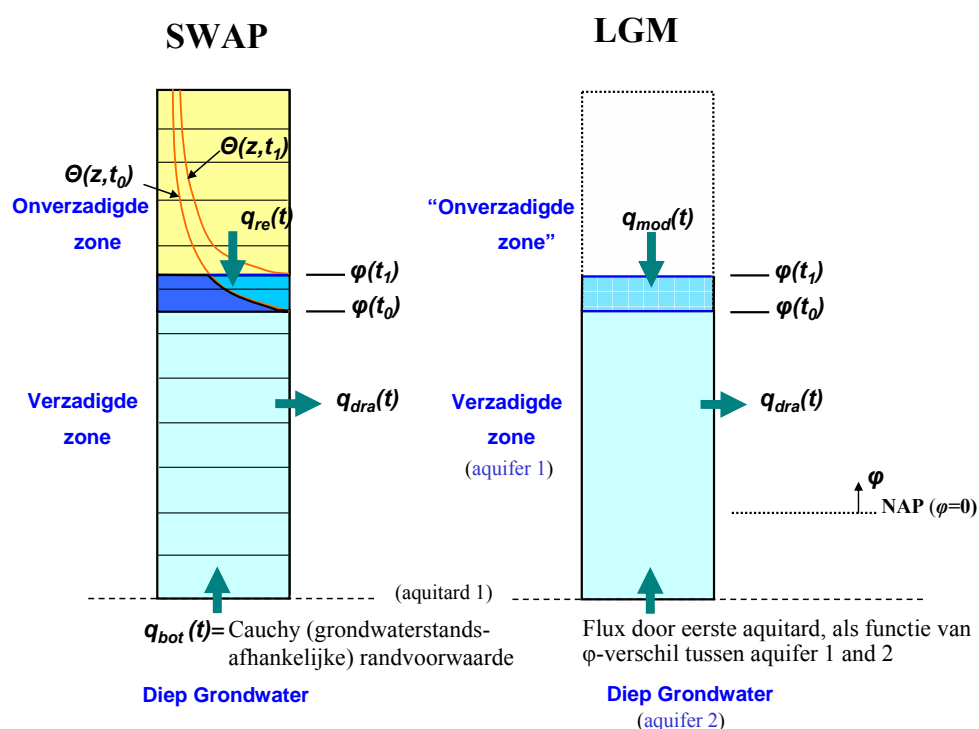
## 2.3 Twee methoden voor koppeling LGM-SWAP

Het freatische watervoerende pakket wordt in beide modellen in de berekening meegenomen. Omdat in LGM en SWAP identieke termen in de waterbalans voorkomen, moeten uiteindelijk in de geconvergeerde situatie overeenkomende termen bij benadering gelijke waarden hebben bereikt. Als dit niet het geval zou zijn,

zou dit een fout in het koppelingsconcept betekenen. De freatische grondwaterstand speelt hierin een cruciale rol, omdat de fluxtermen (drainageflux naar kleinoppervlaktewater, flux door onderrand van SWAP) er een directe relatie mee hebben. Figuur 2-4 geeft een schematisch overzicht van de koppeling tussen SWAP en LGM. 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 freatisch vlak bekend zijn. Deze flux wordt hier als de grondwateraanvulling ( $q_{re}$ ) aangeduid. De flux door het freatisch 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 zijn twee aanpakken gevolgd, hierna aangeduid als methode 1 en methode 2.

### 2.3.1 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 freatisch vlak.



Figuur 2-4: Koppelingsschema LGM-SWAP

Bij een verandering (in tijd) van de freatische grondwaterstand behoort een hoeveelheid water (bodemvocht) 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 (vergelijking 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 kleinoppervlaktewater [m/d]
- $\Delta t$  : 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 freatisch vlak en is een in de tijd variërende grootheid. Om  $S$  te kunnen berekenen moet gedeeld worden door de verandering van het freatisch vlak  $\Delta \varphi$ . Dit levert numerieke problemen op bij kleine veranderingen in het freatisch 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.

### 2.3.2 Methode 2: koppeling met constante bergingscoëfficiënt en tijdsafhankelijke surrogaat grondwateraanvulling

Daarom is bij de koppeling van SWAP en LGM voor een andere aanpak gekozen, door aan te nemen dat  $S$  constant in tijd is en gelijk is aan de maximale bergingscoëfficiënt ( $\theta_{sat}$ ) van de bodemlaag in de SWAP-kolom waarin het freatisch vlak ligt.  $\theta_{sat}$  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 surrogaatvariabele). Het is niet meer de flux door het freatisch vlak gedurende tijdstap  $\Delta t$ .

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

In de vergelijking 2 is  $\theta_{sat}$  constant en afhankelijk van de bodemfysische eigenschappen van de grondlaag. Dit heeft ontegenzeggelijk numerieke voordelen. De modelflux  $q_{mod}$  is nu de enige onbekende grootheid 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 van dezelfde berekeningsresultaten van SWAP is uitgegaan. Dat is ook bevestigd toen beide methoden naast elkaar werden gebruikt. Echter de stabiliteit en robuustheid van methode 2 hebben ertoe geleid dat uiteindelijk alleen voor methode 2 een volledig geconvergeerde berekening is gedaan.

## **2.4 Uitwisseling van data tussen LGM en SWAP (randvoorwaarden)**

### **2.4.1 Onderrandvoorwaarde van SWAP, berekend met LGM**

De meest gebruikte onderrandvoorwaarden van een onverzadigd grondwatermodel, gekoppeld aan een regionaal verzadigd grondwatermodel, zijn de grondwaterflux als functie van de tijd (Neuman) en de in de tijd variërende grondwaterstijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket (Cauchy). De Neuman-grondwaterflux-randvoorwaarde heeft geen directe relatie met de freatische grondwaterstand en dus ook niet met veranderingen daarin. Voor een directe koppeling tussen verzadigd en onverzadigd grondwatermodel in ruimte en tijd (1:1) zal de Neuman-flux-randvoorwaarde goed voldoen als de temporele variatie in de opgegeven flux aan de onderzijde van SWAP bij benadering goed bekend is. Om grote verschillen in de uitkomsten te voorkomen, moet vanwege de onderlinge beïnvloeding van onverzadigde en verzadigde zone de tijdstap waarin data worden uitgewisseld klein worden gehouden.

In geval er geen één-op-éénkoppeling in tijd wordt toegepast (offline) zal, vooral als het verzadigdegrondwatermodel met een grotere (data in- c.q. uitvoer)tijdstap werkt dan het onverzadigde model, koppeling onvoldoende zijn om de dynamiek van de freatische grondwaterstand in de onderrandflux tot uiting te laten komen. Dit kan leiden tot een onder- of overschatting van de grondwaterflux over de onderrand met als gevolg een te hoog of te laag berekende grondwaterstand in het onverzadigdegrondwatermodel gedurende de invoertijdstap van het verzadigdegrondwatermodel. De met het onverzadigdegrondwatermodel berekende grondwaterflux over het freatisch vlak, als invoer voor verzadigdegrondwatermodel, zal hierdoor eveneens worden beïnvloed.

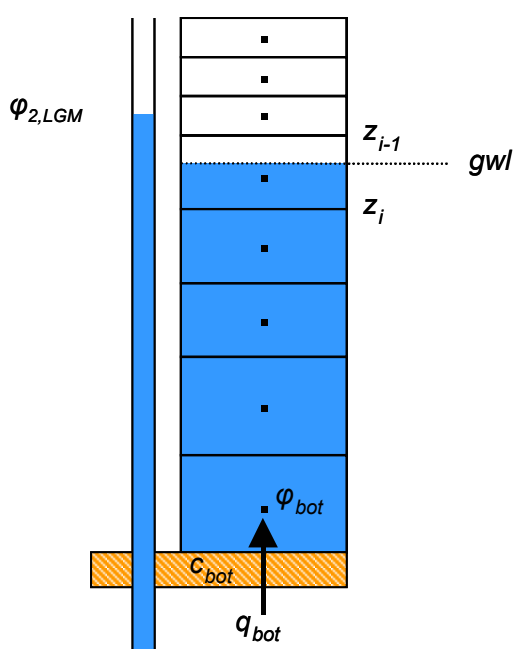
De grondwaterstijghoogte in het watervoerende pakket dat onder de onderzijde van de SWAP-kolom ligt, wordt als functie van de tijd opgegeven (Cauchy randvoorwaarde). SWAP berekent voor iedere (interne) tijdstap de grondwaterflux over de onderrand als functie van de in SWAP berekende grondwaterstijghoogte in de onderste numerieke laag en de opgegeven grondwaterstijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket. Een belangrijke voorwaarde is dat zich binnen het freatische vlak geen potentiaal verval voordoet. LGM gaat uit van de Dupuit-Forchheimer benadering (geen verticale grondwaterstroming in de watervoerende pakketten). Dit betekent een oneindig grote verticale doorlatendheid met als gevolg een constante potentiaal in verticale richting. Om geen potentiaal verval te simuleren in SWAP moeten de verticale weerstanden in de verschillende bodemcompartimenten relatief klein zijn om onderlinge verschillen te voorkomen. Anders moet de weerstand in de SWAP-kolom verwerkt worden in de weerstand van de slecht doorlatende laag aan de onderzijde van SWAP-kolom.

De randvoorwaarde aan de onderkant van de SWAP-kolom wordt als volgt berekend (zie ook Figuur 2-5):

$$q_{bot} = \frac{\varphi_{2,lgm} - \varphi_{bot}}{c_{bot}} + q_{left,lgm} \quad (3)$$

waarin

- $\varphi_{bot}$  = grondwaterstijghoogte in onderste numerieke laag (m)
- $\varphi_{2,LGM}$  = grondwaterstijghoogte in 2e watervoerende pakket van LGM [m]
- $c_{bot}$  = weerstand slecht doorlatende laag [d]
- $q_{bot}$  = Cauchy-onderrandflux [m/d]
- $q_{left,lgm}$  = leftoverflux van freatisch watervoerend pakket in LGM, die later zal worden uitgelegd



**Cauchy :**  $q_{bot} = \frac{\varphi_{2,LGM} - \varphi_{bot}}{c_{bot}}$

- $\varphi_{bot}$  = grondwaterstijghoogte in onderste numerieke laag (m)
- $\varphi_{2,LGM}$  = grondwaterstijghoogte in 2<sup>e</sup> watervoerende pakket van LGM [m]
- $c_{bot}$  = weerstand slechtdoorlatende laag [d]
- $q_{bot}$  = Cauchy onderrandflux [m/d]
- $gwl$  = freatische grondwaterstand [m]
- $z_i$  &  $z_{i+1}$  = z-diepten van bodemcompartiment [m]

Figuur 2-5: Cauchy-onderrandvoorwaarde van SWAP

Opgemerkt moet worden dat niet de freatische grondwaterstand maar de grondwaterstijghoogte in het onderste bodemcompartiment wordt gebruikt om de grondwaterflux over de onderrand te berekenen. In SWAP is er 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

weerstand aan de onderkant van de SWAP-kolom is dus gelijk aan de hydraulische weerstand tussen het freatische en het hieronder gelegen watervoerende pakket in LGM ( $c_1$ -laag).

De leftoverflux  $q_{left,LGM}$  (m/d) is speciaal ingevoerd voor de koppeling van LGM en SWAP. De leftoverflux is een grondwaterflux, samengesteld uit hydrologische processen in het freatische watervoerende pakket, die wel in LGM in beschouwing worden genomen, maar niet het onverzadigde grondwatermodel SWAP. De leftoverflux  $q_{left,LGM}$  is omgezet van een volumeflux ( $m^3/d$ ) naar een ruimtelijk gedistribueerde grondwaterflux (m/d) en kan uit de volgende drie grondwaterfluxen bestaan:

$$q_{left,LGM} = \frac{Q_{riv}}{A_{inf}} + \frac{Q_{well}}{A_{inf}} + \frac{Q_{hor}}{A_{inf}} \quad (4)$$

Waarin:

- $Q_{riv}$  ( $m^3 d^{-1}$ ) : de volumeflux van oppervlaktewater dat als lijnsegment in LGM is verwerkt,
- $Q_{well}$  ( $m^3 d^{-1}$ ): de grootte van de grondwateronttrekking in het freatische watervoerende pakket van LGM,
- $Q_{hor}$  ( $m^3 d^{-1}$ ) : de netto horizontale grondwaterflux in een knooppunt van het eindige-elementennetwerk van of naar de aangrenzende knooppunten,
- $A_{inf}$  ( $m^2$ ) : het invloedsoppervlak van het knooppunt van het LGM-netwerk.

De leftoverflux zal groot kunnen zijn in de onmiddellijke omgeving van grondwateronttrekkingen en grote waterlopen, die als lijnsegment in LGM zijn opgenomen. De horizontale grondwaterflux zal in veel gevallen gering zijn, vanwege de geringe dikte en daardoor het doorlaatvermogen van het freatische watervoerende pakket.

#### 2.4.2 Bovenrandvoorwaarde van LGM, berekend door SWAP

Het transiënte verzadigde grondwatermodel LGM heeft als bovenrandvoorwaarde waarden van de grondwaterflux over het freatische vlak en de freatische bergingscoëfficiënt nodig. In paragraaf 2.3 is aangegeven dat de bergingscoëfficiënt  $S$  afhankelijk is van deze grondwaterflux, de verandering van het freatische vlak en in de tijd varieert. Om  $S$  te kunnen berekenen, moet gedeeld worden door de verandering van het freatische vlak  $\Delta\phi$ . Dit levert numerieke problemen op bij kleine waarden van  $\Delta\phi$ . 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 ( $\theta_{sat}$ ) van de bodemlaag in de SWAP-kolom waarin het freatische vlak ligt.  $\theta_{sat}$  levert de maximaal mogelijke hoeveelheid (niet aan korrelstructuur gebonden) water die aan de kwantitatieve grondwaterstroming mee kan doen ( $\theta_{sat} \times \Delta\phi$ ). Deze hoeveelheid water wordt gelijk gesteld aan de modelflux  $q_{mod}$ .

In het geval van diepe grondwaterstanden moet voorkomen worden dat tijdens de berekening van het watertransport in de onverzadigde zone de gehele SWAP-kolom onverzadigd wordt. In deze situaties is het niet mogelijk om de Cauchy-voorwaarde als onderrandvoorwaarde te gebruiken. Daarom is bij diepe grondwaterstanden voor een andere soort onderrandvoorwaarde gekozen om LGM toch een grondwaterflux te

kunnen leveren. Dit is de zogenaamde ‘free drainage’-flux, een speciaal geval van de Neumann-randconditie. De free-drainageflux veronderstelt een unitgradiënt over de onderrand, waardoor de maximale onderrandflux gelijk is aan de hydraulische doorlatendheid van de onverzadigde zone van het onderste bodemcompartiment van SWAP. De voorwaarde is in vergelijking 5 uitgewerkt .

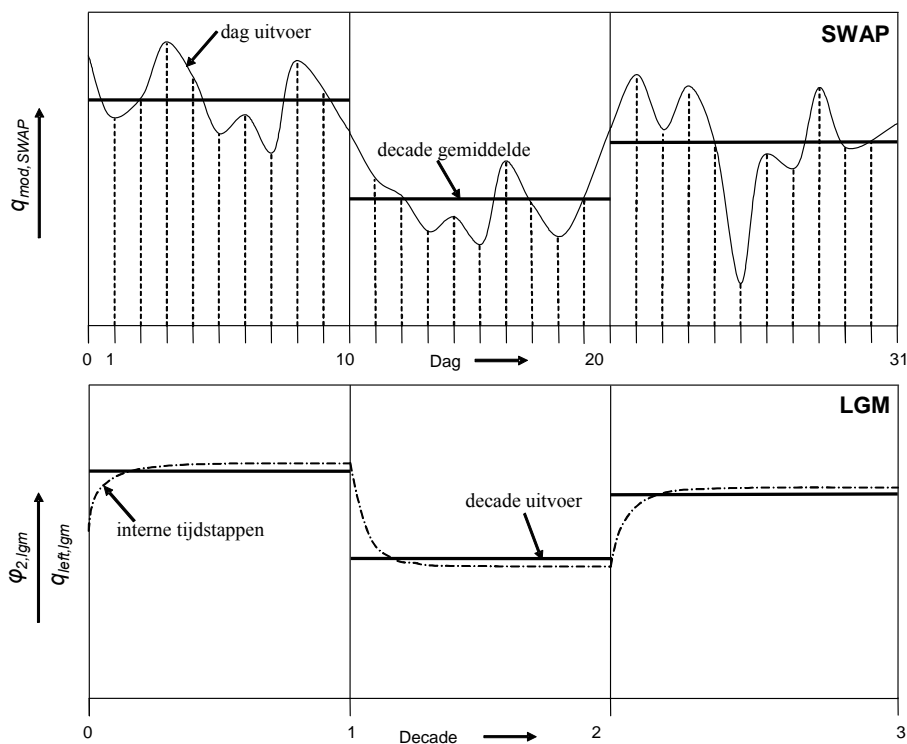
$$\frac{\partial H}{\partial z} = 1 \quad \Rightarrow \quad q_{re} = -k_{numlay} \quad \text{als} \quad gws_{lgm} > 6m - mv \quad (5)$$

Hierin is  $k_{numlay}$  (m/d) de hydraulische doorlatendheid van de onverzadigde zone van het onderste bodemcompartiment van SWAP en  $gws_{lgm}$  (m) is de hoogste / meest ondiepe grondwaterstand tijdens de gehele simulatieperiode van LGM.

### 2.4.3 Aspecten met betrekking tot tijd middeling

De koppeling is uitgevoerd met een transiënt op decade gebaseerde in-/ouput van LGM en een transiënte op dagbasis gebaseerde in/output van SWAP. De uitvoerwaarden van beide modellen zijn uitgewisseld op decadebasis, volgens het model met de grootste in-/uitvoertijdstep, dat in dit geval LGM is. De op dagbasis gegenereerde uitvoerwaarden van SWAP ( $q_{mod}$ ) worden (gewogen) gemiddeld over de decade volgens onderstaande regels van de tijd-middelingsprocedure (Figuur 2-6):

- een jaar bestaat uit 36 decades;
- de eerste twee decades beslaan elk tien dagen;
- de derde decade bevat het aantal dagen om de maand te completeren;
- de schrikkel dag wordt verrekend.



**Figuur 2-6: Effecten van tijdmiddeling van het gekoppelde LGM-SWAP-model. Boven: daguitvoer van SWAP gemiddeld naar decadewaarden voor LGM. Onder: interne tijdstappen van LGM gebruikt om decadeuitvoer voor SWAP te genereren.**

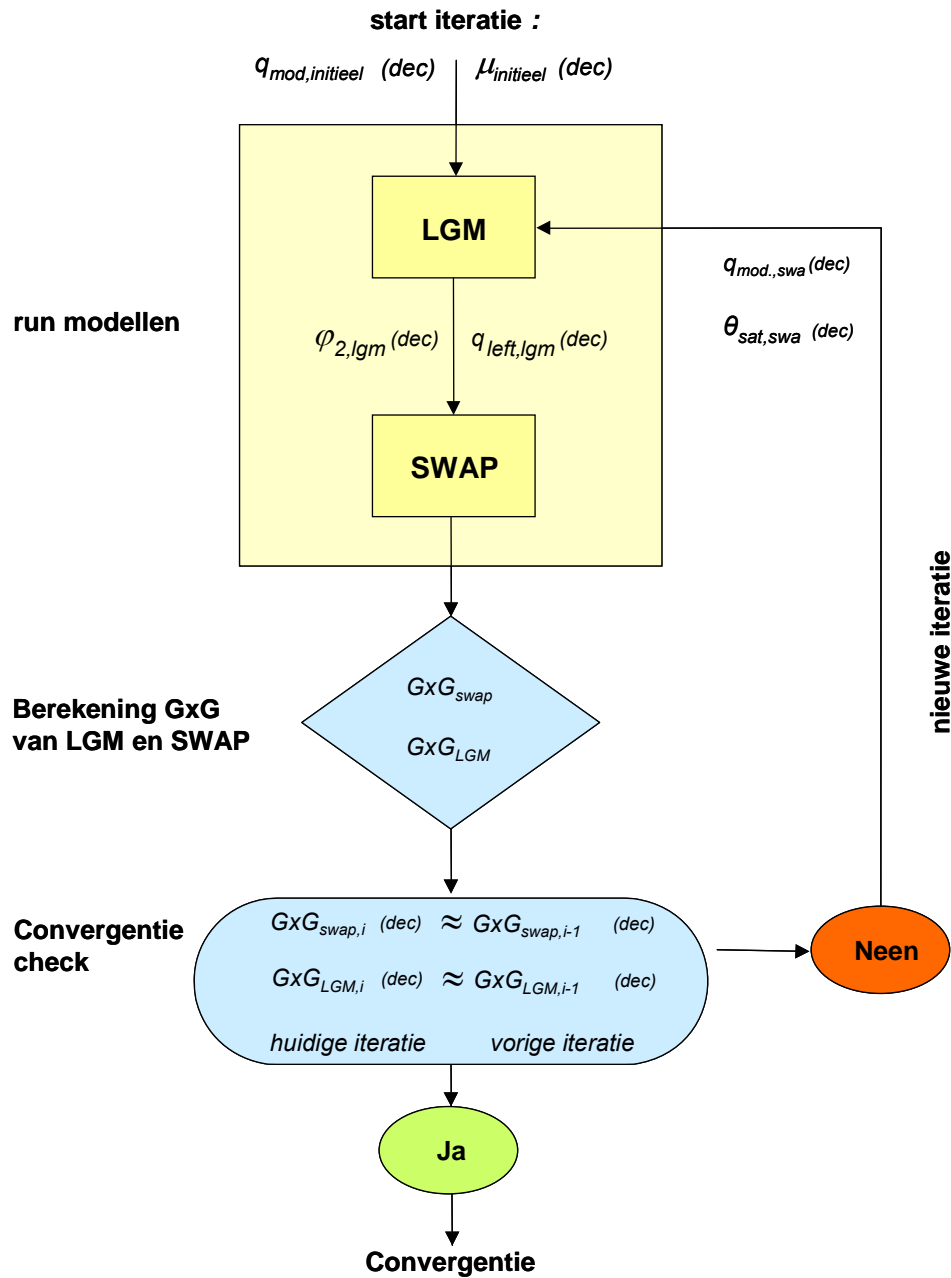


Het LGM-model heeft een interne tijdstap om convergentie te bereiken die kleiner is dan de in-/uitvoertijdstap. De interne tijdstap aan het begin van de decade kan worden opgegeven. Ook het maximale verschil in stijghoogte aan het begin en eind van de interne tijdstap is een invoer gegeven. De uitvoergegevens van LGM ( $\varphi_{2,lgm}$  en  $q_{left,lgm}$ ) zijn weergegeven per decade en gebruikt als invoer voor de onderrand van het SWAP-model. In Figuur 2-6 is het effect van het tijdmiddelen weergegeven.

## 2.5 Convergentieprocedure

De koppeling tussen LGM en SWAP is gebaseerd op de volgende iteratieve procedure (Figuur 2-7):

- Run LGM met initiële invoerseries van de grondwaterflux  $q_{mod}$  (m/d) en de freatische bergingscoëfficiënt  $S$  (-), beide per decade. Voor  $q_{mod,initieel}$  is gestart met een sinusvormige grondwateraanvulling met een gemiddelde waarde van 0,8 mm/d en een amplitude van 0,4 mm. De maximale waarde wordt bereikt op dag 90. De freatische bergingscoëfficiënt start met een waarde van 0,3. Voor alle knooppunten van het eindige-elementennetwerk zijn dezelfde invoerseries opgegeven als randvoorwaarde voor LGM.
- De decadewaarden van de met LGM berekende grondwaterstijghoogten van het tweede watervoerende pakket  $\varphi_{2,lgm}$  (m) en de freatische leftoverflux  $q_{left,lgm}$  (m/d) worden gebruikt als de onderrandvoorwaarde van SWAP, waarna het model SWAP gedraaid wordt.
- SWAP berekent de freatische grondwaterstand, freatische bergingscoëfficiënt en grondwaterflux  $q_{mod}$  op dagbasis. De dagwaarden worden daarna omgezet naar een gemiddelde waarde per decade voor de beoordeling van de convergentie en de invoer van LGM.
- De beoordeling van de convergentie gebeurt door het vergelijken van de freatische grondwaterstand die is berekend door zowel SWAP als LGM. LGM levert de uitvoer van de freatische grondwaterstand als een gemiddelde per decade. De freatische grondwaterstand van SWAP is omgezet naar 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 extreemste decadewaarden (hoogste, respectievelijk 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. De convergentie wordt bereikt als de GxG van LGM én SWAP geen significant verschil met de GxG uit de vorige run vertoont.



Figuur 2-7: Convergentieprocedure van het gekoppelde LGM-SWAP-model

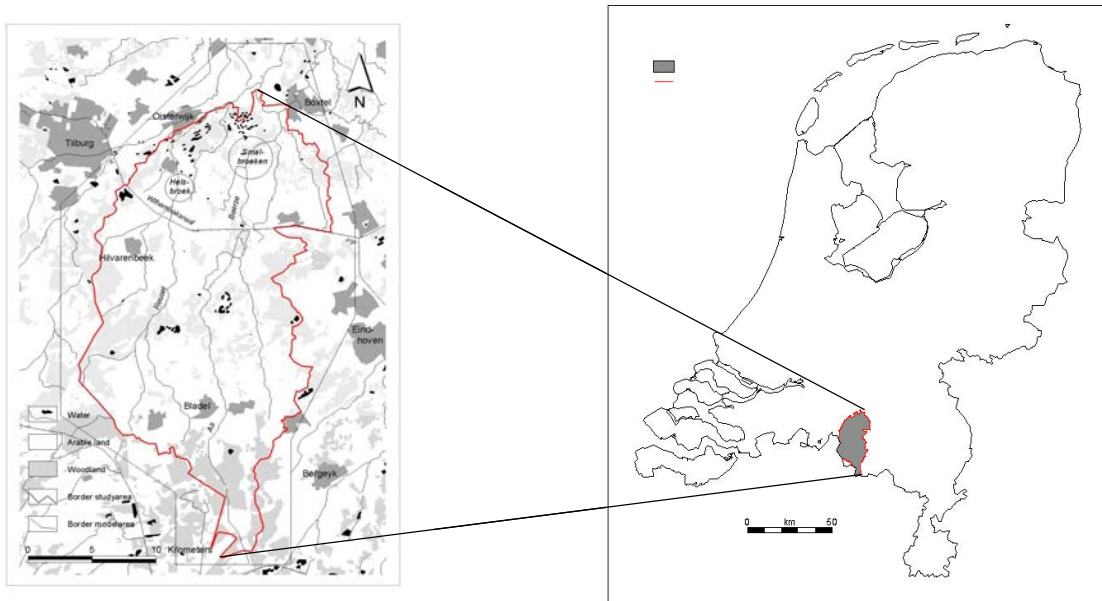
## **3. Beschrijving van het stroomgebied van de Beerze en de Reusel**

### **3.1 Inleiding**

Het gekoppelde modelinstrumentarium is toegepast voor het stroomgebied van de Beerze en de Reusel. Het studiegebied is gebruikt om modelconcepten van Alterra (SIMGRO), RIZA (NAGROM-MOZART) en RIVM (LGM/SWAP) te vergelijken (Van der Giessen, 2005). Er is voor het studiegebied Beerze-Reusel gekozen omdat Alterra en RIZA uitvoerig modelonderzoek hebben uitgevoerd voor dit gebied. Bovendien is het gebied in modelmatig opzicht uitdagend. De geohydrologische opbouw is gecompliceerd, er komen zowel diepe als ondiepe grondwaterstanden voor, er zijn droogvallende waterlopen, etcetera. Door deze ruimtelijke en temporele variatie kunnen verschillen in toegepaste modelconcepten qua performance eerder aan het licht komen.

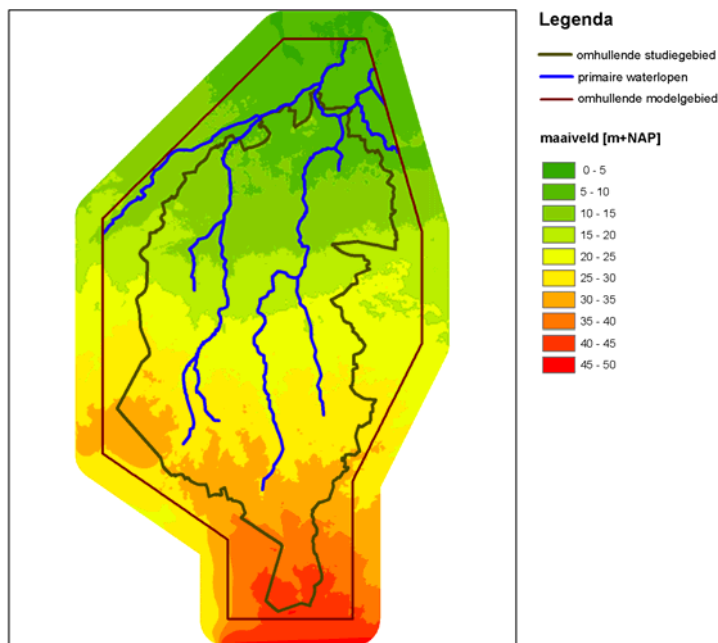
Het accent van de studie ligt op modelsystemen voor lands(deel)dekkende toepassingen. Onderzocht is hoe de tot nu toe voor praktische beleidsanalyses gebruikte methoden kunnen worden verbeterd. Het gaat om verbetering in termen van de kwaliteit van de modelresultaten van vooral grondwaterstanden, drainagefluxen en gewasverdamping, en de expliciete geografische interpreteerbaarheid en representativiteit ervan. Daarnaast is gekeken of en hoe met het model verantwoord ingrepen in het geohydrologische systeem en dus beleidsmaatregelen kunnen worden doorgerekend. Om een goed beeld te kunnen krijgen van de verschillende modelconcepten is gekozen voor een set van basisgegevens, die voor elk modelinstrumentarium gebruikt is, op basis waarvan de parameterisatie van het model plaatsvindt. De meest gedetailleerde gegevens van het studiegebied Beerze-Reusel zijn te vinden in het Alterra-onderzoek (Van Walsum et al., 2002). Deze gegevens hebben gediend als basisdata voor dit onderzoek.

Het studiegebied van de Beerze en de Reusel behoort tot het stroomgebied van de Dommel in Brabant. Het omvat het stroomgebied van de Beerze en de Reusel en heeft een omvang van circa 45.000 ha. In Figuur 3-1 is de ligging van het studiegebied weergegeven. Het gebied ligt voor een klein deel in België. De waterscheiding tussen de Reusel en de Poppelsche Loop vormt de westgrens van het studiegebied. In het oosten vormt de waterscheiding tussen de Kleine Beerze en de Dommel de grens van het studiegebied. De zuidgrens wordt gevormd door de waterscheiding tussen het stroomgebied van de Maas en de Schelde. De noordgrens van het studiegebied ligt ter hoogte van het punt waar de Beerze in de Essche Stroom uitmondt.



**Figuur 3-1: Ligging studiegebied Beerze-Reusel**

Het stroomgebied van de Beerze en de Reusel ligt in het Brabantse Dekzandgebied. Het gebied helt van het zuiden (de Kempen) met een hoogteligging van circa 44 m+NAP naar het noorden (rivierengebied) met een maaiveldhoogte van circa 6 m+NAP). Het gebied wordt doorsneden door een aantal beekdalen, waarvan de dalen van de Beerze en de Reusel de belangrijkste zijn. De beekdalen zijn in het landschap ingesneden. In Figuur 3-2 is het ruimtelijke beeld weergegeven van de maaiveldhoogten in het studiegebied.



**Figuur 3-2: Hoogte van maaiveld (m+NAP)**

## 3.2 Geohydrologie

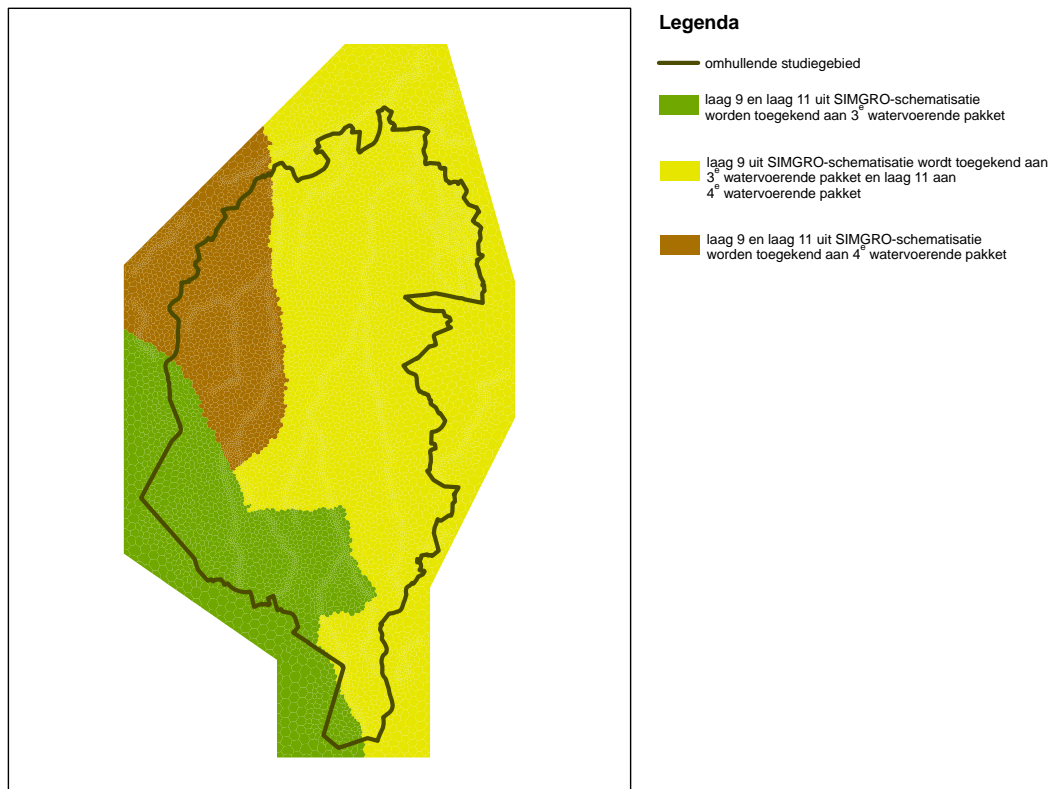
De basisdata van het studiegebied Beerze-Reusel bevat een geohydrologische schematisatie van de ondergrond tot acht watervoerende pakketten. Voor lands(deel)dekkende toepassingen is deze schematisatie te gedetailleerd. De geohydrologische schematisatie is vereenvoudigd van de oorspronkelijke acht watervoerende pakketten naar vier watervoerende pakketten. Ook moeten hierdoor slecht doorlatende lagen (aquitards) worden samengevoegd. In Tabel 3-1 is aangegeven hoe de samenvoeging is uitgevoerd, uitgaande van de basisdata.

**Tabel 3-1: Geohydrologische schematisatie van data uit het project ‘Klimaat en beken’**

Laagnummer basisdata	Geologische formatie	Schematisatie basisdata	Nieuwe schematisatie
1	<b>Nuenen fijn zand</b>	<b>wvp 1</b>	wvp 1
2	<b>Nuenen leem</b>	<b>aquitard 1</b>	aquitard 1
3	<b>Sterkesel/Nuenen zand</b>	<b>wvp 2</b>	wvp 2
4	<b>Kedichem/Tegelen klei</b>	<b>aquitard 2</b>	aquitard 2
5	<b>Kedichem/Tegelen zand</b>	<b>wvp 3</b>	wvp3
6	<b>Tegelen klei</b>	<b>aquitard 3</b>	aquitard 2
7	<b>Tegelen zand</b>	<b>wvp 4</b>	wvp 3
8	<b>Maassluis/Belfeld klei</b>	<b>aquitard 4</b>	aquitard 3
9	<b>Belfeld zand</b>	<b>wvp 5</b>	wvp 3 en 4
10	<b>Kallo/Reuver klei</b>	<b>aquitard 5</b>	aquitard 3
11	<b>Schinveld zand</b>	<b>wvp 6</b>	wvp 3 en 4
12	<b>Oosterhout/Brunssum klei</b>	<b>aquitard 6</b>	aquitard 3
13	<b>Zanden van Pey</b>	<b>wvp 7</b>	wvp 4
14	<b>Brunssum klei</b>	<b>aquitard 7</b>	aquitard 3
15	<b>Waubach zand</b>	<b>wvp 8</b>	wvp 4

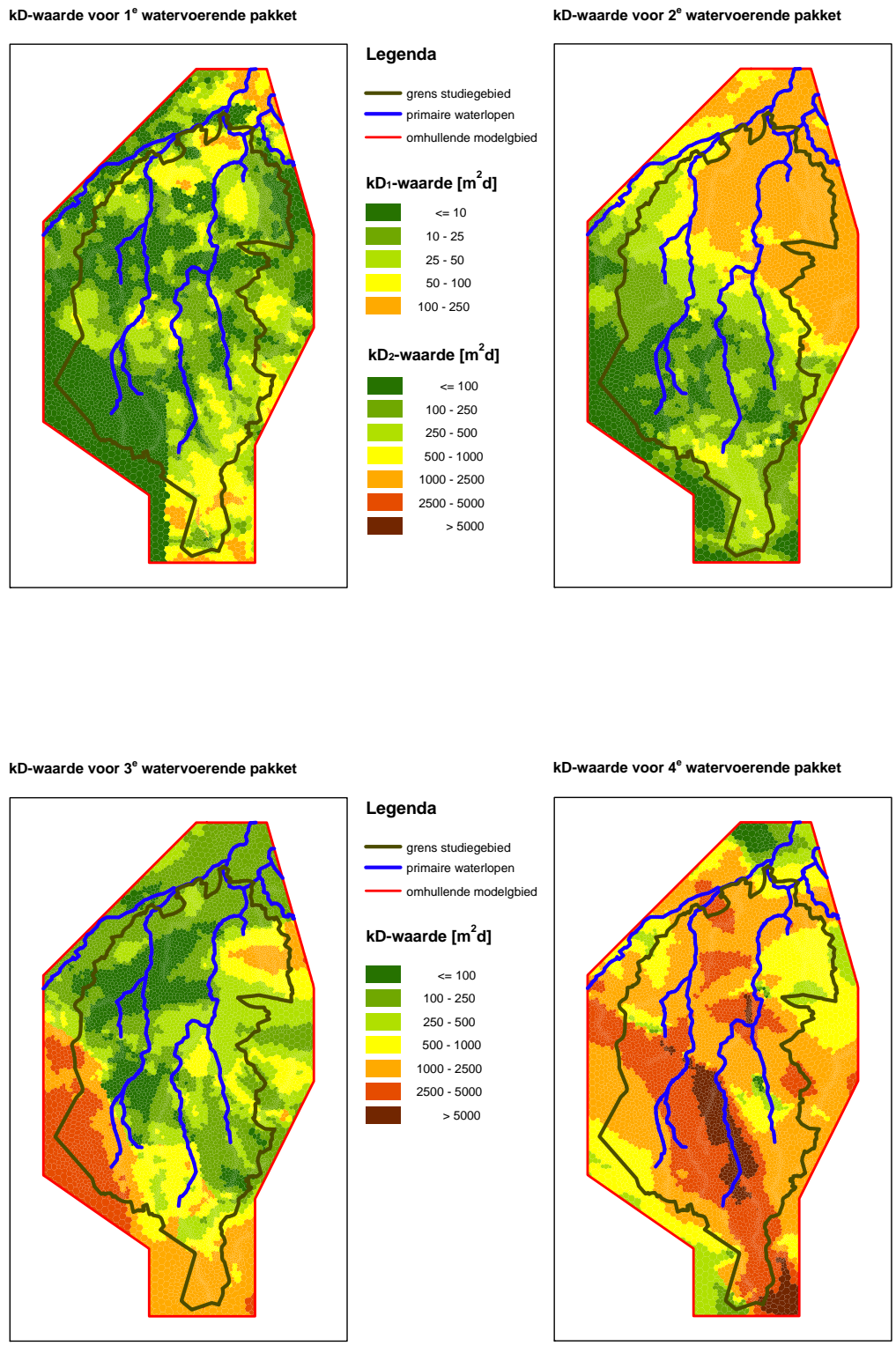
Wvp = watervoerend pakket

In Figuur 3-3 is ruimtelijk weergegeven hoe de samenvoeging van vooral het derde en vierde watervoerende pakket heeft plaatsgevonden.



**Figuur 3-3: Samenvoeging watervoerende lagen uit project 'Klimaat en beken' tot landelijke schematisatie**

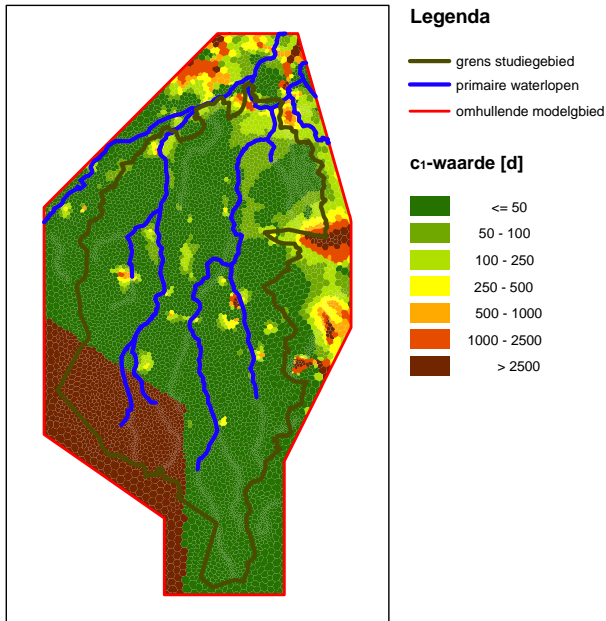
Het doorlaatvermogen per watervoerende pakketten is weergegeven in Figuur 3-4.



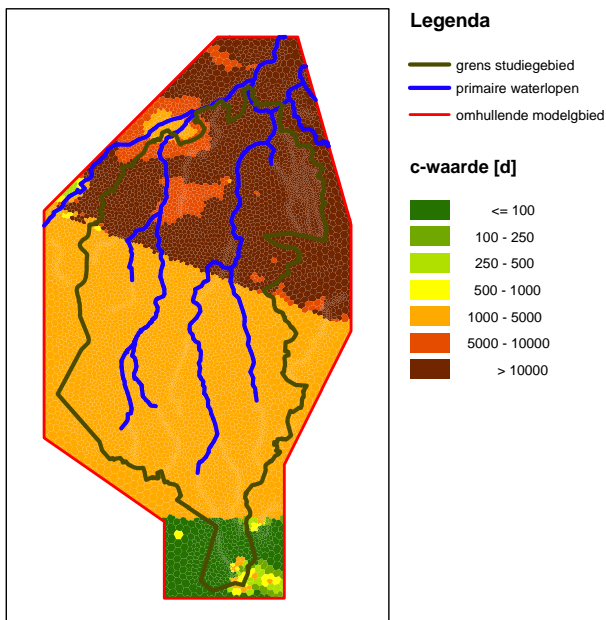
Figuur 3-4: Doorlaatvermogen (kD-waarde) van de vier watervoerende pakketten

Op grond van de samenvoeging van de watervoerende pakketten zijn ook de betreffende slecht doorlatende lagen samengevoegd tot drie lagen. In Figuur 3-5 is per slecht doorlatende laag de ruimtelijke verdeling van de weerstand tegen verticale grondwaterstroming weergegeven.

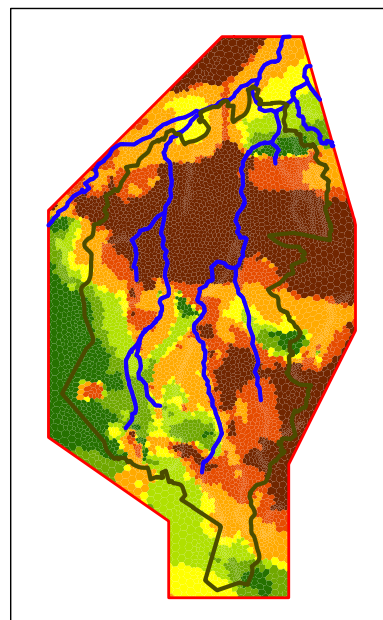
c-waarde voor 1° slechtdoorlatende laag



c-waarde voor 2° slechtdoorlatende laag



c-waarde voor 3° slechtdoorlatende laag



**Figuur 3-5: Weerstand (c-waarde) van de drie slecht doorlatende lagen**



### 3.3 Oppervlaktewater

Zoals in Paragraaf 2.1 vermeld is, worden grote waterlopen (rivieren en beken) in LGM als individuele lijnelementen beschreven en kleine waterlopen als gelumpte sink-termen.

#### 3.3.1 Rivieren en beken

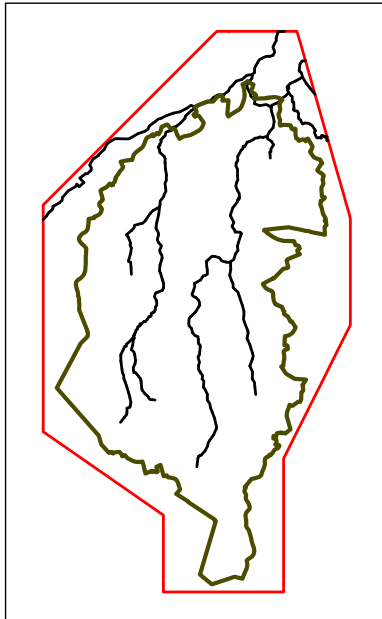
De grondwaterstand in het bovenste watervoerende pakket wordt sterk beïnvloed door het aanwezige oppervlaktewater. De belangrijkste waterlopen in het gebied, delen van de Beerze en de Reusel, zijn in het model verwerkt als lijnsegmenten, die samenvallen met de randen van de elementen van het eindig-elementennetwerk. De grondwaterinfiltratie of drainage is afhankelijk van de infiltratie- of drainageweerstand en het verschil tussen de grondwaterstijghoogte in het bovenste watervoerende pakket en het peil in de waterloop (paragraaf 2.1). Voor elk rivierknooppunt moet daarom een waterpeil worden afgeleid. In deze studie zijn hiervoor stuwpeilen (boven- en benedenstrooms) van de beek gebruikt. De stuwpeilen zijn, rekening houdend met de loop van de beek, lineair geïnterpoleerd naar de rivierknooppunten. Er is geen rekening gehouden met variabiliteit in de tijd van waterpeilen. Deze keuze is gemaakt omdat de tijdsafhankelijke parameterinvoer van lijnelementen in het huidige LGM niet operationeel is. De software, die voor het LGM wordt gebruikt, bezat oorspronkelijk een optie om ook tijdsafhankelijke waterpeilen van lijnelementen te kunnen inlezen. Tijdens de implementatie van GIS in LGM (geen tijdsafhankelijke data, stationair grondwatermodel) en de daarmee gepaard gaande aanpassing van de invoerroutines van LGM is de optie van een in de tijd variërend waterpeil van de lijnelementen niet meegenomen. Dit betekent dat het waterpeil in de beek in de natte periode wordt onderschat (te laag ten opzichte van de werkelijkheid) en in de droge periode overschat (te hoog ten opzichte van de werkelijkheid). Dit zal in de omgeving van de beek invloed hebben op de grondwaterstand en dus op de stroming van grondwater van of naar de beek.

#### 3.3.2 Sloten en greppels

Het stelsel van sloten en greppels, het secundaire en tertiaire drainagesysteem, 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 het oppervlaktewatersysteem niet in het model verwerkt worden als individuele waterlopen. Het effect van het kleinoppervlaktewater is daarom gedefinieerd als een diffuse (gelumpte) grondwaterstand-afvoerrelatie, gebaseerd op de ontwateringsbasis en de drainageweerstand (paragraaf 2.1). In Figuur 3-6 is de ligging van waterlopen van het secundaire en tertiaire stelsel weergegeven. De breedte van de waterlopen varieert van 0,5 tot 7,5 meter. De intreeweerstand varieert van 0,8 tot 1,5 dagen per lengte-eenheid waterlopen (streckende meter).

## Afwateringsstelsel

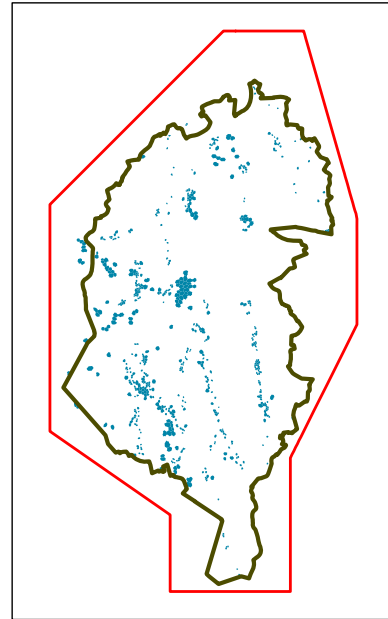
Primaire waterlopen



### Legenda

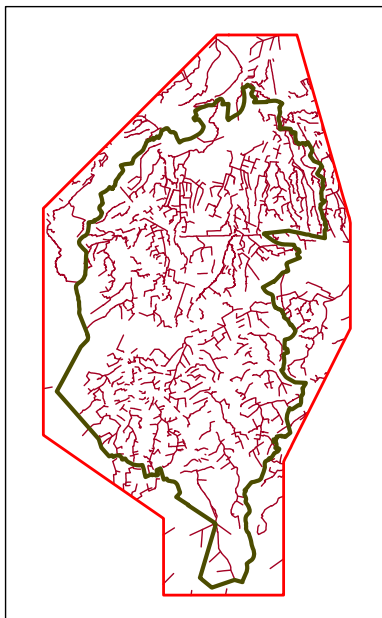
- grens studiegebied
- primaire waterlopen
- omhullende modelgebied
- gebieden met drains in de ondergrond

Voorkomen van drains



## Afwateringsstelsel

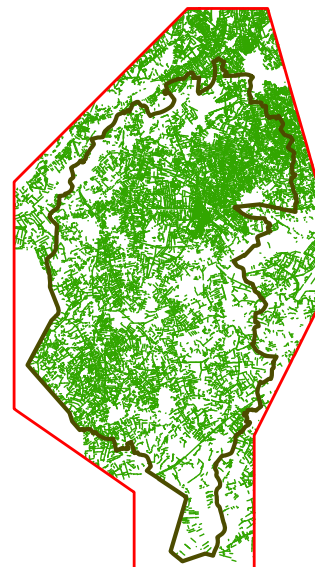
Secundaire waterlopen



### Legenda

- grens studiegebied
- omhullende modelgebied
- secundaire waterlopenstelsel
- tertiaire waterlopenstelsel

Tertiaire waterlopen



**Figuur 3-6: Voorkomen van waterlopen en drains in modelgebied**

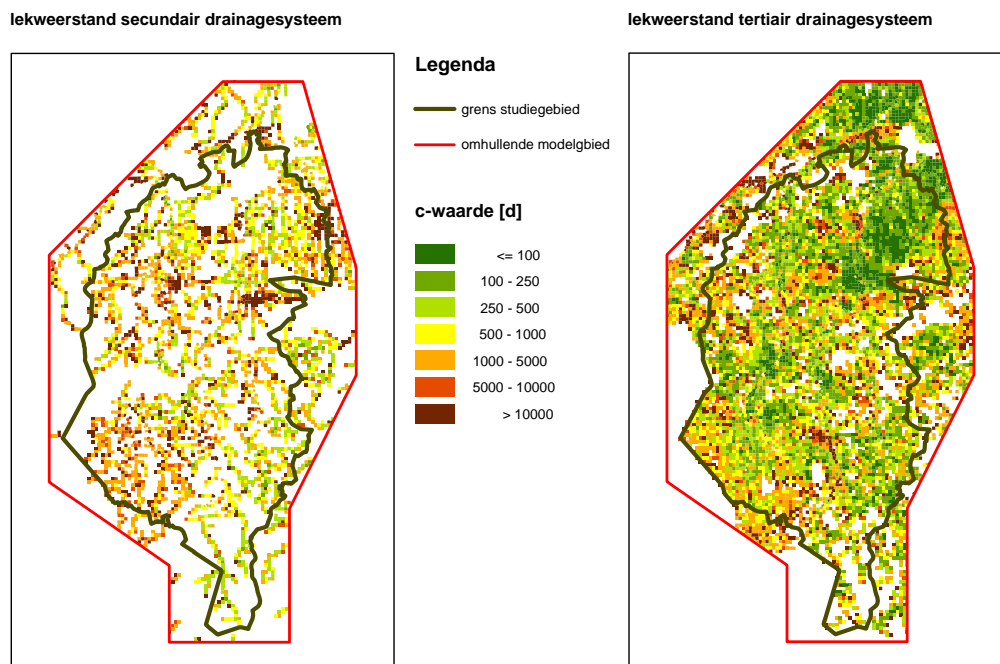
De lekweerstand voor het secundaire en tertiaire drainagesysteem zijn berekend met de formule van Ernst:

$$C_{\text{lek}} = L C_{\text{intree}} + L^2 / (8 kD_0) \quad (6)$$

met:

- $C_{\text{lek}}$  = de lekweerstand van drainagesysteem [d]  
 $L$  = slootafstand [m]  
 $C_{\text{intree}}$  = intreeweerstand sloot [d/m<sup>1</sup>]  
 $kD_0$  = doorlaatvermogen freatisch watervoerend pakket [m<sup>2</sup>/d]

De formule gaat uit van evenwijdig aan elkaar liggende waterlopen, waaruit de slootafstand eenduidig is af te leiden. In de praktijk zal deze situatie niet optreden. Daarom wordt per LGM-invloedsgebied een gemiddelde slootafstand afgeleid. Allereerst wordt voor elk drainagesysteem per invloedsgebied de totale lengte aan waterlopen bepaald ( $\sum L_w$ ). De slootafstand  $L$  is dan gelijk aan  $\sum L_w / A$ , waarin  $A$  gelijk is aan het oppervlak van het invloedsgebied van LGM-knooppunt. De berekende lekweerstand voor het secundaire en tertiaire drainagesysteem zijn in Figuur 3-7 weergegeven.



Figuur 3-7: Lekweerstand van secundair en tertiair drainagesysteem

### 3.4 Drains

De aanwezigheid van buisdrainage is afgeleid uit informatie van het 'Klimaat en Beken'-project (Van Walsum et al., 2002), waar per invloedsgebied van SIMGRO-

knooppunten de aanwezigheid van buisdrainage is aangegeven (Figuur 3-6). De buisdrainage is wel (waarde= 1) of niet (waarde=0) aanwezig. De invloedsgebieden van SIMGRO (12000 knooppunten) komen niet overeen met de invloedsgebieden van LGM (3241 knooppunten). Er is daarom een overlay gemaakt van de SIMGRO-invloedsgebieden met de LGM-invloedsgebieden. Per LGM-invloedsgebied is vervolgens het oppervlak buisdrainage bepaald ten opzichte van het totale oppervlak van het invloedsgebied (van 0 tot 1). Met een drainageweerstand van 100 dagen is vervolgens per LGM-knooppunt waar buisdrainage voorkomt, de drainageweerstand voor het LGM-model berekend als:

$$C_{\text{drain}} = 100 (\text{drainageweerstand}) \times (A_{\text{tot}} / A_{\text{drain}}) \quad (7)$$

Waarin:

- $C_{\text{drain}}$  = lekweerstand voor knooppunt-modelnetwerk LGM [d]  
 $A_{\text{tot}}$  = totale oppervlak invloedsgebied LGM-knooppunt [m<sup>2</sup>]  
 $A_{\text{drain}}$  = oppervlak buisdrainage binnen invloedsgebied LGM-knooppunt [m<sup>2</sup>]

### 3.5 Maaielddrainage

Bij hoge grondwaterstanden gaat het maaiveld als drainagemiddel fungeren. Aangezien het maaiveld in werkelijkheid niet vlak is, zullen lagere plekken eerder draineren dan hogere plekken. Dit proces is in SWAP gemodelleerd via een van de drainagemiddelen. Voor de ontwateringsbasis is voor alle LGM-invloedsgebieden een diepte van 20 cm onder het maaiveld aangehouden. De weerstand is op 20 dagen gesteld.

### 3.6 Grondwateronttrekkingen

In het modelonderzoek zijn drie grondwateronttrekkingen ten behoeve van de openbare drinkwatervoorziening meegenomen (Tabel 3-2). De grondwaterwinningen onttrekken het grondwater aan het tweede of derde watervoerende pakket.

**Tabel 3-2: grondwateronttrekkingen in modelgebied**

	x-coördinaat [m]	y-coördinaat [m]	onttrekking [m <sup>3</sup> /jaar]	wvp
ps Vessem	149680	383070	9×10 <sup>6</sup>	2
ps Haaren	145100	402400	5×10 <sup>6</sup>	3
ps Oirschot	145800	393600	3×10 <sup>6</sup>	3

### 3.7 Neerslag

De neerslag en de referentiegewasverdamping vormen de input van de bovenrand van het SWAP-model. De gegevens op dagbasis zijn afkomstig van het KNMI en hebben betrekking op het hoofdstation van het KNMI-district 13. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de periode 1981-1990. De periode 1981-1984 geldt als initialisatieperiode voor het SWAP-model voor het creëren van een goede uitgangssituatie voor de simulatieperiode. De uitvoer van de periode 1985-1990 wordt

gebruikt om de modellen onderling te vergelijken. In SWAP wordt de referentieverdamping omgerekend naar de evapotranspiratie. Deze evapotranspiratie is een combinatie van bodemverdamping (evaporatie) en gewasverdamping (transpiratie, inclusief interceptie). De evapotranspiratie verschilt per gewas. Voor de onderhavige studie is het bodemgebruik voor het gehele modelgebied op gras gesteld. Voor het doel van de studie – het beoordelen van modelconcepten, schematisering en parameterisering – is het toepassen van een uniform bodemgebruik voor het modelgebied niet van belang. De studie is hierdoor echter niet geschikt om te laten zien in hoeverre de berekende grondwaterpeilen overeenkomen met de gemeten grondwaterpeilen.

### **3.8 Bodemfysische eenheden**

Om de hydrologische situatie van de onverzadigde zone te kunnen beschrijven is informatie nodig van de bodemfysische kenmerken van de bodem. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van de indeling in Bodemfysische Eenheden van Wösten et al. (1988). De basis van de kaart met Bodemfysische Eenheden is de bodemkaart van Nederland, schaal 1: 250.000, waarbij de legenda-eenheden van de oorspronkelijke kaart zijn geaggregeerd tot 21 eenheden (exclusief open water en verhard oppervlak). Iedere eenheid is opgebouwd uit bouwstenen uit de Staringreeks (Wösten, 1987) waardoor pF- en  $k(\psi)$ -relaties bekend zijn.



## 4. Berekeningsresultaten

### 4.1 Inleiding

#### 4.1.1 Ruimtelijke resolutie van de rekenresultaten

Bij de toepassing van het gekoppelde LGM-SWAP-model is een relatief grof eindig-elementennetwerk gebruikt: de basis van het netwerk werd gevormd door elementen met een lengte van  $500 \times 500 \text{ m}^2$ . Het netwerk bevat 3241 knooppunten, waarvan 228 randknooppunten. Deze ruimtelijke resolutie is eigenlijk te grof om de ruimtelijke informatie van de beekdalen goed in de berekeningen mee te nemen, daarvoor is minimaal  $250 \times 250 \text{ m}^2$  nodig. Dit fijne netwerk bevat 13.000 knooppunten. De reden dat toch een relatief grof netwerk gebruikt is, is dat tijdens de start van het project er nog te weinig computercapaciteit beschikbaar was om met een hogere ruimtelijke resolutie te rekenen.

Om de rekenresultaten toch met een fijnere resolutie van  $250 \times 250 \text{ m}^2$  beschikbaar te krijgen, is een tweestapsprocedure gevolgd:

- De in paragraaf 2.5 beschreven afstemming van LGM en SWAP (convergentie van de modellen) is uitgevoerd op het grove netwerk van  $500 \times 500 \text{ m}^2$ . Deze stap heeft geresulteerd in geconvergeerde, tijdsafhankelijke invoer van de grondwaterflux en de freatische bergingscoëfficiënt.
- Deze tijdsafhankelijke, geconvergeerde invoer is vervolgens neergeschaald naar het fijnere netwerk van  $250 \times 250 \text{ m}^2$ . Met deze neerschaling is éénmalig met LGM een niet-stationaire run voor alle 13.000 knooppunten van het fijnere netwerk gemaakt.

Het voordeel van deze methode is dat het SWAP-model uitsluitend op het grove netwerk behoeft te worden toegepast. De gebruikte neerschalingmethode moet gezien worden als een eerste benadering. In GIS is bepaald in welk invloedsgebied van het grove netwerk het knooppunt van het fijne netwerk ligt. Het knooppunt krijgt vervolgens de bijbehorende tijdreeks van het knooppunt uit het grove netwerk. De methode kan verbeterd worden door bij de neerschaling rekening te houden met het bodemtype, de grondwaterstand en het bodemgebruik.

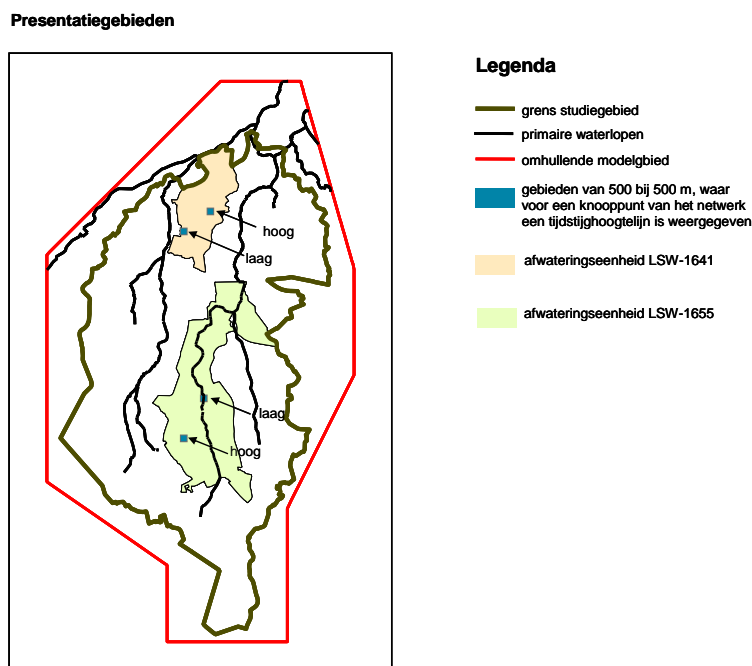
#### 4.1.2 Gekozen modeluitvoerparameters

De modellen LGM/SWAP, SIMGRO en NAGROM/MOZART zijn vergeleken op basis van de volgende modeluitvoer:

- GHG en GLG, bepaald als het gemiddelde van de drie hoogste dan wel laagste grondwaterstanden per jaar (op decadebasis) voor de periode 1985-1990.
- Grondwaterfluxen, zoals de drainagefluxen naar afwateringssystemen en de grondwaterflux over de slecht doorlatende laag van of naar freatisch watervoerend pakket (topstelsel).
- Waterbalans voor het kalenderjaar 1989 voor het gehele studiegebied en voor twee deelstroomgebieden. De deelstroomgebieden verschillen in hydrologisch opzicht van elkaar. Gebied LSW 1655 ligt in het bovenstroomse deel van het studiegebied, een gebied met relatief weinig actieve drainagesystemen en grote hoogteverschillen. Gebied LSW 1641 ligt benedenstrooms in een relatief vlak

gebied met veel actieve drainagemiddelen. De deelstroomgebieden zijn weergegeven in Figuur 4-1.

- Afvoerdynamiek van het gehele stroomgebied voor het jaar 1989.
- Grondwaterdynamiek van een viertal geselecteerde vlakken van 500 x 500 m<sup>2</sup>. De vlakken liggen in de bovengenoemde deelstroomgebieden. Binnen elk deelstroomgebied is een vlak met weinig drainagemiddelen (locatie ‘hoog’) en een vlak met veel drainagemiddelen gekozen (vlak ‘beek’). De vlakken zijn eveneens in Figuur 4-1 weergegeven.



**Figuur 4-1: Verschillende presentatiegebieden van modelresultaten**

### 4.1.3 Scenario's

In de werkgroep 'Consensus Hydrologie' zijn naast de basisrun vijf scenario's benoemd, waarvan er drie met het model LGM/SWAP zijn doorberekend. De scenario's zijn gedefinieerd om mogelijke verschillen in modelconcepten tot uiting te laten komen in de berekeningsresultaten. Als referentie (basisrun), de situatie waarmee de andere scenario's zijn vergeleken, geldt de situatie met de eerder gepresenteerde modelparameters, waarbij tijdsafhankelijke parameters zijn genomen voor de periode 1981-1990. De scenario's zijn onderling onafhankelijk te beschouwen, d.w.z. een volgend scenario voegt geen extra maatregelen toe aan het beschouwde scenario. De vijf scenario's zijn:

1. Verondiepen van de slootbodem van het tertiair systeem in landbouwgebied (anti-verdrogingsmaatregel).
2. Dempnen van de helft van waterlopen van het tertiair systeem in landbouwgebied (anti-verdrogingsmaatregel).
3. Verandering in klimaat (nattere winters en drogere zomers).

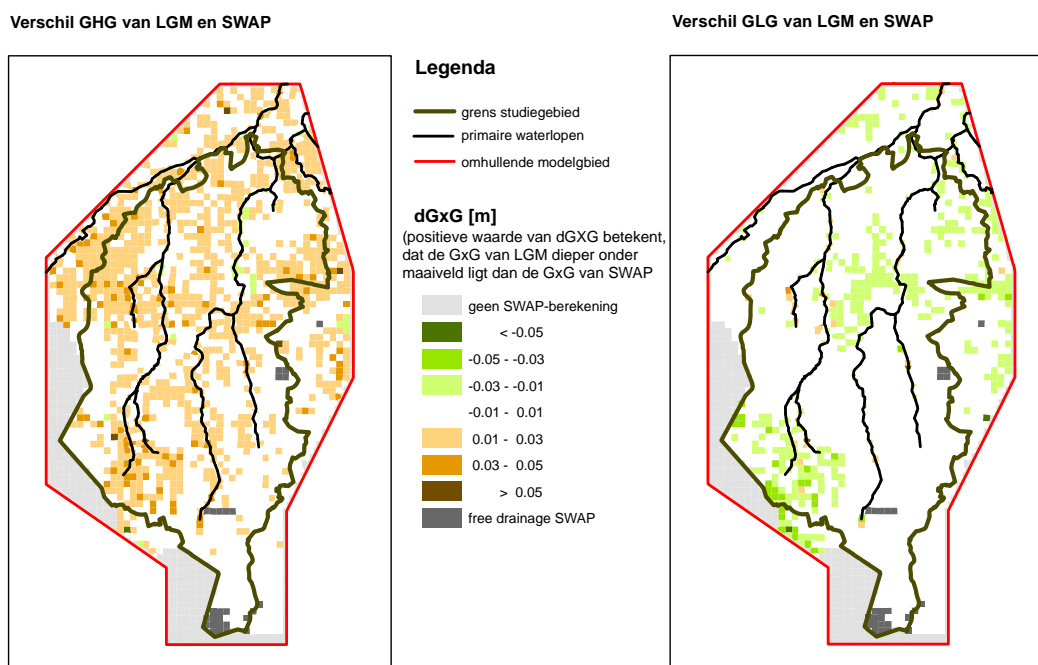


4. Berekening van het gehele landbouwgebied.
  5. Veranderen van het landgebruik van gras naar loofbos.
- Met het model LGM/SWAP zijn de scenario's 1, 2 en 3 doorgekend.

In de volgende paragraaf zal eerst worden ingegaan op het convergentieproces van het gekoppelde LGM/SWAP-model. Daarna worden de resultaten van de basisrun en de scenario's besproken.

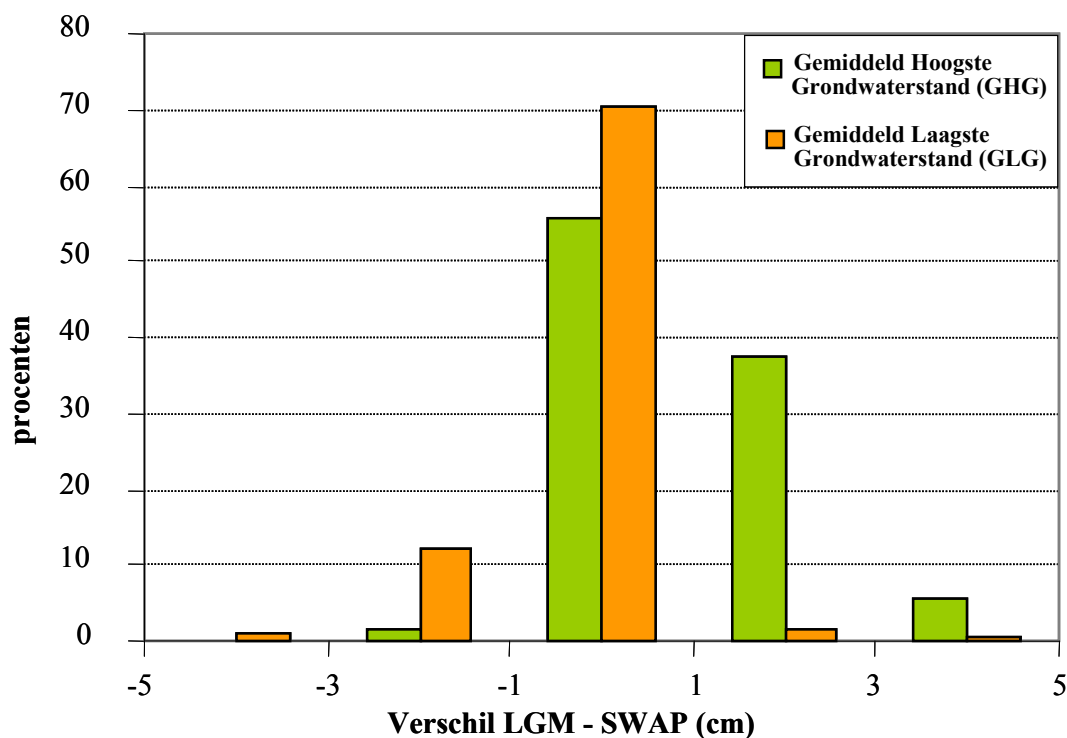
## 4.2 Beoordeling van de convergentiemethode

De beoordeling van de convergentie van het gekoppelde model LGM/SWAP gebeurt door het vergelijken van de freatische grondwaterstand die is berekend door zowel SWAP als LGM. Van de berekende grondwaterstanden wordt zowel voor SWAP als voor LGM voor de periode 1985-1990 een Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) en een Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) afgeleid. Hiervoor worden per kalenderjaar de drie extreemste decadewaarden voor de freatische grondwaterstanden genomen. Na elke 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. De beoordeling van de convergentie gebeurt op basis van het verschil tussen de GHG van LGM en SWAP, respectievelijk het verschil tussen de GLG van SWAP en LGM. 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.



**Figuur 4-2: Verschil van gemiddeld hoogste (GHG) en laagste (GLG) grondwaterstand van LGM en SWAP**

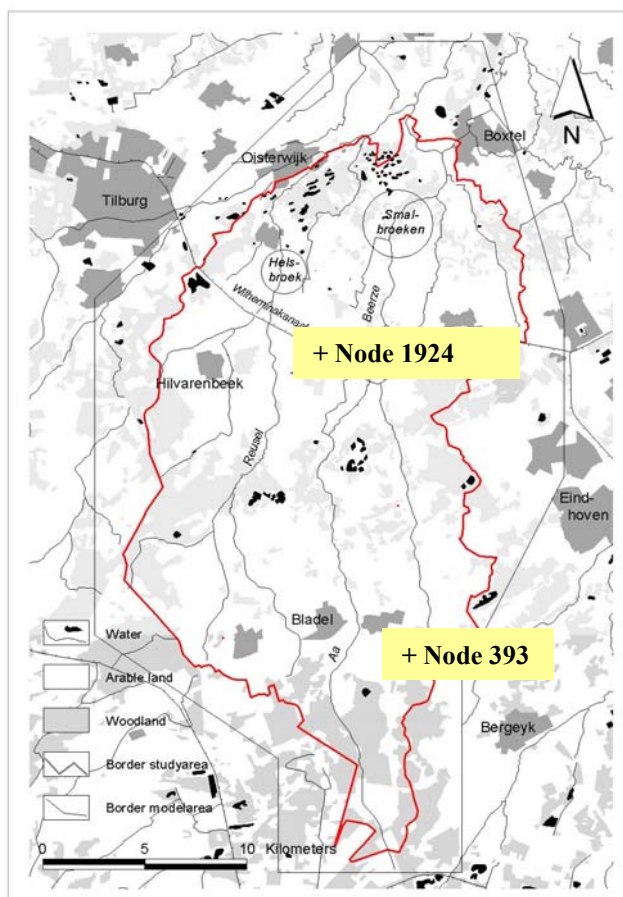
In Figuur 4-2 is het ruimtelijke beeld van het verschil in GHG weergegeven. Hieruit is af te leiden dat de GHG van LGM dieper beneden het maaiveld ligt dan de door SWAP voorspelde GHG. Een tweede indicatie voor een systeemfout is het verschil tussen de GLG van LGM en die van SWAP. Het ruimtelijke beeld van dit verschil is in Figuur 4-2 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 die van SWAP. De fluctuatie van de grondwaterstand in LGM is dus minder groot dan in de naar decades omgerekende gemiddelde grondwaterstanden van SWAP. Dit is te verklaren uit het feit dat SWAP de tijdsafhankelijke data op dagbasis invoert, dat SWAP met heel korte tijdstappen rekt ( $< 1$  dag) en dat SWAP de grondwaterstand op dagbasis uitvoert. LGM daarentegen werkt met tijdsafhankelijke data, die op decadebasis zijn gegenereerd en ingelezen. De verschillen van GHG en GLG uit LGM en SWAP zijn in Figuur 4-3 in een histogram uitgezet. De overeenkomst is goed, met andere woorden: het effect van de conceptuele verschillen tussen LGM en SWAP is klein.



**Figuur 4-3: Histogram van verschillen tussen LGM en SWAP, voor periode 1985-1990**

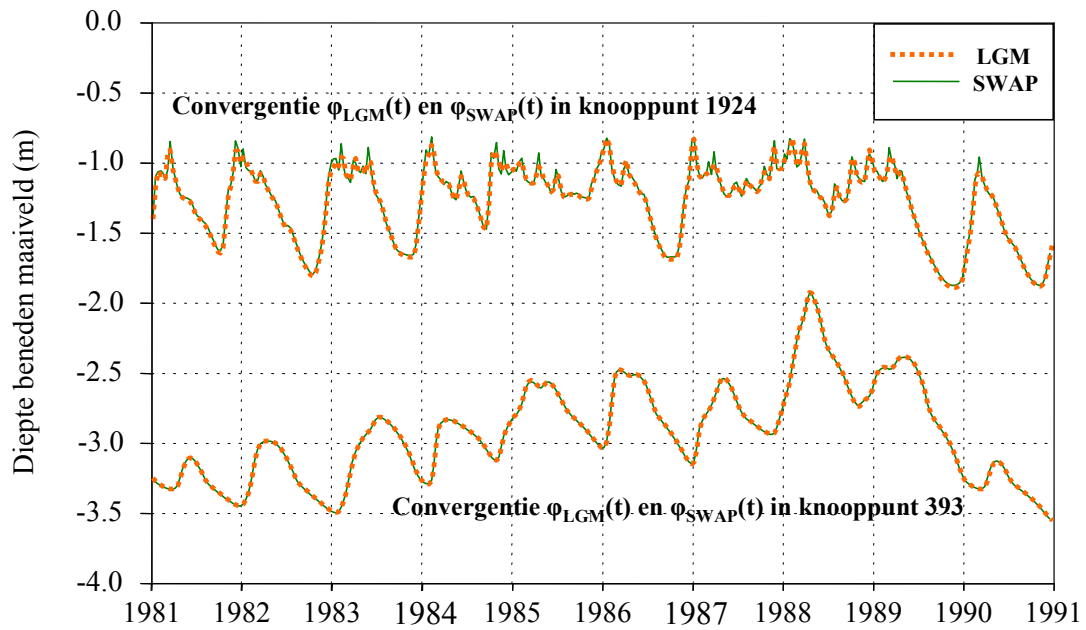
Daarnaast is voor een tweetal knooppunten van het model, waarvan de ligging in Figuur 4-4 is aangegeven, de tijdstijghoogtelijn (decadegetallen) van SWAP en LGM van de laatste modelrun weergegeven (Figuur 4-5). De grondwaterstand ten opzichte van maaiveld is verschillend. De grondwaterstand van knooppunt 1924 ligt gemiddeld op ongeveer 1.25 meter onder maaiveld. Het drainagestelsel topt de ondiepe grondwaterstanden af. Knooppunt 393 echter heeft grondwaterstanden van meer dan 2 meter onder maaiveld. Het drainagestelsel, indien aanwezig, is in dit knooppunt niet actief omdat de grondwaterstand onder de drainagebasis ligt. De diepe ligging van het grondwater zorgt voor een afvlakking van de neerslagpieken in het stijghoogtebeeld.

Voor beide knooppunten zijn de verschillen in de grondwaterstand, berekend met SWAP en LGM, gering, wat aangeeft dat beide modellen dezelfde dynamiek in de grondwaterstand hebben. Tot slot is in Figuur 4-6 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.

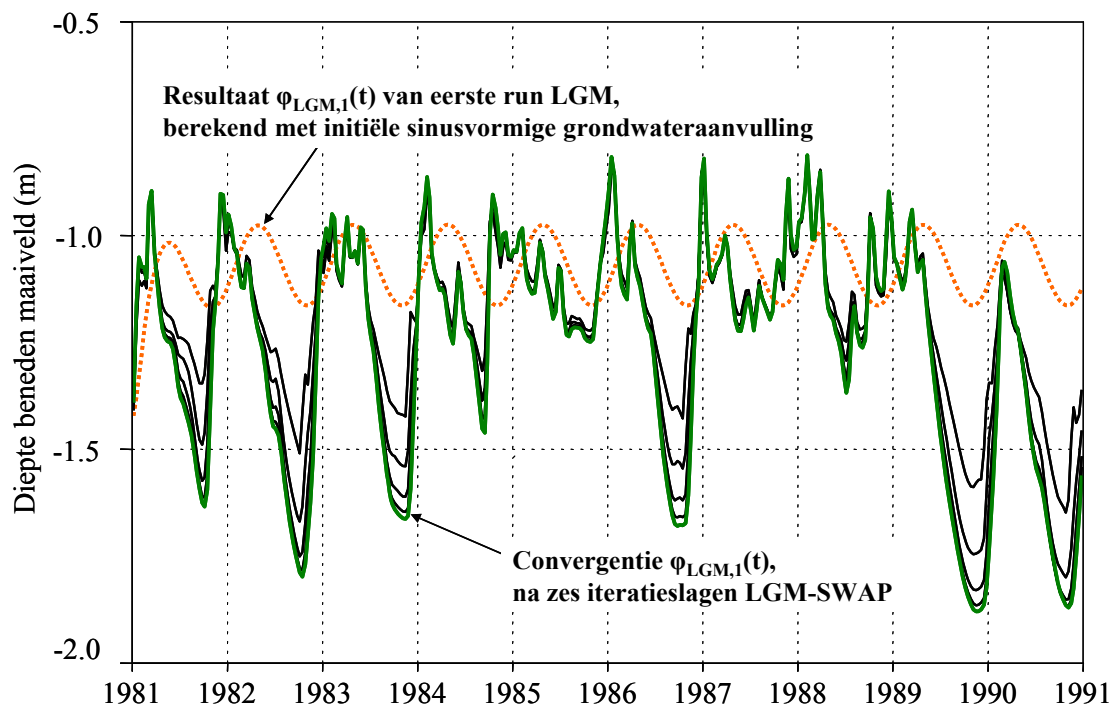


**Figuur 4-4: Ligging modelknooppunten waarvoor tijdstijghoogtelijnen zijn weergegeven**

Omdat het freatische watervoerende pakket in beide modellen wordt meegenomen, zijn overeenkomstige waterbalanstermen met elkaar vergeleken. De totale drainageflux naar het topsysteem ( $q_{dra}$ ) en de grondwaterflux over de eerste slecht doorlatende laag ( $q_{bot}$ ) waren in beide modellen gelijk.



Figuur 4-5: Tijdstijghoogtelijn van LGM en SWAP in twee knooppunten, voor geconvergeerde iteratierun



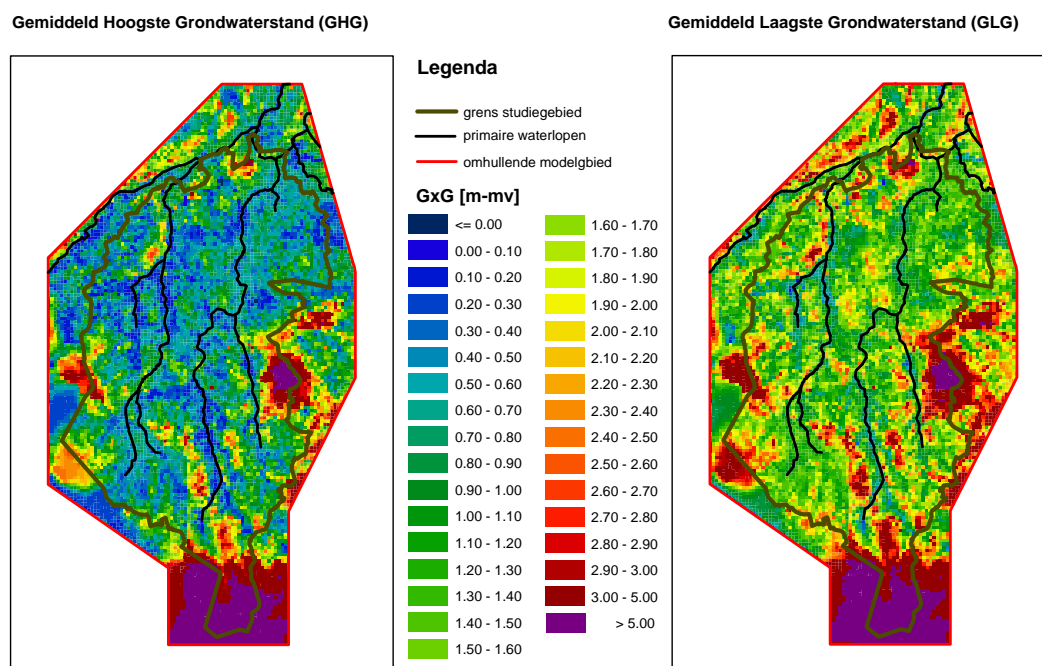
Figuur 4-6: Verloop van convergentie voor tijdstijghoogtelijn, in knooppunt 1224

## 4.3 Basisrun

In het onderzoek is uitgegaan van een referentiesituatie, waarbij het grondgebruik voor het gehele modelgebied uit gras bestaat. De resultaten zijn afgeleid uit de modelrun met het fijnere netwerk, waarvan het basiselement een afmeting heeft van 250 x 250 m<sup>2</sup> (zie paragraaf 4.1).

### 4.3.1 Grondwaterstanden

In Figuur 4-7 zijn de gemiddeld hoogste (GHG) en gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) weergegeven. De waarden zijn bepaald uit de berekende freatische grondwaterstand in het eerste watervoerende pakket. In het beeld komen de beekdalen goed tot uiting. Door het synthetische karakter van de berekening (grondgebruik gras voor het gehele modelgebied) is vergelijking van de basisrun en de werkelijkheid niet goed mogelijk.

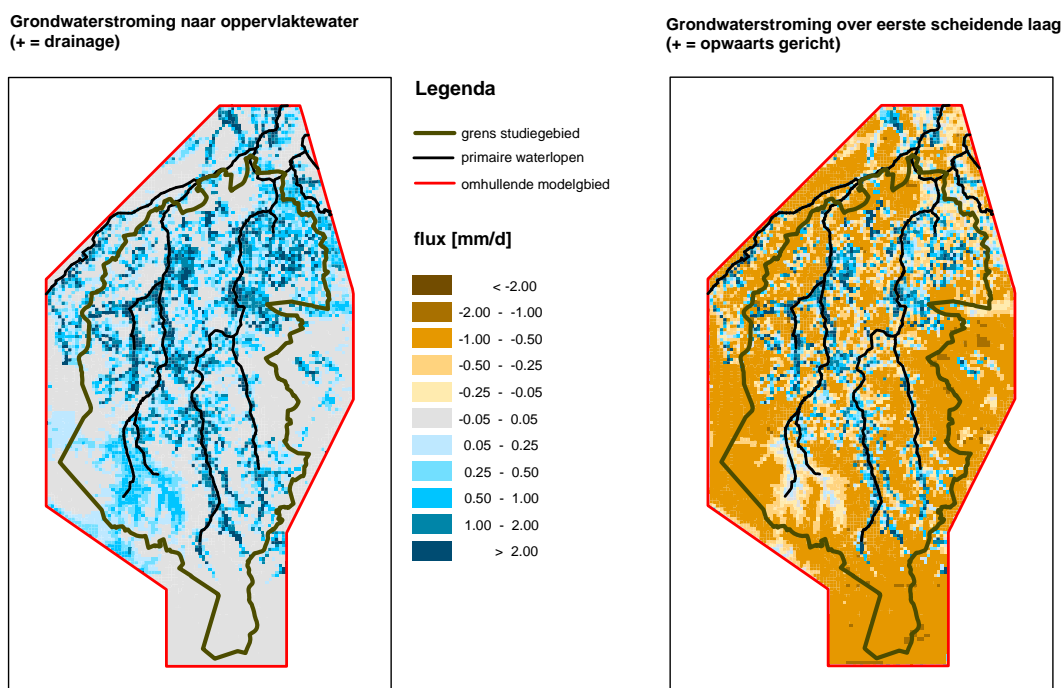


Figuur 4-7: GHG en GLG, berekend over de periode 1985-1990, in meters beneden maaiveld

### 4.3.2 Grondwaterstroming

In Figuur 4-8 zijn de netto (lees: gemiddelde) grondwaterflux van of naar het (secundaire en tertiaire) drainagesysteem en door de eerste scheidende laag weergegeven. Het beeld van de grondwaterstroming naar het drainagesysteem wordt bepaald door de aanwezigheid van oppervlaktewaterstelsel binnen het invloedoppervlak van het modelknooppunt.

Bij de grondwaterstroming van of naar het freatische pakket is het goed onderscheid te maken in kwel- en infiltratiegebieden. In grote delen van het gebied is de grondwaterstroming neerwaarts (infiltratie). Vooral bij een deel van de beken (primaire drainagesysteem) is een opwaartse grondwaterstroming naar het freatische watervoerende pakket berekend. De geïnfiltreerde neerslag komt onder meer door het geringe doorlaatvermogen van het freatische watervoerende pakket via de diepere watervoerende pakketten tot afstroming. Ook de relatief diepe ligging van de beekdalen speelt een rol in het draineren van het gebied.



**Figuur 4-8: Gesommeerde grondwaterstroming naar oppervlaktewater en grondwaterstroming over de eerste scheidende laag als gemiddelde over de periode 1985-1990**

### 4.3.3 Waterbalansen

In Tabel 4-1 is de waterbalans voor de periode 1985-1990 weergegeven voor het studiegebied en voor de deelstroomgebieden LSW-1641 en LSW-1655. De evapotranspiratie bedraagt bijna 70% van de neerslag. Het studiegebied is als totaal een infiltratiegebied. Ruim 50 mm per jaar infiltreert van het topsysteem naar het diepe watervoerende pakket. Ook het stroomgebied LSW-1655 is een infiltratiegebied maar met gemiddeld 10 mm/jaar duidelijk minder dan het studiegebied. Afwateringsgebied LSW-1641 is een kwelgebied. Gemiddeld kwelt ruim 35 mm/jaar op van het diepe watervoerende pakket naar het topsysteem. Dat komt ook tot uiting in de totale drainageafvoer, met uitzondering van de grondwaterstroming van of naar de primaire waterlopen. De afvoer van LSW-1641 is beduidend hoger dan van de overige gebieden. De berekende bergingsverandering over de periode 1985-1990 is met een afname van 17 mm voor het studiegebied en LSW-1655 gering. De grondwaterstand aan het begin van 1985 zal niet veel hoger zijn dan aan het eind van 1990.

**Tabel 4-1: Waterbalans van de basisrun, voor 1989 en als jaargemiddelde voor de periode 1985-1990, voor de deelstroomgebieden LSW-1641, LSW-1655 en studiegebied**

**Waterbalanstermen 1989 [mm/jaar]**

	lsw 1641	lsw 1655	studiegebied
<b>SWAP: onverzadigde zone</b>			
bergingsverandering water in kolom	-102	-123	-132
neerslag	627	627	625
flux door 1ste aquitard (SWAP) (positief naar boven)	46	-10	-48
verdamping intercepted water	85	85	84
actuele bodemverdamping	90	90	90
actuele gewasverdamping	405	401	397
Afvoer secundair drainagestelsel	53	35	33
Afvoer tertiaire drainagestelsel	75	70	61
Afvoer buisdrainage	32	25	24
Afvoer surfacedrainagesysteem	13	18	20
potentiële bodemverdamping	115	115	114
potentiële gewasverdamping	440	440	439
totale drainageafvoer	173	148	138
grondwateraanvulling (positief naar beneden)	154	179	190
<b>LGM: verzadigde zone</b>			
Totale drainageafvoer	177	153	143
flux door 1ste aquitard (positief naar boven)	45	-10	-50
flux door 2e aquitard (positief naar boven)	19	21	-29
flux door 3e aquitard (positief naar boven)	32	8	-12

**Waterbalanstermen gemiddelde over periode 1985-1990 [mm/jaar]**

	lsw 1641	lsw 1655	studiegebied
<b>SWAP: onverzadigde zone</b>			
bergingsverandering onverzadigde zone	-11	-17	-17
neerslag	784	784	781
flux door 1ste aquitard (SWAP) (positief naar boven)	37	-15	-52
verdamping intercepted water	92	92	92
actuele bodemverdamping	88	88	88
actuele gewasverdamping	357	354	353
Afvoer secundair drainagestelsel	97	75	52
Afvoer tertiaire drainagestelsel	114	98	89
Afvoer buisdrainage	49	33	32
Afvoer surfacedrainagesysteem	30	36	36
run-off	1	1	1
stroming eerste aquifer (qmod)	2	7	4
potentiële bodemverdamping	102	102	101
potentiële gewasverdamping	382	382	380
totale drainageafvoer	291	244	210
grondwateraanvulling (positief naar beneden)	266	276	274
<b>LGM: verzadigde zone</b>			
Totale drainageafvoer	266	215	203
flux door 1ste aquitard (positief naar boven)	37	-12	-50

In de waterbalans is apart de leftoverflux opgenomen. De leftoverflux is een grondwaterflux, samengesteld uit hydrologische processen in het freatische watervoerende pakket, die wel in LGM in beschouwing worden genomen, maar niet in het onverzadigdegrondwatermodel SWAP. In deze studie gaat het om de horizontale grondwaterstroming in het topsysteem en de flux van of naar de beken die als lijnsegmenten in LGM zijn opgenomen (het primaire drainagesysteem). De grondwaterflux bedraagt gemiddeld slechts enkele mm per jaar en speelt nauwelijks een rol in de waterbalans.

Omdat het freatische watervoerende pakket in beide modellen wordt meegenomen, zijn overeenkomstige waterbalanstermen met elkaar te vergelijken. De grondwaterflux over de eerste slecht doorlatende laag is in beide modellen gelijk. Anders ligt het met de totale drainageflux. Voor het studiegebied is het verschil niet groot (7 mm). Anders is het voor de deelstroomgebieden LSW-1641 en LSW-1655. Het verschil is respectievelijk 25 en 29 mm per jaar. SWAP rekent structureel meer drainageafvoer dan LGM. Zoals eerder beschreven bij het vergelijken van de GxG uit SWAP en LGM is de fluctuatie van de grondwaterstand in LGM minder groot dan in de naar decade omgerekende gemiddelde grondwaterstanden van SWAP. In de berekende grondwaterstand van LGM treedt ten opzichte van SWAP een afvlakking van de grondwaterstand op. Gevoegd bij de heel korte tijdstappen waarmee SWAP rekent (< 1 dag) en de bij die tijdstap behorende hogere (piek)grondwaterstanden de drainageflux berekent, leidt dit uiteindelijk tot hogere drainagefluxen dan in LGM.

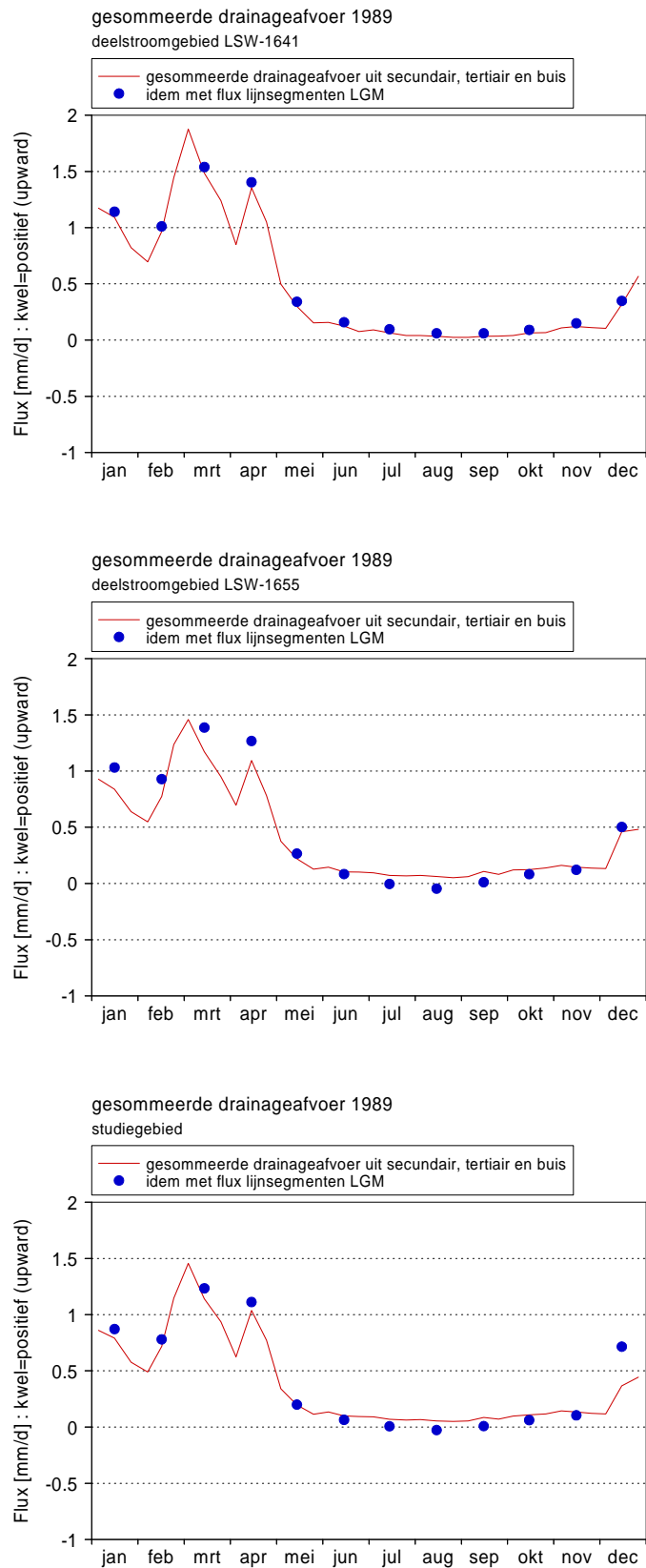
De waterbalans van 1989 is apart beschouwd. Dit jaar was een jaar met weinig neerslag (625 mm). Het jaar 1989 was niet alleen een droog jaar, maar ook de evapotranspiratie was met 571 mm (ruim 90% van de neerslag) hoog. De totale drainageflux van het studiegebied is bijna 70 mm lager dan het gemiddelde in de periode 1985-1990. De grondwaterstand is aan het eind van 1989 beduidend lager dan aan het begin. Dit komt tot uiting in de grote (negatieve) bergingsverandering van ruim 130 mm. De overige termen in de waterbalans zijn in orde grootte gelijk aan het gemiddelde van de periode 1985-1990. De deelstroomgebieden LSW-1641 en -1655 laten voor 1989 hetzelfde beeld zien.

#### **4.3.4 Afvoerdynamiek van het stroomgebied**

Voor het jaar 1989 is de afvoerdynamiek van het studiegebied, evenals van de deelstroomgebieden LSW-1641 en -1655, beschouwd. Voor de weergave van de afvoer is de drainageflux van alle drainagesystemen gesommeerd. De grondwaterflux van of naar het primaire drainagesysteem (de beken) wordt niet in SWAP berekend maar is per decade als een leftoverflux over de onderrand van SWAP verrekend. De flux wordt uit de LGM-berekening gehaald als maandgemiddelde. De drainageflux van de overige systemen is gehaald uit decadedcijfers van SWAP om vooral de dynamiek van de afvoer in de natte periode zichtbaar te houden.

In Figuur 4-9 zijn voor de drie gebieden de afvoeren van 1989 weergegeven. De afvoeren vertonen hetzelfde patroon. De invloed van de berekende afvoer van het primaire systeem is het duidelijkst zichtbaar in deelstroomgebied LSW-1655, waar in het voorjaar kwel naar het primaire systeem overheerst. In de grafiek is ook zichtbaar dat het primaire systeem infiltreert in de zomermaanden.





**Figuur 4-9: Afvoerdynamiek deelstroomgebieden LSW-1641 en LSW-1655 en studiegebied voor het jaar 1989**

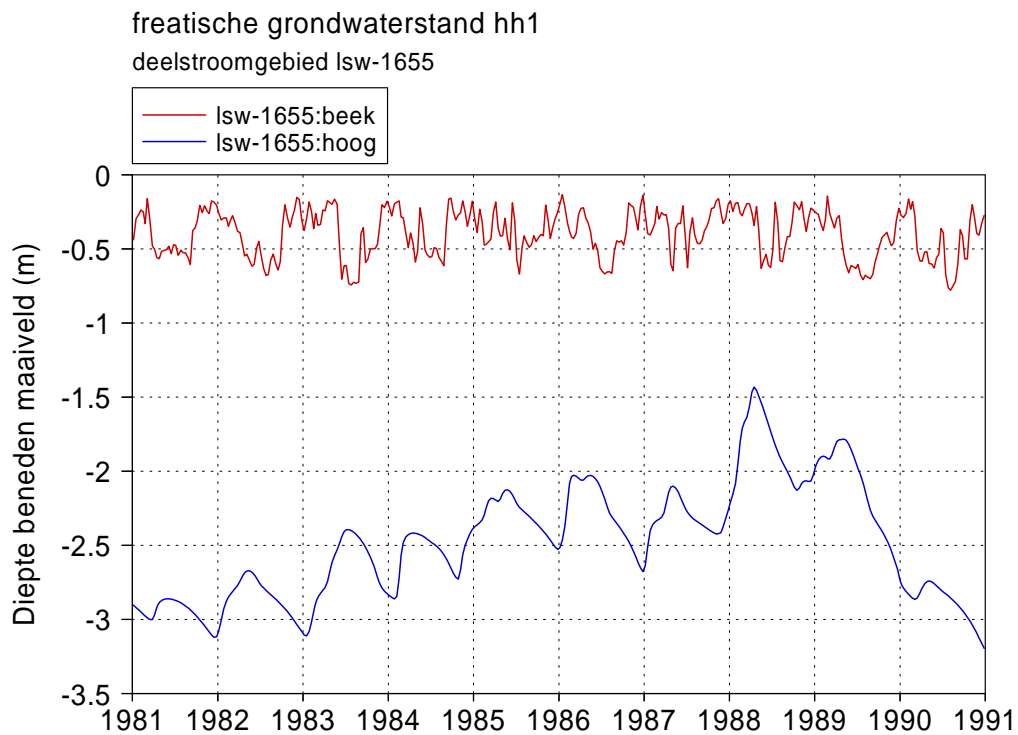
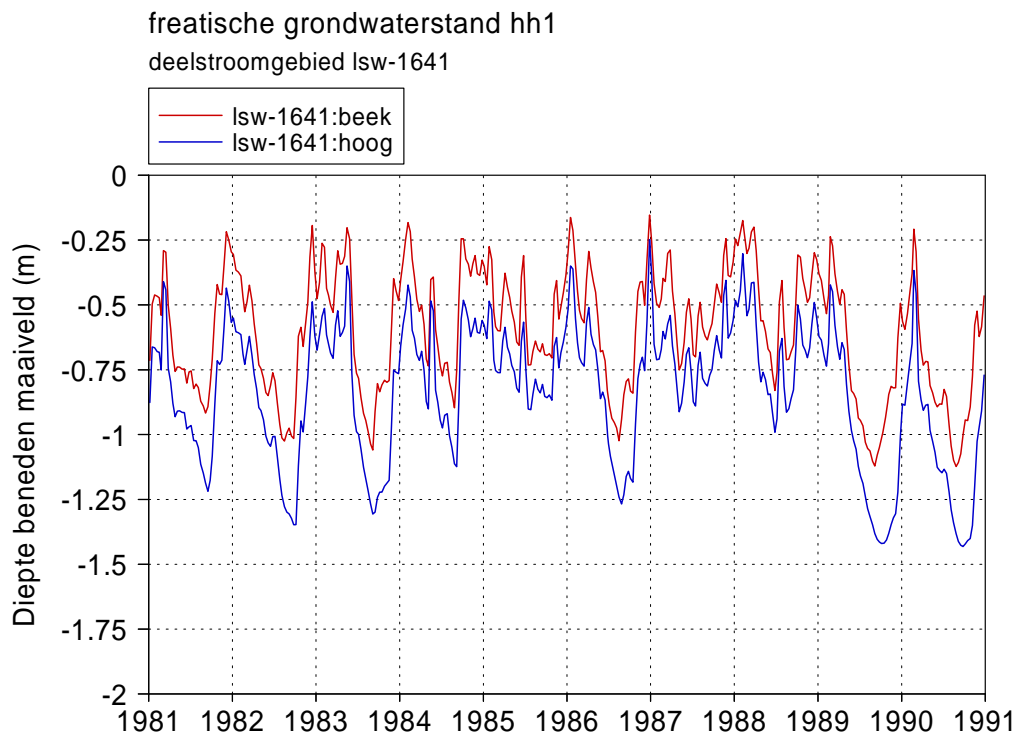
De totale drainageafvoer, dus met primaire waterlopen, ligt dan onder de gesommeerde drainageafvoer uit secundair-, tertiair- en buisdrainage. De totale waarde van de drainageafvoer wordt zelfs negatief. Een belangrijke oorzaak voor dit verschijnsel ligt in de aanname dat het peil in de primaire waterlopen in LGM niet veranderd kan worden. Dit geeft, zoals eerder gemeld, een hogere kwelflux in de natte periode naar de waterlopen. In de droge zomerperiode wordt echter een hogere infiltratieflux dan wel te lage kwelflux berekend. Als wateraanvoer van buiten het beschouwde gebied niet mogelijk is, kunnen delen van beken in de zomermaanden weinig of geen afvoer hebben. Infiltratie van water zal in deze situatie niet of nauwelijks optreden.

#### **4.3.5 Grondwaterdynamiek in een aantal knooppunten**

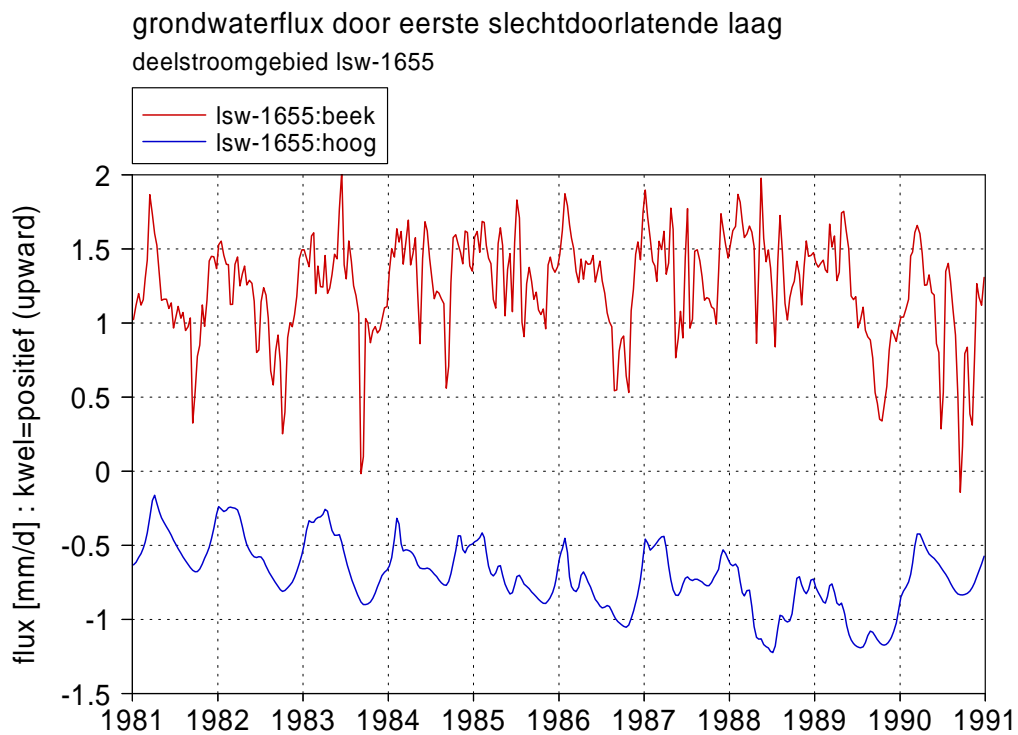
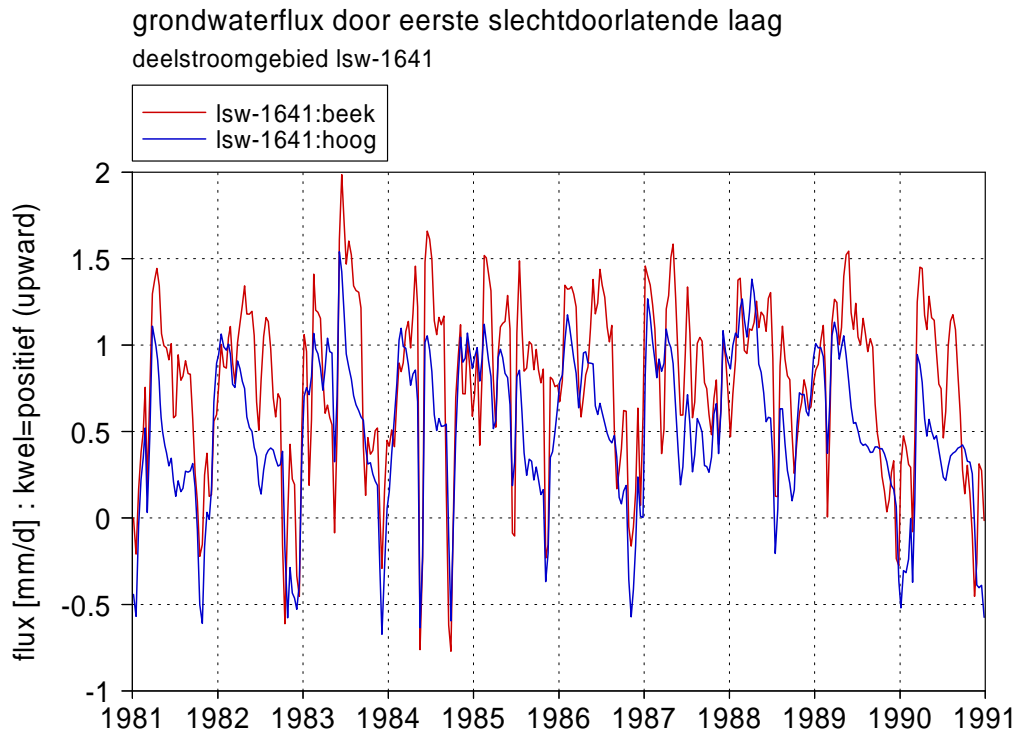
Als laatste is gekeken naar de grondwaterdynamiek in een aantal knooppunten van het gekoppelde modelinstrumentarium LGM-SWAP. In de geselecteerde deelstroomgebieden LSW-1641 en LSW-1655 zijn twee vlakken van 500 bij 500 meter geselecteerd (zie Figuur 4-10). De vlakken zijn zoveel mogelijk hydrologisch verschillend gekozen. De locatie 'hoog' ligt in het gebied met weinig drainagemiddelen. De locatie 'beek' ligt in een gebied vlak bij de beek, waar meestal meer drainagemiddelen voorkomen. Voor het modelknooppunt in of dicht bij het vierkant is de tijdstijghoogtelijn voor de periode 1981-1990 uitgezet.

De deelstroomgebieden reageren duidelijk verschillend. LSW-1655 heeft op de hoger gelegen delen diepe grondwaterstanden (meer dan twee meter onder maaiveld). Het gebied is een infiltratiegebied, waarbij het neerslagoverschot infiltreert naar het diepe grondwater. Dit komt beter tot uiting als gekeken wordt naar de grondwaterflux door de eerste slecht doorlatende laag, de laag tussen het freatisch watervoerende pakket (toplaag) en het eronder gelegen diepe grondwatersysteem (Figuur 4-11). Voor de gehele periode is een infiltratieflux berekend van de freatische toplaag naar de diepe watervoerende pakketten.

Voor het lager gelegen gebied (beek) in LSW-1655 is de situatie geheel anders. De freatische grondwaterstand zit vooral tussen 0,20 en 0,70 m beneden maaiveld, het traject waarbinnen het drainagesysteem volop actief is. De kwelflux, die uit de dieper gelegen lagen moet komen, is duidelijk zichtbaar in de grondwaterstroming door de slecht doorlatende laag. Voor deelstroomgebied LSW-1641 zijn de verschillen minder duidelijk. Het geselecteerde knooppunt bij de beek heeft weliswaar hogere kwel dan het hoger gelegen knooppunt, maar het patroon van kwel/infiltratie is voor beide punten min of meer gelijk.



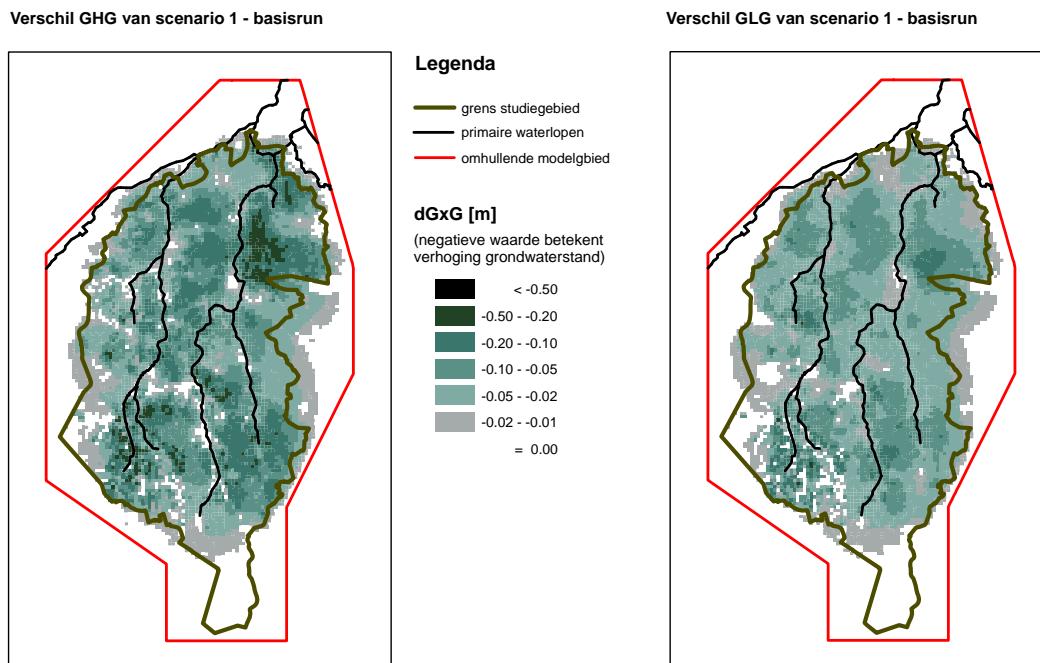
**Figuur 4-10: Freatische grondwaterstand voor twee knooppunten in deelstroomgebied LSW-1641 en LSW-1655**



**Figuur 4-11: Grondwaterflux door eerste slecht doorlatende laag voor twee knooppunten in deelstroomgebied LSW-1641 en LSW-1655**

## 4.4 Scenario 1: effect van verondiepen van tertiair systeem in landbouwgebied

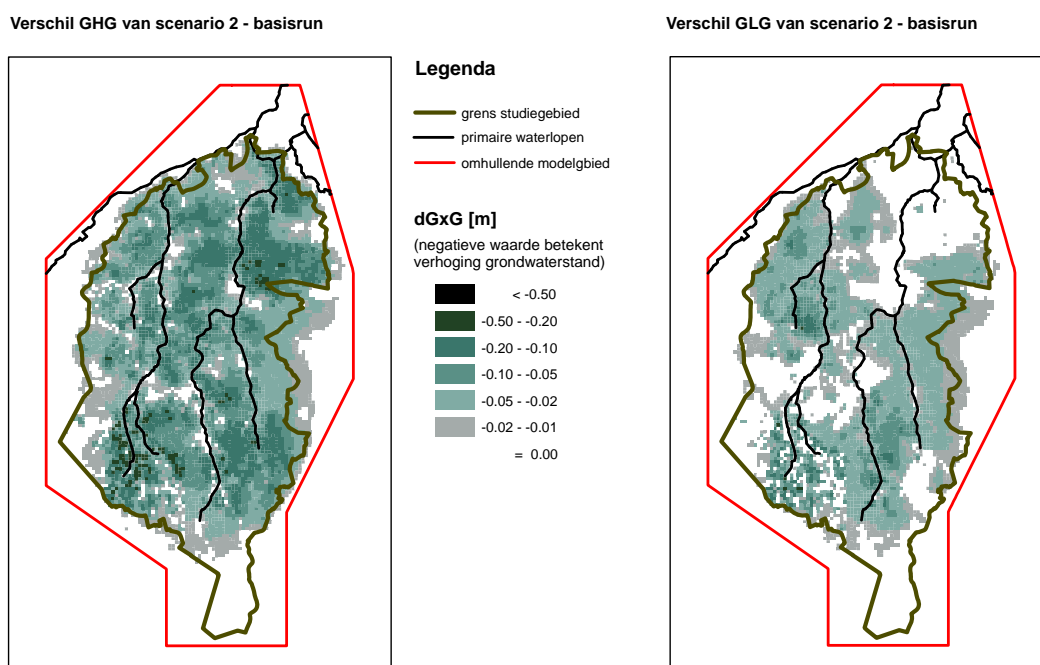
Door de waterlopen in het landbouwgebied met 0,30 m te verondiepen, wordt de afwatering van het tertiaire drainagesetel vertraagd en verminderd. Door het gebruikte modelconcept leidt de aanpassing niet tot andere waarden van de lekweerstand. De nieuwe diepte van de waterlopen wordt verwerkt in de niet-lineaire grondwaterstand-afvoerrelatie en komt tot uiting in een later actief zijn van het tertiaire drainagesysteem. De grondwaterstand zal hierdoor plaatselijk stijgen, afhankelijk van de activiteit van het drainagesysteem in de basisrun, en ook de berging van grondwater zal tijdelijk toenemen. In Figuur 4-12 zijn de berekende effecten op de GHG en GLG weergegeven. De effecten bij de GHG zijn groter dan bij de GLG, omdat in de natte periode het tertiaire drainagesysteem actiever is dan in de droge zomermaanden.



**Figuur 4-12: Verschil in GHG (links) en GLG (rechts) als gevolg van het verondiepen van de slootbodern tertiair systeem met 0,30 m in het landbouwgebied**

## 4.5 Scenario 2: effecten dempen van waterlopen tertiair systeem in landbouwgebied

Bij deze maatregel is de helft van de tertiaire waterlopen in het landbouwgebied gedempt. Voor elk invloedsgedebied van het modelknooppunt is bepaald hoeveel meter waterloop van het tertiaire drainagestelsel binnen het landbouwgebied ligt. Vervolgens is dit aantal met de helft verminderd. Door het gebruikte modelconcept, waarbij de slootdichtheid een maat is voor de lekweerstand, vertaalt deze maatregel zich in een nieuwe, hogere lekweerstand. Ook deze maatregel leidt tot een plaatselijke verhoging van de grondwaterstand, een vertraagde en geringere afvoer van het drainagestelsel en toename van de infiltratie. In Figuur 4-13 zijn de effecten op de GHG en GLG weergegeven. De effecten zijn kleiner dan bij het verondiepen van de slootbodem. Oorzaak moet gezocht worden in het eerder actief zijn van het drainagestelsel bij dit scenario.



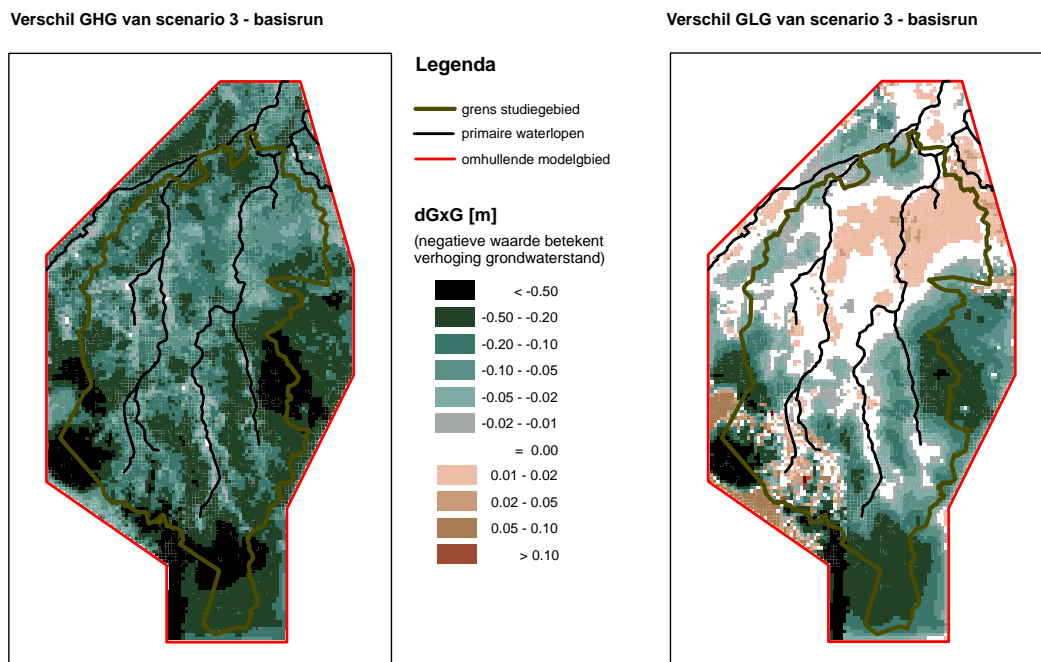
**Figuur 4-13: Verschil in GHG (links) en GLG (rechts) als gevolg van het dempen van waterlopen in het tertiaire drainagesysteem in het landbouwgebied**

## 4.6 Scenario 3: effecten van klimaatverandering

Om het effect van een verandering in het klimaat te onderzoeken zijn de meteorologische invoergegevens als volgt aangepast:

- De dagneerslag in de winterperiode van 1981-1990 is verhoogd met 25%.
- De referentiegewasverdamping in de periode 1981-1990 is met 5% verhoogd.

Het verhogen van de neerslag heeft een duidelijk effect op de GHG. In grote delen van het modelgebied stijgt de GHG met meer dan 0,20 m, lokaal zelfs meer dan 0,50 m. In gebieden met een sterke stijging van de GHG ( $> 0,20$  m) is ook een (soms aanzienlijke) hogere GLG berekend (zie Figuur 4-14). Mogelijk is hier sprake van het ‘opvullen’ van diepe grondwaterstanden in het freatische watervoerende pakket (bijv. winning Vessem). Het effect van een verhoging van de referentiegewasverdamping op de GLG is echter gering. In een groot deel van het onderzoeksgebied (midden en noord-oost) is het effect op de GLG gering, slechts enkele cm hogere of lagere grondwaterstanden.



Figuur 4-14: Verschil in GHG (links) en GLG (rechts) als gevolg van een verandering in het klimaat

## 4.7 Effecten op waterbalans

In Tabel 4-2 is de waterbalans van de basisrun en de scenario's weergegeven, zowel voor het jaar 1989 als het gemiddelde voor de periode 1985-1990. Ook nu is weer gekeken naar de deelstroomgebieden LSW-1641, LSW-1655 en het onderzoeksgebied. De waterbalans is opgemaakt met de rekenresultaten van SWAP.

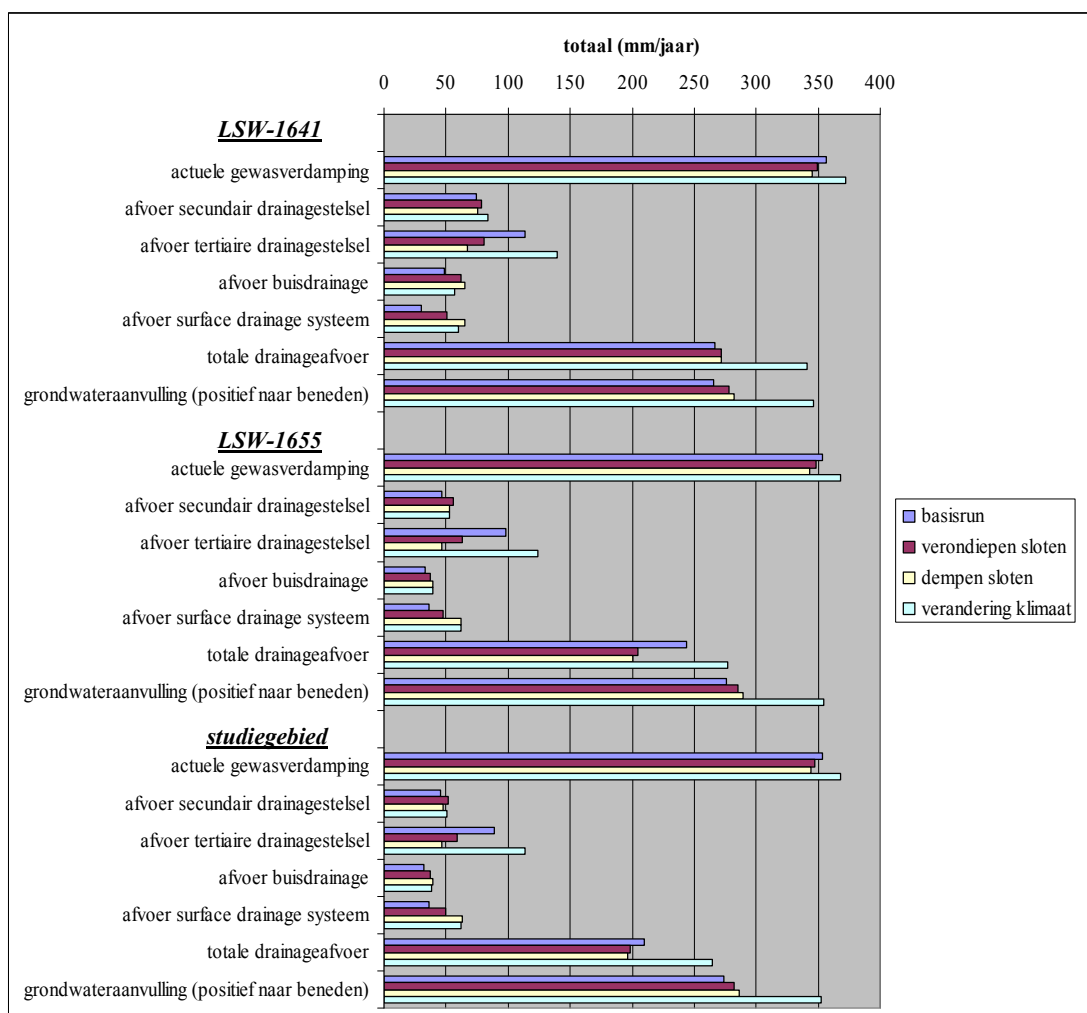
Opvallend is, ondanks hogere grondwaterstanden, de afname van de actuele gewasverdamping in de twee scenario's die betrekking hebben op het tertiaire drainagesysteem. De grondwateraanvulling, de grondwaterstroming over het freatisch vlak,

neemt hierdoor toe. Deze trend is in alle gepresenteerde cijfers zichtbaar, dus voor het jaar 1989, het gemiddelde van de periode 1985-1990, de deelstroomgebieden LSW-1641 en LSW-1655 en het studiegebied.

De afvoer van het tertiaire drainagesysteem neemt door de ingrepen af. De totale drainageafvoer verandert niet spectaculair. Wel treedt binnen de onderscheiden drainagesystemen een verschuiving op. Vooral de afvoer naar het surfacedrainagesysteem neemt in verhouding sterk toe. Dit drainagesysteem is (modelmatig) actief als de grondwaterstand binnen het traject van maaiveld tot 0,20 m onder maaiveld ligt.

Voor het klimaatscenario zitten de grote verschillen vooral in de actuele gewasverdamping, neerslag (beide min of meer invoergerelateerd), afvoer tertiair drainagesysteem, afvoer surfacedrainagesysteem, resulterend in een hogere totale drainageafvoer en grondwateraanvulling.

In Figuur 4-15 zijn voor de periode 1985-1990 en de vier modelruns de relatief grootste veranderingen in de waterbalansen grafisch weergegeven voor achtereenvolgens de deelstroomgebieden LSW-1641, LSW-1655.



**Figuur 4-15: Enkele (grote) waterbalanstermen van de vier modelruns, gemiddeld voor de periode 1985-1990, voor de deelstroomgebieden LSW-1641, LSW-1655 en studiegebied**



**Tabel 4-2: Waterbalanstermen van de vier modelruns, voor 1989 en als jaargemiddelde voor de periode 1985-1990, voor de deelstroomgebieden LSW-1641, LSW-1655 en studiegebied**

	1989				gemiddelde 1985-1990			
	bas	s1	s2	s3	bas	s1	s2	s3
<b><u>LSW-1641</u></b>								
bergingsverandering water in kolom	-102	-103	-102	-84	-11	-12	-12	-7
neerslag	627	627	627	712	784	784	784	883
flux door 1ste aquitard (SWAP) (positief naar boven)	25	25	25	29	12	8	5	13
verdamping intercepted water	85	85	85	87	92	92	92	95
actuele bodemverdamping	90	91	91	93	88	88	88	91
actuele gewasverdamping	405	402	400	420	357	349	345	372
afvoer secundair drainagestelsel	53	56	55	60	74	79	75	84
afvoer tertiaire drainagestelsel	75	53	45	96	114	81	67	140
afvoer buisdrainage	32	42	45	38	49	62	65	57
afvoer surfacedrainagesysteem	13	25	33	29	30	51	65	60
potentiële bodemverdamping	115	115	115	121	102	102	102	107
potentiële gewasverdamping	440	440	440	463	382	382	382	403
totale drainageafvoer	173	176	178	224	267	272	272	341
grondwateraanvulling (positief naar beneden)	154	161	162	207	266	278	282	346
<b><u>LSW-1655</u></b>								
bergingsverandering water in kolom	-123	-123	-122	-107	-17	-17	-17	-13
neerslag	627	627	627	712	784	784	784	883
flux door 1ste aquitard (SWAP) (positief naar boven)	-24	-33	-37	-27	-51	-65	-74	-60
verdamping intercepted water	85	85	85	87	92	92	92	95
actuele bodemverdamping	90	91	91	94	88	88	88	91
actuele gewasverdamping	401	398	395	417	354	348	343	368
afvoer secundair drainagestelsel	35	44	42	40	46	56	53	53
afvoer tertiaire drainagestelsel	70	45	34	90	98	63	46	124
afvoer buisdrainage	25	28	30	29	33	37	39	39
afvoer surfacedrainagesysteem	18	26	35	33	36	48	62	62
potentiële bodemverdamping	115	114	114	121	102	102	102	107
potentiële gewasverdamping	440	440	440	463	382	382	382	403
totale drainageafvoer	148	142	140	193	244	205	201	277
grondwateraanvulling (positief naar beneden)	179	184	186	231	276	285	289	355
<b><u>studiegebied</u></b>								
bergingsverandering water in kolom	-132	-132	-131	-116	-17	-18	-18	-14
neerslag	625	625	625	709	781	781	781	879
flux door 1ste aquitard (SWAP) (positief naar boven)	-46	-51	-54	-49	-63	-72	-77	-72
verdamping intercepted water	84	84	84	87	92	92	92	95
actuele bodemverdamping	90	90	90	93	88	88	88	91
actuele gewasverdamping	397	394	391	414	353	347	344	368
afvoer secundair drainagestelsel	33	39	37	39	45	52	48	51
afvoer tertiaire drainagestelsel	61	41	33	81	89	59	46	114
afvoer buisdrainage	24	27	29	28	32	37	39	38
afvoer surfacedrainagesysteem	20	28	37	35	36	50	63	62
potentiële bodemverdamping	114	114	114	120	101	101	101	107
potentiële gewasverdamping	439	439	439	462	380	380	380	401
totale drainageafvoer	138	135	135	182	210	198	196	265
grondwateraanvulling (positief naar beneden)	190	195	198	242	274	282	286	352

Bas : basisrun  
S1 : verondiepen sloten  
S2 : dempen sloten  
S3 : verandering klimaat



## 5. Discussie en conclusies

In het kader van een vergelijkstudie van de werkgroep 'Consensus hydrologie' zijn de hydrologische modellen van Alterra, RIZA en MNP toegepast op het stroomgebied van de Beerze en de Reusel. Het MNP gebruikte voor deze studie een koppeling tussen het onverzadigdezonemodel SWAP en het grondwatermodel LGM. De koppeling werd 'op afstand' uitgevoerd, ingrepen in de individuele modellen waren daarom nauwelijks noodzakelijk. Voor de koppeling zijn gegevens op decadebasis uitgewisseld, zodat er sprake was van een transiënte koppeling. Voor ieder invloedsgebied van LGM is één SWAP-berekening uitgevoerd (een zogenaamde één-op-éénkoppeling). Dit is een belangrijk verschil met de tot dusverre bij landelijke hydrologische studies gehanteerde werkwijze. In de tot dusverre gehanteerde methode wordt één SWAP-run uitgevoerd per unieke combinatie van bodemeigenschappen, gewastype en hydrologische eigenschappen (zogenoemde plots). Er is inmiddels consensus dat deze werkwijze achterhaald is (Van der Giessen, 2005).

De in dit rapport gepresenteerde koppelingsmethode levert goede resultaten. De berekende waterbalanstermen van LGM zijn vrijwel gelijk aan die van SWAP. Ook de dynamiek van de berekende grondwaterstanden, zoals berekend met de beide modellen, kwam goed overeen. Doordat de modellen op decadebasis gekoppeld waren en SWAP op dagbasis rekent, rekende LGM iets minder grote jaarlijkse grondwaterstandfluctuaties uit dan SWAP. Dit verschil was echter zelden groter dan enkele centimeters. De gehanteerde methode is ook praktisch bruikbaar: de modellen convergeerden in het algemeen in drie iteraties.

De zogenoemde freatische bergingscoëfficiënt speelt een essentiële rol bij de koppeling van beide modellen. Tijdens deze studie zijn twee methoden uitgetoetst om met deze bergingscoëfficiënt om te gaan. In de eerste methode is de bergingscoëfficiënt variabel in de tijd ingevoerd en is de flux over het freatisch vlak gebruikt om de modellen te koppelen. In de tweede methode is de bergingscoëfficiënt constant in de tijd verondersteld en verdisconteerd in een tijdsafhankelijke grondwaterflux. Theoretisch leveren beide methoden dezelfde resultaten, omdat van dezelfde berekeningsresultaten van SWAP is uitgegaan. Dat is geconstateerd toen beide methoden naast elkaar werden gebruikt. Echter de stabiliteit en de robuustheid van de tweede methode hebben ertoe geleid dat uiteindelijk alleen voor de tweede methode volledig geconvergeerde berekeningen zijn uitgevoerd. Het verdient aanbeveling deze methode ook te gebruiken in landsdekkende, gekoppelde hydrologische modellen, zoals het Nationaal Hydrologisch Instrument.

De koppeling is in deze studie uitgevoerd voor een relatief grof eindig-elementennetwerk (gemiddelde elementgrootte  $500 \times 500 \text{ m}^2$ ). Om de resultaten toch met een fijnere resolutie van  $250 \times 250 \text{ m}^2$  te kunnen presenteren is succesvol een tweestapsbenadering gevolgd. In deze benadering zijn de modellen LGM en SWAP iteratief op elkaar afgestemd voor het grove netwerk. Vervolgens is, met de geconvergeerde data, éénmalig een niet-stationaire LGM-run gedaan. Het voordeel van deze methode is dat het SWAP-model (dat het grootste deel van de rekentijd opsoupeert) uitsluitend op het grove netwerk hoeft te worden toegepast. Deze methodiek zou ook gebruikt kunnen worden om in grootschalige modelstudies uitspraken te kunnen doen met een zeer fijne resolutie (bijvoorbeeld  $25 \times 25 \text{ m}^2$ ). Hiervoor dient de methode wel te worden verfijnd.

SWAP en LGM vertonen een aantal conceptuele verschillen. Een belangrijk verschil is dat de horizontale grondwaterstroming in het freatische watervoerende pakket en de stroming van en naar lijnvormige rivierelementen van LGM niet in SWAP kunnen worden gemodelleerd. Deze fluxen moesten daarom als een extra grondwaterflux aan de onderkant van de SWAP-kolom worden opgenomen. Om dit mogelijk te maken is een speciale versie van het SWAP-model gemaakt. Het verdient aanbeveling deze aanpassing standaard in te bouwen in het SWAP-model.

Een ander conceptueel verschil betreft de verticale stromingsweerstand in het verzadigde deel van de SWAP-kolom. Deze weerstand is vooralsnog niet in LGM-parameterisatie van de c-waarde van de eerste slecht doorlatende laag meegenomen. Omdat de dikte van het freatische watervoerende pakket meestal beperkt is tot enkele meters, zal de bijbehorende verticale stromingsweerstand gering zijn en dus slechts kleine verschillen tussen LGM en SWAP tot gevolg hebben.

Voor elk rivierknooppunt moet een waterpeil worden afgeleid. In de studie is geen rekening gehouden met de variabiliteit in de tijd van waterpeilen. Deze keuze is gemaakt omdat de tijdsafhankelijke parameterinvoer van lijnelementen in het huidige LGM niet operationeel is. LGM is in oorsprong opgezet om ook tijdsafhankelijke waterpeilen te kunnen inlezen. Maar na de implementatie van GIS in LGM en de daarmee gepaard gaande aanpassing van de invoerroutines van LGM, is de optie van een in de tijd variërend waterpeil voor lijnelementen niet meegenomen. Dit betekent dat het waterpeil in de beek in de natte periode wordt onderschat (te laag ten opzichte van de werkelijkheid) en in de droge periode overschat (te hoog ten opzichte van de werkelijkheid). Dit zal ongetwijfeld in de lokale omgeving van de beek invloed hebben op de grondwaterstand en dus de stroming van grondwater van of naar de beek.

## Literatuur

- Dam, J.C. van (2000) Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. Ph.D. Thesis. Wageningen University, Wageningen, the Netherlands.
- Dam, J.C. van, J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk, C.A. van Diepen (1997) Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. Technical document 45. Wageningen Agricultural University and DLO Winand Staring Centre, the Netherlands.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik, H. Zaradny (1978) Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. PUDOC, Wageningen, the Netherlands.
- Giessen, A. van der (2005) Naar een gezamenlijk Nationaal Hydrologisch Modelinstrumentarium; Eindrapport van de werkgroep Consensus Hydrologie. MNP-rapport 500026002. Milieu- en natuurplanbureau, Bilthoven.
- Laat, P.J.M. de (1980) Model for unsaturated flow above a shallow water-table. Proefschrift, Landbouwhogeschool Wageningen.
- MNP (2004) Mineralen beter geregeld. Evaluatie van de werking van de Meststoffenwet 1998-2003.. RIVM-rapport 500031001. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- MNP (2005) Effecten van klimaatverandering in Nederland. MNP-rapport 773001034. Milieu- en natuurplanbureau, Bilthoven.
- MNP (2006a) Tussenevaluatie van de Nota duurzame gewasbescherming. MNP-rapport 500126001. Milieu- en Natuurplanbureau, Bilthoven.
- MNP (2006b) Natuurbalans 2006. MNP-rapport 500402001. Milieu- en natuurplanbureau, Bilthoven.
- MNP (2006c) Nationale Milieuverkenning 6 2006-2040. MNP-rapport 500085001. Milieu- en natuurplanbureau, Bilthoven.
- 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.
- Walsum, P.E.V. van, H.Th.L. Massop (2003) Consensusmodellering regionale hydrologie: Deelrapport SIMGRO. Alterra-rapport 870, ISSN 1566-7197.
- Walsum, P.E.V. van, P.F.M. Verdonschot en J. Runhaar (2002) Effects of climate and land-use change on lowland stream ecosystems. Nationaal Onderzoek Programma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering (NOP). Report 523, Alterra, Wageningen.
- Willems, W.J., A.H.W. Beusen, L.V. Renaud, H.H. Luesink, J.G. Conijn, H.P. Oosterom, G.J. v.d. Born, J.G. Kroes, P. Groenendijk, O.F. Schoumans (2005) Nutriëntenbelasting van bodem en water. Verkenning van de gevolgen van het nieuwe mestbeleid. MNP-rapport 500031003. Milieu- en natuurplanbureau, Bilthoven.

Wösten, J.H.M. (1987) Beschrijving van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken uit de Staringreeks met analytische functies. Rapport 2019. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Wösten, J.H.M., F. de Fries, J. Denneboom, 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.