



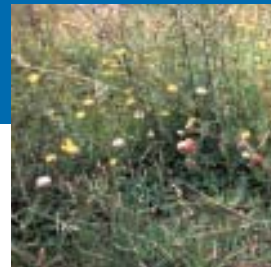
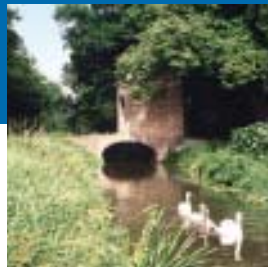
ALTERRA

WAGENINGEN UR

Duurzaam waterbeheer Langbroekerwetering

Fase 1: Modelbouw, calibratie en
bepaling van het Actueel Grond-
en Oppervlaktewaterregime

A.G.M. Hermans, P.E.V. van Walsum, J. Runhaar & P.J.T. van Bakel



Alterra-rapport 914, ISSN 1566-7197

Centrale foto omslag: Hans Neecke, Leersum

Duurzaam waterbeheer Langbroekerwetering – fase 1

Opdrachtgever: Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden

Duurzaam waterbeheer Langbroekerwetering

Fase 1: Modelbouw, calibratie en bepaling van het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime

**A.G.M. Hermans
P.E.V. van Walsum
J. Runhaar
P.J.T. van Bakel**

Alterra-rapport 914

Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2004

REFERAAT

Hermans, A.G.M., P.E.V. van Walsum, J. Runhaar, en P.J.T. van Bakel. 2004. *Duurzaam waterbeheer Langbroekerwetering; Fase 1 modelbouw, calibratie en bepaling van het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime*. Wageningen, Alterra. Alterra-rapport 914. 119 blz.; 30 fig.; 3 tab.; 25 ref.

Het project Duurzaam waterbeheer Langbroekerwetering is door het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden in samenwerking met de provincie Utrecht en de Dienst Landelijk Gebied opgestart als pilot-project voor de vaststelling van de GGOR (Gewenst Grond- en Oppervlaktewaterregime). Daarbij wordt voor het Langbroekerwetering-gebied (6 800 ha) gebruik gemaakt van de Waternoodsystematiek en het daarbij horende evaluatie-instrumentarium voor de kwantificering van doelrealisaties met betrekking tot landbouw en natuur. Vanwege de geschiktheid van het modelinstrumentarium is gekozen voor SIMGRO als rekenhart in combinatie met de GIS-schil AlterraAqua.

In het voorliggende deelrapport wordt beschreven hoe het model SIMGRO is opgezet voor het modelgebied van 25 000 ha. Het model is gecalibreerd met behulp van een relatief eenvoudige methode, die echter wel gebaseerd is op kwantitatieve criteria en systematisch en reproduceerbaar is. Vervolgens is een simulatie gemaakt van het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime, en zijn met het Waternoodinstrumentarium de doelrealisaties voor natuur en landbouw bepaald.

Trefwoorden: GGOR, AGOR, Waternood, regionale hydrologie, calibratie, SIMGRO

ISSN 1566-7197

De centrale foto op de kaft is gemaakt door Hans Neecke, Leersum

Dit rapport (in zwart/wit met CD van kleurenversie) kunt u bestellen door €22,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 914. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten. Het rapport kan ook worden gedownload van www.alterra.nl

© 2004 Alterra,
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info@alterra.wur.nl

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

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

1	Inleiding	13
2	Beschrijving van het gebied	15
3	Beschrijving van het model SIMGRO	17
3.1	Algemeen	17
3.2	Grondwaterstroming	17
3.3	Bodemwaterprocessen	18
3.4	Oppervlaktewater: ontwatering en afwatering	20
3.4.1	Ontwatering	20
3.4.2	Afwatering	20
3.5	Uitwisseling tussen modules	21
3.6	SIMGRO en AlterraAqua	21
4	Modelschematisering en invoergegevens	23
4.1	Modelgebied en ruimtelijke indeling	23
4.2	Grondwater	24
4.2.1	Maaiveldshoogte	24
4.2.2	Geohydrologische schematisatie	25
4.3	Bodemwater	27
4.3.1	Bodemkenmerken	27
4.3.2	Landgebruik	27
4.3.3	Aanpassen percolatie hangwaterprofiel	28
4.4	Oppervlaktewater	30
4.4.1	Ontwatering	30
4.4.2	Afwatering	32
4.4.3	Wateraanvoer	34
4.5	Waterbeheer stedelijk gebied	36
4.6	Randvoorwaarden	36
4.6.1	Stijghoogten	36
4.6.2	Grondwateronttrekkingen	37
4.6.3	Neerslag en verdamping	37
4.6.4	Berekening	38
5	Gevoeligheidsanalyse en calibratie.	39
5.1	Resultaten van het ongecalibreerde model	39
5.2	Calibratieperiode	39
5.3	Calibratiemethode	40
5.3.1	Calibratie van de ondergrond	40
5.3.2	Calibratie van de freatische laag	43
5.4	Gevoeligheidsanalyse en calibratie ondergrond	44
5.4.1	Gevoeligheidsanalyse	44
5.4.2	Calibratie van weerstanden van scheidende lagen	44
5.4.3	Calibratie van de watervoerende pakketten	45
5.5	Gevoeligheidsanalyse en Calibratie topsysteem	47

5.5.1	Gevoeligheidsanalyse van radiale/horizontale weerstand	47
5.5.2	Calibratie van de horizontale weerstand van de deklaag	47
5.5.3	Gevoeligheidsanalyse van de bergingscoefficient	48
6	Actueel Grond- en Oppervlaktewater Regime	51
6.1	Representativiteit meteorologische rekenperiode	51
6.1.1	Gehele periode	51
6.1.2	Een droog en een nat jaar	52
6.2	Grondwater	53
6.2.1	Vershil gemeten en berekende grondwaterstanden	53
6.2.2	Presentatie GHG, GLG, GVG en kwel	56
6.3	Oppervlaktewater	58
6.4	Verdamping	60
6.4.1	Vergelijking van methoden	60
6.4.2	Aanpassing verdamping	62
6.5	Droogteschade landbouw	62
6.5.1	Vergelijking van methoden	62
6.5.2	Aanpassing model	64
6.5.3	Presentatie van de droogteschade	65
6.6	Natschade landbouw	65
6.7	Doelrealisatie Natuur	66
7	Conclusies en aanbevelingen	69
7.1	Conclusies ten aanzien van de prestatie van het model	69
7.2	Conclusies ten aanzien van het AGOR	70
7.3	Conclusies ten aanzien van de doelrealisatie van het AGOR	70
7.4	Aanbevelingen	71
	Literatuur	73
	Bijlagen	
A	Figuren bij modelbouw	75
B	Verbeterfunctie AHN in AltterrAqua	85
C	Figuren bij gevoeligheidsanalyse en calibratie	87
D	Metingen oppervlaktewater	97
E	Vergelijking SIMGRO en SEBAL-verdamping	101
F	Droogteschade volgens SIMGRO-verdampingsreductie	107
G	Natuurdoeltypen	109
H	Neergeschaalde GXG-kaarten voor natuurevaluatie	119

Woord vooraf

Het rapport dat voor u ligt vormt de afsluiting van de eerste fase van het onderzoek Duurzaam waterbeheer Langbroekerwetering. Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden.

Onze dank voor de goede samenwerking gaat uit naar Eric Haddink die als projectleider namens het hoogheemraadschap fungeerde. Ook danken wij Sarian Kosten die deze taak vervulde tot januari 2003. Joost Heijkers, eveneens van het hoogheemraadschap, danken wij voor de levering van de noodzakelijke data. Verder zijn wij erkentelijk voor het werk van de begeleidingscommissie. Naast bovengenoemde personen bestond deze uit Rob Klaarenbeek van DLG-Utrecht en Frank van Pruissen van de Provincie Utrecht. Het was motiverend om met hen de tussenresultaten van het onderzoek te bediscussiëren.

Vanuit Alterra heeft Ellen Hermans de modellering met SIMGRO verricht. Han Runhaar heeft getekend voor de discussie met de Provincie Utrecht over de natuurdoeltypen en Jan van Bakel heeft zijn licht laten schijnen over de uitkomsten met betrekking tot opbrengstdepressies van de landbouw. Ondergetekende was verantwoordelijk voor de calibratiemethode en de projectleiding vanuit Alterra. Onontbeerlijke logistieke steun hebben we gehad van Gerrit Hendriksen en Pim Dik die verantwoordelijk zijn voor de GIS-schil AlterraAqua waar we dankbaar gebruik van hebben gemaakt.

Wageningen, februari 2004

Paul van Walsum (namens het projectteam)

Samenvatting

Om de doelstellingen geformuleerd in het gebiedsgericht project Langbroekerwetering te kunnen bereiken wordt voor dit gebied het geïntegreerde regionale hydrologische model SIMGRO ingezet.

Het Langbroekerwetering-gebied heeft een oppervlakte van 6 800 ha. Het modelgebied is ongeveer 25 000 ha groot en zo gekozen dat effecten van foutieve randvoorwaarden op dit interessegebied te verwaarlozen zijn. De eindige elementen methode wordt gebruikt voor de numerieke berekeningen van de grondwaterstroming. Hiertoe is een driehoeksnetwerk aangemaakt. De zogenoemde invloedsgebieden van de knooppunten van dit netwerk vormen ook de basis voor de berekening van de onverzadigde zone. Het aantal knooppunten bedraagt bijna 30 000; de knooppuntafstand varieert van 250 meter op de modelrand tot plaatselijk 20 meter in het interessegebied.

De maaiveldhoogte varieert van bijna 70 m +NAP op de Utrechtse Heuvelrug tot net iets boven NAP in het zuidwestelijke deel van het Langbroekerwetering-gebied. De geohydrologie is geschematiseerd tot drie watervoerende pakketten, twee scheidende lagen en een deklaag. Het gebied kent een grote variatie in bodemtypen: van zandgronden op de heuvelrug tot zavel- en kleigronden richting Kromme Rijn. Voor de bodemfysische eigenschappen van deze gronden wordt gebruik gemaakt van de Staringreeks (Wösten, 2001). Het landgebruik bestaat voor 51% uit grasland, 26% natuur, 13% bebouwing, 8% akkerbouw en 2% boomgaarden. Voor een verbeterde berekening van het hangwaterprofiel en de evapotranspiratie op de Utrechtse heuvelrug is de percolatie in SIMGRO aangepast.

Type A-watervangen, stuwen, duikers, gemalen en leggergegevens zijn gebruikt bij het opzetten van het oppervlaktewatermodel. Binnen het interessegebied is de afwatering gedetailleerd gemodelleerd; buiten het interessegebied zijn grovere afwateringseenheden onderscheiden. In SIMGRO wordt de waterbalans van een afwateringseenheid gesimuleerd met één reservoir voor het geheel van grotere en kleinere waterlopen. De afwatering wordt gesimuleerd met een netwerk van reservoirs. Voor het afleiden van de afvoerrelaties voor deze reservoirs zijn hydraulische berekeningen uitgevoerd met een voor deze studie opgezet SOBEK-model. Drainagemiddelen, wateraanvoer en stedelijk waterbeheer zijn in het SIMGRO-model geschematiseerd. Op de modelrand zijn stijghoogten bepaald met behulp van een bestaande SIMGRO-model van een groter gebied (Wendt, 1998). Andere aan het model opgelegde randvoorwaarden zijn de grondwateronttrekkingen, neerslag, verdamping en beregening.

De calibratie van geohydrologische parameters is met behulp van een eenvoudige procedure met gebruik van kwantitatieve criteria op een systematische en reproduceerbare wijze uitgevoerd. De gevolgde calibratieprocedure voldoet daarmee voor een belangrijk deel aan het handboek 'Good Modelling Practice' (STOWA/RIZA,

1999). Eerst de diepere lagen zijn gecalibreerd op grond van zo correct mogelijke stijghoogteverschillen. Vervolgens is de deklaag gecalibreerd, gericht op zo correct mogelijke absolute stijghoogten. Er is een gevoeligheidsanalyse vooraf gegaan aan iedere calibratiestap. Uiteindelijk is bereikt dat de standaardafwijking van de gesimuleerde stijghoogten ten opzichte van de gemeten waarden is teruggebracht tot gemiddeld 22 cm.

Met het gecalibreerde model is het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime (AGOR) bepaald. De hiervoor gebruikte meteorologische periode (1989-200) is representatief voor het huidige klimaat. Vergelijking van berekende en gemeten grondwaterstanden en oppervlaktewaterafvoer geven reden tot vertrouwen in de prestaties van het model. In eerste instantie gold dit in mindere mate voor de verdampingsberekeningen. De verdampingsberekening in SIMGRO is verbeterd op basis van gegevens verkregen via *remote sensing* en op basis van de droogteschade voor de landbouw berekend met het Waternoodinstrumentarium.

De berekende AGOR wordt met kaartbeelden gepresenteerd: Op de flanken van de heuvelrug infiltreert het water en vinden we diepe grondwaterstanden. Over het algemeen zakken de grondwaterstanden in de overige delen van het interessegebied niet dieper weg dan 1,20 m beneden maaiveld. Plaatselijk ligt de GLG zelfs in de klasse 50-80 cm beneden maaiveld. Dit zijn kwellocaties. De GHG is plaatselijk zeer ondiep met waarden in de klasse 0-20 cm beneden maaiveld. Opvallend is het geringe verschil in GHG en GLG in het gebied. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de aanzienlijke kwel en een goede drainage van bolvormige percelen. De kwel naar de deklaag loopt plaatselijk op tot 5 mm/dag. Hiervan komt maximaal 1 mm/dag ten goede aan de terrestrische vegetatie. De rest draineert naar het oppervlaktewater zonder de wortelzone te bereiken.

De doelrealisatie voor het AGOR is berekend voor landbouw en terrestrische natuur met behulp van het Waternoodinstrumentarium. Bij het AGOR is de schade voor de landbouw op bepaalde locaties vrij gering maar kan op andere locaties oplopen tot 30%. De doelrealisatie voor natuur is bij de huidige drogere natuurdoelen over het algemeen goed.

De belangrijkste conclusie is dat het gecalibreerde SIMGRO-model dusdanig goede resultaten levert dat het met vertrouwen ingezet kan worden voor de tweede fase van het project 'Duurzaam waterbeheer Langbroekerwetering'.

1 Inleiding

Sinds 1996 loopt er in het Langbroekerwetering-gebied het ‘Gebiedsgericht project Langbroekerwetering’. In dat project moeten de knelpunten ten aanzien van de verschillende van belang zijnde thema’s (waaronder landbouw, natuur en water) zoveel mogelijk in samenhang opgelost worden.

De volgende concrete doelstellingen worden met het project beoogd ten aanzien van het Langbroekerwetering-gebied:

- het bepalen van de meest geschikte ligging van de nieuwe natuurgebieden (400 ha);
- het bepalen van het Gewenste Grond- en Oppervlaktewaterregime (GGOR) voor de verschillende peilgebieden;
- het bepalen van de mate van herstel voor de verdroogde gebieden;
- het definiëren van de maatregelen die genomen moeten worden om deze GGOR te bereiken.

Voor Alterra is de doelstelling van het project – behalve het beantwoorden van de vragen van de opdrachtgever – het creëren van een voorbeeld voor het operationeel maken van haar modellen en methodieken in het kader van de Waternoodsystematiek.

Gezien de complexiteit van de vraagstelling is het zinvol om gebruik te maken van het geïntegreerde regionale hydrologische model SIMGRO. Tevens kunnen dan diverse andere aan te koppelen methodieken van Alterra worden ingezet, zoals NATLES (Runhaar, 1999) voor de natuurevaluatie en Waterwijs (Van Walsum e.a., 2002) voor het genereren van landgebruikpatronen en waterbeheersmaatregelen die optimaal gebruik maken van de mogelijkheden van het regionale watersysteem.

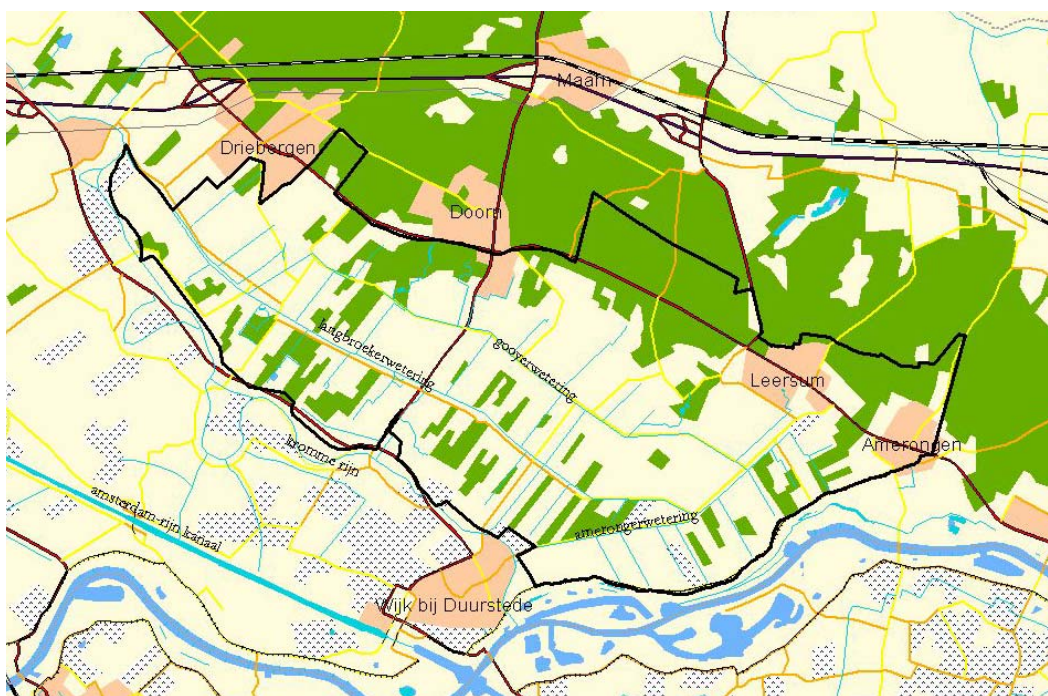
Dit document is een verslag van de eerste fase van het project: Het opzetten en calibreren van een SIMGRO-model van het Langbroekerweteringgebied. Het resulteert in een gecalibreerd model waarmee het Actueel Grond- en Oppervlaktewater Regiem (AGOR) wordt bepaald. Dit model wordt in een tweede fase toegepast om de bovenvermelde doelstellingen van het project te realiseren. In deze tweede fase wordt tevens het Waterwijsinstrumentarium ingezet. Voor fase twee van dit project verschijnt een aparte rapportage.

In hoofdstuk 2 wordt een korte beschrijving gegeven van het gebied. Hoofdstuk 3 gaat kort in op de werking van het model SIMGRO. In hoofdstuk 4 wordt de model-schematisering behandeld en komen de invoergegevens aan bod. Hoofdstuk 5 behandelt de gevoeligheidsanalyse en de calibratie van het model. Het resultaat van de calibratie getoond, het Actueel Grond en Oppervlaktewaterregime (AGOR), wordt in hoofdstuk 6 besproken. Hier wordt tevens ingegaan op doelrealisaties van het AGOR volgens het Waternoodinstrumentarium. Tenslotte volgen in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen.

2 Beschrijving van het gebied

Het Langbroekerwetering-gebied ligt in de provincie Utrecht. Het vormt een landschappelijk en (hydro)ecologisch rijk overgangsgebied tussen de droge zandgronden van de Utrechtse Heuvelrug en de oeverwallen en natte komkleigronden langs de Kromme Rijn. Kenmerkend is de grote afwisseling van bosgebieden, houtsingels, weilanden, akkers en waterlopen. Landbouw, natuur en recreatie zijn belangrijke, vaak sterk verweven functies.

Figuur 1 geeft een overzicht van het onderzoeksgebied. De Langbroekerwetering doorkruist het gebied van oost naar west. Andere belangrijke weteringen in het gebied zijn de Amerongerwetering en de Gooyerwetering. In het studiegebied liggen de dorpen Amerongen, Leersum, Langbroek en deels Doorn.



Figuur 1: Overzichtskaart van het Langbroekerwetering-gebied

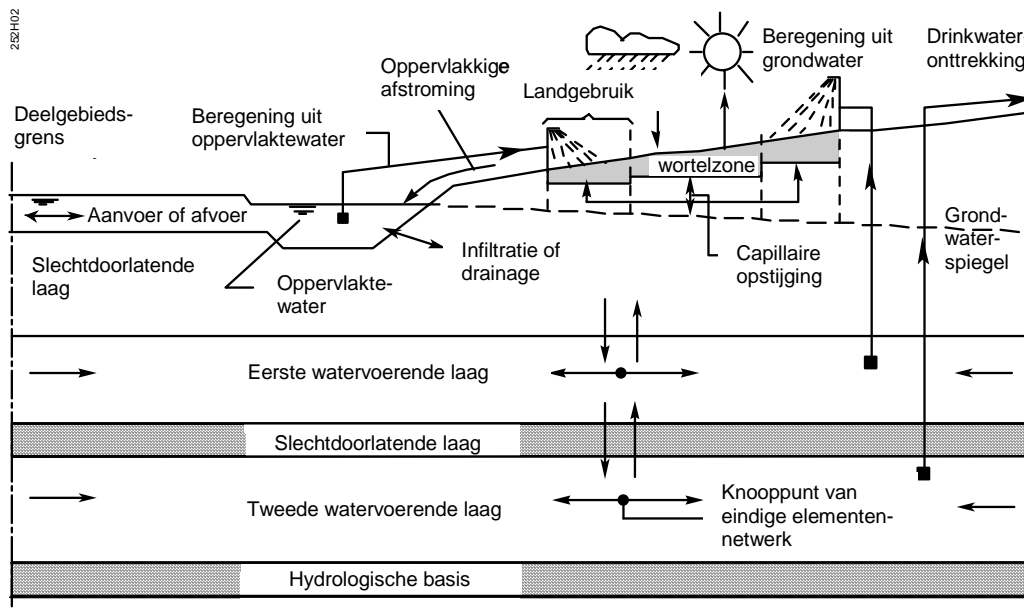
De Utrechtse Heuvelrug en het overgangsgebied naar de Kromme Rijn zijn geologisch gevormd tijdens de laatste en voorlaatste ijstijd, toen het landijs ons land deels bedekte. In de Saalien-ijstijd werd door het landijs grof materiaal opgestuwd, waardoor de Utrechtse Heuvelrug ontstond. Direct ten zuiden van de stuwwal ontstonden zogenaamde puinwaaiers, gelegen aan de noordzijde van het Kromme Rijngebied, tegen de flanken van de Utrechtse Heuvelrug. Later zijn de hellingen van de Utrechtse Heuvelrug ondergestoven met dekzand, soms tot hoge of lage landduinen. Tussen deze landduinen door hebben zich uit afstromend

oppervlaktewater en kwelwater in de loop van de tijd verschillende droge beekdalen ontwikkeld. De meeste van deze beekdalen lopen in zuidwestelijke richting. In de laagste en natste delen heeft zich plaatselijk veen gevormd, dat later bedekt is door rivierklei-afzetting van de Kromme Rijn.

3 Beschrijving van het model SIMGRO

3.1 Algemeen

Om de effecten van waterhuishoudkundige ingrepen in een gebied te kunnen kwantificeren is het regionale model SIMGRO ontwikkeld. SIMGRO beschrijft de stroming in de verzadigde zone, de onverzadigde zone en het oppervlaktewater (Veldhuizen et al., 1998; Van Walsum et al., in voorbereiding). In figuur 2 is een schematisch beeld gegeven van het model. Het niet-stationaire karakter van dit model, waarin de interactie tussen de hydrologische processen in grond- en oppervlaktewater van belang zijn, maakt het mogelijk de variaties binnen het hydrologische systeem door veranderende randvoorwaarden, zoals de weersomstandigheden, te beschrijven.

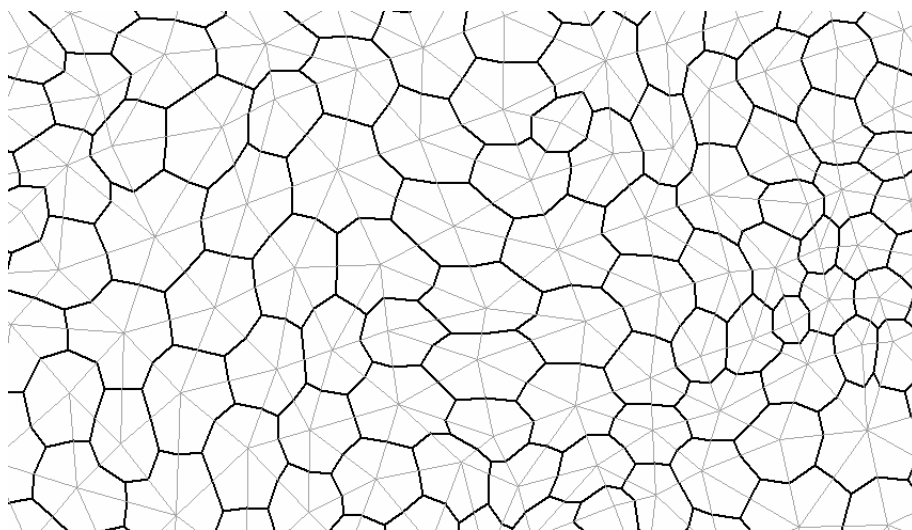


Figuur 2 : Schematische weergave van de hydrologische processen en systemen in SIMGRO

3.2 Grondwaterstroming

Voor het beschrijven van de grondwaterbeweging in de verzadigde zone wordt een schematisatie toegepast in watervoerende en weerstandbiedende lagen (zie figuur 2). Een driehoeksnetwerk (zie figuur 3) vormt de meetkundige basis van de numerieke berekening van grondwaterstroming met de methode van eindige elementen. Deze methode beschrijft de stijghoogte en/of flux in ieder knooppunt (hoekpunt van een

driehoek) met behulp van lineaire interpolatiefuncties. In een watervoerende laag treedt horizontale stroming op en in een weerstandbiedende laag alleen verticale stroming. Op deze wijze wordt de verzadigde grondwaterstroming quasi-driedimensionaal beschreven. Om tot een oplossing te komen wordt langs de rand van het model een stijghoogte of een flux opgelegd.



Figuur 3: Berekening verzadigde grondwaterstroming op basis van het eindige elementennetwerk van driehoeken (dunne lijnen) en berekening onverzadigde grondwaterstroming op basis van invloedsoppervlakken van knooppunten (boningraatstructuur met dikke lijnen).

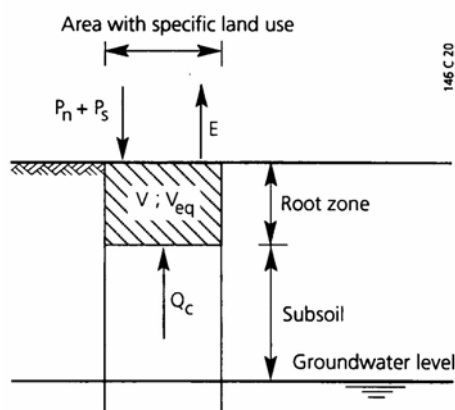
3.3 Bodemwaterprocessen

Aan de hand van het driehoeksnetwerk voor de grondwaterstroming kan voor ieder knooppunt een zogenoemd invloedsoppervlak worden geconstrueerd (zie figuur 3). De berekening van de onverzadigde grondwaterstroming vindt plaats per invloedsoppervlak.

Het in detail modelleren van het bodemwater als onderdeel van een regionaal model zou een buitensporige rekeninspanning vereisen. Om toch de belangrijkste bodemwaterprocessen in beeld te brengen heeft SIMGRO een module met een eenvoudig bakmodel voor de wortelzone en een vochtprofiel voor de ondergrond. Hierbij is de ondergrond gedefinieerd als het profiel tussen wortelzone en freatisch vlak volgens figuur 4. Het model maakt gebruik van tabellen die met het numerieke bodemwatermodel CAPSEV zijn verkregen (Wesseling, 1991).

De beschouwde wortelzone heeft een vochtbergend vermogen dat wordt bepaald door de dikte en de vocht karakteristiek van het bodemmateriaal. Toevoeging aan of onttrekking uit dit systeem zijn neerslag, beregening, evapotranspiratie, capillaire flux en percolatie.

De berekeningswijze van de percolatie is in dit project aangepast. Daarom wordt deze niet hier behandeld maar komt ze in 4.3.3 uitgebreid aan de orde. Als er minder vocht dan behorende bij het evenwichtsprofiel in de wortelzone aanwezig is, kan er een capillaire flux optreden. De capillaire flux is afhankelijk van de bodemfysische eenheid, de grondwaterstandsdiepte, het vochtgehalte en de dikte van de wortelzone. De maximale vochtinhoud van de wortelzone is afhankelijk van dezelfde factoren. Met de percolatie of capillaire flux uit de onverzadigde zone rekent het model in de bovenste laag van het verzadigde deel een verandering van de grondwaterstand uit, die afhankelijk is van de freatische bergingscoëfficiënt. Het vochttransport in de onverzadigde zone wordt op een pseudo-stationaire wijze benaderd, dat wil zeggen volgens een opeenvolging van stationaire situaties.



Figuur 4 Schematisatie van de onverzadigde zone in SIMGRO. Met P_n = netto neerslag, P_s = beregening, E = evapotranspiratie, V = vochtgehalte, V_{eq} = vochtgehalte bij een evenwichtsprofiel en Q_c = opwaartse flux

Invoer voor het model van de onverzadigde zone is aan de bovenkant neerslag en potentiële verdamping. De potentiële verdamping van gras wordt met behulp van de Makkink-formule berekend (gras-referentieverdamping). Voor andere gewassen wordt deze referentieverdamping vermenigvuldigd met gewasfactoren om de potentiële verdamping te bepalen (Hooghart, 1987 en Feddes, 1987). De actuele verdamping (evapotranspiratie) hangt af van de vochtvoorraad in de wortelzone. Buiten het groeiseizoen van een gewas rekent het model met een bodemverdamping. De vochttoestand van het bovenste laagje grond bepaalt deze verdamping. Deze vochttoestand hangt af van de voorafgaande droge periode.

Voor bos is onderscheid gemaakt in naald- en loofhout. Voor beiden wordt de potentiële verdamping berekend volgens de procedures opgesteld door de Ad Hoc Groep Verdamping (1984). Hierbij wordt voor bossen rekening gehouden met de interceptie van neerslag op de bladeren en naalden. Dit wordt modelmatig geschematiseerd als een reservoir waarvan de grootte verschilt in zomer en winter. Dit interceptiewater verdampt weer en is zodoende onderdeel van de potentiële verdamping voor bossen.

3.4 Oppervlaktewater: ontwatering en afwatering

3.4.1 Ontwatering

In SIMGRO worden de invloedsoppervlakken van de knooppunten gegroepeerd tot afwateringseenheden. Binnen een afwateringseenheid wordt onderscheid gemaakt tussen vijf categorieën van waterlopen:

- primaire waterlopen (beken, kanalen, rivieren);
- secundaire waterlopen (beekjes, sloten in beheer bij het waterschap);
- tertiaire waterlopen (sloten en greppels);
- drains;
- maaiveldgreppels.

Een ontwateringsmiddel is actief als de grondwaterstand en/of de oppervlaktewaterstand hoger is dan de bodem van het ontwateringsmiddel. De grondwaterstand wordt bekeken op het niveau van het invloedsgebied. De oppervlaktewaterstand op het niveau van de afwateringseenheid. Afhankelijk van de omstandigheden is er sprake van drainage of infiltratie. De drainage wordt berekend met de formule van Ernst (Ernst, 1978), aangepast ten behoeve van toepassing in een numeriek model.

3.4.2 Afwatering

De waterbalans van een afwateringseenheid wordt gesimuleerd met één reservoir voor het geheel van grotere en kleinere waterlopen. De afwatering wordt gesimuleerd met een netwerk van reservoirs. De netwerkstructuur definieert de wijze waarop de reservoirs een cascade vormen. Voor ieder reservoir wordt een relatie afgeleid tussen berging en peil, de zogenaamde bergingsrelatie, en tussen afvoer en peil, de afvoerrelatie. Tevens wordt voor periodes met automatische peilregeling het streefpeil ingevoerd. Afhankelijk van inrichting, type beheer en de tijdsperiode in het jaar (zomer/winter) wordt bij de peilsimulatie òf van een afvoerrelatie, òf van een streefpeil gebruikt gemaakt. Bij gebruik van de afvoerrelatie wordt een natuurlijke situatie gesimuleerd (waterloop met een bepaalde bodemhoogte) of een stuw met een vaste klepstand (vaste stuw). Bij gebruik van een streefpeil wordt een automatische stuw gesimuleerd; de klepstand wordt automatisch bijgesteld, gericht op handhaving van het ingestelde streefpeil.

In het model wordt per reservoir aangegeven of er terugstuwning kan plaatsvinden in bovenstroomse richting. Terugstuwning betekent dat het model water blokkeert en eventueel water in tegengestelde richting verplaatst als aangegeven door de netwerkstructuur. Dit gebeurt als het benedenstroomse peil hoger dreigt te worden dan het bovenstroomse peil.

3.5 Uitwisseling tussen modules

De waterstanden in het oppervlaktewater reageren meestal zeer snel op een veranderende drainage. De berging ervan is immers zeer gering in vergelijking met het grondwatersysteem. Een kleine tijdstap is dan ook gewenst, die los staat van de gekozen tijdstap voor het grondwater. Voor de onverzadigde zone en de verzadigde zone rekent SIMGRO over het algemeen met tijdstappen van ¼ dag tot ½ dag. Het oppervlaktewatersysteem in het model wordt daarentegen met veel kleinere tijdstappen (10 minuten tot 1,5 uur) doorgerekend. De interactie tussen het grondwater en het oppervlaktewater wordt voor deze kleinere tijdstap berekend. De grondwaterstand blijft in die periode constant, maar het waterpeil varieert en de berekende drainage of infiltratie wordt gesommeerd. Bij de volgende tijdstap voor het grondwater wordt deze gesommeerde drainageflux gebruikt om een nieuwe grondwaterstand te berekenen.

3.6 SIMGRO en AlterraAqua

AlterraAqua is een GIS-applicatie ontwikkeld in ArcView 3.3. Het heeft tot doel regionale hydrologische modellen door middel van geografische informatie systemen toegankelijk te maken. AlterraAqua is ontstaan uit een GIS applicatie ontwikkeld rond het model SIMGRO.

AlterraAqua biedt de volgende mogelijkheden bij het modelleren met SIMGRO:

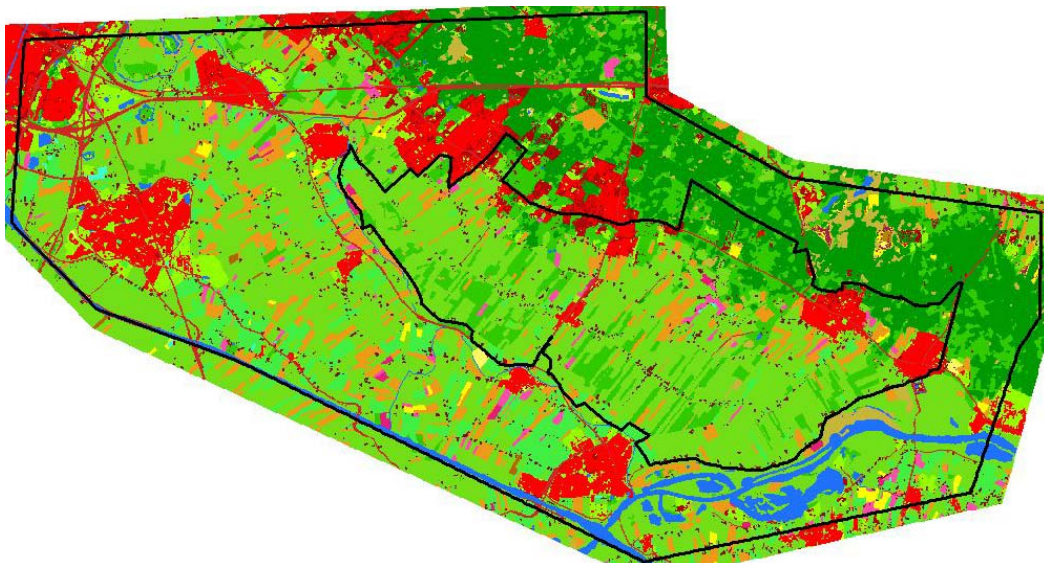
- het omzetten van GIS-bestanden tot SIMGRO-invoer;
- het visualiseren van modelinvoer;
- het starten van een SIMGRO-simulatie;
- het visualiseren van modelresultaten;
- het aanmaken van SIMGRO-scenario's en de implementatie van maatregelen;
- het nabewerken van SIMGRO-resultaten: op het moment zijn de volgende nabewerkingen mogelijk:
 - hoogwaterberekeningen volgens de methode regionale normering watersystemen (Koolen e.a., 2001);
 - bepalen van doelrealisaties voor landbouw en natuur volgens het instrumentarium Waternood (STOWA, 2002);
 - berekenen van landbouwschade volgens de HELP-methodiek (Landinrichtingsdienst, 1987) ;
 - natuurevaluatie volgens NATLES (Runhaar, 1999).

AlterraAqua is modulair opgezet. De structuur sluit zoveel mogelijk aan op de richtlijnen van Good Modelling Practice (STOWA/RIZA, 1999). In aangepaste versie wordt de GMP methodiek in de nabije toekomst de basis voor een kwaliteitskeurmerk in het modelleren (NEN-norm).

4 Modelschematisering en invoergegevens

4.1 Modelgebied en ruimtelijke indeling

Figuur 5 geeft een overzicht van het modelgebied met daarin het interessegebied Langbroekerwetering. Het totale modelgebied heeft een grootte van ongeveer 25 000 ha. Het interessegebied is 6 800 ha groot. Het modelgebied is zo gekozen dat effecten van foutieve randvoorwaarden op het interessegebied vrijwel te verwaarlozen zijn. Aan de noordoostkant van de heuvelrug ligt de modelgrens in het Binnenveld. In het zuidwesten ligt de modelgrens op het Amsterdam Rijnkanaal. In het zuidoosten ligt de modelgrens ten zuiden van de Nederrijn. In het noordwesten ligt de modelgrens op voldoende afstand van het interessegebied. Hierbij is rekening gehouden met een stromingsrichting van het grondwater van noordoost naar zuidwest.

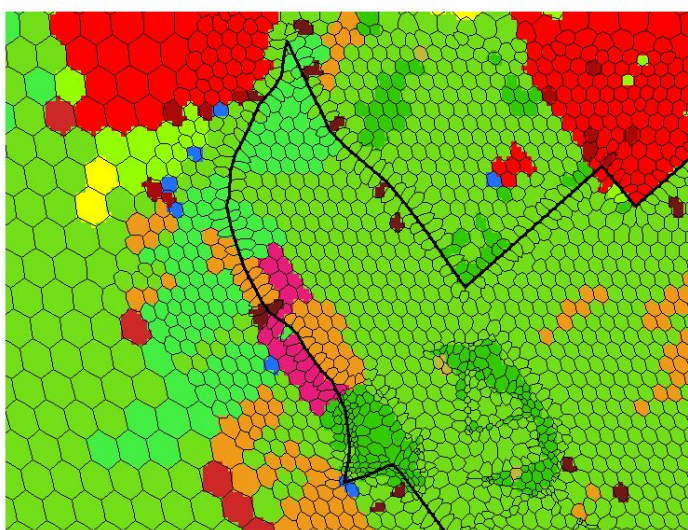


Figuur 5: Overzicht modelgebied met daarin het interessegebied.

De eindige elementen methode wordt gebruikt voor de numerieke berekeningen van de grondwaterstroming. Hiervoor is een driehoeksnetwerk gemaakt, met voor ieder knooppunt een invloedsgebied. Bij het aanmaken van dit netwerk is ervoor gezorgd dat de invloedsgebieden zo goed mogelijk de grenzen van de peilgebieden volgen. Een peilgebied dat dwars door een invloedsgebied loopt kan bij de berekening van de drainage immers voor onnauwkeurigheden zorgen. Om dezelfde reden volgen de

invloedsgebieden ook de grenzen van natuurgebieden. Dit met het oog op het mogelijk doorrekenen van scenario's in fase 2 met nieuwe peilgebieden voor natuur.

Het aantal knooppunten bedraagt 29162 met een onderlinge afstand variërend van 250 m op de modelrand tot 20 m ter plaatse van natuurgebiedsgrenzen in het interessegebied. Figuur 6 zoomt in op een deel van het modelgebied. In deze figuur is goed te zien hoe de invloedsgebieden de grenzen van peilgebieden en natuurgebieden volgen. Figuur A1 in bijlage A toont de invloedsgebieden van de knooppunten voor het gehele modelgebied.



Figuur 6: Invloedsgebieden volgen de grens van peilgebied (zwarte lijn) en natuurgebieden (donkergroene vlakken)

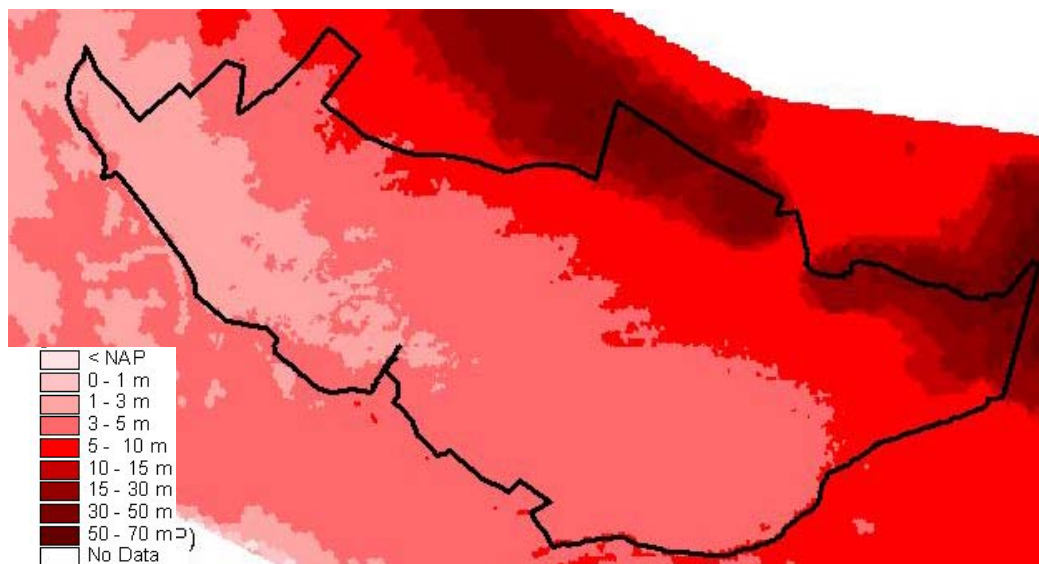
4.2 Grondwater

4.2.1 Maaiveldhoogte

Het maaiveld vormt de bovenste begrenzing van de ruimte waarbinnen het grondwaterlichaam zich kan bevinden. Het maaiveldverloop is ontleend aan het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Het AHN is gemaakt met behulp van metingen die door middel van laseraltimetrie zijn verkregen in een resolutie van één punt per zestien vierkante meter. Laseraltimetrie is een *remote sensing* techniek voor hoogtebepaling van het landschap vanuit een vliegtuig of helikopter.

Het geleverde AHN-bestand bleek nog fouten te bevatten. Soms worden bomen of wateroppervlakten gezien als maaiveld. Het instrument AlterrAqua is ingezet om het AHN-bestand te verbeteren. In bijlage B wordt deze methode beschreven.

In SIMGRO wordt de gemiddelde maaiveldhoogte per invloedsg gebied gebruikt als basis voor de berekeningen (zie figuur 7). Bij het modelleren van situaties met inundatie wordt de maaiveldberging meegerekend door gebruik te maken van de maaiveldverdeling per invloedsg gebied. De maaiveldhoogte in het interessegebied varieert van 66 m +NAP op de heuvelrug tot 1,5 m +NAP in het zuidwestelijke deel.



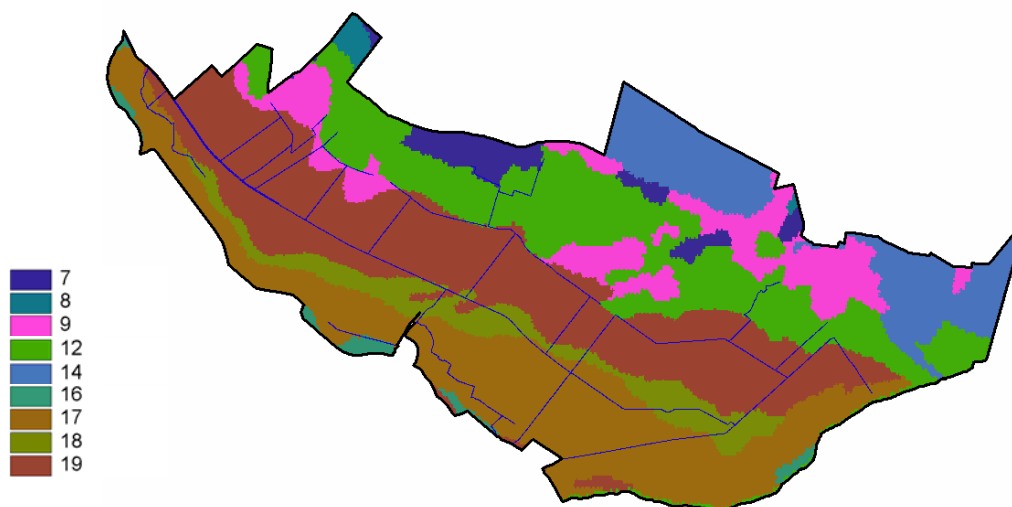
Figuur 7: Gemiddelde maaiveldhoogte per invloedsg gebied (m+NAP).

4.2.2 Geohydrologische schematisatie

In het kader van het project “Water Rijk Utrecht” is een SIMGRO-model opgezet (Wendt, 1998). Het huidige modelgebied is een onderdeel van dit model. Het is geohydrologisch geschematiseerd met drie watervoerende pakketten, twee scheidende lagen en een deklaag. Voor de huidige studie is deze schematisatie overgenomen inclusief de dikte van de lagen. Figuur 8 geeft een overzicht. De dikte van lagen is gerekend vanaf maaiveld. Als uitgangspunt zijn tevens de doorlatendheden (k -waarden) van de watervoerende pakketten en de weerstanden (c -waarden) van de scheidende lagen gebruikt. Bij de calibratie van het model zijn deze parameters echter aangepast (zie hoofdstuk 5). In bijlage A (figuren A2 t/m A7) worden de KD-waarden en de c -waarden van de diverse lagen van het gecalibreerde model weergegeven.

Afdekkend pakket (laag 1)	10 m
1 ^e watervoerend pakket (laag 2)	50 m
1 ^e scheidende laag (laag 3)	50 m
2 ^e watervoerende pakket (laag 4)	50 m
2 ^e scheidende laag (laag 5)	50 m
3 ^e watervoerende pakket (laag 6)	50 m
Ondoorlatende basis	

Figuur 8: Geohydrologische schematisatie en laagdikten.



Figuur 9: Vertaling van de bodemkaart 1:50 000 naar PAWN-eenheden, met:

- 7 : stuifzandgronden
- 8 : podzolgronden in leemarm, fijn zand
- 9 : podzolgronden in zwak lemig, fijn zand
- 12 : enkeerdgronden in zwak lemig, fijn zand
- 14 : podzolgronden in grof zand
- 16 : homogene, lichte kleigronden
- 17 : kleigronden met een zware tussenlaag of ondergrond
- 18 : kleigronden op veen (drechtvaaggronden)
- 19 : klei op zandgronden

4.3 Bodemwater

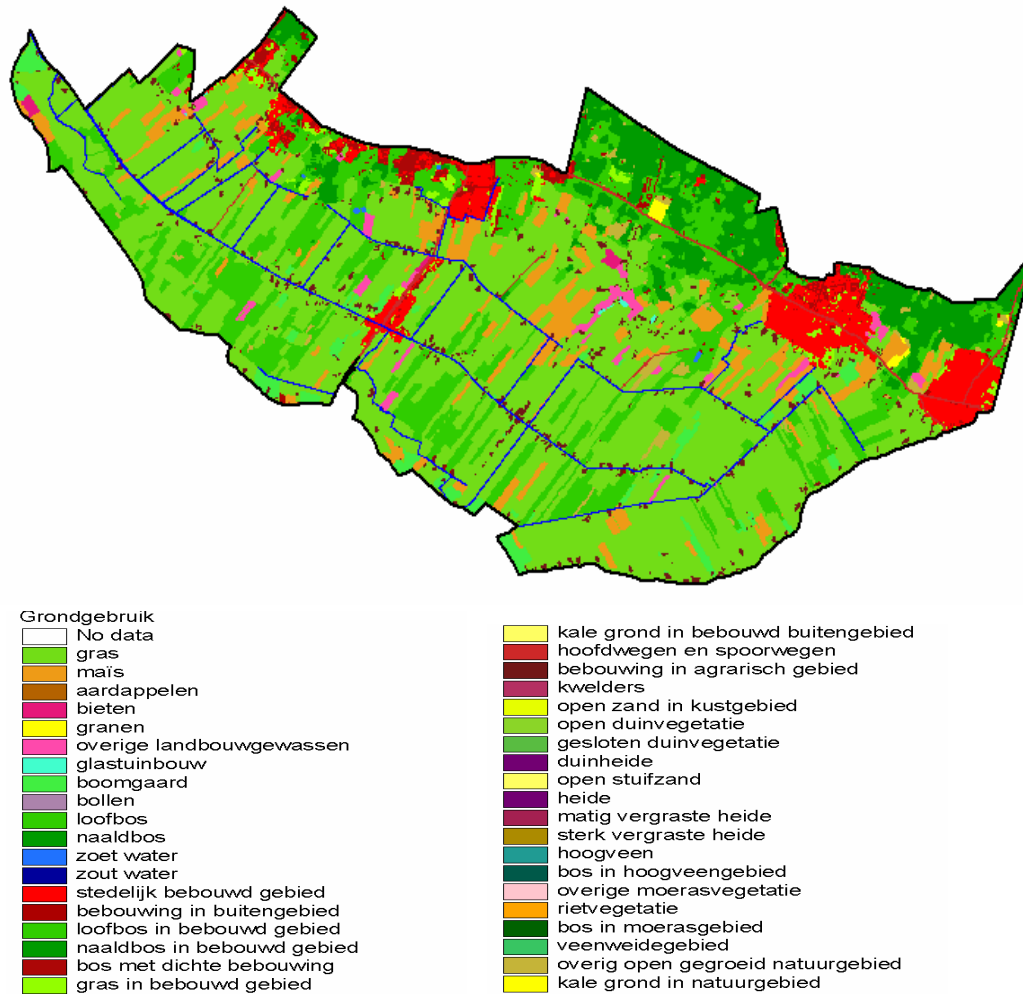
Voor de simulatie van de onverzadigde zone zoals beschreven in paragraaf 3.3 zijn, naast gegevens over maaiveldhoogte (zie paragraaf 4.2.1), gegevens over de bodemkenmerken en het bodemgebruik benodigd. Daarnaast vraagt een juiste simulatie van de verdamping op de Utrechtse Heuvelrug om een nadere beschouwing van het hangwaterprofiel.

4.3.1 Bodemkenmerken

Figuur A8 in bijlage A toont voor de bodemkaart 1:50:000 (De Vries en Denneboom, 1992). De eenheden op de bodemkaart zijn vertaald naar een 45-tal bodemfysische profielen, ook wel PAWN-eenheden genoemd. Daarbij is gebruik gemaakt van de bouwstenen van de Staringreeks (Wösten et al, 2001). In SIMGRO wordt de dominante bodemfysische eenheid per invloedsgebied gebruikt als basis voor de berekeningen. Figuur 9 geeft een overzicht van de bodemfysische eenheden. Op de heuvelrug vinden we de stuifzand-, podzol- en enkeerdgronden. Richting Kromme Rijn komen lichte en zware kleigronden voor. In de ondergrond kan zich veen of zand bevinden.

4.3.2 Landgebruik

Gegevens over het bodemgebruik zijn ontleend aan het LGN4 bestand van Alterra. Het LGN4 bestand is een rasterbestand met een resolutie van 25 meter. In het bestand worden de belangrijkste landbouwgewassen, een aantal natuurklassen en stedelijke klassen onderscheiden. Het bestand is vervaardigd met behulp van satellietbeelden van 1999 en 2000 en andere relevante ruimtelijke informatie. In SIMGRO wordt het dominante grondgebruik per invloedsgebied gebruikt als basis voor de berekeningen. Figuur 10 geeft een overzicht. Het landgebruik bestaat voor ongeveer de helft van het areaal uit grasland (51%). Een behoorlijk deel van het oppervlak is natuur (26%). Daarnaast bestaat het landgebruik uit bebouwing (13%), akkerbouw (8%), en boomgaarden (2%).



Figuur 10: Landgebruik volgens LGN4

4.3.3 Aanpassen percolatie in verband met hangwaterprofiel

Bij diepe grondwaterstanden vinden we bovenin het profiel een niet door de grondwaterspiegel beïnvloede zone met het zogenaamde 'hangwater', het water dat na een periode van neerslag niet is gepercoleerd en is blijven hangen.

In de eerste SIMGRO-versies trad percolatie op wanneer het evenwichtsvochtgehalte werd overschreden. In de huidige versie treedt percolatie op bij een vochtgehalte groter dan het vochtgehalte bij een negatieve drukhoogte van 200 cm. Dit komt overeen met het gangbare begrip 'veldcapaciteit' met een pF van 2,3. Echter, de juiste definitie van veldcapaciteit is het vochtgehalte dat in de bovenlaag van de grond enige dagen na een natte periode wordt aangetroffen. Veldcapaciteit en de daarbij optredende negatieve drukhoogte is niet constant maar afhankelijk van de grondwaterstand, het bodemtype en de periode in het jaar. Zo treedt aan het einde van het winterseizoen over het algemeen een gemiddelde percolatie op van 1 mm/dag. De negatieve drukhoogte zal dan eerder een waarde hebben van 50-100 cm

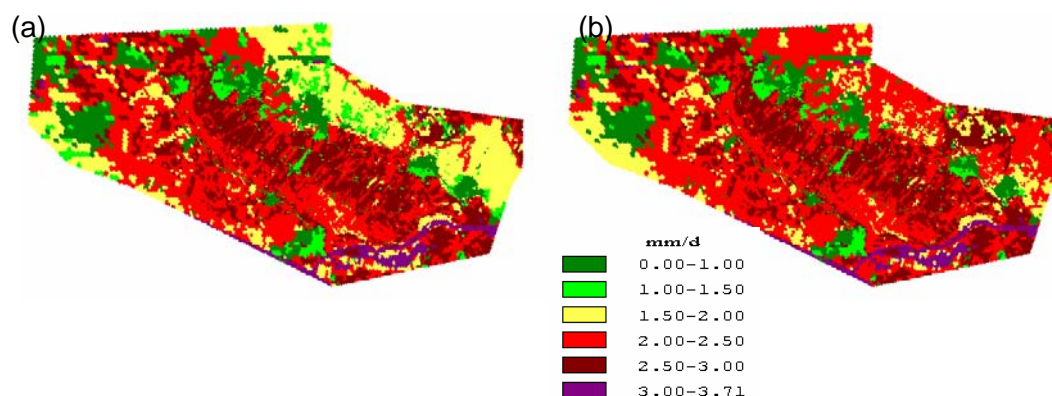
in plaats van 200 cm. Het vochtgehalte zal hoger zijn dan het gangbare begrip ‘veldcapaciteit’. Als gevolg van een grotere beschikbare vochtvoorraad in het eerste kwartaal zal de verdampingsreductie in met name het tweede kwartaal lager zijn.

Om dit inzichtelijk te maken zijn twee simulaties uitgevoerd waarbij percolatie optreedt bij een negatieve drukhoogte van respectievelijk 200 en 50 cm. Figuur 11 geeft het effect op de verdamping in het tweede kwartaal weer. Er is duidelijk te zien dat bij percolatie bij een negatieve drukhoogte van 50 cm meer verdamping optreedt op de heuvelrug dan bij een negatieve drukhoogte van 200 cm. In de overige delen van het modelgebied, waar grondwaterstanden minder diep zijn is de invloed van de negatieve drukhoogte op de verdamping verwaarloosbaar.

Op basis van de relatie tussen doorlatendheid en drukhoogte ($k-h$ functie) van het bodemtype op de heuvelrug wordt bij een percolatie van 1 mm/dag een negatieve drukhoogte van 50 cm afgeleid. Daarom is met het oog op betere simulatieresultaten op de heuvelrug SIMGRO voor dit onderzoek aangepast met betrekking tot de percolatie: Deze treedt nu op wanneer het vochtgehalte groter is dan het vochtgehalte bij een negatieve drukhoogte van 50 cm.

In dit concept zit duidelijk een tegenstrijdigheid opgesloten. Het model berekent immers geen percolatie als het vochtgehalte overeenkomt met (of kleiner is dan) het verbeterde begrip ‘veldcapaciteit’. Terwijl dezelfde veldcapaciteit afgeleid is van een situatie waarin een percolatie van 1 mm/dag optreedt. Echter, deze tegenstrijdigheid zit ook in het gangbare begrip voor veldcapaciteit. Alleen is in dit geval de grens bij een andere negatieve drukhoogte en dus een andere percolatiewaarde gelegd.

Conclusie is echter wel dat het percolatieconcept in SIMGRO erg eenvoudig is. Eigenlijk zou de percolatie per bodemfysische eenheid afhankelijk moeten zijn van het actuele vochtgehalte en de actuele grondwaterstand. Er wordt naar gestreefd dit binnen afzienbare tijd te realiseren.



Figuur 11: gemiddelde verdamping in het 2^e kwartaal bij een hangwaterprofiel-onderdruk van respectievelijk 200 cm (a) en 50 cm (b).

4.4 Oppervlaktewater

4.4.1 Ontwatering

Zoals beschreven in paragraaf 3.4.1 wordt in SIMGRO onderscheid gemaakt tussen vijf categorieën ontwateringsmiddelen. Deze zijn ruimtelijk weergegeven in figuur 12.

1). Primaire waterlopen: De Rijn is als randvoorwaarde met een stijghoogte in model gebracht (zie paragraaf 4.6.1)

2). Secundaire waterlopen: Dit zijn de hoofdwaterlopen in beheer bij het hoogheemraadschap. Ze worden ook wel type A-watergangen genoemd. Ligging en dimensies worden in de volgende paragraaf besproken omdat deze waterlopen tevens een rol in de afwatering spelen. Er wordt uitgegaan van een eerste schatting van de in- en uittreeweerstand van 1 dag. De gevoeligheidsanalyse gaf geen aanleiding deze waarde aan te passen (zie paragraaf 5.5.1).

3). Tertiaire waterlopen: Dit zijn de sloten die niet in beheer zijn van het hoogheemraadschap. De ligging is ontleend aan het Top10-Vector bestand van de Topografische Dienst. In dit bestand wordt onderscheid gemaakt tussen gerenforceerde sloten, enkele sloten en greppels. Ten behoeve van een studie in Noord-Brabant (Massop en te Beest, 2001) is voor elk type sloot of greppel per hydrotype en per grondwatertrap een inschatting gemaakt van de afmetingen. Voor het Langbroekerwetering-gebied zijn de resultaten van een soortgelijke studie nog niet beschikbaar. Daarom wordt hier gebruik gemaakt van de resultaten uit Noord-Brabant. Voor combinaties van sloottype, hydrotype en grondwatertrap die wel in het huidige studiegebied voorkomen maar niet in Noord-Brabant is een inschatting gemaakt van de afmetingen (Massop, mond. med.). Er wordt uitgegaan van een eerste schatting van de in- en uittreeweerstand van 1 dag. De gevoeligheidsanalyse gaf geen aanleiding deze waarde aan te passen (zie paragraaf 5.5.1).

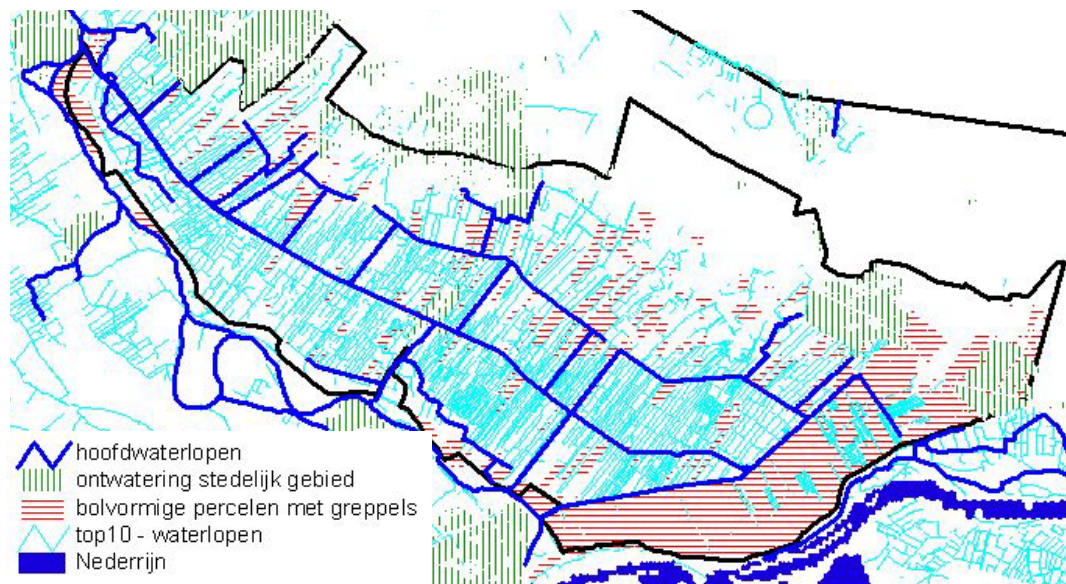
4). Greppels en buisdrainage:

a). Door Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden zijn bolvormige percelen aangegeven waar op regelmatige afstand zeer smalle ondiepe greppels voorkomen. Deze greppeltjes zijn circa 60 cm diep ten opzichte van het gemiddelde maaiveld, 10 cm breed en liggen 20 m uit elkaar. Er wordt uitgegaan van een drainage- en infiltratieweerstand van 150 dagen (uitkomsten met een weerstand van 100 dagen werden minder realistisch geacht door de begeleidingscommissie)

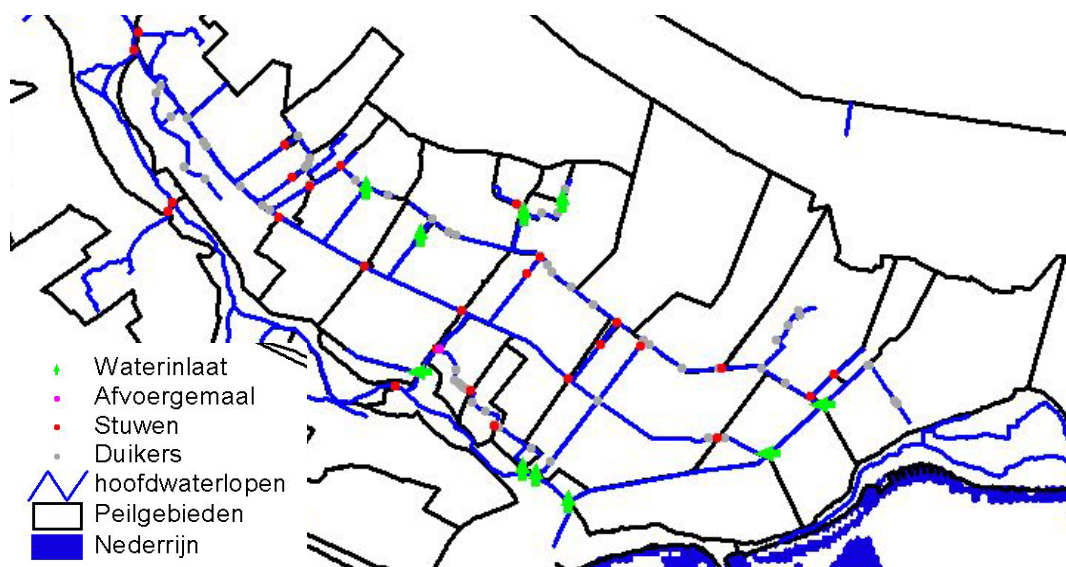
b). Er is verondersteld dat het stedelijke gebied goed is ontwaterd met behulp van buisdrainage. De buisdrainage ligt 1,20 m diep op een onderlinge afstand van 20 m. Er wordt uitgegaan van een drainage- en infiltratieweerstand van 100 dagen.

5). Maaiveld: Naast de greppels die expliciet voorkomen in het Top10-Vectorbestand van de topografische dienst en de bolvormige percelen met greppels wordt verondersteld dat er in het gehele gebied nog lokale laagtes aanwezig zijn die als greppel kunnen fungeren. Voor deze laagtes is uitgegaan van een diepte van 20

cm, en een drainage- en infiltratieweerstand van 20 dagen. In situaties met (gedeeltelijke) inundatie wordt deze weerstand overigens door het model sterk verlaagd, tot uiteindelijk 0,5 d bij volledige inundatie.



Figuur 12: De ontwateringsmiddelen in SIMGRO



Figuur 13: Afwatering en wateraanvoer in SIMGRO

4.4.2 Afwatering

4.4.2.1 Afwateringseenheden

Gegevens met betrekking tot de type A-watgangen en peilgebieden binnen het interessegebied zijn aangeleverd door Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. Het betreft allereerst de ligging en stroomrichting van de waterlopen en de begrenzing van de peilgebieden. Daarnaast zijn ook de leggergegevens van waterlopen, stuwen, gemalen en duikers aangeleverd en de voor peilgebieden gehanteerde zomer- en winterpeilen. Buiten het interessegebied heeft het hoogheemraadschap alleen gegevens met betrekking tot de Kromme Rijn aangeleverd.

Al deze gegevens zijn in model gebracht. In het interessegebied is dit met een groot detailniveau gebeurd. De waterlopen zijn hier op overgangen van peilgebieden en natuur- en landbouwgebieden opgesplitst. Ook op andere locaties is dit gebeurd opdat segmenten van maximaal 100 meter ontstaan. In SIMGRO heeft elk waterloopsegment een eigen afwateringseenheid. Een afwateringseenheid is samengesteld uit verschillende invloedsgebieden van de knooppunten. Binnen de grenzen van een peilgebied worden afwateringseenheden gevormd op basis van kortste afstand tussen invloedsgebied en waterloopsegment. Het opsplitsen van door het hoogheemraadschap aangeleverde waterlopen reduceert onnauwkeurigheden in de berekening van afwatering en ontwatering. Bovendien kan met een model op dit detailniveau op eenvoudige wijze gerekend worden aan toekomstscenario's met gewijzigde peilgebieden.

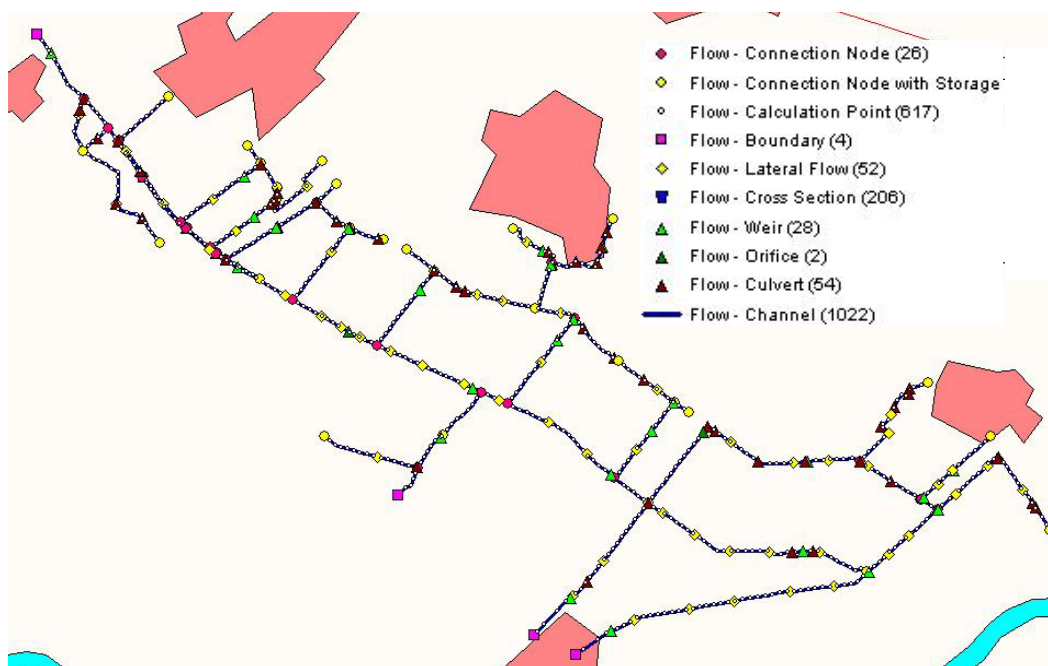
Buiten het interessegebied zijn de aangeleverde waterlopen niet gesegmenteerd. Hier geldt dus een grovere schematisering in afwateringseenheden.

Figuur 13 geeft een overzicht van de ligging van waterlopen, peilgebieden, stuwen, duikers en het afvoergemaal. Figuur A9 in bijlage A geeft een overzicht van de toegekende afwateringseenheden.

4.4.2.2 Bergingsrelatie en afvoerrelatie

In paragraaf 3.4.2 is al vermeld dat de waterbalans van een afwateringseenheid wordt gesimuleerd met één reservoir voor het geheel van grotere en kleinere waterlopen. De afwatering wordt gesimuleerd met een netwerk van reservoirs. De netwerkstructuur definieert de wijze waarop de reservoirs een cascade vormen. Voor ieder reservoir moet een relatie afgeleid worden tussen berging en peil, de zogenaamde bergingsrelatie, en tussen afvoer (Q) en peil (h), de afvoerrelatie.

Met behulp van de het instrument AlterrAqua wordt de Q - h relatie benaderd door het toepassen van eenvoudige formules met betrekking tot stroming door leidingen en over kunstwerken. Voor Hoog-Nederland is deze eenvoudige benadering veelal toereikend. Voor Laag-Nederland is het beter de Q - h relaties af te leiden met een



Figuur 14: SOBEK schematisatie

hydraulisch model. Binnen het interessegebied is daarom het model SOBEK ingezet. Buiten het interessegebied is gebruik gemaakt van de procedure in AlterraAqua.

In SOBEK is een schematisatie opgezet die overeenkomt met de oppervlaktewater-schematisatie in SIMGRO (zie figuur 14). Elk einde van een waterloopsegment is SOBEK geschematiseerd met een *calculation point* (bij een snijding van waterlopen een *connection node*). Hier berekent SOBEK waterstanden. Op de tussengelegen *flow channel* segmenten berekent SOBEK afvoeren. Berekeningen vinden plaats op basis van de Saint-Venant vergelijkingen (WL | Delft Hydraulics, 2001).

Een duiker is geschematiseerd als *flow culvert*. Aangenomen is dat een duiker op de bodem van een waterloop ligt. Een stuw is geschematiseerd als *flow weir*; een onderlaat als *flow orifice*.

Voor het bepalen van de Q-h relaties wordt het SOBEK-model gebruikt om een serie stationaire berekeningen uit te voeren voor oplopende waarden van de gebiedsafvoer. Hierbij is het van belang dat de waterlopen evenwichtig belast worden. De Top10-Vector waterlopenkaart is gebruikt om de peilgebieden op te delen en vast te stellen waar deze kleinere afwateringsgebieden het hoofdwatersysteem belasten. Deze belasting is in SOBEK gesimuleerd met *lateral flows*. Deze kunnen ofwel gelegen zijn aan het uiteinde van een waterloop op een *connection nodes*, ofwel halverwege een waterloop op een 'flow channel' segment. Per *lateral* wordt het representerende oppervlak opgegeven. Vervolgens wordt dit oppervlak in 9 verschillende simulaties belast met resp. 0,01 l/s/ha 0,1 0,2 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 en 3,0 l/s/ha.

Resultaten in de vorm van 9 waterstand-afvoer combinaties per overgang van waterloopsegment worden geconverteerd tot SIMGRO-invoer. In een nabewerking wordt de afvoer van alle waterlopen in het modelgebied opgevoerd als de waterstanden boven maaiveld komen. Dit in verband met meestromende berging.

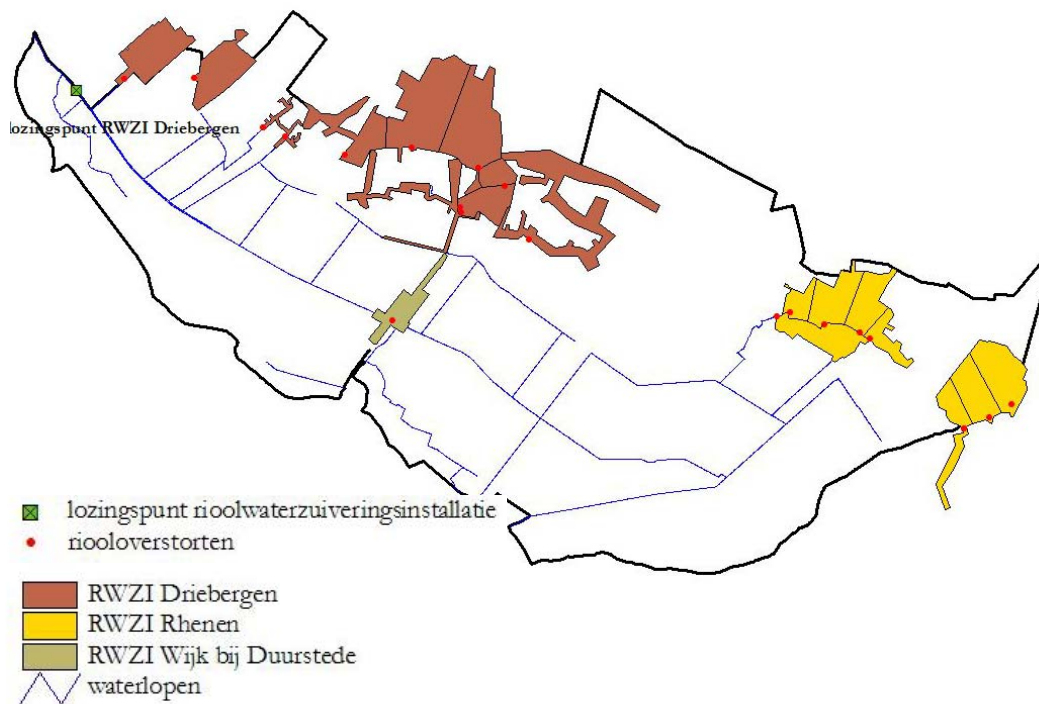
Er is voor gekozen de stuwen in SOBEK geheel te strijken en de onderlaten geheel te openen. Op deze manier worden de hydraulische knelpunten in het systeem goed zichtbaar. De berekende peilen bij bepaalde afvoeren gelden dus als ondergrens. Het werkelijke peil wordt in SIMGRO gesimuleerd met automatische stuwen: De klepstand wordt automatisch bijgesteld, gericht op handhaving van het streefpeil. Er wordt gebruik gemaakt van de bergingsrelatie. Pas als SIMGRO het peil niet meer kan handhaven omdat de stuw al geheel gestreken is wordt overgegaan op de door SOBEK berekende Q-h relatie.

Het SIMGRO-model rekent met terugstuwing van water. Echter, van buiten- naar binnen het interessegebied kan water niet terugstuwen. Dit komt overigens overeen met de aanname in een eerdere door het hoogheemraadschap geleverde SOBEK-schematisatie.

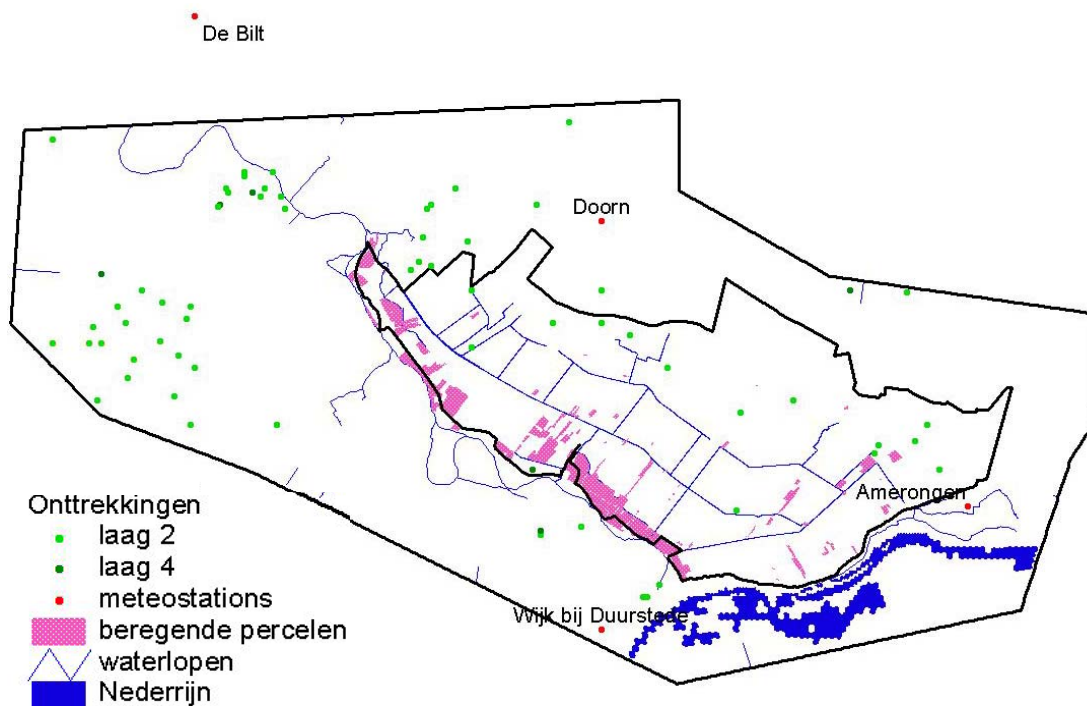
4.4.3 Wateraanvoer

De locaties van de inlaatpunten zijn afgeleid uit materiaal aangeleverd door het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. Het inlaten van water wordt geregeld door afsluitbare duikers, aanvoergemalen of waterscheidende stuwen die gestreken kunnen worden. Deze inlaten zijn aangegeven in figuur 12.

Voor het simuleren van wateraanvoer zijn er in SIMGRO twee mogelijkheden: Water wordt van buiten het modelgebied aangevoerd of is er sprake van interne wateraanvoer. De wateraanvoer voor de Kromme Rijn is gesimuleerd door water van buiten het modelgebied in te laten. Dit komt overeen met de werkelijke situatie waarbij water ingelaten wordt vanuit de Nederrijn. Binnen het interessegebied is wateraanvoer geregeld door water van het ene oppervlaktewaterbakje, al dan niet tegen de afwateringsstructuur in, naar het andere oppervlaktewaterbakje te verplaatsen. Hierbij is voor alle inlaten binnen het interessegebied het criterium gehanteerd dat de waterstand eerst 20 cm uit mag zakken beneden streefpeil voordat wateraanvoer plaatsvindt. De Kromme Rijn wordt steeds geheel op peil gehouden met wateraanvoer. Voor enkele waterinlaten in het interessegebied is de inlaatcapaciteit bekend. In deze gevallen wordt in SIMGRO met deze capaciteit gerekend. Voor de overige inlaten is de capaciteit als niet beperkend beschouwd.



Figuur 15 Stedelijk waterbeheer in SIMGRO.



Figuur 16: Randvoorwaarden in SIMGRO: op de modelrand ingevoerde stijghoogten ontleend aan het model van Wendt (1998), ingevoerde stijghoogten als interne randvoorwaarden bij de Nederrijn, ligging van grondwater-onttrekkingen, locaties van gebruikte meteo-stations, en beregende percelen.

4.5 Waterbeheer stedelijk gebied

In of nabij het studiegebied liggen de dorpen Amerongen, Leersum, Langbroek en Doorn. Het stedelijke waterbeheer van deze dorpen is geschematiseerd in SIMGRO. Figuur 15 geeft een overzicht. Het regenwater dat op verhard oppervlak valt komt samen met het huishoudelijke afvalwater in de riolering terecht. Er zijn een aantal rioleringsgebieden onderscheiden. Ieder rioleringsgebied heeft een overstort. Deze loost vervuild water op het oppervlaktewater wanneer bij grote neerslaghoeveelheden het rioolstelsel overbelast raakt. In SIMGRO komt dit vervuilde water in het dichtstbijzijnde oppervlaktewaterreservoir terecht.

Het rioolwater van de dorpen Leersum en Amerongen wordt getransporteerd naar de Rioolwaterzuivering Rhenen. Het rioolwater van Langbroek wordt getransporteerd naar Wijk bij Duurstede. Deze RWZI's liggen respectievelijk buiten het modelgebied en buiten het interessegebied. In SIMGRO gaat dit vervuilde water direct het modelgebied uit. Het rioolwater van Doorn en Driebergen wordt getransporteerd naar de Rioolwaterzuivering in Driebergen. Deze RWZI loost zijn water aan het eind van de Langbroekerwetering. Dit gezuiverde water wordt op deze locatie in het oppervlaktewatermodel gebracht. Gegevens met betrekking tot de capaciteit het rioleringsstelsel is aangeleverd door het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden en aldus in SIMGRO geschematiseerd.

4.6 Randvoorwaarden

In deze paragraaf worden de randvoorwaarden van het model besproken. Figuur 16 geeft een overzicht.

4.6.1 Stijghoogten

Voor het simuleren van de regionale grondwaterstroming is het nodig om langs de rand van het model de randvoorwaarden te kennen. De randvoorwaarden zijn in de vorm van een stijghoogte overgenomen uit het eerder besproken SIMGRO-model (Wendt, 1998).

Om dit te bewerkstelligen is met het oude model opnieuw gerekend. Hierbij is dezelfde simulatieperiode gebruikt als voor het huidige model (zie paragraaf 5.2). Ook zijn dezelfde randvoorwaarden opgelegd met betrekking tot neerslag, verdamping en onttrekkingen. Voor deze berekening is voor alle lagen dagelijks de stijghoogte op alle knooppunten van de huidige modelrand uitgevoerd. Deze zijn vervolgens opgelegd aan het huidige model.

Ook De Nederrijn is in de vorm van een stijghoogte als randvoorwaarde opgelegd. Gegevens zijn ontleend aan een bestand van Rijkswaterstand Directie Oost-Nederland. Het betreft dagwaterstanden voor de stations Amerongen-boven en Amerongen-beneden voor de periode 1988 t/m 2000. Aan elk knooppunt van de

Nederrijn is als randvoorwaarde de waterstand van het dichtstbijzijnde station toegekend.

4.6.2 Grondwateronttrekkingen

Grondwateronttrekkingen zijn ontleend aan het provinciale grondwaterregister van de Provincie Utrecht. In dit register staat voor de periode 1971-2001 per onttrekking vermeld van welke laag hoeveel water per kwartaal onttrokken is. Deze gegevens zijn als randvoorwaarden overgenomen in SIMGRO. Aangenomen is dat binnen een kwartaal per tijdsstap een constante hoeveelheid water onttrokken is. In tabel 1 wordt voor de periode 1989-2000 de per jaar onttrokken hoeveelheid water weergegeven. Deze cijfers gelden voor het gehele modelgebied. Gemiddeld wordt over deze twaalf jaar 8,4 miljoen m³ per jaar onttrokken.

Tabel 1: Totaal per jaar onttrokken hoeveelheid water uit het modelgebied.

Jaar	onttrokken water (miljoen m ³)
1989	8,9
1990	9,1
1991	8,5
1992	9,1
1993	7,6
1994	8,1
1995	9,9
1996	7,8
1997	7,5
1998	8,2
1999	7,6
2000	8,2

4.6.3 Neerslag en verdamping

Neerslagdata zijn ontleend aan de volgende vier meteostations: De Bilt, Doorn, Wijk bij Duurstede en Amerongen (Figuur 16). Alterra heeft beschikking over de gegevens van De Bilt. Voor de overige stations zijn neerslaghoeveelheden per dag aangeleverd door Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. Voor station De Bilt zijn behalve neerslaggegevens ook gegevens voorhanden over temperatuur, relatieve vochtigheid en straling. Deze laatste drie parameters zijn niet alleen voor De Bilt maar ook voor de overige stations aangewend om in combinatie met de neerslag de potentiële verdamping van gras en bos te berekenen. Voor een overzicht van totalen van de meteoreeks wordt verwezen naar hoofdstuk 6. Daar wordt tevens het gebruik van de reeks voor de berekening van het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregim behandeld.

Aan elk invloedsgebied van een knooppunt zijn de gegevens van het meest dichtbijgelegen meteostation toegekend.

4.6.4 Berekening

Het waterschap heeft een bestand aangeleverd met de percelen die berekend worden binnen het interessegebied. Ten noorden van de Gooyerwetering worden deze percelen uit grondwater berekend. Uit het grondwaterregister van de provincie Utrecht is af te leiden dat dit water onttrokken wordt aan het eerste watervoerende pakket. Ten zuiden van de Gooyerwetering wordt het water voor berekening aan het oppervlaktewater onttrokken. Zowel voor grond- als oppervlaktewaterberekening wordt verondersteld dat het water plaatselijk onttrokken wordt. Deze gegevens zijn gebruikt om de berekening in model te brengen.

5 Gevoeligheidsanalyse en calibratie

In dit hoofdstuk wordt eerst kort ingegaan op de modeluitkomsten met het ongecalibreerde model (paragraaf 5.1). De methode van calibreren wordt uiteengezet in paragraaf 5.2. De calibratieperiode komt in paragraaf 5.3 aan bod. Vervolgens wordt in paragraaf 5.4 en paragraaf 5.5 ingegaan op de daadwerkelijke uitvoering van gevoeligheidsanalyses en calibraties van respectievelijk de ondergrond en het topsysteem. Het uiteindelijke resultaat van de calibratie wordt niet in dit hoofdstuk besproken maar komt in hoofdstuk 6 uitgebreid aan bod.

5.1 Resultaten van het ongecalibreerde model

Figuren C1 en C2 in bijlage C geven de verschillen tussen gemeten en berekende stijghoogten weer voor respectievelijk de deklaag en het eerste watervoerende pakket. Deze figuren worden in paragraaf 6.1 als referentie gebruikt bij de evaluatie van het calibratieresultaat.

De figuren laten zien dat de verschillen tussen berekende stijghoogten en gemeten stijghoogten binnen het interessegebied duidelijk kleiner zijn dan daarbuiten. Dit is een gevolg van het detailniveau van de invoer en een afname van de invloed van de randvoorwaarden van het model. Voor de deklaag is het verschil gemiddeld 22 cm in het interessegebied. Voor het eerste watervoerende pakket is dit verschil gemiddeld 29 cm. Deze beginresultaten geven al vertrouwen in een goede opbouw van het model. Opvallend is dat de stijghoogten in het interessegebied over het algemeen hoger worden berekend dan gemeten.

5.2 Calibratieperiode

De calibratieperiode loopt van begin 1989 tot halverwege 2000. Dit heeft deels te maken met de beschikbaarheid van meteorologische gegevens. Een andere reden is het voorkomen van een aantal droge en natte jaren.

In verband met de initiële condities is in alle berekeningen is gewerkt met een 'aanloopsimulatie'. Hiertoe is steeds de periode 1989 tot 1994 gesimuleerd en is het simulatieresultaat op 1 januari 1994 overgenomen als de beginconditie voor de daadwerkelijke simulatie op 1 januari 1989. De 'aanloopsimulatie' is gedraaid met de gewijzigde parameters.

5.3 Calibratiemethode

De calibratie van geohydrologische parameters is met behulp van een eenvoudige procedure met gebruik van kwantitatieve criteria op een systematische en reproduceerbare wijze uitgevoerd. De gevolgde calibratieprocedure voldoet daarmee voor een belangrijk deel aan het handboek 'Good Modelling Practice' (STOWA/RIZA, 1999). De methode volgt een calibratie in twee fasen:

1. calibratie van diepere lagen gericht op zo correct mogelijke stijghoogteverschillen;
2. calibratie van de bovenste laag gericht op zo correct mogelijke absolute stijghoogten.

Eigenlijk zouden boven- en ondergrond in één beschouwing moeten worden aangepast, maar voor een relatief simpele methode is dat teveel gevraagd. Het in een eerste fase calibreren van de ondergrond is gebaseerd op de notie dat hier met name correct gesimuleerde stijghoogteverschillen wenselijk zijn. Pas als die zo goed mogelijk worden gesimuleerd heeft het zin om het model af te regelen op het gemeten niveau van de freatische grondwaterstand.

5.3.1 Calibratie van de ondergrond

In de methode wordt geredeneerd in termen van weerstanden: het stijghoogteverschil is recht evenredig met de weerstand en natuurlijk ook met de flux. Een gevoeligheidsanalyse gaat vooraf aan de calibratie. Daarbij wordt de weerstand van een laag gevarieerd. Maar omdat de modelinvoer geschiedt in termen van k -waarden, moeten bij de gevoeligheidsanalyse steeds de k -waarden worden aangepast: per laag moeten de waarden in het hele modelgebied met een bepaalde doorlatendheidsfactor (k_f -factor) worden vermenigvuldigd, terwijl die in de overige lagen ongewijzigd blijven. Per laagaanpassing dienen twee simulaties beschikbaar zijn, één met een lage k_f -factor, één met een hoge k_f -factor. Typische waarden voor k_f -factoren zijn 0.5 en 2.0, of 0.25 en 4.0.

Om de methode te kunnen toepassen dienen een aantal peilbuisparen te worden geïdentificeerd die gebruikt kunnen worden voor de:

- calibratie van verticale weerstanden; dit zijn peilbuisparen met dezelfde (x,y)-coördinaten, met de filters in respectievelijk de aquifer boven en onder de weerstandslaag;
- calibratie van horizontale doorlatendheden; dit zijn peilbuisparen in dezelfde aquifer die een onderlinge ligging hebben evenwijdig aan de overheersende stroming.

Voor de calibratie is een rekenprogramma ontwikkeld. Dit rekenprogramma maakt gebruik van de volgende gegevens:

- de geselecteerde peilbuisparen inclusief de gemeten gemiddelde stijghoogten;
- de resultaten van de referentiesimulatie en de gevoeligheidsimulaties.

Het rekenprogramma zet de bij de gevoeligheidsanalyses gebruikte k_f -factoren om naar weerstandsfactoren w_f ($w_f=1/k_f$). Na het berekenen van de juiste calibratiefactor worden de weerstandsfactoren weer terug-omgerekend naar k_f -factoren.

Per gevoeligheidssimulatie en per peilbuispaar wordt de volgende procedure gevolgd om te komen tot een calibratiefactor voor de weerstand:

- Er worden drie stijghoogteverschillen berekend:
 - Δh_m : gemeten stijghoogteverschil;
 - Δh_r : berekende stijghoogteverschil in de referentiesimulatie;
 - Δh_g : berekende stijghoogteverschil in de gevoeligheidssimulatie.
- Er wordt eerst gecontroleerd of de drie stijghoogteverschillen allemaal hetzelfde teken hebben. Alleen als dit het geval is heeft het zin om de procedure toe te passen. Als niet aan deze voorwaarde wordt voldaan, wordt een calibratiefactor van 1.0 aangehouden;
- Er wordt een variabele y gedefinieerd op het interval $[0,1]$. Deze variabele y geeft aan in welke mate de calibratiefactor ‘gebruik’ maakt van de w_f -factor van de gevoeligheidssimulatie (bij 0 helemaal niet, bij 1 helemaal wel). De calibratiefactor voor de weerstand wordt dan gedefinieerd als:

$$(1-y)*1.0 + y*w_f\text{-factor}$$

- Er wordt een eenvoudig voorspellingsmodel gebruikt voor het voorspellen van het stijghoogteverschil dat verwacht wordt na daadwerkelijke toepassing van de calibratiefactor:

$$\Delta h_s(y) = \Delta h_r + y (\Delta h_g - \Delta h_r)$$

Deze vergelijking wordt opgelost door $\Delta h_s(y)$ gelijk te stellen aan Δh_m . Dit levert $y = (\Delta h_m - \Delta h_r) / (\Delta h_g - \Delta h_r)$

- Uiteindelijk wordt de calibratiefactor alleen geaccepteerd indien:
 - de y -waarden binnen het interval $[0,1]$ liggen;
 - de absolute verbetering van de voorspelling groter is dan een minimum-waarde;
 - de relatieve verbetering tussen model en meting groter is dan een minimum-waarde.

De methode wordt geïllustreerd aan de hand van een eenvoudig rekenvoorbeeld. Bij een gevoeligheidssimulatie wordt de doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket met een k_f -factor van 0,25 vermenigvuldigd. Dit komt overeen met een vermenigvuldiging van de weerstand met een factor 4,0 (w_f -factor). Stel dat de volgende waarden worden gevonden voor het stijghoogteverschil tussen twee peilbuizen in dit watervoerende pakket:

- Δh_m (gemeten stijghoogteverschil) = 0,10 m;
- Δh_r (berekende stijghoogteverschil in de referentiesimulatie) = 0,05 m;
- Δh_g (berekende stijghoogteverschil in de gevoeligheidsimulatie) = 0,20 m;

In dit geval wordt uit de cijfers snel duidelijk dat het stijghoogteverschil precies recht-evenredig met de weerstand toeneemt, zodat kennelijk de flux niet verandert. De calibratie zou dus moeten opleveren dat de weerstand met een factor 2 zou moeten worden verhoogd. Invulling van bovenstaande gegevens in de vergelijking voor y levert:

$$y = (\Delta h_m - \Delta h_r) / (\Delta h_g - \Delta h_r) = (0,10 - 0,05) / (0,20 - 0,05) = 1/3.$$

De toe te passen weerstandsfactor is dan $(1 - 1/3) * 1,0 + (1/3) * 4,0 = 2$. De toe te passen doorlatendheidsfactor is dan $1/2 = 0,5$.

Het hier gegeven voorbeeld voor een niet-veranderende flux demonstreert dat de procedure voor een dergelijke situatie goed functioneert. Situaties dat de flux juist wel verandert zijn te gecompliceerd om met een eenvoudig voorbeeld uiteen te zetten. Hier moet het resultaat van de calibratie overtuigen. De extreme situatie waarin het stijghoogteverschil in het geheel niet gevoelig is voor de weerstandsfactor wordt in de methode afgevangen door alleen waarden van y op het interval $[0;1]$ te accepteren: de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse worden alleen geïnterpoleerd, en niet geëxtrapoleerd.

Nadat met behulp van het rekenprogramma per laag de calibratiefactoren op de diverse locaties zijn vastgesteld, worden deze in ArcView per laag ruimtelijk geïnterpoleerd. Vervolgens wordt per laag de kaart met geïnterpoleerde calibratiefactoren vermenigvuldigd met de kaart met oorspronkelijke k -waarden. Uiteindelijk wordt met behulp van AlterraAqua de aangepaste geohydrologie omgezet tot SIMGRO invoer.

5.3.2 Calibratie van de freatische laag

De grondwaterstanden in de freatische laag worden het meest beïnvloed door een combinatie van de weerstand van de deklaag en intreeweerstanden van het drainagesystemen. Wat het meest bepalend is hangt van de situatie af. Hieronder wordt de methode uitgewerkt voor calibratie van de k -waarden omdat deze calibratie het huidige onderzoek daadwerkelijk is toegepast (zie paragraaf 5.5.2). Voor de term ‘ k -waarden’ kan echter evengoed de term ‘intreeweerstanden’ of ‘een combinatie van k -waarden en intreeweerstanden’ gelezen worden. Voor de methode maakt dit geen verschil. Het is aan de gebruiker om nadat het algoritme voor een locatie een calibratiewaarde heeft bepaald, deze te vertalen naar een ruimtelijk patroon van k -waarden voor de deklaag en voor de intreeweerstanden. Hier wordt er van uitgegaan dat het gaat om een factor voor de k -waarde van de deklaag (zie ook par. 5.5).

Een gevoeligheidsanalyse dient vooraf te gaan aan de calibratie. In de gevoeligheidsanalyse worden de k -waarden van de deklaag met een bepaalde df -factor vermenigvuldigd. Er dient een serie simulaties beschikbaar te zijn met oplopende waarden van de df -factor.

Voor de calibratie is een rekenprogramma ontwikkeld. Dit rekenprogramma maakt gebruik van de volgende gegevens:

- Peilbuizen met het filter in de deklaag inclusief de gemeten gemiddelde stijghoogten;
- De resultaten van de gevoeligheidssimulaties.

Het rekenprogramma volgt per peilbuislocatie de volgende procedure om te komen tot een calibratiefactor:

- Ligt de gemeten stijghoogte tussen de stijghoogte berekend door de eerste gevoeligheidssimulatie en die van de laatste gevoeligheidssimulatie?
 - zo ja, dan wordt vastgesteld tussen welke twee simulaties de gemeten stijghoogte ligt, en wordt via een eenvoudige interpolatie de calibratiefactor vastgesteld op basis van de ligging in dat interval;
 - zo nee, dan wordt nagegaan of de gemeten waarde ‘buiten’ die berekend door de eerste of de laatste simulatie valt; valt de gemeten waarde buiten de eerste, dan wordt de df -factor van de eerste simulatie gebruikt, valt de waarde buiten de laatste, dan wordt de df -factor van de laatste simulatie gebruikt. Deze df -factor wordt echter alleen geaccepteerd als er een minimum verschil bestaat tussen de berekende stijghoogte van de eerste en de laatste simulatie.

Nadat met behulp van het rekenprogramma de calibratiefactoren op de diverse peilbuislocaties zijn vastgesteld, worden deze in ArcView ruimtelijk geïnterpoleerd. Vervolgens wordt de kaart met geïnterpoleerde calibratiefactoren vermenigvuldigd met de kaart met oorspronkelijke k -waarden van de deklaag. Uiteindelijk wordt met behulp van AlterraAqua de aangepaste geohydrologie omgezet tot SIMGRO invoer.

5.4 Gevoeligheidsanalyse en calibratie ondergrond

5.4.1 Gevoeligheidsanalyse

Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de doorlatendheden van de watervoerende pakketten en de weerstanden van de scheidende lagen. Uitgangpunt is de geohydrologie volgens een eerder SIMGRO-model (Wendt, 1998). Voor de gevoeligheidsanalyse is steeds in één laag de doorlatendheid aangepast met een factor 0,5 of een factor 2. Deze factoren zijn met opzet bescheiden gehouden om irreële aanpassingen van doorlatendheden te voorkomen. Dit resulteerde in een twaalfstal simulaties. Uit analyse volgde dat de aanpassingen van doorlatendheid een significante invloed heeft op de berekende stijghoogten.

Om deze reden is besloten tot het calibreren van k -waarden volgens de methode beschreven in paragraaf 5.3.1. Dit is gebeurd op basis van stijghoogteverschillen tussen paren peilbuizen.

5.4.2 Calibratie van weerstanden van scheidende lagen

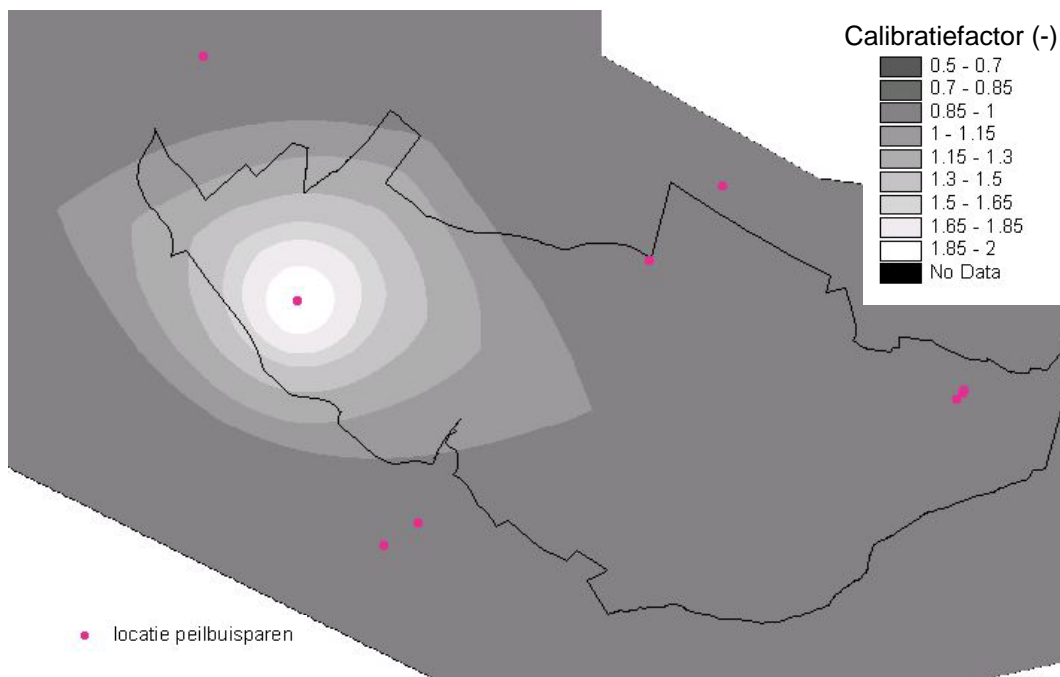
Voor het calibreren van de weerstanden van beide scheidende lagen zijn in en nabij het interessegebied peilbuizen geselecteerd met zowel een filter in het bovenliggende als het onderliggende watervoerende pakket. Voor het calibreren van de deklaag zijn peilbuizen geselecteerd met zowel een filter in de laag zelf als in het onderliggende watervoerende pakket. Met het onder paragraaf 5.3.1 beschreven rekenprogramma is per peilbuispaar bepaald welke calibratiefactor (tussen 0,5 en 2,0) met de doorlatendheid van de scheidende laag vermenigvuldigd moet worden opdat het berekende stijghoogteverschil zo goed mogelijk overeenkomt met het gemeten stijghoogteverschil. Vervolgens zijn deze calibratiefactoren ruimtelijk geïnterpoleerd met behulp van de *spline*methode in ArcView.

In Bijlage C geven de figuren C3, C4 en C5 de resultaten van deze calibratieslag voor de beide scheidende lagen en de deklaag. Ter illustratie van de werkwijze is het resultaat voor de eerste scheidende laag ook in figuur 17 weergegeven.

Daar peilbuizen met filters tot in het derde watervoerende pakket slechts op twee locaties voorkomen is de tweede scheidende laag slechts op basis van twee peilbuisparen in laag vier en laag zes gecalibreerd. Eén van deze paren gaf aanleiding tot het verlagen van de k -waarde met een factor 0,5. Als gevolg hiervan wordt de weerstand van deze laag zeer plaatselijk verhoogd (zie figuur C3, bijlage C).

In en nabij het interessegebied zijn negen peilbuizen gevonden met zowel een filter in de vierde als in de tweede laag. Ook hier gaf slechts één peilbuispaar reden tot aanpassing van de k -waarde van de tussenliggende (eerste) scheidende laag: een verhoging met een factor 2. Interpolatie geeft vervolgens in het westelijk deel van het

interessegebied een verlaging van de weerstand van de eerste scheidende laag (zie figuur 17).



Figuur 17: Ruimtelijke calibratiefactoren voor de k -waarde van de eerste scheidende laag (laag3)

Tenslotte zijn een veertiental peilbuizen geselecteerd met een filter in zowel het eerste watervoerende pakket als in de deklaag. Het stijghoogteverschil tussen deze peilbuisparen als gevolg van de weerstand van de deklaag representeert de invloed van de regionale hydrologie op het topsysteem. In het zuidelijk deel van het interessegebied heeft aanpassing van calibratiefactoren gezorgd voor een lichte afname van de weerstand van de deklaag (zie figuur C5 in bijlage C).

De resulterende weerstanden van de twee scheidende lagen zijn al besproken in hoofdstuk 4 en ruimtelijk weergegeven in de figuren A4 en A6 van bijlage A. De resulterende weerstand van de deklaag is weergegeven in figuur C8. Deze dient als basis voor de calibratie van het topsysteem in paragraaf 5.5.

5.4.3 Calibratie van doorlatendheden van de watervoerende pakketten

Voor het eerste en tweede watervoerende pakket zijn een aantal peilbuizen geselecteerd die in de stromingsrichting raaien vormen door het interessegebied. Met het onder paragraaf 5.3.1 beschreven rekenprogramma is per peilbuispaar (twee achtereenvolgende peilbuizen op de een raai) bepaald welke calibratiefactor (tussen 0,5 en 2,0) met de doorlatendheid van de scheidende laag vermenigvuldigd moet worden opdat het berekende stijghoogteverschil zo goed mogelijk overeenkomt met het gemeten stijghoogteverschil. Deze calibratiefactoren zijn vervolgens toegekend

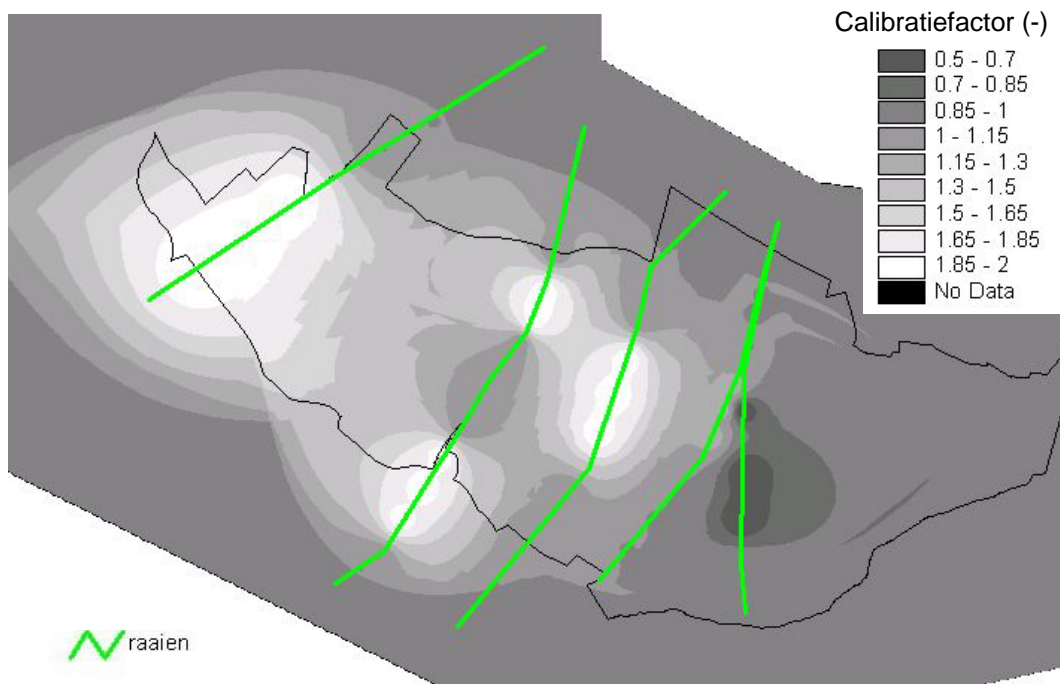
aan punten op de raai tussen tussen de betreffende peilbuizen in. Vervolgens zijn de calibratiefactoren geïnterpoleerd met behulp van de *spline*-methode in ArcView.

In bijlage C geven de figuren C6 en C7 de resultaten van deze calibratieslag voor respectievelijk het tweede en eerste watervoerende pakket. Ter illustratie van de werkwijze is het resultaat voor het eerste watervoerende pakket ook in figuur 18 weergegeven. In het derde watervoerende pakket (laag zes) zijn niet voldoende filters aanwezig om op te calibreren. Hier blijven de doorlatendheden ongewijzigd volgens het eerdere SIMGRO-model (Wendt, 1998).

Voor het tweede watervoerende pakket (laag vier) zijn langs een tweetal raaien voor vier paren peilbuizen op bovenbeschreven wijze calibratiefactoren bepaald. Dit gaf midden in het interessegebied aanleiding tot verlaging van de doorlatendheid van laag vier (zie figuur C6 in bijlage C).

Voor het eerste watervoerende pakket (laag twee) zijn langs een vijftal raaien voor achttien paren peilbuizen op bovenbeschreven wijze calibratiefactoren bepaald. In het grootste deel van het interessegebied gaf dit aanleiding tot verhoging van de *k*-waarden van laag twee. Alleen in het oostelijke deel van het interessegebied blijven de doorlatendheden ongewijzigd of worden deze plaatselijk verlaagd (zie figuur 18).

De resulterende doorlatendheden van de drie watervoerende pakketten zijn al besproken in hoofdstuk 4 en ruimtelijk weergegeven in de figuren A2, A4 en A6 van bijlage A.



Figuur 18: Ruimtelijke calibratiefactoren voor de *k*-waarde van het eerste watervoerende pakket (laag2).

5.5 Gevoeligheidsanalyse en Calibratie topsysteem

5.5.1 Gevoeligheidsanalyse van radiale weerstand en horizontale weerstand

Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de radiale in- en uittreeweerstanden voor zowel de secundaire en tertiaire waterlopen. Uitgangspunt was een in- en uittreeweerstand van 1 dag. Voor deze gevoeligheidsanalyse zijn een viertal simulaties gedraaid waarbij deze weerstanden respectievelijk met een factor 0,4 0,7 1,3 en 1,7 vermenigvuldigd zijn. De in- en uittreeweerstanden blijven met deze calibratiefactoren binnen realistische grenzen. Uit analyse volgde dat het model ongevoelig is voor het aanpassen van deze radiale weerstanden. De grondwaterstanden wijzigen nauwelijks. Een verklaring hiervoor is de lage doorlatendheid van de deklaag. Hierdoor is de radiale weerstand relatief klein vergeleken met de horizontale weerstand. Om deze reden is besloten dat het niet zinvol is om in- en uittreeweerstanden te calibreren en zijn deze weerstanden ongewijzigd gebleven.

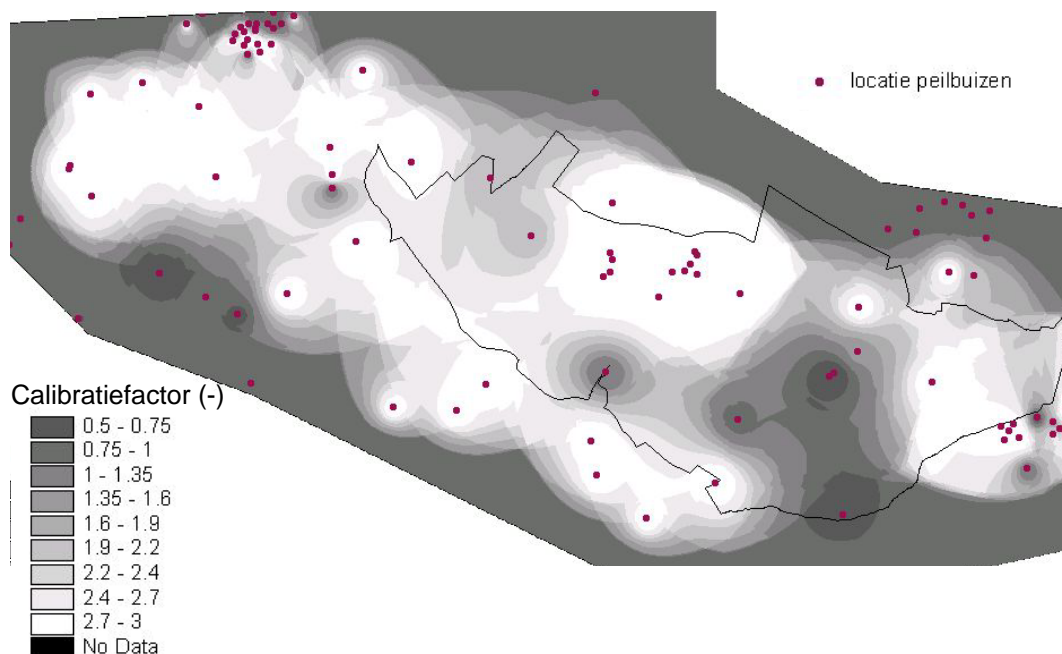
Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de horizontale drainageweerstand. Deze is omgekeerd evenredig met de doorlatendheid van de deklaag. Uitgangspunt voor deze doorlatendheid is het resultaat van de eerste calibratieslag (zie figuur E8 in bijlage E). Voor de gevoeligheidsanalyse zijn drie simulaties gedraaid waarbij de doorlatendheid respectievelijk met een factor 0,5 2 en 3 is vermenigvuldigd. In paragraaf 5.1 werd al geconstateerd dat in het interessegebied te hoge grondwaterstanden gesimuleerd worden. Daarom is met opzet de factor 3 meegenomen om de horizontale lekweerstand te verlagen en de berekende grondwaterstanden beter in overeenstemming te brengen met de gemeten grondwaterstanden. Zelfs met een calibratiefactor 3 blijft de weerstand van de deklaag binnen realistische grenzen. Uit analyse volgt dat de aanpassingen van de doorlatendheid van de deklaag en daarmee de horizontale weerstand een significante invloed heeft op de berekende stijghoogten.

Om deze reden is besloten tot het calibreren van de k -waarden en daarmee de drainageweerstanden van het afdekkende pakket. In tegenstelling tot de eerste calibratieslag van de ondergrond is dit niet gebeurd op basis van stijghoogteverschillen tussen paren peilbuizen, maar op basis van absolute verschillen tussen de gemeten en de berekende stijghoogte in een peilbuis (zie ook paragraaf 5.3).

5.5.2 Calibratie van de horizontale weerstand van de deklaag

Voor het calibreren van de doorlatendheid van de deklaag zijn in het gehele modelgebied peilbuizen geselecteerd met ondiepe filters. Met het onder paragraaf 5.3.2 beschreven rekenprogramma is per peilbuis bepaald welke calibratiefactor (tussen 0,5 en 3,0) met de doorlatendheid vermenigvuldigd moet worden opdat de berekende stijghoogte zoveel mogelijk overeenkomt met de gemeten stijghoogte. Vervolgens worden deze calibratiefactoren ruimtelijk geïnterpoleerd. Figuur 19 geeft het resultaat van deze calibratieslag. In grote gebieden is de doorlatendheid met een factor 3,0

verhoogd. De resulterende k -waarden van het afdekkende pakket zijn al besproken in hoofdstuk 4 en ruimtelijk weergegeven in figuur A7 van bijlage A



Figuur 19: Ruimtelijke calibratiefactoren voor de k -waarden van de deklaag.

5.5.3 Gevoeligheidsanalyse van de hysteresisfactor van de bergingscoëfficiënt

Tenslotte is in een gevoeligheidsanalyse gekeken naar de invloed van de hysteresisfactor van de bergingscoëfficiënt op de grondwaterstandfluctuatie. Per bouwsteen van de Staringreeks (Wösten, 2001) wordt een pF-curve gehanteerd. De pF-curve geeft de relatie tussen de bergingscoëfficiënt en de negatieve drukhoogte. Het verschijnsel dat de pF-curve bij verdroging anders is als de pF-curve bij vernatting van de grond wordt hysteresis genoemd. In het algemeen geldt dat bij eenzelfde negatieve drukhoogte een bodem natter is gedurende een verdrogingsproces dan gedurende een vernattingsproces. In SIMGRO wordt de bergingscoëfficiënt vermenigvuldigd met een hysteresisfactor om aan te geven welke fractie van het poriënvolume met water gevuld wordt bij stijging van de grondwaterstand. Uitgangspunt was een hysteresis-factor van 0,8. In een gevoeligheidsanalyse zijn twee extra simulaties uitgevoerd met een hysteresisfactor van respectievelijk 1,0 en 0,65.

Tabel 2 geeft voor peilbuizen binnen het interessegebied aan wat de invloed is van de hysteresisfactor op de grondwaterstandfluctuatie uitgedrukt als verschil tussen GHG en GLG. In de tabel is voor elke peilbuis vet gedrukt weergegeven welke

hysteresisfactor een berekende grondwaterstandfluctuatie geeft die het meest overeenkomt met de gemeten fluctuatie.

Tabel 2: invloed van de hysteresisfactor op de grondwaterstandfluctuatie (m) uitgedrukt als GHG-GLG; in vet gedrukte berekende waarden komen het meest overeen met gemeten waarden

Peilbuiscode	GHG-GLG 0,65 * μ (m)	GHG-GLG 1,0 * μ (m)	GHG-GLG 0,8 * μ (m)	GHG-GLG Gemeten (m)
32CL0078_01	0.64	0,53	0,59	0,65
39AP0210_01	0.46	0,42	0,44	0,27
39AP0261_01	0.56	0,47	0,52	0,56
39BL0002_01	0.93	0,91	0,92	0,84
39BL0009_01	0.41	0,39	0,40	0,76
39BL0020_01	0.51	0,44	0,47	0,60
39BP0081_01	0.43	0,39	0,41	0,30
39BP0140_01	0.48	0,43	0,46	0,40
39BP0141_01	0.41	0,39	0,40	0,42
39BP0144_01	0.64	0,63	0,64	0,50
39BP0259_01	0.36	0,34	0,35	0,36
39BP0260_01	0.85	0,85	0,86	0,87
39BP0283_01	0.90	0,70	0,81	0,78
39BP0336_01	0.55	0,45	0,5	0,52
39BP0338_01	0.54	0,45	0,49	0,50
39BP0343_01	0.83	0,71	0,77	0,80
39BP0344_01	1.06	1,01	1,04	0,22
39BP7006_01	0.87	0,74	0,80	0,77
39BP7008_01	0.65	0,60	0,63	0,69
39BP7009_01	0.77	0,68	0,73	0,71
39BP7601_01	0.74	0,62	0,68	0,76
39BP7602_01	0.66	0,56	0,61	0,56
39BP7604_01	0.41	0,38	0,40	0,50

Er vallen een aantal zaken op:

- de gevoeligheid van het model voor de hysteresisfactor is nogal wisselend. Zo wordt ter plaatse van peilbuis 39BP0144_01 voor alle factoren een zelfde grondwaterstandfluctuatie berekend. Terwijl deze fluctuatie voor peilbuis 39BP283_01 90 cm is bij een hysteresis-factor van 0,65 en 70 cm bij een hysteresis-factor van 1,00;
- er is niet duidelijk aan te geven welke hysteresisfactor een grondwaterstandfluctuatie geeft die het meest overeenkomt met de gemeten fluctuatie. Dit verschilt per locatie.

Er is geconcludeerd dat de gevoeligheid van de hysteresisfactor te wisselend is om op te calibreren. De hysteresisfactor wordt daarom ongewijzigd op 0,8 gehouden. Eigenlijk was het juister geweest deze gevoeligheidsanalyse uit te voeren per bodemfysische eenheid.

6 Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime

Het resultaat van de calibratie is het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime (AGOR). In dit hoofdstuk worden drie doelen nagestreefd:

1. het onderzoeken van de realiteitswaarde van het berekende AGOR en daarmee de prestatie van het model;
2. het presenteren van het berekende AGOR;
3. Het presenteren van de voor het AGOR bepaalde doelrealisatie met betrekking tot landbouw en natuur.

Hiertoe wordt in paragraaf 6.1 ingegaan op de representativiteit van de gebruikte meteorologische rekenperiode. Vervolgens worden simulatieresultaten met betrekking tot grondwater en oppervlaktewater gepresenteerd en vergeleken met gemeten waarden (zie paragraaf 6.2 en 6.3). In paragraaf 6.4 worden de verdampingsberekeningen gepresenteerd en vergeleken met de verdamping verkregen via bewerking van *remote sensing* data. Uiteindelijk wordt in paragraaf 6.5 en 6.6 ingegaan op de doelrealisatie van het AGOR met betrekking tot respectievelijk landbouw en natuur.

6.1 Representativiteit meteorologische rekenperiode

Voor het berekenen van het AGOR is gebruik gemaakt van de rekenperiode 1 april 1989 tot 1 april 2001. Net als bij de calibratie is gebruik gemaakt van een ‘aanloop-simulatie’ voor de periode 1989-1994. In deze paragraaf wordt de periode 1989-2000 geanalyseerd met betrekking tot de representativiteit van de meteorologische gegevens in deze periode.

6.1.1 Gehele periode

Ten eerste is voor station De Bilt een vergelijking gemaakt tussen de meteorologische dat voor de 11-jarige rekenperiode en een 50-jarige periode (1950-2000). Tabel 3 toont het resultaat van deze vergelijking voor de gemiddelde neerslag, referentieverdamping volgens Makkink en het gemiddelde neerslagoverschot. Zo beschouwd zijn de verschillen tussen de beiden perioden marginaal.

Tabel 3: Gemiddelde neerslag, gemiddelde referentieverdamping volgens Makkink en het gemiddelde neerslagoverschot voor de periodes 1989-2001 en 1950-2000.

Periode	1989-2001	1950-2000
Jaargemiddelde neerslag (mm)	818	803
Jaargemiddelde verdamping volgens Makkink (mm)	555	533
Jaargemiddelde neerslagoverschot (mm)	263	270

Ten tweede is de gemiddelde droogtegraad van de 11-jarige rekenperiode bepaald. De maximaal optredende waarde van het neerslagtekort is een goede maat voor de droogtegraad van een bepaald jaar. Jaargemiddeld blijkt de 11-jarige rekenperiode met een droogtegraad van 37% aan de droge kant te zijn. Bij een volledige representatieve reeks zou deze immers 50% moeten zijn.

Tenslotte is het effect van de gebruikte meteorologische reeks op de berekende GLG en GHG geanalyseerd. Hiertoe zijn twee simulaties uitgevoerd :

- een simulatie met de rekenperiode 1 april 1989 tot 1 april 2001 met meteorologische data van de Bilt;
- een simulatie met de rekenperiode 1 april 1950 tot 1 april 2000 met meteorologische data gebruikt is een bestaande SIMGRO-model van het Beerze en Reuzelgebied in Noord-Brabant (Van Walsum et al., 2002).

Analyse van de resultaten van beide simulaties tonen aan dat de berekende GLG nauwelijks verschilt. Hetzelfde geldt voor de berekende GHG. Tabel 4 geeft de exacte cijfers. Overigens dient men bij de interpretatie van deze resultaten rekening te houden met het veranderende klimaat. Dat de 11-jarige periode iets droger is (volgens de GLG) en tevens iets natter (volgens de GHG), past binnen het beeld dat men heeft van de klimaatverandering die zich aan het voltrekken is.

Tabel 4: Effect van meteorologische rekenperiode op berekende GLG en GHG.

Periode	1989-2001	1950-2000
Jaarlijkse variatie in gebiedsgemiddelde LG3-standen (m-mv)	1,51 – 2,54	
Jaarlijkse variatie in gebiedsgemiddelde HG3-standen (m-mv)	0,63 – 1,80	
Berekende gebiedsgemiddelde GLG (m-mv)	2,10	2,07
Berekende gebiedsgemiddelde GHG (m-mv)	1,16	1,22

6.1.2 Een droog en een nat jaar

In paragraaf 6.4 wordt de met het model berekende verdamping vergeleken met verdampingsdata verkregen via bewerking van *remote sensing* data. Dit is gebeurd voor een nat en een droog jaar, respectievelijk 1998 en 1995. Om deze reden worden deze jaren hier nader geanalyseerd.

In tabel 5 wordt een overzicht gegeven van de meteorologische cijfers van deze jaren voor het eerste, tweede en derde kwartaal. Het betreft de daggemiddelden van neerslag en referentieverdamping volgens Makkink, het doorlopende neerslagtekort en het maximaal doorlopende neerslagtekort. Bij de middeling van de neerslag is de zware neerslag van de laatste dagen van september niet meegerekend.

Het jaar 1998 kent zowel aan het eind van het 2^e als aan het eind van het 3^e kwartaal geen doorlopend neerslagtekort. In 1995 is dit voor beide kwartalen wel het geval. Beide jaren vertonen in het tweede kwartaal een maximaal doorlopend neerslagtekort van circa 65 mm. Alleen in 1995 is sprake van een groot maximaal doorlopend neerslagtekort van 207 mm aan het eind van het derde kwartaal.

Tabel 5: Meteorologische cijfers voor 1998 en 1995.

Periode	Neerslag (mm/d)	Referentie-verdamping volgens Makkink (mm/d)	Doorlopend neerslagtekort (mm)	Maximaal doorlopend neerslagtekort (mm)
1998, 1 ^e kwartaal	2,24	0,60	0	n.v.t.
1998, 2 ^e kwartaal	3,21	2,23	0	68
1998, 3 ^e kwartaal	2,96	2,20	0	69
1995, 1 ^e kwartaal	3,34	0,66	0	n.v.t.
1995, 2 ^e kwartaal	1,80	2,41	55	65
1995, 3 ^e kwartaal	1,22	2,89	207	207

Op basis van het maximaal doorlopend neerslagtekort van deze jaren in vergelijking met de 50-jarige reeks van De Bilt is een droogtegraad toegekend:

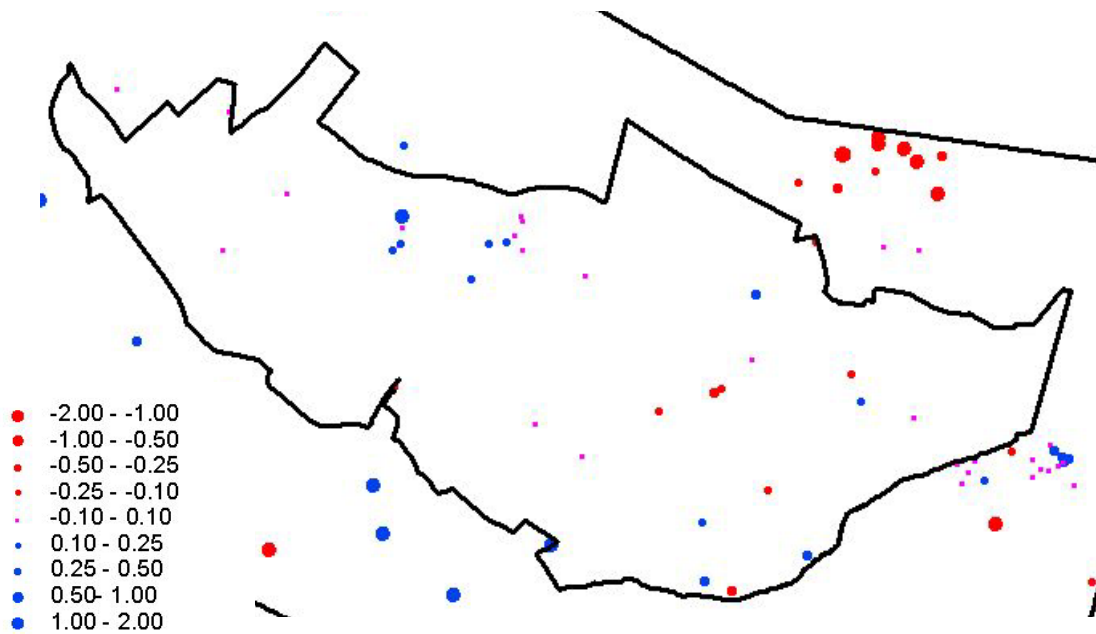
- het droge jaar 1995 is een 20% droog jaar;
- het natte jaar 1998 is een 92% ‘droog jaar’.

6.2 Grondwater

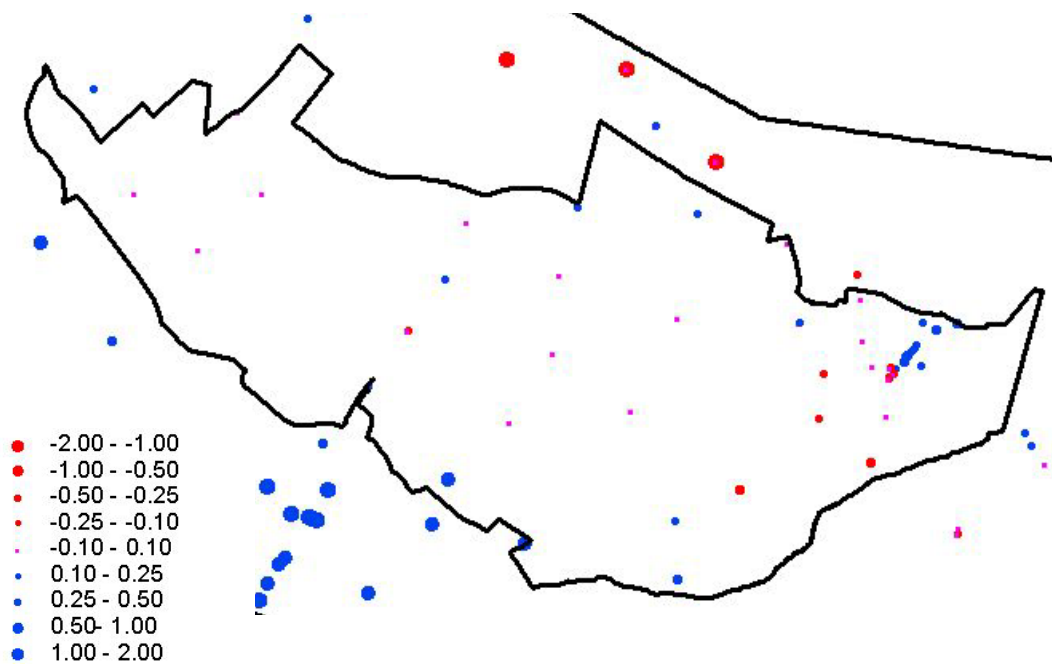
6.2.1 Verschil tussen gemeten en berekende grondwaterstanden

Figuren 20 en 21 geven de verschillen tussen gemeten en berekende stijghoogten weer voor respectievelijk de deklaag en het eerste watervoerende pakket. Vergelijking van deze figuren met de figuren C1 en C2 in bijlage C toont aan dat als gevolg van de calibratie de verschillen tussen berekende en gemeten stijghoogten is afgenomen. Voor de deklaag is dit verschil afgenomen van gemiddeld 22 cm voor de calibratie tot 5 cm na de calibratie. Voor het eerste watervoerende pakket is dit verschil afgenomen van gemiddeld 29 cm voor de calibratie tot 10 cm na de calibratie. Het gemiddelde van het absolute verschil is iets groter met respectievelijk 16 cm en 17 cm voor laag 1 en laag 2. Dit zijn cijfers voor het interessegebied.

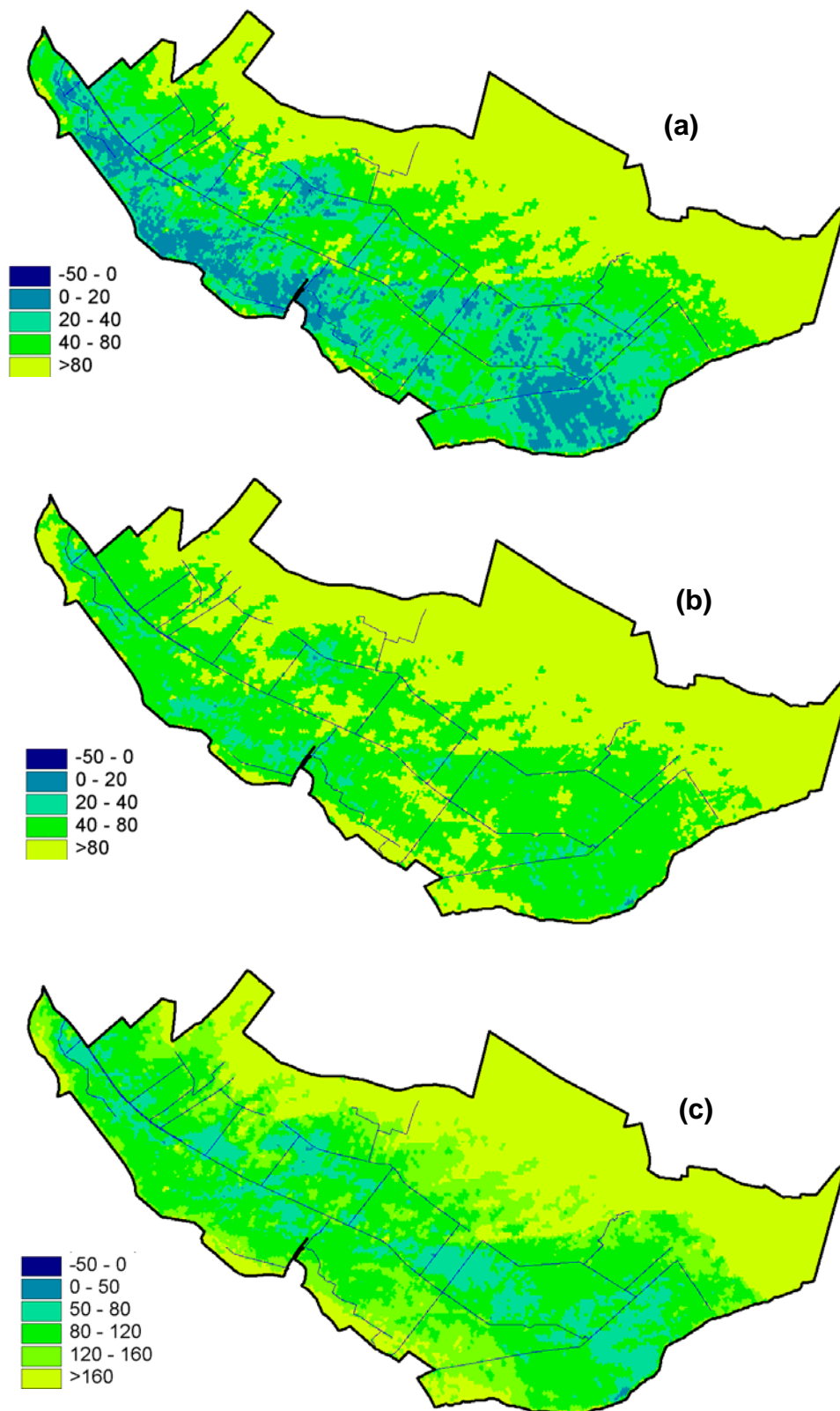
Voor de beoordeling van de betrouwbaarheid van het model is de gemiddelde *standaardafwijking* een betere maat dan de gemiddelde afwijking die boven is gebruikt. In de berekening van de standaardafwijking worden de plus-verschillen *niet* weg-gemiddeld tegen de min-verschillen. Voor zowel freatische als diepe stijghoogten bedraagt de gemiddelde standaardafwijking 22 cm, wat een acceptabele waarde is. Men moet zich daarbij realiseren dat een deel van de afwijking ontstaat doordat het model de pieken en dalen iets verkeerd in de tijd voorspelt, wat bij de berekening van de standaardafwijking leidt tot relatief grote verschillen. In werkelijkheid gaat het meer om de pieken en dalen zelf, en is de timing van minder belang. Dus de echte fout waar het om gaat is kleiner dan de genoemde 22 cm.



Figuur 20: Verschil tussen berekende en gemeten gemiddelde grondwaterstand deklaag (m). Rood: droger berekend dan gemeten; Blauw: natter berekend dan gemeten.



Figuur 21: Verschil tussen berekende en gemeten gemiddelde grondwaterstand eerste watervoerend pakket (m). Rood: droger berekend dan gemeten; Blauw: natter berekend dan gemeten.



Figuur 22: GHG (a); berekende GVG (b) en berekende GLG (c) berekend voor het AGOR.

6.2.2 Presentatie GHG, GLG, GVG en kwel

Figuren 22a, b en c geven een overzicht van de voor het interessegebied berekende GHG, GLG en GVG.

Op de flanken van de heuvelrug zijn de grondwaterstanden diep. Over het algemeen zakken de grondwaterstanden in de overige delen van het interessegebied niet dieper weg dan 1,20 m beneden maaiveld. Plaatselijk komt de GLG zelfs in de klasse 50-80 cm beneden maaiveld uit. Op deze locaties komt kwel voor (zie figuur 23). De GHG is plaatselijk zeer ondiep met waarden in de klasse 0-20 cm beneden maaiveld.

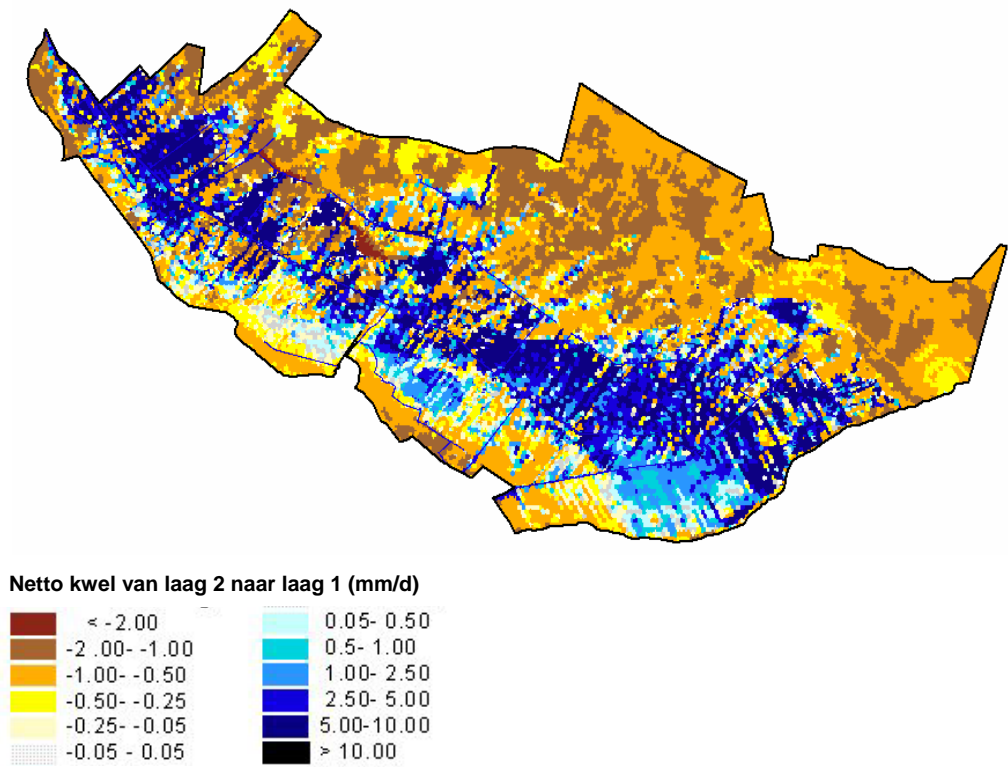
De kaarten in figuur 21 gaan uit van een gemiddelde waarde van de grondwaterstand beneden maaiveld per invloedsgebied van een knooppunt. Ze zijn gebruikt voor het berekenen van de droogteschade en de natschade voor de landbouw (zie paragraaf 6.5 en 6.6).

Voor ecologische toepassingen zijn juist de variaties en extremen interessant. Daarom zijn de GHG, GLG en GVG-kaarten ook vervaardigd na een zogenaamde 'neerschaling', waarbij de variatie van het maaiveld gesuperponeerd is op de modeluitkomsten. Die neerschaling is gebaseerd op de aanname dat de grondwaterspiegel zich niets aantrekt van de lokale variaties van het maaiveld zoals gegeven door het 5m*5m grid van het Algemeen Hoogtebestand Nederland. Deze kaarten zijn opgenomen in figuur H1 bijlage H en gebruikt voor de natuurevaluatie (zie paragraaf 6.7).

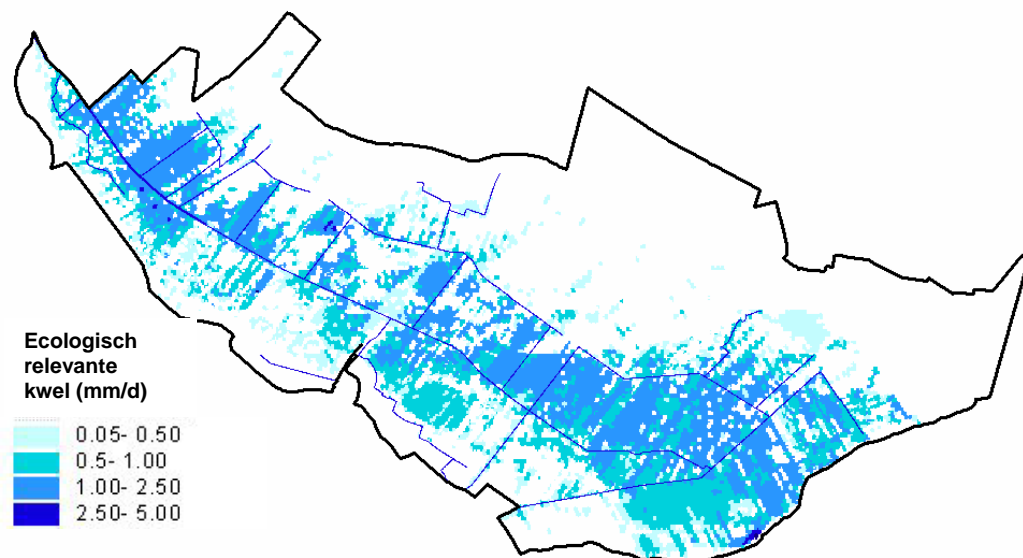
Voor de kwel is onderscheid gemaakt in kwel naar de deklaag en ecologisch relevante kwel. Figuur 23 geeft een overzicht van de netto kwel van het eerste watervoerende pakket naar de deklaag. Op de heuvelrug infiltreert het water. In een stook evenwijdig aan de heuvelrug treedt kwel op. Deze kan oplopen tot 5,0 mm/dag.

Figuur 24 geeft een overzicht van de ecologische relevante kwel. Deze wordt verkregen op basis van een lopende waterbalans van de neerslaglens (Van Walsum et al., 2002). Alleen in situaties dat de lens verdwenen is, treedt ecologisch relevante kwel op. Als de neerslaglens nog aanwezig is verdwijnt de kwel direct in de waterlopen, en komt niet of nauwelijks in contact met de wortelzone van de terrestrische vegetatie. Deze methode gaat niet in op de herkomst van de kwel. De ecologisch relevante kwel wordt gebruikt voor de voor de natuurevaluatie (zie paragraaf 6.7).

Het areaal van gebied waar deze ecologische kwel optreedt komt overeen met de kwel naar de deklaag. Waar echter 5 mm/dag opkwelt naar de deklaag, komt maximaal maar 1 mm/dag ten goede aan de terrestrische vegetatie.



Figuur 23: Netto kwel (mm/ dag) van laag 2 naar laag 1 berekend voor het AGOR.

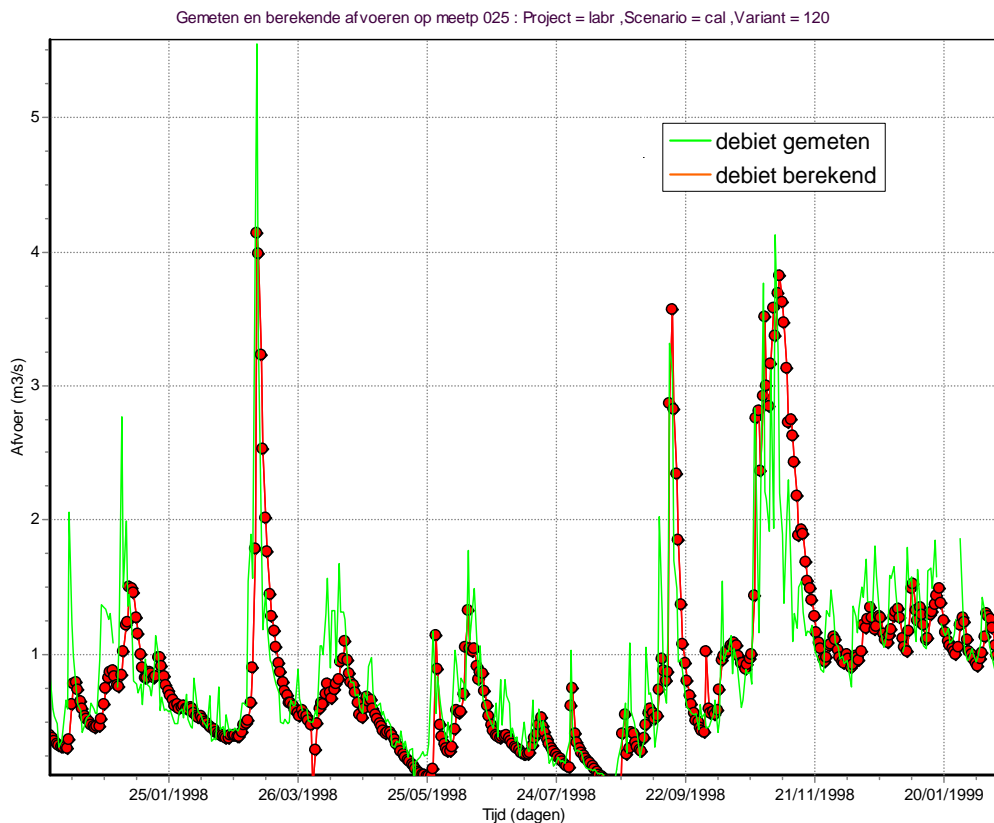


Figuur 24: Ecologisch relevante kwel (mm/jaar) berekend voor het AGOR.

6.3 Oppervlaktewater

Modelresultaten met betrekking tot het oppervlaktewater kunnen vergeleken worden met meetresultaten. Op een aantal locaties zijn waterstanden gemeten door Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. Afvoeren zijn nooit direct gemeten maar altijd afgeleid via een algemene stuwformule. De meetstuwen zijn niet voor de extreme situaties geijkt. De metingen hebben niet gedurende de gehele simulatieperiode plaatsgevonden. Vergelijking tussen berekeningen en metingen vindt daarom plaats voor kortere perioden. In figuur D1 van bijlage D zijn de meetlocaties weergegeven.

In figuur D2 van bijlage D is de afvoer getoond voor de periode van 1996 tot halverwege 2000, voor het punt waar de Langbroekerwetering het interessegebied verlaat. Voor de meetperiode is daar een gemiddelde afvoer van $0,72 \text{ m}^3/\text{s}$ gemeten. De gemiddelde gebiedsafvoer van het simulatiemodel is voor dezelfde periode $0,57 \text{ m}^3/\text{s}$. Maar daar moet bij aangetekend worden dat het verschil sterk afhangt van de beschouwde deelperiode. Voor bijvoorbeeld 1998 (getoond in figuur 25) is de waterbalansafwijking maar enkele procenten. Het is mogelijk dat de waterbalansafwijkingen aan het begin van de meetperiode een gevolg zijn van meetfouten, maar



Figuur 25: Vergelijking van gemeten (groen)/ berekende(rood, bolletjes) afvoer van de Langbroekervetering bij het verlaten interessegebied (meetpunt 025) voor het jaar 1998.

meer waarschijnlijk is dat het komt doordat die periode (1995/1996) uitzonderlijk droog was. Volgens de metingen komt de afvoer nadien beter op gang dan volgens het model. Dat kan komen doordat het model nog steeds de actuele verdamping te hoog berekent, of dat onnauwkeurigheden in de randvoorwaarden aan de grens van het modelgebied voelbaar worden in een situatie met weinig voeding van boven af.

Het in Figuur 25 getoonde afvoerpatroon (voor het relatief natte jaar 1998) komt redelijk goed overeen met de metingen. Een deel van de gemeten afvoerpieken komen minder goed tot uitdrukking in de berekeningen. Door de hele periode heen gaat het om kortdurende pieken van een of twee dagen. Er is in figuur 25 echter ook een grote voorjaarspiek te zien in begin maart. Het gaat daarbij om heftige buien met een dagtotaal van circa 40 mm. Vermoedelijk treedt er dan op grote schaal oppervlakteafvoer op als gevolg van een beperking bij de infiltratiecapaciteit. Dat proces is relatief grof geschematiseerd, en vereist bovendien gedetailleerde informatie over het tijdsbestek waarbinnen de neerslag op een dag is gevallen. Nu wordt er in het model standaard vanuit gegaan dat de bui valt in 2,5 uur. Behalve de gebrekkige informatie over de tijdsduur van buien, speelt vermoedelijk ook dat veel van de percelen in het gebied bolvormig zijn. Water dat niet meteen infiltreert krijgt dan nauwelijks een 'herkansing' om alsnog in een lokale depressie te infiltreren. Dit is een mogelijke verklaring voor de vele kortdurende 'kleine' pieken. Een andere mogelijke verklaring is dat het direct op het oppervlaktewater lozende verhard oppervlak is onderschat. Het kan daarbij o.a. gaan om verspreid liggende bebouwing, want de echte stedelijke agglomeraties zijn gemodelleerd met de rioolafvoer-optie van het model

Anders van aard is de piek in het najaar van 1998. Hier gaat het om een piek als gevolg van een aanhoudend regenrijke periode, met grondwaterstanden tot in het maaiveld. De oppervlakteafvoer die dan optreedt is beter te simuleren door SIMGRO, wat terug te vinden is in de juiste hoogte van de piek. Dit soort pieken zijn gerelateerd aan het (grond)waterbeheer, en kunnen via maatregelen beïnvloed worden.

In figuur 25 valt verder op de plotselinge terugval in de gesimuleerde afvoer op 1 april. Op die datum wordt overgegaan van winter- op zomerpeil, wat terug is te vinden als een tijdelijke stagnatie van de afvoer.

6.4 Verdamping

6.4.1 Vergelijking van methoden

De verdampingsberekening heeft gevolgen voor zowel de berekening van de droogteschade als de afvoeren. Het is belangrijk voor het praktische nut van het model dat de berekende waarden zoveel mogelijk overeenkomen met de realiteit. In deze paragraaf wordt de berekende verdamping vergeleken met verdampingscijfers zoals verkregen via bewerking van *remote sensing* data met behulp van het programma SEBAL. Deze bewerking is uitgevoerd door het bedrijf *Waterwatch*. De vergelijking vindt plaats voor het droge jaar 1995 en het natte jaar 1998.

In bijlage E worden de verdampingsbeelden volgens SIMGRO en volgens SEBAL getoond. SIMGRO berekent zowel de potentiële als de actuele verdamping. SEBAL berekent slechts de actuele verdamping.

6.4.1.1 Het natte jaar 1998

Ondanks het feit dat 1998 gezien kan worden als een nat jaar, berekent SIMGRO voor het tweede kwartaal van 1998 enige verdampingsreductie (zie bijlage E, Figuur E1b). Dit wordt veroorzaakt door een zeer droge periode in de maand mei. SEBAL berekent voor grote gebiedsdelen een nog grotere verdampingsreductie (Figuur E1c in bijlage E).

Dit verschil kan als volgt verklaard worden: Terwijl in SIMGRO de opkomst van het gewas niet afhankelijk is gesteld van het weer, registreert SEBAL wellicht dat de groei traag op gang komt als gevolg van licht vochttekort. Bij een nog niet volledig bedekte bodem treedt verdampingsreductie op zodra de bovenste centimeters zijn uitgedroogd. Deze uitdroging wordt vrijwel volledig gedomineerd door de bodemfysische eigenschappen van die bovenste centimeters en de bodembewerking en vrijwel niet door de grondwaterstand. Dit proces wordt in SIMGRO nagebootst maar leidt wellicht niet snel genoeg tot verdampingsreductie.

In het derde kwartaal van 1998 berekent SIMGRO op veel plaatsen een actuele verdamping die vrijwel potentieel is (Fig. E2b in bijlage E). De verdampingsreductie in het zuiden van het gebied wordt mogelijk veroorzaakt door een combinatie van geringe neerslag in de maand augustus op gedeeltelijk gedraineerde gronden met lichte wegzijging. De strook langs de Langbroekerwetering vertoont geen reductie omdat hier beregening uit oppervlaktewater plaatsvindt. De SEBAL-verdamping vertoont een ruimtelijk patroon dat gelijkenis vertoont met het beeld van de potentiële verdamping. Alleen is de verdamping overal ongeveer 0,25 mm/dag lager. (zie figuren E2a en E2c). Gezien het natte karakter lijkt dit niet reëel.

6.4.1.2 Het droge jaar 1995

Voor het tweede kwartaal van 1995 benadert de door SIMGRO berekende actuele verdamping vrijwel overal de potentiële waarde (Figuur E3b). Dat is opmerkelijk, gezien de relatief lage neerslag in die periode (zie Tabel 5). Echter, de neerslag kent een gunstige verdeling in de tijd, waardoor deze 100% effectief bijdraagt aan de verdamping. Een totaal neerslagtekort van circa 55 mm kan door de bodemvochtvoorraad grotendeels opgevangen worden. Opvallend is dat SEBAL een lagere verdamping berekent, ook op gronden met veel kwel.

Duidelijk verschillend is de berekening van de verdamping op de heuvelrug: volgens SEBAL vrijwel potentieel, terwijl SIMGRO reeds in het tweede kwartaal een reductie berekent. Dit ondanks de aanpassingen die zijn doorgevoerd ten aanzien van het hangwaterprofiel (zie paragraaf 4.3.3). Echter, het vochttekort in tabel 5 is gebaseerd op gras terwijl het naaldbos op de heuvelrug veel meer verdampt. Dit leidt in de SIMGRO kennelijk toch tot vochttekort.

In het derde kwartaal van 1995 treedt volgens SIMGRO in een deel van het gebied forse verdampingsreducties op (Figuur E4b in bijlage E). Verdampingswaarden gelijk aan de gemiddelde neerslag vormen geen uitzondering. Voor de heuvelrug lijkt dit niet realistisch vanwege de dikke wortelzone van bos. SEBAL berekent een actuele verdamping die juist aan de hoge kant lijkt. Dit geldt echter niet voor de beregende gebieden: Deze zijn op geen enkele manier terug te vinden in de verdampingsplaatjes van SEBAL. De door SEBAL aangegeven hoge verdamping van de naaldbossen op de arme zandgrond van de heuvelrug is op basis van het doorlopende neerslagtekort niet mogelijk. Deze analyse bevestigt de ervaring dat *remote sensing* beelden van bossen geen goede indicatie geven van de verdampingsreductie omdat ook bij gereduceerde verdamping bossen weinig opwarmen vanwege de grote aërodynamische ruwheid.

Opvallend is dat SIMGRO nauwelijks verdampingsreductie berekent voor het wegzijgingsgebied ten noorden van de Gooyerwetering. Het betreft podzolgronden in zwak lemig, fijn zand, met volgens de Staringreeks zeer gunstige capillaire eigenschappen: bij een wortelzone van 0.25 m en een grondwaterstand van 1.70 m beneden maaiveld kan er nog steeds 1 mm per dag capillair opstijgen als de wortelzone een pF van 3.0 heeft. Uit andere studies is gebleken dat deze gunstige eigenschappen te weinig verdampingsreductie teweeg brengen in vergelijking met de reductie volgens de HELP-tabellen en de praktijkervaring. Dit wordt door de huidige studie bevestigd (zie ook paragraaf 6.5).

De landbouwgrond in het zuidelijke deel van het gebied verdampt weinig volgens SIMGRO. Dit kan realistisch zijn. Het betreft immers onberegend grasland op een rivierkleigrond met wegzijging. Bij een grondwaterstand van 70 cm beneden maaiveld is de capillaire opstijging nog wel 1 mm per dag. Maar bij diepere grondwaterstanden neemt de capillaire opstijging snel af (Wösten, 2001).

6.4.2 Aanpassing verdamping

Al met al rijzen er twijfels over de juistheid van de verdampingsberekeningen door zowel SEBAL als SIMGRO. In de volgende paragraaf wordt dit vermoeden voor SIMGRO bevestigd en is besloten tot het aanpassen van het model met betrekking tot de bodemfysische data. Voor details van deze aanpassing wordt verwezen naar de volgende paragraaf.

6.5 Droogteschade landbouw

Droogteschade ontstaat wanneer de waterbeschikbaarheid in de wortelzone onvoldoende is en de gewasverdamping wordt gereduceerd. Dit resulteert in verminderde drogestof-opbrengsten en veelal ook in schade aan gewas of vrucht. De reductie van de verdamping is meestal de belangrijkste oorzaak van droogteschade.

6.5.1 Vergelijking van methoden

Daar de verdampingsreductie de belangrijkste oorzaak is van droogteschade is het in principe mogelijk deze schade met een hydrologisch model te bepalen. In dit geval wordt de schade berekend als de 'procentuele verdampingsreductie' genomen ten opzichte van de potentiële verdamping van het tweede en derde kwartaal. Een tweede mogelijkheid is om gebruik te maken van de Help-tabel (Landinrichtingsdienst, 1987). Deze tabel geeft voor grasland en bouwland voor 70 profieltypen per grondwatertrap de procentuele nat- en droogteschade gebaseerd op praktijk- en proefveldgegevens. De HELP-methode is in het Waternoodinstrumentarium geïmplementeerd. Met behulp van het Waternoodinstrumentarium is voor een groot aantal combinaties van GHG en GLG de droogteschade te bepalen (STOWA, 2003). In deze studie wordt als invoer de door SIMGRO berekende GHG en GLG gebruikt. In het Waternoodinstrumentarium wordt in geval van berekening de droogteschade gereduceerd tot 20% van de droogteschade zonder berekening.

Beide methoden zijn toegepast. De resultaten worden getoond in respectievelijk figuur F1a van bijlage F en in figuur 27. Bij analyse van de beelden valt het volgende op:

- De droogteschade volgens het Waternoodinstrumentarium is over het algemeen duidelijk hoger dan de door SIMGRO berekende droogteschade op basis van de verdampingsreductie. Volgens deze laatste methode treedt in grote delen van het gebied totaal geen droogteschade op, zelfs niet in gebiedsdelen met wegzijging. Deze resultaten lijken niet erg realistisch.
- De extreme schades die met de methode SIMGRO-verdampingsreductie wordt berekend in het zuidelijke deel van het gebied lijken op grond van bodemfysische kenmerken (Wösten, 2001) niet onrealistisch. Als de schade echt zo groot zou zijn, dan zou er wel berekend worden. Probleem bij die redenering is dat er in de praktijk inderdaad wellicht meer wordt berekend dan officieel bekend is. Eigen

waarneming op 3 augustus 2003 (Van Walsum, pers. med.) leerde evenwel dat geen enkele beregeningsinstallatie actief was in het gebied. De berekening in het gebied zal dus geen grote omvang hebben. Bij diezelfde eigen waarneming was de droogteschade niet zo extreem als SIMGRO berekent.

Deze bevindingen ondersteunen het eerder genoemde vermoeden dat onjuistheden in de bodemfysische data onjuiste verdampingsberekeningen tot gevolg hebben. Naast deze mogelijke oorzaak zijn echter nog diverse andere oorzaken aan te geven voor de geconstateerde verschillen in berekende droogteschades tussen beide methodes. Hieronder worden daarom alle mogelijke oorzaken op een rijtje gezet:

- het verschil in bodemfysische eigenschappen:
De bodemfysische eigenschappen in SIMGRO komen in model via de keten: bodemtype schaal 1 : 50.000 -> bodemeenheid Pawn-studie -> profielopbouw met Staringreeksbouwstenen -> per bouwsteen de Van Genuchtenparameters zoals beschreven in Wösten e.a. (2001). De droogteschades in de Help-tabel zijn gebaseerd op de berekeningen met het model MUST (De Laat, 1980). De bodemfysische eigenschappen zijn gebaseerd op de keten: bodemtype schaal 1 : 50.000 -> bodemeenheid HELP-tabel -> lagenopbouw met bodemfysische eigenschappen. De ervaring heeft geleerd dat de verdampingsreductie berekend met modellen die gebruik maken van de Pawn-indeling en de standaard Staringreeksbouwstenen in de regel geringer is dan de praktijk en de Help-tabel indiceren;
- de dikte van de wortelzone:
De dikte van de wortelzone is van grote invloed op de actuele verdamping. In SIMGRO is de wortelzone per gewas bepaald per bodemeenheid van de 1:50 000 bodemkaart. In de Help-tabel wordt de wortelzone per gewas bepaald per Help-bodemeenheid;
- onderrandvoorwaarden:
in SIMGRO is de berekende GHG en GLG een resultante van processen in de onverzadigde zone en in het verzadigde grondwatersysteem. Must start op 1 april met een GVG en de onderrand fluxvoorwaarde wordt iteratief bijgesteld tot op 1 oktober de GLG wordt bereikt (gemiddeld over de rekenperiode van 30 jaar). Het opvallende van Langbroekerwetering is het geringe verschil tussen GHG en GLG in verhouding tot de standaardwaarden in de Help-tabel, terwijl door de hoge actuele verdamping er juist een groter verschil is te verwachten. Blijkbaar is de hydrologische situatie in Langbroekerwetering afwijkend van de standaard-situatie, met veel kwel in combinatie met een redelijk goede ontwatering;
- modelconcepten:
de modelconcepten voor de onverzadigde zone in SIMGRO zijn anders dan in MUST. Het gaat te ver om hier nader op in te gaan.

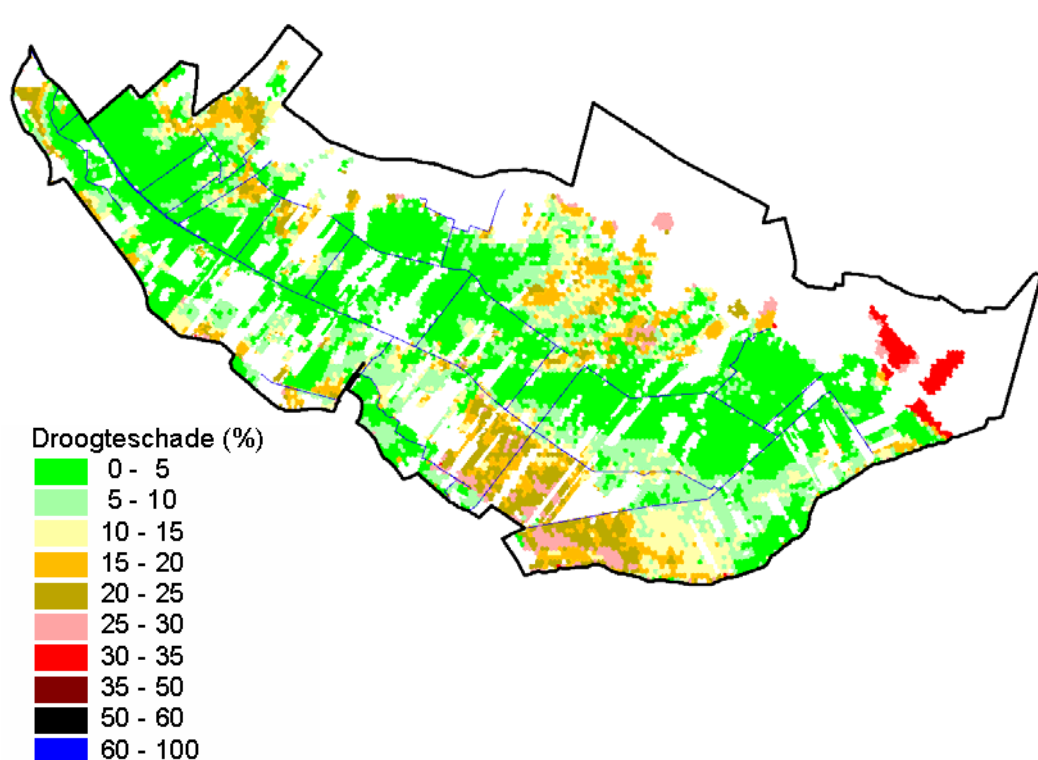
De volgende argumenten pleiten voor het bepalen van de droogteschade met het Waternodinstrumentarium:

- er zijn twijfels of de bodemfysische data in SIMGRO nauwkeurig genoeg zijn om de schadeberekening op de verdampingsreductie te baseren;
- de Help-methode is een algemeen geaccepteerde methode;
- de natschade wordt ook berekend met de Help-tabel (zie paragraaf 6.6).

De Klankbordgroep van de gebiedsstudie staat achter deze keuze. Het Waternood-instrument zal ook in fase 2 van dit project worden ingezet voor het bepalen van de droogteschade.

6.5.2 Aanpassing model

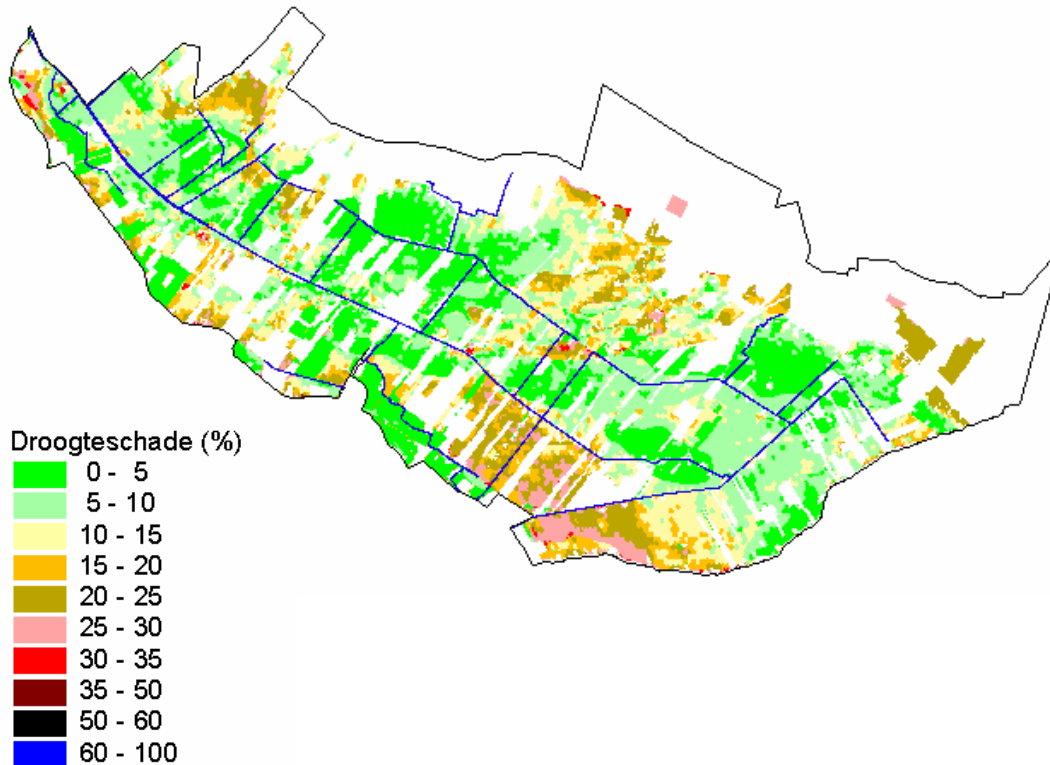
Voor allerlei scenarioberekeningen die in fase 2 van deze studie zullen volgen is het echter wel wenselijk dat het SIMGRO-model zo realistisch mogelijk de verdampingsreductie berekent. Een nadere analyse van het rekenalgoritme in SIMGRO toonde aan dat de verdampingsreductie op een relatief ongevoelige wijze wordt berekend. Dit is aangepast. Bovendien zijn de capillaire geleidingseigenschappen gecalibreerd. Daarbij is rekening gehouden met de grote spreiding (een factor 10 of hoger) van de meetdata waarop de Staringreeksbouwstenen zijn gebaseerd (Wösten e.a., 2001). Vandaar dat het verantwoord is geacht om de k -waarden van de ondergrond van bodemfysische eenheden 8, 9, 12, en 19 met een factor 4 te verlagen, en die van eenheid 17 (strook zware klei langs de zuidelijke kant van het interessegebied) met een factor 4 te verhogen. De berekende verdampingsreductie na deze aanpassingen wordt getoond in Figuur F2 van bijlage F en in figuur 26. Deze reductie komt nu veel beter overeen met die volgens het Waternood-instrumentarium (zie figuur 27).



Figuur 26: Droogteschade voor de landbouw bij het AGOR berekend op basis van de verdampingsreductie volgens SIMGRO na aanpassing van de rekenwijze voor de verdampingsreductie en na calibratie van de bodemfysische parameters.

6.5.3 Presentatie van de droogteschade

De droogteschade volgens Waternood (figuur 27) laat zien dat deze varieert van nihil tot 30% plaatselijk op droge zandgronden en op onberegende zware kleigronden.



Figuur 27: Droogteschade voor de landbouw bij het AGOR berekend met Waternood.

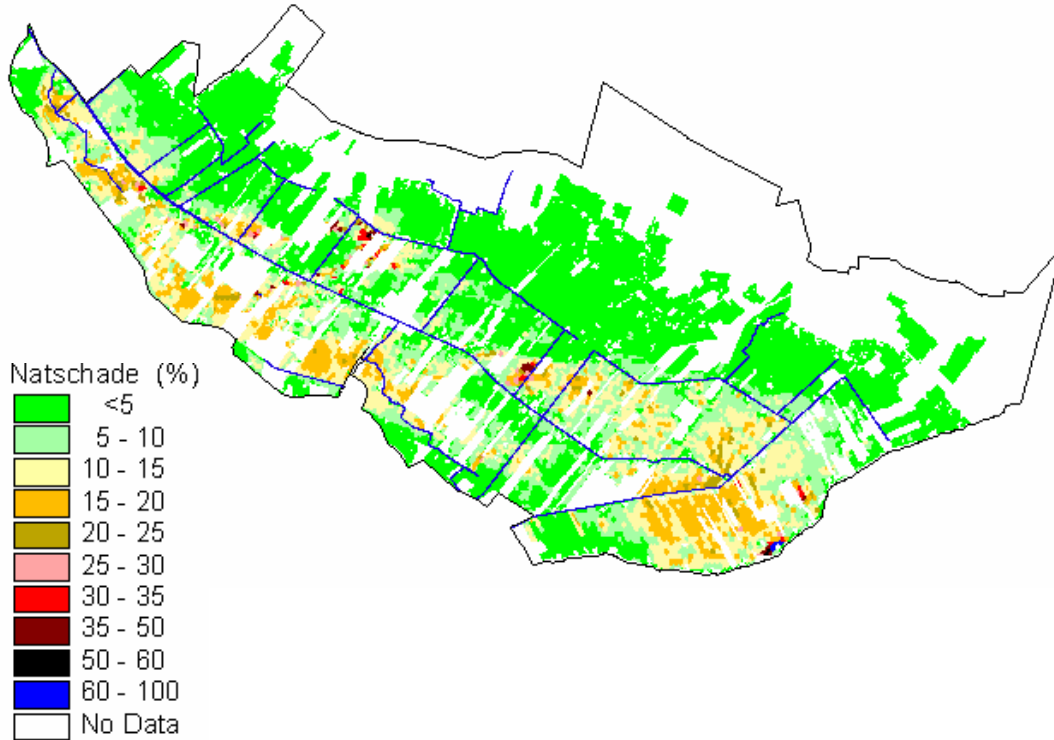
6.6 Natschade landbouw

De opbrengsten van landbouwgewassen kunnen door te natte omstandigheden afnemen. Natte omstandigheden kunnen leiden tot verdampingsreductie. Echter, indirecte effecten zoals verminderde bereikbaarheid, vertrapping, trage kieming en opkomst, verslemping van de grond en verrotting van het gewas zijn vaak belangrijker.

Er zijn momenteel geen methoden operationeel om deze vormen van natschade te koppelen aan het grondwaterstandverloop. Daarom wordt meestal gebruik gemaakt van de eerdergenoemde Help-tabel. Met behulp van het Waternoodinstrumentarium (STOWA, 2003) is voor een groot aantal combinaties van GHG en GLG de natschade te bepalen.

Deze procedure is toegepast waarbij de door SIMGRO gesimuleerde GHG en GLG als ingang zijn genomen voor berekening van de natschade. Figuur 28 geeft het resultaat.

Voor een groot areaal is de natschade gering. De grenzen van de bodemfysische eenheden zijn duidelijk terug te vinden in het natschadebeeld. Opvallend is een strook evenwijdig aan de Utrechtse Heuvelrug waar de natschade duidelijk hoger is (tot 20%) met op enkele plaatsen zeer hoge natschades (tot 50%).



Figuur 28: Natschade voor de landbouw bij het AGOR berekend met Waternood.

6.7 Doelrealisatie Natuur

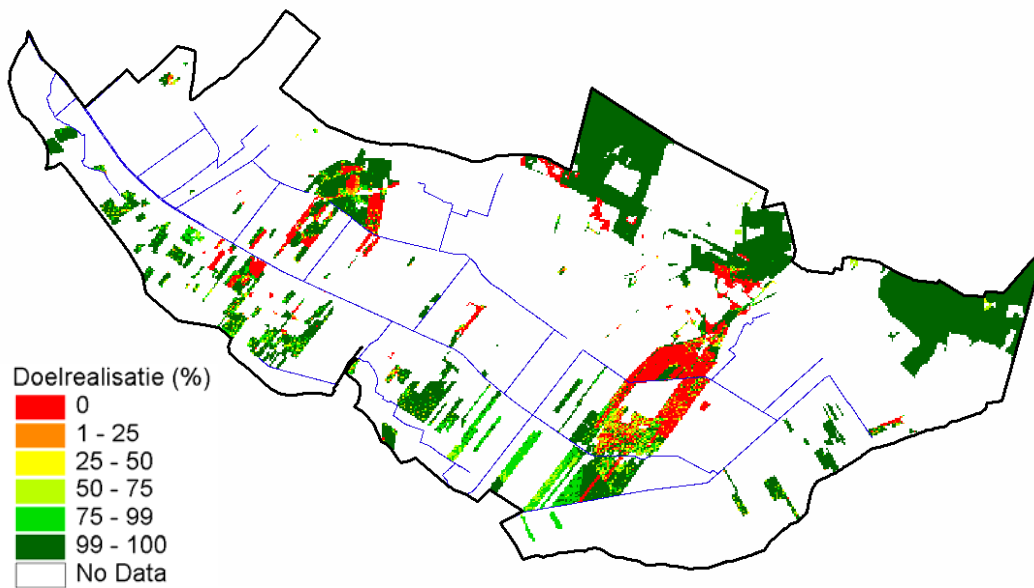
De bepaling van de doelrealisatie voor natuur bij het door SIMGRO berekende Actueel Grond- en Oppervlaktewater Regime wordt gemaakt met behulp van een verbeterde versie van het Waternood-instrumentarium versie 1.0. In dit instrumentarium wordt voor de doelrealisatie gewerkt met zogenoemde doelrealisatiefuncties (Runhaar & Hennekens, juli 2002). Doelrealisatiefuncties zijn lineaire functies die aangeven binnen welke grenzen een bepaald natuurdoeltype kan voorkomen. De doelrealisatiefuncties worden opgesteld voor de hydrologische stuurvariabelen waarvan bekend is dat deze bepalend zijn voor het al dan niet voorkomen van soorten. In de methode Waternood wordt uitgegaan van de volgende stuurvariabelen:

- de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG);
- de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG);
- de ecologisch relevante kwel.

In deze studie wordt als invoer de door SIMGRO berekende en neergeschaalde GVG en GLG (zie ook bijlage H) gebruikt en de door SIMGRO berekende ecologisch relevante kwel (zie paragraaf 6.2.2).

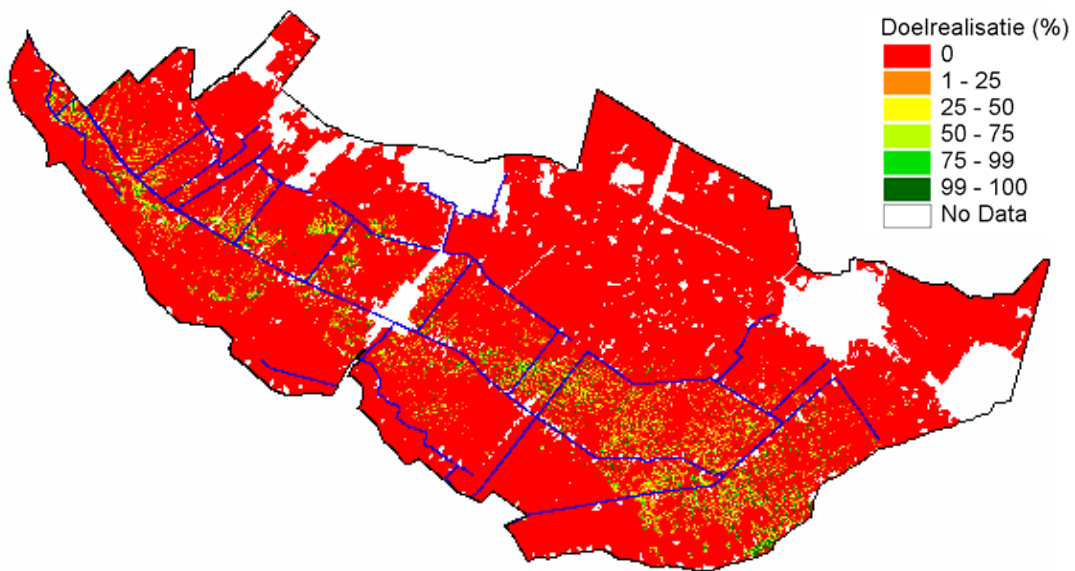
De doelrealisatie is bepaald uitgaande van de huidige natuurdoelen (UNAT's) zoals opgesteld door de provincie Utrecht (provincie Utrecht, 2001). Deze natuurdoelen zijn weergegeven in figuur G1 in bijlage G. Hoewel het hydrologische basismateriaal een resolutie van 5m*5m heeft, zijn de doelrealisaties voor natuur toch op 25m*25m resolutie uitgevoerd vanwege een beperking van het Waternood-instrumentarium. Figuur 29 geeft het resultaat.

Opvallend is dat op veel locaties sprake is van een hoge doelrealisatie. Dit wordt grotendeels veroorzaakt door de aanwezigheid van droge natuurdoelen die gemakkelijk realiseerbaar zijn. De locaties met lage doelrealisaties in figuur 29 komen overeen met vochtige natuurdoelen.



Figuur 29: Doelrealisatie AGOR Natuur bij de huidige natuurdoelen berekend met Waternood.

Ter illustratie is de doelrealisatie ook bepaald door overal schraalgrasland als natuurdoeltype op te leggen. Volgens de definities van de provincie Utrecht omvat dit natuurdoeltype overigens zowel natte schrale als natte wat productievere graslanden. Figuur 30 geeft het resultaat weer. Duidelijk is dat met het AGOR dit nattere natuurdoel nauwelijks realiseerbaar is.



Figuur 30: Doelrealisatie AGOR Natuur als overal het de UNAT schraalgrasland nagestreefd wordt (berekend met Waterlood).

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Prestatie van het model

Nadat het model op basis van technische en objectieve criteria was gecalibreerd, zijn de resultaten voor de GHG, GLG, droogte- en natschade voorgelegd aan de klankbordgroep van het project. De klankbordgroep bestaat uit mensen die zeer goed bekend zijn met het gebied, uit zowel de landbouw- als de natuurhoek. Hun conclusie was dat de resultaten van het model zeer goed overeenkomen met hun eigen 'gevoel'. Dat is van groot belang voor het draagvlak van het model, en daarom voor de rol van die het model kan spelen in het proces op weg naar de GGOR. De conclusie is dat het gecalibreerde SIMGRO-model dusdanig goede resultaten levert dat het met vertrouwen ingezet kan worden voor de tweede fase van het project 'Duurzaam Waterbeheer Langbroekerwetering'.

Met een relatief simpele – maar wel goed vastgelegde – procedure zijn de geohydrologische parameters gecalibreerd. Met name gemiddelde grondwaterstanden worden goed gesimuleerd. De gemiddelde berekende grondwaterstand in het gebied wijkt voor de deklaag slechts 5 cm af met de gemiddelde gemeten waarde. Voor de beoordeling van de betrouwbaarheid van het model is de gemiddelde *standaardafwijking* een betere maat. In die maat worden de plus-verschillen niet weggemiddeld tegen de min-verschillen. Voor zowel freatische als diepe stijghoogten bedraagt de gemiddelde standaardafwijking 22 cm, wat een acceptabele waarde is. Men moet zich daarbij realiseren dat een deel van de afwijking ontstaat doordat het model de pieken en dalen iets verkeerd in de tijd voorspelt, wat bij de berekening van de standaardafwijking leidt tot relatief grote verschillen. In werkelijkheid gaat het meer om de pieken en dalen zelf, en is de timing van minder belang. Dus de echte fout waar het om gaat is kleiner dan de genoemde 22 cm.

De verdamping werd in eerste instantie minder goed gesimuleerd met het SIMGRO-model. Zowel vergelijking met verdampingberekeningen met SEBAL als met berekeningen van de droogteschade met Waternood toonde dit aan. Over het algemeen leek SIMGRO de verdamping te overschatten. Maar het tegenovergestelde kwam ook voor. Deze constatering gaf aanleiding tot het aanpassen van de bodemfysische parameters van het model. De prestaties ten aanzien van verdampingsreductie zijn hierdoor sterk verbeterd.

Voor de meetperiode van oppervlaktewater (01/02/1996 - 30/06/200) is een gemiddelde afvoer van 0,72 m³/s gemeten. De gemiddelde gebiedsafvoer van het simulatiemodel is voor dezelfde periode 0,57 m³/s. Maar daar moet bij aangetekend worden dat het verschil sterk afhangt van de beschouwde deelperiode. Voor bijvoorbeeld 1998 (getoond in figuur 25) is de afwijking maar enkele procenten. Het is mogelijk dat de waterbalansafwijkingen aan het begin van de meetperiode een gevolg zijn van meetfouten, maar meer waarschijnlijk is dat het komt doordat die

periode (1995/1996) uitzonderlijk droog was. Volgens de metingen komt de afvoer nadien beter op gang dan volgens het model. Dat kan komen doordat het model nog steeds de actuele verdamping te hoog berekent, of dat onnauwkeurigheden in de randvoorwaarden (modelgrens) sterk gaan doorwerken in situaties met weinig voeding van boven af.

Een andere soort afwijking betreft de simulatie van kortdurende pieken. Het gaat hierbij om de gebrekkige informatie over de tijdsduur van buien, en de rol van ruimtelijke variabiliteit van de bodeminfiltratieweerstand. Vermoedelijk speelt hier dat de bolvormige percelen die in het gebied veel voorkomen al gauw oppervlakteafvoer genereren: water dat niet direct infiltreert krijgt nauwelijks een herkansing om alsnog in een lokale depressie de grond in te dringen. Ook kan een rol spelen dat het direct op het oppervlaktewater lozende verhard oppervlak is onderschat. Het kan daarbij o.a. gaan om verspreid liggende bebouwing, want de echte stedelijke agglomeraties zijn gemodelleerd met de rioolafvoer-optie van het model. De afvoerpieken die ontstaan als gevolg van een opeenvolging van zware neerslagdagen worden *wel* goed gesimuleerd. Een voorbeeld van een dergelijke piek is die van 5 en 6 november in 1998. Het zijn juist dit soort pieken die sterk worden beïnvloed door het waterbeheer, en dus het meest interessant.

7.2 Conclusies ten aanzien van het AGOR

De meteorologische periode (1989-200) die is gebruikt voor het berekenen van het AGOR is representatief.

Op de flanken van de heuvelrug infiltreert het water en vinden we diepe grondwaterstanden. Over het algemeen zakken de grondwaterstanden in de overige delen van het interessegebied niet dieper weg dan 1,20 m beneden maaiveld. Plaatselijk ligt de GLG zelfs in de klasse 50-80 cm beneden maaiveld. Dit zijn kwellocaties. De GHG is plaatselijk zeer hoog met waarden in de klasse 0-20 cm beneden maaiveld. Opvallend is het geringe verschil in GHG en GLG in het gebied. Dit wordt veroorzaakt door de aanzienlijke kwel en een redelijk goede drainage. De kwel naar de deklaag loopt plaatselijk op tot 5 mm/dag. Hiervan komt maximaal 1 mm/dag ten goede aan de terrestrische vegetatie.

7.3 Conclusies ten aanzien van de doelrealisatie van het AGOR

De doelrealisatie voor het AGOR is berekend voor landbouw en terrestrische natuur met behulp van het Waternoodinstrumentarium.

Bij het AGOR is de schade voor de landbouw aanzienlijk te noemen. Op de flanken van de Utrechtse heuvelrug en op onberegende zware kleigronden komt een droogteschade voor van ongeveer 30%. In een strook evenwijdig aan de heuvelrug vinden we natschade tot ongeveer 20%. Daar op sommige locaties zowel droogte-

schade als natschade voorkomt kan de totale schade voor de landbouw hoger zijn. Hydrologische maatregelen in deze gebieden zouden de landbouwopbrengsten verder kunnen verhogen.

Bij het AGOR is de doelrealisatie voor natuur op veel plaatsen nogal hoog. Dat heeft te maken met de door de provincie Utrecht vastgestelde natuurdoelen die in veel gevallen relatief 'droog' zijn. De nattere natuurdoelen zijn meestal (nog) niet realiseerbaar.

7.4 Aanbevelingen

Om de verdampingsresultaten van SIMGRO te verbeteren is het aan te bevelen de opkomst van het gewas afhankelijk te maken van het weer. Nu worden gemiddelde data aangehouden voor de gewasgroeiperiode. Er kan overwogen worden deze periode afhankelijk te maken van de temperatuur en de vochttoestand van de bodem. Het is wenselijk de simulatie van de verdamping van de onbegroeide bodem aan een nader onderzoek te onderwerpen.

Voor het simuleren van piekafvoeren als gevolg van extreme buien is meer informatie nodig met betrekking tot het tijdsbestek waarbinnen een bui valt. Ook de parameterisering in SIMGRO is nog relatief grof, en dus voor verbetering vatbaar.

De ecologisch relevante kwel die in dit onderzoek gebruikt wordt voor de bepaling van de doelrealisatie voor natuur legt een zwaar filter over de kwel die vanuit de ondergrond komt: slechts een klein deel bereikt volgens de rekenmethode de wortelzone van de terrestrische vegetatie. Maar vervolgens maakt het Waternood-instrumentarium slechts onderscheid tussen meer of minder kwel dan 100 mm/jaar. Aanbeveling richting het Waternoodinstrumentarium is dan ook meer klassen in kwelsterkte te onderscheiden en daarbij aan te sluiten bij NATLES.

Literatuur

- Ad hoc groep verdamping. 1984. *Herziening van de berekening van gewasverdamping in het hydrologische model GELGAM*. Begeleidingsgroep GELGAM, Provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer, Arnhem
- De Laat, P.J.M., 1980. *Model for unsaturated flow above a shallow watertable, applied to a regional subsurface flow problem*. Doctoral thesis, Agric. University Wageningen. Pudoc, Wageningen.
- Ernst, L.F., 1978. *Drainage of undulating sandy soils with high groundwater tables*. Journal of Hydrology 39 (3/4):1-50.
- Feddes, R.A. 1987. *Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration*. Commissie Hydrologisch Onderzoek TNO, Den-Haag.
- Grontmij, 2003 (in voorbereiding). *Milieuvoorwaarden voor Utrechtse Natuurdoeltypen*. Grontmij, Arnhem.
- Hooghart, J.C. 1987. *Verdampingscijfers: van Penman naar Makkink*. Waterschapsbelangen, 72^e jaargang no. 8: 232-235.
- Jansen, P.C. 2004 in prep. *Kwel in beeld*. Alterra, Wageningen.
- Jansen, P.C. en J. Runhaar. (in voorbereiding). *Toelichting op de referentiegrondwaterstand en de hydrologische randvoorwaarden voor de realisatie van natuurdoelen in het gebied Langbroekervetering van het Hoogbeemraadschap Stichtse Rijnlanden*. Alterra, Wageningen.
- Kolen, B, Kok, M., Bolt van der, F.J.E.. 2001. *Stochasten voor het thema waterberging voor de reconstructie in Braban.*, HKV lijn in water, Lelystad.
- Landinrichtingsdienst, 1987. *De invloed van de waterhuishouding op de landbouwkundige produktie; rapport van de Werkgroep Help-tabel*. Utrecht, Landinrichtingsdienst.
- Massop, H.Th.L., en J.G. te Beest, 2001. *Informatie-inwinning oppervlaktewatetestelsel; Kenmerken van het tertiair ontwateringsstelsel in Noord-Brabant*. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport. 78 blz. 16 fig.; 22 tab.; 8 ref.
- Provincie Utrecht. 2001. *Natuurgebiedsplan Kromme Rijngebied*. Provincie Utrecht, Utrecht.
- Runhaar, J., Kuijpers, H., Boogaard, H.L., Schouwenberg, E.P.A.G. en P.C. Jansen. 2003. *Natuurgericht Landevaluatie-systeem (NATLES) versie 2*. Alterra, Wageningen.

Runhaar, J., Gehrels, J.C., Van der Lee, G., Hennekens, S.M., Wamelink, G.W.W., Van der Linden, W., De Louw, P.G.B. 2002. *Doelrealisatie natuur. Waternood deelrapport 05*. Rapport 2002-26, STOWA, Utrecht.

STOWA/RIZA, 1999. *Vloeiend Modelleren in het Waterbeheer, Handboek Good Modelling Practice*; STOWA-rapport 99-05, Rijkswaterstaat-RIZA-rapport 99.036, ISBN-nr. 90-5773-056-1. RIZA, Lelystad.

STOWA/RIZA, 2002. *Instrumentarium Waternood. Waternood deelrapport 02*. Rapport 2002-35, STOWA, Utrecht.

Veldhuizen, A.A., A. Poelman, L.C.P.M. Stuyt en E.P. Querner, 1998. *Software documentation for SIMGRO V3.0. Regional water management simulator*. Technical document 50, SC-DLO, Wageningen.

Van Walsum, P.E.V., Verdonschot, P.F.M. en J. Runhaar. 2002. *Effects of climate and land-use change on lowland stream ecosystems*. Alterra-Report 523, Alterra, Wageningen. (te downloaden vanaf: www.alterra.nl/english)

Van Walsum, P.E.V., Helming, J.F.M., Schouwenberg, E.P.A.G., Stuyt, L.C.P.M., Groenendijk, P., de Bont, C.J.A.M., Vereijken, P.H., Kwakernaak, C., van Bakel, P.J.T., van Staalduinen, L.C. en K.W. Ypma., 2002. *Watervijis; Plannen met water op regionale schaal*. Alterra-rapport 433, Alterra, Wageningen.

Van Walsum, P.E.V., A.A. Veldhuizen, P.J.T. van Bakel, F.J.E. van der Bolt, P.E. Dik, P. Groenendijk, E.P. Querner, M.F.R. Smit (in voorbereiding). *SIMGRO; theory and model implementation*. Alterra-rapport 913, Wageningen.

Vries, F. de en J. Denneboom, 1992. *De bodemkaart van Nederland digitaal. Technisch document 1*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Wageningen.

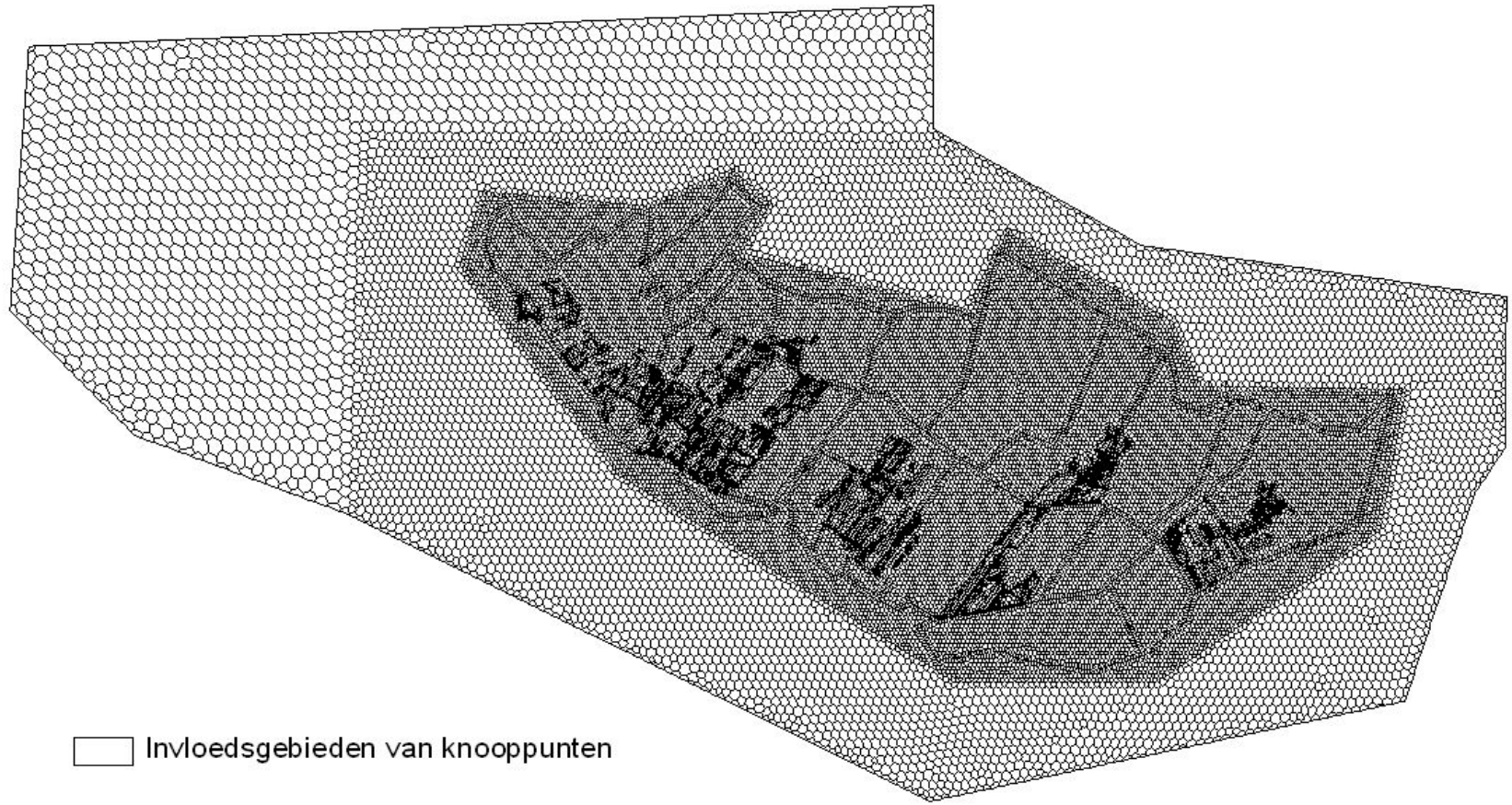
Wendt, T., 1998. *Water Rijk Utrecht; Effecten van toekomstscenario's op het grondwater in Utrecht*. Grontmij, Houten.

Wesseling, J.G., 1991. *CAPSEV: steady state moisture flow theory: program description, user manual*. Staring Centre, Wageningen.

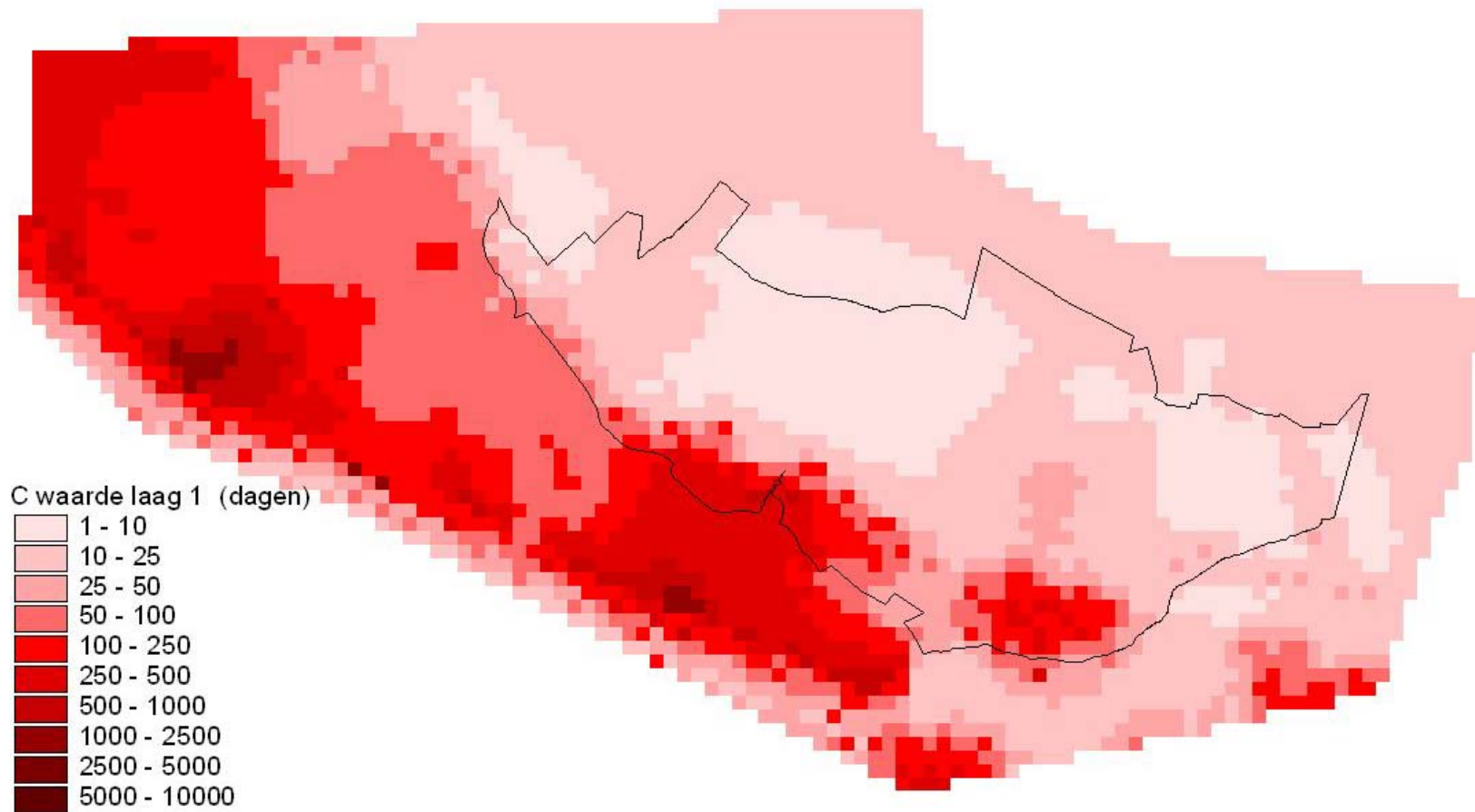
WL Delft Hydraulics, 2001. *SOBEK Rural, managing your flow*. Manual, version 2.07, WL delft Hydraulics, Delft.

Wösten, J.H.M., G.J., 2001. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks*. Alterra, Wageningen.

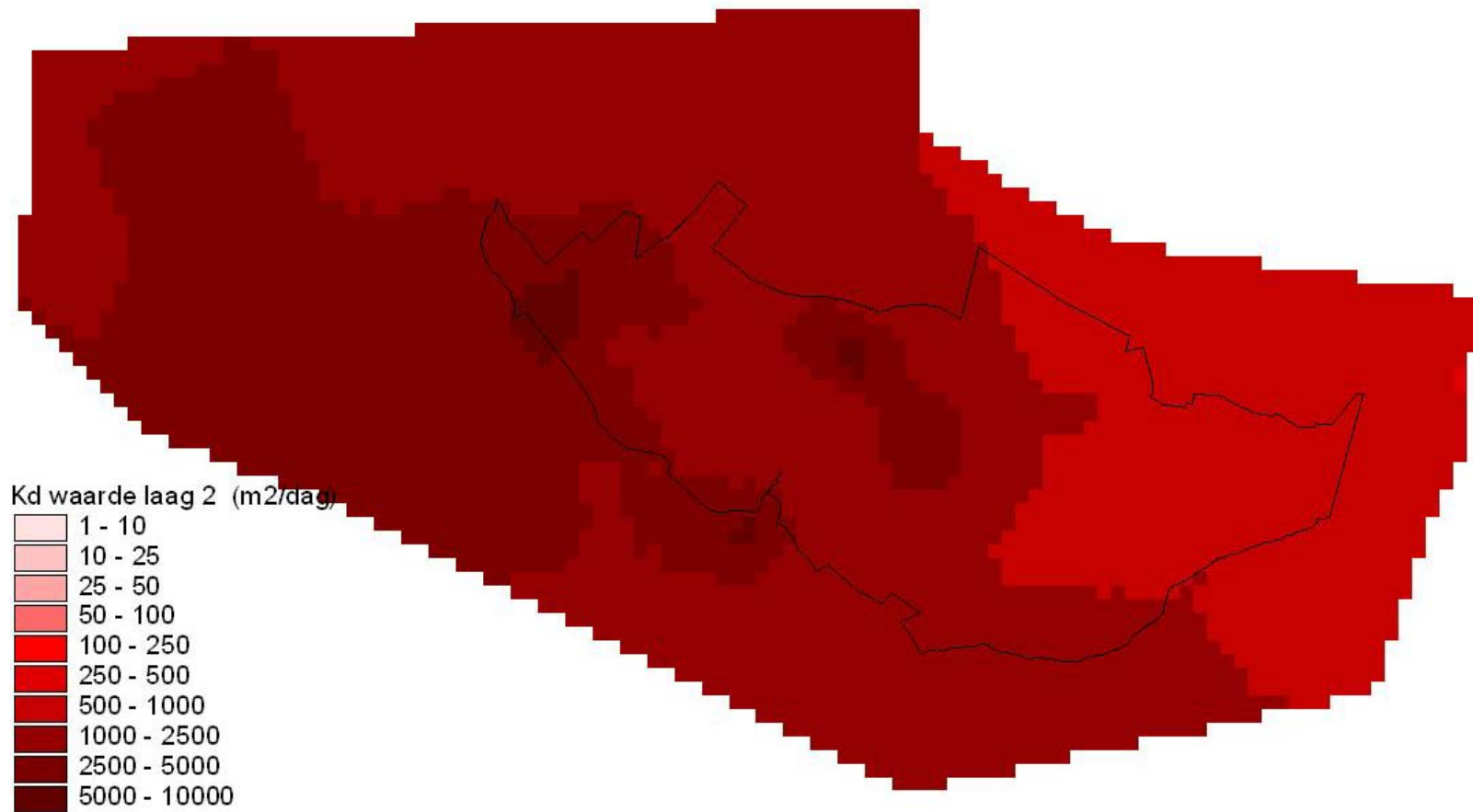
Bijlage A Figuren bij modelbouw



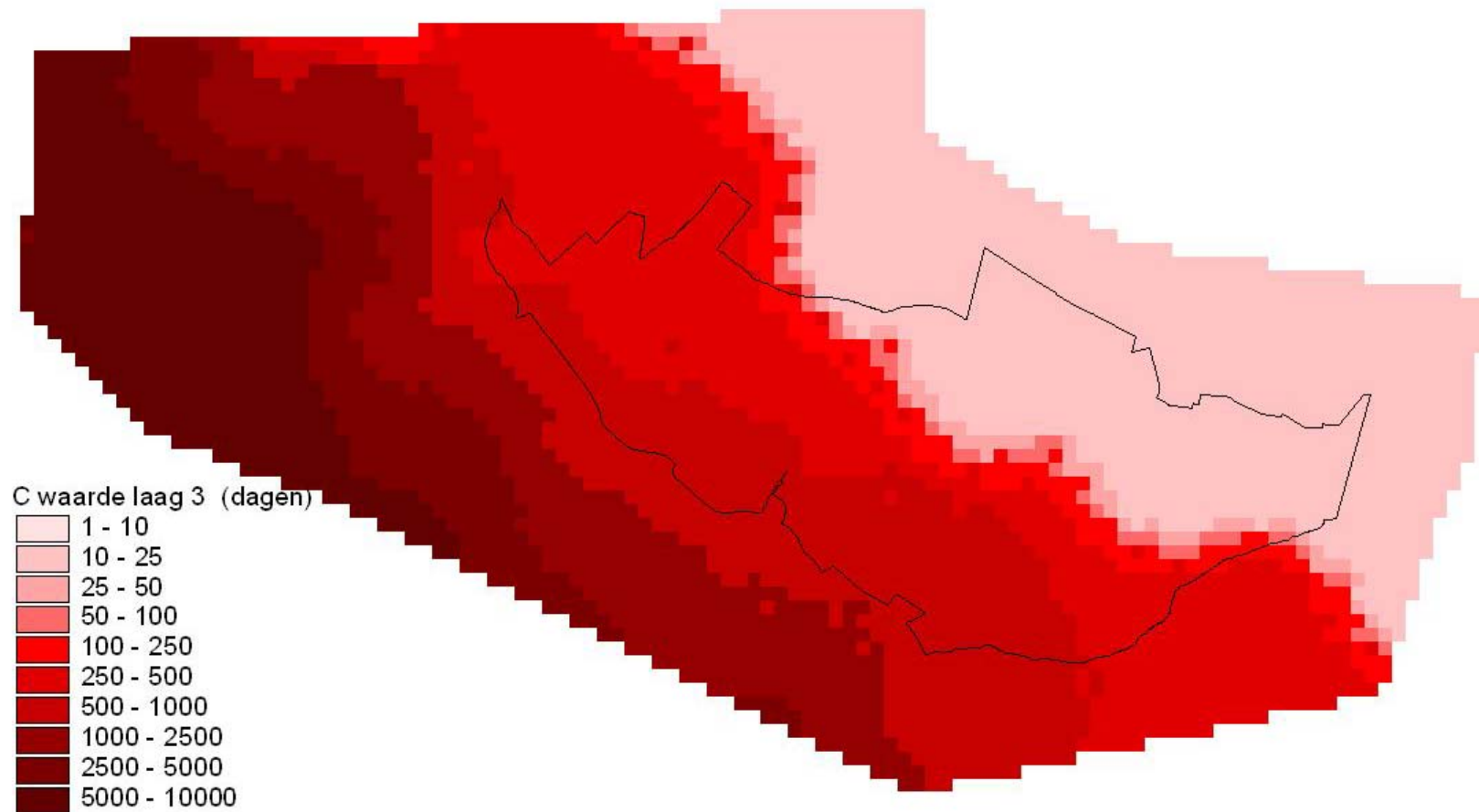
Figuur A1: Invloedsgebieden van de knooppunten in het modelgebied.



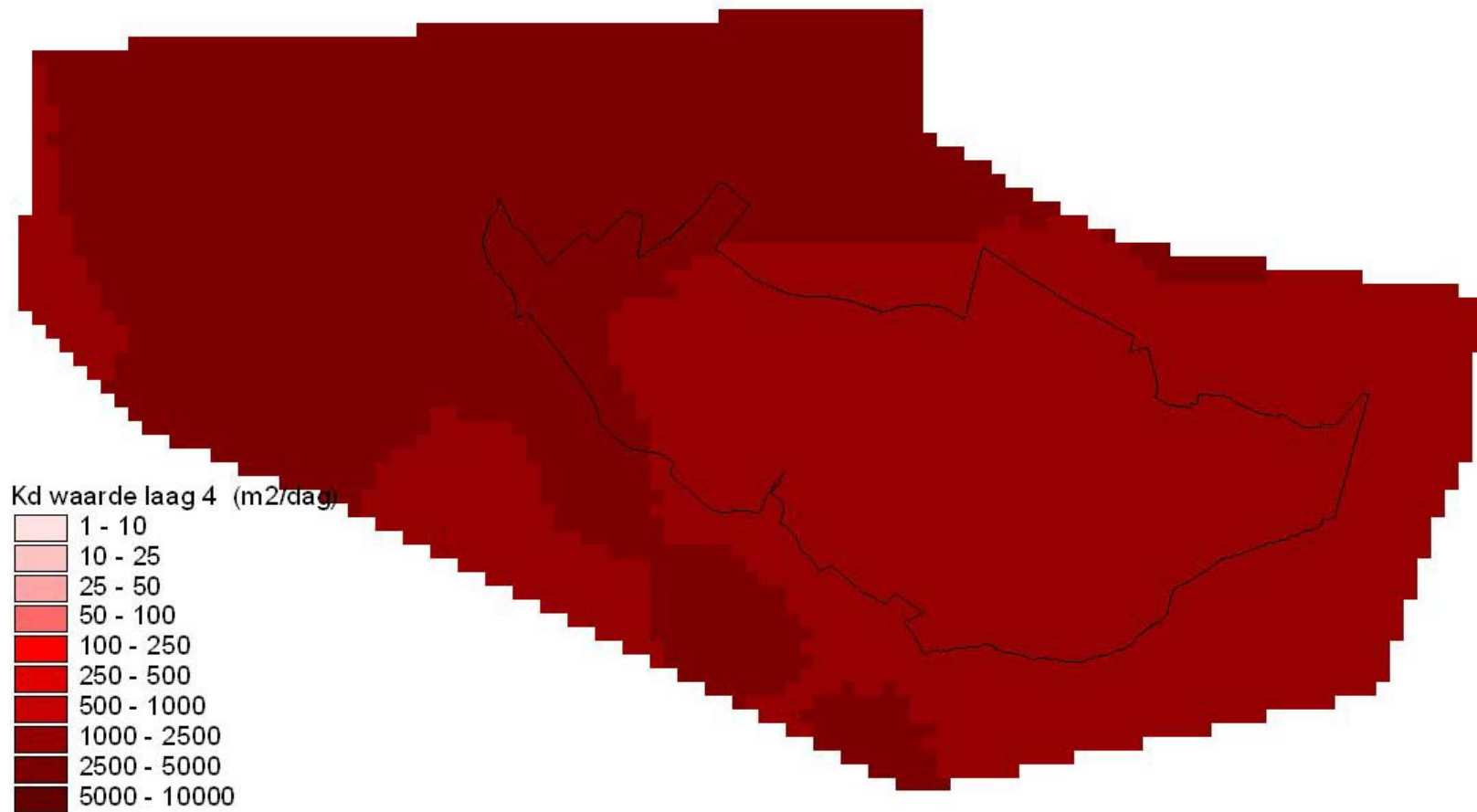
Figuur A2: Weerstand van de deklaag (gecalibreerde model).



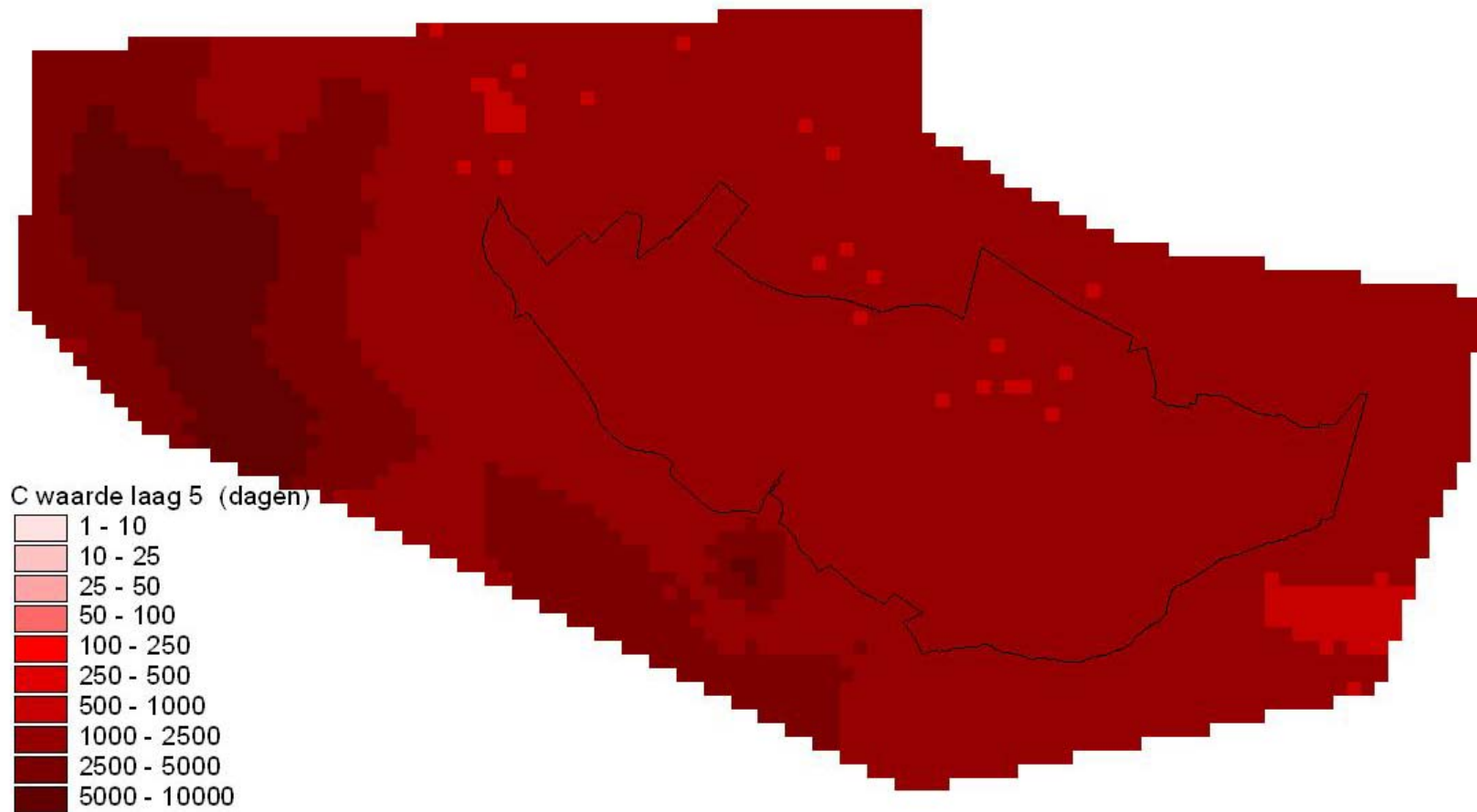
Figuur A3: Doorlatendheid van het eerste watervoerend pakket (gecalibreerde model).



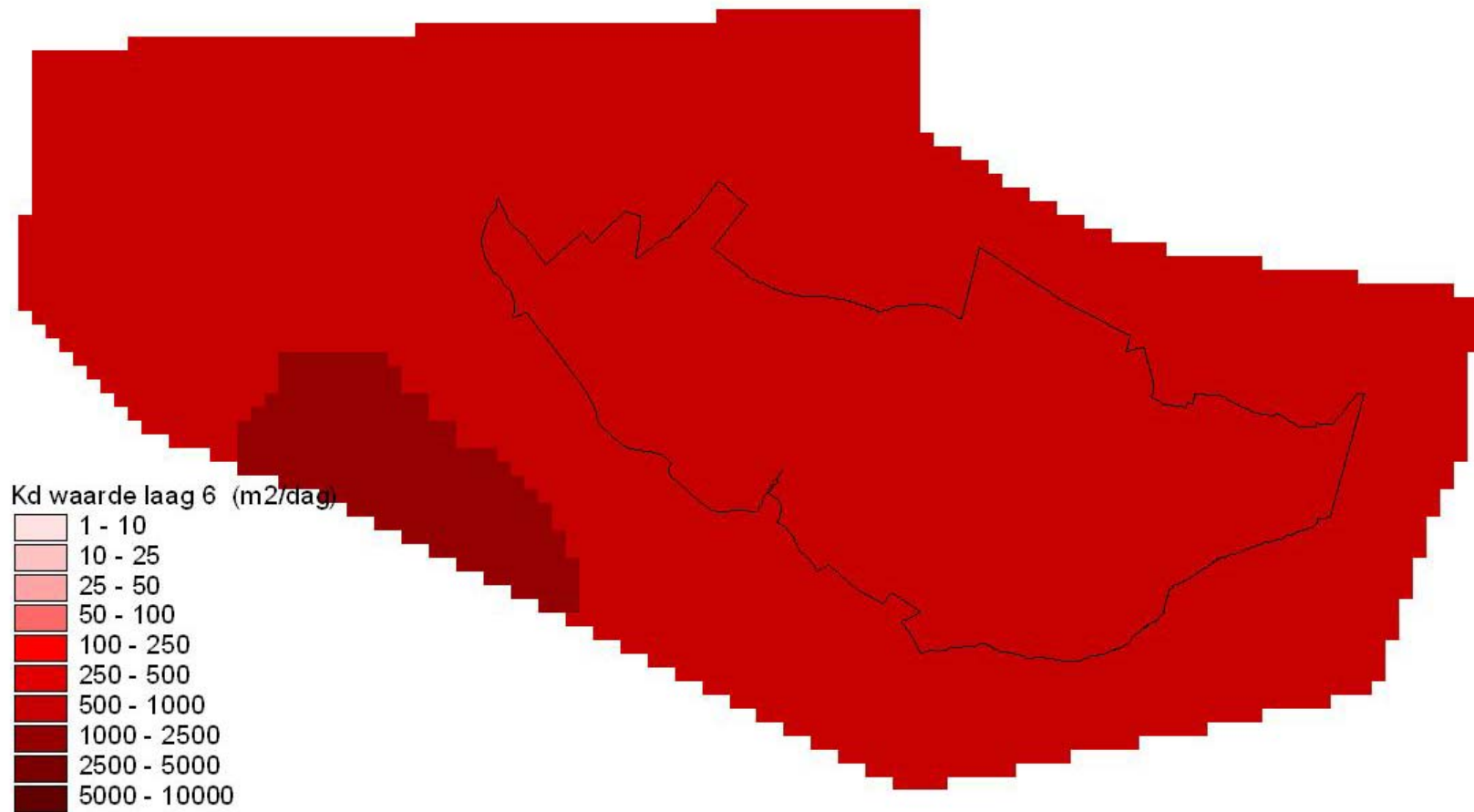
Figuur A4: Weerstand van de eerste scheidende laag (gecalibreerde model).



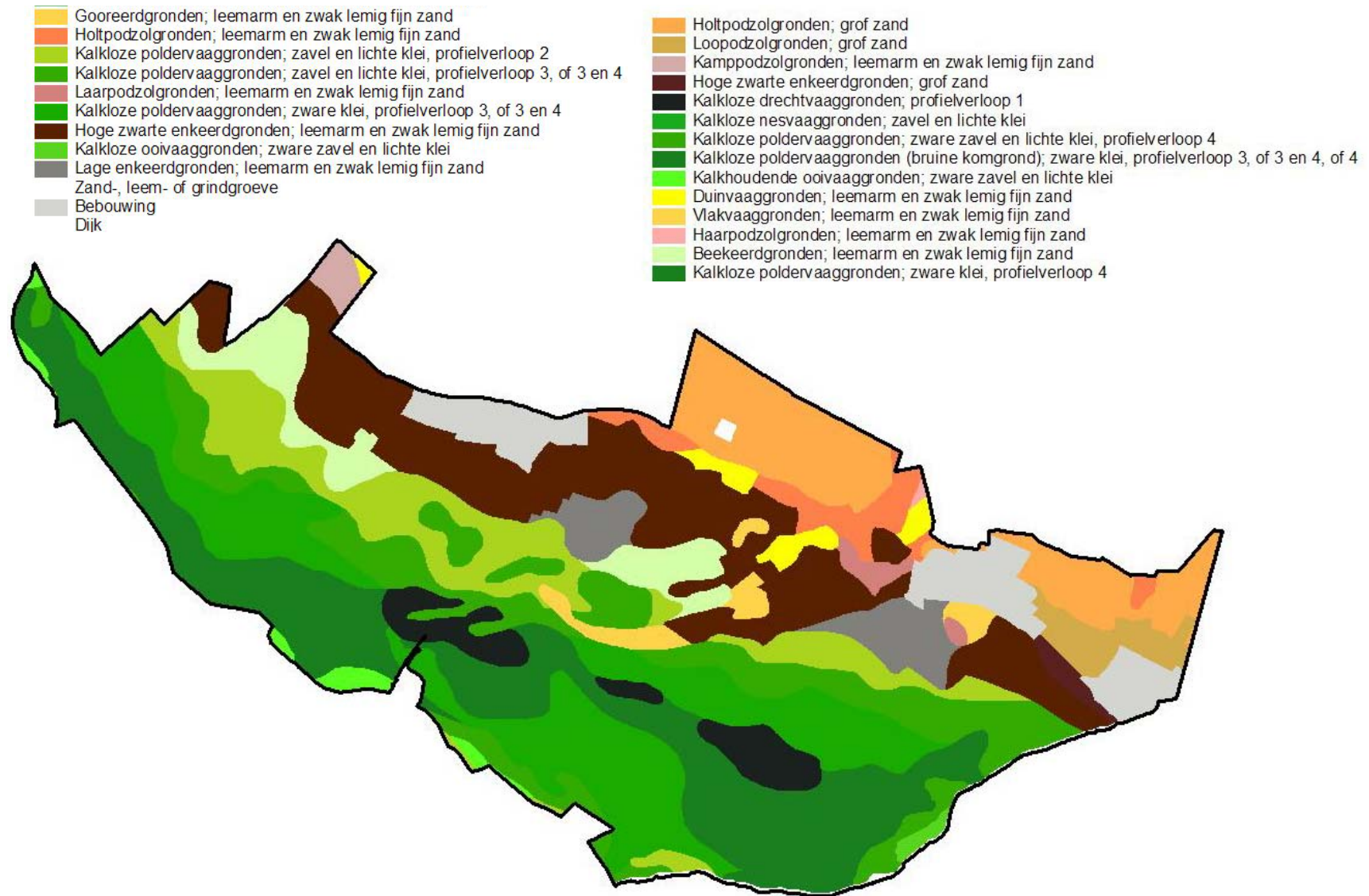
Figuur A5: Doorlatendheid van het tweede watervoerend pakket (gecalibreerde model).



Figuur A6: Weerstand van de tweede scheidende laag (gecalibreerde model).



Figuur A7: Doorlatendheid van het derde watervoerend pakket (gecalibreerde model).



Figuur A8: Bodemomschrijving volgens de bodemkaart 1:50.000 (De Vries en Denneboom, 1992).



Figuur A9: Toegekende afwateringseenheden in het interessegebied.

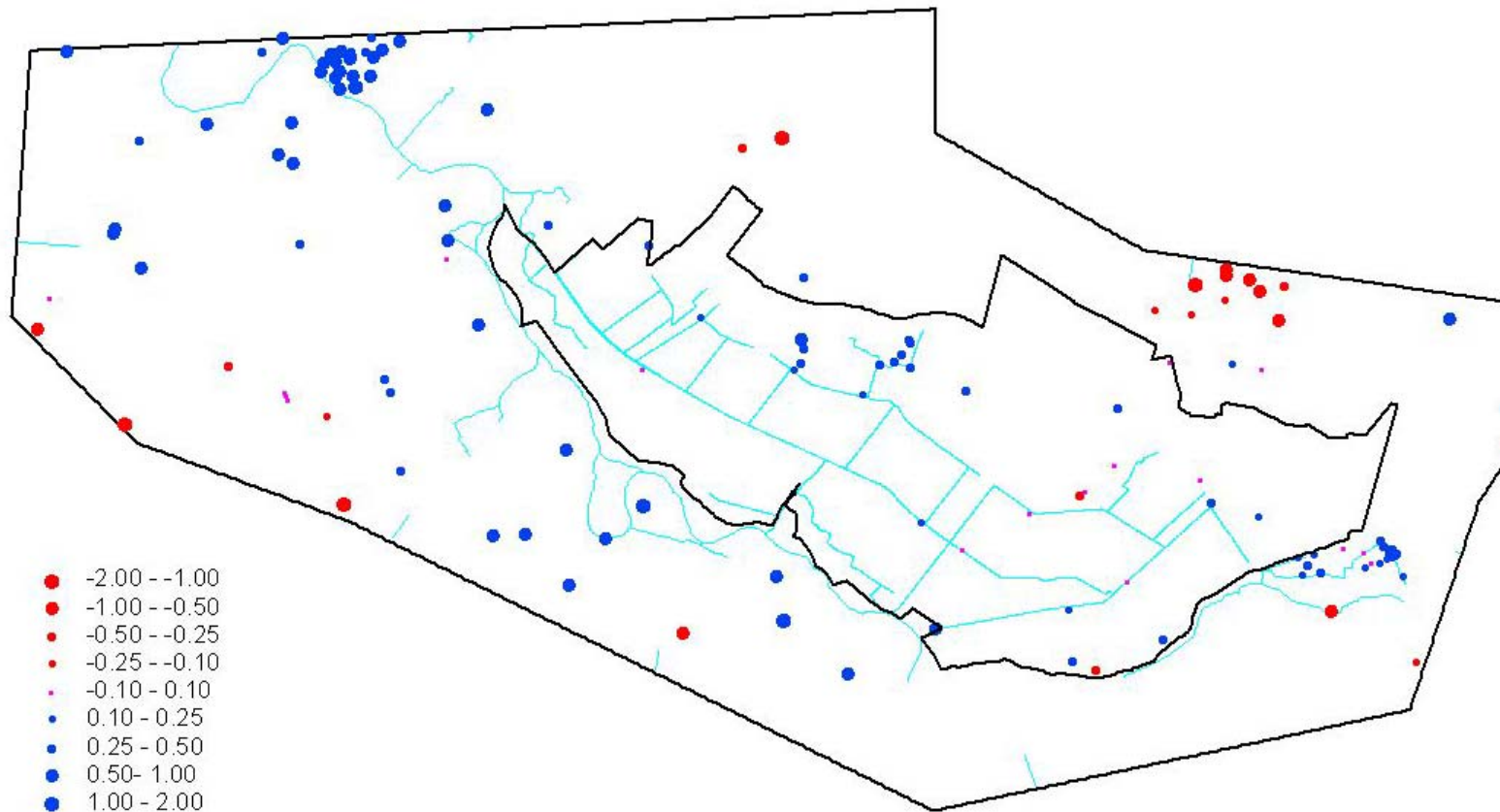
Bijlage B De functie 'Verbeteren AHN' in AlterraAqua

De functie gaat alleen uit van het AHN en heeft geen andere gegevens nodig. De volgende stappen worden doorlopen:

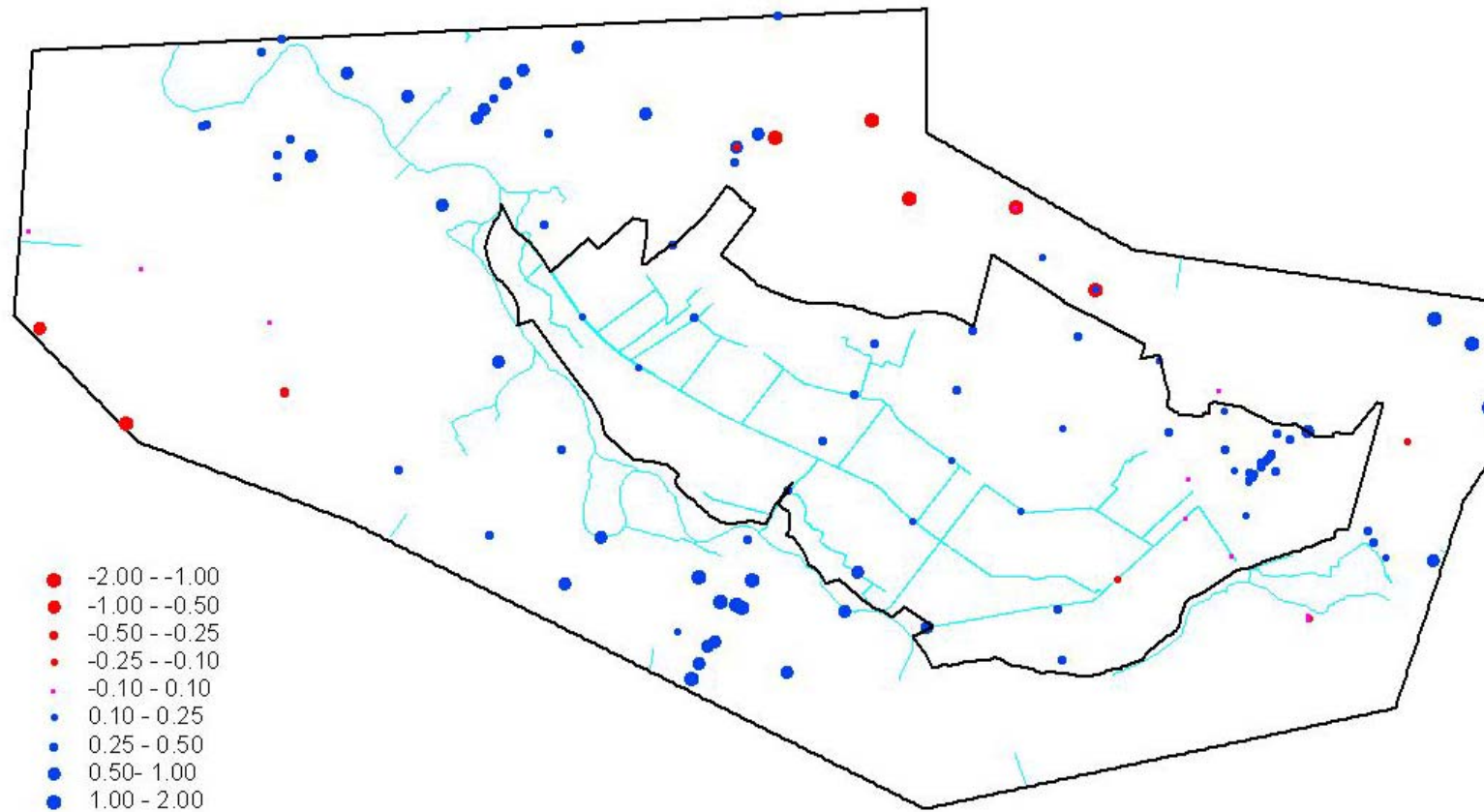
- Het AHN wordt geresampled naar een door de gebruiker op te geven celgrootte (default = 50 meter). Belangrijke is deze niet te klein te kiezen ivm rekentijd.
- De middelpunten van de cellen worden naar een punten bestand geconverteerd
- Deze hoogtepunten worden gebruikt om een TIN (Triangular Irregular Network) aan te maken
- Het TIN wordt geconverteerd naar een grid met een celgrootte van 5*5 meter
- Er wordt een verschilgrid berekend tussen het oorspronkelijk AHN en het resultaat van de vorige stap
- Alle cellen die een absoluut verschil hebben dat groter is dan een door de gebruiker gespecificeerde waarde worden uit het AHN gefilterd (default = 40 cm.)
- Groepen van aangrenzende cellen met een door de gebruiker gespecificeerd oppervlakte (default = 5 ha.) worden ook uit het AHN gefilterd.
- De resterende cellen worden geresampled naar door de gebruiker op te geven celgrootte (default = 50 meter) en geconverteerd naar een punten bestand.
- De punten worden met behulp van een Inverse Distance Weighted Interpolatie geïnterpoleerd tot een 5*5 meter grid waarbij de gebruiker de mach kan specificeren (default = 2). Des te hoger de macht des te kleiner is de invloed van punten die verder wegliggen.

Naast het gecorrigeerde AHN bestand wordt tevens een grid aangemaakt waarin die cellen worden afgebeeld die veranderen ten opzicht van het originele AHN. Het strekt tot de aanbeveling dit grid te gebruiken en te analyseren om tot optimale instellingen te komen.

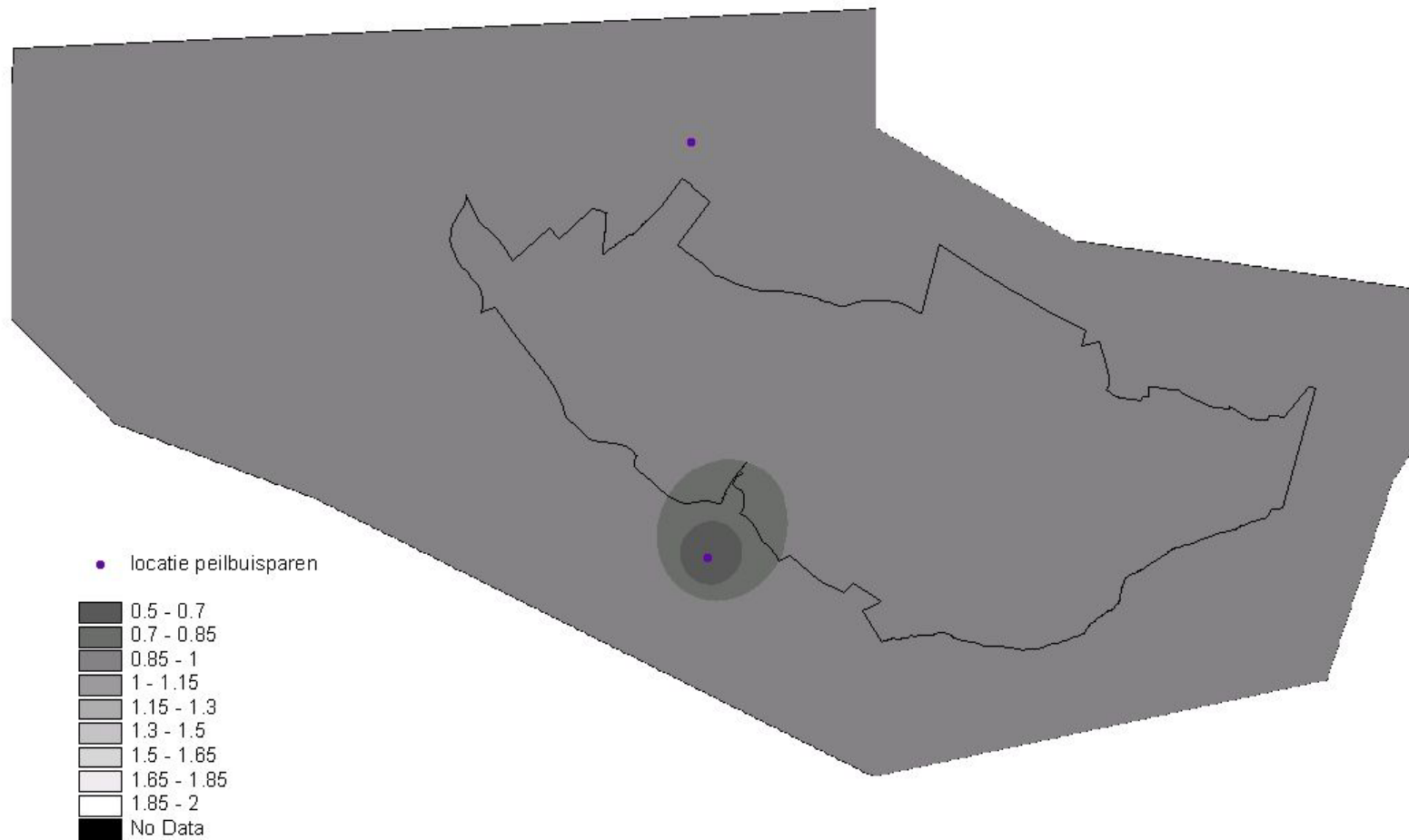
Bijlage C Figuren bij gevoeligheidsanalyse en calibratie



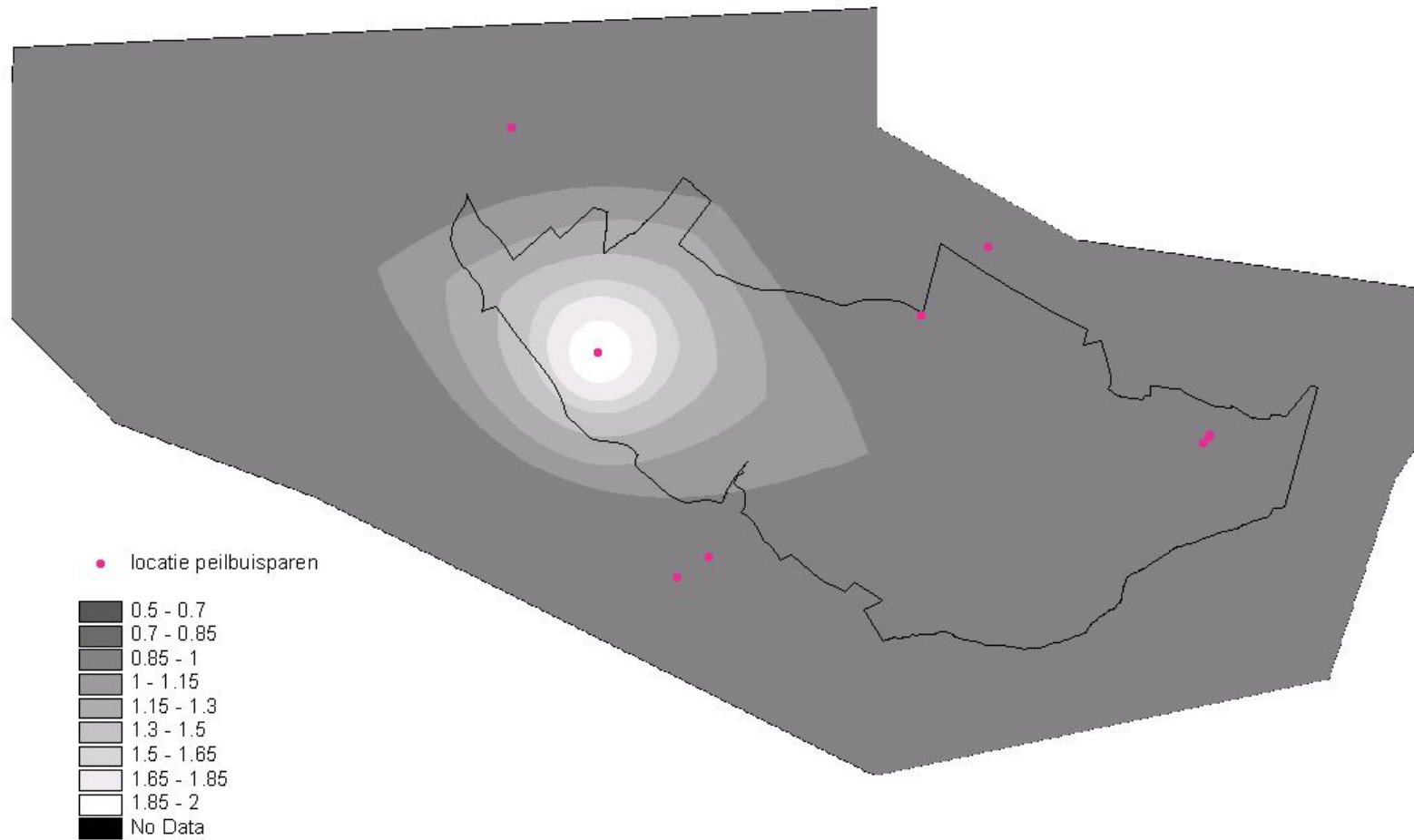
Figuur C1: Verschil tussen berekende en gemeten gemiddelde grondwaterstand deklaag (m). Rood: droger berekend dan gemeten; Blauw: natter berekend dan gemeten.



Figuur C2 : Verschil tussen berekende en gemeten gemiddelde grondwaterstand eerste watervoerende pakket 2 (m). Rood: droger berekend dan gemeten; Blauw: natter berekend dan gemeten.



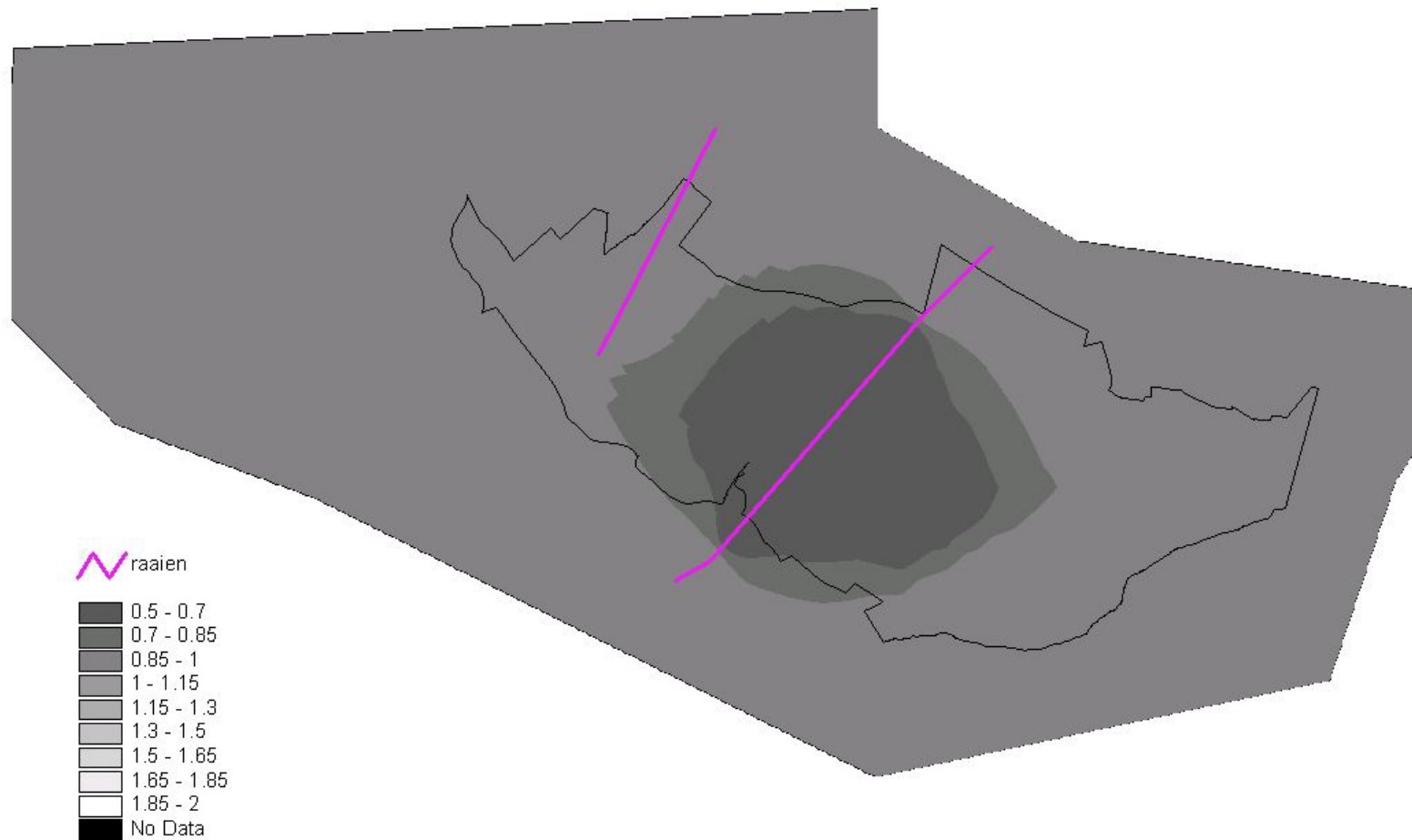
Figuur C3: Ruimtelijke calibratiefactoren voor de k -waarde van de tweede scheidende laag (laag5)



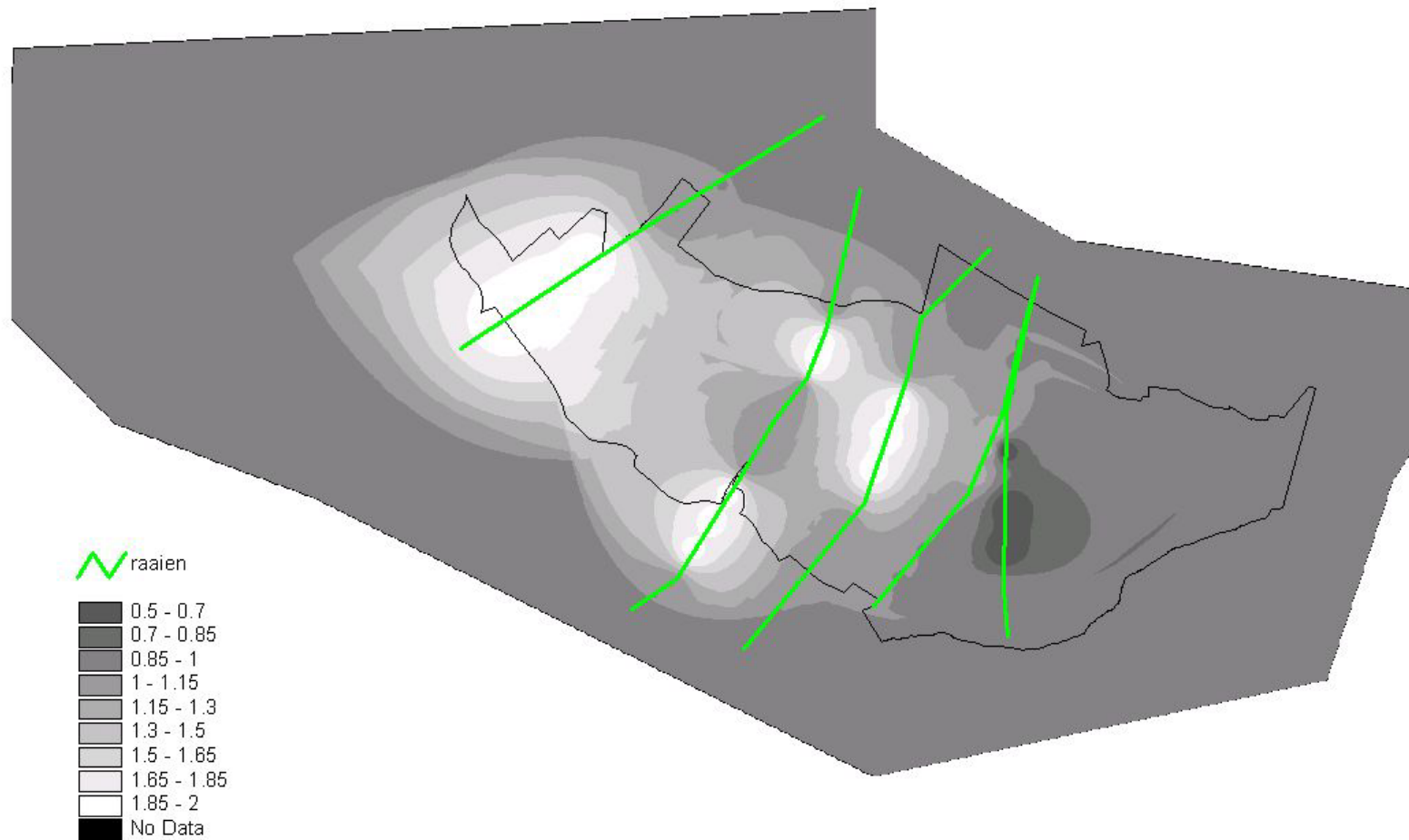
Figuur C4: Ruimtelijke calibratiefactoren voor de k -waarde van de eerste scheidende laag (laag3)



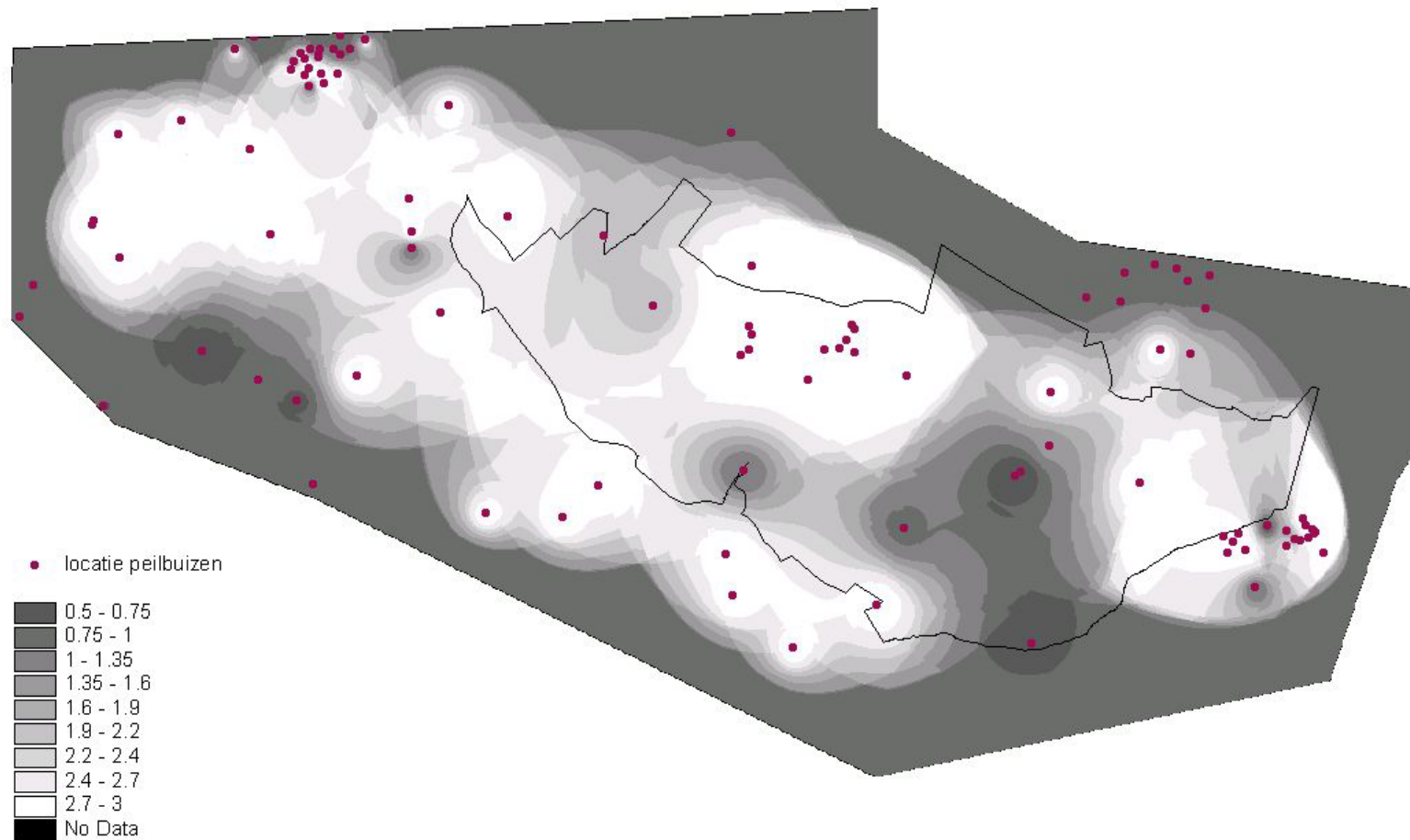
Figuur C5: Ruimtelijke calibratiefactoren voor de k -waarde van de deklaag (laag5)



Figuur C6: Ruimtelijke calibratiefactoren voor de k-waarde van het tweede watervoerende pakket (laag4).

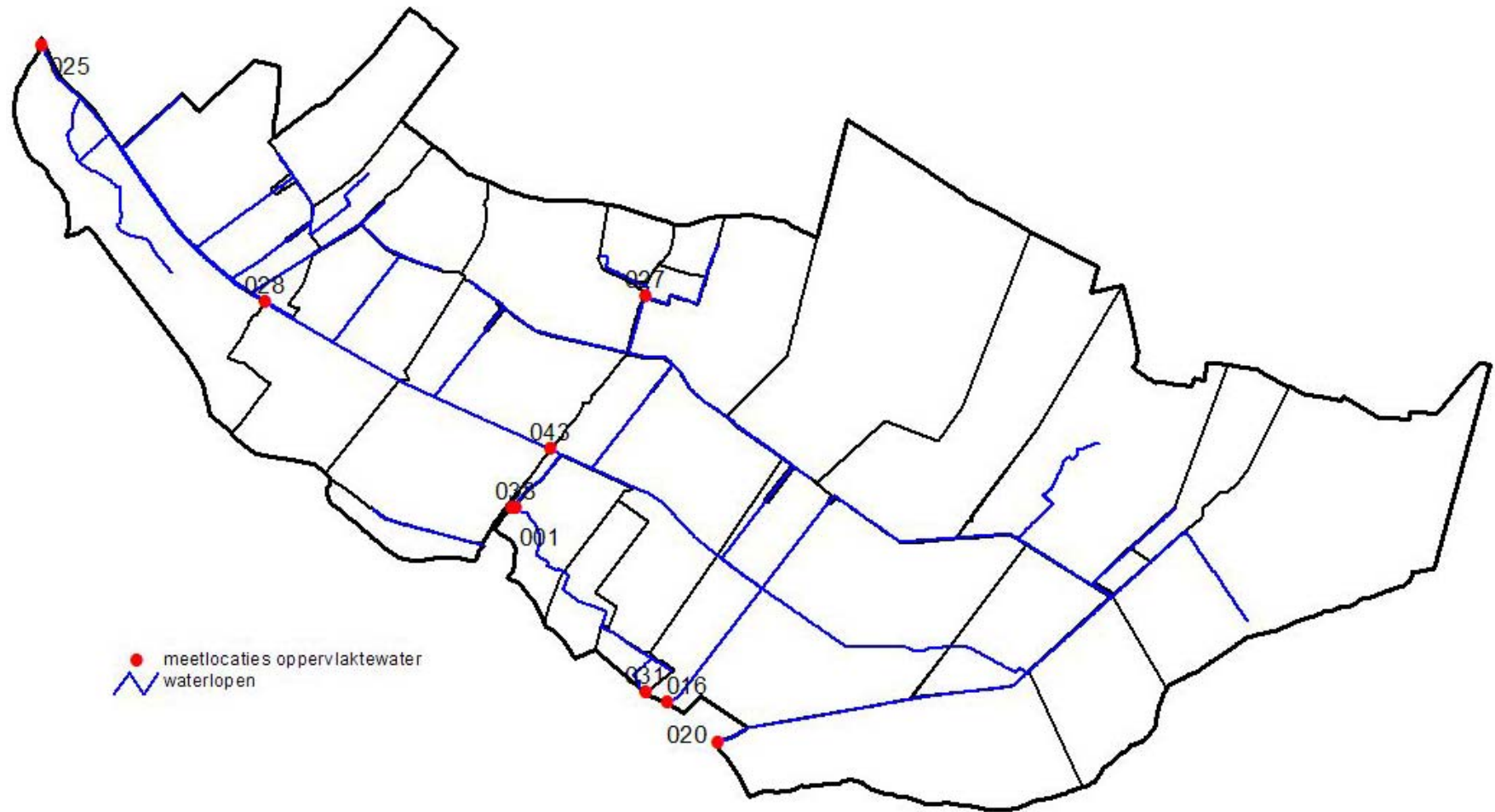


Figuur C7 Ruimtelijke calibratiefactoren voor de k -waarde van het eerste watervoerende pakket (laag2)

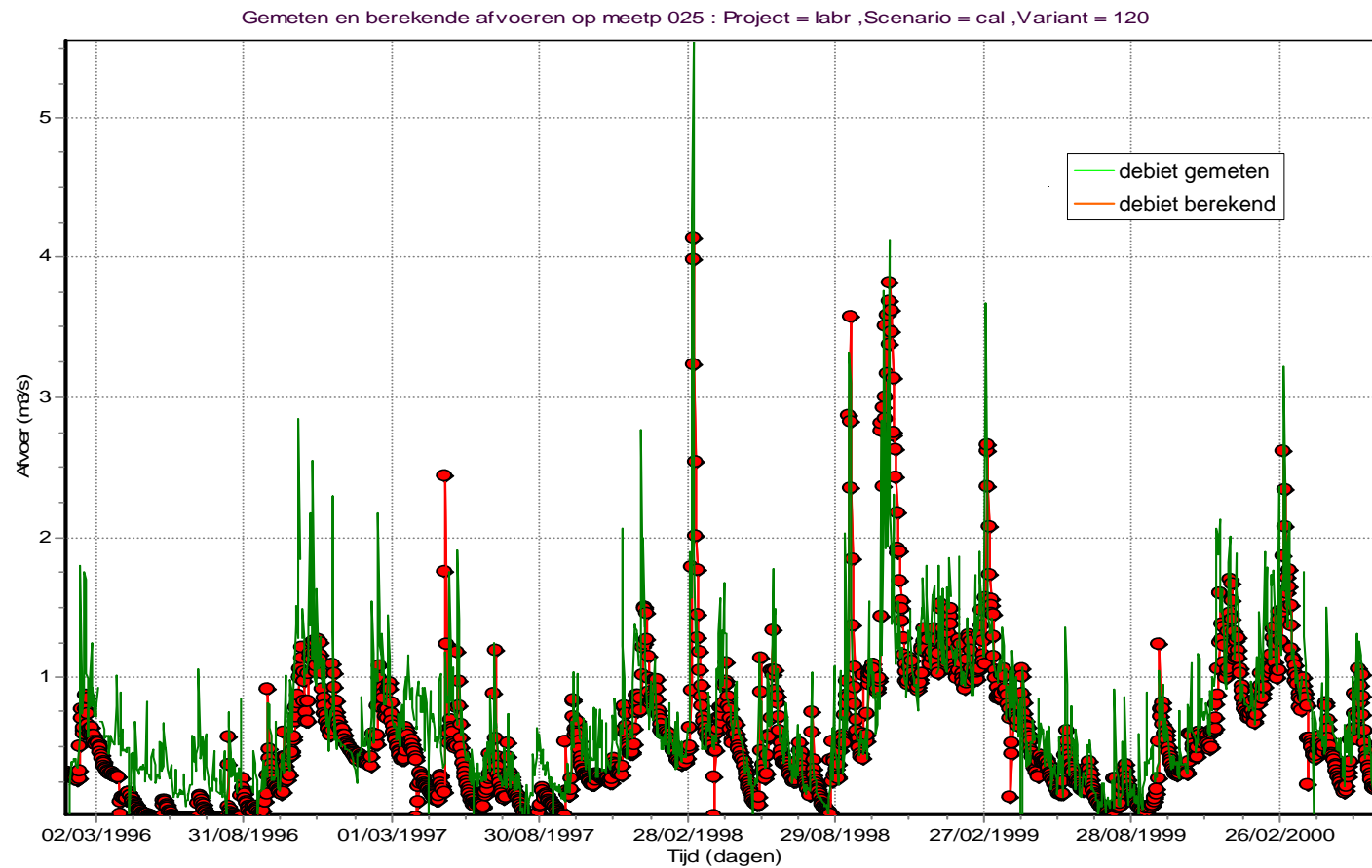


Figuur C8: Ruimtelijke calibratiefactoren voor de k-waarden van de deklaag bij de calibratie van het topsysteem.

Bijlage D Metingen oppervlaktewater



figuur D1: locaties van meetpunten van het oppervlaktewater.

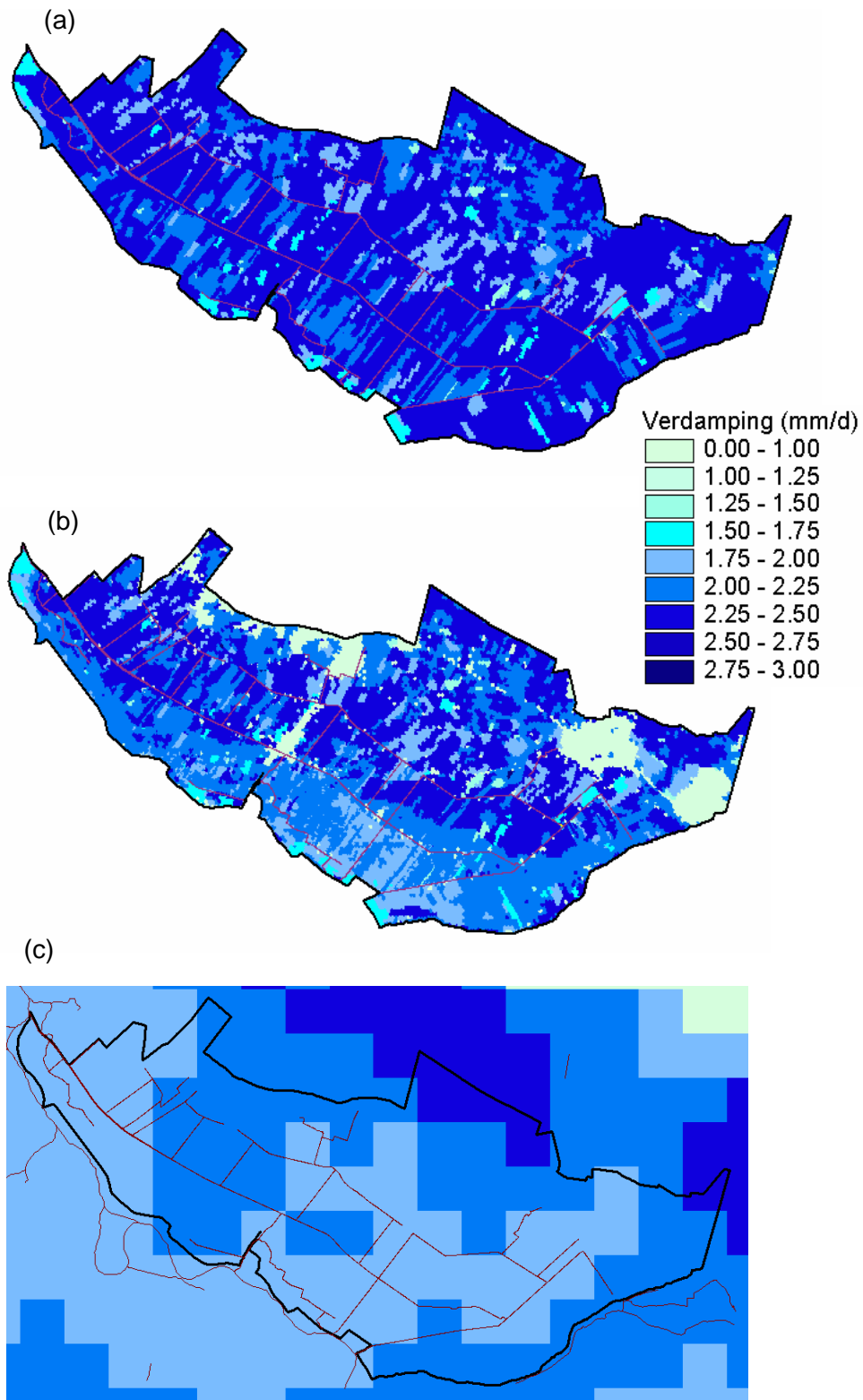


Figuur D2: Vergelijking van de berekende en de gemeten afvoer voor de periode 1996 tot halverwege 2000 voor meetpunt 025.

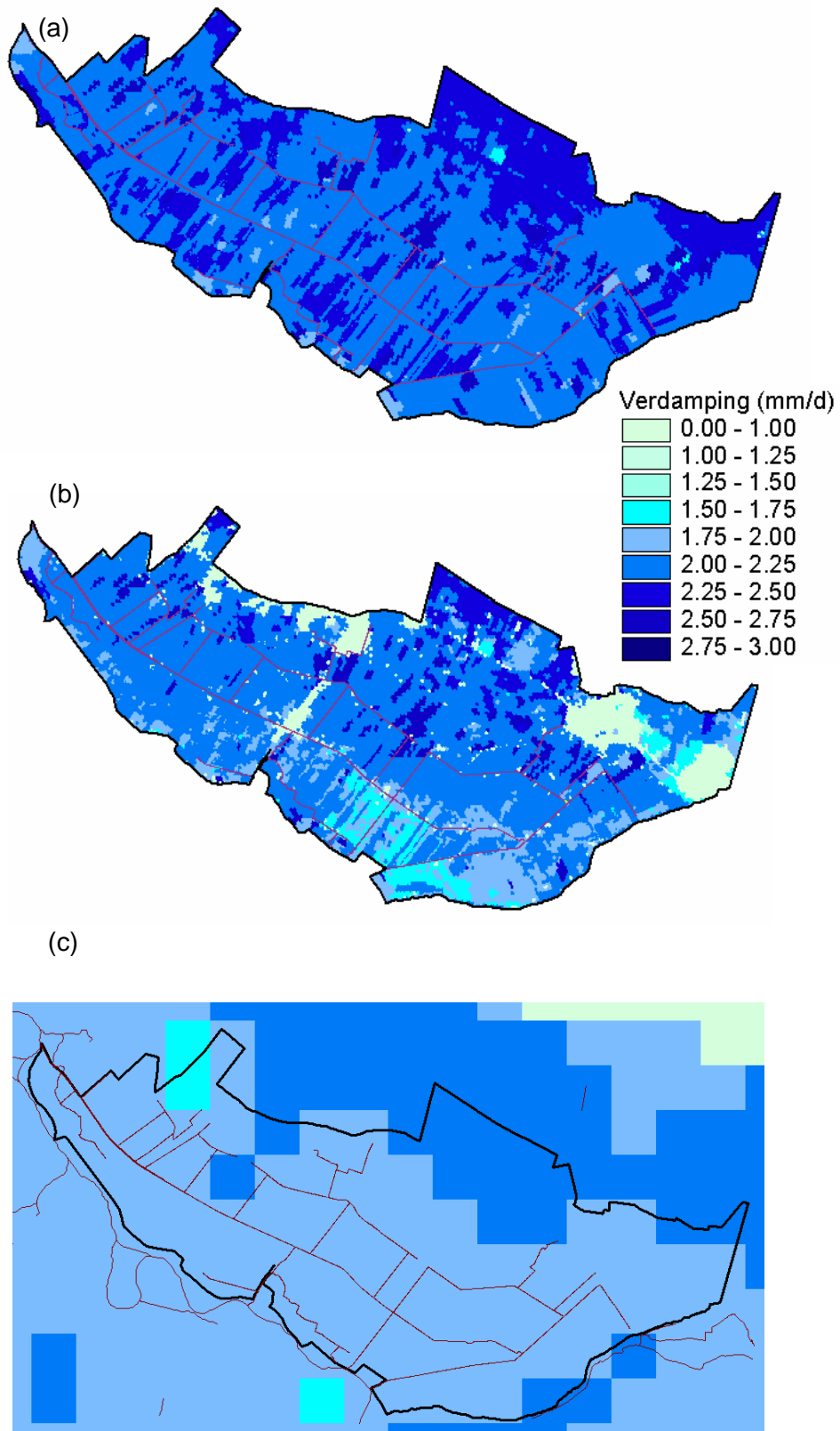
Bijlage E Vergelijking SIMGRO en SEBAL verdamping

Opmerking ten aanzien van de figuren in deze bijlage:

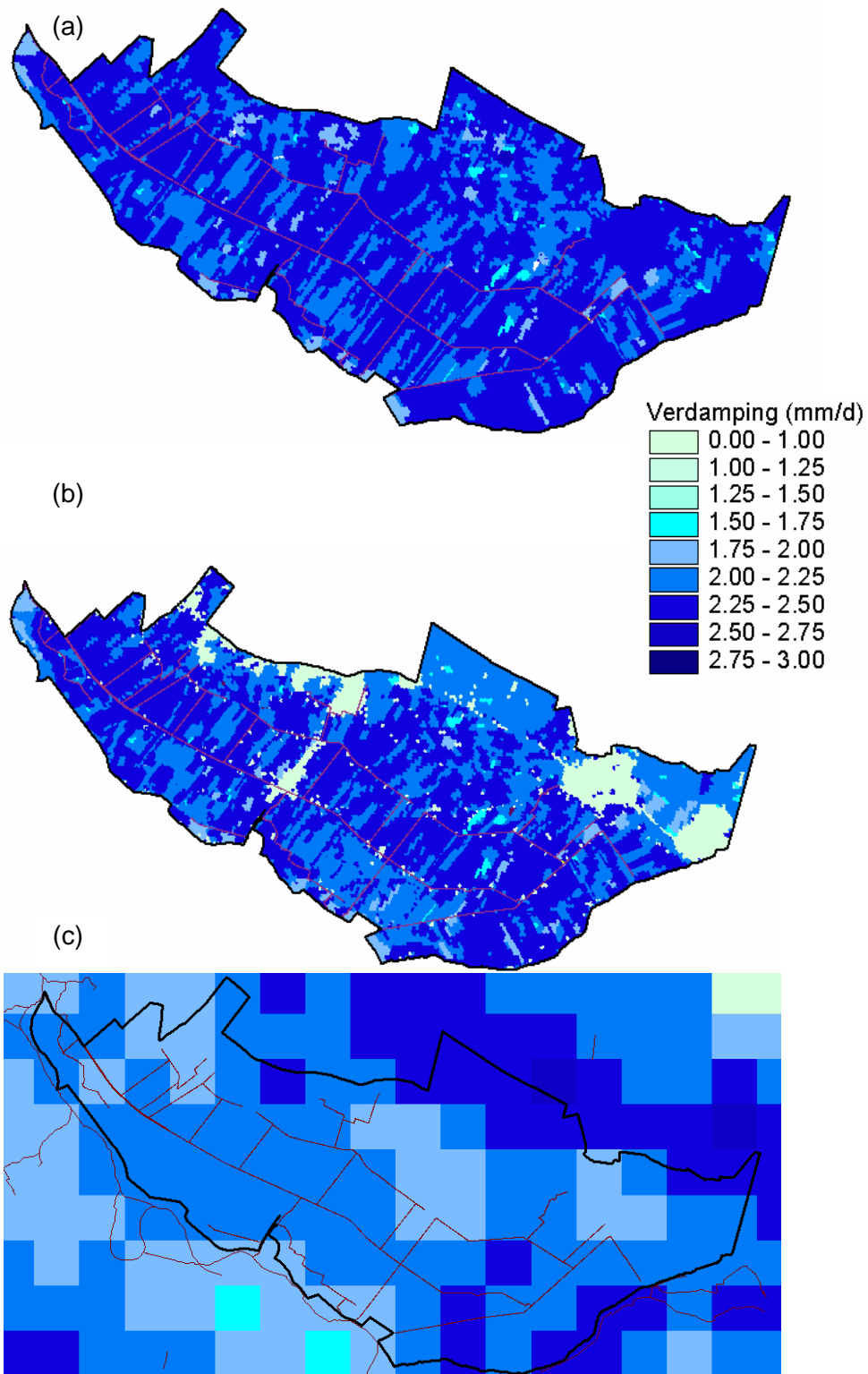
In het kaartbeelden van actuele verdamping volgens SIMGRO zijn de stedelijke gebieden te herkennen aan de groene vlekken, met sterke verdampingsreductie. Dat de stedelijke gebieden een sterke reductie vertonen, zelfs in kwartalen zonder neerslagtekort, komt doordat in de potentiële verdamping nog niet het verharde oppervlak verdisconteerd is. Uitgebeeld is dus de potentiële verdamping van de niet-verharde delen. De gemiddelde potentiële verdamping is natuurlijk veel lager. Genomen ten opzichte van dat gemiddelde zal er in de kwartalen met geen neerslagtekort in werkelijkheid geen verdampingsreductie zijn van het stedelijk groen.



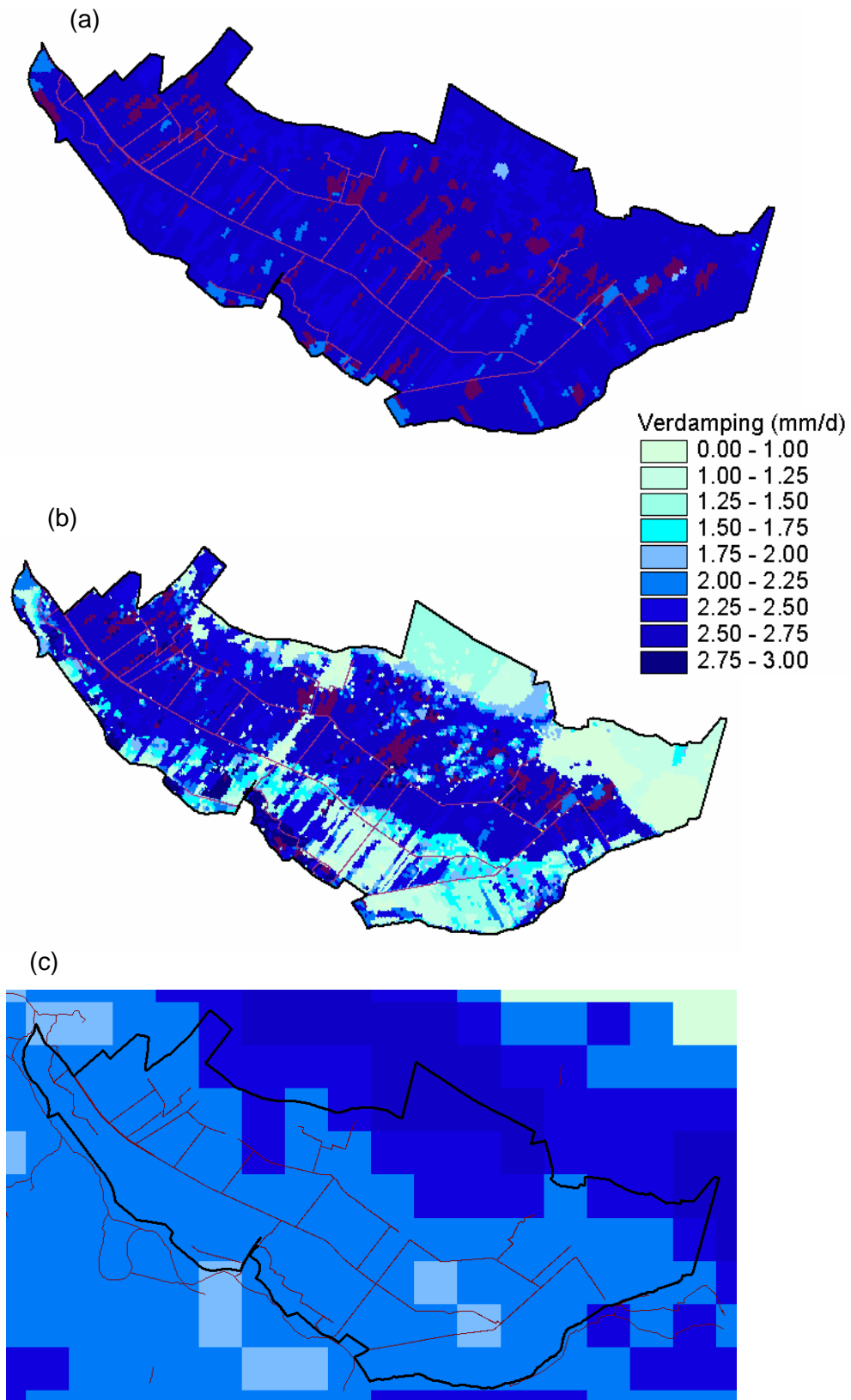
Figuur E1: Verdampingsbeelden voor het tweede kwartaal van 1998: potentiële verdamping volgens SIMGRO (a), actuele verdamping volgens SIMGRO (b) en actuele verdamping volgens SEBAL (c)



Figuur E2: Verdampingsbeelden voor het derde kwartaal van 1998: potentiële verdamping volgens SIMGRO (a), actuele verdamping volgens SIMGRO (b) en actuele verdamping volgens SEBAL (c)

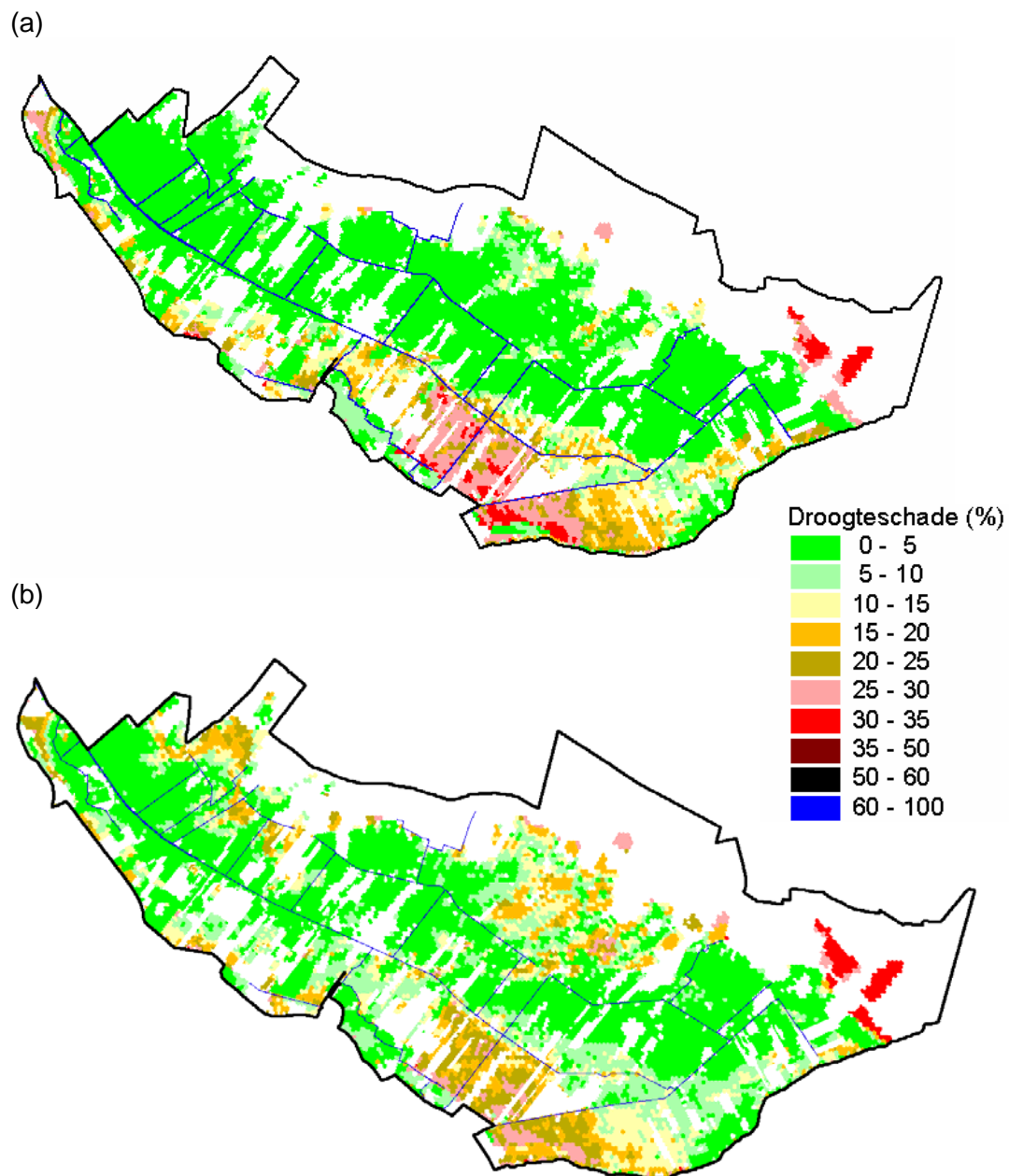


Figuur E3: Verdampingsbeelden voor het tweede kwartaal van 1995: potentiële verdamping volgens SIMGRO (a), actuele verdamping volgens SIMGRO (b) en actuele verdamping volgens SEBAL (c)



Figuur E4: Verdampingsbeelden voor het derde kwartaal van 1995: potentiële verdamping volgens SIMGRO (a), actuele verdamping volgens SIMGRO (b) en actuele verdamping volgens SEBAL (c)

Bijlage F Droogteschade volgens SIMGRO-verdampingsreductie



Figuur F1: Droogteschade berekend op basis van de verdampingsreductie volgens SIMGRO met de oorspronkelijke bodemfysische schematisering (a) en na aanpassing van de rekenwijze voor de verdampingsreductie en na calibratie van de boemfysische parameters (b).

Bijlage G Natuurdoeltypen

1 Inleiding

Voor de bepaling van de doelrealisatie van terrestrische natuurdoelen is uitgegaan van de doelrealisatiefuncties die met behulp van de Waternood-applicatie 'Hydrologische Randvoorwaarden Natuur' zijn afgeleid uit de vegetatiebeschrijving van de Utrechtse Natuurdoeltypen (UNAT's). Bij het begin van het project is gekeken naar de mogelijkheid om gebruik te maken van de hydrologische randvoorwaarden zoals die door de provincie waren vastgelegd in de zogenaamde 'GGOS/UNAT tabel'. Deze optie is echter afgefallen. Bij een eerste analyse waren er al vragen gerezen over de juistheid van met name de GLG-grenzen uit de GGOS/UNAT-tabel (zie notitie Jansen en Runhaar 22 nov. 2002). Ook in andere studies bleek dat de hydrologische randvoorwaarden afgeleid uit de tabel niet altijd voldeden. Daarom is door de provincie aan de Grontmij de opdracht gegeven de milieuvorwaarden voor de Utrechtse natuurdoeltypen verder uit te werken (Grontmij 2003, in voorbereiding).

Om dat te kunnen doen was het nodig de Utrechtse natuurdoeltypen nauwkeuriger te omschrijven. Het was namelijk niet altijd duidelijk welke vegetatietypen tot een bepaald natuurdoeltype behoren, en dus ook niet waar precies de grenzen tussen natuurdoeltypen lagen. Door de Grontmij is daarom een tabel gemaakt waar per natuurdoeltype wordt aangegeven welke vegetatietypen deel uitmaken van het natuurdoeltype en hoe kenmerkend ze zijn voor het doeltype. Die tabel is in deze studie gebruik als uitgangspunt om de hydrologische randvoorwaarden voor de UNAT's te bepalen.

Omdat de UNAT's op provinciale schaal nogal breed zijn omgrensd zijn, en de precieze vegetatiesamenstelling van de doeltypen van gebied tot gebied kan verschillen, is in een overleg met de HDSR en de Provincie Utrecht (overleg 14 maart 2003) besloten om voor het gebied uit te gaan van een op het studiegebied afgestemde detaillering van de UNAT-indeling waarin de typen smaller zijn gedefinieerd en afgestemd op de in het gebied aanwezige of te verwachten variatie. In het volgende wordt ingegaan op de gebiedsgerichte uitwerking van de UNAT's voor de Langbroekerwetering en omgeving, en op de afleiding van de doelrealisatiefuncties voor deze eenheden.

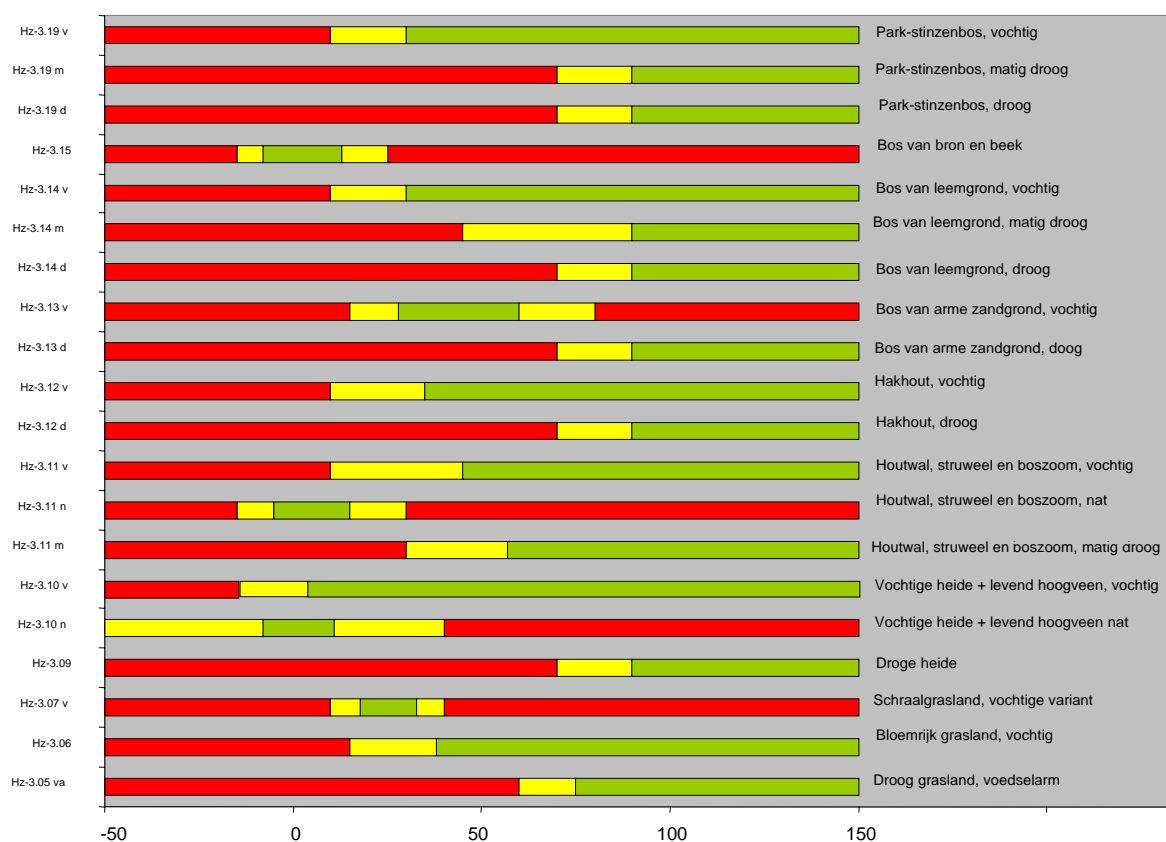
2 Gebiedseigen invulling voor Kromme-Rijgebied

De detaillering van de doeltypen is uitgevoerd door Provincie Utrecht (E. van den Dool) van de provincie Utrecht. Ze is daarbij uitgegaan van de eerder genoemde tabel van de Grontmij. Aan de definitie van de natuurdoelen is vervolgens een gebiedsspecifieke invulling gegeven door vegetatietypen die in het studiegebied niet thuishoren uit het doeltype te verwijderen en eventueel vegetatietypen die in het studiegebied erg kenmerkend voor het doeltype een hogere weegwaarde te geven. Een voorbeeld is het doeltype Hz-3.15, 'Bos van bron en beek': het Vogelkers-Essenbos dat vooral in de beekdalen voorkomt is verwijderd uit het type, zodat alleen het Elzenzegge-Elzenbroekbos overblijft. Daarbij heeft ze zich beperkt tot de vegetatietypen die zijn opgenomen in de Waternood-applicatie 'Hydrologische Randvoorwaarden Natuur', en zijn waar nodig aanduidingen op het niveau van subassociaties omgezet in aanduidingen op het niveau van associaties. Op basis van commentaar van Alterra (J. Runhaar) is deze

tabel nog op een aantal punten aangepast (aanscherping onderscheid tussen natte en vochtige heide, indeling van Abelen-Iepenbos bij vochtige in plaats van natte bosdoeltypen). De resulterende natuurdoeltype-definities zijn weergegeven in tabel 1.

3 Afleiding hydrologische randvoorwaarden GVG, GLG en droogtestress

De hydrologische randvoorwaarden zijn door Alterra bepaald met behulp van de Waterlood-applicatie 'Hydrologische Randvoorwaarden Natuur' door de definities van de natuurdoeltypen uit tabel 1 in te voeren in de applicatie en vervolgens middels de optie 'Export' een tabel met doelrealisatiefuncties per UNAT te laten aanmaken. De resultaten zijn opgenomen in tabel 2. Ter illustratie zijn voor de hogere zandgronden in figuur 1 de doelrealisatiefuncties voor de GVG grafisch weergegeven.



Figuur 1 Doelrealisatiefuncties UNAT's hogere zandgronden voor GVG (in cm -mv). Rood: geen doelrealisatie, geel: suboptimaal en groen: optimaal.

Zoals te zien is de bandbreedte waarbij het type optimaal ontwikkeld kan worden vrij beperkt (let niet op functies waar het optimale bereik ver naar rechts toe doorloopt; dat zijn doeltypen waar juist de vochtleverantie de kritische factor is en niet de voorjaarsgrondwaterstanden). Wel is bij een aantal doeltypen de afstemming tussen verwante typen nog onbevredigend. Bij de natte en vochtige heide (hz-3.10n en hz-3.10v) is er vrij veel overlap in hydrologische randvoorwaarden doordat bij natte heide ook minder natte heischrale graslanden zijn ondergebracht (19Aa2 Gentiano pneumonanthes-Nardetum). Ook bij park-stinzenbos (Ri-3.10) is de overlap erg groot, waarbij zich bovendien het verschijnsel voordoet dat het vochtige subtype (Ri-3.10v) met een maximale droogtestress van 50 dagen droger is dan het droge subtype (Ri-3.10d) dat een

maximale droogtestress van 15 dagen kent (zie tabel 2). Een verdere optimalisatie van de inhoud van de natuurdoeltypen lijkt daarom voor de toekomst gewenst. In deze studie is daartoe echter geen poging ondernomen en is uitgegaan van de doeltype-definitie zoals weergegeven in tabel 1.

4 Bepaling kwelafhankelijkheid typen

In tabel 2 is ook aangegeven welke UNAT's in het Kromme-Rijngebied afhankelijk zijn van kwel of infiltratie. Er zijn slechts twee doeltypen die in het studiegebied beschouwd kunnen worden als zijnde afhankelijke van kwel. Bij het doeltype Hz-3.15 (Bos van bron en beek) is de toekenning eenduidig omdat het doeltype slechts één vegetatietype omvat, het Elzenzegge-Elzenbroek, dat vrijwel altijd aan kwelomstandigheden is gebonden. Bij doeltype Ri-3.4 (Nat schraalgrasland) is de toekenning minder eenduidig, omdat dit type zowel een vegetatietype omvat dat vooral voorkomt op voedselrijke, regelmatig overstroomde plekken (Associatie van Geknikte vossestaart) als een vegetatietype dat kan voorkomen op matig voedselrijke plekken onder invloed van overstroming of kwel (Associatie van Boterbloemen en Waterkruiskruid), als een type dat strikt gebonden is aan kwel (Associatie van Engelwortel en Moeraszegge). Gezien het feit dat overstroming in het gebied geen rol lijkt te spelen is aangenomen dat kwel een voorwaarde vormt voor de buffering van de standplaats. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat op kalkrijke kleigrond dit type ook bij afwezigheid van kwel nog langdurig (tientallen jaren?) kan voorkomen als gevolg van buffering door in de bodem aanwezige kalk.

Naast deze kwelafhankelijke typen komt nog een doeltype voor dat kenmerkend is voor intermediaire situaties, waarin zeer lokale kwel met kalkarm grondwater optreedt (Hz-3.7v Vochtig schraalgrasland). Ook komen een paar voedselarme zure droge typen voor die kenmerkend zijn voor infiltratiegebieden op zand.

Literatuur

Grontmij, 2003 (in prep). Milieuvorwaarden voor Utrechtse Natuurdoeltypen. Grontmij, Arnhem.

Jansen, P.C. en J. Runhaar. 2002. Toelichting op de referentiegrondwaterstand en de hydrologische randvoorwaarden voor de realisatie van natuurdoelen in het gebied Langbroekerwetering van het Hoogheemraadschap Stichtse Rijnlanden. Concept, 22 nov. 2002

- | | | | |
|---|--|---|---|
|  | Bloemrijk grasland, vochtig |  | Hakhout, vochtig |
|  | Bos van arme zandgrond, droog |  | Houtwal, struweel en boszoom, matig droog |
|  | Bos van arme zandgrond, vochtig |  | Houtwal, struweel en boszoom, nat |
|  | Bos van leemgrond, vochtig |  | Houtwal, struweel en boszoom, vochtig |
|  | Bos van leemgrond, droog |  | Nat schraalgrasland |
|  | Bos van leemgrond, matig droog |  | Park-stinzenbos, droog |
|  | Bosgemeenschap van rivierklei, droog |  | Park-stinzenbos, vochtig |
|  | Bosgemeenschap van rivierklei, nat |  | Parkstinzenbos, vochtig |
|  | Bosgemeenschap van rivierklei, vochtig |  | Schraalgrasland, vochtige variant |
|  | Bosgemeenschap van zandgrond en lichte k |  | Stroomdalgrasland in uiterwaarden |
|  | Droge heide |  | Stroomdalgrasland, droog |
|  | Droog grasland, voedselarm |  | Vochtig stroomdalgrasland |
|  | Grasland, vochtig (met ontwikkelingspers |  | Vochtige heide + levend hoogveen nat |
|  | Hakhout en griend, vochtig |  | Vochtige heide + levend hoogveen, vocht |
|  | Hakhout, droog | | |



Figuur G1: Natuurdoelen volgens de Utrechtse natuurdeoltypten (UNAT's)

Tabel G1 Gebiedsspecifieke invulling UNAT's voor het kromme-Rijngebied

UNAT	Ass. nr	Associatie Naam	Weeg- waarde
Hz-3.05 va - Droog grasland, voedselarm	14Bb1	Associatie van Schapegras en Tijn	1
Hz-3.06 - Bloemrijk grasland, vochtig	16Bc1b	Kamgrasweide; subass. met Moerasrolklaver	1
	16Bc1a	Kamgrasweide; typische subass.	1
Hz-3.07 v - Schraalgrasland, vochtige variant	19Aa2	Associatie van Klokjesgentiaan en Borstelgras	1
Hz-3.09 - Droge heide	14Aa1	Associatie van Buntgras en Heidespurrie	1
	20Aa1	Associatie van Struikhei en Stekelbrem	1
Hz-3.10 n - Vochtige heide + levend hoogveen nat	9Aa3	Associatie van Moerasstruisgras en Zompzegge	2
	28Aa1	Draadgentiaan-associatie	2
	10Ab1	Associatie van Draadzegge en Veenpluis	2
	19Aa2	Associatie van Klokjesgentiaan en Borstelgras	2
	11Aa2a	Ericetum tetralicis sphagnetosum	2
	11Ba1	Erico-Sphagnetum magellanici	2
Hz-3.10 v - Vochtige heide + levend hoogveen, vochtig	11Aa1	Associatie van Moeraswolfsklauw en Snavelbies	1
	11Aa2c	Ericetum tetralicis	1
Hz-3.11 m - Houtwal, struweel en boszoom, matig droog	42Aa3	Bochtige smele-Beukenbos	1
	42Aa2d	Beuken-Zomereikenbos; subass. met Pijpestrootje	2
Hz-3.11 n - Houtwal, struweel en boszoom, nat	36Aa1	Associatie van Geoorde wilg	2
	36Aa2	Associatie van Grauwe wilg	2
	39Aa2	Elzenzegge-Elzenbroek	8
Hz-3.11 v - Houtwal, struweel en boszoom, vochtig	37Ab1	Associatie van Sleedoorn en Eenstijlige meidoorn	1
	43Aa2	Essen- Iepenbos	1
Hz-3.12 d - Hakhout, droog	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos	1
	42Aa1	Betulo-Quercetum roboris	1
Hz-3.12 v - Hakhout, vochtig	42Aa1d	Betulo-Quercetum molinietosum	1
	43Aa2	Essen- Iepenbos	1
Hz-3.13 d - Bos van arme zandgrond, droog	42Aa1	Berken-Eikenbos	1
Hz-3.13 v - Bos van arme zandgrond, vochtig	43Aa5	Vogelkers-Essenbos	1
Hz-3.14 d - Bos van leemgrond, droog	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos	1
Hz-3.14 m - Bos van leemgrond, matig droog	42Aa3	Bochtige smele-Beukenbos	1
Hz-3.14 v - Bos van leemgrond, vochtig	43Aa2	Essen- Iepenbos	1
Hz-3.15 - Bos van bron en beek	39Aa2	Elzenzegge-Elzenbroek	1

Hz-3.19 d - Park-stinzenbos, droog	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos	1
Hz-3.19 m - Park-stinzenbos, matig droog	42Ab1	Veldbies-Beukenbos	1
Hz-3.19 v - Park-stinzenbos, vochtig	43Aa2	Essen- Iepenbos	1
Ri-3.03 n - Rietland en Moeras, nat	8Bb4	Riet-associatie	1
Ri-3.03 u - Rietland en moeras, uiterwaarden	8Bb4	Riet-associatie	2
Ri-3.04 - Nat schraalgrasland	12Ba1	Associatie van Geknikte vossestaart	1
	16Ab4	Associatie van Boterbloemen en Waterkruiskruid	3
	16Ab6	Associatie van Gewone engelwortel en Moeraszegge	3
Ri-3.05 d - Stroomdalgrasland, droog	14Bc1	Associatie van Vetkruid en Tijn	1
	14Bc2	Associatie van Sikkelklaver en Zachte haver	2
Ri-3.05 u - Stroomdalgrasland in uiterwaarden	16Bb1a	Glanshaver-ass.; typische subass.	2
	16Bb1b	Glanshaver-ass.; subass. met Rietzwenkgras	2
	16Bb1c	Glanshaver-ass.; subass. met Gewone veldbies	2
	16Bb1d	Glanshaver-ass.; subass. met Sikkelklaver	2
	16Bc1a	Kamgrasweide; typische subass.	2
	16Bc1b	Kamgrasweide; subass. met Moerasrolklaver	2
	16Bc1c	Kamgrasweide; subass. met Veldgerst	2
	16Bc1d	Kamgrasweide; subass. met Ruige weegbree	2
Ri-3.05 v - Vochtig stroomdalgrasland	16Bb1a	Glanshaver-ass.; typische subass.	5
Ri-3.05 v - Vochtig stroomdalgrasland	16Bb1b	Glanshaver-ass.; subass. met Rietzwenkgras	1
	16Bb1c	Glanshaver-ass.; subass. met Gewone veldbies	1
	16Bb1d	Glanshaver-ass.; subass. met Sikkelklaver	1
	16Bc1a	Kamgrasweide; typische subass.	1
	16Bc1b	Kamgrasweide; subass. met Moerasrolklaver	1
	16Bc1c	Kamgrasweide; subass. met Veldgerst	1
	16Bc1d	Kamgrasweide; subass. met Ruige weegbree	1
Ri-3.06 u - Rivierduin en slik in uiterwaarden	14Bc1	Associatie van Vetkruid en Tijn	2
	14Bc2	Associatie van Sikkelklaver en Zachte haver	2
	29Aa2	Associatie van Goudzuring en Moerasandijvie	1
	29Aa4	Slijkgroen-associatie	2
	31Ba1	Slangekruid-associatie	2
Ri-3.07 d - Houtwal, struweel en boszoom, droog	31Ab3	Associatie van Ballote en andere Netels	1
	37Ab1	Associatie van Sleedoorn en Eenstijlige meidoorn	2
Ri-3.07 n - houtwal, struweel en boszoom, nat	36Aa1	Associatie van Geoorde wilg	2
	36Aa2	Associatie van Grauwe wilg	2
	43Aa2	Essen- Iepenbos	2

Ri-3.07 v - Houtwal, struweel en boszoom, vochtig	37Ab1	Associatie van Sleedoorn en Eenstijlige meidoorn	2
	43Aa1	Abelen-lepenbos	2
	43Aa2	Essen- lepenbos	2
Ri-3.08 n - Hakhout en griend, nat	36Aa1	Associatie van Geoorde wilg	2
	36Aa2	Associatie van Grauwe wilg	2
	43Aa2	Essen- lepenbos	2
Ri-3.08 v - Hakhout en griend, vochtig	43Aa2	Essen- lepenbos	1
	43Aa1	Violo odoratae-Ulmetum	1
Ri-3.09 - Bosgemeenschap van zandgrond en lichte klei	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos	1
Ri-3.10 d - Bosgemeenschap van rivierklei, droog	43Ab1	Eiken-Haagbeukenbos	1
Ri-3.10 n - Bosgemeenschap van rivierklei, nat	38Aa2	Gele lis-ooibos	2
Ri-3.10 u - Bosgemeenschap van rivierklei, uiterwaard	38Aa2	Gele lis-ooibos	2
Ri-3.10 v - Bosgemeenschap van rivierklei, vochtig	43Aa1	Abelen-lepenbos	1
	43Aa2	Essen- lepenbos	1
	43Aa5	Vogelkers-Essenbos	1
	43Ab1	Eiken-Haagbeukenbos	1
Ri-3.12 d - Parkstijnenbos, droog	43Aa2	Essen- lepenbos	2
Ri-3.12 v - Parkstijnenbos, vochtig	43Aa1	Abelen-lepenbos	1
	43Aa2	Essen- lepenbos	1
	43Aa5	Vogelkers-Essenbos	1

Tabel G2 Doelrealisatiefuncties UNAT's Langbroeker Wetering

Per natuurdoeltype worden voor GVG, GLG en droogtestress de volgende kritische parameterwaarden uit de doelrealisatiefuncties gegeven:

- a1 waarde waar beneden het type niet meer kan voorkomen
- b1 waarde waar boven het type optimaal voorkomt, dwz. geen beperking vormt voor de ontwikkeling of handhaving van het type

- b2 waarde waar beneden het type optimaal voorkomt
- a2 waarde waar boven het type niet meer kan voorkomen

Voor kwel wordt de afhankelijkheid van kwel/infiltratie als volgt aangegeven:

- 0 indifferent
- 1 regenwaterafhankelijk
- 2 intermediair
- 3 kwelafhankelijk

UNAT		GVG (cm -mv)				GLG (cm -mv)				Droogtestress (d)				Kwelafh
		a1	b1	b2	a2	a1	b1	b2	a2	a1	b1	b2	a1	
Hz-3.05 va	Droog grasland, voedselarm	60	75	999	999	0	0	0	0	15	25	999	999	0
Hz-3.06	Bloemrijk grasland, vochtig	15	38	999	999	0	0	0	0	-999	-999	3	20	0
Hz-3.07 v	Schraalgrasland, vochtige variant	10	18	33	40	0	0	0	0	-999	-999	10	25	2
Hz-3.09	Droge heide	70	90	999	999	0	0	0	0	20	43	999	999	1
Hz-3.10 n	Vochtige heide + levend hoogveen nat	-50	-8	11	40	0	0	0	0	-999	-999	5	25	1
Hz-3.10 v	Vochtige heide + levend hoogveen, vochtig	-15	3	999	999	0	0	0	0	-999	-999	8	25	1
Hz-3.11 m	Houtwal, struweel en boszoom, matig droog	30	57	999	999	0	0	0	0	1	17	999	999	0
Hz-3.11 n	Houtwal, struweel en boszoom, nat	-15	-5	15	30	-999	-999	50	70	0	0	0	0	0
Hz-3.11 v	Houtwal, struweel en boszoom, vochtig	10	45	999	999	0	0	0	0	-999	-999	13	35	0
Hz-3.12 d	Hakhout, droog	70	90	999	999	0	0	0	0	10	20	999	999	1
Hz-3.12 v	Hakhout, vochtig	10	35	999	999	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hz-3.13 d	Bos van arme zandgrond, doog	70	90	999	999	0	0	0	0	10	20	999	999	1
Hz-3.13 v	Bos van arme zandgrond, vochtig	15	28	60	80	0	0	0	0	-999	-999	5	20	0
Hz-3.14 d	Bos van leemgrond, droog	70	90	999	999	0	0	0	0	10	20	999	999	1

UNAT		GVG (cm -mv)				GLG (cm -mv)				Droogtestress (d)				Kwelaflh
		a1	b1	b2	a2	a1	b1	b2	a2	a1	b1	b2	a1	
Hz-3.14 m	Bos van leemgrond, matig droog	45	90	999	999	0	0	0	0	1	10	999	999	1
Hz-3.14 v	Bos van leemgrond, vochtig	10	30	999	999	0	0	0	0	-999	-999	0	15	0
Hz-3.15	Bos van bron en beek	-15	-8	13	25	-999	-999	50	70	0	0	0	0	3
Hz-3.19 d	Park-stinzenbos, droog	70	90	999	999	0	0	0	0	10	20	999	999	1
Hz-3.19 m	Park-stinzenbos, matig droog	70	90	999	999	0	0	0	0	-999	-999	30	40	1
Hz-3.19 v	Park-stinzenbos, vochtig	10	30	999	999	0	0	0	0	-999	-999	0	15	0
Ri-3.03 n	Rietland en Moeras, nat	-300	-200	-50	0	-999	-999	0	50	0	0	0	0	0
Ri-3.03 u	Rietland en moeras, uiterwaarden	-300	-200	-50	0	-999	-999	0	50	0	0	0	0	0
Ri-3.04	Nat schraalgrasland	-10	10	29	55	-999	-999	55	90	0	0	0	0	3
Ri-3.05 d	Stroomdalgrasland, droog	70	90	999	999	0	0	0	0	20	28	999	999	0
Ri-3.05 u	Stroomdalgrasland in uiterwaarden	15	72	999	999	0	0	0	0	-999	-999	12	35	0
Ri-3.05 v	Vochtig stroomdalgrasland	15	71	999	999	0	0	0	0	-999	-999	10	35	0
Ri-3.06 u	Rivierduin en slik in uiterwaarden	-50	50	999	999	0	0	0	0	20	33	999	999	0
Ri-3.07 d	Houtwal, struweel en boszoom, droog	40	70	999	999	0	0	0	0	-999	-999	28	45	0
Ri-3.07 n	houtwal, struweel en boszoom, nat	-15	9	999	999	0	0	0	0	-999	-999	2	15	0
Ri-3.07 v	Houtwal, struweel en boszoom, vochtig	10	50	999	999	0	0	0	0	-999	-999	20	50	0
Ri-3.08 n	Hakhout en griend, nat	-15	9	999	999	0	0	0	0	-999	-999	2	15	0
Ri-3.08 v	Hakhout en griend, vochtig	10	45	999	999	0	0	0	0	-999	-999	18	50	0
Ri-3.09	Bosgemeenschap van zandgrond en lichte klei	70	90	999	999	0	0	0	0	10	20	999	999	0
Ri-3.10 d	Bosgemeenschap van rivierklei, droog	10	25	999	999	0	0	0	0	-999	-999	5	20	0
Ri-3.10 n	Bosgemeenschap van rivierklei, nat	-25	-13	13	25	0	20	999	999	-999	-999	1	10	0
Ri-3.10 u	Bosgemeenschap van rivierklei, uiterwaard	-25	-13	13	25	0	20	999	999	-999	-999	1	10	0
Ri-3.10 v	Bosgemeenschap van rivierklei, vochtig	10	36	999	999	0	0	0	0	-999	-999	11	50	0
Ri-3.12 d	Parkstinzenbos, droog	10	30	999	999	0	0	0	0	-999	-999	0	15	0
Ri-3.12 v	Parkstinzenbos, vochtig	10	39	999	999	0	0	0	0	-999	-999	13	50	0

Bijlage H Neergeschaalde GXG-kaarten voor natuurevaluatie

