

Kaarten met grondwaterstandverloop nader bekeken

Kaarten met grondwaterstandverloop nader bekeken

Kan de kwaliteit van grondwaterstandkaarten die gemaakt zijn met ruimtelijke modellen verbeterd worden door aanvullend veldwerk?

**M. Pleijter
F. Brouwer
D.J. Brus**

Alterra-rapport 736

Alterra, Wageningen, 2003

REFERAAT

Pleijter, M., F. Brouwer en D.J. Brus, 2003. *Kaarten met grondwaterstand nader bekeken. Kan de kwaliteit van grondwaterstandkaarten verbeterd worden door aanvullend veldwerk?*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 736. 35 blz.; 4 fig.; 7 tab.; 7 ref.

Onderzocht is of de kwaliteit van regionale, met een ruimtelijk model, gemaakte kaarten van de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand en Gemiddeld Laagste Grondwaterstand kan worden verbeterd door middel van aanvullend veldwerk. Hiervoor is de kwaliteit onderzocht van de modelmatig gemaakte kaart van het waterschap Rijn en IJssel en van de in het veld opgenomen grondwatertrappenkaart in een studiegebied in de omgeving van Vorden-Wichmond. Geconcludeerd wordt dat de in het veld opgenomen grondwatertrappenkaart nauwkeuriger is dan de modelmatig gemaakte kaart. Dit komt tot uiting in een kleinere systematische fout en een kleinere toevallige fout. De kosten van dit aanvullende veldwerk zijn echter hoog. Nader onderzoek naar de efficiëntie van alternatieve methoden om de kwaliteit van de modelmatig gemaakte kaart te vergroten is daarom gewenst.

Trefwoorden: grondwatertrap, grondwaterstandkarakteristieken, grondwaterstandverloop, kanssteekproef, kwaliteit, nauwkeurigheid, upgrading, zuiverheid

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 736. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2003 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info@alterra.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
1.1 Achtergrond van dit onderzoek	11
1.1.1 Veldwerk-methode	11
1.1.2 Model-methode	12
1.2 Doel van het onderzoek	13
1.3 Ligging van het onderzoekgebied	13
2 Methode voor bepaling van de kwaliteit van de kaarten	17
2.1 Kanssteekproef	17
2.2 Kwaliteitsmaten	17
2.2.1 Zuiverheid	18
2.2.2 Nauwkeurigheid	18
2.3 Bepaling van de fout in de geschatte GHG en GLG op de steekproefpunten	20
2.3.1 De werkelijke GXG op de steekproefpunten	20
2.3.2 De geschatte GHG en GLG op de steekproefpunten	22
3 Resultaten	23
3.1 Zuiverheid	23
3.2 Nauwkeurigheid	24
4 Kosten	27
5 Discussie	29
5.1 Kaartresolutie	29
5.2 Alternatieve methoden voor upgrading van regionale, met modellen gemaakte grondwaterstandkaarten	29
6 Conclusies	31
Literatuur	33
Aanhangsel 1 Globale personele kosten van kartering...	35

Woord vooraf

Alterra heeft ervaring in het vastleggen van het grondwaterstandverloop op kaarten. Het belangrijkste product van de voormalige Stiboka (nu Alterra) is de Bodemkaart van Nederland 1 : 50 000 waarop het grondwaterstandverloop is aangegeven in klassen. Deze kaarten zijn vooral in de jaren zestig en zeventig gemaakt. In het kader van het besluit aanwijzing van uitspoelingsgevoelige gronden (Bzl) waren actuele grondwaterstandgegevens nodig. Hierop heeft Alterra een methode ontwikkeld, waarbij het grondwaterstandverloop voor grote gebieden in relatief korte tijd wordt vastgesteld. Dit onderzoek is gericht op een mogelijke verbetering van de kwaliteit van de modelmatig gemaakte kaarten met behulp van aanvullend veldwerk.

In het voor- en najaar van 2002 is ten behoeve van dit onderzoek op een groot aantal plaatsen de grondwaterstand gemeten door de heren L. Lansink, B. van Os en G. Stoffelsen, waarvoor wij hen erkentelijk zijn.

Verder is Alterra dank verschuldigd aan de eigenaren van de percelen waarop de grondwaterstand is gemeten.

Samenvatting

Sinds enige jaren worden door Alterra met regressie-modellen kaarten gemaakt van het grondwaterstandsverloop. Het gaat hierbij om de kartering van grote gebieden, vaak hele waterschappen. Het veldwerk is in vergelijking met de kartering van grondwatertrappen in het veld beperkt, en daardoor zijn de kosten per ha veel lager. De vraag is of de kwaliteit van deze met ruimtelijke modellen vervaardigde kaarten voldoende is wanneer deze kaarten in kleinere gebieden worden toegepast, bijv. op perceelsniveau. Om dit te onderzoeken is in een deel van het waterschap Rijn en IJssel (omgeving Vorden en Wichmond) een actuele grondwatertrappenkaart (Gt-kaart) gemaakt volgens de veldwerkmethode (met veel veldwerk dus), en is de kwaliteit van deze Gt-kaart vergeleken met die van de Gt-, GHG- en GLG-kaarten gemaakt met de modelmatige methode ter plaatse. Deze vergelijking geeft inzicht in de mate waarin de kwaliteit van de met modellen gemaakte Gt-, GHG-, en GLG-kaarten kan worden verbeterd door een investering in de vorm van aanvullend veldwerk. De kwaliteit van de kaarten is bepaald in termen van de *zuiverheid* van de kaarten, en de *nauwkeurigheid* van schattingen van de GHG en GLG op punten op basis van beide kaarten. De zuiverheid van een kaart met betrekking tot de Gt geeft het percentage aan van het oppervlak van het gekarteerde gebied waarvan de Gt goed is weergegeven.

Voor de op “ambachtelijke” wijze gemaakte Gt-kaart, aangeduid met de Gtveld-kaart, moet eerst een keuze gemaakt worden ten aanzien van de methode waarmee de GHG en GLG op punten wordt geschat, alvorens de nauwkeurigheid van de GHG- en GLG-schattingen op basis van deze Gtveld-kaart kan worden gekwantificeerd. De Gtveld-kaart geeft immers informatie over de GHG en GLG in klassen. In dit onderzoek is het gemiddelde van de GHG (GLG) op alle boorpunten binnen hetzelfde vlak op de Gt-kaart gebruikt als puntschatting.

Bij het bepalen van de nauwkeurigheid is onderscheid gemaakt tussen een systematische fout (gemiddelde fout) en een toevallige fout (fout tengevolge van onverklaarde ruimtelijke variatie).

De zuiverheid en nauwkeurigheid van de kaarten zijn geschat met een gestratificeerde aselechte steekproef van 100 punten. Op deze steekproefpunten is twee keer de grondwaterstand gemeten, één keer in april en één keer in oktober. Deze grondwaterstandmetingen zijn gebruikt om de GHG en GLG op deze steekproefpunten te voorspellen. Dit is gedaan met een regressiemodel voor de GHG (GLG) met als verklarende variabele(n) de grondwaterstand(en). Voor het aanpassen van dit regressiemodel zijn zes stambuizen met een lange meetreeks, en acht buizen met een relatief korte meetreeks gebruikt. Deze met het regressiemodel voorspelde GHG en GLG zijn vervolgens vergeleken met de van de kaarten afgeleide GHG en GLG.

De zuiverheid m.b.t. de Gt is voor de Gtveld-kaart 36% en voor de Gtmodel-kaart 32%. De zuiverheid van de GHG-klasse is bij beide kaarten beter (resp. 63% en 59%) dan de zuiverheid voor de GLG-klasse (resp. 55% en 52%).

De GLG wordt op de GLGmodel-kaart systematisch te diep weergegeven (systematische fout 18 cm). Ook de GHG wordt iets te diep weergegeven, maar deze systematische fout is kleiner (6 cm). De systematische fouten van de Gtveld-kaarten zijn zowel voor de GHG als de GLG klein, resp. -5 en -2 cm. De toevallige fout (fout tengevolge van onverklaarde variatie) van de GLGveld-kaart is aanzienlijk kleiner dan die van de GLGmodel-kaart (770 versus 1911 cm²). Voor de GHG is deze fout door het veldwerk gereduceerd van 493 cm² naar 408 cm².

1 Inleiding

1.1 Achtergrond van dit onderzoek

Alterra maakt sinds jaar en dag kaarten waarop het grondwaterstandverloop gedurende een seizoen staat afgebeeld. Met name in de jaren zestig en zeventig heeft de voormalige Stichting voor Bodemkartering (Stiboka) het grondwaterstandverloop in de vorm van *grondwatertrappen* op de Bodemkaart van Nederland, schaal 1: 50 000 weergegeven. De grondwatertrap geeft informatie over de diepte van de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) en de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG), ten opzichte van maaiveld (in klassen). Nog steeds worden op deze wijze door Alterra grondwatertrappenkaarten vervaardigd van relatief kleine gebieden (5 000 – 10 000 ha), waarbij de kaarten meestal worden opgeleverd met een schaal van 1: 10 000. De door de Stichting voor Bodemkartering ontwikkelde methode voor het vastleggen van het grondwaterstandverloop is voornamelijk gebaseerd op veldwaarnemingen.

In verband met de toegenomen kosten van arbeid en om een opdrachtgever sneller van een actuele grondwatertrappenkaart van een relatief groot gebied (bijv. van een waterschap) te kunnen voorzien heeft Alterra een methode ontwikkeld waarbij het veldwerkdeel sterk is verminderd. In deze methode wordt gebruik gemaakt van modellen voor de grondwaterstandkarakteristieken. Een belangrijke invoervariabele van deze modellen is de relatieve maaiveldshoogte die wordt afgeleid van het Actuele Hoogtebestand van Nederland (AHN). Alle invoervariabelen dienen gebiedsdekkend aanwezig te zijn, zodat met het model gebiedsdekkende voorspellingen kunnen worden gedaan van de grondwaterstandskarakteristieken. Met deze modelmatige methode kunnen behalve de GHG en GLG ook andere parameters die de *grondwaterdynamiek* beschrijven in kaart worden gebracht. In verband hiermee wordt deze methode ook wel aangeduid met de Gd-methode (Gd van grondwaterdynamiek).

Sinds de ontwikkeling van de nieuwe methode worden door Alterra beide methoden gebruikt om het grondwaterstandverloop van een bepaald gebied weer te geven: de “ambachtelijke” methode gebaseerd op veel veldwerk (hierna veldwerk-methode genoemd), en de model-methode, met relatief weinig veldwerk.

1.1.1 Veldwerk-methode

In de veldwerk-methode worden op veel plaatsen boringen verricht, en wordt aan de hand van hydromorfe kenmerken in het bodemprofiel de GHG en GLG geschat (ten Cate et al. 1995). Hierbij wordt ook gelet op de grondwaterstand op dat moment, de relatieve hoogteligging van het boorpunt, het landgebruik (vegetatie), de afstand tot sloten, enz. Deze geschatte GHG en GLG bepalen de grondwatertrap (Gt) van het boorpunt. Vlakken met gelijke Gt worden in het veld begrensd aan de

hand van de beschreven boringen, onbeschreven tussenboringen en veldkenmerken zoals relatieve hoogteligging en landgebruik (vegetatie). Voor een standaard Gt-kartering, schaal 1: 10 000, worden 1 á 2 boringen per ha verricht tot een diepte van ca. 1,50 m - mv. De boringdiepte is afhankelijk van de diepte van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG). De schattingen van de Gt bij de boringen worden “gecalibreerd” aan de hand van grondwaterstandmetingen in grondwaterstandbuizen waarvan de klimaatrepresentatieve GHG en GLG berekend zijn. Desgewenst wordt het meetnet van grondwaterstandbuizen uitgebreid door nieuwe buizen te plaatsen, waarin voor de duur van het onderzoek de grondwaterstand wordt gemeten. De grondwaterstanden in deze zelfgeplaatste buizen worden gerelateerd aan de grondwaterstanden in de stambuizen. Deze relatie wordt beschreven met een regressiemodel, en met dit model wordt vervolgens de GHG en GLG voor de zelfgeplaatste buizen voorspeld. Verder wordt tijdens een periode waarin de grondwaterstanden zich rond de GHG (GLG) bevindt de grondwaterstand gemeten op gericht geselecteerde locaties verspreid over het hele onderzoeksgebied (gerichte opnames). Met deze metingen wordt de grondwatertrappenkaart gecontroleerd en zonodig aangepast.

De met deze methode vervaardigde grondwatertrappenkaarten worden hierna aangeduid met Gtveld-kaart. In tegenstelling tot de GHGmodel-kaart en GLGmodel-kaart (zie hierna) geeft de Gtveld-kaart alleen intervallschattingen van de GHG en GLG, bijv. de GHG zit tussen 0 en 25 cm. Bovendien is dit interval voor alle punten binnen de vlakken van eenzelfde Gt gelijk. Er zijn veel manieren om een GXG-interval voor een bepaalde Gt te vervangen door één bepaalde waarde, die vervolgens gebruikt kan worden als de geschatte GXG op een willekeurige locatie binnen deze Gt. Zo zou het klassemidden hiervoor gebruikt kunnen worden, of het gemiddelde van de GXG geschat met een steekproef. Op deze wijze kan dus van de Gtveld-kaart een GHG- en GLG-kaart worden afgeleid die hierna aangeduid worden met GHGveld- en GLGveld-kaart.

1.1.2 Model-methode

In de model-methode wordt intensief gebruik gemaakt van modellen. In de veldwerk-methode is het gebruik van modellen beperkt tot het voorspellen van de GXG (GXG staat voor GHG, GVG en GLG) op de punten met buizen en eventueel op de punten met gerichte opnames. In de model-methode wordt tevens een model gebruikt voor het ruimtelijk interpoleren van de voorspelde GXG's op de punten met grondwaterstandmetingen naar een fijnmazig grid dat het hele studiegebied bedekt.

De methode maakt gebruik van een bestaand meetnet van grondwaterstandbuizen (stambuizen) waarvoor een klimaatrepresentatieve GXG wordt berekend. Tevens wordt de grondwaterstand twee keer op een groot aantal lokaties gemeten (gerichte opnames). De puntdichtheid van deze gerichte opnames is ongeveer 1 punt per 100 ha. De relatie tussen de grondwaterstand op de dag van de gerichte opname en de GXG wordt gebruikt voor het voorspellen van de GXG op de gerichte

opnamepunten. Dit sterk verdichte net van voorspelde GXG's wordt vervolgens met regressie-kriging ruimtelijk geïnterpoleerd naar een fijnmazig grid (25 m bij 25 m). In deze methode wordt de ruimtelijke trend beschreven met regressiemodellen met als verklarende variabelen de absolute en relatieve maaiveldhoogte (afgeleid van het AHN) en andere vlakdekkende hulpinformatie, zoals afstand tot een waterloop, drooglegging, e.d. Hiervoor wordt het gebied eerst ingedeeld in strata, waarbij verondersteld wordt dat een stratum een min of meer homogeen hydrologisch gebied is met een unieke regressie-vergelijking. Per stratum wordt een regressiemodel geschat.

Omdat bij de model-methode veel minder veldwerk nodig is, wordt deze methode vooral toegepast voor het actualiseren van de Gt zoals weergegeven op de Bodemkaart van Nederland 1: 50 000. Hierbij zijn grote gebieden in een relatief kort tijdsbestek (ca. 1 jaar) opgenomen. Deze kaarten zijn in de periode 2000-2003 voor verschillende opdrachtgevers (zoals Waterschappen en Ministerie van LNV) gemaakt.

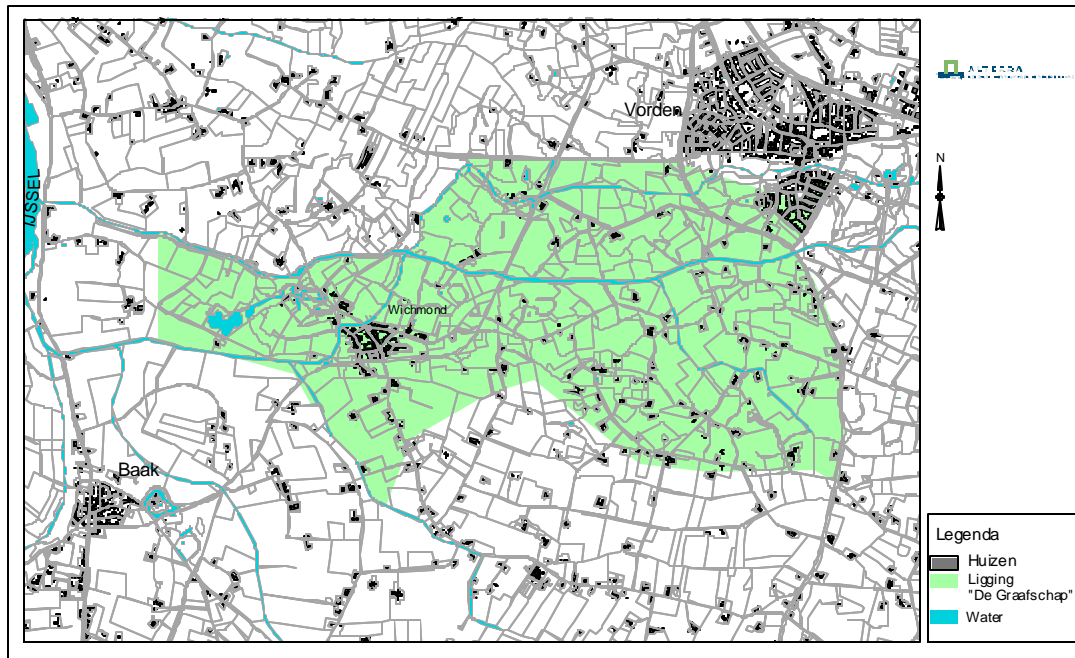
Met de model-methode vervaardigde kaarten worden bij Alterra kortweg aangeduid met Gd-kaart (Gd van grondwaterdynamiek). In feite gaat het om een set van kaarten, een GHG-kaart, GLG-kaart, Gt-kaart enz. Deze afzonderlijke kaarten worden hierna aangeduid met GHGmodel-kaart, GLGmodel-kaart, Gtmodel-kaart.

1.2 Doel van het onderzoek

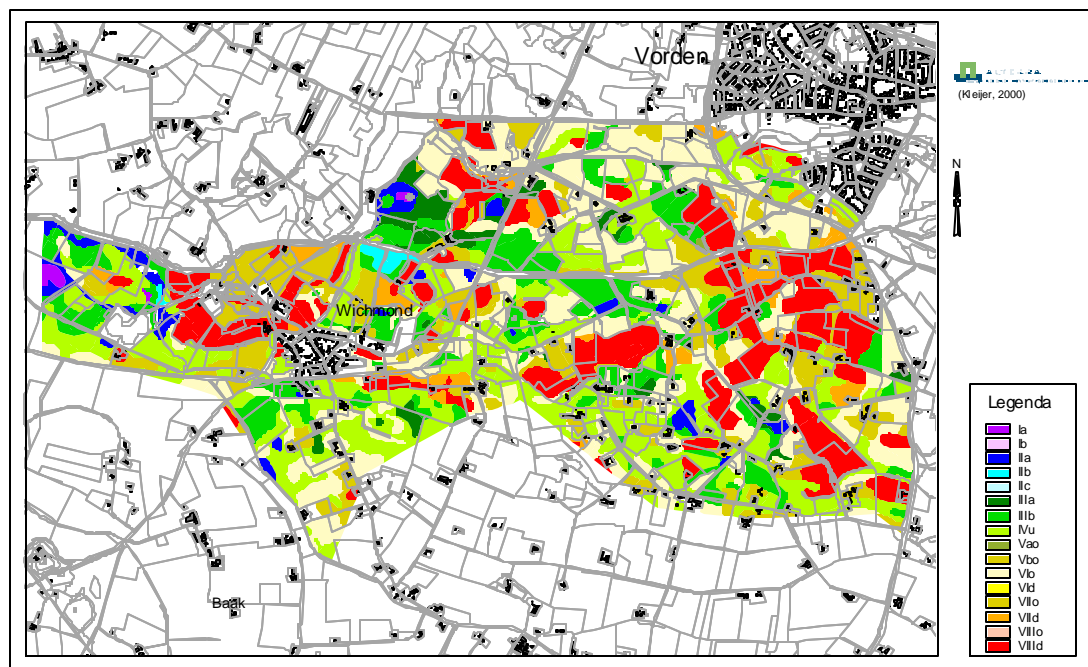
Het doel van het onderzoek is het vergelijken van de kwaliteit van de met de bovengenoemde twee methoden gemaakte grondwaterstandkaarten in een proefgebied, zodat inzicht wordt verkregen in de eventuele meerwaarde van een gedetailleerde Gt-kartering volgens de veldwerk-methode.

1.3 Ligging van het onderzoekgebied

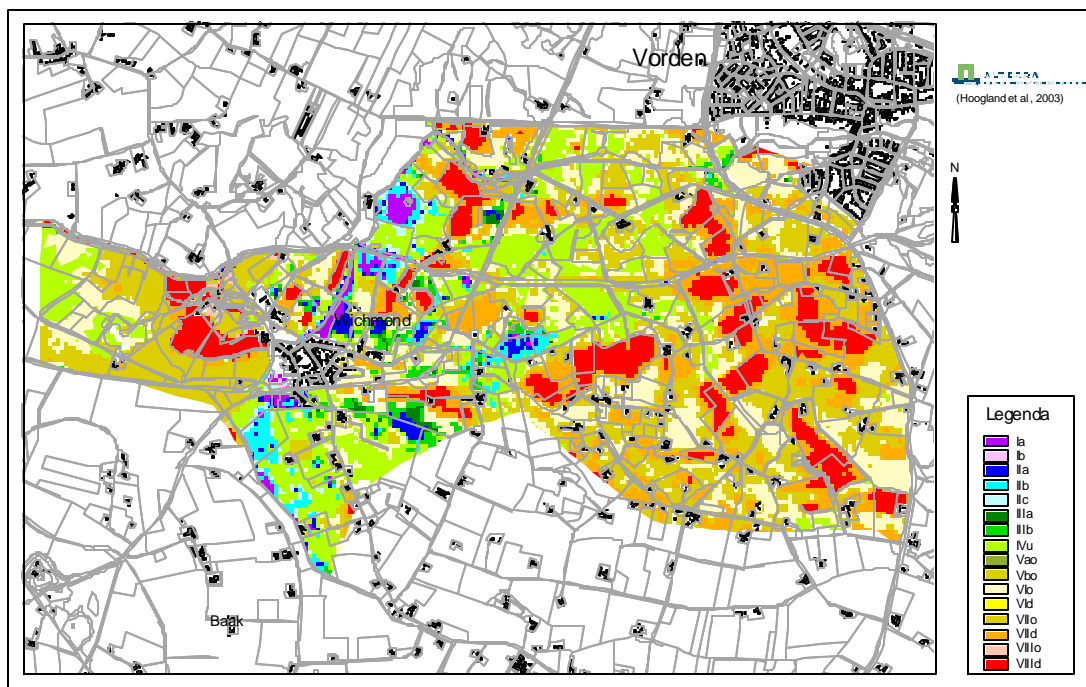
Gekozen is voor een studiegebied waarvan de GHG en GLG met beide methoden (model-methode en veldwerk-methode) in kaart is gebracht. Het studiegebied ligt in het waterschap Rijn en IJssel, tussen Vorden en Wichmond (figuur 1). De Gt-kaart dateert uit 1999 (Kleijer 2000), de opnames ten behoeve van de Gd-kartering zijn verricht in 1997 (Hoogland et al. 2003). De grondwatertrappenkaart en de grondwaterdynamiekaart zijn in de figuren 2 en 3 weergegeven. Het onderzoekgebied heeft een oppervlakte van 936 ha en ligt grotendeels in het Pleistocene zandgebied. Het westelijke gedeelte van het onderzoeksgebied, globaal gelegen tussen de IJssel en Wichmond, bestaat uit kleiige rivierafzettingen.



Figuur 1 Ligging van het onderzoekgebied "De Graafschap"



Figuur 2 Grondwatertrappenkaart gemaakt met de veldwerk-methode (Kleijer 2000)



Figuur 3 Grondwatertrappenkaart gemaakt met de model-methode (Hoogland et al. 2003)

2 Methode voor bepaling van de kwaliteit van de kaarten

2.1 Kanssteekproef

De kwaliteit van de twee kaarten is geschat met een kanssteekproef, d.w.z. de punten zijn geloot volgens een goed gedefinieerde steekproefopzet. Als steekproefopzet is gekozen voor een gestratificeerde, enkelvoudig aselechte steekproef. De strata worden gevormd door de Gt's van de grondwatertrappenkaart gemaakt volgens de veldwerkmethode. Enkele min of meer verwante Gt's met een klein oppervlak zijn samengevoegd. Samengevoegd zijn: Gt Ia met Ib en IIb en Gt IIIb met Vao en Vbo. In totaal zijn 100 punten geloot. De punten zijn evenredig naar oppervlak verdeeld over de strata, met een minimum van vier punten per stratum. Voor de meeste strata betekent dit één boring per 8 à 9 ha, voor de kleine strata één boring per 5 à 6 ha. Tabel 1 geeft een overzicht van de strata, met de oppervlakte en het aantal boringen.

Tabel 1 Stratumindeling en aantal lotingen per stratum

Stratum	Aantal gelote punten	Gt- klasse	Oppervlakte (ha)
1	7	wIa, Ia, IIa, IIb	31
2	4	IIIa	27
3	13	IIIb, Vao, Vbo	118
4	21	IVu	211
5	21	VIo	217
6	13	VIIo	133
7	4	VIIId	33
8	17	VIIIId	166
Totaal	100		936

Indien een geloot punt op een locatie ligt die niet tot het doelgebied behoort (erf, berm, sloot enz.), is uitgeweken naar het eerstvolgende reservepunt binnen hetzelfde stratum. Punten aan de rand van percelen en op de grens van een Gt-klasse behoren wel tot het doelgebied (ook hierover doen de kaarten een uitspraak) en zijn dus wel meegenomen.

2.2 Kwaliteitsmaten

Met de kanssteekproef zijn de volgende kwaliteitsmaten geschat:

- Zuiverheid met betrekking tot GHG (GLG)-klassen en Gt;
- Nauwkeurigheid van de geschatte GHG en GLG op punten.

Deze kwaliteitsmaten worden in de onderstaande sub-paragrafen verder toegelicht.

2.2.1 Zuiverheid

De zuiverheid van een kaart met betrekking tot de Gt is gedefinieerd als het percentage van het gekarteerde oppervlak waarvoor de Gt goed is weergegeven op de kaart. Hiervoor is op de gelote steekproefpunten de GHG en GLG voorspeld met een regressiemodel (zie par. 2.3). Op basis van de voorspelde GHG en GLG wordt de Gt bepaald. Deze voorspelde Gt wordt beschouwd als de werkelijke Gt, en wordt vergeleken met de Gt zoals weergegeven op de kaart. Wanneer de Gt overeenkomt met die op de kaart wordt aan het steekproefpunt een '1' toegekend, wanneer ze verschillend zijn wordt een '0' toegekend. De zuiverheid van een kaart is het gebiedsgemiddelde van deze indicator-variabele, en kan voor de gestratificeerde, enkelvoudig aselechte steekproef worden geschat met:

$$\text{Zuiverheid (\%)} = \sum_{h=1}^L W_h \frac{1}{n_h} \sum_{j=1}^{n_h} i_{hj},$$

waarin W_h relatieve oppervlakte van stratum h , i_{hj} indicator van punt j in stratum h , n_h totaal aantal gelote steekproefpunten in stratum h , en L het aantal strata is.

Tevens is de zuiverheid met betrekking tot de GHG-klasse en GLG-klasse geschat, waarbij de GHG-klassen en GLG-klassen overeenkomen met de klassen gebruikt bij de definitie van de Gt. Hiervoor zijn indicatoren aan de steekproefpunten toegekend met de waarde '1' als de GHG-klasse (GLG-klasse) op het steekproefpunt overeenkomt met de (van de Gt-afgeleide) GHG-klasse(GLG-klasse) zoals weergegeven op de kaart, en een '0' als dit niet het geval is.

2.2.2 Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de kaarten is gekwantificeerd met de volgende drie kwaliteitsmaten:

- (1) gemiddelde fout (ME),
- (2) gemiddelde gekwadraterde fout (MSE),
- (3) ruimtelijke variantie van de fout (VE).

Gemiddelde fout (ME):

De gemiddelde fout is gedefinieerd als

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i,$$

waarin N het totaal aantal mogelijke steekproefpunten in het onderzoeksgebied, en e_i de fout op punt i is, d.w.z. het verschil tussen de geschatte GXG (op basis van de GXGveld- of GXGmodel-kaart) en de werkelijke GXG op punt i . Deze gemiddelde fout (ME) is geschat met:

$$me = \sum_{h=1}^L W_h \cdot me_h = \sum_{h=1}^L W_h \sum_{i=1}^{n_h} \frac{e_{hi}}{n_h},$$

waarin e_{hi} de fout op punt i in stratum h is.

Gemiddelde gekwadrateerde fout (MSE):

De gemiddelde gekwadrateerde fout is gedefiniëerd als:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2.$$

De gemiddelde gekwadrateerde fout is geschat met:

$$mse = \sum_{h=1}^L W_h \cdot mse_h = \sum_{h=1}^L W_h \sum_{i=1}^{n_h} \frac{e_{hi}^2}{n_h}.$$

Ruimtelijke variantie van de fout (VE):

De ruimtelijke variantie van de fout is gedefinieerd als:

$$VE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i - ME)^2 = MSE - (ME)^2.$$

Een zuivere schatter voor VE is (Marsman en de Gruijter 1986):

$$ve = mse - (me)^2 + vme,$$

waarin vme de geschatte steekproefvariantie van de geschatte gemiddelde fout (me) is:

$$vme = \sum_{h=1}^L W_h^2 \cdot vme_h = \sum_{h=1}^L W_h^2 \frac{\text{var}(e_h)}{n_h}$$

waarin $\text{var}(e_h)$ de ruimtelijke variantie van de e 's binnen stratum h is.

Omdat de met het regressiemodel voorspelde GXG's op de steekproefpunten met de gerichte grondwaterstandmetingen (zie par. 2.3) niet foutloos zijn, kennen we de echte fouten eigenlijk niet, waardoor de schatter *ve* een onzuivere schatter wordt van de ruimtelijke variantie van de werkelijke fouten. Hetzelfde geldt voor de schatter van de gemiddelde gekwadraterde fout (*mse*). Wanneer we kijken naar *het verschil* in *mse* tussen de GXGveld-kaart en de GXGmodel-kaart, dan hebben we geen last van deze vertekening tengevolge van fouten in de geschatte GXG op de steekproefpunten. Om deze reden hebben we met de t-toets voor gepaarde waarnemingen getoetst of het verschil tussen de *mse* van de GXGveld-kaart en de GXGmodel-kaart significant afwijkt van 0. Als de *mse* van de GXGveld-kaart verminderd met de *mse* van de GXGmodel-kaart significant kleiner is dan 0, betekent dit dat de GXGveld-kaart significant nauwkeuriger is dan de GXGmodel-kaart.

2.3 Bepaling van de fout in de geschatte GHG en GLG op de steekproefpunten

De fout in de geschatte GXG op een steekproefpunt is gedefinieerd als het verschil tussen de geschatte GXG (GXG volgens kaart) en de werkelijke GXG op dat punt. Een positieve fout betekent dus een te diepe schatting, van de GXG en een negatieve fout een te ondiepe schatting.

2.3.1 De werkelijke GXG op de steekproefpunten

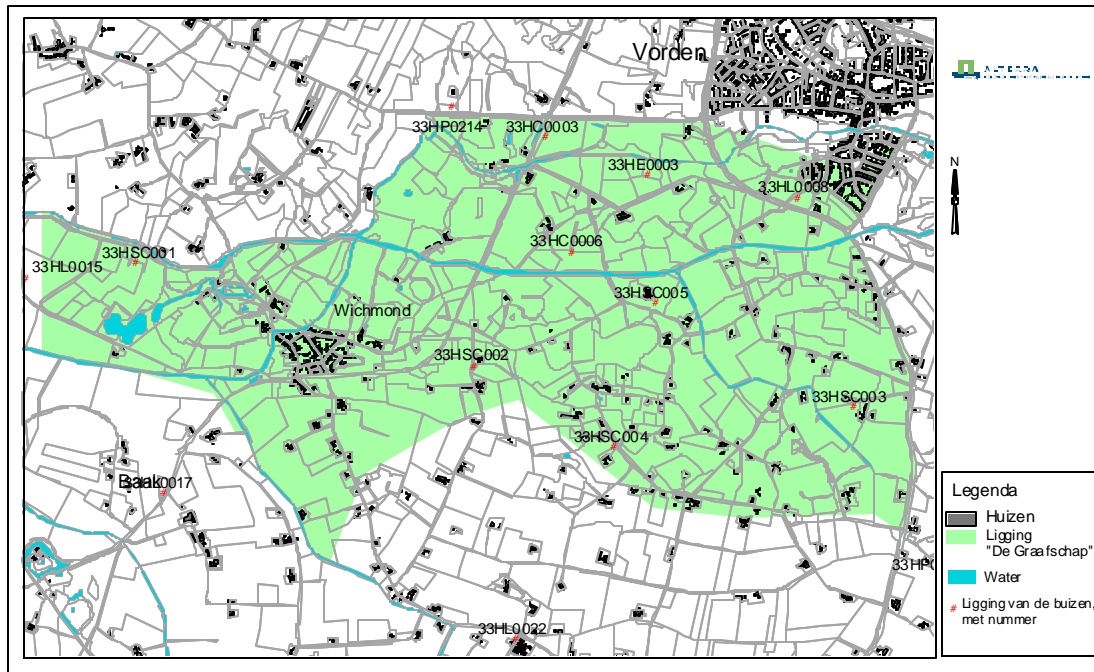
De werkelijke GXG op de gelote steekproefpunten is bepaald met regressiemodellen met als predictoren (verklarende variabelen) de grondwaterstand op een bepaalde dag. Hiervoor zijn op 29 maart 2002 en op 10 oktober 2002 de grondwaterstanden op de gelote locaties gemeten. Voor het aanpassen van het regressiemodel is op deze dagen tevens de grondwaterstand gemeten in buizen waarvan de GXG met een grote mate van nauwkeurigheid bekend is. Het gaat om vijf door Kleijer (2000) geplaatste buizen die gedurende één jaar zijn opgenomen (S-nummers), drie buizen van het waterschap (C- en E- nummers), en zes buizen uit DINO (L- en P-nummers).

De lange meetreeksen zijn beschreven met transfer-ruismodellen. Deze modellen zijn gebruikt om klimaatrepresentatieve GXG's te berekenen. Voor de negen korte meetreeksen is een regressie-analyse uitgevoerd met het programma GTKORTEREEKS (Voshaar en Stolp 1997). In dit programma wordt de grondwaterreeks in een buis met een korte meetreeks gecorreleerd met die in stambuizen, met een lange meetreeks en bekende GXG. Wanneer het verband goed is kan deze relatie gebruikt worden om gegeven de GXG in de stambuis de GXG in de buis met korte meetreeks te voorspellen. De ligging van de 14 grondwaterstandbuizen is weergegeven in figuur 4. In tabel 2 staan de gegevens van de gebruikte buizen weergegeven.

Tabel 2 Gegevens van de gebruikte grondwaterstandbuizen

Grondwater-standbuis		GHG		GLG		Gt
33H-L-0008	*	78	(2,4)	166	(2,6)	VIIo
33H-P-0144	*	90	(2,4)	174	(2,6)	VIIo
33H-L-0022	*	76	(1,6)	145	(1,8)	VIo
33H-L-0017	*	56	(1,3)	107	(1,2)	IVu
33H-P-0214	*	99	(2,1)	184	(2,3)	VIIo
33H-L-0015		62	(3,3)	148	(2,7)	VIo
33H-C-0003		55	(3,5)	144	(2,6)	VIo
33H-C-0006		48	(2,4)	120	(2,6)	IVu
33H-E-0003		49	(3,2)	138	(2,6)	VIo
33H-S-0001		19	(3,5)	109	(4,1)	IVu
33H-S-0002		57	(1,9)	116	(1,6)	IVu
33H-S-0003		71	(2,6)	150	(2,8)	VIo
33H-S-0004		58	(2,1)	127	(2,4)	VIo
33H-S-0005		57	(2,0)	120	(1,8)	IVu

Tussen haakjes de geschatte standaardafwijking. Bij de buizen met een * is het transfer-ruismodel gebruikt. Buizen met een vetgedrukte * zijn ook door Hoogland et al. (2003) gebruikt bij de modelmatige kartering.



Figuur 4 Ligging van de grondwaterstandbuizen

2.3.2 De geschatte GHG en GLG op de steekproefpunten

Voor de GHGmodel-kaart en GLGmodel-kaart is voor ieder steekproefpunt het dichtstbijzijnde punt van het interpolatiegrid bepaald (anders gezegd, binnen welke 25 m bij 25 m cel het steekproefpunt valt), en is de GHG en GLG van deze cel toegekend aan het steekproefpunt.

De Gtveld-kaart geeft alleen intervallschattingen van de GHG en GLG. In dit onderzoek is het gemiddelde van de GXG's van alle boorpunten (verricht tijdens het veldwerk) binnen een bepaald vlak op de Gtveld-kaart gebruikt als schatting van de GXG op een steekproefpunt in ditzelfde vlak.

3 Resultaten

3.1 Zuiverheid

De zuiverheid van de kaarten gemaakt met de veldwerk-methode en de model-methode is weergegeven in tabel 3. De geschatte zuiverheid met betrekking tot Gt is voor de Gtveld-kaart 36% en voor de de Gtmodel-kaart 32%. Marsman en de Gruijter (1986) vonden een zuiverheid van Gtveld-kaarten tussen 42% en 46%, Brus en Kiestra (2002) tussen 20 en 45%.

De geschatte zuiverheid m.b.t. GHG-klassen en GLG-klasse is voor de Gtveld- en de Gtmodel-kaart aanzienlijk hoger, namelijk tussen 52% en 63%. Het verschil in zuiverheid m.b.t GHG-klasse tussen Gtveld- en Gtmodel-kaart is klein, en niet significant afwijkend van 0 bij een overschrijdingskans van 95% (tabel 4). Hetzelfde geldt voor het verschil in zuiverheid m.b.t. GLG-klasse.

Tabel 3 Geschatte zuiverheid (%) m.b.t. GHG-klasse, GLG-klasse en Gt van de Gtveld-kaart en Gtmodel-kaart

Gtveld Stratum- nummer	Gtveld			Gtmodel		
	GHG- klasse	GLG- klasse	Gt	GHG- klasse	GLG- klasse	Gt
1	14	0	0	57	43	29
2	0	50	0	25	0	0
3	23	62	23	54	69	46
4	90	33	29	52	48	24
5	67	76	48	52	38	24
6	46	54	31	46	54	8
7	100	0	0	75	25	0
8	76	71	65	94	76	76
Hele gebied	63 (6,9)	55 (5,7)	36 (4,4)	59 (5,3)	52 (4,6)	32 (4,4)

Tussen haakjes de geschatte standaardafwijking

Tabel 4 Geschat verschil in zuiverheid (%) m.b.t. GHG-klasse, GLG-klasse en Gt tussen Gtveld-kaart en Gtmodel-kaart

Stratum- nummer	GHG-klasse	GLG-klasse	Gt
1	-43 (30)	-43 (20)	-29 (18)
2	-25 (25)	50 (29)	0 (0)
3	-31 (21)	-8 (21)	-23 (20)
4	38 (13)	-14 (17)	5 (13)
5	14 (16)	38 (11)	24 (15)
6	0 (11)	0 (18)	23 (12)
7	25 (25)	-25 (25)	0 (25)
8	-18 (13)	-6 (16)	-12 (8)
Hele gebied	4(7)	3 (7)	4 (6)

Tussen haakjes de geschatte standaardafwijking

3.2 Nauwkeurigheid

In de tabellen 5 en 6 zijn de *me*, *mse* en *ve* van de GHGveld-kaart, GLGveld-kaart, de GHGmodel-kaart en de GLGmodel-kaart weergegeven. Voor de GXGveld-kaarten zijn de gemiddelde fouten gerekend over het hele onderzoeksgebied klein (-5,3 cm voor GHG en -2,3 cm GLG). Dit geldt eveneens voor de GHGmodel-kaart (5,7 cm), maar op de GLGmodel-kaart is de GLG systematisch te diep weergegeven (systematische fout 17,8 cm).

Tabel 5 Geschatte gemiddelde fout (*me*), gemiddelde gekwadeerde fout (*mse*) en variantie van de fout (*ve*) voor de GHGveld- en GLGveld-kaart

Stratum-nummer	GHG			GLG		
	me	mse	ve	me	mse	ve
1	-10,7 (4,9)	259 (107)		-27,6 (2,6)	802 (141)	
2	-33,7 (13,9)	1711 (1271)		-30,1 (9,3)	1167 (708)	
3	-16,3 (4,2)	480 (173)		-15,0 (4,1)	426 (200)	
4	-8,4 (3,1)	258 (99)		-18,1 (3,8)	623 (220)	
5	-12,4 (4,1)	482 (159)		-0,3 (4,2)	360 (80)	
6	1,9 (3,6)	175 (45)		6,3 (5,9)	496 (89)	
7	11,0 (2,7)	144 (70)		37,1 (3,8)	1422 (265)	
8	12,4 (5,6)	647 (248)		18,2 (9,5)	1762 (613)	
Hele gebied	-5,3 (1,8)	433 (75)	408	-2,4 (2,4)	770 (126)	770

Tussen haakjes de geschatte standaardafwijking

Verder valt op dat voor de GHG de geschatte variantie van de fout voor de GHGveld-kaart iets kleiner is dan voor de GHGmodel-kaart (408 versus 493 cm²), en voor de GLG veel kleiner (770 versus 1911 cm²). In tabel 7 zijn de verschillen in de gekwadeerde gemiddelde fouten tussen de GXGveld- en GXGmodel-kaart weergegeven.

Tabel 6 Geschatte gemiddelde fout (*me*), gemiddelde gekwadeerde fout (*mse*) en variantie van de fout (*ve*) voor de GHGmodel- en GLGmodel-kaart

Stratum-nummer	GHG			GLG		
	me	mse	ve	me	mse	ve
1	15,1 (11,3)	990 (698)		-9,5 (13,1)	1126 (405)	
2	-5,4 (15,4)	745 (248)		-27,1 (24,9)	2589 (687)	
3	9,7 (6,0)	528 (179)		-0,1 (11,0)	1455 (479)	
4	10,0 (5,9)	787 (230)		7,9 (7,7)	1241 (276)	
5	0,2 (4,0)	324 (83)		4,8 (9,3)	1771 (369)	
6	5,9 (6,0)	493 (175)		23,7 (9,3)	1683 (470)	
7	10,5 (6,1)	221 (92)		54,6 (14,9)	3651 (1404)	
8	3,4 (4,8)	389 (89)		60,6 (8,6)	4852 (1112)	
Hele gebied	5,7 (2,2)	520 (70,9)	493	17,8 (3,8)	2214 (248)	1911

Tussen haakjes de geschatte standaardafwijking

Tabel 7 Geschat verschil in MSE tussen de GXGveld- en GXGmodel-kaart voor GHG en GLG

Stratum-nummer	GHG	GLG
1	-731 (744)	-324 (475)
2	966 (1151)	-1421 (637)
3	-48 (287)	-1028 (504)
4	-529 (260)	-618 (408)
5	159 (188)	-1411 (380)
6	-310 (158)	-1174 (479)
7	-77 (76)	-2229 (1626)
8	258 (272)	-3090 (1369)
Hele gebied	-86 (106)*	-1441 (296)*

Tussen haakjes de geschatte standaardafwijking. De verschillen gemarkeerd met met een "*" zijn significant afwijkend van nul bij een overschrijdingskans van 95%.

4 Kosten

Tot nu toe is alleen gekeken naar de kwaliteit van de Gt-kaarten gemaakt volgens de veldwerk-methode en de model-methode. De conclusie is dat gedetailleerde kaarten gemaakt met de veldwerk-methode op een aantal aspecten een hogere kwaliteit hebben dan de grootschalige kaarten gemaakt met de model-methode, maar hiervoor is ook een investering gedaan in de vorm van veldwerk. Dit veldwerk verschaft echter bovendien informatie over de bodemgesteldheid en bestaat dus niet alleen uit het verzamelen van Gt-informatie.

Bij de veldwerkmethode (Kleijer 2000) is ongeveer 1 boring per hectare beschreven, waarbij zowel GHG en GLG zijn geschat. In het gebied zijn in totaal op ruim 940 punten de GHG en GLG geschat. De personele kosten voor het vervaardigen van deze Gt-kaart bedragen € 62 568,-, (zie aanhangsel) wat overeenkomt met een prijs per hectare van € 66,55. Deze kosten per ha zijn nauwelijks afhankelijk van de oppervlakte van het gebied, omdat de veldwerkkosten een zeer aanzienlijk deel van de totale kosten vormen. Uit onderzoek is gebleken dat wanneer tijdens het veldwerk gebruik wordt gemaakt van het AHN het aantal boringen per ha teruggebracht kan worden naar 1 per 2 à 3 ha zonder dat dit ten koste gaat van de kwaliteit van de Gt-kaart (Kiestra en Brus, 2002). Daarmee zouden de kosten per ha van de veldwerk-methode voor het studiegebied gereduceerd worden naar € 41,00.

Ter vergelijking wordt nu informatie gegeven over de kosten van een modelmatige kartering van de GXG. In het waterschap Rijn en IJssel zijn indertijd op 1 punt per 170 hectare de grondwaterstanden gemeten. Eén keer tijdens een periode waarin de grondwaterstand zich in grote delen van het gebied in de buurt van de GHG bevond (afgekort GHG-periode) en een keer tijdens de GLG-periode (Hoogland et al., 2003). Het in 1997 gekarteerde gebied beslaat een oppervlakte van 197 000 ha. De personele kosten van het onderzoek bedragen € 205 448,- (zie aanhangsel), wat neerkomt op een prijs van ongeveer € 1,00 per ha. Tegenwoordig wordt bij een modelmatige kartering 1 punt (met gerichte opnames) per 100 ha aangehouden. De personele kosten voor waterschap Rijn en IJssel zouden in dat geval gestegen zijn naar € 337 176,-, wat neerkomt op een prijs van € 1,70 per hectare. De kosten per ha zijn sterk afhankelijk van de oppervlakte van het gebied. Naarmate het gebied kleiner wordt stijgen de kosten per ha.

Uit het bovenstaande volgt dat het om een aanzienlijke investering gaat, zeker gelet op de prijs per ha.

5 Discussie

5.1 Kaartresolutie

De gemiddelde grootte van de vlakken op de Gtveld-kaart wordt afgestemd op de dichtheid van de boringen. Hoe groter de dichtheid, hoe kleiner de vlakken. De gemiddelde kaartvlakgrootte op de Gt-kaart van het proefgebied is ca. 1,6 ha.

De resolutie van de modelmatig gemaakte kaarten is 25 x 25 m. Dit is tevens de resolutie van het bij de kartering intensief gebruikte AHN. Voor elke cel (pixel) afzonderlijk wordt de GHG en GLG voorspeld. De resolutie van de kaart wordt dus niet afgestemd op de dichtheid van de punten met een gerichte opname. Noodzakelijk is dit ook niet omdat per cel ook een schatting wordt geleverd van de nauwkeurigheid¹. Lagere dichtheden zullen een grotere onnauwkeurigheid tot gevolg hebben en omgekeerd. Wel kunnen gebruikers door de hoge resolutie van de modelmatig gemaakte kaarten op het verkeerde been worden gezet, doordat ze een hoge resolutie associëren met een hoge nauwkeurigheid. Uit dit onderzoek blijkt dat de nauwkeurigheid van de Gtveld-kaarten groter is dan die van de Gtmodel-kaarten. Het verdient de voorkeur de resolutie van de modelmatig gemaakte kaart mede af te stemmen op de dichtheid van gerichte opnamepunten. Om meerdere redenen is het geen goed idee om hiervoor het AHN te aggregeren naar grotere cellen (bijv. 100 bij 100 m). Van belang hierbij is dat het regressiemodel voor de ruimtelijke interpolatie wordt geschat met schattingen van de respons-variabele (de GXG) op punten (de punten met gerichte opnames), en dus niet met schattingen van de gemiddelde GXG van cellen. Hulpvariabelen afgeleid van het 25 bij 25 m AHN zullen waarschijnlijk een groter deel van de variatie van de GXG op punten verklaren dan hulpvariabelen afgeleid van een geaggregeerd AHN.

5.2 Alternatieve methoden voor upgrading van regionale, met modellen gemaakte grondwaterstandkaarten

In dit onderzoek zijn de regionale, met modellen gemaakte grondwaterstandkaarten lokaal opgewaardeerd door een nieuwe opname in het veld met een boringsdichtheid die ook gebruikelijk is in gebieden waarvan nog geen Gtmodel-kaarten bestaan. Dit heeft inderdaad tot een verhoging van de kwaliteit geleid, maar de kosten van een dergelijke upgrading zijn navenant hoog. Wel moet in ogenschouw genomen worden dat bij het vervaardigen van een Gtveld-kaart niet alleen het grondwaterstandverloop wordt vastgelegd, maar de bodemgesteldheid in brede zin (bodempopbouw en hydrologie). Op basis van het onderzoek van Kiestra en Brus (2002) zouden we voorzichtig kunnen stellen dat deze kosten gereduceerd kunnen worden door tijdens de veldopname gebruik te maken van het AHN en van de Gtmodel-kaarten. Nader

¹ deze nauwkeurigheid heeft betrekking op de voorspelde GXG op het punt in het centrum van een cel, en niet op de voorspelde gemiddelde GXG van deze cel.

onderzoek naar efficiënte methoden voor het uitvoeren van aanvullend veldwerk bij modelmatig gemaakte grondwaterstandkaarten is echter gewenst. Verbeteren van de kwaliteit door een meer modelmatige aanpak waarbij gebruik wordt gemaakt van lokale ruimtelijke modellen is ook mogelijk. De kosten en de verhoging van kwaliteit van alternatieve karteringsmethoden dienen in de toekomst nader onderzocht te worden.

In dit onderzoek is de de verhoging van kwaliteit uitgedrukt in termen van de basale maten zuiverheid en nauwkeurigheid. In eventueel vervolgonderzoek raden wij aan tevens te kijken naar kwaliteitsmaten die beter aansluiten bij het gebruik van de grondwaterstandkaarten.

6 Conclusies

- A) Verhoging van kwaliteit van een Gtmodel-kaart met behulp van aanvullend veldwerk (Gtveld-methode) leidt tot een nauwkeuriger schatting van de GHG en GLG op punten. De verhoogde nauwkeurigheid is het gevolg van een verkleining van de systematische schattingsfout, en van een reductie van de toevallige schattingsfout, d.w.z. fouten in de geschatte GXG tengevolge van onverklaarde ruimtelijke variatie.
- B) De zuiverheid m.b.t. Gt, GHG-klasse en GLG-klasse leidt bij aanvullend veldwerk niet tot een significant hogere kwaliteit (deze kwaliteitsmaat is echter niet erg onderscheidend).
- C) Aanvullend veldwerk is duur (bij een dichtheid van 1 boring per ha ongeveer €66,50 per ha). Nader onderzoek naar de efficiëntie van alternatieve kwaliteitverhogende methoden is gewenst. De kwaliteitverhoging dient in dit vervolgonderzoek bepaald te worden in termen van kwaliteitsmaten die aansluiten bij het gebruik van de kaarten in de praktijk.
- D) Uit dit onderzoek blijkt dat de nauwkeurigheid van de Gtveld-kaarten groter is dan die van de Gtmodel-kaarten. Het verdient de voorkeur de resolutie van de modelmatig gemaakte kaart mede af te stemmen op de dichtheid van gerichte opnamepunten.

Literatuur

Brus, D.J en E. Kiestra, 2002. *Kan de efficiëntie van bodemkarteringen op schaal 1:10 000 worden vergroot met het Actuele Hoogtebestand Nederland?* Wageningen, ALTERRA, Rapport 498.

Cate, J.A.M. ten, A.F. van Holst, H. Kleijer, J. Stolp, 1995. *Handleiding bodemgeografisch onderzoek. Richtlijnen en voorschriften. Deel B: Grondwater.* Wageningen, DLO- Staring Centrum, technisch document 19B.

Hoogland, T. en P.A. Finke en F. de Vries, 2003. *Actualisatie grondwatertrappenkaart Waterschap Rijn en IJssel.* Wageningen, ALTERRA Rapport 126.

Kleijer, H., 2000. *De bodemgesteldheid van de gebieden Berkeldal, Graafschap, Wildenborch, Warnsveld-Vierakker en Hummelo-Keppel. Resultaten van een bodemgeografisch onderzoek.* Wageningen, ALTERRA, Rapport 090.

Marsman, B.A. en J.J. de Gruijter, 1986. *Quality of Soil maps. A comparison of survey methods in a sandy area.* Wageningen, Netherlands Soil Survey Institute, soil survey papers, no 15.

Oude Voshaar, J.H. en J. Stolp, 1997. *Schatting van GHG en GLG van tijdelijke peilbuizen met korte meetreeksen.* Wageningen, DLO – Staring Centrum. Technisch document 30.

Riele, W.J.M. te en D.J. Brus, 1991. *Methoden van gerichte grondwaterstandsmetingen voor het schatten van de GHG.* Wageningen, DLO – Staring Centrum, Rapport 158

Aanhangsel 1 Globale personele kosten van kartering van vervaardigen grondwaterstandskarakteristieken volgens veldwerk-methode (zonder gebruik van AHN) en volgens modelmatige aanpak (1 punt met gerichte opnames per 170 ha)

Grondwatertrappenkaart volgens veldwerk-methode (940 ha)

<i>Werkzaamheden</i>	<i>Benodigde tijd</i>	<i>Personele kosten</i>
Vervaardigen veldkaarten	5 dagen (cat. 1)	3 160,-
Uitvoeren schattingen op 940 locaties	63 dagen (cat. 1)	39 816,-
Plaatsen van ca 10 waterstandbuizen	5 dagen (cat. 1)	3 160,-
Opzoeken DINO buizen	2 dagen (cat. 1)	1 264,-
Metten van de grondwaterstandbuizen (0,5 jaar)	10 dagen (cat. 1)	6 320,-
Verwerking en rapportage gegevens	14 dagen (cat. 1)	8 848,-
Totaal	99 dagen	?62 568,-

Grondwaterdynamiekaart volgens model-methode (197 000 ha)

<i>Werkzaamheden</i>	<i>Benodigde tijd</i>	<i>Personele kosten</i>
Definitie hydrologische gebieden	5 dagen (cat. 2)	4 120,-
Veldcheck stambuizen	4 dagen (cat. 1)	2 528,-
Lokatie keuze voor de gerichte opname	9 dagen (cat.2)	7 416,-
Gerichte opname GHG en GLG	192 dagen (cat 1.)	121 344,-
Relaties GHG/GVG/GLG met grondwaterstanden	15dagen (cat. 2)	12 360,-
Schatting GHG/GVG/GLG op maaiveldhoogte punten	25 dagen (cat. 2)	20 600,-
Verwerking en rapportage gegevens	45 dagen (cat. 2)	37 080,-
Totaal	274 dagen	? 205 448,-