

De grondwaterdynamiek in het waterschap Velt en Vecht

De grondwaterdynamiek in het waterschap Velt en Vecht

M. Knotters

J.B.F. van der Horst

T. Hoogland

Alterra-rapport 1189

Alterra, Wageningen, 2005

REFERAAT

Knotters, M., J.B.F. van der Horst & T. Hoogland, 2005. *De grondwaterdynamiek in het waterschap Velt en Vecht*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1189. 52 blz.; 6 fig.; 2 tab.; 28 ref.

Op basis van tijdreeksen van grondwaterstanden en gerichte waarnemingen van freatische grondwaterstanden in de winter en de zomer zijn gemiddelde voorjaars-, hoogste en laagste grondwaterstanden (GVG, GHG en GLG, tezamen GxG) geschat. Vervolgens wordt de GxG geostatistisch geïnterpoleerd met behulp van gebiedsdekkend beschikbare hulpvariabelen die zijn ontleend aan bronnen zoals het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Naast de GxG zijn regimecurves en duurlijnen geschat. De bestanden vormen een gebiedsdekkende beschrijving van de grondwaterdynamiek (Gd) in het waterschap Velt en Vecht, die representatief is voor de heersende hydrologische en klimatologische omstandigheden. De geadviseerde presentatieschaal is 1 : 50 000.

Trefwoorden: DEM, Gd, geostatistiek, grondwaterdynamiek, Gt, tijdreeksanalyse, stratificatie, universal co-kriging

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 1189. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2005 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 verveelvoudigd 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	13
1.1 Achtergrond en probleemstelling	13
1.2 Doelstelling	14
1.3 Uitvoering	14
1.4 Opbouw van het rapport	14
1.5 Afkortingen en begrippen	14
2 De methode van kartering van de grondwaterdynamiek	17
2.1 Inleiding	17
2.2 Schematische weergave	17
2.3 Indeling van het gebied in homogene deelgebieden	18
2.4 De GxG op peilbuislocaties	20
2.4.1 Selectie van grondwaterstandsreeksen	20
2.4.2 Overige grondwaterstandsreeksen	22
2.4.3 Schatting van de GxG	23
2.5 De GxG op gerichte opnamelocaties	25
2.5.1 Inleiding	25
2.5.2 Berekening van de GxG voor gerichte-opnamelocaties	26
2.6 Gebiedsdekkende hulpinformatie over topografie en waterhuishouding	27
2.6.1 Bewerking van het AHN-bestand	27
2.6.2 Afleiding van gebiedsdekkende hulpinformatie	28
2.6.3 Extra hulpinformatie voor het waterschap Velt en Vecht	31
2.7 Gebiedsdekkende voorspelling van de GxG	31
2.7.1 Inleiding	31
2.7.2 Regressieanalyse	32
2.7.3 Ruimtelijke structuur van de residuen	32
2.7.4 Universal kriging van GxG	33
2.8 Ruimtelijke voorspelling van duurlijnen, regimecurves en extremen	34
2.8.1 Durlijnen	34
2.8.2 Regimecurves	34
2.8.3 Extremen	35
3 Resultaten	37
3.1 Inleiding	37
3.2 Geactualiseerde GxG	37
3.3 Durlijnen, regimecurves en extremen	40
4 Conclusies en aanbevelingen	41
Literatuur	43
Bijlagen	
1 Geselecteerde peilbuizen uit het DINO-bestand	47
2 Extra peilbuizen voor Velt en Vecht	49

Woord vooraf

Dit Alterra-rapport beschrijft actualisatie van de karakterisering van de grondwaterdynamiek in het waterschap Velt en Vecht. Het project is simultaan uitgevoerd met het project 'Vaststellen verspreiding uitspoelingsgevoelige gronden', dat werd gefinancierd uit Nitraatgelden en het DWK-programma 409 'Uitspoelingsgevoelige gronden', en werd begeleid door de Begeleidingscommissie Uitspoelingsgevoelige Gronden, bestaande uit de volgende personen:

Ir. E.E. Biewinga (voorzitter, LNV-DL)

J.T.M. Huinink, MSc (secretaris, LNV-EC)

Ing. G.P. Beugelink (RIVM)

Ir. J. Bodegraven (LNV-DN)

Dr.ir. T. Breimer (LNV-DWK)

Ing. G.J. Grotentraast (LNV-DLG, tot 1-7-2004)

Dr.ir. G.B.M. Heuvelink (UvA, vanaf 1-6-2003 Alterra)

Drs. D.A. Jonkers (VROM, vanaf 31-12-2003)

Ing. N.J. Molenaar (VROM, tot 31-12-2003)

Dr. E.J. Pebesma (UU)

Ir. H. Prak (LNV-DLG, vanaf 1-7-2004)

Drs. P.J.J. Torfs (WUR, tot 1-7-2003)

Dr.ir. F.C. van Geer (NITG-TNO)

Wij danken de leden van de begeleidingscommissie voor hun inzet voor dit project. De contacten met P. Filius, T. de Meij, T. Grobbee en B. Ludikhuize waren onmisbaar voor het welslagen van dit project, waarvoor wij graag onze erkentelijkheid uitspreken.

Projectleider van het project 'Vaststellen verspreiding uitspoelingsgevoelige gronden' was dr. P.A. Finke (Alterra, tot 8-10-2001). Wij bedanken hem voor zijn initiatieven en hulp.

Bij de uitvoering van het project is een belangrijke bijdrage geleverd door F. Brouwer, N. Heidema, M. Pleijter, H. Vroon, R. Visschers, F. de Vries en M.M. van der Werff, waarvoor hartelijk dank.

Zonder de medewerking van de grondeigenaren en –gebruikers, provinciale landschappen, Natuurmonumenten en Staatsbosbeheer had deze studie niet uitgevoerd kunnen worden. Onze dank hiervoor!

Samenvatting

Het grondwater bevindt zich in Nederland doorgaans op geringe diepte, en is daardoor een belangrijke factor bij beslissingen met betrekking tot de inrichting, het beheer en de kwaliteit van het landelijk gebied. Beschikbaarheid van actuele informatie over de grondwaterstand is daarom belangrijk. Vanouds staat deze informatie op grondwatertrappen- of Gt-kaarten, die echter verouderd zijn omdat de waterhuishouding sinds de karteringen is veranderd. Bovendien zijn de kaarten gebaseerd op korte grondwaterstandsreeksen van ca. acht jaar lang en daardoor beïnvloed door toevallige meteorologische omstandigheden in de meetperiode. Daardoor weerspiegelen de kaarten niet altijd de grondwaterstanden die optreden onder het heersende klimaat (het gemiddelde weer in een periode van 30 jaar). Verder wensen de gebruikers van Gt-kaarten meer informatie dan de Gt-klassen van gemiddeld hoogste en gemiddeld laagste grondwaterstanden (resp. GHG en GLG): er is behoefte aan kaarten van GHG's, GVG's en GLG's (samengevat als GxG's), regimecurves en duurlijnen, alsmede aan een indicatie van de nauwkeurigheid van deze informatie. De nieuwe, uitgebreide beschrijving van de grondwaterstand wordt grondwaterdynamiek (Gd) genoemd.

Dit project heeft een beschrijving van de grondwaterdynamiek van het waterschap Velt en Vecht als doel, die representatief is voor de heersende (actuele) hydrologische en klimatologische omstandigheden. Hiertoe dient de dynamiek van de grondwaterstand, door middel van GxG, regimecurve en duurlijn, met gekwantificeerde nauwkeurigheid gebiedsdekkend in kaart gebracht te worden.

De ontwikkelde methodiek bestaat globaal gezien uit de volgende drie fasen:

1. *Verzamelen van benodigde gegevens.* Binnen het te karteren gebied worden homogene deelgebieden (strata) onderscheiden. Daarbinnen worden vervolgens grondwaterstandsgegevens (GxG) verzameld op permanente meetlocaties (peilbuislocaties) en op de tijdelijke locaties van een verdicht meetnet (gerichte-opnamelocaties). Middels 'gerichte opname' in boorgaten op tijdstippen dat de grondwaterstand zich rond GHG- of GLG-niveau bevindt, tijdreeksanalyse en regressieanalyse worden voor alle locaties GxG's geschat die representatief zijn voor de heersende hydrologische en klimatologische omstandigheden. Ook wordt gebiedsdekkende hulpinformatie over topografie en waterhuishouding verzameld;
2. *Geostatistische verwerking van de gegevens.* De GxG's worden ruimtelijk geïnterpoleerd tussen de meetpunten, gebruik makend van de gebiedsdekkende hulpinformatie;
3. *Nabewerking van de geostatistische resultaten.* Het geïnterpoleerde GHG- en GLG-vlak wordt omgezet in Gt-vlakken, en deze worden cartografisch weergegeven.

Het waterschap Velt en Vecht omvat 34 strata met een gezamenlijke oppervlakte van 80585 ha waarvoor een Gd-kaart is vervaardigd. Een aantal van deze strata lopen buiten het beheersgebied van het waterschap door. In totaal zijn in deze studie 747 gerichte opnamen verricht. Daarnaast is uit eerdere studies een aantal opnames overgenomen, en zijn de berekende GxG's gebruikt van 90 locaties met extra grondwaterstandsbuizen, waarvan de gegevens door het waterschap geleverd zijn.

Voor de strata die geheel binnen het waterschap liggen stelde het waterschap extra hulpinformatie beschikbaar, namelijk de zomer- en winterpeilen ten opzichte van maaiveld voor de verschillende peilvakken en de ligging van gebieden met en zonder wateraanvoer. De gebiedsdekkende GxG-voorspellingen zijn verricht met modellen die door middel van automatische modelselectie voor ieder stratum afzonderlijk zijn geselecteerd. Verklarende variabelen zijn hierbij afgeleid van gebiedsdekkende hulpinformatie. Vervolgens is de ruimtelijke structuur van de gestandaardiseerde verschillen tussen de regressievoorspellingen en puntvoorspellingen van de GxG gemodelleerd met een variogram. Gebiedsdekkende voorspelling wordt met universal co-kriging uitgevoerd in het geval van simultane voorspelling van GHG, GVG en GLG. De hulpvariabelen bij kriging zijn met behulp van regressie geselecteerd uit gebiedsdekkende hulpinformatie.

De GHG is in het waterschap Velt en Vecht gemiddeld 72 cm en heeft een gemiddelde voorspelfout van 31 cm. De GVG ligt gemiddeld op 103 cm en heeft een gemiddelde voorspelfout van 29 cm. De GLG ligt gemiddeld op 167 cm en heeft een gemiddelde voorspelfout van 31 cm. Opgemerkt dient te worden dat de voorspelfouten zijn berekend voor puntvoorspellingen; voor vlakvoorspellingen zullen de voorspelfouten aanmerkelijk lager liggen.

Uit de geactualiseerde Gd-kaart blijkt dat het areaal met Gt VI en VII met 37 % is toegenomen ten opzichte van de bodem- en Gt-kaart, schaal 1 : 50 000. Gedeeltelijk kan deze verschuiving worden verklaard uit verschillen in karteringsmethode, zoals het gebruik van regressiemodellen en het elimineren van het effect van korte-termijn meteorologische schommelingen. Gezien de omvang van de toename van relatief 'droge' Gt's is het aannemelijk dat dit de trend van daling van de grondwaterstanden als gevolg van geïntensiveerde ontwatering en waterwinning weerspiegelt.

De GxG-voorspellingen van de Gd-kaart zijn enigszins gladgestreken als gevolg van de toepassing van regressiemodellen, waardoor er minder extremen zijn te zien. Omdat er echter informatie beschikbaar is over de kansverdelingen van de GxG's zijn uitspraken over wateroverlast en droogte in termen van risico's mogelijk. Belangrijk is hierbij echter wel dat de onzekerheid over de werkelijke GxG nauwkeurig is gekwantificeerd. Ook bij deze kwantificering moeten modellen worden gebruikt en veronderstellingen worden gemaakt. Het is aan te bevelen om methodiek te ontwikkelen waarbij de onzekerheid zo min mogelijk wordt onderschat.

De voorspelfouten van GHG, GLG en GVG hebben vergelijkbare patronen: relatief grote ten westen van Coevorden en oostelijk van Coevorden, langs de Vecht en de Duitse grens, en relatief kleine in het centrale en zuidoostelijke deel van het waterschap en rond het Bargerveen.

Bij de Gd-methodiek wordt verondersteld dat de grondwaterstand lineair samenhangt met het neerslagoverschot en dat de grondwaterstand in de tijd normaal verdeeld is. Met behulp van deze veronderstellingen is de grondwaterdynamiek over het algemeen goed te karakteriseren met GxG, duurlijn en regimecurve. Extremen, dat wil zeggen grondwaterstanden die eenmaal per jaar, eenmaal per vijf jaar of

eenmaal per tien jaar gedurende minstens een dag worden overschreden, worden als gevolg van deze veronderstellingen echter overschat. Risico's op wateroverlast worden bijgevolg te conservatief ingeschat, met name in gebieden met ondiepe grondwaterstanden en beheerste peilen. Een remedie voor dit probleem zou de toepassing van tijdreeksmodellen voor drempel-nietlineariteit kunnen zijn. Het verdient aanbeveling om een methode te ontwikkelen waarbij de grondwaterdynamiek van regimes met drempel-nietlineariteit ruimtelijk kan worden voorspeld.

De informatie over voorspelfouten en onzekerheid moet gebruikers van Gd-informatie beter in staat stellen risico's af te wegen, en rationele beslissingen te nemen over investeringen in de waterhuishouding en over de noodzaak van nader onderzoek ter reductie van onzekerheid. Bovendien kan deze informatie worden gebruikt bij het optimaliseren van het grondwaterstandsmmeetnet. In gebieden waar de voorspelfouten kleiner zijn dan een vereist minimum zou het meetnet kunnen worden uitgedund, terwijl in gebieden waar grote voorspelfouten optreden het meetnet kan worden verdicht. Een bijzonder probleem doet zich voor in de gebieden waar keileem voorkomt. Voor deze gebieden zijn geen nauwkeurige waarnemingen van de freatische grondwaterstand beschikbaar; door het optreden van schijnspiegels wordt de afstand van het maaiveld tot het freatische grondwaterniveau niet goed waargenomen in peilbuizen. Het verdient aanbeveling om de peilbuizen in dit gebied te vervangen door een set peilbuizen per locatie, met filters boven en onder stagnerende lagen, of door tensiometers die op verschillende dieptes zijn geïnstalleerd.

Naast de kaarten met voorspelfouten kunnen ook de resultaten van de tijdreeksanalyses worden gebruikt bij het optimaliseren van het grondwaterstandsmmeetnet. Tijdreeksmodellering bleek bij een aantal reeksen niet goed mogelijk omdat zij waren waargenomen in peilbuizen met defecten of andere onvolkomenheden. Deze peilbuizen zouden moeten worden verwijderd en eventueel worden vervangen.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en probleemstelling

De grondwatertrappenkaart (Gt-kaart), schaal 1 : 50 000, is de enige landsdekkende beschrijving van de seizoensfluctuatie van freatische grondwaterstanden in Nederland. De Gt's werden in de periode 1961–1992 simultaan met de bodem in kaart gebracht en opgeslagen in het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS). De Gt heeft betrekking op de diepte van het grondwater. Door de geringe diepte waarop zich in Nederland het grondwater bevindt, is de Gt-informatie van belang bij allerlei vraagstukken met betrekking tot de inrichting, het beheer en de kwaliteit van het landelijk gebied. Een voorbeeld hiervan is de aanwijzing van gronden die gevoelig zijn voor de uitspoeling van nitraat naar het grondwater.

In de loop van de tijd veranderden de niveaus en de fluctuaties van de grondwaterstand als gevolg van aanpassingen van de waterhuishouding aan landbouwkundige wensen, drainage, drinkwaterwinning e.d. (Braat *et al.*, 1989). Hierdoor verouderde de informatie op de Gt-kaarten. De behoefte aan Gt-informatie die de heersende, actuele hydrologische omstandigheden representeert, bleef echter onverminderd groot. Daarom werd de actualisatie van de Gt-kaarten een speerpunt bij de verzameling van bodemdata. Inmiddels bleek ook dat de Gt-informatie de heersende klimatologische omstandigheden beter zou representeren wanneer niet alleen grondwaterstandswaarnemingen gedurende de ca. acht jaar voorafgaand aan de kartering zouden worden gebruikt, zoals tot dan toe gebruikelijk was bij de kartering van Gt's, maar ook gebruik zou worden gemaakt van meteorologische data en de samenhang tussen deze data en de grondwaterstand. Uit een onderzoek onder de gebruikers van de bodem- en Gt-kaart (Finke *et al.*, 1999) bleek bovendien dat een uitgebreidere beschrijving van de grondwaterstandsfluctuatie gewenst was. Er was onder andere behoefte aan ruimtelijke informatie over de gemiddeld hoogste en gemiddeld laagste grondwaterstanden en gemiddelde voojaarsgrondwaterstanden (resp. GHG, GLG en GVG, samengevat GxG) die ten grondslag liggen aan de indeling in Gt-klassen. Daarnaast wensten de gebruikers een indicatie van de nauwkeurigheid van de GxG's.

Kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid van GxG's is nodig voor de ondersteuning van beleidsbeslissingen, zoals de aanwijzing van gronden die gevoelig zijn voor uitspoeling van meststoffen. Bij het nemen van deze beslissingen is het belangrijk inzicht te hebben in het risico dat een perceel ten onrechte als uitspoelingsgevoelig wordt aangewezen. Dit risico moet zo laag mogelijk zijn. Bovendien is het bij de aanwijzing van uitspoelingsgevoelige gronden van belang dat deze is gebaseerd op GxG's die het heersende grondwaterregime representeren, en niet op verouderde informatie. In dit project is gebruik gemaakt van de methodiek die door De Gruijter *et al.* (2004) is ontwikkeld voor de actualisering van grondwaterstandsinformatie en perceelsclassificatie naar uitspoelingsgevoeligheid voor nitraat.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het project is een beschrijving van de grondwaterdynamiek van het waterschap Velt en Vecht te geven die representatief is voor de heersende, actuele hydrologische en klimatologische omstandigheden. Hiertoe dient de dynamiek van de grondwaterstand, door middel van GxG, regimecurve en duurlijn, met gekwantificeerde nauwkeurigheid gebiedsdekkend in kaart gebracht te worden. Daarnaast worden kaarten gemaakt van de extreme grondwaterstanden die hooguit eenmaal per 1, 5 of 10 jaar worden overschreden.

1.3 Uitvoering

Het project werd simultaan uitgevoerd met het project van het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit voor de aanwijzing van gronden die gevoelig zijn voor de uitspoeling van nutriënten naar het grondwater.

In de jaren 2002 en 2003 liep er een onderzoeksproject voor classificatie van percelen naar uitspoelingsgevoeligheid, rekening houdend met de nauwkeurigheid van de GxG-waarden. De Gruijter *et al.* (2004) beschrijven de methodiek die, voor wat betreft de kartering van de Gd, ook in het project dat in dit rapport wordt beschreven is toegepast.

1.4 Opbouw van het rapport

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de karteringsmethode voor de grondwaterdynamiek (Gd) die in het waterschap Velt en Vecht is gevold. Hoofdstuk 3 beschrijft de resultaten. Ten slotte bevat hoofdstuk 4 de conclusies die uit de actualisatie van de beschrijving van de grondwaterdynamiek naar voren zijn gekomen.

1.5 Afkortingen en begrippen

In dit rapport worden een aantal afkortingen en begrippen gebruikt:

Grondwaterstand: de stijghoogte van het freatische grondwater ten opzichte van het maaiveld, gemeten in een boorgat of een peilbuis met een ondiep filter (in het algemeen ondieper dan 5 meter onder het maaiveld).

HG3 en LG3: het gemiddelde van de drie hoogste, resp. drie laagste grondwaterstanden die in een hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart) worden gemeten, uitgaande van een halfmaandelijks meetfrequentie.

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

Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand, GHG: de statistische verwachtingswaarde van de HG3 in enig toekomstig jaar, gegeven de heersende hydrologische en klimatologische condities.

Gemiddeld Laagste Grondwaterstand, GLG: de statistische verwachtingswaarde van de LG3 in enig toekomstig jaar, gegeven de heersende hydrologische en klimatologische condities.

Gemiddelde VoorjaarsGrondwaterstand, GVG: de statistische verwachtingswaarde van de VG3 in enig toekomstig jaar, gegeven de heersende hydrologische en klimatologische condities.

xG3: staat in dit rapport voor het drietal HG3, VG3 en LG3.

GxG: staat in dit rapport voor het drietal GHG, GVG en GLG. In het verleden werd de GxG geschat met het gemiddelde van de xG3's van een periode van tenminste acht jaar lang, waarin geen ingrepen in de waterhuishouding hadden plaatsgevonden. Tegenwoordig wordt een andere schattingsprocedure gevolgd, die de weersvariatie over een periode van 30 jaar, de klimaatperiode, verdisconteert. Daarom wordt ook wel gesproken van een 'klimaatsrepresentatieve GxG', om het verschil met de schattingsmethode uit het verleden duidelijk te maken.

2 De methode van kartering van de grondwaterdynamiek

2.1 Inleiding

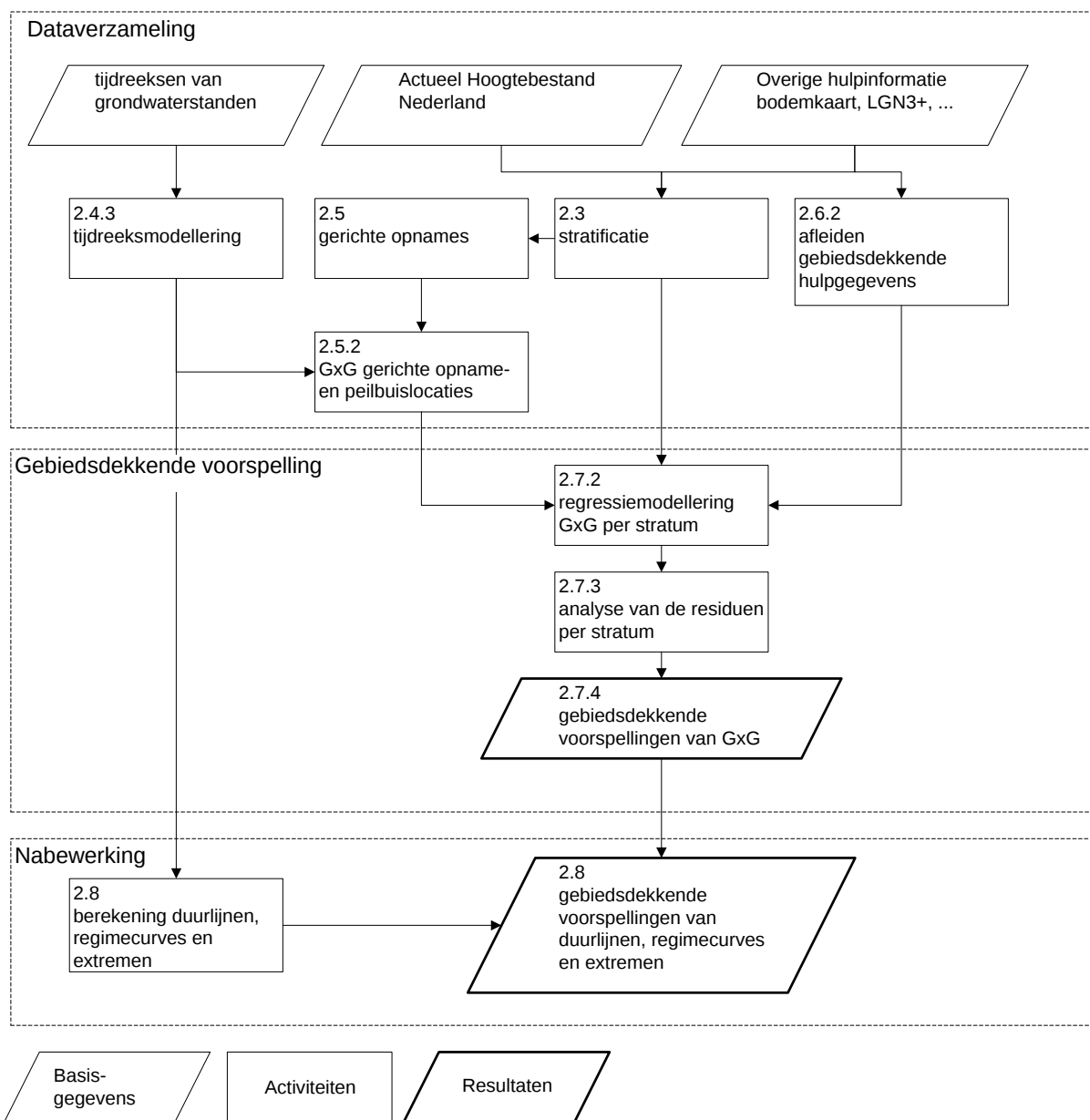
Dit hoofdstuk geeft in het kort de methode weer waarmee de beschrijving van de grondwaterdynamiek is geactualiseerd. De methodiek is door Finke *et al.* (2002, 2004, 2005) en De Gruijter *et al.* (2004) beschreven. Dit hoofdstuk is dan ook gebaseerd op deze rapporten. Eerst is in § 2.2 de werkwijze schematisch weergegeven. In § 2.3 wordt vervolgens de methode van stratificatie beschreven. In § 2.4 komt de selectie van peilbuizen aan de orde, en de schatting van de GxG uit de tijdreeksen die in deze peilbuizen zijn waargenomen. § 2.5 gaat in op de selectie van de locaties waar de zogenaamde gerichte opnames worden verricht, en geeft een beschrijving van de wijze waarop voor deze locaties GxG's worden geschat. § 2.6 beschrijft de gebruikte gebiedsdekkende hulpinformatie over de topografie en de waterhuishouding. In § 2.7 wordt beschreven hoe gebiedsdekkende voorspellingen van de GxG tot stand komen.

2.2 Schematische weergave

De ontwikkelde methodiek bestaat globaal gezien uit de volgende drie fasen:

1. *Verzamelen van benodigde gegevens.* In deze eerste fase worden binnen het te karteren gebied homogene deelgebieden (strata) onderscheiden. Daarbinnen worden vervolgens tijdreeksen van grondwaterstanden verzameld op permanente meetlocaties (peilbuislocaties) en op de tijdelijke locaties van een verdicht meetnet (gerichte-opnamelocaties). Middels 'gerichte opname' in boorgaten op tijdstippen dat de grondwaterstand zich rond GHG- of GLG-niveau bevindt, tijdreeksanalyse en regressieanalyse worden voor alle locaties GxG's geschat die representatief zijn voor de heersende hydrologische en klimatologische omstandigheden. Ook wordt gebiedsdekkende hulpinformatie over topografie en waterhuishouding verzameld.
2. *Geostatistische verwerking van de gegevens.* In deze fase worden de GxG's ruimtelijk voorspeld, gebruik makend van de gebiedsdekkende hulpinformatie.
3. *Nabewerking van de geostatistische resultaten.* In deze fase wordt het geïnterpoleerde GHG- en GLG-vlak omgezet in Gt-vlakken, en deze worden cartografisch weergegeven.

De globale werkwijze bij de gebiedsdekkende voorspelling van GxG is weergegeven in figuur 1. De nummers in de figuur verwijzen naar de paragrafen in dit hoofdstuk, waarin een gedetailleerde beschrijving van de methoden wordt gegeven zoals die in een regionale Gd-kartering wordt toegepast.



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

2.3 Indeling van het gebied in homogene deelgebieden

Het verdelen van het gebied in homogene deelgebieden wordt stratificatie genoemd. Het doel van de stratificatie is om de onzekerheid over de gebiedsdekkende voorspellingen van de GxG te reduceren. Er mag namelijk worden verondersteld dat binnen geohydrologisch homogene deelgebieden de samenhang tussen de GxG en hulpinformatie sterker is dan in het gebied als geheel. Stratificatie heeft uitsluitend zin binnen het studiegebied, omdat hiervoor de relaties met hulpinformatie worden opgesteld en voorspellingen van de GxG worden gedaan.

Er worden strata onderscheiden op basis van eigenschappen die gerelateerd zijn aan bodemopbouw, hydrologie en maaiveldhoogte. Voor elk van de strata wordt de samenhang tussen de GxG en gebiedsdekkende hulpinformatie beschreven met een regressiemodel, dat gebruikt wordt bij de gebiedsdekkende voorspelling van de GxG. Regressiemodellen voor de verschillende strata kunnen onderling aanmerkelijk verschillen.

Voor de stratificatie in het Waterschap Velt en Vecht is de volgende gebiedsdekkende informatie gebruikt:

- het Actueel Hoogtebestand Nederland, AHN 25 × 25 meter (Adviesdienst Geoinformatie en ICT);
- de ligging van waterlopen volgens de topografische kaart van Nederland, Top10-Vector (Topografische Dienst);
- de bodem- en Gt-kaart van Nederland, schaal 1 : 50 000 (Alterra);
- de indeling in peilgebieden volgens het waterschap.

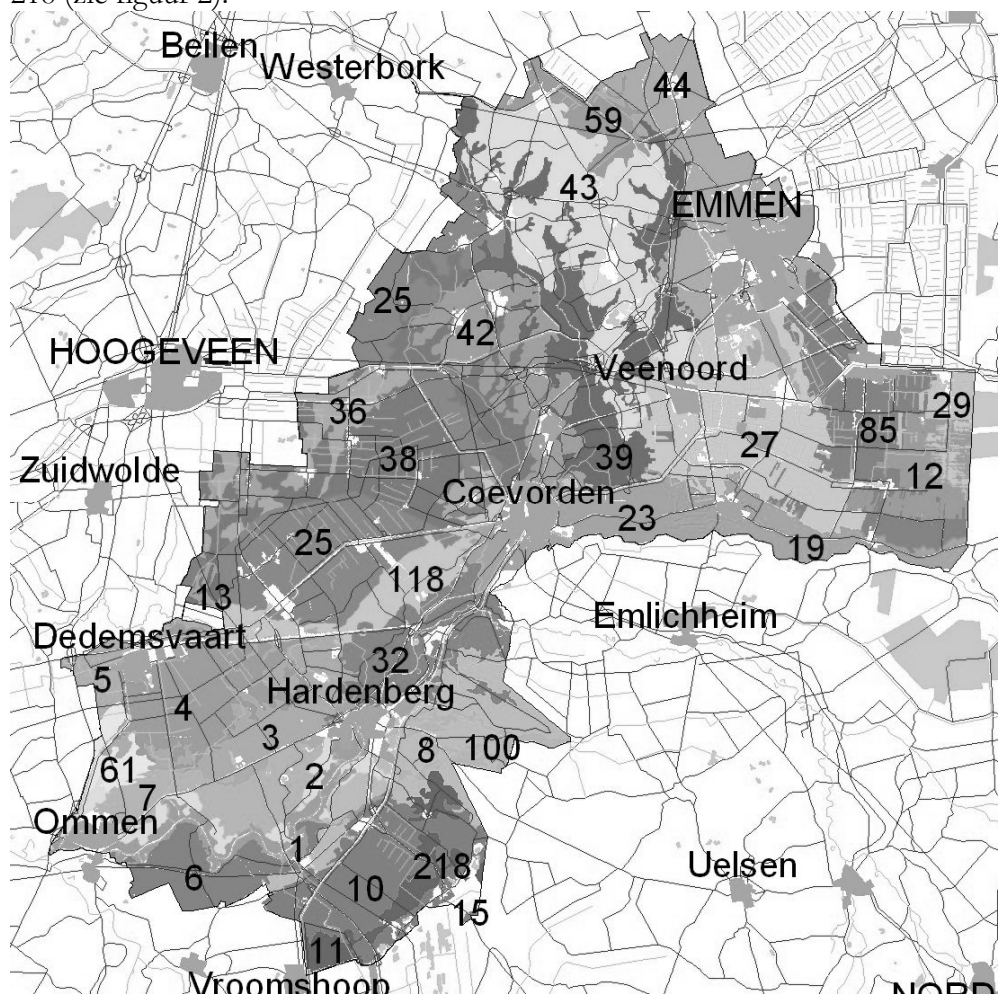
De bodem- en Gt-kaart van Nederland, schaal 1 : 50 000, vormt de basis voor de stratificatie. Indien nodig worden de kaartvlakken aan de hand van additionele informatie gesplitst. De stratificatie verloopt in drie stappen:

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;
 - de aanwezigheid van leemlagen in de ondergrond;
 - de textuur van de bodem;
 - de aanwezigheid van grof zand in de ondergrond;
 - de intensiteit van afwateringspatroon.Voorbeelden van deze bodemkundig-hydrologische eenheden zijn:
 - beekdalen;
 - droge zandgronden;
 - lemige gronden met stagnatie van grondwater door leemlagen.
3. 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 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 juist groter kunnen zijn.

Het waterschap Velt en Vecht omvat 34 strata met een gezamenlijke oppervlakte van 80585 ha waarvoor een Gd-kaart is vervaardigd. Een aantal van deze strata lopen buiten het beheersgebied van het waterschap door.

Bij het project van Gd-actualisatie ten behoeve van de aanwijzing van uitspoelingsgevoelige gronden is het totale areaal om praktische redenen in een aantal regio's

verdeeld. Omdat het waterschap Velt en Vecht bij twee regio's hoort kwam tweemaal het stratumnummer 18 voor. Deze gebieden zijn hernummerd, waarbij gebied 18 uit regio 1 het nieuwe nummer 118 heeft gekregen en het gebied uit regio 2 het nummer 218 (zie figuur 2).



Figuur 2 Strata van de regio Velt en Vecht waarvoor een Gd-kaart is vervaardigd.

2.4 De GxG op peilbuislocaties

2.4.1 Selectie van grondwaterstandsreeksen

De grondwaterstandsreeksen komen voor het overgrote deel uit de DINO-databank van TNO-NITG (Van Bracht, 1988). Daarnaast zijn korte meetreeksen van grondwaterstanden aangeleverd door waterschappen en provincies. Hieruit worden grondwaterstandsreeksen geselecteerd die geschikt zijn voor de berekening van de GxG, op basis van de volgende criteria:

1. de reeksen moeten zijn waargenomen in peilbuizen met een filter dat zich op maximaal vijf meter diepte bevindt;
2. de grondwaterstand t.o.v. maaiveld moet bekend zijn;
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, zonder effecten van ingrepen;
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 acht meter zijn;
10. het meetpunt mag niet worden beïnvloed door afstromend oppervlaktewater (zoals bijvoorbeeld nabij verharding), en mag zich niet bevinden in een kuil, op een dijk, een oprit, en dergelijke.

Criterium 6 komt voort uit het feit dat de reeksen in de DINO-databank meestal tot een half jaar geleden zijn aangevuld, en de reeksen bij aanvang van het project in één keer worden opgevraagd. De criteria 7 tot en met 10 worden getoetst in het veld. Bijlage 1 geeft een overzicht van de peilbuizen uit het DINO-bestand die voor het waterschap Velt en Vecht zijn gebruikt. Figuur 3 geeft de locaties van de peilbuizen weer.



Figuur 3 Ligging van de peilbuizen en locaties van gerichte opnamen

2.4.2 Overige grondwaterstandsreeksen

Waterschappen en provincies exploiteren een aantal grondwaterstandsmetnetten. Over het algemeen hebben deze meetnetten een tijdelijk karakter en zijn ingericht voor een specifiek doel. De gegevens die door waterschappen en provincies worden aangeleverd moeten tenminste voldoen aan criteria 1, 2 en 3 hierboven.

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 wordt berekend. Als de gegevens voldoen aan de criteria die

hierboven zijn gesteld dan wordt de GxG berekend met behulp van tijdreeksmodellering (zie § 2.4.3). Als het niet lukte een tijdreeksmodel op de reeks te kalibreren, als de berekende GxG's onrealistische waarden hadden of als uit visuele beoordeling van het gekalibreerde model bleek dat dit niet goed de grondwaterstandsfluctuatie beschrijft, zijn de gegevens niet gebruikt in de verdere analyses.

Bijlage 2 geeft een overzicht van de extra peilbuizen die voor het waterschap Velt en Vecht zijn gebruikt. Als het aantal waarnemingen klein is, dan zullen de gegevens worden beschouwd als gerichte opnames van de grondwaterstand en zal de methode die in § 2.5 wordt besproken worden gevolgd. 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.

2.4.3 Schatting van de GxG

Het is gebleken dat de 'klassieke' schatting van de GxG op basis van meetreeksen van acht jaar lang een vertekend, systematisch te nat of te droog, beeld van de grondwatersituatie kan geven ten opzichte van een klimaatperiode van dertig jaar (Knotters en Van Walsum, 1994, 1997). Afhankelijk van de weersomstandigheden gedurende de achtjarige meetperiode kan de GxG systematisch te diep of te ondiep worden geschat. Het ideaal zou een grondwaterstandsreeks van dertig jaar lang zijn, waarin geen effecten van ingrepen voorkomen; deze reeks zou goed kunnen worden gebruikt voor het schatten van de GxG. Omdat dergelijke reeksen echter zelden beschikbaar zijn, worden tijdreeksmodellen voor de relatie tussen neerslagoverschot en grondwaterstand 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 parameters, zoals de GxG en G_t , worden berekend, die representatief zijn voor de heersende hydrologische en klimatologische omstandigheden (Knotters en Van Walsum, 1994). Tevens kunnen hieruit duurlijnen en regimecurves worden geconstrueerd.

Voor elke meetreeks van grondwaterstanden middels tijdreeksanalyse eerst de afhankelijkheid tussen de grondwaterstand en het neerslagoverschot gemodelleerd. Uit een analyse van Knotters en Bierkens (1999) blijkt dat reeksen van vier tot acht jaar voor veel ondiepe grondwatersystemen 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. Met dit tijdreeksmodel kunnen vervolgens klimaatsrepresentatieve schattingen van de GxG worden verkregen.

In het tijdreeksmodel dat de dynamische relatie tussen het neerslagoverschot p en de grondwaterstand h beschrijft bestaat de grondwaterstand op tijdstip t uit een som van

twee componenten: een deterministische of transfercomponent, h_t^* , en een ruiscomponent, n_t :

$$h_t = h_t^* + n_t. \quad (2.1)$$

Deze relatie wordt transfer-ruismodel genoemd. De deterministische transfer-component h_t^* is dat deel van de grondwaterstand dat kan worden verklaard uit een lineaire samenhang met het neerslagoverschot. De deterministische component h_t^* wordt in de Gd-methodiek geschat met de vorige grondwaterstandmeting uit de tijdreeks en het neerslagoverschot tussen de huidige en de vorige meting:

$$h_t^* = \delta \cdot h_{t-1}^* + \omega \cdot p_t, \quad (2.2)$$

waarin δ een autoregressieve en ω een moving-averagecoëfficiënt is. De stochastische ruiscomponent n_t bevat de resterende invloeden. In de Gd-methodiek heeft de ruiscomponent de volgende structuur:

$$n_t - c = \phi \cdot (n_{t-1} - c) + \varepsilon_t, \quad (2.3)$$

waarin c een constante is, ϕ een autoregressieve parameter en ε_t een reeks onafhankelijke, gelijk verdeelde ‘verstoringen’ vormt met eindige en constante variantie σ_ε^2 (witte-ruisreeks).

Het model dat beschreven is in vergelijking (2.1) tot en met (2.3) is eenvoudig fysisch te verklaren in termen van de waterbalans van een grondkolom (Knotters, 2001), en geeft in veel situaties een goede beschrijving van de grondwaterstandsdynamiek. Het transfer-ruismodel is ingebed in een Kalmanfilter waardoor kalibratie op onregelmatig waargenomen grondwaterstandsreeksen mogelijk is (Bierkens *et al.*, 1999).

Het gebruik van alleen de deterministische component bij de simulaties zou leiden tot een onderschatting van de temporele variatie. Omdat zowel de GHG als de GLG extreme grondwaterstanden beschrijven, zouden ze worden onderschat als zij uit een deterministische simulatie zouden worden berekend. Daarom is het van belang GHG en GLG te schatten uit stochastische simulaties (zie Knotters, 2001, hoofdstuk 2). Hiermee kan ook de nauwkeurigheid van de geschatte GxG's worden aangegeven. Dit betreft de nauwkeurigheid uitgaande van het gekalibreerde tijdreeksmodel; de nauwkeurigheid van de gekalibreerde tijdreeksparameters en het gekozen model zijn niet verdisconteerd. De werkelijke nauwkeurigheid wordt dus overschat. Om een indruk te krijgen van de werkelijke nauwkeurigheid van de voorspellingen kan bijvoorbeeld een validatie-experiment worden uitgevoerd. Dit houdt in dat de modelvoorspellingen worden vergeleken met onafhankelijke waarnemingen, dat wil zeggen waarnemingen die niet zijn gebruikt bij de kalibratie van het model.

De coëfficiënten van het transfer-ruismodel worden gekalibreerd met het programma KALTFN (Bierkens *et al.*, 1999). De neerslaggegevens zijn afkomstig van het KNMI-neerslagstation dat zich het dichtst bij de peilbuis bevindt. De gegevens betreffende de referentie-gewasverdamping zijn eveneens afkomstig van het dichtstbijzijnde weerstation.

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

$$p_t = p_{N,t} - e_{M,t} \quad (2.4)$$

Met het gekalibreerde tijdreeksmodel en de neerslagoverschotreeks van de dertig jaar worden voor elke peilbuislocatie 100 grondwaterstandsreeksen gesimuleerd van dertig jaar lang. Uit deze 100 gesimuleerde reeksen wordt de GxG en zijn voorspelfout berekend. Wij hebben gekozen voor 100 simulaties omdat dit aantal stabiele schattingen van de GxG oplevert tegen acceptabele rekentijd. De berekening van de GxG uit een gesimuleerde reeks van dertig jaar lang verloopt in twee stappen:

1. per hydrologisch jaar wordt het gemiddelde van de drie hoogste (HG3) en drie laagste (LG3) grondwaterstanden genomen, dan wel de grondwaterstand op 14 en 28 maart en 14 april (VG3);
2. de dertig HG3's worden gemiddeld tot een GHG, de dertig LG3's tot een GLG en de dertig VG3's tot en GVG.

Deze twee stappen worden uitgevoerd voor alle 100 gesimuleerde reeksen. De geschatte GxG is het gemiddelde van de aldus verkregen 100 GxG-realisaties. De standaardfout van de geschatte GxG wordt benaderd met de standaardafwijking van de 100 GxG-realisaties.

2.5 De GxG op gerichte opnamelocaties

2.5.1 Inleiding

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 'gerichte opnames'. Het doel van deze gerichte opnames is om het net van GxG's te verdichten, zodat er uiteindelijk voldoende geschatte GxG's zijn om de statistische relatie met maaiveldhoogte, daarvan afgeleide eigenschappen en de overige hulpinformatie te kunnen analyseren (§ 2.7). Hiertoe is het nodig dat in elk stratum voor tenminste twintig locaties GxG-waarden bekend zijn. Een aanvullende eis is dat deze locaties ruimtelijk gelijkmatig zijn verspreid over het stratum en over de droge en natte terreindelen die in het stratum voorkomen. De locaties worden als volgt gekozen:

1. voor elk stratum wordt bepaald hoeveel waarnemingen er worden gedaan (minimaal twintig);
2. met het Top10-Vectorbestand en het AHN wordt een kaart van de drooglegging gemaakt met voor elke 25×25 m-pixel een drooglegging (zie § 2.6.1);
3. de droogleggingen, of indien deze niet beschikbaar zijn de Gt-klassen, worden per stratum gesorteerd van nat (ondiep) naar droog (diep);
4. de gesorteerde droogleggingen of Gt's worden in een aantal klassen verdeeld dat gelijk is aan het aantal waarnemingen in het stratum. De klassenbreedten zijn kleiner in 'natte' dan in 'droge' terreindelen, waardoor relatief veel opnames in

natte terreindelen plaatsvinden. Dit is om te bereiken dat ondiepe GxG's nauwkeuriger worden voorspeld dan diepe. Een fout van 20 cm op bijvoorbeeld een GHG van 30 cm doet er vaak meer toe dan een fout van 20 cm op een GHG van 100 cm;

5. per klasse worden één waarnemingslocatie en twee reservelocaties geloot.

Er wordt tweemaal gemeten: eenmaal in de winter, als de grondwaterstand zich rond het GHG-niveau bevindt, en eenmaal in de zomer, als de grondwaterstand zich rond het GLG-niveau bevindt. Tijdens neerslagperiodes wordt niet gemeten, omdat de diepte van het freatisch vlak dan te veel varieert in de tijd. Tijdens het veldwerk worden boorgaten gemaakt tot tien cm onder het grondwaterniveau (maar nooit dieper dan 2,50 m). Na een instelperiode (1-2 dagen) wordt de grondwaterstand in het boorgat gemeten. Figuur 3 geeft de locaties van de gerichte opnamen.

2.5.2 Berekening van de GxG voor gerichte-opnamelocaties

Op de tijdstippen van de gerichte opnames worden ook grondwaterstanden gemeten in de peilbuizen waar de GxG met een tijdreeksmodel is berekend (§ 2.4.3). Deze peilbuizen liggen idealiter in de directe omgeving van de meetpunten. In de praktijk worden er op één meetdag in uitgestrekte gebieden metingen verricht, en liggen de peilbuizen 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 grondwaterstanden en de berekende GxG. Het lineaire regressiemodel dat de relatie beschrijft tussen de GxG en een gemeten grondwaterstand noemen we het 'stambuisregressiemodel'. Dit model heeft de volgende vorm:

$$GxG = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \epsilon, \quad (2.5)$$

waarin x_1 de grondwaterstand, β_0 en β_1 regressiecoëfficiënten en ϵ de foutenterm.

Met het stambuisregressiemodel wordt de GxG voorspeld uit grondwaterstands-waarnemingen die tijdens de gerichte opname zijn verricht en worden de voorspelfouten van deze voorspellingen berekend. De voorspelfouten van de GxG-voorspellingen op puntniveau worden ook wel aangeduid als pseudomeetfouten en voor deze meetfouten kan in de verdere verwerking worden gecorrigeerd (zie § 2.7.2, gewogen regressie en § 2.7.3, correctie variogram).

Soms wordt de grondwaterstand niet waargenomen binnen de maximale boordiepte van 2,50 meter. Dit noemen we 'een gecensureerde waarneming': de precieze waarde is onbekend, maar wel is bekend dat de waarde 'groter dan' een grenswaarde is. In deze situatie kiezen wij voor de benadering die door Cohen (1991) is beschreven. Eerst wordt een *maximum likelihood*-schatting 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. Het bekende deel van de verdeling zijn alle gemeten grondwaterstanden rond het tijdstip waarop respectievelijk GHG of GLG wordt verwacht. Hieruit wordt een normale

verdeling geschat. Van de geschatte verdeling wordt de diepe staart gebruikt voor de schatting van een 'dieper dan'-waarneming. De check op gecensureerde waarnemingen en de vervanging met het meest waarschijnlijke getal is standaard ingebouwd in het computerprogramma waarmee de GxG wordt voorspeld.

Voor stambuisregressie is gebruik gemaakt van 40 stambuizen waarvan de x - en y -coördinaat, de geschatte GxG, de voorspelfout van GxG, de tijdreeksparameters en gemeten grondwaterstanden zijn opgenomen als bijlage (zie Cd-rom\stambuisgegevens\stambuizen-vv). Met behulp van stambuisregressie zijn de grondwaterstanden die tijdens de 'gerichte opnames' zijn waargenomen omgerekend naar GxG's die representatief zijn voor de heersende hydrologische en klimatologische omstandigheden. In totaal zijn in deze studie 747 gerichte opnames verricht. Daarnaast is uit eerdere studies een aantal opnames overgenomen. De voorspelde GxG op locaties van de 'gerichte opnames' zijn beoordeeld op basis van een vergelijking met informatie uit de 1:50.000 bodemkaart voor de betreffende locatie. Er is daarbij gelet op zowel de bodemcode met voor- en achtervoegsels als de aanduiding van Gt-klasse. Er zijn per groep van bodemkenmerken, zoals de aanduiding van stagnerende profielen, de aanduiding van xerogronen of het fluctuatietraject van een Gt-klasse, criteria opgesteld voor controle van de met stambuisregressie geschatte GxG (Beoordelingscriteria Cd-rom\beoordelingscriteria\rekenregel.doc). Schattingen van de GxG die niet voldoen aan de criteria die per groep van bodemkenmerken zijn opgesteld zijn bij de verdere verwerking niet gebruikt. Daarnaast zijn er ook GLG- en GHG-schattingen afgefallen omdat er op een aantal locaties van gerichte opname geen zomer- of wintergrondwaterstanden zijn gemeten. Door controles zijn vijf locaties met GHG- en GVG-schattingen en 33 met GLG-schattingen vervallen. De x - en y -coördinaten, de geschatte GxG en de voorspelfout van GxG voor deze locaties zijn opgenomen als bijlage (zie Cd-rom\Gerichte-opnames\alle_opnames). Daarnaast zijn de berekende GxG's gebruikt van 90 locaties met extra grondwaterstandsruizen, waarvan de gegevens door het waterschap geleverd zijn. Deze gegevens zijn eveneens opgenomen als bijlage (zie Cd-rom\extra-ruizen\extra-ruizen).

2.6 Gebiedsdekkende hulpinformatie over topografie en waterhuishouding

2.6.1 Bewerking van het AHN-bestand

Het Actueel Hoogtebestand Nederland wordt eerst gecontroleerd op 'onnatuurlijke' hoogten die veroorzaakt worden door bijvoorbeeld schuren, huizen, wegen en viaducten. Deze onnatuurlijke hoogten zijn verwijderd. Eerst zijn alle cellen die behoren tot de LGN4-klassen 'zoet water', 'zout water', 'stedelijk bebouwd gebied' en 'hoofdwegen en spoorwegen' verwijderd. Vervolgens zijn de standaardafwijkingen van de hoogten zijn berekend voor schuivende vensters van de 3×3 omliggende cellen. Cellen zijn verwijderd als deze standaardafwijking groter is dan 100 cm, en de cellen behoren 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 op minder dan 50 m afstand van 'hoofdwegen en spoorwegen', dan zijn deze ook verwijderd.

2.6.2 Afleiding van gebiedsdekkende 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 ondergebracht in dezelfde groep. De inhoud en de afleiding van de gebiedsdekkende hulpinformatie wordt hieronder voor elk van de vijf groepen beschreven. Het AHN-bestand tezamen met de hulpbestanden wordt in het vervolg het 'AHN+-bestand' genoemd.

Groep 1: relatieve maaiveldhoogten

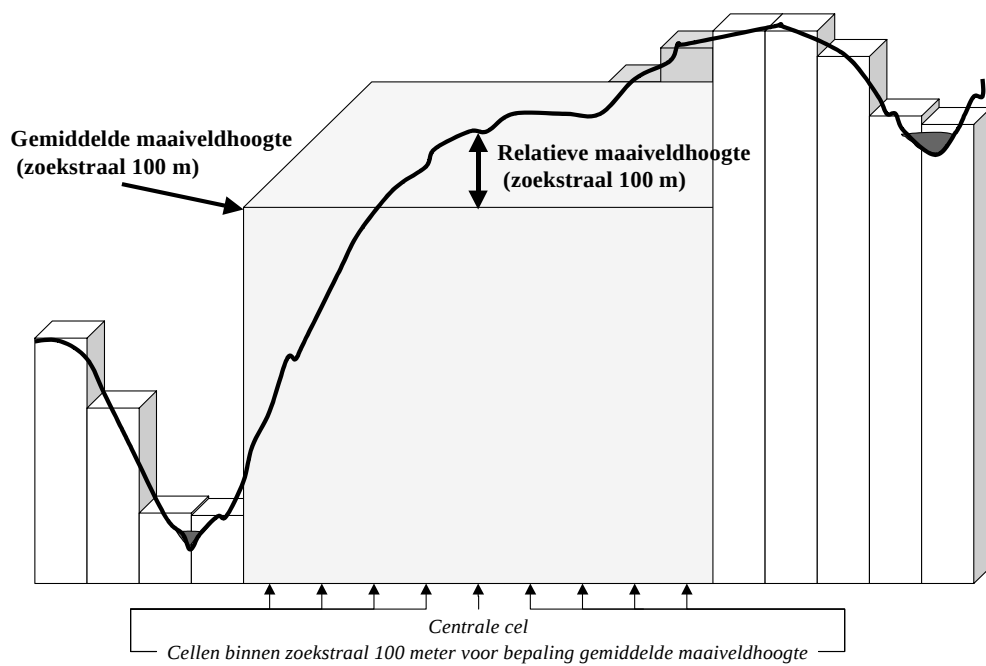
Uit onderzoek van Te Riele en Brus (1992) en Te Riele *et al.* (1995) is gebleken dat grondwaterstanden kunnen samenhangen met de maaiveldhoogte ten opzichte van NAP en met de relatieve maaiveldhoogte. Met relatieve maaiveldhoogte wordt de hoogte van een punt ten opzichte van de gemiddelde hoogte in een gebied binnen een bepaalde straal rond dat punt bedoeld (figuur 4). 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

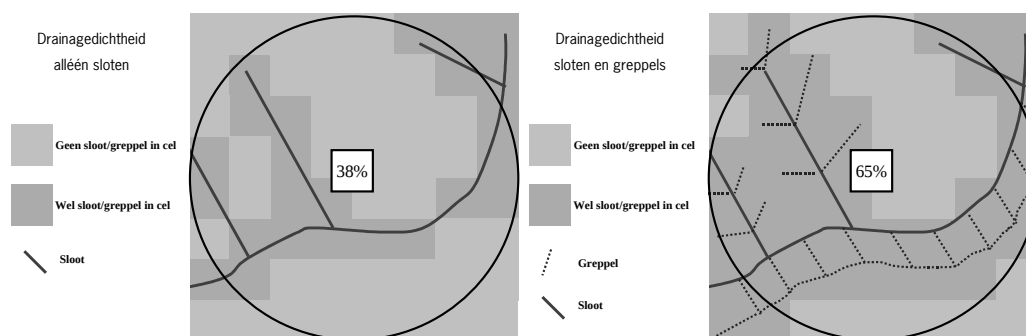
De dichtheid van de ontwateringsmiddelen beïnvloedt de grondwaterstanden in een gebied (met name de GHG, maar indien er sprake is van waterinlaat ook de GLG). Daarom wordt de drainagedichtheid gebiedsdekkend geschat en gebruikt als hulpinformatie. Uit het Top10-Vectorbestand zijn alle watergangen geselecteerd. Hiervan zijn twee bestanden gemaakt: een bestand met alle watergangen ('sloot en greppel') en een bestand waar de detailontwatering uit is verwijderd ('alleen sloot'). Voor elke 25×25-metercel is bepaald in hoeveel naburige cellen binnen een zoekstraal van 300 en 400 meter drainage voorkomt (figuur 5). Hieruit volgt een indicatie van de drainagedichtheid voor 'alleen sloot' en 'sloot en greppel'.

Groep 3: drooglegging ten opzichte van maaiveld

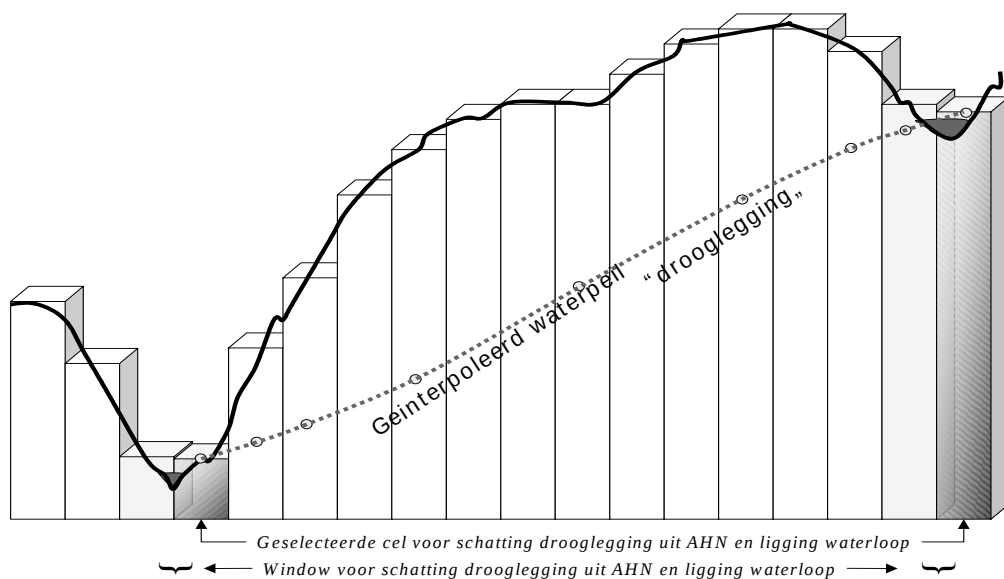
De drooglegging is het hoogteverschil tussen de waterspiegel in een waterloop en het grondoppervlak. Het kan worden geïnterpreteerd als het verwachte effect van het peilbeheer en de infrastructuur van de waterlopen op de grondwaterstand. Een gebiedsdekkende schatting van de drooglegging zal daarom naar verwachting nuttige hulpinformatie opleveren bij een grondwaterstandskartering.



Figuur 4 Bepaling relatieve maaiveldhoogte uit het AHN



Figuur 5 Bepaling van de drainagedichtheid



Figuur 6 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-meterpixel de drooglegging is bepaald (figuur 6). 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. Waarschijnlijk geeft de drooglegging die op bovenstaande wijze is berekend een systematisch te nat beeld van de drooglegging, omdat het peil geschat in stap 1 deels op hoogtecijfers van de oevers zal zijn gebaseerd, en niet op het waterpeil zelf.

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

Gt op kaart	GHGboven	GHGonder	GLGboven	GLGonder
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

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 de 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. Om die reden is de 1 : 50 000 Gt-kaart omgezet in kaarten van de GHGoud en GLGoud, waarbij gebruik is gemaakt van de karakterisatie van Gt's door Van der Sluijs (1982, 1990), zie tabel 1. De Gt-klassen van de 1 : 50 000 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 5-de en 95-ste percentiel van de AHN-hoogten in dat vlak bepaald. Voor de hoogten tussen het 5 - de en 95-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 ook voor de locaties buiten het 5-de tot het 95-ste percentiel. De op deze wijze neergeschaalde oude GHG en GLG worden als gebiedsdekkende hulpinformatie aangeboden.

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 de oude GHG en GLG berekend. Deze bergingscapaciteiten zijn als gebiedsdekkende hulpinformatie gebruikt.

2.6.3 Extra hulpinformatie voor het waterschap Velt en Vecht

Voor de strata die geheel binnen het waterschap liggen stelde het waterschap extra hulpinformatie beschikbaar, namelijk de zomer- en winterpeilen ten opzichte van maaiveld voor de verschillende peilvakken (**groep 6**) en de ligging van gebieden met en zonder wateraanvoer (**groep 7**).

2.7 Gebiedsdekkende voorspelling van de GxG

2.7.1 Inleiding

De gebiedsdekkende voorspelling van de GxG vindt plaats in een aantal stappen, die weergegeven zijn in figuur 1. Allereerst wordt met behulp van regressieanalyse de samenhang tussen de GxG op puntlocaties en de zeven groepen met gebiedsdekkende hulpinformatie onderzocht.

De regressieanalyse wordt beschreven in § 2.7.2 en wordt per stratum uitgevoerd. Dit levert voor elk stratum een selectie van predictoren op, een gekalibreerd regressiemodel en een aantal residuen (verschilwaarden tussen de GxG die voor puntlocaties is berekend en de GxG die voor deze locaties is voorspeld met het regressiemodel). Vervolgens wordt de ruimtelijke structuur van deze residuen

gemodelleerd met een variogram. Dit gebeurt niet per stratum, maar voor alle strata tegelijk, teneinde over voldoende metingen te beschikken om de ruimtelijke structuur te kunnen modelleren. De laatste stap, de voorspelling van de GxG, wordt beschreven in § 2.7.3. Voor elke cel uit het 25×25-metergrid wordt de GxG voorspeld op basis van de, met regressie, geselecteerde predictoren, de variogrammen en de waarden van de GxG op meetlocaties.

2.7.2 Regressieanalyse

Voor elk stratum is een model geselecteerd dat de samenhang beschrijft tussen de GxG op meetlocaties en de zeven groepen met gebiedsdekkende hulpinformatie die zijn beschreven in § 2.6.2 en 2.6.3. In totaal zijn in het waterschap Velt en Vecht 1011 datapunten gebruikt bij de Gd-kartering. Hiervan liggen er 441 in de gebieden die geheel binnen het waterschap liggen, en 570 liggen er in de gebieden die deels binnen het waterschap liggen.

Omdat verklarende variabelen (gebiedsdekkende hulpinformatie) die tot dezelfde groep behoren naar verwachting uitwisselbaar zijn in de regressieanalyse, is uit elke groep slechts één variabele in het regressiemodel opgenomen. Aldus wordt een set kandidaatmodellen samengesteld, met elk een regressieconstante en met maximaal zes predictorvariabelen. Voor elk stratum is het beste model geselecteerd op basis van het Mallows' Cp-criterium (Mallows, 1966). Om de nauwkeurigheid (of pseudo-meetfout) van de GxG-voorspellingen voor peilbuis- en gerichte opnamelocaties te kunnen verdisconteren is een gewogen regressie uitgevoerd, waarbij de nauwkeurigheid als gewicht diende: hoe nauwkeuriger de GxG-voorspelling, 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 , $i = 1 \dots n$, en f een correctiefactor die ervoor zorgt dat de gewichten sommeren tot het aantal waarnemingen n , gebruikt in de regressieanalyse.

Voor gebieden die deels in het waterschap liggen is de hulpinformatie gebruikt die standaard is bij het LNV-project van Gd-kartering ten behoeve van de aanwijzing van uitspoelingsgevoelige gronden (groep 1 tot en met 5, zie § 2.6.2 en De Gruijter *et al.*, 2004).

2.7.3 Ruimtelijke structuur van de residuen

Het verschil tussen de GxG-waarde op een peilbuislocatie of de locatie van een gerichte opname (GxG_{obs}), en de waarde die is berekend met het geselecteerde regressiemodel (GxG_{mod}), noemen we residu en wordt als volgt berekend:

$$\varepsilon_k(x) = GxG_{\text{obs},k}(x) - GxG_{\text{mod},k}(x), \quad (2.6)$$

waarin k aangeeft in welk stratum het residu ligt. Het gemiddelde van de residuen per stratum is ongeveer nul en ze hebben een variantie s_k^2 . Waarschijnlijk vertonen de residuen een ruimtelijke correlatie of structuur. Het regressiemodel behoeft immers

niet alle ruimtelijke structuur in de GxG verklaard te hebben uit de gebiedsdekkende hulpinformatie. Voor de voorspelling van de GxG en de berekening van de voorspelfout, is het van belang 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 wordt gemodelleerd voor GHG, GVG en GLG afzonderlijk. Eerst worden de residuen per stratum gestandaardiseerd door ze te delen door de variantie van de residuen per stratum s^2_k . Na standaardisatie worden de residuen uit alle strata gebruikt bij de modellering van één en hetzelfde, gestandaardiseerd variogram. De variogrammen worden vervolgens per stratum gedestandaardiseerd op basis van s^2_k . Dit stratum-specifieke variogram wordt nog gecorrigeerd voor de pseudomeetfout (eigenlijk voorspelfout) van de GxG-opnamen door vermindering van de *nugget*-parameter van het variogram met de gemiddelde variantie van de pseudomeetfout in de GxG-opnamen per stratum. Indien de *nugget*-parameter van het variogram kleiner is dan de gemiddelde variantie van de pseudomeetfout wordt ze gelijk gesteld aan nul.

Tabel 2 geeft de parameters van de gestandaardiseerde variogrammen voor het waterschap Velt en Vecht.

Tabel 2 Kenmerken en parameters van het gebruikte gestandaardiseerde variogram.

GxG	Type	Nugget[-]	Sill[-]	Range[m]
GHG	Exponentieel	0.3	0.7	1000
GVG	Exponentieel	0.35	0.64	1000
GLG	Exponentieel	0.5	0.45	1000

De gebruikte regressiemodellen voor de vlakdekkende voorspelling zijn opgenomen als bijlage (zie Cd-rom\modelsamenvattingen\r1vv-modelsamen.txt).

2.7.4 Universal kriging van GxG

De gebiedsdekkende voorspelling van de GxG vindt voor elk stratum afzonderlijk plaats. Binnen een stratum wordt bij een standaard kartering rekening gehouden met de correlatie tussen GHG, GVG en GLG door cross-variogrammen te gebruiken bij voorspelling met Gstat (Pebesma en Wesseling, 1998). Gebiedsdekkende voorspelling wordt met universal co-kriging uitgevoerd in het geval van simultane voorspelling van GHG, GVG en GLG. Als driftvariabelen bij kriging wordt gebruik gemaakt van de, met regressie, geselecteerde predictoren (gebiedsdekkende hulpinformatie).

Het resultaat is een gebiedsdekkende krigingvoorspelling van de GxG en een gebiedsdekkende krigingvariantie van de voorspelling per stratum. De GxG-voorspellingen en voorspelfouten per stratum worden in een GIS samengevoegd tot

kaarten voor het totale gebied. De resolutie en gebiedsbegrenzing is gelijk aan de gebiedsdekkende hulpinformatie waaraan de gebruikte predictoren zijn ontleend.

2.8 Ruimtelijke voorspelling van duurlijnen, regimecurves en extremen

2.8.1 Duurlijnen

Duurlijnen geven het verband aan tussen een grondwaterstand en de tijdsduur dat deze wordt overschreden. Duurlijnen komen overeen met de cumulatieve frequentieverdeling van de grondwaterstand. Deze wordt voor een normale verdeling beschreven met het gemiddelde en de standaardafwijking. De grondwaterstanden die gesimuleerd worden voor een periode van 30 jaar lang worden verondersteld bij benadering normaal verdeeld te zijn. Weliswaar is er een autocorrelatiestructuur, maar het aantal grondwaterstanden is zeer groot (centrale limietstelling). Voor elk AHN-pixel kan nu een duurlijn worden geconstrueerd, als het gemiddelde en standaardafwijking van de grondwaterstand bekend zijn. Verwacht mag worden dat de gemiddelde grondwaterstand samenhangt met het gemiddelde van de GHG en de GLG die voorspeld zijn voor het pixel, en dat de standaardafwijking van de grondwaterstand samenhangt met het verschil tussen de GHG en de GLG. Deze samenhang is onderzocht voor peilbuislocaties waarvoor de GHG en de GLG geschat zijn met behulp van een transfer-ruismodel. Deze schattingen zijn immers relatief nauwkeurig ten opzichte van schattingen voor locaties waarvoor gebruik is gemaakt van stambuisregressie (§ 2.5.2). Vervolgens worden deze relaties gebruikt om voor de AHN-pixels duurlijnen van grondwaterstanden te construeren.

De regressierelaties zijn opgesteld voor vijf deelgebieden: Bargerveen, beekdalen, keileemgebieden, veenkolonies en hoge en droge gronden. De keuze voor vijf deelgebieden in plaats van de 30 oorspronkelijke strata is een consequentie van het feit dat we ons hier beperken tot locaties waarvoor met behulp van een tijdreeksmodel een GxG is geschat. Het aantal locaties per stratum is te klein om voor elk stratum afzonderlijk een regressierelatie op te stellen, vandaar een indeling in vijf deelgebieden met voldoende peilbuislocaties per deelgebied om een regressierelatie op te kunnen stellen.

2.8.2 Regimecurves

Een regimecurve geeft voor elke dag in enig toekomstig jaar de verwachte grondwaterstand, gegeven de huidige hydrologische en klimatologische condities. Het is nadrukkelijk niet het verwachte grondwaterstandsverloop in een toekomstig jaar, omdat de temporele autocorrelatie tussen grondwaterstanden niet is verdisconteerd. Een waarde uit de regimecurve, bijvoorbeeld voor dag 100, geeft dus de verwachte grondwaterstand op dag 100 in enig toekomstig jaar, ongeacht de grondwaterstanden die voorafgaand aan dag 100 optraden.

De gebiedsdekkende voorspelling van de regimecurves kent de volgende stappen:

1. de regimecurves worden voor alle peilbuislocaties uit de gesimuleerde grondwaterstandsreeksen berekend, voor de halfmaandelijke data waarop de grondwaterstand wordt waargenomen;
2. de relatie tussen de 24 waarden van deze regimecurves en de GHG, GLG en GxG wordt gemodelleerd met 24 regressiemodellen, die de volgende algemene structuur hebben:

$$D_t = \beta_{0,t} + \beta_{1,t} \cdot GHG + \beta_{2,t} \cdot GVG + \beta_{3,t} \cdot GLG + \varepsilon_t, \quad (2.7)$$

waarin D_t de grondwaterstand op tijdstip t ($t=1...24$ in de regimecurve is, $\beta_{0...3,t}$ vier regressiecoëfficiënten zijn en ε_t de foutenterm is;

3. met de 24 regressierelaties worden voor elk AHN-pixel de 24 punten van de regimecurve voorspeld, gebruikmakend van de GHG, GVG en GLG's die voor de pixels zijn voorspeld.

Voor elk punt van de regimecurve kan een 90%-voorspellingsinterval worden berekend. Het 5^e en het 95^e percentiel van de waarschijnlijkheidsverdeling van grondwaterstanden geven de grenzen van dit interval aan. Ze worden overeenkomstig stap 2 en 3 ruimtelijk voorspeld.

2.8.3 Extremen

Uit de duurlijnen kunnen de grondwaterstanden worden afgeleid die bijvoorbeeld eenmaal per vijf jaar of eenmaal per tien jaar worden overschreden. Uitgaande van een normale verdeling van grondwaterstanden, zijn uit de duurlijnen die voor elk pixel met een gemiddelde en een standaardafwijking zijn geconstrueerd de grondwaterstanden geschat die eenmaal per jaar, eenmaal per vijf jaar of eenmaal per tien jaar gedurende tenminste een dag worden overschreden.

3 Resultaten

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de Gd-actualisatie voor het waterschap Velt en Vecht beschreven. De resultaten zijn op CD-rom als bijlage bij dit rapport gevoegd. § 3.2 gaat in op de geactualiseerde GxG's. In § 3.3 worden de duurlijnen, regimecurves en geschatte extremen bediscussieerd.

3.2 Geactualiseerde GxG

De bestanden Cd-rom\gxg\ghgpr,\gvgpr,\glgpr,\ghgvfout,\gvgvfout,\glgvfout en \Gt_grd op de bijgevoegde CD-rom bevatten de voorspelde GxG's en hun voorspelfouten. De GHG is in het waterschap Velt en Vecht gemiddeld 72 cm en heeft een gemiddelde voorspelfout van 31 cm. De GVG ligt gemiddeld op 103 cm en heeft een gemiddelde voorspelfout van 29 cm. De GLG ligt gemiddeld op 167 cm en heeft een gemiddelde voorspelfout van 31 cm.

De GxG-kaarten geven de hydrologische en landschappelijke patronen die in het waterschap aanwezig zijn duidelijk weer. De meest ondiepe GHG's en GVG's komen voor in het Bargerveen en in de beekdalen, zoals het dal van het Drostendiep, de Westerstroom, het Holslootdiep, de Geesterstroom en het Loodiep. Zeer ondiepe GLG's komen uitsluitend voor in het Bargerveen.

De diepste GxG's worden gevonden op de eerste en tweede Hondsrug in de boswachterijen Schoonloo, Sleenerzand, Odoorn en Exloo. Ook de Lutterhaar bij Oud-Lutten en de hoge zandgronden in het Ommerbos ten noorden van de Hessenweg komen duidelijk als gebieden met diepe GxG's naar voren.

Het Vechtdal valt op door een grote ruimtelijke variatie in GxG's. Op korte afstand worden hier diepe en ondiepe grondwaterstanden aangetroffen. Opvallend zijn de rivierduinen, met name langs de noordoever tussen Stegeren en Heemse.

Veenkoloniale gebieden en jonge heideontginningen vallen op door een geringe ruimtelijke variatie in GxG's. Opmerkelijk is dat rond Beerzerveld en de Hammerflier de GxG's relatief ondiep zijn.

De kaartbladen van de Bodem- en Gt-kaart, schaal 1 : 50 000, waarbinnen het waterschap Velt en Vecht valt zijn gereedgekomen in de jaren 1978 (17 West en Oost), 1983 (28 West), 1989 (22 West en Oost) en 1992 (28 Oost). De laatste ca. 100 jaar is in grote delen van pleistoceen Nederland de grondwaterstand gedaald (Van der Gaast, 2005; Knotters en Jansen, 2005) en deze daling blijkt zich ook na 1990 voort te zetten (Kremers en Van Geer, 2000). In tabel 3 zijn de oppervlakten van de Gt-klassen van Bodem- en Gt-kaart, schaal 1 : 50 000, vergeleken met die van de geactualiseerde Gd-kaart. Hieruit blijkt dat in het Waterschap Velt en Vecht het

areaal met Gt VI en VII met 37 % is toegenomen. Het areaal met Gt II, III, III*, IV en V is afgenomen met 33 %. Het areaal met Gt VIII blijkt te zijn verdwenen. De verschuivingen in de Gt-klassen hebben de volgende oorzaken:

1. Geïntensiveerde ontwatering en waterwinning hebben tot daling van de grondwaterstanden geleid, waardoor het areaal van gronden met Gt VI en VII is toegenomen;
2. De GxG's zijn verschillend geschat. Bij de totstandkoming van de bodem- en Gt-kaart, schaal 1 : 50 000, werden de schattingen van GxG's gebaseerd op reeksen van ca. acht jaar lang. Bij de Gd-methodiek daarentegen worden GxG's geschat uit simulaties van 30 jaar lang, om het effect van schommelingen in het neerslagoverschot zoveel mogelijk te elimineren;
3. In de Gd-methodiek vindt een zekere *smoothing* plaats als gevolg van het toepassen van regressiemodellen (*regression to the mean*), namelijk bij de stambuisregressie (§ 2.5.2) en maaiveldsregressie (§ 2.7.2). Dit verklaart een deel van de afname van het areaal van extreem natte of extreem droge Gt's. Voor deze arealen zijn echter wel uitspraken te doen over wateroverlast of droogte in termen van risico's, omdat de kansverdeling van GxG's immers geschat is in de Gd-methodiek.

De patronen in de voorspelfouten zijn voor GHG, GVG en GLG vergelijkbaar. De patronen worden voor een belangrijk deel bepaald door de stratumindeling en de afstand tot waarnemingslocaties. De grootste voorspelfouten zijn berekend voor strata 19 en 25, gelegen respectievelijk langs de Vecht bij de Duitse grens en verspreid ten westen van Coevorden (zie figuur 2). Voorspelfouten voor stratum 19 liggen tussen 40 en 85 cm en voor stratum 25 tussen 40 en 65 cm. Dit is hoog ten opzichte van de gemiddelden van rond de 30 cm.

Het effect van de stratificatie is geweest dat in strata waar de GxG nauwkeurig kan worden voorspeld dit is gebeurd, terwijl de voorspelfouten die optreden in strata waar de samenhang tussen GxG en hulpinformatie gering is niet zijn uitgesmeerd over het gehele gebied.

In het noordelijk deel van het waterschap liggen voorspelfouten tussen 20 en 50 cm. Voor het centrale en zuidoostelijke deel van het waterschap zijn relatief lage voorspelfouten berekend, tussen 5 en 40 cm. Ook voor het gebied rond het Bargerveen werden relatief kleine voorspelfouten berekend, tussen 5 en 20 cm. Het is belangrijk om zich te realiseren dat dit voorspelfouten van puntvoorspellingen zijn. Vlakvoorspellingen van GxG's zullen aanmerkelijk nauwkeuriger uitvallen dan de puntvoorspellingen. Het zelfde geldt voor de klassieke Gt-kaarten, schaal 1 : 50 000: als deze zouden worden gebruikt voor puntvoorspellingen dan zouden er voorspelfouten optreden die minstens zo groot zijn als die van de Gd-kartering.

Wat een 'redelijke' voorspelfout is kunnen uitsluitend de gebruikers van Gd-informatie aangeven. Wat redelijk of rationeel is hangt samen met de risico's van foute beslissingen die uit de voorspelfouten voortvloeien. Welke risico's zijn nog acceptabel en bij welke voorspelfouten kunnen geen verantwoorde beslissingen meer worden genomen? Is extra onderzoek vereist om risico's te reduceren, of kunnen met de huidige voorspellingen en onzekerheidsinformatie verantwoorde, rationele, beslissingen worden genomen? De informatie over onzekerheid moet de gebruikers van Gd-informatie beter in staat stellen risico's af te wegen, en rationele beslissingen te nemen over investeringen in de waterhuishouding en over de noodzaak van nader onderzoek ter reductie van onzekerheid.

Tabel 3 Kruistabel met Gt-klassen van de Bodem- en Gt-kaart, schaal 1 : 50 000, en van de Gd-kaart. Oppervlakten in ha

Bodem- en Gt- kaart	Gd-kaart										Totaal bodem- en Gt-kaart	opp. %
	I	II	III	III*	IV	V	V*	VI	VII	VIII		
I	0	0	11	3	2	3	2	7	2	0	30	0
II	1	89	2046	1061	672	255	557	1720	473	18	6893	9
III	8	81	976	716	262	614	908	3480	961	2	8009	10
III*	0	25	993	1140	456	399	1630	6483	626	1	11751	15
IV	0	3	87	168	254	175	352	3879	1643	3	6565	9
V	0	5	119	269	28	315	926	1994	663	0	4319	6
V*	1	2	47	62	30	113	323	3076	1092	0	4746	6
VI	10	16	199	183	175	403	855	10217	7061	8	19126	25
VII	3	5	17	9	13	58	108	1775	8443	2	10430	14
VIII	0	0	0	0	1	0	2	262	4243	2	4510	6
Totaal- Gd	22	226	4494	3611	1895	2334	5662	32892	25207	36		
opp. %	0	0	6	5	2	3	7	43	33	0		

3.3 Duurlijnen, regimecurves en extremen

De bestanden Cd-rom\duurlijnen\duurl_[7...352]_grd op de bijgevoegde CD-rom bevatten de duurlijnen. De getallen 7 t/m 352 staan voor het aantal dagen per jaar dat de grondwaterstand wordt overschreden. De bestanden Cd-rom\regimecurves\P5_[1...24], \P50_[1..24] en \P95_[1...24] bevatten de regimecurves. De getallen 1 t/m 24 staan voor 24 dagen gelijkmatig verdeeld over een kalenderjaar (halfmaandelijke frequentie). P5, P50 en P95 staan voor respectievelijk het vijfde, het vijftigste en het 95^e percentiel van de kansverdeling van grondwaterstanden op een bepaalde dag. Het vijftigste percentiel is het zelfde als de mediane grondwaterstand. De bestanden Cd-rom\duurlijnen\duurl_1j_grd, duurl_5j_grd en duurl_10j_grd bevatten de extreme grondwaterstanden die één dag per jaar, één dag per 5 jaar of één dag per 10 jaar worden overschreden.

Belangrijke veronderstellingen in de gevolgde methode van Gd-actualisatie zijn die van een lineaire samenhang tussen neerslagoverschot en grondwaterstand, en een grondwaterstand die normaal verdeeld is in de tijd. Uit onderzoek van onder meer Knotters en Van Walsum (1997) en Knotters en De Gooijer (1999) blijkt dat de veronderstelling van lineariteit in veel gevallen goed bruikbaar is bij de voorspelling van grondwaterstanden uit tijdreeksen van het neerslagoverschot, maar dat er ook situaties zijn waarbij een niet-lineair model voor de samenhang tussen neerslagoverschot en grondwaterstand beter bruikbaar is. Dit is met name het geval bij ondiepe grondwaterregimes, waar hoge grondwaterstanden worden afgevlakt door ontwatering of oppervlakkige afvoer. In deze situaties kan de samenhang tussen neerslagoverschot en grondwaterstand worden gesplitst in een regime boven het drainageniveau en een regime onder het drainageniveau. Het drainageniveau fungeert als drempel en we noemen deze vorm van niet-lineariteit daarom drempel-nietlineariteit. Voor dit soort situaties is de veronderstelling van normaal verdeelde grondwaterstanden ook niet bruikbaar; door de 'afoming' van het grondwater komen hoge standen minder vaak voor dan lage standen wat resulteert in een scheve verdeling.

Voor de meeste voorspelde GxG's, het grootste deel van de duurlijn en de regimecurve zijn de consequenties van veronderstellingen over lineariteit en normaliteit gering, zoals uit Knotters en De Gooijer (1999) blijkt. Bij de schatting van de grondwaterstanden die eenmaal per jaar, eenmaal per vijf jaar of eenmaal per tien jaar tenminste een dag worden overschreden blijken deze veronderstellingen echter wel vaker consequenties te hebben. Dit komt omdat deze schattingen zijn gebaseerd op het extreme, geëxtrapoleerde bereik van de duurlijn voor duren van een dag of korter. Het gevolg is dat extremen worden overschat, wat tot conservatieve inschattingen van risico's leidt. De risico's zouden beter kunnen worden ingeschat als van niet-lineaire tijdreeksmodellen gebruik zou worden gemaakt. De nauwkeurigheid van de geschatte risico's is niet eenvoudig aan te geven. Expert-judgement moet uitwijzen op welke locaties de risico's te hoog zijn ingeschat als gevolg van het gebruik van een lineair model.

4 Conclusies en aanbevelingen

Uit de geactualiseerde Gd-kaart blijkt dat het areaal met Gt VI en VII met 37 % is toegenomen ten opzichte van de bodem- en Gt-kaart, schaal 1 : 50 000. Gedeeltelijk kan deze verschuiving worden verklaard uit verschillen in karteringsmethode, zoals het gebruik van regressiemodellen en het elimineren van het effect van korte-termijn meteorologische schommelingen. Gezien de omvang van de toename van relatief 'droge' Gt's is het aannemelijk dat dit de trend van daling van de grondwaterstanden als gevolg van geïntensiveerde ontwatering en waterwinning weerspiegelt.

De GxG-voorspellingen van de Gd-kaart zijn enigszins gladgestreken als gevolg van de toepassing van regressiemodellen (*regression to the mean*). De deterministische voorspellingen laten hierdoor minder extremen zien. Er is echter informatie beschikbaar over de kansverdelingen van de GxG's, waardoor uitspraken over wateroverlast en droogte in termen van risico's mogelijk is. Belangrijk is hierbij echter wel dat de onzekerheid over de werkelijke GxG nauwkeurig is gekwantificeerd. Ook bij deze kwantificering moeten modellen worden gebruikt en veronderstellingen worden gemaakt. Het is aan te bevelen om methodiek te ontwikkelen waarbij de onzekerheid zo min mogelijk wordt onderschat. Met name de toepassing van ontwerpgebaseerde steekproeven kan hierbij nuttig zijn (Knotters, 2001; De Gruijter *et al.*, in voorbereiding).

Bij de Gd-methodiek wordt verondersteld dat de grondwaterstand lineair samenhangt met het neerslagoverschot en dat de grondwaterstand in de tijd normaal verdeeld is. Met behulp van deze veronderstellingen is de grondwaterdynamiek over het algemeen goed te karakteriseren met GxG, duurlijn en regimecurve. Extremen, dat wil zeggen grondwaterstanden die eenmaal per jaar, eenmaal per vijf jaar of eenmaal per tien jaar gedurende minstens een dag worden overschreden, worden als gevolg van deze veronderstellingen echter overschat. Risico's op wateroverlast worden bijgevolg te conservatief ingeschat, met name in gebieden met ondiepe grondwaterstanden en beheerste peilen. Een remedie voor dit probleem zou de toepassing van modellen kunnen zijn die rekening houden met drempel-niet-lineariteit. Met deze modellen kan op dit moment echter nog niet eenvoudig een gebiedsdekkende beschrijving van de grondwaterdynamiek worden verkregen. KIWA Water Research en Alterra integreren momenteel kennis over drempel-nietlineariteit en fysische onderbouwing van tijdreeksmodellen. Het verdient aanbeveling om een methode te ontwikkelen waarbij deze fysische onderbouwing wordt gebruikt om de grondwaterdynamiek van regimes met drempel-nietlineariteit ruimtelijk te voorspellen.

Naast de voorspellingen van de GxG worden ook voorspelfouten gepresenteerd. Deze informatie over onzekerheid moet de gebruikers van Gd-informatie beter in staat stellen risico's af te wegen, en rationele beslissingen te nemen over investeringen in de waterhuishouding en over de noodzaak van nader onderzoek ter reductie van onzekerheid. De informatie over de voorspelfouten in de GxG kan bovendien

worden gebruikt bij het optimaliseren van het grondwaterstandsmeetnet. In gebieden waar de voorspelfouten kleiner zijn dan een vereist minimum zou het meetnet kunnen worden uitgedund, terwijl in gebieden waar grote voorspelfouten optreden het meetnet kan worden verdicht. Een bijzonder probleem doet zich voor in de gebieden waar keileem voorkomt. Voor deze gebieden zijn geen nauwkeurige waarnemingen van de freatische grondwaterstand beschikbaar; door het optreden van schijnspiegels wordt de afstand van het maaiveld tot het freatische grondwaterniveau niet goed waargenomen in peilbuizen. Het verdient aanbeveling om de peilbuizen in dit gebied te vervangen door een set peilbuizen per locatie, met filters boven en onder stagnerende lagen, of door tensiometers die op verschillende dieptes zijn geïnstalleerd.

Naast de kaarten met voorspelfouten kunnen ook de resultaten van de tijdreeksanalyses worden gebruikt bij het optimaliseren van het grondwaterstandsmeetnet. Tijdreeksmodellering bleek bij een aantal reeksen niet goed mogelijk omdat zij waren waargenomen in peilbuizen met defecten of andere onvolkomenheden. Deze peilbuizen zouden moeten worden verwijderd en eventueel worden vervangen.

Literatuur

- Bierkens, M., M. Knotters en F. van Geer, 1999. Tijdreeksanalyse nu ook toepasbaar bij onregelmatige meetfrequenties. *Stromingen* 5(2): 43–54.
- Braat, L., A. van Amstel, A. Gerritsen, C. van Gool, N. Gremmen, C. Groen, H. Rolf, J. Runhaar en J. Wiertz, 1989. *Verdroging van natuur en landschap in Nederland. Beschrijving en analyse*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 's-Gravenhage.
- Bracht, M. van, 1988. *OLGA: On Line Grondwater Archief*. Delft, DGV-TNO, rapport PN88-11.
- Bruin, H. de, 1987. Van Penman naar Makkink. In Hooghart, J. (red.): *Neerslag en Verdamping*. Den Haag, CHO-TNO, Mededeling 39.
- 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.
- Finke, P.A., T. Hoogland, M.F.P. Bierkens, D.J. Brus en F. de Vries, 1999. *Pilot naar grondwaterkaarten in het Weerijsg gebied*. Wageningen, Alterra, intern rapport.
- Finke, P., M. Bierkens, D. Brus, J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries. 2002. *Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap Mark en Weerij*. Wageningen, Alterra, rapport 387.
- Finke, P.A., D.J. Brus, M.F.P. Bierkens, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2004. Mapping groundwater dynamics using multiple sources of exhaustive high resolution data. *Geoderma* 123: 23 - 39.
- Finke, P.A., D.J. Brus, M.F.P. Bierkens, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2005. Kartering van de grondwaterdynamiek met behulp van geo-informatie van hoge resolutie. *Stromingen* 11(1): 27-41.
- Gaast, J. van der en H. Massop, 2005. De verdroging in beeld met historische en actuele grondwatertrappen op basis van karteerbare kenmerken. *H₂O* 38(14/15): 43-46.
- Gruijter, J.J. de, J.B.F. van der Horst, G.B.M. Heuvelink, M. Knotters en T. Hoogland, 2004. *Grondwater opnieuw op de kaart. Methodiek voor de actualisering van grondwaterstands-informatie en perceelsclassificatie naar uitspoelingsgevoeligheid voor nitraat*. Wageningen, Alterra, rapport 915.

Gruijter, J.J. de, D.J. Brus, M.F.P. Bierkens en M. Knotters, in voorbereiding. *Sampling for Natural Resource Monitoring*. Springer, Heidelberg.

Knotters, M., 2001. *Regionalised time series models for water table depths*. Proefschrift, Wageningen Universiteit.

Knotters, M. en M. Bierkens, 1999. Hoe lang moet je de grondwaterstand meten om iets over de dynamiek te weten? *Stromingen* 5(4): 5–12.

Knotters, M. en P.C. Jansen, 2005. Honderd jaar verdroging in kaart. *Stromingen* (in druk).

Knotters, M. en P. van Walsum, 1994. *Uitschakeling van weersinvloeden bij de karakterisering van het grondwaterstandsverloop*. Wageningen. DLO-Staring Centrum. Rapport 350.

Knotters, M. en P.E.V. van Walsum, 1997. Estimating fluctuation quantities from time series of water-table depths using models with a stochastic component. *Journal of Hydrology* 197: 25-46.

Knotters, M. en J.G. de Gooijer, 1999. TARSO modeling of water table depths. *Water Resources Research* 35: 695-705.

Kremers, A.H.M. en F.C. van Geer, 2000. *Trendontwikkeling Grondwater 2000. Analyseperiode 1955-2000*. TNO-NITG. Rapport NITG 00-184-B, Delft.

Mallows, C.L., 1966. *Choosing a Subset Regression*. Joint Statistical Meetings, Los Angeles, CA.

Pebesma E. en C. Wesseling, 1998. Gstat, a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. *Computers and Geosciences* 24(1): 17-31; <http://www.gstat.org>.

Riele, W.J.M. te en D. Brus, 1992. *Het gebruik van fysisch-geografische voorinformatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstanden en grondwaterkarakteristieken (GHG en GLG)*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 209.

Riele, W.J.M. te, E.P. Querner, M. Knotters en A.B. Pomper, 1995. *Geostatistische interpolatie van grondwaterstandsdiepten met behulp van fysisch-geografische informatie en de resultaten van een regionaal stromingsmodel*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 414.

Sluijs, P. van der, 1982. De grondwatertrap als karakteristiek van het grondwaterstandsverloop. *H₂O* 15: 42-46.

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.

Wesseling, J.G., 1991. *CAPSEV: steady state moisture flow theory; program description and user manual*. Wageningen, Winand Staring centre, report 37.

Wösten, J.H.M., F. de Vries, J. Denneboom en A.F. van Holst, 1988. *Generalisatie en bodemkundige vertaling van de bodemkaart 1 : 250.000, ten behoeve van de PAWN-studie*. Wageningen, Stiboka, rapport 2055.

Bijlage 1 Geselecteerde peilbuizen uit het DINO-bestand

Tabel B1 De locaties van de geselecteerde peilbuizen uit het DINO-bestand, de geschatte GHG's en GLG's op basis van tijdreeksanalyse en de standaardfouten van de schattingen

Buisnr.	x-coördinaat	y-coördinaat	GHG (cm)	sd(GHG) (cm)	GLG (cm)	sd(GLG) (cm)
17EL0014	244630	539200	-137	2.9	-241	3.1
22EL0004	244430	521530	-75	1.9	-158	2.0
17BL0026	232180	541060	-77	3.2	-198	3.4
17EP0016	241760	545860	-133	3.8	-212	3.9
18CP0026	265860	533850	-98	1.3	-148	1.4
21FP0040	212300	521430	-63	1.3	-144	1.3
22AL0032	227950	521730	-57	3.5	-171	3.7
22AL0034	227730	520680	-91	1.7	-156	1.8
22AP0093	227740	521325	-75	1.5	-128	1.6
22BL0005	234120	524040	-42	2.2	-117	2.3
22BL0026	238720	513710	-148	2.5	-227	2.6
22CL0036	227760	507690	-103	2.3	-193	2.5
22CL0039	227850	506550	-71	1.4	-124	1.5
22CL0041	221800	504740	-74	11.6	-170	11.8
22CL0050	224730	509420	-73	1.4	-129	1.5
22CL0051	228890	509200	-87	2.9	-148	3.0
22CL0057	224060	511370	-78	2.1	-154	2.3
22CL0064	225840	502540	-154	5.2	-250	5.3
22CL0074	227910	500990	-109	3.8	-204	4.0
22CL9004	225510	510010	-93	1.3	-157	1.4
22CP0078	225990	506230	-94	1.4	-152	1.5
22DL0004	238350	505980	-44	2.4	-140	2.5
22DL0009	235920	511180	-85	2.7	-211	2.7
22DL0023	231240	505740	-69	1.3	-132	1.5
22DL0024	233890	506430	-54	2.2	-152	2.4
22DL0027	239830	505380	-125	3.5	-229	3.7
22DL0041	234350	504170	-85	2.5	-184	2.7
22EL0011	243170	517360	-88	1.6	-156	1.7
22EL0017	243170	513530	-63	1.8	-153	1.9
22GL0001	240070	507880	-123	6.4	-255	6.7
22GL0004	244480	511620	-44	1.8	-135	1.9
22GL0005	243270	510630	-60	1.9	-152	2.1
22GL0015	244410	508530	-89	1.2	-148	1.3
22GL0016	243860	508040	-76	2.0	-160	2.1
28AL0024	224110	495570	-108	3.3	-178	3.5
28AL0049	227530	491090	-116	3.4	-220	3.6
28AL0078	226030	497730	-160	3.3	-250	3.5
28AL0083	222435	495475	-66	1.5	-138	1.5
28AP0058	226610	494360	-68	3.2	-192	3.4
28BL0051	236620	496140	-132	1.6	-191	1.8

Bijlage 2 Extra peilbuizen voor Velt en Vecht

Buisnr.	x-coördinaat	y-coördinaat	GHG (cm)	sd(GHG) (cm)	GLG (cm)	sd(GLG) (cm)
22BL0026	238720	513710	-140	2.3	-225	2.6
22BL0028	237330	512760	-68	2.8	-172	2.9
22BL0032	236588	518000	-156	1.9	-226	2.0
22BL0039	232490	514940	-51	1.2	-99	1.4
22BP0032	236588	518000	-140	1.9	-206	2.1
22BP0033	237480	520820	-171	2.5	-247	2.8
22BP0034	233800	516230	-135	2.5	-215	2.6
22BP0075	238700	519240	-81	1.9	-155	2.1
22CL0036	227760	507690	-106	2.8	-193	2.9
22CL0038	229995	507760	-108	1.3	-172	1.4
22DL0018	235610	507670	-48	4.4	-187	4.6
22DL0042	239589	503124	-125	1.5	-187	1.7
22DP0053	235940	502620	-147	1.4	-205	1.5
22EL0006	240680	519990	-137	3.8	-265	3.9
22EL0027	242580	515460	-107	3.4	-226	3.6
22GL0003	242590	512140	-65	2.7	-174	2.9
22GL0016	243860	508040	-72	2.5	-159	2.6
22GP0025	244190	510020	-73	1.1	-122	1.3
99XL0007	237642	519522	-117	1.3	-175	1.4
99XL0008	237339	519839	-103	1.3	-157	1.4
99XL0010	238567	519427	-94	0.9	-133	1.0
99XL0012	238144	519960	-186	1.8	-251	2.0
99XL0014	237998	520587	-136	2.8	-217	2.9
99XL0015	237812	519308	-44	1.3	-97	1.4
99XL0044	237217	511959	-75	1.6	-133	1.8
99XL0045	236640	512374	-111	3.2	-202	3.4
99XL0046	235824	512347	-51	2.8	-123	3.0
99XL0048	236566	512060	-39	2.7	-121	2.8
99XL0049	236566	512059	-60	2.7	-132	2.8
99XL0050	236565	512056	-127	2.6	-204	2.8
99XL0052	236565	512039	-89	3.1	-182	3.2
99XL0053	236540	512010	-69	3.8	-169	4.0
99XL0054	236500	511953	-153	3.3	-239	3.5
99XL0056	236326	511649	-159	3.4	-255	3.5
99XL0057	234657	502025	-160	1.7	-224	1.9
99XL0078	243726	504076	-139	4.2	-226	4.3
99XL0079	243688	504065	-185	3.1	-269	3.2
99XL0080	243620	504033	-147	2.8	-220	2.9
99XL0081	243521	503986	-153	4.0	-230	4.2
99XL0084	243933	504322	-170	3.6	-258	3.8
99XL0085	243996	504273	-157	3.5	-242	3.6
99XL0086	244026	504248	-155	3.7	-239	3.9
99XL0087	244042	504235	-161	5.6	-239	5.8
99XL0095	244246	502525	-131	1.7	-183	1.7
99XL0096	244808	503619	-190	1.4	-237	1.5
99XL0097	244295	503000	-138	1.8	-192	1.9

Buisnr.	x-coördinaat	y-coördinaat	GHG (cm)	sd(GHG) (cm)	GLG (cm)	sd(GLG) (cm)
99XL0098	244882	502925	-131	1.5	-180	1.5
99XL0101	234404	520624	-127	2.4	-234	2.5
99XL0107	231153	517674	-103	2.4	-198	2.6
99XL0108	231139	516798	-71	1.6	-132	1.7
99XL0110	232461	522913	-77	1.2	-131	1.3
99XL0111	231569	521566	-20	3.0	-170	2.9
99XL0114	231007	521397	-66	2.7	-175	2.8
99XL0120	236376	525143	-59	1.7	-158	1.7
17EL0512	243260	540290	-13	1.6	-105	1.7
17GL0001	245450	537440	-61	1.8	-154	1.8
17GL0010	248600	534260	-61	1.3	-148	1.2
17GL0012	245020	531770	-135	2.2	-280	2.0
17GL0538	245960	535985	28	1.3	-56	1.4
17GL0557	244150	535700	-57	3.3	-145	3.5
17GL0579	247130	530585	-3	1.3	-77	1.2
17GL0581	248950	530270	-22	1.2	-89	1.2
17GL0589	246970	526300	-44	3.6	-214	3.7
17GP0042	242940	526810	-140	1.3	-221	1.2
17HC0011	256400	527680	-14	0.9	-63	0.8
17HC0013	257480	527400	-64	2.9	-156	2.9
17HC2101	258140	526080	-98	1.2	-144	1.3
17HL0005	250010	533080	-98	1.9	-217	1.8
17HL0012	253465	534100	-106	2.9	-212	2.9
17HL0022	250860	528615	-94	3.0	-230	3.1
17HL0026	256430	526250	-130	1.3	-199	1.3
17HL0027	253490	526040	-165	2.0	-251	2.1
17HL0051	250200	527840	-126	1.5	-209	1.5
17HL0538	252340	526420	-31	1.0	-84	0.9
17HP0194	253380	530050	-66	2.3	-134	2.6
17HP0196	254330	530630	-119	3.7	-227	3.9
22ECSC01	247940	520185	-62	0.9	-101	1.0
22EL0502	244233	524842	-44	1.6	-113	1.8
22EL0505	244170	519840	-68	1.2	-116	1.3
22EL0508	246650	518750	-29	1.2	-100	1.4
22EL0509	248080	519100	-74	1.1	-118	1.2
22EL0530	243100	519270	-79	0.9	-115	1.0
22EL0531	244400	516970	-200	0.6	-227	0.7
22FC0001	255616	528710	-13	3.7	-128	4.1
22FC0002	255690	528240	-155	1.7	-235	1.9
22FC0004	256030	528420	4	0.8	-52	0.8
22FC0005	256220	528500	-13	1.0	-57	1.1
22FC0083	254600	520700	-50	2.2	-132	2.3
22FCMK05	253831	521384	-39	2.1	-133	2.2
22FCSC03	250909	520083	-83	1.7	-155	1.9
22FCSC07	259962	520770	-39	1.3	-114	1.3
22FCSC17	258907	521222	-96	1.3	-160	1.3
22FL0001	258800	519300	-83	1.8	-170	1.9
22FL0002	250115	520187	-74	1.3	-132	1.4

Buisnr.	x- coördinaat	y- coördinaat	GHG (cm)	sd(GHG) (cm)	GLG (cm)	sd(GLG) (cm)
22FL0508	253140	525120	-17	1.8	-97	1.9
23ACMK1 2	267231	517991	-61	1.9	-140	2.1
23ACMK1 3	262060	518527	-44	1.7	-127	1.9
23ACSC08	261472	521892	-76	1.6	-154	1.8
23AL0001	266970	523330	-74	2.3	-145	2.3
23AL0005	263639	520300	-99	1.5	-148	1.6
23AL0006	266818	519969	-57	2.5	-138	2.6
23AL0008	264170	518610	-126	3.0	-218	3.0
23AP0014	262010	519114	-235	1.8	-303	2.0

