

Actualisatie van de grondwaterdynamiek

Actualisatie van de grondwaterdynamiek

Volledige herkartering of beperkte actualisatie?

M.F.P. Bierkens en T. Hoogland

Alterra-rapport 602

Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2002

REFERAAT

Bierkens, M.F.P. en T. Hoogland, 2002. *Actualisatie van de Grondwaterdynamiek. Volledige herkartering of beperkte actualisatie?* Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 602. 40 blz.; 6 fig.; 1 tab.; 7ref; 1CD met bijlagen.

Het maken van GD-kaarten is betrekkelijk duur, met name vanwege het vele veldwerk. Het is dus van belang om na te gaan of bij een hernieuwde kartering het gebruik van de oude GD-kaart en informatie over ingrepen sinds de vorige gd-kartering kan leiden tot kostenbesparing. In dit onderzoek zijn vier alternatieven getoetst op nauwkeurigheid en kosten: GD-kartering zonder gebruik te maken van een bestaande GD-kaart; volledige herkartering gebruik makend van een bestaande GD-kaart en informatie over ingrepen; herkartering met geringe dichtheid van veldwaarnemingen gebruik makend van een bestaande GD-kaart en informatie over ingrepen. herkartering met reguliere dichtheid zich beperkend tot de zone waar wordt vermoed dat ingrepen effect hebben gehad en gebruik makend van een bestaande GD-kaart. Bij de toetsing is gebruik gemaakt van een numeriek laboratorium om de “werkelijke”GD-kaart te construeren. De belangrijkste aanbeveling uit dit onderzoek is om een GD-herkartering te beperken tot gebieden waar ingrepen hebben plaatsgevonden en in deze gebieden een grotere waarnemingsdichtheid dan normaal (> 1 per km²) te hanteren.

Trefwoorden: GD-kartering, GxG, regimecurve, duurlijn, numeriek laboratorium

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 602. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2002 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: postkamer@alterra.wag-ur.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	11
2 Methoden	13
2.1 GD-parameters	13
2.2 GD-kartering	14
2.3 Methode om de nauwkeurigheid van actualisatie-alternatieven te testen	16
3 Het numerieke laboratorium	19
3.1 De situatie zonder ingreep	19
3.2 De situatie na de ingreep	28
4 Resultaten	31
5 Conclusies en discussie	37
Literatuur	39

Woord vooraf

Grondwaterdynamiek (GD) kaarten zijn een belangrijk instrument om de actuele grondwatersituatie te beschrijven. Voor een groeiend areaal in Nederland is recent een nieuwe GD-kaart opgeleverd of in de maak (Geheel Pleistoceen Nederland eind 2002). Nederland staat echter aan de vooravond van grote waterhuishoudkundige ingrepen, bijvoorbeeld door verder uitwerking van provinciale waterhuishoudkundige plannen en stroomgebiedsvisies en de reconstructie. Waternood en de Gewenste Grond- en OppervlaktewaterRegime (GGOR) vormen hierbij het uitvoerings-instrumentarium, waarbij de GD-kaart kan dienst doen als beschrijving van het Actueel GrondwaterRegime (AGR). Als voorgestelde maatregelen binnen de verschillende plannen in de komende jaren zullen worden uitgevoerd valt te verwachten dat binnen 5 tot 10 jaar een groot aantal van de GD-kaarten verouderd zullen zijn. Hierop vooruitlopend tracht dit onderzoek na te gaan op welke wijze een efficiënte (= relatief goedkoop en nauwkeurig) herkartering van de GD mogelijk is, met name door gebruik te maken van de oude GD-kaart en informatie over de locatie en vorm van waterhuishoudkundige ingrepen.

Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het LNV-DWK onderzoeksprogramma 395 “Bodem- en Grondwaterinformatie Groene Ruimte”.

Samenvatting

Sinds 1999 worden door Alterra kaarten gemaakt van de grondwaterdynamiek. Deze kaarten behelzen ruimtelijke bestanden die voor 25x25m pixels de grondwaterdynamiek (GD) karakteriseren door de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG), gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG), de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG), de regimecurve en een duurlijn.

Onafhankelijk van de toepassing geldt dat GD-kaarten die het grondwaterregime weergeven op een bepaald moment (weliswaar gecorrigeerd voor meerjarige weersfluctuaties) zullen verouderen omdat het regime van de grondwaterstand voortdurend aan verandering onderhevig is ten gevolge van menselijk ingrijpen. Zo zullen het nemen van waterhuishoudkundige maatregelen in het kader van Waterlood leiden tot een veranderd grondwaterregime. Als een provincie of waterschap op de hoogte wil blijven van de actuele grondwatersituatie zal er na zekere tijd dus een nieuwe GD-kaart gemaakt moeten worden. Men kan zich ook voorstellen dat men na verloop van tijd (bijv. vijf jaar na het effectief worden van de maatregelen) wil evalueren of maatregelen die in het kader van Waterlood zijn genomen effect hebben gehad, i.c. hoe ver ligt het actuele grondwaterregime van het gewenste grondwaterregime af?

Het maken van een GD-kaart is behoorlijk prijzig, met name omdat voor het bereiken van voldoende nauwkeurigheid nogal wat veldwerk nodig is om aanvullende waarnemingen van de grondwaterstand te verzamelen. Men kan zich dus indenken dat bij een actualisatie van de GD men niet telkens zal kiezen voor een volledige nieuwe kartering maar slechts voor een beperkte actualisatie. Dit onderzoek heeft derhalve de volgende doelstelling:

Te onderzoeken of het mogelijk is om, door gebruik te maken van de bestaande (meest actuele) GD-kaart en informatie over het invloedsgebied van ingrepen in de waterhuishouding die tussen de opnamen voor de meest actuele GD-kaart en de huidige opname zijn gedaan, tegen geringe kosten een GD-kaart van dezelfde kwaliteit te maken als zou zijn bereikt bij een volledige GD-kartering.

Om deze vraag te beantwoorden moet men de kwaliteit van een GD-kartering kunnen kwantificeren voor de situatie voor en na een ingreep en voor verschillende actualisatiealternatieven. Dit kan alleen als men de werkelijkheid zelf creëert. Daarom is in deze studie gebruik gemaakt van een numeriek laboratorium. Dit is een computerprogramma waarmee voor een bepaalde hydrologische situatie op een 25x25 m grid reeksen van grondwaterstanden kunnen worden gesimuleerd en daaruit GD-bestanden gemaakt. Dit is dan de “werkelijke GD”. De gesimuleerde reeksen worden bemonsterd voor grondwaterstanden, i.c. reeksen op een beperkt aantal locaties en gerichte opnamen, met een dichtheid zoals die normaal in een gebied te verwachten is. Deze grondwaterstanden worden vervolgens gebruikt om via de alternatieve karteringsmethoden GD-bestanden te maken waarbij het verschil tussen beide bestanden een maat voor de nauwkeurigheid is. Op deze wijze kunnen

nauwkeurigheid en kosten (volgens dezelfde berekeningswijze als onze offertes) voor verschillende actualisatiealternatieven naast elkaar worden gezet.

De volgende karteringsalternatieven zijn op deze wijze geëvalueerd:

1. GD-kartering zonder gebruik te maken van een bestaande GD-kaart;
2. Volledige herkartering gebruik makend van een bestaande GD-kaart en informatie over ingrepen;
3. Herkartering met geringe dichtheid van veldwaarnemingen gebruik makend van een bestaande GD-kaart en informatie over ingrepen.
4. Herkartering met reguliere dichtheid zich beperkend tot de zone waar wordt vermoed dat ingrepen effect hebben gehad en gebruik makend van een bestaande GD-kaart.

Uit evaluatie van de actualisatiealternatieven kan het volgende geconcludeerd worden.

- Het gebruik van oude GD-kaarten bij het herkarteren na ingrijpen leidt bij gelijkblijvende waarnemingsdichtheid niet tot betere resultaten. Dit is naar alle waarschijnlijkheid het gevolg van de ingreep die niet goed is opgepakt door de waarnemingen waardoor het effect van extra voorinformatie wordt tenietgedaan. Wellicht zou het goed zijn het gebied rond de ingreep als een apart stratum te beschouwen en hier de waarnemingsdichtheid te vergroten.
- Alternatief 3, het gebruik van de oude GD-kaart in combinatie met halvering van de waarnemingsdichtheid van gerichte opnamen, is vanwege het grote verlies aan nauwkeurigheid niet aan te raden.
- Alternatief 4, het beperken van de update tot een gebied rond de ingreep, is vanwege de relatief geringe kosten en het geringe verlies aan nauwkeurigheid een goed alternatief voor volledige herkartering.

Op basis van deze studie is de belangrijkste aanbeveling om een GD-herkartering te beperken tot gebieden waar ingrepen hebben plaatsgevonden en in deze gebieden een grotere waarnemingsdichtheid dan normaal (> 1 per km^2) te hanteren. Het is in dit kader van belang dat waterbeherende instanties, i.c. provincies en waterschappen, een logboek in de vorm van een GIS-bestand bijhouden van alle ingrepen in het waterhuishoudkundig systeem sinds het gereedkomen van de laatste GD-kartering.

1 **Inleiding**

Sinds 1999 worden door Alterra kaarten gemaakt van de grondwaterdynamiek. Deze kaarten behelzen ruimtelijke bestanden die voor 25x25m pixels de grondwaterdynamiek (GD) karakteriseren door de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG), gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG), de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG), de regimecurve en een duurlijn. In hoofdstuk 2 worden deze parameters preciezer gedefinieerd, alsmede een beknopte beschrijving gegeven van de gevolgde methode om een GD-kaart te maken. Voor een uitgebreide beschrijving verwijzen wij naar Finke e.a. (2001).

GD-kaarten worden gemaakt in opdracht van het ministerie van landbouw, waar ze als basis dienen voor het maken van kaarten ten behoeve van de mestwetgeving, in opdracht van Provincies die ze gebruiken als basisbestand bij het vaststellen van het gewenste grondwaterregime (GGR) in het kader van Waternood (Projectgroep Waternood, 1998), en waterschappen die ze gebruiken als basis voor het vaststellen van maatregelen die moeten worden genomen om de GGR te bereiken. Hierbij wordt een GD-kaart gebruikt om het actuele grondwaterregime (AGR) te beschrijven (zie bijv. Finke e.a., 2001). Verder zijn er waterschappen die de GD-kaart als basis nemen voor de omslag van waterschaplasten aan de ingelanden.

Onafhankelijk van de toepassing geldt dat GD-kaarten die het grondwaterregime weergeven op een bepaald moment (weliswaar gecorrigeerd voor meerjarige weersfluctuaties; zie hoofdstuk 2) zullen verouderen omdat het regime van de grondwaterstand voortdurend aan verandering onderhevig is ten gevolge van menselijk ingrijpen. Zo zullen het nemen van waterhuishoudkundige maatregelen in het kader van Waternood leiden tot een veranderd grondwaterregime. Als een provincie of waterschap op de hoogte wil blijven van de actuele grondwatersituatie zal er na zekere tijd dus een nieuwe GD-kaart gemaakt moeten worden. Men kan zich ook voorstellen dat men na verloop van tijd (bijv. vijf jaar na het effectief worden van de maatregelen) wil evalueren of maatregelen die in het kader van Waternood zijn genomen effect hebben gehad, i.c. hoe ver ligt het actuele grondwaterregime van het gewenste grondwaterregime af?

Het maken van een GD-kaart is behoorlijk prijzig, met name omdat voor het bereiken van voldoende nauwkeurigheid nogal wat veldwerk nodig is om aanvullende waarnemingen van de grondwaterstand te verzamelen. Men kan zich dus indenken dat bij een actualisatie van de GD men niet telkens zal kiezen voor een volledige nieuwe kartering maar slechts voor een beperkte actualisatie. Dit kan op twee manieren. Men kan er voor kiezen om voor het hele studiegebied minder aanvullende grondwaterstandswaarnemingen te doen, in de hoop dat het gebruik van de oude GD-kaart als hulpinformatie, het verlies aan nauwkeurigheid dat hierdoor zou optreden compenseert. Ten tweede kan men er voor kiezen de actualisatie te beperken tot het gebied waarvoor men denkt dat maatregelen van invloed op de grondwaterstand zijn geweest. Dit onderzoek heeft derhalve de volgende doelstelling:

Te onderzoeken of het mogelijk is om, door gebruik te maken van de bestaande (meest actuele) GD-kaart en informatie over het invloedsgebied van ingrepen in de waterhuishouding die tussen de opnamen voor de meest actuele GD-kaart en de huidige opname zijn gedaan, tegen geringe kosten een GD-kaart van dezelfde kwaliteit te maken als zou zijn bereikt bij een volledige GD-kartering.

Om deze vraag te beantwoorden moet men de kwaliteit van een GD-kartering kunnen kwantificeren voor de situatie voor en na een ingreep en voor verschillende actualisatiealternatieven. Dit kan alleen als men de werkelijkheid zelf creëert. Daarom wordt in deze studie gebruik gemaakt van een numeriek laboratorium. Dit is een computerprogramma waarmee we voor een bepaalde hydrologische situatie op een 25x25 m grid reeksen van grondwaterstanden kunnen simuleren en daaruit GD-bestanden kunnen maken. Dit is dan de “werkelijke GD”. De gesimuleerde reeksen kunnen bemonsterd worden voor grondwaterstanden, reeksen op een beperkt aantal locaties en gerichte opnamen, met een dichtheid zoals die normaal in een gebied te verwachten is. Deze grondwaterstanden kunnen dan gebruikt worden om via de normale karteringsmethode (Finke e.a., 2001) GD-bestanden te maken waarbij het verschil tussen beide bestanden een maat voor de nauwkeurigheid is. Op deze wijze kunnen nauwkeurigheid en kosten (volgens dezelfde berekeningswijze als onze offertes) voor verschillende actualisatie-alternatieven naast elkaar worden gezet. Dit geeft toekomstige opdrachtgevers, op basis van vereiste nauwkeurigheid of kostenrandvoorwaarden, een handvat om te kiezen tussen volledige herkartering of één van alternatieven van gedeeltelijke actualisatie.

Na een korte uitleg over de methode van GD-kartering volgens Finke e.a. (2001) wordt in hoofdstuk 2 beschreven op welke wijze de nauwkeurigheid van actualisatie-alternatieven kan worden bepaald. Hierbij worden vier alternatieven bekeken: volledige kartering zonder gebruik te maken van een bestaande GD-kaart; volledige herkartering door gebruik te maken van een bestaande GD-kaart; actualisatie door gebruik te maken van een bestaande GD-kaart met minder gerichte opnamen; gedeeltelijke actualisatie door deze te beperken tot gebieden waar men vermoedt dat ingrepen in de waterhuishouding effect hebben gehad op de grondwaterstand. In hoofdstuk 3 wordt een uitgebreide beschrijving gegeven van het numeriek laboratorium dat is gebruikt om de alternatieven te evalueren. Hoofdstuk 4 behandelt de resultaten van deze evaluatie. In hoofdstuk 5 volgen de belangrijkste conclusies en aanbevelingen.

2 Methoden

We beginnen dit hoofdstuk met een korte beschrijving van de parameters die de grondwaterdynamiek (GD) beschrijven. Daarna volgt een beschrijving van de GD-kartering. Tenslotte wordt beschreven op welke wijze de nauwkeurigheid van verschillende actualisatie-alternatieven kan worden gekwantificeerd.

2.1 GD-parameters

De grondwaterdynamiek wordt vastgesteld voor een periode van 30 jaar onder de hydrologische omstandigheden die gelden tijdens de periode van opname van de grondwaterstanden. Dit betekent dat de bestanden de grondwaterdynamiek beschrijven die zou gelden voor de komende 30 jaar als het oppervlaktewatersysteem en de regionale hydrologie alsmede het klimaat de komende 30 jaar niet zouden veranderen. De periode van 30 jaar is gekozen om de weerssituatie tijdens de opname van de grondwaterstanden eruit te filteren. Zoals bekend kan deze nogal variëren tussen jaren (vergelijk de zestiger met de zeventiger jaren). Op deze wijze is de grondwaterdynamiek representatief voor het huidige klimaat en kunnen verschillen tussen GD-kaarten worden toegeschreven aan menselijk handelen en niet aan weersfluctuaties. De volgende parameters worden gebruikt om de grondwaterdynamiek te beschrijven (hierbij geldt dat grondwaterstanden op de 14e en de 28e van de maand worden gemeten):

de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG). Deze wordt berekend door per jaar het gemiddelde van de drie hoogste gemeten grondwaterstanden te berekenen, de zgn. HG3. Het gemiddelde van de 30 HG3s van 30 jaar grondwaterstanden is de GHG;

de gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG). Deze wordt berekend door per jaar het gemiddelde van de drie laagste gemeten grondwaterstanden te berekenen, de zgn. LG3. Het gemiddelde van de 30 LG3s van 30 jaar grondwaterstanden is de GLG;

de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG). De GVG is eigenlijk de verwachte grondwaterstand op 1 april, het begin van het groeiseizoen. In de praktijk wordt deze geschat door per jaar het gemiddelde van de grondwaterstanden gemeten op 14 maart, 28 maart en 14 april te nemen en de 30 gemiddelden, één voor elk van de 30 jaar, te middelen;

de duurlijn. De duurlijn is eigenlijk de cumulatieve frequentieverdeling van de grondwaterstand en geeft voor elke grondwaterstand het aantal dagen per jaar (binnen een periode van 30 jaar) dat deze grondwaterstand wordt overschreden. De duurlijn wordt berekend door alle grondwaterstanden van 30 jaar te sorteren van ondiep naar diep en uit te zetten tegen de frequentie in dagen per jaar. De laatste is te berekenen door $(365 \times \text{volgnummer}) / (30 \times 24)$ in het geval van waarnemingen op de 14e en de 28e. Bij tijdreeksanalyse hebben we de beschikking over dagelijkse grondwaterstanden en wordt de frequentie berekend door $(\text{volgnummer} / 30 \times 365)$. In de GD-bestanden wordt de duurlijn geparameteriseerd door een cumulatieve normale verdeling met twee parameters, het gemiddelde en de variantie;

de regimecurve. De regimecurve geeft voor elk dagnummer een kansverdeling van de grondwaterstand. Deze geeft aan wat de kans is dat de grondwaterstand op een zeker dagnummer gedurende 30 jaar tussen zekere grenzen ligt. De kansverdeling wordt samengevat door drie maten: het gemiddelde, 5-percentiel en het 95-percentiel. Deze worden berekend door per dagnummer alle gemeten grondwaterstanden te nemen (30 in totaal), de één na laagste als 5-percentiel te nemen, de één na hoogste als 30-percentiel en het gemiddelde van de dertig als het gemiddelde van de kansverdeling. Deze drie parameters worden alleen bepaald voor 14e en de 28e van elke maand, resulterend in $3 \times 24 = 72$ parameters.

Een GD-kaart is dus feitelijk een bestand van 25×25 m pixels waarbij per pixel 77 parameters worden vastgesteld: GHG, GVG, GLG, duurlijn (2 parameters) en regimecurve (72 parameters). Omdat bij de karteringsmethode gebruik gemaakt wordt van stochastische methoden is het in principe mogelijk van deze parameters de nauwkeurigheid te kwantificeren. Bij de huidige methodiek gebeurt dit alleen voor de GHG, de GLG en de GVG.

2.2 GD-kartering

Hier volgt een beknopte beschrijving van de methode die wordt gevolgd bij het karten van GD-parameters. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar Finke e.a. (2001).

Als eerste stap wordt een selectie gemaakt van de beschikbare tijdreeksen in landbouwbuizen uit het archief van grondwaterstanden van TNO-NITG. Deze selectie vindt plaats op basis van ligging (bijv. niet in wegbermen of bij sloten), reekslengte en frequentie. Op basis van neerslaggegevens en verdampingsgegevens van het dichtstbijgelegen meteostation wordt een transfer-ruismodel gekalibreerd tussen het neerslagoverschot (neerslag minus potentiële verdamping) en de gemeten grondwaterstand (Bierkens e.a., 2001). Met behulp van het gekalibreerde transfer-ruismodel, een reeks meteodata van 30 jaar en een *pseudo-random number generator* worden vervolgens 100 verschillende reeksen van 30 jaar gesimuleerd, waarbij de variatie tussen deze reeksen de onzekerheid reflecteert van het feit dat slechts een gedeelte van de grondwaterstand vanuit het neerslagoverschot kan worden verklaard. Van elke 30-jarige reeks kan de GxG (GHG, GVG of GLG) worden geschat, hetgeen resulteert in 100 GxG-waarden. Hieruit kan de GxG worden geschat (het gemiddelde) plus het bijbehorende betrouwbaarheidsinterval. Regimecurve en duurlijn worden bepaald door alle grondwaterstanden uit de 100 30-jarige reeksen samen te nemen. Het resultaat van deze stap is dat de GD op alle locaties met tijdreeksen van de grondwaterstand is bepaald.

Bij de tweede stap wordt het gebied op basis van gelijkaardige fysiografische kenmerken (geologie, bodem, grondwatertrap, watersysteem) ingedeeld in zogenaamde strata (gestratificeerd). Voor elk stratum wordt aan de hand van ruimtelijke interpolatie berekende oppervlaktewaterpeilen en het 25×25 m maaiveldhoogtebestand (Algemeen Hoogtebestand Nederland – AHN) voor 25×25

m pixels de ontwateringsdiepte bepaald. Vervolgens wordt per stratum een steekproef genomen van 30 locaties zodanig dat deze het gehele bereik van ontwateringsdiepte binnen het stratum evenredig dekken.

Op de locaties van de steekproef wordt op twee tijdstippen in het jaar de grondwaterstand opgenomen, namelijk als deze relatief hoog staat en als deze relatief laag staat. Dit heet de “gerichte opname”. Tegelijkertijd worden de grondwaterstanden in de TNO-buizen gemeten. Meting vindt bij voorkeur plaats voldoende lange tijd na een neerslaggebeurtenis, opdat de grondwaterstand overal uitzakkend is en een goed ruimtelijk verband vertoont. Op alle locaties met TNO-buizen zijn zowel de grondwaterstanden als de GxG bekend. Op basis hiervan wordt een regressierelatie aangepast tussen de GxG (de te voorspellen variabele) en de gemeten grondwaterstanden op de tijdstippen van de gerichte opname. Deze relatie kan vervolgens worden toegepast op de locaties met gerichte opname om de GxG daar te voorspellen, alsmede de bijbehorende voorspellingsfout. Bij het berekenen van de voorspellingsfout wordt rekening gehouden met verschillende nauwkeurigheid waarmee de GxG op de locaties van de verschillende TNO-buizen bekend is. Het resultaat van deze stap is dus een voorspelling van de GxG op een groot aantal locaties (locaties van TNO-buizen en locaties van gerichte opname) plus bijbehorende nauwkeurigheid.

De volgende stap is om voor het gehele gebied bestanden te maken van hulpvariabelen die de variatie van de GxG zouden kunnen verklaren. Kandidaten zijn de maaiveldshoogte, de relatieve maaiveldshoogte bepaald voor verschillende zoekstralen (zie Finke e.a., 2001), de ontwateringsdiepte en eventueel een beschikbare grondwatertrappenkaart (over een aantal jaren wellicht de meest recente GD-kaart).

Op basis van de hulpvariabelen op de locaties waar de GxG voorspeld is (TNO-buislocaties of locaties gerichte opnamen) en daar voorspelde GxG worden regressiemodellen aangepast. Hierbij wordt een statistische procedure toegepast die per stratum voor GHG, GLG en GVG de juiste combinatie van hulpvariabelen kiest, waarbij alleen variabelen overblijven die een significante bijdrage leveren aan de verklaring van de variatie van de GxG. De regressiemodellen worden vervolgens gebruikt om voor elk pixel van het 25×25 m grid een voorspelling van de GHG, GLG en GVG te doen plus de bijbehorende variantie van de voorspelfout (een maat voor de nauwkeurigheid). Ook hierbij kan weer rekening gehouden worden met variabele nauwkeurigheid van de GxG op de TNO-locaties en die van de gerichte opnamen.

Het resultaat van deze stap zijn dus gebiedsdekkende bestanden van de GxG met bijbehorende nauwkeurigheidsmaat. Via *infilling*- en *smoothing*operaties worden gaten opgevuld (bijv. op locaties waar hulpvariabelen ontbreken en waar geen regressievoorspellingen zijn gedaan vanwege een te grote extrapolatie¹) en sprongen in het freatisch vlak op de randen van strata uitgevlakt.

¹ Om onzinnige voorspellingen te voorkomen wordt een grens gesteld aan de extrapolatie die nog mogelijk is (zie Oude Voshaar, 1994, p.84)

Voor de overige 74 parameters (regimecurve en duurlijn) wordt voor elke parameter een regressiemodel geselecteerd en aangepast tussen de waarden van deze parameters op de locaties van de TNO-buizen en de beschikbare hulpvariabelen. Deze relaties worden vervolgens ruimtelijk toegepast op het 25×25 m grid om ruimtelijke bestanden van duurlijnen en de regimecurves te krijgen.

2.3 Methode om de nauwkeurigheid van actualisatie-alternatieven te testen

De volgende actualisatie-alternatieven zullen worden beschouwd:

1. GD-kartering zonder gebruik te maken van een bestaande GD-kaart;
2. Volledige herkartering gebruik makend van een bestaande GD-kaart en informatie over ingrepen;
3. Herkartering met geringe dichtheid van veldwaarnemingen gebruik makend van een bestaande GD-kaart en informatie over ingrepen.
4. Herkartering met reguliere dichtheid zich beperkend tot de zone waar wordt vermoed dat ingrepen effect hebben gehad en gebruik makend van een bestaande GD-kaart.

Voor elk van deze alternatieven, die in het vervolg zullen worden aangeduid met alternatieven 1 t/m 4 zullen zowel de nauwkeurigheid als de kosten worden vastgesteld. De wijze waarop kosten worden berekend is zoals die gebeurt in offertes van Alterra voor GD-projecten en hangen naast vaste kosten per ha voor dataverwerking met name af van kosten die gerelateerd zijn aan de waarnemingsdichtheid. In deze paragraaf wordt ingegaan op de wijze waarop de nauwkeurigheid van de alternatieven worden vastgesteld.

De kern van de methode bestaat uit een numeriek laboratorium. Dit is een computerprogramma waarmee voor een bepaalde hydrologische situatie op een 25x25 m grid reeksen van grondwaterstanden kunnen worden gesimuleerd en hieruit GD-bestanden kunnen worden gemaakt. Dit is dan de “werkelijke GD”. De gesimuleerde reeksen kunnen bemonsterd worden voor grondwaterstanden, i.c. reeksen en gerichte opnamen op een beperkt aantal. Deze grondwaterstanden kunnen dan gebruikt worden om via de normale karteringsmethode zoals beschreven in 2.2. en in Finke e.a. (2001) GD-bestanden te maken, waarbij het verschil tussen beide bestanden een maat voor de nauwkeurigheid is. Het numerieke laboratorium wordt beschreven in hoofdstuk 3.

Om de kwaliteit van een gemaakt GD-bestand te beoordelen worden de volgende maten gehanteerd:

Per punt wordt berekend

- verschillen tussen voorspelde en echte GXG (GHG, GLG en GVG);
- of de echte GXG (GHG, GVG en GLG) binnen het interval van de voorspelde $GXG \pm sdGXG$ ligt.

- het percentage overlap tussen de echte en voorspelde regimecurve. Gekeken wordt welk percentage van de zone van de echte regimecurve tussen het 5 en 95-percentiel wordt overlapt door deze zone van de voorspelde regimecurve.

Van deze maten kunnen kaarten gemaakt worden. Om alternatieven te vergelijken hebben we echter ook kengetallen nodig voor het gehele gebied. Hier worden vier kengetallen berekend:

1. het gebiedsgemiddelde van de fout in de GXG (GHG, GVG, GLG). Dit geeft aan of de GXG in het gebied gemiddeld wordt overschat of onderschat;
2. De standaarddeviaties van de fouten in GXG (GHG, GVG, GLG). Dit is een maat voor de betrouwbaarheid van de voorspelde GXG over het gebied als geheel.
3. Het percentage cellen waarvoor de echte GXG binnen het interval van de voorspelde $GXG \pm sdGXG$ liggen. Deze vergelijkingsmaat is een combinatie van de juiste inschatting van het niveau en een juiste inschatting van de voorspelfout.
4. het gebiedsgemiddelde van het percentage overlap tussen voorspelde en echte regimecurves. Dit is een integrale maat voor overeenkomst tussen echte en voorspelde grondwaterdynamiek, waar zowel het gemiddeld niveau, de fluctuaties als de timing van de grondwaterstanden bepalend zijn.

De volgende stappen worden genomen om de nauwkeurigheid van de actualisatie-alternatieven te berekenen.

1. Met behulp van het numeriek laboratorium wordt een GD-bestand gemaakt en bijbehorende reeksen van grondwaterstanden en gerichte opnamen voor de situatie voor de ingreep. Dit gebeurt door 1 persoon (Marc Bierkens);
2. Met behulp van de gesimuleerde tijdreeksen van grondwaterstanden en de gerichte opnamen wordt door een ander persoon (Tom Hoogland) onafhankelijk een GD-bestand gemaakt volgens de methode beschreven in paragraaf 2.2. Vergelijking van beide bestanden levert maten van nauwkeurigheid voor actualisatiemethode 1 (GD-kartering zonder gebruik van bestaande GD-kaart).
3. Met behulp van het numerieke laboratorium wordt een ingreep gesimuleerd en vervolgens een GD-bestand gemaakt, alsmede bijbehorende reeksen van grondwaterstanden en gerichte opnamen voor de situatie na de ingreep. Dit gebeurt door 1 persoon (Marc Bierkens);
4. Met behulp van de gesimuleerde tijdreeksen van grondwaterstanden en de gerichte opnamen na de ingreep wordt door ander persoon (Tom Hoogland) onafhankelijk een GD-bestand gemaakt volgens de methode beschreven in paragraaf 2.2, nu gebruik makend van de GD-kaart van voor de ingreep (uit stap 1) en informatie over de plekken waar de ingrepen hebben plaatsgevonden. Vergelijking van het zo gemaakte GD-bestand met het echte uit stap 3 levert maten van nauwkeurigheid voor actualisatiemethode 2. Verschillen in de nauwkeurigheid tussen methoden 1 en 2 reflecteren voornamelijk het verschil in het wel of niet de beschikking hebben van een bestaande GD-kaart.
5. Deze stap is als stap 4, maar nu met minder waarnemingen in de gerichte opname. Dit levert een maat voor de nauwkeurigheid van actualisatiemethode 3. Vergelijking van de nauwkeurigheid van dit bestand met dat verkregen in volgens

- methode 1 geeft antwoord op de vraag of minder waarnemingen kunnen worden gecompenseerd door de extra hulpinformatie in de vorm van een bestaande GD-kaart en informatie over de locatie van ingrepen.
6. Deze stap is als stap 4, maar nu met waarnemingen voor de gerichte opname beperkt tot een gebied waarin wordt vermoed dat de genomen maatregelen effect hebben gehad op de grondwaterstand. Dit levert een maat voor de nauwkeurigheid van actualisatiemethode 4. Vergelijking van de nauwkeurigheid van dit bestand met dat verkregen volgens methode 2 geeft antwoord op de vraag of het mogelijk is de meetinspanning te beperken tot een gebied waar ingrepen worden verondersteld effect te hebben gehad.

Bij alle beschouwde actualisatiemethoden wordt gebruik gemaakt van het actueel hoogtebestand Nederland (AHN). Ditzelfde bestand wordt echter ook gebruikt in het numerieke laboratorium om grondwaterstanden te genereren, en geldt daarin dus als “echte” maaiveldshoogte. Omdat er tussen een individuele maaiveldshoogte verkregen door waterpassing en het AHN een fout met een standaardafwijking van ca 15 cm zit wordt er een gesimuleerd ruisveld met een standaardafwijking van 15 cm bij het AHN-bestand opgeteld. Dit iets veranderde maaiveldshoogte bestand wordt vervolgens gebruikt om de actualisatiemethoden uit te voeren. Het ruisveld wordt gesimuleerd met behulp van sequentiële Gaussische simulatie (Deutsch en Journel, 1998) met een exponentieel semivariogram met een correlatielengte van 750 m, vergelijkbaar met de ruimtelijke structuur van de fout in de grondwaterstand zelf (zie hierna).

3 Het numerieke laboratorium

In dit hoofdstuk wordt het numerieke laboratorium beschreven waarmee GD-kaarten en bijbehorende tijdreeksen en gerichte opnamen van de grondwaterstand kunnen worden gegenereerd. Een groot aantal figuren zijn vanwege hun gezamenlijke omvang op een CD gezet in een powerpointpresentatie. Figuren A1, A2, etc. refereert aan het bestand basis.ppt. Figuren B1, B2, etc aan het bestand ingreep.ppt.

3.1 De situatie zonder ingreep

De simulatie van grondwaterstanden is gebaseerd op het volgende geregionaliseerde ARX(0,1)- model of RARX-model (Knotters en Bierkens, 2000)

$$H_t(\mathbf{x}_i) = c(\mathbf{x}_i) + a(\mathbf{x}_i)\{H_{t-1}(\mathbf{x}_i) - c(\mathbf{x}_i)\} + b(\mathbf{x}_i)P_t(\mathbf{x}_i) + e_t(\mathbf{x}_i) \quad (1)$$

waarbij H_t de grondwaterstand op tijdstip t voorstelt, P_t het gemiddeld neerslag-overschot (neerslag minus potentiële verdamping) tussen de tijdstippen t en $t-1$ en $\mathbf{x}_i, i = 1, \dots, N$ een coördinaat van een 25×25 m grid van N punten over het studiegebied. De parameters a, b, c zijn respectievelijk de autoregressieve parameter, de *moving average* parameter en een parameter die het gemiddeld niveau van H_t bepaalt. De variable e_t is een ruisterm. Dit is discrete witte ruis (ongecorreleerd in de tijd en normaal verdeeld) met gemiddelde 0 en variantie s_e^2 . Zowel de variabelen H_t , P_t en e_t als de parameters a, b, c en s_e^2 hangen af van de plaatscoördinaat $\mathbf{x}_i$. Verder geldt dat de ruis ruimtelijk gecorreleerd is met exponentiele correlatie en dus een covariantie heeft die voldoet aan de volgende eigenschappen:

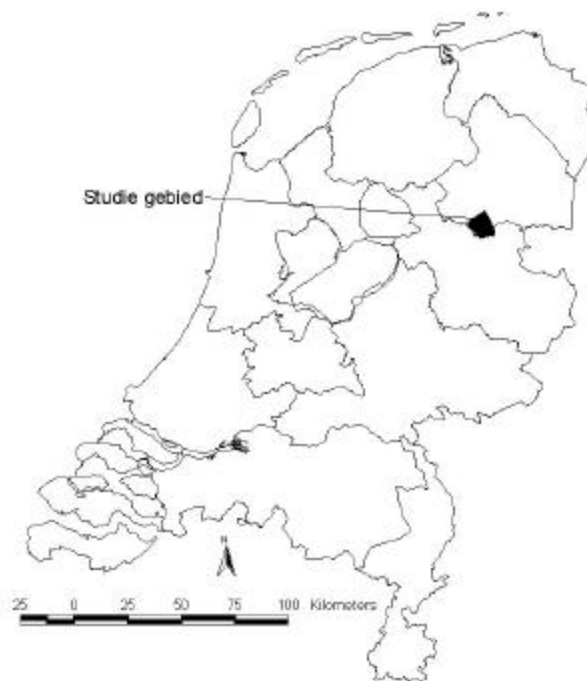
$$\text{COV}[e_t(\mathbf{x}_i)e_s(\mathbf{x}_j)] = \begin{cases} s_e(\mathbf{x}_i)s_e(\mathbf{x}_j)\exp\left[-\frac{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|}{I}\right] & \text{als } t = s \\ 0 & \text{als } t \neq s \end{cases} \quad (2)$$

waarbij de parameter I de integraalschaal wordt genoemd en bepaald over welke afstand de ruis gecorreleerd is.

Het grid waarop bovenstaande model is toegepast om uit reeksen van neerslagoverschot reeksen van grondwaterstanden te berekenen is het 25×25 m grid van het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN) voor een gebied in het waterschap Reest en Wieden, ten zuiden van Hoogeveen en ten noorden van het reestdal (zie Figuur 1). Dit zijn drie strata die zijn gebruikt bij de GD-kartering voor het waterschap Reest en Wieden (Finke e.a., 1999). Deze strata bestaan uit een

beekdal (van de Reest), open zandgronden en een stratum waar keileem ondiep in de ondergrond voorkomt zodat schijnspiegels kunnen ontstaan. Om reeksen met grondwaterstanden te generen met behulp van bovenstaand model moeten dus allereerst voor alle gridlocaties waarden geschat worden van het neerslagoverschot P_t en de parameters a , b , c en s_e^2 . In het volgende wordt beschreven hoe deze zijn bepaald. Men moet hierbij bedenken dat het doel van deze exercitie niet was om de werkelijke grondwaterstanden zo goed mogelijk te benaderen, maar om een ruimte-tijd variatie van de grondwaterstand te creëren die realistisch genoeg is om als veronderstelde werkelijkheid door te gaan. Vandaar dat het numerieke laboratorium weliswaar geïnspireerd is door een bestaand gebied, maar het geen voorspellend model van dit gebied is.

De periode van de gesimuleerde grondwaterstanden betreft 1965-1997, waarbij 1968-1997 de 30-jarige periode is waarover de GD wordt berekend en de jaren 1965-1967 aanloopjaren zijn om de invloed van de beginvoorwaarden kwijt te raken. 1997 is het jaar waarin op ca 100 locaties binnen het gebied gerichte opnamen zijn gemaakt. Verder zijn er drie TNO-locaties met grondwaterstandsreeksen binnen het gebied. Gesimuleerde grondwaterstanden op locaties van gerichte opnamen en TNO-buizen worden bewaard op precies die tijdstippen waarop ook in werkelijkheid waarnemingen zijn gedaan. Voor het regionaliseren van regimecurves en duurlijnen en voor het vertalen van gerichte opnamen naar GxG zijn meer dan drie locaties met tijdreeksen nodig. Deze worden dan ook aangevuld met echte waarnemingen in TNO-buizen die buiten, maar in de buurt van het gebied liggen. Hierbij wordt dus impliciet aangenomen dat de hydrologie binnen studiegebied geen invloed heeft op de systemen waartoe de andere buislocaties behoren.



Figuur 1 Locatie van het studiegebied waarop het numeriek laboratorium is geïnspireerd

De ruimte-tijd variatie van het neerslagoverschot

Om tijdreeksen van het neerslagoverschot te berekenen voor elk pixel moet rekening gehouden worden met de ruimtelijke variatie hiervan. Er is verondersteld dat de referentieverdamping binnen het gebied constant is. Hiervoor is de reeks 1965-1997 van het hoofdstation Eelde genomen. Om de referentieverdamping om te rekenen in een potentiële verdamping is gebruik gemaakt van een gewasfactor f_c per type landgebruik. Hier zijn slechts 3 klassen van landgebruik gebruikt (Figuur A1): landbouw, bos, wegen en bebouwing, met respectievelijk gewasfactoren 0.9, 0.9 en 0.5. Figuur A3 toont de resulterende kaart met gewasfactoren.

Neerslag varieert veel sterker in de ruimte dan de referentieverdamping. Er is rekening gehouden met deze ruimtelijke variatie door neerslagen te betrekken van drie neerslagstations die de randen van het gebied liggen: Dedemsvaart (zuid), Hoogeveen (noord) en Schoonebeek (oost). Voor het berekenen van het over de tijd gemiddelde neerslagoverschot is kan men de over de tijd gemiddelde neerslag op de drie locaties interpoleren, bijv via inverse afstandsinterpolatie (Burrough, 1986) zoals te zien is in Figuur A3. Als $R(\mathbf{x}_i)$ de geïnterpoleerde tijdsgemiddelde neerslag is op locatie $\mathbf{x}_i$ en $\bar{E}_r$ de referentieverdamping van Eelde dan wordt het tijdsgemiddeld neerslagoverschot $\bar{P}(\mathbf{x}_i)$ (over 30 jaar) berekend als:

$$\bar{P}(\mathbf{x}_i) = \{1 - f_{\text{int}}(\mathbf{x}_i)\}R(\mathbf{x}_i) - f_c(\mathbf{x}_i)\bar{E}_r \quad (3)$$

waarin $f_{\text{int}}(\mathbf{x}_i)$ de interceptiefractie van de neerslag is. De interceptiefractie wordt net als de gewasfactor $f_c(\mathbf{x}_i)$ opgehangen aan het landgebruik met waarden 0, 0.3 en 0.5 voor respectievelijk de klassen landbouw, bos, wegen en bebouwing (zie Figuur A4). Figuur A5 toont de resulterende kaart van de tijdsgemiddelde grondwateraanvulling. Deze zal hierna nog gebruikt worden bij het berekenen van de een consistente set RARX-parameters.

De tijdsgemiddelde neerslag laat zich goed interpoleren via een *smooth* interpolatiemethode zoals de inverse kwadratische afstandsinterpolatie. Voor dagelijkse neerslag is dit echter een probleem omdat het dan tussen de stations bijna nooit droog zal zijn, maar ook nooit veel neerslag zal vallen: het miezert er altijd. We zouden dus een soort conditionele simulatiealgoritme nodig hebben dat de waarden gemeten op de stations respecteert en tussen de stations in zowel de juiste kans op regen als de juiste neerslaghoeveelheid gegeven dat het regent respecteert en dit alles inclusief seizoenaliteit. Dit zou een nogal complex hiërarchisch geostatistisch model behoeven, en het voert te ver dit binnen dit onderzoek te doen. Daarom wordt hier een grove benadering toegepast die zowel de (30-jaar) gemiddelde neerslag op de stations respecteert als ook de kans op neerslag op een onbezochte locaties, zolang de laatste niet te veel in de ruimte varieert. Dit gebeurt door het neerslagveld voor 1 dag maar aan 1 station (Dedemsvaart) op te hangen. Voor de overige stations is eerst de ratio berekend tussen de 30-jaar gemiddelde neerslag op dat station en het 30-jaargemiddelde van Dedemsvaart (respectievelijk 1.055 voor Hoogeveen en 0.9058 voor Schoonebeek). Vervolgens is de ratio geïnterpoleerd naar het grid (zie Figuur

A6). Met deze kaart kan een dagneerslag op Dedemsvaart worden omgezet naar een dagneerslag voor het gehele gebied. Dit overschat overigens wel de kans dat het op twee plaatsen op vele kilometers van elkaar tegelijkertijd regent: deze kans is hier 1, terwijl bijv. deze kans voor de stations Dedemsvaart en Hoogeveen gemiddeld 0.8 is (0.95 in de winter en 0.6 in de nazomer). Als $R_t(\mathbf{x}_0)$ de neerslag op tijdstap (=dag) t in Dedemsvaart is en $E_{r,t}$ de referentieverdamping op tijdstap t in Eelde (beiden gemiddelden tussen tijdstap $t - 1$ en t) en $r(\mathbf{x}_i)$ de ratio op gridlocatie $\mathbf{x}_i$ uit Figuur A5, dan wordt het neerslagoverschot op $\mathbf{x}_i$ berekend als:

$$P_t(\mathbf{x}_i) = \{1 - f_{\text{int}}(\mathbf{x}_i)\}r(\mathbf{x}_i)R_t(\mathbf{x}_i) - f_c(\mathbf{x}_i)E_{r,t} \quad (4)$$

Het is duidelijk dat we in deze studie geen rekening houden met verdampingsreductie en dus gebruik maken van de potentiële verdamping om het neerslagoverschot te berekenen. Dit betekent dat in de zomer de grondwaterstanden iets dieper wegzakken dan in de werkelijkheid door dat verdamping doorgaat. Hiervoor wordt echter gedeeltelijk gecorrigeerd door de tijdreeksparameters die hierna worden vastgesteld te baseren op de tijdreeksparameters die zijn bepaald op 14 locaties met gemeten grondwaterstanden via calibratie van model (1) met neerslagoverschot op basis van potentiële verdamping als invoer: de fout die we hierbij maken wordt automatisch gecorrigeerd door iets andere waarden van de parameters a, b, c . Verder zal de ingreep die wordt geanalyseerd geen betrekking hebben op landgebruik, waarbij verwacht kan worden dat veranderingen in verdampingsreductie van belang zijn.

De ruimtelijke variatie van de RARX-parameters

Om tot een consistente set parameters voor het gebied te komen wordt gebruik gemaakt van de volgende relaties tussen de tijdreeksparameters en de meer fysische parameters drainageweerstand g , effectieve porositeit m , de onderrandflux q_b en de drainagebasis (slootbodem of waterpeil) h_s (Knotters en Bierkens, 2000):

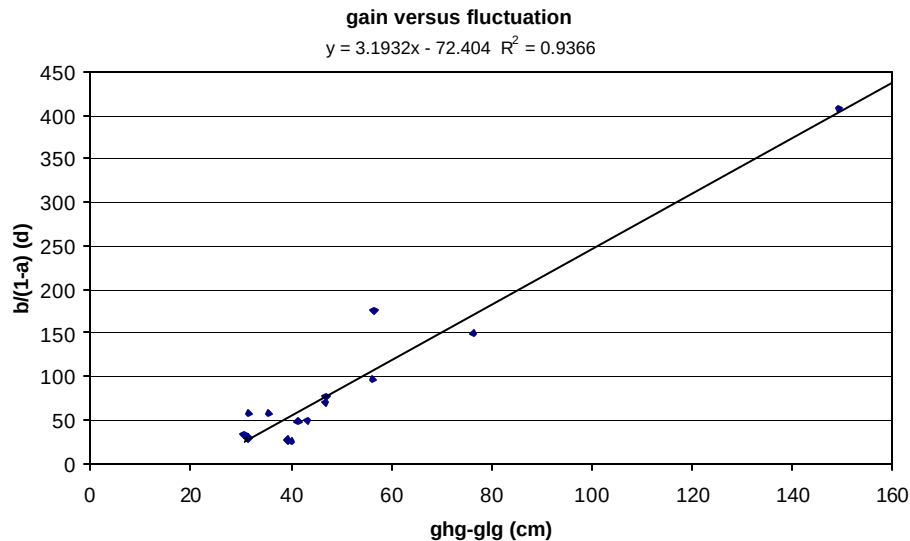
$$\begin{aligned} a &= e^{-\Delta t / mg} \\ b &= g(1 - a) \\ c &= gq_b + h_s \end{aligned} \quad (5)$$

of andersom

$$\begin{aligned} g &= \frac{b}{1 - a} \\ m &= \frac{-\Delta t}{g \ln a} \\ q_b &= \frac{c - h_s}{g} \end{aligned} \quad (6)$$

met Δt de gebruikte tijdstap in het ARX-model (hier 1 dag). Hierna volgen de stappen om de tijdreeksparameters te bepalen.

1. Als eerste wordt de drainageweerstand bepaald. Deze is gelijk aan de zogenaamde *steady state gain* ($b/(1-a)$) (zie vergelijking 6). Uit een onderzoek in het zuidelijkste gedeelte van het studiegebied zijn op 14 locaties met tijdreeksen de drainageweerstand bekend door calibratie van het ARX-model (Bierkens e.a., 2001). Figuur 2 toont de relatie tussen de drainageweerstand en het verschil tussen GHG en GLG (gebaseerd op de periode 1967-1997) voor 14 locaties. Voor de GHG/GLG-kaarten wordt verwezen naar Finke e.a. (1999). De relatie is niet toegepast buiten het bereik van deze data. Dus na toepassing van de regressierelatie zijn de voorspellingen afgekapt buiten het bereik [25,450].

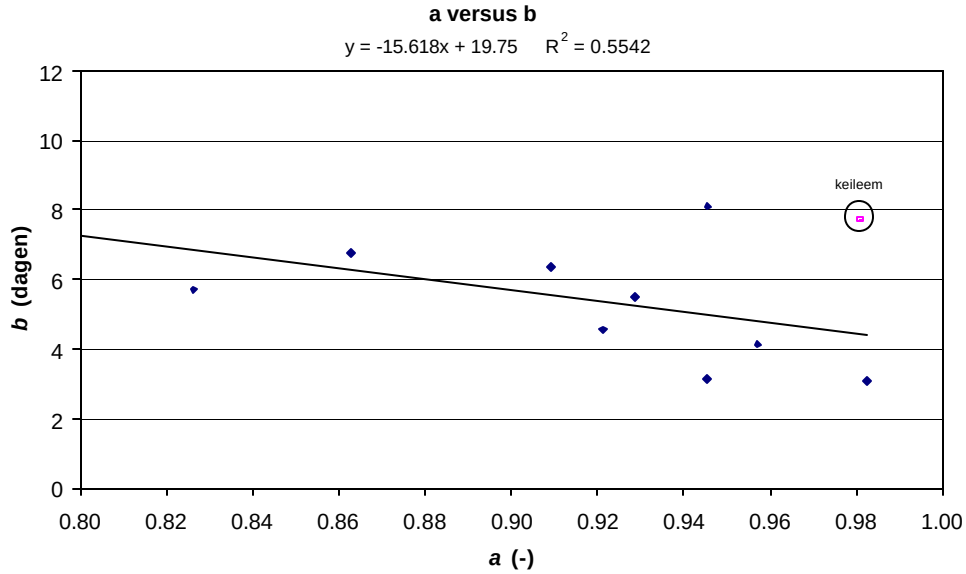


Figuur 2 Relatie tussen drainageweerstand (steady state gain $b/(1-a)$) en het bereik $ghg-glg$.

2. De tweede stap is het vinden van een relatie tussen a en b . Ook dit is gebeurd via een regressie tussen a en b gekalibreerd op 14 locaties in het zuiden van het gebied. Figuur 3 toont de gevonden relatie. Keileem is hierbij niet meegenomen. Door substitutie van de relatie $b = 19.75 - 15.618a$ in de relatie $g = b/(1-a)$ wordt de volgende eenduidige relatie gevonden tussen a en g

$$a = \frac{g - 19.75}{g - 15.618} \quad (7)$$

waarmee op basis van kaart met $g(x_i)$ een kaart van de parameter $a(x_i)$ is gemaakt. Het resultaat is te zien in Figuur A7. Ook hierbij zijn de schattingen van a afgekapt tot binnen het bereik van de gevonden waarden op de 14 locaties met tijdreeksen, i.c. tot het interval [0.56,0.999].



Figuur 3 Relatie tussen parameters a en b .

3. Na berekening van $a(\mathbf{x}_i)$ kan $b(\mathbf{x}_i)$ berekend worden met $b(\mathbf{x}_i) = 19.75 - 15.618a(\mathbf{x}_i)$. Dit is gebeurd voor alle beekdalgronden en open zandgronden. Voor de gronden op keileem is de volgende relatie tussen maaiveldshoogte $z(\mathbf{x}_i)$ en de parameter $b(\mathbf{x}_i)$ verondersteld (Lineaire interpolatie tussen de grenzen 5 en 11 op basis van maaiveldshoogteverdeling op keileemgronden):

$$b(\mathbf{x}_i) = 5.0 + \left(\frac{11.0 - 5.0}{1900 - 600} \right) (z(\mathbf{x}_i) - 600) \quad (8)$$

Figuur A8 geeft de kaart met maaiveldshoogten en Figuur A9 toont de drie strata die in het gebied voorkomen: beekdal, open zandgronden en keileem. Na afkappen tussen de datagrenzen [4.145, 11.0] van de 14 locaties, wordt de uiteindelijke kaart met b -parameters nog een keer *gesmoothed* met een 3×3 window, i.c. door het middelste pixel de gemiddelde waarde van de negen pixels binnen het window te geven. Op deze wijze worden grote sprongen in b -parameters op de grenzen van de open zandgebieden en de keileem verwijderd. Figuur A10 toont de kaart met b -parameters.

4. Omdat voor de keileemgronden b is aangepast moet g worden herberekend via $g(\mathbf{x}_i) = b(\mathbf{x}_i) / (1 - a(\mathbf{x}_i))$ om een consistente set parameters a, b, g te krijgen. Figuur A11 toont de uiteindelijke kaart met drainageweerstand.
5. Met de relatie $m(\mathbf{x}_i) = -\Delta t / (g(\mathbf{x}_i) \ln a(\mathbf{x}_i))$ (zie vergelijking 6) kan een kaart gemaakt worden met de effectieve bergingscoëfficiënt. Deze is gegeven in Figuur A12.

6. Om de c -parameter te berekenen kunnen we de volgende relatie gebruiken tussen de tijdsgemiddelde grondwaterstand $\bar{H}(\mathbf{x}_i)$ op een locatie $\mathbf{x}_i$ en het tijdsgemiddelde neerslagoverschot op die locatie (af te leiden uit vergelijkingen 1, 5 en 6):

$$\bar{H}(\mathbf{x}_i) = c(\mathbf{x}_i) + \left(\frac{b(\mathbf{x}_i)}{1 - a(\mathbf{x}_i)} \right) \bar{P}(\mathbf{x}_i) \quad (9)$$

Dus als naast de parameters a , b (Figuren A7 en A10) en het neerslagoverschot $\bar{H}(\mathbf{x}_i)$ (Figuur A5) ook de gemiddelde grondwaterstand $\bar{H}(\mathbf{x}_i)$ bekend is kan de c -parameter worden berekend uit:

$$c(\mathbf{x}_i) = \bar{H}(\mathbf{x}_i) - \left(\frac{b(\mathbf{x}_i)}{1 - a(\mathbf{x}_i)} \right) \bar{P}(\mathbf{x}_i) \quad (10)$$

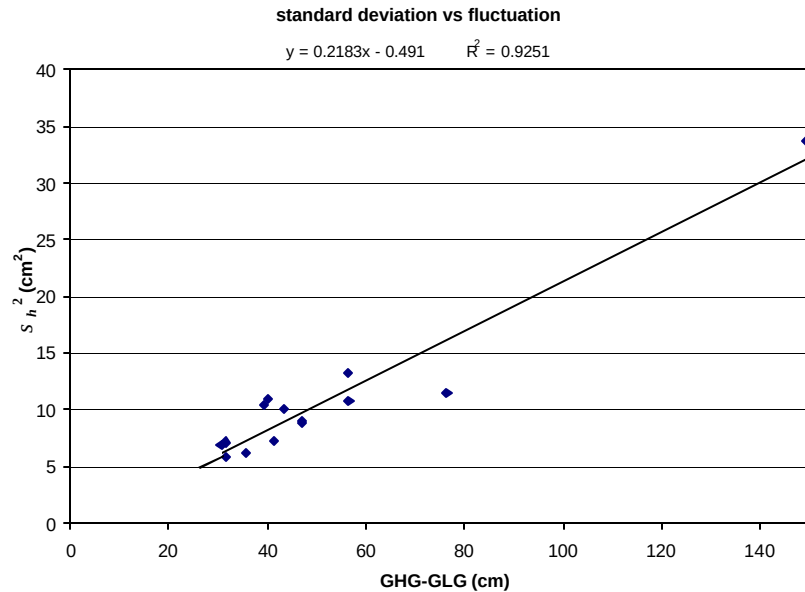
De tijdsgemiddelde grondwaterstanddiepte wordt hier geschat door het gemiddelde te nemen van de GHG en de GLG. Aftrekken van de grondwaterstanddiepte van de maaiveldshoogte (Figuur A8) geeft de tijdsgemiddelde grondwaterstand ten opzichte van NAP (Figuur A13). Om een realistisch freatisch vlak te verkrijgen, zonder locale minima is dit bestand twee maal *smoothed* door een 3×3 *window*. Tenslotte is door aftrekken van de zo verkregen NAP-standen van de maaiveldshoogte een consistent kaart van de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld verkregen (Figuur A14). Invullen van de gemiddelde grondwaterstand ten opzichte van NAP in Vergelijk 10 geeft een kaart van de c -parameter (zie Figuur A15).

7. De laatste parameter die nog moet worden bepaald is de variantie van de ruis s_e^2 . Dit is de variantie die hoort bij de fout die men maakt als met het model 1 tijdstap vooruit wordt voorspeld. Deze fout is niet erg goed te relateren aan fysische kenmerken. Wat ervaring wel zegt is dat als men met een deterministisch model probeert een hele reeks grondwaterstanden te voorspellen (dus niet 1 stap vooruit maar een groot aantal stappen) dat de variantie van de fout die hiermee gemaakt wordt (laten we die s_h^2 noemen) evenredig is met de fluctuatie van de grondwaterstand. Tussen s_e^2 en s_h^2 bestaat de volgende relatie (zie Knotters en Bierkens, 2000):

$$s_h^2 = \left(\frac{s_e^2}{1 - a^2} \right) \quad (11)$$

met deze relatie is voor de 14 locaties met gefitte tijdreeksparameters s_h^2 berekend. Deze is vervolgens gecorreleerd met de fluctuatie GHG-GLG zoals te zien is in Figuur 4. Met behulp van deze relatie is er een kaart gemaakt van s_h^2 (Figuur A16 toont de wortel van deze variantie, i.c. de standaardafwijking

s_h) en via de relatie $s_e^2 = (1 - a^2)s_h^2$ van s_e^2 . Deze kaart is te zien in Figuur A17.



Figuur 4 Relatie tussen variantie van voorspelfout in de grondwaterstand en fluctuatie

8. Met de vier benodigde kaarten met parameters kan nu de grondwaterstand worden gesimuleerd. Om de tijdreeksparameters na een ingreep te voorspellen hebben we echter ook consistente bestanden van de kwel/infiltratie en de drainagebasis nodig. Bij de berekening van de kwel gaan we ervan uit we te maken hebben met een gesloten systeem: de hoeveelheid water die infiltreert naar het grondwater is gelijk aan de hoeveelheid die weer opkwelt (Dit kan ook betekenen dat net zoveel water het gebied van buiten via de ondergrond binnenkomt als via de ondergrond weer verlaat). Over de infiltratie wordt het volgende verondersteld: a) alle locaties met grondwatertrap VII en hoger hebben infiltratie (grondwateraanvulling) gelijk aan het neerslagoverschot; b) alle locaties die hoger liggen dan de mediane maaiveldshoogte hebben infiltratie die een fractie is van de grondwateraanvulling (een gedeelte van de grondwateraanvulling wordt teniet gedaan door toestroming vanaf hogere delen en afgevoerd via het drainagesysteem). Deze fractie is evenredig met het rangnummer van de grondwaterstand ten opzichte van NAP. Er zijn ca 140000 cellen in het gebied. De infiltratie $q_b(\mathbf{x}_i)$ wordt dus gegeven door de volgende vergelijkingen.

- Alle cellen met grondwatertrap VII en hoger:

$$q_b(\mathbf{x}_i) = -\bar{P}(\mathbf{x}_i) \quad (12)$$

- Alle cellen met grondwaterstand volgnummer i hoger dan 70000 (groter dan de mediane maaiveldshoogte):

$$q_b(\mathbf{x}_i) = \left(\frac{70000 - i(\mathbf{x}_i)}{70000} \right) \bar{P}(\mathbf{x}_i) \quad (13)$$

De totaal infiltrerende massa aan water komt als kwel boven in de rest van de cellen om samen met het neerslagoverschot te worden afgevoerd door het drainagesysteem. Hierbij wordt aangenomen dat hoe lager een cel ligt des te meer kwel ontvangt deze cel. Dit leidt tot een vergelijkbare relatie met het volgnummer in het bestand van grondwaterstanden ten opzichte van NAP.

- Alle overige cellen ($i \leq 70000$ en Grondwatertrap VI of lager) ontvangen kwel evenredig aan:

$$q_b(\mathbf{x}_i) = \left(\frac{i(\mathbf{x}_i) - 70000}{70000} \right) q_{b,\max} \quad (14)$$

waarbij $q_{b,\max}$ zodanig wordt gekozen dat de totaal infiltrerende flux gelijk is aan de opkwellende flux. In dit geval betekent dit $q_{b,\max} = 2.6$ mm/dag. De resulterende kaart met kwel en infiltratie wordt gegeven door Figuur A18.

9. De drainagebasis kan nu berekend worden via Vergelijking (6) als:

$$h_s(\mathbf{x}_i) = c(\mathbf{x}_i) - g(\mathbf{x}_i)q_b(\mathbf{x}_i) \quad (15)$$

Figuur A19 toont de zo berekende drainagebasis voor het studiegebied. De drooglegging (maaienveld minus drainagebasis) is gegeven in Figuur A20.

Simulatie van grondwaterstanden

Met de parameters bekend, gaat de simulatie van grondwaterstanden door een herhaling van de volgende stappen:

1. simuleer voor het grid van het studiegebied een ruimtelijk veld van ruimtelijk gecorreleerde ruis met verwachting 0 en variantie 1 en een exponentiële correlatiefunctie met correlatieparameter $I=750$ m. Deze correlatielengte komt uit ervaring met deze parameter in vorige studies (bijv. Bierkens e.a., 2001). Simulatie van het ruimtelijk gecorreleerde veld van ruis wordt gedaan via een algoritme dat sequentiële Gaussische simulatie heet (Deutsch and Journel, 1998);
2. transformeer het standaard normale ruisveld in een ruisveld met de juiste covariantiefunctie (vergelijking 2) door vermenigvuldiging van de gesimuleerde ruis met de standaardafwijking s_e ;
3. de grondwaterstand wordt één stap vooruit berekend via de tijdreeksparameters en het bij de tijdstap behorende neerslagoverschot via:

$$H_t(\mathbf{x}_i) = c(\mathbf{x}_i) + a(\mathbf{x}_i)\{H_{t-1}(\mathbf{x}_i) - c(\mathbf{x}_i)\} + b(\mathbf{x}_i)P_t(\mathbf{x}_i) \quad (16)$$

Het gesimuleerde ruisveld wordt vervolgens bij de nieuwe grondwaterstand opgeteld;

4. Tenslotte wordt een *smoothing* op de gesimuleerde grondwaterstand toegepast via een 3×3 *window*. Deze laatste stap is om te voorkomen dat er geen rare pieken en dalen in het freatisch vlak komen. In de werkelijkheid wordt grondwater immers beschreven door een partiele differentiaalvergelijking en zullen dus tijdelijke locale verschillen in de grondwaterstand door laterale vereffening worden opgeheven. De *smoothing* tracht dit effect na te bootsen. De resulterende grondwaterstand geldt nu als beginvoorwaarde voor de volgende tijdstap waarbij stappen 1 tot en met 4 worden herhaald.

3.2 De situatie na de ingreep

De voorgestelde ingreep bestaat uit een vernattingsoperatie in de vorm van een verhoging van de waterpeilen van de Reest en de polderpeilen van het gebied “de Paardelanden” met 20 cm. Figuur B1 toont de gebieden waar deze ingreep plaatsvindt. Daarnaast worden in de Paardelanden en alle gronden behorende tot het stratum “beekdal” de drainageweerstand met een factor twee verhoogd door de helft van de sloten te dempen. Om de uitstraling van de waterstandsverhoging te berekenen is gebruik gemaakt van de formule van Mazure. Dit betekent dat het effect van de ingreep eindig is omdat deze wordt gecompenseerd door een veranderende fluxsituatie in het gebied. In een gesloten gebied betekent dit een afbuiging van de kwel van de locatie met verhoogde peilen naar andere lage gebieden. De formule van Mazure voor de verhoging $\Delta \bar{H}(\mathbf{x}_i)$ in cm voor een pixel op locatie $\mathbf{x}_i$ die een afstand $\Delta s(\mathbf{x}_i)$ ligt van de dichtstbijzijnde pixel met een verhoging van 20 cm is

$$\Delta \bar{H}(\mathbf{x}_i) = 20e^{-\Delta s(\mathbf{x}_i) / l(\mathbf{x}_i)} \quad (17)$$

waarbij $l(\mathbf{x}_i)$ de spreidingslengte is die we zullen schatten met

$$l(\mathbf{x}_i) = \sqrt{kD(\mathbf{x}_i)g(\mathbf{x}_i)} \quad (18)$$

en $kD(\mathbf{x}_i)$ de transmissiviteit die we op 1000 m²/dag hebben gezet. Figuur B2 toont de berekende spreidingslengte en Figuur B3 de afstand. De resulterende verhoging is te zien in Figuur B4. We realiseren ons dat dit een sterk vereenvoudigde weergave is. Zo zal een de verhoging die een pixel voelt niet alleen te maken hebben met de afstand tot de dichtstbijzijnde pixel met 20 cm verhoging maar hangt deze ook af van de hoeveel pixels met 20 cm verhoging in de buurt. Verder kan men de spreidingslengte eigenlijk niet direct berekenen via (18), ten eerste omdat we de voedingweerstand in plaats van de drainageweerstand nodig hebben en ten tweede kan dit niet per pixel apart maar zal de spreidingslengte een soort niet lineaire integrale zijn over de pixels waarlangs de verhoging zich via het grondwater in de ondergrond voortplant. We stellen hier echte nogmaals dat het niet onze intentie is een werkelijke ingreep te voorspellen maar een voldoende realistisch effect van een mogelijke ingreep voor te stellen. Als zodanig moet Figuur B4 gezien worden.

Nadat de ingreep en zijn gevolgen zijn vastgesteld is het zaak om nieuwe RARX-parameters daarbij te berekenen. Dit gebeurt in de volgende stappen.

1. De Nieuwe drainagebasis $h_s^{(1)}(\mathbf{x}_i)$ wordt gevonden door bij de oude de verhoging op te tellen (we geven de waarden na de ingreep aan met een superscript (1)). Het resultaat is te zien in Figuur B5. Figuur B6 geeft de kaart met de nieuwe drainageweerstand $g^{(1)}(\mathbf{x}_i)$ met duidelijke veranderingen in het beekdal en de Paardelanden.
2. De nieuwe parameters $a^{(1)}(\mathbf{x}_i)$ en $b^{(1)}(\mathbf{x}_i)$ zijn direct te berekenen via de volgende vergelijkingen:

$$a^{(1)}(\mathbf{x}_i) = \exp \left[\frac{-1}{m(\mathbf{x}_i)g^{(1)}(\mathbf{x}_i)} \right] \quad (19)$$

$$b^{(1)}(\mathbf{x}_i) = g^{(1)}(\mathbf{x}_i)(1 - a^{(1)}(\mathbf{x}_i)) \quad (20)$$

De resultaten zijn te zien in de Figuren B7 (a -parameter) en B8 (b -parameter).

3. De nieuwe c -parameter lijkt in eerste instantie ook gemakkelijk opnieuw te berekenen via de formule $c^{(1)}(\mathbf{x}_i) = h_s^{(1)}(\mathbf{x}_i) + g^{(1)}(\mathbf{x}_i)q_b(\mathbf{x}_i)$. Echter door een veranderende drainagebasis verandert ook de tijdsgemiddelde grondwaterstand en dus de verdeling van de kwel, wat weer een effect op de tijdsgemiddelde grondwaterstand heeft. We moeten dus een nieuw evenwicht tussen tijdsgemiddelde grondwaterstand, kwel/infiltratie en de c -parameter vinden. Dat gebeurt door het volgende iteratieve schema:
 - i. bereken een eerste schatting van de c -parameter op basis van de oude kwel:

$$c^{(1)}(\mathbf{x}_i) = h_s^{(1)}(\mathbf{x}_i) + g^{(1)}(\mathbf{x}_i)q_b(\mathbf{x}_i); \quad (21)$$

- ii. bereken de bijbehorende gemiddelde grondwaterstand via:

$$\bar{H}^{(1)}(\mathbf{x}_i) = c^{(1)}(\mathbf{x}_i) + \left(\frac{b^{(1)}(\mathbf{x}_i)}{1 - a^{(1)}(\mathbf{x}_i)} \right) \bar{P}(\mathbf{x}_i); \quad (22)$$

- iii. maak op basis van $\bar{H}^{(1)}(\mathbf{x}_i)$ een nieuw bestand met volnummers $i^{(1)}(\mathbf{x}_i)$ met $i=1,...,140000$ gaande van de kleinste naar de grootste waarde;
 - iv. bereken een nieuwe kwel/infiltratiekaart $q_b^{(1)}(\mathbf{x}_i)$ volgens de procedure uitgelegd rond vergelijkingen (12), (13) en (14);
 - v. met de nieuwe kaart van $q_b^{(1)}(\mathbf{x}_i)$ bereken de nieuwe waarde van de c -parameter met

$$c^{(1)}(\mathbf{x}_i) = h_s^{(1)}(\mathbf{x}_i) + g^{(1)}(\mathbf{x}_i)q_b^{(1)}(\mathbf{x}_i); \quad (23)$$

Stappen ii tot en met v worden herhaald tot de kaart met $q_b^{(1)}(\mathbf{x}_i)$ niet meer verandert. De waarde van $q_{b,\max}$ die bij deze procedure is gebruikt is 2.7 mm/dag. Figuur B9 geeft de uiteindelijke waarde van $c^{(1)}(\mathbf{x}_i)$ en Figuur B10 de waarde van $\bar{H}^{(1)}(\mathbf{x}_i)$. Wanneer we de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld laten zien (Figuur B11) en vergelijken met A14 is te zien dat het beekdal en de Paardelanden duidelijk natter zijn geworden. De Nieuwe kwelkaart is te zien in Figuur B12 en het verschil in kwel/infiltratie in Figuur B13. Deze kaarten laten zien dat de vernattingsmaatregelen in het beekdal verminderde kwel tot gevolg hebben gehad ten faveure van het lage gebied in het westen, waar de kwelsterke is toegenomen. In de vernatte gebieden is er echter nog steeds een voldoende kwelflux van groter dan 1 mm/dag.

4. De laatste parameter die moet worden aangepast is de variantie van de ruis. We gaan er hierbij vanuit dat de totale voorspellingsvariantie s_h^2 niet verandert. De nieuwe ruisvariantie $s_e^{(1)2}$ wordt dus berekend als:

$$s_e^{(1)2}(\mathbf{x}_i) = \left(1 - [a^{(1)}(\mathbf{x}_i)]^2\right) s_h^2(\mathbf{x}_i) \quad (24)$$

Met de nieuwe parameters worden vervolgens op dezelfde wijze simulaties van de grondwaterstand uitgevoerd als beschreven in paragraaf 3.1.

4 Resultaten

Als voorbeeld zijn de “werkelijke GHG-kaart en de werkelijke GHG-kaart na ingreep “gegeven in Figuur 5, samen met de schattingen volgens de verschillende alternatieven. Opvallend is dat alternatief 3 te droog uitkomt en dat alternatieven 2 en 4 vergelijkbare schattingen van de GHG opleveren.

Om de kwaliteit van een gemaakt GD-bestand te beoordelen worden de volgende maten gehanteerd:

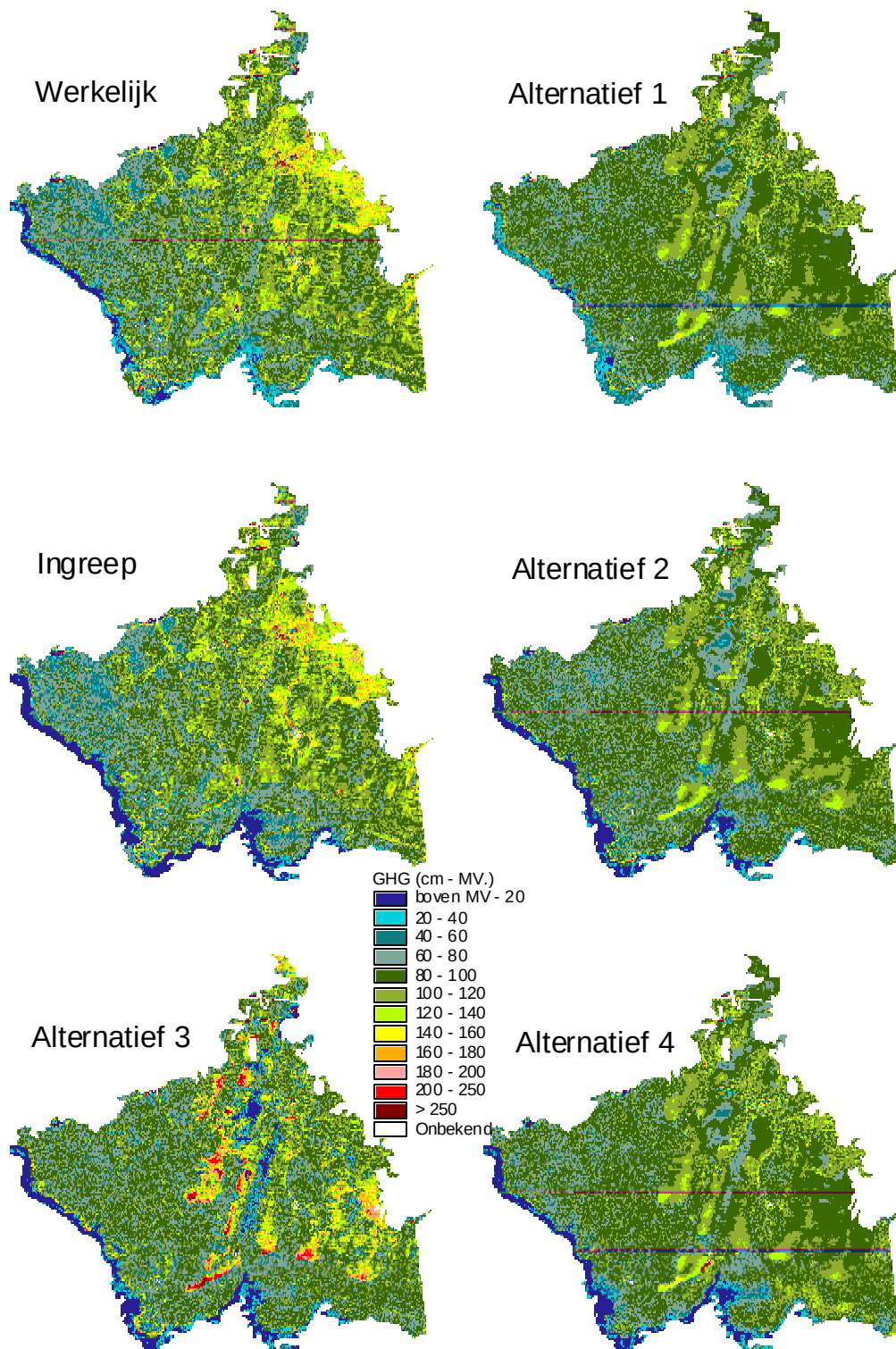
Per punt wordt berekend

- verschillen tussen voorspelde en echte GXG (GHG, GLG en GVG);
- of de echte GXG (GHG, GVG en GLG) binnen het interval van de voorspelde $GXG \pm sdGXG$ ligt.
- het percentage overlap tussen de echte en voorspelde regimecurve. Gekeken wordt welk percentage van de zone van de echte regimecurve tussen het 5 en 95-percentiel wordt overlapt door deze zone van de voorspelde regimecurve.

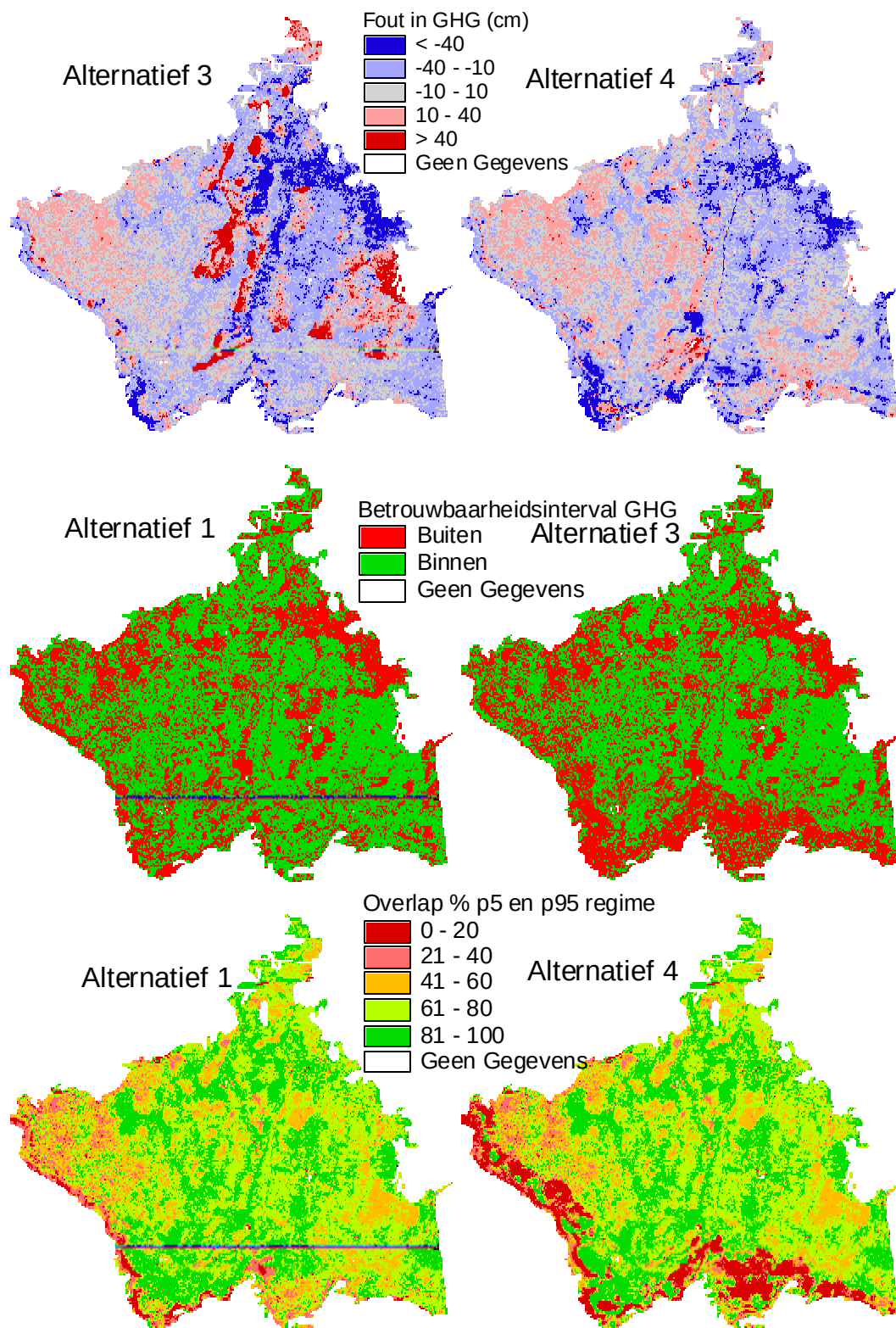
Ter vergelijking zijn elk van drie bovengenoemde maten kaarten gemaakt, per vergelijkings-maat telkens voor het beste en het slechtste alternatief voor de parameter GHG of regime (zie Figuur 6).

Om alternatieven te vergelijken hebben we echter ook kengetallen nodig voor het gehele gebied. Hier worden vier kengetallen berekend:

1. het gebiedsgemiddelde van de fout in de GXG (GHG, GVG, GLG). Dit geeft aan of de GXG in het gebied gemiddeld wordt overschat of onderschat;
2. De standaarddeviaties van de fouten in GXG (GHG, GVG, GLG). Dit is een maat voor de betrouwbaarheid van de voorspelde GXG over het gebied als geheel.
3. Het percentage cellen waarvoor de echte GXG binnen het interval van de voorspelde $GXG \pm sdGXG$ liggen. Dit is een integrale maat voor de correcte inschatting van het GXG niveau en een correcte schatting van de voerspelfout van GXG.
4. het gebiedsgemiddelde van het percentage overlap tussen voorspelde en echte regimecurves. Dit is een integrale maat voor overeenkomst tussen echte en voorspelde grondwaterdynamiek, waar zowel het gemiddeld niveau, de fluctuatie als de timing van de grondwaterstanden bepalend zijn.



Figuur 5. De actualisatie alternatieven voor GHG op punt niveau



Figuur 6. Vergelijking van actualisatie alternatieven op punt niveau.

Deze vergelijkingsmaten zijn voor de vier genoemde alternatieven berekend en staan in tabel 1. Omdat bij de GD-kartering GXG-niveau's boven maaiveld op maaiveldsniveau worden afgetopt zijn locaties waar dit optreed en waar de “werkelijke GXG” ook boven maaiveld ligt buiten de vergelijking gehouden. De verschillende alternatieven voor vergelijking staat in § 2.3 beschreven.

Kengetallen	Parameter	Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3	Altern. 4
Kosten		100	100	70	40
Gemiddelde Fout (cm)	GHG	-1.1	-4.5	-1.7	-3.3
	GVG	7.1	3.4	5.8	4.7
	GLG	-1.1	-4.4	-2.5	-5.0
Standaarddeviatie Fout (cm)	GHG	20.7	21.7	30.1	23.2
	GVG	20.8	22.4	29.6	23.9
	GLG	19.8	19.8	32.1	27.3
Aantal % in GXG $\pm$ sdGXG	GHG	63%	59%	50%	57%
	GVG	54%	52%	45%	49%
	GLG	59%	58%	46%	52%
Aantal % overlap tussen 90% Regime-curve interval van de regimecurves		70%	70%	65%	64%

Tabel 1. Kengetallen voor de beoordeling van de vier actualisatie alternatieven.

Naast de fouten zijn ook de relatieve kosten van de alternatieven geschat, i.e. de kosten van de volledige (her)karteringen (alternatieven 1 en 2) zijn geïndexeerd op 100 en de kosten van alternatieven 3 en 4 op deze schaal uitgedrukt. De kosten van alternatief 4 zijn minder dan die van 3 omdat onder alternatief 3 alleen bespaard wordt op het veldwerk, terwijl onder alternatief 4 zowel wordt bespaard op het veldwerk als op de uitwerking daarna.

De gebiedsgemiddelde fouten van de vier alternatieven verschillen relatief weinig. Alternatief 3 geeft, kijkend naar de gemiddelde fout over alle GXG parameters samen, de beste maat voor het GXG niveau, gevolgd door alternatief 4, alternatief 1 en alternatief 2. Opvallend is dat alle alternatieven een te droge schatting van het GVG niveau geven. Een verklaring hiervoor is niet gevonden.

Bij vergelijking van de standaarddeviaties van de fouten, presteert alternatief 3 duidelijk het slechtst. De andere drie alternatieven verschillen op dit punt relatief weinig: alternatief 1 is het best, gevolgd door alternatief 2 en alternatief 4 (zie Figuur 6 en Tabel 1). De oorzaak van de hogere standaarddeviaties voor alle GXG parameters van alternatief 3 is de gehalveerde waarnemingsdichtheid bij de GD-actualisatie. Het aantal % van de werkelijke GXG's binnen het interval van de voorspelde GXG $\pm$ de voorspelfout van GXG is een maat waarin zowel de juiste inschatting van het gemiddelde niveau als de juiste inschatting van de voorspelnauwkeurigheid een rol speelt. Bij een gemiddeld juiste schatting van zowel het GXG niveau als de voorspelfout van GXG zou het percentage binnen dit interval 68% bedragen. Omdat de verschillen in de gemiddelde fouten tussen de vier alternatieven relatief klein zijn worden verschillen in dit kengetal vooral veroorzaakt door de inschatting van de voorspelfout. Alternatief 3 presteert op dit kengetal duidelijk het slechtst. De andere drie alternatieven verschillen op dit kengetal minder: alternatief 1 is het best, gevolgd

door alternatief 2 en alternatief 4. Het grotere oppervlak buiten het GHG betrouwbaarheidsinterval in alternatief 3 t.o.v. alternatief 1 in figuur 1 illustreert dit. Opvallend hierbij is dat met name in het gebied rond het reestdal, waar de ingreep heeft plaatsgevonden, grote arealen voorkomen waar de werkelijke GHG buiten het betrouwbaarheidsinterval liggen.

Het aantal % overlap tussen het 5 en 95 percentiel van de werkelijke regimecurve en het 5 en 95 percentiel van de voorspelde regimecurve is een maat waarin zowel de juiste inschatting van het gemiddelde regime, de juiste inschatting van de fluctuatie en het tijdstip van voorkomen van bepaalde standen een rol speelt. Bij een juiste schatting van zowel het gemiddelde regime, de fluctuatie als de timing zou het percentage overlap 100% bedragen. Alternatieven 3 en 4 presteren op dit kengetal duidelijk het slechtst en 1 en 2 het best. Het grotere oppervlak met lage overlap-percentages tussen het 5 en 95 percentiel van de werkelijke regimecurve en het 5 en 95 percentiel van de voorspelde regimecurve in alternatief 4 t.o.v. alternatief 1 in figuur 1 illustreert dit. Opvallend hierbij is dat met name in het gebied rond het reestdal, waar de ingreep heeft plaatsgevonden, grotere gebieden met lage overlap percentages voorkomen (zie figuur 1).

Tenslotte is het opvallend dat alternatief 2 niet beter presteert dan alternatief 1, terwijl daarbij toch extra hulpinformatie in de vorm van een bestaande GD-kaart is gebruikt. Dit is naar alle waarschijnlijkheid het gevolg van de ingreep die niet goed is opgepakt door de waarnemingen waardoor het effect van extra voorinformatie wordt tenietgedaan.

5 Conclusies en discussie

Uit het onderzoek naar verschillende manieren om GD-kaarten te actualiseren kan men het volgende concluderen.

Het gebruik van oude GD-kaarten bij het herkarteren na ingrijpen leidt bij gelijkblijvende waarnemingsdichtheid niet tot betere resultaten. In dit onderzoek presteerde deze methode zelfs slechter dan de originele kartering zonder ingreep. Dit is naar alle waarschijnlijkheid het gevolg van de ingreep die niet goed is opgepakt door de waarnemingen waardoor het effect van extra voorinformatie wordt tenietgedaan. Wellicht zou het goed zijn het gebied rond de ingreep als een apart stratum te beschouwen en hier de waarnemingsdichtheid te vergroten.

Alternatief 3, het gebruik van de oude GD-kaart in combinatie met halvering van de waarnemingsdichtheid van gerichte opnamen, is vanwege het grote verlies aan nauwkeurigheid niet aan te raden.

Alternatief 4, het beperken van de update tot een gebied rond de ingreep, is vanwege de relatief geringe kosten en het geringe verlies aan nauwkeurigheid een goed alternatief voor volledige herkartering.

Op basis van deze studie is de belangrijkste aanbeveling om een GD-herkartering te beperken tot gebieden waar ingrepen hebben plaatsgevonden en in deze gebieden een grotere waarnemingsdichtheid dan normaal (> 1 per km²) te hanteren. Het is in dit kader van belang dat waterbeherende instanties, i.c. provincies en waterschappen, een logboek in de vorm van een GIS-bestand bijhouden van alle ingrepen in het waterhuishoudkundig systeem sinds het gereedkomen van de laatste GD-kartering.

Literatuur

- Bierkens, M.F.P., M. Knotters en T. Hoogland, 2001. Space-time modelling of water table depth using a regionalized time series model and the Kalman filter. *Water Resources Research* 37(5), 1277-1290.
- Burrough, P.A., 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford, Clarendon Press.
- Deutsch, C.V. and A.G. Journel, 1998. *GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide* (2nd edition). New York, Oxford University Press.
- Finke, P.A., T. Hoogland, M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, M. Knotters, and F. de Vries, 1999. Pilot naar een nieuwe beschrijving van grondwaterkaarten in het Weerijsgebied; Methodiekontwikkeling met extrapolatie naar een plan van aanpak voor Noord-Brabant. Wageningen, intern rapport DLO-Staring Centrum.
- Finke, P.A., W.P.C. Zeeman, G. Schouten, J. Runhaar, P. van der Molen, W. van der Meer, J.J. de Gruijter, M.F.P. Bierkens, P.J.T. van Bakel and J. Hoeks (red.), 2001. *Beter werken met "Waternood"; Een proeftoepassing in het herinrichtingsgebied De Leijen*. Alterra, rapport 267, Wageningen
- Knotters, M. en M.F.P. Bierkens, 2000. Physical basis of time series models for water table depths. *Water Resources Research* 36(1), 181-188.
- Projectgroep Waternood, 1998. *Grondwater als Leidraad voor oppervlaktewater. Een op het grondwater georiënteerde aanpak voor inrichting en beheer van oppervlaktewatersystemen*. Utrecht, Dienst Landelijke Gebieden. Den Haag, Unie van Waterschappen. DLG-publicatie 1998/2.

