HG172 Kast Hydrologie

Vakgroep Waterhuishouding

Ruimtelijke en temporele grondwateraanvulling in het stroomgebied van de Noor

Een analyse met verschiliende onverzadigde en verzadigde grondwatermodellen

M.V.M. te Vaarwerk

September, 1997

Landbouwuniversiteit **Wageningen**

Vakgroep Waterhuishouding, groep Hydrogeologie

Ruimtelijke en temporele grondwateraanvulling in het stroomgebied van de Noor

Een analyse met verschillende onverzadigde en verzadigde grondwatermodellen

Afstudeeronderzoek Hydrologie (K150-717)

M.V.M. te Vaarwerk

Wageningen, september 1997

Begeleiders: Dr. ir. H.A.J. van Lanen
R. Dijksma
ir. J.C. van Dam
ing. G. Bier

Landbouwuniversiteit **Wageningen**

Voorwoord

Deze scriptie is het resultaat van een 6-maands afstudeervak Hydrologie voor de studierichting Bodem, Water en Atmosfeer aan de Vakgroep Waterhuishouding van de Landbouw Universiteit Wageningen. Hierbij wil ik mijn begeleiders Henny van Lanen, Roel Dijksma, Jos van Dam en George Bier bedanken voor hun adviezen en grote enthousiasme.

De rondleiding door Roel, in en rond het stroomgebied van de Noor, in het beginstadium van het onderzoek was erg verhelderend. Het aanpassen van de programmacode van het agrohydrologisch model SWAP door Jos, zodat de gewenste extra uitvoer wordt gegenereerd, heeft het onderzoek gemakkelijker gemaakt. Bovendien zijn het aantal compartimenten vergroot waardoor de onverzadigde grondwaterstroming tot op grotere diepte gedetailleerder kan worden gesimuleerd. De programmacode van het reservoirmodel NUT_DAY is aangepast door Henny. De berekening van het actuele neerslagoverschot vindt nu plaats met invoerbestanden, waardoor de simulatie makkelijker te controleren en te reproduceren is. George heeft mij geholpen met het vergroten van het aantal tijdstappen in het programma MUNSFLOW, zodat de onverzadigde grondwaterstroming meerdere jaren achter elkaar kan worden doorgerekend. Ook het opstarten van het verzadigd grondwatermodel MODFLOW door George heeft mij erg geholpen bij het onderzoek.

Verder wil ik Marette Zwamborn (Kiwa Onderzoek en Advies, Nieuwegein) bedanken voor het beschikbaar stellen van het programma MUNSFLOW.

Tot slot wil ik de familie Ortmans uit Slenaken bedanken voor hun gastvrijheid tijdens de rondleiding in het stroomgebied en de mede-studenten in de zaal voor de gezelligheid.

Mariska te Vaarwerk

Inhoud

Samenvatting

1. Inleiding **1**

2. Gebiedsbeschrijving **3**
2.1 Algemeen 3
2.1.1 Ligging 3
2.1.2 Klimaat 4
2.1.3 Landgebruik 4
2.2 Geologie van Zuid-Limburg 5
2.2.1 Geologisch kader 5
2.2.2 Geologische geschiedenis 6
2.3 Hydrogeologie van het Noordal 7
2.3.1 Hydrostratigrafie 7
2.3.1.1 Carboon 7
2.3.1.2 Krijt 8
2.3.1.3 Kwartair 8
2.3.2 Hydrogeologisch systeem 9

3. Procedure en gebiedsindeling **11**
3.1 Inleiding 11
3.2 Verticale schematisering en toegepaste modellen 11
3.3 Horizontale schematisering 12

4. Agrohydrologisch model SWAP **15**
4.1 Modelbeschrijving 15
4.2 Modelachtergronden 15
4.3 Invoer en uitvoer 20
4.4 Neerslagoverschot en grondwateraanvulling 22
4.5 Gevoeligheidsanalyse 25
4.5.1 Methode 25
4.5.2 Landgebruik 25
4.5.3 Bewortelingsdiepte 26
4.5.4 Verzadigde doorlatendheid 26
4.5.5 Onderrandvoorwaarde 28
4.5.6 Bodemtype 29
4.5.7 Bodemfysische eigenschappen van de Formatie van Gulpen 30
4.5.8 Compartimentsgrootte 31
4.5.9 Samenvatting 31

5. Andere onverzadigde grondwatermodellen **33**
5.1 Reservoirmodel NUT_DAY 33
5.1.1 Modelbeschrijving 33
5.1.2 Modelachtergronden 33
5.1.3 Invoer en uitvoer 35

5.1.4 Neerslagoverschot 36
5.1.5 Gevoeligheidsanalyse 38
5.1.5.1 Landgebruik 38
5.1.5.2 Bewortelingsdiepte 38
5.1.5.3 Kritisch punt voor reductie van de potentiële verdamping 39
5.2 MUNSFLOW 39
5.2.1 Modelbeschrijving 39
5.2.2 Modelachtergronden 40
5.2.3 Invoer en uitvoer 42
5.2.4 Neerslagoverschot en grondwateraanvulling 43
5.2.5 Gevoeligheidsanalyse 45
5.2.5.1 Heterogene ondergrond 45
5.2.5.2 Verzadigde doorlatendheid 45
5.3 Transferfunctie 46
5.3.1 Beschrijving 46
5.3.2 Achtergrond 47
5.3.3 Invoer en uitvoer 47
5.3.4 Grondwateraanvulling 48

6. Vergelijking onverzadigde grondwatermodellen 49
6.1 Methode 49
6.2 Wortelzone 49
6.3 Onverzadigde ondergrond 52

7. Verzadigd grondwatermodel MODFLOW 55
7.1 Inleiding 55
7.2 Modelachtergronden 55
7.3 Invoer en uitvoer 57
7.4 Resultaten 58

8. Conclusies en aanbevelingen 61
8.1 Conclusies 61
8.2 Aanbevelingen 62

Literatuurlijst

Bijlagen

Samenvatting

In Zuid-Limburg, een plateau en dallandschap, wordt in het stroomgebied van de Noor hydrogeologisch onderzoek gedaan om inzicht te krijgen in de grondwaterstroming. Daarvoor zijn in het recente verleden verzadigde grondwatermodellen toegepast, waaronder MODFLOW. Grondwateraanvulling is in deze modellen een belangrijke randvoorwaarde. De grondwateraanvulling is in gebieden met een diepe grondwaterstand lastig te bepalen. In het stroomgebied van de Noor is de grondwateraanvulling daarom tot op heden op een grove manier benaderd.
De doelstelling van dit onderzoek is derhalve het vaststellen van de ruimtelijke en temporele verdeling van de grondwateraanvulling in het stroomgebied van de Noor en de reactie van de grondwaterstanden daarop. Voor een betrouwbare bepaling van de grondwateraanvulling zal het actuele neerslagoverschot, indien er geen meetgegevens voorhanden zijn, moeten worden bepaald met onverzadigde grondwatermodellen. In gebieden met een diepe grondwaterstand, zoals onder de plateau's en hellingen in het stroomgebied van de Noor, speelt verticaal opwaarts vochttransport vanaf het freatisch vlak geen rol en komt het neerslagoverschot in een dikke onverzadigde ondergrond (tot 55 m) terecht waar het uitsluitend verticaal naar beneden stroomt. Hier spelen vertraging en demping van het neerslagoverschot een rol. Deze vertraging en demping in de onverzadigde ondergrond wordt ook benaderd met onverzadigde grondwatermodellen. Met de onverzadigde grondwatermodellen wordt uiteindelijk de grondwateraanvulling berekend (in tijdreeksen) en als invoer gebruikt in een bestaand MODFLOW model. De met dit model gesimuleerde stijghoogten worden vergeleken met de gemeten stijghoogten. De grootte van de verschillen tussen de gemeten en gesimuleerde stijghoogten geven informatie over de betrouwbaarheid van de gesimuleerde grondwateraanvulling.

Bij de bepaling van het neerslagoverschot en de grondwateraanvulling is rekening gehouden met het bodemtype, het landgebruik, de geologische opbouw en de grondwaterstandsdiepte. Hiertoe is het stroomgebied van de Noor ingedeeld in 45 eenheden.

Het neerslagoverschot is bepaald met het agrohydrologisch model SWAP, het reservoirmodel NUT_DAY en het reservoirmodel in het programma MUNSFLOW. Daarbij is het agrohydrologisch model SWAP als conceptueel het beste model voor de berekening van het actuele neerslagoverschot (in het stroomgebied van de Noor) naar voren gekomen. In tegenstelling tot de twee reservoirmodellen houdt SWAP bij de berekening van het neerslagoverschot rekening met interceptie van het gewas. Bovendien worden evaporatie en transpiratie apart berekend en is capillaire nalevering vanuit het bovenste deel van de onverzadigde ondergrond mogelijk. Uit de berekeningen met SWAP kwam naar voren dat het neerslagoverschot van graan het grootst is, gevolgd door maïs, gras en loofbos. Het gemiddeld neerslagoverschot in de periode 1991-1994 ligt tussen de 240 en 375 mm/jaar.

Om de vertraging en demping van het neerslagoverschot in de onverzadigde ondergrond te bepalen zijn het agrohydrologisch model SWAP, het programma MUNSFLOW en een wiskundige transferfunctie gebruikt. Voor de simulatie van de onverzadigde grondwaterstroming is, in het stroomgebied van de Noor, het agrohydrologisch model SWAP als conceptueel het beste model naar voren gekomen. Het model houdt rekening met de fysische eigenschappen van de grond. Bovendien worden variabele vochtgehalten in de

grond meegenomen bij de berekening van de onverzadigde grondwaterstroming. De gemiddelde vertraging van het neerslagoverschot tussen 3 en 7 meter diepte is ongeveer 3 maanden en de piekdemping is zo'n 70%.

De met SWAP berekende grondwateraanvulling is in het verzadigd grondwatermodel MODFLOW gebruikt voor het berekenen van stijghoogten in het stroomgebied van de Noor. Vergelijking van berekende en gemeten grondwaterstanden laat zien dat de berekende grondwaterstanden te weinig fluctueren en teveel vertraagd zijn. De door SWAP berekende grondwateraanvulling is op 15 m diepte iets meer dan een half jaar vertraagd en de demping is te groot. Het neerslagoverschot wordt minder vertraagd en gedempt als de verzadigde doorlatendheid bij de simulatie van de onverzadigde grondwaterstroming wordt vergroot. De met SWAP berekende grondwateraanvulling blijkt echter, uit de vergelijking van gemeten en berekende stijghoogten in MODFLOW, nog steeds teveel vertraging en demping te ondervinden.

Als de reële verzadigde doorlatendheden in SWAP worden vervangen door arbitrair gekozen effectieve waarden om spleetstroming in de kalksteen te simuleren dan is de demping en vertraging van het neerslagoverschot nog te groot. Introductie van preferente stroming in de onverzadigde zone door spleten in de Formatie van Gulpen zou mogelijk leiden tot een betere simulatie van de temporele verdeling van de grondwateraanvulling.

1. Inleiding

Probleemverkenning
Voor het voeren van een optimaal grondwaterbeheer zijn verzadigde grondwaterstromingsmodellen belangrijke hulpmiddelen geworden. Verzadigde grondwatermodellen berekenen uitsluitend de grondwaterstroming in de verzadigde zone. Ook in het stroomgebied van de Noor, gelegen in Zuid-Limburg en België, zijn niet-stationaire verzadigde grondwaterstromingsmodellen toegepast om inzicht te krijgen in de grondwaterstroming (Kroon en Weerts, 1995 en van Lanen et al. 1995). Grondwateraanvulling is zeker in verzadigde grondwatermodellen een belangrijke randvoorwaarde.
De verzadigde grondwaterstroming in het gebied is reeds gemodelleerd met MODFLOW (Kroon en Weerts, 1995), waarbij de grondwateraanvulling op een grove manier is benaderd. Voor een betrouwbare bepaling van de grondwateraanvulling zal allereerst, omdat er geen metingen zijn, het neerslagoverschot goed moeten worden benaderd met onverzadigde grondwatermodellen. Daarna stroomt in gebieden met een diepe grondwaterstand, zoals onder de plateaus en hellingen in het stroomgebied van de Noor, het neerslagoverschot vervolgens door een dikke onverzadigde zone. De grondwaterstand reageert dan niet direct op een neerslagoverschot, maar met een vertraging en demping. Om de grondwateraanvulling in het stroomgebied van de Noor te kunnen vaststellen dient dus rekening te worden gehouden met processen in de wortelzone en de stroming door de onverzadigde ondergrond. In de onverzadigde ondergrond spelen vertraging en demping een rol.
De grondwateraanvulling is niet op een praktische manier direct te meten. Een toetsingsmogelijkheid is gebruik te maken van gemeten grondwaterstanden. Er zijn echter relatief weinig waarnemingspunten in het stroomgebied van de Noor voorhanden waar diepe grondwaterstanden voorkomen. Bovendien is de beperking van deze methode dat de grondwaterstanden niet alleen afhankelijk zijn van het neerslagoverschot en de stroming door de onverzadigde zone, maar ook van de stroming in de verzadigde zone. Zo kan het voorkomen dat er grondwateraanvulling plaatsvindt zonder dat het grondwaterpeil stijgt. Er zal daarom een bestaand model voor de verzadigde grondwaterstroming in MODFLOW als gereedschap gebruikt worden om de grondwateraanvulling te toetsen. Hierbij zal alleen gekeken worden naar het oostelijk deel van het stroomgebied.

Doelstelling
Het vaststellen van de ruimtelijke en temporele verdeling van de grondwateraanvulling in het stroomgebied van de Noor en de reactie van de grondwaterstand daarop.
Deze doelstelling is onder te verdelen in de volgende deelvragen:

- Hoe is de algemene, bodemkundige, geologische en hydrogeologische opbouw van het gebied?
- Wat is een geschikte gebiedsindeling, zodat deze te gebruiken is in de toe te passen modellen?
- Welke onverzadigde modellen zijn toepasbaar en hoe werken ze?
- Welke invoerparameters zijn nodig en hoe kan hun grootte worden vastgesteld?
- Welke modelvariant en eventuele combinatie van onverzadigde grondwatermodellen is het beste bruikbaar om de ruimtelijke en temporele verdeling van de grondwateraanvulling goed te berekenen?
- Beschrijft deze modelcombinatie de bovenrandvoorwaarde (grondwateraanvulling) voor de verzadigde grondwaterstroming in MODFLOW voldoende betrouwbaar?

Onderzoeksactiviteiten

Er is al veel onderzoek verricht in het Noordal en er zijn dan ook veel gegevens bekend. De eerste fase bestond uit een literatuurstudie en daarna een verkennend veldonderzoek in het gebied. Tijdens het veldonderzoek werden de volgende zaken bekeken:

- de belangrijkste geologische formaties in het Noordal;
- de gebiedsgrenzen en de aanliggende gebieden (Voerdal, Gulpdal, Plateau van Margraten);
- de verschillende meetpunten (peilbuizen, afvoermeetpunten);
- enkele raaien in het gebied.

De tweede fase bestond uit het verzamelen en verwerken van gegevens voor de bepaling van de grondwateraanvulling. De te verzamelen gegevens bestonden uit:

- het landgebruik in het gebied (gras, akkerbouw en bos) en bijbehorende gewasgegevens;
- de geologische- en bodemkaarten;
- de grondwaterstanden;
- de neerslag- en verdampingsgegevens.

Deze informatie is in de derde fase gebruikt om met onverzadigde grondwatermodellen (agrohydrologisch model SWAP en twee reservoirmodellen) de processen in de wortelzone zo goed mogelijk te simuleren en het actueel neerslagoverschot vast te stellen. De uitkomsten van de modellen zijn vergeleken, waarna het beste model is gekozen. In de vierde fase kwam de stroming door de onverzadigde ondergrond aan bod. Hier werd de grondwateraanvulling met bijbehorende vertraging en demping zo goed mogelijk vastgesteld. Gebruik werd gemaakt van de onverzadigde grondwaterstromingsmodellen SWAP, MUNSFLOW en een transferfunctie. Ook hier zijn de verschillende modellen vergeleken en uiteindelijk is het beste model voor verder gebruik geselecteerd. Het agrohydrologisch model SWAP werd als referentie gebruikt bij de vergelijking van de verschillende modellen, omdat dit model het meest gedetailleerd de fysische processen beschrijft.

In de vijfde fase van het onderzoek is de berekende grondwateraanvulling in het verzadigd grondwatermodel MODFLOW ingevoerd. De uitkomsten zijn getoetst aan de hand van gemeten grondwaterstanden in enkele diepe peilbuizen in het gebied.

Opbouw rapport

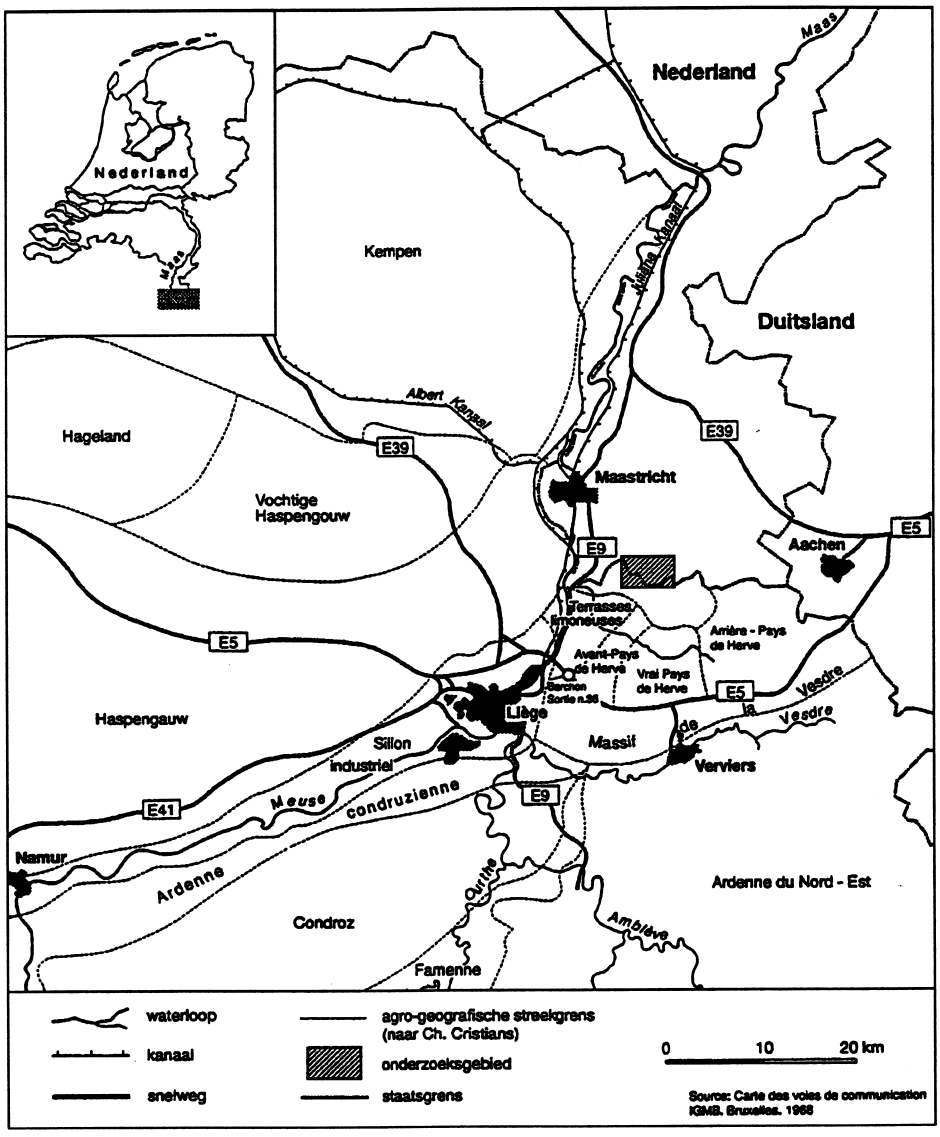
In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving van het gebied gegeven. Hier komen de algemene kenmerken, de geologische opbouw en de hydrogeologie van het gebied aan de orde. In hoofdstuk 3 wordt de gebiedsindeling beschreven, die gebruikt wordt om de ruimtelijke en temporele grondwateraanvulling vast te stellen met behulp van de onverzadigde grondwatermodellen. In hoofdstuk 4 wordt het agrohydrologisch model SWAP beschreven en zijn de resultaten van de simulaties weergegeven. De gevoeligheidsanalyse wordt eveneens beschreven. Hoofdstuk 5 beschrijft de andere onverzadigde grondwatermodellen met de resultaten van de simulaties. De onverzadigde grondwatermodellen zijn het reservoirmodel NUT_DAY, het programma MUNSFLOW en een transferfunctie. In hoofdstuk 6 worden de resultaten van de onverzadigde grondwatermodellen onderling vergeleken. Hier wordt het beste model of de beste modelcombinatie geselecteerd om de grondwateraanvulling te berekenen. De berekende grondwateraanvulling zal in hoofdstuk 7 gebruikt worden als bovenrandvoorwaarde in het verzadigd grondwatermodel. In dit hoofdstuk volgt een beschrijving van het verzadigde grondwatermodel MODFLOW en de resultaten van de simulaties. Tenslotte bevat hoofdstuk 9 de conclusies en aanbevelingen.

2. Gebiedsbeschrijving

2.1 Algemeen

2.1.1 Ligging

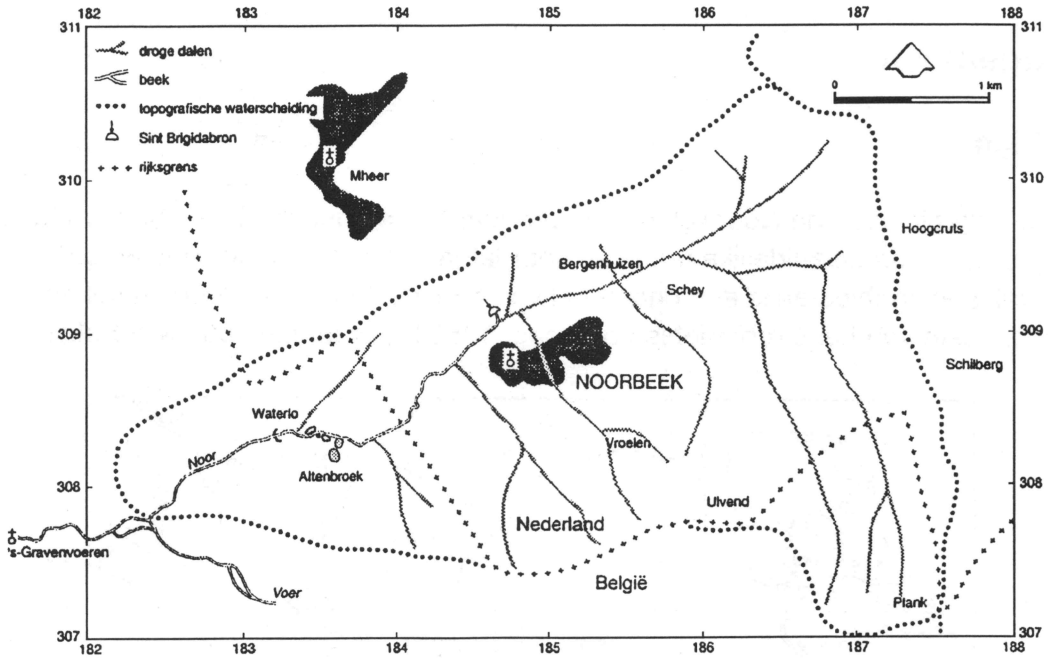
Het stroomgebied van de Noor ligt in Zuid-Limburg, in de driehoek Luik, Aken en Maastricht (zie figuur 2.1) aan de zuidelijke rand van het Plateau van Margraten. Het stroomgebied ligt in een kalksteengebied en is een onderdeel van een versneden plateau- en dallandschap. De oppervlakte van het stroomgebied bedraagt 1056 ha, waarvan 309 ha in België ligt.



Figuur 2.1: De ligging van het onderzoeksgebied (van Lanen et al., 1995).

Het Noordal begint op een hoogte van 240 m boven NAP in de omgeving van De Planck als een droog dal en wordt watervoerend bij de St. Brigidabron in Noorbeek op een hoogte van 138 m boven NAP. Het natte dal van de Noor is ongeveer 3 km lang, waarvan 1 km in Nederland ligt en 2 km in België. De Noor stroomt bij 's-Gravenvoeren in de Voer op een hoogte van 89 m boven NAP. In figuur 2.2 wordt het topografisch vanggebied van het

stroomgebied van de Noor gegeven.



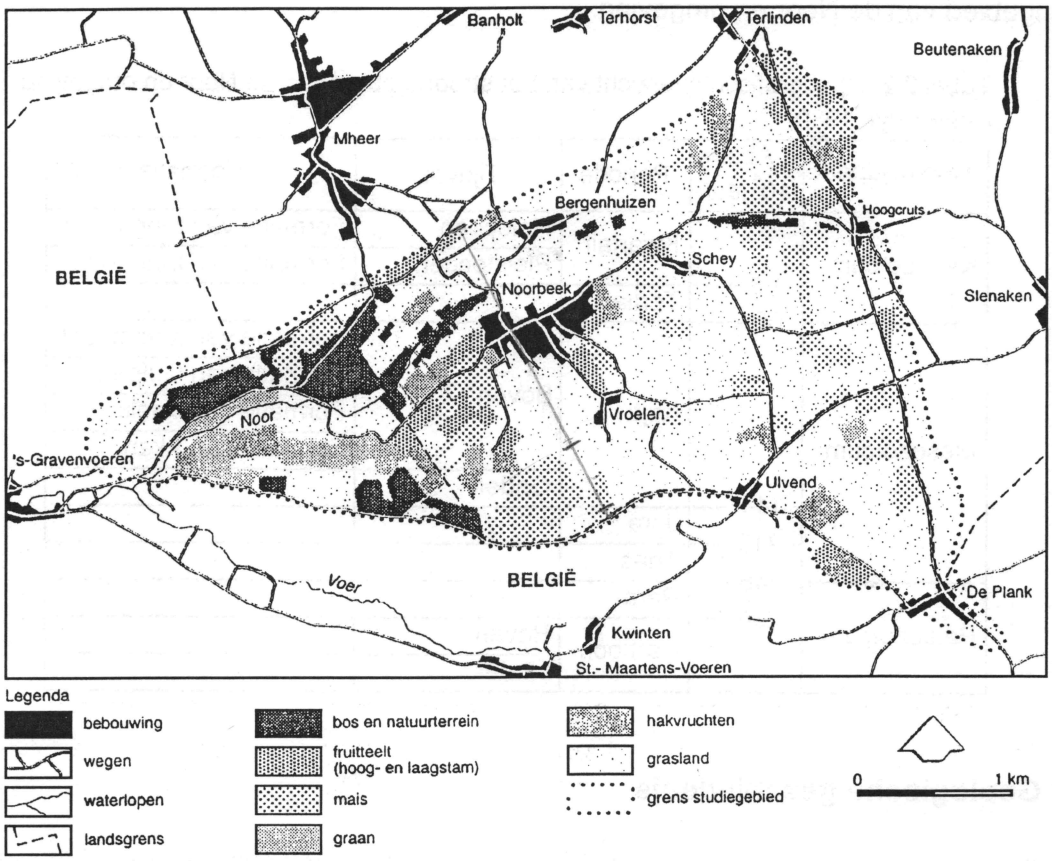
Figuur 2.2: Overzicht van het topografische vanggebied van de Noor met de droge dalen en het watervoerende deel van de Noor (van Lanen et al., 1995).

2.1.2 Klimaat

Het klimaat in Zuid-Limburg wordt volgens de klimaatsindeling van Köppen getypeerd als gematigd regenachtig met neerslag in alle seizoenen. De totale gemiddelde neerslag in Zuid-Limburg bedraagt 750-800 mm/jaar. Het gemiddelde actuele neerslagoverschot, dat het grondwater voedt, bedraagt voor Zuid-Limburg ongeveer 300 mm/jaar (Wolters-Noordhoff atlasprodukties,1988).

2.1.3 Landgebruik

Er bestaat een directe relatie tussen het landgebruik en de hellingsgraad in het gebied. Op de steile hellingen, aan de noordzijde van de Noor, bevindt zich overwegend extensief gebruikt grasland en bos. Op de minder steile hellingen, aan de zuidzijde van de Noor komt een gevarieerd landgebruik voor. In het Nederlandse deel van het dal bevindt zich een nat natuurterrein, terwijl in het Belgische deel van het dal zowel grasland als akkerland voorkomen. In figuur 2.3 en tabel 2.1 is te zien dat grasland het meest voorkomend landgebruik in het stroomgebied van de Noor is.



Figuur 2.3: Landgebruikskaart van het stroomgebied van de Noor (van Lanen et al., 1995).

Tabel 2.1: Landgebruik binnen het stroomgebied van de Noor in 1992 (van Lanen et al., 1995).

Landgebruik	hectare	percentage
grasland	665	62
hakvruchten	80	8
graan	39	4
maïs	219	20
fruit	31	3
bos en natuurterrein	14	1
wegen en bebouwing	17	2
totaal	1056	100

2.2 Geologie van Zuid-Limburg

2.2.1 Geologisch kader

De Hercynische oftewel de Variscische gebergtevorming en de Alpiene opheffing hebben een grote invloed gehad op de geologische opbouw van Zuid-Limburg.
Door de Alpiene opheffing zijn een groot deel van de Mesozoïsche en Kenozoïsche afzettingen verdwenen als gevolg van erosie. Verder naar het noorden is Zuid-Limburg steeds minder opgeheven en zijn deze afzettingen niet verdwenen. De Alpiene opheffing is tezamen met de insnijding door smeltwaterstromen tijdens het Pleistoceen de oorzaak van het nu bestaande plateau- en dallandschap. Tabel 2.2 bevat het stratigrafisch overzicht van het

stroomgebied van de Noor en omgeving.

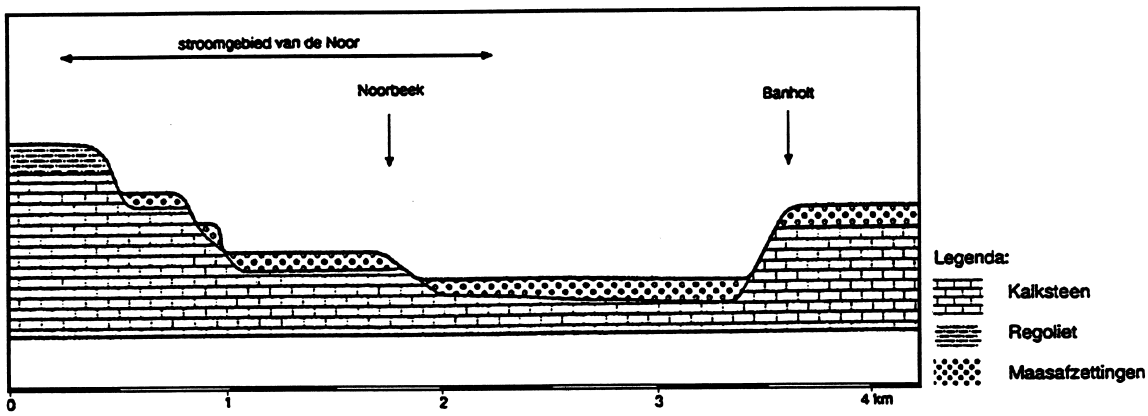
Tabel 2.2: Stratigrafisch overzicht van het stroomgebied van de Noor en omgeving (naar Kuyl, 1980).

Hoofdtijdperk	Abs. 10^6 jaar	Periode	Tijdvak	Formatie
Kenozoïcum		Kwartair	Holoceen	Formatie van Singraven
			Pleistoceen	Formatie van Eindhoven
	1.8	Tertiair		
	65			
Mesozoïcum		Krijt	Boven	Formatie van Maastricht
				Formatie van Gulpen
				Formatie van Vaals
				Formatie van Aken
			Onder	
	144	Jura		
	213	Trias		
	248	Perm		
Paleozoïcum	266	Carboon	Boven	
			Onder	

2.2.2 Geologische geschiedenis

In het Paleozoïcum vond de Hercynische gebergtevorming plaats. Er vond op grote schaal plooiing, overschuiving, erosie en denudatie plaats van verkitte sedimentsgesteenten. Heel Zuid-Limburg kwam boven zeeniveau te liggen. De nabijheid van het Massief van Brabant en het Ardennen-Rijnland Massief is na het Carboon en tijdens het Mesozoïcum van grote invloed geweest op de sedimentatie. Zuid-Limburg lag tot het Krijt aan de rand van het Noordwest Europese Sedimentatie-Bekken. In het Onder-Krijt begon de wereldwijde transgressie, waardoor de kustlijn zich langzaam naar het hoger gelegen zuiden verplaatste. Het Massief van Brabant en Zuid-Limburg kwamen in het Noordwest Europese Sedimentatie-Bekken te liggen.
De oudste afzettingen uit het Krijt in Zuid-Limburg bestaan uit zandige en siltige klei, afgewisseld met zand. Deze afzettingen behoren tot de Formatie van Aken (Kuyl, 1980). Deze zeer kust-nabije afzetting komt niet voor in het stroomgebied van de Noor (van Lanen et al., 1995). In de geleidelijk dieper wordende zee worden onder duidelijk mariene omstandigheden vervolgens de afzettingen behorende tot de Formaties van Vaals, Gulpen en Maastricht afgezet. De Formatie van Vaals is afgezet in een wadmilieu en vertoont dan ook de typerende geulen en platenstructuur. De Formatie van Gulpen werd in een diepere zee afgezet en bevat overwegend fijnkorrelige kalksteen, de Formatie van Maastricht bestaat uit een grofkorrelige kalksteen (Kuyl,1980). De Formatie van Maastricht is door verwering en erosie geheel uit het stroomgebied van de Noor verdwenen. In het verweringsdek komen nog residuen voor van deze formatie, in de vorm van klei en vuurstenen, die getuigen van een vroegere aanwezigheid (van Lanen et al., 1995).
Aan het begin van het Kenozoïcum komt Zuid-Limburg aan de rand van het Noordzee Bekken te liggen. Er zijn waarschijnlijk wel Vroeg-Tertiaire kalken afgezet, maar deze zijn vervolgens weer geërodeerd (Kuyl, 1980). Vervolgens begon er een verlanding op te treden als gevolg van de zich aankondigende Alpiene opheffing. Zo ontstond de Laat-Tertiaire

schiervlakte, met een zich ontwikkelend drainagepatroon. De Laat-Tertiaire Maas stroomde in die tijd direct voorbij Luik in noord-oostelijke richting en schoof in het Vroeg-Pleistoceen op in noordelijke richting. In het begin van het Pleistoceen maakte bijna het hele stroomgebied van de Noor deel uit van het verwilderd riviersysteem van de Maas die destijds in oostelijke richting naar Duitsland stroomde. De oeverrand van de Pleistocene Maas is bij Hoogcruts/Schilberg nog steeds zichtbaar in het gebied.



Figuur 2.4: Doorsnede van het Maasdal ter hoogte van het stroomgebied (van Lanen et al.,1995).

De Alpiene opheffing ging in het Pleistoceen nog steeds door en dit had een kanteling van het gebied tot gevolg. De Mesozoïsche en Tertiaire afzettingen werden scheefgesteld; de gemiddelde helling van de Pre-Pleistocene lagen is 1,5 procent in noordwestelijke richting. De Maas verlegde zijn loop in noordwestelijke richting en verliet definitief het stroomgebied van de Noor. De start van het huidige drainagepatroon van de Noor is toen opgetreden. Tijdens de permafrostperioden in het Pleistoceen zijn de diep ingesneden dalen in het Plateau van Margraten gevormd door smeltwaterstromen, omdat het water niet in de bevroren ondergrond kon wegzijgen (van Lanen et al., 1995).
Tijdens de laatste glacialen in het Pleistoceen is löss eolisch afgezet. Vanaf het Midden-Pleistoceen tot het Holoceen is op de hellingen regoliet ontstaan. Löss en regoliet worden de Formatie van Eindhoven genoemd. In het Holoceen zijn erosieproducten van de hellingen afgezet in het dal van de Noor, waarbij deze door de beek zijn gesorteerd. De beekafzetting wordt tot de Formatie van Singraven gerekend.

2.3 Hydrogeologie van het Noordal

2.3.1 Hydrostratigrafie

2.3.1.1 Carboon

De hydrologische basis in het oostelijk deel van het Noordal wordt gevormd door de afzettingen van het Boven-Carboon. De Boven-Carbonische gesteenten zijn sterk verkit en geplooid en bestaan uit schalies en harde kwartsitische zandstenen (Vleeshouwer en Damoiseaux, 1990). De primaire permeabiliteit is laag als gevolg van de sterke verkitting van de schalies en zandstenen. Ook de transmissiviteit is laag ondanks het voorkomen van enkele diaklazen (21 m^2/dag) (van Lanen et al., 1995).
De overgang naar het westelijk deel van het Noordal ligt wat betreft de hydrologische basis

bij de Molenhoeve bij landgoed Altembroek. De Boven-Carbonische zandsteen is hier door erosie verdwenen en de Mesozoïsche gesteenten rusten direct op de Onder-Carbonische kalksteen. Deze kalksteen is, mits goed gespleten, goed doorlatend en kan dus niet als een hydrologische basis beschouwd worden. De hydrologische basis bevindt zich in het westelijk deel van het Noordal op meer dan 800 m diepte (van Lanen et al., 1995).

2.3.1.2 Krijt

Formatie van Vaals
De Formatie van Vaals is afgezet in een marien milieu tijdens het Boven-Krijt. De formatie bestaat uit glauconietrijke, uiterst fijne zanden en siltige kleien, rijk aan fossielen. Het materiaal is gesedimenteerd in een wadmilieu (Vleeshouwer en Damoiseaux, 1990). Deze afzettingen worden dan ook gekenmerkt door het voorkomen van een geulen en platen-structuur. Gemiddeld over het hele pakket ligt de mediaan van de korrelgrootte tussen de 2 en 50 μm (silt). De dikte van het pakket onder het plateau bedraagt 40 tot 50 meter.
De zandige gedeelten zijn verkit en later ten gevolge van de Alpiene opheffing weer verbrokkeld. De permeabiliteit van de individuele zandsteenbankjes varieert tussen de 20 en 50 m/dag. Het onverkitte deel van de formatie heeft echter een permeabiliteit van rond de 0,001 m/dag (van Lanen et al., 1995).

Formatie van Gulpen
De Formatie van Gulpen is eveneens afgezet in een marien milieu tijdens het Boven-Krijt. De formatie bestaat voor 90 tot 95% uit kalksteen en verder uit kleimineralen en vuursteen. De dikte van het pakket onder het plateau bedraagt 50 tot 60 meter; in het noorden van het stroomgebied komen pakketten tot wel 90 meter dikte voor. De primaire permeabiliteit is klein als gevolg van het fijnkorrelige karakter van de kalksteen. De geschatte effectieve porositeit voor het gehele gebied bedraagt 10%, die grotendeels is te verklaren uit de aanwezigheid van diaklazen (Nota en van der Weerd, 1978). Grondwaterstroming zal vooral door spleten en scheuren plaatsvinden en daarom is de gemiddelde permeabiliteit moeilijk aan te geven en zal variëren tussen de 0,5 en 10 m/dag (Nota et al., 1988).

2.3.1.3 Kwartair

Formatie van Eindhoven
De Formatie van Eindhoven bestaat uit pleistocene afzettingen, die zowel het gevolg zijn van eolische processen als hellingsprocessen. Tot de Formatie van Eindhoven in het stroom-gebied van de Noor worden de löss en het regoliet gerekend.
Löss is een zeer goed gesorteerd fijnkorrelig sediment. Het bestaat globaal voor 75% uit silt, 20% uit klei en 5% uit fijn zand (Kuyl, 1980). Het is kalkrijk afgezet in het gebied en komt zowel in situ als omgewerkt voor. De niet-verplaatste löss bevindt zich op de plateaus en is door uitspoeling kalkloos geworden. De bovengrond van löss heeft door de aanwezigheid van bioporiën een hogere verzadigde verticale doorlatendheid dan de ondergrond; respec-tievelijk 10 m/dag en 0,01 m/dag (van Lanen et al., 1995). Löss op de hellingen is vaak omgewerkt en maakt deel uit van het regoliet.
Regoliet is een hellingafzetting, die voorkomt op de hellingen in het gehele gebied als gevolg van materiaal verplaatsing onder invloed van de zwaartekracht. Regoliet is een mengsel van

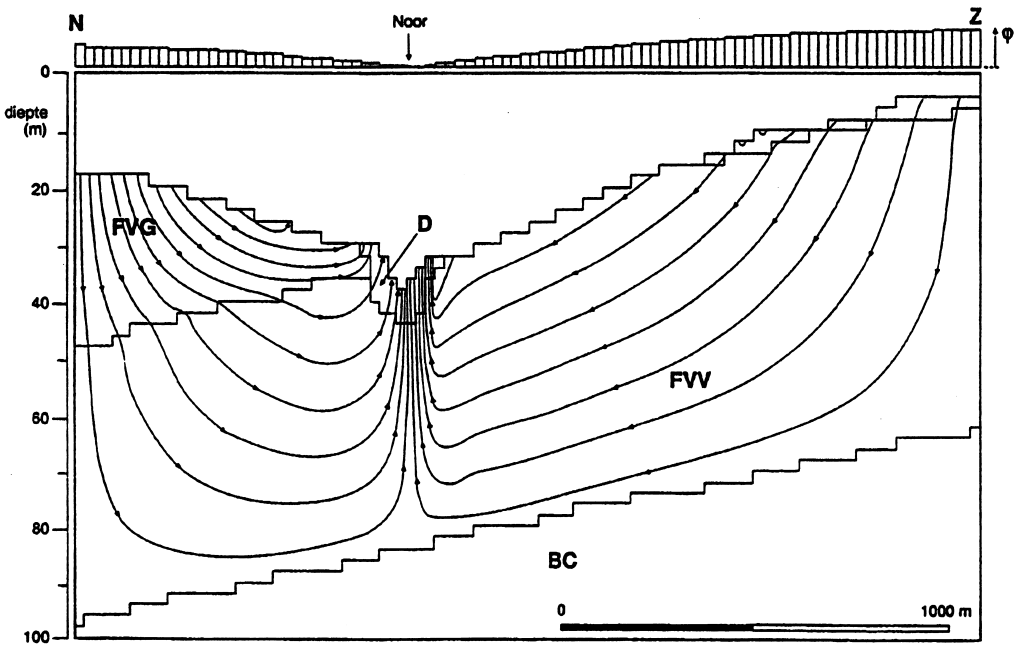
materiaal van de Formatie van Vaals, verweringsresten van de Formaties van Gulpen en Maastricht, grof zand en grind afgezet door de Maas en löss. De dikte varieert sterk, van enkele decimeters op de steile hellingen tot 5 meter op de minder steile hellingen. De verticale verzadigde doorlatendheid is, net als bij de löss, afhankelijk van het aantal bioporiën en varieert tussen de 0,5 en 5 m/dag (Nota en van der Weerd, 1978).

Formatie van Singraven
De Formatie van Singraven bestaat uit beekafzettingen die in het dal van de Noor worden aangetroffen. De formatie bestaat uit fijnkorrelige, plaatselijk grindhoudende afzettingen met ingeschakelde humeuze en venige lagen. De verzadigde verticale doorlatendheid kan daarom sterk variëren tussen de 0,1 en 0,001 m/dag (Schunselaar en van der Hoeven, 1993).

2.3.2 Hydrogeologisch systeem

De hierboven beschreven hydrostratigrafische opbouw bepaalt het hydrogeologisch systeem. De redelijk hoge doorlatendheden van de löss en het regoliet zorgen ervoor dat neerslag die in het gebied valt, overwegend zal infiltreren. Er vindt bijna geen oppervlakte- of oppervlakkige afvoer plaats. Een geïnfiltreerd waterdeeltje kan door verdamping het bodemsysteem weer verlaten. Het overgebleven deel, het actuele neerslagoverschot, zakt nagenoeg verticaal door de onverzadigde zone naar de grondwaterspiegel. Op het plateau en de hellingen komt een dikke onverzadigde zone voor. Hier kan een waterdeeltje er jaren over doen om de grondwaterspiegel te bereiken.

Nadat het actuele neerslagoverschot het grondwater heeft aangevuld volgt het grondwater verschillende routes richting Noor.



Figuur 2.5: Gesimuleerde verzadigde grondwaterstroming met FLOWNET (van Lanen et al., 1995).

Op de helling ten noorden van de Noor is het pakket kalksteen dik. Het grondwater kan hier in de Formatie van Gulpen, evenwijdig aan het contactvlak met de Formatie van Vaals, relatief ondiep naar het verweringsdek of de beekdalopvulling stromen (zie figuur 2.5). Het grondwater kan hier ook in de Formatie van Vaals terechtkomen om dan via een langere weg in de beekdalopvulling te stromen.
Op de helling ten zuiden van de Noor zal het grondwater, nadat het freatisch vlak is bereikt, door de Formaties van Gulpen en Vaals stromen en dan uiteindelijk in de beekdalopvulling terechtkomen. In de nabijheid van de Noor is dan ook sprake van kwel. Het grondwater zal bij de Noor het bodemsysteem verlaten via bronnetjes en kwelplekken om deel uit te gaan maken van het oppervlaktewater-systeem van de Noor (van Lanen et al., 1995).

3. Procedure en gebiedsindeling

3.1 Inleiding

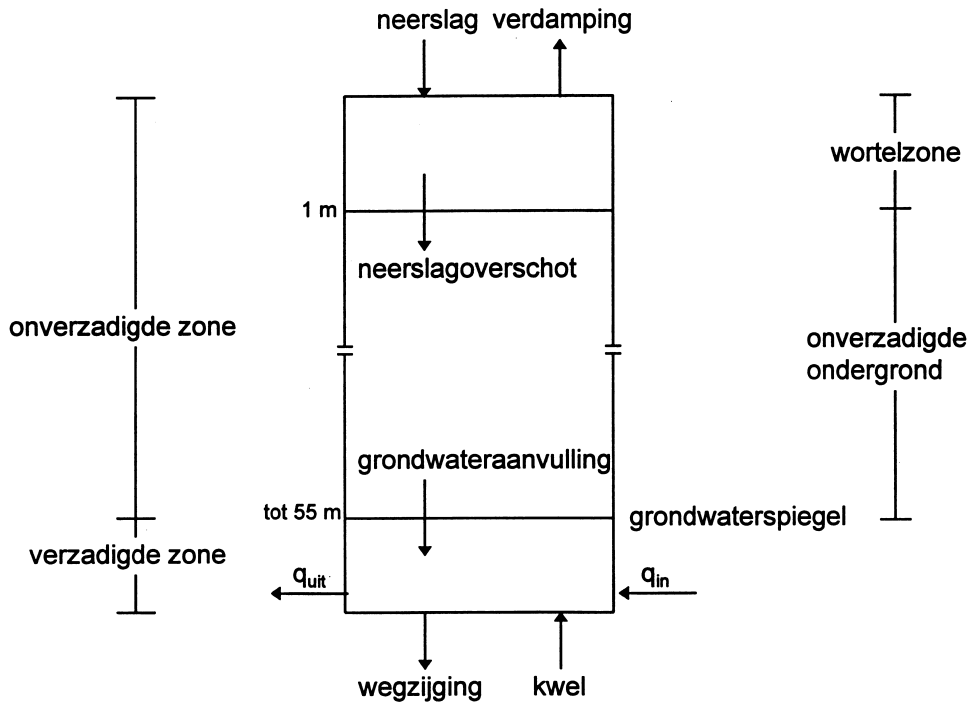
Voor het vaststellen van de ruimtelijke en temporele grondwateraanvulling in het stroomgebied van de Noor is een schematisatie van het stroomgebied in verticale en horizontale zin nodig. Er is gekozen voor een indelingsprincipe dat rekening houdt met alle kenmerken die voor onverzadigde grondwaterstroming belangrijk zijn.

Een goede schematisatie is belangrijk voor het vaststellen van de temporele en ruimtelijke verdeling van de grondwateraanvulling in het stroomgebied van de Noor.

De gebiedskenmerken van het stroomgebied variëren. Het is daarom van belang om een onderverdeling te maken in deelgebieden op grond van enkele belangrijke gebiedskenmerken die relevant zijn voor de grondwateraanvulling. Binnen één deelgebied wordt hetzelfde landgebruik, grondwaterstand, bodemtype en geologische opbouw verondersteld.

3.2 Verticale schematisering en toegepaste modellen

De verticale schematisering houdt een goede indeling van het bodemsysteem in. Het bodemsysteem bestaat uit een (dikke) onverzadigde en een verzadigde zone. In figuur 3.1 wordt het bodem-watersysteem weergegeven.



Figuur 3.1: Het bodem-watersysteem (den Toom en van der Koppel, 1993).

In het bodem-watersysteem wordt de onverzadigde zone verder opgedeeld. In het kader van dit onderzoek wordt de onverzadigde zone opgedeeld in een wortelzone en een onverzadig-

de ondergrond. Met de onverzadigde ondergrond wordt de zone tussen de onderkant van de wortelzone en de grondwaterspiegel bedoeld.

In de wortelzone spelen zich vele processen af tussen bodem, plant en atmosfeer. Een deel van de neerslag zal verdampen en de grond houdt een deel van het water tijdelijk vast in de bodemmatrix. Om deze processen te simuleren zal gebruik worden gemaakt van verschillende, al bestaande, modellen (het agrohydrologisch model SWAP (van Dam et al., 1996), het reservoirmodel NUT_DAY (van Lanen et al., 1996) en het reservoirmodel in MUNSFLOW (Zwamborn en Baggelaar, 1995)). Het toepassen van deze modellen heeft als doel het vaststellen van de hoeveelheid neerslag die uiteindelijk de grondwateraanvulling zal vormen. Deze hoeveelheid wordt ook wel het actuele neerslagoverschot genoemd. In de onverzadigde ondergrond zal het actuele neerslagoverschot in kwantitatieve zin onveranderd blijven, alleen demping en vertraging spelen een rol. Deze demping en vertraging zijn afhankelijk van de fysische eigenschappen van de grond. In de onverzadigde ondergrond wordt de temporele verdeling van de grondwateraanvulling op een bepaalde diepte gesimuleerd door gebruik te maken van verschillende, al bestaande, onverzadigde grondwatermodellen (het agrohydrologisch model SWAP, het programma MUNSFLOW en een transferfunctie).
De temporele verdeling van de grondwateraanvulling is de bovenrandvoorwaarde voor de verzadigde grondwaterstroming. Om de berekende grondwateraanvulling te controleren zal de grondwateraanvulling ingevoerd worden in het verzadigde, niet-stationaire grondwatermodel in MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988). Dit model is voor het stroomgebied van de Noor gemaakt door Kroon en Weerts (1995). De berekende grondwaterstand in MODFLOW zal uiteindelijk vergeleken worden met de werkelijke grondwaterstand van enkele peilbuizen.

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de verschillende gebruikte modellen. In de tabel wordt voor elk model aangegeven voor welk deel van het bodemsysteem het gebruikt wordt.

Tabel 3.1: Overzicht van de verschillende modellen.

	SWAP	NUT_DAY	MUNSFLOW	transferfunctie	MODFLOW
Wortelzone	x	x	x		
Onverzadigde ondergrond	x		x	x	
Verzadigde zone					x

De rekenperiode beslaat de periode van 1991 tot en met 1994. Voor het vaststellen van de beginvoorwaarde van bovengenoemde modellen zijn de jaren 1987 tot en met 1990 enkele keren achter elkaar doorgerekend om een goede beginvoorwaarde te creëren.

3.3 Horizontale schematisering

Het stroomgebied van de Noor beslaat 1056 ha, die ingedeeld moet worden in homogene deelgebieden. De kenmerken waarop is ingedeeld zijn: landgebruik, grondwaterstand, bodemtype en geologische opbouw. De indeling moest globaal zijn, omdat anders te veel deelgebieden ontstaan. Met elk model moeten namelijk de berekeningen voor alle deelgebieden worden uitgevoerd, dit houdt in dat het aantal deelgebieden om praktische redenen niet te groot mocht zijn. Het model voor de verzadigde grondwaterstroming

MODFLOW werkt met een raster. Het raster is opgebouwd uit een netwerk van rechthoeken. De grondwateraanvulling wordt als bovenrandvoorwaarde ingevoerd per rastercel en daarom was het practisch om de deelgebieden vast te stellen aan de hand van dit raster. Er zijn vier kaarten gemaakt met het modelraster als basis, namelijk kaarten van het landgebruik, de grondwaterstandsdiepte, het bodemtype en de dikte van de Formatie van Gulpen.

De gegevens over het landgebruik zijn overgenomen uit Grent en Peeters (1992). Het aantal verschillende landgebruiksklassen (zie tabel 2.1) is teruggebracht tot vier; gras, maïs, graan en loofbos. De andere landgebruiksklassen nemen een zeer klein, vaak versnipperd, deel van het oppervlak in en zijn daarom in de uiteindelijke indeling weggevallen.
De kaart met de grondwaterstandsdiepte ten opzichte van maaiveld is gemaakt aan de hand van een isohypsenkaart die gebaseerd is op waarnemingen van Kroon en Weerts (1995) en op topografische kaarten, schaal 1:10.000 van het gebied (Nationaal Geografisch Instituut, 1976). De klassen indeling is van 0-1 m, 1-5 m, 5-10 m, 10-20 m en zo verder met klassen van 10 m tot een diepte van 60 m. Er zijn op die manier 8 klassen onderscheiden.
Het vaststellen van het bodemtype heeft plaatsgevonden met behulp van bodemkaarten (Vleeshouwer en Damoiseaux, 1990), geologische kaarten (Kuyl, 1980) en een hellingspercentagekaart van het gebied (Becks en van Os, 1995). Verondersteld is dat op de minder steile hellingen (0-5%) op het plateau een dik pakket löss voorkomt, op de steilere hellingen (5-10%) een dik regolietdek, op de zeer steile hellingen (>10%) een dun regolietdek en in het dal een beekdalopvulling. De lösslaag wordt 3 m dik verondersteld, de dikte van het dunne regolietdek 1 m en de dikte van het dikke regolietdek 3 m. De dikte van de dalopvulling is ook 3 m dik verondersteld. Deze dikten zijn indicatief en vastgesteld aan de hand van boorbeschrijvingen (Bouma en Leene, 1993; ten Dam en Tiemensma, 1993; Gans en Tiebosch, 1994).
Op de kaart met de dikte van de Formatie van Gulpen zijn klassen met een interval van 10 m dikte weergegeven. Deze grove indeling was nodig, omdat anders teveel klassen zouden ontstaan. De gegevens zijn overgenomen uit laagdikte tabellen zoals die zijn gebruikt bij de modelinvoer in MODFLOW (Kroon en Weerts, 1995). In totaal zijn 9 klassen onderscheiden.

Met behulp van de eerdergenoemde vier kaarten is een gebiedsindeling gemaakt. Met de gebiedsindeling is rekening gehouden met het landgebruik, het bodemtype en de geologische opbouw tot de grondwaterstand.

Uiteindelijk zijn er 45 Noor-eenheden vastgesteld. Een Noor-eenheid wordt gekenmerkt door een unieke combinatie van bovengenoemde gebiedskenmerken. Voor elk van deze eenheden wordt de grondwateraanvulling vastgesteld met de verschillende onverzadigde grondwatermodellen. Tabel 3.2 geeft de oppervlakte van de verschillende landgebruiksklassen aan volgens de gehanteerde gebiedsindeling.

Tabel 3.2: Landgebruik in het modelgebied.

Landgebruik	hectare	percentage
grasland	790	74
maïs	152	14
loofbos	74	7
graan	57	5
totaal	1073	100

Vegelijking van tabel 3.2 met het landgebruik in 1992 (tabel 2.1) geeft aan dat het totale geschematiseerde oppervlak grasland groter is (12%) en ook loofbos neemt een groter oppervlak in (6%). Het totale geschematiseerde oppervlak maïs neemt een kleiner oppervlak in (6%). De totale oppervlakte van het modelgebied is 1073 ha. Ten gevolge van de schematisering is dit ongeveer 2% groter dan het werkelijke stroomgebied. Dit wordt veroorzaakt door de grove schematisering van het modelraster voor het verzadigde grondwatermodel in MODFLOW.

In tabel 3.3 staat de verdeling van de diepte van de grondwaterstand weergegeven. Er is ten behoeve van de illustratie in deze tabel onderscheid gemaakt tussen ondiepe (tot 3 m), matig diepe (tot 10 m) en diepe grondwaterstanden. Uit de tabel blijkt dat in meer dan 90% van het gebied de grondwaterstand dieper dan 10 m beneden maaiveld voorkomt. De verdeling van het bodemtype wordt weergegeven in tabel 3.4. Löss en regoliet nemen 90% van de oppervlakte in en beekdalopvulling neemt slechts 10% oppervlakte van het modelgebied in.

Tabel 3.3: Grondwaterstand in het modelgebied.

Grondwaterstand	hectare	percentage
ondiep	13	1
matig diep	75	7
diep	985	92

Tabel 3.4: Bodemtype in het modelgebied.

Bodemtype	hectare	percentage
löss	401	37
dik regoliet	386	36
dun regoliet	183	17
beekdalopvulling	103	10

Bijlage A1 bevat een tabel die een overzicht geeft van de kenmerken van alle 45 Noor-eenheden. In de tabel worden de volgende gegevens weergegeven: oppervlakte in ha, het type landgebruik, het bodemtype, de grondwaterstandsdiepte en de dikte van de Formaties van Gulpen en Vaals tot de grondwaterspiegel. In de tabel is bijvoorbeeld te zien dat Noor-eenheid 1 een oppervlak van 90 ha inneemt. Het landgebruik in deze Noor-eenheid is gras en de grondwaterstand staat 55 m onder maaiveld. Het bodemprofiel bestaat uit 3 m löss, 45 m Formatie van Gulpen en tot de grondwaterspiegel nog 7 m Formatie van Vaals. Bijlage A2 geeft een ruimtelijk beeld van alle Noor-eenheden.

In elk onverzadigd grondwatermodel kunnen verschillende Noor-eenheden gecombineerd worden tot één model-eenheid. Dit betekent dat enkele Noor-eenheden voor een onverzadigd grondwatermodel identiek kunnen zijn, hierdoor zijn er minder simulaties dan 45 nodig om de grondwateraanvulling van alle Noor-eenheden te berekenen. Het agrohydrologisch model SWAP kan in één profiel de grondwateraanvulling op verschillende diepten berekenen. Het aantal SWAP-eenheden is daardoor teruggebracht tot 21. Het reservoirmodel NUT_DAY simuleert alleen de wortelzone, het aantal NUT_DAY-eenheden is daardoor slechts 13. Het programma MUNSFLOW heeft 36 model-eenheden nodig. De transferfunctie is alleen geschikt voor simulatie van de onverzadigde ondergrond en ook hier is het aantal eenheden teruggebracht naar 20. De indeling van de model-eenheden staat weergegeven in de laatste 4 kolommen van de tabel in bijlage A1.

4. Agrohydrologisch model SWAP

4.1 Modelbeschrijving

Het agrohydrologisch model SWAP is een simulatieprogramma voor transportprocessen in de bodem-water-atmosfeer-plant systeem (Soil-Water-Air-Plant environment). Het doel van SWAP is om in dit systeem het water-, stoffen- en warmtetransport te simuleren (van Dam et al., 1996). In het kader van dit onderzoek wordt alleen gebruik gemaakt van de simulatie van het watertransport. Het programma kan zowel de processen in de wortelzone als de stroming in de onverzadigde ondergrond simuleren.

In het kader van dit onderzoek is het programma aangepast. In het programma zijn nu meer compartimenten in de diepte mogelijk, omdat de grondwaterstand in het modelgebied tot wel 55 m onder maaiveld kan staan. Door het aantal compartimenten te vergroten kan de onverzadigde grondwaterstroming tot op grotere diepte nog gedetailleerd worden gesimuleerd. Het model zal als referentie gebruikt worden bij de vergelijking van de verschillende onverzadigde grondwatermodellen, omdat het de meest gedetailleerde beschrijving van de fysische processen kent.

4.2 Modelachtergronden

In deze paragraaf worden de achtergronden van SWAP behandeld. Aan de orde komen; de onverzadigde grondwaterstroming, de evaporatie van de bodem, de transpiratie van het gewas, de interceptie door het gewas en de onderrandvoorwaarde. Uitgebreide informatie over de achtergronden is verder te vinden in de SWAP handleiding (van Dam et al., 1996).

Grondwaterstroming
De onverzadigde grondwaterstroming kan met twee vergelijkingen worden beschreven. De waterbeweging in de verticale richting wordt beschreven door de wet van Darcy:

$$q = -K(h)\frac{\partial(h+z)}{\partial z} \qquad (4\text{-}1)$$

met q = grondwater fluxdichtheid [cm/d]
K = onverzadigde hydraulische doorlatendheid [cm/d]
h = drukhoogte [cm]
z = plaatshoogte/diepte [cm]

De waterbalans over een oneindig klein bodemvolume wordt beschreven met de continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - S(h) \qquad (4\text{-}2)$$

met θ = vochtgehalte [-]
t = tijd [d]

S = 'sink'-term, onder andere de wortelwater opnamesnelheid [1/d]

Combinatie van vergelijkingen (4-1) en (4-2) leidt tot de algemene stromingsvergelijking, ook wel de Richards vergelijking genoemd:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = C(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)\right]}{\partial z} - S(h) \qquad (4\text{-}3)$$

met C = watercapaciteit ($d\theta/dh$) [1/cm]

Vergelijking (4-3) heeft een duidelijke fysische achtergrond. De bodem wordt als een medium voorgesteld dat bestaat uit bodem, water en lucht. Om deze vergelijking op te lossen zijn relaties tussen het vochtgehalte θ, de drukhooge h en de hydraulische doorlatendheid K nodig. Deze relaties zijn samengevat in de vochtretentiefunctie $\theta(h)$ en de onverzadigde hydraulische doorlatendheidsfunctie $K(\theta)$. Deze twee relaties kunnen met behulp van veel veld- en laboratoriummetingen worden vastgesteld en in tabel- of analytische vorm worden weergegeven.
De analytische $\theta(h)$ functie volgens van Genuchten (1980) is:

$$\theta = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{\left(1+|\alpha h|^n\right)^m} \qquad (4\text{-}4)$$

met θ_{sat} = verzadigd vochtgehalte [-]
θ_{res} = residuair vochtgehalte in de droge range [-]
α = verdrogings- en vernattingsparameter [1/cm]
n = empirische vormfactor [-]
m = empirische vormfactor (m = 1-1/n) [-]

De analytische $K(\theta)$ functie volgens Mualem (1976) is:

$$K(\theta) = K_{sat} S_e^{\lambda}\left[1-\left(1-S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \qquad (4\text{-}5)$$

met K_{sat} = verzadigde doorlatendheid [cm/d]
λ = poriën fractie [-]
S_e = relatieve verzadiging ($S_e = (\theta - \theta_{res})/(\theta_{sat} - \theta_{res})$) [-]

Als alle bodemfysiche parameters bekend zijn, dan zijn daarmee de analytische functies (4-4) en (4-5) gedefinïeerd en kan, als de begin- en randvoorwaarden zijn vastgesteld, de Richards vergelijking (4-3) gebruikt worden om de onverzadigde grondwaterstroming te simuleren. Om de één-dimensionale Richards vergelijking op te kunnen lossen is een goede numerieke discretisatie nodig. Goede numerieke discretisatie van de Richards vergelijking is moeilijk, omdat de Richards vergelijking een hyperbolische vorm heeft. Bovendien zijn de

hydraulische functies sterk niet-lineair. Voor het oplossen van de Richards vergelijking maakt SWAP gebruik van een impliciete, terugwaartse, eindige differentie-methode met expliciete linearisatie.

De onverzadigde grondwaterstroming kan, zoals hierboven al kort wordt aangegeven, alleen worden gesimuleerd als de begin- en randvoorwaarden zijn vastgesteld. De randvoorwaarden worden besproken in de volgende alinea's.

Potentiële transpiratie en evaporatie
In de wortelzone spelen verschillende processen tussen bodem, water, plant en atmosfeer een rol. De potentiële transpiratie van het gewas en de potentiële evaporatie van de bodem worden bepaald aan de hand van meteorologische- en gewasgegevens.
De volgende drie grootheden zijn van belang:

- potentiële transpiratie van een nat gewas, T_{w0} [mm/dag];
- potentiële transpiratie van een droog gewas, T_{p0} [mm/dag];
- potentiële evaporatie van een kale grond, E_{p0} [mm/dag].

Als een potentiële referentieverdamping, ET_{ref} [mm/dag], is opgegeven in het meteorologische invoerbestand dan worden bovenstaande grootheden als volgt berekend:

$$T_{p0} = T_{w0} = E_{p0} = k_c ET_{ref} \tag{4-6}$$

met k_c = gewasfactor [-]

Bovenstaande vergelijking is alleen geldig voor een uniform oppervlak. Voor een gedeeltelijk bedekte bodem wordt de potentiële evaporatie als volgt berekend:

$$E_p = E_{p0} e^{\kappa_{gr} LAI} \tag{4-7}$$

met κ_{gr} = extinctie coëfficiënt voor globale straling [-]
LAI = Leaf Area Index [-]

Voor de extinctie coëfficiënt voor globale straling geldt:

$$\kappa_{gr} = 0.75 \kappa_{dif} \tag{4-8}$$

met κ_{dif} = gewas specifieke extinctie coëfficiënt voor diffuse straling [-]

De gewas specifieke extinctie coëfficiënt voor diffuse straling ligt tussen de 0,4 en 1,1; SWAP neemt standaard een waarde van 0,6 aan.

De ratio tussen de hoeveelheid interceptieverdamping en de potentiële transpiratie van een nat gewas geeft een indicatie van de dagelijkse tijdfractie dat het gewas nat is; W_{frac} [-]. Als het gewas nat is dan is de actuele transpiratie gelijk aan T_{w0}, als het gewas droog is dan geldt T_{p0}.

De potentiële transpiratie van een gedeeltelijk bedekt oppervlak met een droog gewas, T_p

[cm/dag], wordt als volgt bepaald:

$$T_p = (1.0 - W_{frac})T_{p0} - E_p \qquad \text{met } T_p \geq 0 \qquad (4\text{-}9)$$

Actuele transpiratie

De actuele transpiratie van een nat gewas is gelijk aan de potentiële transpiratie (T_p). Voor een droog gewas geldt dat de potentiële transpiratie T_p [cm/dag] gelijk is aan de totale potentiële wateropname door wortels. De potentiële waterextractie op een bepaalde diepte $S_p(z)$ [1/dag] wordt bepaald door de worteldichtheid op deze diepte $l_{root}(z)$ [-] als een fractie van de totale worteldichtheid te vermenigvuldigen met de potentiële transpiratie:

$$S_p(z) = \frac{l_{root}(z)}{\int_0^{D_{root}} l_{root}(z)dz} T_p \qquad (4\text{-}10)$$

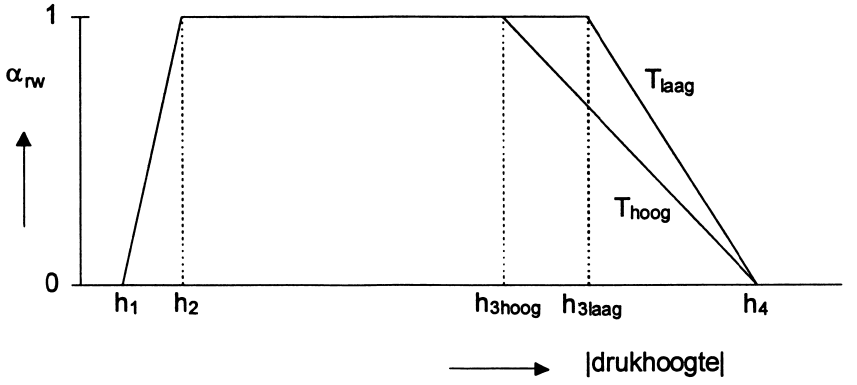
met D_{root} = worteldiepte [cm]

Te droge, te natte of te zoute condities zullen leiden tot een gereduceerde totale potentiële wateropname. De actuele wateropname is te berekenen uit:

$$S_a(z) = \alpha_{rw}\alpha_{rs}S_p(z) \qquad (4\text{-}11)$$

met α_{rw} = reductiecoëfficiënt ten gevolge van te natte of te droge condities[-]
α_{rs} = reductiecoëfficiënt ten gevolge van te zoute condities [-]

De reductiecoëfficiënt α_{rs} is gelijk aan 1 in het Noordal, omdat er geen te hoge zoutcondities voorkomen. De reductiecoëfficiënt α_{rw} is ongelijk aan 1 als er te natte of te droge condities voorkomen in het Noordal. De reductiecoëfficiënt α_{rw} kan worden gezien als een functie van de drukhoogte h van het bodemvocht. De volgende figuur (4.1) laat dit verband zien.



Figuur 4.1: Reductiecoëfficiënt voor wortelwater opname, α_{rw}, als functie van de drukhoogte van het bodemvocht.

De drukhoogten zijn in figuur 4.1 absoluut weergegeven. In de onverzadigde zone zijn de drukhoogten negatief. Drukhoogte h_1 geeft het startpunt van wateropname van een gewas weer. Tussen drukhoogte h_2 en drukhoogte h_3 is de wateropname optimaal. Boven drukhoogte h_4 kan het gewas geen water meer opnemen. De waarde van drukhoogte h_3 is afhankelijk van de transpiratie vraag (T). Bij hoge transpiratie vraag (T_{hoog}≈0,5 mm/dag) is er

eerder een gereduceerde wateropname dan bij lage transpiratie vraag (T_{laag}≈0,1 mm/dag). De actuele transpiratie van het gewas (T_a) is gelijk aan de actuele wateropname door wortels geïntegreerd over de wortelzone.

Actuele evaporatie

In een natte grond zal de actuele evaporatie E_a [cm/dag] gelijk zijn aan de potentiële evaporatie E_p [cm/dag]. Als de grond uitdroogt dan neemt de doorlatendheid af en zal de actuele evaporatie ook afnemen. Het is niet duidelijk hoe de evaporatie van de doorlatendheid afhangt, omdat evaporatie plaatsvindt in de bovenste centimeters van de bodem en daar is het onbekend of de hydraulische functies geldig zijn. Er zijn wel empirische vergelijkingen te gebruiken. In het programma SWAP zijn meerdere vergelijkingen te kiezen. Standaard wordt de empirische vergelijking van Black (1969) gebruikt. Deze berekent de cumulatieve actuele evaporatie gedurende een uitdrogingsproces $\sum E_a$ [cm] als volgt:

$$\sum E_a = \beta_1 \sqrt{t} \qquad (4\text{-}12)$$

met β_1 = bodemspecifieke parameter voor evaporatie processen [cm/d$^{1/2}$]
t = tijd na een regenval [d]

Het uitdrogingsproces begint na een bepaalde hoeveelheid neerslag. De daarop volgende dagen wordt met vergelijking 4-12 de som van de actuele evaporatie berekend. De actuele evaporatie van de betreffende dag is daardoor bekend. Het uitdrogingsproces stopt bij een nieuwe regenval, waarna het proces zich herhaalt.

Interceptie door het gewas

De interceptie van verschillende gewassen is gemeten door Von Hoyningen-Hune (1983) en Braden (1985). Zij hebben de volgende vergelijking vastgesteld voor gewasinterceptie:

$$P_i = a\,LAI\left(1 - \frac{1}{1 + \frac{b\,P_{gross}}{a\,LAI}}\right) \qquad (4\text{-}13)$$

met P_i = interceptie [cm]
P_{gross} = totale neerslag [cm]
a = empirische coëfficiënt [-]; SWAP neemt standaard 0,25
b = bodembedekkingsgraad (≈LAI/3,0) [-]

Onderrandvoorwaarde

De keuze van een onderrandvoorwaarde is afhankelijk van de conditie die aan de onderkant van het bodemprofiel gecreëerd moet worden. In eenheden met een ondiepe grondwaterstand kan de onderrandvoorwaarde beschreven worden met een grondwaterstand h_{gwl} [cm]. In de eenheden met een diepe grondwaterspiegel kan vrije drainage van het bodemprofiel als onderrandvoorwaarde genomen worden. Vrije drainage houdt in dat de flux gelijk wordt gesteld aan de doorlatendheid als functie van het vochtgehalte, $k(\theta)$.

4.3 Invoer en uitvoer

Om met SWAP de wortelzone en de onverzadigde ondergrond te simuleren zijn gegevens nodig met betrekking tot: het weer, het gewas, de bodem en de onderrandvoorwaarde. In bijlage C zijn alle waarden van de invoerparameters weergegeven zoals ze zijn gebruikt in dit onderzoek. Het resultaat van de simulaties wordt gegeven in een waterbalans. De vochtprofielen en de gewasontwikkelingsgegevens worden ook gegeven. In bijlage B worden de invoer- en uitvoerbestanden gegeven.

In paragraaf 4.2 is reeds beschreven dat SWAP bij de berekening van de onverzadigde grondwaterstroming gebruik maakt van een numerieke discretisatie. Daarvoor zijn tijdvariabelen en numerieke parameters ingevoerd, zoals de maximale tijdstapgrootte en het stopcriterium bij de iteratie. Voor het oplossen van de Richards vergelijking (4-1) is ook discretisatie van het bodemprofiel nodig en daarom werd de geometrie van het bodemprofiel ingevoerd. De geometrie van het bodemprofiel wordt beschreven aan de hand van compartimenten. De compartimenten zijn boven in het profiel (nabij maaiveld) 5 cm dik en verlopen naar 100 cm dik onder in het profiel (nabij de grondwaterspiegel; tot 55 m diepte). Als beginvoorwaarde moeten de initiële vochtcondities ingevoerd worden. De initiële vochtcondities zijn iteratief bepaald door de jaren 1987 tot en met 1990 enkele keren achter elkaar door te rekenen, waarbij het vochtprofiel op het einde van de simulatie steeds als beginvoorwaarde werd ingevuld.

De meteorologische gegevens zijn de neerslag [mm/dag] en de verdamping [mm/dag]. De neerslag is geregistreerd op het neerslagstation Haesen. Dit station is uitgerust met een handregenmeter volgens de Nederlandse standaard en is in Noorbeek gesitueerd. De Makkink referentie-gewas-verdamping (ofwel kortweg Makkink verdamping) is overgenomen uit de KNMI-verdampingsgegevens van distrikt 15 (KNMI, 1986-1994). In principe gebruikt SWAP de Penman-Monteith vergelijking voor de berekening van de potentiële verdamping, maar er zijn ook andere invoermogelijkheden zoals het rechtstreeks invoeren van een open water- of referentieverdamping. Om de Penman-Monteith vergelijking te gebruiken, moeten de dagelijkse gegevens van de windsnelheid, temperatuur, zonnestraling en luchtvochtigheid worden ingevoerd. Deze gegevens zijn in de Makkink verdamping al verdisconteerd. Bovendien is Makkink onder Nederlandse condities goed te gebruiken (van Dam et al., 1996).

De gewasgegevens zijn per klasse (gras, maïs, graan en loofbos) ingevoerd. De volgende gegevens zijn ingevoerd: de Leaf Area Index (LAI), gewashoogte, bewortelingsdiepte, gewasfactor, watergebruik, wortelverdeling en groeiseizoen.
Al deze gegevens zijn van belang om de verdamping op een betrouwbare manier te bepalen. De Makkink verdamping gaat uit van goed van water voorzien, kort en gesloten gras dat optimaal groeit (de Bruin, 1994). Om de potentiële transpiratie van een willekeurig gewas te bepalen moet de Makkink verdamping vermenigvuldigd worden met een gewasfactor, die gedurende het jaar kan variëren. De actuele verdamping is uit de potentiële verdamping te berekenen door gebruik te maken van andere gewasgegevens en de vochttoestand in de wortelzone. Het watergebruik geeft de opnamecapaciteit van de wortels weer bij verschillende drukhoogten (h_1, h_2, h_3 en h_4) . Wortels kunnen optimaal water opnemen als de drukhoogte zich tussen h_2 en h_3 bevindt (zie figuur 4.1). De grens drukhoogten zijn voor elk gewas verschillend.

De bodemfysische gegevens zijn ingevoerd per bodemtype of geologische formatie (löss, regoliet, dalopvulling, Formaties van Gulpen en Vaals). Om de Richards vergelijking (4-3) met behulp van de analytische vergelijkingen (4-4 en 4-5) op te lossen moeten de bodemfysische karakteristieken bekend zijn, dat wil zeggen de retentiecurve en de onverzadigde doorlatendheidscurve. Deze bodemfysische karakteristieken zijn niet in het stroomgebied van de Noor gemeten. Voor alle gegevens is de Staringreeks (Wösten et al., 1994) gebruikt. Deze reeks geeft de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van verschillende boven- en ondergronden in Nederland. De verzadigde doorlatendheid is wel in het Noordal gemeten, maar bleek niet overeen te komen met de waarde die gebruikt wordt in de Staringreeks. Bij de gevoeligheidsanalyse (paragraaf 4.5.4) wordt hier nader op ingegaan. In eerste instantie is gebruik gemaakt van de verzadigde doorlatendheid, zoals die in de Staringreeks staat vermeld.
De gronden die voorkomen in het Noordal, zijn omschreven door Bouma et al. (1978). Zij geven enkele waterretentie- en doorlatendheidsgrafieken van gronden die voorkomen op het Plateau van Margraten. Deze zijn vergeleken met de grafieken uit de Staringreeks, om de bodemfysische gegegevens vast te kunnen stellen. Bij de vergelijking is de grond die het beste overeenkwam, gekozen als standaardgrond voor één van de bovengenoemde bodemtypes en geologische formaties. Löss bleek vergelijkbaar te zijn met een matig lichte zavelbovengrond (B8) en een siltige leemondergrond (O15), regoliet met een lichte klei bovengrond (B10) en een lichte kleiondergrond (O11). Beekdalafzetting kwam qua fysische eigenschappen overeen met het regoliet. Door Bouma et al. (1978) zijn drie waterretentiegrafieken gegeven voor kalkgesteente. Voor de Formatie van Gulpen is het zachtste gesteente genomen en daarmee bleek de Formatie van Gulpen vergelijkbaar te zijn met een sterk lemige, zeer fijne tot matig fijne zandondergrond (O3). Voor de Formatie van Vaals bleek vergelijkbaar te zijn met een zeer lichte zavelondergrond (O8).

De onderrandvoorwaarde voor de ondiepe bodemprofielen is een opgegeven grondwaterstand. Dit betekent dat capillaire nalevering kan plaatsvinden. Voor de diepere profielen wordt vrije drainage als onderrandvoorwaarde genomen. Onder de diepe profielen worden alle Noor-eenheden verstaan met een grondwaterstandsdiepte groter of gelijk aan 3 m.

De resultaten worden weergegeven in de vorm van een waterbalans, hierin zijn de waterbalanstermen weergegeven: de totale neerslag, de netto neerslag (neerslag - interceptie), de potentiële en actuele transpiratie en evaporatie, de flux aan de onderkant van het profiel en de grondwaterstand per dag of per decade.

De bodemprofielgegevens bevat informatie over het verloop van de drukhoogte en het vochtgehalte gedurende de simulaties. De gegevens zijn voor dit onderzoek per dag of per decade weergegeven.

Voor loofbos is de berekening van de gewasinterceptie aangepast. De gewasinterceptie was te laag en daarom is de empirische coëfficiënt a in vergelijking 4-13 aangepast (van a=0,25 (voor cultuurgewassen) naar a=1), totdat de gewenste interceptie was bereikt (20%). De interceptie van gemengd loofbos blijkt minstens 20% van de totale hoeveelheid neerslag uit te maken (Dolman en Moors, 1994; Feddes en Koopmans, 1996).

Het programma is voor dit onderzoek is verder op een tweetal punten aangepast zodat extra uitvoer wordt gegeven. Op verschillende diepten in het profiel wordt de flux [cm/dag] gege-

ven, waardoor meerdere Noor-eenheden zijn samen te voegen tot één SWAP-eenheid (zie paragraaf 3.3). Het vochtgehalte aan het eind van een simulatie wordt gegeven om het iteratief bepalen van de initiële vochtcondities (beginvoorwaarde) te vereenvoudigen.

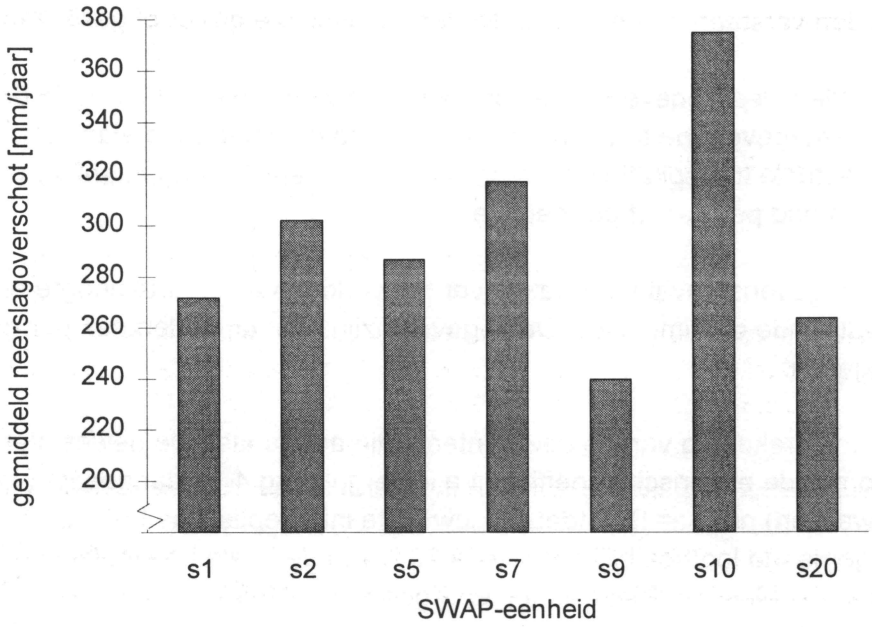
4.4 Neerslagoverschot en grondwateraanvulling

De simulatie is uitgevoerd voor een aantal representatieve SWAP-eenheden (s1, s2, s5, s7, s9, s10 en s20; zie bijlage A1). In deze paragraaf worden de resultaten van de simulatie van vochttransport in de wortelzone en de onverzadigde ondergrond gepresenteerd. De waterbalans van de wortelzone geeft een indicatie van het actuele neerslagoverschot. Dit neerslagoverschot zal in de onverzadigde ondergrond gedempt en vertraagd worden en zal uiteindelijk tot grondwateraanvulling leiden.

Neerslagoverschot

Tabel 4.1 geeft de jaarlijkse waterbalans van de wortelzone weer voor de gehele simulatieperiode van een aantal eenheden. De tabel bevat de termen van de waterbalans; de totale neerslag (P_{gross}), de netto neerslag (P_{net}), de interceptie (P_i), de potentiële en actuele gewastranspiratie (T_p en T_a), de potentiële en actuele bodemevaporatie (E_p en E_a) en het neerslagoverschot (q).

Het verschil in neerslagoverschot tussen een bepaald gewas op regolietgronden en hetzelfde gewas op lössgronden wordt veroorzaakt door een verschil in actuele gewasverdamping (T_a). Het grotere neerslagoverschot op regolietgronden, gemiddeld 15 mm/jaar, wordt dus veroorzaakt door een kleinere gewasverdamping. In de tabel en figuur 4.2 is goed te zien dat het gemiddeld neerslagoverschot van graan het grootst is, gevolgd door maïs, gras en loofbos (vergelijk eenheden s5, s7, s9 en s10 in tabel 4.1 en figuur 4.2). Het gemiddeld neerslagoverschot van graan is 375 mm/jaar, terwijl het gemiddeld neerslagoverschot van loofbos maar 240 mm/jaar is.



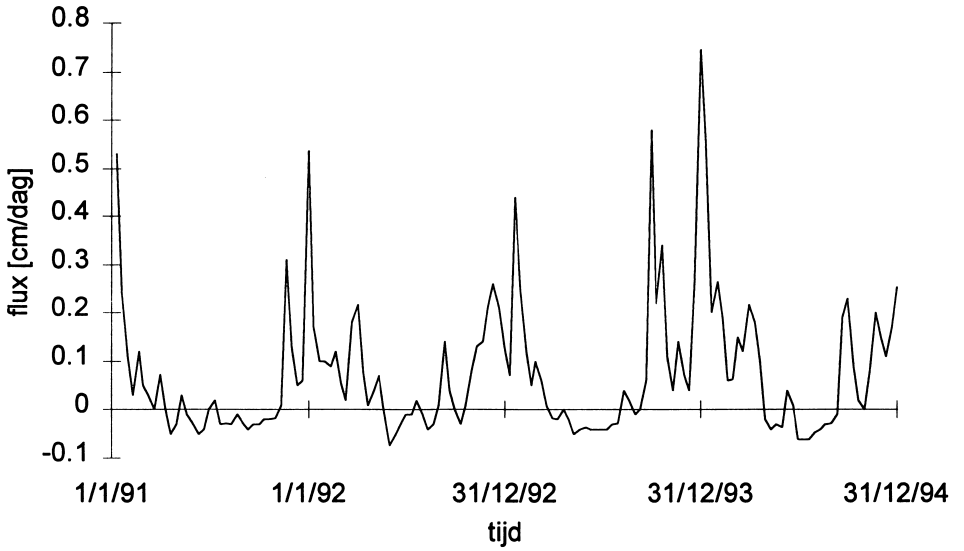
Figuur 4.2: Gemiddeld neerslagoverschot van een aantal SWAP-eenheden (in tabel 4.1 wordt het landgebruik en het bodemtype van de eenheden weergegeven).

Opvallend is dat het neerslagoverschot van loofbos met ondiepe grondwaterstand (SWAP-eenheid s20) niet het laagst is wat je wel mag verwachten. De gewasverdamping is tegen de verwachting in niet potentieel; er treedt een verdampings-reductie op doordat de omstandigheden te nat zijn. Het is niet zo dat de grondwaterstand tijdens de simulatie vaak tot aan maaiveld staat, maar drukhoogte h_2 (zie figuur 4.1) wordt periodiek overschreden. Uiteraard heeft deze natheidsreductie te maken met de keuze van de grootte van h_1 en h_2 (figuur 4.1 en bijlage C).

Tabel 4.1: Waterbalans van de wortelzone van enkele SWAP-eenheden, in [mm].

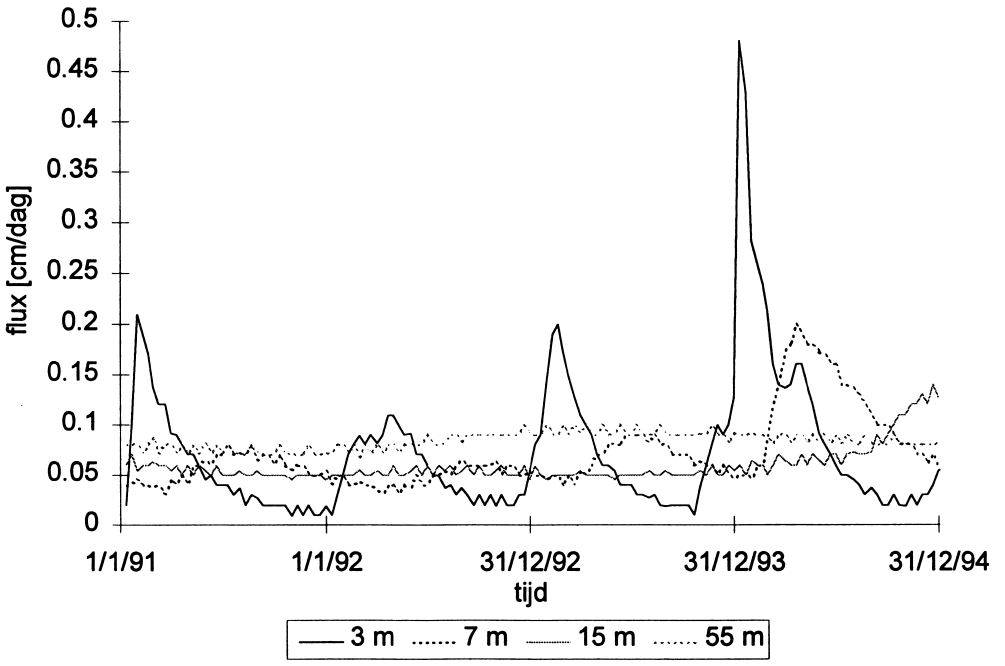
SWAP-eenheid	jaar	P_{gross}	P_{net}	P_i	T_p	T_a	E_p	E_a	q
gras op löss (s1)	1991	704	623	81	413	368	92	83	172
	1992	815	720	95	418	408	87	82	230
	1993	915	808	107	393	349	88	74	385
	1994	819	721	98	414	334	89	85	302
								gem.	**272**
maïs op löss (s2)	1991	704	667	37	347	331	205	144	192
	1992	815	768	47	343	340	203	153	275
	1993	915	851	64	293	289	209	134	428
	1994	819	771	48	347	308	206	152	311
								gem.	**302**
gras op regoliet/beek-dal (s5)	1991	704	624	80	413	358	92	83	183
	1992	815	720	95	418	399	87	82	239
	1993	915	808	107	393	332	88	74	402
	1994	819	721	98	414	314	89	85	322
								gem.	**287**
maïs op regoliet (s7)	1991	704	667	37	347	318	205	144	205
	1992	815	768	47	343	326	203	153	289
	1993	915	851	64	293	280	209	134	437
	1994	819	771	48	347	283	206	152	336
								gem.	**317**
loofbos op regoliet (s9) a=1 in interceptievgl.	1991	704	578	126	336	328	105	98	152
	1992	815	648	167	336	334	102	98	216
	1993	915	727	188	309	297	102	90	340
	1994	819	653	166	327	309	104	94	250
								gem.	**240**
graan op regoliet/beek-dal (s10)	1991	704	678	26	189	189	344	173	316
	1992	815	793	22	235	234	319	214	345
	1993	915	888	27	218	214	317	186	488
	1994	819	801	18	248	233	313	216	352
								gem.	**375**
loofbos op beekdal met ondiepe gws (s20) a=1 in interceptievgl.	1991	704	578	126	336	305	105	98	175
	1992	815	648	167	336	291	102	98	259
	1993	915	727	188	309	273	102	90	364
	1994	819	653	166	327	302	104	94	257
								gem.	**264**

Direct onder de wortelzone is het berekende neerslagoverschot een deel van het jaar negatief. Dit betekent dat er capillaire nalevering plaatsvindt vanuit de (onverzadigde) ondergrond naar de wortelzone ofschoon de grondwaterspiegel zeer diep onder maaiveld voorkomt. In figuur 4.3 is de flux direct onder de wortelzone weergegeven van SWAP-eenheid gras op löss (s1).



Figuur 4.3: Flux direct onder de wortelzone, SWAP-eenheid s1.

Demping en vertraging van het neerslagoverschot; grondwateraanvulling
In de onverzadigde ondergrond gaan demping en vertraging van het neerslagoverschot een rol spelen. Figuur 4.4 geeft dit goed weer. Op een diepte van 55 m blijkt de grondwateraanvulling gelijkmatig te verlopen over de gesimuleerde jaren; de demping lijkt bijna volledig of de rekenperiode is te kort, waardoor de grote piek aan het einde van 1993 nog niet op 55 m diepte is aangekomen. De grondwateraanvulling bedraagt daar gemiddeld 0,75 mm/dag. Ook op 15 m diepte zijn de neerslagpieken van de eerste jaren volledig uitgedempt, alleen de neerslagpiek van 1993 is terug te vinden in de figuur.



Figuur 4.4: Grondwateraanvulling op verschillende diepten, SWAP-eenheid s1.

De grondwateraanvulling op 3 m en 7 m diepte laat een heel ander beeld zien. De gemiddelde vertraging tussen 3 m en 7 m diepte is ongeveer 3 maanden en de piekdemping is 70%. De gemiddelde vertraging tussen 3 m en 15 m diepte is al 11 maanden en de piek-

demping 80%.
De grondwateraanvulling op verschillende diepten van andere SWAP-eenheden laten een vergelijkbaar beeld zien.

4.5 Gevoeligheidsanalyse

4.5.1 Methode

De betrouwbaarheid van een model is afhankelijk van de processen die in het model zijn opgenomen en de kwaliteit van de modelinvoer. De invoerparameters zijn niet altijd exact bekend en ook de invloed van een parameter op de modeluitkomst is niet altijd duidelijk. De gevoeligheid van een aantal parameters wordt daarom bekeken. De gevoeligheid wordt bepaald aan de hand van modeluitkomsten, in dit geval het actuele neerslagoverschot en de grondwateraanvulling. Bij de gevoeligheidsanalyse wordt één parameter per keer veranderd. De uitkomsten worden vergeleken met de onveranderde situatie (standaard, paragraaf 4.4). Naarmate een parameter een grotere invloed heeft op de modeluitkomsten wordt het belangrijker om de ingevoerde waarden kritisch te bekijken. Bij de vergelijking van de verschillende modellen (hoofdstuk 6) is de gevoeligheidsanalyse met SWAP bekeken. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn ook gebruikt toen uit de simulaties met MODFLOW (hoofdstuk 7) bleek dat de grondwateraanvulling aangepast moest worden.

Bij de simulatie van de vochthuishouding van de wortelzone is het neerslagoverschot een belangrijke modeluitkomst. De gevoeligheid van typische wortelzone parameters, zoals gewaskeuze en bewortelingsdiepte, werd getoetst met de uitkomsten van het neerslagoverschot. Bij de simulatie van de onverzadigde ondergrond is de temporele verdeling van de grondwateraanvulling een belangrijke modeluitkomst. De gevoeligheid van typische onverzadigde ondergrond parameters, zoals doorlatendheid, werd getoetst.
De gevoeligheidsanalyse werd uitgevoerd voor de representatieve SWAP-eenheden (zie paragraaf 4.4). De gevoeligheidsanalyse werd niet voor alle invoerparameters uitgevoerd, omdat dit te tijdrovend was. De gevoeligheid van het landgebruik, de bewortelingsdiepte, de verzadigde doorlatendheid en de keuze van de onderrandvoorwaarde is bepaald. Ook is de gevoeligheid van het bodemtype en de bodemfysische eigenschappen van de Formatie van Gulpen getoetst. Als laatste is de gevoeligheid van de compartimentsgrootte bekeken.

4.5.2 Landgebruik

Het landgebruik op een bepaalde plaats kan grote invloed hebben op het neerslagoverschot (tabel 4.1). De gevoeligheid van het landgebruik is op alle in het gebied voorkomende gronden uitgevoerd, omdat de vochthuishouding van de wortelzone afhankelijk is van de grondsoort. Als referentie is het landgebruik gras gekozen, omdat dit gewas het meeste voorkomt in het gebied. Alleen die gewassen zijn vergeleken die in het gebied op de specifieke grondsoorten voorkomen.
Onderstaande tabel laat zien dat graan en maïs, zoals al eerder is opgemerkt (paragraaf 4.4) inderdaad een groter neerslagoverschot hebben dan gras. Loofbos heeft een duidelijk lager neerslagoverschot.

Tabel 4.2: Procentueel verschil in gemiddeld neerslagoverschot (1991-1994) ten opzichte van gras.

Grondsoort	loofbos	maïs	graan
löss	-	+14,4%	-
regoliet/beekdalopv.	-12,1%	+13,2%	+36,7%

In tabel 4.2 laat een vervanging van gras door graan het grootste verschil (36,7%) in neerslagoverschot zien. De gevoeligheidsanalyse laat zien dat het zeer belangrijk is dat het landgebruik goed wordt vastgesteld en geschematiseerd in het gebied.

4.5.3 Bewortelingsdiepte

De hoeveelheid water die een plant op kan nemen is onder meer afhankelijk van de bewortelingsdiepte. Langere wortels hebben een groter grondvolume waar ze water uit kunnen onttrekken. In dit geval is de grondsoort ook belangrijk. De standaard bewortelingsdiepte (zie bijlage C) is vergeleken met wortels die 25% dieper(+) of minder diep(-) wortelen. Onderstaande tabel (4.3) geeft het resultaat van de gevoeligheidsanalyse aan. Als de bewortelingsdiepte groter is dan is het neerslagoverschot ook altijd kleiner; de actuele transpiratie (T_a) wordt niet zo snel gelimiteerd, zodat het gewas meer kan verdampen.

Tabel 4.3: Procentueel verschil in gemiddeld neerslagoverschot (1991-1994) bij andere bewortelingsdiepten ten opzichte van de standaard bewortelingsdiepte.

Grondsoort	gras-	gras+	maïs-	maïs+	loofbos-	loofbos+	graan-	graan+
löss	+1,9%	-2,9%	+2,4%	-1,1%	-	-	-	-
regoliet/beekdal	+2,0%	-2,8%	+2,7%	-1,5%	+2,0%	-1,2%	+0,9%	-0,5%

Het verschil in gemiddeld neerslagoverschot is maximaal 2,9% per jaar (gras op löss). Dit betekent een verschil in neerslagoverschot van nog geen 8 mm/jaar. Opvallend is het kleine verschil in neerslagoverschot bij afwijkende bewortelingsdiepten. De gevoeligheidsanalyse laat zien dat een verkeerd gekozen bewortelingsdiepte geen grote invloed heeft op de modeluitkomsten van SWAP.

4.5.4 Verzadigde doorlatendheid

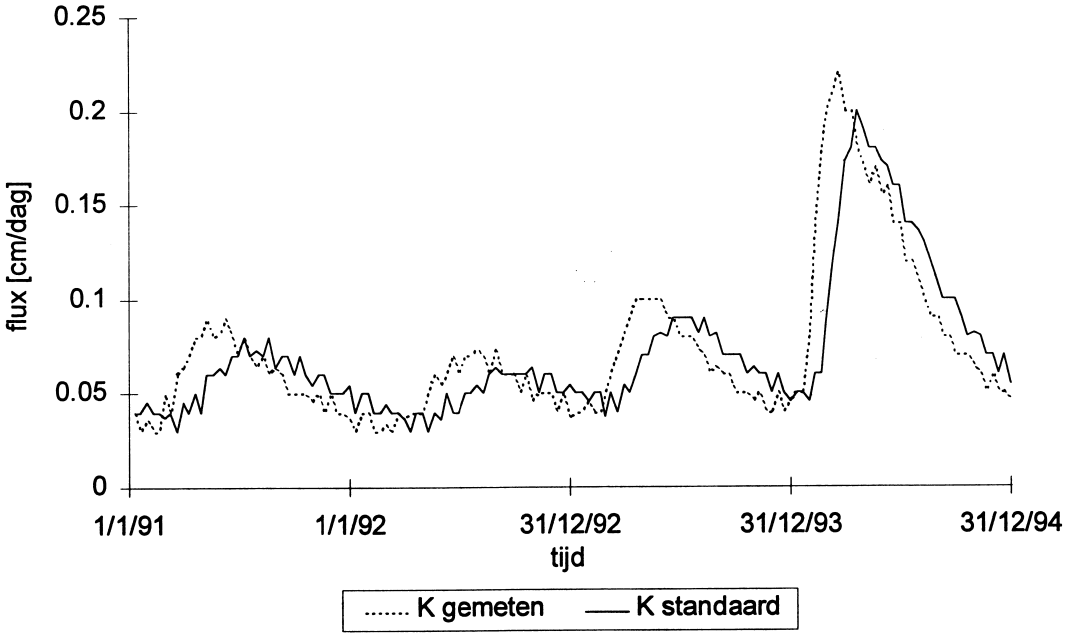
De waterretentiecurve en onverzadigde doorlatendheidsfunctie worden beschreven met 6 parameters (zie paragraaf 4.2 en 4.3). Eén van deze parameters is de verzadigde doorlatendheid. In het Noordal was de verzadigde doorlatendheid wel gemeten, maar deze parameter wijkt sterk af van de verzadigde doorlatendheid volgens de Staringreeks (standaard). Uit de $K(\theta)$ functie (vergelijking 4-5) blijkt dat er een rechtstreeks verband tussen onverzadigde doorlatendheid ($K(\theta)$) en de verzadigde doorlatendheid (K_s) is. Het aanpassen van de verzadigde doorlatendheid betekent ook een aanpassing van de onverzadigde doorlatendheid en heeft daarmee effect op de onverzadigde grondwaterstroming (zie vergelijking 4-3).

De verzadigde doorlatendheid, K_s [cm/dag], van de Formaties van Gulpen en Vaals zijn aangepast uitgaande van de gemeten waarden in het gebied (zie tabel 4.4).

Tabel 4.4: Verzadigde doorlatendheid [cm/dag] gemeten en volgens de Staringreeks.

Grondsoort	gemeten	standaard
Formatie van Gulpen	250	18,3
Formatie van Vaals	100	9,08

Figuur 4.5 laat duidelijk het verschil in vertraging en demping zien bij de grondwateraanvulling (flux) op 7 m diepte in een 4 m dik pakket van de Formatie van Gulpen, boven dit pakket ligt 3 m löss (SWAP-eenheid s1). Vergroting van de verzadigde doorlatendheid geeft een kleinere vertraging en demping van het neerslagoverschot. Het verschil in vertraging is ongeveer 2 maanden en de piekdemping is 10% kleiner.
Het verschil in vertraging en demping wordt groter naarmate de grondwateraanvulling op grotere diepte wordt vergeleken. Op 10 m diepte (3 m löss en 7 m Formatie van Gulpen) is het verschil in vertraging al ongeveer 3 maanden en de piekdemping is ook iets kleiner (7%).

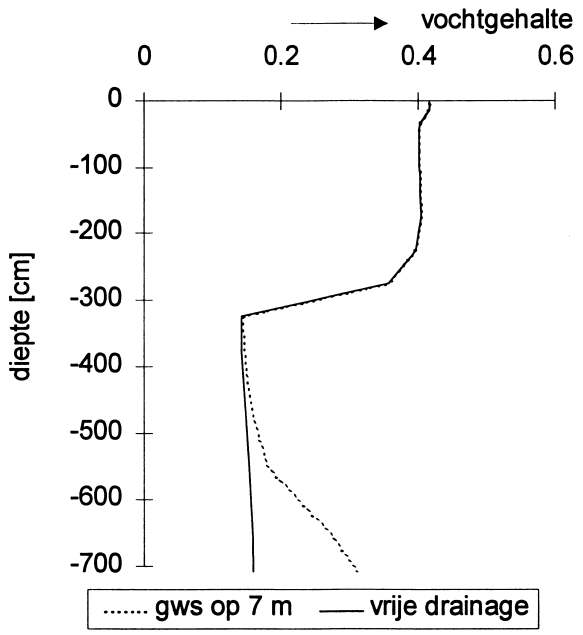


Figuur 4.5: Grondwateraanvulling op 7 m diepte bij verschillende verzadigde doorlatendheden voor de Formatie van Gulpen.

Ook de grondwateraanvulling op plaatsen waar de grondwaterspiegel in de Formatie van Vaals ligt, laat een kleiner vertragend en dempend effect zien ten opzichte van de standaardsimulatie. De grondwateraanvulling op 15 m diepte is bekeken in een 5 m dik pakket van de Formatie van Vaals. Boven dit pakket ligt 3 m regoliet en 7 m Formatie van Gulpen (SWAP-eenheid s5). Het verschil in vertraging, als gevolg van een vergroting van de verzadigde doorlatendheid, is ongeveer 5 decades. De piekdemping is iets kleiner, maar niet precies vast te stellen, omdat slechts één piek optrad aan het einde van de simulatieperiode. Het aanpassen van de verzadigde doorlatendheid kan nuttig zijn bij de calibratie van de grondwateraanvulling, omdat hiermee de vertraging en demping van het neerslagoverschot beïnvloed kunnen worden.

4.5.5 Onderrandvoorwaarde

Voor Noor-eenheden met een diepe grondwaterstand (vanaf 3 m) is vrije drainage als onderrandvoorwaarde gekozen (zie paragraaf 4.3). In werkelijkheid wordt de onderrand echter gevormd door de grondwaterstand. Door vrije drainage als onderrandvoorwaarde te nemen, treden drogere vochtcondities in de compartimenten boven het freatisch vlak op. Figuur 4.6 laat het verschil in vochtgehalte in de diepte zien voor een bepaalde situatie als voor de onderrandvoorwaarde vrije drainage of de grondwaterstand op 7 m diepte wordt genomen. Het vochtgehalte heeft uiteraard invloed op de onverzadigde grondwaterstroming (vergelijking 4-3).

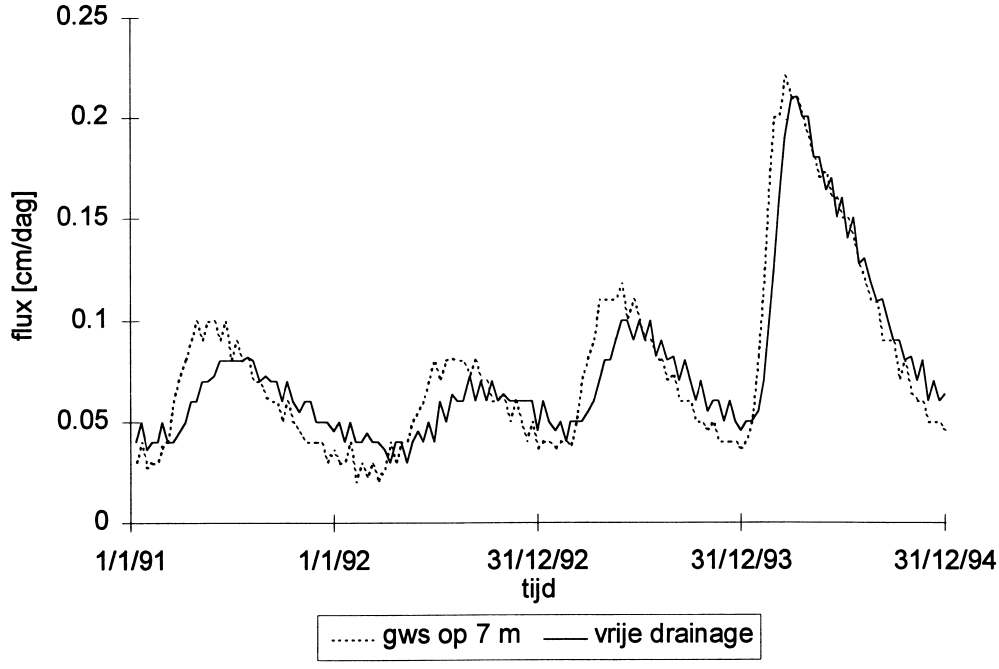


Figuur 4.6: Vochtgehaltes bij twee verschillende onderrandvoorwaarden.

De gevoeligheid is uitgevoerd met twee verschillende onderrandvoorwaarden; vrije drainage en een opgegeven constante grondwaterstand voor een eenheid (s3) met een grondwaterstand van 3 m en 7 m onder maaiveld.

Figuur 4.7 laat zien dat, als op een diepte van 7 m vrije drainage als onderrandvoorwaarde wordt gekozen in plaats van een constante grondwaterstand, dit een effect heeft op de vertraging en demping van de grondwateraanvulling.
De grondwateraanvulling op 7 m diepte wordt minder vertraagd en gedempt als voor de onderrandvoorwaarde een grondwaterstand (in dit geval op 7 m) wordt opgegeven. Het vertragingsverschil is ongeveer 1 maand en de piekdemping is zo'n 15% kleiner. Een hoger vochtgehalte betekent dat een groter aandeel van de poriën water bevat en dit betekent een groter doorstromend oppervlak. Het gevolg hiervan is minder vertraging en demping in de onverzadigde ondergrond.
De grondwateraanvulling op 3 m diepte laat een vergelijkbaar beeld (zoals in figuur 4.7) zien. De piekdemping is iets groter (ongeveer 20%) als vrije drainage wordt gekozen in plaats van een constante grondwaterstand. Bij de bodemprofielen met een diepere grondwaterstand wordt het verschil in vertraging en demping bij verschillende onderrandvoorwaarden kleiner, omdat alleen vlak boven de grondwaterstand het effect van een hoger vochtgehalte

invloed heeft (zie figuur 4.6).



Figuur 4.7: Grondwateraanvulling op 7 m diepte voor verschillende onderrandvoorwaarden, SWAP-eenheid s3.

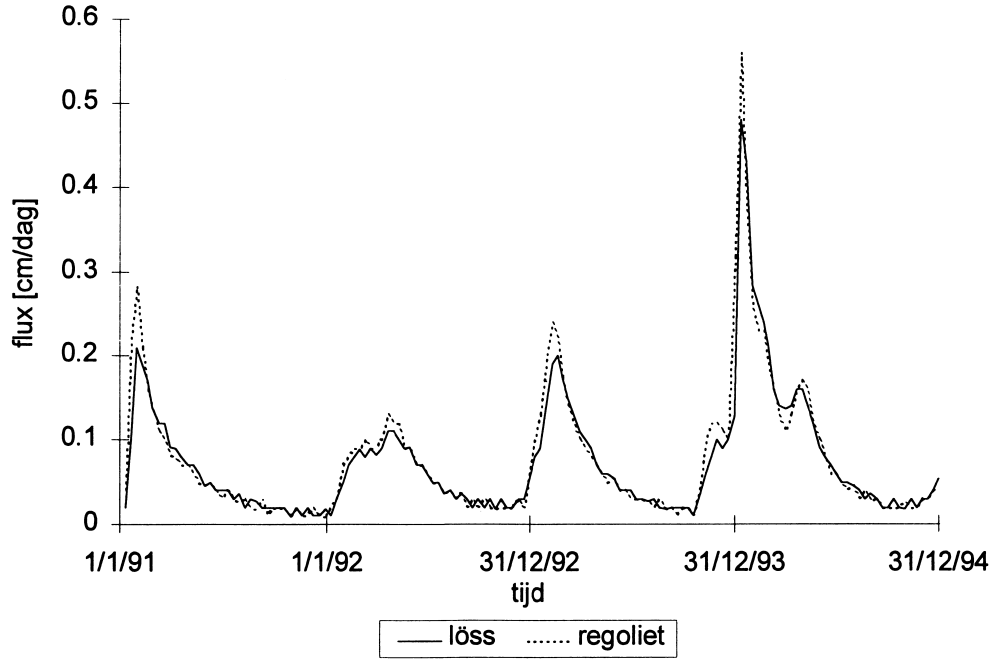
Vooral in profielen met een ondiepe grondwaterstand heeft een opgegeven constante grondwaterstand als onderrandvoorwaarde, in plaats van vrije drainage, een kleinere vertraging en demping van het neerslagoverschot tot gevolg. De keuze van de onderrandvoorwaarde heeft dan een grote invloed op de temporele variatie van de grondwateraanvulling.

4.5.6 Bodemtype

In het Noordal zijn veel boringen verricht. Vooral dichtbij de Noor is daardoor veel informatie voorhanden. Op de hellingen en de plateau's zijn veel minder boringen verricht en daardoor zijn er minder gegevens over het voorkomen en de dikte van löss of regoliet beschikbaar. Het bodemtype is niet alleen van invloed op de grootte van het neerslagoverschot, maar ook op de temporele verdeling van het neerslagoverschot, die als bovenrandvoorwaarde voor de onverzadigde ondergrond geldt. De gevoeligheid van het bodemtype werd getoetst door de lössgrond (SWAP-eenheid s1) te vervangen voor de regolietgrond. Beide gronden kunnen tot op een diepte van 3 m voorkomen. De flux op deze diepte wordt vergeleken in figuur 4.8. De figuur laat zien dat de piek van het neerslagoverschot met het bodemtype regoliet groter is (25%) dan met het bodemtype löss.

Door het gebrek aan boringen op de plateau's en hellingen staat ook de dikte van löss en regoliet niet vast. De gevoeligheid is moeilijk te toetsen. De grondwateraanvulling op 3 m diepte van een bodemprofiel bestaande uit 3 m löss moet bijvoorbeeld worden vergeleken met een profiel bestaande uit 2 m löss en 1 m Formatie van Gulpen. De fysische eigenschappen van de Formatie van Gulpen spelen daardoor ook een rol. Als de Formatie van Gulpen een hogere verzadigde doorlatendheid heeft, dan is de grondwateraanvulling op 3 m diepte in een profiel van 2 m löss en 1 m Formatie van Gulpen minder vertraagd en

gedempt dan de grondwateraanvulling in een profiel bestaande uit 3 m löss.



Figuur 4.8: Grondwateraanvulling op 3 m diepte voor een profiel bestaande uit löss en een profiel bestaande uit regoliet.

4.5.7 Bodemfysische eigenschappen van de Formatie van Gulpen

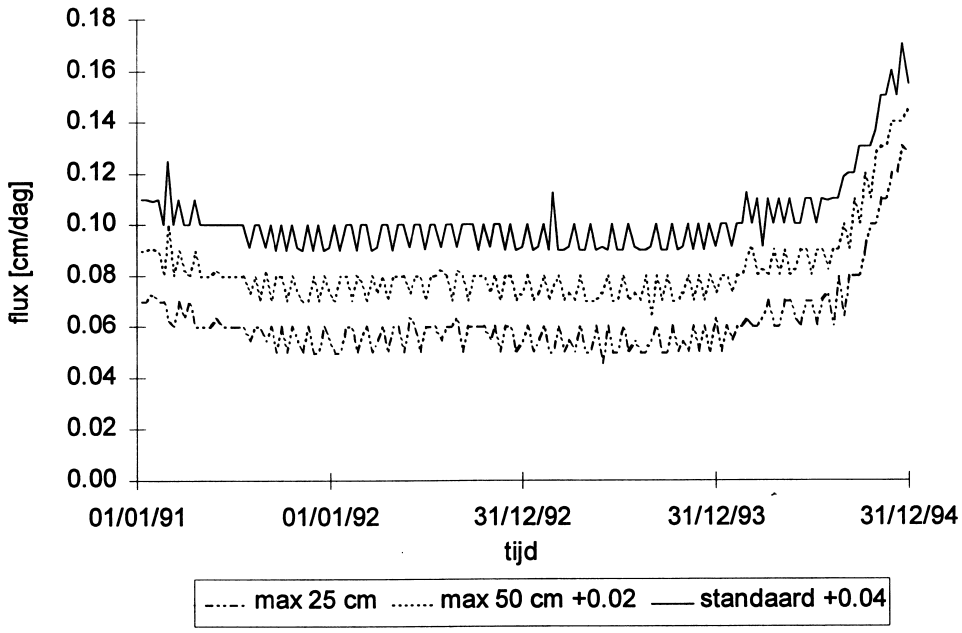
De fysische eigenschappen van de Formatie van Gulpen spelen in een groot deel van het stroomgebied van de Noor een relatief grote rol bij de vertraging en demping van het neerslagoverschot in de onverzadigde ondergrond. De formatie komt in de onverzadigde ondergrond in dikke pakketten voor en heeft daardoor grote invloed op de onverzadigde grondwaterstroming.

Bouma et al. (1978) geven, zoals in paragraaf 4.3 reeds aan de orde is gekomen, enkele waterretentie- en doorlatendheidsgrafieken van gronden die voorkomen op het Plateau van Margraten. Voor de Formatie van Gulpen zou ook een andere waterretentiecurve (van het matig harde gesteente) dan gebruikt in paragraaf 4.4, van toepassing kunnen zijn. Deze waterretentiecurve is weer vergeleken met de grafieken uit de Staringreeks (zie paragraaf 4.3). De Formatie van Gulpen als matig hard gesteente bleek vergelijkbaar te zijn met een zeer lichte zavelondergrond (O8). De Formatie van Gulpen komt hiermee overeen met de Formatie van Vaals.

Bovengenoemde ondergrond voor de Formatie van Gulpen blijkt, in vergelijking met de standaardgrond (paragraaf 4.4), een grotere vertraging en demping tot gevolg te hebben. Op 7 m diepte, met 3 m löss en een 4 m dik pakket van de Formatie van Gulpen (SWAP-eenheid s1), is het vertragingsverschil ongeveer 1 maand. Bij een dikker pakket van de Formatie van Gulpen wordt het vertragingsverschil groter.
Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat goede bodemfysische gegevens van de onverzadigde ondergrond belangrijk zijn om de juiste vertraging en demping vast te stellen. Een foutief gekozen ondergrond heeft grote invloed op de temporele variatie in de grondwateraanvulling.

4.5.8 Compartimentsgrootte

Bij de simulatie van de onverzadigde ondergrond is gebruik gemaakt van relatief grote compartimenten (zie paragraaf 4.3) en het is niet precies bekend hoe gevoelig de berekende grondwateraanvulling daarvoor is. Als compartimentsgrootte is bij de standaardsimulatie maximaal 100 cm genomen. De uitkomsten laten een erg typisch schommelende grondwateraanvulling zien (figuur 4.9). Bovendien geven de waterbalansen in 1994 een fout tot 2 cm. Dit kan worden veroorzaakt door een numerieke fout bij de berekeningen. Om dit te testen zijn simulaties uitgevoerd met een maximale compartimentsgrootte van 25 en 50 cm.



Figuur 4.9: Grondwateraanvulling op 15 m diepte bij verschillende compartimentsgroottes.

De grafieken met de standaard compartimentsgrootte en de maximale compartimentsgrootte van 50 cm zijn verticaal verschoven met respectievelijk 0,04 en 0,02 cm/dag. Dit is gedaan om de verschillen in schommeling zichtbaar te maken. Figuur 4.9 laat duidelijk de typisch schommelende grondwateraanvulling zien bij de verschillende compartimentsgroottes. Het schommelend effect wordt veroorzaakt door de afronding die SWAP maakt op tienden van millimeters. Als de uitvoer in meer decimalen wordt gegeven dan is deze schommeling niet meer aanwezig. De waterbalansfout blijft ongewijzigd. De oorzaak van de fout zou de hoge neerslag (150 mm/2 weken) aan het einde van 1993 kunnen zijn.

4.5.9 Samenvatting

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse met SWAP zijn samengevat in tabel 4.5. In de tabel wordt de relatieve gevoeligheid van de parameters weergegeven. De gevoeligheid van elke parameter is aangegeven voor ondiepe (tot 3 m), matig diepe (3 en 7 m) en diepe grondwaterstanden (>7m).

Het landgebruik en de bewortelingsdiepte zijn parameters die invloed hebben op de berekening van het neerslagoverschot, onafhankelijk van de diepte van een profiel. Het bodem-

type is een parameter die het neerslagoverschot en de temporele verdeling van het neerslagoverschot bepalen. De andere parameters zijn belangrijk voor de berekening van de temporele grondwateraanvulling en wel afhankelijk van de dikte van de onverzadigde ondergrond. In de profielen met een ondiepe grondwaterstand spelen deze parameters in principe geen rol. De verzadigde doorlatendheid heeft echter wel invloed op de grootte van het neerslagoverschot. De onderrandvoorwaarde voor profielen met een ondiepe grondwaterstand is standaard een opgegeven grondwaterstand.

Tabel 4.5: Relatieve gevoeligheid (-- = ongevoelig en ++ = zeer gevoelig) van de parameters voor ondiepe, matig diepe en diepe grondwaterstanden (gws).

Parameters	Gevoeligheid		
	ondiepe gws	matig diepe gws	diepe gws
Landgebruik	+	+	+
Bewortelingsdiepte	-	-	-
Verzadigde doorlatendheid	+	+	++
Onderrandvoorwaarde	nvt	+	+/-
Bodemtype	+/-	+/-	+/-
Eigenschappen Formatie van Gulpen	nvt	+	++

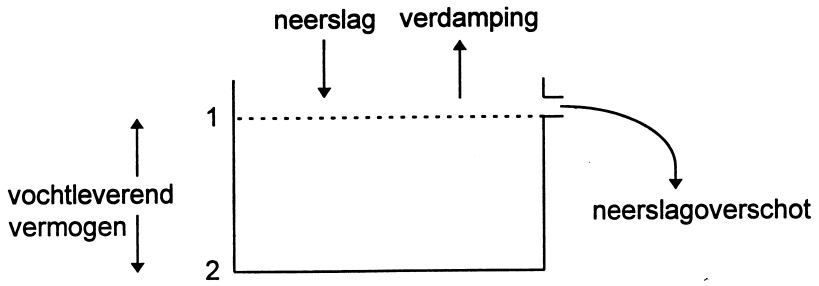
Het landgebruik is een gevoelige parameter voor het berekenen van het neerslagoverschot, terwijl de bewortelingsdiepte niet gevoelig is. De verzadigde doorlatendheid, de onderrandvoorwaarde en de bodemfysische eigenschappen van de Formatie van Gulpen zijn alle drie gevoelige parameters voor het berekenen van de temporele grondwateraanvulling. De verzadigde doorlatendheid en de bodemfysische eigenschappen van de Formatie van Gulpen zijn gevoeliger naarmate de grondwaterstand dieper is. De onderrandvoorwaarde is daarintegen minder gevoelig als de grondwaterstand dieper is.

5. Andere onverzadigde grondwatermodellen

5.1 Reservoirmodel NUT_DAY

5.1.1 Modelbeschrijving

Reservoirmodellen beschouwen de wortelzone als een reservoir of als een serie van reservoirs (cascade). Het programma NUT_DAY is een simulatieprogramma dat werkt op basis van één reservoir(van Lanen et al., 1996). Het reservoir is weergegeven in onderstaande figuur (5.1). Voor de gewasverdamping is de potentiële verdamping en de hoeveelheid beschikbaar vocht van belang. Als de bodem niet op veldcapaciteit is dan wordt het teveel aan neerslag in de wortelzone opgenomen. Als de bodem op veldcapaciteit is dan wordt het teveel aan neerslag niet meer opgenomen in de wortelzone en zal het doorstromen naar de ondergrond. Dit is het actuele neerslagoverschot.



1 vochtgehalte bij veldcapaciteit 2 vochtgehalte bij verwelkingspunt

Figuur 5.1: Het lineaire reservoir model (den Toom en van der Koppel, 1993).

De stippellijn in figuur 5.1 geeft de vochtinhoud bij veldcapaciteit weer. De onderkant van het reservoir geeft de vochtinhoud bij verwelkingspunt weer. Het verschil tussen vochtinhoud bij veldcapaciteit en verwelkingspunt is het vochtleverend vermogen. Het vochtleverend vermogen wordt afgeleid uit de bewortelingsdiepte en de vochtkarakteristieken van de bodemlagen die in de wortelzone voorkomen.

5.1.2 Modelachtergronden

In deze paragraaf worden de achtergronden van het reservoirmodel NUT_DAY behandeld. Aan de orde komen: de waterbalans van de wortelzone, de evapotranspiratie en het actuele neerslagoverschot.

Waterbalans van de wortelzone
NUT_DAY berekent het dagelijkse neerslagoverschot door de wortelzone als een reservoir voor te stellen. De waterbalansvergelijking voor de wortelzone ziet er bij diepe grondwaterstanden (geen capillaire nalevering) als volgt uit:

$$S(t) = S(t-1) + P(t)\Delta t - ET_a(t)\Delta t - q(t)\Delta t \qquad (5\text{-}1)$$

met $S(t)$ = berging in de wortelzone op tijdstip t [mm]

S(t-1)= berging in de wortelzone op tijdstip t-1 [mm]
P = neerslag [mm/d]
ET_a = actuele evapotranspiratie [mm/d]
q = flux naar de ondergrond oftewel het neerslagoverschot [mm/d]
Δt = tijdstap [d]

Potentiële evapotanspiratie
De potentiële evapotranspiratie wordt als volgt berekend:

$$ET_p(t) = f\ ET_{ref}(t) \qquad (5\text{-}2)$$

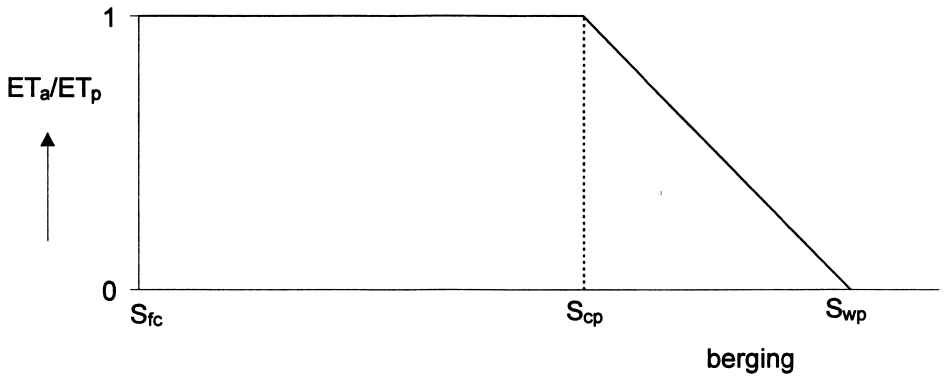
met ET_p = potentiële evapotranspiratie [mm/d]
ET_{ref} = referentie evapotranspiratie volgens Makkink [mm/d]
f = Makkink gewasfactor [-]

Actuele evapotranspiratie
De actuele evapotranspiratie wordt bepaald voor twee verschillende situaties: de grondwaterstand kan ondiep en diep zijn.

Als de grondwaterstand ondiep is dan kan het gewas altijd potentieel verdampen en zal de actuele evapotranspiratie gelijk zijn aan de potentiële evapotranspiratie:

$$ET_a(t) = ET_p(t) \qquad (5\text{-}3)$$

Als de grondwaterstand diep staat dan speelt de actuele berging een rol.



Figuur 5.2: Actuele evapotranspiratie als functie van de actuele berging.

Figuur 5.2 laat de verhouding tussen potentiële en actuele evapotranspiratie zien als functie van de actuele berging. De berging bij veldcapaciteit (S_{fc}) is het grootst en bij verwelkingspunt (S_{wp}) het kleinst. In de figuur is te zien dat er een reductie in evapotranspiratie gaat optreden als de actuele berging onder het kritische punt (S_{cp}) komt.

Als de actuele berging groter is dan het beschikbaar vocht bij het kritische punt dan is de actuele evapotranspiratie gelijk aan de potentiële evapotranspiratie, dus:

$$ET_a(t) = ET_p(t) \qquad \text{als } S(t) \geq S_{cp} \qquad (5\text{-}4)$$

met S = actuele berging [mm]
S_{cp} = beschikbaar vocht bij het kritische punt [mm]

Als de actuele berging kleiner is dan het beschikbaar vocht bij het kritische punt dan wordt de actuele evapotranspiratie gereduceerd en geldt:

$$ET_a(t) = \frac{S(t) - S_{wp}}{S_{cp} - S_{wp}} ET_p(t) \qquad \text{als } S(t) < S_{cp} \qquad (5\text{-}5)$$

met S_{wp} = beschikbaar vocht bij het verwelkingspunt [mm]

Actueel neerslagoverschot
Als de grondwaterstand ondiep is dan geldt:

$$q(t) = P(t) - ET_p(t) \qquad (5\text{-}6)$$

Uit vergelijking (5-6) is af te leiden dat het actueel neerslagoverschot van een zekere tijdstap bij een ondiepe grondwaterstand zowel negatief als positief kan zijn.

Als de grondwaterstand diep is dan speelt de berging een rol. Als de hoeveelheid geborgen water kleiner is dan de maximale berging dan kan alle neerslag geborgen worden in de wortelzone en zal er geen neerslagoverschot optreden dat naar de onverzadigde ondergrond stroomt:

$$q(t) = 0 \qquad \text{als } S(t) \leq S_{fc} \qquad (5\text{-}7)$$

met S_{fc} = beschikbaar vocht bij veldcapaciteit [mm]

Als de berging maximaal is dan kan er geen water meer geborgen worden in de wortelzone. De neerslag die dan valt, zal direct doorstromen naar de onverzadigde ondergrond:

$$q(t) = S(t) - S_{fc} \quad \text{als } S(t) > S_{fc} \qquad (5\text{-}8)$$

5.1.3 Invoer en uitvoer

Het reservoirmodel NUT_DAY werkt met een beperkt aantal invoergegevens. De meteorologische gegevens, enkele gewasgegevens en de bodemprofiel en -fysische gegevens zijn nodig voor de simulatie van het neerslagoverschot.

De meteorologische gegevens van 1987 tot en met 1994 zijn voor de berekening gebruikt. De simulatie begint op 1 januari 1991. De voorliggende jaren worden gebruikt om de vochtinhoud van het reservoir op 1 januari 1991 te kunnen bepalen. NUT_DAY gebruikt voor de simulatie neerslaggegevens [mm/dag] en verdampingsgegevens [mm/dag]. Voor de neerslaggegevens wordt, net als bij SWAP, gebruik gemaakt van de neerslag geregistreerd op het neerslagstation Haesen. Voor de verdampingsgegevens wordt, net als bij SWAP,

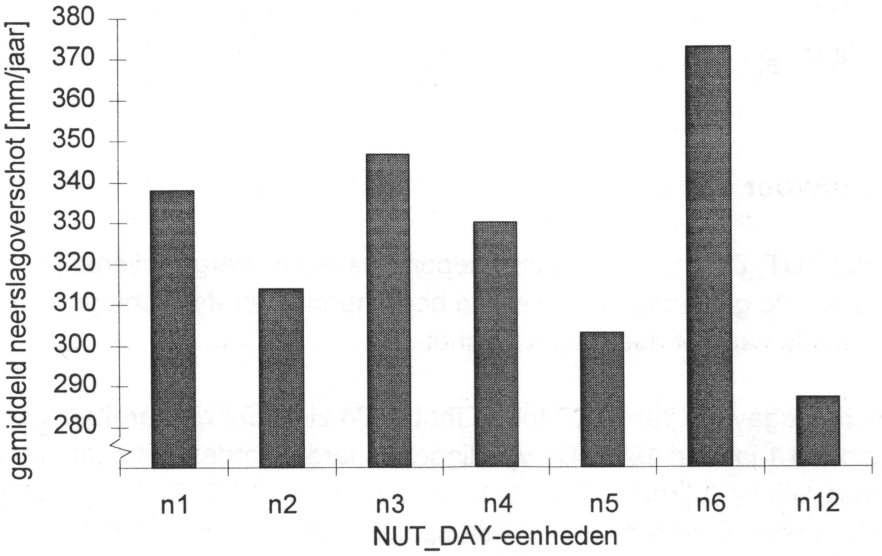
gebruik gemaakt van de Makkink referentieverdamping van distrikt 15 (KNMI, 1986-1994). De potentiële verdamping wordt berekend met behulp van de gewasfactor (zie paragraaf 5.1.2). De gewasfactor voor elk gewas staat per decade in de programma structuur vermeld en is te vinden in bijlage C.

De gewasgegevens, bodemprofiel en -fysische gegevens van de wortelzone zijn: het landgebruik, de bewortelingsdiepte, de grondwaterstand, het aantal lagen, de dikte van iedere laag en het vochtpercentage bij verschillende drukhoogten. De grondwaterstand wordt gedefinieerd als diep of ondiep. De vochtpercentages worden opgegeven bij verschillende drukhoogten (veldcapaciteit, kritisch punt en verwelkingspunt). Deze zijn voor elk gewas verschillend en daarom zijn, net als in SWAP, de gewasspecifieke drukhoogten gebruikt (zie paragraaf 4.3). In de literatuur wordt onderscheid gemaakt tussen drukhoogte bij het kritische punt met lage transpiratie vraag en hoge transpiratie vraag. In NUT_DAY kan maar één waarde voor het kritisch punt worden ingevoerd. Bij de invoer is gekozen voor een gemiddelde waarde van de kritische drukhoogten, zoals die in SWAP zijn gebruikt (zie bijlage C). De vochtpercentages bij verschillende drukhoogten moet voor iedere laag uitgerekend worden met behulp van de Staringreeks (interpolatie tussen gegeven tabelwaarden) om vervolgens ingevoerd te worden. Uit de vochtpercentages wordt door het programma de maximale berging (vochtleverend vermogen) berekend.

De uitvoer wordt gegeven in de vorm van een tabel waarin de waterbalans van de wortelzone wordt gegeven. De tabel geeft per dag de totale neerslag, de referentie, potentiële en actuele verdamping, de actuele berging en het actuele neerslagoverschot.

5.1.4 Neerslagoverschot

De simulatie is uitgevoerd voor een aantal representatieve NUT_DAY-eenheden (n1, n2, n3, n4, n6, n6 en n12; zie bijlage A1). De waterbalans geeft als belangrijkste uitvoer het actuele neerslagoverschot. Figuur 5.3 geeft het gemiddeld neerslagoverschot (1991-1994) weer.



Figuur 5.3: Gemiddeld neerslagoverschot van een aantal NUT_DAY-eenheden (in tabel 5.1 wordt het landgebruik en het bodemtype van de eenheden weergegeven).

Tabel 5.1 geeft de jaarlijkse waterbalans van de wortelzone voor de gehele simulatieperiode weer. De tabel bevat voor elk jaar enkele termen van de waterbalans; namelijk de neerslag (P), de potentiële en actuele evapotranspiratie (ET_p en ET_a) en het actuele neerslagoverschot (q).

Tabel 5.1: Waterbalans van de wortelzone van een aantal NUT_DAY-eenheden, in [mm].

NUT_DAY-eenheid	jaar	P	ET_p	ET_a	q
gras op löss (n1)	1991	704	572	465	239
	1992	815	584	545	270
	1993	915	565	454	461
	1994	820	583	440	380
				gem.	**338**
maïs op löss (n2)	1991	704	536	488	216
	1992	815	547	545	270
	1993	915	511	507	408
	1994	820	550	459	361
				gem.	**314**
gras op regoliet/beek-dal (n3)	1991	704	572	456	248
	1992	815	584	537	278
	1993	915	565	445	470
	1994	820	583	430	390
				gem.	**347**
maïs op regoliet (n4)	1991	704	536	466	238
	1992	815	547	538	277
	1993	915	511	496	419
	1994	820	550	433	387
				gem.	**330**
loofbos op regoliet (n5)	1991	704	517	507	197
	1992	815	539	539	276
	1993	915	517	506	409
	1994	820	533	490	330
				gem.	**303**
graan op regoliet/beek-dal (n6)	1991	704	432	432	272
	1992	815	467	467	348
	1993	915	456	439	476
	1994	820	471	426	394
				gem.	**373**
loofbos op beekdal met ondiepe gws (n12)	1991	704	517	517	187
	1992	815	539	539	276
	1993	915	517	517	398
	1994	820	533	533	287
				gem.	**287**

De tabel laat zien dat het verschil in neerslagoverschot van een gewas op löss of regoliet bepaald wordt door een verschil in actuele evapotranspiratie. Het verschil is gemiddeld 9 mm/jaar voor gras en 16 mm/jaar gemiddeld voor maïs. De potentiële verdamping van een gewas op regoliet wordt dus meer gereduceerd dan van eenzelfde gewas op löss. Het neerslagoverschot op regoliet is om die reden hoger.

In tabel 5.1 en figuur 5.3 is goed te zien dat het gemiddeld neerslagoverschot van graan het

grootst is, gevolgd door gras, maïs en loofbos (vergelijk eenheden n3, n4, n5 en n6 in tabel 5.1 en figuur 5.3). Het gemiddeld neerslagoverschot van graan is 373 mm/jaar, terwijl het gemiddeld neerslagoverschot van loofbos met een ondiepe grondwaterstand 303 mm/jaar is. De vergelijking van het berekende neerslagoverschot met behulp van NUT_DAY en het berekende neerslagoverschot met behulp van SWAP komt in hoofdstuk 6 aan de orde.

5.1.5 Gevoeligheidsanalyse

5.1.5.1 Landgebruik

Het landgebruik op een bepaalde plaats kan grote invloed hebben op het neerslagoverschot (tabel 5.1). De gevoeligheid is op dezelfde wijze als in SWAP uitgevoerd (zie paragraaf 4.5.2). Als referentie is, net als in SWAP, het gewas gras gekozen en zijn alleen die gewassen vergeleken die in het gebied ook voorkomen op de specifieke grondsoorten.

Tabel 5.2: Procentueel verschil in gemiddeld neerslagoverschot (1991-1994) ten opzichte van gras.

Grondsoort	loofbos	maïs	graan
löss	-	-6,1%	-
regoliet/beekdalopvulling	-11,5%	-3,8%	+8,5%

Tabel 5.2 laat zien dat graan, zoals al eerder is opgemerkt (paragraaf 5.1.4), inderdaad een groter neerslagoverschot heeft dan gras (8,5%) op een regolietgrond. Maïs en loofbos hebben een lager neerslagoverschot. Uit de tabel is af te lezen dat loofbos het grootste verschil (11,5%) in neerslagoverschot geeft. Vanwege de grote gevoeligheid is het dus belangrijk het landgebruik goed vast te stellen in het gebied.

5.1.5.2 Bewortelingsdiepte

De bewortelingsdiepte van een plant is van belang voor de hoeveelheid water die de plant op kan nemen. De gevoeligheidsanalyse is op dezelfde manier als in SWAP uitgevoerd: de standaard bewortelingsdiepte is vergeleken met wortels die 25% dieper(+) of minder diep(-) wortelen. Tabel 5.3 geeft het resultaat van de gevoeligheidsanalyse aan.

Tabel 5.3: Procentueel verschil in gemiddeld neerslagoverschot (1991-1994) bij andere bewortelingsdiepten ten opzichte van de standaard bewortelingsdiepte.

Grondsoort	gras-	gras+	maïs-	maïs+	loofbos-	loofbos+	graan-	graan+
löss	+4,8%	-3,6%	+6,8%	-4,2%	-	-	-	-
regoliet/beekdal	+5,2%	-2,9%	+6,3%	-5,0%	+6,0%	-3,5%	+3,6%	-2,5%

Het verschil in gemiddeld neerslagoverschot is voor maïs op löss met 25% minder diepgaande wortels het grootst, namelijk 6,8% groter. Uit de gevoeligheidsanalyse met NUT_DAY blijkt dat het effect van een verkeerd gekozen bewortelingsdiepte niet zondermeer te verwaarlozen is.

5.1.5.3 Kritisch punt voor reductie van de potentiële verdamping

In paragraaf 5.1.3 werd al gezegd dat NUT_DAY maar één kritische drukhoogte kent en dus geen rekening houdt met een hoge of lage transpiratie vraag, zoals in SWAP. De standaardsimulaties (zie paragraaf 5.1.4) zijn uitgevoerd met een vochtgehalte die hoort bij een gemiddelde waarde van de kritische drukhoogten. De gevoeligheid werd getest door het vochtgehalte dat hoort bij de kritische drukhoogte bij lage transpiratie vraag in te voeren. Vervolgens werd ook het vochtgehalte behorende bij een hoge transpiratie vraag ingevoerd (zie bijlage C). De gevoeligheid werd alleen voor gras op löss en gras op regoliet/beekdalopvulling vastgesteld, omdat deze het meest voorkomen in het gebied. Bovendien is bij gras het verschil tussen de twee extreme drukhoogten het grootst en zal naar verwachting de grootste invloed hebben.

Tabel 5.4 laat het verschil in neerslagoverschot zien door het neerslagoverschot berekend met de gemiddelde kritische drukhoogte te vergelijken met het neerslagoverschot berekend met een lage kritische drukhoogte en met een hoge kritische drukhoogte. De lage kritische drukhoogte geldt bij een lage transpiratie vraag en de hoge kritische drukhoogte geldt bij een hoge transpiratie vraag (zie figuur 4.1).

Tabel 5.4: Procentueel verschil in gemiddeld neerslagoverschot (1991-1994) met verschillende waarden voor de kritische drukhoogte.

Grondsoort	hoge drukhoogte	lage drukhoogte
löss	+2,4%	-2,9%
regoliet/beekdalopv.	+1,8%	-2,9%

De actuele verdamping van een gewas is groter bij de lage kritische drukhoogte is groter. De verklaring hiervoor is dat de verdamping pas bij een kleinere actuele berging begint te reduceren. Het neerslagoverschot zal daarom kleiner zijn. Bij een hoge drukhoogte geldt het omgekeerde. Het verschil in neerslagoverschot is echter gering, maximaal 2,9%. Daaruit blijkt dat een gemiddelde waarde van de kritische drukhoogten niet veel invloed heeft op het neerslagoverschot.

5.2 MUNSFLOW

5.2.1 Modelbeschrijving

Het programma MUNSFLOW is een model bestemd voor de simulatie van het watertransport in de onverzadigde zone (Zwamborn en Baggelaar, 1995). Het model berekent de grondwateraanvulling uit een reeks van neerslag- en verdampingsgegevens. In het model wordt onderscheid gemaakt tussen een wortelzone en de onverzadigde ondergrond. In de wortelzone wordt de actuele verdamping en het actuele neerslagoverschot (percolatie) berekend met behulp van een eenvoudig reservoirmodel. In de onverzadigde ondergrond wordt de demping en de vertraging van het neerslagoverschot bepaald. Het model neemt alleen verticale stroming aan. De uiteindelijke uitkomst van MUNSFLOW is de grondwateraanvulling.

Het model heeft de mogelijkheid om meerdere deelgebieden tegelijkertijd uit te rekenen. Ook

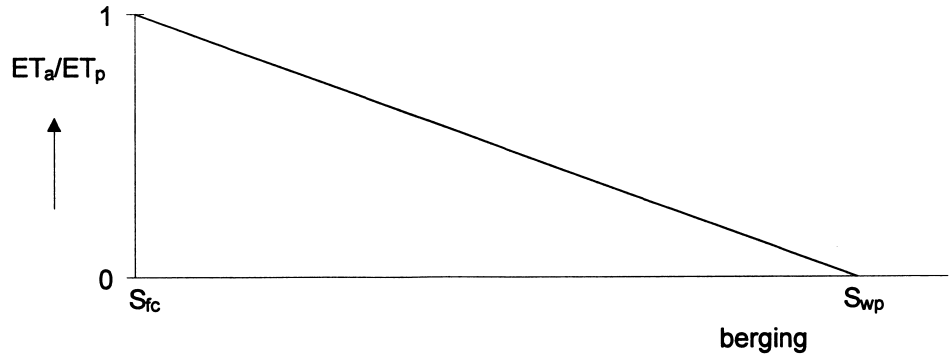
is het mogelijk om meerdere weerstations te gebruiken. Er werd echter in dit onderzoek geen gebruik gemaakt van deze opties.

Het aantal tijdperiodes (in dit onderzoek dagen) waarvoor een simulatie kan worden uitgevoerd is in het programma vergroot van 400 naar 10.000 dagen. Het is nu mogelijk om meerdere jaren achter elkaar door te rekenen in één simulatie. Dit is belangrijk in gebieden met een diepe grondwaterstand.

5.2.2 Modelachtergronden

In deze paragraaf worden de achtergronden van MUNSFLOW behandeld. Aan de orde komen de evapotranspiratie en het neerslagoverschot dat de wortelzone verlaat en de vertraging en demping in de onverzadigde ondergrond.

Wortelzone
De simulatie van het neerslagoverschot is te vergelijken met het reservoirmodel NUT_DAY (paragraaf 5.1). De potentiële verdamping wordt op dezelfde wijze berekend alsmede de actuele verdamping bij ondiepe grondwaterstanden. Bij diepe grondwaterstanden gebruikt het reservoirmodel in MUNSFLOW echter een andere rekenmethode. De actuele berging speelt nog steeds een rol. In onderstaande figuur (5.4) is te zien dat er een lineaire reductie in de potentiële evapotranspiratie gaat optreden als de actuele berging onder veldcapaciteit (S_{fc}) van de grond komt.



Figuur 5.4: Actuele evapotranspiratiegraad als functie van de berging.

Net als in het reservoirmodel NUT_DAY is de berging bij veldcapaciteit (S_{fc}) het grootst en bij verwelkingspunt (S_{wp}) het kleinst. In het programma MUNSFLOW wordt het vochtbergend vermogen (V) van de wortelzone ingevoerd, deze is gelijk aan het beschikbaar vocht bij veldcapaciteit (S_{fc}) min het beschikbaar vocht bij verwelkingspunt (S_{wp}) vermenigvuldigd met de bewortelingsdiepte.
Als de actuele berging gelijk is aan het vochtbergend vermogen dan is de actuele evapotranspiratie gelijk aan de potentiële evapotranspiratie, dus:

$$ET_a(t) = ET_p(t) \qquad \text{als } S_{act}(t) \geq V \qquad (5\text{-}9)$$

met S_{act} = actuele berging van het reservoir [mm]
V = vochtbergend vermogen [mm]

Als de actuele berging kleiner is dan het vochtbergend vermogen dan wordt de actuele evapotranspiratie gereduceerd (figuur 5.4) en geldt:

$$ET_a(t) = \frac{S_{act}(t)}{V} ET_p(t) \qquad \text{als } S_{act}(t) < V \qquad (5\text{-}10)$$

Voor het neerslagoverschot geldt hetzelfde als bij het reservoirmodel NUT_DAY. Bij een ondiepe grondwaterstand zal alle neerslag die niet direct verdampt (potentiële verdamping) in het grondwater terechtkomen. Bij diepe grondwaterstanden zal, als de actuele berging gelijk is aan het vochtbergend vermogen, alle neerslag direct doorgevoerd worden naar de onverzadigde ondergrond. Als de actuele berging kleiner is dan het vochtbergend vermogen dan zal alle neerslag geborgen worden in de wortelzone. Het neerslagoverschot is dan gelijk aan nul.

Onverzadigde ondergrond

De vertraging en demping van het neerslagoverschot in de onverzadigde ondergrond wordt met een impuls-respons model benaderd. De impuls-respons functie wordt beschreven door de Pearson type III kansverdeling:

$$F(t) = \frac{a^n (t-b)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-a(t-b)} \qquad \text{voor } t > b$$

$$F(t) = 0 \qquad \text{voor } t < b \qquad (5\text{-}11)$$

met F = impuls-respons functie
t = tijd [d]
a, b en n = parameters voor Pearson type III kansverdeling

De impuls-respons functie beschrijft het verloop van de grondwateraanvulling op een bepaalde diepte. De invoer is het neerslagoverschot uit de wortelzone. De impuls-respons functie van een bepaalde dag wordt berekend door een aantal voorliggende tijdstappen (de aanloopperiode) te gebruiken. De bij de berekeningen gebruikte aanloopperiode is afhankelijk van de diepte en kan maximaal een lengte hebben van 4 jaren (1987-1990; inloopperiode paragraaf 5.2.3). Als de inloopperiode niet toereikend is dan kan MUNSFLOW de impuls-respons functie niet berekenen.
De waarden voor a, b en n in de impuls-respons functie (vergelijking 5-11) kunnen als volgt berekend worden:

$$a = \frac{1}{3}\frac{(k_1)^2}{k_0 h_1} \qquad b = \frac{1}{3}\frac{z}{k_1} \qquad n = \frac{2}{9}\frac{k_1}{k_0 h_1} z \qquad (5\text{-}12)$$

met k_1 = parameter voor de vertraging [cm/d]
$k_0 h_1$ = parameter voor de demping [cm^2/d]

Als de parameter voor de vertraging (k_1) groot is dan verplaatst de flux zich snel door de bodem. Als de parameter voor de demping ($k_0 h_1$) groot is dan worden pieken niet veel gedempt.

Nadat de impuls-respons functie bepaald is, wordt de grondwateraanvulling berekend uit het neerslagoverschot:

$$Q(t) = \sum_{\tau=1}^{i+1} q(t-\tau+1)F(\tau) \qquad \text{voor} \quad t > i \tag{5-13}$$

met Q = grondwateraanvulling [cm/d]
q = neerslagoverschot [cm/d]
τ = tijdstap impuls-respons functie [d]
i = aantal tijdstappen in de aanloopperiode [d]

De grondwateraanvulling op een tijdstip wordt berekend uit de som van het neerslagoverschot van een aantal tijdstappen vermenigvuldigd met de impuls-respons functie (5-13).

5.2.3 Invoer en uitvoer

Het programma MUNSFLOW gebruikt bij de simulatie algemene gegevens, meteorologische gegevens en gebiedsinformatie.

De algemene gegevens bestaan uit informatie over het aantal uniforme deelgebieden, het aantal weerstations en het aantal landgebruikscodes. Ook wordt het aantal dagen, waarover gesimuleerd moet worden en de inloopperiode ingevoerd. Gedurende de inloopperiode wordt geen uitvoer gegeven.

De meteorologische gegevens bestaat uit neerslag- en verdampingsgegevens [cm/dag]. De neerslag is geregistreerd op het neerslagstation Haesen. Voor berekeningen van het neerslagoverschot zijn de neerslaggegevens van 1991 tot en met 1994 gebruikt. Voor de verdamping is, net als in SWAP en NUT_DAY, de Makkink referentie gewasverdamping ingevoerd van distrikt 15 (KNMI 1987-1994). Voor het berekenen van de potentiële verdamping van een gewas moeten de gewasfactoren voor elke dag worden ingevoerd.

De gebiedinformatie bevat gegevens over het landgebruik, de gewasfactoren, het vochtbergend vermogen van de wortelzone, de dikte van de onverzadigde ondergrond en twee parameters die de demping en vertraging in de onverzadigde ondergrond bepalen. Het vochtbergend vermogen van de wortelzone is overgenomen uit het reservoirmodel NUT_DAY (zie bijlage C). De parameters voor demping en vertraging worden uit bodemfysische karakteristieken van de ondergrond berekend. De parameters worden bepaald voor een situatie met een gemiddelde grondwateraanvulling, met een bijbehorend gemiddeld vochtgehalte. De gemiddelde doorlatendheid, k_0 [cm/dag], wordt gelijkgesteld aan de gemiddelde grondwateraanvulling. Uit berekeningen met de doorlatendheidskarakteristiek van van Genuchten (vergelijkingen 4-4 en 4-5) volgt een gemiddelde drukhoogte h_0 [cm] die hoort bij k_0. De waarden van k_1 en h_1 worden numeriek benaderd door $h_0+\Delta h$ en $h_0-\Delta h$ in te vullen voor de drukhoogte. Bij deze twee drukhoogten wordt wederom het vochtgehalte θ [-] en de doorlatendheid k [cm/dag] bepaald. Vervolgens geldt voor $k_1=\Delta k/\Delta\theta$ [cm/d] en voor $h_1=\Delta h/\Delta\theta$ [cm]. Uit deze waarden kunnen de parameters voor demping (k_0h_1) en vertraging (k_1) bepaald worden (Zwamborn, 1995). MUNSFLOW gaat uit van een homogene ondergrond. Als

de Formaties van Gulpen en Vaals voorkomen in één profiel dan wordt voor beide parameters (demping en vertraging) een gewogen gemiddelde genomen.

De onverzadigde grondwaterstroming berekend met SWAP en MUNSFLOW worden vergeleken in hoofdstuk 6. Om deze vergelijking beter te kunnen maken wordt voor de simulatie van het neerslagoverschot altijd SWAP gebruikt. Het is mogelijk om alleen de vertraging en demping van het neerslagoverschot te berekenen met MUNSFLOW, hiervoor wordt het reservoirmodel in MUNSFLOW uitgeschakeld. Om het reservoirmodel uit te schakelen werd de waarde die bij de verdamping staat niet gebruikt, omdat de gewasfactor gelijk aan nul werd gesteld. Er zal daardoor niets verdampen uit het reservoir en het reservoir zal op veldcapaciteit blijven, zodat het neerslagoverschot direct doorgevoerd wordt naar de onverzadigde ondergrond. De invoer bestaat dan uit het neerslagoverschot, berekend met SWAP, in plaats van de werkelijke neerslag. De invoer zou eigenlijk moeten bestaan uit de flux direct onder de wortelzone. De flux die SWAP berekend is op deze diepte een deel van het jaar negatief (zie figuur 4.3) en hiermee kan MUNSFLOW niet rekenen. Daarom werd de flux op 3 m diepte gebruikt als invoer.
Voor de berekeningen in de onverzadigde ondergrond werd voor 1987 tot en met 1990 een gemiddelde waarde voor het neerslagoverschot ingevoerd. Deze periode is de inloopperiode. De gemiddelde waarde is berekend voor de jaren 1991 tot en met 1994. Aansluitend bevat het bestand voor 1991 tot en met 1994 het dagelijks neerslagoverschot, berekend met SWAP. Daarna werd een uitloopperiode ingevoerd van enkele jaren, waarin weer de gemiddelde waarde van het neerslagoverschot werd ingevoerd. Deze uitloopperiode geeft de mogelijkheid om een goed beeld te krijgen van de vertraging en demping.

5.2.4 Neerslagoverschot en grondwateraanvulling

De simulatie is uitgevoerd voor een aantal representatieve MUNSFLOW-eenheden (m1 en m3; zie bijlage A1). Het neerslagoverschot werd bepaald met behulp van het reservoirmodel voor de wortelzone. De vertraging en demping van het neerslagoverschot werd bepaald met de impuls-respons functie.

Neerslagoverschot
De simulatie is alleen uitgevoerd voor gras. De overige gewassen hebben een in de tijd wisselende gewasfactor en die moet voor elke dag van de simulatieperiode ingevoerd worden. Dit is tijdrovend werk en voor een vergelijking tussen verschillende modellen (hoofdstuk 6) niet direct noodzakelijk.

Tabel 5.5 geeft de termen van de waterbalans voor de twee MUNSFLOW-eenheden. Het is duidelijk dat het aantal termen van de waterbalans berekend door MUNSFLOW niet groot is. Net als bij NUT_DAY zijn alleen de neerslag (P), de actuele evapotranspiratie (ET_a) en het neerslagoverschot (q) berekend.

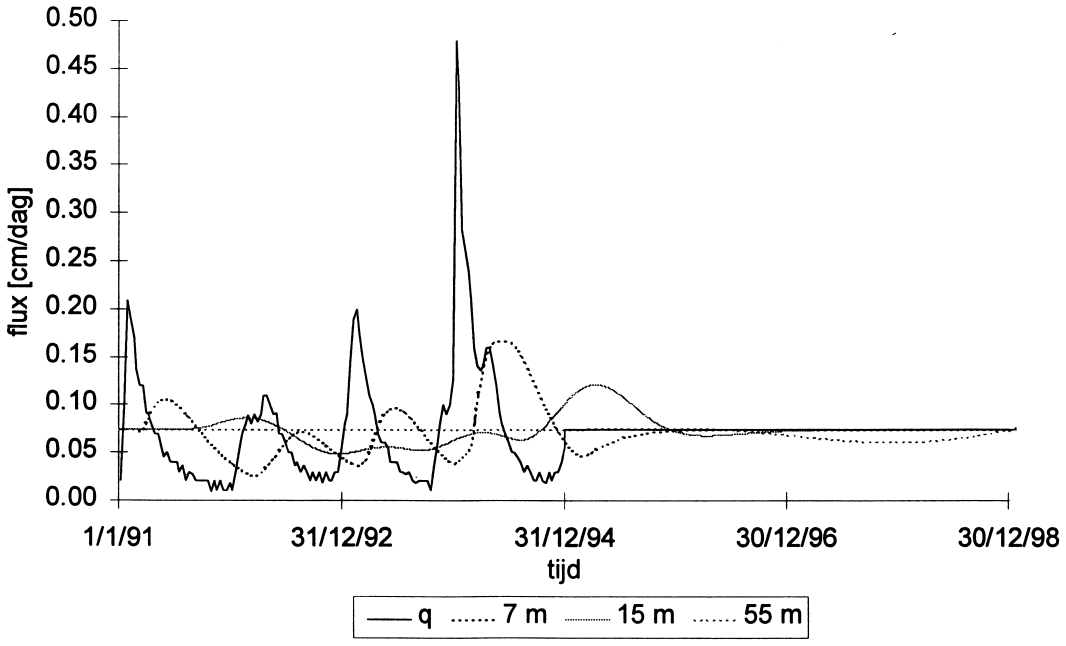
Net als bij de berekeningen met SWAP (paragraaf 4.4) en NUT_DAY (paragraaf 5.1.4) is het neerslagoverschot van een gewas op regoliet of beekdalopvulling groter (9 mm/jaar) dan het neerslagoverschot van eenzelfde gewas op löss.

Tabel 5.5: Waterbalans van de wortelzone voor twee MUNSFLOW-eenheden, in [mm].

MUNSFLOW-eenheid	jaar	P	ET_a	q
gras op löss (m1)	1991	704	424	280
	1992	815	489	326
	1993	915	425	490
	1994	820	405	415
			gem.	**378**
gras op regoliet/beekdal (m3)	1991	704	412	292
	1992	815	479	336
	1993	915	419	496
	1994	820	396	424
			gem.	**387**

De vergelijking tussen het berekende neerslagoverschot met MUNSFLOW en het berekende neerslagoverschot met SWAP en NUT_DAY komt in hoofdstuk 6 aan de orde.

Demping en vertraging van het neerslagoverschot; grondwateraanvulling
In de onverzadigde ondergrond spelen demping en vertraging van het neerslagoverschot een rol. Figuur 5.5 geeft de grondwateraanvulling op verschillende diepten. Op een diepte van 55 m blijkt de grondwateraanvulling gelijkmatig te verlopen over de gesimuleerde jaren; de demping is bijna volledig, pas in 1997 is de eerste reactie waar te nemen.



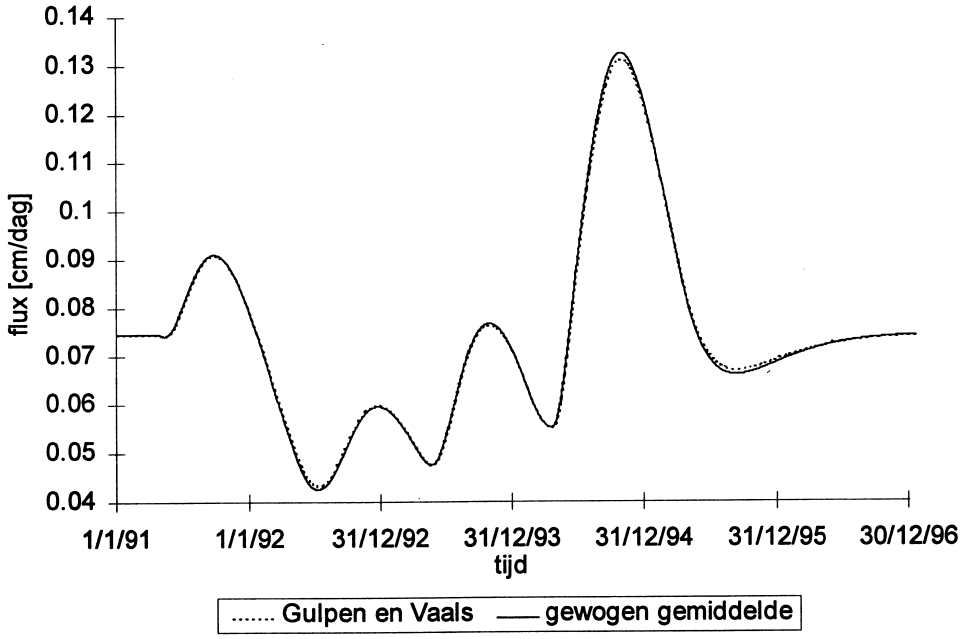
Figuur 5.5: Grondwateraanvulling op verschillende diepten, MUNSFLOW-deelgebied m1.

Het neerslagoverschot (q) is de flux op 3 m diepte, overgenomen uit de resultaten met SWAP. In de figuur is verder goed de reactietijd op verschillende diepten waar te nemen: zolang het neerslagoverschot van begin 1991 niet op een bepaalde diepte is aangekomen blijft de gemiddelde grondwateraanvulling (zie paragraaf 5.2.3) gehandhaafd. De grondwateraanvulling op 7 m diepte heeft een gemiddelde vertraging van ongeveer 4 maanden en de piekdemping is zo'n 70%. Op 15 m diepte is de gemiddelde vertraging al 15 maanden en de piekdemping is 80%

5.2.5 Gevoeligheidsanalyse

5.2.5.1 Heterogene ondergrond

Het programma MUNSFLOW gaat uit van een homogene onverzadigde ondergrond. Als de Formaties van Gulpen en Vaals voorkomen in één profiel dan is voor de dempingsparameter k_0h_1 en de vertragingsparameter k_1 een gewogen gemiddelde van de hydraulische parameters van beide formaties ingevoerd. De gevoeligheid van dit gewogen gemiddelde is getoetst door de twee verschillende formaties apart door te rekenen. De uitvoer van de bovenste laag (Formatie van Gulpen) is als invoer gebruikt voor de onderliggende laag (Formatie van Vaals). De uitkomst van deze berekening werd vergeleken met de gewogen gemiddelde vertragings- en dempingsparameters (figuur 5.6).

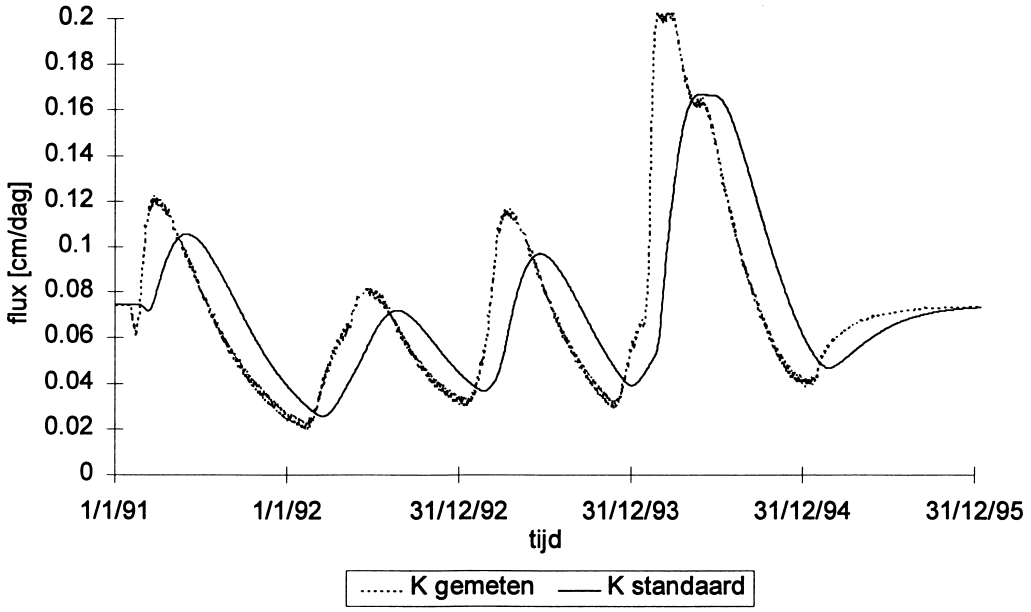


Figuur 5.6: Grondwateraanvulling op 10 m diepte voor twee methoden om de dempings- en vertragingsparameters vast te stellen.

In de figuur is de grondwateraanvulling (flux) op een diepte van 10 m te zien. Het verloop van de grondwateraanvullingen is praktisch gelijk. Dit betekent dat er goed met een gewogen gemiddelde van de vertragings- en dempingsparameters gerekend kan worden voor simulaties met een heterogene ondergrond.

5.2.5.2 Verzadigde doorlatendheid

De parameters voor demping en vertraging werden vastgesteld met behulp van bodemfysische karakteristieken (zie vergelijkingen 4-4 en 4-5 in paragraaf 4.2). Eén van deze parameters is de verzadigde doorlatendheid. Deze werd vervolgens gebruikt om de dempings- en vertragingsparameters (zie paragraaf 5.2.3) te bepalen. Voor de verzadigde doorlatendheid van de Formaties van Gulpen en Vaals zijn de gemeten waarden in het gebied (zie tabel 4.4, paragraaf 4.5.4) gebruikt.



Figuur 5.7: Grondwateraanvulling op 7 m diepte bij verschillende verzadigde doorlatendheden voor de Formatie van Gulpen, MUNSFLOW-eenheid m1.

Figuur 5.7 laat duidelijk een verschil in vertraging en demping zien van het neerslagoverschot in de Formatie van Gulpen als de grondwateraanvulling (flux) op 7 m diepte wordt bekeken. Dit betekent een 4 m dik pakket van de Formatie van Gulpen met daarboven 3 m löss (MUNSFLOW-eenheid m1). Het verschil in vertraging is 2 maanden en de piekdemping is ongeveer 20% kleiner. Als de grondwateraanvulling op grotere diepte wordt bekeken dan is het verschil in vertraging en demping groter.
Het verschil in vertraging en demping van het neerslagoverschot in de Formatie van Vaals is vergelijkbaar met het beeld voor de Formatie van Gulpen (figuur 5.7). Het verschil in vertraging en demping van het neerslagoverschot is op een diepte van 7 m bekeken. Dit betekent een 4 m dik pakket van de Formatie van Vaals met daarboven 3 m löss (geen MUNSFLOW-eenheid). Het verschil in vertraging is 4 maanden en het verschil in piekdemping is ongeveer 30%.
Het aanpassen van de verzadigde doorlatendheid kan nuttig zijn bij de calibratie van het model, omdat hiermee de vertraging en demping bijgesteld kunnen worden.

5.3 Transferfunctie

5.3.1 Beschrijving

De transferfunctie is een wiskundige vergelijking die gebruikt kan worden om de vertraging en demping van het neerslagoverschot te berekenen. Het programma MOV3_AV berekent de grondwateraanvulling uit een tijdreeks van het neerslagoverschot. Er worden twee parameters ingevoerd die de vertraging en demping simuleren (van Lanen et al., 1996).

De programmacode van het programma MOV2_AV is in het kader van dit onderzoek aangepast naar MOV3_AV. Het programma heeft nu de gewenste invoer en uitvoer en is geschikt voor simulaties in het Noordal.

5.3.2 Achtergrond

De vertraging en demping in de onverzadigde ondergrond wordt gesimuleerd met een transferfunctie. Met deze transferfunctie wordt de grondwateraanvulling berekend uit het neerslagoverschot.
De grondwateraanvulling wordt berekend met een eenvoudige wiskundige formule:

$$Q(t) = \sum_{i=t-t_d-t_a+1}^{i=t-t_d} \frac{q(i)}{t_a} \qquad (5\text{-}14)$$

met Q = grondwateraanvulling [cm/d]
q = neerslagoverschot [cm/d]
t = tijd [d]
t_d = parameter voor vertraging [-]
t_a = parameter voor demping [-]

Met bovenstaande vergelijking wordt de grondwateraanvulling berekend als een voortschrijdend gemiddelde van een aantal dagen (t_a dagen) met als laatste dag t-t_d. Bovendien is de grondwateraanvulling verschoven met t_d dagen.

5.3.3 Invoer en uitvoer

De programma heeft voor het berekenen van de grondwateraanvulling een beperkt aantal invoergegevens nodig: een tijdreeks van het neerslagoverschot en de parameters voor demping en vertraging (t_a en t_d).

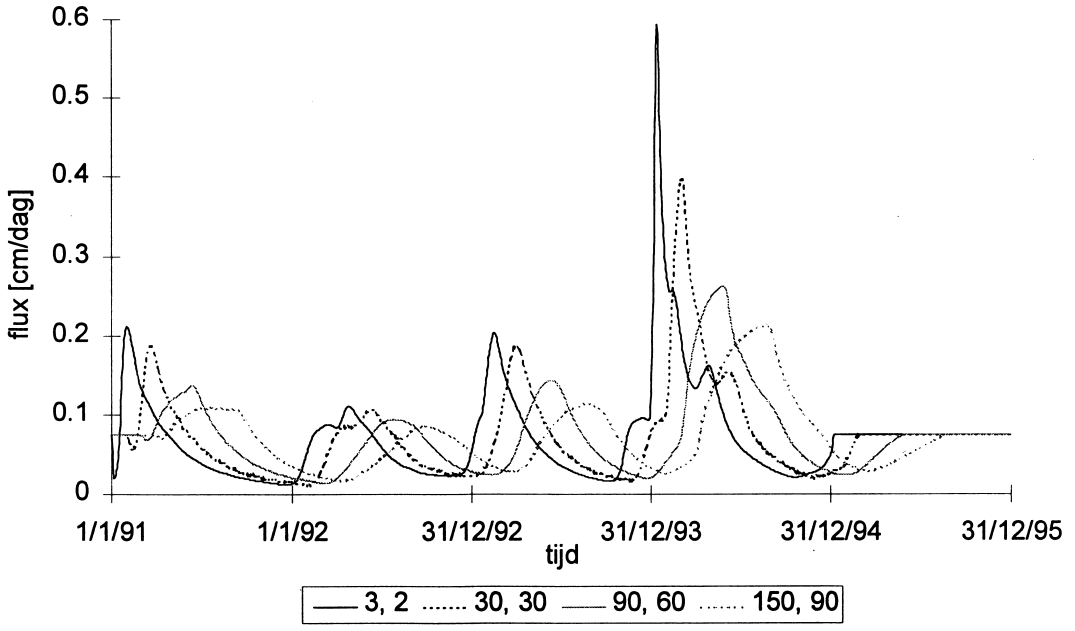
Voor de berekening van de vertraging en demping in de onverzadigde ondergrond werd het neerslagoverschot [cm/dag] ingevoerd. Voor 1990 is een gemiddelde waarde van het neerslagoverschot ingevoerd (inloopperiode). Deze gemiddelde waarde is berekend uit de jaren 1991 tot en met 1994. Aansluitend bevat het bestand voor 1991 tot en met 1994 het dagelijks neerslagoverschot berekent met SWAP. De invoer zou gelijk moeten zijn aan de flux direct onder de wortelzone, maar de flux die SWAP berekend, is op deze diepte en deel van het jaar negatief (zie figuur 4.3). De transferfunctie kan hiermee, in tegenstelling tot MUNSFLOW, wel rekenen. Om echter geen negatieve grondwateraanvulling te krijgen, moet een veel te grote demping ingevoerd worden. Daarom wordt eveneens de flux op 3 m diepte gebruikt als invoer voor de transferfunctie. Tenslotte bevat het bestand een uitloopperiode van 1 jaar, waarin weer de gemiddelde waarde van het neerslagoverschot wordt opgegeven. Deze uitloopperiode geeft de mogelijkheid om een goed beeld te krijgen van de vertraging en demping.

De parameter voor de vertraging wordt gegeven door het aantal dagen op te geven voordat een reactie van het neerslagoverschot bij de grondwaterspiegel is te zien. Deze parameter houdt een aantal dagen verschuiving in (zie vergelijking 5-14). De parameter voor de demping wordt bepaald door een voortschrijdend gemiddelde te hanteren. Beide parameters moeten door middel van calibratie bepaald worden. Hierbij kunnen gemeten grondwaterstanden of gevalideerde verzadigde grondwatermodellen gebruikt worden.

De uitvoer van de transferfunctie is de grondwateraanvulling, waarbij de eerste dag gelijk is aan 1 januari 1991.

5.3.4 Grondwateraanvulling

In figuur 5.8 wordt de grondwateraanvulling voor verschillende waarden van de parameters voor demping en vertraging gegeven voor een bepaalde transfer-eenheid (t1; zie bijlage A1). Het is mogelijk om voor de parameters elke willekeurige waarde in te voeren. Figuur 5.8 laat de resultaten van de simulatie zien met enkele arbitrair gekozen parameters.



Figuur 5.8: Grondwateraanvulling voor verschillende waarden van de parameter voor de demping (eerste getal) en vertraging (tweede getal), transfer-eenheid t1.

In figuur 5.8 is de grondwateraanvulling voor vier verschillende situaties gegeven. De variant 3, 2 laat de grondwateraanvulling zien voor een parameter voor de demping die gelijk is aan 3 en een parameter voor de vertraging die gelijk is aan 2. Dit betekent een simulatie met een voortschrijdend gemiddelde van 3 dagen en een verschuiving van 2 dagen. Uit de figuur blijkt dat elke vertraging gerealiseerd kan worden. Er zijn geen fysische beperkingen. De piekdemping is afhankelijk van het aantal dagen waarover een voortschrijdend gemiddeld wordt berekend. Op deze manier worden pieken gedempt. Het verschil in piekdemping tussen een voortschrijdend gemiddelde van 3 dagen en 30 dagen is gemiddeld 8% voor de eerste drie pieken in figuur 5.8 en 48% voor de laatste piek in figuur 5.8.
De vertraging wordt bepaald door het aantal dagen verschuiving, waardoor een hoge piek evenveel vertraging ondervindt dan een lage piek. De parameters voor demping en vertraging kunnen onafhankelijk van elkaar worden bepaald. Dit betekent dat een calibratie met behulp van gemeten grondwaterstanden flexibiliteit kent. De gewenste demping en vertraging kunnen vaak gerealiseerd worden.

6. Vergelijking onverzadigde grondwatermodellen

6.1 Methode

De onverzadigde grondwatermodellen, die in de voorgaande twee hoofdstukken zijn besproken, worden in dit hoofdstuk met elkaar vergeleken. Deze vergelijking is nodig om het beste model of de beste combinatie van modellen te kiezen om de grondwateraanvulling in het Noordal te berekenen. De berekende grondwateraanvulling zal als bovenrandvoorwaarde worden gebruikt in het verzadigd grondwatermodel in MODFLOW (hoofdstuk 7).

De uitkomsten van het agrohydrologisch model SWAP worden als referentie gebruikt bij de vergelijking van de verschillende modellen, omdat het model SWAP het meest gedetailleerd het watertransport beschrijft. Bij de vergelijking wordt gekeken naar de modeluitkomsten en de modelconcepten. Ook de invoer en de resultaten van de gevoeligheidsanalyse spelen een rol bij de keuze van een model of modelcombinatie. Bij de modelconcepten spelen de mate waarin de fysische procesbeschrijving aansluit bij de werkelijkheid ook een rol. Voor de wortelzone wordt de waterbalans en met name het neerslagoverschot vergeleken. Voor de onverzadigde ondergrond wordt de vertraging en demping van het neerslagoverschot vergeleken.

6.2 Wortelzone

Voor de wortelzone zijn drie verschillende modellen gebruikt om het neerslagoverschot te simuleren. Als eerste is het agrohydrologisch model SWAP gebruikt, vervolgens het reservoirmodel NUT_DAY en het eenvoudige reservoir in het programma MUNSFLOW.

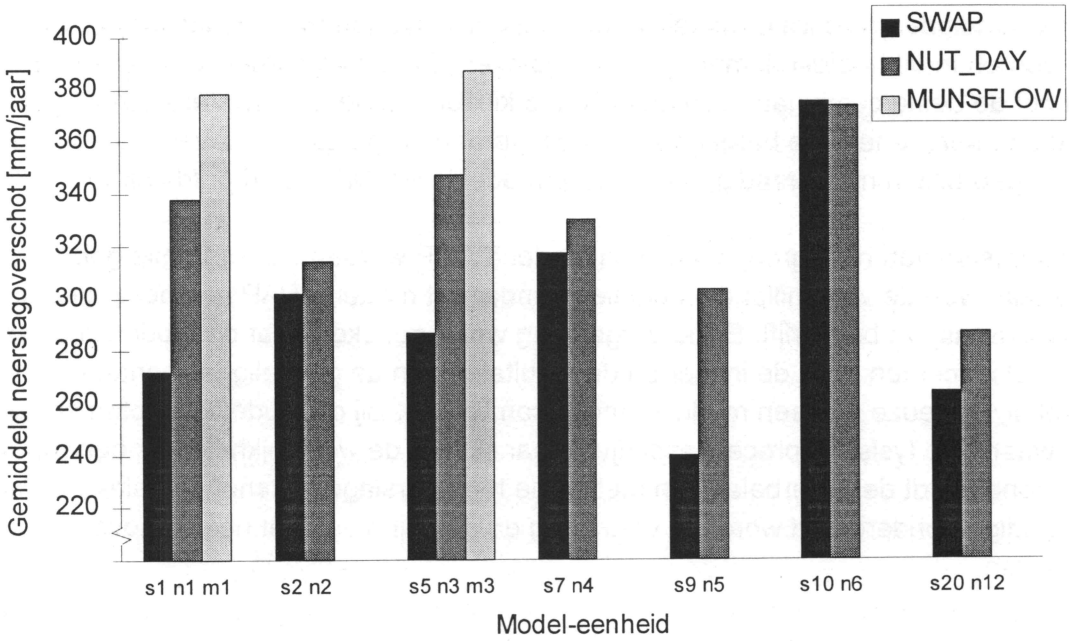
Modelresultaten; neerslagoverschot
In tabel 6.1 en figuur 6.1 wordt het neerslagoverschot [mm/jaar] berekend door de verschillende modellen weergegeven. Het berekende gemiddelde neerslagoverschot van beide reservoirmodellen wordt vergeleken met het berekende neerslagoverschot van het agrohydrologisch model SWAP. In de figuur en tabel worden alleen de representatieve eenheden weergegeven.

Tabel 6.1: Gemiddeld neerslagoverschot [mm/jaar] (1991-1994) van de representatieve eenheden en het procentueel verschil ten opzichte van SWAP.

Eenheden	SWAP	NUT_DAY	verschil	MUNSFLOW	verschil
gras op löss (s1 n1 m1)	272	338	24%	378	39%
maïs op löss (s2 n2)	302	314	4%	-	-
gras op regoliet/beekdal (s5 n3 m3)	287	347	21%	387	35%
maïs op regoliet (s7 n4)	317	330	4%	-	-
loofbos op regoliet (s9 n5)	240	303	26%	-	-
graan op regoliet/beekdal (s10 n6)	375	373	1%	-	-
loofbos op beekdal met gws (s20 n12)	264	287	9%	-	-

De tabel laat zien dat het verschil tussen het reservoirmodel NUT_DAY en het reservoirmodel in MUNSFLOW aanzienlijk is. Het reservoirmodel NUT_DAY geeft duidelijk een beter

resultaat dan het reservoirmodel in MUNSFLOW. Het hogere neerslagoverschot berekend met MUNSFLOW wordt veroorzaakt door een kleinere actuele verdamping (ET_a). De actuele verdamping is kleiner door de sterk vereenvoudigde relatie die de reductie van het potentiële verdamping beschrijft (figuur 5.4).



Figuur 6.1: Gemiddeld neerslagoverschot van een aantal eenheden (in tabel 6.1 wordt het landgebruik en het bodemtype van de verschillende eenheden weergegeven).

In figuur 6.1 is goed te zien dat de gemiddelde neerslagoverschotten van de representatieve eenheden berekend met beide reservoirmodellen systematisch hoger liggen dan de gemiddelde neerslagoverschotten berekend met het agrohydrologisch model SWAP.

Het verschil tussen NUT_DAY en SWAP is grotendeels te verklaren uit het feit dat SWAP wel rekening houdt met interceptie van het gewas en NUT_DAY niet. NUT_DAY berekent wel een hogere evapotranspiratie, waardoor het uiteindelijke verschil in neerslagoverschot kleiner is. Dit is af te leiden uit de tabellen 4.1 en 5.1, die de resultaten van de waterbalans geven voor respectievelijk SWAP en NUT_DAY.

Modelconcepten

Bij het gebruik van de verschillende modellen worden verschillende concepten gevolgd, die meer of minder gegevens nodig hebben.

Het agrohydrologisch model SWAP gebruikt veel invoergegevens om het neerslagoverschot te berekenen. Het model is veelzijdig en houdt rekening met een groot aantal factoren die de interactie tussen bodem, plant en atmosfeer bepalen. Het model SWAP kan met verschillende methoden het neerslagoverschot bepalen. De gebruiker moet een keuze maken. Door de grote verscheidenheid zijn veel invoergegevens nodig. Een voorbeeld is de verdamping (zie paragraaf 4.3). Bij de simulaties wordt niet alleen het gevraagde neerslagoverschot bepaald, maar onder andere ook de gewasopbrengst. De gewasopbrengst is in het kader van dit onderzoek niet interessant, maar de gegevens voor de berekening ervan moeten wel ingevoerd worden. De veelzijdigheid van SWAP heeft dus als nadeel dat er veel gegevens ingevoerd moeten worden, die voor een deel niet relevant zijn voor dit onderzoek.

Het reservoirmodel NUT_DAY gebruikt minder invoergegevens. Vooral het aantal gewasgegevens is beperkt. Enkele gewasgegevens, zoals het groeiseizoen en de gewasontwikkeling, zijn verwerkt in de gewasfactoren. De drukhoogten voor wateropname van een gewas (zie paragraaf 5.1.2) zijn verwerkt in de bodemfysische gegevens. Hierbij moet opgemerkt worden dat de gebruiker zelf het vochtgehalte bij de verschillende drukhoogten moet berekenen voordat de juiste gegevens ingevoerd kunnen worden (zie paragraaf 5.1.3).
Het reservoirmodel in MUNSFLOW gebruikt ook minder invoergegevens dan SWAP. De gebruiker kan, net als in NUT_DAY, wel enkele gewasgegevens verwerken in de invoer. Het vochtbergend vermogen van de wortelzone moet door de gebruiker bepaald worden (zie paragraaf 5.2.3) en hierin zijn de drukhoogten voor wateropname van een specifiek gewas verwerkt (veldcapaciteit en verwelkingspunt). Voor het onderzoek kon het vochtbergend vermogen dat met het reservoirmodel NUT_DAY berekend was, in MUNSFLOW worden ingevoerd. De gebruiker moet zelf veel berekeningen uitvoeren als het vochtbergend vermogen nog niet bekend is.

Als naar het concept wordt gekeken dan is het duidelijk dat het agrohydrologisch model SWAP, vooral voor de wortelzone, het fysisch proces zodanig beschrijft dat het goed aansluit bij de werkelijkheid. De belangrijkste verschillen tussen de modellen worden hieronder behandeld.
Het agrohydrologisch model SWAP berekent de verdamping van interceptiewater van het gewas. Beide reservoirmodellen bevatten geen interceptieformule. Vooral loofbos kent een relatief grote interceptie. De interceptieformule in SWAP moest voor loofbos wel aangepast worden om de gewenste interceptie te bereiken (zie paragraaf 4.4).
Grote verschillen zijn er bij de wijze waarop de actuele evapotranspiratie wordt berekend. SWAP maakt onderscheid in de evaporatie en de transpiratie, terwijl de reservoirmodellen alleen de evapotranspiratie bepalen. Dit zijn verschillende concepten, die moeilijk met elkaar te vergelijken zijn. Een aparte berekening van evaporatie en transpiratie is beter te controleren en bij te stellen.
In de modellen wordt bij de berekening van de actuele transpiratie (SWAP) en actuele evapotranspiratie (reservoirmodellen) rekening gehouden met het vochtgehalte van de wortelzone. Bij de beschrijving van de verschillende modellen in hoofdstuk 4 en 5 is te zien dat de actuele (evapo)transpiratie op verschillende manieren afhankelijk is van het vochtgehalte (figuren 4.1, 5.2 en 5.4). SWAP kan de transpiratie reduceren als de bodem te nat of te droog wordt. NUT_DAY kan de evapotranspiratie alleen reduceren als te droge omstandigheden voorkomen. MUNSFLOW gaat de potentiële verdamping al lineair reduceren als het vochtgehalte in de wortelzone lager wordt dan veldcapaciteit. Uit literatuur blijkt dat deze aanname een te sterke vereenvoudiging inhoudt. De wateropname capaciteit van de wortels wordt beïnvloed door de verschillende reductie concepten voor potentiële verdamping en hierin vereenvoudigd het reservoirmodel in MUNSFLOW teveel.
Beide reservoirmodellen beschouwen de wortelzone als één geheel, terwijl in SWAP de wortelzone is opdeeld in verschillende compartimenten. Dit betekent dat als één compartiment te droog of te nat is dan wordt de actuele transpiratie al verlaagd (zie vergelijking 4-10). De wortels in de andere compartimenten gaan dan niet meer water onttrekken om toch aan de transpiratie vraag te voldoen. De reservoirmodellen kunnen zolang er genoeg water in het reservoir aanwezig is voldoen aan de transpiratie vraag.
Het agrohydrologisch model SWAP kan water capillair naleveren vanuit de onverzadigde ondergrond naar de wortelzone. De reservoirmodellen kunnen dit niet. Dit houdt in dat ze alleen maar geschikt zijn voor gebieden met diepe grondwaterstanden of zeer ondiepe

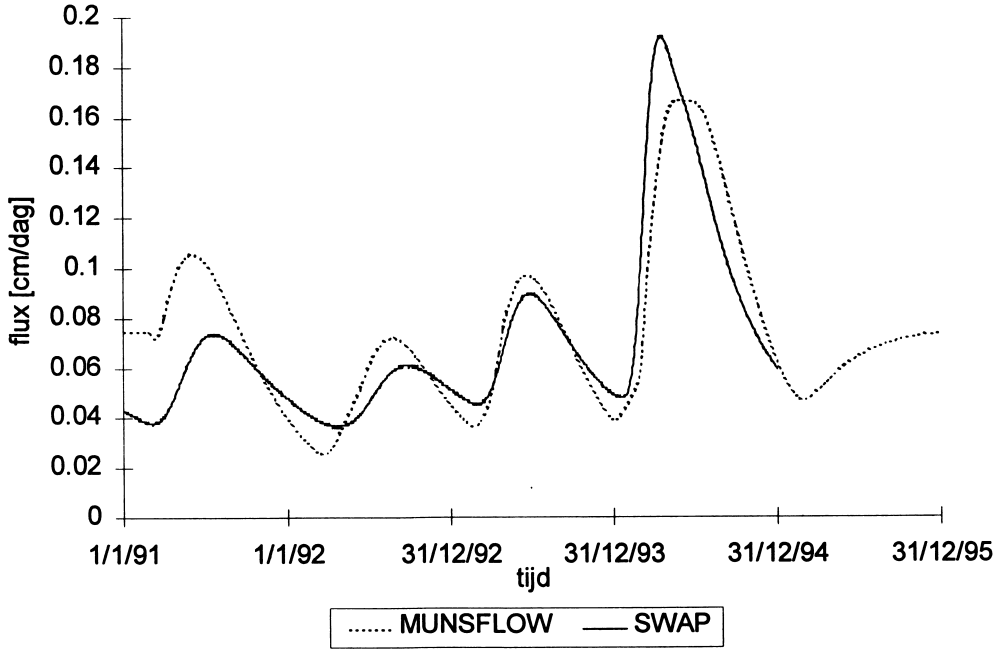
grondwaterstanden. Bij de diepe grondwaterstanden blijkt dan nog dat je rekening moet houden met het opwaartse vochttransport vanuit de onverzadigde ondergrond (zie paragraaf 4.4).

Er kan geconcludeerd worden dat voor de wortelzone het agrohydrologisch model SWAP conceptueel het beste in elkaar zit. Bovendien laat het berekende neerslagoverschot geloofwaardige waarden zien. Voor de berekening van het neerslagoverschot uit de wortelzone is dus bovengenoemd model, als beste model gekozen.

6.3 Onverzadigde ondergrond

Voor de berekening van de vertraging en demping van het neerslagoverschot in de onverzadigde ondergrond is gebruik gemaakt van drie modellen. Als eerste is het agrohydrologisch model SWAP gebruikt, vervolgens het programma MUNSFLOW en als laatste een transferfunctie. Om de verschillende modellen goed te kunnen vergelijken, is bij de berekening steeds het agrohydrologisch model SWAP voor de wortelzone gebruikt om het neerslagoverschot te berekenen.

Modelresultaten; grondwateraanvulling
In figuur 6.2 is het verschil tussen SWAP en MUNSFLOW te zien. De figuur laat de grondwateraanvulling op 7 m diepte zien van SWAP-eenheid s1 en MUNSFLOW-eenheid m1. Duidelijk is dat de grondwateraanvulling van SWAP en MUNSFLOW voor deze eenheid heel dicht bij elkaar liggen. Vergelijking van andere model-eenheden laten een vergelijkbaar beeld zien. Op grotere diepte is het neerslagoverschot veel meer gedempt en vertraagd dan op 7 m diepte (figuur 6.2).



Figuur 6.2: Grondwateraanvulling op 7 m diepte, bepaald met MUNSFLOW en SWAP.

De eerste piek in de grondwateraanvulling (halverwege 1991) is erg verschillend, dit wordt

veroorzaakt door verschillende modelinvoer. Met SWAP werden de jaren 1987 tot en met 1990 gebruikt om de beginvoorwaarde op 1 januari 1991 vast te stellen, terwijl bij MUNSFLOW het gemiddelde van 1991 tot en met 1994 gebruikt werd om de beginvoorwaarde vast te stellen.

Modelconcepten

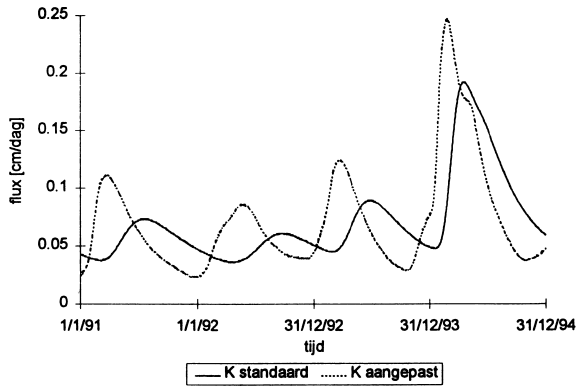
Voor de berekening van de stroming in de onverzadigde ondergrond gebruikt SWAP als invoer de bodemfysische eigenschappen en het neerslagoverschot. De onverzadigde grondwaterstroming in de ondergrond kan in SWAP echter niet eenvoudig zonder wortelzone gesimuleerd worden.
De onverzadigde grondwaterstroming in de onverzadigde ondergrond kan in MUNSFLOW wel zonder wortelzone gesimuleerd worden (zie paragraaf 5.2.3). Het programma gebruikt als invoer voor de stroming in de onverzadigde ondergrond twee parameters, één voor de demping en één voor de vertraging. Deze parameters moeten door de gebruiker zelf worden berekend uit bodemfysische eigenschappen en vervolgens in het model worden ingevoerd. Hierbij gaat MUNSFLOW uit van een situatie met een gemiddelde grondwateraanvulling (zie paragraaf 5.2.3). Hiermee worden gemakkelijk fouten in het model geïntroduceerd (Zwamborn, 1995). MUNSFLOW kent als nadeel dat geen negatieve fluxen uit de wortelzone kunnen worden ingevoerd. In het geval van capillaire nalevering kan de flux direct onder de wortelzone niet als invoer worden gebruikt (zie paragraaf 5.2.3).
De transferfunctie gebruikt voor de beschrijving van de demping en vertraging in de onverzadigde ondergrond ook twee parameters, die alle mogelijke waarden kunnen aannemen. Bovendien zit in deze transferfunctie niet de diepte als variabele, zodat voor eenzelfde profiel met verschillende grondwaterstanden verschillende parameters ingevoerd moeten worden. Deze parameters moeten elke keer weer empirisch worden vastgesteld. In de transferfunctie kunnen wel negatieve fluxen worden ingevoerd, maar om dan geen negatieve grondwateraanvulling te krijgen moet wel een grote demping worden ingevoerd.

De modelconcepten zijn zeer verschillend. SWAP gebruikt de Richards vergelijking voor de beschrijving van de onverzadigde grondwaterstroming. De bodemfysische eigenschappen worden rechtstreeks in de vergelijking gebruikt. Bovendien worden de variabele vochtgehalten (in de diepte en tijd) in de grond meegenomen bij de berekening van de onverzadigde grondwaterstroming (zie vergelijking 4-3).
Het programma MUNSFLOW maakt gebruik van een impuls-respons functie met een fysische achtergrond. Deze impuls-respons functie wordt bepaald met parameters voor demping en vertraging en deze moeten worden berekend met bodemfysische gegevens. Daarbij wordt uitgegaan van een gemiddeld vochtgehalte (in de diepte en tijd) (zie paragraaf 5.2.3).
De transferfunctie, die in paragraaf 5.3 is beschreven, kent geen enkele fysische achtergrond en is puur wiskundig (signaalvervormer). Alle gewenste parameters voor demping en vertraging kunnen worden ingevoerd. Op deze manier lijkt altijd een goede vertraging en demping mogelijk. Het is echter wel zo dat een grote flux evenveel vertraging ondervindt als een kleine flux. In de praktijk zal een grote flux altijd minder vertraging ondervinden. Deze transferfunctie is conceptueel zo zwak dat gebruik van dit model voor de onverzadigde ondergrond afvalt. De transferfunctie wordt dus niet in de vergelijking betrokken.

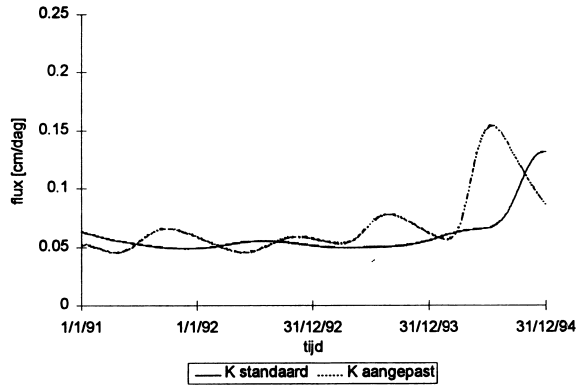
De conclusie is dat zowel SWAP als MUNSFLOW de vertraging en demping in de onverzadigde ondergrond goed lijken te beschrijven. Bij vergelijking van de modelconcepten blijkt het

agrohydrologisch model SWAP ook voor de berekeningen in de onverzadigde ondergrond conceptueel het beste model.

Uit gemeten grondwaterstanden blijkt dat de door SWAP berekende demping en vertraging te groot zijn. De demping en vertraging van het neerslagoverschot in de onverzadigde ondergrond is in SWAP verkleind door de verzadigde doorlatendheden van de verschillende lagen aan te passen. Bij de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.5.4 is gebleken dat een vergroting van de verzadigde doorlatendheid van de Formaties van Gulpen en Vaals een verkleining van de vertraging en demping tot gevolg heeft. De op fysische gronden maximale verzadigde doorlatendheid van beide formaties is daarbij gebruikt. De verzadigde doorlatendheden van de löss-, regoliet- en beekdalondergronden zijn op fysische gronden vergroot naar 100 cm/dag. Figuren 6.3 en 6.4 laten het verschil in temporele grondwateraanvulling zien op 7 en 15 m diepte, van SWAP-eenheid s1, tussen de standaard simulatie en de simulatie met aangepaste verzadigde doorlatendheden. Uit de figuren blijkt dat de demping en vertraging inderdaad minder groot zijn.



Figuur 6.3: Grondwateraanvulling op 7 m diepte met aangepaste verzadigde doorlatendheid.



Figuur 6.4: Grondwateraanvulling op 15 m diepte met aangepaste verzadigde doorlatendheid.

Het agrohydrologisch model SWAP werd met aangepaste verzadigde doorlatendheden voor de berekeningen in de onverzadigde ondergrond gebruikt. De met SWAP berekende grondwateraanvulling wordt in hoofdstuk 7 als bovenrandvoorwaarde van modelvariant 'SWAP' gebruikt bij de berekening van de verzadigde grondwaterstroming in MODFLOW.

Uit de resultaten van de gevoeligheidsanalyse blijkt dat ook het bodemtype en de onderrandvoorwaarde een kleinere vertraging en demping van het neerslagoverschot tot gevolg hebben. Bovendien kan de dikte van de löss, het regoliet en de beekdalopvulling een rol spelen.

7. Verzadigd grondwatermodel MODFLOW

7.1 Inleiding

De grondwateraanvulling berekent met SWAP is niet op een praktische manier direct te toetsen in het stroomgebied van de Noor. Toetsing met behulp van gemeten grondwaterstanden is mogelijk. De grondwaterstanden zijn echter niet alleen afhankelijk van de grondwateraanvulling maar ook van de stroming door de verzadigde zone. Een toetsingsmogelijkheid, waarbij ook rekening wordt gehouden met de verzadigde grondwaterstroming, is gebruik te maken van het het verzadigd grondwatermodel in MODFLOW. De bovenrandvoorwaarde van het model is de grondwateraanvulling die met SWAP is berekend. De berekende stijghoogten worden vergeleken met de gemeten stijghoogten van enkele peilbuizen. Het model wordt op deze wijze als gereedschap gebruikt om de grondwateraanvulling te toetsen. Het model zal niet opnieuw gecalibreerd worden.

Het verzadigd grondwatermodel MODFLOW is een modulair, drie-dimensionaal eindige differentie verzadigd grondwaterstomingsmodel. MODFLOW kan zowel stationaire als niet-stationaire grondwaterstroming simuleren in freatische, semi-gespannen en gespannen watervoerende paketten. MODFLOW is ontwikkeld door de U.S. Geological Survey (McDonald en Harbaugh, 1988).

De Engineering Computer Graphics Laboratory of Brigham Young University heeft het programma Groundwater Modeling System (GMS) ontwikkeld. GMS is een grafische schil voor het invoeren, bewerken en presenteren van invoer en uitvoer van onder andere MODFLOW. De simulatie van de verzadigde grondwaterstroming wordt door het programma MODFLOW uitgevoerd. GMS biedt vele mogelijkheden, een uitgebreide beschrijving is te vinden in de GMS tutorial (Brigham Young University, 1995).

7.2 Modelachtergronden

In deze paragraaf worden de achtergronden van MODFLOW behandeld. Aan de orde komen de grondwaterstroming, de grondwateraanvulling en de schematisatie, omdat deze in het kader van dit onderzoek belangrijk zijn. Uitgebreide informatie is te vinden in de MODFLOW handleiding (McDonald en Harbaugh, 1988).

Grondwaterstroming
De verzadigde grondwaterstroming in MODFLOW wordt beschreven met twee vergelijkingen; de wet van Darcy en de continuïteitsvergelijking. Hierdoor ontstaat de volgende differentiaalvergelijking:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) + Q(t) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (7\text{-}1)$$

met k_x, k_y, k_z = hydraulische doorlatendheid in x-, y- en z-richting [m/d]
h = stijghoogte [m]

Q	= debiet per eenheid volume (voeding of onttrekking) [1/d]
S_s	= specifieke bergingscoëfficiënt [1/m]
t	= tijd [d]

Bovenstaande vergelijking wordt met MODFLOW numeriek opgelost met de eindige differentiemethode. Voor deze berekeningen is discretisatie van het onderzoeksgebied noodzakelijk. De differentiaalvergelijking (7-1) wordt vervangen door een differentievergelijking voor elk knooppunt. Voor elke actieve cel in het netwerk wordt een dergelijke vergelijking opgesteld, zodat een stelsel ontstaat van n vergelijkingen en n onbekenden (de stijghoogten op n knooppunten). Dit stelsel van vergelijkingen wordt iteratief opgelost volgens de matrix:

$$[A](h) = (q) + (r) \qquad (7\text{-}2)$$

met	A	= matrix van de constante coëfficiënten uit linkerlid van vergelijking 7-1
	h	= vector van de onbekende h waarden
	q	= vector waarin de randvoorwaarden en bergingstermen zijn vastgelegd
	r	= restvector

De restvector is gelijk aan de afbreekfout, deze neemt door het itereren af. Het itereren wordt gestopt als de restvector onder een vooraf opgegeven waarde komt.

Grondwateraanvulling

In MODFLOW kunnen cellen droogvallen en daarom kan de grondwateraanvulling niet zomaar aan de bovenste cel worden toegekend. De grondwateraanvulling van elke rastercel wordt in MODFLOW toegekend aan de bovenste actieve (verzadigde) cel. De grondwateraanvulling voor een bepaalde tijdstap wordt in MODFLOW als volgt berekend:

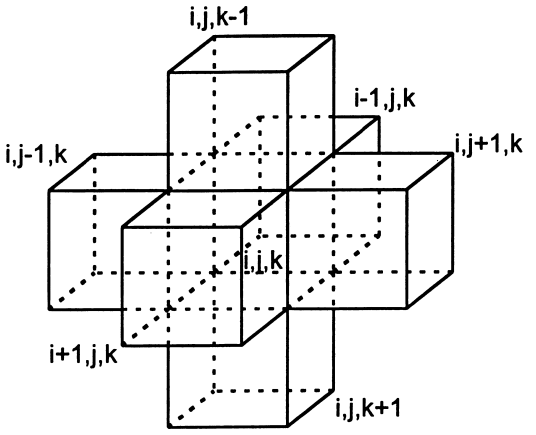
$$Q_{i,j}(t) = I_{i,j}(t)\Delta r_j \Delta c_i \qquad (7\text{-}3)$$

met	$Q_{i,j}$	= grondwateraanvulling in cel i,j [m^3/d]
	$I_{i,j}$	= grondwateraanvulling (waterschijf) in cel i,j [m/d]
	Δr_j	= hoogte van een cel i,j [m]
	Δc_i	= breedte van een cel i,j [m]

Schematisatie

Het model in MODFLOW werkt met een raster. Het raster is opgebouwd uit een netwerk van rechthoeken; het zogenaamde modelraster. Dit raster heeft een derde dimensie (diepte), waardoor cellen ontstaan (figuur 7.1).

Het modelraster is reeds gebruikt bij de horizontale schematisatie in paragraaf 3.3. Over het modelgebied ligt een raster van 47 * 71 cellen (zie bijlage A2). In het modelraster ligt het stroomgebied van de Noor. Cellen die buiten het stroomgebied vallen zijn niet actief en worden bij de berekeningen ook niet meegenomen. Het model onderscheidt 4 lagen met cellen die de bodemopbouw beschrijven (Kroon en Weerts, 1995). Voor elke laag is aangegeven of het om een freatisch of gespannen watervoerend pakket gaat. Cellen in het freatisch pakket kunnen onverzadigd raken en worden dan door MODFLOW dan als niet-actief gezien. Deze cellen doen dan namelijk niet mee met de verzadigde grondwaterstroming.



Figuur 7.1: Cel i,j,k met omringende cellen, blokstructuur in MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988).

Het stroomgebied van de Noor is reeds gemodelleerd door Kroon en Weerts (1995). Zij hadden de grondwateraanvulling berekend met het reservoirmodel NUT_DAY en de transferfunctie. Bij ondiepe grondwaterstanden hebben zij géén vertraging toegepast, bij matig diepe grondwaterstanden een vertraging van 4 dagen en bij diepe grondwaterstanden een vertraging van 70 dagen. Er is geen demping toegepast (van Lanen et al., 1995). In het model wordt nu de met SWAP berekende grondwateraanvulling ingevoerd, zonder dat het model opnieuw gecalibreerd wordt. MODFLOW berekent hiermee de stijghoogten in het gebied. Het model in MODFLOW wordt in het kader van dit onderzoek alleen gebruikt om de berekende stijghoogten, uitgaande van verschillende grondwateraanvulling, te vergelijken met gemeten stijghoogten van enkele ondiepe en diepe peilbuizen in het gebied.

7.3 Invoer en uitvoer

Het verzadigd grondwatermodel MODFLOW is opgebouwd uit diverse modules. Rivieren, greppels, onttrekkeningen en aanvullingen werden door middel van onafhankelijke modules aan de basismodule gekoppeld. De modules bevatten invoergegevens die gebruikt worden bij de berekeningen. Alle modules zijn ongewijzigd gebleven ten opzicht van Kroon en Weerts (1995), behalve de module die de grondwateraanvulling beschrijft.

De basismodule 'Basic Package' bevat de modelstructuur. In de basismodule staat informatie over de opbouw van het modelraster, begin- en randvoorwaarden en de status van elke cel in het modelraster (actief of niet-actief). Bovendien bevat de basismodule informatie over welke onafhankelijke modules geactiveerd zijn.

Met de 'Block-Centered Flow Package' worden de termen die nodig zijn voor het oplossen van de eindige differentievergelijking berekend. De module bevat informatie over de simulatie (stationair of niet-stationair) en het laagtype (freatisch of gespannen). Verder bevat de module per cel de waarde van de horizontale doorlatendheid, verticale doorlatendheid, de effectieve porositeit, de specifieke bergingscoëfficiënt en de anisotropiefactor voor elke laag. Deze module bevat ook een 'wetdry'-optie, waarmee het droogvallen of verzadigen van de cellen wordt beschreven.

Met de riviermodule 'River Package' wordt de interactie tussen de rivier en het grondwatersysteem gesimuleerd. In het model is aangegeven in welke rastercellen de Noorbeek loopt. Voor deze cellen zijn enkele gegevens ingevoerd, zoals beekpeil, bodemhoogte en hydraulische geleidbaarheid.

De module 'Drainage Package' kan bronnen, greppels en kwelzones simuleren. In het model is aangegeven in welke rastercellen greppels of bronnen voorkomen. Voor deze cellen zijn enkele gegevens ingevoerd, zoals hoogte van de bron of greppel en de hydraulische geleidbaarheid.

Met de 'General-head boundary Package' module worden de fluxen over de modelrand gesimuleerd. In het westen van het modelgebied stroomt het grondwater waarschijnlijk door het Onder-Carboon (laag 4) in westelijke richting het gebied uit. In het model is aangegeven voor welke cellen deze module van toepassing is.

Met de 'Recharge Package' module wordt de grondwateraanvulling gesimuleerd.
De 10-daagse gemiddelden van grondwateraanvulling werden per cel ingevoerd voor de periode 1-1-1990 tot en met 30-9-1994. MODFLOW bepaalt de hoogste actieve cel die meedoet aan de verzadigde grondwaterstroming en hieraan wordt de grondwateraanvulling toegekend. De grondwateraanvulling is per dag berekend met het agrohydrologisch model SWAP. Het gemiddelde neerslagoverschot van alle SWAP-eenheden staat in bijlage E vermeld. Het programma AL_RCH3 maakt de met SWAP berekende grondwateraanvulling geschikt voor invoer in MODFLOW. Bijlage F bevat meer informatie over het programma AL_RCH3.

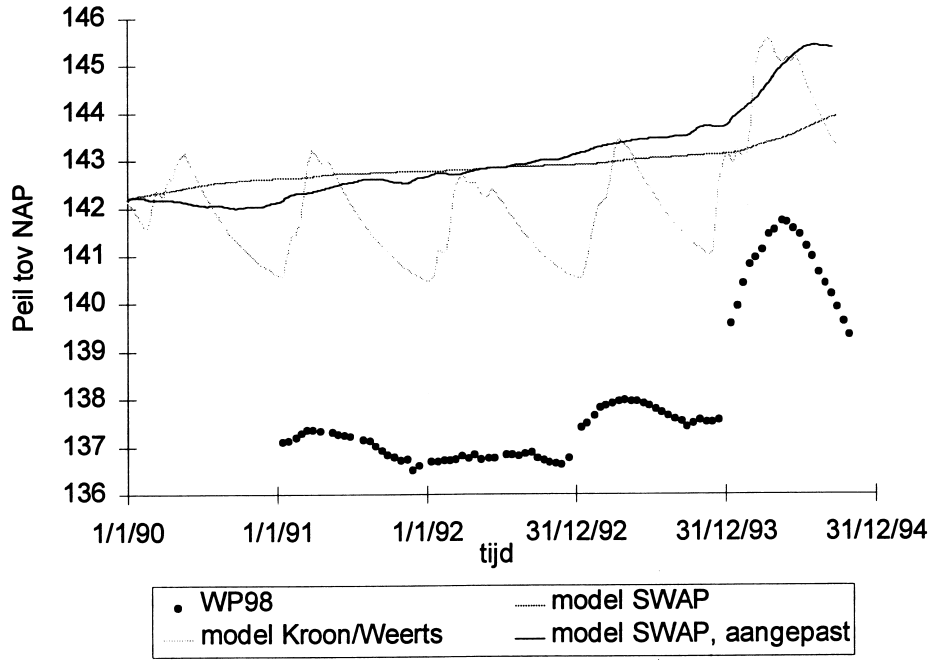
7.4 Resultaten

Met MODFLOW is de stijghoogte van elke rastercel berekend. Van enkele rastercellen wordt de berekende stijghoogte vergeleken met de gemeten stijghoogte van het grondwater in een peilbuis in een specifieke rastercel. In bijlage D1 zijn de locaties van de peilbuizen weergegeven. De plaats (rij, kolom en diepte) van enkele peilbuizen in het modelraster is gegeven in bijlage D2. Van de peilbuizen zijn stijghoogtegegevens beschikbaar voor een gedeelte of voor de gehele simulatieperiode. De stijghoogten zijn doorgaans elke maand gemeten.

Net buiten het stroomgebied van de Noor zijn 4 diepe peilbuizen aanwezig. De gemeten stijghoogte in deze peilbuizen (DB22, DB23, WP96 en WP98) kan vergeleken worden met de berekende stijghoogten op de modelrand. Omdat de peilbuizen buiten het gebied liggen kan aan het niveau van de stijghoogte minder waarde worden gehecht, maar de stijghoogtefluctuatie kan wel worden vergeleken als de dikte van de onverzadigde zone, het bodemtype, de geologische opbouw en het landgebruik gelijk zijn.

Diepe peilbuizen
Figuur 7.2 laat de gemeten en berekende stijghoogte zien ter plaatse van peilbuis WP98. De berekende stijghoogte van het model van Kroon en Weerts (1995) (grondwateraanvulling berekend met NUT_DAY en transferfunctie) en de berekende stijghoogte van het model SWAP (grondwateraanvulling berekent met SWAP) worden in figuur 7.2 weergegeven. Het

nieveau van de berekende en gemeten stijghoogten hoeft niet overeen te komen; de fluctuatie echter wel. De grondwateraanvulling berekend met SWAP geeft in MODFLOW (modelvariant 'model SWAP') een berekende stijghoogte die, zoals uit figuur 7.2 blijkt, bijna geen fluctuatie vertoont.



Figuur 7.2: Vergelijking gemeten en berekende stijghoogte (peilbuis WP98).

Uit de gevoeligheidsanalyse van SWAP (paragraaf 4.5) blijkt dat ook een wijziging van löss in regoliet en de onderrandvoorwaarde een kleinere vertraging en demping van het neerslagoverschot tot gevolg hebben. Bovendien kan de dikte van de löss, het regoliet en de beekdalopvulling een rol spelen (zie paragraaf 6.3). Tenslotte kan de verzadigde doorlatendheid van enkele gronden nog verder verhoogd worden. De Formatie van Gulpen wordt gekenmerkt door spleten en daardoor kan preferente grondwaterstroming plaatsvinden. In SWAP zijn daarom effectieve doorlatendheidswaarden ingevoerd. Als de grondwateraanvulling wordt berekend met bovengenoemde aanpassingen (zie bijlage G) dan zien de door MODFLOW berekende stijghoogten eruit zoals in figuur 7.2 wordt weergegeven met de modelvariant 'model SWAP, aangepast'.

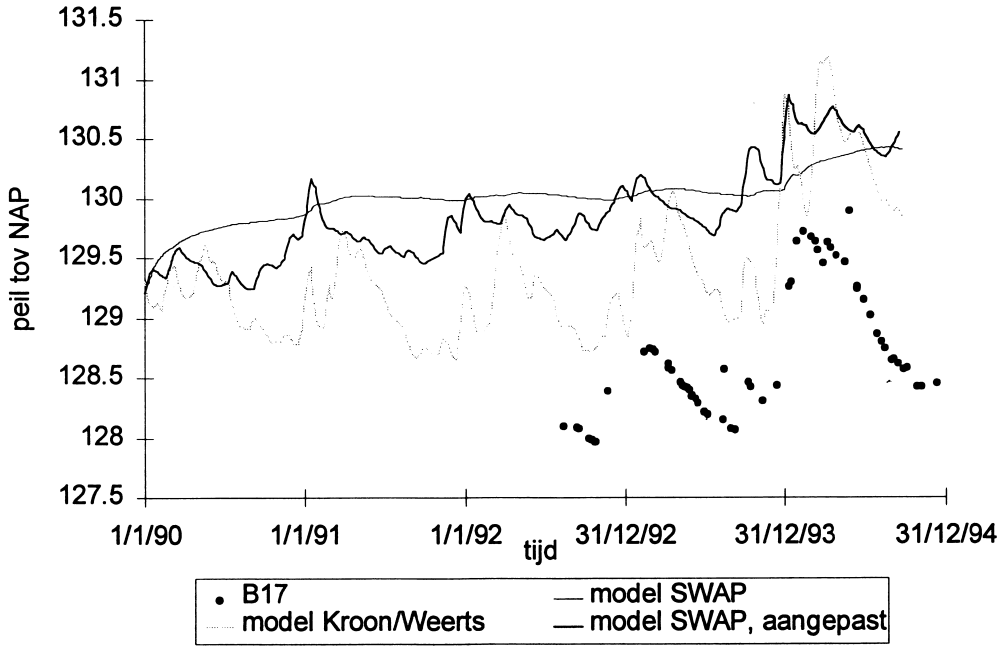
De berekende stijghoogten van de modelvariant 'model SWAP, aangepast' laten nog steeds te weinig fluctuatie zien; de demping blijft te groot. De gemeten stijghoogten hebben een stijghoogtefluctuatie van 5,2 m, terwijl de berekende stijghoogten een fluctuatie hebben van 3,4 m. Bovendien is de vertraging van de grondwateraanvulling te groot, waardoor de berekende stijghoogten later reageren dan de gemeten stijghoogten. Opvallend is de stijgende trend van de berekende stijghoogten. Het model in MODFLOW is gecalibreerd met de modelvariant 'model Kroon/Weerts'. De gemiddelde grondwateraanvulling in dit model is systematisch lager dan de grondwateraanvulling berekend met SWAP. Het niet opnieuw calibreren van het model zou de oorzaak van de stijgende trend kunnen zijn. Ook andere diepe peilbuizen in het gebied vertonen hetzelfde beeld (zie bijlage H).

Aanpassingen in de modelinvoer van SWAP om de vertraging en demping van het neerslag-

overschot in de onverzadigde ondergrond te verkleinen heeft ook invloed op de processen in de wortelzone en daarmee op de grootte van het neerslagoverschot. De aanpassingen hebben tot gevolg dat het vochtgehalte in de wortelzone lager wordt. Hierdoor wordt de actuele transpiratie lager en is de grondwateraanvulling groter. De grondwateraanvulling kan tot 26% groter zijn door deze aanpassingen (bijlage G).

Ondiepe peilbuizen

Figuur 7.3 laat de gemeten en berekende stijghoogten zien ter plaatse van peilbuis B17. Peilbuis B17 is in het dal gesitueerd. Ook hier zijn de stijghoogten uit het model van Kroon en Weerts en uit het model SWAP weergegeven. De grondwateraanvulling berekend met SWAP geeft in MODFLOW (modelvariant 'model SWAP') een berekende stijghoogte die, zoals uit figuur 7.3 blijkt, te weinig fluctuatie vertoont.



Figuur 7.3: Vergelijking gemeten en berekende stijghoogte, B17.

Als de grondwateraanvulling wordt berekend met de bij de diepe peilbuizen genoemde aanpassing (zie ook bijlage G), dan zien de door MODFLOW berekende stijghoogten eruit zoals in figuur 7.3 wordt weergegeven met de modelvariant 'model SWAP, aangepast'.

De berekende stijghoogten van de modelvariant 'model SWAP, aangepast', laten meer fluctuatie zien. De fluctuatie van de gemeten stijghoogten in peilbuis B17 is minstens 2 m, terwijl de berekende stijghoogten een fluctuatie van maximaal 1,7 m vertonen. Hieruit blijkt dat de demping nog iets te groot is. De gemeten en berekende stijghoogten reageren wel tegelijk op een verandering in grondwateraanvulling. In bijlage H zijn de gemeten en berekende stijghoogten van enkele andere ondiepe peilbuizen weergegeven.

Bij de probleemstelling in de inleiding is al aan de orde geweest dat de stijghoogten in het gebied niet alleen afhankelijk zijn van de grondwateraanvulling, maar ook van de stroming in de verzadigde zone. Dit betekent dat de berekende stijghoogten in de ondiepe peilbuizen in het dal nooit goed kunnen worden gereconstrueerd als de berekende stijghoogten van de diepe peilbuizen op de hellingen en plateau's niet goed worden gesimuleerd (zie figuur 2.5).

8. Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Belangrijke gebiedskenmerken voor het bepalen van het neerslagoverschot en de grondwateraanvulling zijn het landgebruik, de grondwaterstand, het bodemtype en de geologische opbouw tot aan de grondwaterstand. Het stroomgebied van de Noor is opgedeeld in 45 eenheden met elk een unieke combinatie van bovengenoemde gebiedskenmerken.

Bij de vergelijking van het agrohydrologisch model SWAP, het reservoirmodel NUT_DAY en het reservoirmodel in het programma MUNSFLOW, is SWAP als beste model voor de berekening van het actuele neerslagoverschot in het stroomgebied van de Noor naar voren gekomen. SWAP is conceptueel het beste model. In tegenstelling tot de twee reservoirmodellen houdt SWAP rekening met interceptie door het gewas. Bovendien worden evaporatie en transpiratie apart berekend en is capillaire nalevering vanuit de ondergrond mogelijk. Het reservoirmodel in het programma MUNSFLOW is teveel vereenvoudigd.

In het stroomgebied van de Noor is het neerslagoverschot onder graan het grootst, gevolgd door achtereenvolgens maïs, gras en loofbos. Het gemiddeld neerslagoverschot in de periode 1991-1994 ligt tussen 240 en 375 mm/jaar. Het neerslagoverschot van een gewas op regoliet en beekdalopvulling is groter dan het neerslagoverschot van hetzelfde gewas op löss. Dit wordt veroorzaakt door de kleinere actuele transpiratie van een gewas op regoliet en beekdalopvulling.

Bij de vergelijking van het agrohydrologisch model SWAP, het programma MUNSFLOW en een wiskundige transferfunctie, is SWAP het beste model voor de simulatie van de demping en vertraging van het neerslagoverschot in de onverzadigde ondergrond in het stroomgebied van de Noor. SWAP is ook voor de simulatie van de grondwaterstroming in de onverzadigde ondergrond conceptueel het beste model. Het model houdt rekening met de fysische eigenschappen van de grond. Bovendien worden de variabele vochtgehalten (in de tijd en diepte) van de grond meegenomen bij de berekening van de onverzadigde grondwaterstroming.

De simulatie van de grondwaterstroming in de onverzadigde ondergrond met het agrohydrologisch model SWAP geeft teveel demping en vertraging, zodat uiteindelijk de grondwateraanvulling niet goed wordt berekend. Het vergroten van de verzadigde doorlatendheid, aanpassen van de onderrandvoorwaarde (geen vrije drainage, maar een opgegeven grondwaterstand) en het verkleinen van de dikte van de löss, het regoliet of de beekdalopvulling hebben een gunstige invloed op de vertraging en demping van het neerslagoverschot. Bij de berekeningen met MODFLOW blijkt dat het stijghoogteverloop veel te weinig fluctuatie vertoont vergeleken met gemeten stijghoogten in het gebied. Dit is het geval in zowel de diepe als de ondiepe peilbuizen.

Invoeren van effectieve (hogere) verzadigde doorlatendheidswaarden in SWAP heeft een minder grote demping en vertraging van het neerslagoverschot in de onverzadigde ondergrond tot gevolg. Bij de berekeningen met MODFLOW blijkt echter dat het stijghoogteverloop nog te vlak is vergeleken met gemeten stijghoogten in het gebied.

Met een fysisch-georiënteerde model zoals SWAP en invoer binnen fysisch acceptabele grenzen zijn de gemeten stijghoogten in het stroomgebied van de Noor niet te reconstrueren. Waarschijnlijk is bij de berekening van de vertraging en demping van het neerslagoverschot in de onverzadigde ondergrond invoering van preferente stroming via spleten in de Formatie van Gulpen nodig.

8.2 Aanbevelingen

De aanwezigheid en dikte van löss of regoliet op de hellingen en plateau's is niet exact bekend. Meer boringen kunnen hier een oplossing bieden.

De grootte van het neerslagoverschot is alleen te controleren als er verdampingsmetingen met een mast, bodemvochtmetingen of lysimeters in het gebied worden geplaatst.

Goede gegevens van de onverzadigde doorlatendheid en secundaire porositeit van de Formatie van Gulpen is nodig om spleetstroming in de onverzadigde ondergrond te kunnen simuleren. Door gebruik te maken van bijvoorbeeld tracers in het veld kan lokaal meer informatie worden verkregen over de onverzadigde grondwaterstroming in de formatie. Vooral metingen van de drukhoogte of bodemfysische eigenschappen rond de gemiddelde flux (0,8 mm/dag) of vochtgehalte is belangrijk.

Het reservoirmodel NUT_DAY wordt conceptueel beter als interceptie door het gewas wordt toegevoegd aan het model. Invoegen van een conceptueel sterker reservoirmodel in het programma MUNSFLOW zou het gehele programma aantrekkelijker maken.

Een langere rekenperiode geeft meer informatie over de vertraging en demping van het neerslagoverschot in de dikke onverzadigde ondergrond.

Het aanpassen van de module die spleetstroming kan simuleren in het agrohydrologisch model SWAP zal invoering van effectieve doorlatendheidswaarden overbodig maken.

Gebruik van de Penman-Monteith vergelijking in plaats van de Makkink vergelijking biedt meer mogelijkheden voor de simulatie van het actuele neerslagoverschot met het agrohydrologisch model SWAP. De gewashoogte en -weerstand worden in de Penman-Monteith vergelijking gebruikt om de potentiële verdamping te berekenen. Het groeistadium van een gewas kan, bij gebruikmaking van de Penman-Monteith vergelijking, gekoppeld worden aan de weersomstandigheden. De actuele verdamping die berekend wordt met behulp van de Penman-Monteith vergelijking houdt dus meer rekening met het gewas.

Voor het toetsen van de grondwateraanvulling zijn de berekende stijghoogten in MODFLOW vergeleken met de gemeten stijghoogte van enkele peilbuizen in het gebied. Hieraan is relatief weinig tijd besteed. De stijghoogten die met MODFLOW worden berekend zijn niet alleen afhankelijk van de ruimtelijke en temporele grondwateraanvulling, maar ook van de andere modelparameters. Aanpassingen en calibratie van het model in MODFLOW kunnen tot betere resultaten van het stijghoogteverloop leiden.

Literatuur

Becks, M. en J.F. van Os, 1995. Hydrogeologische verkenning stroomgebied Noorbeek. Stroomgebiedsonderzoek om de mogelijkheden na te gaan voor het gebruik van grond- en oppervlaktewater voor de watervoorziening. Scriptie, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Black, T.A., W.R. Gardner en G.W. Thurtell, 1969. The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil. Soil Science Society of America Journal, 33, 655-660.

Boons-Prins, E.R., G.H.J. de Koning, C.A. van Diepen en F.W.T. Penning de Vries, 1993. Crop specific simulation parameters for yield forecasting across the European Community. CABO-DLO, Staring Centrum, Wageningen.

Bouma, J., G.H. Stoffelsen, T.C. Teunissen van Manen, J.M.J. Dekkers en J.N.B. Poelman, 1978. Onderzoek naar de hydrologische situatie in de onverzadigde zone op het plateau van Margraten. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Bouma, J.H. en G.J. Leene, 1993. Hydrogeologie van het Noordal. Een hydrogeologisch onderzoek in het Belgische deel van het Noordal met een toepassing van het computerprogramma FLOWNET. Scriptie, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Braden, H., 1985. Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell for Wasser und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzer Einzugsgebiete. Mittelungen Deutsche Bodenkundliche Geselschaft, 42, 294-299.

Brigham Young University, 1995. Groundwater Modeling System, tutorials. Department of Defense, Engineering Computer Graphics Laboratory, Utah.

Bruin, H.A.R. de, 1994. Micrometeorologie. Diktaat, Vakgroep Meteorologie, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Burg, J. van de, 1996. Beworteling van boomsoorten in Nederlandse bossen. Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (IBN-DLO), IBN rapport 224, Wageningen.

Dam, H.J. ten en H.A. Tiemensma, 1993. Hydrogeologie in het stroomgebied van de Noor. Scriptie, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Dam, J.C. van, J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat en P.E.V. van Walsum, 1996. SWAP User's Manual, Simulation of transport processes in the Soil-Water-Air-Plant environment. Concept, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Dolman, A.J. en E.J. Moors, 1994. Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland, Fase 1: Toetsing instrumentarium. Staring Centrum, Dienst Landbouwkundig Onderzoek (SC-DLO), Wageningen.

Feddes, R.A., 1987. Crop factors in relation to makkink reference-crop evaporation. In: J.C. Hooghart (Ed.). Evaporation and weather, Proceedings and information 39, TNO Commitee on Hydrological Research, The Hague.

Feddes, R.A. en R.W.R. Koopmans, 1996. Agrohydrology. Collegedictaat, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Gans, A.J. de en A.H.L.M. Tiebosch, 1994. De reaktie van stijghoogten en afvoer op neerslag in het stroomgebied van de Noor, Zuid-Limburg. Scriptie, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Grent, Arjen en John Peeters, 1992. Hydrogeologie van het Noordal. Scriptie, Vakgroep waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Hendriks, M.J., P. Kabat, F. Homma en J. Postma, 1990. Onderzoek naar de verdamping van een loofbos. Meetresultaten en enkele modelberekeningen. Rapport 90, Staring Centrum, Wageningen.

Kroon, T. en A.H. Weerts, 1995. Niet-Stationaire Modellering van het Stroomgebied van de Noor met MODFLOW en de Effecten van Grondwaterwinning. Scriptie, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

KNMI, 1986-1994. Maandoverzichten van het weer. KNMI, de Bilt.

Kuyl, O.S., 1980. Toelichting bij de Geologische kaart van Nederland 1:50.000 blad Heerlen (62W oost en 62 O west). Rijks Geologische Dienst.

Lanen, H.A.J. van, B. van der Weerd, R. Dijksma, H.J. van Dam, G. Bier, 1995. Hydrogeologie van het stroomgebied van de Noor en de effecten van grondwateronttrekkingen aan de westrand van het Plateau van Margraten - Basisrapport. Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Lanen, H.A.J. van, B. van de Weerd, W.J. Ackerman en R. Dijksma, 1995. Programma van het hydrogeologisch veldpracticum. Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Lanen, H.A.J. van, A.H. Weerts, T. Kroon en R. Dijksma, 1996. Estimation of Groundwater Recharge in Areas with Deep Groundwater Tables Using Transient Groundwater Flow Modeling. ModelCARE 96, Calibration and Reliability in Groundwater Modeling, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.

McDonald, Michael G. en Arlen W. Harbaugh, 1988. A modular, three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Washington.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12, 513-522.

Nationaal Geografisch Instituut, 1976. Topografische kaart 1:10.000. Nederlandse gegevens ontleend aan de kaart 1:25.000 van de Topografische Dienst van Nederland, Brussel.

Nota, D.G.J. en B. van der Weerd, 1978. A hydrogeological study in the basin of the Gulp creek - 1, Groundwaterflow characteristics.

Nota, D.G.J., A.M.G. Bakker, B. van der Weerd en G. Halma, 1988. A hydrological study in the basin of the Gulp creek - 3, Chemistry of surface and groundwater. Agricultural University Wageningen Papers 87-7, 46 pg.

Peerboom, J.M.P.M., 1990. Waterhuishoudkundige schadefuncties op grasland. Rapport 43, Staring Centrum, Wageningen.

Schunselaar S.S. en K.M.L.J. van der Hoeven, 1993. Dalopvulling, een bron voor de hydrogeologie. De drie-dimensionale verbreiding en de hydraulische eigenschappen van de dalopvulling in het bovenstroomse deel van het natuurgebied 'de Noorbeemden' en de consequenties hiervan op de grondwaterstroming. Scriptie, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Soesbergen, G.A. van, C.van Wallenburg, K.R. van Lynden en H.A.J. van Lanen, 1986. De interpretatie van bodemkundige gegevens. Systeem voor de geschiktheidsbeoordeling van gronden voor akkerbouw, wiedebouw en bosbouw. Rapport nr. 1967. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Toom, B. van den en T. van der Koppel, 1993. Hydrogeologie Zuidelijke-Voerstreek, Tijdstijghoogte simulatie. Scriptie, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898.

Vleeshouwer, J.J. en J.H. Damoiseaux, 1990. Bodemkaart van Nederland 1:50000. Toelichting bij kaartblad 61-62 West en Oost Maastricht-Heerlen. Stiboka, Staring Centrum, Wageningen.

Von Hoyningen-Hüne, J., 1983. Die Interception des Niederschlags in landwirtschaftlichen Beständen. Schriftenreihe des DVWK 57, 1-53.

Wesseling, J.G., 1991. Meerjarige simulatie van grondwaterstroming voor verschillende bodemprofielen, grondwatertrappen en gewassen met het model SWATRE. Rapport 152, Dienst Landbouwkundig Onderzoek, Wageningen.

Wolters-Noordhoff atlasproducties, 1988. De Grote Bosatlas. 50^{e} editie, Groningen.

Wösten, J.H.M., G.J. Veerman en J. Stolte, 1994. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en onvergronden in Nederland: de Staringreeks. Staring Centrum, Dienst Landbouwkundig Onderzoek (SC-DLO), Wageningen.

Zwamborn, M.H. en D.H. Baggelaar, 1995. MUNSFLOW gebruikershandleiding. Kiwa Onderzoek en Advies, Nieuwegein.

Zwamborn, M.H., 1995. Modellering van de onverzadigde zone ten behoeve van grondwatermodellen. Scriptie, Landbouwuniversiteit Wageningen en Kiwa Onderzoek en Advies Nieuwegein.

Bijlagen

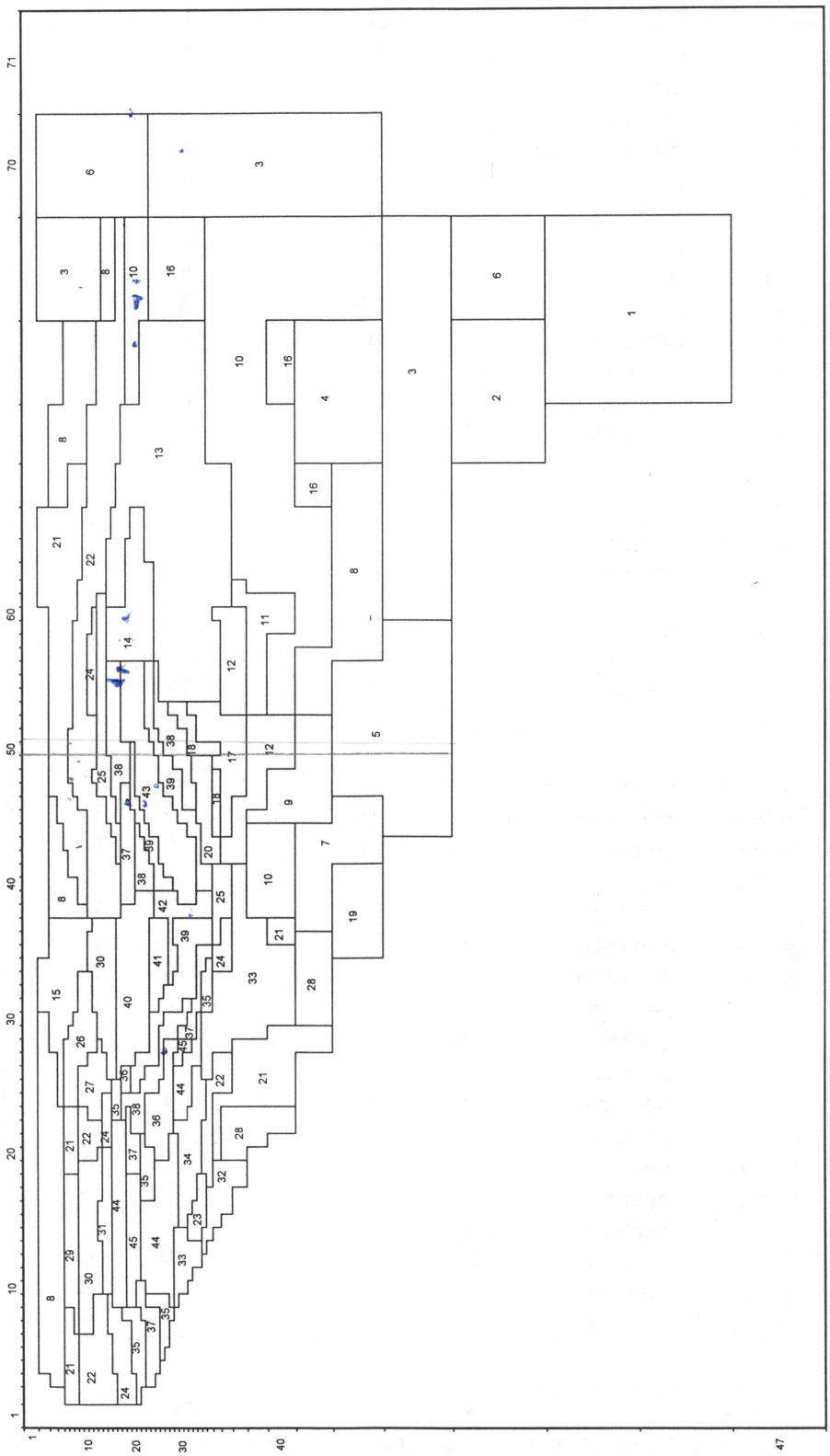
Bijlage A1	Kenmerken van de Noor-eenheden
Bijlage A2	Ruimtelijke gebiedsindeling
Bijlage B	Invoer- en uitvoerbestanden SWAP
Bijlage C	Invoerparameters
Bijlage D1	Locatie peilbuizen
Bijlage D2	Plaatsbepaling peilbuizen in het modelraster
Bijlage E	Neerslagoverschot SWAP-eenheden
Bijlage F	Programma AL_RCH3
Bijlage G	Grondwateraanvulling met SWAP aanpassingen
Bijlage H	Gemeten en berekende stijghoogten

Bijlage A1 Kenmerken van de Noor-eenheden

Eenheid	Opp. [ha]	Landgebruik	Bodemtype	GWS [m -mv]	Gulpen [m]	Vaals [m]	SWAP	NUTDAY	MUNSFLOW	Transfer
1	90	gras	löss	55	45	7	1	1	1	1
2	34	gras	löss	45	42		1	1	2	2
3	147.58	gras	löss	35	32		1	1	3	3
4	31.96	gras	löss	30	27		1	1	4	3
5	43.1	maïs	löss	50	47		2	2	5	4
6	54.5	maïs	löss	40	37		2	2	6	4
7	14.75	gras	dik rego	45	42		3	3	7	5
8	67.735	gras	dik rego	35	32		3	3	8	6
9	11.55	gras	dik rego	35	15	17	4	3	9	7
10	126.83	gras	dik rego	25	22		3	3	10	6
11	8	gras	dik rego	25	15	7	4	3	11	8
12	15.275	gras	dik rego	25	7	15	5	3	12	9
13	73.04	gras	dik rego	15	12		3	3	13	10
14	9.6	gras	dik rego	7	4		3	3	14	10
15	10.025	maïs	dik rego	35	32		6	4	15	11
16	25	maïs	dik rego	25	22		6	4	16	11
17	7.3	maïs	dik rego	15	7	5	7	4	17	12
18	3.5	maïs	dik rego	10	0	7	8	4	18	13
19	9.45	loofbos	dik rego	55	52		9	5	19	14
20	3.725	graan	dik rego	7	0	4	10	6	20	15
21	42.99	gras	dun rego	35	34		11	7	8	6
22	47.625	gras	dun rego	25	24		11	7	10	6
23	1.75	gras	dun rego	25	15	9	12	7	21	8
24	8.225	gras	dun rego	15	14		11	7	13	10
25	7.8	gras	dun rego	7	0	6	13	8	22	16
26	5.125	maïs	dun rego	35	34		14	9	15	11
27	3.25	maïs	dun rego	25	20	4	15	9	23	11
28	12.95	loofbos	dun rego	40	39		16	10	24	14
29	4	loofbos	dun rego	35	34		16	10	25	17
30	13.75	loofbos	dun rego	25	24		16	10	26	17
31	3.125	loofbos	dun rego	15	14		16	10	27	18
32	4.075	graan	dun rego	40	25	14	17	11	28	19
33	22.175	graan	dun rego	25	24		17	11	29	20
34	5.75	graan	dun rego	25	15	9	18	11	30	20
35	7.5	gras	beekdal	15	12		3	3	13	10
36	5	gras	beekdal	15	0	12	19	3	31	10
37	9.175	gras	beekdal	7	4		3	3	14	10
38	14.5	gras	beekdal	7	0	4	19	3	32	10
39	15.45	gras	beekdal	3			19	3	nvt	nvt
40	10.75	loofbos	beekdal	15	12		9	5	33	18
41	3.125	loofbos	beekdal	7	4		9	5	34	18
42	3.475	loofbos	beekdal	3			9	5	nvt	nvt
43	13.125	loofbos	beekdal	0.5			20	12	nvt	nvt
44	16.875	graan	beekdal	15	12		21	13	35	15
45	4.125	graan	beekdal	7	4		21	13	36	15

GWS = grondwaterstand [m -maaiveld]
Löss, dik regoliet en beekdalopvulling zijn 3 m dik, dun regoliet is 1 m dik
In de tabel is de bodemopbouw tot de grondwaterstand weergegeven.

Bijlage A2 Ruimtelijke gebiedsindeling



Bijlage B Invoer- en uitvoerbestanden SWAP

Hieronder volgt de opbouw van hoofdbestand, invoerbestanden en uitvoerbestanden van het agrohydrologisch model SWAP.

Het model maakt bij de simulatie gebruik van een hoofdbestand. In dit hoofdbestand worden verschillende invoerbestanden aangeroepen. In deze invoerbestanden staan gegevens die gebruikt worden bij de berekeningen. Deze bestanden zijn gestandaardiseerd. De resultaten van de simulaties worden weggeschreven naar uitvoerbestanden.

Er zijn invoerbestanden die altijd ingevoerd moeten worden om simulaties uit te voeren en er zijn optionele invoerbestanden, die naargelang de situatie doorgerekend moeten worden. In tabel B1 is te zien dat altijd zes invoerbestanden vereist zijn om een simulatie uit te voeren.

Tabel B1: Overzicht vereiste en optionele invoerbestanden.

Invoerbestand	vereist	optioneel
algemeen	*SWAP.KEY*[1)]	
meteorologische dag gegevens	METHUP.*979*[2)]	
regen gegevens(korte interval)		METHUP*R.979*[2)]
irrigatie voorschriften		FIXED.*IRG*
berekende irrigatie		CALC.*CAP*
gewas schema	CROP.*CAL*	
gewasgegevens		WHEATS. *CRP*
fysische bodemgegevens		
zijdelingse drainage		DITCH.*DRA*
onderrandvoorwaarde	GWL.*BBC*	
interactie met opp. water		SWASURF.*SRF*
specifieke uitvoergegevens	OUT.*DAT*	

[1)] schuin gedrukte tekst geeft de voorgeschreven namen aan
[2)] de laatste drie nummers corresponderen met het meteorologische jaar

SWAP geeft standaard een aantal uitvoerbestanden, er zijn ook optionele uitvoerbestanden. In de onderstaande tabel is te zien dat twee uitvoerbestanden altijd gegeven worden en dat de overige uitvoerbestanden optioneel zijn.

Tabel B2: Overzicht altijd gegeven en optionele uitvoerbestanden.

Uitvoerbestand	altijd	optioneel
water balans	TEST1.*BAL*[1)]	
stoffenbalans		TEST1.*SLT*
gewas ontwikkeling	TEST1.*CRP*	
bodemprofiel gegevens		TEST1.*ANA*
opp. waterbalans		SIM.*SRF*
irrigatie schema		SIM.*SCH*
bodem temperaturen		SIM.*TMP*
invoergegevens PESTLA		SWEXTR

[1)] schuin afgedrukte tekst geeft de voorgeschreven namen aan

Bijlage C Invoerparameters

De volgende gronden komen in het gebied voor:

- Bergbrikgronden (BLb6) en Radebrikgronden (BLd6), beide behorend tot de leembrikgronden, deze komen vooral in het zuiden van het gebied voor;
- Ooivaaggronden (Ld6g en Ldh6) en Poldervaaggronden (Lnd6), beide behorend tot de vaaggronden(leem), deze komen vooral op de hellingen en in het noorden van het gebied voor.

Löss-, terras- en kalksteenhellinggronden (AHc) komen ook nog voor in het gebied, maar van deze gronden worden zijn geen gegevens bekend, bovendien worden ze naast de bovengenoemde gronden onderscheiden. In tabel C1 staan de diktes van de organische (A)-horizont [cm] van de verschillende gronden. De gegevens zijn ontleend aan Vleeshouwer en Damoiseaux (1990) en Soesbergen et al. (1986).

Tabel C1: Organische (A-)horizont van de verschillende gronden.

Grondsoort	dikte A horizont
BLb6	10-30
BLd6	10-30
Ld6g	20-30
Ldh6	25-30
Lnd6	20-30

In het kader van dit onderzoek wordt alleen onderscheidt gemaakt tussen de bodemtypes: löss, regoliet en beekdalopvulling. Voor de dikte van de organische (A-)horizont wordt voor deze bodemtypes 30 cm genomen. De bovengronden van de bodemtypes zijn dus allemaal 30 cm dik.

In tabel C2 staan voor verschillende gewassen de maximale bewortelingsdiepte [cm], de dag waarop de deze diepte wordt bereikt, de dag waarop het gewas begint te groeien en de laatste dag dat een gewas op het veld staat. De gegevens van gras, maïs en graan zijn ontleend aan Wesseling (1991). De gegevens van bos zijn ontleend aan van de Burg (1996).

Tabel C2: Max. worteldiepte [cm], dag waarop deze wordt bereikt, dag waarop het gewas begint te groeien en laatste dag dat het gewas op het veld staat voor de verschillende gewassen.

Gewas	max worteldiepte	dag max. worteldiepte	opkomst dag	oogst dag
graan	80	171	97	226
gras	30[1)]	1	1	365
maïs	80	171	97	288
loofbos	100	1	1	365

[1)] Uit: Van Soesbergen et al., 1986

Tabel C3 bevat de belangrijkste drukhoogten h [cm] zoals ze gebruikt zijn voor de simulatie van de wortelopname door de verschillende gewassen. De gegevens voor gras, maïs en graan zijn ontleend aan Wesseling (1991). De gegevens voor bos zijn ontleend aan Hendriks et al. (1990).

Tabel C3: Belangrijkste drukhoogten [cm] voor de wortelopname.

	h_1	h_2	h_{3h}	h_{3l}	h_4
graan	0	-1	-500	-900	-16000
gras	-10	-25	-200	-800	-8000
maïs	-15	-30	-325	-600	-8000
loofbos	-5	-10	-500	-600	-16000

Gewasfactoren gerelateerd aan de Makkink referentie gewasverdamping staan in tabel C4 weergegeven. De gegevens zijn weergegeven per decade. De gegevens zijn ontleend aan Feddes (1987) en Feddes en Koopmans (1996).

Tabel C4: Gewasfactoren voor Makkink referentie gewasverdamping.

	april	mei	juni	juli	augustus	september
gras[1)]	1,0 1,0 1,0	1,0 1,0 1,0	1,0 1,0 1,0	1,0 1,0 1,0	1,0 1,0 1,0	1,0 1,0 1,0
maïs	- - -	0,5 0,7 0,8	0,9 1,0 1,2	1,3 1,3 1,2	1,2 1,2 1,2	1,2 1,2 1,2
graan	0,7 0,8 0,9	1,0 1,0 1,0	1,2 1,2 1,2	1,0 0,9 0,8	0,6 - -	- - -
loofbos[2)]	1,04	1,04	1,04	1,04	0,96	0,96

[1)] gewasfactor rest van het jaar 1 [2)] gewasfactor rest van het jaar 0,5

Voor de gewassen is ook de Leaf Area Index een belangrijke invoerparameter. Tabel C5 bevat deze gegevens. Voor gras zijn de gegevens ontleend aan Peerboom (1990). Voor maïs en graan aan Boons-Prins et al. (1993). Voor loofbos zijn de gegevens ontleend aan Dolman en Moors (1994).

Tabel C5: Leaf Area Index voor verschillende gewassen.

Gewas	jan-mrt	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt-dec
gras	1,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	1,5
maïs	-	1	1	3	5	5	5	-
graan	-	0,2	2	4	4	1	-	-
loofbos	0,0	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	0,0

De volgende tabel (C6) bevat per grondsoort de waarden van de fysische parameters; residuaire waarde van het vochtgehalte θ_r, verzadigde waarde van het vochtgehalte θ_s, verzadigde doorlatendheid K_s [cm/d], parameter α [1/cm], parameter l en parameter n. De gegevens zijn ontleend aan Wosten et al. (1994).

Tabel C6: Waarden van fysische parameters.

	θ_r	θ_s	K_s	α	l	n
löss bovengrond	0,00	0,43	2,25	0,0096	-2,733	1,284
löss ondergrond	0,01	0,41	3,7	0,0071	0,912	1,298
regoliet bovengrond	0,01	0,42	1,17	0,0118	-4,795	1,224
regoliet ondergrond	0,00	0,42	13,79	0,0191	-1,384	1,152
beekdal bovengrond	0,01	0,42	1,17	0,0118	-4,795	1,224
beekdal ondergrond	0,00	0,42	13,79	0,0191	-1,384	1,152
Formatie van Gulpen	0,01	0,34	18,30	0,0211	-0,522	1,564
Formatie van Vaals	0,00	0,47	9,08	0,0136	-0,803	1,342

Bij de gevoeligheidsanalyse worden voor de Formaties van Gulpen en Vaals de gemeten K_s waarden uit het gebied gebruikt.
Voor de Formatie van Gulpen geldt K_s=250 cm/dag en voor de Formatie van Vaals geldt K_s=100 cm/dag. Deze gegevens zijn ontleend aan verschillende voorgaande onderzoeken, zoals Schunselaar en van der Hoeven (1993); Kroon en Weerts (1995).

In tabel C3 zijn de belangrijkste drukhoogten weergegeven. In het reservoirmodel NUT_DAY moeten de vochtgehaltes behorende bij deze drukhoogten ingevoerd worden. Tabel C7 bevat de vochtgehaltes die horen bij deze belangrijke drukhoogten (h_2, h_{3h}, h_{3l} en h_4). NUT_DAY maakt geen onderscheidt tussen h_{3h} en h_{3l}. Voor de invoer in NUT_DAY is gebruik gemaakt van de gemiddelde waarde van deze twee drukhoogten (h_{3gem}).

Tabel C7: Vochtgehaltes, zoals ze zijn gebruikt in het reservoirmodel NUT_DAY, behorend bij de belangrijkste drukhoogten. Zie ook tabel C3.

Land-gebruik	druk-hoogte	loss boven-grond	loss onder-grond	regoliet/ beekdal bovengrond	regoliet/ beekdal ondergrond	Formatie van Gulpen	Formatie van Vaals
gras	h_2	0,419	0,401	0,407	0,399	0,307	0,441
	h_{3h}	0,336	0,334	0,335	0,335	0,161	0,318
	h_{3gem}	0,290	0,291	0,297	0,306	0,121	0,263
	h_{3l}	0,243	0,247	0,259	0,277	0,080	0,208
	h_4	0,128	0,132	0,161	0,196	0,029	0,096
maïs	h_2	0,416	0,398	0,404	0,395	0,298	0,435
	h_{3h}	0,303	0,305	0,308	0,314	0,125	0,276
	h_{3gem}	0,282	0,285	0,291	0,301	0,108	0,252
	h_{3l}	0,261	0,264	0,274	0,288	0,091	0,227
	h_4	0,128	0,132	0,161	0,196	0,029	0,096
bos	h_2	0,428	0,407	0,417	0,410	0,333	0,456
	h_{3h}	0,270	0,273	0,281	0,294	0,096	0,237
	h_{3gem}	0,266	0,269	0,278	0,291	0,094	0,232
	h_{3l}	0,261	0,264	0,274	0,288	0,091	0,227
	h_4	0,104	0,108	0,138	0,175	0,023	0,074
graan	h_2	0,433	0,410	0,422	0,418	0,343	0,466
	h_{3h}	0,270	0,273	0,281	0,294	0,096	0,237
	h_{3gem}	0,252	0,256	0,267	0,283	0,086	0,218
	h_{3l}	0,234	0,238	0,252	0,272	0,075	0,199
	h_4	0,104	0,108	0,138	0,175	0,023	0,074

Het reservoirmodel in het programma MUNSFLOW heeft bij de berekening van het neerslag-overschot het vochtleverend vermogen van de wortelzone nodig. Hierbij is gebruik gemaakt van de uitkomsten van het reservoirmodel NUT_DAY. In tabel C8 wordt het vochtleverend vermogen van een aantal representatieve eenheden gegeven.

Tabel C8: Vochtleverend vermogen [mm] van de wortelzone voor een aantal eenheden.

Eenheid	vochtleverend vermogen [mm]
gras op löss	87,3
maïs op löss	219,4
gras op regoliet/beekdal	73,8
maïs op regoliet	172,4
loofbos op regoliet	248,2
graan op regoliet/beekdal	206,7

MUNSFLOW gebruikt bij de berekening van de vertraging en demping van het neerslag-overschot twee parameters voor respectievelijk de demping en de vertraging. In de tabellen C9 en C10 worden enkele tussenstappen in de berekening (zie paragraaf 5.2.3) en de uiteindelijke parameters weergegeven.

Tabel C9: Parameters voor vertraging (k_1) en demping (k_0h_1) van de Formaties van Gulpen en Vaals, bij de standaard waarde van de verzadigde doorlatendheid.

Eenheid	q_{gem} [mm/jaar]	q_{gem} [cm/dag]	h_o	Gulpen k_1	Gulpen k_0h_1	h_o	Vaals k_1	Vaals k_0h_1
gras op loss	272	0.0745	151	2.44	142.7	150	1.78	133.4
mais op loss	302	0.0825	145	2.66	150.2	143	1.95	141.8
gras op rego	287	0.0784	148	2.54	146.5	146	1.88	137.1
mais op rego	3167	0.0867	142	2.78	153.8	139	2.06	145.4
bos op rego	240	0.0656	159	2.18	134.2	160	1.57	124.4
graan op rego	375	0.1027	133	3.2	168.1	127	2.44	160

Tabel C10: Parameters voor vertraging (k_1) en demping (k_0h_1) van de Formaties van Gulpen en Vaals, bij de aangepaste waarde van de verzadigde doorlatendheid.

Eenheid	q_{gem} [mm/jaar]	q_{gem} [cm/dag]	h_o	Gulpen k_1	Gulpen k_0h_1	h_o	Vaals k_1	Vaals k_0h_1
gras op loss	272	0.0745	399	3.87	557.1	453	2.09	413.6
mais op loss	302	0.0825	385	4.19	585	433	2.41	455.4
gras op rego	287	0.0784	392	4.03	571	443	2.3	444.8
mais op rego	317	0.0867	378	4.37	598.2	424	2.51	466.7
bos op rego	240	0.0656	418	3.49	525.8	479	1.96	409.1
graan op rego	375	0.1027	355	5.03	645.7	393	2.93	505.2

Appendix C PARAMETER VALUES

parameter	value		parameter	value
q_1 (entire bog)	0.79 mm/d		c_3 (high bog)	40000-100000 d
q_1 (grass)	1.10 mm/d		c_3 (bog margin)	10000-110000 d
q_1 (forest)	1.00 mm/d		c_3 (forest)	3000-20000 d
			c_3 (fenpeat)	1000-20000 d
h_0	surface level		c_3 (mound)	500-6000 d
h_0	drainage level			
c_1 (drains)	10 d		c_3 (till)	500 d
c_1 (rivers)	20 d		c_3 (drains)	10-110000 d
c_1 (entire bog)	20 d		c_3 (silklei)	3000 d
c_1 (fenpeat)	50 d		c_3 (alluvial)	2000 d
c_1 (diffuse)	50 d		c_3 (rest of model)	1 d
c_1 (rest of model)	0 d			
			T_3 (entire bog)	4-23 m^2/d
T_1 (high bog)	125 m^2/d		T_3 (forest)	4-23 m^2/d
T_1 (bog margin)	10 m^2/d		T_3 (fenpeat)	20-40 m^2/d
T_1 (rest of model)	1 m^2/d		T_3 (mound)	8-125 m^2/d
			T_3 (till)	20-40 m^2/d
c_2 (entire bog)	1 d		T_3 (esker)	250-750 m^2/d
c_2 (forest)	1 d		T_3 (drains)	5-250 m^2/d
c_2 (fenpeat)	1 d		T_3 (Silver)	18-40 m^2/d
c_2 (rest of model)	1 d		T_3 (Brosna)	18-400 m^2/d
			T_3 (alluvial)	20-700 m^2/d
T_2 (high bog)	0.1 m^2/d		T_3 (silklei)	10-20 m^2/d
T_2 (bog margin)	0.05 m^2/d		T_3 (clay)	100-250 m^2/d
T_2 (rest of model)	1 m^2/d		T_3 (rest of model)	20-500 m^2/d
q_2 (model)	0 mm/d		q_3 (model)	0 mm/d

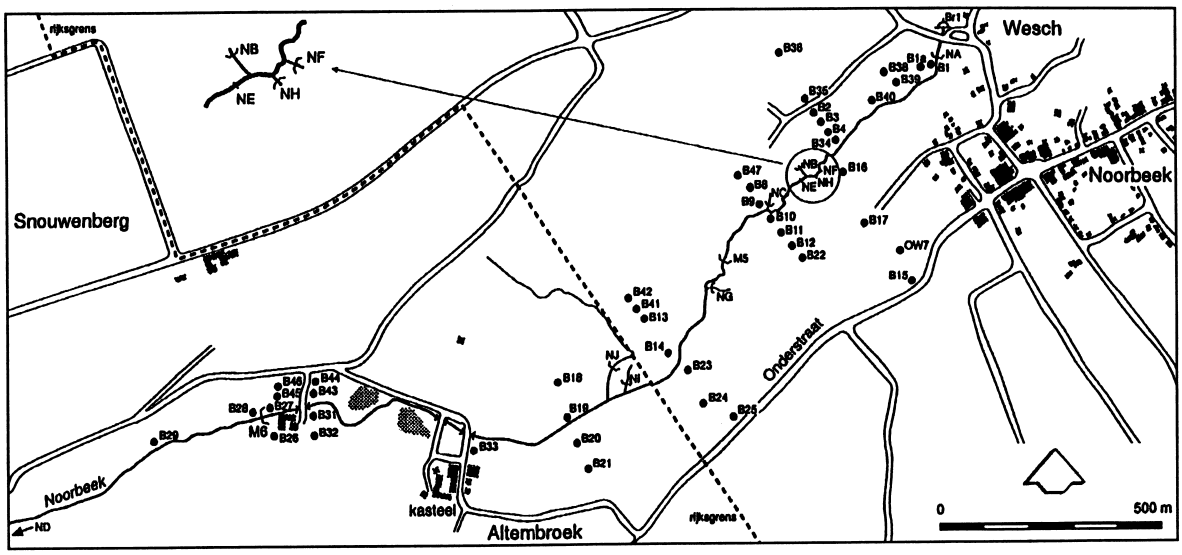
Appendix C PARAMETER VALUES

parameter	value		parameter	value
q_1 (entire bog)	0.79 mm/d		c_3 (high bog)	40000-100000 d
q_1 (grass)	1.10 mm/d		c_3 (bog margin)	10000-110000 d
q_1 (forest)	1.00 mm/d		c_3 (forest)	3000-20000 d
			c_3 (fenpeat)	1000-20000 d
h_0	surface level		c_3 (mound)	500-6000 d
h_0				
c_1 (drains)	10 d		c_3 (till)	500 d
c_1 (rivers)	20 d		c_3 (drains)	10-110000 d
c_1 (entire bog)	20 d		c_3 (silklei)	3000 d
c_1 (fenpeat)	50 d		c_3 (alluvial)	2000 d
c_1 (diffuse)	50 d		c_3 (rest of model)	1 d
c_1 (rest of model)	0 d			
			T_3 (entire bog)	4-23 m^2/d
T_1 (high bog)	125 m^2/d		T_3 (forest)	4-23 m^2/d
T_1 (bog margin)	10 m^2/d		T_3 (fenpeat)	20-40 m^2/d
T_1 (rest of model)	1 m^2/d		T_3 (mound)	8-125 m^2/d
			T_3 (till)	20-40 m^2/d
c_2 (entire bog)	1 d		T_3 (esker)	250-750 m^2/d
c_2 (forest)	1 d		T_3 (drains)	5-250 m^2/d
c_2 (fenpeat)	1 d		T_3 (Silver)	18-40 m^2/d
c_2 (rest of model)	1 d		T_3 (Brosna)	18-400 m^2/d
			T_3 (alluvial)	20-700 m^2/d
T_2 (high bog)	0.1 m^2/d		T_3 (silklei)	10-20 m^2/d
T_2 (bog margin)	0.05 m^2/d		T_3 (clay)	100-250 m^2/d
T_2 (rest of model)	1 m^2/d		T_3 (rest of model)	20-500 m^2/d
q_2 (model)	0 mm/d		q_3 (model)	0 mm/d

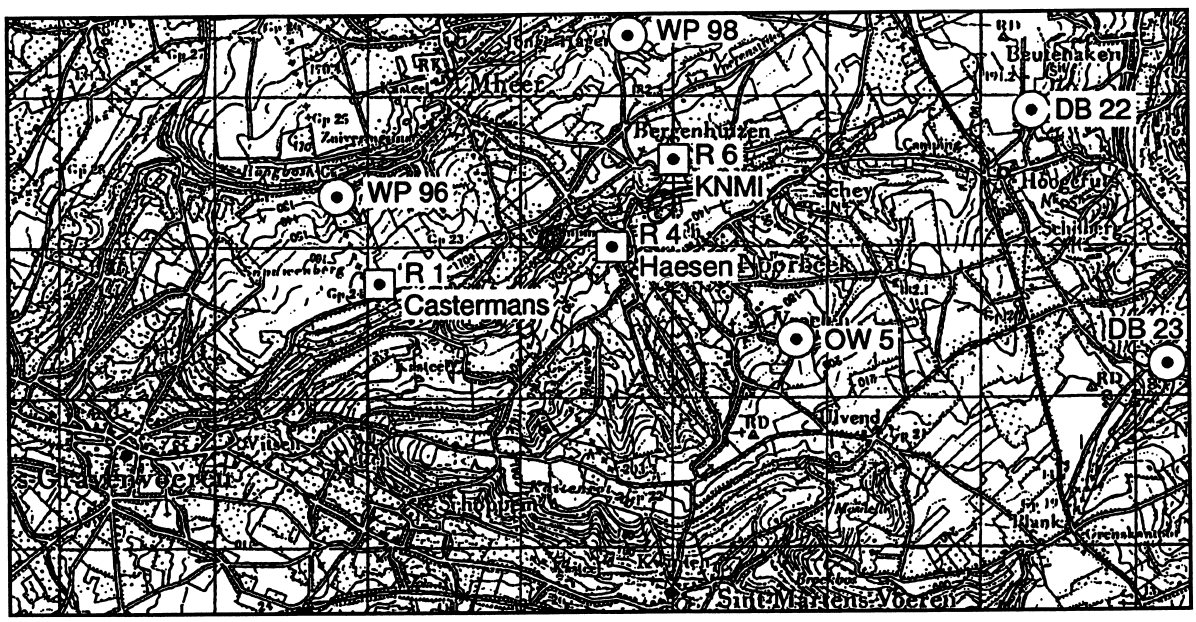
Appendix C PARAMETER VALUES

parameter	value		parameter	value
q1 (entire bog)	0.79 mm/d		c3 (high bog)	40000-100000 d
q1 (grass)	1.10 mm/d		c3 (bog margin)	10000-110000 d
q1 (forest)	1.00 mm/d		c3 (forest)	3000-20000 d
			c3 (fenpeat)	1000-20000 d
h0	surface level		c3 (mound)	500-6000 d
c1 (drains)	10 d		c3 (till)	500 d
c1 (rivers)	20 d		c3 (drains)	10-110000 d
c1 (entire bog)	20 d		c3 (silklei)	3000 d
c1 (fenpeat)	50 d		c3 (alluvial)	2000 d
c1 (diffuse)	50 d		c3 (rest of model)	1 d
c1 (rest of model)	0 d			
			T3 (entire bog)	4-23 m^2/d
T1 (high bog)	125 m^2/d		T3 (forest)	4-23 m^2/d
T1 (bog margin)	10 m^2/d		T3 (fenpeat)	20-40 m^2/d
T1 (rest of model)	1 m^2/d		T3 (mound)	8-125 m^2/d
			T3 (till)	20-40 m^2/d
c2 (entire bog)	1 d		T3 (esker)	250-750 m^2/d
c2 (forest)	1 d		T3 (drains)	5-250 m^2/d
c2 (fenpeat)	1 d		T3 (Silver)	18-40 m^2/d
c2 (rest of model)	1 d		T3 (Brosna)	18-400 m^2/d
			T3 (alluvial)	20-700 m^2/d
T2 (high bog)	0.1 m^2/d		T3 (silklei)	10-20 m^2/d
T2 (bog margin)	0.05 m^2/d		T3 (clay)	100-250 m^2/d
T2 (rest of model)	1 m^2/d		T3 (rest of model)	20-500 m^2/d
q2 (model)	0 mm/d		q3 (model)	0 mm/d

Bijlage D1 Locatie peilbuizen



Figuur D1: Locatiekaart peilbuizen en afvoermeetpunten in het dal van de Noor.



Figuur D2: Locatiekaart diepe peilbuizen stroomgebied van de Noor.

Bijlage D2 Plaatsbepaling peilbuizen in modelraster

Elke peilbuis in het gebied bevindt zich in een cel van het modelraster van MODFLOW. De rij en kolom van de peilbuizen is uitgezocht aan de hand van grafieken uit de scriptie van Kroon en Weerts (1995). Zij hebben de plaats bepaald aan de hand van topografische kaarten en dat brengt een onnauwkeurigheid met zich mee. Dit kan tot gevolg hebben dat de plaats van een peilbuis aan een verkeerde cel is toegekend. Enkele peilbuizen net buiten het modelgebied zijn aan een cel op de modelrand toegekend.

Tabel D1 bevat de plaats van enkele peilbuizen, de diepte van de peilbuis, in welke Formatie het filter zit, de gemiddelde grondwaterstand in de peilbuis en de rij, kolom en diepte in het modelraster.

Tabel D1: Gegevens van enkele peilbuizen.

Peilbuis	diepte [m]	GWS [m -mv]	Formatie[1)]	rij	kolom	z in model [m]
B15	6	5	FvV	36	48	135
B17	7	2	FvV	30	49	120
B24	2	0,5	dal	32	42	118
B34	7	0,5	FvV	20	50	115
B35	8	2	FvV	17	50	116
B36	9	6	FvV	12	50	128
DB22	54	45	FvG	37	70	136
DB23	55	42	FvV	44	69	165
OW1	35	34	FvG	40	64	142
OW5	43	38	FvG	42	66	150
OW7	5	3	rego	34	49	130
WP98	27	21	FvG	2	63	154

[1)] FvV = Formatie van Vaals, FvG = Formatie van Gulpen, dal = beekdalopvulling en rego = regoliet
GWS = gemiddelde grondwaterstand [m -maaiveld]

De locatie van de verschillende peilbuizen staat in de bijlage D1.

Bijlage E Neerslagoverschot SWAP-eenheden

In de volgende tabel staat het gemiddeld neerslagoverschot [mm/jaar] van de periode 1990-1994 van alle SWAP-eenheden.

Tabel E1: Gemiddeld neerslagoverschot [mm/jaar] (1990-1994) voor alle SWAP-eenheden.

SWAP-eenheid	Neerslagoverschot
s1	261
s2	309
s3	273
s4	273
s5	273
s6	315
s7	315
s8	315
s9	241
s10	378
s11	284
s12	284
s13	284
s14	323
s15	323
s16	245
s17	381
s18	381
s19	273
s20	284
s21	378

Bijlage F Programma AL_RCH3

Het programma is geschreven om de berekende grondwateraanvulling voor invoer in MODFLOW geschikt te maken. De resultaten zijn geschikt voor niet-stationaire simulaties. Het programma AL_RCH3 maakt de met SWAP berekende grondwateraanvulling geschikt voor invoer in MODFLOW. Het actuele neerslagoverschot [mm/dag] van een Noor-eenheid wordt toegekend aan een cel in het modelraster van MODFLOW. Elke Noor-eenheid heeft een nummer die weer aan de betreffende cellen zijn toegekend (zie bijlage A).

Het neerslagoverschot van alle Noor-eenheden moet worden opgeslagen in kolommen verdeeld over vijf invoerbestanden. Voor elke cel in het modelraster van MODFLOW is het nummer van een Noor-eenheid ingevoerd in één invoerbestand.
De uitvoer bestaat uit één groot bestand met daarin voor elke cel in het modelraster van MODFLOW de grondwateraanvulling [m/10dagen]. Dit bestand is geschikt voor invoer in het verzadigd grondwatermodel in MODFLOW.

Bijlage G Grondwateraanvulling met SWAP aanpassingen

De grondwateraanvulling is te veel vertraagd en gedempt als alleen de verzadigde doorlatendheden van de ondergronden wordt verhoogd (figuren 6.3 en 6.4). De volgende aanpassingen in SWAP zijn toegepast om een betere grondwateraanvulling te krijgen:

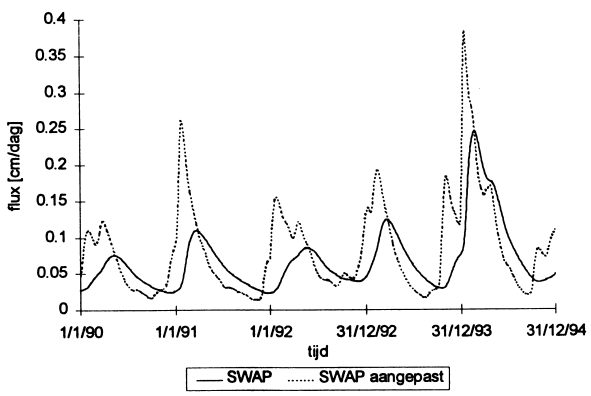
- Invoering van arbitrair gekozen effectieve verzadigde doorlatendheidswaarden voor löss- en beekdalondergrond (250 cm/dag), regolietondergrond (500 cm/dag), Formatie van Gulpen (10000 cm/dag) en Formatie van Vaals (2500 cm/dag). Deze waarden zijn ingevoerd om spleetstroming te simuleren.
- Op het plateau nabij 'de Planck' is het bodemtype löss vervangen voor regoliet.
- De dikte van de regoliet is teruggebracht van 3 m naar 2 m.
- Bij matig diepe grondwaterstanden (3 en 7 m) is de onderrandvoorwaarde vrije drainage vervangen door een opgegeven grondwaterstand.

Alle aanpassingen zijn gemaakt naar aanleiding van de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.5. De aanpassingen hebben allemaal een verkleining van de vertraging en demping van het neerslagoverschot tot gevolg. De model-eenheden van SWAP (bijlage A1) kunnen door deze aanpassingen niet gehandhaafd worden. De nieuwe SWAP-eenheden worden hieronder voor elke Noor-eenheid weergegeven.

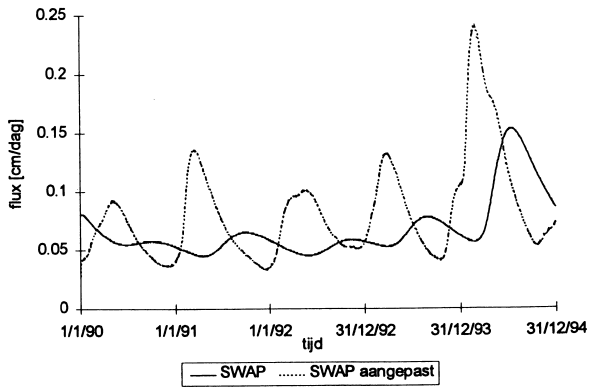
Tabel G1: SWAP-eenheden voor elke Noor-eenheid.

Noor-eenheid	SWAP-eenheid	Noor-eenheid	SWAP-eenheid	Noor-eenheid	SWAP-eenheid
1	k1	16	k2	31	k16
2	k1	17	k7	32	k17
3	k1	18	k8	33	k17
4	k1	19	k9	34	k18
5	k2	20	k10	35	k19
6	k3	21	k11	36	k20
7	k1	22	k11	37	k21
8	k1	23	k12	38	k22
9	k4	24	k11	39	k23
10	k1	25	k13	40	k24
11	k4	26	k14	41	k25
12	k5	27	k15	42	k26
13	k1	28	k16	43	k27
14	k6	29	k16	44	k28
15	k2	30	k16	45	k29

De grondwateraanvulling op 7, 15, 25 en 45 m diepte van SWAP-eenheid s1 zijn weergegeven in de figuren G1 tot en met G4.

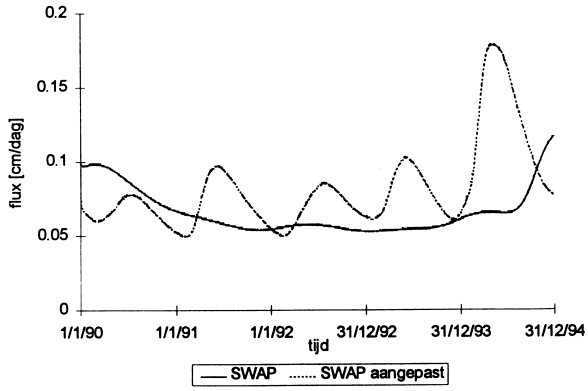


Figuur G1: Grondwateraanvulling op 7 m diepte.

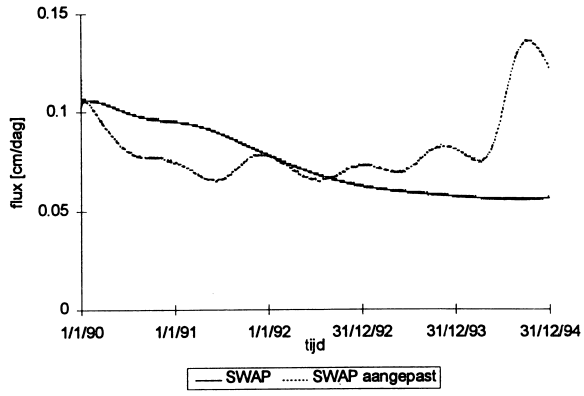


Figuur G2: Grondwateraanvulling op 15 m diepte.

De grondwateraanvulling van modelvariant 'SWAP aangepast' is op 7 m diepte ruim 1 maand minder vertraagd en de piekdemping is zo'n 40% kleiner. De grondwateraanvulling op 15 m diepte is ongeveer 5 maanden minder vertraagd en de piekdemping is zo'n 60% kleiner.



Figuur G3: Grondwateraanvulling op 25 m diepte.



Figuur G4: Grondwateraanvulling op 45 m diepte.

In de figuren G3 en G4 is te zien dat het verschil in vertraging en demping op grote diepte steeds groter wordt. Het verschil tussen de jaren is met de modelvariant 'SWAP, aangepast' duidelijk te zien. De grondwateraanvulling reageert nu op het grote neerslagoverschot aan het einde van 1993.

Bovenstaande aanpassingen hebben echter ook invloed op de processen in de wortelzone. Het vochtgehalte in de wortelzone wordt door de aanpassingen lager, waardoor de actuele transpiratie van het gewas ook lager wordt. De met SWAP berekende grondwateraanvulling wordt hierdoor iets hoger. Tabel G1 geeft de gemiddelde grondwateraanvulling [mm/jaar] (1990-1994) van een aantal representatieve SWAP-eenheden, zoals in bijlage E staat vermeld en grondwateraanvulling nadat bovenstaande aanpassingen zijn doorgevoerd.

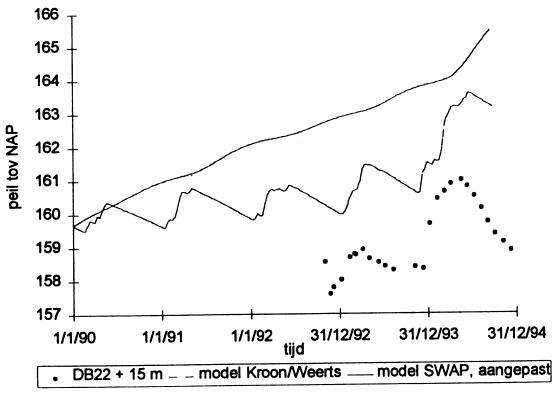
Tabel G1: Gemiddelde grondwateraanvulling [mm/jaar] (1990-1994) vóór en na aanpassing van invoergegevens in SWAP.

SWAP-eenheid	voor	na	verschil
gras op löss (s1)	261	328	26%
maïs op löss (s2)	309	365	18%
gras op regoliet (s5)	273	330	21%
maïs op regoliet (s7)	315	366	16%
loofbos op regoliet (s9c)	241	287	19%
graan op regoliet (s10)	378	378	0%
loofbos op beekdal, met gws (s20c)	284	295	4%

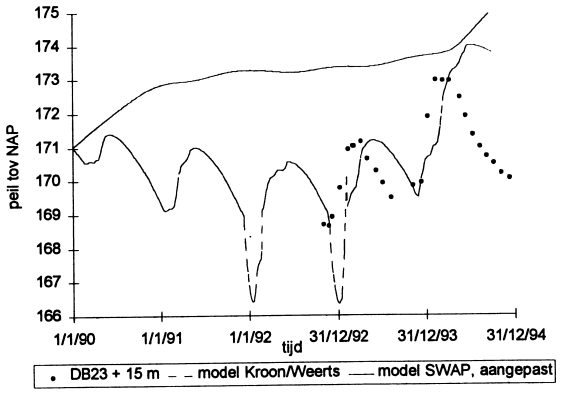
Bijlage H Gemeten en berekende stijghoogten

In deze bijlage staan van enkele peilbuizen de berekende en gemeten stijghoogten weergegeven. In bijlage D is de locatie van de verschillende peilbuizen te vinden.

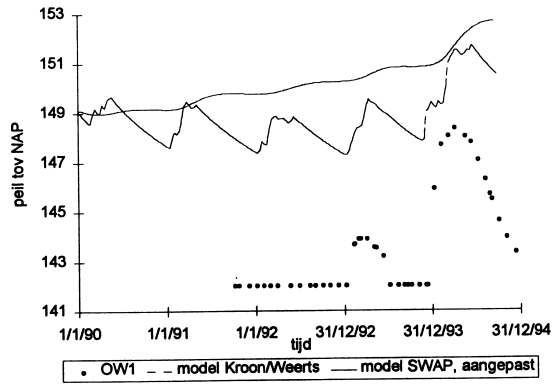
Diepe peilbuizen
Gemeten en berekende stijghoogte van enkele diepe peilbuizen als de grondwateraanvulling met SWAP wordt berekend volgens de in bijlage G genoemde aanpassingen: modelvariant 'model SWAP, aangepast'.



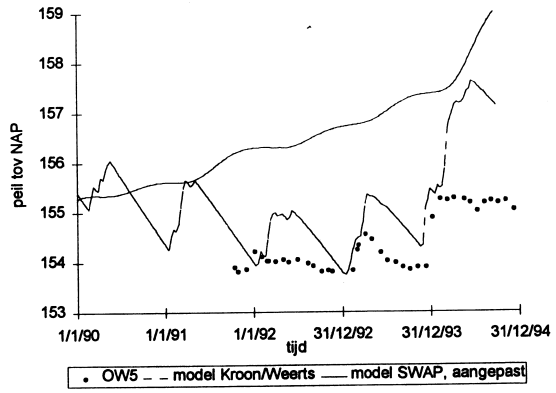
Figuur H1: Stijghoogte DB22.



Figuur H2: Stijghoogte DB23.



Figuur H3: Stijghoogte OW1.

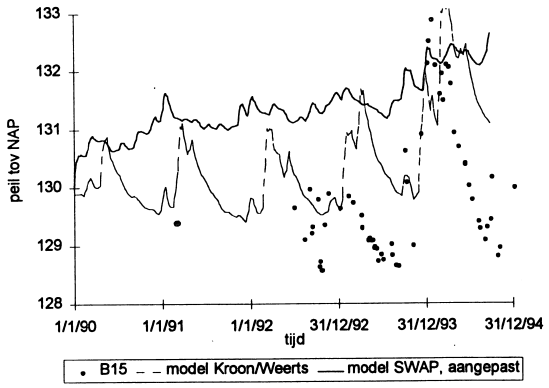


Figuur H4: Stijghoogte OW5.

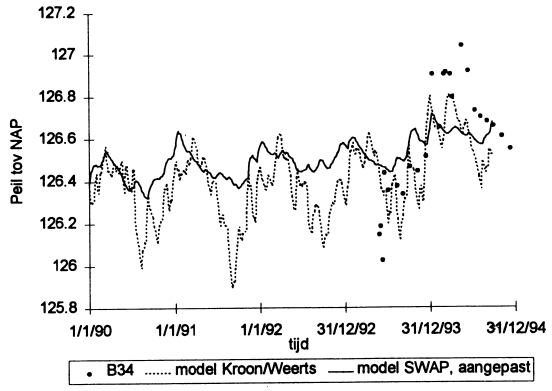
De berekende stijghoogten in de diepe peilbuizen hebben met de modelvariant 'model SWAP, aangepast' een stijghoogtefluctuatie die nog steeds te weinig varieert.

Ondiepe peilbuizen

Gemeten en berekende stijghoogte van enkele ondiepe peilbuizen als de grondwateraanvulling met SWAP wordt berekend volgens de in bijlage G genoemde aanpassingen: modelvariant 'model SWAP, aangepast'.

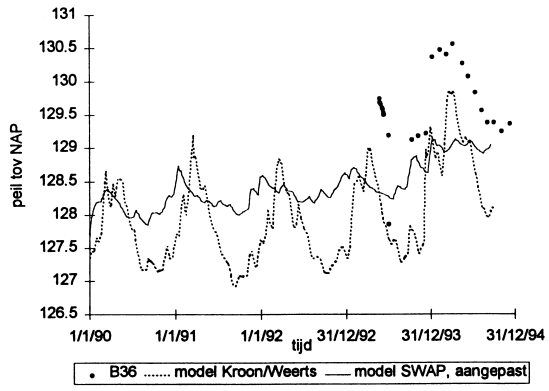


Figuur H5: Stijghoogte B15.

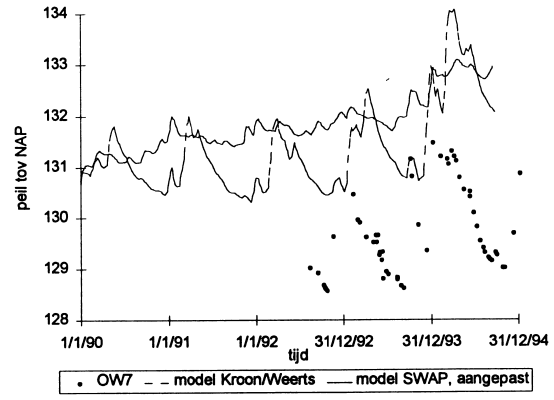


Figuur H6: Stijghoogte B34.

De gemeten stijghoogten in peilbuis B15 hebben een stijghoogtefluctuatie van 4,3 m, terwijl de berekende stijghoogten met de modelvariant 'model SWAP, aangepast' een fluctuatie hebben van 2,6 m. De fluctuatie is te klein. De vertraging is goed gesimuleerd. Hetzelfde geldt voor de stijghoogten in B34, B36 en OW7.



Figuur H7: Stijghoogte B36.



Figuur H8: Stijghoogte OW7.