

---

# Kartering van de grondwaterdynamiek met behulp van geo-informatie van hoge resolutie

P.A. Finke, D.J. Brus, M.F.P. Bierkens,  
T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries

---

*Gedurende de laatste jaren is voor een groot deel van Nederland de grondwatertrappenkaart, schaal 1 : 50.000, geactualiseerd. Naast de grondwatertrappen is ook andere informatie over de grondwaterdynamiek verzameld, om daarmee te kunnen voorzien in de wensen van de gebruikers. Digitaal beschikbare geo-informatie van hoge resolutie speelde een belangrijke rol bij de actualisatie. In dit artikel beschrijven wij het omvangrijke actualisatieproject, waarbij wij aandacht besteden aan de validatie van de nauwkeurigheid van de oude en nieuwe kaarten en aan de afweging tussen kosten en kwaliteit bij de actualisatie.*

## Inleiding

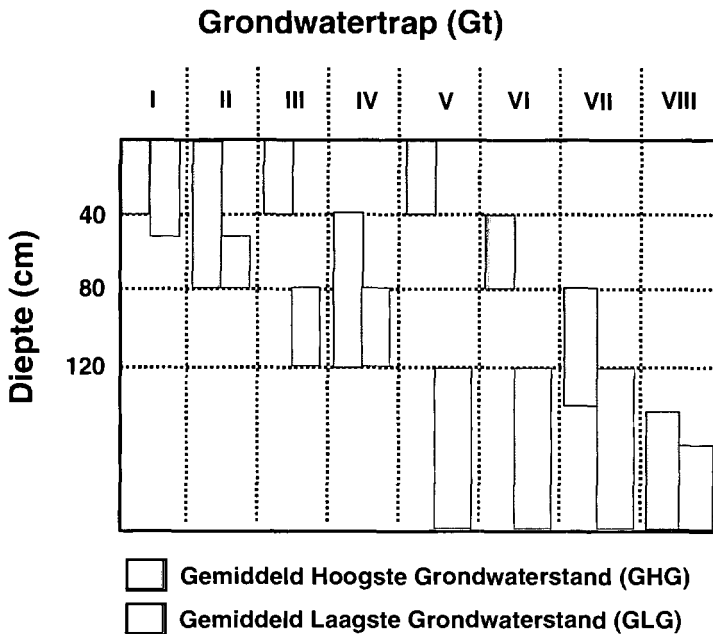
Door de geringe diepte waarop zich in Nederland het grondwater bevindt, is informatie over de diepte en fluctuatie van de grondwaterstand van belang bij allerlei vraagstukken over inrichting, beheer en kwaliteit van het platteland. De grondwatertrappenkaart (Gt-kaart), schaal 1 : 50.000, beschrijft landsdekkend de seizoensfluctuatie van freatische grondwaterstanden. De Gt's staan samen met de bodem op de kaart en zijn digitaal opgeslagen in het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS) van Alterra ([www.bodemdata.nl](http://www.bodemdata.nl)).

De Gt is gebaseerd op een klassenindeling van de gemiddeld hoogste en gemiddeld laagste grondwaterstand (respectievelijk GHG en GLG), zie figuur 1. De GHG werd berekend als het gemiddelde van de drie hoogste grondwaterstanden in een jaar (HG3) bij een halfmaandelijkse meetfrequentie, gemiddeld over acht jaar of meer. De GLG werd overeenkomstig berekend voor de drie laagste grondwaterstanden (LG3), en de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) voor de drie grondwaterstandsdiepten die zich het dichtst bij 1 april bevinden. GHG, GLG en GVG (samengevat als GxG) hebben betrekking op de *freatische grondwaterstandsdiepte*: de afstand van het maaiveld tot het niveau waarbij absolute waterdruk van het grondwater gelijk is aan de druk van de atmosfeer. Deze afstand is relevant voor onder andere vochtvoorziening van planten, draagkracht van de bodem en

---

**P.A. Finke** is werkzaam bij Universiteit Gent, Faculteit Wetenschappen, Vakgroep Geologie en bodemkunde, Krijgslaan 281 S8, 9000 Gent, België, [peter.finke@ugent.be](mailto:peter.finke@ugent.be). **D.J. Brus**, **T. Hoogland**, **M. Knotters** en **F. de Vries** zijn werkzaam bij Wageningen Universiteit en Research Centrum, Alterra, Postbus 47, 6700 AA Wageningen. **M.F.P. Bierkens** is werkzaam bij Universiteit Utrecht, Departement Fysische Geografie, Postbus 80115, 3508 TC Utrecht, [bierkens@geog.uu.nl](mailto:bierkens@geog.uu.nl). Corresponderend auteur: [martin.knotters@wur.nl](mailto:martin.knotters@wur.nl).

uitspoeling van meststoffen naar het grondwater. GxG's kunnen worden gezien als 'verwachtingswaarden' van xG3's onder de heersende hydrologische en klimatologische omstandigheden.



**Figuur 1:** Relatie tussen grondwatertrap (Gt) en gemiddeld hoogste (GHG) en gemiddeld laagste (GLG) grondwaterstand.

De bodem- en Gt-karteringen vonden plaats tussen 1961 en 1992. In de loop van de tijd veranderden de niveaus en fluctuaties van de grondwaterstand door drainage, drinkwaterwinning e.d. (Braat e.a., 1989), waardoor de Gt-kaarten verouderden. De behoefte aan Gt-informatie die de *actuele* hydrologische omstandigheden representeert bleef echter onverminderd groot. Daarom werd de actualisatie van de Gt-kaarten een speerpunt bij de verzameling van bodemdata (Finke, 2000). Doordat de periodes van tenminste acht jaar, die nodig waren om de GxG's voor de kaartbladen te berekenen, niet samenvielen ontstonden systematische verschillen tussen de GxG's op verschillende kaartbladen, veroorzaakt door verschillen in gemiddeld neerslagoverschot, de belangrijkste drijvende kracht achter de grondwaterstandsfluctuatie. Dit probleem zou kunnen worden opgelost door de GxG's te berekenen over een en dezelfde periode van 30 jaar (de klimaatperiode). Bovendien bleek uit een onderzoek onder gebruikers van bodem- en Gt-kaarten (Finke e.a., 1999; tabel 1) dat zij een uitgebreidere beschrijving van de grondwaterstandsfluctuatie wensten, en een indicatie van de nauwkeurigheid van de GxG's.

Deze ontwikkelingen leidden tot de volgende onderzoeksdoelen:

- 1 kosteneffectieve en snelle actualisatie van de Gt-kaart;
- 2 weergave van de dynamiek van de grondwaterstand, gegeven het heersende waterbeheer en klimaat;
- 3 kartering van kwantitatieve parameters voor de dynamiek van de grondwaterstand, met gekwantificeerde nauwkeurigheid;

**Tabel 1:** Gewenste parameters, volgens een onderzoek onder gebruikers van GD-informatie (Finke e.a., 1999).

Naam	Beschrijving	Voorbeeld van een toepassing (altijd in samenhang met bodemkundige gegevens)	Aantal gekarteerde parameters
GHG	Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand	Bepaling van het fosfaatbindend vermogen	1
sdGHG	standaardfout van de voorspelde GHG		1
GLG	Gemiddeld Laagste Grondwaterstand	Bepaling van droogtestress bij gewassen	1
sdGLG	standaardfout van de voorspelde GLG		1
GVG	Gemiddelde Voorjaarsgrondwaterstand	Bepaling van de berijdbaarheid in het voorjaar	1
sdGVG	standaardfout van de voorspelde GVG		1
Gt	Grondwatertrap (Fig. 1)	Stratificatie op basis van de bodem- en Gt-kaart bij modellering	1
FOE	Frequency of Exceeding; het aantal tijdstippen* in enig jaar dat een gegeven grondwaterstand is overschreden. Gebaseerd op het geschatte gemiddelde en standaardafwijking van de grondwaterstand in een jaar, uitgaande van een normale verdeling	Aangeven van de geschiktheid voor ontwikkeling van specifieke natte of droge ecosystemen	2
REG	grondwaterREGime; verwachte grondwaterstand op een bepaalde dag* in enig jaar	Bepaling van de bergingscapaciteit gedurende het jaar	24
REG5	grondwaterREGime, 5de percentiel: het 5de percentiel van de verdeling van grondwaterstanden voor een bepaalde dag*	Bepaling van de minimale bergingscapaciteit gedurende het jaar	24
REG95	grondwaterREGime, 95ste percentiel: het 95ste percentiel van de verdeling van grondwaterstanden voor een bepaalde dag*	Bepaling van de maximale bergingscapaciteit gedurende het jaar	24
KWEL	Indicator voor het optreden van kwel of wegzijging in een jaar; geschat uit de mate waarin het verschil tussen de gemiddelde grondwaterstand en de drainagebasis kan worden verklaard uit het neerslagoverschot	Indicator voor de mogelijkheid voor ontwikkeling van kwelminnende vegetaties	1

\* Gebaseerd op een halfmaandelijke waarnemingsfrequentie (de 14de en 28ste van de maand) en representatief voor de heersende hydrologische en klimatologische omstandigheden

4 vaststelling van de relatie tussen kosten en kwaliteit.

Met deze doelen in het vizier ontwierpen wij een methode om de 82 gewenste parameters (tabel 1) in kaart te brengen. Deze parameters karakteriseren de grondwaterdynamiek (GD). Elke GD-parameter moet zodanig worden gekarteerd dat weergave op schaal 1 : 50.000 verantwoord is, teneinde aan te sluiten bij de bestaande bodem- en Gt-kaart. Gebiedsdekkend beschikbare hulpinformatie, zoals het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), wordt zoveel mogelijk benut. De kwaliteit van de kaarten toetsten wij door middel van een validatiestudie voor twee gebieden (10.000 ha en 179.000 ha).

## **Gebruikte informatie**

Allereerst zijn tijdreeksen van halfmaandelijks waargenomen grondwaterstandsdiepten nodig, het liefst van tenminste de laatste 30 jaar en zonder invloeden van veranderd waterbeheer. Zulke reeksen zijn echter zeldzaam (Van Bracht, 2001). Daarom extrapoleerden wij kortere reeksen, die op veel meer locaties zijn waargenomen, naar een periode van 30 jaar, waarbij wij gebruik maakten van reeksen van neerslag en verdamping en de samenhang tussen potentieel neerslagoverschot en grondwaterstand.

De grondwaterstandsfluctuatie varieert ruimtelijk als gevolg van onder andere verschillen in bodemtype, hydrologisch-landschappelijke ligging, landgebruik en ontwatering. Daarom gebruikten wij twee typen landsdekkende databestanden die de geografie van deze factoren weergeven:

- 1 Kwantitatieve data zoals het 25 x 25 m<sup>2</sup> AHN;
- 2 Nominale en ordinale data zoals bodemtype, Gt, landgebruik en (hydro-)geologie.

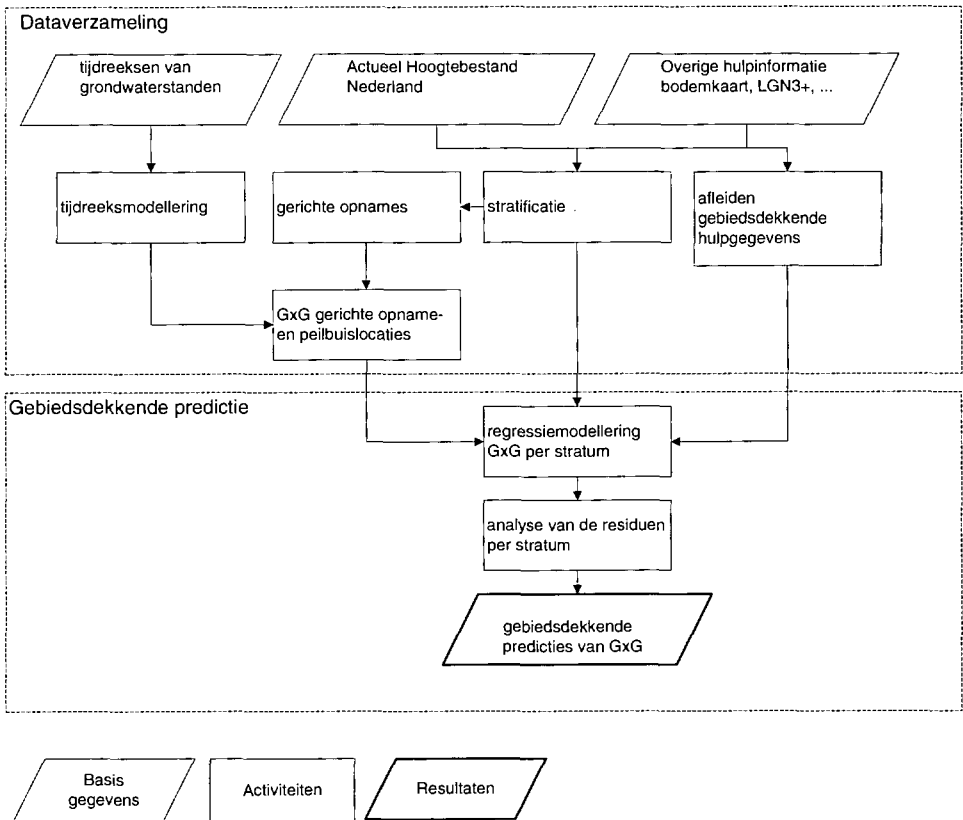
## **Aanpak van de GxG-kartering**

Figuur 2 geeft de aanpak in hoofdlijnen weer. In de eerste fase worden klimaatsrepresentatieve GxG-gegevens verzameld op de locaties van een verdicht meetnet (via 'gerichte opname', tijdreeksanalyse en regressieanalyse), en wordt gebiedsdekkende hulpinformatie over topografie en waterhuishouding verzameld. In de tweede fase wordt de GxG ruimtelijk geïnterpoleerd, gebruik makend van gebiedsdekkende hulpinformatie.

### *Tijdreeksmodellering*

Tijdreeksanalyse is nodig om klimaatsrepresentatieve GD-parameters te kunnen berekenen uit grondwaterstandsreeksen die vaak slechts 5 tot 8 jaar lang zijn en bovendien incompleet kunnen zijn. Samengevat is de methode als volgt:

- 1 Selectie van grondwaterstandsreeksen zonder discontinuïteiten door ingrepen en verplaatsingen;
- 2 Kalibratie van een transfer-ruismodel voor de relatie tussen neerslagoverschot en grondwaterstand;
- 3 Simulatie van een reeks van 30 jaar lang met het gekalibreerde model en neerslag- en verdampingsgegevens voor de periode van 30 jaar;
- 4 Karakterisatie van de reeks van 30 jaar met behulp van de GD-parameters.



**Figuur 2:** Globale werkwijze bij een GD-kartering.

Neerslag- en verdampingsgegevens worden gebruikt van het dichtstbijzijnde weerstation, meestal binnen 20 kilometer van de locatie van de buis. Wij gebruikten een eenvoudig lineair transfer-ruismodel voor de relatie tussen het potentiële neerslagoverschot en de grondwaterstand, dat beschreven is door Bierkens e.a. (1999). De modelparameters worden geschat door kalibratie op een tijdreeks van de grondwaterstand met het programma KALTFN (Bierkens e.a., 2002). Omdat het transfer-ruismodel is ingebed in een Kalmanfilter, kunnen de parameters worden gekalibreerd op onregelmatig waargenomen grondwaterstandsreeksen.

Met het gekalibreerde model en een neerslagoverschotreeks van 30 jaar lang kunnen realisaties van grondwaterstandsreeksen van 30 jaar lang worden gesimuleerd. Uit deze gesimuleerde reeksen worden vervolgens GD-parameters berekend (tabel 1).

### Stratificatie

Stratificatie is een verdeling in deelgebieden met als doel de nauwkeurigheid van de GD-kaarten te vergroten. Binnen elk stratum (deelgebied) gelden karakteristieke regressie-relaties tussen hulpinformatie en GD-parameters. De stratificatie is gebaseerd op de bodem- en Gt-kaart, schaal 1:50.000. Zijn 1:10.000- of 1:25.000-kaarten beschikbaar, dan

worden die gebruikt. De stratificatie gaat als volgt:

- 1 Geohydrologische hoofdeenheden worden onderscheiden op basis van dagzomende geologische formaties en breuklijnen volgens de geologische kaart;
- 2 Deze hoofdeenheden worden onderverdeeld in bodemkundig-hydrologische eenheden op basis van de bodem- en Gt-kaart, gegevens over het afwateringspatroon en de maaiveldshoogte;
- 3 De strata worden gevormd, waarbij plaatselijk bodemkundig-hydrologische eenheden worden samengevoegd om versnippering en kunstmatige discontinuïteiten op stratumgrenzen te vermijden. De strata zijn 1.000 tot 5.000 ha groot.

### *Gerichte opnames*

De strata dienen als basis voor de 'gerichte opname' van grondwaterstanden: op twee momenten worden grondwaterstanden gemeten in een groot aantal boorgaten op vooraf vastgestelde locaties, en in de grondwaterstandsbuizen. Doel hiervan is om het net van punten waarvoor een GxG bekend is te verdichten, zodat er uiteindelijk voldoende GxG-data zijn om een relatie met maaiveldshoogten en daarvan afgeleide informatie vast te stellen. Hiertoe moet voor elk stratum de GxG van tenminste 20 locaties bekend zijn. Deze locaties moeten gelijkmatig over het stratum zijn verspreid en zowel droge als natte terreingedeelten vertegenwoordigen.

Er wordt éénmaal in de winter gemeten, als de grondwaterstand zich rond GHG-niveau bevindt, en éénmaal in de zomer, als de grondwaterstand rond GLG-niveau is. GxG-waarden voor de gerichte opnamelocaties worden geschat met de methode van Te Riele en Brus (1991). Eerst wordt een regressiemodel gekalibreerd voor de relatie tussen GxG en grondwaterstand in grondwaterstandsbuizen tijdens de gerichte opname. Met dit model worden GxG's voorspeld voor de gerichte-opnamelocaties. Omdat de boorgaten niet dieper zijn dan 250 cm, bestaat een deel van de dataset uit 'dieper dan'-waarden. Voorafgaand aan de regressievoorspellingen worden deze zogenaamde gecensoreerde waarnemingen vervangen door *maximum-likelihood*-schattingen (Cohen, 1991).

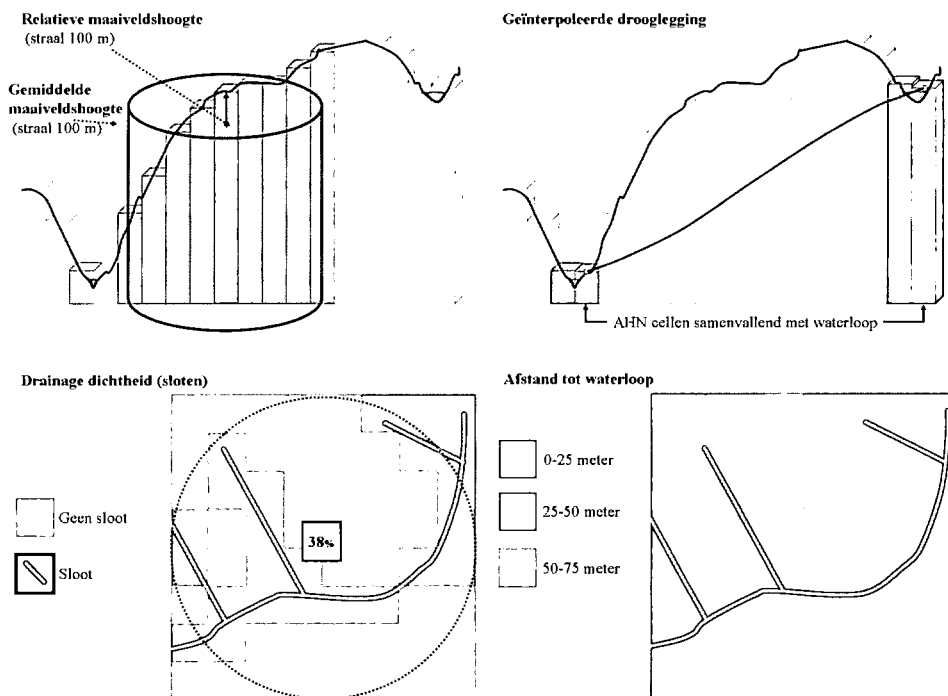
### *Hulpgegevens*

Om de GD gebiedsdekkend te karteren is gebiedsdekkende hulpinformatie nodig met een hoge resolutie en met een hydrologisch relevant verband met de GD. De beschikbare informatie van het AHN, de bodem- en Gt-kaart en het Top10-Vectorbestand is ondergebracht in vijf groepen. Variabelen die onderling een sterke correlatie hebben zijn samengebracht in één groep. De groepen zijn:

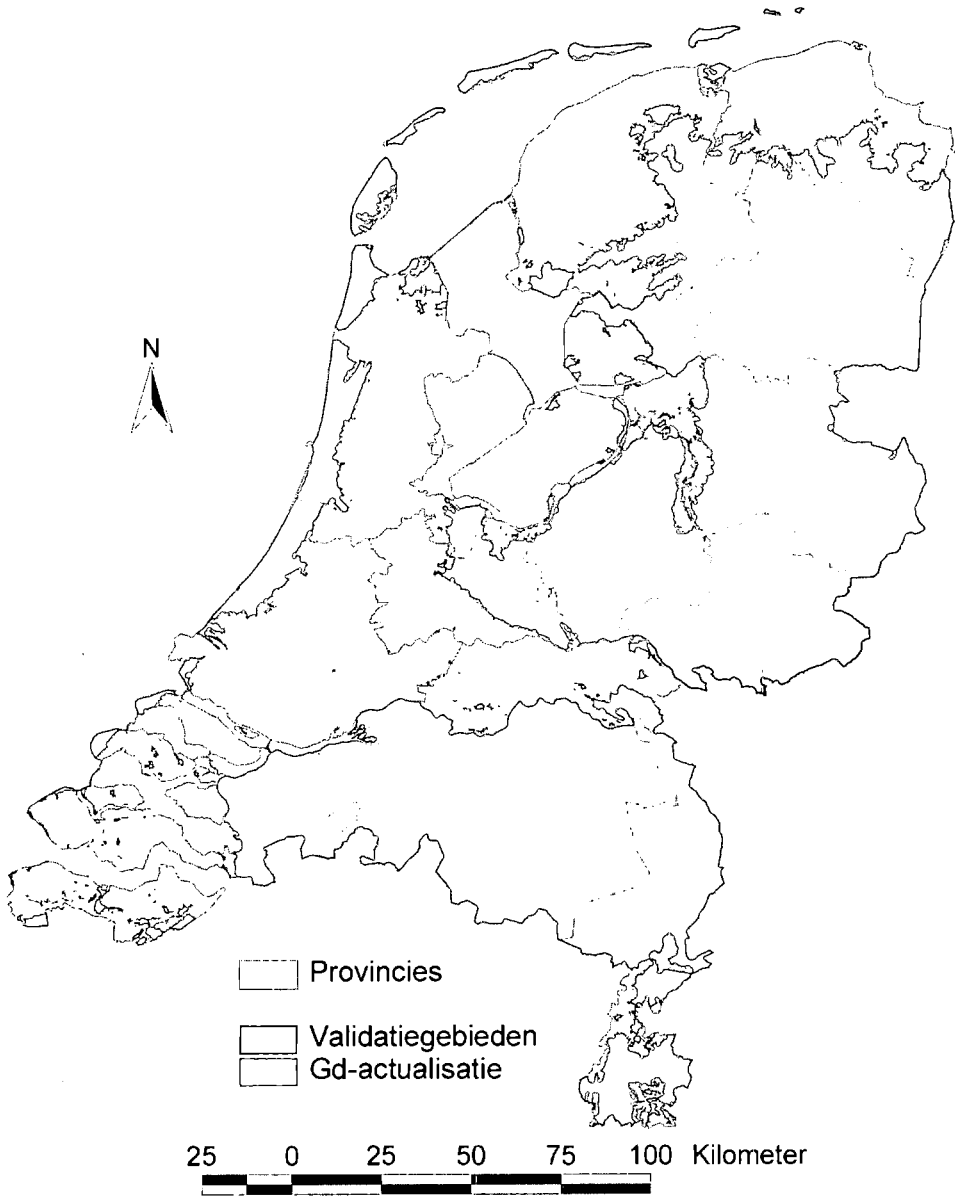
- 1 *Relatieve maaiveldshoogte*: de hoogte van een punt ten opzichte van de gemiddelde hoogte in een gebied met een bepaalde straal rond dat punt (figuur 4). Wij gebruiken zoekstralen van 100, 200, 300, 400 en 500 meter.
- 2 *Afstand tot sloten*: naarmate de afstand tot drainerende sloten groter wordt neemt de diepte van de grondwaterstand af, terwijl de diepte toeneemt als de afstand tot infiltrerende sloten toeneemt (figuur 4).
- 3 *Drainagedichtheid*: de dichtheid van drainagemiddelen beïnvloedt de grondwaterdynamiek, en geeft een indicatie over de grondwaterstandsdiepte. Uit het Top10-Vector-

bestand worden alle watergangen geselecteerd. Voor elke  $25 \times 25 \text{ m}^2$  AHN-cel wordt bepaald hoeveel naburige cellen met een waterloop voorkomen binnen een zoekstraal van 100 meter (figuur 3). Hierbij onderscheiden wij greppels en sloten, wat twee kaarten met drainagedichtheden oplevert.

- 4 *Drooglegging ten opzichte van maaiveld*: het hoogteverschil tussen de waterspiegel in een waterloop en het grondoppervlak. De drooglegging wordt geschat uit de gedigitaliseerde waterlopen uit het Top10-Vectorbestand en het AHN (figuur 3). Eerst wordt voor elk segment van een waterloop het peil ten opzichte van NAP geschat met de waarde van het laagst gelegen punt van het AHN in de directe omgeving van de waterloop. Vervolgens wordt dit peil gebiedsdekkend geïnterpoleerd, gewogen naar de inverse afstand tot de waterloop. Tenslotte wordt de drooglegging gebiedsdekkend berekend als het verschil tussen de geïnterpoleerde peilen en de maaiveldshoogte uit het AHN. Peilen die gedurende het veldwerk worden gemeten, worden gebruikt om de kaart met droogleggingen te corrigeren. Zowel de gecorrigeerde droogleggingkaart als de kaart met oorspronkelijke schattingen wordt gebruikt als hulpinformatie.
- 5 *Maaiveld t.o.v. NAP*: de absolute maaiveldshoogte volgens het AHN.
- 6 *Het vóórkomen van drainage*: de aanwezigheid van drainagemiddelen heeft invloed op de grondwaterstand.
- 7 *De GHG en GLG volgens de Gt-kaart 1 : 50.000 en de geschatte bergingscapaciteit*. De Gt-kaart 1 : 50.000 mag verouderd zijn wat betreft de absolute niveaus van de GxG, de ruimtelijke variatie wordt mogelijk nog wel goed weergegeven. Daarom is de Gt-kaart 1 : 50.000 omgezet in een kaart met 'GHG-oud' en 'GLG-oud', op basis van de Gt-karak-



**Figuur 3:** Afleiding van hulpinformatie van het AHN en topografische kaarten.



**Figuur 4:** Gebieden waar GD-parameterset is gekarteerd (lichtgrijs), en waar de kaart is gevaldeerd (donkergrijs).

terisatie van Van der Sluijs (1990) en het AHN. Met behulp van de bodemfysische vertaling van de bodemkaart (Wösten e.a., 1988), het programma CAPSEV (Wesseling, 1991), GHG-oud en GLG-oud zijn bergingscapaciteiten berekend, die eveneens als gebiedsdekkende hulpinformatie zijn gebruikt.



## Regressiemodellering

Voor elk stratum wordt een lineair regressiemodel geselecteerd dat de samenhang beschrijft tussen de GxG en de gebiedsdekkende hulpinformatie uit de vijf groepen die hierboven zijn beschreven. Omdat variabelen uit dezelfde groep sterk gecorreleerd kunnen zijn, wordt uit elke groep slechts één hulpvariabele in het regressiemodel opgenomen. Dit levert in totaal 540 kandidaatmodellen op. Voor elk stratum wordt het beste model geselecteerd met behulp van een statistisch criterium, Mallows' Cp (Mallows, 1966). Om de onnauwkeurigheid van de GxG-schattingen voor peilbuis- en gerichte-opnamelocaties te verdisconteren wordt *gewogen* regressie uitgevoerd: hoe nauwkeuriger de schatting, hoe meer gewicht in de regressieanalyse. Met het geselecteerde regressiemodel wordt de GxG voorspeld voor elke AHN-cel waarvoor de hulpinformatie bekend is.

### Analyse van de residuen

Het residu  $e$  is het verschil tussen de GxG-waarde zoals berekend voor een peilbuislocatie of een locatie van de gerichte opname ( $GxG$ ), en de waarde die voor die locatie is geschat met het regressiemodel ( $G\hat{x}G$ ):

$$e_{i,k} = GxG_{i,k} - G\hat{x}G_{i,k}, \quad (1)$$

voor de  $i$ -de locatie in stratum  $k$ . De residuen zijn gemiddeld nul en hebben variantie  $s_k^2$ . De residuen kunnen ruimtelijk gecorreleerd zijn, met name als niet alle ruimtelijke correlatie in GxG met het regressiemodel kan worden verklaard. Voor de ruimtelijke interpolatie van de GxG is het van belang met de ruimtelijke correlatie van de residuen rekening te houden. De ruimtelijke correlatie van de residuen wordt gemodelleerd met een variogram (Davis, 2002, blz. 254–264). Omdat het aantal punten per stratum te klein is om een variogram te fitten, wordt deze gefit op de *gestandaardiseerde* residuen; door de residuen te delen door  $s_k^2$  kunnen de residuen uit alle strata worden gebruikt bij het fitten van het variogram.

### Gebiedsdekkende interpolatie

De gestandaardiseerde residuen worden geïnterpoleerd naar elke AHN-cel door middel van *simple kriging* met het programma GSLIB (Deutsch en Journel, 1998). De geïnterpoleerde residuen worden vervolgens gestandaardiseerd en opgeteld bij de regressievoorspellingen van de GxG, wat de uiteindelijke GxG-kaart oplevert. Daarnaast wordt ook de nauwkeurigheid van de voorspelling berekend (variantie van de voorspelfout) als de som van twee componenten, nl. de nauwkeurigheid van de regressie en de nauwkeurigheid van de kriging-interpolatie. Inmiddels wordt bij GD-karteringen overigens een andere, elegantere procedure toegepast, waarbij gebruik gemaakt wordt van *universal co-kriging* (De Gruijter e.a., 2004). Bij deze nieuwe aanpak wordt rekening gehouden met de onzekerheid in de berekende GxG's op de meetpunten en met de correlatie tussen GHG, GVG en GLG. Verder worden er, behalve voor de bepaling van het residuele variogram, bij de interpolatie binnen een stratum geen gegevens van buiten het stratum gebruikt.

## Kartering van de overige GD-parameters

### *Karakteristieken van de verdeling*

De overige 74 parameters (tabel 1) beschrijven de duurlijn (2), de regimecurve (24) en het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de regimecurve (48). Omdat mag worden aangenomen dat deze parameters gecorreleerd zijn met de GxG, is een vereenvoudigde procedure voor de kartering toegepast:

- 1 voor de geohydrologische hoofdeenheden die de basis voor de stratificatie vormen worden de 74 parameters verkregen uit gesimuleerde tijdreeksen voor locaties van peilbuisen;
- 2 voor elk van de 74 parameters wordt een regressierelatie gefit, met GHG, GLG en GVG als verklarende variabelen;
- 3 voor het 25×25 m<sup>2</sup> grid waarvoor de GxG voorspeld is, worden met behulp van de regressiemodellen de 74 parameters voorspeld.

### *Kwel*

Bij kwel zou de jaarlijks gemiddelde grondwaterstand zich boven het drainageniveau moeten bevinden wanneer het neerslagoverschot gelijk aan 0 is. De kwelflux  $q$  berekenen wij voor peilbuislocaties met

$$q = (c - d)/\gamma, \quad (2)$$

waarin  $c$  de jaarlijks gemiddelde grondwaterstand is [cm] als het neerslagoverschot 0 is,  $d$  het drainageniveau t.o.v. maaiveld is [cm] en  $\gamma$  de drainageweerstand [d] is die uit de parameters van het lineaire tijdreeksmodel kan worden geschat (Knotters en Bierkens, 2000). Vervolgens zijn regressiemodellen opgesteld waarmee  $q$  gebiedsdekkend kan worden voorspeld uit GHG, GLG, GVG en  $d$ . De waarden van  $q$  zijn tenslotte verdeeld over de klassen 'kwel', 'neutraal' en 'wegzijging', om schijnnaauwkeurigheid te vermijden.

## **Validatie van de kaart**

De GD-actualisatie beslaat 1 790.000 ha (55% van Nederland). De kwaliteit van de GD-kaarten werd gevalideerd op basis van onafhankelijke waarnemingen in twee gebieden (figuur 4). De validatie concentreerde zich op de parameters GxG en Gt, omdat deze het meest worden gebruikt. In het testgebied van 10.000 ha werden 30 locaties geselecteerd, in het testgebied van 179.000 ha waren dat er 92. De locaties werden geselecteerd volgens een gestratificeerde aselechte steekproef, proportioneel over de meeste strata en met uitzondering van strata met diepe grondwaterstanden. Op de validatielocaties werden de GxG's bepaald door gerichte opname zoals hierboven is beschreven. Drie validatiestatistieken werden berekend:

$$ME = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (3a)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3b)$$

$$RMPEV = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \text{var}(\hat{y}_i)} \quad (3c)$$

*RMPEV* wordt berekend uit de variantie van de regressievoorspellingen en de zogenaamde krigingvariantie die bij de interpolatie van de residuen wordt berekend;  $\text{var}(\hat{y}_i)$  is de som van beide. *RMPEV* geeft dus de ‘theoretische’ kaartkwaliteit weer die volgt uit de regressie- en krigingvergelijkingen. Bij *ME* en *RMSE* wordt de proef op de som genomen: ze worden berekend uit de verschillen tussen de gekarteerde GxG-waarden ( $\hat{y}_i$ ) en de GxG-waarden die voor de validatiepunten door een gerichte opname zijn bepaald ( $y_i$ ). Verder is de kaartzuiverheid berekend, namelijk het percentage van het gebied waar de gekarteerde Gt’s overeenkomen met de Gt’s die door gerichte opname zijn bepaald.

#### *De relatie tussen kosten en kwaliteit*

Veranderingen in het aantal peilbuis- en gerichte-opnamelocaties (totaal  $N$ ) zullen gevolgen hebben voor de zowel de regressie- als de krigingcomponent in de nauwkeurigheid van de GxG-voorspellingen. Als *worst-case scenario* veronderstellen we dat de nauwkeurigheid van de *regressievoorspellingen* met een factor 2 afneemt als  $N$  een factor 4 kleiner wordt. De nauwkeurigheid van de *krigingvoorspellingen* kan voor individuele locaties worden afgeleid met de variogrammen die zijn gefit voor  $N$  locaties en de puntenconfiguraties behorend bij alternatieve, grotere, aantallen locaties (zie Burgess en Webster, 1980). Door de bijdrage aan de nauwkeurigheid van zowel regressie als kriging te combineren voor voldoende grote aantallen locaties, kan voor elk stratum afzonderlijk het effect van waarnemingsdichtheid op *RMPEV* worden geanalyseerd. De kosten kunnen worden geschat met de kosten voor het veldwerk, omdat deze de totale kosten domineren (Finke, 2000).

## **Resultaten**

### *Kaartkwaliteit*

Figuur 5 geeft een GHG-kaart en een kaart van de theoretische voorspelnaauwkeurigheid, uitgedrukt in Root Prediction Error Variance (*RPEV*), oftewel  $\text{sd}(\hat{y}_i)$ . De uitkomsten van de validatie (tabel 2) laten zien dat de systematische fout (*ME*) dichtbij nul ligt in beide validatiegebieden. De *RMSE*'s en *RMPEV*'s verschillen slechts enkele centimeters, wat aangeeft dat de (theoretische) *RPEV* een nauwkeurige indicatie geeft van de kaartkwaliteit.

**Tabel 2:** Validatieresultaten.

GD-parameter	Statistiek *	eenheid	gebied 1, 10.000 ha (n=30)	gebied 2, 179.000 ha (n=91)
GHG	ME	m	0,03	0,04
GHG	RMSE	m	0,37	0,27
GHG	RMPEV	m	n.v.	0,28
GLG	ME	m	0,06	0,07
GLG	RMSE	m	0,35	0,42
GLG	RMPEV	m	n.v.	0,37
GVG	ME	m	0,02	0,05
GVG	RMSE	m	0,32	0,28
GVG	RMPEV	m	n.v.	0,30
Gt	Zuiverheid nieuwe kaart	-	37%	62%
Gt	Zuiverheid oude kaart	-	13%	20%

\* Zie tekst

ME = gemiddelde fout (positief: waargenomen niveau dieper dan gekarteerde niveau)

RMSE = Root Mean Squared Error

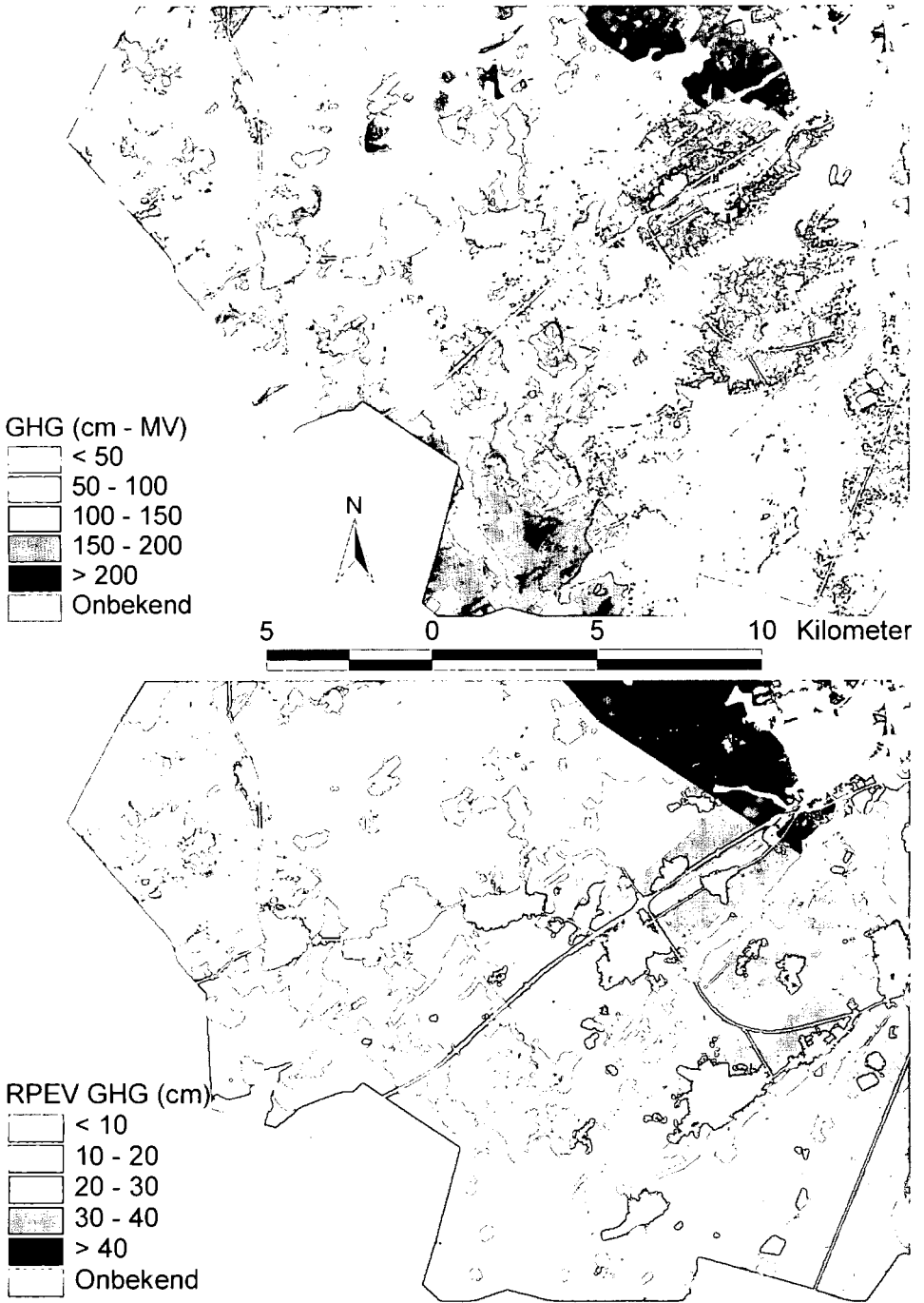
RMPEV = Root Mean Prediction Error Variance

n.v. = niet vastgesteld

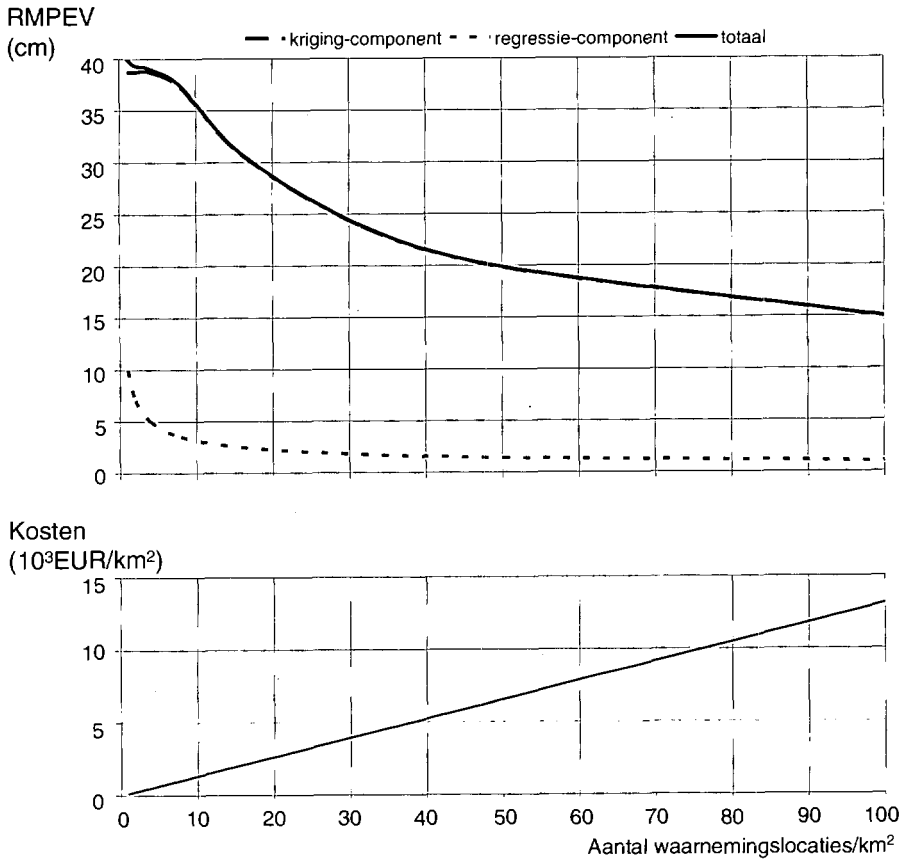
De kaartzuiverheid van de nieuwe Gt-kaart is in beide validatiegebieden groter dan die van de oude Gt-kaart. De kaartzuiverheden voor de twee gebieden blijken overigens sterk te verschillen. Mogelijk komt dit doordat de hydrologische veranderingen in het ene gebied groter zijn geweest dan in het andere gebied, of doordat de kwaliteit van de oorspronkelijke Gt-kaart in het ene gebied lager was dan in het andere gebied. Beide factoren beïnvloeden de voorspelkracht van verschillende bronnen van hulpinformatie, en dus de kaartkwaliteit.

### *Waarnemingsdichtheid, kwaliteit en kosten*

Een groot deel van de onnauwkeurigheid van de GxG-voorspellingen is toe te schrijven aan de kriginginterpolatie van gestandaardiseerde residuen. Het aandeel van de regressievoorspellingen is slechts circa 6% van de totale onnauwkeurigheid. Als er nieuwe hulpinformatie met grote voorspelkracht beschikbaar zou komen, dan zou de nauwkeurigheid aanmerkelijk toenemen omdat de residuen kleiner worden. Uitgaande van de hulpinformatie die nu beschikbaar is, heeft de waarnemingsdichtheid voornamelijk invloed op de *RMPEV* via de krigingcomponent (figuur 6). Het variogram en de configuratie van de waarnemingspunten zijn dus belangrijk voor de kaartkwaliteit. De kosten voor het karteren van de complete GD-parameterset zijn linear met de waarnemingsdichtheid, en bedragen circa € 150/km<sup>2</sup> bij de toegepaste waarnemingsdichtheid van 1/km<sup>2</sup> (bij een groot aantal km<sup>2</sup>). Een traditionele kartering van de Gt zou circa € 230/km<sup>2</sup> kosten, omdat er meer veldwerk voor nodig is.



**Figuur 5:** Kaart van GHG (cm) en voorspelfout, uitgedrukt in RPEV (cm), voor een gebied ten zuidwesten van Eindhoven.



**Figuur 6:** Relatie tussen waarnemingsdichtheid en Root Mean Prediction Error Variance (RMPEV), voor twee onzekerheidscomponenten en kosten.

## Conclusies

De ontwikkelde GD-methodiek kost minder dan een traditionele Gt-kartering, maar levert een complete set van parameters op. De nauwkeurigheid van de GxG-voorspellingen wordt ook in kaart gebracht, wat de mogelijkheid biedt tot verdere verbetering van de nauwkeurigheid van de kaart tegen gegeven kosten. De kaartkwaliteit kan tegen hoge kosten worden verbeterd door de waarnemingsdichtheid te vergroten. Een andere optie is nieuwe bronnen van hulpinformatie te gebruiken, zoals die bijvoorbeeld kunnen worden ontleend aan berekeningen met deterministisch-fysische hydrologische modellen. Voor een uitgebreide analyse van de mogelijkheden om de GD-kartering te verbeteren verwijzen wij naar Hoogland e.a. (2004).

## Literatuur

- Braat, L.C., A.R. van Amstel, A.C. Garritsen, C.R. van Gool, N. Gremmen, C.L.G. Groen, H.L.M. Rolf, J. Runhaar, en J. Wiertz (1989)** Verdroging van natuur en landschap in Nederland – beschrijving en analyse, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 's-Gravenhage.
- Bracht, M. van (2001)** Made to measure: information requirements and groundwater level monitoring networks; proefschrift, Vrije Universiteit, Amsterdam en TNO-NITG, Delft.
- Bierkens, M.F.P., M. Knotters en F.C. van Geer (1999)** Tijdreeksanalyse nu ook toepasbaar bij onregelmatige meetfrequenties; in: *Stromingen*, jrg 5, nr 2, pag 43–54.
- Bierkens, M.F.P., W.A. Bron en M. Knotters (2002)** Vidente 1.1: a graphical user interface and decision support system for stochastic modelling of water table fluctuations at a single location; rapport 613, Alterra, Wageningen.
- Burgess, T.M. en R. Webster (1980)** Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging; in: *Journal of Soil Science* 31, pag 315–331.
- Cohen, A.C. (1991)** Truncated and censored samples: theory and applications; Dekker Inc., New York.
- Davis, J.C. (2002)** Statistics and data analysis in geology; 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley, New York.
- Deutsch, C.V. en A.G. Journel (1998)** Gslib: Geostatistical Software Library and User's Guide; 2<sup>nd</sup> edition (Applied Geostatistics Series), Oxford University Press, New York.
- Finke, P.A., T. Hoogland, M.F.P. Bierkens, D.J. Brus en F. de Vries (1999)** Pilot naar grondwaterkaarten in het Weerijdsgebied; Alterra-projectrapport, Wageningen.
- Finke, P.A. (2000)** Updating the (1:50,000) Dutch groundwater table class map by statistical methods: an analysis of quality versus cost; in: *Geoderma* 97, pag 329–350.
- Gruijter, J.J. de, J.B.F. van der Horst, G.B.M. Heuvelink, M. Knotters en T. Hoogland (2004)** Grondwater opnieuw op de kaart. Methodiek voor de actualisering van grondwaterstands-informatie en perceelsclassificatie naar uitspoelingsgevoeligheid voor nitraat; rapport 915, Alterra, Wageningen.
- Hoogland, T., D.J. Brus, G.B.M. Heuvelink en M. Knotters (2004)** Hoe de kartering van de grondwaterstand (nog) beter kan; rapport 1032, Alterra, Wageningen.
- Knotters, M. en M.F.P. Bierkens (2000)** Tijdreeksmodellen voor de grondwaterstand: Een kijkje in de black box; in: *Stromingen*, jrg 5, nr 3, pag 35–49.
- Mallows, C.L. (1966)** Choosing a Subset Regression; Joint Statistical Meetings, Los Angeles.
- Riele, W.J.M. te en D.J. Brus (1991)** Methoden van gerichte grondwaterstandmetingen voor het schatten van de GHG; rapport 158, DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- Sluijs, P. van der (1990)** Hoofdstuk 11: Grondwatertrappen; in: W. Locher en H. de Bakker (red), *Bodemkunde van Nederland, deel 1: Algemene Bodemkunde*; Malmberg, Den Bosch.
- Wesseling, J.G. (1991)** CAPSEV: steady state moisture flow theory; program description and user manual. Winand Staring Centre, Report 37, Wageningen.
- Wösten, J.H.M., F. de Vries, J. Denneboom en A.F. van Holst (1988)** Generalisatie en bodemkundige vertaling van de bodemkaart 1 : 250.000, ten behoeve van de PAWN-studie; rapport 2055, Stiboka, Wageningen.

