32/446 (306.1) 2e ex

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

Nutriëntenbelasting van grond- en oppervlaktewater in de stroomgebieden van de Beerze, de Reusel en de Rosep

Simulatie van de regionale hydrologie

F.J.E. van der Bolt
P.E.V. van Walsum
P. Groenendijk

Rapport 306.1

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS
0000 0728 3001

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1996

- 7 JAN. 1997

REFERAAT

F.J.E. van der Bolt, P.E.V. van Walsum en P. Groenendijk, 1996. *Nutriëntenbelasting van grond- en oppervlaktewater in de stroomgebieden van de Beerze, de Reusel en de Rosep; simulatie van de regionale hydrologie*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 306.1. 78 blz.; 19 fig.; 16 tab.; 30 ref.; 1 aanh.

Voor de provincie Noord-Brabant is een methodiek ontwikkeld om met modellen de waterkwaliteit regionaal te beschrijven. De methode is toegepast op de beekdalen van de Beerze, Reusel en Rosep. Eerste is de regionale hydrologie gesimuleerd met het pseudo-driedimensionale, niet-stationaire grondwaterstromingsmodel SIMGRO. SIMGRO beschrijft het grondwatersysteem, het oppervlaktewatersysteem, de onverzadigde zone en de interacties tussen deze deelsystemen. De invoergegevens komen uit geografische gegevensbestanden. De beekdalen hebben de schematisering bepaald, die met een geografisch informatiesysteem is gerealiseerd. De resultaten beschrijven het regionaal hydrologisch systeem adequaat en kunnen worden gebruikt voor regionale stoftransportberekeningen.

Trefwoorden: beekdal, grondwaterstroming, simulatiemodel, waterhuishouding, waterkwaliteit

ISSN 0927-4499

©1996 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.
Tel.: (0317) 474200; fax: (0317) 424812; e-mail: postkamer@sc.dlo.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Project 5803 Rap306-1.IS\09-96

Inhoud

	blz.
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Doel en methode	13
2.1 Probleemstelling	13
2.2 Doelstelling van het onderzoek	13
2.3 Methode	13
2.4 Eisen aan het grondwaterstromingsmodel	14
2.5 Modelbeschrijving	15
3 Beschrijving van het onderzoeksgebied	19
3.1 Fysiografie	19
3.2 Geologie	19
3.3 Landschappelijke ontwikkeling en landbouwkundige situatie	20
3.4 Bodemkundige situatie	21
3.5 Ontwatering	22
3.6 Beregening	22
3.7 Grondwatersysteem	22
4 Schematisering en invoergegevens	25
4.1 Koppeling GIS-SIMGRO	25
4.2 Begrenzing van het studiegebied	27
4.3 Het elementennetwerk	27
4.4 Geohydrologische schematisering	28
4.5 Geohydrologische gegevens	31
4.6 Gegevens van de onverzadigde zone	31
4.7 Stroomgebiedsindeling en maaiveldshoogten	32
4.8 Gebiedsschematisering	33
4.9 Bodemgebruik	34
4.10 Meteorologische data	35
4.11 Schematisering en invoergegevens van het oppervlaktewater	37
4.12 Initiële waarden	44
5 Resultaten van de modelberekeningen	45
5.1 Globale toetsing voor winter en zomer 1980 en 1982	45
5.2 Kwalitatieve toetsing van de huidige situatie m.b.v. langjarige gemiddelden	48
5.2.1 Grondwaterstanden	48
5.2.2 Kwel/wegzijging	53
5.2.3 Oppervlaktewaterafvoeren	55

5.3 Kwantitatieve toetsing voor de reeks 1970-1986. 57
5.3.1 Toetsing van de berekende afvoer van het oppervlaktewatersysteem 57
5.3.2 Toetsing van berekende grondwaterstanden 59
5.3.3 Toetsing van berekende verdamping en beregeningsgift 61

6 Conclusies 69
6.1 Simulatieresultaten 69
6.2 Methode 70

Literatuur 73

Woord vooraf

In opdracht van het bureau Bodembescherming en het bureau Oppervlaktewater van de Provincie Noord-Brabant heeft DLO-Staring Centrum een verkennende modelstudie naar de nutriëntenbelasting van grond- en oppervlaktewater in de stroomgebieden van de Beerze, Reusel en Rosep verricht. Het onderzoek past binnen het stappenplan dat moet leiden tot plannen van aanpak voor de realisering van de Ecologische HoofdStructuur. De provincie wil met de resultaten van dit onderzoek het te voeren beleid voor beperking van de stikstofbemesting onderbouwen.

Het onderzoek is uitgevoerd in de tweede helft van 1991 (koppeling GIS) en eerste helft van 1992 (simulatie regionale waterhuishouding). Het onderzoek werd begeleid door een commissie waarin zitting hebben gehad:
- K. Betten (Waterschap De Dommel)
- A. Boer (Gewestelijke Raad van het Landbouwschap)
- M. Dewachter (Bureau Grondwater, Prov. Noord-Brabant)
- J. Gardeniers (Landbouw Universiteit Wageningen, vakgroep natuurbeheer)
- A. Mol (Bureau Oppervlaktewater, Prov. Noord-Brabant)
- F. Kouwe (Gemeenschappelijke Technologische Dienst Oost-Brabant)
- J. Leunk (Bureau Grondwater, Prov. Noord-Brabant)
- I. Meeuwissen (Ministerie van Landbouw (MLNV), Natuurbeheer en Visserij, Landinrichtingsdienst)
- G. Schouten (MLNV, Landinrichtingsdienst)
- R. Straatman (Waterleidingmaatschappij Oost-Brabant)
- R. Stuurman (Instituut voor Grondwater en Geo-Energie TNO)
- W. Thijssen (MLNV, Consulentschap Landbouw)
- J. van Rijen (MLNV, Consulentschap NBLF)
- R. Ruijtenberg (Bureau Grondwater, Prov. Noord-Brabant)
- R. Siebinga (Bureau Bodembescherming, Prov. Noord-Brabant)
- J.P. Vermeulen (Afdeling Ruimtelijke Ordening Buitengebied, Prov. Noord-Brabant)
- E. van Zadelhoff (MLNV, Consulentschap NBLF)

In de loop van het onderzoek hebben diverse instanties gegevens aangedragen. Het waterschap de Dommel heeft gegevens over de waterlopen in het studiegebied ter beschikking gesteld. De Regionale Directie Noord-Brabant van Rijkswaterstaat heeft gegevens over de dimensies en de peilen van het Wilhelminakanaal verstrekt. Het bureau Grondwater van de provincie Noord-Brabant heeft gegevens over de grondwater-onttrekkingen geleverd. De Waterleidingmaatschappij Oost-Brabant heeft gegevens van pompstations verstrekt alsook intreeweerstanden van het Wilhelminakanaal.

Ook hebben een aantal personen hun medewerking verleend. P.J.T van Bakel heeft in de beginfase geholpen de onderzoeksopzet vorm te geven. E.P. Querner heeft advies gegeven over het gebruik van SIMGRO. G.A. van Soesbergen heeft tabellen samengesteld voor de effectieve dikten van de wortelzone als funktie van het bodemtype en de grondwaterstand. H. Kleijer heeft zijn bestanden met beoordeling

van de representativiteit van de stijgbuizen ter beschikking gesteld en heeft aangegeven waarom de Gt-kaart 1:50 000 voor het gebied rond de Mortelen en het Kerkebosch niet geheel correct is. A.F. van Holst heeft de data van het Bodemkundig-Hydrologisch onderzoek Noord-Brabant en de stijgbuisgegevens ter beschikking gesteld.

Samenvatting

Om het beleid van de provincie Noord-Brabant inzake de bescherming van de kwaliteit van het grond- en oppervlaktewater te ondersteunen is een methodiek ontwikkeld om de waterkwaliteit regionaal te beschrijven. Met een reeks gekoppelde modellen wordt uiteindelijk de nutriëntenbelasting van grond- en oppervlaktewater uitgerekend. Om deze uitspoeling van nutriënten te simuleren is het nodig de waterstromen in de bodem en de diepere ondergrond te kwantificeren. De eerste stap bestaat uit het simuleren van de regionale hydrologie. Daartoe is het pseudo-driedimensionale, niet-stationaire (grond)waterstromingsmodel SIMGRO gebruikt. SIMGRO beschrijft het grondwatersysteem, het oppervlaktewatersysteem, de onverzadigde zone (het topsysteem) en de interacties tussen deze deelsystemen.

In deze studie zijn de voor SIMGRO benodigde invoergegevens met behulp van het GIS-pakket ARC/INFO uit geografische databestanden aangemaakt. De geohydrologische schematisering en de gebiedsbegrenzing zijn gebaseerd op de Centrale Slenk studie van IWACO (1989). Bij het genereren van het elementennetwerk en de indeling in deelgebieden is ervoor gezorgd dat de beekdalen herkenbaar zijn. De schematisering van het studiegebied in deelgebieden is tot stand gebracht op basis van de geografisch gebonden invoergegevens.

Omdat geen uitgebreid meetprogramma kon worden uitgevoerd zijn de rekenresultaten niet gecalibreerd. Wel zijn de resultaten getoetst aan beschikbare gegevens en gangbare inzichten. De gesimuleerde grondwaterstandsfluctuaties en de berekende afvoeren lijken goed overeen te komen met gemeten waarden. De berekende verdamping en beregenings giften zijn voor het doel van deze studie acceptabel te noemen. Het ruimtelijk onderscheidend vermogen voldoet aan de doelstelling van het onderzoek. De resultaten kunnen worden gebruikt voor het kwantificeren van de uitspoeling van nutriënten.

De gevolgde methode biedt mogelijkheden om regionale hydrologische scenariostudies relatief snel en efficiënt te kunnen verrichten; daartoe moet de koppeling van het model met GIS verder worden uitgewerkten/of geformaliseerd en moeten de benodigde GIS-bestanden worden aangelegd en/of uitgebreid.

Op basis van deze studie kunnen ook verkennende systeemanalyses kunnen worden gedaan door aanvullend stroombanen te berekenen. Hiermee kunnen kan inzicht worden verkregen in de begrenzingen van hydrologische systemen, kunnen verblijftijden worden berekend, kan de herkomst van (kwel)water worden getraceerd, kan de kwaliteit van het kwelwater worden geschat, en kan worden bepaald of het kwelwater de wortelzone bereikt.

1 Inleiding

De beekdalen van de Beerze en de Reusel worden in diverse beleidsnota's op zowel provinciaal als nationaal niveau genoemd als gebieden met bijzondere natuur- en landschapswaarden. In het Natuurbeleidsplan wordt dit relatief grote gebied genoemd als kansrijk gebied dat in aanmerking komt voor projecten gericht op het tegengaan van of het voorkomen van verdroging en gericht op een integrale aanpak van eutrofiëringsbestrijding van oppervlaktewateren.

In het waterhuishoudingsplan, het ontwerp-streekplan en het ontwerp-natuurbeleidsplan van de provincie Noord-Brabant wordt voor de stroomgebieden van de Beerze en de Reusel een integrale gebiedsgerichte uitwerking aangekondigd waarin ook de doelstellingen van het milieubeleidsplan worden meegenomen. Deze uitwerking moet leiden tot plannen van aanpak voor de realisering van de Ecologische HoofdStructuur, voor de ontwikkeling van de rundveehouderij en voor de ontwikkeling van de verblijfs- en dagrecreatie waarbij de randvoorwaarden worden bepaald door het natuur- en milieubeleid. Om deze plannen van aanpak te kunnen realiseren heeft de Provincie Noord-Brabant een stappenplan opgesteld. Het stappenplan voorziet in hydrologisch onderzoek om de formulering van effectieve maatregelen te kunnen onderbouwen en om uit te zoeken hoe de voor de natuurwaarden noodzakelijke waterkwaliteit en -kwantiteit worden gehandhaafd of worden ontwikkeld. Daartoe heeft de Provincie Noord-Brabant het Staring Centrum in 1991 de opdracht gegeven de stikstof- en fosforstromen van de landbouwgebieden naar de natuurgebieden via het ondiepe grondwater en het oppervlaktewater te kwantificeren. Aanvullend worden de effecten van een aantal door de provincie opgestelde gebiedsgedifferentieerde scenario's (gericht op zowel het beperken van de nutriëntenbelasting als op ingrepen in het hydrologisch systeem) op de waterkwaliteit onderzocht.

Om dit mogelijk te maken is een methode ontwikkeld die met behulp van modellen de water- en nutriëntenhuishouding op regionale schaal beschrijft. Daarbij zijn geografische informatie-bestanden gebruikt om de invoergegevens aan te maken.

Dit rapport is het eerste deel van een serie van vier rapporten waarin conform de studie-opzet achtereenvolgens de waterhuishouding, de nutriëntenhuishouding, de effecten van maatregelen ten aanzien van de bemesting op de nutrientenbelasting, en de effecten van ingrepen in het waterbeheer op de nutriëntenbelasting worden besproken.

In hoofdstuk 2 worden het doel en de methode beschreven. Een beschrijving van het onderzoeksgebied volgt in hoofdstuk 3. Hoe op basis van GIS-bestanden de invoer voor SIMGRO is aangemaakt en hoe de schematisering met behulp van GIS tot stand is gebracht staat beschreven in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden de rekenresultaten gepresenteerd. De conclusies staan in hoofdstuk 6.

2 Doel en methode

2.1 Probleemstelling

In Midden-Brabant bestaan milieukundige problemen (wordt niet voldaan aan normen) als gevolg van de belasting van grond- en oppervlaktewater doordat de landbouw relatief intensief is. Deze nutriëntenbelasting vormt een bedreiging voor bestande of te ontwikkelen natuurwaarden. Een groot gedeelte van de landbouwgronden wordt intensief belast met meststoffen, met nutriëntenuitspoeling naar grond- en oppervlaktewater als gevolg. In de stroomgebieden van de Beerze en de Reusel zijn grote natuurwaarden aanwezig. Om de natuurwaarden in het gebied veilig te stellen dan wel te vergroten wordt in het kader van de gebiedsgerichte aanpak beperking van de bemesting voorgesteld. De fosfaatbemesting op deze gronden zal dan volgens de nationale regelgeving moeten worden beperkt. De provincie Noord-Brabant realiseert de noodzakelijke beperking van de stikstofbemesting op dit moment via de Bijdrage Regeling Bodembeschermingsgebieden.

Om inzicht te krijgen in de gevolgen van mogelijke ingrepen voor de N- en P-uitspoeling heeft de provincie Noord-Brabant de opdracht verleend om effecten van ingrepen in de bemesting en het waterbeheer te kwantificeren door middel van scenarioberekeningen met het nutriëntenmodel ANIMO. Om deze berekeningen mogelijk te maken worden eerst de waterbalanstermen berekend met het regionaal grondwaterstromingsmodel SIMGRO.

2.2 Doelstelling van het onderzoek

Doel van dit deel van het onderzoek is het aanleveren van hydrologische termen ten behoeve van de berekening van de stikstof- en fosforuitspoeling met het model ANIMO waarin de nutriëntenkringlopen worden gemodelleerd. Tevens worden fluxen op jaarbasis berekend die gebruikt worden voor de berekening van het stoftransport in de diepere ondergrond. De kwantitatieve beschrijving moet het mogelijk maken effecten van gebiedsgerichte waterhuishoudkundige maatregelen op de nutriënten-belasting mogelijk te maken.

2.3 Methode

De vraagstelling vraagt om een (quasi-)driedimensionale niet-stationaire procesmatige benadering van het probleem.

- Driedimensionaal omdat op (sub)regionale schaal de interacties via het hydrologisch systeem van essentieel belang zijn.
- Procesmatig omdat scenario's worden doorgerekend waardoor het systeem zal veranderen (en waardoor empirische relaties niet meer geldig zijn en dus niet

mogen worden geëxtrapoleerd).
- Niet-stationair omdat als gevolg van de optredende processen de belastingen sterk kunnen variëren binnen een weerjaar maar ook tussen afzonderlijke weerjaren en omdat scenario's betrekking kunnen hebben op het tijdstip van toediening van mestgiften.

Dit betekent dat aan de te gebruiken methode zware inhoudelijke-, rekentechnische-, logistieke- en kwaliteitseisen worden gesteld om aan de doelstelling te kunnen voldoen.

De regionale hydrologie wordt gesimuleerd met behulp van een (quasi) driedimensionaal rekenmodel dat zowel de waterstroming in de verzadigde als de onverzadigde zone van de bodem beschrijft. Ook beschrijft het model de interacties tussen het grond- en oppervlaktewater.

Dergelijke regionale grondwaterstromingsmodellen vereisen een groot aantal invoergegevens. In deze studie is geprobeerd deze gegevens zoveel mogelijk te ontlenen aan bestanden met geografische gebonden informatie (GIS-bestanden). Voordeel van een dergelijke werkwijze is dat het genereren van invoerdata snel en zonder introductie van fouten kan verlopen. Voorwaarde is dat er goed onderhouden GIS-bestanden aanwezig zijn en dat de programmatuur om de gegevens uit deze bestanden om te zetten naar invoergegevens voor het gebruikte regionale grondwaterstromingsmodel beschikbaar is.

Wanneer de gebiedsgegevens uit de gegevensbestanden zijn verzameld, en wanneer nodig ontbrekende gegevens zijn verzameld en/of aangemaakt, kan het studiegebied worden geschematiseerd in deelgebieden en geohydrologische pakketten. Aansluitend worden de invoergegevens uit de gegevensbestanden gehaald en wordt de hydrologie voor een aantal weerjaren gesimuleerd.

Omdat het hier gaat om verkennende berekeningen en er geen uitgebreidde meetprogramma's zijn opgestart om de resultaten te kunnen onderbouwen kan niet worden gecalibreerd. Wel zijn de rekenresultaten getoetst aan beschikbare (meet)gegevens om de juistheid van de schematisering en de invoergegevens vast te stellen (validatie). De berekende uitvoergegevens voor deze reeks weerjaren kunnen worden gebruikt als invoer voor stoftransportmodellen.

2.4 Eisen aan het grondwaterstromingsmodel

De berekening van de nutriëntenbelasting van oppervlaktewater en beekdalen met hoge natuurwaarden via regionale grondwaterstroming stelt de volgende eisen aan de hydrologische schematisering:
- De koppeling tussen de deelgebieden dient in de modellering tot uitdrukking te komen. Gezien de doelstelling is het noodzakelijk de horizontale grondwaterstroming over grotere afstanden naar beken te berekenen. De beken hebben behalve voor de beekdalen ook een afvoerfunctie voor de diepere pakketten.

- De dynamiek van de bodemvochtbeweging moet in voldoende detail worden beschreven. Deze is van groot belang voor met name de stikstofkringloop (nitrificatie/denitrificatie).
- De koppeling tussen grondwater en oppervlaktewater dient in beschouwing te worden genomen. De uitspoeling van stikstof en fosfor is o.a. een functie van de ontwatering.
- Om de effecten van de optredende processen op de stofstromen in te kunnen schatten zijn hydrologische gegevens over een periode van minimaal 10 weerjaren nodig.
- De maximaal toelaatbare tijdstaplengte voor de berekening van het nutriënten-transport en daarmee eveneens voor de hydrologie bedraagt 10 dagen.

Op basis van deze eisen is gekozen voor gebruik van het grondwaterstromingsmodel SIMGRO.

2.5 Modelbeschrijving

SIMGRO (Querner en van Bakel, 1989) is een regionaal niet-stationair grondwater-stromingsmodel waarin behalve de grondwaterstroming ook de bodemvochtbeweging en de interactie met het oppervlaktewatersysteem wordt berekend. Daartoe beschrijft het de hydrologische processen, inclusief beregening of irrigatie, in een gebied (fig. 1). Door de verzadigde zone quasi-driedimensionaal te modelleren worden accurate resultaten verkregen met relatief weinig invoergegevens en met een beperkte rekentijd.

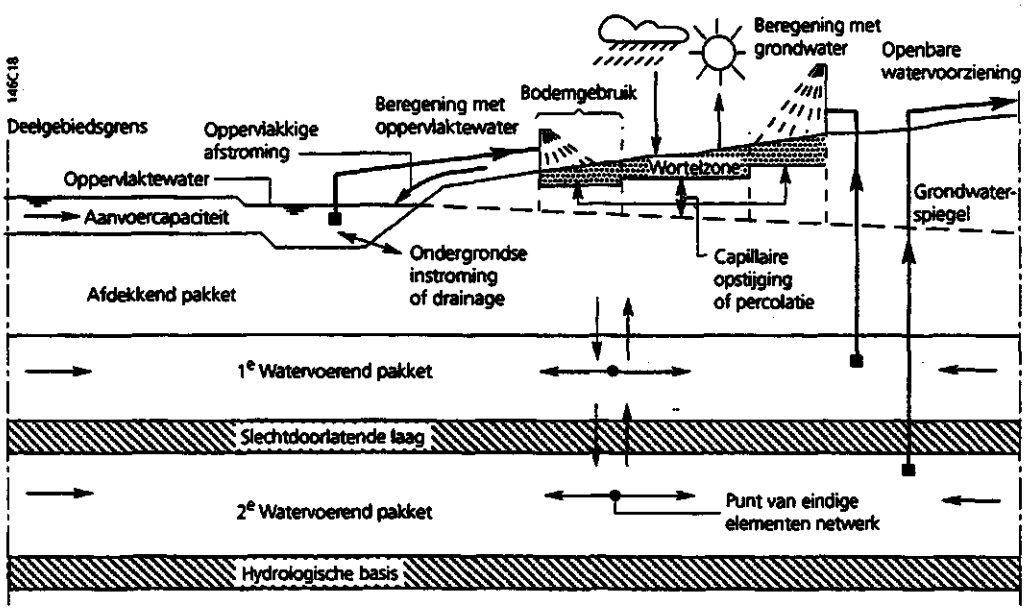

Fig. 1 Schematisering van de waterhuishouding in een deelgebied volgens SIMGRO (Querner en van Bakel, 1989)

De stroming in de verzadigde zone wordt berekend met de eindige elementenmethode. Daartoe wordt het gebied verdeeld in een aantal elementen waarvan de hoekpunten knooppunten vormen. De bodem is geschematiseerd in watervoerende pakketten en weerstandsbiedende lagen. In de aquifers wordt de stroming horizontaal beschouwd, in de aquitards wordt alleen een verticale stroming verondersteld. De stijghoogtes en de fluxen worden per knooppunt berekend met behulp van lineaire interpolatie-functies. De randvoorwaarden voor het netwerk van elementen bestaan uit opgelegde potentialen of fluxen. Onttrekkingen kunnen per knooppunt worden opgelegd.

De onverzadigde zone is onderverdeeld in twee reservoirs; de wortelzone en de onverzadigde ondergrond. De (verticale) stroming van water in de onverzadigde zone wordt pseudo-stationair berekend. De waterbalans van de wortelzone wordt per tijdstap opgesteld waarbij processen als neerslag, verdamping, gewasopname, capillaire opstijging en wegzijging worden meegenomen. Wanneer een zeker evenwichtsvochtgehalte wordt overschreden percoleert het overschot naar de onverzadigde ondergrond; wanneer het vochtgehalte in de wortelzone kleiner is dan het evenwichtsvochtgehalte kan er een capillaire flux vanuit de verzadigde zone optreden. Met behulp van de waterbalans van de ondergrond en een bergings-coëfficiënt wordt de diepte van het grondwater berekend. De waterbalans van de onverzadigde zone wordt, om de benodigde invoergegevens en de rekentijd te beperken, per landgebruiksvorm voor een deelgebied berekend. Een deelgebied wordt gevormd door een aantal knooppunten uit het elementen-netwerk. De grondwaterstand van een deelgebied wordt berekend door de grondwaterstanden van de knooppunten te middelen waarbij gewogen wordt naar het oppervlak per knooppunt. De bodemfysische eigenschappen en de hydrologische processen in een deelgebied moeten vrijwel homogeen zijn. Daarom is de onderverdeling van het gebied in deelgebieden erg belangrijk. De binnen een deelgebied onderscheiden bodemgebruiksvormen worden niet ruimtelijk gedefinieerd, maar worden gegeven als een percentage van het oppervlak van het totale deelgebied. De randvoorwaarden voor dit systeem worden gevormd door de aan het bodemoppervlak/in de wortelzone optredende hydrologische processen.

Het oppervlaktewatersysteem van een deelgebied wordt weergegeven door een reservoir met een overstort aan het eind. Alle instroming, uitstroming en onttrekking gebeuren naar en vanuit dit reservoir. De processen die worden beschreven zijn wateraan- of afvoer, drainage of infiltratie, oppervlakkige afstroming en onttrekking voor beregening. Voor de winterperiode moet een stuwpeil worden gegeven, voor de zomerperiode een streefpeil. Voor deze studie is gebruik gemaakt van een aangepaste versie van SIMGRO waarbij zowel voor de zomer- als de winterperiode een stuwpeil is opgegeven. Bij waterafvoer kan het water boven het stuwpeil worden opgestuwd volgens een afvoer-relatie. Bij infiltratie en/of beregening kan bij onvoldoende wateraanvoer de waterspiegel tot onder het stuwpeil zakken. De ontwatering van een deelgebied kan worden beschreven met een drainagefunctie (Ernst 1978) die de afvoer relateert aan de grondwaterstand en aan de hoogte van de open waterspiegel. De kleinere waterlopen worden gekarakteriseerd door gegeven drainageweerstanden en hun dichtheid (de totale lengte per oppervlakte-eenheid). Daarom wordt verondersteld dat deze waterlopen homogeen over het oppervlak verdeeld zijn en in ieder knooppunt voorkomen. De drainage/infiltratie van kanalen

wordt beschreven met een door het model berekende drainageweerstand en de lengte van de waterloop tussen twee knooppunten. Omdat de reactietijd van het oppervlaktewater kleiner is dan die van het grondwater wordt gerekend met kleinere tijdstappen voor het open water. Binnen een tijdstap van het oppervlaktewatersysteem is de grondwaterstand constant. Watertransport tussen deelgebieden via het oppervlaktewater wordt (in de standaard SIMGRO-versie) niet in beschouwing genomen.

3 Beschrijving van het onderzoeksgebied

Het studiegebied omvat het volledige stroomgebied van de Beerze en de Reusel. De zuidgrens wordt daarbij gevormd door de waterscheiding tussen het stroomgebied van de Maas en de Schelde, de westgrens valt samen met de waterscheiding tussen de Reusel en de Poppelsche Loop, de oostgrens wordt gevormd door de waterscheiding tussen het dal van de Kleine Beerze en de Dommel. De noordgrens ligt ter hoogte van het punt waar de Beerze in de Essche Stroom uitmondt.

3.1 Fysiografie

De stroomgebieden van de Beerze en de Reusel liggen in het zwak golvende Brabants dekzandgebied. Het gebied helt van het zuiden (de Kempen) naar het noorden (rivierengebied) af; op het hoogste punt van de zuidelijke waterscheiding is de hoogteligging 44 m + NAP, wanneer de Beerze en Essche Stroom samenvloeien is de hoogte 6 m + NAP. Het verval bedraagt bijna 1 m per kilometer. Het gebied wordt doorsneden door een aantal beekdalen. De grootste dalen zijn die van de Beerze en de Reusel. De beekdalen zijn diep in het landschap ingesneden, maar de hellingen zijn overwegend glooiend. Plaatselijk zijn de dalen smal en zijn de hellingen steiler. Het reliëf van de hoger gelegen delen is onregelmatig glooiend. Reliëfrijke stuifzandgronden komen voor naast vrijwel vlakke gebieden (Teunissen van Manen, 1985).

3.2 Geologie

Zuidoost Nederland wordt doorsneden door een stelsel van zuidoost naar noordwest gerichte breuken, die het gebied in horsten en Slenken verdelen. De belangrijkste Slenk is de Centrale Slenk, waarbinnen het noordoostelijk deel van het stroomgebied van de Beerze en de Reusel ligt. Aan de zuidwestkant wordt de Centrale Slenk begrensd door de Feldbiss-breuk, de Rijenbreuk. Het zuidelijk deel van het studiegebied behoort tot de flexuurzone tussen het relatief hooggelegen en stabiel Brabants Massief en de Centrale Slenk. Deze zone wordt gekenmerkt door een groot aantal dicht bij elkaar gelegen, evenwijdige breuken (Vandenberghe 1990). De tektoniek in het gebied heeft grote gevolgen gehad voor de lithostratigrafie.

Tijdens het Mioceen behoorde het studiegebied tot het zuidelijke deel van de Noordzee. De afzettingen zijn dan ook marien (Formatie van Breda, slibrijk fijn zand met kleilaagjes, in zuidwestelijk deel grofzandig). In het Boven-Mioceen werd het land geleidelijk opgeheven waardoor de zee naar het noordwesten werd teruggedrongen. In het Plioceen zijn mariene (Formatie van Oosterhout, fijne slibhoudende en matig grove zanden met kleilagen) en fluviatiele sedimenten (Kiezelooliet Formatie, opgebouwd uit Waubach zanden, klei van Brunssum en

Schinveld zanden) afgezet. Door de verheffing en tegelijkertijd optredende kanteling van het land zijn de breuken ontstaan. De wegzakkende Centrale Slenk is in het Kwartiair opgevuld met dikke sedimentpakketten, terwijl op de hoger gelegen horsten deze afzettingen ontbreken of heel dun zijn. In het Onder-Pleistoceen heeft de Rijn in de Centrale Slenk de Formatie van Tegelen afgezet. Dit pakket is opgebouwd uit een aantal sedimentlagen: het grind van Belfeld, de klei van Belfeld, het grind van Tegelen en de klei van Tegelen. Tegelijkertijd heeft de zee de Formatie van Maassluis (grove en fijne zanden met klei- en leemlagen) afgezet in het Noordelijk deel van de Centrale Slenk. Aan het einde van het Onder-Pleistoceen zijn door Rijn en plaatselijk de Maas fijne zanden met kleilagen (Formatie van Kedichem) afgezet in de Centrale Slenk. Bij de overgang van Onder- naar Midden-Pleistoceen zijn door Rijn en Maas grofzandige, grindhoudende sedimenten afgezet (Formatie van Sterksel) die ten westen van de Feldbiss ondiep of aan de oppervlakte voorkomen. Ten gevolge van tektoniek is de loop van de Rijn in Duitsland tijdens het Midden-Pleistoceen naar het noordoosten verplaatst. De vervolgens door de Maas afgezette Formatie van Veghel komt voor in het oostelijk deel van de Centrale Slenk maar ontbreekt in het studiegebied. Door de tektonische opheffing van de Peelhorst werd ook de loop van de Maas naar het oosten verplaatst tot in de Slenk van Venlo. Tijdens het Midden- en Boven-Pleistoceen is de nog steeds dalende Centrale Slenk geleidelijk opgevuld met periglaciale en eolische afzettingen (Formaties van Eindhoven, Asten en Twente). Er ontstond een pakket fijnzandige sedimenten, onderbroken door lösslagen en lokale veenlaagjes. Omdat deze formaties in het gebied van de Centrale Slenk moeilijk zijn te onderscheiden heeft Bisschops (1973) voorgesteld deze sedimenten samen te vatten onder de naam 'Nuenen-groep'. In het Holoceen ontstonden beken die het gebied ontwaterden en die zich in het landschap insneden. De Middenbrabantse dekzandrug heeft de afwatering van het zuidelijk gelegen gebied bemoeilijkt. De doorsnijdingen van de dekzandrug door de Beerze en de Reuzel zijn erg smal. In de beekdalen werd zand, klei en veen afgezet (Formatie van Singraven). Door menselijk ingrijpen ontstonden stuifzandcomplexen (Formatie van Kootwijk) in gebieden waar pleistocene afzettingen (de dekzandruggen van de Nuenengroep) aan het oppervlak voorkomen. Deze complexen worden gekenmerkt door een geaccidenteerd terrein ten gevolge van de vorming van stuifduinen.

3.3 Landschappelijke ontwikkeling en landbouwkundige situatie

De hydrologische gesteldheid heeft grote invloed gehad op de ontwikkeling van het landschap. De bewoners vestigden zich op plaatsen met relatief droge gronden, geschikt voor bouwland, met in de nabijheid vochtige weidegronden en hooiland. Door mest uit potstallen (mest vermengd met heideplaggen en/of bosstrooisel) op de bouwlanden te brengen zijn de cultuurgronden met een humushoudende bovengrond ontstaan. De mest was overwegend afkomstig van schapen die op heidevelden (ontstaan door ontbossing) graasden. Door ontbossen en het steken van heideplaggen door de mens zijn plaatselijk (op leemarme, hooggelegen droge gronden) stuifzanden ontstaan. Aan het eind van de negentiende eeuw is het landschap sterk veranderd door ontginningen en bebossing van de heidevelden. Dit werd mogelijk door de uitvinding van kunstmest waardoor de heidevelden hun functie

verloren en als bouwland konden worden gebruikt. De nieuwe ontginningsgronden hebben een dunner humeus dek. Bebossing is uitgevoerd om stuifzanden vast te leggen, om erosie van heidevelden te voorkomen en om hout voor de steenkoolmijnen te produceren. Het landschapsbeeld is ten gevolge van deze landbouwkundige ontwikkelingen sterk afwisselend. De beekdalgronden bestaan overwegend uit grasland met plaatselijk moerasbosjes. De jonge ontginningsgronden worden gebruikt als grasland, op enkele plaatsen zijn deze gronden beplant met naaldbos. De stuifzanden zijn begroeid met naaldbos. Plaatselijk komen nog restanten van de heidevelden voor. Binnen het studiegebied zijn een aantal ruilverkavelingen of herinrichtingen uitgevoerd, in uitvoering, of in voorbereiding.

De oude cultuurgronden, die in grote blokken rond de oude woonkernen voorkomen, zijn binnen de gemengde bedrijfsvoering altijd als bouwland gebruikt. Later zijn veel van deze percelen door de uitbreiding van de melkveehouderij omgezet in grasland of bebouwd met maïs. Door de introductie van kunstmatige beregening is ook grasland op hoger gelegen gronden ontstaan. In de (gedraineerde) beekdalen is grasland gescheurd en omgezet in bouwland of maïsland. De intensieve veehouderij is flink toegenomen.

De sector landbouw heeft ongeveer 60% van het studiegebied in gebruik (grasland 29%, mais 25%, overig bouwland 7%). 30 % van het gebied bestaat uit natuur (loofbos 7%, naaldbos 18%, overig natuurgebied (heide, hooigraslanden, moeras, vennen e.d.) 6%) en 10% van het studiegebied is bebouwd (Thunnissen, 1993).

3.4 Bodemkundige situatie

Uit het aan het oppervlak liggende dekzand hebben zich onder antropogene invloed en afhankelijk van de hoogteligging een aantal verschillende bodems ontwikkeld. De gronden in de stuifzandcomplexen zijn leemarm of zwak lemig, hebben een losse pakking en er heeft nog nauwelijks bodemvorming plaats kunnen vinden. Binnen het studiegebied worden ze overwegend geclassificeerd als duinvaaggronden en hebben ze op dit moment naaldbos als begroeiing. De cultuurgronden komen voor op (1) zwak lemig fijn zand en op (2) sterk lemig fijn zand van de Nuenengroep. De oude cultuurgronden (a) zijn matig diep tot diep humushoudend; de jonge cultuurgronden (b) zijn ondiep humushoudend. Ze worden geclassificeerd als: (1a) enkeerd of laarpodzol met als bodemgebruik bouwland of grasland; (1b) veldpodzolen begroeid met gras of naaldbos; (2) gooreerd (matig dik (2a) of dun (2b)) met voornamelijk gras. De beekdalgronden komen voor op lemig fijn zand en hebben een dikke of matig dikke humeuze bovengrond en worden geclassificeerd als beekeerd, gooreerd of broekeerd. De typerende begroeïng bestaat uit grasland of moerasbos (Teunissen van Manen, 1985).

3.5 Ontwatering

Het gebied wordt door de beken op natuurlijke wijze ontwaterd. De beken stromen nagenoeg allemaal naar het noorden of het noordoosten. De meeste beken monden uit in de hoofdwaterlopen de Beerze en de Reusel, die via de Essche Stroom op de Dommel afwateren. Het ontwateringssysteem is verbeterd door de aanleg van sloten. De Beerze en de Reusel zijn na 1950 grotendeels genormaliseerd en voorzien van kunstwerken. Op enkele plaatsen zijn omleidingen aangebracht waarmee wordt getracht de specifieke milieuomstandigheden in de oude waterlopen te handhaven. Om de ontwatering te verbeteren is een dicht netwerk van sloten gegraven. In de beekdalen is de ontwatering plaatselijk verbeterd door het leggen van buisdrainage.

3.6 Beregening

In het studiegebied worden grasland, bouw- en maïsland beregend (Reinds, 1986). Het percentage beregend areaal is voor 1985 gesteld op respectievelijk 30, 10 en 3% voor gras, bouw- en maïsland. Sinds 1985 zijn de beregende arealen toegenomen: het percentage beregend grasland bedraagt rond de 40% van het grasland-areaal. De beregening vindt uitsluitend plaats vanuit het grondwater (Reinds, 1986)

3.7 Grondwatersysteem

Het studiegebied is gelegen binnen een veel groter regionaal grondwaterstromingssysteem. Alleen het voor deze studie relevante deel van het stroomgebied van de Beerze en de Reusel wordt beschreven. De hooggelegen Kempen fungeren als intrekgebied voor het regionale grondwaterstromingssysteem. De grondwaterscheiding valt samen met de topografische waterscheiding. De stroming verloopt noordwaarts om later af te buigen naar noordwestelijke richting. In de Kempen wordt functioneel één watervoerend pakket onderscheiden. De deklaag (Nuenengroep) is dun (0-5 meter). De nagenoeg ondoorlatende hydrologische basis wordt gevormd door de lemige zanden van de Formatie van Breda.

Drinkwaterwinningen beïnvloeden de grondwaterstroming. In het studiegebied komen drie grote waterwinningen voor, n.l. Vessem, Oirschot en Haaren.

Het geohydrologisch profiel verandert bij de Feldbiss-breuk en de Riel-breuk. Ten noorden van deze breuken, in de Centrale Slenk, zijn meer watervoerende pakketten aanwezig waarvan de onderste worden gevoed door de regionale grondwaterstroming uit de Kempen. De afzettingen van de Nuenengroep zijn 10 tot 40 meter dik. Bij de breuken kan kwel optreden waarbij water van diepe pakketten het toppakket bereikt. Deze kwelzones hoeven niet scherp door de breuken begrensd te zijn.

Naast het regionale systeem worden enkele subregionale en lokale systemen onderscheiden. Deze zijn van belang voor de voeding van de bovenste watervoerende

pakketten. De inzijgingsgebieden van de subregionale systemen worden gevormd door relatief hoog gelegen dekzandruggen en dekzandplateaus. Binnen het studiegebied liggen twee subregionale systemen: de Kampina en de Midden Brabantse dekzandrug (genoemd naar het infiltratiegebied). De kleine infiltratiesystemen bestaande uit geïsoleerde dekzandruggen, en de hoger gelegen gebieden tussen de beekdalen hebben alleen zichtbare invloed op de stroomlijnen van het eerste watervoerend pakket (er is wel invloed op de waterbeweging in diepere lagen via waterdruk) en worden daarom lokaal genoemd. De stroming zal ten gevolge van de regionale gradiënt overwegend naar het noorden gericht zijn. De beekdalen van de Beerze en de Reusel en hun zijdalen draineren de lokale en subregionale systemen.

De intrekgebieden worden in het algemeen gekenmerkt door diepe grondwaterstanden (Gt VI en VII), door qua genese specifiek hoger gelegen bodems (hoge enkeerdgronden, duinvaaggronden, podzolen), door een grofmazig ontwateringsstelsel of door het ontbreken van een zichtbaar ontwateringssysteem, en door bos of heide als bodemgebruik. De kwelzones worden gekarakteriseerd door ondiepe grondwaterstanden (Gt I, II en III); door onder natte omstandigheden gevormde bodems (beekeerd- en broekeerdgronden); door een dicht ontwateringsstelsel; door de aanwezigheid van buisdrainage (naar schatting is 15 tot 20% van de gronden gedraineerd), en door grasland als bodemgebruik.

4 Schematisering en invoergegevens

Voor het regionale grondwaterstromingsmodel SIMGRO zijn een groot aantal invoergegevens nodig. De beschikbaarheid en de betrouwbaarheid van deze gegevens zijn met de schematisering van het studiegebied bepalend voor de betrouwbaarheid van de rekenresultaten (gegeven de doelstelling en gegeven de vereenvoudigingen in de modelformulering). Voor dit project is geprobeerd zoveel mogelijk benodigde informatie aan GIS-bestanden te ontlenen: de invoergegevens en de deelgebiedsindeling zijn met behulp van het geografisch informatie-systeem ARC/INFO gegenereerd.

4.1 Koppeling GIS-SIMGRO

De volgende invoergegevens zijn nodig om SIMGRO toe te passen:
- geohydrologische data (per knooppunt)
- het bodemgebruik (per deelgebied)
- de dikten van de wortelzones
- bodemfysische data (per deelgebied en per knooppunt)
- drainageweerstanden (per deelgebied)
- dimensies van de waterlopen
- afvoerrelaties (per deelgebied)
- stuwpeilen (per deelgebied)
- maaiveldhoogtes (per knooppunt)

Om de datastroom beheersbaar (overzichtelijkheid, voorkomen van fouten en reproduceerbaarheid van de resultaten) te houden, is besloten zoveel mogelijk gegevens aan GIS-bestanden te ontlenen om geautomatiseerd invoergegevens voor het hydrologische model te kunnen genereren. Deze manier van werken kan ook voor andere vraagstellingen en/of modellen worden gebruikt. Wanneer de (goed onderhouden en gestandaardiseerde) GIS-bestanden en de (algemeen en gebruikersvriendelijk gemaakte) programmatuur voor de koppeling beschikbaar zijn kan SIMGRO relatief snel voor andere gebieden operationeel worden gemaakt. GIS wordt dan een nuttig hulpmiddel voor regionale studies.

Geprobeerd is om ook de horizontale ruimtelijke schematisatie (elementennetwerk, indeling in deelgebieden) met behulp van GIS te genereren. Om dat verantwoord te kunnen doen, zijn aanvullende gegevens nodig:
- de ligging van de waterlopen,
- de begrenzing van de stroomgebieden,
- de begrenzing van de EHS,
- de grondwatertrappen (per deelgebied en knooppunt).

De invoergegevens voor SIMGRO en de ruimtelijke schematisering zijn via de volgende vijf stappen verkregen:

1 *Allereerst zijn de invoergegevens in GIS-bestanden geplaatst.*
De invoergegevens zijn:
   a direct ontleend aan bestaande GIS-bestanden:
      - het bodemgebruik aan de Landelijke Grondgebruikskartering Nederland;
      - de geohydrologische data aan de Centrale Slenk dataset.
   b gedigitaliseerd op basis van analoge bestanden:
      - maaiveldhoogten van topografische kaart 1:25.000;
      - waterlopen van de waterlopenkaart van waterschap De Dommel;
      - stroomgebieden van de Waterstaatskaart;
      - de EHS zoals ingetekend door de provincie Noord-Brabant.
   c via 'vertaalslagen' afgeleid uit GIS-bestanden:
      - grondwaterklassen op basis van grondwatertrappen;
      - bodemfysische eenheden op basis van bodemeenheden;
      - dikte wortelzones op basis van bodemeenheid en grondwaterklasse;
      - drainageweerstanden op basis van de lengte van waterlopen;
      - afvoerrelaties op basis van oppervlaktes, bodemgebruik, bodemeenheid, grondwaterklasse.
   d anders met behulp van GIS toegekend:
      - stuwpeilen;
      - dimensionering van het oppervlaktewatersysteem.

2 *Vervolgens is het elementennetwerk gegenereerd.*
De vraagstelling, de schaal waarop deze zich richt, en het gebruikte model bepalen de te gebruiken schematisering. Het elementennetwerk is in deze studie gegenereerd op basis van de loop van de Beerze, de Reusel en de Rosep.

3 *Voor de vereiste eigenschappen is per knooppunt één waarde toegekend.*
Deze waarde geldt voor het zogenaamde invloedsgebied rond het knooppunt (een soort Thiessen-polygoon). Wanneer meer dan één waarde van een eigenschap binnen een invloedsgebied wordt gevonden moet een representatieve waarde voor dat invloedsgebied worden bepaald. Dat is gebeurd met behulp van 'besliscriteria'. Voorbeelden van besliscriteria zijn:
   - de waarde van de eigenschap in het knooppunt,
   - de waarde met het grootste oppervlak binnen het invloedsgebied,
   - een (gewogen) gemiddelde,
   - een vervangingsweerstand.

   De eigenschap is bepalend voor de keuze van het besliscriterium. Voor sommige eigenschappen (bijvoorbeeld de geohydrologische weerstanden) is de keuze voor het besliscriterium eenduidig; voor andere eigenschappen ontbreekt een onderbouwing voor het te hanteren criterium.

4 *Door aggregatie op basis van eigenschappen zijn deelgebieden verkregen.*
De deelgebieden ontstaan door aan elkaar grenzende knooppunten met identieke waarden voor eigenschappen (voor een regionale hydrologische studie zijn dat:

stroomgebied, grondwaterklasse/grondwatertrap, bodemfysische eenheden, hoogtezones, grondgebruik en evt. beleidscriteria) samen te voegen.

5 *Per deelgebied zijn waarden voor de overige eigenschappen toegekend.*
Deze waarde geldt voor het volledige deelgebied. Wanneer meer dan één waarde van een eigenschap binnen een deelgebied voorkomt moet een representatieve waarde voor dat deelgebied worden bepaald. Dat is wederom gebeurd met behulp van 'besliscriteria'.

4.2 Begrenzing van het studiegebied

De begrenzing van het eigenlijke studiegebied wordt gevormd door de waterscheidingen van de stroomgebieden van de Beerze, de Reusel en de Rosep (oppervlakte 44000 ha). De diepere watervoerende lagen strekken zich uit tot ver buiten het studiegebied. De feitelijke begrenzing ten behoeve van de modelstudie is dan ook vastgesteld op basis van de grondwatersysteemanalyse. De rand aan de zuidzijde wordt gevormd door de geohydrologische waterscheiding. Deze valt nagenoeg samen met de geografische waterscheiding. De ligging is ontleend aan de isohypsenkaarten behorende bij het Centrale Slenk Model (IWACO, 1987). Op een waterscheiding is de flux nul. Met behulp van dezelfde isohypsenkaarten is de globale ligging van de stroomlijnen die het studiegebied volledig omhullen vastgesteld. Ook over stroomlijnen vindt geen stroming van water plaats. De randvoorwaarden in het noorden worden gedefinieerd door stijghoogten die zijn ontleend aan de isohypsenkaart van het 2^{e} watervoerende pakket voor de stationaire situatie berekend met het neerslagoverschot van de winter 1971/1982 (IWACO, 1987). Om de fout die ontstaat als gevolg van de onnauwkeurigheden in de opgelegde, constante potentialen binnen het studiegebied te verkleinen is deze rand ruim 5 kilometer ten noorden van het studiegebied gekozen (ongeveer de lijn Helvoirt - Sint-Michielsgestel). Het totale modelgebied van de waterhuishoudkundige studie heeft een oppervlakte van 58000 ha.

4.3 Het elementennetwerk

De doelstelling van de studie maakte het nodig het elementennetwerk te verdichten rond de zones waar waterafhankelijke natuur voorkomt of kan worden ontwikkeld; de beekdalen. Omdat geen netwerkgenerator beschikbaar is die mede op basis van lijnvormige elementen automatisch een netwerk kan genereren, is een omweg bewandeld waarbij met behulp van ARC/INFO-bewerkingen een set punten is gegenereerd uit een gedigitaliseerde (hoofd)waterlopenkaart. Hiervoor zijn analoge kaarten ter beschikking gesteld door het Waterschap de Dommel. Deze punten zijn in een gegevensbestand van de netwerkgenerator als vaste punten ingepast waarna door 'trial and error' een netwerk is gegenereerd. Als gevolg van deze werkwijze en van de in de netwerkgenerator ingebouwde wiskundige criteria waaraan het netwerk moet voldoen is een dicht en naar grootte van de 4745 elementen homogeen

netwerk (opgebouwd uit 2448 knooppunten) ontstaan. In de beekdalen liggen de knooppunten dichter bij elkaar en zijn de elementen kleiner. Hierdoor zijn de beekdalen duidelijk te onderscheiden in het netwerk (Fig. 2).

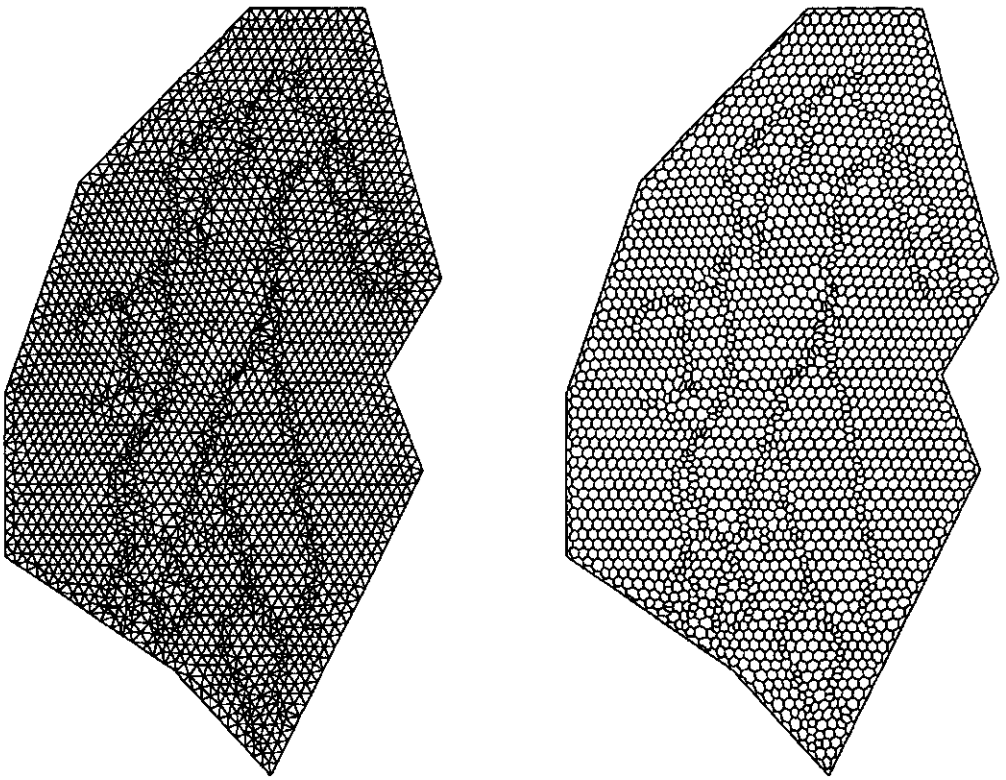

Fig. 2 Het elementennetwerk (links) en de invloedsgebieden van de knooppunten (rechts)

In de beekdalen bedraagt de afstand tussen de knooppunten ongeveer 400 m, buiten de beekdalen kan deze afstand oplopen tot 800 m.

Voor ieder knooppunt wordt aan de voor de berekeningen vereiste grootheden een waarde toegekend. Deze waarde wordt representatief geacht voor een oppervlakte rond het knooppunt: het invloedsgebied van het knooppunt. Het invloedsgebied is bepaald door de zwaartepunten tussen knooppunten te verbinden (Fig. 2).

4.4 Geohydrologische schematisering

Het grondwatersysteem is gedefinieerd overeenkomstig het Geohydrologisch onderzoek Centrale Slenk Fase 2 (IWACO, 1987), dat een uitbreiding vormt van de geohydrologische studie van de Centrale Slenk door het RIVM (Sman, 1985). Beide studies zijn gebaseerd op de Grondwaterkaart van Nederland, Centrale Slenk (Lekahena, 1975). Figuur 3 geeft een geschematiseerd overzicht van de afzettingen in de stroomgebieden van de Beerze, Reusel en Rosep. Globaal kan dit stroomgebied

worden verdeeld in twee delen; de Centrale Slenk ten noordoosten van de Rielbreuk en de Feldbiss-breuk, en het plateau van de Kempen ten zuiden van deze breuken:

- In de Centrale Slenk kan de Nuenengroep, die als deklaag voorkomt, worden onderscheiden in Nuenen-grof, Nuenen-fijn en Nuenen-leem. Nuenen-fijn vormt het freatisch pakket, Nuenen-leem is de eerste scheidende laag en Nuenen-grof wordt tot het eerste watervoerende pakket gerekend. Daarnaast bestaat de eerste aquifer uit afzettingen van de Formatie van Sterksel. De 2e scheidende laag bestaat uit de kleilagen van de formaties van Tegelen en Kedichem. Tegelen grind, Belfeld klei/Formatie van Maassluis, Belfeld grind, Reuver klei/Klei van Kallo, Schinveld zanden, Brunssum klei/Formatie van Oosterhout en de Waubach zanden vormen de afwisselend watervoerende en scheidende lagen tot aan de ondoorlatende basis gevormd door de kleien van de Formatie van Breda.

- Het plateau van de Kempen heeft een eenvoudiger opbouw. De Nuenengroep vormt ook hier een dunne slechtdoorlatende deklaag of ontbreekt. Ten gevolge van het ontbreken van kleiafzettingen vormen de goed doorlatende afzettingen van de Formatie van Sterksel, samen met ter plekke zandig ontwikkelde Formatie van Kedichem en de Formatie van Tegelen één watervoerend pakket. De hydrologische basis wordt gevormd door de lemige afzettingen van de Formatie van Breda.

Doordat de flexuurzone tussen de Centrale Slenk en het Brabants Massief de overgang tussen deze twee gebieden vormt, lopen een groot aantal nagenoeg evenwijdige breuken door het gebied (Vandenberghe, 1990). De lithostratigrafie is bepaald door de breuktektoniek en de breuken hebben gevolgen voor de grondwaterstroming (Ernst en de Ridder, 1960). Daarom is het de vraag of de gegevens die voor dit complexe gebied beschikbaar zijn, toereikend zijn voor een adequate simulatie van met name de diepe kwel vanuit de dieper gelegen watervoerende pakketten tot aan de grondwaterspiegel.

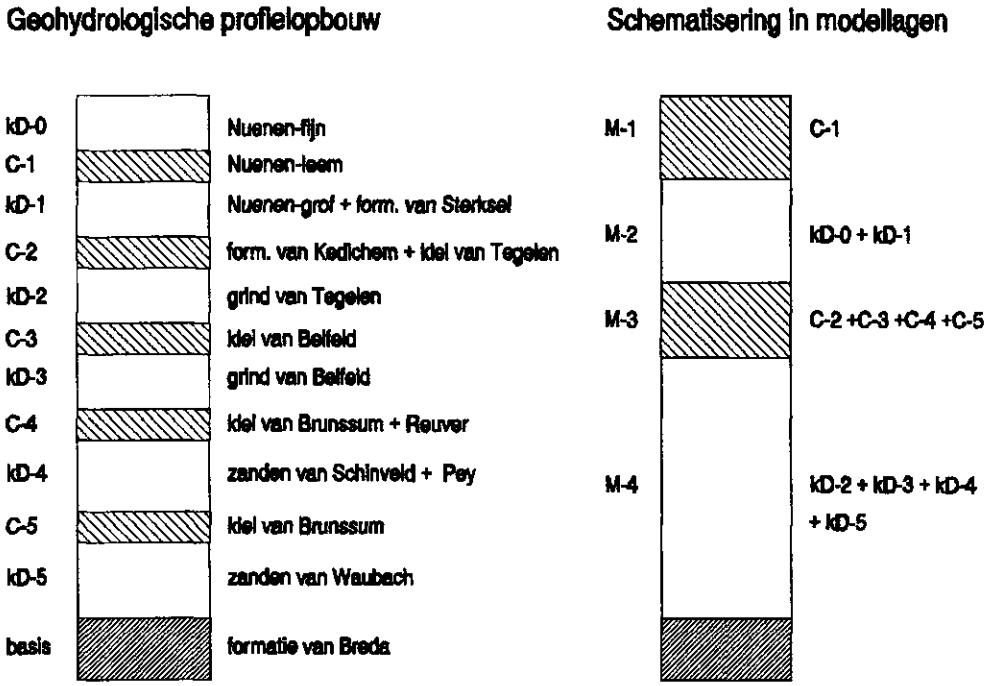

Fig. 3 De geohydrologische profielopbouw (links) en de schematisering (rechts) in modellagen

Om de rekentijd te beperken is overgegaan tot een schematisering in 4 lagen (Fig. 3) voor het hele studiegebied. De eigenschappen van de watervoerende pakketten kD2, kD3, kD4, en kD5 zijn gesommeerd tot één watervoerend pakket (M4). Ditzelfde is gedaan voor het freatisch pakket (kD0) en het eerste watervoerende pakket (KD1) die samen het tweede modelpakket (M2) vormen. De weerstanden van de scheidende lagen C3, C4 en C5 zijn opgeteld bij de weerstand van de tweede scheidende laag (C2) tot het derde modelpakket (M3). Deze vereenvoudiging is toelaatbaar door de lage kD-waarden van Nuenen-fijn en de lage weerstanden van de diepste weerstandsbiedende lagen (C3, C4 en C5). Nuenen-leem (C1) vormt het eerste modelpakket (M1).

Doordat de weerstand van de formatie van Kedichem (C2) in het plateau van de Kempen erg laag is (hier is uitsluitend zand afgezet), en andere weerstandsbiedende lagen ontbreken (C3, C4 en C5), kunnen het eerste watervoerend pakket (M2), de formatie van Kedichem (M3) en het tweede watervoerende pakket (M4) daar als één watervoerend pakket worden beschouwd. Om rekentechnische problemen, veroorzaakt door het plaatselijk dunne toppakket (M1, Nuenen- leem), te voorkomen is gerekend met een imaginaire dikte voor dit pakket. Deze is berekend door de werkelijke dikte met een factor te vermenigvuldigen. Om de berging van dit pakket niet te laten toenemen moet deze ingreep worden gecompenseerd door de specifieke berging van deze laag evenredig te verkleinen.

4.5 Geohydrologische gegevens

Bij het definiëren van deze studie is besloten geen expliciete aandacht te besteden aan een geohydrologische analyse maar om deze te ontlenen aan het Centrale Slenk model (IWACO, 1989). De geohydrologische gegevens (lithostratigrafie, transmissiviteit, weerstanden en specifieke bergingscoëfficiënt) zijn door IWACO in digitale vorm aangeleverd. De eveneens door IWACO geleverde data van de verfijningsstudies Aalsterweg en Fuji zijn niet gebruikt omdat deze data niet aansluiten bij de gegevens uit de Centrale Slenk studie, omdat deze verfijningsstudies niet de volledige stroomgebieden van de Beerze, Reusel en Rosep omvatten, en omdat binnen deze studie geen ruimte was voor een diepgaande geohydrologische analyse.

De in het gebied aanwezige waterwinningen die groter zijn dan 50.000 m^3/jaar zijn expliciet in het model opgenomen. De pompstations Haaren, Oirschot en Vessem (met een gezamenlijke maximale onttrekking van 19.500.000 m3/jaar op basis van de vergunningen in 1989) zijn aan het meest dichtbij gelegen knooppunt toegekend. De overige onttrekkingen zijn per gemeente gesommeerd en toegekend aan het knooppunt bij de grootste onttrekking binnen de gemeente. De provincie Noord-Brabant heeft de gegevens over de jaarlijkse onttrekkingen in de periode van 1975 tot en met 1989 ter beschikking gesteld. Voor de periode van 1971 tot en met 1974 zijn de onttrekkingscijfers van 1975 gebruikt. Verondersteld is dat de onttrekkingen gedurende een jaar constant blijven. Wanneer een winning filters heeft in verschillende lagen, is de totale onttrekking toegekend aan de laag waarin zich de meeste filters bevinden.

4.6 Gegevens van de onverzadigde zone

Binnen het studiegebied bevinden zich 1886 kaartvlakken met grondwatertrappen (kaartbladen 44oost, 45west, 50oost, 51west en 56oost/57west (schaal 1:50000) van het Bodemkundig Informatie Systeem (Staring Centrum, 1991)). Omdat op basis van deze gedetailleerde informatie geen adequate deelgebiedsindeling mogelijk is, zijn de grondwatertrappen samengevoegd tot grondwaterklassen (Tabel 1).

Tabel 1 GHG en GLG per grondwaterklasse

Grondwaterklasse	1	2	3
GHG [cm-mv]	< 40	< 40	> 40
GLG [cm-mv]	< 120	> 120	> 120

Om de beekdalen duidelijk naar voren te laten komen zijn de Gt's waar kwel voor kan komen; I, II(*) en III(*) samengevoegd tot grondwaterklasse 1. Grondwaterklasse 2 wordt gevormd door Gt V(*). Grondwaterklasse 3 bestaat uit de Gt's VI en VII(*). Gt IV komt binnen het studiegebied niet als kaartvlak voor. Deze bewerking resulteert in 55 vlakken waarin de beekdalen goed zijn te herkennen.

De bodemfysische eenheden kunnen worden gekoppeld aan de bodemeenheden van de bodemkaarten 1:50000 zoals vastgesteld door Bannink et al. (1988). Omdat het

aantal onderscheiden bodemfysische eenheden erg groot is (ruim 600 eenheden binnen het studiegebied), is een procedure analoog aan de Werkgroep Waterbeheer Noord-Brabant (1990) gebruikt om het aantal bodemfysische eenheden te verminderen. Het aantal bodemfysische eenheden kon daarbij worden gereduceerd tot 44, maar binnen het studiegebied worden dan nog steeds 1074 kaartvlakken onderscheiden. Hierdoor kan deze dataset niet voor deze studie worden gebruikt. In plaats daarvan is teruggegrepen op de bodemkaart 1:250.000 en de bijbehorende vertaalslagen van Wösten et al. (1988). Op deze manier worden voor het studiegebied 11 bodemfysische eenheden verkregen die voorkomen op 98 kaartvlakken. Een bodemfysische eenheid is opgebouwd uit een aantal bouwstenen; de pF- en k(h)-relaties van de bouwstenen zijn vastgelegd in de Staringreeks (Wösten, 1987). Het evenwichtsvochtgehalte in de wortelzone, de capillaire opstijging en de bergingscoëfficiënt voor de onverzadigde zone (onder de wortelzone) zijn per bodemfysische eenheid bepaald met behulp van CAPSEV (Wesseling, 1991). Daartoe zijn enkele aanpassingen in dit model aangebracht.

De gegevens van de Staringreeks beschrijven uitdrogingscurven. Het effect dat de bodem bij bevochtiging een andere pF-curve heeft dan bij uitdroging (t.g.v. hysterese en luchtinsluiting) wordt hiermee niet beschreven. Voor de modelberekeningen resulteert dat bij bevochtiging in een te groot vochtgehalte en daarmee in een te grote berging. Dit heeft tot gevolg dat de berekende grondwaterstanden minder fluctueren dan in werkelijkheid het geval is. Om dit probleem op te lossen zijn de vochtgehaltes voor de wortelzone en de bergingscoëfficiënten voor de onverzadigde zone vermenigvuldigd met een zogenoemde hysteresis-factor. Van Walsum en Knotters (1992) hebben voor een drietal zandgronden deze factor door calibratie aan stijgbuisgegevens vastgesteld. Op basis van hun resultaten is voor deze studie voor alle bodems de hysteresis-factor 0,8 gebruikt.

4.7 Stroomgebiedsindeling en maaiveldshoogten

De stroomgebieden zijn gedigitaliseerd aan de hand van Waterstaatskaarten. Waterschap De Dommel heeft aanvullende informatie verstrekt. Binnen het eigenlijke studiegebied worden 15 (deel)stroomgebieden onderscheiden (Fig. 4).

Met behulp van ARC/INFO-programmatuur (Gehrels, 1991) zijn hoogtelijnen (afstand 1 meter) geïnterpoleerd op basis van de hoogtelijnen en hoogtepunten van de topografische kaarten 44H, 45C, 45D, 50F, 51A, 51B, 50H, 51C, 51D, 57A EN 57B schaal 1:25000 (Topografische Dienst). Door de hoogten per invloedsgebied naar het oppervlak gewogen te middelen is de gemiddelde maaiveldshoogte per invloedsgebied berekend en aan de knooppunten toegekend. Door de hoogte van ieder invloedsgebied af te kappen naar hele of halve meters wordt een hoogtezone-kaart verkregen op basis waarvan de indeling in deelgebieden kan gebeuren.

4.8 Gebiedsschematisering

Idealiter zou de waterhuishouding van de onverzadigde zone per knooppunt moeten worden berekend. Om de rekentijd te beperken is het nodig deelgebieden te definiëren. (Querner en Van Bakel, 1989). Een deelgebied bestaat uit een aantal knooppunten met bijbehorende invloedsgebieden en wordt verondersteld homogeen te zijn met betrekking tot het oppervlaktewatersysteem, de grondwatertrap, de bodemfysische eenheid en de maaiveldshoogte.

Omdat bij de schematisering rekening dient te worden gehouden met een belasting van natuurgebieden via grondwater en door uitspoeling naar oppervlaktewater zijn de natuurgebieden zoveel mogelijk als afzonderlijke deelgebieden onderscheiden. Daartoe zijn de grenzen van de voorlopige Groene HoofdStructuur (GHS) gedigitaliseerd en is de code voor het wel of niet tot de GHS behoren gebruikt voor het onderscheiden van deelgebieden.

De indeling in deelgebieden is gemaakt op basis van het knooppuntenbestand. Aan ieder knooppunt zijn de voor het invloedsgebied van dat knooppunt meest representatieve invoergegevens en codes voor eigenschappen met behulp van beslisregels toegekend. Door invloedsgebieden die naast elkaar liggen en dezelfde eigenschappen bezitten samen te voegen wordt een indeling in deelgebieden verkregen (Fig. 4).

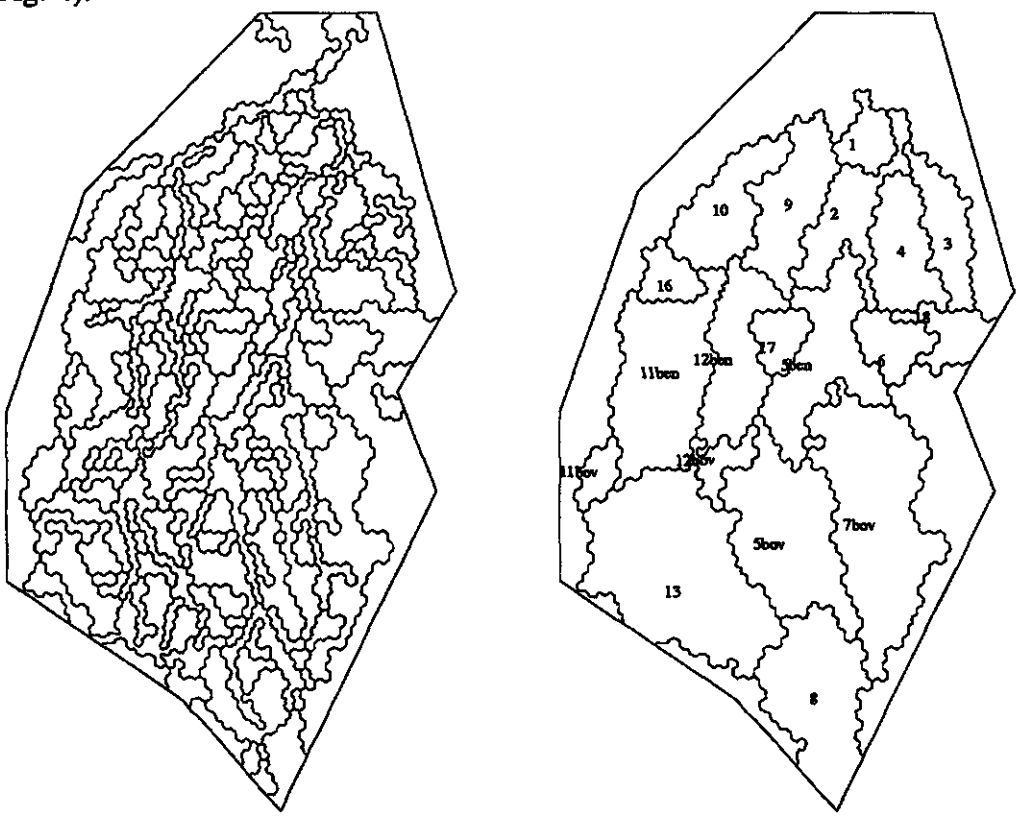

Fig. 4 De onderscheiden deelgebieden (links) en stroomgebieden (rechts).

Querner (1991, pers. com.) adviseert het aantal deelgebieden zo klein mogelijk te houden (in ieder geval kleiner dan 200). Dit impliceert dat verdere vereenvoudigingen noodzakelijk zijn. Om het aantal deelgebieden te beperken is de indeling in hoogtezones bij voorbaat niet gebruikt bij de indeling in deelgebieden. Door de overige eigenschappen (stroomgebieden, grondwaterklassen, bodemfysische eenheden en GHS) te combineren ontstaat een indeling in meer dan 700 deelgebieden. Om dit aantal te reduceren is een nieuwe deelgebiedsindeling gemaakt door ook de bodemfysische eenheden niet te gebruiken. Dit leidde tot een indeling in 361 deelgebieden. Door buiten het eigenlijke studiegebied geen stroomgebieden te onderscheiden en tevens de grondwaterklassen 2 en 3 samen te voegen verminderde het aantal deelgebieden tot 278. De deelgebieden gevormd door één invloedsgebied zijn vervolgens (indien mogelijk) verwijderd door de begrenzing van de GHS of de grondwaterklasse aan te passen. De stroomgebiedsgrenzen zijn slechts bij wijze van uitzondering aangepast. Deze subjectieve bewerking reduceerde het aantal deelgebieden tot 187. In een later stadium zijn drie in de beekdalen gelegen deelgebieden opgesplitst: nr 122 in nr 122 en nr 188, nr 155 in nr 155 en nr 189, en nr 160 in nr 160, nr 190 en nr 191. De invoergegevens voor deze gebieden zijn niet opnieuw met het GIS vastgesteld maar gelijk gehouden aan de gegevens van de oorspronkelijk onderscheiden deelgebieden.

Omdat de bodemfysische eenheden niet zijn gebruikt bij de indeling in deelgebieden is per deelgebied de naar oppervlak meest voorkomende eenheid bepaald.

4.9 Bodemgebruik

De bodemgebruiksvormen zijn ontleend aan de digitale bestanden van het Landelijk Grondgebruiksclassificatie project Nederland, opname 1990 (Thunnissen, 1993). Per deelgebied zijn de procentuele verdelingen bepaald van een zevental bodemgebruiksvormen: gras, maïs, overige landbouwgewassen, loofbos, naaldbos, overig natuurgebied en bebouwing. Open water en vaarwegen zijn bij het bepalen van de procentuele verdeling niet meegenomen. Later zijn de klassen gras, maïs en bouwland onderverdeeld in beregend en onberegend, waardoor het totaal aantal onderscheiden grondgebruiksklassen 10 bedraagt. Tabel 2 geeft het oppervlak per bodemgebruiksvorm in het studiegebied.

Tabel 2 Oppervlaktes van de onderscheiden grondgebruiksvormen in de stroomgebieden van de Beerze, Reusel, en Rosep. De gegevens zijn afkomstig uit de Landelijk Grondgebruiksclassificatie project Nederland, opname 1990 (Thunnissen, 1993).

Grondgebruiksvorm	oppervlak [ha]	oppervlak [%]
gras	12582	29
maïs	10440	24
overige bouwland	2990	7
loofbos	3099	7
naaldbos	7916	18
overig natuurgebied	2548	6
bebouwing	4391	10

De effectieve dikte van de wortelzone is op basis van de bodemfysische eenheid en de grondwaterklasse via 'deskundigen oordeel' per bodemgebruiksvorm toegekend door G.A. van Soesbergen (1992, pers. com.; zie aanhangsel 1). Voor deze studie is een relatie tussen de effectieve dikte van de wortelzone en de bodemgebruiksvorm gebruikt. Deze relatie is afgeleid uit de tabel van Van Soesbergen.

Beregening is in rekening gebracht voor grasland, maïs en bouwland door het areaal per deelgebied te verdelen in een niet beregend deel en een beregend deel. Het percentage beregend areaal is voor 1985 (Reinds, 1986) vastgesteld op 30, 3 en 10 % van het totale studiegebied voor respectievelijk gras, maïs en bouwland. Vanuit de begeleidingscommissie is opgemerkt dat deze percentages sinds 1985 zijn toegenomen en dat het percentage beregend grasland rond de 40% van het graslandareaal bedraagt. De beregening vindt plaats vanuit het grondwater (Reinds, 1986) en wordt in het model in de periode van 1 juni tot 1 september toegediend als neerslag in giften van 25 mm met een interval van minimaal 7 dagen wanneer het bodemvochtgehalte beneden een kritische waarde komt (Querner en van Bakel, 1989). De kritische waarde is afgeleid uit de relatie tussen de relatieve evapotranspiratie en het bodemvochtgehalte (Feddes et al., 1978). Het criterium is gesteld op 0,5 maal het evenwichtsvochtgehalte in de wortelzone bij een grondwaterstand van 1,00 m - mv. Dit komt overeen met een reductie van de potentiële verdamping met 5% (Feddes et al., 1978). Omdat de beregening afhankelijk is van het vochtgehalte in de wortelzone zal in de nattere, relatief laag gelegen delen van het studiegebied niet snel worden beregend, waar dat in de hogere delen wel het geval zal zijn. Omdat bij het definiëren van het beregend areaal per deelgebied niet alleen het gebiedsgemiddelde in beschouwing moet worden genomen maar ook de verdeling binnen het studiegebied (plaatselijke droogtegevoeligheid), is gesteld dat alle grasland kan worden beregend (100%), en dat 10 respectievelijk 30% van het maïs en het bouwland per deelgebied kunnen worden beregend. Op deze manier wordt geprobeerd voor het totale studiegebied met de werkelijkheid overeenkomende hoeveelheden onttrekkingen voor beregening te simuleren.

4.10 Meteorologische data

De meteorologische gegevens zijn ontleend aan de gecombineerde datasets voor de stations Eindhoven en Someren voor de weerjaren 1971 t/m 1986 (Van Walsum, 1991). Deze reeks van weerjaren is in tabel 3 geanalyseerd op representativiteit. In deze tabel zijn de neerslag, de open waterverdamping volgens Penman en het neerslagoverschot, alsmede de onderschrijdings-kansen van deze grootheden weergegeven van de door Van Walsum (1991) samengestelde reeks.

*Tabel 3 Neerslag P (mm), openwaterverdamping E0mow (mm) en neerslagoverschot P-0,8*E0mow (mm) en hun onderschrijdingskansen k (%) voor de weerjaren 1971-1986*

jaar	P	k	E0mow	k	P-0,8*E0mow	k
	mm	%	mm	%	mm	%
1971	609	145	659	38	81	20
1972	639	22	622	36	42	35
1973	646	24	688	60	95	23
1974	933	96	675	50	393	94
1975	580	10	670	46	44	13
1976	544	6	786	98	-85	2
1977	836	82	627	18	335	87
1978	677	32	593	6	203	54
1979	741	54	624	17	242	65
1980	754	48	676	50	213	57
1981	860	86	630	20	356	90
1982	648	24	696	65	91	22
1983	752	57	702	69	191	50
1984	904	93	670	46	368	92
1985	742	54	703	70	180	47
1986	823	78	779	98	200	53
gemiddeld	730	50,0	675	50,0	190	50
st.afwijking	117	-	53	-	130	-
minimum	544	6	593	6	-85	2
maximum	933	96	786	98	393	94

Het berekende langjarig gemiddelde en de standaardafwijking van de neerslag, 730 mm en 117 mm, komen goed overeen met de door het KNMI (1982) gepubliceerde waarden van 746 mm en 137 mm voor district 13 (oostelijk deel van Noord-Brabant) gedurende de periode 1951-1980. De gemiddelde potentiële verdamping van 675 mm is nagenoeg gelijk aan de langjarig (1951-1980) gemiddelde potentiële verdamping van 690 mm voor station Eindhoven (KNMI, 1982). Het gemiddeld neerslagoverschot (190 mm) komt nagenoeg overeen met het te verwachten overschot van (746 - 0,8*690 =) 194 mm. De reeks blijkt voor langjarig gemiddelden representatief te zijn. De verdelingen van de overschrijdingskansen voor de neerslag, de potentiële verdamping en het neerslagoverschot variëren respectievelijk van 10% tot 96%, van 2% tot 84% en van 6% tot 98%. Dat betekent dat zowel extreem natte (1984 en 1974) als extreem droge (1975 en 1976) weerjaren binnen deze reeks voorkomen. Hoewel de reeks weerjaren naar statistische maatstaven kort is (N = 16), lijkt hij evenwichtig van opbouw en daarmee geschikt voor het doel van deze studie. Uit deze reeks is 1983 geselecteerd als gemiddeld weerjaar.

Met deze basisgegevens is de referentiegewasverdamping voor gras berekend naar Makkink. Voor de overige grondgebruiksvormen is de potentiële gewasverdamping gerelateerd aan de potentiële verdamping van gras door middel van gewasfactoren (Feddes, 1987). Voor maïs, bouwland en de klasse 'overige natuur' is de neerslag gereduceerd met 10% interceptie. Voor de bossen is in de berekening van de potentiële verdamping gecorrigeerd voor interceptie.

Verondersteld is dat in 90% van het bebouwde areaal de neerslag wordt opgevangen in rioleringsstelsels of verdampt. Dit percentage is groter dan de met behulp van een (over een periode van 10 weerjaren) gemiddelde waterbalans voor Lelystad bepaalde

percentages (Van de Ven, 1985) omdat de LGN een hoge resolutie heeft (en daardoor bijvoorbeeld ook in stedelijke gebieden onderscheid maakt tussen bebouwing en gras/kale grond).

4.11 Schematisering en invoergegevens van het oppervlaktewater

Het oppervlaktewatersysteem is geschematiseerd tot één reservoir met een imaginaire stuw aan het uitstroompunt per deelgebied. Ieder deelgebied vormt een zelfstandig functionerend deelstroomgebiedje. Er vind geen uitwisseling plaats tussen deelgebieden. Om reële afvoeren te berekenen moeten de ontwateringsdieptes, de berging en de breedte van de imaginaire stuw worden geschat. Om de berekende afvoeren te kunnen vergelijken met gemeten afvoeren kunnen de berekende afvoeren van de deelgebiedjes binnen een stroomgebied worden gesommeerd. Daartoe moeten de grenzen van de stroomgebieden worden gebruikt voor het bepalen van de begrenzingen van de deelgebieden.

Voor berekening van de drainage/infiltratie van het secundaire en tertiaire systeem met behulp van een gemiddelde grondwaterstands-afvoerrelatie per deelgebied zijn gegevens nodig over de dichtheid van de waterlopen per deelgebied, de diepte van de waterlopen en de drainageweerstanden van deze waterlopen. Per deelgebied worden gemiddelde waarden opgelegd. In werkelijkheid kunnen binnen een deelgebied, zelfs binnen eenzelfde grondwaterklasse, de slootdichtheid, de ontwateringsbasis en de dimensionering van de waterlopen van met name het derde-orde systeem sterk variëren.

De waterlopen binnen het studiegebied (voor zover in beheer bij het waterschap De Dommel) zijn gedigitaliseerd met behulp van door het waterschap verstrekte kaarten. De waterlopen worden onderscheiden in hoofdwaterlopen (beken en kanalen), behorende tot het secundair stelsel (sloten/beken met een ontwaterende en afwaterende functie) en een tertiair stelsel (ontwaterende (perceels)sloten).

De ontwateringsbases en de drainageweerstanden (Tabel 4) zijn in eerste instantie afgeleid uit de, in de studie naar wateraanvoer en -conservering in midden en oostelijk Noord-Brabant (Wergroep Waterbeheer Noord-Brabant, 1990) gecalibreerde, data van IWACO (1987). De aangepaste gegevens per grondwatertrap zijn omgewerkt naar drainageweerstanden per deelgebied door de reciproke waarden van de weerstanden per grondwatertrap gewogen naar het oppervlak van de grondwatertrap te sommeren en de vervangingsweerstand te bepalen:

$$\frac{1}{\gamma_s} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\frac{A_i}{\gamma_i})}{\sum_{i=1}^{i=n} (A_i)} \qquad (1)$$

γ_s = *vervangingsdrainageweerstand per deelgebied [d]*
γ_i = *drainageweerstand Gt-klasse in een deelgebied[d]*
A_i = *oppervlakte Gt-klasse in een deelgebied [m]*

Om deze sommatie mogelijk te maken zijn de ontwateringsbases van de Werkgroep Waterbeheer Noord- Brabant aangepast zodat deze voor alle grondwatertrappen binnen een grondwaterklasse gelijk zijn (tabel 4).

Tabel 4 Drainageweerstanden (w) per grondwatertrap voor het 2e-orde (2) en 3e-orde (3) systeem met een gelijke ontwateringsbasis (b) per grondwaterklasse (afgeleid van Werkgroep Waterbeheer Noord-Brabant 1990).

grondwatertrap	II(*)	III	III*	V	V*	VI	VII(*)
grondwaterklasse	1	1	1	2	2	3	3
basis 2e-orde [cm-mv]	-	120	120	140	140	180	180
basis 3e-orde [cm-mv]	60	60	60	60	60	60	60
weerstand 2e-orde [d]	-	500	225	575	1600	400	500
weerstand 3e-orde [d]	125	100	300	420	1000	400	500

Omdat de afgeleide drainageweerstanden uit Tabel 4 geen realistisch ruimtelijk beeld blijken te geven voor het studiegebied (dit lijkt met name te worden veroorzaakt door de lage weerstanden voor de hogere grondwatertrappen), is de drainageweerstand benaderd op basis van de theorie van Ernst (1978).

De drainageweerstand kan worden berekend door de gemiddelde drainafstand binnen een gebied te vermenigvuldigen met de gemiddelde weerstand per meter drainafstand:

$$\gamma = L * (\frac{L}{8 * k_h * D} + \Omega + \frac{C_s}{P}) \qquad (2)$$

γ = *drainageweerstand* *[d]*
k_h = *horizontale doorlatendheid* *[m.d^{-1}]*
D = *dikte doorstroomde laag* *[m]*
L = *drainafstand* *[m^2.m^{-1}]*
Ω = *radiale weerstandsfactor* *[d.m^{-1}]*
C_s = *bodemweerstand* *[d]*
P = *natte omtrek van ontwateringsmiddel* *[m]*

De radiale weerstandsfactor geeft de radiale drainageweerstand per meter drainafstand en niet per meter waterloop! De drainafstand is de inverse van de draindichtheid (lengte aan waterlopen per oppervlakteëenheid) en kan in het GIS worden bepaald

als het quotiënt van het oppervlak van het deelgebied en de gesommeerde lengte van de waterlopen in dit deelgebied:

$$L = \frac{A}{l_t} \tag{3}$$

A = *oppervlakte deelgebied* [m^2]
l_t = *totale lengte aan waterlopen in deelgebied*[m]

De drainageweerstand per meter drainafstand bestaat uit drie componenten (vergelijking 2). De eerste component beschrijft de horizontale stroming, de tweede component beschrijft de radiale stroming en de derde component beschrijft de intredeweerstand.

Door binnen een deelgebied per ontwateringssysteem en per grondwaterklasse de weerstand per meter drainafstand constant te beschouwen:

$$\omega = \frac{L}{8 * k_h * D} + \Omega + \frac{C_s}{P} = constant \tag{4}$$

w = *konstante weerstand per meter drainafstand*[$d.m^{-1}$]

wordt de drainageweerstand lineair afhankelijk van de drainafstand:

$$\gamma = L * w \tag{5}$$

en kan de drainageweerstand (Fig. 5) per ontwateringssysteem worden geschat door deze constante te vermenigvuldigen met de totale oppervlakte van het deelgebied en te delen door de gesommeerde lengte van de waterlopen in een deelgebied:

$$\gamma = \frac{A}{l_t} * w \tag{6}$$

De weerstand per meter drainafstand is per grondwaterklasse en per ontwateringssysteem geschat (Tabel 5). Daarbij is verondersteld dat de variatie in L/kD-waarden, radiale weerstand per meter drainafstand en bodemweerstand binnen het studiegebied zijn te verwaarlozen. De weerstand per meter drainafstand is dan uitsluitend afhankelijk van de drainafstand en van de natte omtrek. De natte omtrek van het 2e-orde systeem is groter dan de natte omtrek van het 3e-orde systeem en dus is de weerstand per meter drainafstand voor het 3e-orde systeem groter dan voor het 2e-orde systeem bij eenzelfde grondwaterklasse. De weerstand per meter drainafstand

is voor grondwaterklasse 3 groter dan voor grondwaterklasse 1 omdat voor grondwaterklasse 3 de drainafstand groter en natte omtrek kleiner is.

Tabel 5 Geschatte weerstanden per meter drainafstand [d.m-1] per grondwaterklasse voor de waterlopen van het secundaire en het tertiaire systeem

grondwaterklasse	1	2	3
3e-orde systeem	1,0	1,6	2,0
2e-orde systeem	0,7	1,2	1,5

De dichtheden van de waterlopen van het secundaire systeem zijn per deelgebied berekend met de per deelgebied in ARC/INFO vastgelegde lengten en oppervlaktes. Daartoe is verondersteld dat alle bij het waterschap De Dommel in beheer zijnde waterlopen tot het secundaire systeem behoren, en alle overige (niet-gedigitaliseerde) sloten tot het tertiaire systeem. Wat betreft het tertiaire systeem is per grondwaterklassen voor een aantal kilometer-vakken met een landbouwkundig grondgebruik een schatting gemaakt van de dichtheid op basis van de topografische kaart 1:50 000. Vervolgens is per grondwaterklasse een gemiddelde dichtheid vastgesteld (Tabel 6). Voor het toekennen van dichtheden aan de deelgebieden zijn per deelgebied per grondwaterklasse de oppervlaktes met landbouwkundig gebruik vermenigvuldigd met de geschatte gemiddelde dichtheid per grondwaterklasse. Door sommatie van de dichtheden per grondwaterklasse per deelgebied is de totale dichtheid per deelgebied verkegen.

Tabel 6 Op basis van de topkaart geschatte gemiddelde dichtheid van de waterlopen van het tertiaire systeem

grondwaterklasse	1	2	3
dichtheid [m/ha]	120	80	60

Voor de deelgebieden buiten het eigenlijke studiegebied is de dichtheid van het secundaire systeem vastgesteld op basis van de grondwaterklassen. Daartoe is binnen het studiegebied per grondwaterklasse de gemiddelde verhouding in dichtheid tussen het secundaire- en tertiaire systeem berekend. De berekende verhoudingen zijn voor de grondwaterklassen 1, 2 en 3 respectievelijk 0,23, 0,24 en 0,24. De berekende verhouding tussen het secundaire- en tertiaire syteem blijkt nagenoeg constant te zijn (en is blijkbaar onafhankelijk van de grondwaterklasse). Door de dichtheid van het tertiaire systeem buiten het studiegebied te vermenigvuldigen met deze verhouding is de gemiddelde dichtheid van het secundaire systeem voor de buitengebieden berekend.

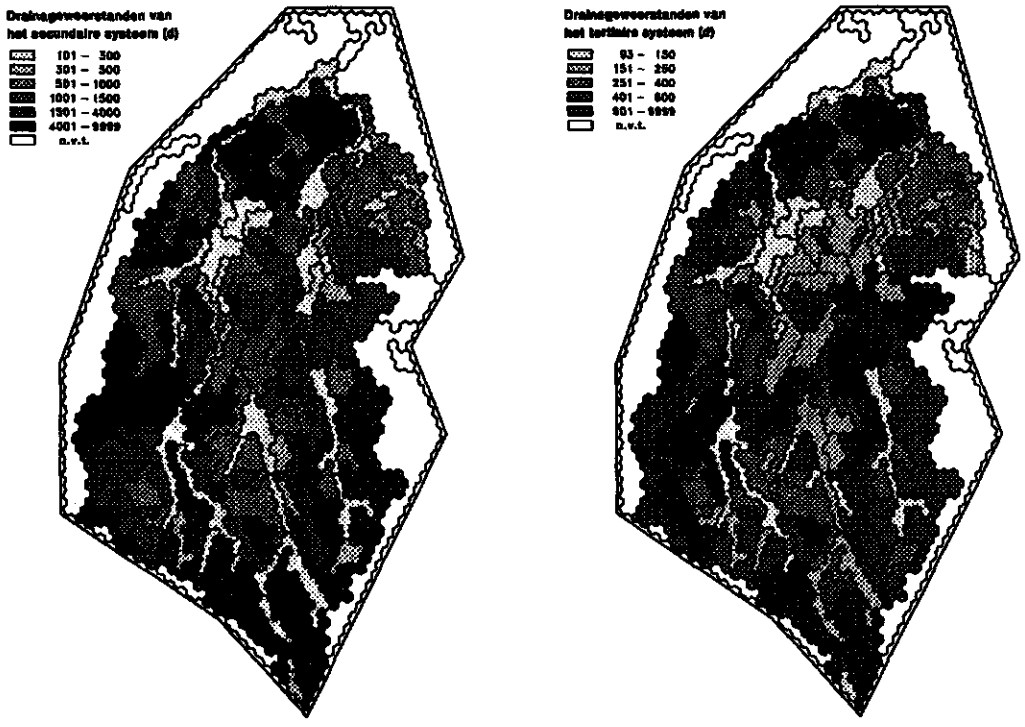

Fig. 5 De drainageweerstanden van het secundaire (a) en tertiaire (b) systeem.

Aan de intrekgebieden wordt door deze werkwijze een hoge drainageweerstand toegekend. Voor de intensief ontwaterde beekdalen worden lage drainageweerstanden bepaald. De ligging van de beekdalen en de ligging van de dekzandruggen zijn in het verkregen patroon van drainageweerstanden (figuur 5) te herkennen.

De drainageflux van een waterloop wordt in het model berekend door:

$$q = \frac{\Delta h}{\gamma} \qquad (7)$$

q = *flux* $[m.d^{-1}]$
Δh = *stijghoogte-verschil* $[m]$

De afvoer van de waterlopen uit een klasse binnen een deelgebied is gelijk aan de flux maal de oppervlakte. Substitueren van de vergelijking voor de drainageweerstand (3) en de vergelijking voor de drainafstand (4) leidt tot:

$$Q = \frac{l_t}{w} * \Delta h \qquad (8)$$

Q = *afvoer* $[m^3.d^{-1}]$

Hieruit volgt dat het af te voeren debiet evenredig is met de totale lengte van de binnen het deelgebied aanwezige waterlopen en het potentiaalverschil tussen het grond- en oppervlaktewater. Het af te voeren debiet is omgekeerd evenredig met de weerstand per meter waterloop.

Per oppervlaktewatersysteem zijn naast de dichtheden van de systemen per deelgebied de diepte, de bodembreedte en de taludhelling nodig om bij verschillende waterstanden de berging in het oppervlaktewater- reservoir in het model te berekenen. Geprobeerd is een methode te volgen waarbij ieder deelgebied volgens gangbare ontwerpnormen wordt ontwaterd: de dieptes van de waterlopen zijn overeenkomstig de schematisering naar de Werkgroep Waterbeheer Noord-Brabant (1990, zie Tabel 4); de taludhellingen zijn gegeven door Waterschap de Dommel; de bodembreedtes zijn berekend met empirische relaties of worden bepaald door de minimale afmeting van 0,50 meter (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988). Aan de benedenstroomse zijde van ieder deelgebied is een denkbeeldige overlaat gesitueerd. Deze overlaat bepaalt de waterstand afhankelijk van de hoeveelheid afvoer uit het deelgebied. Om reële waarden voor de Q-h relaties te verkrijgen is de maatgevende afvoer per deelgebied vastgesteld. Dit is gebeurd door de maatgevende afvoeren per grondwatertrap (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988) te clusteren tot maatgevende afvoeren (l.s-1.ha-1) per grondwaterklasse (Tabel 7). Deze maatgevende afvoeren worden voor Brabant met 25% gereduceerd (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988) .

Tabel 7 Maatgevende afvoeren (l.s-1.ha-1) per grondwaterklasse

grondwaterklasse	1	2	3
maatgevende afvoer	1,50	0,75	0,50

De totale afvoer bij hoogwaterpeil (frequentie 1 á 2 dagen per jaar) is berekend door de maatgevende afvoer te vermenigvuldigen met het oppervlak cultuurgrond (dit om overdimensionering in deelgebieden met veel natuur te voorkomen en omdat de maatgevende afvoeren tamelijk hoog lijken te zijn):

$$Q_h = q_h * A_c \qquad (9)$$

Q_h = *afvoer bij hoogwaterpeil* [$l.s^{-1}$]
q_h = *maatgevende afvoer (flux)* [$l.s^{-1}ha^{-1}$]
A_c = *oppervlakte cultuurgrond* [*ha*]

De breedte van een rechthoekige, volkomen overlaat kan worden uitgerekend (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988):

$$B = \frac{Q_h}{1.7 * m * b * (h_s)^{\frac{3}{2}}} \qquad (10)$$

Q	=	*debiet*	$[l.s^{-1}]$
m	=	*vormfactor*	[-]
b	=	*breedte van de stuw*	[m]
h_s	=	*overstorthoogte*	[m]

Door de vergelijkingen 6 en 7 gelijk te stellen en door uit te gaan van een overstorthoogte bij hoogwaterpeil van 50 cm boven de stuwkruin en een vormfactor van 1.11 (range van vormfactoren loopt van 0.85 tot 1.37; Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988) kan de breedte van een denkbeeldige overlaat worden berekend met:

$$b = 2.0 * q_h * A_c \qquad (11)$$

De Q-h relatie en de berging zijn berekend met het programma Femsin (Querner, 1988). Daarbij is rekening gehouden met opstuwing als gevolg van de stomingsweerstand in de waterlopen.

De drooglegging-ontwerpnormen voor zandgrond zijn 0.90 m-mv voor grasland en 1.10 m-mv voor bouwland. In deze studie is uitgegaan van een drooglegging-ontwerpnorm van 0.90 m-mv (grasland) voor grondwaterklasse I, van 1.00 m-mv (gemiddelde van grasland en bouwland) voor grondwaterklasse II, en van 1.10 m-mv (bouwland) voor grondwaterklasse III. Om het effect van reliëfverschillen binnen de deelgebieden te verdisconteren is het stuwpeil verlaagd voor de grondwaterklassen I, II en III met respectievelijk 0.10, 0.20 en 0.30 m. De gebruikte stuwpeilen zijn 1,00 m-mv voor grondwaterklasse I, op 1,20 m-mv voor grondwaterklasse II en op 1,40 m-mv voor grondwaterklasse III. In de hoger gelegen delen zal de waterstand regelmatig tot onder het stuwpeil zakken, en kunnen de waterlopen zelfs droogvallen (de drainagebasis is 1,20 m-mv voor grondwaterklasse I, 1,40 m-mv voor grondwaterklasse II en 1,80 m-mv voor grondwaterklasse III).

Omdat in het studiegebied nauwelijks greppels voorkomen is deze optie in het model samen met de bergingsfactor gebruikt om effecten van microreliëf (plasvorming en oppervlakkige afvoer) te simuleren. De bergingsfactor in de onverzadigde zone is voor laagjes van 10 cm bodem van 250 cm-mv tot 10 cm-mv berekend met CAPSEV (Wesseling, 1991). Aan het maaiveld heeft de bergingsfactor een waarde 1,0. Door greppels te definiëren waarvan de bodem 10 cm - mv ligt, zal oppervlakkige afvoer optreden bij grondwaterstanden hoger dan 10 cm - mv terwijl tevens een grote berging wordt verkregen in de zone tussen 10 cm - mv en het maaiveld. Door de drainageweerstand voor de greppels niet te klein te nemen wordt bereikt dat de grondwaterspiegel tot aan het maaiveld kan blijven stijgen. Voor de berekeningen is voor de greppels een drainageweerstand van 50 dagen gebruikt.

De drainageweerstand van het Wilhelminakanaal is met SIMGRO berekend. Daartoe moeten de lengte kanaal per invloedsgebied van een knooppunt, de natte omtrek, de bodembreedte, de bodemhoogte en het waterpeil van het kanaal, alsook de radiale weerstand en de intreeweerstand voor de bodemlagen bekend zijn. De lengten van de kanalen per knooppunt zijn vastgesteld m.b.v. ARC/INFO, de hydraulische data zijn afkomstig van Rijkswaterstaat, de weerstanden zijn geschat. De radiale weerstand is berekend voor een breed kanaal volgens Ernst (1978):

$$\Omega = \frac{1}{\pi * k} * \ln\left(f * \frac{D}{P}\right) \qquad (12)$$

Ω	=	*radiale weerstandsfactor*	$[d.m^{-1}]$
k	=	*doorlatendheid*	$[m.d^{-1}]$
f	=	*vormfactor*	[-]
D	=	*dikte doorstroomde laag*	[m]
P	=	*natte omtrek*	[m]

Gegevens over de verliezen binnen het kanaal zijn bij Rijkswaterstaat niet beschikbaar zodat het niet mogelijk is met behulp van de waterbalans een schatting te maken van de intreeweerstand. Aan de intreeweerstand ($c^{s)}$ is een waarde van 50 dagen toegekend (Broks Adviezen, 1990). Indien gegevens verzameld zouden kunnen worden over grondwaterstanden vlak langs het kanaal, dan zou door calibratie een betere waarde van de intredeweerstand kunnen worden verkregen.

De in SIMGRO gedefinieerde hergebruiksfactor is buiten werking gesteld door er een waarde van 100% aan toe te kennen. Deze hergebruiksfactor beschrijft de fractie van de af te voeren hoeveelheid water die in het oppervlaktewater-bakje terecht komt en dus binnen het deelgebied kan infiltreren. Uitschakelen van deze factor bleek noodzakelijk omdat SIMGRO bijzonder gevoelig blijkt te zijn voor deze empirische factor en omdat als gevolg van de relatief kleine deelgebieden er geen reden is om een lagere waarde te gebruiken.

4.12 Initiële waarden

De initiële stijghoogtes per knooppunt zijn vastgesteld door per knooppunt de grondwatertrap te bepalen en de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand per grondwatertrap af te trekken van de maaiveldshoogte per knooppunt. De verkregen stijghoogtes zijn aan alle vier onderscheiden modelpakketten toegekend omdat uit de door IWACO (1987) gepubliceerde isohypsenkaarten blijkt dat de verschillen tussen de lagen klein zijn en omdat het effect van een foutieve startwaarde na enige tijd uitdempt. De startwaarden van de noordelijke modelrand zijn gelijk aan de opgelegde potentialen. Door op basis van deze startwaarden een stationaire berekening uit te voeren zijn nieuwe stijghoogten per knooppunt per laag berekend. Deze waarden zijn gebruikt als initiële stijghoogtes voor startberekeningen met de drie weerjaren 1970, 1971 en 1972 waarna de berekeningen voor de reeks weerjaren van 1970 tot en met 1986 zijn uitgevoerd.

5 Resultaten van de modelberekeningen

Het calibreren van een modelparameter heeft alleen zin wanneer:
- het model gevoelig is voor de betreffende parameter;
- bekend is binnen welke grenzen de waarde van een parameter kan variëren;
- voldoende gegevens over de afvoeren en grondwaterstanden van het gebied beschikbaar zijn;
- de waterbalansen op (deel)stroomgebiedsniveau bekend zijn.

Omdat dit een verkennende modelstudie is waarbinnen geen mogelijkheid bestond om een uitgebreid meetprogramma op te zetten om grondwaterstanden en afvoeren op een gedetailleerde schaal te meten, zijn de invoergegevens niet gecalibreerd. Daarnaast is ervan uitgegegaan dat de door IWACO aangeleverde geohydrologische dataset betrouwbaar is en dat de overige gegevens voldoende accuraat zijn. De gebruikte dataset is globaal getoetst door de resultaten van de berekeningen voor het winterhalfjaar (stationair doorgerekend) en het (niet-stationair berekende) zomerhalfjaar van 1980 en 1982 te vergelijken met de op overeenkomstige wijze berekende en aan de hand van stijghoogtereeksen getoetste rekenresultaten van IWACO (1987). De isohypsen berekend met de methode waarmee een eerste indruk is verkregen (één winterhalfjaar stationair doorrekenen en één zomerhalfjaar niet-stationair doorrekenen) zijn vergeleken met de resultaten van de (niet-stationair) berekende historische reeks om de bruikbaarheid van de 'stationaire' benadering te toetsen. Een nadere kwalitatieve toetsing is uitgevoerd door de reeks van 16 weerjaren (1971 t/m 1986) door te rekenen met gedurende de hele periode de onttrekkingen van 1989 (totaal 21 miljoen m3; waarvan 19,5 miljoen door de pompstations Haaren, Oirschot en Vessem). Uit de rekenresultaten zijn langjarige gemiddelden te berekenen en zijn de verschillen tussen de weerjaren bestudeerd. Deze berekening beschrijft de (langjarig gemiddelde) huidige situatie. De dataset is kwantitatief gevalideerd door een berekening uit te voeren voor dezelfde reeks weerjaren met de werkelijke onttrekkingen per weerjaar. De resultaten beschrijven de historische reeks. De berekende afvoeren zijn voor het studiegebied op jaarbasis gesommeerd en zijn vergeleken met de door Waterschap De Dommel gemeten afvoeren. Het verloop in de tijd en de hoogte van de potentialen is getoetst aan gemeten stijghoogtes in peilbuizen voor zover in het studiegebied buizen konden worden gevonden met voldoende betrouwbare en voor de omgeving representatieve meetreeksen. De berekende beregeningsgiften zijn vergeleken met de rekenresultaten van een studie naar de effecten van ingrepen in de beregening (Metselaar et al., 1991).

5.1 Globale toetsing voor winter en zomer 1980 en 1982

Een eerste indruk van de resultaten is verkregen door de isohypsenkaarten voor 15 maart en 27 september 1980 (Fig. 6) te bestuderen. De isohypsen lopen ruwweg oost-west, de stijghoogte neemt naar het noorden af zodat het grondwater regionaal bezien noordwaarts stroomt. Dit patroon is het meest duidelijk voor het vierde

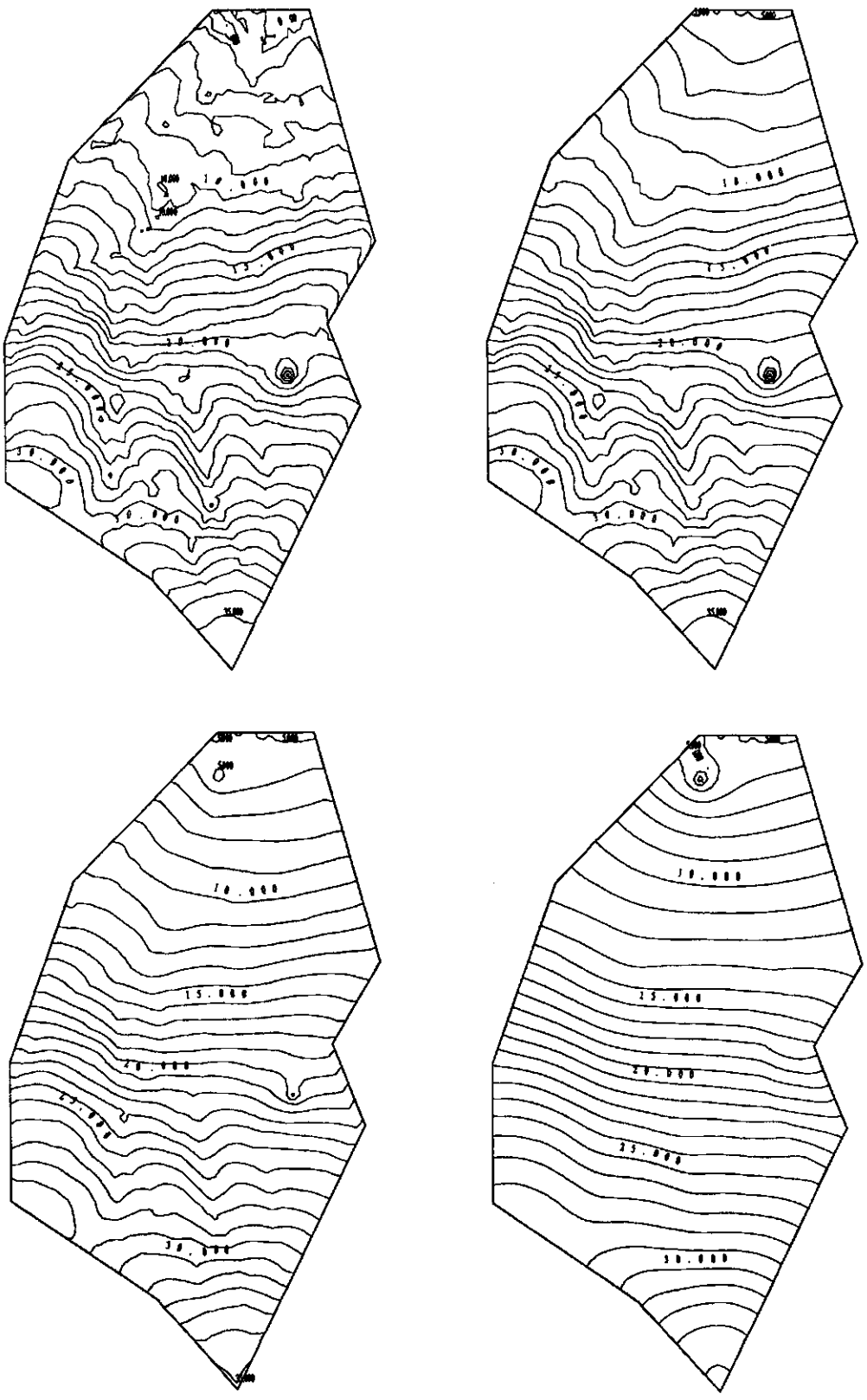

Fig. 6 De berekende isohypsen voor de watervoerende pakketten 1 (a), 2 (b), 3 (c) en 4(d) op 27 september 1980

modelpakket omdat in deze laag de lokale effecten van de relatieve hoogteligging en/of ontwatering zijn uitgedempt. De ligging van de beken is duidelijk terug te vinden in het isohypsenpatroon van de eerste drie modelpakketten. In deze pakketten is ook de aanwezigheid van pompstation Vessem te herkennen. In mindere mate is de invloed van pompstation Luijksgestel in de eerste twee pakketten zichtbaar. In het vierde pakket is de onttrekkingskegel van pompstation Haaren zichtbaar. De isohypsen van het eerste pakket vertonen in september een minder grillig verloop dan in maart. Dit wijst op een verminderde invloed van de beken als gevolg van een daling van de grondwaterstand. De isohypsen zijn dan ook in noordelijke richting verschoven. Hetzelfde is in afnemende mate waar te nemen in het tweede en derde pakket. De isohypsen van het vierde pakket vertonen nauwelijks enig verschil voor beide perioden.

Door de isohypsenkaarten voor de berekende stijghoogten van het eerste watervoerende modelpakket op 15 maart 1980, 27 september 1980, 15 maart 1982, 9 juli 1982 en 17 september 1982 te vergelijken met de door IWACO (1987) gepresenteerde isohypsenkaarten is een eerste indruk verkregen van de overeenkomst in simulatieresultaten. De kaarten zijn niet zondermeer te vergelijken omdat de afstand tussen de knooppunten sterk verschilt. IWACO hanteert een minimale oppervlakte van de invloedsgebieden van 0,4 km^2, en een maximale oppervlakte van 12,5 km^2; Het gemiddelde oppervlak bedraagt 4,0 km^2. In deze studie bedraagt het kleinste oppervlak 0,05 km^2 het grootste oppervlak 0,4 km^2 en bedraagt het gemiddelde oppervlak 0,25 km^2. Het regionale patroon moet hetzelfde zijn omdat de randen zijn vastgesteld op basis van de IWACO-studie en omdat de geohydrologische invoergegevens in beide studies dezelfde zijn. De in deze studie berekende isohypsen moeten echter ook lokale patronen weergeven.

Vergelijking van de resultaten laat zien dat:
- De regionale isohypsenpatronen over het hele studiegebied nagenoeg gelijk zijn.
- Het regionale patroon van de beide studies afwijkt rond pompstation Vessem en in de zuidwestelijke hoek van het modelgebied.
- De berekende stijghoogten in het noordelijk deel van het studiegebied (de Slenk) nagenoeg identiek zijn.
- In het zuidelijk deel van het studiegebied in deze studie hogere stijghoogtes worden berekend, in de meest zuidelijke punt van het studiegebied daarentegen worden lagere stijghoogtes berekend (dit is mogelijk een fout veroorzaakt door de opgelegde randvoorwaarden in deze studie).
- De lokale effecten van de beekdalen in deze studie beter zichtbaar zijn.
- De lokale verlaging van de stijghoogten rond pompstation Vessem in deze studie gedetailleerder wordt weergegeven.

De met de historische reeks 1970-1986 berekende isohypsen op 27 september 1980 (figuur 6) zijn vergeleken met de isohypsen op dezelfde datum berekend met een stationair winterhalfjaar gevolgd door niet-stationair zomerhalfjaar. De berekende isohypsen verschillen nauwelijks in de Slenk. In de Kempen nemen de verschillen in de bovenste watervoerende pakketten toe naarmate de zuidgrens van het studiegebied wordt genaderd. Op deze grens wordt met de historische reeks (en bij identieke randvoorwaarden) een grondwaterstand berekend die bijna twee meter lager

is in de meest zuidelijke punt, en ongeveer één meter lager is in de zuidwestelijke hoek. In het tweede modelpakket (eerste aquifer) worden vergelijkbare dalingen in de stijghoogten berekend. In het vierde modelpakket (diepe aquifers) is het verschil te verwaarlozen. De oorzaak van deze verschillen ligt in de gebruikte rekenmethode. Voor het schatten van de initiële situatie blijkt het stationair doorrekenen van één winterhalfjaar niet voldoende. De begintoestand van een hydrologisch systeem is een functie van de voorafgaande gebeurtenissen (geheugenfunctie). Het zuidelijk deel van het studiegebied (de Kempen) met zijn andere geohydrologische opbouw vormt een gevoeliger systeem dan het noordelijk deel van het studiegebied (de Slenk). Voor gevoelige systemen (systemen met een langjarig geheugen) moet voor het schatten van de beginsituatie een aantal werkelijk optredende weerjaren (de voorgeschiedenis) door te rekenen.

5.2 Kwalitatieve toetsing van de huidige situatie m.b.v. langjarige gemiddelden

5.2.1 Grondwaterstanden

Als eerste toets zijn kaarten van de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) en Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) vervaardigd, zowel op basis van de geschematiseerde grondwatertrappenkaart als voor de resultaten van de langjarige reeks. Omdat de deelgebiedsindeling is gemaakt op basis van grondwaterklassen (tabel 1) zijn de legendaklassen hieraan aangepast. Figuur 7 geeft de GHG en GLG volgens de schematisering naar de grondwatertrappenkaart, figuur 8 laat de rekenresultaten zien. Vergelijken van de kaart en de berekeningen laten voor de GLG een goed gelijkend ruimtelijk beeld zien voor de stroomgebieden van de Reusel, Rosep en de bovenloop van de Grote Beerze. De bovenloop van de kleine Beerze vertoont in de buurt van pompstation Vessem een lagere berekende GLG. In de benedenloop van de Beerze wordt rond De Baest en de Mortelen een hogere GLG berekend dan de volgens de schematisering mag worden verwacht. De Gt-kaart laat zien dat dit een complex gebied is met overwegend Gt's III en V. Voor Gt III is de GLG ondieper dan 1,20 m-mv, voor Gt V is de GLG dieper dan 1,20 m-mv. Omdat de GLG binnen dit gebied varieert rond de klassegrens van 1,20 m- mv en omdat de berekende GLG's naar de 1,20 neigen, vallen de rekenresultaten binnen het interval van te verwachten waarden. Daarbij moet niet worden vergeten dat bij het schematiseren van dit gebied de Gt's II en III zijn weggevallen (het oppervlak Gt V is groter binnen de deelgebieden), zodat de geschematiseerde grondwatertrappenkaart een vertekend beeld weergeeft. De berekende GLG's ondieper dan 1,20 meter voor het gebied rond de Mortelen en de Kerkebosch stroken niet met de bevindingen van Vlot et al. (1992). Vlot et al. baseren hun analyse voornamelijk op de Gt-kaart en op waarnemingen uit de droge weerjaren 1991 en 1992. Stuurman (1992, pers. com.) stelt in aanvulling hierop dat ten gevolge van enkele diep (3 tot 4 m- mv) ingegraven afwateringskanalen in het gebied de GLG dieper dan 1,20 m-mv is. Kleijer (1992, pers. com.) daarentegen stelt dat de GLG in dit gebied op de Gt-kaart te diep is weergegeven. Dit wordt veroorzaakt doordat bij de karteringen van deze bodems met leem in de ondergrond de GLG veelal te diep wordt geschat. Omdat bij verbetering van de

detailontwatering de GHG wel daalt maar de GLG niet of nauwelijks, lijken volgens Kleijer de rekenresultaten met de werkelijkheid overeen te komen. De op de Gt-kaart voorkomende Gt's III en V zijn op dit moment in werkelijkheid respectievelijk Gt IV (GLG kleiner dan 1,20 m-mv) en Gt IV of VI (GLG dieper dan 1,20 m-mv). De berekende Gt's III rond de Mortelen worden geclassificeerd als Gt III* en hebben een ondiepere GHG dan de Gt's IV en VI die de huidige situatie beschrijven. Dit kan erop duiden dat de in het model gebruikte ontwateringsbases voor dit gebied te ondiep zijn. De schaal waarop de deelgebieden zijn geschematiseerd en het complexe beeld van de Gt-kaart voor dit deel van het studiegebied in aanmerking nemend, is er geen reden om de modelparameters aan te passen. Door expliciet modelleren van de hoofdwaterlopen en een meer kleinschalige deelgebiedsindeling kan het hydrologisch systeem van dit gebied beter worden gesimuleerd.

De GHG geeft grote verschillen tussen het kaartbeeld en de rekenresultaten. Alle gebieden met een berekende GHG ondieper dan 40 cm-mv hebben deze volgens de kaart ook. Voor een groot aantal deelgebieden dat volgens de kaart ook in deze klasse valt wordt echter een lagere GHG berekend. Dit duidt op een lagere berekende grondwaterstand. Omdat de kaartopnames dateren uit 1980 (50oost), 1973 (51west) en 1963 (56/57west) en de gepresenteerde grondwaterklassen zijn bepaald aan de hand van meetreeksen van minimaal 8 jaar geeft de Gt-kaart een verouderd beeld weer. Aangezien de berekeningen zijn uitgevoerd met de onttrekkingscijfers van 1989 sluit de geconstateerde grondwaterstandsdaling aan bij de waarnemingen van andere onderzoeken (Noordhuis et al., 1990; IWACO, 1987). De oorzaken van de grondwaterstandsdaling zijn :

- het bebossen van de voormalige heidevelden
- het toenemend stedelijk gebied (verhard oppervlak)
- de drinkwateronttrekkingen
- een toename van de gewasverdamping als gevolg van de verhoogde opbrengsten (betere rassen, minder ziektes, intensievere verzorging)
- de onttrekkingen t.b.v. beregening
- de normalisatie van de waterlopen
- de aanleg van buisdrainage (naar schatting is in de laats te 15 jaar 15 tot 20% van de gronden in het studiegebied gedraineerd)
- 'incidentele' verbeteringen van de ontwatering zoals het uitdiepen van sloten.

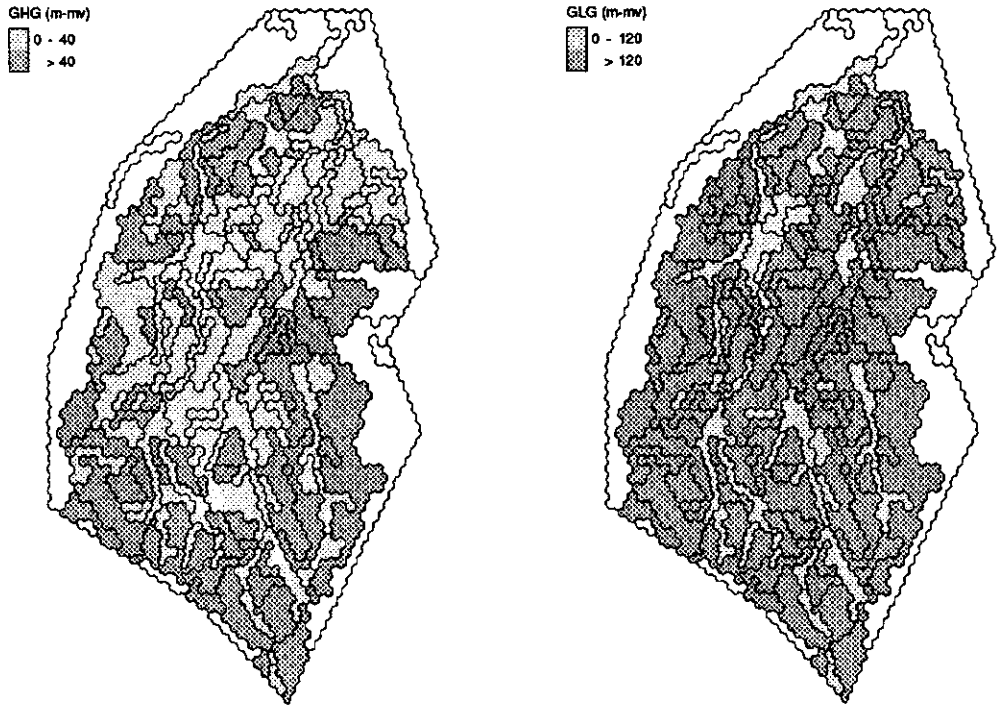

Fig. 7 GHG en GLG overeenkomstig de grondwaterklassen per deelgebied op basis van de Gt-kaart.

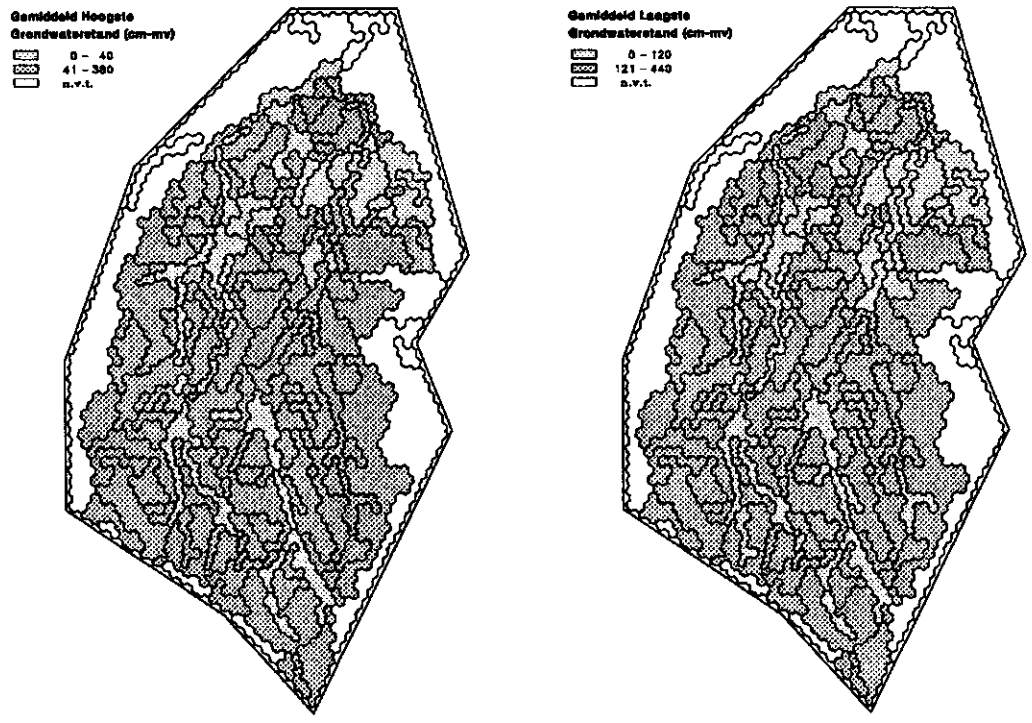

Fig. 8 Berekende GHG en GLG overeenkomstig de grondwaterklassen per deelgebied.

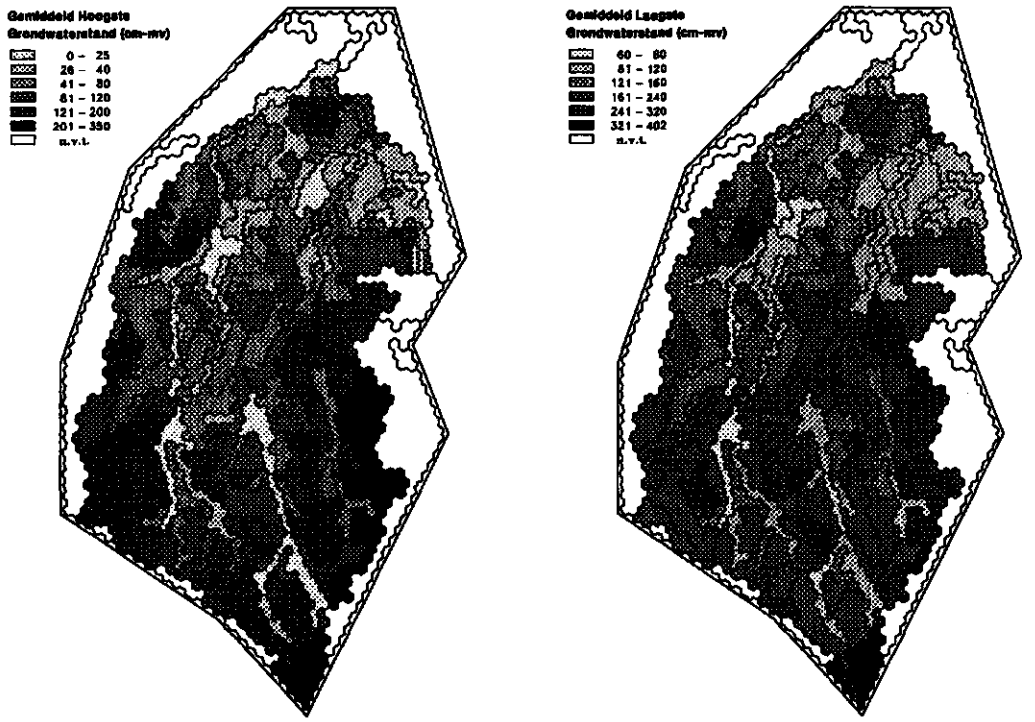

Fig. 9 De berekende GHG en GLG per deelgebied

De relatief lager gelegen deelgebieden (de beekdalen) bezitten volgens de rekenresultaten nog wel GHG's ondieper dan 40 cm-mv. Opvallend is dat de bovenloop van de Kleine Beerze niet meer in deze klasse valt. Dit komt overeen met waarnemingen van Waterschap De Dommel. Volgens het waterschap heeft de Kleine Beerze nauwelijks nog afvoer sinds de volledige capaciteit van pompstation Vessem wordt benut en staat deze waterloop het grootste deel van het jaar droog. Om meer inzicht in de ruimtelijke verdeling binnen het studiegebied te geven zijn de GLG en GHG ook met andere legenda-eenheden weergegeven (Fig. 9).

Om de invloed van de schematisering in deelgebieden te onderzoeken is een meer gedetailleerde kaart vervaardigd door de grondwaterstandsgegevens per knooppunt weer te geven (Fig. 10).

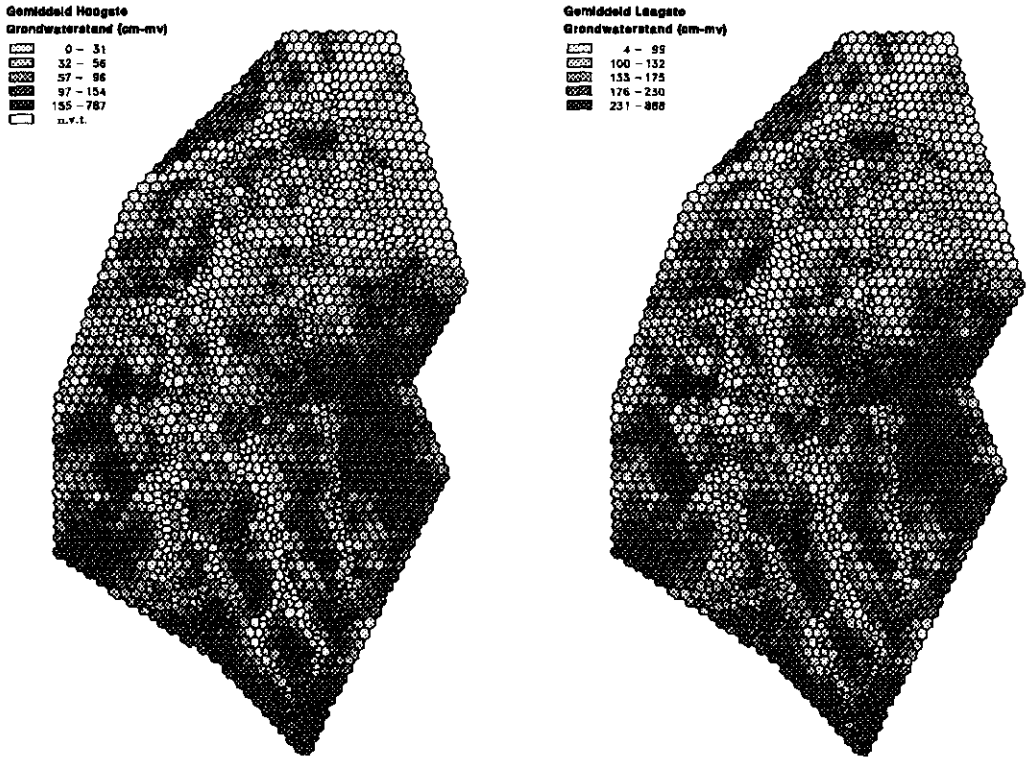

Fig. 10 Berekende GHG en GLG per knooppunt.

Het globale beeld komt overeen met figuur 8. Er verdwijnt informatie bij het berekenen van een (deel)gebiedsgemiddelde GHG en GLG op basis van de door SIMGRO berekende GHG en GLG in de knooppunten. De deelgebiedsindeling beïnvloed de presentatie van resultaten. In het gebied rond de Mortelen en het Kerkebosch worden bijvoorbeeld in een aantal knooppunten GLG's ondieper dan 1,20 m-mv berekend; ten gevolge van de presentatie per deelgebied valt deze informatie echter weg. Ook blijkt uit de rekenresultaten per knooppunt dat dit een complex gebied is (berekende Gt's variërend van II tot en met VI). Een fijnere deelgebiedsindeling is nodig om het systeem beter te kunnen doorgronden.

Het ruimtelijk beeld vertoont op knooppuntsniveu meer verschillen. Opvallend is dat de maximale waarden in figuur 10 veel groter zijn dan in figuur 8. Blijkbaar verdwijnen extremen bij het middelen over de deelgebieden. Bestuderen van figuur 10 maakt duidelijk dat deze zeer diepe grondwaterstanden alleen voorkomen in de meest zuidelijke punt van het studiegebied (ongeveer ter hoogte van Witrijt) en rond pompstation Vessem. Alleen rond pompstation Vessem worden grondwaterstanden dieper dan 6 m-mv worden berekend. De grondwaterstandsverlaging rond de winning wordt op basis van deze data geschat (vergelijken met gegevens van de omringende knooppunten) op 4 meter. Een vergelijkbare daling is af te leiden uit de isohypsen van het eerste pakket in figuur 6. Dit komt goed overeen met de door de Waterleidingsmaatschappij Oost-Brabant gegeven verlaging van 3,50 meter in de directe omgeving van de onttrekking. De vorm van de onttrekkingskegel kan uit deze

(regionale) studie niet worden afgeleid omdat de afstand van de knooppunten rond de drinkwaterwinning daarvoor te groot is.

5.2.2 Kwel/wegzijging

De gecombineerde kwel/wegzijgingskaarten (Fig. 11) laten zien waar de intrekgebieden en de kwelzones in het gebied gelegen zijn.

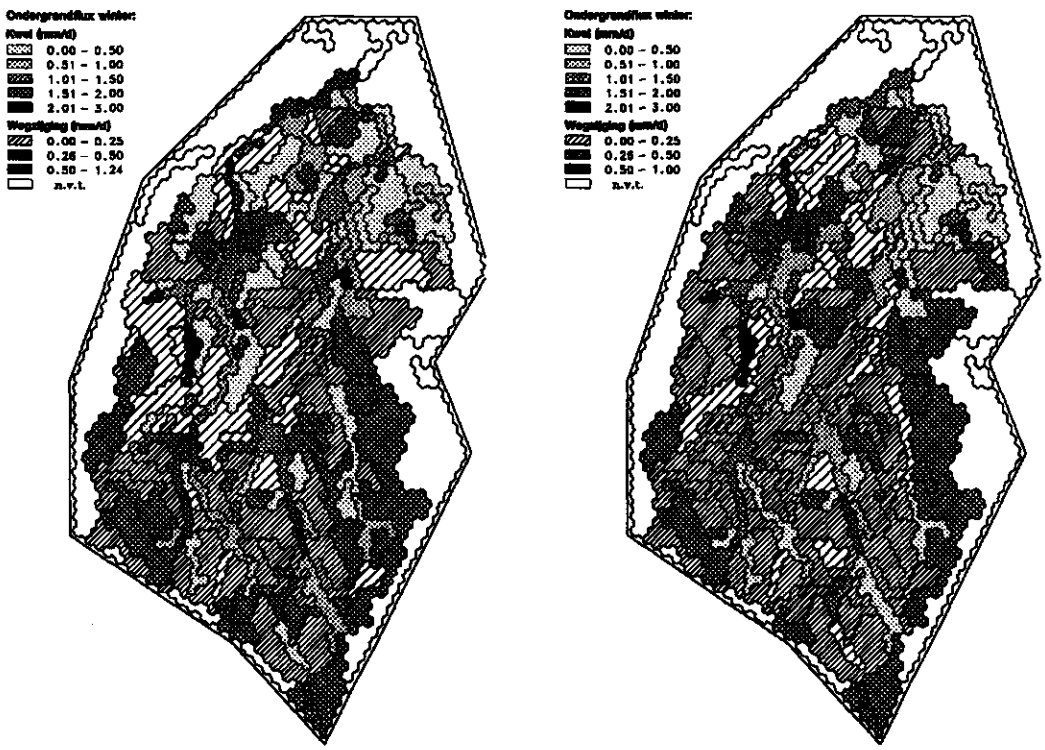

Fig. 11 Kwel/wegzijgingskaart voor het zomerhalfjaar (a) en voor het winterhalfjaar (b)

Kwel is gedefinieerd als een opwaartse flux over het grensvlak tussen het eerste en tweede pakket (stroming van het tweede naar het eerste pakket), wegzijging is gedefinieerd als een neerwaartse flux over hetzelfde vlak (stroming van pakket 1 naar pakket 2). Uitgezonderd de beekdalen fungeert het plateau van de Kempen als intrekgebied, in het noordelijk deel van het studiegebied treedt met name in de zomer kwel op. De Kampina geeft (langjarig gemiddeld) zowel in de winter als de zomer wegzijging. Het regionale patroon van het hydrologisch systeem lijkt goed met de werkelijkheid overeen te komen. De maximale berekende langjarig gemiddelde kwel ligt in de orde van 3 mm/dag, de maximaal berekende langjarig gemiddelde wegzijging is ongeveer 1 mm/dag. Dit zijn reële waarden.

Een nauwkeuriger identificatie van het voorkomen van kwelzones kan worden verkregen door te interpoleren tussen de berekende potentiaalverschillen van de

knooppunten. De resultaten zijn voor september 1980 (langjarige niet-stationaire berekening voor huidige situatie !) weergegeven in figuur 12. Omdat dit het einde van de zomerperiode betreft, bezitten de kwelzones hun maximale afmetingen.

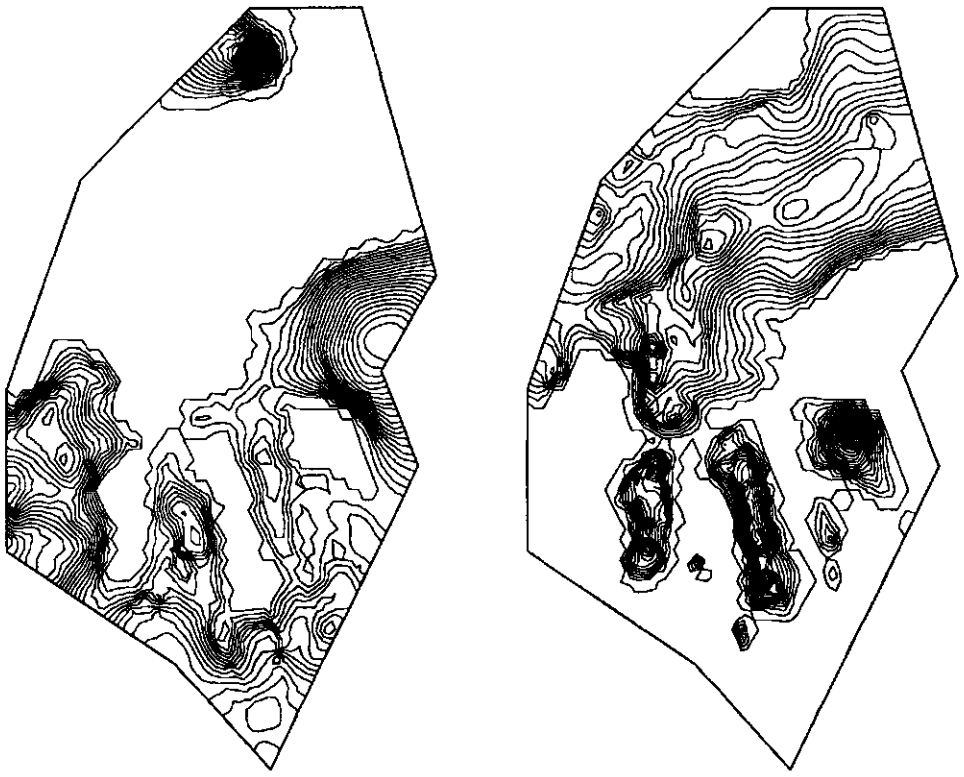

Fig. 12 Kwel- en infiltratiezones zones voor fluxen van het vierde naar het tweede watervoerende modelpakket op basis van potentiaalverschillen.

Door ook de infiltratiegebieden weer te geven wordt het grondwaterstromingssysteem van het studiegebied zichtbaar. De invloed van de pompstations Haaren en Vessem op het regionale systeem blijkt bijzonder groot te zijn. Het effect van deze pompstations kan zichtbaar worden gemaakt door de berekeningen te herhalen waarbij geen onttrekkingen plaatsvinden. De kwelzone van het regionale systeem wordt gevormd door het gebied ten noorden van de lijn Poppel-Oirschot en de zones rond de Reusel en de Grote Beerze. De kwelzone rond de Kleine Beerze is (als gevolg van de invloed van pompstation Vessem) mogelijk een relict van een grotere kwelzone. De intrekgebieden van de subregionale systemen van de Kampina, de Oisterwijksche Heide en de Kerkeindsche Heide/Beekse Bergen te zuidwesten van Moergestel zijn te herkennen. De Middenbrabantse dekzandrug is minder duidelijk te lokaliseren omdat deze gelegen is binnen het regionale infiltratiegebied.

Op basis van de potentiaalverschillen tussen het tweede en het eerste watervoerende pakket kunnen lokale en subregionale systemen worden geïdentificeerd. De beekdalen vormen de belangrijkste kwelzones. Zones met een groot berekend potentiaalverschil blijken een zeer lokaal karakter te hebben. Lokale kwelzones worden berekend voor de Koppenaardsche Heide (ten zuidoosten van Reusel), de Hoogeindsche Beek ten zuiden van de Broekeling en rond het Molenbroek tussen Vessem en Middelbeers;

lokale infiltratiegebieden worden volgens de berekeningen aangetroffen in de buurt van Diesen, Landgoed De Baest, Lennisheuvel, Boxtel, en De Logt. Het voorkomen van kwel over de grens tussen het eerste - en tweede watervoerende pakket hoeft niet te betekenen dat het kwelwater de wortelzone bereikt.

Om de begrenzingen en de samenhang van deze lokale en de subregionale systemen zichtbaar te maken is meer informatie nodig. De koppeling tussen infiltratiegebieden en kwelgebieden kan worden gelegd door het berekenen van stroombanen. De met SIMGRO berekende waterbalanstermen zijn toereikend voor het uitvoeren van een dergelijke verkennende systeemanalyse.

5.2.3 Oppervlaktewaterafvoeren

De langjarig gemiddelde afvoeren van het secundaire en tertiaire open water systeem worden voor het zomer- en winterhalfjaar gepresenteerd in de figuren 13 en 14.

Het secundaire systeem heeft in de zomer een hogere afvoer dan het tertiaire systeem (waarvan de ontwateringsbasis ondieper ligt). In de zomerperiode vindt alleen afvoer plaats in de beekdalen en het noordelijk deel van het studiegebied.

In de winterperiode is de tertiaire afvoer in de beekdalen ongeveer gelijk aan de secundaire afvoer; in de overige gebieden is de afvoer via het secundaire systeem groter. De orde van grootte van de afvoeren (tot bijna 2,5 mm/dag voor het secundaire systeem in de winter) is zonder meer acceptabel. Saillant detail is de hogere berekende afvoer in de zomerperiode voor het middenstuk van de bovenloop van de Grote Beerze ten opzichte van de boven- en benedenstrooms gelegen delen van deze waterloop. Dit beeld stemt overeen met waarnemingen in augustus 1991 toen bij diepe grondwaterstanden als gevolg van de geringe hoeveelheid neerslag in dat jaar het bovenstroomse - en benedenstroomse deel droog waren gevallen terwijl dit middenstuk nog watervoerend was. De hogere zomerafvoeren in de bocht van de Aa ten zuiden van Bladel de ten opzichte van de aangrenzende deelgebieden stemmen ook overeen met waarnemingen.

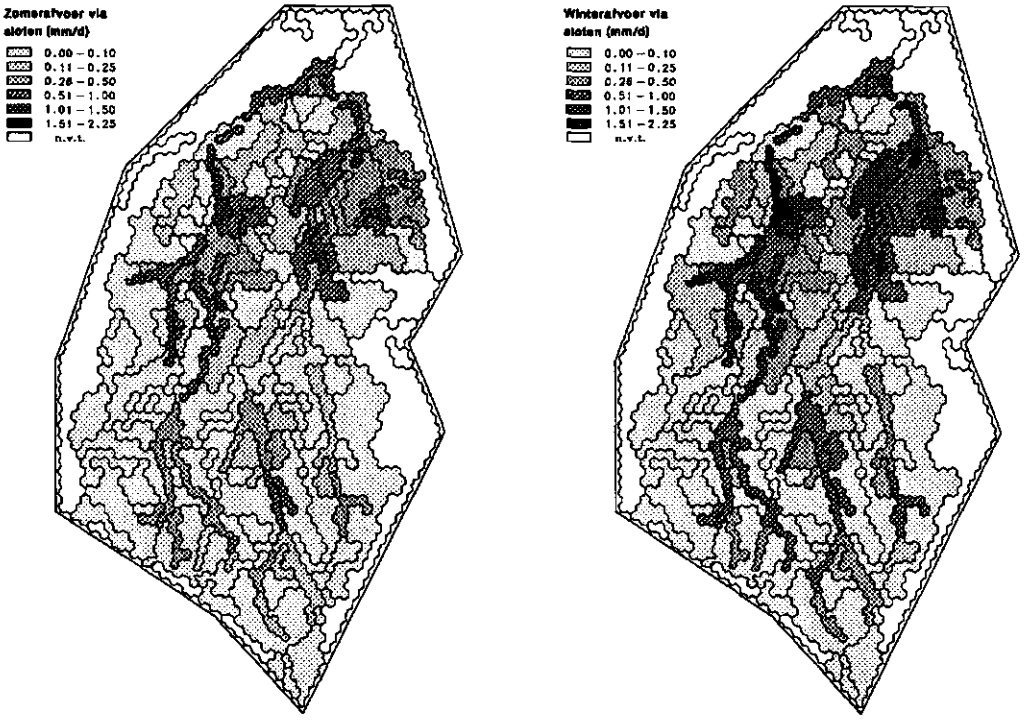

Fig. 13 Zomer- (links) en winterafvoer (rechts) van het secundaire oppervlaktewatersysteem

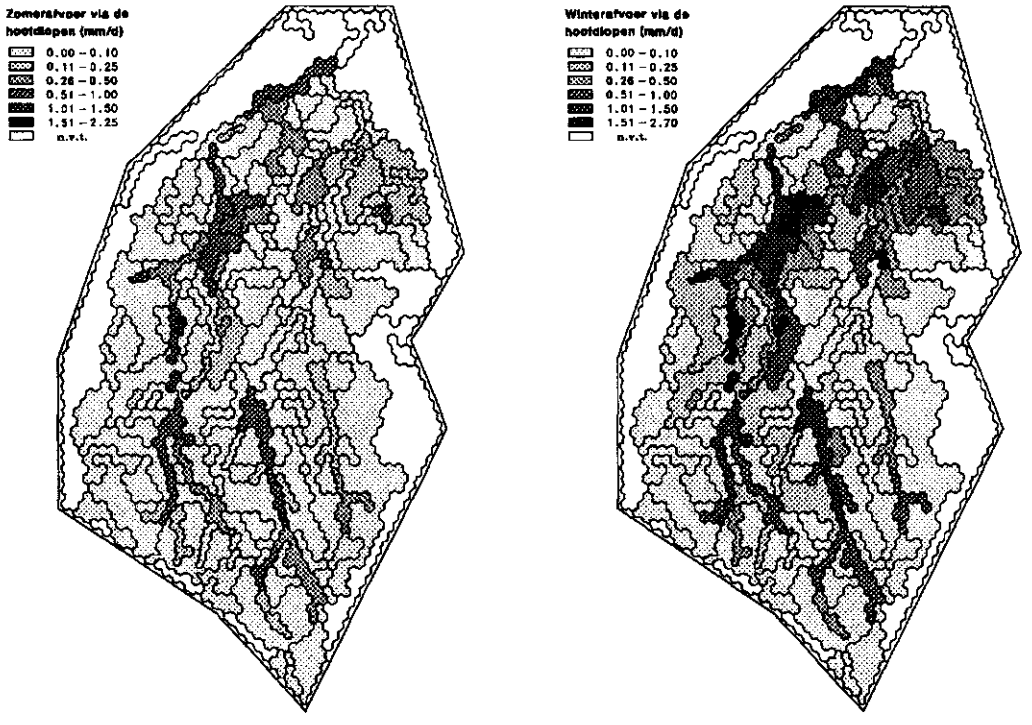

Fig. 14 Zomer- (a) en winterafvoer (b) van het tertiaire oppervlaktewatersysteem

Opvallend zijn de hoge berekende zomer- en winterafvoeren (fig. 14) van de Hoogeindsche Beek ter hoogte van Esbeek, de Roodloop ten noorden van Hilvarenbeek, de Reusel ten noordoosten van Diessen en de Beerze ten noorden van landgoed De Baest. Ook op de kwelzonekaarten (Fig. 12) springen deze gebieden eruit. Het Wilhelminakanaal heeft een drainerende werking op zijn directe omgeving ten westen van de Beekse Bergen, waar het kanaal de noordelijke Midden-Brabantse dekzandrug doorsnijdt. In het overige deel van het studiegebied treden verliezen op vanuit het kanaal naar het grondwater. De oppervlakte-afvoer en de greppelafvoer (die in de gebruikte schematisering ook als oppervlakte- afvoer wordt beschouwd) kunnen in de berekeningen alleen optreden wanneer het grondwater (bijna) tot het maaiveld stijgt.

Oppervlakte-afvoer ten gevolge van het overschrijden van de infiltratiecapaciteit kan niet worden berekend wanneer gewerkt wordt met dagelijkse neerslagcijfers. De oppervlakte-afvoer zal dan ook laag zijn en zal voornamelijk worden gesimuleerd in de beekdalen. Voor de deelgebieden rond de bovenlopen van de Beerze, Reusel en de Hoogeindsche Beek wordt (geringe) oppervlakkige afvoer berekend. In de winterperiode wordt ook oppervlakte-afvoer berekend rond de de Esche Stroom.

5.3 Kwantitatieve toetsing voor de reeks 1970-1986.

De rekenresultaten zijn kwantitatief getoetst aan gemeten oppervlaktewaterafvoeren en gemeten grondwaterstanden.

5.3.1 Toetsing van de berekende afvoer van het oppervlaktewatersysteem

De berekende afvoeren zijn vergeleken met de afvoeren van de Beerze en de Reusel die door het waterschap De Dommel zijn gemeten. De berekende afvoeren zijn naar verwachting lager dan de gemeten afvoeren omdat de afvoer die via de zuiverings-installaties in de waterlopen terechtkomt niet is meegenomen in de berekeningen. Om deze hoeveelheden te schatten kan worden verondersteld dat alle op verhard oppervlak gevallen neerslag en alle door waterwinningen onttrokken water binnen het studiegebied via de zuiveringsinstallaties op de waterlopen wordt geloosd (het surplus aan beregeningswater is via de grondwaterstand-afvoer relaties in de modelberekeningen verdisconteerd). Door deze termen op te tellen bij de berekende oppervlaktewaterafvoer wordt, wanneer geen wateraanvoer plaatsvindt, een maximale totale afvoer verkregen die kan worden vergeleken met de gemeten afvoeren (Tabel 8).

Uit Tabel 8 blijkt dat de door SIMGRO berekende afvoeren kleiner zijn dan de gemeten afvoeren, en dat de totale berekende afvoeren groter zijn dan de gemeten afvoeren. Het verschil van de totale berekende hoeveelheid ten opzichte van de gemeten hoeveelheid varieert van -8 tot +16%, en bedraagt gemiddeld 4%. Verschillen tussen de totale berekende afvoer en de gemeten afvoeren van 25 tot 30

% zijn acceptabel voor dit soort regionale studies (Van Bakel, 1992, pers. com.). Daar vallen de berekende resultaten ruim binnen. In beschouwing nemend dat de totale berekende afvoeren alleen de ontwatering van het gebied weergeven, zijn de resultaten goed te noemen. Een nauwkeuriger vergelijking tussen gemeten en berekende afvoeren kan worden verkregen door de werkelijke lozingen van waterzuiveringsinstallaties en riooloverstorten op jaarbasis te sommeren en van de gemeten afvoeren af te trekken. De resulterende gemeten afvoer kan dan direct worden vergeleken met de in deze studie berekende afvoer waardoor een absoluut verschil kan worden berekend.

Tabel 8 Berekende en gemeten afvoeren [100 m3] van het oppervlaktewatersysteem en het verschil tussen de gemeten en berekende afvoeren [%]

jaar	berekend				gemeten	verschil
	afvoer	neerslag	winning	totaal	afvoer	
1980	78334	32987	16100	127421	129002	- 1,2
1981	84750	29344	15956	130050	118476	+ 9,8
1982	60584	29383	16261	106228	112030	- 5,2
1983	75512	29977	16710	122199	131953	- 7,4
1984	96664	31957	18430	147051	130080	+ 13,0
1985	88716	33383	20901	143000	136503	+ 4,8
1986	87036	31640	21004	139680	120723	+ 15,7
gemiddeld	81656	31244	17909	130809	125538	+ 4,2

Uit de vergelijking van de afvoeren voor het zomer- en winterhalfjaar blijkt dat zowel in de modelberekeningen als de meetwaarden gemiddeld 32% van de jaarafvoer 's zomers wordt afgevoerd en 68% 's winters (Tabel 9). De verschillen in de verhoudingen zijn voor de zeven werkelijke weerjaren maximaal 3 procent. De effecten van de weerjaren op de afvoer van het oppervlaktewater worden goed gesimuleerd.

Tabel 9 Gemeten en berekende afvoeren voor het zomer- en winterhalfjaar als percentage van de totale jaarafvoer

	gemeten		berekend	
jaar	1-4/31-9	1-10/31-3	1-4/31-9	1-10/31-3
1980	30	70	28	72
1981	25	75	28	72
1982	19	81	19	81
1983	44	56	43	57
1984	33	67	35	65
1985	40	60	38	62
1986	29	71	32	68
gemiddeld	32	68	32	68

De berekende bijdragen van het stroomgebied van de Beerze en het stroomgebied van de Reusel aan de totale afvoer wijken af van de gemeten waarden. Gemeten wordt een bijdrage van 52% van de Beerze en een bijdrage van 48% van de Reusel; berekend worden bijdragen van 61% en 39%. De berekende bijdragen lijken sterk

gerelateerd aan de verhouding in grootte van de stroomgebieden; respectievelijk 59 en 41% van het totale stroomgebied. Omdat de berekende hoeveelheden betrekking hebben op de afvoer van het hydrologisch systeem en de gemeten afvoeren de totalen vormen van de afvoer van het systeem plus de lozingen van waterzuiveringen kan dit betekenen dat de bijdrage van de zuiveringsinstallaties tot een gewijzigde verhouding in de afvoeren leidt.

5.3.2 Toetsing van berekende grondwaterstanden

Kleijer (1992) heeft onderzoek verricht naar betrouwbaarheid en de representativiteit van de in het TNO-grondwaternet opgenomen peilbuizen met filters in het freatisch pakket. De reeksen die door Kleijer (1992) als betrouwbaar en representatief worden aangeduid zijn in deze studie gebruikt voor de toetsing van berekende grondwaterstanden. Alle andere buizen zijn buiten beschouwing gebleven. Uiteindelijk zijn 13 buizen binnen de stroomgebieden van de Beerze, Reusel en Rosep als betrouwbaar en reprersentatief gekwalificeerd.

Tabel 10 De gemeten GHG en GLG voor vijftien stijgbuizen en de berekende GHG en GLG voor het invloedsgebied waarbinnen de buis ligt in cm-mv.

	GEMETEN		BEREKEND			VERSCHIL		
buis	GHG	GLG	nr	GHG	GLG	GHG	GLG	AMPL.
45cL115	36	122	138	27	95	+9	+27	+18
50fL28	159	224	697	102	182	+57	+42	-15
50fL32	66	182	782	94	173	-28	+9	+37
50hL2	90	183	1370	64	140	+26	+43	+17
51aL11	97	198	291	73	154	+24	+44	+20
51aL15	77	179	515	41	129	+36	+50	+14
51aL21	67	137	686	93	176	-26	-39	-13
51aL23	44	96	860	88	180	-44	-84	-40
51aL29	57	150	1089	103	176	-46	-26	+20
51aL35	106	198	208	181	256	-75	-58	+17
51aP101	90	182	453	126	203	-36	-21	+15
51bL23	73	158	666	34	115	+39	+43	+4
51cL18	38	138	1769	104	185	-66	-47	+19
51cL19	94	178	1314	203	284	-109	-106	+3
51dL30	168	226	1921	210	284	-42	-58	-16

Voor deze 13 buizen en 2 buizen op de rand van het studiegebied zijn de berekende GHG en GLG van het meest nabijgelegen knooppunt vergeleken met de GHG en GLG van de betreffende buis. Daarbij moet niet worden vergeten dat de berekende waarden gebiedsgemiddelde waarden zijn waar de buizen puntwaarden betreffen die representatief worden geacht voor hun directe omgeving. In invloedsgebieden met hoogteverschillen op korte afstand kunnen de verschillen tussen de berekende en de gemeten waarde aanzienlijk zijn. Deze verschillen zijn te verklaren uit de hoogteverschillen binnen het invloedsgebied, de grootte van het invloedsgebied en de relatieve hoogteligging van de buis en stromingsweerstand van de bodem rond de stijgbuis. De berekende en gemeten GHG en GLG in cm-mv worden in tabel 10 gegeven.

Tabel 11 Maaiveldshoogten van de stijgbuizen en de in het model ingevoerde gemiddelde hoogte van het invloedsgebied waarbinnen de buis ligt (= hoogte knooppunt) in meters + NAP.

buis	mv	nr	mv	dif
45cL115	6,81	138	7,04	-0,23
50fL28	14,60	697	14,50	+0,10
50fL32	14,18	782	14,26	-0,08
50hL2	21,90	1370	22,02	-0,12
51aL11	9,64	291	9,52	+0,12
51aL15	10,93	515	10,50	+0,43
51aL21	12,14	686	12,47	-0,33
51aL23	13,32	860	14,21	-0,89
51aL29	-	1089	17,50	-
51aL35	8,51	208	9,49	-0,98
51aP101	10,21	453	10,73	-0,52
51bL23	12,03	666	11,78	+0,25
51cL18	-	1769	25,26	-
51cL19	20,78	1314	21,14	-0,36
51dL30	26,87	1921	27,49	-0,62

Tabel 12 De gemeten GHG en GLG voor vijftien stijgbuizen en de berekende GHG en GLG voor het invloedsgebied waarbinnen de buis ligt in meters + NAP.

	GEMETEN		BEREKEND			VERSCHIL	
buis	GHG	GLG	nr	GHG	GLG	GHG	GLG
45cL115	645	559	138	677	609	-32	-50
50fL28	1301	1236	697	1348	1268	-47	-32
50fL32	1352	1236	782	1332	1253	+20	-17
50hL2	2100	2007	1370	2138	2062	-38	-55
51aL11	867	766	291	879	798	-12	-32
51aL15	1016	914	515	1009	921	+7	-7
51aL21	1147	1077	686	1154	1071	-7	+6
51aL23	1288	1236	860	1333	1241	-45	-5
51aL29	-	-	1089	-	-	-	-
51aL35	745	653	208	768	693	-23	-40
51aP101	931	839	453	947	870	-16	-31
51bL23	1130	1045	666	1144	1063	-14	-18
51cL18	-	-	1769	-	-	-	-
51cL19	1984	1900	1314	1911	1830	+73	+70
51dL30	2519	2461	1921	2539	2465	-20	-4

Omdat de verschillen mede worden veroorzaakt door verschillen in maaiveldshoogte (tabel 11) zijn de GHG en GLG omgerekend naar meters +NAP (tabel 12). De verschillen in GLG tussen de puntwaarneming en het berekende gebiedsgemiddelde variëren van -60 tot +70 cm. Het verschil in GHG varieert tussen -50 en +75 cm. Omdat puntwaarnemingen worden vergeleken met berekende gebiedsgemiddelde waarden lijken de resultaten bevredigend.

Tabel 10 laat zien dat de gemeten langjarig gemiddelde waarde van de amplitude (berekend als GLG-GHG) 43 cm bedraagt en de bijbehorende standaardafwijking 9 cm. Voor de berekende GLG-GHG bedragen deze waarden respectievelijk 40 cm en 3 cm. Hieruit blijkt dat de rekenresultaten minder van het gemiddelde afwijken dan de waarnemingen. De amplitude van de rekenresultaten is kleiner. Dit blijkt ook uit de minimum en maximum waarden. Dit effect mag worden verwacht bij

vergelijking van puntwaarden met gebiedsgemiddelden en is een logisch gevolg van de schematisering. Het kleine verschil tussen de gemeten puntwaarnemingen en de berekende gebiedsgemiddelde fluctuaties laat zien dat de gebiedsgemiddelde fluctuatie goed wordt benaderd.

Tabel 13 Vergelijking van gemeten en berekende verschillen in amplitude (berekend met GLG en GHG als minimum en maximum) van 15 grondwaterstandsreeksen [cm-mv]

buis nr.	GEMETEN AMPLITUDE	knoop nr.	BEREKEND AMPLITUDE	VERSCHIL
45cL115	43	138	34	+9
50fL28	33	697	40	-7
50fL32	58	782	40	+18
50hL2	47	1370	38	+9
51aL11	51	291	41	+10
51aL15	51	515	44	+7
51aL21	35	686	42	-7
51aL23	26	860	46	-20
51aL29	47	1089	37	+10
51aL35	46	208	38	+8
51aP101	46	453	39	+7
51bL23	43	666	41	+2
51cL18	50	1769	41	+9
51cL19	42	1314	41	+1
51dL30	29	1921	37	-8
gemiddeld	43		40	+3
standaard-afwijking	9		3	10
minimum	26		34	-20
maximum	58		46	+18

5.3.3 Toetsing van berekende verdamping en beregeningsgift

De evapotranspiratie van grasland en de hoeveelheid beregening voor grasland staan voor de zomerhalfjaren van 1983 (gemiddeld) en 1975 (droog) in figuur 15 en in figuur 16.

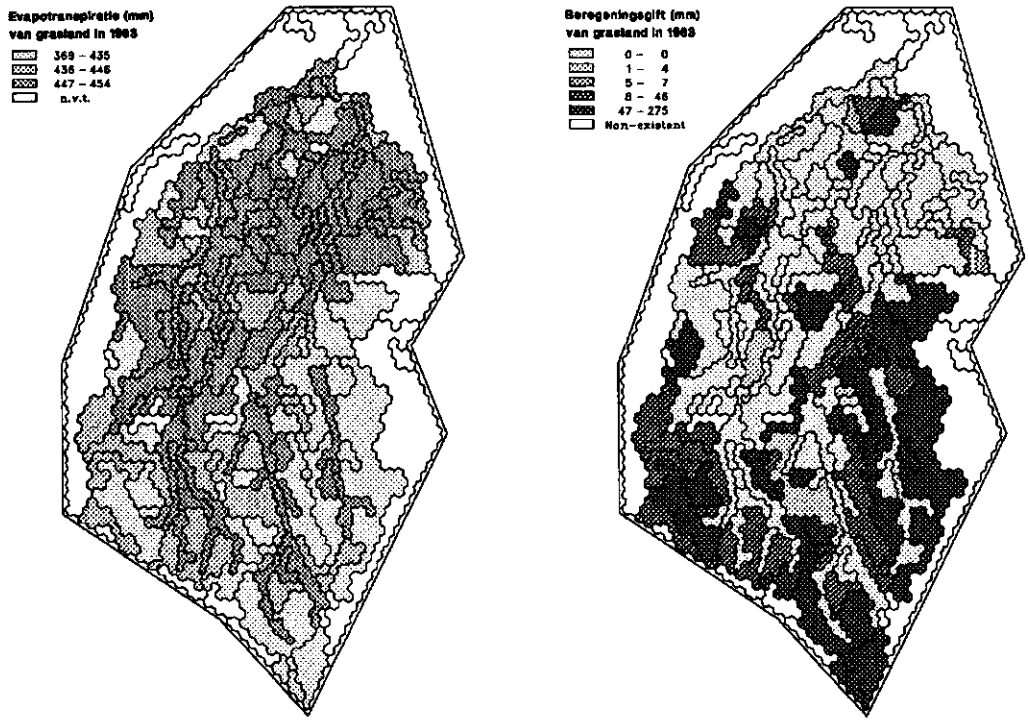

Fig. 15 Evapotranspiratie (a) van en de beregeningsgift (b) voor grasland in 1983

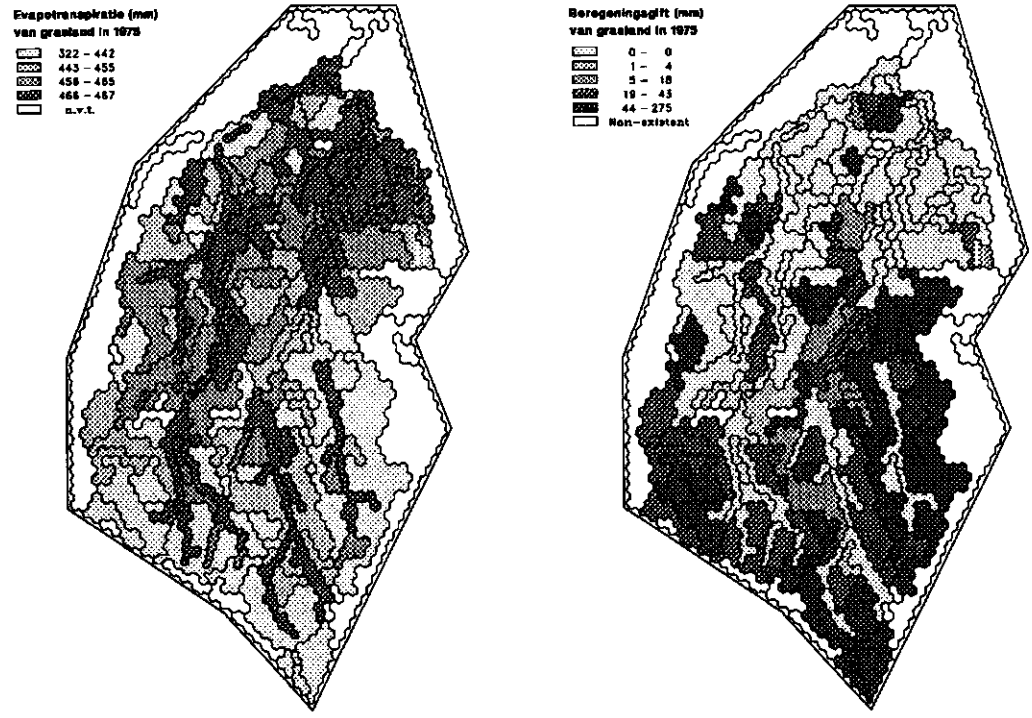

Fig. 16 Evapotranspiratie (a) van en de beregeningsgift (b) voor grasland in 1975

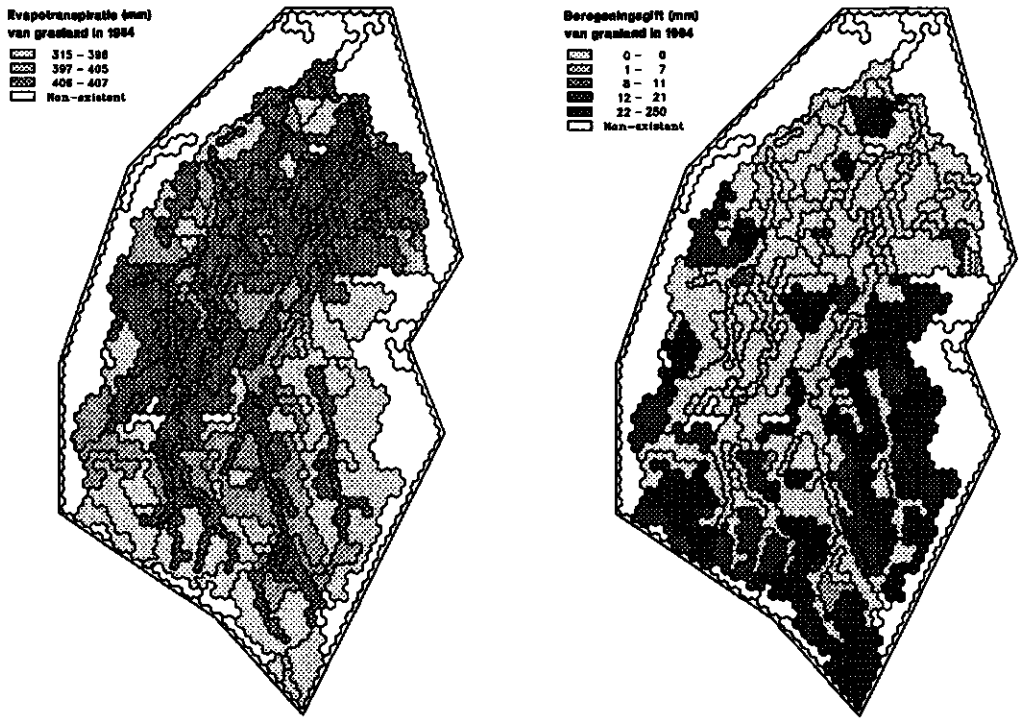

Fig. 17 Evapotranspiratie (a) van en de beregeningsgift (b) voor grasland in 1984

Te zien is dat in het gemiddelde weerjaar 1983 tweederde van het gebied een nagenoeg potentiële evapotranspiratie heeft en dat onder deze omstandigheden in de relatief hoger gelegen delen over een groot oppervlak nog aanzienlijke reducties in de gewasverdamping optreden. De hoger gelegen gebieden worden dan ook beregend. De maximum gift (250 mm) per jaar wordt in dit weerjaar al in enkele deelgebieden gegeven. In het droge jaar 1975 neemt het beregende oppervlak enigszins toe maar neemt de grootte van de beregeningsgift niet toe. Blijkbaar zijn de verschillen in neerslagoverschot op jaarbasis groter dan de verschillen in de zomerperiode. Bestuderen van de evapotranspiratie en de beregeningsgift (Fig. 17) van het natte jaar 1984 laat zien dat het beregende areaal iets kleiner wordt en dat de beregeningsgift afneemt. Daaruit blijkt dat in een aantal deelgebieden als gevolg van hun hoge ligging vrijwel altijd beregening noodzakelijk is voor een optimale gewasopbrengst (in de meeste van deze gebieden is natuur dan ook de dominerende bodemgebruiksvorm). De grootte van de beregeningsgift is vergeleken met door Metselaar et al. (1991) berekende waarden voor een fijnzandig en een grofzandig bodemprofiel, beide met (een vrij droge) grondwatertrap VI. Daartoe is gekeken aan welke deelgebieden een vergelijkbare bodemfysische eenheid en grondwatertrap VI of VII (grondwaterklasse 3) zijn toegekend, en zijn de voor deze deelgebieden berekende beregeningsgiften vergeleken met de door Metselaar et al. (1991) gepresenteerde gegevens voor beregening vanaf 1 juni tot 15 augustus (tabel 14 en 15).

Tabel 14 In deze studie berekende beregeningsgiften voor de deelgebieden 125, 177 (Hd21, profiel 8 Wösten et al. 1988), 102, 112, 137, 145, 165, 168, 170 en 171 (Hn21, profiel 9 Wösten et al. 1988), en de door Metselaar et al. (1991) berekende beregenings-hoeveelheden voor het fijnzandig profiel voor de seizoenen 1980 - 1986 en het langjarig gemiddelde.

jaar	125	177	102	112	137	145	165	168	170	171	Mets.
1971	200	250	114	118	93	114	0	104	89	43	86
1972	200	225	64	68	32	64	0	54	36	25	38
1973	250	275	196	200	168	196	39	193	182	146	102
1974	200	225	111	118	104	114	0	107	107	68	88
1975	189	250	100	157	50	129	0	50	50	25	92
1976	275	275	246	246	246	246	179	246	246	246	183
1977	200	225	96	100	89	100	0	93	93	75	70
1978	150	200	86	104	43	100	0	79	79	0	105
1979	121	250	50	71	18	61	0	39	39	0	78
1980	129	200	111	136	75	132	0	100	96	18	70
1981	154	225	68	100	18	79	0	32	32	0	86
1982	175	250	125	139	79	132	0	104	111	64	114
1983	171	250	118	164	46	125	0	68	68	21	68
1984	118	250	89	132	25	107	0	43	25	0	47
1985	79	225	43	75	0	68	0	0	0	0	39
1986	150	250	107	157	50	136	0	50	0	25	143
gem.	173	239	108	130	71	119	-	85	80	47	88
GLG	237	342	238	292	209	266	159	219	211	188	174
GHG	164	284	168	215	146	176	88	154	150	127	71
Gt	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VI

De resultaten van deze studie en de resultaten van Metselaar et al. zijn niet zondermeer vergelijkbaar omdat:

- een andere neerslagreeks is gebruikt (Someren respectievelijk Gemert),
- de periode waarin wordt beregend verschilt (75 dagen Metselaar vs. 90 dagen deze studie), zodat de maximale beregeningshoeveelheid verschilt (275 mm versus 325 mm),
- de modellen een andere schematisering van de onverzadigde zone hebben,
- de bodemfysische schematisering verschilt,
- in deze studie een hysteresis-factor is gebruikt,
- een ander besliscriterium voor beregening is gehanteerd (verdampingsreductie versus pF-waarde 2,3),
- het fijnzandig profiel in deze studie de wortelzone 30 cm dik is en 20 cm bij Metselaar,
- bij Metselaar een bedrijfsmodel bepaalt of daadwerkelijk wordt beregend.

Omdat de berekeningen zijn uitgevoerd voor vergelijkbare bodems onder vergelijkbare klimatologische omstandigheden moeten de orden van grootten echter wel vergelijkbaar zijn.

Tabel 15 In deze studie berekende beregeningsgiften voor de deelgebieden 8, 11, 16, 28, 35, 119, 121, 143 en 178 (Hn21g, profiel 10 Wösten et al. 1988) alsook de door Metselaar et al. (1991) berekende beregeningshoeveelheden voor het grofzandig profiel voor de seizoenen 1980 - 1986 en het langjarig gemiddelde.

jaar	8	11	16	28	35	119	121	143	178	Mets.
1971	89	21	0	0	0	57	0	93	118	112
1972	25	0	0	0	0	25	0	43	68	65
1973	146	61	0	11	14	132	50	171	200	143
1974	79	0	0	0	0	61	0	104	118	121
1975	61	7	0	0	0	25	0	71	161	144
1976	239	189	121	132	125	232	150	239	246	186
1977	82	18	0	0	0	79	0	93	100	117
1978	29	0	0	0	0	0	0	75	107	139
1979	21	0	0	0	0	0	0	25	75	135
1980	75	0	0	0	0	14	0	82	136	100
1981	18	0	0	0	0	0	0	21	104	139
1982	86	25	0	0	0	46	18	86	139	144
1983	57	0	0	0	0	21	0	57	175	125
1984	25	0	0	0	0	11	0	25	139	110
1985	32	0	0	0	0	0	0	0	75	78
1986	75	0	0	0	0	21	0	57	168	165
gem.	71	20	-	-	-	45	-	78	133	126
GHG	152	100	63	47	59	121	83	165	348	72
GLG	227	180	141	149	152	208	167	235	405	162
Gt	VII	VII	VI	VI	VI	VII	VII	VII	VII	VI

De berekende hoeveelheid beregening is kleiner dan de door Metselaar berekende hoeveelheid bij een gelijke grondwaterstand. Bij diepere grondwaterstanden neemt de berekende beregeningshoeveelheid toe (Fig. 18). De maximale waarden van Metselaar worden op grotere diepte bereikt voor het grofzandige en fijnzandige profiel met een bodemfysische karakteristiek 'bouwsteen B2' volgens de Staringreeks. Het fijnzandig profiel met bouwsteen B1 voor de wortelzone overschrijdt de maximale waarden van Metselaar. Dit is mogelijk doordat in deze studie een langere beregeningsperiode is gehanteerd, doordat het bedrijfsmodel bij Metselaar beslist of daadwerkelijk wordt beregend, omdat een ander beregeningscriterium is gebruikt en omdat door het gebruik van de hysteresis-factor in deze studie de berging is verkleind.

De indruk bestaat dat in de studie van Metselaar een te hoge beregeningsgift wordt berekend (J. Leunk, Prov. Noord-Brabant, pers. com.). Bij vergelijkbare GLG is de hier berekende beregeningsgift lager dan de door Metselaar berekende beregeningsgift (fig. 18).

Uit de resultaten kan een relatie tussen de langjarig gemiddelde beregenings-hoeveelheid en de GLG (fig. 18) worden geschat. Voor het profiel Hn21 is met log-lineaire regressie een functie gefit met als relatie $Y = -64.0641 + 430.92*log(GLG)$ en een verklaarde variantie van 96%. Voor het profiel Hn21g is met log-lineaire regressie een functie gefit met als relatie $Y = -47.6913 + 306.861*log(GLG)$ en een correlatiecoëfficient van 94%. Deze relaties kunnen worden verklaard uit het beregeningscriterium dat is gebaseerd op het vochtgehalte van de wortelzone. Het

vochtgehalte in de wortelzone wordt berekend als een evenwichtsvochtgehalte en wordt daarmee direct gestuurd door de grondwaterstand.

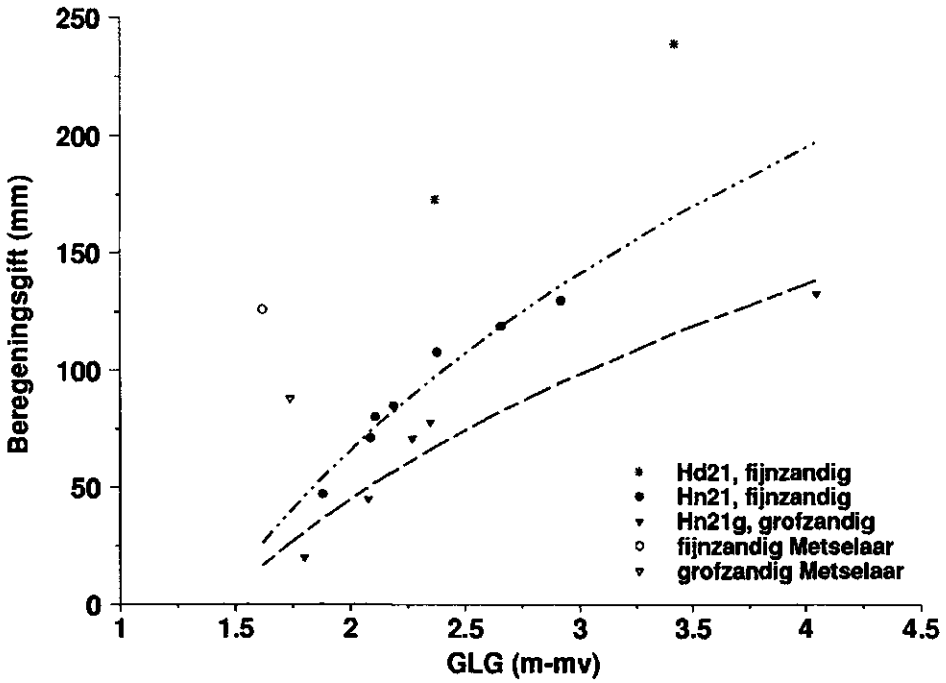

Fig. 18 Berekende langjarig gemiddelde beregeningsgift voor het grofzandig profiel en de fijnzandige profielen met bouwsteen B2 voor de wortelzone als functie van de GLG.

De in deze studie berekende beregeningshoeveelheid voor het fijnzandig profiel (Hn21: met bodemfysische eenheid 8) is groter dan de berekende beregeningshoeveelheid voor het fijnzandig profiel met bodemfysische eenheid 9 en het grofzandig profiel (Hn21g: bodemfysische eenheid 10) bij vergelijkbare grondwaterstanden (deelgebied 125 versus de deelgebieden 102, 137, 145, 168, 170, 8 en 143; en deelgebied 177 versus deelgebied 178; tabel 14 en 15). Dit wordt veroorzaakt door het in SIMGRO gehanteerde beregeningscriterium. Dit criterium wordt berekend als het quotiënt van het actuele gemiddelde evenwichtsvochtgehalte in de wortelzone en het evenwichtsvochtgehalte voor een drukhoogte van -100 cm in de wortelzone. Voor het fijnzandig profiel (bodemfysische eenheid 8, bouwsteen B1) komt de in deze studie gebruikte waarde van 0,5 overeen met een drukhoogte van - 476 cm (pF = 2,68); voor het grofzandige profiel en fijnzandig profiel (bodemfysische eenheden 10 en 9, bouwsteen B2) komt dit overeen met een drukhoogte van -680 cm (pF = 2,83). Dit impliceert dat de bovengrond B1 bij een gelijke grondwaterstand eerder wordt beregend dan de bovengrond B2 hetgeen niet overeenkomstig de werkelijkheid is. Om deze tekortkoming op te lossen zouden binnen SIMGRO beregeningscriteria per bodemfysische eenheid kunnen worden gedefinieerd en moet de grootte van de criteria worden afgeleid uit de pF-curven van de bouwstenen van de wortelzones met behulp van een pF-waarde die dan feitelijk als beregeningscriterium fungeert.

Tabel 16 Berekende totale jaarlijkse hoeveelheid beregeningswater [1000 m3] voor het studiegebied

jaar	beregeningswater
1971	4250
1972	2469
1973	9818
1974	4278
1975	4335
1976	21397
1977	4444
1978	2669
1979	1728
1980	3470
1981	1931
1982	5249
1983	4367
1984	2620
1985	1377
1986	4479
gemiddeld (zonder 1976)	3832

Uit figuur 19 blijkt dat in een jaar met een extreem droge zomer in alle deelgebieden waar landbouw voorkomt wordt beregend, zelfs in de beekdalen. Het model overschat in een dergelijk extreem droog jaar de toegediende beregeningshoeveelheid op stroomgebiedsniveau. Dit beeld wordt bevestigd door de berekende jaarlijkse hoeveelheid beregening (tabel 16). Om een dergelijke fout te voorkomen moeten per deelgebied de werkelijke fracties potentieel te beregenen landbouwgrond worden ingevoerd. Dat deze fout alleen onder extreme omstandigheden optreedt blijkt uit tabel 16 en eveneens uit figuur 16 waar de beregeningshoeveelheden voor het droge weerjaar 1975 worden gegeven. Op basis van deze figuur kan worden geconcludeerd dat het (langjarig gemiddeld) beregende areaal voor het studiegebied redelijk lijkt te worden benaderd omdat ruim 40% van het graslandareaal blijkt te worden beregend.

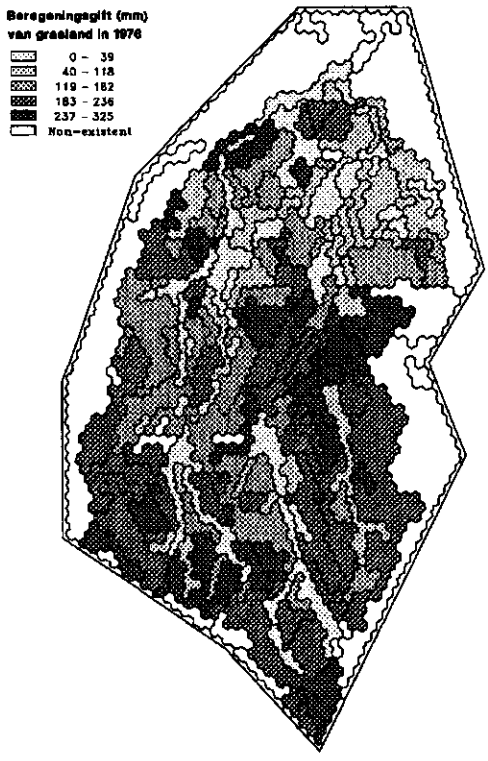

Fig. 19 Beregeningsgift voor grasland in 1976

6 Conclusies

6.1 Simulatieresultaten

De gebiedsschematisering afgeleid uit de grondwaterklassen, stroomgebiedsgrenzen en de Groene HoofdStructuur voldoet aan de vraagstelling. De beekdalen zijn duidelijk herkenbaar. Een verdere opsplitsing van een aantal grote/langgerekte deelgebieden en een kleinere knooppuntsafstand in complexe gebieden (beekdalen, De Mortelen) zou de schematisering verbeteren en daarmee het ruimtelijk detail kunnen verhogen. Dit resulteert dan wel in een toename van de rekentijd.

Omdat dit een verkennende modelstudie is en omdat geen hydrologisch meetprogramma is opgezet om grondwaterstanden en afvoeren in het studiegebied te meten, zijn de invoergegevens niet gecalibreerd. Een globale vergelijking met de resultaten van de Centrale Slenk studie (IWACO, 1987) toont aan dat het regionale beeld overeenkomt en dat deze studie meer detail te zien geeft. De langjarig gemiddelden van de grondwaterstanden, de kwel/wegzijging en de oppervlakte-waterafvoeren voor de situatie van 1989 (doorgerekend met een aantal verschillende weerjaren) bezitten reële waarden en laten een ruimtelijk patroon zien dat goed met de werkelijkheid overeen lijkt te komen. De berekende afvoeren van de historische reeks 1980 tot en met 1986 komen voor het studiegebied goed overeen met de gemeten afvoeren van de Beerze en Reusel. De bijdragen van de stroomgebieden van de Beerze en de Reusel aan de berekende afvoeren verschillen van de gemeten bijdragen. Dit kan worden veroorzaakt door de bijdragen van de afvalwaterlozingen. De berekende bijdragen van de afvoeren van het zomer- en winterhalfjaar komen nagenoeg overeen met de gemeten bijdragen. De berekende gebiedsgemiddelde GLG en GHG wijken tot maximaal 75 cm af van puntwaarnemingen (stijgbuizen) in de invloedsgebieden en wijken in 85% minder dan 50 cm af. De verschillen in amplitude tussen GLG en GHG bedragen maximaal 20 cm en zijn veelal kleiner dan 10 cm. Omdat gebiedsgemiddelde waarden worden vergeleken met puntwaarnemingen lijken de resultaten acceptabel. De toetsing toont aan dat het hydrologisch systeem van de stroomgebieden van de Beerze, Reusel en Rosep adequaat wordt gesimuleerd gegeven de doelstelling van deze studie. De gekozen gebiedsbegrenzing, de opgelegde randvoorwaarden, de schematisering van de ondergrond en de gebruikte invoergegevens voldoen.

De resultaten van deze studie kunnen worden verfijnd door:
- gebruik te maken van geohydrologische gegevens en schematisering uit REGIS;
- opleggen van in de tijd variërende randvoorwaarden per laag (bijvoorbeeld stijghoogten afkomstig uit het Centrale Slenk model);
- de neerslagcijfers van alle binnen het studiegebied gelegen neerslagstations te gebruiken om een ruimtelijk gedifferentieerder patroon te creëren (dit vergt wel een aanpassing van SIMGRO);
- de onttrokken hoeveelheden op maandbasis in te voeren om de effecten van de onttrekkingen op het regionale grondwaterstromingspatroon meer tijdsafhankelijk te maken;

- de hoofdwaterlopen van het open-watersysteem expliciet te modelleren;
- de dichtheden van het tertiaire systeem te schatten aan de hand van veldopnamen;
- de gedraineerde gronden te inventariseren en in de berekening mee te nemen;
- de lozingen van de waterzuiveringen te kwantificeren;
- uit te gaan van de beregeningsgegevens per gemeente om een ruimtelijk gedifferentieerd beeld van de beregening te verkrijgen. Met behulp van de grondwatertrappen of -klassen kan dit beeld per deelgebied eventueel nog verder worden verfijnd.

De gevolgde methode biedt mogelijkheden regionale hydrologische studies relatief snel en efficiënt te kunnen verrichten. Het instrumentarium maakt het niet alleen mogelijk toekomstige ontwikkelingen als gevolg van ingrepen te voorspellen, maar maakt het ook mogelijk historische situaties te reconstrueren door het ongedaan maken van bestaande ingrepen (voor zover deze significante invloed hebben). Ook kunnen verkennende systeemanalyses worden gedaan. Dat vergt het aanvullend berekenen van stroombanen om de begrenzingen van hydrologische systemen te bepalen, om verblijftijden te berekenen, en om de herkomst van (kwel)water te traceren, kan de kwaliteit van het kwelwater worden geschat of berekend, en kan worden bepaald of het kwelwater de wortelzone bereikt.

6.2 Methode

De gevolgde methode, waarbij de invoergegevens voor (quasi-) driedimensionale hydrologische modellen afkomstig zijn uit, dan wel gegenereerd zijn met behulp van GIS-bestanden, is veelbelovend. Het in deze studie bereikte detailniveau had alleen met veel moeite kunnen worden bereikt wanneer de benodigde invoergegevens met de hand ingevoerd hadden moeten worden. Voorwaarde om deze methode toe te passen blijft het aanwezig zijn van goed onderhouden, makkelijk toegankelijke gegevensbestanden en het beschikbaar zijn van programmatuur om de gegevens uit de bestanden op te halen en te bewerken tot voor de gebruikte simulatiemodellen geschikte invoergegevens. De gevolgde methode is volledig reproduceerbaar; uitgezonderd de noodgedwongen toegepaste subjectieve bewerking om het aantal deelgebieden te reduceren. Combineren van (simulatie)modellen met GIS biedt de mogelijkheid om regionale studies relatief snel en efficiënt te verrichten. Het is niet alleen mogelijk invoergegevens uit GIS te betrekken; ook de horizontale ruimtelijke schematisering kan met behulp van GIS tot stand worden gebracht. De werkwijze is technisch eenvoudig te implementeren, maar bevat een groot aantal open einden:
- Welke schaal kan zinvol worden gebruikt, gezien de vraagstelling en schematisering?
- Hoe kunnen datasets naar andere schaalniveaus worden omgezet (in ieder geval alleen naar kleinere schaal)?
- Hoe kan een goede schematisering worden verkregen?
- Hoe kan ervoor worden gezorgd dat zo min mogelijk informatie verloren gaat bij het gebruik van besliscriteria?
- Wat is de betrouwbaarheid van de data in de GIS?
- Wat is de ruimtelijke en temporele variabiliteit van de in GIS opgenomen data?

- Hoe kunnen regionale berekeningen zinvol worden getoetst?
- Wat is de betrouwbaarheid van de resultaten en welke beslissingen kunnen hierop wel en welke niet worden gebaseerd?
- Hoe kunnen de resultaten worden gepresenteerd om een objectieve weergave te garanderen?

Een verdere inhoudelijke onderbouwing voor een verantwoord gebruik van GIS bij modelstudies is dan ook noodzakelijk.

Om regionale hydrologische modelstudies te kunnen verrichten in hellende gebieden met in het landschap ingesneden (beek)dalen, is het noodzakelijk dat een netwerkgenerator wordt ontwikkeld die in staat is om mede op basis van voorgedefinieerde lijnvormige structuren binnen een vlak een optimaal netwerk te genereren.

De besliscriteria op basis waarvan eigenschappen per invloedsgebied aan de knooppunten zijn toegekend moeten theoretisch worden onderbouwd (in relatie tot de schaal waarop de studie zich richt).

Het lijkt zinvol een methode te ontwikkelen om per laag (in de tijd) variërende randvoorwaarden te ontlenen aan modelstudies met een grovere schaal en met een globalere schematisering. Voor dit gebied kan worden gedacht aan het gebruik van de (niet-)stationair berekende stijghoogten uit het Centrale Slenk model (IWACO).

De beginvoorwaarden zijn via een uitgebreide voorbewerking bepaald. Omdat de hydrologische toestand voor een jaar mede wordt bepaald door de voorafgaande weerjaren (geheugenfunctie) kan een initiële rekenperiode van een aantal werkelijke weerjaren (hier bijv. de reeks 1965-1969) de overeenkomst met de werkelijkheid voor de eerste doorgerekende weerjaren sterk verbeteren.

De methode om de gemiddelde hoogteligging per knooppunt te bepalen lijkt redelijke resultaten op te leveren. Een verdere onderbouwing en toetsing is wenselijk.

Een deelgebiedsindeling die ook is gebaseerd op de hoogteligging en op de verdeling van bodemfysische/bodemchemische eenheden zal de gebiedsschematisering sterk verbeteren. Daarbij kan worden overwogen om per deelgebied, afhankelijk van het aantal onderscheiden deelgebieden, minder bodemgebruiksvormen te definiëren om de rekentijd te beperken.

Up-to-date Gt-kaarten zijn noodzakelijk voor validatie van de resultaten.

De gebruikte methode voor het berekenen van drainageweerstanden geeft adequate resultaten; het regionale patroon lijkt goed te voldoen. De drainageweerstanden voor het tertiaire systeem kunnen beter worden geschat wanneer ook dit systeem is gedigitaliseerd. Een alternatief is de lengte van de waterlopen van dit systeem per oppervlakte-eenheid via opnamen in het veld te schatten (als functie van de Gt, de relatieve maaiveldsligging en/of de bodemgebruiksvorm).

De methode om via de maatgevende afvoer per grondwaterklasse en geschatte dimensies van de waterlopen de imaginaire Q-h relaties van de deelgebieden vast te stellen, lijkt voor het hele stroomgebied van de Beerze, Reusel en Rosep redelijke resultaten op te leveren wanneer de berekende grondwaterstanden worden vergeleken met de gemeten (lokale) grondwaterstanden. De accuratesse met betrekking tot het ruimtelijk onderscheidend vermogen van deze methode moet blijken door de met deze methode berekende resultaten te vergelijken met de resultaten verkregen uit een studie met behulp van de expliciet gemodelleerde hoofdwaterlopen in het studiegebied.

Het gebruik van een hysteresisfactor om in het laboratorium bepaalde bodemfysische karakteristieken te vertalen naar invoergegevens voor (regionale) modelstudies moet verder worden onderzocht. Een theoretische onderbouwing is noodzakelijk, evenals het calibreren van de grootte van de hysteresisfactor per bodemfysische bouwsteen. Het is aan te bevelen om de effectieve dikte van de wortelzone gerelateerd aan bodemeenheid en grondwatertrap in het Bodemkundig Informatie Systeem van het Staring Centrum op te nemen.

De in SIMGRO gebruikte schematisering van de onverzadigde zone kent beperkingen. Dit wordt veroorzaakt doordat SIMGRO is ontworpen als grondwaterstromingsmodel waarvoor de bovenrandvoorwaarde (de grondwaterstand) door het model zelf wordt bepaald. SIMGRO lijkt op dit moment minder geschikt te zijn voor studies waarin óók de resultaten voor de onverzadigde zone van belang zijn (verdroging, beregening, stoftransport). Om de kwaliteit van dergelijke toepassingen te verbeteren moet de berekening voor de onverzadigde zone worden verbeterd.

Om de kwaliteit van studies naar de effecten van ingrepen in de beregening met SIMGRO te verhogen, moet behalve het verbeteren van de schematisering van de onverzadigde zone ook het gebruikte beregeningscriterium afhankelijk worden gemaakt van de bodemfysische karakteristiek (bouwsteen Staringreeks) van de wortelzones om voor alle bouwstenen reële beregeningshoeveelheden te kunnen simuleren. De te gebruiken waarde voor dit agro-hydrologisch criterium moet dan uit de pF-curven worden afgeleid.

Door het gebruik van meer dan één neerslagreeks in SIMGRO mogelijk te maken kan (voor grote gebieden) een verdeling van neerslag over het studiegebied worden verdisconteerd door de neerslaghoeveelheden van de in het studiegebied gelegen neerslagstations met bijv. Thiessen- polygonen over het studiegebied verdelen.

Literatuur

Bannink, M.H., B.J. Bles en A.F. van Holst, 1988. *Bodemkundig-agrohydrologisch onderzoek Midden- en Oost-Brabant.* Wageningen, STIBOKA. Rapport nr. 1864.

Bisschops, J.H., 1973. *Toelichting bij de geologische kaart van Nederland, Eindhoven-oost (51 oost) 1:50.000.* Haarlem, RGD.

Broks Adviezen, 1990. *Eco-hydrologisch onderzoek winplaats 'Lieshout' WOB.* Fase 1. Den Bosch, Broks Adviezen.

Ernst, L.F. en N.A. de Ridder, 1960. *High resistance to horizontal groundwater flow in coarse sediment due to faulting.* In: Geologie en mijnbouw, 39, p. 66-85 Ernst, L.F., 1978. Drainage of undulating sandy soils with high groundwater tables. I A drainage formula based on a constant hydraulic head ratio. II The variable hydraulic head ratio. Journal of Hydrology 39, 3/4, p. 1-50. Wageningen, ICW. Technical bulletin 106.

Feddes, R.A., 1987. *Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration.* Den Haag, Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO. Proc. and Inf. No. 39, p. 33-44.

Feddes, R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny, 1978. *Simulation of field water use and crop yield.* Wageningen, PUDOC. Simulation monograph.

IWACO, 1987. *Eindrapport geohydrologisch onderzoek Centrale Slenk Fase 2.* Boxtel.

IWACO, 1989. *Extra berekeningen Centrale Slenk Model.* Boxtel.

K.N.M.I., 1982. *Klimatologische gegevens van Nederlandse stations no. 10 normalen en standaardafwijkingen voor het tijdvak 1951-1980.* De Bilt, K.N.M.I..

Lekahena, E.G., 1983. *Grondwaterkaart van Nederland, Centrale Slenk (Oost-Brabant).* Delft, DGV-TNO.

Metselaar K. et al, 1991. *Modelstudie naar de effecten van de beperking van beregening uit grondwater voor een Noordbrabants melkveebedrijf.* Wageningen, Staring Centrum. Rapport 127.

Noordhuis, M., P.J.T. van Bakel en A.F. van Holst, 1990. *Onderzoek naar de verandering van de freatische grondwaterstanden op enkele kaartbladen in de provincie Noord-Brabant als gevolg van veranderingen in de waterhuishouding.* Wageningen, Staring Centrum. Rapport 72.

Querner, E.P. en P.J.T. van Bakel, 1989. *Description of the regional groundwater flow model SIMGRO.* Wageningen, Staring Centrum. Report 7.

Sman, H.T., 1985. *Een regionaal geohydrologisch modelonderzoek van de Centrale Slenk van Noord-brabant.* Bilthoven, RIVM. Rapport 840348003.

Teunissen van Manen, T.C, 1985. *Bodemkaart van Nederland 1:50000; Toelichting bij de kaartbladen 50 Oost Tilburg en 51 West Eindhoven.* Wageningen, STIBOKA.

Thunnissen, H.A.M., P.J. van den Boogaard en H.P.T. Ullenbroeck, 1993. *Operational Land cover classification in the Netherlands using satellite images and other geographical information.* Presented at the International Symposium 'Operationalization of Remote Sensing',ITC Enschede, The Netherlands.

Ven, F.H.M. van de en B.R. Voortman, 1985. *De waterbalans van een stedelijk gebied; ervaringen in twee meetgebieden in Lelystad.* In: H2O 18(1985)8 p. 170-176.

Vlot, J.E., B. Minnema en R.J. Stuurman, 1992. *Hydrologisch onderzoek naar de regeneratie mogelijkheden van grondwaterafhankelijke natuurwaarden in de Mortelen en het Veldersbosch.* Delft, IGG-TNO. Concept rapport.

Vandenberghe, J., 1990. *Morphological effects of pleistocene faulting in unconsolidated sediments (Central Graben, Netherlands).* Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Bd. 34, Heft 1.

Walsum, P.E.V. van, 1990. *Waterbeheer rondom de Groote Peel. Verkenning en evaluatie van scenario's.* Wageningen, Staring Centrum. Rapport 106.

Walsum, P.E.V. van, 1991. *Interactive comparitive display system for analyzing results of environmental modelling.* Wageningen, Staring Centrum. Report 14.

Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. *Cultuurtechnisch Vademecum.* Utrecht, Cultuurtechnische vereniging.

Werkgroep Waterbeheer Noord-Brabant, 1990. *Planning van de oppervlakte-waterhuishouding in midden en oostelijk Noord-Brabant.* Wageningen, Staring Centrum. Rapport 99.

Wesseling, J.G., 1991. *CAPSEV.* Wageningen, Staring Centrum. Report 37.

Wösten, J.H.M. et al., 1987. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks.* Wageningen, Stiboka/ICW. STIBOKA-rapport 1932, ICW-rapport 18.

Wösten, J.H.M. et al., 1988. *Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 250000, ten behoeve van de PAWN-studie.* Wageningen, Stiboka. Rapport nr. 2055.

Niet-gepubliceerde bronnen

Gehrels, B.S., 1990. *Gebruik van digitale terreinmodellen voor geomorfologisch onderzoek.* Wageningen, Staring Centrum. Interne mededeling 79.

Querner, E.P., 1988. *FEMSIN; Data managment program for groundwater and surface water models.* Wageningen, ICW. Nota 1903.

Reinds, 1986. *Beregenings- en bevloeingsmogelijkheden in 1985.* Wageningen, ICW. Nota 1727.

Walsum, P.E.V. van en M. Knotters, 1992. *Ontwikkelen van een methode voor het karteren van afvoerfactoren.* Wageningen, Staring Centrum. Interne mededeling nr. 201.

Aanhangsel 1 Werkzame dikten van wortelzones

De werkzame worteldieptes (in cm) zijn op basis van de bodemfysische eenheid en de grondwaterklasse per grondgebruiksvorm op basis van 'expert judgement' toegekend door G.A. van Soesbergen (1992)

bodem	eenheid	code[1]	gwk[2]	gras	mais	granen	bieten	aardappel	bos
broekeerd/	iWz	5	1	25	30	30	30	30	40
dampodzol	iWp		2	30	40	40	35	35	50
duinvaag	Zd20	7	2	30	40	40	35	30	40
	Zd21		3	30	50	50	45	30	70
haarpodzol	Hd21	8	3	30	40	40	35	30	50
veldpodzol	Hn21	9	1	25	35	35	30	30	40
			2	30	50	50	40	30	50
			3	30	50	50	40	30	70
veldpodzol	Hn21g	10	1	25	35	35	30	30	40
vanaf 1. m			2	30	50	50	35	30	50
grofzand			3	30	50	50	40	30	70
veldpodzol	Hn23x	11	1	25	35	35	30	30	40
vanaf .9 m			2	30	40	40	35	30	50
leem			3	30	40	40	35	30	80
enkeerd	zEZ21	12	1	30	40	40	30	30	40
			2	40	60	60	50	35	80
			3	50	80	80	60	40	100
beekeerd	pZg23	13	1	30	40	40	35	30	40
			2	30	50	50	40	30	60
podzol	gHd30	14	1	20	30	25	25	20	35
op grof zand			2	20	30	30	30	25	40
poldervaag	Mn22p	19	1	30	40	40	35	35	50

[1] code staat voor de codering van de bodemfysische eenheden 1:250.000 naar Wösten (1988)

[2] GWK staat voor grondwaterklasse