

Actualisatie grondwaterdynamiek Waterschap De Dommel

Actualisatie grondwaterdynamiek Waterschap De Dommel

T. Hoogland
M.R. Hoogerwerf
A.J. van Kekem

Alterra-rapport 1008

Alterra, Wageningen, 2004

REFERAAT

Hoogland, T., M.R. Hoogerwerf & A.J. van Kekem, 2004. *Actualisatie grondwatertrappenkaart Waterschap de Dommel*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1008. 44 blz.; 5 fig.; 7 tab.; 18 ref.

Omdat de provinciale kartering van de grondwaterdynamiek (Gd) volgens het waterschap de Dommel vooral in de beekdalen te droog gekarteerde waarden liet zien, zijn in opdracht van het waterschap geactualiseerde ruimtelijke bestanden gemaakt van de gemiddelde hoogste, voorjaars- en laagste grondwaterstand (GHG, GVG en GLG) en van de grondwatertrap (Gt).

Als basisinformatie zijn hierbij aanvullende incidentele metingen en tijdreeksen van grondwaterstanden gebruikt. Door toepassing van technieken uit de tijdreeksmodellering en regressietechnieken is een uniforme set puntschattingen van GHG, GVG en GLG verkregen. Deze gegevens zijn, gewogen naar kwaliteit, gebruikt om relaties met recent verzamelde hoogtegegevens (het AHN) te leggen. Door gebiedsdekkende toepassing van deze relaties en een statistische foutcorrectie zijn gedetailleerde ruimtelijkebestanden verkregen met de resolutie van het AHN waarin GHG, GVG en GLG en hun voorspelfout worden weergegeven.

De geactualiseerde Gd-kaart geeft vooral in de beekdalen een natter beeld dan de provinciale kartering en levert een groter nauwkeurigheid in de gekarteerde grondwaterdynamiek.

Trefwoorden: actualisatie, Gd, grondwaterdynamiek, grondwaterstanden, Gt, kartering, statistiek

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door € 15,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 1008. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2004 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

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

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding en doelstellingen onderzoek	11
1.2 Begrippenkader	11
1.3 Indeling van het rapport	12
2 Methoden bij kartering van de grondwaterdynamiek	13
2.1 Overzicht van de methode	13
2.2 Indeling van het gebied in homogene deelgebieden	14
2.3 De GxG op peilbuislocaties	15
2.3.1 Selectie van grondwaterstandsreeksen	15
2.3.2 Overige grondwaterstandsreeksen	16
2.3.3 Berekening van de klimaatrepresentatieve GxG voor peilbuislocaties	16
2.4 De GxG op tijdelijke meetpunten	19
2.4.1 Berekening van de GxG voor gerichte-opnamelocaties	20
2.5 Gebiedsdekkende hulpinformatie over topografie en waterhuishouding	21
2.5.1 Afleiding van hulpinformatie	21
2.6 Gebiedsdekkende predictie van de GxG	24
2.6.1 Regressieanalyse	25
2.6.2 Ruimtelijke structuur van de residuen	26
2.6.3 Universal co-kriging van GxG	26
3 Gebruikte gegevens en resultaten	29
3.1 Gebiedsindeling	29
3.2 Puntgegevens	30
3.2.1 Klimaatsrepresentatieve GxG uit meetreeksen	30
3.2.2 Gerichte opnames	31
3.2.3 Aanvullende gerichte winter opnames	31
3.3 De omzetting van grondwaterstanden in GxG	32
3.4 Gebiedsdekkende predictie van GxG	32
3.4.1 Relaties tussen hulpinformatie en GxG	32
3.4.2 Het geschatte variogrammodel	32
3.4.3 De GxG predictie en nauwkeurigheid van predictie	33
3.5 Schatting van de gemiddelde GHG per kaartvlak	34
3.6 Vergelijking Gd-kartering 2000 en huidige kartering.	35
3.6.1 De voorspelde GxG	35
3.6.2 De gekwantificeerde nauwkeurigheid van GxG voorspellingen	36
4 Conclusies en aanbevelingen	39
Literatuur	41
Bijlage 1 Gebruikte predictoren per stratum bij het voorspellen van GHG, GVG en GLG	43

Woord vooraf

Het Waterschap De Dommel heeft Alterra opdracht gegeven om actuele grondwatertrappenkaarten te vervaardigen van het beheersgebied van het waterschap. Deze worden onder andere gebruikt voor het vaststellen van waterschapslasten.

Voor het vervaardigen van de grondwatertrappenkaart is de door Alterra ontwikkelde modelmatige Gd-methodiek gebruikt. Doordat de methode tijdens de verwerking van de gegevens op onderdelen werd bijgesteld, is er een aanzienlijke vertraging opgetreden in de oplevering van de gegevensbestanden. Alterra is het waterschap dan ook dank verschuldigd voor het begrip en geduld dat het heeft opgebracht.

Samenvatting

In het begin van de jaren negentig is voor het waterschap een classificatiekaart gemaakt op basis van een grondwaterklassenindeling. De indeling is gebaseerd op de gemiddelde hoogste wintergrondwaterstand (GHG) en luidt als volgt:

Aanduiding	GHG (cm-mv)	Klasse
Laag	0 – 40	A
Middel	40 – 80	B
Hoog	> 80	C

In 2000 is voor de Provincie Noord-Brabant de Grondwaterdynamiek (Gd) in kaart gebracht. Onderdeel van de Gd is een bijgestelde, klimaatsrepresentatieve, GHG kaart. Bij een vergelijking tussen de classificatiekaart en de GHG kaart uit de Gd bleek dat in sommige gebieden de klassen uit de classificatiekaart niet overeenkomen met de klassen op de GHG kaart uit de Gd kartering.

Voor een deel kunnen deze verschillen worden verklaard uit het feit dat de Gd kaart 10 jaar later is vervaardigd dan de classificatiekaart, waardoor ook recente veranderingen in grondwaterstand in deze kaart zijn verwerkt die nog niet op de classificatiekaart voorkomen. Voor een ander deel kunnen verschillen worden verklaard uit een verschillende doelstelling voor beide kaarten. De classificatiekaart is voor een kleiner gebied vervaardigd dan de Gd een heeft daarom een grotere dichtheid aan waarnemingen en daarmee een groter detail.

Om tot een nieuwe GHG kaart te komen die kan worden gebruikt voor het vaststellen van een nieuwe classificatiekaart is daarom besloten de huidige Gd kaart bij te stellen in de gebieden binnen het waterschap de Dommel waarvoor beide kaarten een afwijkende indeling laten zien. Het gaat hier om gebieden waar de GHG uit de Gd zowel een drogere als een nattere indeling laat zien.

Alterra aanvaardde in 2002 een opdracht van waterschap de Dommel tot de levering van bijgestelde gebiedsdekkende actuele GHG-, GLG- en Gt-bestanden. Onderliggend rapport geeft de hierbij gehanteerde methoden en bereikte resultaten weer.

De kartering van de grondwaterdynamiek kan gezien worden als een stapsgewijze verdichting van ruimtelijke meetgegevens tot een gebiedsdekkend bestand:

1. Startpunt is het bestaande meetnet van grondwaterstandbuizen met ondiepe filters. Hier maken het NITG-TNO meetnet maar ook door derden onderhouden meetnetten deel van uit. De in deze meetnetten gemeten grondwaterstandsmetreeksen worden geanalyseerd met tijdreeksmodellen zodat een klimaatsrepresentatief beeld van de grondwaterdynamiek ontstaat dat tevens de huidige inrichting en beheer weerspiegelt.
2. Op basis van een onderverdeling van het gebied zijn extra meetlocaties gekozen naast de locaties die in 2000 of 2001 elk twee maal zijn bemeeten. Deze

waarnemingen zijn gedaan in gebieden waar de GHG-lassenkaart van de provinciale Gd-kaart afweek. Deze waarnemingen worden eveneens omgezet in een klimaatsrepresentatief beeld. Daarnaast zijn gegevens van extra meetlocaties van gedigitaliseerd en toegevoegd aan de dataset van meetlocaties

3. De aldus verkregen puntgegevens worden in verband gebracht met gebiedsdekkende hulpbestanden, welke voor een belangrijk deel zijn afgeleid van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). De hieruit verkregen relaties worden gebiedsdekkend toegepast, en leiden tot een gebiedsdekkend beeld van de grondwaterdynamiek.

Deze werkwijze is toegepast, en de resulterende bestanden van GHG, GVG, GLG, Gt zijn opgeleverd aan het Waterschap. Alle bestanden hebben een resolutie van $25 \times 25 \text{ m}^2$ en kunnen het best gepresenteerd worden op schaal 1 : 25 000.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doelstellingen onderzoek

In het begin van de jaren negentig is voor waterschap De Dommel een classificatie kaart gemaakt op basis van een grondwaterklassenindeling. De indeling is gebaseerd op de gemiddelde hoogste wintergrondwaterstand (GHG) en luidt als volgt:

Aanduiding	GHG (cm-mv)	Klasse
Laag	0 – 40	A
Middel	40 – 80	B
Hoog	> 80	C

In 2000 is voor de Provincie Noord-Brabant de Grondwaterdynamiek (Gd) in kaart gebracht (Finke et al, 2002). Onderdeel van de Gd is een bijgestelde, klimaats-representatieve, GHG kaart. Bij een vergelijking tussen de classificatiekaart en de GHG kaart uit de Gd bleek dat in sommige gebieden de klassen uit de classificatiekaart niet overeenkomen met de klassen op de GHG kaart uit de Gd kartering.

Voor een deel kunnen deze verschillen worden verklaard uit het feit dat de Gd kaart 10 jaar later is vervaardigd dan de classificatiekaart, waardoor ook recente veranderingen in grondwaterstand in deze kaart zijn verwerkt die nog niet op de classificatiekaart voorkomen. Voor een ander deel kunnen verschillen worden verklaard uit een verschillende doelstelling voor beide kaarten en de daaruit voortvloeiende verschillen in waarnemingsdichtheid en karteringsmethode. De classificatiekaart is voor een kleiner gebied vervaardigd dan de Gd en heeft daarom een grotere dichtheid aan waarnemingen. Omdat het waterschap de provinciale Gd kaart vooral in de beekdalen te droog achtte en de classificatie kaart beter aan het beeld voldoet. Heeft het waterschap opdracht gegeven voor het maken van een geactualiseerde Gd kaart.

De doelstelling van dit project is het maken van een geactualiseerde Gd kaart waarbij de nieuwste karteringsmethode wordt gebruikt in combinatie met een hogere waarnemingsdichtheid in gebieden waar een afwijking tussen de classificatiekaart en de Gd kaart werd vastgesteld. De verwachting is dat deze actualisatie met extra waarnemingen tot een natter en betrouwbaarder kaartbeeld zal leiden en meer gelijkennis zal vertonen met de classificatie kaart.

1.2 Begrippenkader

In dit rapport zullen een aantal afkortingen en begrippen worden gebruikt welke hieronder worden gedefinieerd:

Grondwaterstand is de stijghoogte ten opzichte van het maaiveld in een boorgat of een peilbuis met ondiepe filterdiepte (in het algemeen minder dan 5 meter onder het maaiveld);

HW3 respectievelijk *LW3* zijn het gemiddelde van de drie hoogste respectievelijk laagste grondwaterstanden die in een hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart) worden gemeten, uitgaande van een tweewekelijkse meetfrequentie;

VG3 is de gemiddelde grondwaterstand op de meetdata 14 maart, 28 maart en 14 april in een bepaald kalenderjaar;

GHG (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand) is gedefinieerd als het gemiddelde van de HW3 over een aaneengesloten periode van tenminste acht jaar waarin geen ingrepen hebben plaatsgevonden. In dit rapport zijn alle gepresenteerde GHG berekend over 30 jaar (de klimaatperiode);

GLG (Gemiddeld Laagste Grondwaterstand) is gedefinieerd als het gemiddelde van de LW3 over een aaneengesloten periode van tenminste acht jaar waarin geen ingrepen hebben plaatsgevonden. In dit rapport zijn alle gepresenteerde GLG berekend over 30 jaar (de klimaatperiode);

GVG (Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand) is in dit rapport gedefinieerd als het gemiddelde van de VG3 over een aaneengesloten periode van tenminste acht jaar waarin geen ingrepen hebben plaatsgevonden. In dit rapport zijn alle gepresenteerde GVG berekend over 30 jaar (de klimaatperiode);

GxG staat in dit rapport voor GHG, GVG en GLG samen.

Gt (Grondwatertrap) is een typische combinatie van GHG- en GLG-klassen welke op thematische kaarten kan worden weergegeven.

Gd (Grondwaterdynamiek) staat voor alle parameters die het grondwaterregime karakteriseren en volgens de hier gehanteerde methode in kaart kunnen worden gebracht. Naast de GxG en Gt betreft dit duurlijnen, regimecurves en kwelklassen.

1.3 Indeling van het rapport

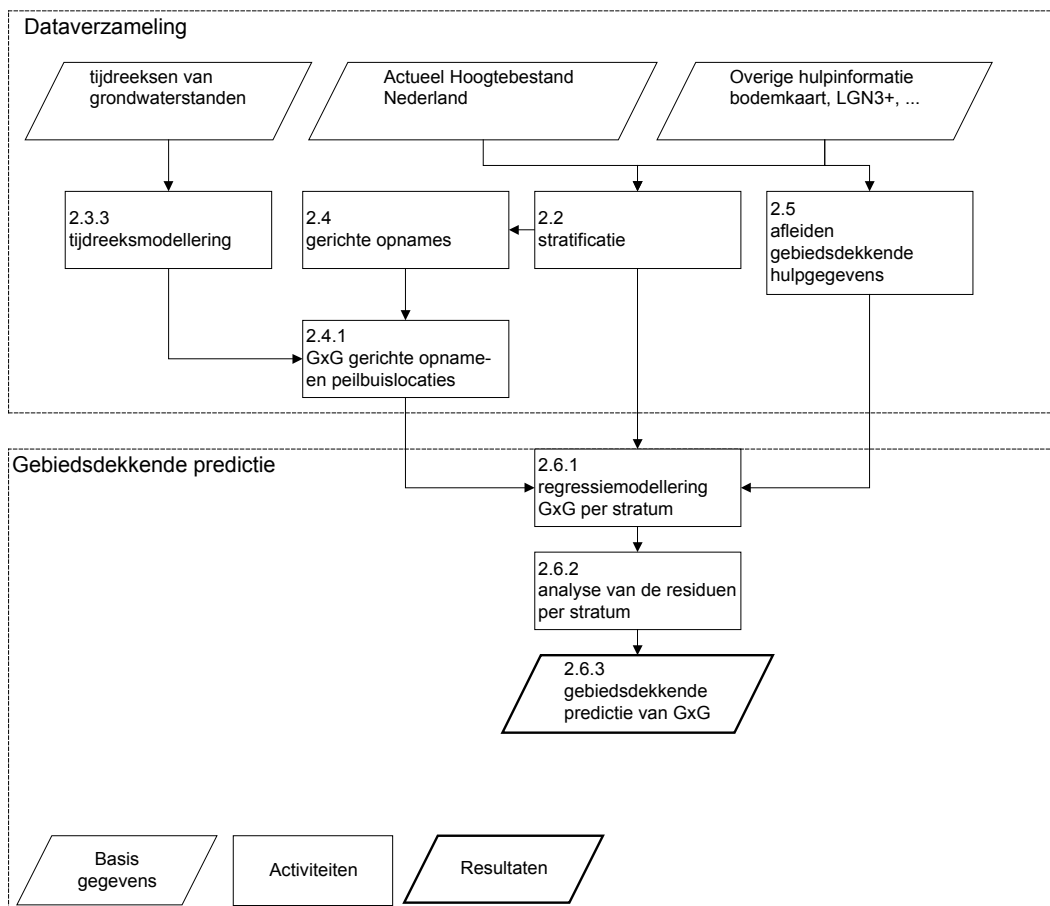
Hoofdstuk 2 beschrijft de methode zoals die is gevolgd om te komen tot gebiedsdekkende bestanden van de GHG, GVG, GLG en Gt. De gebruikte gegevens en de resultaten zijn beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4, tenslotte, worden conclusie en aanbevelingen besproken.

2 Methoden bij kartering van de grondwaterdynamiek

Dit hoofdstuk beschrijft de wijze waarop uit verschillende informatiebronnen de gegevens zijn afgeleid die als basis dienen voor de gebiedsdekkende predictie van de GxG.

2.1 Overzicht van de methode

De globale werkwijze bij de gebiedsdekkende kartering van GxG is weergegeven in Figuur 1. De nummers verwijzen naar de paragrafen in hoofdstuk 2, waarin een gedetailleerde beschrijving van de methoden wordt gegeven. De globale werkwijze wordt in figuur 1 samengevat, waarbij de figuur van boven naar beneden wordt doorlopen.



Figuur 1. Stroomschema van de gevolgde werkwijze bij een Gd-kartering

Een belangrijk onderdeel van het onderzoek is de indeling in homogene deelgebieden. Deze zogenaamde stratificatie speelt bij de verzameling van grondwaterstandswaarnemingen al een rol. Daarom volgt eerst een beschrijving van de

stratificatie in § 2.2. Vervolgens komt in § 2.3.1 de selectie van peilbuizen aan de orde, en de berekening van de GxG uit de tijdreeksen die in deze peilbuizen zijn waargenomen. § 2.4 gaat in op de selectie van de locaties waar de zogenaamde gerichte opnames werden verricht, en geeft een beschrijving van de wijze waarop voor deze locaties GxG's worden berekend. In § 2.5 volgt tenslotte een beschrijving van de gebiedsdekkende hulpinformatie over de topografie en de waterhuishouding. Om af te ronden met de manier waarop gebiedsdekkende predicties van de GxG tot stand komen in § 2.6.

2.2 Indeling van het gebied in homogene deelgebieden

Het onderscheiden van homogene deelgebieden wordt stratificatie genoemd. Het doel van de stratificatie is om de onzekerheid over de gebiedsdekkende predicties van de GxG te reduceren. Er mag namelijk worden verondersteld dat binnen homogene deelgebieden de samenhang tussen de GxG en allerlei hulpinformatie sterker zal zijn dan in het studiegebied als geheel. Er worden deelgebieden (strata) onderscheiden op basis van eigenschappen die gerelateerd zijn aan hydrologie en maaiveldhoogte. Voor elk van de strata wordt de samenhang tussen de GxG enerzijds en variabelen die aan de maaiveldhoogte zijn gerelateerd anderzijds beschreven met een regressiemodel. Dit regressiemodel wordt gebruikt bij de gebiedsdekkende predictie van de GxG. De regressiemodellen kunnen tussen de verschillende strata aanmerkelijk verschillen.

Voor de stratificatie wordt de volgende gebiedsdekkende informatie gebruikt:

- de geologische kaart van Nederland, schaal 1 : 50 000 (NITG-TNO);
- de geomorfologische kaart van Nederland, schaal 1 : 50 000 (Alterra);
- het Actueel Hoogtebestand Nederland, AHN 25 × 25 meter (Adviesdienst voor Geoinformatie en ICT, Rijkswaterstaat);
- de ligging van waterlopen volgens de topografische kaart van Nederland, Top10-Vector (Topografische Dienst, Kadaster);
- de Landelijke Grondgebruikkaart Nederland, LGN3+, 25 × 25 meter (Alterra);
- de bodem- en Gt-kaart van Nederland, schaal 1 : 50 000 (Alterra).

Verder worden er gegevens gebruikt die niet altijd gebiedsdekkend beschikbaar zijn:

- de indeling in stroomgebieden en peilgebieden volgens de waterschappen;
- gedetailleerde bodemkaarten, schaal 1 : 10 000 of schaal 1 : 25 000, die zijn vervaardigd voor bijvoorbeeld landinrichtingsprojecten (Alterra);
- de locaties van droogvallende waterlopen;
- de ligging van gebieden met vernattingsprojecten.

De bodem- en Gt-kaart van Nederland, schaal 1 : 50 000, vormt de basis voor de stratificatie. Indien nodig worden de kaartvlakken aan de hand van additionele informatie gesplitst. De stratificatie verloopt in drie stappen:

1. Er worden geohydrologische hoofdeenheden onderscheiden op basis van dagzomende geologische formaties en een aantal gedigitaliseerde breuklijnen die op de geologische kaart zijn weergegeven;

2. De geohydrologische hoofdeenheden worden onderverdeeld in bodemkundig-hydrologische eenheden, op basis van de bodem- en Gt-kaart, en gegevens over het afwateringspatroon en de maaiveldhoogte. Hierbij wordt gelet op:
 - een indeling in Gt-klassen;
 - de aanwezigheid van leemlagen in de ondergrond;
 - de textuur van de bodem;
 - de aanwezigheid van grof zand in de ondergrond;
 - de intensiteit van het afwateringspatroon.

3. Voorbeelden van deze bodemkundig-hydrologische eenheden zijn:
 - beekdalen;
 - droge zandgronden;
 - lemige gronden met stagnatie van grondwater door leemlagen.

Een eenheid kan uit meerdere vlakken bestaan en de oppervlakte van de vlakken loopt uiteen van minder dan honderd tot bijna 10 000 ha (Finke et al., 2002). De bodemkundige informatie die gebruikt wordt bij deze stap is voornamelijk ontleend aan de bodem- en Gt-kaart, schaal 1 : 50 000. Als er echter digitaal kaartmateriaal van detailkarteringen (1 : 10 000 of 1 : 25 000) beschikbaar is, wordt dit bij de stratificatie gebruikt.

4. In deze stap worden de uiteindelijke strata gevormd. Vlakken van bodemkundig-hydrologische eenheden worden samengevoegd tot strata, om tot meer aaneengesloten strata te komen en versnippering dus tegen te gaan. De strata zijn gemiddeld 3000 hectare groot (Finke et al., 2002). In gebieden met grote bodemkundig-hydrologische verschillen kunnen strata echter kleiner zijn, terwijl in homogene gebieden de strata groter zijn.

In een stratum liggen tenminste twintig punten van het verdichte meetnet.

2.3 De GxG op peilbuislocaties

2.3.1 Selectie van grondwaterstandsreeksen

De grondwaterstandsreeksen komen voor het overgrote deel uit de OLGA-databank van NITG-TNO (Van Bracht, 1988). Vanaf 1 januari 2001 heet deze databank DINO. Daarnaast worden korte meetreeksen van grondwaterstanden aangeleverd door de waterschappen en de provincies. In het DINO-bestand wordt onderscheid gemaakt tussen landbouwbuizen (L-buizen) en peilbuizen (P-buizen). Als wij spreken over peilbuizen dan bedoelen wij zowel de landbouw- als de peilbuizen. De selectiecriteria voor te gebruiken peilbuizen zijn:

1. de reeksen moeten zijn waargenomen in peilbuizen met een filter dat maximaal vijf meter beneden maaiveld begint;
2. de grondwaterstand moet bekend zijn t.o.v. maaiveld;
3. de plaatscoördinaten van de buislocatie moeten bekend zijn;
4. er moeten minimaal negen waarnemingen per hydrologisch halfjaar zijn verricht;
5. de meetreeks moet minimaal drie jaar lang zijn;

6. de meetreeks moet doorlopen tot minimaal een half jaar voor het begin van de kartering;
7. de afstand van de peilbuis tot een rivier of kanaal moet tenminste 40 m zijn;
8. de afstand van de peilbuis tot waterlopen en beken moet tenminste 20 m zijn;
9. de afstand van de peilbuis tot een watervoerende perceelssloot moet tenminste 8 m zijn;
10. het meetpunt mag niet worden beïnvloed door afstromend oppervlaktewater (bijvoorbeeld nabij verharding), zich bevinden in een kuil, op een dijk, een oprit, en dergelijke.

De criteria 1 tot en met 6 worden getoets op basis van gegevens uit de DINO-database en de criteria 7 tot en met 10 worden getoetst in het veld.

2.3.2 Overige grondwaterstandsreeksen

Waterschappen en provincies exploiteren een aantal grondwaterstandsmeetnetten. Over het algemeen zijn deze meetnetten er tijdelijk, voor een specifiek doel. De gegevens die door waterschappen en provincies worden aangeleverd moeten tenminste voldoen aan criteria 1, 2 en 3 die hierboven zijn gegeven. Afhankelijk van de waarnemingsfrequentie (criterium 4), de reekslengte (criterium 5) en de waarnemingsperiode (criterium 6) wordt besloten op welke wijze uit de gegevens de GxG worden berekend. Als de gegevens voldoen aan de criteria die hierboven zijn gesteld dan wordt de GxG berekend met behulp van tijdreeksmodellering, zie § 2.3.3). Als het aantal waarnemingen klein is, dan zullen de gegevens worden beschouwd als gerichte opnames van de grondwaterstand en zal de methode in § 2.4 worden gevolgd. Als de reeksen te kort zijn voor tijdreeksmodellering, dan kan de methode van regressiemodellering worden gevolgd die is beschreven door Oude Voshaar en Stolp (1997). In tegenstelling tot de peilbuizen uit het DINO-bestand worden de buizen uit de lokale meetnetten niet in het veld bezocht. Dit is een gevolg van de korte doorlooptijd tussen het beschikbaar komen van de gegevens en de kartering.

2.3.3 Berekening van de klimaatrepresentatieve GxG voor peilbuislocaties

Voor de berekening van een klimaatrepresentatieve GxG op peilbuislocaties worden tijdreeksmodellen gebruikt die de samenhang tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand beschrijven. Dit is nodig omdat maar zelden gedurende dertig jaar grondwaterstanden worden gemeten op een locatie, zonder dat het hydrologische regime in die periode wijzigt door ingrepen in de waterhuishouding. Het is gebleken dat op basis van uitsluitend korte reeksen een vertekend (systematisch te nat of te droog) beeld van de grondwatersituatie kan ontstaan ten opzichte van de klimaatperiode van dertig jaar. Daarom worden er tijdreeksmodellen gekalibreerd die de samenhang beschrijven tussen het potentiële neerslagoverschot en de grondwaterstand. Deze modellen worden vervolgens gebruikt om op basis van reeksen van neerslagoverschotten die door het KNMI gedurende tenminste dertig jaar zijn verzameld grondwaterstandsreeksen te simuleren. Uit deze gesimuleerde

grondwaterstandsreeksen van dertig jaar lang kunnen klimaatsrepresentatieve parameters zoals de GxG en Gt worden berekend, duurlijnen en regimecurves worden geconstrueerd (Knotters en van Walsum, 1994).

Veronderstel nu dat het neerslagoverschot over de laatste dertig jaar in gemiddelde en temporele variatie gelijk zal zijn aan het neerslagoverschot over de komende dertig jaar. De klimaatsrepresentatieve GxG is dan voor te stellen als de GxG zoals die over dertig jaar zou worden berekend als vanaf heden gedurende 30 (hydrologische) jaren de grondwaterstanden zouden worden gemeten op de 14^{de} en de 28^{ste} van elke maand, en als er geen ingrepen in de grondwatersituatie zouden plaatsvinden die buiten het huidige peilbeheer vallen.

In de oorspronkelijke methode van GxG-berekening, zoals beschreven door Van der Sluijs (1990), wordt de GxG voor peilbuislocaties berekend uit grondwaterstandsreeksen die tenminste acht jaar bestrijken waarin geen ingrepen hebben plaatsgevonden. In de praktijk is het echter een probleem om reeksen te vinden die hieraan voldoen, omdat peilbuizen worden verplaatst, verwijderd of omdat er hydrologische ingrepen hebben plaatsgevonden. Daarom worden ook reeksen met een lengte van vier tot acht jaar vaak geaccepteerd. Zoals gezegd kan het voorkomen dat het weer in de afgelopen vier tot acht jaar systematisch natter of droger was dan het gemiddelde voor de klimaatperiode, waardoor de GxG wordt onder- of overschat. Uit een analyse van Knotters en Bierkens (1999) blijkt dat reeksen van vier tot acht jaar meestal lang genoeg zijn om de samenhang tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand te kunnen modelleren, en dat ook reeksen met een lengte van drie jaar in veel situaties nog zullen voldoen.

In het tijdreeksmodel dat de dynamische relatie tussen neerslagoverschot p en de grondwaterstand h beschrijft, bestaat de grondwaterstand op tijdstip t , h_t uit twee gesommeerde componenten: een deterministische of transfercomponent, h_t^* , en een ruiscomponent, n_t : $h_t = h_t^* + n_t$. De relatie wordt transfer-ruismodel genoemd. De deterministische component h_t^* is het deel van de grondwaterstand dat kan worden verklaard uit een lineaire samenhang met het neerslagoverschot, en de ruiscomponent n_t bevat de resterende invloeden. In dit onderzoek wordt een eenvoudige vorm van het transfer-ruismodel gebruikt. Knotters (2001) toonde aan dat dit model eenvoudig fysisch is te verklaren en in veel situaties een goede beschrijving van de grondwaterdynamiek geeft. De deterministische component h_t^* wordt geschat met:

- de vorige grondwaterstandsmeting uit de tijdreeks en
- het neerslagoverschot tussen de huidige en de vorige meting.

$$h_t^* = \delta_1 h_{t-1}^* + \omega_0 p t$$

$$(n_t - \mu) = \phi_1 (n_{t-1} - \mu) + \varepsilon_t$$

$$h_t = h_t^* + n_t$$

waarin:

h_t = de grondwaterstand op tijdstip t is [L];

p_t = het gemiddelde potentiële neerslagoverschot is tussen $t - 1$ en t [LT⁻¹];

h_t^* = de deterministische component van de grondwaterdiepte op tijdstip t is, welke wordt verklaard door het neerslagoverschot p_t [L];

n_t = de ruiscomponent op tijdstip t is, welke de resultante is van alle invloeden behalve p_t [L];

μ = een constante is, het gemiddelde van n_t [L];

ε_t = de foutenterm is met discrete tijdindex t , waarvan wordt aangenomen dat het een witte-ruisproces is, met gemiddelde nul en eindige en constante variantie σ_ε^2 [L];

δ_t = de autoregressieve parameters van het transfermodel is [-];

ω_0 = de moving average-parameter van het transfermodel is [T];

ϕ_t = de autoregressieve parameter van het ruismodel is [-];

Het dagelijkse potentiële neerslagoverschot p wordt berekend uit het verschil tussen dagneerslagsom (p_N) en de etmaalverdamping voor een referentiegewas volgens Makink (e_M), zoals deze door het KNMI is gegeven (De Bruin, 1987):

$$p_t = p_{N,t} - e_{M,t}$$

Het transfer-ruis model is ingebed in een Kalman-filter en gebaseerd op de dagfrequentie van de neerslagoverschotreëksen, waardoor kalibratie op de minder frequent en onregelmatig waargenomen grondwaterstandsreeksen mogelijk is (Bierkens et al., 1999).

De coëfficiënten van het transfer-ruismodel worden gekalibreerd met het programma KALTFN. De neerslagegegevens zijn afkomstig van het KNMI-neerslagstation dat zich het dichtst bij de peilbuis bevindt. De gegevens betreffende de referentiegewasverdamping zijn eveneens afkomstig van het dichtstbijzijnde weerstation waar deze worden verzameld.

De berekening van de GxG uit de gesimuleerde reeksen van dertig jaar lang verloopt in twee stappen:

1. per hydrologisch jaar wordt het gemiddelde van de drie hoogste en laagste grondwaterstanden genomen (respectievelijk HG3 en LG3);
2. de dertig HG3's en LG3's worden gemiddeld tot een GHG en een GLG.

Het gebruik van alleen de deterministische component bij de simulaties zou leiden tot een onderschatting van de temporele variatie. Met stochastische simulatie kan dit worden voorkomen, doordat dan de ruiscomponent in rekening wordt gebracht. Omdat zowel de GHG als de GLG extreme grondwaterstanden beschrijven, is het van belang dat de temporele variatie juist wordt gesimuleerd. Daarom wordt gebruik gemaakt van stochastische simulatie (zie Knotters, 2001, hoofdstuk 2); deterministische simulatie zou tot te diepe schattingen van de GHG en te ondiepe schattingen van de GLG leiden. Omdat de grondwaterstandsreeksen van dertig jaar

lang worden gesimuleerd door middel van stochastische simulatie, kan ook de onnauwkeurigheid als gevolg van het veronderstelde verband tussen neerslagoverschot en grondwaterstand worden gekwantificeerd.

Met het gekalibreerde tijdreeksmodel en de neerslagoverschotreeks van de dertig jaar voorafgaand aan de kartering wordt voor elke peilbuislocatie een groot aantal (100) even waarschijnlijke grondwaterstandsreeksen gesimuleerd van dertig jaar lang. Uit deze 100 gesimuleerde reeksen wordt de GxG en zijn standaardfout berekend.

2.4 De GxG op tijdelijke meetpunten

Tijdens de kartering worden grondwaterstanden gemeten in een groot aantal boorgaten, op vooraf vastgestelde locaties en tijdstippen. Omdat zowel het tijdstip als de locatie van de opnames vooraf worden bepaald, wordt er gesproken van twee ‘gerichte opnames’. Het doel van deze gerichte opnames is om het net van peilbuizen te verdichten, zodat er uiteindelijk voldoende GxG-data zijn om de statistische relatie met maaiveldhoogten en daarvan afgeleide eigenschappen te kunnen analyseren (§ 2.6). Hiertoe is het nodig dat in elk stratum voor tenminste twintig locaties GxG-waarden bekend zijn. In de grotere strata is dat aantal groter. In deze actualisatie heeft het gebruik van eerder uitgevoerde metingen (Finke et al., 2002), gecombineerd met nieuwe eenmalige metingen in de winter en gedigitaliseerde metingen uit andere projecten geleid tot gemiddelde één locatie per 51 hectare waarvoor GxG-waarden bekend zijn.

In een standaard Gd-kartering wordt tweemaal gemeten: éénmaal in de winter, als de grondwaterstand zich rond het GHG-niveau bevindt, en éénmaal in de zomer, als de grondwaterstand zich rond het GLG-niveau bevindt. In periodes van neerslag wordt er niet gemeten, omdat dan de diepte van het freatisch vlak te veel varieert. Tijdens het veldwerk worden boorgaten gemaakt tot 10 cm onder het grondwatervlak (maar nooit dieper dan 2,50 m). Na een instelperiode (1-2 dagen) wordt de grondwaterstand gemeten.

Gegevens van gerichte opnames die in het recente verleden ten behoeve van andere projecten hebben plaatsgevonden zijn bij het onderzoek betrokken. De gegevens zijn afkomstig uit detailkarteringen (schaal 1 : 10 000 en schaal 1 : 25 000) van ná 1990. Het gaat hierbij om korte meetreeksen (in het algemeen circa één jaar) en om gerichte opnames.

Metingen die in 1999 door Alterra in opdracht van het waterschap zijn verricht zijn van topografische kaarten gedigitaliseerd en toegevoegd aan het bestand van gerichte opnamen. Het gaat daarbij om één gemeten grondwaterstand per locatie. In totaal is op 900 locaties een gemeten grondwaterstand gebruikt voor de berekening van de GxG.

Voor dit onderzoek zijn 500 aanvullende winter metingen van de grondwaterstand gedaan. Op basis van de classificatiekaart van de provinciale Gd-kaart (Finke et. al.,

2002) en de GHG-klassenkaart (Kleijer, 1993) is een verschilkaart gemaakt die de gebieden toont waarin een afwijkende klassenindeling wordt gevonden tussen de provinciale Gd-kaart en de GHG-klassenkaart. Deze 500 extra waarnemingen bevinden zich allemaal in de gebieden waar een verschil tussen de classificatiekaart en de GHG(Gd) is geconstateerd.

De droger geclassificeerde gebieden bevinden zich voornamelijk in beekdalen. Om te voorkomen dat bij een random selectie van locaties voor de beekdalen teveel punten in de flanken van de beekdalen worden geselecteerd wordt het zoekgebied eerst verkleind met 50 meter, zodat de hoogste flanken van het beekdak afvallen. Vervolgens wordt het zoekgebied in twee gedeeld, een centrumdeel (max. 150 meter) en een flankdeel (100 meter). In het centrumdeel worden 57% van de locaties geloot, in de flankdelen 43%.

In het projectplan is aangegeven dat ook de schattingen van de GHG-klasse die door de jaren heen door Henk Kleijer zijn verricht gebruikt zouden worden (Kleijer, 1993). Het bleek echter niet mogelijk om een bruikbaar verband tussen deze, in klasse indeelde, schattingen van GHG en de GHG voorspellingen uit gerichte opname te leggen. In overleg met het waterschap is daarom tijdens de uitvoering van het project besloten om deze gegevens van Kleijer niet te gebruiken voor de kartering. Dit leidt tot een lagere waarnemingsdichtheid dan in het projectplan is genoemd.

2.4.1 Berekening van de GxG voor gerichte-opnamelocaties

Op de tijdstippen van de gerichte opnames worden ook grondwaterstanden gemeten in de peilbuizen waarvan de GxG is berekend (§ 2.3.3). Deze peilbuizen liggen idealiter in de directe omgeving van de meetpunten, en vertegenwoordigen samen alle grondwatertrappen. In de praktijk worden er op één meetdag in uitgestrekte gebieden metingen verricht, en liggen de peilbuizen die samen alle grondwatertrappen vertegenwoordigen ook over een groot gebied verspreid. Het aantal peilbuizen waarin per meetdag wordt gemeten varieert tussen de vijftien en de vijfentwintig. Dit is voldoende om voor elke meetdag een regressiemodel op te stellen dat de relatie beschrijft tussen de waargenomen grondwaterstand en de berekende GxG. Dit model dat de lineaire relatie beschrijft tussen de GxG en de grondwaterstand die is waargenomen tijdens de gerichte opname die plaatsvond rond GxG-niveau luidt als volgt:

$$GxG = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \epsilon,$$

waarin x_1 de grondwaterstand rond GHG-niveau of de grondwaterstand rond GLG-niveau is, β_0 en β_1 regressiecoëfficiënten en ϵ de foutenterm.

Met het geselecteerde model wordt de GxG voorspeld uit grondwaterstands-waarnemingen die tijdens de gerichte opname zijn verricht. Tevens worden de standaardfouten van deze predicties berekend.

Indien de grondwaterstand niet wordt waargenomen binnen de maximale boordiepte van 2,50 meter spreken we van een ‘gecensureerde waarneming’: de precieze waarde is onbekend, maar wel is bekend dat de waarneming ‘dieper dan’ een grenswaarde is. Wij kiezen voor de volgende benadering (Cohen, 1991): eerst wordt een maximum likelihoodschatting gemaakt van de grondwaterstand. Daarbij wordt de code ‘> 2, 50’ vervangen door de meest waarschijnlijke diepte groter dan 2,50 m. Dit getal wordt vervolgens ingevoerd in de regressievergelijking. De check op gecensureerde waarnemingen en de vervanging met het meest waarschijnlijke getal is standaard ingebouwd in het computerprogramma waarmee GxG’s worden voorspeld.

2.5 Gebiedsdekkende hulpinformatie over topografie en waterhuishouding

Voordat van het Actueel Hoogtebestand Nederland hulpinformatie wordt afgeleid, is het bestand getoetst. In het bestand bleken hoogten voor te komen die toe te schrijven waren aan bijvoorbeeld schuren, huizen, wegen en viaducten. Deze ‘onnatuurlijke’ hoogten zijn verwijderd. Allereerst worden alle cellen die behoren tot de LGN4-klassen ‘zoet water’, ‘zout water’, ‘stedelijk bebouwd gebied’ en ‘hoofdwegen en spoorwegen’ verwijderd. Vervolgens worden de standaardafwijkingen berekend van de hoogten in vensters van 3×3 cellen. Cellen worden verwijderd als deze standaardafwijking groter is dan 100 cm, en de cellen behoorden tot één van de volgende klassen van het LGN4-bestand: ‘bebouwing in agrarisch en buitengebied’, ‘loof- en naaldbos in bebouwd gebied’, ‘bos met dichte bebouwing’, ‘gras in bebouwd gebied’, ‘kale grond in bebouwd buitengebied’. Als de standaardafwijking groter is dan 100 cm en de cellen liggen minder dan 50 m verwijderd van ‘hoofdwegen en spoorwegen’ dan zijn deze ook verwijderd. Binnen gebieden waarvan de cellen bij de filtering zijn verwijderd, kunnen losse cellen met een hoogtecijfer, of clustertjes van deze cellen voorkomen. Als het aantal cellen in zo’n clustertje kleiner dan twintig is, dan is het uit het bestand verwijderd. In het AHN-bestand bleken clusters van cellen met hoogtecijfers te ontbreken. Voor zover deze ‘gaten’ in het bestand door de filtering zijn ontstaan die hierboven is beschreven, wordt zij uiteraard niet opgevuld. Om het aantal ontbrekende waarnemingen te beperken, werden de clusters van minder dan twintig cellen met ontbrekende informatie opgevuld met de gemiddelde hoogte van de 25 omliggende cellen.

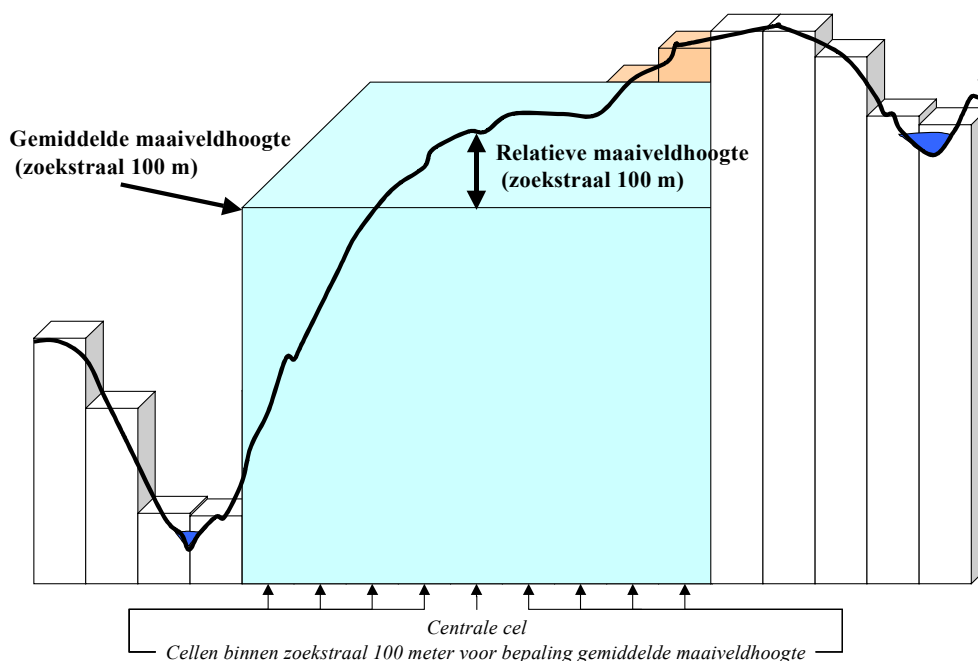
2.5.1 Afleiding van hulpinformatie

Van het AHN-bestand, de 1 : 50 000 Gt-kaart en het Top10- Vectorbestand zijn vijf groepen hulpinformatie afgeleid. Elk van deze groepen hulpinformatie bevat één of meer kaarten met daarop parameters die hydrologisch relevant zijn. Parameters die min of meer uitwisselbaar zijn, zijn samengebracht in één groep. De inhoud en de afleiding van de gebiedsdekkende hulpinformatie wordt hieronder voor elk van de acht groepen beschreven. Het AHN-bestand tezamen met de hulpbestanden wordt in het vervolg het ‘AHN+-bestand’ genoemd.

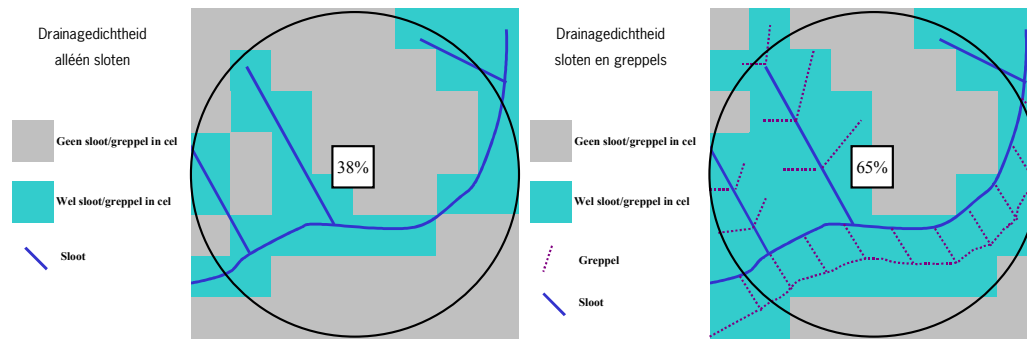
Groep 1: relatieve maaiveldhoogten Uit onderzoek van Te Riele en Brus (1992) en Te Riele et al. (1995) is gebleken, dat grondwaterstanden kunnen samenhangen met de maaiveldhoogte ten opzichte van NAP en met de relatieve maaiveldhoogte. Met relatieve maaiveldhoogte wordt de hoogte van een punt ten opzichte van de gemiddelde hoogte in een gebied binnen een bepaalde straal rond dat punt bedoeld (Figuur 2). Voor elk punt in het AHN is voor omgevingen met een straal van 100, 200, 300, 400 en 500 meter de relatieve maaiveldhoogte bepaald.

Groep 2: drainagedichtheid De dichtheid waarmee een gebied is ontwaterd beïnvloedt de grondwaterstand (met name de GHG, maar indien er sprake is van waterinlaat ook de GLG). Daarom wordt de drainagedichtheid gebiedsdekkend geschat en gebruikt als hulpinformatie. Uit het Top10-Vectorbestand zijn alle watergangen geselecteerd. Hiervan zijn twee bestanden gemaakt: een lijnenbestand met alle watergangen ('sloot en greppel') en een bestand waar de detailontwatering uit is verwijderd ('alleen sloot'). Voor elke 25 × 25 meter cel is bepaald hoeveel naburige cellen met een waterloop er voorkomen binnen een zoekstraal van 100 meter (Figuur 3). Hieruit volgt een indicatie van de drainagedichtheid voor 'alleen sloot' en 'sloot en greppel'.

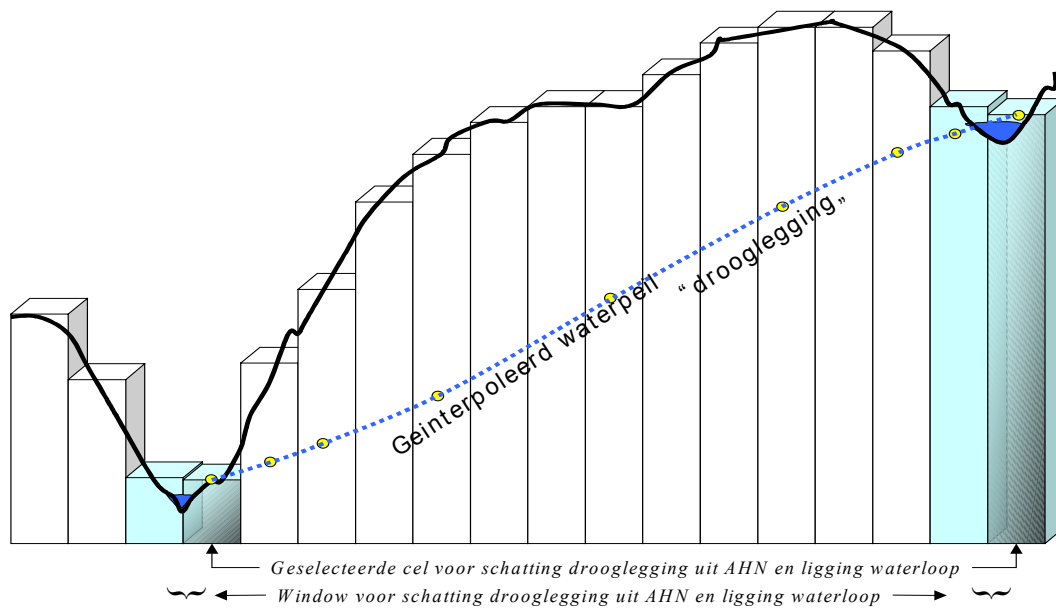
Groep 3: drooglegging ten opzichte van maaiveld De drooglegging is het hoogteverschil tussen de waterspiegel in een waterloop en het grondoppervlak. Het kan worden geïnterpreteerd als het verwachte effect van het peilbeheer en de waterlopeninfrastructuur op de grondwaterstand. Een gebiedsdekkende schatting van de drooglegging zal daarom naar verwachting nuttige hulpinformatie opleveren bij een grondwaterkartering.



Figuur 2. Bepaling relatieve maaiveldhoogte uit het AHN



Figuur 3. Bepaling van de drainagedichtheid



Figuur 4. Schatting van de drooglegging

Uit een combinatie van de gedigitaliseerde waterlopen uit het Top10-Vectorbestand en het AHN is een bestand afgeleid waar per 25×25 meter pixel de drooglegging is bepaald (Figuur 4). Dit is gebeurd in drie stappen:

1. In elk segment van een watergang is een peil ten opzichte van NAP geschat met de waarde van het laagst gelegen punt van het AHN in de directe omgeving;
2. dit peil ten opzichte van NAP is gebiedsdekkend geïnterpoleerd, gewogen naar de inverse afstand tot de waterloop;
3. door deze geïnterpoleerde peilen af te trekken van de maaiveldhoogte uit het AHN is de drooglegging ten opzichte van het maaiveld gebiedsdekkend berekend.

Groep 4: maaiveld ten opzichte van NAP. Dit is de absolute maaiveldhoogte volgens het 25×25 meter AHN-bestand.

Groep 5: de GHG en GLG volgens de Gt-kaart 1 : 50 000 en geschatte berging. De Gt-kaart 1 : 50 000 is weliswaar verouderd wat betreft de absolute niveaus van de GHG en GLG, maar geeft de ruimtelijke variatie mogelijk nog wel goed weer. Daarom zullen mogelijk de ‘GHG-oud’ en ‘GLG-oud’, afgeleid uit de Gt-kaart 1 : 50 000, de actuele GxG goed kunnen voorspellen. Om die reden is de 1 : 50 000 Gt-kaart omgezet in kaarten van de GHG-oud en GLG-oud, waarbij gebruik is gemaakt van de karakterisatie van Gt’s door Van der Sluijs (1990), zie Tabel 1.

Tabel 1. Onder - en bovengrenzen van GHG en GLG per Gt-klasse

Gt op kaart	GHG-boven	GHG-onder	GLG-boven	GLG-onder
I	-17	40	26	50
II	-9	40	50	80
II*	25	50	50	80
III	0	40	80	120
III*	25	40	80	120
IV	40	120	80	120
V	0	40	120	150
V*	25	40	120	160
VI	40	80	120	190
VII	80	120	160	260
VII* / VIII	140	220	160	400

De Gt-klassen van de 1 : 50 000 bodem- en Gt-kaart en het AHN-maaivelds-hoogtebestand worden gebruikt om een neergeschaalde kaart van de GHG en GLG te maken. Voor elk Gt-vlak van de 1 : 50 000 kaart wordt het 15^{de} en 85^{ste} percentiel van de AHN-hoogten in dat vlak bepaald. Voor de hoogten tussen het 15^{de} en 85^{ste} percentiel wordt verondersteld dat deze lineair samenhangen met de GHG’s en GLG’s tussen de onder- en bovengrens voor de betreffende Gt-klasse. Vervolgens worden de hoogten uit het AHN-bestand met deze lineaire relatie getransformeerd in GHG’s en GLG’s. Voor de locaties waarvan de hoogte niet in het interval van het 15^{de} tot het 85^{ste} percentiel ligt, wordt een GHG en GLG geïnterpoleerd t.o.v. NAP, vanuit de overige punten die wel in het interval vallen. Vervolgens zijn deze GHG’s en GLG’s teruggerekend naar diepten t.o.v. maaiveld, met behulp van de hoogten uit het AHN-bestand. Met behulp van de bodemfysische vertaling van de bodemkaart (Wösten et al., 1988), het programma CAPSEV (Wesseling, 1991) en de grondwaterstanden in Tabel 1 is de bergingscapaciteit bij GHG-oud en GLG-oud berekend. Deze bergingscapaciteiten zijn als gebiedsdekkende hulpinformatie gebruikt.

2.6 Gebiedsdekkende predictie van de GxG

De gebiedsdekkende predictie van de GxG vindt plaats in een aantal stappen, die weergegeven zijn in Figuur 1. Allereerst wordt de samenhang tussen de GxG op puntlocaties en de 5 groepen gegevens uit het ‘AHN+’ onderzocht met behulp van regressieanalyse. De analyses worden per stratum uitgevoerd. Dit levert voor elk stratum een selectie van predictoren op, een gekalibreerd regressiemodel en een aantal residuen (verschilwaarden tussen de GxG op puntlocaties en op basis van

regressie voorspelde waarden). De regressieanalyse wordt beschreven in § 2.5.1. Vervolgens wordt de ruimtelijke structuur van de residuen geanalyseerd. Dit gebeurt niet per stratum, maar voor alle strata tegelijk, teneinde over voldoende data te beschikken om de ruimtelijke structuur te kunnen modelleren. Daarom worden de residuen eerst gestandaardiseerd, zodat de variantie van de residuen voor alle strata gelijk is aan één. Op basis van de gestandaardiseerde residuen wordt een model voor de ruimtelijke structuur, een variogram, geschat (zie § 2.6.2.). Dit variogram wordt vervolgens ge-de-standaardiseerd, dat wil zeggen dat het wordt geschaald naar de oorspronkelijke varianties van de residuen in de strata. Dit levert voor elk stratum een variogram op. De feitelijke predictie van GxG wordt beschreven in § 2.6.3. Voor elke cel uit het 25×25 -metergrid wordt de GxG voorspeld op basis van de, met regressie, geselecteerde predictoren, de variogrammen en de locaties en waarden van de GxG op peilbuis- en gerichte-opnamen. Hierbij wordt rekening gehouden met de correlatie tussen de GHG, GVG en de GLG (samen GxG). Het resultaat is gebiedsdekkende predictie van de GxG.

2.6.1 Regressieanalyse

Voor elk stratum is een model geselecteerd dat de samenhang beschrijft tussen de GxG en de gebiedsdekkende hulpinformatie uit de vijf groepen die beschreven zijn in § 2.5.1. Omdat verklarende variabelen die tot dezelfde groep behoren uitwisselbaar zijn in de regressieanalyse, is uit elke groep slechts één hulpvariabele in het regressiemodel opgenomen. Op deze wijze kan een set kandidaatmodellen worden samengesteld, met elk een regressieconstante en met maximaal vijf predictor-variabelen. De omvang van de set kandidaatmodellen M is dan gelijk aan

$$M = \prod_{i=1}^N (G_i + 1) + 1$$

waarin N het aantal groepen is en G_i het aantal verklarende variabelen in de i de groep. In dit onderzoek is $N = 5$, $G_1 = 5$, $G_2 = 2$, $G_3 = 2$, $G_4 = 1$ en $G_5 = 4$, dus $M = 540$. Voor elk stratum is het beste model geselecteerd op basis van Mallows' C_p -criterium (Mallows, 1966). Om de onnauwkeurigheid van de GxG-schattingen voor peilbuis- en gerichte opnamelocaties te kunnen verdisconteren is er een gewogen regressie uitgevoerd, waarbij de nauwkeurigheid als gewicht diende: hoe nauwkeuriger de GxG-schatting, hoe meer gewicht in de regressieanalyse. In formulevorm is het gewicht gelijk aan $f/(1 + s_i^2)$, waarin s_i^2 de variantie is van de fout in de berekende GxG op locatie i , $i = 1 \dots n$ van een peilbuis of een gerichte opname, en f een factor is die ervoor zorgt dat de gewichten sommeren tot het aantal waarnemingen n dat gebruikt is in de regressieanalyse.

2.6.2 Ruimtelijke structuur van de residuen

Het residu is het verschil tussen de GxG-waarde zoals die berekend is voor een peilbuislocatie of een locatie van de gerichte opname (GxG), en de waarde die voor die locatie is geschat met het geselecteerde regressiemodel (R_i):

$$\varepsilon_{k,i} = GxG_{k,i} - R_{k,i}$$

waarin i de locatie aangeeft in stratum k . De residuen zijn gemiddeld nul en hebben een variantie s^2_k . Waarschijnlijk vertonen de residuen een ruimtelijke correlatie of structuur. Het regressiemodel hoeft immers niet alle ruimtelijke structuur in de GxG verklaard te hebben uit de hulpinformatie van het AHN+. Voor de predictie van de GxG en de berekening van de voorspelfout, is het van belang om rekening te houden met de ruimtelijke structuur van de residuen.

De ruimtelijke structuur wordt gemodelleerd met een (semi-)variogram (Davis, 2002, blz. 254-264). Het variogram geeft de afhankelijkheid weer tussen een waarneming op locatie x en een waarneming op locatie $x + h$, waarbij h een vector is die zowel afstand als richting aangeeft. Het variogram geeft de varianties $Var(e[x] - e[x - h])$ als functie van de lag h .

Het variogram wordt gemodelleerd voor GHG, GVG en GLG afzonderlijk. Voordat het variogram wordt gemodelleerd, worden eerst de residuen gestandaardiseerd, zodat de residuen in alle strata variantie één hebben. Dankzij de standaardisatie kunnen de residuen uit alle strata worden gebruikt bij de modellering van één, gestandaardiseerd variogram. Zonder standaardisatie zouden er variogrammen voor de strata afzonderlijk moeten worden gemodelleerd, wat gezien het geringe aantal waarnemingen in de strata onnauwkeurige modellen zou opleveren. De variogrammen zijn vervolgens per stratum ge-de-standaardiseerd op basis van de restvariantie van het regressiemodel. Dit variogram wordt nog gecorrigeerd voor de meetfout (eigenlijk schattingsfout) van de GxG-opnamen door vermindering van de nuggetparameter van het variogram met de gemiddelde variantie van de meetfout in de GxG-opnamen per stratum. Indien de nuggetparameter van het variogram kleiner is dan de gemiddelde variantie van de meetfout wordt de nuggetparameter gelijk gesteld aan nul.

2.6.3 Universal co-kriging van GxG

De gebiedsdekkende predictie van GxG vindt voor elk stratum afzonderlijk plaats en onafhankelijk van elkaar. Binnen een stratum wordt rekening gehouden met de correlaties tussen GHG, GVG en GLG bij de predictie. De gebiedsdekkende predictie wordt uitgevoerd met Gstat (Pebesma, 1998) en maakt gebruik van de geselecteerde predictoren (zie § 2.6.1) van het regressiemodel (de gebiedsdekkende hulpinformatie) en de geostatistische interpolatie techniek kriging (Davis, 2002). De gebiedsdekkende voorspelling van GxG vindt voor iedere cel plaats op basis van een combinatie van de regressie voorspelling en een ruimtelijk geïnterpoleerde GxG-

waarde van de nabij gelegen meetlocaties. De predictie wordt met universal co-kriging uitgevoerd waarbij als drift variabelen (hulpinformatie) gebruik wordt gemaakt van de, met regressie, geselecteerde predictoren.

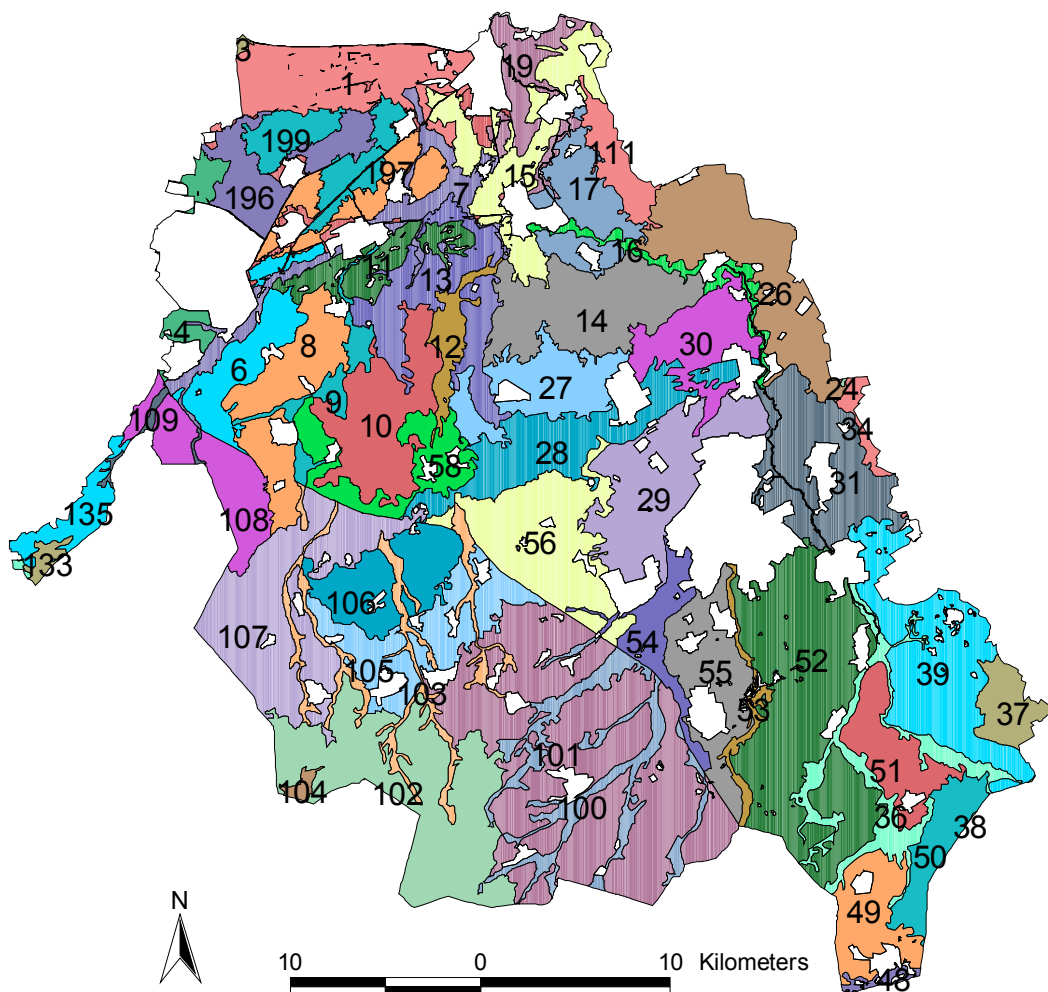
Het resultaat is een gebiedsdekkende predictie van GxG en een gebiedsdekkende model-variantie van de GxG per stratum. De GxG predicties en predictie-varianties per stratum worden in een GIS samengevoegd tot kaarten voor het totale gebied. De resolutie en gebiedsbegrenzing is gelijk aan de gebruikte gebiedsdekkende hulpinformatie die gebruikt wordt als predictoren.

3 Gebruikte gegevens en resultaten

3.1 Gebiedsindeling

Binnen het beheersgebied van Waterschap De Dommel zijn 3 geohydrologische hoofdeenheden onderscheiden: de Centrale Slenk, de Sterksel zone en de Kedichem zone.

De gebiedsindeling heeft geleid tot 55 deelgebieden die zijn overgenomen uit de provinciale Gd-kartering (Finke et. al., 2002) die geheel of gedeeltelijk binnen het gebied van Waterschap De Dommel liggen (Figuur 5).



Figuur 5. Deelgebieden van Waterschap De Dommel

3.2 Puntgegevens

3.2.1 Klimaatsrepresentatieve GxG uit meetreeksen

Tabel 2 geeft een overzicht van de resultaten van de tijdreeksmodellering in 24 voor stambuisregressie bruikbare DINO-peilbuizen binnen het beheersgebied. Met “bruikbaar” wordt hier bedoeld (i) in het veld voor wat betreft ligging en representativiteit goedgekeurde buizen; (ii) met een meetreeks van voldoende lengte (meerdere jaren onafgebroken gemeten, zonder ingrepen) en frequentie (18-24 metingen per jaar). De GxG bepalingen in de peilbuizen zijn nauwkeurig blijkend uit de standaardafwijking van de voorspelfout (sdGxG) die in het algemeen rond de 2 cm is en niet groter dan 7 cm.

Een extra controle op uit de DINO-database opgevraagde grondwaterstanden levert een aantal niet-waarschijnlijke grondwaterstanden op. Bij verwijdering van deze niet-waarschijnlijke standen worden voor een aantal buizen sterk afwijkende tijdreeksmodellen geselecteerd. Ten opzichte van berekende klimaatsrepresentatieve GxG uit de Gd kartering van 2000 levert dit voor een aantal buizen een afwijkende en meer waarschijnlijke GxG.

Tabel 2. Klimaatsrepresentatieve GxG [cm] en sdGxG [cm] van de gebruikte stambuizen, negatieve GxG waarden liggen boven maaiveld

LOCATIE	X	Y	GHG	sdGHG	GVG	sdGVG	GLG	SdGLG
45CL0055	147450	404760	76	4	122	5	179	4
45CP7018	149310	409170	-11	1	7	1	30	1
45DL0049	154660	402590	41	5	98	7	165	5
50FL9016	135620	392920	90	4	128	5	172	3
50FL9032	133180	389340	71	3	106	3	180	3
50FL9033	134210	389950	146	2	184	3	251	4
50HL0003	136350	382740	64	1	88	1	142	1
51AL0020	142790	392285	75	1	104	2	158	1
51AL0068	145720	392380	46	1	77	2	159	1
51AP7807	144776	398520	-26	2	-3	3	65	2
51AP7927	146145	396066	18	1	38	2	113	1
51AP7941	146960	396550	-18	2	9	3	71	2
51AP7957	143420	397220	144	1	169	1	239	1
51CL0008	143200	381050	60	3	96	4	153	3
51CL0033	145480	382730	125	4	176	5	249	4
51DL0030	151470	378500	176	5	214	6	254	5
51DP7806	157838	376438	50	1	80	2	128	1
51DP7807	157640	376250	22	2	51	2	107	1
51GL0131	169380	376890	54	2	90	2	134	2
51GP7029	168260	379810	48	4	96	4	170	3
57BL0058	151850	372890	27	2	57	2	107	2
57BP7805	157640	364500	33	3	71	4	113	3
57BP7821	157720	364850	-21	3	16	4	66	3
57FL0020	171780	371100	81	3	123	4	201	3

3.2.2 Gerichte opnames

In het gebied van Waterschap De Dommel zijn t.b.v. de provinciale Gd-kartering (Finke et. al., 2002) op 1236 locaties de GHG, GVG en GLG uit grondwaterstands-metingen in de zomer en winter bepaald. Gegeven de oppervlakte van het Waterschap (ca 134 000 hectare, excl. bebouwd gebied) zijn dat 1 GxG per 108 hectare.

Metingen die in 1999 door Alterra in opdracht van het waterschap zijn verricht zijn van topografische kaarten gedigitaliseerd en toegevoegd aan het bestand van gerichte opnamen. Het gaat daarbij om één gemeten grondwaterstand per locatie. In totaal is op 900 locaties een gemeten grondwaterstand gebruikt voor de berekening van de GxG.

In het projectplan is aangegeven dat ook de schattingen van de GHG-klasse die door de jaren heen door Henk Kleijer zijn verricht gebruikt zouden worden (Kleijer, 1993). Het bleek echter niet mogelijk om een bruikbaar verband tussen deze, in klasse indeelde, schattingen van GHG en de GHG voorspellingen uit gerichte opname te leggen. In overleg met het waterschap is daarom tijdens de uitvoering van het project besloten om deze gegevens van Kleijer niet te gebruiken voor de kartering. Dit leidt tot een lagere waarnemingsdichtheid dan in het projectplan is genoemd.

3.2.3 Aanvullende gerichte winter opnames

Op basis van de classificatiekaart van de provinciale Gd-kaart (Finke et. al., 2002) en de GHG-lassenkaart (Kleijer, 1993) is een verschilkaart gemaakt die de gebieden toont waarin een afwijkende klassenindeling wordt gevonden tussen de provinciale Gd-kaart en de GHG-lassenkaart. De locaties van deze extra waarnemingen bevinden zich allemaal in de gebieden waar een verschil tussen de classificatiekaart en de GHG(Gd) is.

Tabel 3 toont de combinatie van klassen in beide kaarten, uit de verschilkaart. Uit de tabel blijkt dat voor 61% van het oppervlak beide kaarten dezelfde indeling laten zien. Voor 19% van het oppervlak is de GHG(Gd) kaart natter dan de classificatiekaart en voor 20% is de GHG(Gd) droger dan de classificatiekaart. De droger geclassificeerde gebieden bevinden zich voornamelijk in beekdalen.

Tabel 3. Oppervlakte percentages (%) combinatie klassen GHG(Gd) en Classificatiekaart

Classificatiekaart	GHG (Gd)			Totaal
	0 - 40	40 - 80	> 80	
0 - 40	9	10	1	20
40 - 80	6	24	9	39
> 80	2	11	28	41
Totaal	17	45	38	100

De natter en droger geclassificeerde gebieden zijn gebruikt als zoekgebied voor het uitvoeren van aanvullende grondwaterstandsmetingen. Gedurende het project zijn naast de reeds beschikbare grondwaterstandsmetingen op aanvullende locaties grondwaterstanden gemeten in boorgaten op vooraf vastgestelde tijdstippen. Totaal zijn op 500 extra locaties gerichte opnamen van grondwaterstanden uitgevoerd. De grondwaterstanden zijn op 4 verschillende meetdata rond het GHG tijdstip opgenomen. Tegelijkertijd met de opname van grondwaterstanden op de locaties van de gerichte opnamen, zijn t.b.v. stambuisregressie (zie §2.4.1) ook grondwaterstanden in daarvoor geselecteerde DINO buizen opgenomen.

3.3 De omzetting van grondwaterstanden in GxG

Om de gemeten grondwaterstanden om te rekenen naar klimaatsrepresentatieve GXG wordt voor alle meetdata een stambuisregressie bepaald. De standaardfout van de stambuisregressies voor metingen in 2003 ligt tussen de 5 en 13 cm. Dit is, vergeleken met eerdere studies, erg nauwkeurig, en wordt veroorzaakt door het feit dat meettijdstippen zijn geselecteerd op basis van de kwaliteit van regressierelaties. Dit was mogelijk omdat personeel van het Waterschap aan het begin van de meetcampagnes wekelijks standen in een selectie van DINO-buizen opmat, welke binnen een dag werden geanalyseerd. Bij een gunstige analyse en een gunstige weersverwachting werd de meetcampagne gestart. Stambuisregressies voor de andere meettijdstippen in 1999 en 2000 zijn van minder hoge kwaliteit.

3.4 Gebiedsdekkende predictie van GxG

3.4.1 Relaties tussen hulpinformatie en GxG

Per stratum zijn regressie relaties geselecteerd voor het vlakdekkend voorspellen van GXG uit de gebiedsdekkende hulpinformatie (zie § 2.6.1.). De regressies die per deelgebied zijn bepaald op maaiveldgerelateerde variabelen (samen “AHN+” genoemd) zijn voor GHG, GVG en GLG gegeven in bijlage 1. De voorspellende variabelen die het vaakst zijn geselecteerd zijn de drooglegging en de absolute maaiveldhoogte.

3.4.2 Het geschatte variogrammodel

Tijdens de foutcorrectie is op de meetpunten van GHG, GVG en GLG het verschil tussen de meetwaarde en de voorspelde waarde van de regressiefuncties bepaald. Dit verschil is gebiedsdekkend geïnterpoleerd volgens de methode beschreven in § 2.6.2. De hiervoor gebruikte variogram-modellen en ρ -parameters zijn gegeven in Tabel 4. De maximale afstand waarop GxG-residuen ruimtelijk zijn gecorreleerd ligt rond de 600 meter.

Tabel 4. Variogramparameters voor foutcorrectie

Parameter	Variogrammodel	Nugget (-)	Sill (-)	Range (meter)
GHG	Exponentieel	0.56	0.39	615
GVG	Exponentieel	0.51	0.41	615
GLG	Exponentieel	0.44	0.49	615

Variogramparameters worden per stratum ge-destandaardiseerd door vermenigvuldiging met de gemiddelde gekwadraterde fout op de meetlocaties (MSRES). En daarna wordt gecorrigeerd voor de bepalingfout van GxG op de meetlocaties door de nugget te verminderen met de gemiddelde variantie van de meetfouten op de meetlocaties. Het variogram-model na deze stratum specifieke correcties wordt gebruikt voor universal co-kriging waarbij ook de geselecteerde gebiedsdekkende hulpinformatie wordt gebruikt.

3.4.3 De GxG predictie en nauwkeurigheid van predictie

Naast een gebiedsdekkende voorspelling van GHG, GVG en GLG hoort bij elk van deze voorspellingen een inschatting van de betrouwbaarheid van deze voorspelling. Voor de berekeningswijze van de gebiedsdekkende voorspellingen en betrouwbaarheid zie §2.6.

De voorspelde GxG is in cm onder maaiveld weergegeven voor elke cel van 25*25 en voor dezelfde cellen is ook een schatting van de betrouwbaarheid in aangegeven. Deze bestanden geven per cel een indicatie (in centimeter) van de nauwkeurigheid (ook wel aangeduid als onzekerheid of betrouwbaarheid) van de GxG. De onzekerheid is het gevolg van het op niet-bezochte locaties schatten van een waarde van de GxG met behulp van gegevens van wisselende kwaliteit. Met behulp van deze onzekerheidsmaat kunnen indien gewenst betrouwbaarheidsintervallen rondom de voorspelde GxG op celniveau worden geconstrueerd. De wortel uit de kriging variantie is een maat voor de nauwkeurigheid van de GXG voorspellingen en wordt ook in kaartvorm weergegeven.

Voorspelfouten voor GxG in de huidige kaarten verschillen sterk per stratum en ook binnen strata treedt variatie op afhankelijk van de nabijheid van een locatie waar de GxG is geschat. Rond meetlocaties waar de GxG is bepaald met stambuisregressie of uit tijdreeksanalyse lopen de voorspelfouten terug tot ongeveer 10 cm. Het aantal strata waarvoor de gemiddelde voorspelfout in GHG of GLG in een bepaalde klasse valt is in tabel 5 weergegeven.

Tabel 5. Aantal strata met een gemiddelde voorspelfout in 3 nauwkeurigheidsklassen

	Aantal strata voor GHG	Aantal strata voor GLG
Gem. Voorspelfout > 40 cm	4	10
Gem. Voorspelfout 20 - 40 cm	22	25
Gem. Voorspelfout 0 - 20 cm	29	20

De huidige Gd-kartering is uitgevoerd met een vóóraf bepaalde waarnemingsdichtheid opgelegd door de beschikbare gegevens. Deze waarnemingsdichtheid leidt

tot grote regionale verschillen in kaartkwaliteit. In die deelgebieden waar de kaartkwaliteit lager ligt dan gewenst, is het mogelijk om uit te rekenen welke kwaliteit bij welke waarnemingsdichtheid (dus het investeringsniveau) haalbaar is. Deze berekeningen kunnen worden gebaseerd op de in dit onderzoek verzamelde gegevens.

3.5 Schatting van de gemiddelde GHG per kaartvlak

Voor o.a. de bepaling van waterschapslasten is in de jaren 90 door Kleijer een schatting van GHG in klassen gemaakt en weergegeven in kaartvlakken (Kleijer, 1993). Op basis van de hier vervaardigde kaart is voor dezelfde vlakken als oorspronkelijk in de kaarten van Kleijer zijn onderscheiden de gemiddelde GHG bepaald. Voor het vaststellen van waterschapslasten is op basis van de gemiddelde GHG een kaartvlak in één van de drie door Kleijer onderscheiden klassen ingedeeld.

Er is een aantal vlakken waarvoor in de nieuwe Gd-rasterkaart geen of weinig GHG waarden berekend zijn. Per kaartvlak is daarom aangegeven voor welk percentage van het areaal voorspellingen in de nieuwe Gd-kaart beschikbaar zijn. De vlakken waarvoor de geschatte gemiddelde GHG minder betrouwbaar is zijn te herkennen aan een areaal percentage kleiner dan 50% met GHG voorspellingen. Voor deze vlakken is op basis van omliggende rastercellen, binnen 200m, een schatting gemaakt van de GHG, en deze GHG is gebruikt voor berekening van de gemiddelde GHG per kaartvlak van de Kleijer-kaart. Indien binnen 200m van een vlak uit de Kleijer-kaart geen GHG voorspellingen op kaart zijn gezet is de gemiddelde GHG over het gehele studiegebied per oorspronkelijke Kleijer-klasse gebruikt als inschatting van de gemiddelde GHG voor het betreffende vlak. In deze vlakken is het areaal percentage met GHG voorspellingen 0%.

Op deze manier is voor alle vlakken van de Kleijer-kaart die een GHG-klasse aanduiding hadden een nieuwe gemiddelde GHG berekend uit de rasterkaarten met GHG per 25x25m cel. Het areaal percentage met een GHG voorspelling op celniveau per kaartvlak geeft een kwalitatieve indicatie van de betrouwbaarheid van de gemiddelde GHG voor het betreffende kaartvlak, maar is geen kwantitatieve aanduiding van de betrouwbaarheid.

De kaartvlakken variëren zeer sterk in oppervlak van 2000 ha tot 0.01 ha. Waardoor uitspraken over de gemiddelde GHG per kaartvlak ook sterk in betrouwbaarheid variëren. In een groot kaartvlak kan het gemiddelde weliswaar beter (op meer gridcellen) worden vastgesteld maar is de variatie binnen het kaartvlak meestal ook groter. Voor elk vlak zou daarom niet alleen naar het gemiddelde maar ook naar de variatie moeten worden gekeken. De kans dat in een groot kaartvlak een perceel wat betreft GHG afwijkt van het gemiddelde van dat vlak is groter dan in een kleiner kaartvlak. Het risico van een verkeerde vaststelling van de waterschapslasten in grote kaartvlakken is daardoor groter dan in kleine kaartvlakken. Op basis van de gekarteerde betrouwbaarheid is een uitspraak over de gemiddelde GHG en de

betrouwbaarheid hiervan per gewenste ruimtelijke eenheid mogelijk. Dit vraagt echter om een andere en complexere berekeningswijze dan hier is gevraagd en is daarom niet uitgevoerd.

3.6 Vergelijking Gd-kartering 2000 en huidige kartering.

Vanaf 1999 is in opdracht van de provincie Brabant en de Brabantse waterschappen een kartering van de grondwaterdynamiek uitgevoerd (Finke et al, 2002) De methode die hiervoor destijds is gebruikt wijkt alleen af van de hier gebruikte en beschreven methode door de wijze waarop een gebiedsdekkende voorspelling uit de beschikbare puntinformatie wordt gegenereerd. In de hier gebruikte methode heeft integratie van de maaiveldsregressie met de kriging-interpolatie tot één geostatistische berekeningsstap plaatsgevonden. Voorheen werd eerst een voorspelling met alleen regressie uitgevoerd en die werd vervolgens bijgesteld op basis van met kriging geïnterpoleerde residuen (Finke et al. 2002).

Wat betreft de gebruikte gegevens heeft een aantal belangrijke veranderingen plaatsgevonden, te weten:

1. Er is in 2003 op 500 locaties eenmalig een wintermeting van de grondwaterstand uitgevoerd en toegevoegd aan het bestand van gerichte opnamen.
2. Op 900 meetlocaties waar in 1999 eenmalig de grondwaterstand is gemeten zijn meetwaarden van topografische kaarten gedigitaliseerd en toegevoegd aan het bestand van gerichte opnamen.
3. Er is een nieuwe set van stambuizen geselecteerd die in de directe omgeving van het beheersgebied liggen en waarvan de gemeten grondwaterstanden een extra controle hebben ondergaan.

3.6.1 De voorspelde GxG

De nieuwe Gd-kaart voor waterschap de Dommel geeft zowel wat betreft GHG als GLG nattere waarden aan dan de oude Gd-kaart. In de beekdalen, waar de oude Gd-kaart door waterschap de Dommel als te droog werd beoordeeld, geeft de nieuwe Gd-kaart een nog natter beeld dan voor het totale gebied het geval is. De getalsmatige vergelijking tussen de oude en nieuwe Gd-kaart staat in tabel 6. Uit de standaarddeviaties van de gemiddelde verschillen blijkt dat alle geconstateerde verschillen significant zijn ($\alpha = 0.05$); zowel de kaarten als de opnamen zijn natter in het beheersgebied als geheel en ook als alleen naar beekdalen wordt gekeken.

Tabel 6. Gemiddeld verschil en de standaarddeviatie van het gemiddeld verschil () in GHG en GLG tussen de Gd-kaart en voor de opnamelocaties van 1999 en die van 2003 in het totale beheersgebied en voor alleen de beekdalen

	Verskil in het beheersgebied [cm]	Verskil in de beekdalen [cm]
GHG-kaart	10.4 (0.0)	14.1 (0.1)
GLG-kaart	13.0 (0.0)	24.3 (0.1)
GHG-opname	15.5 (2.8)	18.5 (5.8)
GLG-opname	8.8 (2.4)	16.4 (4.6)

Omdat zowel een methodische verandering als een verandering in de gebruikte gegevens heeft plaatsgevonden is niet exact vast te stellen hoe groot de afzonderlijke bijdrage van deze veranderingen aan het totale verschil is.

Onze inschatting is dat de verschillen voornamelijk worden veroorzaakt door gebruik van extra of andere gegevens en nauwelijks door het methodische verschil. De hier toegepaste stambuisregressie op basis van een andere set van buizen en een extra controle of foutieve meetwaarden uit de DINO-database voor deze stambuizen levert voor de gerichte opname nattere voorspellingen van de GxG (zie tabel 6). Als dezelfde vergelijking voor de opname locaties in de beekdalen wordt gemaakt is een relatief nog natter beeld waar te nemen.

Op basis van de vergelijking tussen de gemeenschappelijke opnamelocaties in beide karteringen is een 15.5 cm natter beeld voor GHG en een 8.8 cm natter beeld voor GLG vastgesteld. De gemeenschappelijke opname locaties zijn voor GHG ($15.5 - 10.4 \approx 5$ cm) natter dan de kaart en voor GLG ($8.8 - 13.0 \approx 4$) droger dan de kaart. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de wijzingen in de methoden, die alleen betrekking hebben op de omzetting van opnamegegevens naar vlakdekkende voorspellingen, tot een ongeveer 5 cm droger beeld voor de GHG en tot een 4 cm natter beeld voor de GLG leidt. De grootste verschillen worden echter veroorzaakt door een andere stambuisregressie waardoor de opnamen natter zijn ingeschat respectievelijk 15.5 cm voor GHG en 8.8 voor GLG. In combinatie met de 1400 aanvullende waarnemingen die met dezelfde stambuisregressie zijn omgezet in GxG voorspellingen levert dat uiteindelijk een 10.4 cm nattere GHG-kaart en een 13.0 cm nattere GLG kaart op.

In de beekdalen zijn meetlocaties op een andere wijze geselecteerd om een betere spreiding over het beekdal te verkrijgen zowel in de lengte als breedte richting van het beekdal (zie § 2.4) vermoedelijk is dit een belangrijke reden voor het natter in kaart brengen van de GLG in beekdalen. Het gericht verhogen van de waarnemingsdichtheid op plaatsen waar de oude Gd-kaart afweek van het door het waterschap verwachte beeld, heeft geleid tot een kaart die beter overeenstemt met de verwachtingen.

3.6.2 De gekwantificeerde nauwkeurigheid van GxG voorspellingen

De gekwantificeerde nauwkeurigheid van GxG voorspellingen is in de geactualiseerde Gd-kaart licht verbeterd. In de beekdalen is de nauwkeurigheid substantieel verbeterd (zie tabel 7).

Tabel 7. Gekwantificeerde nauwkeurigheden van voorspelde GHG en GLG voor de provinciale Gd-kartering van 2000 en de geactualiseerde Gd van 2003 in beheersgebied en in alleen de beekdalen

	SdGHG [cm]	SdGLG [cm]
Provinciale Gd kaart 2000	28,67	34,94
Beekdalen Gd 2000	21,73	30,26
Geactualiseerde Gd 2003	22,24	33,14
Beekdalen Gd 2003	13,43	22,72

Omdat zowel methodische veranderingen als veranderingen in gebruikte gegevens hebben plaatsgevonden is niet exact vast te stellen hoe groot de verbetering van de nauwkeurigheid als gevolg van de extra waarnemingen is. De constatering dat de verbetering met name in de beekdalen optreedt maakt echter aannemelijk dat deze grotendeels verklaard wordt door de extra waarnemingen. De methodische veranderingen hebben immers uniform over het gehele beheersgebied plaatsgevonden en niet specifiek in de beekdalen, terwijl hier wel de grootste nauwkeurigheidsverbetering wordt gerealiseerd. De door het waterschap gewenste verbetering van de nauwkeurigheid in de beekdalen wordt gerealiseerd.

4 Conclusies en aanbevelingen

De geactualiseerde Gd-kaart voor waterschap de Dommel geeft zowel wat betreft GHG als GLG nattere waarden dan de provinciale Gd-kaart. In de beekdalen geeft de geactualiseerde Gd-kaart de grootste vernatting t.o.v de provinciale kaart weer.

Omdat zowel een methodische verandering als een verandering in de gebruikte gegevens heeft plaatsgevonden is niet exact vast te stellen hoe groot de afzonderlijke bijdrage van deze veranderingen aan het totale verschil is. Onze inschatting is dat de verschillen voornamelijk worden veroorzaakt door gebruik van extra of andere gegevens en veel minder door het methodische verschil.

Het gericht verhogen van de waarnemingsdichtheid op plaatsen waar de oude Gd-kaart afweek van de GHG-klassenkaart en het gebruik van een andere stambuisregressie, heeft geleid tot een kaart die significant natter is dan de vorige en beter overeenstemt met de verwachtingen van het waterschap.

De huidige Gd-kartering is uitgevoerd met een vóóraf bepaalde en t.o.v. de provinciale Gd-kartering verhoogde waarnemingsdichtheid. Deze waarnemingsdichtheid leidt ook met deze lokaal verhoogde waarnemingsdichtheid tot grote regionale verschillen in kaartkwaliteit. De gekwantificeerde nauwkeurigheid van GxG voorspellingen is in de geactualiseerde Gd-kaart licht verbeterd. In de beekdalen is de nauwkeurigheid substantieel verbeterd.

Omdat zowel methodische veranderingen als veranderingen in gebruikte gegevens hebben plaatsgevonden is niet exact vast te stellen hoe groot de verbetering van de nauwkeurigheid als gevolg van de extra waarnemingen is. De constatering dat de kwaliteitsverbetering met name in de beekdalen optreedt maakt echter aannemelijk dat de verbetering grotendeels verklaard wordt door de extra waarnemingen.

De kaartvlakken die de basis vormen voor het vaststellen van waterschapslasten variëren zeer sterk in oppervlak (van 2000 ha tot 0.01 ha). Hierdoor varieert ook de betrouwbaarheid van de uitspraken over de gemiddelde GHG per kaartvlak. In een groot kaartvlak kan het gemiddelde weliswaar beter (op meer gridcellen) worden vastgesteld maar is de variatie binnen het kaartvlak meestal ook groter. De kans dat in een groot kaartvlak een perceel wat betreft GHG afwijkt van het gemiddelde van dat vlak is groter dan in een kleiner kaartvlak.

Het risico op een verkeerde vaststelling van de waterschapslasten in grote kaartvlakken is daardoor groter dan in kleine kaartvlakken. Op basis van de op celniveau gekwantificeerde nauwkeurigheid is een uitspraak over de gemiddelde GHG en de betrouwbaarheid hiervan per gewenste ruimtelijke eenheid mogelijk. Hiermee zou het risico op een verkeerde vaststelling van de waterschapslasten kunnen worden verminderd.

Aanbevolen wordt om voor kleinere ruimtelijke eenheden, die aansluiten bij het niveau waarop waterschapslasten worden berekend, de gemiddelde GHG en de betrouwbaarheid van dit gemiddelde vast te stellen zodat het risico op een verkeerde vaststelling wordt geminimaliseerd.

Uit de DINO-database opgevraagde grondwaterstanden moeten zorgvuldig worden gecontroleerd op niet-plausibele grondwaterstanden. Verwijdering van deze niet-plausibele standen levert voor een aantal buizen sterk afwijkende tijdreeksmodellen op. Die, zoals in deze studie blijkt, duidelijk afwijkende GxG voorspellingen op de gerichte opname locaties opleveren en daardoor uiteindelijk ook een andere, in dit geval nattere, kaart.

Verdere kwaliteitsverbetering kan worden bereikt door nieuwe hulpinformatie gebiedsdekkend beschikbaar te maken (met name de aanwezigheid en diepte van ondergrondse drainage, gedetailleerde peilvakinformatie, doorlatendheden en grondwateronttrekkingsgegevens). Succes is echter afhankelijk van de mate waarin deze hulpinformatie de ruimtelijke variatie in gemeten GxG beter beschrijft dan de nu gebruikte hulpinformatie. Het gebiedsdekkend maken van hulpinformatie is financieel aantrekkelijker dan het verhogen van de waarnemingsdichtheid vanwege de lagere kosten.

Literatuur

- Bierkens, M., Knotters, M., en van Geer, F. (1999). Tijdreeksanalyse nu ook toepasbaar bij onregelmatige meetfrequenties. *Stromingen*, 5(2):43–54.
- Cohen, A. (1991). *Truncated and censored samples: theory and applications*. Dekker Inc., New York.
- Davis, J. (2002). *Statistics and data analysis in geology*. Wiley, New York, third edition.
- De Bruin, H. (1987). Van Penman naar Makkink. In Hooghart, J., redactie, *Neerslag en Verdamping*, CHO-TNO Mededeling 39. CHO-TNO, Den Haag.
- Finke, P., Bierkens, M., Brus, D., van der Gaast, J., Hoogland, T., Knotters, M., en de Vries, F. (2002). *Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap De Dommel*. Rapport 381, Alterra.
- Kleijer, H. (1993). De kartereïng van de de grondwatersklassenkaart voor de herclassificatie van het Waterschap De Dommel en de Zandleij. *SC-rapport 269*.
- Knotters, M. (2001). *Regionalised time series models for water table depths*. PhD thesis, Wageningen Universiteit.
- Knotters, M. en Bierkens, M. (1999). Hoe lang moet je de grondwaterstand meten om iets over de dynamiek te weten? *Stromingen*, 5(4):5–12.
- Knotters, M. en van Walsum, P. (1994). Uitschakeling van weersinvloeden bij de karakterisering van het grondwaterstandsverloop. *Rapport 350*, Staring Centrum.
- Mallows, C.L., 1966. *Choosing a Subset Regression*. Joint Statistical Meetings, Los Angeles, CA 1966.
- Oude Voshaar, J. en Stolp, J. (1997). Schatting van GHG en GLG van tijdelijke peilbuizen met korte meetreeksen. *Technisch Document 30*, Staring Centrum.
- Pebesma E. en Wesseling C. (1998). Gstat, a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. *Computers and Geosciences*, 24(1): 17-31; <http://www.gstat.org>
- Sluijs, P. van der (1990) Hoofdstuk 11: Grondwatertrappen. In: Locher, W.P. en H. de Bakker (red.) *Bodemkunde van Nederland deel 1: Algemene bodemkunde*. Malmberg Den Bosch.

Te Riele, W. en Brus, D. (1992). Het gebruik van fysisch-geografische voorinformatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstanden en grondwaterkarakteristieken (GHG en GLG). Rapport 209, Staring Centrum.

Te Riele, W., Querner, E., Knotters, M., en Pomper, A. (1995). Geostatistische interpolatie van grondwaterstandsdiepten met behulp van fysisch-geografische informatie en de resultaten van een regionaal stromingsmodel. Rapport 414, Staring Centrum.

Van Bracht, M. (1988). OLGA: On Line Grondwater Archief. Rapport PN88-11, DGV-TNO.

Wösten, J.H.M., F de Vris, J. Denneboom en A.F. Holst (1988). Generalisatie en bodemkundige vertaling van de bodemkaart 1 : 250.000, tebn behoefte van de pawn-studie. Rapport 2055, Stiboka. Wageningen

Bijlage 1 Gebruikte predictoren per stratum bij het voorspellen van GHG, GVG en GLG

Hgt = Hoogte afgeleid uit het AHN (Actueel hoogte bestand);

Rht[4,8,12,16,20] = relatieve hoogte t.o.v van de zoekomgeving met een straal in aantal cellen van 25m;

Slootd[12, 16] = Percentage cellen waarin een sloot of greppel ligt in een zoekomgeving met een straal in aantal cellen van 25m

Grepdd[12, 16] = Percentage cellen waarin een greppel ligt in een zoekomgeving met een straal in aantal cellen van 25m

Droogl = drooglegging, maaiveldshoogte t.o.v. geïnterpoleerde ontwateringsbasis

Bghg = Op basis van hoogte neergeschaalde GHG afgeleid uit Gt klasse v/d 1: 50.000 bodem- en gt-kaart

Bglg = Op basis van hoogte neergeschaalde GLG afgeleid uit Gt klasse v/d 1: 50.000 bodem- en gt-kaart

Berghg = Berging afgeleid uit Bghg en bodemfysische eigenschappen

Berglg = Berging afgeleid uit Bglg en bodemfysische eigenschappen

Stratum	GHG	GVG	GLG
1	hgt,rht8,grepd8	hgt,rht8,grepd8	hgt,droogl,grepd8
2	rht16,bghg	rht16,bghg	rht16,afstwat,bghg
3	rht4,slootd12,berghg	rht4,slootd12,berghg	hgt,rht4,berghg
4	hgt,rht12,droogl,grepd12	hgt,rht12,droogl,grepd12	hgt,grepd12,berglg
6	rht20,berghg	rht20,berghg	slootd8,berghg
7	hgt,rht20,droogl	rht20,droogl	rht20,droogl
8	droogl,berghg	droogl,grepd8,berghg	rht4,droogl,grepd8,berghg
9	hgt,grepd16	hgt,grepd16	rht16,grepd8
10	rht8,droogl,slootd16	hgt,rht8,droogl,slootd16	rht8,droogl,grepd12
11	hgt,rht16,droogl,slootd16	hgt,rht16,droogl,slootd16	hgt,rht8,droogl,slootd16
12	rht12,droogl,bglg	rht12,droogl,bglg	rht12,droogl,afstwat,bglg
13	rht4,slootd12,berghg	hgt,slootd12,berghg	rht4,droogl,grepd8,berghg
14	rht20,berghg	rht20,grepd12,berghg	rht20,berglg
15	hgt,rht4,droogl,slootd8	rht4,droogl,grepd12,berglg	hgt,rht4,droogl,grepd12,berglg
16	hgt,rht20,grepd12	hgt,rht20,grepd12	hgt,rht20,grepd16
17	rht8,slootd12,afstwat	rht16,slootd12,afstwat	rht16,slootd12
19	Droogl	droogl,berglg	droogl,berglg
24	hgt,rht4,droogl,slootd12	hgt,rht4,droogl,slootd12	hgt,droogl,slootd8,berglg
25	hgt,grepd12,berglg	grepd12,berglg	droogl,berglg
26	rht20,droogl	rht20,droogl	hgt,rht20,droogl
27	rht20,slootd12,berghg	rht20,slootd12,berghg	rht20,grepd12,berghg
28	droogl,bglg	rht20,droogl	hgt,droogl,bglg
29	rht12,bghg	rht16,bglg	rht16,droogl,bghg
30	hgt,rht20	hgt,rht20	hgt
31	hgt,rht20,bglg	hgt,rht20,bglg	rht20,bglg
34	droogl,berghg	droogl,berghg	droogl,berghg
36	hgt,rht16,droogl	hgt,rht16,droogl,berglg	rht12,droogl,berglg
37	hgt,droogl,grepd8,berglg	hgt,droogl,grepd8,berglg	hgt,droogl,grepd8

Stratum	GHG	GVG	GLG
38	rht16	rht16,slootd16	rht20,slootd16
39	rht20,berghg	rht20,berghg	rht20,grepd8,berghg
48	hgt,rht16,droogl,bglg	hgt,rht16,droogl,bglg	rht16,droogl,grepd8,bglg
49	rht20,slootd16	rht20,grepd12	rht20,grepd16
50	hgt,grepd12,berglg	hgt,grepd12,berglg	gripd8,berglg
51	rht16,grepd12	rht16,grepd16	rht16,grepd16
52	hgt,droogl,grepd16,bglg	hgt,rht16,droogl,bglg	rht16,droogl,slootd16,afstwat
53	hgt,rht4,droogl	droogl,bglg	rht8,droogl
54	hgt,rht8	hgt,rht16	hgt,rht16
55	hgt,rht16,droogl,berghg	hgt,rht16,droogl,berghg	hgt,rht16,droogl,berghg
56	rht16,berghg	rht16,berghg	rht16,berghg
58	rht12,bghg	rht12,bghg	rht16,afstwat,bglg
100	rht4,slootd8,berghg	rht4,berghg	hgt,rht8,berglg
101	rht4,droogl,grepd12,berghg	rht4,droogl,grepd12,berglg	rht4,droogl,grepd12,berghg
102	rht16,droogl,grepd16	hgt,rht16,droogl,grepd16	rht16,droogl,slootd16
103	hgt,rht16,droogl,berglg	hgt,rht16,droogl,berglg	hgt,rht20,droogl,berglg
104	rht20,slootd12,berglg	rht20,droogl,berglg	hgt,rht20
105	rht4,droogl,slootd8	rht4,droogl,slootd8	rht4
106	hgt,rht20,berghg	hgt,droogl,berghg	hgt,rht12
107	rht20,berghg	rht12,slootd12,berghg	rht20,berghg
108	gripd16,berghg	gripd16,berghg	rht16,berghg
109	rht20,droogl	rht12,droogl	hgt,rht12
111	droogl,gripd8,berglg	droogl,gripd8,berglg	hgt,droogl,gripd8,berglg
129	hgt,rht16	hgt,rht20	hgt,rht20
133	rht16,gripd12	rht12,gripd12	rht12,gripd12
134	rht4,bglg	rht4,bglg	rht4,bglg
135	rht16,berghg	rht16,berghg	rht12,berghg
196	hgt,bglg	hgt,bglg	hgt,slootd12,berglg
197	hgt,bghg	hgt,bghg	hgt
199	hgt,droogl,bglg	hgt,droogl,bglg	droogl,bglg