



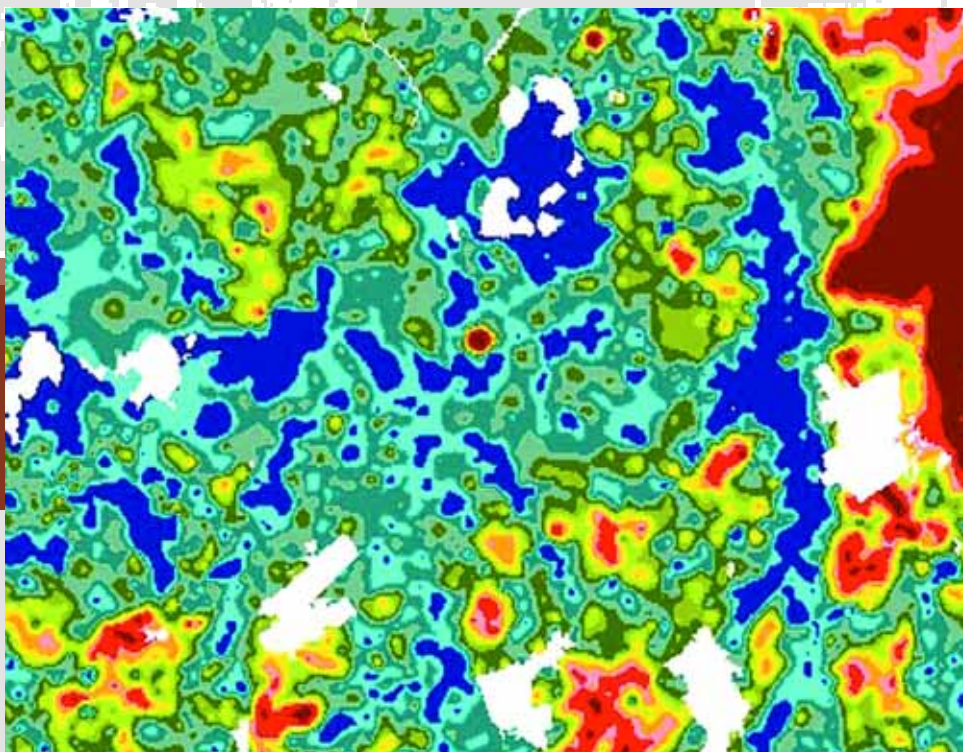
ALTERRA

WAGENINGEN UR

Data-assimilatie voor kartering van de grondwaterstandsdynamiek

T. Hoogland
G.B.M. Heuvelink
J.W.J. van der Gaast
A.A. Veldhuizen
D.J.J. Walvoort

Alterra-rapport 1384, ISSN 1566-7197



Data-assimilatie voor kartering van de grondwaterstandsdynamiek

Data-assimilatie voor kartering van de grondwaterstands- dynamiek

**T. Hoogland
G.B.M. Heuvelink
J.W.J. van der Gaast
A.A. Veldhuizen
D.J.J. Walvoort**

Alterra-rapport 1384

Alterra, Wageningen, 2006

REFERAAT

Hoogland, T., G.B.M. Heuvelink, J.W.J. van der Gaast, A.A. Veldhuizen & D.J.J. Walvoort, 2006. *Data-assimilatie voor kartering van de grondwaterstandsdynamiek*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1384. 40 blz.; 6 fig.; 6 tab.; 13 ref.

Data-assimilatie combineert informatie uit modellen met informatie uit metingen om aldus tot een nauwkeuriger representatie van de werkelijkheid te komen. In dit rapport is data-assimilatie toegepast op kartering van de grondwaterstandsdynamiek in een 400 km² groot dekzandgebied in waterschap De Dommel (Noord-Brabant). Voorspellingen volgens het hydrologisch modelinstrumentarium SIMGRO zijn bijgesteld met waarnemingen aan grondwaterstandskarakteristieken zoals afgeleid uit gerichte opnames en tijdreeksen van grondwaterstanden op peilbuislokaties. Hiervoor is in drie varianten een combinatie van regressie-analyse en geostatistische interpolatie gebruikt. Deze aanpak is vergelijkbaar met de methode zoals toegepast in de bestaande Gd-actualisatiemethode, met dit verschil dat de Gd-actualisatiemethode geen gebruik maakt van SIMGRO uitvoer. De resultaten laten een toename van de nauwkeurigheid van de voorspelde gemiddelde hoogste en laagste grondwaterstand zien voor één van de drie varianten. Hierbij moet wel worden aangetekend dat deze verbetering is gebaseerd op de gekwantificeerde modelnauwkeurigheid en nog niet is bevestigd door een onafhankelijke validatiestudie.

Trefwoorden: GHG, GLG, Grondwaterstand, Hydrologisch Procesmodel, Kriging, Nauwkeurigheid, Regressie, Ruimtelijke Interpolatie

Kosten Alterra-rapport 1384: € 25,-.

Dit rapport is digitaal beschikbaar via www.alterra.wur.nl. Een gedrukte versie van dit rapport, evenals van alle andere Alterra-rapporten, kunt u verkrijgen bij Uitgeverij Cereales te Wageningen (0317 46 66 66). Voor informatie over prijzen en snelste bestelwijze zie www.boomblad.nl/rapportenservice

ISSN 1566-7197

© 2006 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 veeleenvoudigd 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 Probleemstelling	13
1.2 Achtergrond	14
1.3 Projectdoelstelling	15
1.4 Afbakening	15
1.5 Opbouw van het rapport	15
1.6 Begrippenlijst	16
2 Materialen en methoden	19
2.1 Alternatieven voor actualisatie van de grondwaterdynamiek	19
2.2 Uitwerking alternatieve karteringsmethoden	21
2.3 Gegevens	22
2.4 Gestratificeerde kartering met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren (Alternatief 1a)	23
2.4.1 Trendmodellen per stratum	24
2.4.2 Gebiedsdekkende interpolatie met een trendmodel	24
2.5 Ongestratificeerde kartering met SIMGRO-GxG als kandidaatpredictoren (Alternatief 1b)	25
2.5.1 Trendmodellen met ruimtelijke hulpinformatie	25
2.5.2 Gebiedsdekkende interpolatie met trendmodel	25
2.6 Residu-interpolatie met SIMGRO-GxG als guess-field	25
3 Resultaten	27
3.1 Trendmodellen	27
3.2 Variogrammodellen	30
3.3 Predicties	30
3.4 Voorspelfouten	34
3.5 Discussie	35
4 Conclusies	37
Literatuur	39

Woord vooraf

Dit rapport is het eerste van een aantal schriftelijke rapportages voortvloeiend uit een tweejarig onderzoek, uitgevoerd in 2004 en 2005, naar de mogelijkheid om hydrologische en bodemkundige proceskennis te integreren in statistische methoden voor grondwaterstandskartering. Het onderzoek is gefinancierd uit het toenmalige onderzoeksprogramma 395, 'Basis- en kerngegevens bovengrond'.

De inspiratie tot het doen van juist dit onderzoek kwam uit een discussiebijeenkomst met makers en gebruikers van grondwaterstandskaarten. Tijdens deze bijeenkomst werd duidelijk dat veel gebruikers behoefte hebben aan kaarten die niet enkel en alleen via statistische interpolatiemethoden tot stand zijn gekomen, maar die door gebruikmaking van proceskennis fysisch plausibelere patronen te zien geven. Intensieve samenwerking tussen statistici, hydrologen en geo-informatici heeft vervolgens geleid tot nadere uitwerking van drie plannen van aanpak, waarvan dit rapport de aanpak beschrijft die met behulp van data-assimilatie technieken de uitkomsten van een hydrologisch procesmodel combineert met waarnemingen aan grondwaterstandskarakteristieken.

Tussentijdse resultaten zijn tijdens een bijeenkomst voorgelegd aan gebruikers en anderszins betrokkenen. Wij danken Jan van Bakel (Alterra), Ellen Bollen-Weide (Waterschap Rijn en IJssel), Frans van Geer (TNO Bouw en Ondergrond), Joost Heijkers (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden) en Jet Lebbink (Provinciaal Waterleidingbedrijf Noord-Holland) voor opbouwende kritiek en suggesties waar we in de vervolgfase van het project dankbaar gebruik van hebben gemaakt. Ook zijn we het waterschap Dommel en Dongestroom erkentelijk voor de geboden hulp bij de toepassing van de methodiek op het stroomgebied Beerze-Reusel.

Samenvatting

Sinds 1997 is Alterra bezig met de ontwikkeling van methoden en het uitvoeren van projecten om de grondwaterstandsdynamiek (Gd) in kaart te brengen en de, veelal verouderde, Gd-informatie uit de bodemkaart 1: 50.000 te actualiseren. Sindsdien zijn voor de zandgebieden van Nederland diverse Gd-kaarten voor waterschappen, provincies en het ministerie van LNV vervaardigd die voor diverse toepassingen worden gebruikt. In het najaar van 2003 organiseerde Alterra het symposium 'Grondwaterdynamiek in kaart en praktijk'. In dit symposium konden gebruikers en makers van Gd-informatie met elkaar van gedachten wisselen over de gebruiksdoelen en gebruiksmogelijkheden van de geleverde Gd-informatie. Hier bleek dat gebruikers van Gd-kaarten vaak de behoefte hebben om scenario's door te rekenen. Dynamische hydrologische procesmodellen zijn hiervoor bij uitstek geschikt omdat zij de invloed van ingrepen en andersoortige wijzigingen in het beheer expliciet maken via causale relaties. Als dan toch een procesmodel wordt gebouwd en toegepast om scenario's door te rekenen, waarom dan ook niet de Gd-kaarten uit de uitvoer van het procesmodel berekend? Hiermee werd een discussie geopend over de voor- en nadelen van het gebruik van procesmodellen voor Gd-kartering, in vergelijking met statistische modellen zoals gebruikt in de bestaande Gd-karteringsmethode.

Naar aanleiding van de symposiumdiscussie is het project 'Meer proceskennis in Gd-kartering' gestart. Doelstelling van dit project is een methode voor het in kaart brengen van de grondwaterdynamiek te ontwikkelen en toe te passen waarbij hydrologische proceskennis wordt geïntegreerd in de statistische kartering van de grondwaterstandsdynamiek op regionale schaal. De nieuw te ontwikkelen methode moet:

1. nauwkeuriger ruimtelijke voorspellingen en fysisch verklaarbare ruimtelijke patronen van grondwaterstandskarakteristieken opleveren, vergezeld van kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid;
2. extrapolatie mogelijk maken, waaronder het doorrekenen van scenario's en het in kaart brengen van effecten van hydrologische maatregelen/ingrepen. Hierbij dienen voorspellingen over de (toekomstige) grondwaterstandsdynamiek te worden verkregen die de vergelijking met voorspellingen zoals verkregen met dynamische hydrologische procesmodellen kunnen doorstaan.

In een deelproject is aan de doelstelling van het grotere project gewerkt door assimilatie van de resultaten van het hydrologisch modelinstrumentarium SIMGRO met gegevens zoals verzameld voor kartering van de actuele grondwaterstandsdynamiek, ook wel Gd-actualisatie genoemd. Startpunt van het onderzoek is een inventarisatie van hoe het hydrologisch modelinstrumentarium SIMGRO en de methode en gegevens zoals gebruikt voor de Gd-actualisatie gecombineerd kunnen worden. Verschillende alternatieven zijn op een rij gezet, en op haalbaarheid en verwacht resultaat beoordeeld op basis van expertkennis. Twee alternatieve methoden waarvan er één is gesplitst in twee varianten zijn in dit onderzoek

vervolgens uitgewerkt, omdat hiervan het meest werd verwacht in termen van nauwkeurigheid en mogelijkheden voor scenarioberekeningen en omdat de hiervoor benodigde gegevens en technieken direct beschikbaar waren. De eerste methode (alternatief 1) maakt gebruik van trendmodellen met gebiedsdekkende hulpinformatie en blijft het dichtst bij de huidige methode van Gd-actualisatie. Indien de hulpinformatie uit modelberekeningen met SIMGRO een goede verklaring geven voor GxG's die op meetlocaties zijn geschat, dan zal een trendmodel met de GxG volgens SIMGRO nauwkeurige voorspellingen opleveren. Als dit voor het gehele studiegebied geldt, dan zou opdelen van het gebied in deelgebieden of strata overbodig zijn. Om dit te onderzoeken is alternatief 1 in twee varianten uitgewerkt:

1. Het trendmodel wordt voor afzonderlijke strata (deelgebieden) apart geselecteerd en gekalibreerd (Alternatief 1a);
2. Het trendmodel wordt voor het gehele studiegebied in één keer geselecteerd (ongestratificeerd) en gekalibreerd (Alternatief 1b).

In een tweede methode wordt de GxG die met SIMGRO is voorspeld als initiële schatting van de verwachte waarde bij de ruimtelijke interpolatie van de GxG toegepast (Alternatief 2).

De drie alternatieven (alternatief 1a, 1b en 2) zijn toegepast en onderzocht in het studiegebied Beerze-Reusel, waarvoor zowel een recent SIMGRO-model als een Gd-actualisatie gereed is gekomen. Het studiegebied, dat ongeveer 400 km² beslaat, is een dekzandgebied doorsneden door verschillende beekdalen, met een afwateringsrichting van zuid naar noord.

Elk van de drie uitgewerkte alternatieven heeft sterke en zwakke punten, waardoor slechts afhankelijk van de omstandigheden en de doelstelling is aan te geven welk alternatief de voorkeur heeft.

Voor alle drie karteringsmethoden is de bereikte nauwkeurigheid gekwantificeerd op basis van kaarten van de voorspelfout (zogenaamde 'modelschattingen' van nauwkeurigheid). Daarnaast is de nauwkeurigheid van de verschillende alternatieven objectief vastgesteld met een validatiestudie. De uitkomsten van deze studie worden separaat gerapporteerd in een ander rapport resulterend uit het project. Als echter de modelschattingen van nauwkeurigheid worden gebruikt om de karteringsalternatieven te vergelijken, dan is het nauwkeurigste alternatief de gestratificeerde karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren (Alternatief 1a), gevolgd door de ongestratificeerde karteringsmethode (Alternatief 1b) en de residu-interpolatie (Alternatief 2).

De gestratificeerde karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren lijkt ook ten opzichte van de eerder uitgevoerde Gd-kartering (Van Kekem *et al.*, 2005) nauwkeurigheidswinst op te leveren. Het meenemen van resultaten van fysisch deterministische modellen bij het in kaart brengen van de grondwaterdynamiek lijkt dus een succesvolle methode die de nauwkeurigheid kan vergroten.

Ten behoeve van het doorrekenen van scenario's of het in kaart brengen van de effecten van hydrologische maatregelen verdient de residu-interpolatie t.o.v. SIMGRO-GxG de voorkeur, omdat met het SIMGRO-modelinstrumentarium maatregelen doorgerekend kunnen worden. In de varianten waarin een trendmodel wordt geschat (Alternatieven 1a en 1b) en waarin naast SIMGRO-GxG nog andere predictoren voorkomen is het doorrekenen van maatregelen niet mogelijk. Er is daar immers geen sprake van een causaal verband maar slechts van een empirische relatie die is vastgesteld voor de periode waarin waarnemingen zijn verricht.

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

De statistische methode die door Alterra in de afgelopen jaren ontwikkeld is voor regionale kartering van de grondwaterstandsdynamiek (de zogeheten Gd-methode) heeft in de praktijk bewezen een waardevolle techniek te zijn voor het maken van gebiedsdekkende voorspellingen van de grondwaterstandsdynamiek (bijv. Finke *et al.*, 2002; De Gruijter *et al.*, 2004; Finke *et al.*, 2004). De meest gebruikte grondwaterstandskarakteristieken die de methode gebiedsdekkend voorspelt zijn de gemiddeld hoogste (GHG), gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) en de gemiddeld laagste (GLG) grondwaterstand, tezamen ook wel de GxG genoemd. De methode gebruikt tijdreeksanalyse, lineaire regressie en geostatistische interpolatie voor het maken van ruimtelijke beelden van de GxG. Invoergegevens zoals gebruikt door de methode betreffen tijdreeksen van grondwaterstanden op stambuislocaties, gerichte opnames van grondwaterstanden en vlakdekkende hulpinformatie met maaiveldshoogten en dichtheid aan ontwateringsmiddelen (Finke *et al.*, 2002). De Gd-methode kan in voorspelnauwkeurigheid wedijveren met de bodem- en Gt-kaart 1:50.000 (Hoogland *et al.*, 2004) maar haalt niet de nauwkeurigheid van de veldbodemkundige kartering 1:10.000 voor grondwaterstandskartering (Pleijter *et al.*, 2003). Een belangrijk voordeel van de Gd-methode ten opzichte van de traditionele methode is dat kartering in de praktijk veel goedkoper is (Finke *et al.*, 2004).

Ondanks het bewezen nut heeft de Gd-methode ook nadelen en beperkingen. De nauwkeurigheid van de gebiedsdekkende voorspellingen van de GxG is in veel gevallen niet bijzonder groot, hoewel dit zoals gezegd bij de traditionele regionale Gt-karteringsmethode niet veel anders is. Gebruikers schrikken van de door de methode berekende onnauwkeurigheden in de voorspelde GxG's, voor een deel omdat bij traditionele karteringen geen nauwkeurigheden werden gekwantificeerd. Voor veel regionale toepassingen zal de nauwkeurigheid van de uitkomsten van de Gd-methode vaak nog wel acceptabel zijn, maar voor gebruiksdoeleinden waarbij op perceelsniveau uitspraken verwacht worden kan de onnauwkeurigheid te groot zijn. De beperkte nauwkeurigheid van de Gd-methode heeft een groot aantal oorzaken. Uit een in 2004 gerapporteerd onderzoek (Hoogland *et al.*, 2004) blijkt dat het in de praktijk niet eenvoudig zal zijn de bijdrage van de diverse foutenbronnen goed in kaart te brengen. Het zal zeker ook lastig zijn de invloed van de grootste foutenbronnen zodanig te reduceren dat een aanzienlijke verbetering van de GxG-voorspellingen wordt bereikt. Substantiële toename van de nauwkeurigheid is eigenlijk alleen mogelijk met aanzienlijke extra inspanningen in het meetprogramma, zoals een hogere dichtheid van waarnemingen en een kritischer opstelling ten aanzien van tijdstip van uitvoering van gerichte opnames.

Een belangrijke beperking van de Gd-methode volgt uit het empirische karakter van de methode. De methode leunt sterk op waarnemingen van grondwaterstanden en hulpinformatie, en is daarmee - meer nog dan procesgeoriënteerde modellen -

afhankelijk van omvang en kwaliteit van deze informatie. Daarnaast maakt de methode gebruik van statistische relaties tussen waarnemingen en doelvariabelen. Deze relaties kunnen niet of slechts beperkt fysisch worden onderbouwd, waardoor extrapolatie van de uitkomsten van de methode naar andere situaties (zoals bijvoorbeeld benodigd in scenariostudies) slechts in zeer beperkte mate mogelijk is. Daarnaast blijkt dat het ontbreken van een fysische basis de acceptatie van de uitkomsten van de Gd-methode bij gebruikers bemoeilijkt.

1.2 Achtergrond

Na een aantal jaren van uitvoering van Gd-projecten voor waterschappen, provincies en het ministerie van LNV, waarbij voor een groot deel van Nederland Gd-kaarten zijn opgeleverd die voor diverse toepassingen worden gebruikt, organiseerde Alterra in het najaar van 2003 het symposium 'Grondwaterdynamiek in kaart en praktijk' (Hoogland en Van Der Horst, 2004). In dit symposium konden gebruikers en makers van Gd-informatie met elkaar van gedachten wisselen over de gebruiksdoelen en gebruiksmogelijkheden van de geleverde Gd-informatie. Ook de kwaliteit van het geleverde product en het leren omgaan met onzekerheid over de Gd-kaarten kreeg tijdens het symposium de nodige aandacht.

De discussie aan het slot van het symposium betrof onder andere de stelling dat "Gd-karteringen binnen afzienbare termijn zullen worden gemaakt met hoge-resolutie regionale grondwatermodellen". Dit zou het geval zijn omdat gebruikers vaak de behoefte hebben om scenario's door te rekenen. Dynamische hydrologische procesmodellen zijn hiervoor bij uitstek geschikt omdat zij de invloed van ingrepen en andersoortige wijzigingen in het beheer expliciet maken via causale relaties. Als dan toch een procesmodel wordt gebouwd en toegepast om scenario's door te rekenen, waarom dan ook niet de Gd-kaarten uit de uitvoer van het procesmodel berekend? Hiermee werd een discussie geopend over de voor- en nadelen van het gebruik van procesmodellen voor Gd-kartering, in vergelijking met statistische modellen zoals gebruikt in de Gd-methode. In de discussie werd onderkend dat ook het gebruik van procesmodellen een aantal belangrijke nadelen en beperkingen heeft. Procesmodellen bouwen en geschikt maken voor een specifiek gebied is een arbeidsintensieve klus. Procesmodellen hebben veel invoergegevens nodig die vaak niet of slechts gedeeltelijk beschikbaar zijn. Ook hier geldt dat de beschikbaarheid van gegevens bepalend is voor de kwaliteit van de resultaten. In bijna alle gevallen zal ook een zekere vorm van calibratie nodig zijn, hetgeen een rekenintensieve exercitie is die geen unieke oplossing hoeft op te leveren. Calibratie van een model doet daarnaast afbreuk aan de extrapoleerbaarheid van het model. De fysische betekenis van de gekalibreerde parameters neemt immers af, omdat bij de calibratie als het ware 'gecompenseerd' wordt voor fouten in data en modelveronderstellingen. Tenslotte worden de onnauwkeurigheden in de voorspellingen van een hydrologisch model, die in lang niet alle gevallen klein zullen zijn, vaak niet gekwantificeerd.

1.3 Projectdoelstelling

In dit project wordt hydrologische proceskennis geïntegreerd in de statistische kartering van de grondwaterstandsdynamiek op regionale schaal, met als doel een methode voor het in kaart brengen van de grondwaterdynamiek te ontwikkelen en toe te passen die:

1. nauwkeuriger ruimtelijke voorspellingen en fysisch verklaarbare ruimtelijke patronen van grondwaterstandskarakteristieken oplevert, met inbegrip van kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid;
2. extrapolatie mogelijk maakt, waaronder het doorrekenen van scenario's en hydrologische maatregelen/ingrepen. Hierbij dienen voorspellingen over de (toekomstige) grondwaterstandsdynamiek te worden verkregen die de vergelijking met voorspellingen zoals verkregen met dynamische hydrologische procesmodellen kunnen doorstaan.

In een deelproject dat ten grondslag ligt aan dit rapport is een specifieke data assimilatie aanpak gevolgd. Hierbij zijn de resultaten van het hydrologisch modelinstrumentarium SIMGRO (Van Walsum *et al.*, 2004) gecombineerd met gegevens zoals verzameld voor kartering van de actuele grondwaterstandsdynamiek (Finke *et al.*, 2002; De Gruijter *et al.*, 2004), ook wel Gd-actualisatie genoemd.

1.4 Afbakening

Dit project heeft niet tot doel hydrologische procesmodellen te verbeteren. Er is dus geen aandacht besteed aan verbeterde calibratie van hydrologische modellen met behulp van gerichte opnames van grondwaterstanden of aan uitbreiding van deterministische hydrologische modellen met een stochastische component. Uitgangspunt is en blijft het door Alterra ontwikkelde instrumentarium voor regionale kartering van grondwaterstandskarakteristieken, waaraan hydrologische proceskennis is toegevoegd in de vorm van de uitvoer van een hydrologisch procesmodel. Dit wil niet zeggen dat verbetering van procesmodellen niet als waardevol wordt gezien, maar dergelijk onderzoek wordt reeds in ander verband gedaan en valt daarom buiten de doelstelling van dit project.

De methoden zoals deze in dit project zullen worden ontwikkeld richten zich op regionale toepassingen in Pleistoceen Nederland. Dit is omdat de bestaande Gd-methode zich ook met name richt op deze ruimtelijke schaal en dit deel van Nederland.

1.5 Opbouw van het rapport

In hoofdstuk 2 worden verschillende alternatieve methoden voor kartering van de grondwaterstandsdynamiek die gebruik maken van proceskennis in de vorm van modelresultaten geïnventariseerd. De verschillende alternatieven worden kort

besproken, de voor- en nadelen worden beschouwd en de prioritering voor verdere uitwerking in dit deelproject wordt aangegeven.

In hoofdstuk 3 wordt beschreven hoe drie geselecteerde alternatieve karteringsmethoden zijn uitgewerkt en welke gegevens daarbij zijn gebruikt.

Hoofdstuk 4 presenteert en vergelijkt de resultaten van de drie alternatieve karteringsmethoden.

Hoofdstuk 5 bevat de conclusies uit dit deelproject.

1.6 Begrippenlijst

In dit rapport worden een aantal afkortingen en begrippen gebruikt:

Grondwaterstand: De stijghoogte van het freatische grondwater ten opzichte van maaiveld, gemeten in een boorgat of een peilbuis met ondiepe filterdiepte (in het algemeen minder dan vijf meter beneden maaiveld).

HG3 en LG3: Het gemiddelde van de drie hoogste, resp. 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: Het gemiddelde van de HG3 over een aaneengesloten periode van tenminste acht jaar waarin geen ingrepen hebben plaatsgevonden. In dit rapport zijn alle gepresenteerde GHG's berekend over 30 jaar (de klimaatperiode).

Gemiddeld Laagste Grondwaterstand, GLG: Het gemiddelde van de LG3 over een aaneengesloten periode van tenminste acht jaar waarin geen ingrepen hebben plaatsgevonden. In dit rapport zijn alle gepresenteerde GLG's berekend over 30 jaar (de klimaatperiode).

Gemiddelde VoorjaarsGrondwaterstand, GVG: 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's berekend over 30 jaar (de klimaatperiode).

GxG: Verzamelnaam voor het drietal GHG, GVG en GLG.

Grondwatertrap, Gt: Een typerende combinatie van GHG- en GLG-klassen welke op thematische kaarten kan worden weergegeven.

Grondwaterdynamiek, Gd: Een verzamelterm voor GxG, Gt, duurlijn, en regimecurve.

Gerichte opname: Meting van de grondwaterstand rond het tijdstip waarop GHG en GLG optreden.

Stambuis: Grondwaterstandsbuis waarvan een langjarige meetreeks van grondwaterstandsmetingen beschikbaar is.

Stambuisregressie: Statistische methode waarmee grondwaterstandskarakteristieken worden voorspeld op basis van gerichte opnames.

Stambuizenet: Een set van 20-30 stambuizen wordt gebruikt om de grondwaterstandsdynamiek voor een studiegebied te karakteriseren en middels stambuisregressie gerichte opnames van de grondwaterstand naar GxG schattingen om te rekenen.

Stratificatie: Het onderverdelen van een gebied in homogene deelgebieden, ook wel strata genoemd. Met 'homogeen' wordt in deze studie bedoeld: een vergelijkbare hydro-geologische en bodemkundige ondergrond. Soms wordt de landschappelijke ligging (beekdalen), het peilbeheer (grote polders) en het landgebruik (grote natuurgebieden met karakteristiek peilbeheer) bij de stratificatie betrokken.

2 Materialen en methoden

Startpunt van dit onderzoek is een inventarisatie van combinatiemogelijkheden tussen het hydrologisch modelinstrumentarium SIMGRO (Van Walsum *et al.*, 2004) en de methode en gegevens zoals gebruikt voor kartering van de grondwaterstandsdynamiek (Finke *et al.*, 2002; De Gruijter *et al.*, 2004). De verschillende alternatieven zijn op een rij gezet, en op haalbaarheid en verwacht resultaat beoordeeld op basis van expertkennis.

2.1 Alternatieven voor actualisatie van de grondwaterdynamiek

Allereerst is een inventarisatie uitgevoerd van alternatieve methoden om de grondwaterstandsdynamiek in kaart te brengen gebruikmakend van SIMGRO modelresultaten en gegevens uit de Gd-kartering. De verschillende alternatieven worden hieronder kort besproken, de voor- en nadelen beschouwd en de prioritering voor verdere uitwerking in dit deelproject wordt aangegeven door de alternatieven te rangschikken naar afnemende prioriteit:

1. *Gebruik van met SIMGRO berekende GxG als kandidaatpredictor in de maaiveldregressie.*
De GxG volgens SIMGRO is verkregen door SIMGRO voor een representatieve periode te runnen en uit de aldus verkregen tijdreeksen van de grondwaterstand de GxG gebiedsdekkend te berekenen. De GxG die met SIMGRO is berekend wordt gebruikt als een van de kandidaatpredictoren in de maaiveldregressie (Finke *et al.*, 2002, 2004). De bestaande Gd-methode blijft voor het overige zo goed als ongewijzigd. Omdat naast de GxG die met SIMGRO is voorspeld ook de gangbare predictoren uit de Gd-kartering worden aangeboden zal uit de geautomatiseerde modelselectie blijken of SIMGRO een belangrijke verklarende predictor is voor het ruimtelijk patroon van de GxG (Finke *et al.*, 2002, 2004). Hiermee wordt, eventueel per deelgebied (stratum), de relevantie van de SIMGRO resultaten voor de voorspelde GxG vastgesteld. Omdat naast de SIMGRO resultaten ook andere kandidaatpredictoren worden gebruikt bij de gebiedsdekkende predictie van GxG hoeft het ruimtelijk beeld niet compleet te berusten op de fysische beschrijving uit SIMGRO, maar kan ook een ruimtelijke structuur afkomstig uit andere gebiedsdekkende hulpinformatie in het trendmodel worden meegenomen. Dit laatste maakt het doorrekenen van scenario's lastiger omdat het de vraag is of behalve het SIMGRO-gedeelte van het trendmodel ook de rest van het trendmodel dient te worden aangepast bij scenarioberekeningen. In deze alternatieve methode kan het effect van stratificatie worden onderzocht door per stratum trendmodellen te selecteren en de uitkomsten te vergelijken met die waarbij geen stratificatie is toegepast. Indien de modelbeschrijving van SIMGRO perfect aansluit bij het ruimtelijke beeld van de GxG zoals op de meetlocaties vastgesteld zal stratificatie niet nodig zijn en kan worden volstaan met alleen de predictor GxG volgens SIMGRO. In de uitvoering wijkt dit alternatief nauwelijks van de bestaande Gd-methode af. Er dient alleen een

- extra predictor, namelijk de GxG voorspeld met SIMGRO, aan de set van kandidaatpredictoren te worden toegevoegd;
2. *Gebruik van GxG's die met SIMGRO zijn voorspeld als guess-field in ruimtelijke interpolatie van de GxG.* Hierbij wordt op meetlocaties van de Gd-kartering, bestaande uit stambuislocaties en locaties van gerichte opnames (Finke *et al.*, 2002, 2004), het verschil tussen de geschatte GxG volgens de Gd-methode en de GxG berekend met SIMGRO bepaald. De verschillen tussen 'gemeten' en met SIMGRO voorspelde GxG worden vervolgens geïnterpoleerd met universal kriging. Tenslotte worden de geïnterpoleerde verschillen opgeteld bij de SIMGRO resultaten. De nauwkeurigheid in deze uitkomsten wordt gekwantificeerd door de kriging variantie. Het voordeel van dit alternatief boven het onder punt 1 genoemde is dat het trendmodel altijd berust op alleen SIMGRO resultaten en zodoende aangepast kan worden bij scenarioberekeningen. Echter, indien SIMGRO resultaten weinig van de aangetroffen ruimtelijke structuur verklaren ontstaat met deze methode naar verwachting een minder nauwkeurige kaart dan met een methode waarbij meer bronnen van hulpinformatie worden gebruikt;
 3. *Met stambuisregressie verkregen voorspellingen van de GxG op gerichte opnamelocaties corrigeren met SIMGRO resultaten.* In de huidige Gd-methode worden op locaties met gerichte opnames voorspellingen van de GxG verkregen met stambuisregressie. SIMGRO genereert op deze locaties tijdreeksen van de grondwaterstand waaruit ook een GxG geschat kan worden. De GxG waarden die op beide manieren zijn berekend wijken naar verwachting van elkaar af. Door deze twee GxG waarden met elkaar te combineren kan mogelijk een nauwkeuriger voorspelling van de GxG op gerichte opnamelocaties worden bereikt. Dit kan via een gewogen gemiddelde, waarbij de weegfactoren af zouden moeten hangen van de nauwkeurigheid van de beide voorspellingen (zie bijvoorbeeld Heuvelink en Bierkens, 1992). De aldus verkregen GxG waarden kunnen vervolgens op de gebruikelijke manier (maaiveldregressie met kriging van de residuen) vlakdekkend worden geïnterpoleerd.
 4. *Inzet van SIMGRO resultaten voor locatiekeuze bij gegevensverzameling.* SIMGRO resultaten worden in dit geval gebruikt om te bepalen waar en wanneer gerichte opnames van grondwaterstanden het best genomen kunnen worden. Er zou gezocht kunnen worden naar locaties en tijdstippen waar ruimtelijke variatie volgens SIMGRO groot is of juist naar locaties en tijdstippen waar temporele variatie groot is. Het meetnet zou verdicht kunnen worden op plekken met grote verschillen tussen modelresultaten en stambuisgegevens. Evenzo kunnen SIMGRO resultaten gebruikt worden om 'discutabele' grondwaterstanden die zijn waargenomen tijdens de gerichte opnames aan te wijzen. 'Discutabele' grondwaterstanden zijn standen die door zeer lokale afwijkingen in de hydrologie sterk afwijken van het algemene beeld ten tijde van een gerichte opname. Deze lokale afwijkingen kunnen worden veroorzaakt door stagnatie op slecht doorlatende lagen, lokale hevige neerslag, lokale grondwaterwinning of lokale afwijking in de waterhuishouding. Een andere aanpak om SIMGRO resultaten te gebruiken bij de gegevensverzameling is door met meetnetoptimalisatie de ligging van de gerichte opnames te optimaliseren. Het optimale meetnet zal in dat geval afhangen van de SIMGRO resultaten. Hoe dit

precies uitpakt en hoe het optimale meetnet te bepalen zou nader moeten worden onderzocht. Dit alternatief verschilt sterk van de voorgaande en is hoofdzakelijk gericht op meetnetoptimalisatie in plaats van kartering. Gegevensverzameling wordt bijzonder belangrijk geacht voor de Gd-kartering, maar vraagt om een apart, gedegen, onderzoek dat niet binnen de doelstellingen van dit onderzoek kan worden uitgevoerd. Daarom heeft dit alternatief een lage prioriteit binnen dit project;

5. *Gebruik SIMGRO resultaten als guess-field bij ruimte-tijd interpolatie van de grondwaterstand.* Bij deze methode worden de verschillen tussen de grondwaterstanden die met SIMGRO zijn berekend en de waargenomen grondwaterstanden op stambuis- en gerichte opnamelocaties geïnterpoleerd. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van simple kriging of external drift kriging. Merk op dat het hier gaat om interpolatie in ruimte en tijd. Voor het schatten van extremen moet gebruik worden gemaakt van geconditioneerde geostatistische simulatie. Interpolatie is hiervoor niet geschikt omdat extremen dan worden afgevlakt (smoothing). Geconditioneerde simulatie wordt dan ook gebruikt voor het kwantificeren van de nauwkeurigheid. Een voordeel is dat, door uit te gaan van grondwaterstanden in plaats van GxG's, naast de GxG ook andere karakteristieken van de grondwaterstandsdynamiek kunnen worden berekend. Voorbeelden hiervan zijn duurlijnen en regimecurves. Een nadeel is dat interpolatie of simulatie in ruimte en tijd een grote dichtheid aan meetgegevens vereist, zowel in ruimte als in tijd. De kans bestaat dat de stambuislocaties te ver uiteen liggen en daardoor onvoldoende informatie bevatten over de ruimtelijke structuur over korte afstanden. De gerichte-opnamelocaties hebben daarentegen een grotere ruimtelijke dichtheid, maar zullen weinig informatie verschaffen over de temporele correlatie. Dit komt doordat gerichte opnames geclusterd voorkomen rond bepaalde tijdstippen in het jaar. Daarnaast zullen de stambuisgegevens het eindresultaat grotendeels bepalen omdat er veel meer gegevens beschikbaar zijn op stambuislocaties dan op gerichte-opnamelocaties. De procedure is eveneens tijdrovend. Dit geldt niet alleen voor het berekenen en modelleren van directionele semivariogrammen, maar ook voor het visualiseren en kritisch analyseren in ruimte en tijd van het eindresultaat.

De alternatieven die hier onder 1 en 2 worden genoemd zullen in dit rapport worden uitgewerkt, omdat hiervan het meest wordt verwacht in termen van nauwkeurigheid en mogelijkheden voor scenarioberekeningen, en omdat de hiervoor benodigde gegevens en technieken direct beschikbaar zijn. De overige alternatieven worden in dit rapport niet verder uitgewerkt omdat ze (nog) te complex of tijdrovend zijn of omdat gegevens ontbreken.

2.2 Uitwerking alternatieve karteringsmethoden

De alternatieven 1 en 2 voor de integratie van SIMGRO resultaten en die van de Gd-methode (paragraaf 2.1) worden in deze paragraaf nader uitgewerkt.

De voorspelling van de GxG die gebruik maakt van trendmodellen met gebiedsdekkende hulpinformatie (alternatief 1) blijft het dichtst bij de huidige Gd-

methode (De Gruijter *et al.*, 2004). Indien de GxG's die op meetlocaties zijn geschat goed kunnen worden verklaard uit SIMGRO-modelvoorspellingen zal een trendmodel met de GxG volgens SIMGRO nauwkeurige voorspellingen leveren. Als dit voor het gehele studiegebied opgaat, dan zou ook stratificatie overbodig zijn. Om dit te onderzoeken is alternatief 1 in twee varianten uitgewerkt waarbij een trendmodel wordt geselecteerd op twee manieren:

1. Voor afzonderlijke strata (deelgebieden) die later worden samengevoegd tot een gebiedsdekkend beeld (Alternatief 1a);
2. Voor het gehele studiegebied in één keer (Alternatief 1b).

Daarnaast wordt de met SIMGRO voorspelde GxG als *guess-field* in ruimtelijke interpolatie van de GxG (Alternatief 2) toegepast.

2.3 Gegevens

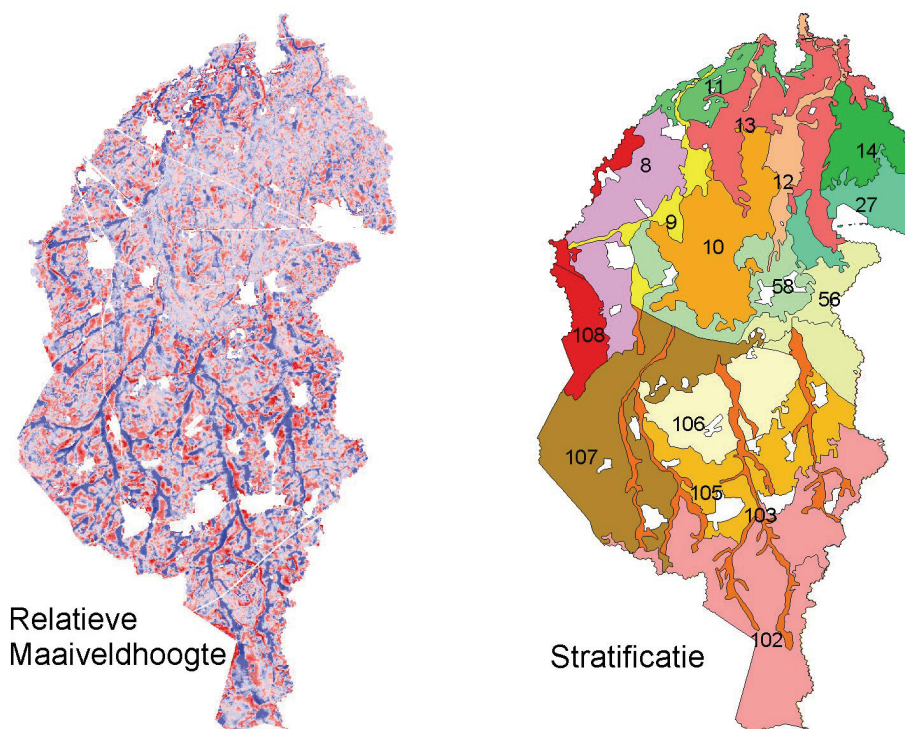
De hierboven genoemde alternatieven zijn toegepast in het studiegebied Beerze-Reusel in de provincie Noord-Brabant, waarvoor zowel een recent SIMGRO-model (van Bakel *et al.*, 2003) als een Gd-actualisatie (van Kekem *et al.*, 2005) beschikbaar is. Het studiegebied beslaat ongeveer 400 km² en is een dekzandgebied doorsneden door verschillende beekdalen met een afwateringsrichting van zuid naar noord. Het studiegebied ligt in het waterschap De Dommel.

De GxG volgens SIMGRO is verkregen door SIMGRO voor de periode 1989-2000 te runnen en uit de aldus gebiedsdekkend verkregen tijdreeksen van de grondwaterstand de GxG gebiedsdekkend te berekenen. Dit betreft dus niet een klimaatsrepresentatieve GxG over 30 jaar zoals bij een Gd-kartering wordt berekend (Finke *et al.*, 2004). De SIMGRO-GxG zoals in deze studie gebruikt is weergegeven in het linker kaartje van figuren 3 en 4.

Voor de alternatieve karteringsmethoden is gebruik gemaakt van GxG schattingen op 850 waarnemingslocaties. De gebruikte GxG schattingen zijn verzameld voor eerder onderzoek (Van Kekem *et al.*, 2005). Het gaat daarbij om resultaten van tijdreeksanalyse op meetreeksen van grondwaterstanden en om gerichte opnames, waarvoor in beide gevallen een schatting van de klimaatsrepresentatieve GxG wordt gemaakt. Bij een gerichte opname is soms sprake van een gecensureerde waarneming, hetgeen wil zeggen dat alleen bekend is dat de grondwaterstand dieper is dan de maximale diepte tot waarop is gemeten. Bij een Gd-kartering wordt hiervoor met *maximum likelihood* een schatting van de grondwaterstand gemaakt, welke wordt gebruikt om de GxG te berekenen. Gevolg van deze berekeningswijze is dat geen GxG-waarden dieper dan ongeveer drie meter worden voorspeld. Hierdoor kunnen de aldus berekende GxG schattingen fors afwijken van de voorspellingen van de GxG zoals verkregen met SIMGRO, welke wel zeer lage GxGs berekent. De grote afwijkingen op een klein aantal punten kan een mogelijk verband negatief beïnvloeden. Daarom is ervoor gekozen om deze GxG-opnames niet te gebruiken in deze studie. Hierdoor zijn 12 waarnemingen vervallen.

2.4 Gestratificeerde kartering met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren (Alternatief 1a)

De stratumindeling zoals bij de eerdere Gd-kartering is gehanteerd (Van Kekem *et al.*, 2005) is aangepast zodat ze aansluit bij de gebiedsbegrenzing van de modelberekeningen met SIMGRO. De berekeningsresultaten van SIMGRO kunnen immers alleen als gebiedsdekkende hulpinformatie worden gebruikt indien ze voor het gehele studiegebied beschikbaar zijn. Strata uit de oorspronkelijke Gd-kartering die tot buiten het SIMGRO-modelgebied doorlopen zijn daarom begrensd op basis van het SIMGRO-modelgebied. Uitgangspunt voor correcte bepaling van een trendmodel per stratum is dat tenminste 20 geschatte GxG's op meetlocaties voorhanden zijn (Van Kekem *et al.*, 2005). Indien vanwege het begrenzen van de oorspronkelijke strata op de modelgrens van SIMGRO niet meer voldoende meetlocaties binnen een stratum liggen dan wordt dit stratum samengevoegd met een vergelijkbaar nabijgelegen stratum, zodat wel voldoende meetlocaties per stratum beschikbaar komen. De gebruikte stratumindeling is weergegeven in het rechterkaartje van figuur 1. Ook de schattingen van de GxG's op meetlocaties zijn overgenomen uit het onderzoek van Van Kekem *et al.* (2005).



Figuur 1 De relatieve maaiveldshoogte in Beerze-Reusel (links) met relatief laaggelegen (blauwe) en hooggelegen (rode) gebieden en de gebruikte stratum-indeling (rechts)

2.4.1 Trendmodellen per stratum

Per stratum worden vervolgens conform de Gd-methode (Finke *et al.*, 2004; De Gruijter *et al.*, 2004) met meervoudige lineaire regressie trendmodellen gefit die de GxG op meetlocaties relateren aan hulpinformatie ter plaatse (kandidaatpredictoren). Daarbij zijn de kandidaatpredictoren onderverdeeld in zes groepen op basis van onderlinge vergelijkbaarheid en wordt uit elke groep maximaal één predictor gekozen om overgeparameteriseerde modellen te voorkomen. In groep 1 zit alleen de maaiveldshoogte volgens AHN (Hgt); in groep 2 zitten de relatieve maaiveldshoogten binnen een zoekstraal van een aantal cellen (rht4, rht12, rht16, rht20); in groep 3 is de ontwateringsdichtheid van greppels en sloten en greppels samen weergegeven binnen een bepaalde zoekstraal uitgedrukt in het aantal cellen (grepd12, grepd16, slootd12 en slootd16); in groep 4 zit de GxG volgens SIMGRO (mGHG, mGVG, mGLG); in groep 5 zit de berging bij GHG en GLG afgeleid uit de bodem- en Gt-kaart 1 : 50.000; en in groep 6 zit de ontwateringsdiepte zoals met waarnemingen en GIS-schattingen is afgeleid (crdraintd).

Een voorbeeld van de gebruikte hulpinformatie is de linker kaart in figuur 1 waarop één van de 15 kandidaatpredictoren is weergegeven, te weten de relatieve maaiveldshoogte. In de gangbare set van gebiedsdekkende hulpinformatie zijn de GHG en GLG die zijn afgeleid uit de 1 : 50.000 bodemkaart (Van Kekem *et al.*, 2005), vervangen door de gebiedsdekkende modelvoorspellingen van GHG en GLG zoals verkregen met SIMGRO. Hierdoor blijft het maximale aantal van 15 kandidaatpredictoren gelijk. Uit de gefitte kandidaat-modellen wordt op basis van het Mallows' Cp-criterium (Mallows, 1966) en de fysische plausibiliteit van gefitte regressiecoëfficiënten een keuze gemaakt voor het trendmodel dat in elk stratum wordt gebruikt.

2.4.2 Gebiedsdekkende interpolatie met een trendmodel

Voor de ruimtelijke interpolatie is gebruik gemaakt van universal kriging met een trendmodel uitgevoerd met GSTAT (Pebesma en Wesseling, 1998). Voor kriging is een semivariogrammodel geschat op basis van de residuen die zijn berekend als het verschil tussen het trendmodel en de geschatte GxG's op de meetlocatie. De gevonden residuen zijn gestandaardiseerd door ze te delen door de standaardafwijking van de voorspelfout zoals berekend met het trendmodel. Op de gestandaardiseerde residuen is vervolgens een exponentieel semivariogrammodel, $\gamma(h)$, gefit van de volgende vorm:

$$\gamma(h) = C_0 + (C_1 - C_0) * (1 - \exp(\frac{-h}{a}))$$

waarin C_0 staat voor de *nugget*, C_1 voor *sill*, h voor de onderlinge afstand tussen waarnemingslocaties en a een waarde evenredig aan de range van het semivariogrammodel is. Het gestandaardiseerde semivariogrammodel is per stratum gedestandaardiseerd door vermenigvuldiging van de *nugget*- en *sill*parameter met de variantie van de voorspelfout per stratum volgens het trendmodel (S in tabel 1). Zoals aangegeven in De Gruijter *et al.* (2004) wordt het geschatte variogram

gecorrigeerd voor de zogeheten pseudo-meetfout, door de nugget van het variogram te verminderen met de gemiddelde variantie van de pseudo-meetfout voor de meetlocaties (Gem. Variantie in tabel 1). De gestandaardiseerde semivariogrammodellen zijn in een universal-krigingprocedure gebruikt om per stratum predicties en bijbehorende voorspelfouten te berekenen.

2.5 Ongestratificeerde kartering met SIMGRO-GxG als kandidaat-predictoren (Alternatief 1b)

Indien de GxG's die voor meetlocaties zijn geschat goed kunnen worden verklaard met SIMGRO-modelberekeningen van de GxG dan zal een trendmodel met alleen de GxG volgens SIMGRO als predictor volstaan. Als dit voor het gehele studiegebied opgaat, dan zou ook stratificatie overbodig zijn. Om dit te onderzoeken is daarom ook een trendmodel geselecteerd voor het gehele studiegebied (alternatief 1b).

2.5.1 Trendmodellen met ruimtelijke hulpinformatie

Voor de kartering van de grondwaterstandsdynamiek in studiegebied Beerze-Reusel is gebruik gemaakt van GxG schattingen op 742 waarnemingslocaties. Op basis van deze gegevens is gezocht naar een verband tussen de ruimtelijke GxG-patronen op waarnemingslocaties en de beschikbare ruimtelijke hulpinformatie (kandidaat-predictoren), om hiermee het ruimtelijk beeld van de GxG gebiedsdekkend te voorspellen. Omdat bij de ongestratificeerde selectie van het trendmodel veel meer punten beschikbaar zijn is geen onderverdeling van de kandidaatpredictoren in groepen gemaakt, waardoor complexere modellen mogelijk zijn.

2.5.2 Gebiedsdekkende interpolatie met trendmodel

Voor de ruimtelijke interpolatie is gebruik gemaakt van universal kriging met een trendmodel uitgevoerd met GSTAT (Pebesma en Wesseling, 1998). Voor kriging is een semivariogrammodel geschat op basis van de residuen die zijn berekend als het verschil tussen het trendmodel en de geschatte GxG op meetlocaties. Op de residuen is een exponentieel semivariogrammodel gefit. Het geschatte variogram wordt gecorrigeerd voor de meetfout door de nugget van het variogram te verminderen met de gemiddelde variantie van de meetfout op meetlocaties. Deze semivariogrammodellen zijn gebruikt om met universal kriging en gebruikmakend van het geselecteerde trendmodel predicties en voorspelfouten van de GHG en GLG te berekenen.

2.6 Residu-interpolatie met SIMGRO-GxG als guess-field

Bij Alternatief 2 wordt de GxG voorspeld door de SIMGRO-voorspellingen op te tellen bij de geïnterpoleerde residuen, die zijn berekend uit de verschillen van

waargenomen GxG's op 742 locaties en de GxG-voorspellingen met SIMGRO. De residuen op meetlocaties worden gebruikt voor het schatten van een exponentieel semivariogrammodel. Het geschatte variogram wordt gecorrigeerd voor de meetfout door de nugget van het variogram te verminderen met de gemiddelde variantie van de meetfout op meetlocaties. Met dit semivariogrammodel en de residuen op meetlocaties worden met *ordinary kriging* de residuen geïnterpoleerd. De geïnterpoleerde GxG-residuen zijn opgeteld bij de gebiedsdekkende GxG-voorspellingen met SIMGRO. De kriging varianties zijn door worteltrekking omgerekend naar standaardafwijkingen.

3 Resultaten

3.1 Trendmodellen

De geselecteerde trendmodellen per stratum bij gestratificeerde kartering met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren (Alternatief 1a) zijn weergegeven in tabel 1 en in de tabel gekarakteriseerd middels regressiecoëfficiënten, de standaardafwijking van de voorspelfout, de *goodness-of-fit* en het aantal GxG schattingen op waarnemingslocaties. Slechts in 11 van de 16 strata blijkt de modelvoorspelling van de GHG en/of GLG met SIMGRO een significant verband te vertonen met de op de waarnemingslocaties geschatte GxG. Alleen in deze strata wordt daarom de grondwaterstandsdynamiek in kaart gebracht met behulp van de GxG die met SIMGRO is berekend.

De geselecteerde trendmodellen bij ongestratificeerde kartering met SIMGRO-GxG als kandidaatpredictoren (Alternatief 1b) voor zowel GHG als GLG bevatten de GxG-SIMGRO als predictor. Bij GHG zijn daarnaast in het trendmodel vijf andere predictoren gebruikt en bij GLG zelfs zeven andere predictoren.

Tabel 1 Regressiecoëfficiënten, aantelwaarnemingen (N), voorspelfout (S), Goodness of Fit (R²) en gemiddelde variantie van de meetfout per stratum en GxG

Stratum	GxG	Intercept	Groep1	Groep2	Groep3	Groep4	Groep5	Groep6	N	S	R ²	Gem. Variantie
8	GHG	7.7	-	-	-	-	-	crdraindt	46	20.33	0.47	163.14
8	GLG	148.8	-	-	-	-	4.34	glgberg	38	18.90	0.66	190.31
9	GHG	-169.5	-	-	-	-	6.31	-	18	13.22	0.61	91.32
9	GLG	112.5	-	-	-	0.99	-	10.25	31	16.24	0.33	189.05
10	GHG	-16.1	0.02	-	-	0.24	-	-	57	19.91	0.26	125.86
10	GLG	50.8	0.04	-	-	0.55	-	-	68	24.49	0.54	209.39
11	GHG	-107.5	0.13	-	-	0.17	-	0.23	27	23.85	0.54	104.74
11	GLG	176.1	-	-	-	-	-	-	41	28.59	0.52	197.12
12	GHG	-136.8	0.09	-	-	-	-	-	38	19.07	0.58	111.81
12	GLG	42.9	-	-	-	0.61	-	-	58	26.55	0.57	221.07
13	GHG	-16.2	0.03	-	-	-	0.21	-	50	17.30	0.64	96.09
13	GLG	61.4	-	-	-	-	0.13	0.23	78	21.46	0.67	212.85
14	GHG	39.6	-	-	-	-	-	-	19	24.68	0.09	126.38
14	GLG	146.6	-	-	-	-	-	-	48	19.49	0.25	227.58
27	GHG	56.1	-	-	-	-	-	-	24	24.36	0.32	86.57
27	GLG	227.5	-	-	-	-	6.11	-	24	28.11	0.65	207.24
56	GHG	-77.4	0.11	-	-	0.20	-	-	17	10.11	0.92	92.66
56	GLG	412.2	-0.15	-	-	-	-	-	20	31.27	0.64	204.27
58	GHG	-52.1	0.06	-	-	-	3.75	-	31	19.23	0.36	95.01
58	GLG	97.9	-	-	-	-	-	6.20	37	23.67	0.42	201.31
102	GHG	-93.4	0.04	-	-	-	5.65	-	39	26.26	0.67	113.58
102	GLG	-54.9	0.04	-	-	-	6.06	-	48	20.97	0.82	183.01

																		Gem. Variantie				
Stratum	GxG	Intercept	Hgt	rht4	rht12	rht16	rht20	grepd12	grepd16	slootd12	slootd16	mghg	mglg	mgvg	ghgberg	glgberg	crdraindt	Groep6	N	S	R²	
103	GHG	13.6	-	-	0.31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.22	37	17.98	0.54	95.60	
103	GLG	99.8	-0.01	-	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.33	66	23.75	0.49	159.49	
105	GHG	69.9	-	-	-	-	-	-	-1.06	-	-	-	-	-	-	-	0.14	31	18.32	0.32	93.08	
105	GLG	19.6	0.04	0.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.25	31	22.45	0.36	213.97	
106	GHG	-112.2	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.34	6.33	-	-	32	20.20	0.72	111.13	
106	GLG	-47.4	0.08	-	0.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51	31.45	0.31	168.86	
107	GHG	18.4	-	0.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.22	5.58	-	-	54	23.10	0.51	135.65	
107	GLG	112.3	-	-	0.23	-	-	-	-	-	-	-	-	0.33	-	-	0.12	67	24.97	0.39	158.72	
108	GHG	32.4	-	-	-	-	0.99	3.06	-	-	-	-	-	-	11.10	-	-0.34	22	25.58	0.70	142.44	
108	GLG	55.2	-	-	0.72	-	-	1.60	-	-	-	-	0.35	-	10.78	-	-	24	19.16	0.88	188.15	

3.2 Variogrammodellen

Bij gestratificeerde kartering met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren (Alternatief 1a) is op de gestandaardiseerde residuen een exponentieel semivariogrammodel (zie paragraaf 2.4.2) gefit met parameters zoals vermeld in tabel 2. Dit gestandaardiseerde semivariogrammodel is per stratum gestandaardiseerd door vermenigvuldiging van de *nugget*- en *sill*parameter met de variantie van de voorspelfout per stratum volgens het trendmodel (S in tabel 1). Het geschatte variogram is gecorrigeerd voor de zogeheten pseudo-meetfout, door de nugget van het variogram te verminderen met de gemiddelde variantie van de pseudo-meetfout (Gem. Variantie in tabel 1).

Tabel 2 Parameters van het gestandaardiseerd semivariogrammodel (Alternatief 1a)

GxG	Nugget parameter [-]	Sillparameter [-]	Range [m]
GHG	0.30	0.70	200
GLG	0.30	0.70	200

De parameters van de gefitte semivariogrammodellen bij ongestratificeerde kartering met SIMGRO-GxG als kandidaatpredictoren (Alternatief 1b) zijn gegeven in tabel 3.

Tabel 3. Parameters van het semivariogrammodel (Alternatief 1b)

GxG	Nugget parameter [cm ²]	Sillparameter [cm ²]	Range [m]
GHG	68.9	366.9	450
GLG	91.3	571.6	450

De parameters van het gehanteerde semivariogrammodel bij residu-interpolatie met SIMGRO-GxG als *guess-field* zijn in tabel 4 gegeven.

Tabel 4 Parameters van het semivariogrammodel (Alternatief 2)

GxG	Nugget parameter [cm ²]	Sill parameter [cm ²]	Range [m]
GHG	135	1000	500
GLG	205	1000	500

3.3 Predicties

In alle methoden is gebruik gemaakt van de GxG zoals berekend met SIMGRO. Deze is weergegeven in de linker kaartjes van Figuur 3 en Figuur 4. De gemiddelde GxG's en spreiding van GxG's in het studiegebied uitgedrukt als standaarddeviatie zijn voor alle alternatieven en SIMGRO-resultaten weergegeven in tabel 5.

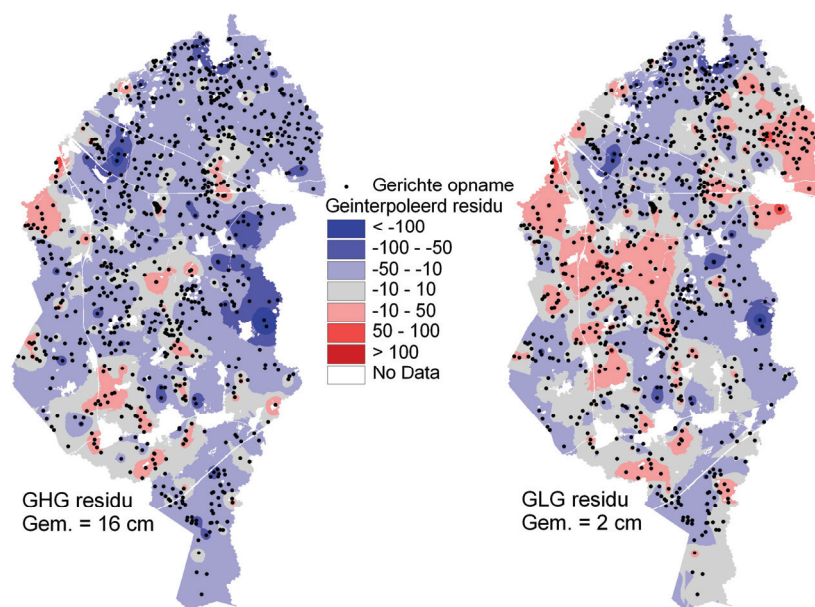
Uit de residu-interpolatie blijkt dat de geschatte GxG op waarnemingslocaties natter is dan volgens SIMGRO. De GxG-kaarten uit residu-interpolatie (Alternatief 2) zijn vergeleken met SIMGRO-resultaten gemiddeld 16 cm lager voor GHG en 2 cm voor GLG (zie figuur 2 en tabel 5). In deze kaarten van de GHG zijn ook patroonveranderingen waarneembaar t.o.v. SIMGRO-GHG; vooral de natte terreindelen in het noorden en midden van het studiegebied worden groter. In de

GLG-kaarten zijn nauwelijks patroonveranderingen waarneembaar ten opzichte van SIMGRO-GLG. Vergeleken met SIMGRO-GxG laten de GxG kaarten uit residu-interpolatie (Alternatief 2) een afgevlakt GxG beeld zien met minder ruimtelijke variatie. De standaarddeviatie van GxG's in de SIMGRO resultaten bedraagt voor GHG 89 cm en voor GLG 92 cm. De standaarddeviatie van de GxG kaarten uit residu-interpolatie bedraagt voor GHG 45 cm en voor GLG 86 cm.

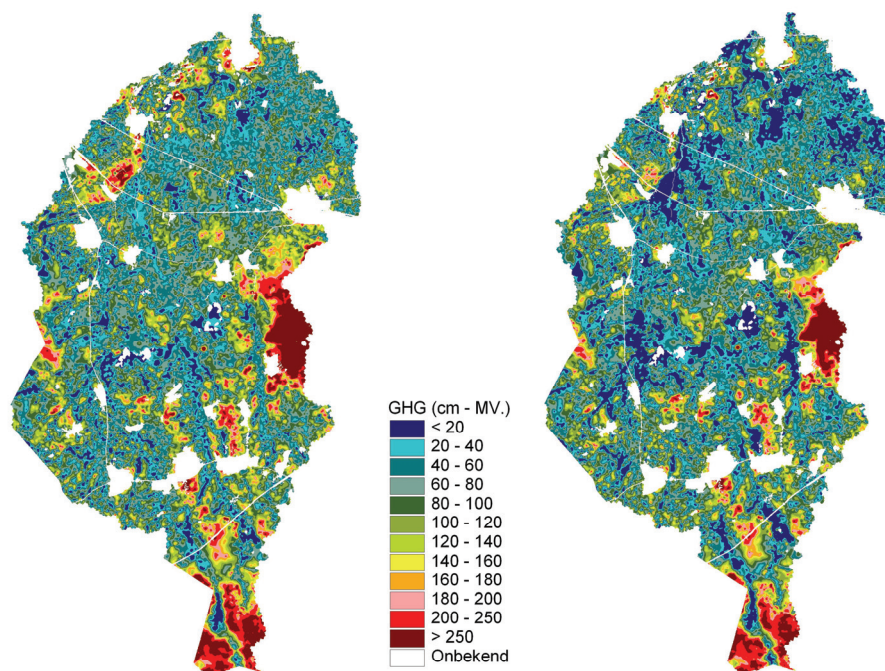
Tabel 5 Gemiddelde GxG [cm – MV] en standaarddeviatie van GxG [cm] voor verschillende karteringsalternatieven en SIMGRO-resultaten

	SIMGRO	Alternatief 1a	Alternatief 1b	Alternatief 2
Gemiddelde GHG	92	70	70	76
Standaarddeviatie GHG	89	45	46	45
Gemiddelde GLG	182	172	172	180
Standaarddeviatie GLG	92	60	62	86

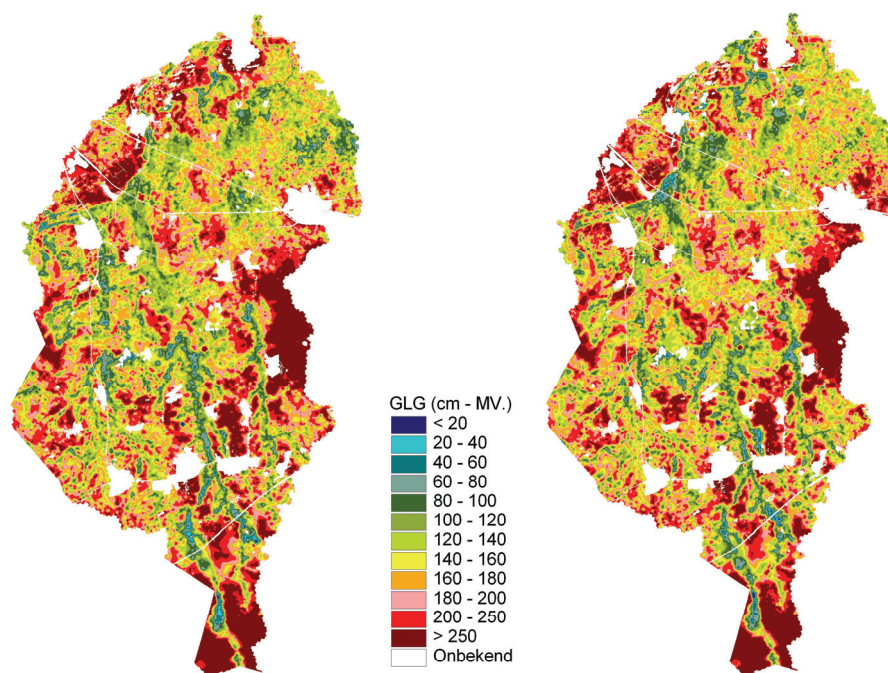
De GxG-kaarten die zijn berekend met de gestratificeerde (Alternatief 1a) en ongestratificeerde (Alternatief 1b) karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren verschillen zowel wat betreft patroon als gemiddelde GxG behoorlijk van de SIMGRO-GxG (vergelijk figuren 3, 4, 5 en 6). Een verklaring hiervoor is dat de methode niet alleen de SIMGRO-GxG als predictor in het gebruikte trendmodel meeneemt maar daarnaast ook andere predictoren gebruikt. De gemiddelde GHG voor het studiegebied volgens SIMGRO (92 cm) is 22 cm droger dan volgens de gestratificeerde- en ongestratificeerde karteringsmethode met SIMGRO-GxG als kandidaatpredictor (70 cm). De gemiddelde GLG volgens SIMGRO (182 cm) is 10 cm droger dan volgens de gestratificeerde- en ongestratificeerde karteringsmethode met SIMGRO-GxG als kandidaatpredictor (172 cm). Vergeleken met de SIMGRO-GxG laten de GxG-kaarten berekend met de gestratificeerde (Alternatief 1a) en ongestratificeerde (Alternatief 1b) karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren een afgevlakt GxG beeld zien met minder variatie in de GxG-kaarten. De standaardafwijking van GxG's in de gestratificeerde (Alternatief 1a) karteringsmethode met SIMGRO-GxG als kandidaatpredictor bedraagt voor de GHG 45 cm en voor de GLG 60 cm. De standaardafwijking van de GxG kaarten uit de ongestratificeerde (Alternatief 1b) karteringsmethode met SIMGRO-GxG als kandidaatpredictor bedraagt voor de GHG 46 cm en voor de GLG 62 cm.



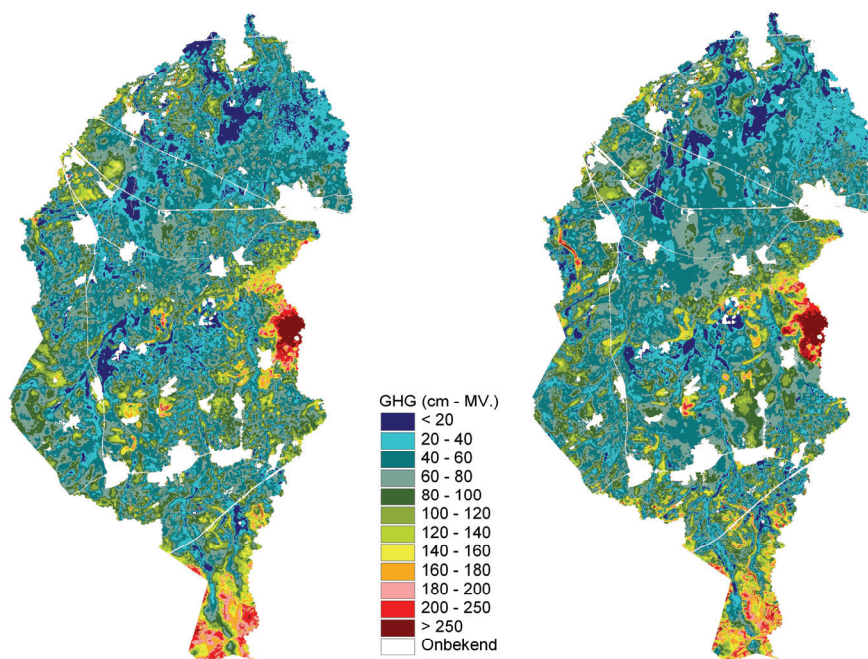
Figuur 2 Geïnterpoleerde residuen van GHG (Links) en GLG (Rechts) t.o.v. SIMGRO-GxG



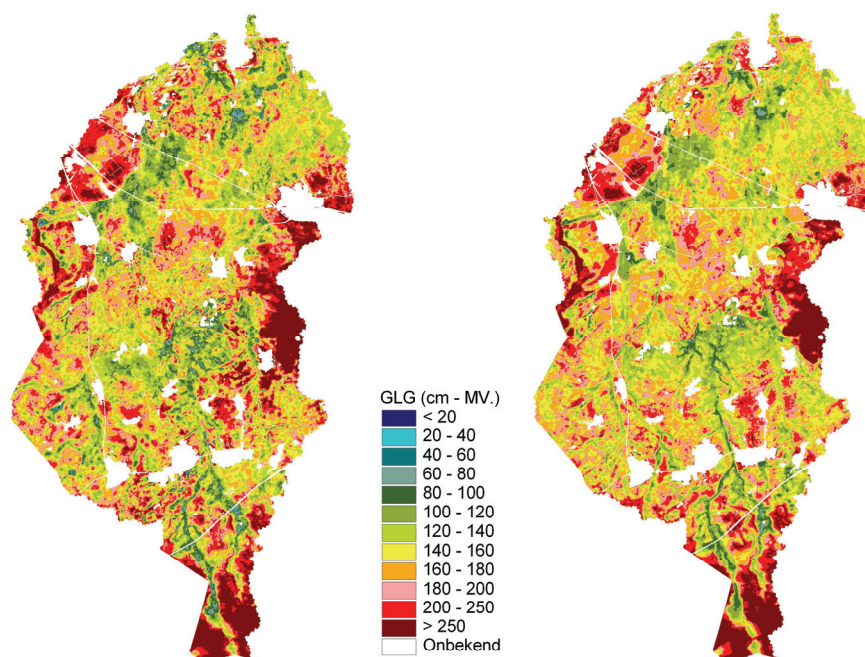
Figuur 3 Links de GHG volgens SIMGRO, rechts de GHG (Alternatief 2) uit SIMGRO+residu-interpolatie.



Figuur 4 Links de GLG volgens SIMGRO, rechts de GLG (Alternatief 2) uit SIMGRO+residu-interpolatie.



Figuur 5 Links de GHG verkregen met Alternatief 1b, rechts de GHG volgens Alternatief 1a.



Figuur 6 Links de GLG verkregen met Alternatief 1b, rechts de GLG volgens Alternatief 1a.

3.4 Voorspelfouten

De drie alternatieve methoden leveren net als de Gd-kartering (Van Kekem *et al.*, 2005) naast GxG-predicties ook schattingen van de nauwkeurigheid van de GxG voorspellingen op die afhankelijk zijn van het gebruikte semivariogrammodel en de configuratie van de waarnemingslocaties. Naarmate voor de kartering van de GxG complexere modellen worden gebruikt, mag verwacht worden dat ook de geschatte modelnauwkeurigheid groter wordt. Door het gebruik van complexe modellen, bijvoorbeeld trendmodellen per stratum, of trendmodellen met veel predictoren, kan naar verwachting de ruimtelijke variatie in de GxG beter worden verklaard dan met een eenvoudiger, ongestratificeerd model en wordt een lagere voorspelfout berekend. De vraag is echter of de geschatte modelnauwkeurigheid goed wordt gekwantificeerd. In het deelproject waarin validatie van de resultaten plaatsvindt, zou daarom ook de geschatte modelnauwkeurigheid gevalideerd moeten worden.

In tabel 5 worden de gemiddelde voorspelfouten voor GHG en GLG van de drie alternatieven vergeleken met de gemiddelde voorspelfouten afkomstig uit de meest recente Gd-kartering in het studiegebied (Van Kekem *et al.*, 2005). Hierbij moet wel worden opgemerkt dat voor de Gd-kartering een andere stratumindeling is gehanteerd waarbij strata ook buiten het huidige studiegebied doorlopen (zie paragraaf 2.4). Daardoor is bij de voorspellingen op basis van trendmodellen ook gebruik gemaakt van opnames van de GxG die buiten het huidige studiegebied liggen maar wel tot een stratum behoren dat deels binnen het studiegebied ligt.

Bij de gestratificeerde (Alternatief 1a), ongestratificeerde (Alternatief 1b) en Gd-kartering (Van Kekem *et al.*, 2005) wordt ook een schatting van de coëfficiënten van het trendmodel gemaakt. De onzekerheid van deze schattingen werkt door in de schatting van de onzekerheid van de GxG voorspellingen. De wortel uit de gebiedsgemiddelde kriging variantie wordt hier gebruikt als schatting van de gemiddelde voorspelfout (standaardafwijkingen) voor de GxG. Tabel 6 geeft voor verschillende karteringsalternatieven de voorspelfouten weer die op deze manier zijn berekend. De verwachte volgorde in nauwkeurigheid wordt hier bevestigd. Complexe gestratificeerde alternatieven (Gd-kartering en Gestratificeerde methode) geven de grootste nauwkeurigheid, gevolgd door de ongestratificeerde met een complex trendmodel en eindigend met residu interpolatie. Alternatief 1a dat ook gebruik maakt van SIMGRO-modelresultaten als kandidaatpredictoren levert nauwkeuriger voorspellingen dan de Gd-kartering waarin deze kandidaat-predictoren niet gebruikt zijn. Het meenemen van resultaten van procesmodellen bij het in kaart brengen van de grondwaterstandsdynamiek lijkt een dus een succesvolle strategie die de nauwkeurigheid kan vergroten, hoewel validatie van resultaten daar nog definitief uitsluitsel over moet geven.

Tabel 6 Voorspelfouten [cm] voor GHG en GLG bij de Gd-kartering en de drie karteringsalternatieven

GxG	Gd-kartering 2005	Gestratificeerde Methode (alternatief 1a)	Ongestratificeerde Methode (alternatief 1b)	Residu-interpolatie SIMGRO-GxG (alternatief 2)
Voorspelfout GHG	20.8	19.9	24.8	30.0
Voorspelfout GLG	27.4	22.6	33.5	30.9

Bij de ongestratificeerde karteringsmethode wordt voor de GLG een hogere voorspelfout berekend dan bij residu-interpolatie, ondanks een lagere sill van het semivariogrammodel (vergelijk tabellen 3 en 4). Deze relatief hoge voorspelfout voor GLG bij de ongestratificeerde karteringsmethode wordt vermoedelijk veroorzaakt door het gebruik van een (te) complex trendmodel, waarin gecorreleerde predictoren voorkomen. In deze variant worden complexere trendmodellen mogelijk doordat geen groepsgewijze selectie van predictoren plaatsvindt, waardoor vergelijkbare predictoren in het trendmodel kunnen worden opgenomen. Ondanks het grote aantal waarnemingen dat is gebruikt om een trendmodel te schatten, is het toch aan te raden het gebruik van vergelijkbare (=gecorrleerde) predictoren in het trendmodel te vermijden, ten einde nauwkeurige voorspellingen te verkrijgen. Bij GHG wordt de onzekerheid in de geschatte regressiecoëfficiënten wel voldoende gecompenseerd door een afname van de ruimtelijke variabiliteit in het residu, zodat de standaardafwijking van de voorspelfout bij alternatief 1b wel lager is dan bij alternatief 2.

3.5 Discussie

In alle drie karteringsalternatieven wordt rekening gehouden met meetfouten in GxG schattingen op waarnemingslocaties en wordt op basis van de data een semivariogrammodel geschat. Bij de twee alternatieven waarin trendmodellen zijn gebruikt wordt ook rekening gehouden met de nauwkeurigheid van de geschatte

regressiecoëfficiënten. Hoewel dus bij alle drie karteringsmethoden getracht is de bereikte nauwkeurigheid te kwantificeren door kaarten van de voorspelfout, kan de nauwkeurigheid van de verschillende berekeningen alleen objectief worden vastgesteld met validatie. In een ander deelproject binnen het grotere project (Knotters *et al.*, in voorbereiding) worden validatiegegevens verzameld in Beerze-Reusel om de uitkomsten van alle deelprojecten, waaronder de resultaten van deze studie, op nauwkeurigheid te kunnen beoordelen.

Als de modelschattingen van de nauwkeurigheid worden gebruikt als criterium om het beste karteringsalternatief te kiezen dan zou de gestratificeerde karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren gekozen worden, gevolgd door de ongestratificeerde karteringsmethode en de residu-interpolatie. De gestratificeerde karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren lijkt, afgaande op berekende voorspelfouten, ook ten opzichte van de eerder uitgevoerde Gd-kartering (Van Kekem *et al.*, 2005) nauwkeurigheidswinst op te leveren (zie tabel 6).

Als het doorrekenen van scenario's of hydrologische maatregelen belangrijk wordt gevonden dan zou de voorkeur uit moeten gaan naar de residu-interpolatie ten opzichte van SIMGRO-GxG, omdat met het SIMGRO modelinstrumentarium maatregelen doorgerekend kunnen worden. De vraag is wel of na nieuwe SIMGRO berekeningen onder een bepaald scenario het ruimtelijke patroon van de residuen gehandhaafd blijft. Alleen als wordt aangenomen dat het eerder vastgestelde ruimtelijk patroon onveranderd blijft of dat een uniforme verschuiving verondersteld mag worden kan deze methode namelijk worden gebruikt voor het doorrekenen van maatregelen. In de beide varianten (Alternatieven 1a en 1b) waarin een trendmodel wordt geschat waarin naast SIMGRO-GxG nog andere predictoren voorkomen, is het doorrekenen van maatregelen eigenlijk niet mogelijk. Er is daar immers geen sprake van een causaal verband maar slechts van een empirische relatie vastgesteld voor de periode waarin de waarnemingen zijn verricht.

Als de fysische plausibiliteit van gekarteerde GxG-patronen het belangrijkste wordt gevonden is de gestratificeerde (Alternatief 1a) karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren het minst geschikt. In deze kaarten zijn immers GxG-sprongen langs stratumgrenzen te verwachten die in werkelijkheid alleen onder specifieke omstandigheden voorkomen. Deels is dit ook zichtbaar in de rechter kaarten in figuren 5 en 6. Daarnaast kunnen zowel in de gestratificeerde (Alternatief 1a) als ongestratificeerde (Alternatief 1b) karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren trendmodellen worden gebruikt die fysisch niet-plausibel zijn. Het meest voor de hand liggende alternatief, als het gaat om fysische plausibiliteit van gekarteerde GxG-patronen, is de residu-interpolatie t.o.v. SIMGRO-GxG (Alternatief 2).

4 Conclusies

Er zijn vele methoden denkbaar waarbij informatie uit procesmodellen samen met gegevens verzameld en bewerkt voor een Gd-kartering gebruikt kunnen worden in een data assimilatie procedure om aldus tot een nauwkeuriger kartering van Gd-informatie te komen. Een inperking van deze alternatieven op basis van een deskundigenoordeel over verwachte nauwkeurigheid en uitvoerbaarheid is daarom noodzakelijk om tot een concrete uitwerking en vergelijking van een kleiner aantal alternatieven te komen.

De drie alternatieven die in dit rapport zijn uitgewerkt hebben allen sterke en zwakke punten, waardoor slechts afhankelijk van de omstandigheden en doelstelling aan te geven is welk alternatief de voorkeur heeft.

Hoewel bij alle drie karteringsmethoden getracht is de nauwkeurigheid te kwantificeren door kaarten van de voorspelfout, kan de nauwkeurigheid van de verschillende berekeningen alleen objectief worden vastgesteld met validatie. Als echter de modelschattingen van nauwkeurigheid worden gebruikt om karteringsalternatieven te vergelijken dan zou het nauwkeurigste alternatief de gestratificeerde karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren zijn, gevolgd door de ongestratificeerde karteringsmethode en als laatste de residu-interpolatie.

De gestratificeerde karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren lijkt ook ten opzichte van de eerder uitgevoerde Gd-kartering (Van Kekem *et al.*, 2005) nauwkeurigheidswinst op te leveren (zie tabel 6). Het meenemen van resultaten van fysisch deterministische modellen bij het in kaart brengen van de grondwaterdynamiek lijkt dus een succesvolle methode die de nauwkeurigheid kan vergroten. De winst in het stroomgebied van Beerze en Reusel bleek echter gering. Als het doorrekenen van scenario's of hydrologische maatregelen belangrijk wordt gevonden dan zou de voorkeur uit moeten gaan naar de residu-interpolatie t.o.v. SIMGRO-GxG, omdat met het SIMGRO-modelinstrumentarium maatregelen doorgerekend kunnen worden.

Als de fysische plausibiliteit van gekarteerde GxG-patronen het belangrijkste wordt gevonden dan is de gestratificeerde (Alternatief 1a) karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren het minst geschikt. In deze kaarten zijn immers GxG-sprongen langs stratumgrenzen te verwachten die in werkelijkheid alleen onder specifieke omstandigheden voorkomen. Daarnaast kunnen zowel in de gestratificeerde (Alternatief 1a) en ongestratificeerde (Alternatief 1b) karteringsmethode met SIMGRO-GxG's als kandidaatpredictoren trendmodellen worden gebruikt die fysisch niet-plausibel zijn. Het meest voor de hand liggende alternatief, als het gaat om fysische plausibiliteit van gekarteerde GxG-patronen, is de residu-interpolatie (Alternatief 2).

Literatuur

De Gruijter, J.J., 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 grondwaterstandsinformatie en perceelsclassificatie naar uitspoelingsgevoeligheid voor nitraat. Rapport 915, Alterra.

Finke, P., M.F.P. Bierkens, D. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. De Vries, 2002. Klimaatsrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap De Dommel. Rapport 381, Alterra.

Finke, P. A., D.J. Brus, M.F.P. Bierkens, T. Hoogland en F. de Vries, 2004. Mapping groundwater dynamics using multiple sources of exhaustive high resolution data. *Geoderma* 123, 23-39

Heuvelink, G.B.M. en M.F.P. Bierkens, 1992. Combining soil maps with interpolations from point observations to predict quantitative soil properties. *Geoderma* 55, 1-15.

Hoogland, T. en J.B.F. van der Horst, 2004. Grondwaterdynamiek in kaart en praktijk; Symposium bundel. Rapport 899, Alterra.

Hoogland, T., D.J. Brus, G.B.M. Heuvelink en M. Knotters, 2004. Verbetermogelijkheden van de statistische Gd-karteringsmethode. Rapport 1032, Alterra.

Knotters, M., G.B.M. Heuvelink en W. De Groot (in voorbereiding). Validatie van data assimilatie methoden voor kartering van de grondwaterstandsdynamiek in stroomgebied Beerze-Reusel, Noord-Brabant.

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

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

Pleijter, M., F. Brouwer en D.J. Brus, 2003. Kaarten met grondwaterstand nader bekeken. Kan de kwaliteit van grondwaterstandkaarten verbeterd worden door aanvullend veldwerk? Rapport 736, Alterra.

Van Bakel, P.J.T., P.E.V. van Walsum, M. Groenendijk en E.P. Querner, 2003. Waterberging en verdrogingsbestrijding. Een nadere analyse van de mogelijkheden en beperkingen aan de hand van modelberekeningen in twee stroomgebieden. Rapport 640, Alterra.

Van Kekem, A.J., T. Hoogland & J.B.F. van der Horst, 2005. Uitspoelingsgevoelige gronden op de kaart; werkwijze en resultaten. Rapport 1080, Alterra.

Van Walsum, P.E.V, A.A. Veldhuizen, P.J.T. van Bakel, F.J.E. van der Bolt, P.E. Dik, P. Groenendijk, E.P. Querner & M.F.R. Smit, 2004. SIMGRO 5.0.1; Theory and model implementation, Rapport 913 .1 Alterra.