

BasisRegistratie Ondergrond (BRO) Actualisatie Gt/Gd

Beschrijving grondwaterkarakteristieken per Gt-klasse voor hoog
Nederland

L C P M Stuyt, M Knotters, D J J Walvoort, T Hoogland, D J Brus, F de Vries, A H Heidema en
J P Okx



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

BasisRegistratie Ondergrond (BRO) Actualisatie Gt/Gd

Beschrijving grondwaterkarakteristieken per Gt-klasse voor hoog Nederland

L C P M Stuyt, M Knotters, D J J Walvoort, T Hoogland, D J Brus, F de Vries, A H Heidema en J P Okx

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research (Alterra) in opdracht van en gefinancierd door het Ministerie van Economische Zaken, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema 'Bodem Informatie Systeem' (projectnummer BO-11-017-025).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, maart 2017

Rapport 2797
ISSN 1566-7197

L C P M Stuyt, M Knotters, D J J Walvoort, T Hoogland, D J Brus, F de Vries, A H Heidema en J P Okx, 2016. *BasisRegistratie Ondergrond (BRO) Actualisatie Gt/Gd; Beschrijving grondwaterkarakteristieken per Gt-klasse voor hoog Nederland*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2797. 52 blz.; 23 fig.; 3 tab.; 90 ref.

Referaat - De Grondwatertrap (Gt)-informatie bij de bodem- en Gt-kaart van Nederland wordt stapsgewijs geactualiseerd. Onlangs (2014) is een geactualiseerde Gt-kaart van laag Nederland gerealiseerd. Voor hoog Nederland is in 2016, op basis van een uit 2004 daterende kaart van de grondwaterdynamiek (Gd), een beschrijving gemaakt van de grondwaterkarakteristieken per Gt-klasse. De hierbij gebruikte procedures en het resultaat worden in dit rapport beschreven. De komende periode zal van laag Nederland een Gd-kaart worden samengesteld. In combinatie met te actualiseren Gd-gegevens van hoog-Nederland zal de Gd-kaart dan compleet zijn, en beschikbaar in de vorm van een gedetailleerde, landsdekkende G×G-kaart.

Summary - Information on the depth and dynamics of the ground water level below the ground surface, 'Gt', associated with the soil map of The Netherlands, is updated incrementally. Only recently (2014), an updated Gt-map of the lower, western Netherlands was completed. A Gt-map of the higher grounds was produced in 2016, based on 'Gd' information established in 2004. The procedures followed and the results are reported in this volume. At this time, the compilation of a Gd map for the lower Netherlands is due. After completion, in conjunction with the update of the 'Gd' data for the higher grounds, a comprehensive, nationwide 'Gd' map of The Netherlands will be available.

Trefwoorden: BRO, Basisregistratie Ondergrond, grondwaterkarakteristieken, grondwatertrap, Gt, Gd.

Dit rapport is gratis te downloaden van <http://dx.doi.org/10.18174/411001> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2017 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, E info.alterra@wur.nl, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen Environmental Research Rapport 2797 | ISSN 1566-7197

Kaart omslag: Wageningen Environmental Research (Alterra)

Inhoud

	Woord vooraf	5
	Samenvatting	7
1	Inleiding	9
	1.1 Achtergrond	9
	1.2 Probleemstelling	11
	1.3 Projectdoelstellingen	11
	1.4 Leeswijzer	12
	1.5 Definities en begrippen	12
2	Overzicht van Gt- en Gd-informatie	14
	2.1 Gt-kaart	14
	2.2 Gd-kaart	14
	2.3 Karteerbare-kenmerkenkaart	15
	2.4 Kaarten op basis van fysisch-mechanistische modellen	15
3	Heranalyse grondwaterstands-informatie hoog Nederland	16
	3.1 Inleiding	16
	3.1.1 Probleemstelling	16
	3.1.2 Doelstelling	18
	3.2 Werkwijze	18
	3.3 Samenvoegen van kaartfragmenten	18
	3.4 Controleren op compleetheid	18
	3.5 Histogrammen en staafdiagrammen van geaggregeerde gegevens	21
	3.5.1 Geen aggregatie	22
	3.5.2 Ruimtelijke aggregatie	23
	3.5.3 Aggregatie over realisaties	24
	3.5.4 Volledige aggregatie	24
	3.6 Dataproducten	24
	3.6.1 Dataproducten op gridcelbasis	25
	3.6.2 Dataproducten op kaartvlakbasis	25
	3.7 Use Cases	26
	3.7.1 Case 1: actualiseren van vlakken van de bodemkaart	26
	3.7.2 Case 2: Beschrijven inhoud vlakken van de bodemkaart	29
	3.7.3 Case 3: prioriteren van onderzoek	29
	3.7.4 Case 4: Modelstudies en -analyses	31
	3.7.5 Case 5: Overschrijdingskansen	32
4	Werkplan realisatie landsdekkende Gd-kaart	34
	4.1 Doelstellingen	34
	4.2 Functionaliteit van de Gd-kaart	35
	4.3 Essentiële stappen ontwerp meetnet Gd 2017-2022	35
	4.3.1 Inventarisatie van recente meetgegevens van de grondwaterstand en gebiedsdekkende ruimtelijke informatie gerelateerd aan de grondwaterstandsfluctuatie	35
	4.3.2 Verkennen van de ruimtelijke variatie in de seizoensfluctuatie van de grondwaterstand aan de hand van beschikbare metingen in gerichte opnamen en peilbuizen gebruikt bij de Gt-actualisatie van 2014	37
	4.3.3 Verwachte ruimtelijke variatie in grondwaterstanden, G×G's en Gt's	37

4.3.4	Vaststellen van de relaties en afhankelijkheden tussen grondwatersituatie vastgesteld met metingen van de grondwaterstand en gebiedsdekkende ruimtelijke informatie	38
4.3.5	Optimalisatie van het meetnetontwerp op basis van de ligging van de bestaande metingen en de gebiedsdekkende ruimtelijk informatiebronnen	38
4.3.6	Aanbevelingen voor het te realiseren meetnetontwerp en de uitvoering van het meetprogramma om tot een uniforme Gd-kaart voor laag Nederland te komen	39
4.3.7	Logistiek van de veldcampagnes	40
4.3.8	Web georiënteerde toolkit voor de Gd	40
5	Relevantie voor BRO, Data Revolution doelstellingen en Sustainable development goals	41
5.1	Bijdrage aan de BRO-doelstellingen	41
5.2	Bijdrage aan de aanbevelingen van het UN Data Revolution rapport	41
5.3	Bijdrage aan de Sustainable Development Goals (SDG's)	42
6	Conclusies en aanbevelingen	46
6.1	Conclusies	46
6.2	Aanbevelingen	46
	Literatuuropgave	48

Woord vooraf

De BasisRegistratie Ondergrond (BRO) biedt actuele en nauwkeurige informatie over de diepte waarop de freatische grondwaterspiegel ten opzichte van het maaiveld fluctueert. Deze informatie is voor veel toepassingen buitengewoon relevant, maar aan voortdurende verandering onderhevig. Daarom wordt informatie over de freatische grondwaterspiegel met enige regelmaat geactualiseerd. Omdat bij diverse actualisaties verschillende benaderingen (moeten) worden gevolgd, was, wat de Gt betreft, van landsdekkende en gelijksoortige informatie niet langer sprake, in tegenstelling tot de oorspronkelijke bodem- en Gt-kaart, schaal 1:50 000, die voor heel Nederland één legenda kent. Doel van dit project in het kader van de BRO was om - in navolging op de Gt-actualisatie voor laag Nederland in 2014 - voor de zandgebieden (globaal hoog Nederland) waarvan een weliswaar gedateerde (2004) maar gedetailleerde Gd-kaart beschikbaar is, een beschrijving van de grondwaterkarakteristieken per Gt-klasse op te stellen. Het doel is bereikt, waarmee de karakterisering per Gt-klasse nu weer uniform en landsdekkend beschikbaar is, zij het met wisselend actualiteitsgehalte en onderliggende berekeningswijze.

De ambitie is om uiteindelijk te kunnen beschikken over een uniform, actueel en landsdekkend Gd-bestand, met per 25×25m rastercel schattingen van de GHG, GVG en GLG (G×G). In het tweede gedeelte van dit rapport wordt een werkwijze voorgesteld hoe tot zo'n gedetailleerde Gd-kartering te komen, optimaal gebruikmakend van bestaande informatie.

Dit rapport is tot stand gekomen in goede samenspraak met direct belanghebbenden en de opdrachtgever.

Wageningen, 27 maart 2017
L C P M Stuyt, projectleider.



Dit project levert een bijdrage aan de realisatie van acht Duurzame Ontwikkelingsdoelen (Global Goals for Sustainable Development; www.globalgoals.org/nl/), te weten 2, 6, 7, 11, 12, 13, 15 en 17.



Samenvatting

Het grondwater bevindt zich in Nederland meestal op geringe diepte, en is daarom van invloed op gewasgroei, ecosystemen, uitspoeling van nutriënten, funderingen, maaiveldaling, berijdbaarheid en dergelijke. Informatie over de grondwaterstand wordt onder meer gebruikt bij het berekenen van schadeuitkeringen aan agrariërs in waterwingebieden, bij het schatten van de nitraatuitspoeling naar het grondwater voor onderbouwing van het mestbeleid en bij de voorbereiding van civieltechnische werken. Veel toepassingen vragen om uniforme en actuele gegevens over grondwaterkarakteristieken. Op dit moment bestaan er echter drie verschillende informatiebronnen, met ieder hun eigen detailniveau, gebruiksmogelijkheden en nauwkeurigheid.

De grondwatertrappen (Gt) op de Bodem- en Gt-kaart 1:50.000 zijn verouderd en moeten worden geactualiseerd. Deze kaart kwam grofweg tot stand tussen 1960 en 2000 (Heesen, 1971; Sluijs, 1982). De Gt-informatie op deze landsdekkende kaart is niet uniform, want gedurende een periode van circa 40 jaar is voortdurend sprake geweest van regionale aanpassingen, verbeteringen en verfijningen. Gaandeweg zijn ook de klassenindeling en de legenda aangepast. Al geruime tijd wordt onderkend dat de Bodem/Gt-kaart dringend zou moeten worden 'geüniformeerd' en geactualiseerd.

Naast de verouderde Gt-informatie is voor hoog Nederland gedetailleerde en actuele informatie over de grondwaterdynamiek (Gd) beschikbaar. Tussen 2000 en 2004 is uit de Bodemkaart 1:50.000, diverse bronnen van digitaal beschikbare hulpinformatie, te weten het Actueel Hoogtebestand van Nederland (AHN) en gerichte boorgatmetingen van de grondwaterstand, een Gd-kaart ('Grondwaterdynamiek') van hoog Nederland samengesteld. Hierbij is een methodiek ontwikkeld om grondwatertrappen te voorspellen. Deze Gd-kaart is in het kader van dit BRO-project uitgangspunt geweest voor de ontwikkeling van een geactualiseerde Bodem/Gt-kaart van hoog Nederland. Daarnaast is het westelijk gedeelte van de landsdekkende Bodem/Gt-kaart (2000) in het kader van BIS 2014 geactualiseerd. Daarbij zijn frequentieverdelingen per Gt-klasse bepaald, echter alleen voor laag Nederland.

Met deze twee recente stappen is een karakterisering per Gt-klasse nu beschikbaar in de vorm van een geactualiseerde, landsdekkende en uniforme Bodem/Gt-kaart (2014-2016), zij het met wisselend actualiteitsgehalte en onderliggende berekeningswijze.

Naast de geactualiseerde, landsdekkende Bodem/Gt-kaart is de ambitie uitgesproken om in uiterlijk in 2022 een gedetailleerde, landsdekkende Gd-kaart beschikbaar te hebben, met per 25×25-meter rastercel schattingen van de GHG, GVG en GLG (G×G) alsook de nauwkeurigheid van deze schattingen (standaardfouten). De verouderde Gd-kaart van hoog Nederland uit 2004 moet in dit kader worden geactualiseerd. Daarnaast moet van laag Nederland een vergelijkbare Gd-kaart worden samengesteld.

In het kader van dit project is - in globale termen - een werkplan ontwikkeld voor de actualisatie van de Gd-kaart van de zandgebieden uit 2004, en voor een gedetailleerde Gd-kartering in laag Nederland. In dit werkplan wordt een inventarisatie gemaakt van de beschikbare en bruikbare gegevens, en op welke locaties behoefte is aan aanvullende gegevens. Daarnaast wordt aangesloten bij gegevens en resultaten van diverse regionale en landelijke hydrologische modellen. Diverse consortia van provincies en waterschappen beschikken over simulatiemodellen om het grondwaterstandsverloop te voorspellen. Een voorbeeld daarvan is het MIPWA-consortium in Noord-Nederland. Verkend zal worden in hoeverre de gegevens van/voor dit soort modellen voor een verbeterde en/of efficiëntere Gd-kartering kunnen worden benut.

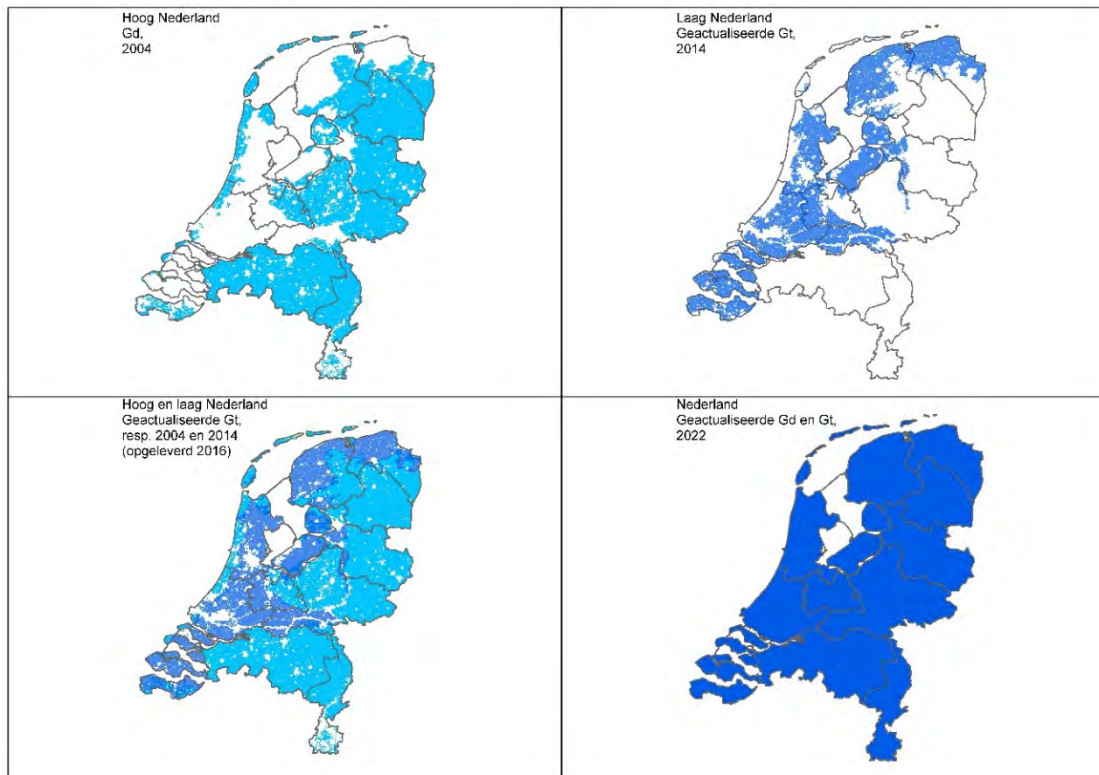
Dit project levert concreet de volgende producten: een Gt-kaart van hoog Nederland die op basis van de Gd-kaart uit 2004 is geactualiseerd en een werkplan voor de ontwikkeling van een Gd-kaart in de periode 2017-2022. De synergie binnen de BRO wordt verwezenlijkt door het gebruik van grondwatergegevens uit DINO (TNO), en het gebruik van MIPWA (TNO).

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Actuele en nauwkeurige informatie over de diepte, ten opzichte van het maaiveld, waarop de freatische grondwaterspiegel fluctueert wordt – onder andere – gebruikt als invoer voor modellen voor uitspoeling van nutriënten en bestrijdingsmiddelen en voor modellen voor de voorspelling van het ecologische en landbouwkundige potentieel. Informatie over grondwaterstandsdiepten wordt in het veld verzameld, waarbij gebruik wordt gemaakt van grondwaterstandsmetingen in peilbuizen en boorgaten, hydromorfe profielkenmerken en landschappelijke kenmerken. Bij detailkarteringen wordt deze methode nog steeds gevolgd. De seizoensfluctuatie die onder de heersende klimatologische en hydrologische omstandigheden optreedt wordt onder andere beschreven met de gemiddeld hoogste en laagste grondwaterstand, resp. GHG en GLG. Op de bodemkaart van Nederland, schaal 1:50 000, zijn GHG's en GLG's samengevat in zogeheten grondwatertrappen (Gt's) waarvan de ruimtelijke verdeling in het veld simultaan met de bodemkartering is bepaald.

In de periode 2000-2004 is de informatie over grondwaterstandsdiepten in het *hoge, pleistocene* deel van Nederland, het deel met voornamelijk zandgronden, geactualiseerd met behulp van veldonderzoek en geostatistische modellering waarbij het Actueel Hoogtebestand van Nederland (AHN) een belangrijke bron van hulpinformatie was; zie Figuur 1. Dit resulteerde in kaarten van de Grondwaterdynamiek (Gd) met een resolutie van 25×25 meter van GHG's en GLG's en kaarten met de nauwkeurigheid van deze ruimtelijk geïnterpoleerde GHG's en GLG's (Finke *et al.*, 2004). Deze wijze van actualisatie werd ingegeven door budgettaire en planningstechnische randvoorwaarden en de behoefte aan kwantitatieve informatie over de kwaliteit van ruimtelijke voorspellingen.



Figuur 1 Landsdekkende weergave van de regio's waar de informatie over grondwaterstandsdiepten is geactualiseerd. Linksboven: Gd-kaart van hoog Nederland (2004). Rechtsboven: geactualiseerde Gt-kaart van laag Nederland (2014). Linksonder: landsdekkende Gt-kaart, opgebouwd uit de Gd-kaart van hoog Nederland uit 2004 en de geactualiseerde Gt-kaart van laag Nederland uit 2014. Rechtsonder: toekomstige, landsdekkende kaart van de grondwaterdynamiek (Gd), opgebouwd uit de te actualiseren kaarten uit 2004, respectievelijk 2014, uiterlijk gereed in 2022.

In de periode 2012-2014 is de informatie over grondwaterstandsdiepten in het *lage, holocene* deel van Nederland geactualiseerd (Hoogland *et al.*, 2014). Om budgettaire, planningstechnische en inhoudelijke redenen is hierbij niet een geostatistisch model gebruikt om nieuwe patronen in kaart te brengen maar een benadering waarbij de actuele inhoud van bestaande kaarten van de Bodem- en Gt-kaart, schaal 1:50 000, kwantitatief werd beschreven. De belangrijkste inhoudelijke reden is dat de ruimtelijke variatie in Gt's in laag Nederland niet zozeer samenhangt met de maaiveldhoogte, zoals in hoog Nederland, maar grotendeels wordt bepaald door het oppervlaktewaterbeheer (ontwatering en afwatering). Hierdoor is de samenhang met maaiveldhoogte gering waardoor geostatistische interpolatie met het AHN als hulpinformatie geen valide werkwijze is. Bovendien kan de ruimtelijke variatie in GxG en Gt die zich binnen percelen voordoet niet nauwkeurig op kaartschaal 1:50 000 worden weergegeven.

De geactualiseerde Gt-kaart van laag Nederland heeft, evenals de oorspronkelijke kaart, Gt's als kaartenheden. Dit is de meest voorkomende Gt binnen de eenheid. Van elke kaartenheid is de verdeling over de verschillende Gt's die erbinnen voorkomen tijdens de actualisatie bepaald. Door stratificatie (zie de begrippenlijst op pagina 12) is het aantal kaartenheden ten opzichte van de oorspronkelijke Gt-kaart, schaal 1:50 000 uitgebreid van 12 Gt-klassen naar 59. Hierdoor bevat de geactualiseerde Gt-kaart van laag Nederland meer ruimtelijk detail dan de oorspronkelijke Gt-kaart, schaal 1:50 000.

Omdat bij de bovenstaande actualisaties kwantitatieve methoden zijn gebruikt is nu ook informatie beschikbaar over de nauwkeurigheid van de geactualiseerde informatie. Hierdoor worden de gebruiksmogelijkheden vergroot, omdat de informatie nu ook toepasbaar is in *smart decision making* en in risicoanalyses.

1.2 Probleemstelling

De verschillende actualisatieprojecten (zie paragraaf 1.1) hebben geleid tot een actueel beeld van de diepte waarop de grondwaterspiegel fluctueert. Doordat bij de actualisaties verschillende benaderingen moesten worden gevolgd is de actuele informatie echter niet landsdekkend eenvormig. Dit in tegenstelling tot de oorspronkelijke bodem- en Gt-kaart, schaal 1:50 000, die voor heel Nederland één legenda kent. Deze kaart is echter niet geschikt voor risicoanalyses en smart decision making, omdat de nauwkeurigheid onbekend is.

De uit 2004 daterende GHG's en GLG's op de Gd-kaarten voor hoog Nederland zijn niet samengevat tot Gt's. Daarnaast is de ruimtelijke verdeling is niet afgestemd op de geactualiseerde bodemkaart, schaal 1:50 000. Dit maakt de Gd-kaarten moeilijk vergelijkbaar met zowel de geactualiseerde Gt-kaarten voor laag Nederland als de oorspronkelijke Bodem- en Gt-kaart.

Een bijkomend probleem is de schijnnaauwkeurigheid van Gd-kaarten. De hoge resolutie (25×25m) van deze kaarten nodigt uit tot toepassing op zeer gedetailleerd schaalniveau. Hierbij wordt informatie over de nauwkeurigheid van de Gd die wordt meegeleverd in de vorm van (een kaart met) standaardafwijkingen van voorspelfouten, gewoonlijk - ten onrechte - genegeerd.

Vergeleken met de Gd-kaart voor hoog Nederland (2004) heeft de in 2014 geactualiseerde Gt-kaart voor laag Nederland minder ruimtelijk detail, maar vergeleken met de oorspronkelijke Gt-kaart (2000) is deze geactualiseerde Gt-kaart gedetailleerder, omdat het aantal kaartenheden is toegenomen van 12 naar 59. Voor elk van deze 59 zogeheten strata (zie de begrippenlijst op pagina 12) is een frequentieverdeling van Gt's bekend. Hoe binnen deze 59 strata de Gt's ruimtelijk zijn verdeeld is echter niet bekend. Bij toepassingen in delen van strata is het van belang inzicht te hebben in de ruimtelijke verdeling van de verschillende Gt's die binnen een stratum voorkomen.

1.3 Projectdoelstellingen

Dit project 'actualisatie Gt/Gd' in het kader van de BRO heeft twee doelen:

1. De geactualiseerde informatie over de fluctuatie van grondwaterstandsdieptes in hoog Nederland te harmoniseren met de actuele (i.c. 2014) Gt-kaart voor laag Nederland, tot één kaart met één legenda en gelijkmatig ruimtelijk detail voor heel Nederland, en geschikt voor *smart decision making* en risicoanalyses. Deze harmonisatie is nodig om in het kader van de BasisRegistratie Ondergrond (BRO) voor elk vlak van de bodemkaart (schaal 1:50.000) de grondwatertrap (Gt) in te kunnen voeren.

In tegenstelling tot laag Nederland, waar de actuele Gt-informatie per *kaartenheid* (stratum) wordt gegeven, zal de Gt in hoog Nederland per *kaartvlak* van de bodemkaart worden gespecificeerd. Omdat een kaartenheid uit meerdere kaartvlakken kan bestaan zal de geharmoniseerde, actuele Gt-kaart van hoog Nederland dus een groter ruimtelijk detail hebben dan de actuele Gt-kaart van laag Nederland.

De reden voor deze aanpak is dat de ruimtelijke variatie in Gt's in hoog Nederland sterk samenhangt met bodem en landschap en daardoor per kaartvlak is te karakteriseren. In laag Nederland hangt de ruimtelijke variatie samen met het grond- en oppervlaktewaterbeheer (ont- en afwatering) waardoor deze meer met landbouwpercelen is geassocieerd en in mindere mate met bodem en landschap.

2. Het opstellen van een werkplan voor de productie van een landsdekkende Gd-kaart van Nederland in 2022.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een samenvatting van beschikbare landsdekkende informatie over de grondwaterstandsdiepte en bediscussieert de relatieve voor- en nadelen van deze informatie en de toepasbaarheid ervan bij de actualisatie van de Gt- en Gd-kaart.

Hoofdstuk 3 beschrijft hoe uit de informatie van de Gd-kaart voor hoog Nederland informatie over Gt's is afgeleid die de situatie van 2004 weergeeft. In dit hoofdstuk passeren ook de diverse producten en toepassingen van deze kennis de revue: (i) een Gt-kaart die geactualiseerd is tot 2004, (ii) de mogelijkheid om frequentieverdelingen te genereren van Gt's binnen kaartvlakken, (iii) het gebruik van kwantitatieve Gd- en Gt-informatie in modelstudies en –analyses, (iv) het berekenen van kansen waarmee kritische drempels in G×G's worden over- of onderschreden, en (v) het prioriteren van onderzoeksinspanningen om Gd- en Gt-informatie te actualiseren en de nauwkeurigheid van deze informatie te vergroten.

Hoofdstuk 4 geeft het werkplan voor de totstandkoming van een landsdekkende, actuele Gd-kaart. Hoofdstuk 5 beschrijft de relevantie van actuele informatie over Gt en Gd voor BRO, Data Revolution doelstellingen en Sustainable development goals.

1.5 Definities en begrippen

Tenzij anders aangegeven hanteren we in dit rapport de definities zoals gegeven door Ritzema et al. (2012):

Drukhoogte: potentiaal van het bodemwater ten gevolge van interactie tussen bodemwater en de bodemmatrix, uitgedrukt in een energiehoogte-equivalent (m).

Duurlijn: geeft aan over welke totale tijdsduur binnen een jaar een bepaalde grondwaterstand wordt overschreden, berekend uit een periode van 30 jaar onder gegeven klimatologische en waterhuishoudkundige omstandigheden (dit rapport).

Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG): gemiddelde van de HG3 over een periode van 30 jaar onder gegeven klimatologische en waterhuishoudkundige omstandigheden.

Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG): gemiddelde van de LG3 over een periode van 30 jaar onder gegeven klimatologische en waterhuishoudkundige omstandigheden.

Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand (GVG): gemiddelde van de VG3 over een periode van 30 jaar onder gegeven klimatologische en waterhuishoudkundige omstandigheden.

Gerichte opname: meting van de grondwaterstand op een vooraf vastgestelde of willekeurig gekozen plaats en vooraf gekozen tijdstip.

Grondwater: al het water dat zich onder het bodemoppervlak in de verzadigde zone bevindt en dat in direct contact met bodem of ondergrond staat.

Grondwaterdynamiek: de dynamiek van de grondwaterstandsdiepte, beschreven met GHG, GLG, GVG, Gt, regimecurve en duurlijn¹.

Grondwaterstand: de hoogte ten opzichte van een referentieniveau (meestal N.A.P., soms het maaiveld) van een punt waar het grondwater een stijghoogte gelijk nul heeft (m).

Grondwaterstandsdiepte: de afstand tussen het grondoppervlak (bodemoppervlak) en de grondwaterstand (m).

Grondwatertrap (Gt): de klasse die begrensd wordt door een GHG- en/of GLG-traject (Ten Cate et al., 1995).

G×G: korte weergave van GLG, GHG en GVG (zie aldaar).

HG3: gemiddelde van de drie hoogste grondwaterstanden in een hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart) bij een meetfrequentie van tweemaal per maand (rond de 14^e en 28^e).

¹ <http://www.wur.nl/nl/Expertises-Dienstverlening/Onderzoeksinstituten/Environmental-Research/Faciliteiten-Producten/Software-en-modellen/Grondwaterdynamiek.htm>

LG3: gemiddelde van de drie laagste grondwaterstanden in een hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart) bij een meetfrequentie van tweemaal per maand (rond de 14^e en 28^e).

Regimecurve: geeft aan wat de grondwaterstand op een bepaalde dag in het jaar is, gemiddeld over een periode van 30 jaar met gegeven klimatologische en waterhuishoudkundige omstandigheden (dit rapport).

Schijngrondwaterspiegel: grondwaterspiegel van een grondwaterlichaam gelegen op een slecht doorlatende laag waaronder een onverzadigde zone voorkomt; op nog grotere diepte bevindt zich een volgende grondwaterspiegel die via het grondwater in verbinding kan staan met het grotere (regionale) grondwaterlichaam.

Stratum (mv. strata): in de steekproeftheorie is een stratum een deelpopulatie. In dit rapport is een stratum een deelgebied. Deelgebieden kunnen om verschillende redenen en op verschillende manieren worden onderscheiden, zie stratificatie.

Stratificatie: indeling van een gebied in strata.

Een eerste reden voor stratificatie kan zijn het vergroten van de nauwkeurigheid door deelgebieden (strata) te onderscheiden waarbinnen de doelvariabele (bijvoorbeeld G×G) weinig varieert.

Een tweede reden voor stratificatie kan zijn het verkrijgen van een geografische spreiding van waarnemingen bij het uitvoeren van een steekproef.

Een derde reden voor stratificatie kan zijn dat voor bepaalde deelgebieden afzonderlijke informatie gewenst is.

Soms wordt de landschappelijke ligging (beekdal), het peilbeheer (polder) en het landgebruik (natuurgebied met karakteristiek peilbeheer) bij de stratificatie betrokken.

Veldschatting: veldschattingen (van de G×G) zijn gebaseerd op profiel- en veldkenmerken en gemeten grondwaterstanden in boorgaten en grondwaterstandsbuizen.

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

2 Overzicht van Gt- en Gd-informatie

2.1 Gt-kaart

De bodemkaart en grondwatertrappenkaart van Nederland (schaal 1:50.000) is tussen de jaren zestig en negentig van de vorige eeuw gemaakt. Hierdoor is deze niet meer overal actueel; dit geldt vooral voor de grondwatertrappen(Gt-)kaart. Daarom hebben actualisaties plaatsgevonden, aanvankelijk in het pleistocene deel van Nederland (Finke *et al.*, 2004, 2005; De Gruijter *et al.* 2004; Van Kekem *et al.*, 2005) en later in het holocene deel (Hoogland *et al.*, 2014).

De Gt-kaart is door veldbodemkundigen gedurende vele jaren simultaan met de bodemkartering in het veld opgenomen. Zij schatten de grondwaterstandskarakteristieken GHG en GLG op locaties in het gebied en de ruimtelijke patronen van deze karakteristieken. Hierbij gebruikten ze niet alleen GHG's en GLG's die waren berekend uit tijdreeksen op meetlocaties binnen of nabij het gebied, maar ook aanvullende informatie zoals topografie, bodemkundige profielopbouw, waterpeilen van oppervlaktewater, vegetatie en dergelijke, en gerichte opnamen van grondwaterstanden in boorgaten onder natte en droge omstandigheden. Veldbodemkundige experts benutten deze aanvullende informatie en hun inzicht in complexe relaties. Nadelen van deze aanpak zijn de betrekkelijke reproduceerbaarheid en het ontbreken van informatie over nauwkeurigheid.

De betrekkelijke reproduceerbaarheid komt naar voren wanneer verschillende experts verschillende kaarten van hetzelfde gebied maken en wanneer dezelfde expert op een ander moment tot een ander resultaat komt. Daarnaast is de manier waarop de expert te werk gaat en tot zijn oordeel komt moeilijk eenduidig vast te leggen (Ten Cate *et al.*, 1995). Daartegenover staat dat de meetnetten (boorpunten met G×G-schattingen en metingen van de grondwaterstand) bij detailkarteringen meestal een hoge dichtheid hebben (variërend van ca. 1 boring per 0,5 tot 5 ha) en dat alle facetten die in een bepaald gebied voorkomen aan het licht komen. Dit betekent ook dat de nauwkeurigheid van de schattingen door de vele meetpunten in het gebied hoog kan zijn. De nauwkeurigheid kan alleen achteraf met een validatiestudie op basis van additionele waarnemingen worden vastgesteld.

Weergave van de seizoensfluctuatie van de grondwaterstandsdiepte met Gt-kaarten veronderstelt dat de variatie binnen Gt-eenheden klein is ten opzichte van die tussen Gt-eenheden. Grote veranderingen doen zich volgens dit model voor op de grenzen van de Gt-eenheden. De interpolatiemethode die hier wordt toegepast is het classificatiemodel, waarbij elke locatie in het gebied tot één van een eindig aantal klassen behoort en de eigenschappen per klasse constant zijn.

2.2 Gd-kaart

De kartering van de grondwaterdynamiek (Gd) in hoog Nederland is gebaseerd op waargenomen tijdreeksen van grondwaterstandsdiepten in peilbuizen, gerichte opnamen van grondwaterstandsdiepten in boorgaten, gebiedsdekkende en digitaal beschikbare hulpinformatie, regressiemodellering en geostatistische interpolatiemethoden (Finke *et al.*, 2004, 2005; De Gruijter *et al.*, 2004; Van Kekem *et al.*, 2005). De Gd-methodiek brengt het verloop van de grondwaterstandsdiepte door het jaar heen in kaart, met voor pixels van 25×25 m² een waarde voor de GHG, GLG en GVG, een Gt, een regimecurve en een duurlijn. Deze zijn geschat uit een groot aantal (300) geostatistische simulaties. Hieruit kunnen ook de standaardfouten en bandbreedtes die de nauwkeurigheid indiceren worden berekend. Opgemerkt moet worden dat deze informatie over de nauwkeurigheid is gegenereerd met een statistisch model dat een bepaalde geldigheid en nauwkeurigheid heeft. Daardoor kan deze modelgebaseerde, lokale informatie over nauwkeurigheid afwijken van de werkelijke voorspelfout. Validatie is daarom nodig om te beoordelen of de modelgebaseerde, lokale informatie over nauwkeurigheid overeenstemt met de werkelijke voorspelfouten.

2.3 Karteerbare-kenmerkenkaart

Van der Gaast *et al.* (2010) ontwikkelden de 'Gt-methode op basis van karteerbare kenmerken', waarbij $G \times G$'s ruimtelijk worden verdeeld, en wel zodanig dat frequentieverdelingen per grondwatertrap worden gerespecteerd en de ruimtelijke verdeling binnen elke grondwatertrap rekening houdt met de relatie tussen de $G \times G$ en de maaiveldhoogte. Een nadeel van deze methode is dat de verdeling van deze gegevens (landelijk of regionaal) over de grondwaterkarakteristiek binnen een bepaalde Gt-klasse wordt gebruikt als representant van de verdeling binnen elk individueel Gt-kaartvlak. Het is echter de vraag in hoeverre de variatie tussen peilbuizen op landelijke schaal een maat is voor de variatie binnen een kaartvlak. Daarnaast is het de vraag in hoeverre de verdeling van de $G \times G$ binnen een kaartvlak een normale verdeling is, zoals impliciet wordt aangenomen. De karteerbare-kenmerkenkaart geeft geen informatie over de nauwkeurigheid van de $G \times G$'s die deze kaart weergeeft. Validatie op basis van additionele data is noodzakelijk om inzicht te krijgen in de nauwkeurigheid van de kaart.

2.4 Kaarten op basis van fysisch-mechanistische modellen

Waargenomen tijdreeksen van grondwaterstanden en stijghoogten kunnen worden gebruikt om numerieke fysisch-mechanistische modellen (ook deterministische modellen of hydrologische procesmodellen genoemd) te kalibreren. Vervolgens kunnen met deze modellen, met invoer van neerslag- en verdampingscijfers, voor een lange periode stijghoogten en freatische grondwaterstanden worden gesimuleerd voor een groot aantal punten op een fijnmazig grid. Uit deze simulaties kunnen vervolgens voor elk gridpunt grondwaterstandskarakteristieken zoals GHG, GLG, GVG, Gt, regimecurves en duurlijnen worden berekend.

Een voordeel van het gebruik van fysisch-mechanistische modellen is dat deze allerlei fysische relaties beschrijven die ook niet-lineair kunnen zijn, en dat alle beschikbare gegevens met hun ruimtelijke verschillen gecombineerd worden benut. Een model dat de relevante processen beschrijft kan worden gebruikt om de effecten van veranderingen in het systeem door bijvoorbeeld klimaatverandering en menselijk handelen te voorspellen. Nadelen van het gebruik van fysisch-mechanistische modellen zijn dat veel tijd moet worden geïnvesteerd in het verwerken van gegevens voor de toepassing en de nauwkeurigheid van de modelvoorspellingen alleen kan worden bepaald door validatie met additionele waarnemingen.

In Nederland zijn diverse fysisch-mechanistische modellen landsdekkend operationeel, zowel op nationale schaal (NHI, Delta instrumentarium) als op regionale schaal (Hydromeda, MIPWA, IBRAHYM, AMIGO). De nauwkeurigheid van modeluitkomsten kan op grond van metingen worden gekwantificeerd en gevoeligheidsanalyses, validatiestudies en onzekerheidsanalyses zijn onderdelen van het handboek *Good Modelling Practice* (Stowa, 1999). $G \times G$ -kaarten die met het NHI en Hydrologie-Stone zijn vervaardigd zijn gevalideerd met behulp van de data uit de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK) en vergeleken met de Gd-kaarten door Knotters *et al.* (2013a en -b). Hoogland *et al.* (2006) pasten een fysisch-mechanistisch model voor grondwaterstroming (SIMGRO) toe bij de kartering van grondwaterstandskarakteristieken. Hoogewoud (2009) gebruikte het MIPWA-model om grondwaterstandskarakteristieken in natuurgebieden in Noord-Nederland te berekenen. Het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (www.nhi.nu) bestaat uit de koppeling van vier hydrologische modellen waarmee een geïntegreerd landsdekkend grond- en oppervlaktewatermodel van Nederland wordt gebruikt voor landelijke analyses.

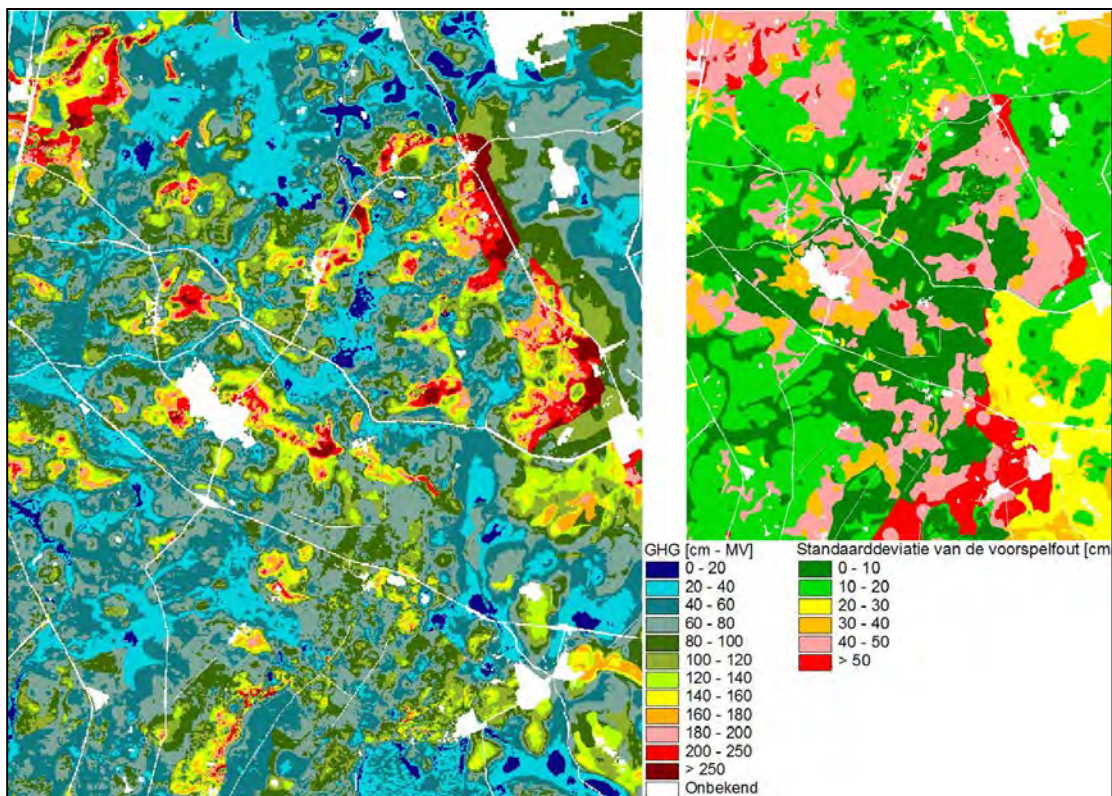
3 Heranalyse grondwaterstands- informatie hoog Nederland

3.1 Inleiding

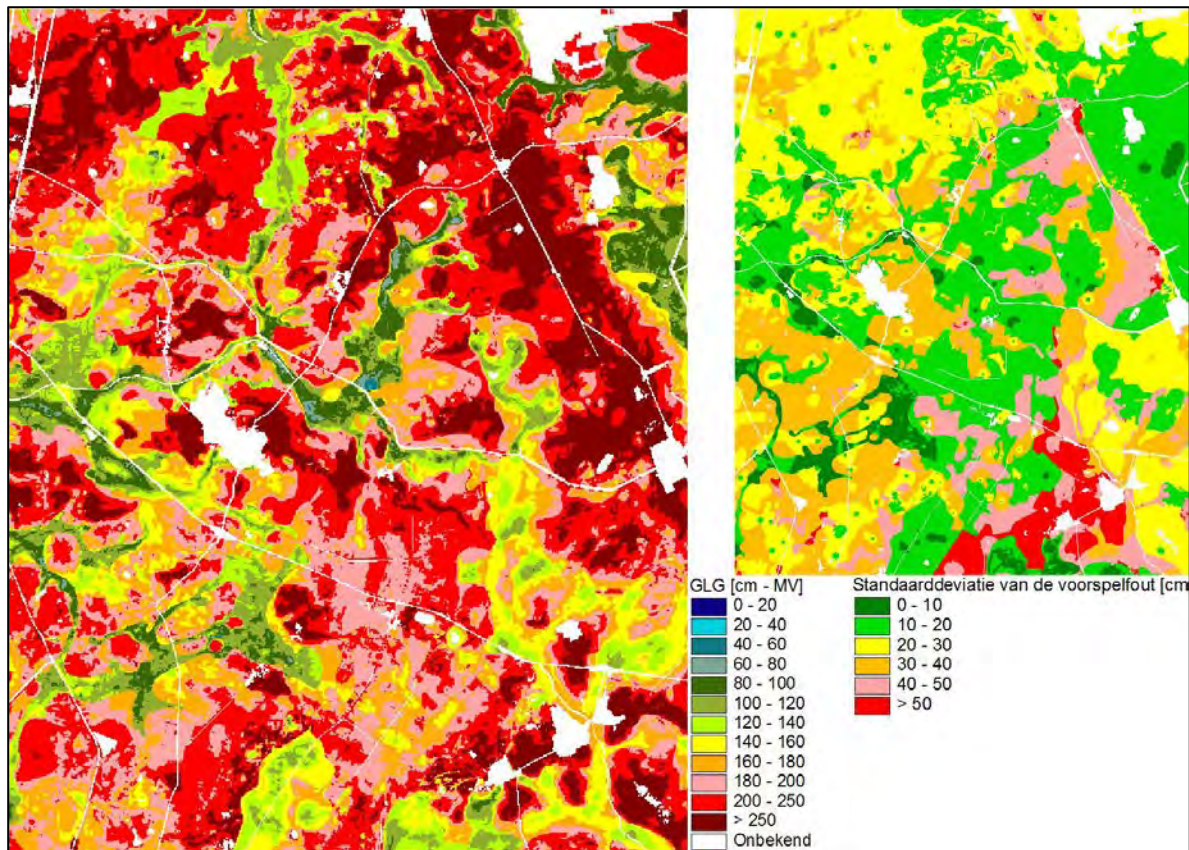
3.1.1 Probleemstelling

In het kader van de BasisRegistratie Ondergrond (BRO) moet voor elk vlak van de bodemkaart (schaal 1:50.000) de grondwatertrap (Gt) worden ingevoerd. De grondwatertrap kan worden bepaald op basis van de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) en de gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG). De GHG en de GLG worden hieronder met G×G aangeduid.

De grondwatertrap op de bodemkaart 1:50.000 is verouderd en dient te worden geactualiseerd. Voor Laag-Nederland is dit gedaan in het kader van BIS 2014. Voor Hoog Nederland is in 2004 een methodiek ontwikkeld om de G×G te voorspellen (en daarmee de grondwatertrap) op locaties die deel uitmaken van een fijn grid met een ruimtelijk resolutie van 25 bij 25 meter (de Gruijter *et al.*, 2004). Deze voorspellingen zijn gebaseerd op een groot aantal grondwaterstandsmetingen, zie ook Van Kekem *et al.* (2005). Voor elk gridpunt zijn niet één maar 300 mogelijke G×G's voorspeld met geostatistische simulatie. Deze voorspellingen worden realisaties genoemd. De realisaties weerspiegelen onze onzekerheid over de G×G op de gridpunten. Hoe groter de variatie in G×G tussen de realisaties hoe groter onze onzekerheid over de werkelijke G×G. Omgekeerd komt een kleine variatie in G×G overeen met relatief nauwkeurige voorspellingen. De meest nauwkeurige G×G's zullen we aantreffen in de buurt van waarnemingspunten. De G×G's zijn het minst nauwkeurig in gebieden met een lage waarnemingsdichtheid. Figuur 2 geeft voor een gebied rond Westerbork (Drenthe) de GHG-kaart de kaart van de standaardafwijkingen van de voorspelfouten GHG's. Figuur 3 geeft deze kaarten voor de GLG.



Figuur 2 GHG-kaart (links) en kaart van standaardafwijkingen van de voorspelfout van de GHG voor een deel van de provincie Drenthe (omgeving Westerbork)



Figuur 3 GLG-kaart (links) en kaart van standaardafwijkingen van de voorspelfout van de GLG voor een deel van de provincie Drenthe (omgeving Westerbork)

De Gruijter *et al.* (2004) hebben de resultaten van de simulaties destijds opgeslagen als 700 gecomprimeerde archiefbestanden (ZIP). Elk bestand heeft betrekking op een stukje van het pleistocene deel van Nederland, en bestaat uit 300 kaartfragmenten voor de GHG, en 300 voor de GLG. In totaal zijn er dus 420.000 kaartfragmenten beschikbaar. De gridpunten van de kaartfragmenten zijn verweven.

3.1.2 Doelstelling

Het doel van deze heranalyse is om:

1. De kaartfragmenten van De Gruijter *et al.* (2004) te gebruiken om de vlakken van de bodemkaart te vullen met grondwatertrapinformatie in het kader van de BRO;
2. Na te gaan welke grondwaterstands informatie (dataprodukten) nog meer kan worden vervaardigd;
3. Te inventariseren welke toepassingsmogelijkheden daarbij horen.

3.2 Werkwijze

De werkwijze is als volgt:

1. Samenvoegen van alle kaartfragmenten tot volledige kaarten van hoog Nederland, te weten, 300 kaarten van de GHG en 300 kaarten van de GLG;
2. Controleren of de gegevens van De Gruijter *et al.* (2004) compleet uit het archief zijn gehaald;
3. Ruimtelijk aggregeren van de 300 realisaties tot bruikbare statistieken.

3.3 Samenvoegen van kaartfragmenten

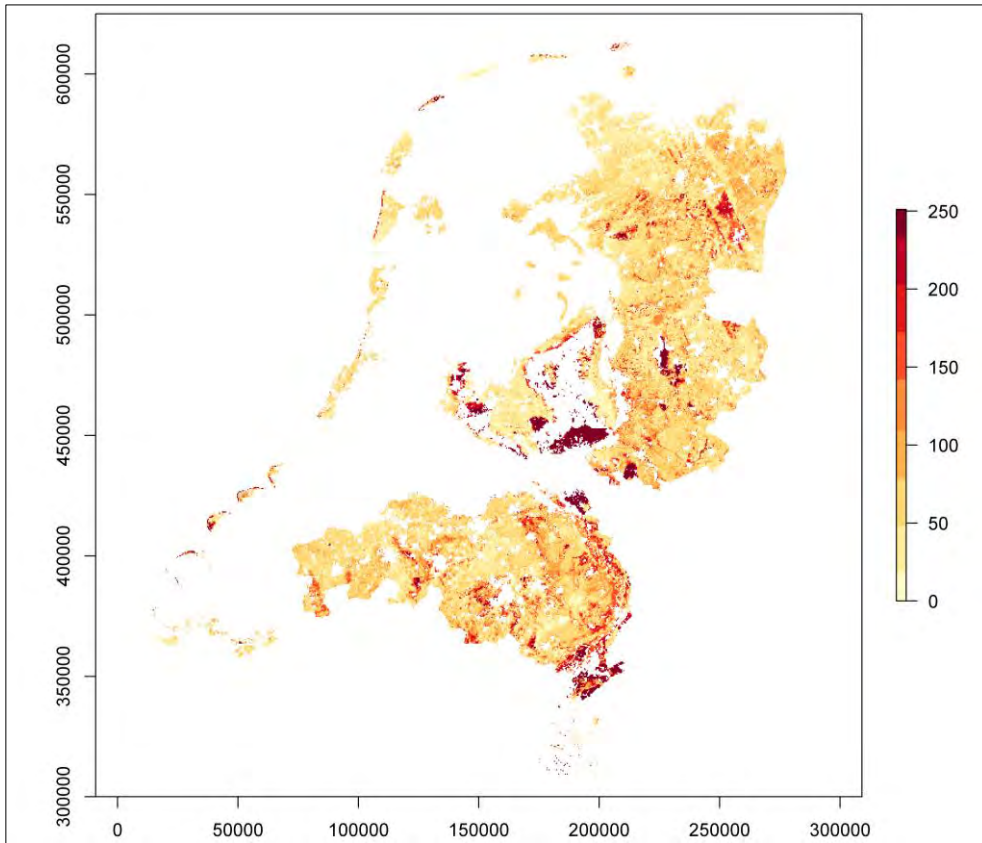
De eerste stap is om de 420 000 kaartfragmenten samen te voegen tot 300 kaarten van de GHG en 300 kaarten van de GLG. Dit is vergelijkbaar met het leggen van 600 legpuzzels, met dit verschil dat de kaartfragmenten niet aaneensluiten maar met elkaar verweven zijn. De gridpunten van de kaartfragmenten zijn weliswaar uniek, alleen kunnen de waarden van nabijgelegen gridpunten van meerdere kaartfragmenten afkomstig zijn.

Vervolgens worden de 600 kaarten samengevoegd tot één GHG-kaart en één GLG-kaart. Alle realisaties zijn dan opgeslagen in twee kaarten: één voor de GHG en één voor de GLG. Hieruit is vervolgens een kaart berekend die 300 realisaties van de Gt bevat.

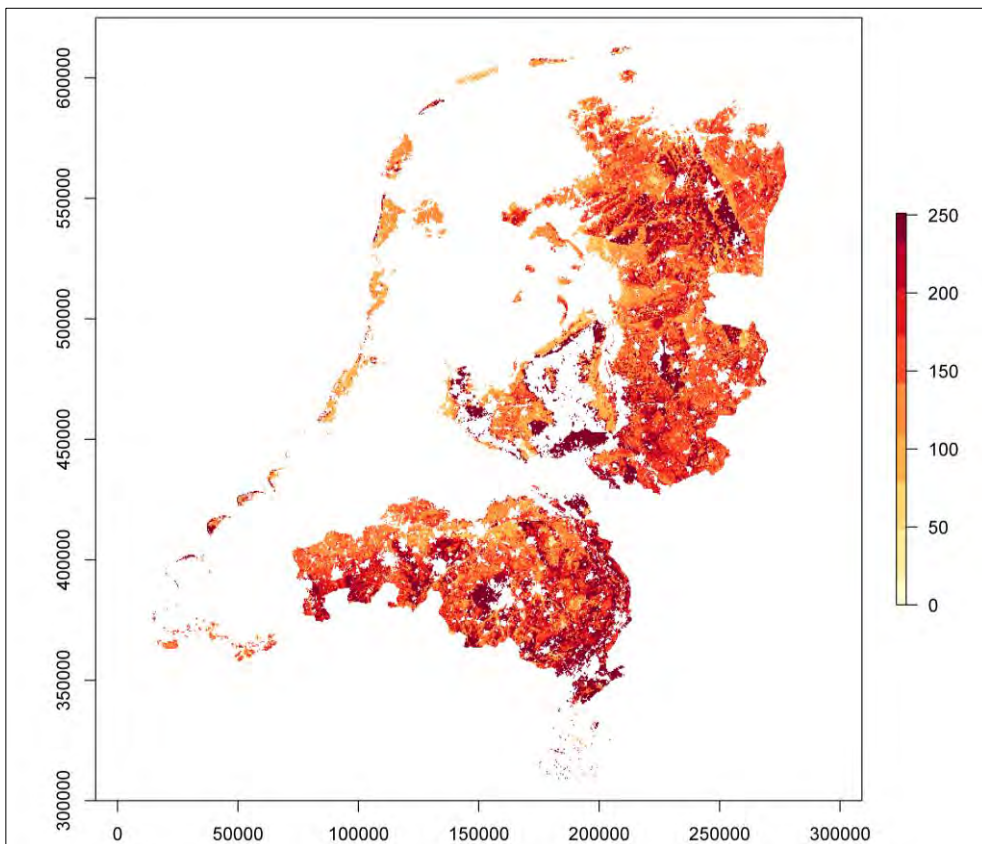
3.4 Controleren op compleetheid

Naast de realisaties bevatte het archief van De Gruijter *et al.* (2004) ook *predicties* van de GHG en GLG. Een predictie is gelijk aan het rekenkundig gemiddelde van alle mogelijk realisaties. De GHG- en GLG-predicties zijn beschikbaar als volledige kaarten en niet, zoals bij de realisaties, als kaartfragmenten. Deze zijn daarom geschikt om te controleren of we over alle kaartfragmenten beschikken en ze op de juiste plekken op de kaart zijn ingevoegd. Met andere woorden: klopt de puzzel die we gelegd hebben? Deze controle kan worden uitgevoerd door voor de GHG en GLG de 300 realisaties rekenkundig te middelen en de gemiddelden te vergelijken met de predicties. De gemiddelden zouden de predicties moeten benaderen.

Figuur 4 en Figuur 5 geven het gemiddelde van de realisaties voor de GHG, respectievelijk GLG.

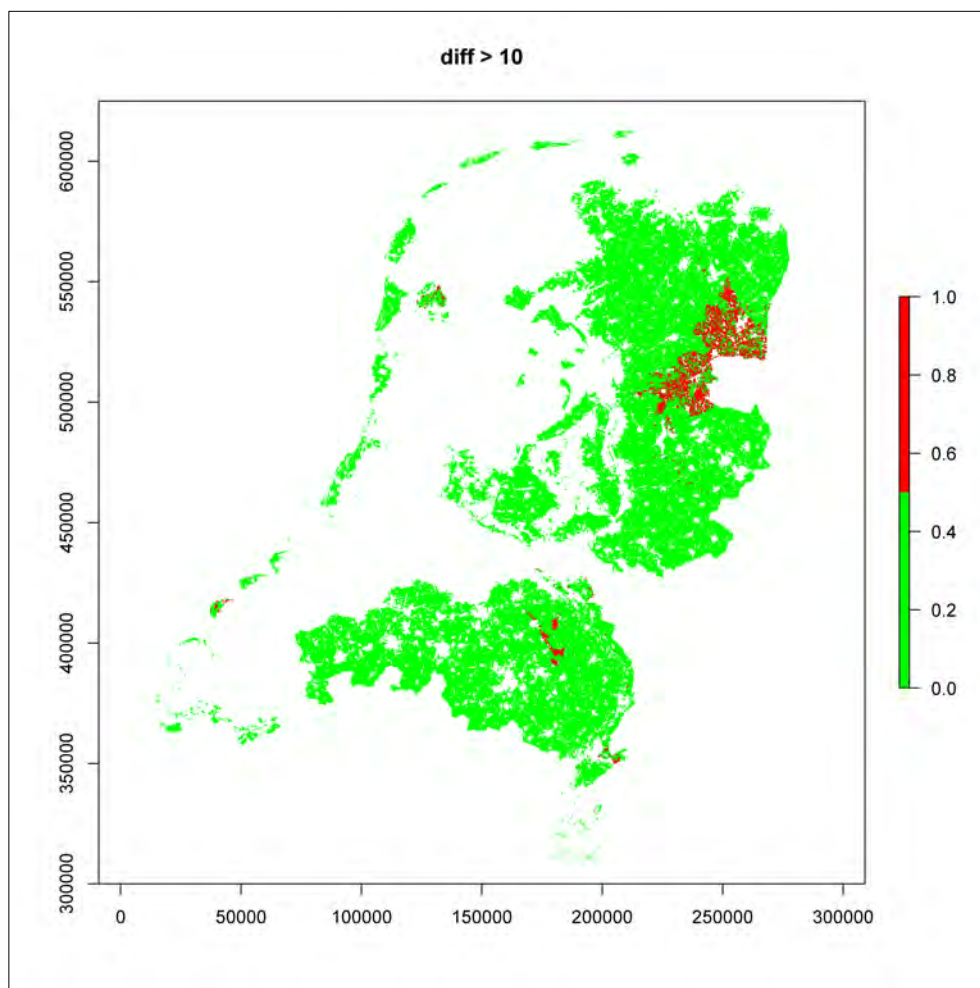


Figuur 4 Complete GHG-kaart van hoog Nederland (gemiddeld over realisaties) in cm

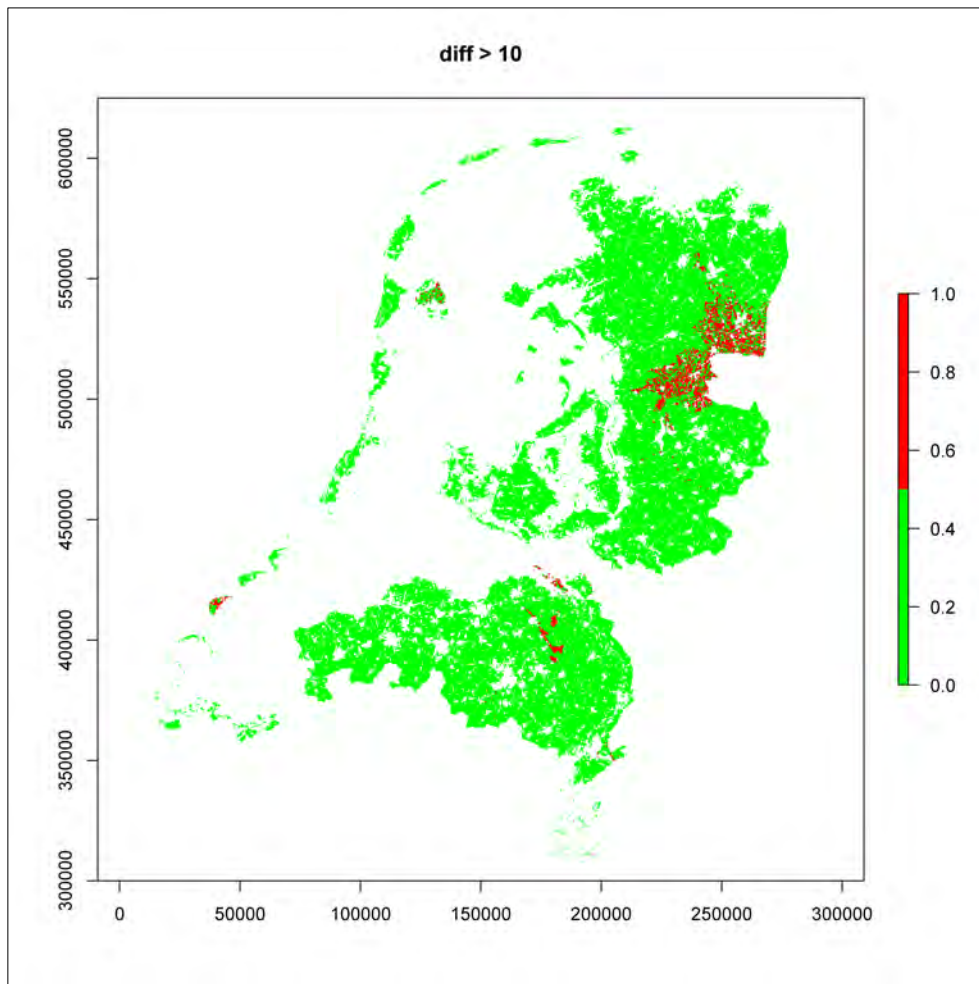


Figuur 5 Complete GLG-kaart van hoog Nederland (gemiddeld over realisaties) in cm

Als we deze kaarten vergelijken met de predicties van De Gruijter *et al.* (2004) zien we vooral verschillen in Drenthe en de Peel (Figuur 6 en Figuur 7). Dit komt doordat de GHG- en GLG-realisaties na het onderzoek van De Gruijter *et al.* (2004) plaatselijk zijn geactualiseerd.



Figuur 6 Verschil van de GHG kaart van hoog Nederland van de Gruijter *et al.* (2004) en de gemiddelde GHG over de realisaties. Verschillen groter dan 10 cm zijn rood; verschillen kleiner dan 10 cm zijn groen.



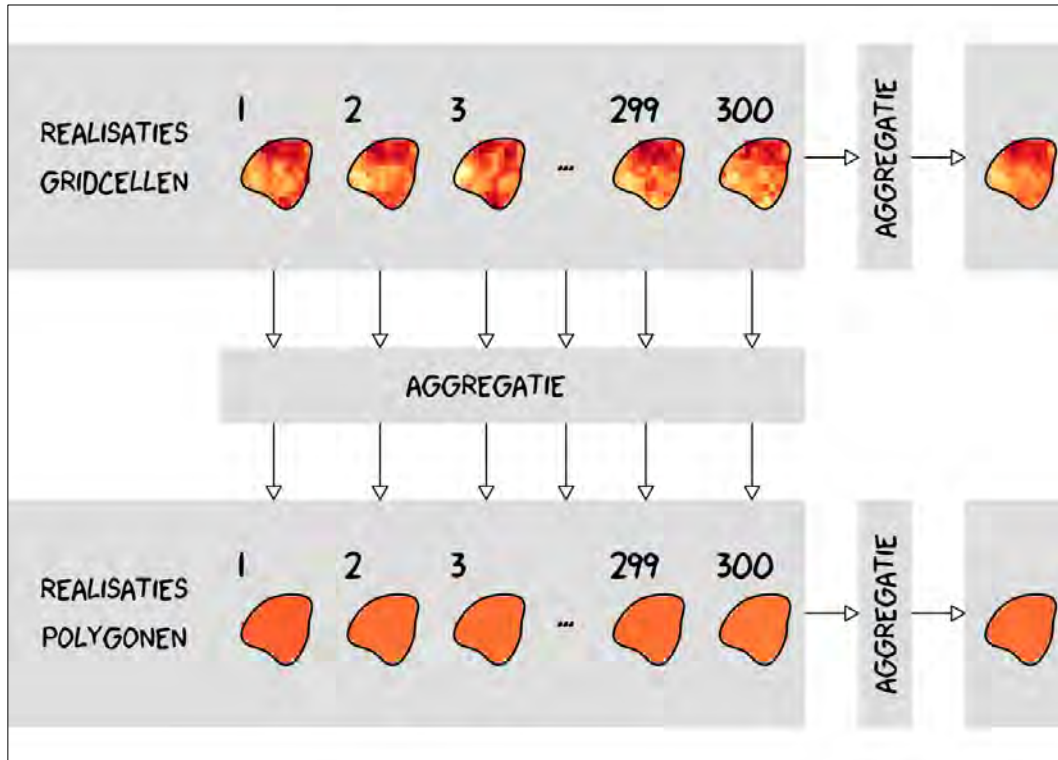
Figuur 7 *Vershil van de GLG kaart van hoog Nederland van de Gruijter et al. (2004) en de gemiddelde GLG over de realisaties. Verschillen groter dan 10 cm zijn rood, verschillen kleiner dan 10 cm zijn groen.*

3.5 Histogrammen en staafdiagrammen van geaggregeerde gegevens

Het doel is om voor elk vlak op de bodemkaart een Gt te bepalen. De Gt kan voor elk gridpunt worden bepaald op basis van de GHG en GLG. Voor elk gridpunt hebben we dan de beschikking over 300 GHG's, 300 GLG's en 300 Gt's. Een vlak op de bodemkaart bestaat uit meerdere gridpunten. Om te komen tot een enkele waarde voor elk vlak op de bodemkaart moeten we de waarden op de gridpunten binnen dit vlak aggregeren. Nadeel van het kiezen van een enkele waarde voor een vlak is dat we veel informatie verliezen. Daarom volgen we een generieke aanpak: we berekenen in eerste instantie een histogram of een staafdiagram, waaruit we in een later stadium een unieke waarde kunnen destilleren. Voor de GHG en GLG berekenen we een histogram omdat dit continue variabelen zijn. Deze geeft, voor verschillende bereiken van GHG of GLG, het aantal gridpunten weer met dit bereik. Voor een klassevariabele als de grondwatertrap gebruiken we in plaats van een histogram een staafdiagram. Deze geeft aan hoeveel gridpunten binnen het kaartvlak een bepaalde grondwatertrap hebben.

Een histogram kan op verschillende manieren worden berekend. De berekeningen voor een staafdiagram zijn vergelijkbaar, en worden daarom niet gegeven. In het onderstaande wordt gesproken over 'aggregeren'. Hieronder kan het ruimtelijke gemiddelde worden verstaan, maar ook een andere aggregatiemaat zoals de mediaan (=de middelste waarde van een aantal grootheden) of de modus (=de waarde die het vaakst voorkomt).

We onderscheiden vier vormen van aggregeren: geen, aggregatie over realisaties, ruimtelijke aggregatie en volledige aggregatie. Figuur 8 illustreert schematisch aggregatie op pixelniveau over 300 realisaties (horizontaal, bovenin), ruimtelijke aggregatie tot informatie op vlakniveau (verticaal), gevolgd door volledige aggregatie over de 300 realisaties (horizontaal, onderin).



Figuur 8 Schematische weergave van de opties voor aggregatie van informatie op pixelniveau tot informatie op vlakniveau, op het niveau van kaartvlakken.

De bovenste balk geeft - gaande van links naar rechts - de aggregatie weer van de 300 realisaties die voor elke gridcel in een kaartvlak zijn berekend. Deze wordt gekwantificeerd door van elke gridcel het gemiddelde van de $G \times G$ over 300 realisaties te berekenen, of door de modus van de 300 Gt 's te nemen.

In neergaande richting wordt ruimtelijke aggregatie gesymboliseerd van alle gridcellen binnen een kaartvlak. Deze aggregatie wordt voor alle 300 realisaties afzonderlijk uitgevoerd, met als resultaat een gemiddelde ($G \times G$) of een modus (Gt) van het betreffende kaartvlak.

De onderste balk illustreert van links naar rechts hoe de 300 realisaties van deze informatie op kaartvlakniveau vervolgens worden geaggregeerd tot een gemiddelde ($G \times G$) of een modus (Gt).

In onderstaande paragrafen wordt kort ingegaan op elke methode.

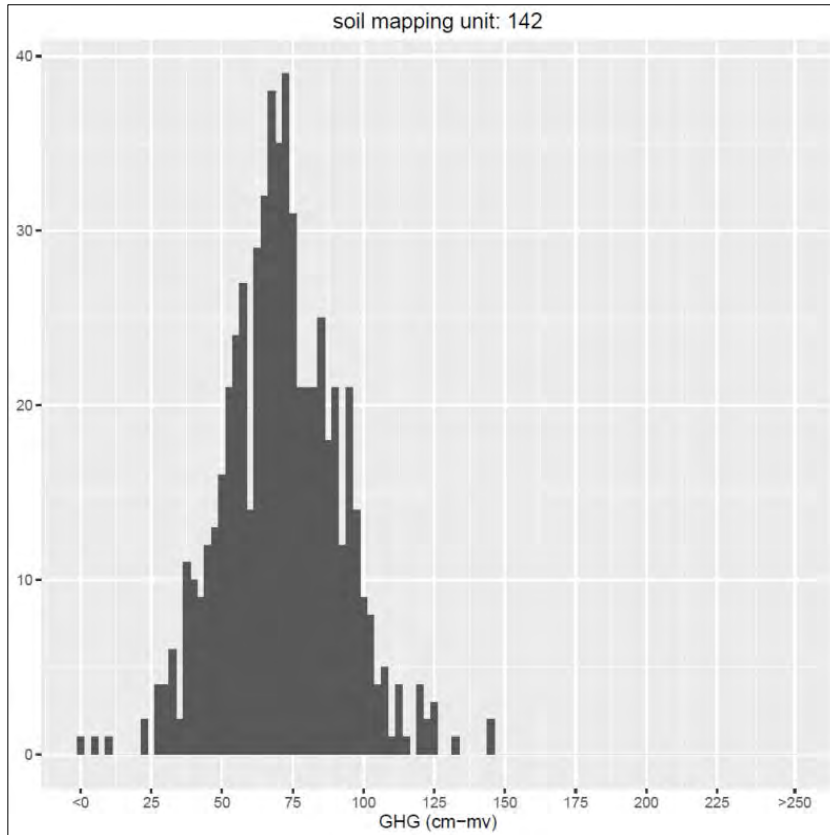
3.5.1 Geen aggregatie

Het histogram wordt berekend voor alle p realisaties van de $G \times G$ op alle n gridpunten binnen het kaartvlak. Dit histogram weerspiegelt zowel de ruimtelijke variatie binnen het kaartvlak als onze onzekerheid ten gevolge van ruimtelijke interpolatie; zie Figuur 9.

In symbolen:

$$f_b = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \delta_b(v_{ij}) \text{ voor elk interval } b$$

waarin: v_{ij} de $G \times G$ is op gridpunt i en voor realisatie j , b een interval op de x-as is van het histogram van de $G \times G$, δ_b een indicatorfunctie is die gelijk is aan 1 als het argument (in dit geval v_{ij}) in interval b van het histogram ligt, en is anders gelijk aan 0, n het aantal gridpunten is en p het aantal realisaties.



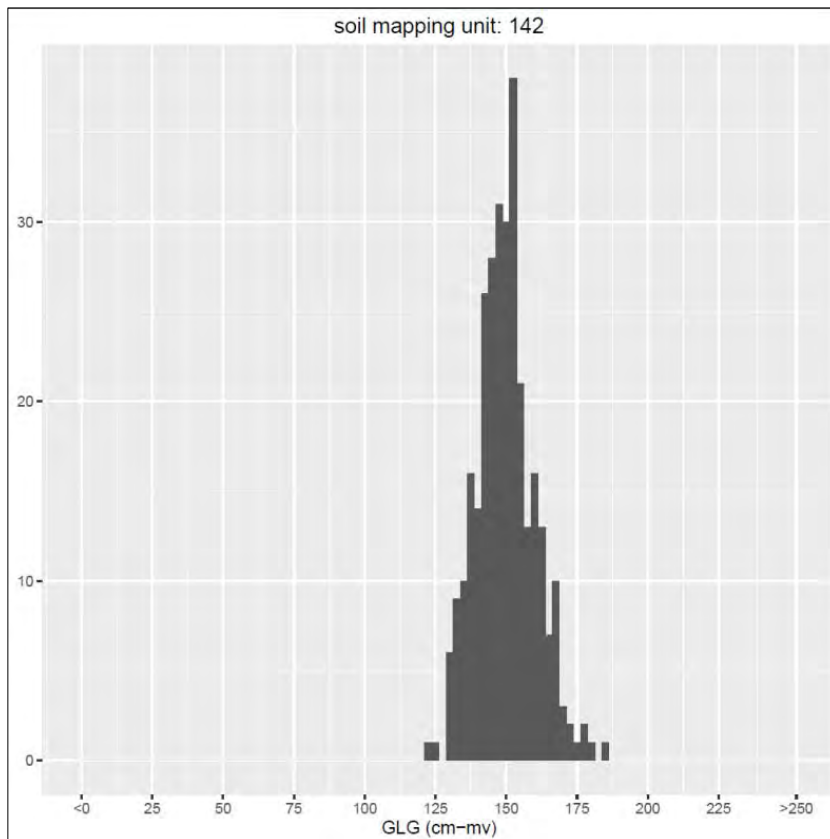
Figuur 9 Voorbeeld van een histogram zonder aggregatie. De breedte van een staaf komt overeen met interval b .

3.5.2 Ruimtelijke aggregatie

Eerst wordt voor elke realisatie de $G \times G$ op alle gridpunten geaggregeerd. Vervolgens wordt hiervan het histogram berekend. In symbolen:

$$f_b = \sum_{j=1}^p \delta_b(\bar{v}_j) = \sum_{j=1}^p \delta_b\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{ij}\right) \text{ voor elk interval } b$$

Ten gevolge van de ruimtelijke aggregatie hebben deze histogrammen een kleinere spreiding dan wanneer niet wordt geaggregeerd; zie Figuur 10. Deze histogrammen weerspiegelen onze onzekerheid over de vlakgemiddelden.



Figuur 10 Voorbeeld van een histogram na ruimtelijke aggregatie. De breedte van een staaf komt overeen met interval b

3.5.3 Aggregatie over realisaties

Eerst worden per gridpunt alle realisaties geaggregeerd. Vervolgens wordt hiervan het histogram berekend.

$$f_b = \sum_{i=1}^n \delta_b(\bar{v}_i) = \sum_{i=1}^n \delta_b\left(\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p v_{ij}\right) \text{ voor elk interval } b$$

3.5.4 Volledige aggregatie

Alle realisaties voor alle gridpunten worden geaggregeerd tot een enkele waarde.

$$\bar{v}_{..} = \frac{1}{np} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p v_{ij}$$

We weten in dit geval niets meer over de variatie binnen een kaartvlak en de nauwkeurigheid van de voorspellingen.

3.6 Dataproducten

Op basis van de gegevens van De Gruijter *et al.* (2004) is voor Hoog Nederland een groot aantal dataproducten afgeleid. Deze producten zijn beschikbaar in de formaten:

- *Band Interleaved by Pixel (BIP)*: de eerste 300 waarden corresponderen met de realisaties voor het eerste gridpunt, de tweede 300 waarden corresponderen met de realisaties voor het tweede gridpunt, enz. Een BIP-bestand gaat altijd gepaard met een header-bestand (HDR) waarin

metainformatie over de kaart is opgeslagen (datatype, aantal bits, gridafstand, aantal rijen en kolommen, etc.).

- *Band Interleaved by Line* (BIL): de kaarten (banden) worden na elkaar opgeslagen. Eerst alle waarden van kaart 1, dan alle waarden van kaart 2, enz. Ook een BIL-bestand gaat altijd gepaard met een header file (HDR) met metainformatie.
- *Comma separated values*: elke rij heeft betrekking op een kaartvlak en geeft het aantal gridpunten per histograminterval ($G \times G$) of staafdiagramklasse (Gt). De aantallen zijn door komma's gescheiden.

Deze formaten kunnen met GIS of met een programmeertaal naar keuze worden bewerkt. De BIP en BIL-formaten maken efficiënte dataverwerking mogelijk (*direct access*).

We onderscheiden twee categorieën van dataproducten. Dataproducten op gridcelbasis en dataproducten op kaartvlakbasis. Deze worden hieronder gegeven.

3.6.1 Dataproducten op gridcelbasis

De dataproducten op gridcelbasis gooien geen informatie weg. Deze bestanden kunnen worden gebruikt om voor willekeurige kaartvlakken statistieken te berekenen. De dataproducten op kaartvlakbasis zijn op deze wijze samengesteld.

1. 300 realisaties van de GHG voor een 25×25 meter grid. Dit bestand is opgebouwd uit de kaartfragmenten van De Gruijter *et al.* (2004). Er is geen aggregatie toegepast. Dataformaat: BIP.
2. 300 realisaties van de GLG voor een 25×25 meter grid. Dit bestand is opgebouwd uit de kaartfragmenten van De Gruijter *et al.* (2004). Er is geen aggregatie toegepast. Dataformaat: BIP.
3. 300 realisaties van de Gt voor een 25×25 meter grid. Dit bestand is opgebouwd uit de kaartfragmenten van De Gruijter *et al.* (2004). Er is geen aggregatie toegepast. Dataformaat: BIP.
4. Het rekenkundig gemiddelde van de GHG over 300 realisaties voor een 25×25 meter grid. Dit bestand benadert de predicties van De Gruijter *et al.* (2004). Dataformaat: BIL.
5. Het rekenkundig gemiddelde van de GLG over 300 realisaties voor een 25×25 meter grid. Dit bestand benadert de predicties van De Gruijter *et al.* (2004). Dataformaat: BIL.
6. De modale (meest voorkomende) Gt per gridpunt. Dataformaat: BIL.

3.6.2 Dataproducten op kaartvlakbasis

Deze dataproducten zijn vervaardigd op basis van de hierboven beschreven aggregatiemethoden. Het dataformaat is telkens CSV. In totaal zijn er 51750 kaartvlakken waarvoor een GHG, GLG, of Gt moet worden berekend.

1. Histogrammen van de GHG's op de gridpunten in elk kaartvlak van de bodemkaart 1:50.000;
2. Histogrammen van de GLG's op de gridpunten in elk kaartvlak van de bodemkaart 1:50.000;
3. Histogrammen van de ruimtelijk gemiddelde GHG's voor elk kaartvlak van de bodemkaart 1:50.000;
4. Histogrammen van de ruimtelijk gemiddelde GLG's voor elk kaartvlak van de bodemkaart 1:50.000;
5. Histogrammen van de gemiddelde GHG's per gridpunt voor elk kaartvlak van de bodemkaart 1:50.000;
6. Histogrammen van de gemiddelde GLG's per gridcel voor elk kaartvlak van de bodemkaart 1:50.000;
7. Staafdiagrammen van de Gt's op de gridpunten in elk kaartvlak van de bodemkaart 1:50.000;
8. Staafdiagrammen van de ruimtelijk geaggregeerde modale Gt in elk kaartvlak van de bodemkaart 1:50.000;
9. Staafdiagrammen van de modale Gt per gridpunt in elk kaartvlak van de bodemkaart 1:50.000.

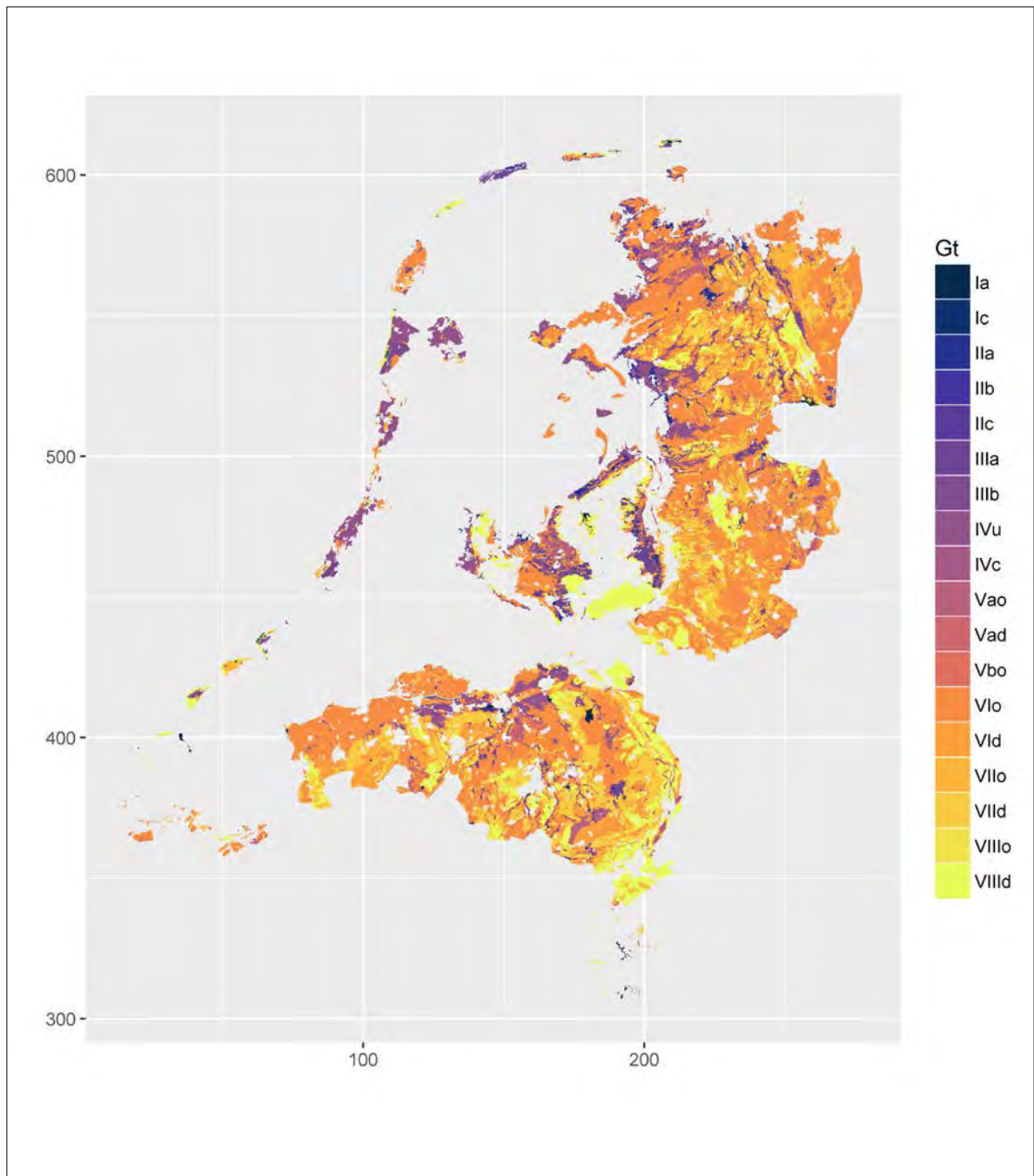
3.7 Use Cases

3.7.1 Case 1: actualiseren van vlakken van de bodemkaart

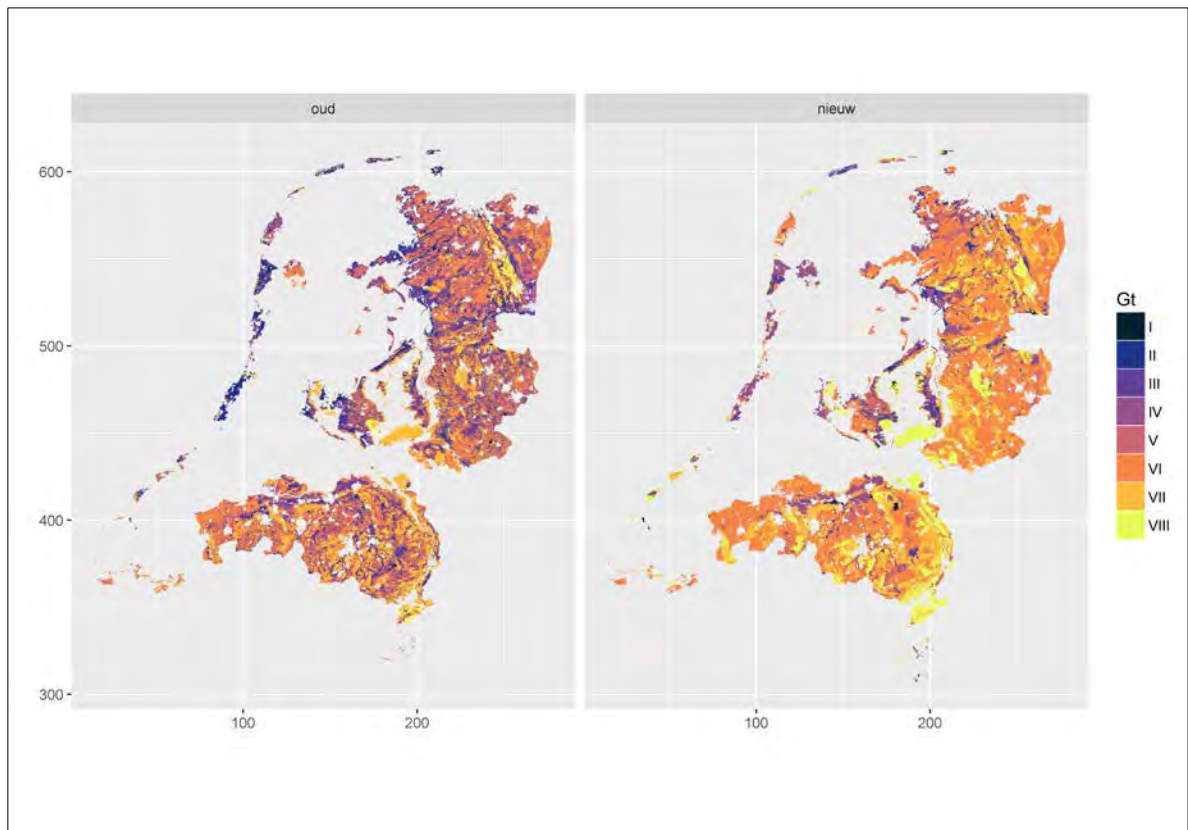
Deze *use case* is op korte termijn het meest relevant voor de BRO. De vlakken van de bodemkaart 1:50.000 bevatten veelal verouderde grondwatertrapinformatie. Om deze te actualiseren naar de periode van de Gd-kartering kan de modus van de staafdiagrammen van de ruimtelijke geaggregeerde modale Gt worden gebruikt. Samengevat komt deze informatie per kaartvlak als volgt tot stand:

1. Voor elke realisatie wordt per gridpunt de Gt bepaald uit de GHG en GLG. Dit levert 300 gridkaarten van Gt's op voor het kaartvlak (vlak linksboven in Figuur 8, op pagina 22).
2. Voor elk van deze gridkaarten van Gt's wordt de modale (meest voorkomende) Gt binnen het kaartvlak bepaald. Dit levert 300 'meest voorkomende' Gt's op. De spreiding hierin geeft de onzekerheid weer over de Gt die het meeste voorkomt in het kaartvlak (vlak linksonder in Figuur 8).
3. Uit het staafdiagram van de 300 'meest voorkomende' Gt's selecteren we de modus. Dit is de langste staaf, de Gt dus die het vaakst als meest voorkomend is gevonden. Deze Gt kan worden beschouwd als de meest waarschijnlijke actuele Gt voor het betreffende kaartvlak (vlak rechtsonder in Figuur 8).

Opgemerkt moet worden dat volgens bovenstaande procedure de Gt-kaart wordt geactualiseerd naar de situatie zoals deze was in de periode dat de Gd-kaart van hoog Nederland werd vervaardigd, dat is de periode 1999-2004, zie De Gruijter *et al.* (2004) en Van Kekem *et al.* (2005). Sinds 2004 kunnen door ingrepen in de waterhuishouding veranderingen in het grondwaterregime zijn opgetreden. Ook klimaatverandering kan een effect hebben. Om vast te stellen of en waar deze informatie over Gt en G×G inmiddels is verouderd en een eventuele prioriteitsvolgorde voor actualisaties vast te stellen is een herhaling van een analyse nodig zoals destijds is ontwikkeld en uitgevoerd door Finke *et al.* (1994, 1998). Figuur 11 geeft de geactualiseerde Gt-kaart.



Figuur 11 Geactualiseerde Gt-kaart van hoog Nederland. De kaart geeft de situatie weer in 2004. Ter vergelijking geeft Figuur 12 de geactualiseerde Gt-kaart naast de tot nu toe gebruikte Gt-kaart 1:50.000 weer.



Figuur 12 Links: de Gt's in hoog Nederland volgens de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000 (opname ca. 1960-1990). Rechts: de actuele Gt's in hoog Nederland (2004), afgeleid van de Gd-kaart.

Uit Figuur 12 blijkt dat de Gt op veel locaties is 'opgeschoven' naar een diepere klasse. Deze verandering heeft plaatsgevonden tussen de opname van de bodem- en Gt-kaart van Nederland, schaal 1:50.000 (1960-1990) en de opname van de Gd-kaart (1999-2004). De verschuiving van nattere naar drogere Gt's blijkt ook uit de frequenties in Tabel 1. Van alle kaarteenheden die op de oorspronkelijke kaart als Gt I waren aangegeven is 11% op de geactualiseerde kaart Gt I gebleven. De overige 89% heeft op de geactualiseerde kaart een diepere Gt gekregen.

Uit Tabel 1 blijkt dat vooral bij Gt III, IV en V op de oorspronkelijke kaart verschuivingen zijn opgetreden naar Gt VI. Een verklaring ligt mogelijk in het effect van waterbeheersingsmaatregelen die sinds de oorspronkelijke kartering hebben plaatsgevonden met als doel landbouwgronden sterker te ontwateren.

Tabel 1 Relatieve frequenties (%) van Gt's op de geactualiseerde kaart voor hoog Nederland, 1:50.000 per Gt op de oorspronkelijke Gt-kaart, 1:50.000

Oorspronkelijke Gt-kaart	Geactualiseerde Gt-kaart							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
-	3	5	7	5	4	35	23	19
I	11	18	31	10	9	12	3	4
II	2	8	25	30	3	28	3	1
III	1	2	15	11	4	57	8	2
IV	0	0	5	24	1	57	11	1
V	0	0	3	2	10	66	17	2
VI	0	0	2	3	2	60	28	5
VII	0	0	1	1	1	18	36	44
VIII	0	0	0	0	1	3	21	76

3.7.2 Case 2: Beschrijven inhoud vlakken van de bodemkaart

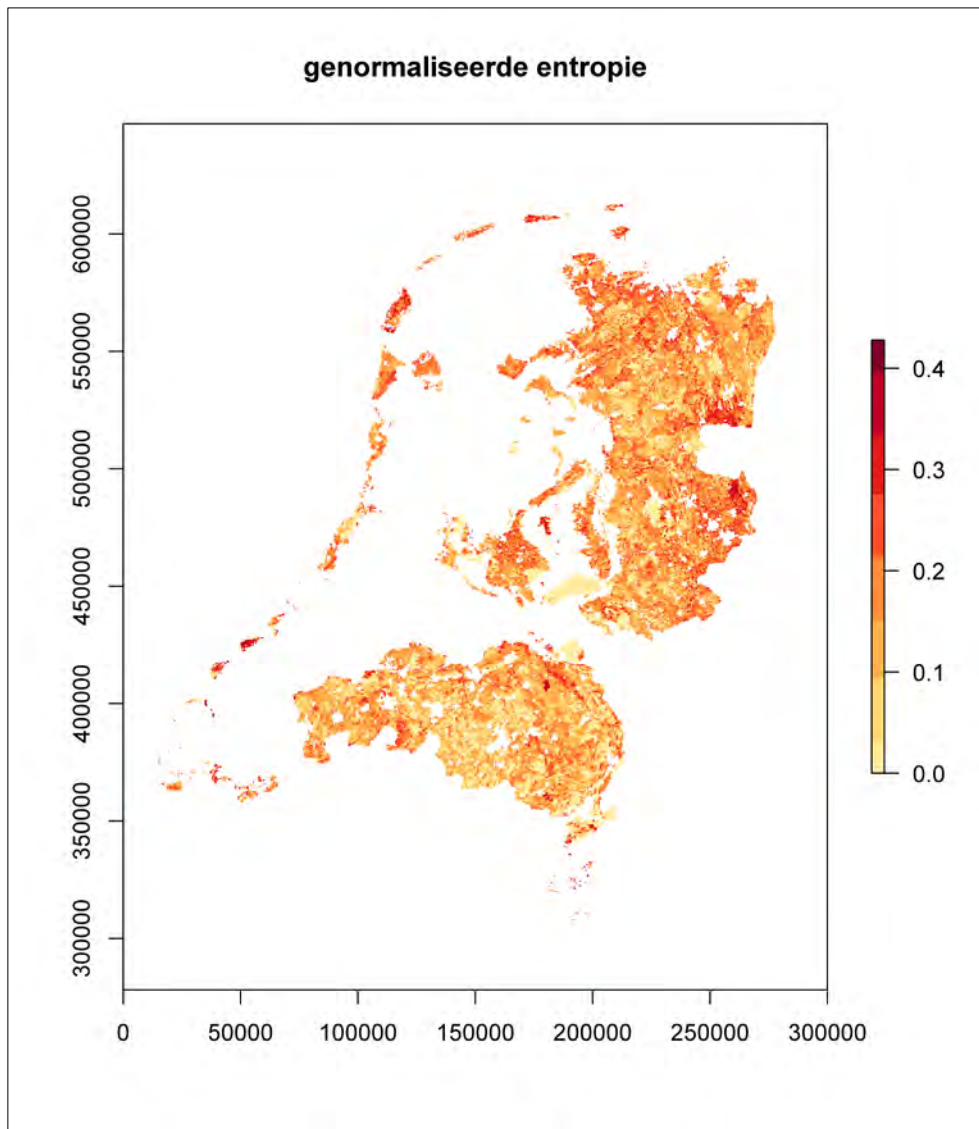
Een kaartvlak van de bodemkaart 1:50.000 geeft meestal één Gt-code aan; alleen bij associaties worden meerdere codes aangegeven. Voor verschillende toepassingen kan het echter nodig zijn om een verdeling van Gt's binnen een kaartvlak te kennen. Denk hierbij aan schadeberekeningen en het prioriteren van onderzoek (zie hierna). De Gt's die per realisatie per gridpunt zijn bepaald kunnen bijvoorbeeld worden gebruikt bij de berekening van opbrengstdepressies. Voor een kaartvlak met n gridpunten worden dan $n \times 300$ opbrengstdepressies worden berekend waaruit vervolgens bijvoorbeeld de verwachte opbrengstdepressie kan worden berekend door het gemiddelde te nemen (bovenste deel van Figuur 8, op pagina 22).

3.7.3 Case 3: prioriteren van onderzoek

Omdat van elk kaartvlak een histogram beschikbaar is, kennen we de heterogeniteit van de G×G's en Gt's binnen de kaartvlakken. In combinatie met de oppervlakte van elk kaartvlak kan deze informatie over heterogeniteit worden gebruikt om veldwerk te prioriteren. De grootste kaartvlakken met de meest heterogene inhoud moeten dan eerst worden geactualiseerd. Als maat voor de heterogeniteit binnen een vlak is de zogenoemde *genormaliseerde entropie* berekend. Deze is gelijk aan 0 als de kans op één enkele grondwatertrap op een willekeurige locatie binnen een vlak gelijk is aan 1. Als elke grondwatertrap evenveel kans heeft voor te komen op een willekeurige locatie binnen een vlak, dan is de genormaliseerde entropie gelijk aan 1. Hoe kleiner de genormaliseerde entropie, des te homogener een kaartvlak qua Gt zal zijn. De genormaliseerde entropie voor de variatie in Gt-klassen binnen een kaartvlak wordt als volgt berekend:

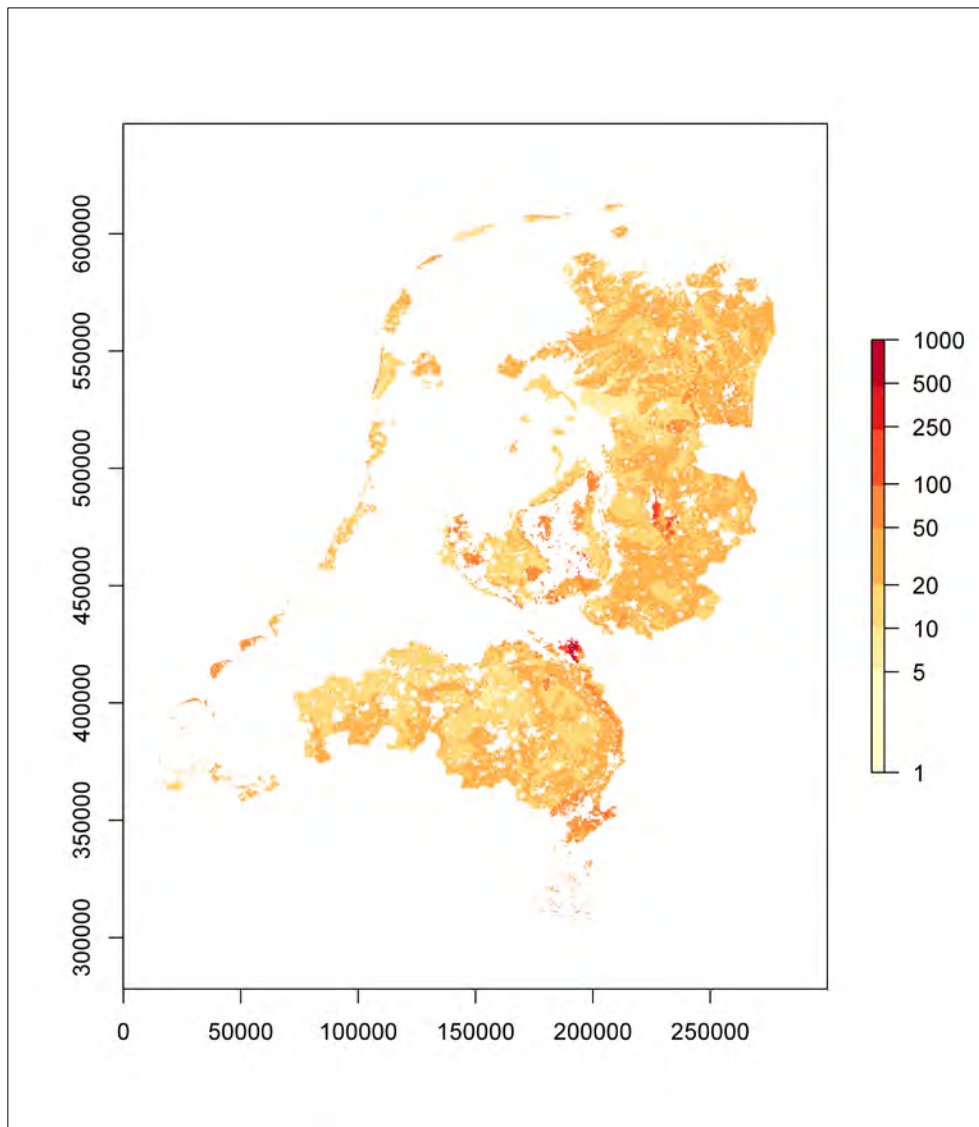
$$H = - \frac{\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i)}{\log_2(n)}$$

waarin p_i de kans is op Gt-klasse $i, i = 1 \dots n$ op een willekeurig pixel binnen het vlak, en n het totale aantal Gt-klassen dat in het stratum voorkomt. Figuur 13 geeft een kaart van de genormaliseerde entropie van de kaartvlakken.



Figuur 13 Kaart van genormaliseerde entropie van de Gt per kaartvlak. Hoe kleiner de genormaliseerde entropie, hoe homogener de inhoud van een vlak is.

Figuur 14 geeft de varianties van voorspelfouten in GHG's op de gridpunten. Deze zijn berekend uit de 300 realisaties van GHG-kaarten (bovenste deel in Figuur 8 op pagina 22). Figuur 14 kan worden gebruikt om gebieden te selecteren waar de nauwkeurigheid van de GHG-kaart laag is en waarvoor de prioriteit om extra waarnemingen te verrichten dus hoog is.



Figuur 14 Variantie van de voorspelfout van de GHG (cm²). Hoe groter, hoe meer onzekerheid en hoe hoger de prioriteit voor actualisatie.

Opgemerkt moet worden dat de informatie over heterogeniteit is gebaseerd op een statistisch model dat geassembleerd is met waarnemingen die zijn verzameld in de periode 1999-2004, zie De Grijter *et al.* (2004) en Van Kekem *et al.* (2005). Om vast te stellen of en waar deze informatie over Gt en G×G inmiddels is verouderd en een eventuele prioriteitsvolgorde voor actualisaties vast te stellen is een herhaling van een analyse nodig zoals destijds is ontwikkeld en uitgevoerd door Finke *et al.* (1994, 1998).

3.7.4 Case 4: Modelstudies en -analyses

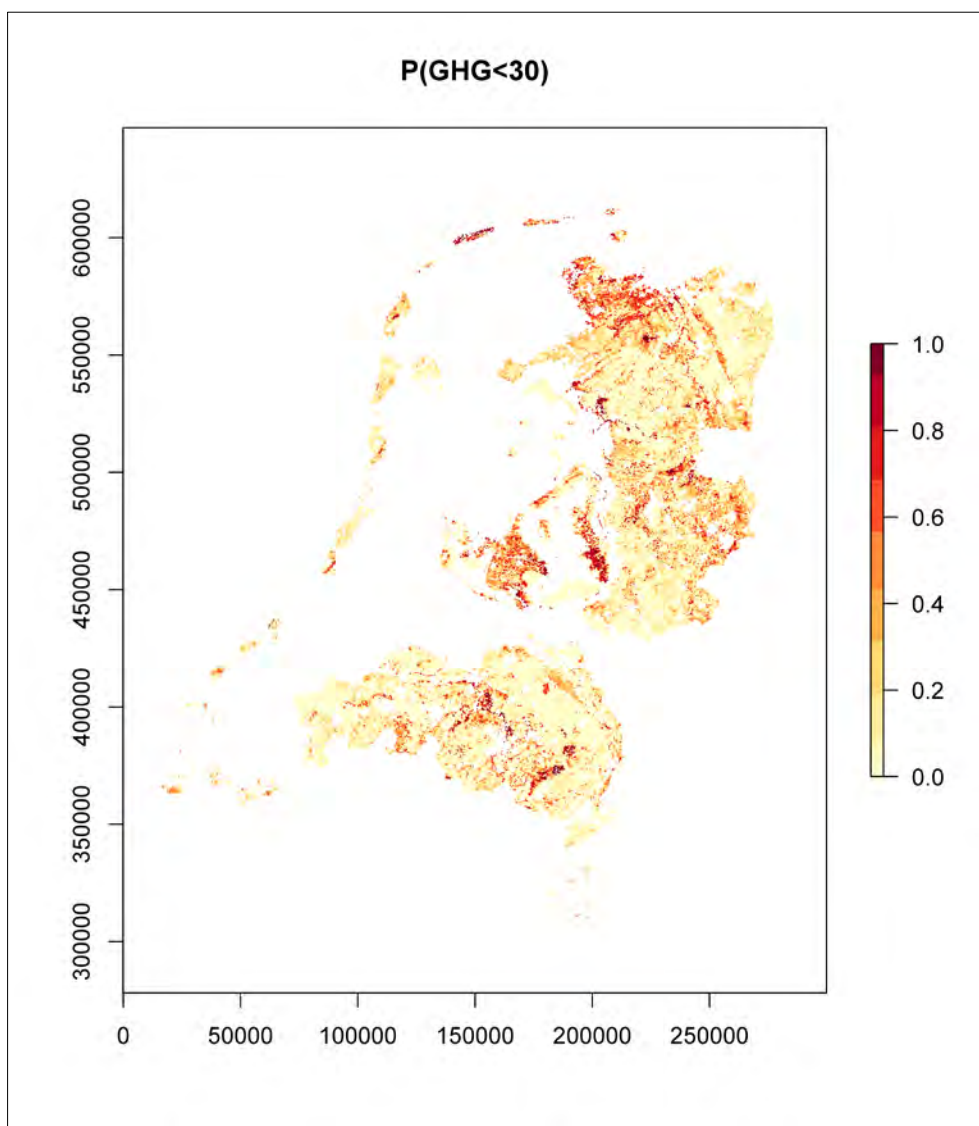
Veel rekenmodellen maken gebruik van grondwaterstandsgegevens. Denk bijvoorbeeld aan de MetaNatuurPlanner (MNP), PLEASE (fosfaatmodel), en de metamodellen gewasschade van WaterWijzer Landbouw. Door realisaties van de G×G of van grondwatertrappen als modelinvoer te gebruiken kan onze onzekerheid ten gevolge van fouten in de grondwaterstandskarakteristieken worden doorgerekend.

Het gebruik van realisaties is met name van belang bij niet-lineaire modellen, omdat anders systematische fouten kunnen worden geïntroduceerd. Een voorbeeld hiervan is de toepassing door Finke *et al.* (2001) van de Gd-informatie bij het vaststellen van het actuele grondwaterregime (AGR), het optimale grondwaterregime (OGR) en het vaststellen van de bereikte doelrealisatie in het gebied 'De Leijen'. Hierbij werd voor het berekenen van de natschade uitgegaan van de grondwaterregime-curve, dat is de curve van het gemiddelde jaarlijkse grondwaterstandsverloop. Omdat ook de

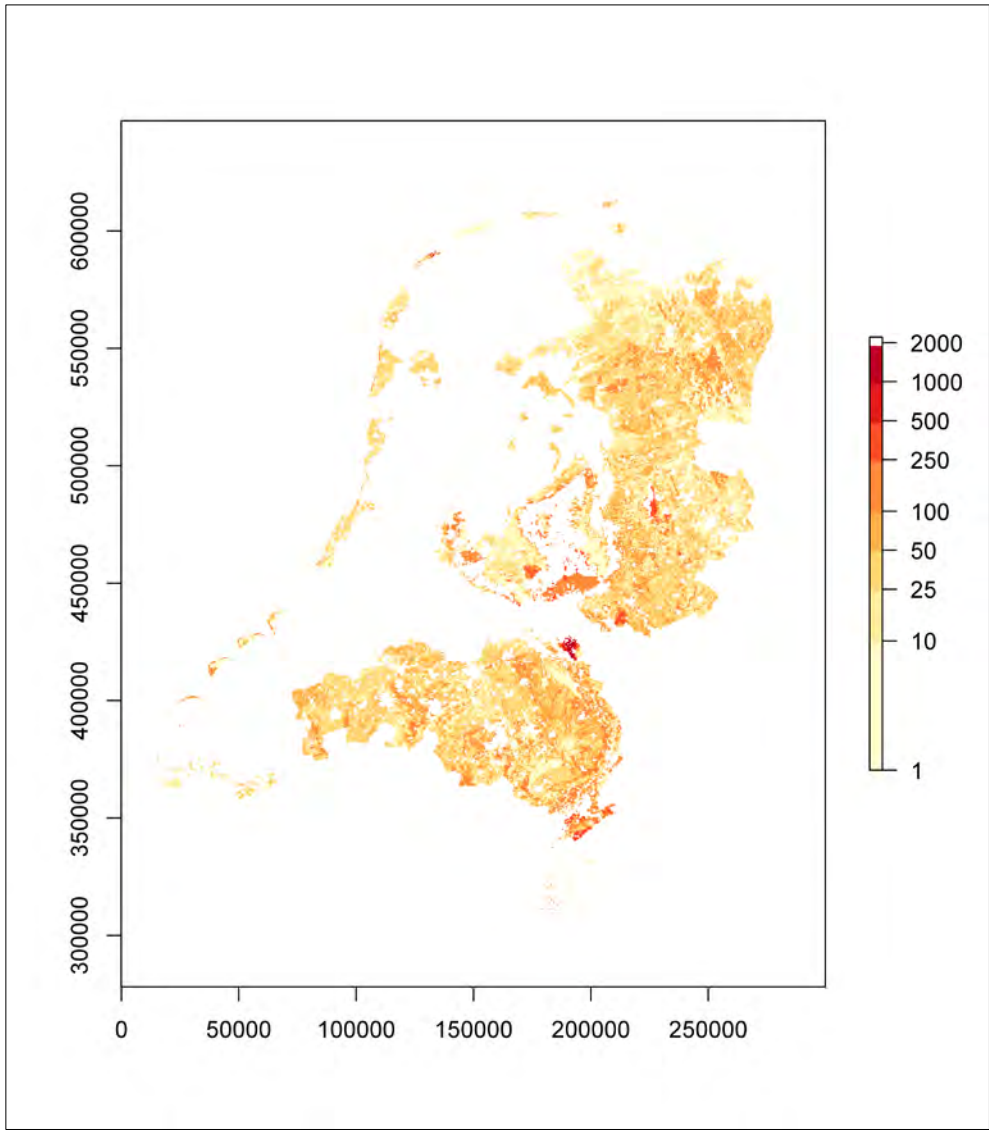
spreiding rond deze curve bekend is kon de kans worden berekend dat de grondwaterstand op een bepaald tijdstip een bepaald kritisch niveau overschrijdt. De natschade die vervolgens werd berekend bleek twee- à driemaal hoger te zijn dan wanneer deze zou worden berekend met de HELP-tabellen (Werkgroep HELP-tabel, 1987).

3.7.5 Case 5: Overschrijdingskansen

Voor natuurontwikkeling, maar ook voor infrastructurele werken is het van belang om te weten hoe groot de kans is dat de GHG boven een kritische waarde ligt (ondieper; natter). Met de beschikbare dataproducten over grondwaterdynamiek kan die kans voor elk vlak of voor elk gridpunt binnen een vlak worden uitgerekend. Figuur 15 geeft hiervan een voorbeeld. Andersom kan ook worden berekend welke GHG of GLG met een bepaalde, vooraf vastgestelde, waarschijnlijkheid op een gridpunt of in een kaartvlak wordt overschreden. Hiervan geeft Figuur 16 een voorbeeld. Een voorbeeld van een toepassing van overschrijdingskansen is de methode voor aanwijzing van percelen die gevoelig zijn voor de uitspoeling van nitraat (De Gruijter *et al.*, 2004).



Figuur 15 De kans dat de GHG ondieper is dan 30 cm beneden maaiveld.



Figuur 16 De kans dat de GHG zich dieper bevindt dan de waarde op de kaart (cm) is 0,9.

4 Werkplan realisatie landsdekkende Gd-kaart

4.1 Doelstellingen

Met het afronden van het in deze rapportage beschreven project bevatten alle kaartvlakken van de nieuwe versie van de 1:50.000 bodemkaart van Nederland de volgende informatie:

- frequentieverdelingen van de actuele GHG en GLG, zie paragraaf 3.5 op pagina 21;
- frequentieverdelingen van de actuele Gt;
- actuele Gt-klassen.

Tijdens de Gt-actualisatie ten behoeve van de ontwikkeling van het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS) dat in beheer is bij Wageningen Environmental Sciences² zijn in 2014 de frequentieverdelingen vastgesteld van GHG, GLG en Gt in 59 strata (deelgebieden) van *laag Nederland*.

In hoofdstuk 3 is beschreven hoe in het kader van de BRO - in navolging op de in 2014 uitgevoerde Gt-actualisatie van laag Nederland - voor de kaartvlakken in *hoog Nederland*, waarvan een weliswaar gedateerde (2004) maar gedetailleerde Gd-kaart beschikbaar is, per kaartvlak van de bodem- en Gt-kaart 1:50.000 een beschrijving van de grondwaterkarakteristieken is opgesteld. Uit de Gd-informatie uit 2004 zijn voor elk kaartvlak de actuele Gt-klasse alsmede frequentieverdelingen van actuele Gt's en GHG's en GLG's afgeleid.

Het gemeenschappelijk resultaat van beide projecten is dat nu, landsdekkend, per (groep van) kaartvlak(ken) met een specifieke Gt-klasse, uniforme informatie over Gt, GHG en GLG beschikbaar is. Deze informatie is echter van wisselende actualiteit, namelijk 2014 voor laag Nederland en 2004 voor hoog Nederland. Bovendien verschilt de onderliggende methodiek: een kanssteekproefbenadering voor laag Nederland en een geostatistische benadering voor hoog Nederland. Paragraaf 1.1 geeft de argumenten voor deze verschillen in benadering. Door het verschil in actualiteit en benadering kan de kwaliteit van de grondwaterstands-informatie tussen laag en hoog Nederland verschillend zijn. In hoeverre dit zo is kan worden vastgesteld op grond van validatieresultaten, maar die zijn niet beschikbaar.

Het doel is om uiterlijk in 2022 te beschikken over een landsdekkend Gd-bestand, waarin voor elke 25×25m rastercel (onder andere) een actuele GHG, GVG en GLG (G×G) en Gt bekend is alsmede frequentieverdelingen die de nauwkeurigheid weergeven. Voor de langere termijn wordt daarom in dit gedeelte van deze rapportage een werkwijze voor een gedetailleerde Gd-kartering in laag Nederland opgesteld.

Allereerst wordt een inventarisatie gemaakt van beschikbare en bruikbare gegevens. Metingen aan de grondwatersituatie worden en zijn in diverse studies verzameld, en worden op hun bruikbaarheid voor een Gd-kartering in laag Nederland beoordeeld. Daarnaast wordt ook de aansluiting bij data en resultaten van diverse regionale en landelijke hydrologische modellen verkend. Verschillende consortia van provincies en waterschappen hebben grondwatermodellen ontwikkeld waarmee het grondwaterstandsverloop in de loop van de tijd kan worden voorspeld. Een voorbeeld daarvan is het MIPWA-consortium in Noord-Nederland. In hoeverre de resultaten of basisdata van een dergelijk model bij kunnen dragen aan een verbeterde en/of efficiëntere Gd-kartering zal worden verkend. Deze verkenning wordt in het werkplan opgenomen.

² <http://www.wur.nl/nl/project/BIS-2014-Management.htm>

4.2 Functionaliteit van de Gd-kaart

In 1997 introduceerde Wageningen Environmental Research (Alterra) het nieuwe concept Grondwaterdynamiek, een actualisatie van de Gt-informatie uit de bodemkaart 1:50000. 'Grondwaterdynamiek' (Gd) is een verzamelterm voor de parameters $G \times G$, Gt, duurlijn, regimecurve en kwelklasse. De eerste contouren van de Gd werden beschreven door Bierkens (1995). $G \times G$ staat voor de begrippen GHG, GLG en GVG, respectievelijk de Gemiddeld Hoogste en Laagste Grondwaterstand en de Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand. De Gt of Grondwatertrap is een specifieke combinatie van GHG- en GLG-klassen die op thematische kaarten kan worden weergegeven. Een duurlijn geeft aan hoe lang binnen het jaar een bepaalde grondwaterstand wordt overschreden.

Anno 2017 kan de 'Gd' het beste als een database worden beschouwd, met mogelijkheden voor beheer en opslag, en het opvragen van (bewerkte), specifieke gegevens. Ook kunnen duurlijnen en regimecurves worden beschreven, en bandbreedtes worden gespecificeerd van bepaalde grondwaterstanden. De 'content' van de Gd database kan op vele manieren worden geraadpleegd, zie paragraaf 3.7 voor de beschrijving van een aantal toepassingen.

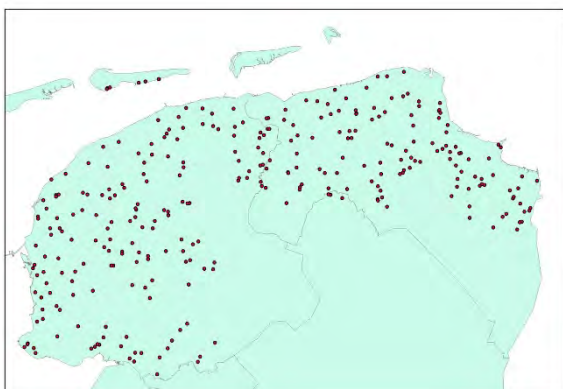
4.3 Essentiële stappen ontwerp meetnet Gd 2017-2022

4.3.1 Inventarisatie van recente meetgegevens van de grondwaterstand en gebiedsdekkende ruimtelijke informatie gerelateerd aan de grondwaterstandsfluctuatie

Deze paragraaf geeft een opsomming van inmiddels afgesloten (karterings)projecten die informatie bevatten die relevant is voor de ontwikkeling van een landsdekkende, geharmoniseerde Gd-kaart van Nederland in 2022.

Laag Nederland

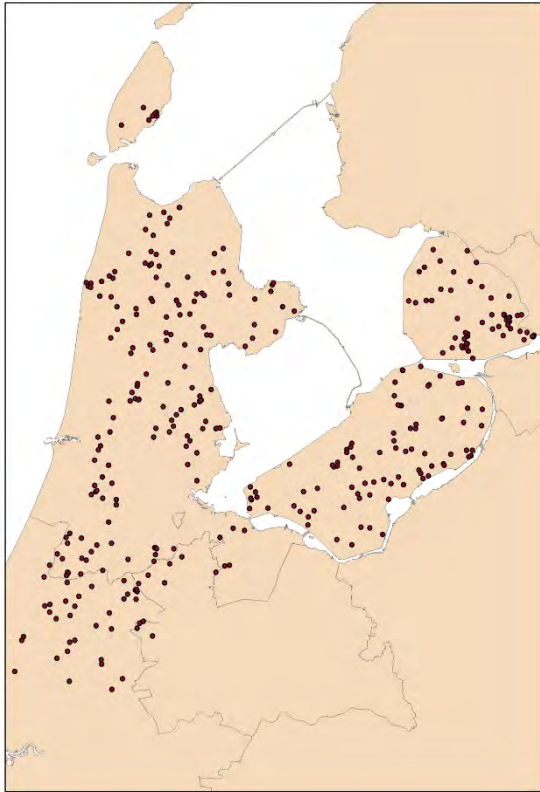
Ter voorbereiding van de realisatie van een gedetailleerde Gd-kartering in laag Nederland wordt een inventarisatie van beschikbare en bruikbare gegevens gemaakt. Vertrekpunt is een serie veldopnames die tussen 2011 en 2013 zijn gedaan ten behoeve van de Gt-actualisatie; zie Figuur 17 tot en met Figuur 20. Deze opnames zijn verwerkt in de geactualiseerde bodem/Gt-kaart van laag Nederland die in 2014 gereedkwam; de onderliggende gegevens zullen - indien geschikt - ook worden gebruikt voor de landsdekkende Gd-kaart 2022. Van deze opnames zijn profielbeschrijvingen beschikbaar (standaard BIS-opslag), naast informatie over grondwaterstanden en berekende $G \times G$'s.



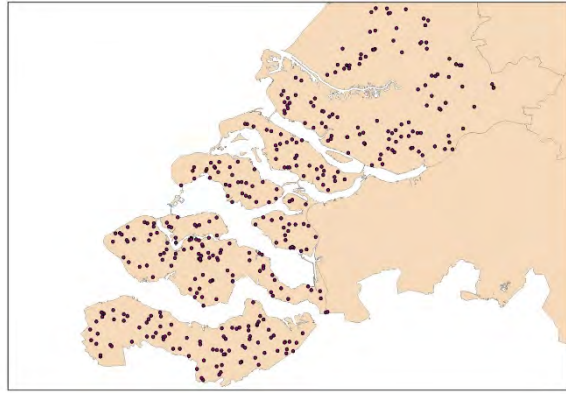
Figuur 17 Gd-opname in 2012 (Riviergebied en flank).



Figuur 18 Gd-opname in 2011 (Noord Nederland).



Figuur 19 Gd-opname in 2013 (Noord Holland en Flevoland).



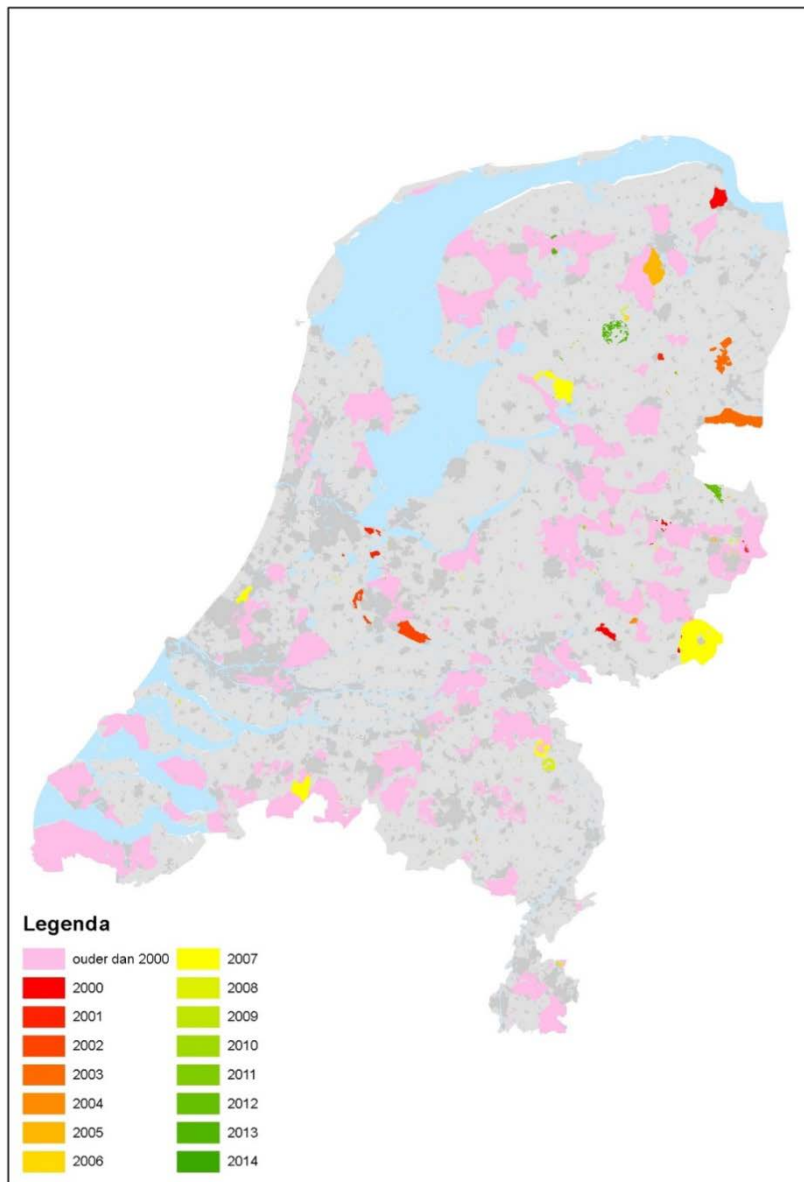
Figuur 20 Gd-opname in 2013 (Zuid Holland en Zeeland).

De recente opnames die ten behoeve van de Gt-actualisatie zijn gedaan en in één database zijn samengebracht, zijn wellicht grotendeels bruikbaar. De waarnemingsdichtheid is echter circa 1 per 935 ha.

Naast bovenstaande opnames heeft Wageningen Environmental Research in de periode 2000-2016 in het kader van tientallen klein(schalig)e projecten een groot aantal metingen verricht aan de 'grondwatersituatie'; zie figuur 21. De hierbij verzamelde informatie wordt beoordeeld op bruikbaarheid in een nieuw meetnet voor een Gd-kartering.

Hoog Nederland

Voor hoog Nederland is informatie over de Gd gebiedsdekkend beschikbaar. Deze informatie is verzameld in de periode 1999-2004. Door ingrepen in de waterhuishouding en door klimaatverandering kunnen sindsdien echter veranderingen in het grondwaterregime zijn opgetreden. Om vast te stellen of-, en waar informatie over Gt en G×G is verouderd, en hieruit de noodzaak voor actualisaties te kunnen vaststellen moet de actualisatiebehoefte van de Gd-informatie met zekere regelmaat worden geanalyseerd. Finke *et al.* (1994, 1998) ontwikkelden een methode die erop was gericht de actualisatiebehoefte van Gt-kaarten te bepalen. Deze methode is toepasbaar, mits geactualiseerd, te weten: uitgebreid met doelfuncties die zijn gebaseerd op G×G's en regimecurves.



Figuur 21 Locaties van gedetailleerde bodemkaarten van circa 65 (karterings)projecten met voor de landsdekkende Gd-kartering bruikbare waarnemingen. Bron: Bodemkundig Informatie Systeem (BIS)

4.3.2 Verkennen van de ruimtelijke variatie in de seizoensfluctuatie van de grondwaterstand aan de hand van beschikbare metingen in gerichte opnamen en peilbuizen gebruikt bij de Gt-actualisatie van 2014

Een eerste schatting van de ruimtelijke patronen en mate van variatie kan worden gemaakt op basis van de bestaande meetlocaties en verschillende bronnen van ruimtelijke informatie zoals het AHN, het LGN en de bodemkaart. Daarnaast wordt de aansluiting bij data en resultaten van het landelijke hydrologische model (NHI) verkend.

4.3.3 Verwachte ruimtelijke variatie in grondwaterstanden, G×G's en Gt's

De Gd-bestanden (De Gruijter *et al.*, 2004; Van Kekem *et al.*, 2005) bevatten gedetailleerde informatie over de ruimtelijke variatie van grondwaterstanden, G×G's en Gt's in hoog Nederland. De actualisatie van de Gt-kaart 1:50.000 bevat informatie over de ruimtelijke variatie van G×G's en Gt's in termen van frequentieverdelingen binnen deelgebieden, maar geen gedetailleerde informatie over ruimtelijke patronen. Verwacht mag worden dat ruimtelijke patronen van grondwaterstanden, G×G's

en Gt's in laag Nederland, met beheerste peilen, anders zullen zijn dan in hoog Nederland, met vrije afwatering. Grondwaterstanden zullen in laag Nederland binnen percelen een ruimtelijke variatie vertonen die samenhangt met de afstand tot ontwateringsmiddelen. Voor grondwaterafhankelijk peilbeheer is kennis over de relatie tussen grond- en oppervlaktewaterstand relevant. Hoogland *et al.* (2005) onderzochten hoe de relatie tussen grond- en oppervlaktewaterstand gebiedsdekkend kan worden beschreven in kleigebieden en hoe deze relatie gebruikt kan worden in een Gd-kartering. De grondwaterstand vertoont met de afstand tot het ontwateringsmiddel een 'opbollingsprofiel', dat varieert met de drainageweerstand en het neerslagoverschot. Hoogland *et al.* (2005) concluderen dat drainageweerstanden uit een opbollingsprofiel kunnen worden geschat dat is waargenomen in een raai van peilbuizen in een perceel, haaks op het ontwateringsmiddel. Ter voorbereiding van kartering van de grondwaterdynamiek in laag Nederland zou de studie van Hoogland *et al.* (2005) moeten worden uitgebreid naar veengronden, zou het meten van grondwaterstanden in raaien binnen percelen als onderdeel van de meetcampagne moeten worden overwogen en zou meer informatie over de ruimtelijke variatie in drainageweerstanden moeten worden verzameld.

4.3.4 Vaststellen van de relaties en afhankelijkheden tussen grondwatersituatie vastgesteld met metingen van de grondwaterstand en gebiedsdekkende ruimtelijke informatie

De relatie tussen G×G's en gebiedsdekkende ruimtelijke hulpinformatie is voor hoog Nederland gedetailleerd onderzocht in de Gd-karteringen (Finke *et al.*, 2004, 2005; De Gruijter *et al.*, 2004; Van Kekem *et al.*, 2005). Voor laag Nederland is hier minder over bekend. Verwacht mag worden dat de relatie tussen grondwaterstand en (relatieve) maaiveldhoogte in laag Nederland minder sterk zal zijn dan in hoog Nederland. Voor laag Nederland zijn polderpeilen en de ligging en type van ont- en afwateringsmiddelen waarschijnlijk relevante bronnen van hulpinformatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstandskarakteristieken. Bij een Gd-kartering in laag Nederland zullen relaties moeten worden gezocht tussen grondwaterstanden en nieuwe bronnen van gebiedsdekkend beschikbare hulpinformatie. Nieuwe geostatistische methoden, zoals Area-to-Point Kriging (Kyriakidis, 2004; Kyriakidis en Yoo, 2005; Orton *et al.*, 2012), bieden wellicht mogelijkheden om kaarten met verschillende aggregatieniveaus te combineren en bijvoorbeeld G×G's te desaggregeren.

4.3.5 Optimalisatie van het meetnetontwerp op basis van de ligging van de bestaande metingen en de gebiedsdekkende ruimtelijk informatiebronnen

Kernactiviteit is het verdichten van het meetnet: aan de bestaande waarnemingslocaties moeten extra locaties worden toegevoegd totdat de gewenste voorspelnaauwkeurigheid is bereikt. Dit houdt optimalisatie in, uitgaande van bestaande gegevens en gegevens die je daar nog aan zou moeten toevoegen.

Bij locatiekeuzes voor aanvullende waarnemingen moet rekening worden gehouden met de ligging van bestaande meetpunten, grondwaterstandspatronen en de dynamiek van de grondwatersituatie die in kaart wordt gebracht. Gebieden met grotere ruimtelijke dynamiek vereisen een grotere waarnemingsdichtheid om de beoogde voorspelnaauwkeurigheid te realiseren.

Bovendien moeten de waarnemingen - in combinatie met langlopende meetreeksen - zó worden verwerkt dat eenmalig gemeten grondwaterstanden uiteindelijk als een G×G kunnen worden geïnterpreteerd. Daar zijn specifieke berekeningen voor nodig, namelijk stambuisregressie (Te Riele en Brus, 1991).

De expertise die nodig is voor het ontwikkelen van een 'selectieprotocol' voor additioneel vereiste gegevens, is bij Wageningen Environmental Research (Alterra) aanwezig.

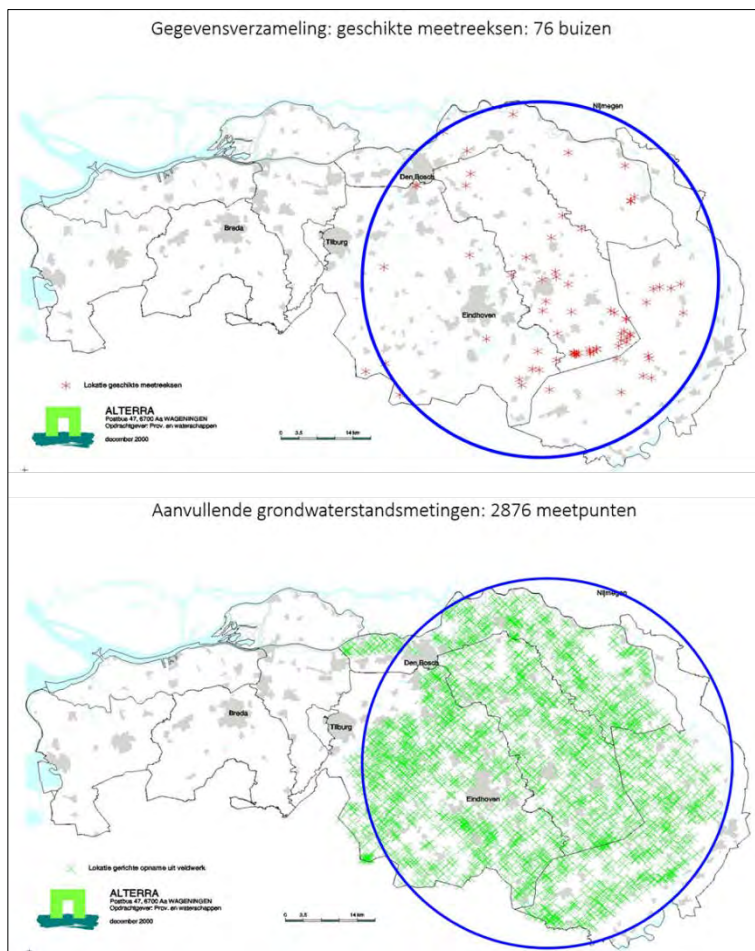
4.3.6 Aanbevelingen voor het te realiseren meetnetontwerp en de uitvoering van het meetprogramma om tot een uniforme Gd-kaart voor laag Nederland te komen

Het ontwerp van het meetnet voor de aanvullende metingen wordt opgesteld aan de hand van de in paragraaf 4.3.1 (pagina 35) geïdentificeerde ruimtelijke informatiebronnen. De beschikbare meetlocaties bepalen hoe de gewenste nauwkeurigheid van de uiteindelijke Gd-kaart zo efficiënt mogelijk kan worden gerealiseerd. Om een zo goed mogelijke keuze te kunnen maken zullen diverse opties voor het meetnetontwerp worden onderzocht, met inbegrip van de gevolgen voor het hierbij verwachte resultaat.

Wageningen Environmental Research levert een wetenschappelijk onderbouwde methodiek voor het ontwerp van een meetnet.

Bij het ontwerp van het meetnet moet rekening worden gehouden met topografische en landschappelijke kenmerken. Er moet een steekproef worden genomen met waarnemingen die het volledige spectrum aan topografische en landschappelijke kenmerken omvatten, en waarmee ook andere kwantitatieve eigenschappen over de hele range worden afgedekt. Dat betekent bijvoorbeeld: waarnemingen vlakbij tot ver van een sloot. Er zijn verschillende methodes beschikbaar om dit soort informatie bij het kiezen van nieuwe meetlocaties volledig te benutten.

Figuur 22 geeft een idee van de dichtheid van het meetnet van peilbuizen en gerichte opnamen bij de Gd-kartering in de periode 1999-2004. De Figuur is ontleend aan de Gd-karteringen die hebben plaatsgevonden in Noord-Brabant en Limburg (Finke *et al.*, 2002a-i).



Figuur 22 Illustratie van een sterke toename van de waarnemingsdichtheid van freatische grondwaterstanden in Oostelijk Noord Brabant en noord Limburg (Finke *et al.*, 2002a-i)

4.3.7 Logistiek van de veldcampagnes

De ambitie bij de Gd-karteringen is om de grondwaterstand te weten voor een gemiddelde winter- en zomersituatie. Een gerichte opname is een boorgat, waarin de grondwaterstand eenmaal in een natte periode en eenmaal in een droge periode wordt gemeten. Elke opname wordt echter beïnvloed door de weersomstandigheden van dat moment. Om te kunnen vaststellen of een opname in een relatief droge, c.q. natte periode werd gedaan, wordt deze gekoppeld aan langlopende meetreeksen. Hiertoe worden, naast opnamen in boorgaten, gelijktijdig opnamen gedaan in nabijgelegen peilbuizen. Na afloop wordt, op grond van langlopende meetreeksen, altijd een correctie uitgevoerd (Te Riele en Brus, 1991).

De voor de Gd-kartering 2017-2022 vereiste meetcampagne is veelomvattend en kost veel (reis)tijd; een ervaren veldbodemkundige realiseert maximaal 8 à 10 opnamen per dag. Ondanks het naar verwachting grote aantal gerichte, bewerkelijke opnamen mag de meetcampagne op zijn hoogst vier jaar gaan duren. De dichtheid van het te ontwerpen meetnet moet hierop worden afgestemd. De Gd-karteringen zijn destijds in Brabant begonnen. De waarnemingsdichtheid was groot: ca. 4000 locaties. De ervaring leert dat circa 80% van dit project qua capaciteitsinzet voor dit type veldwerk moet worden ingeruimd. Elke opname vereist twee bezoeken; dag 1: alle gaten boren, 1 à 2 dagen stabiliseren; dag 2: opnames doen. Alles vindt tweemaal plaats: in droge en natte periode. Elke plek wordt dus viermaal bezocht. Reistijd is verreweg de grootste kostenpost. Ook het vragen van toestemming aan landeigenaren en –gebruikers blijkt tijdrovend te zijn.

4.3.8 Web georiënteerde toolkit voor de Gd

Wageningen Environmental Research heeft de ambitie om voor de Gd een laagdrempelige *toolkit* te ontwikkelen die gebruikers via het web kunnen benaderen en zelf de door hen gewenste informatie *tailor made* kunnen ophalen.

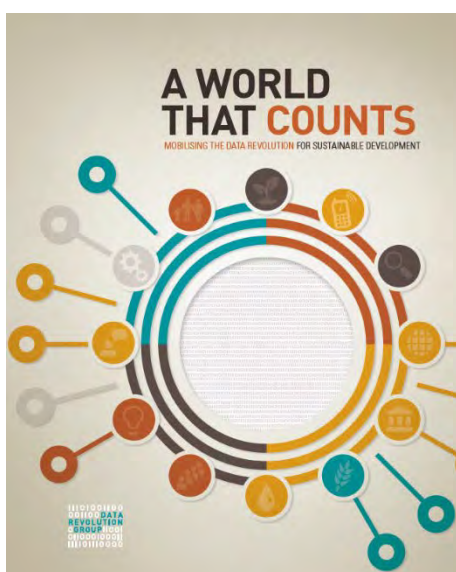
5 Relevantie voor BRO, Data Revolution doelstellingen en Sustainable development goals

5.1 Bijdrage aan de BRO-doelstellingen

Het project 'Actualisatie Gt/Gd' behelst een geactualiseerde oppervlakte van 19 768 km², zijnde het areaal 'hoog Nederland'.

Registratieobject	Totaal aantal records	Aantal toegevoegde records	Totale oppervlakte (km ²)	Geactualiseerde oppervlakte (km ²)
Gd actualisatie	-	-	30 987	19 768

5.2 Bijdrage aan de aanbevelingen van het UN Data Revolution rapport



Gegevens en modellen zijn van levensbelang voor besluitvorming en leveren het uitgangsmateriaal voor af te leggen verantwoording. Zonder de juiste informatie is het ontwerpen, monitoren en evalueren van beleid een bijna onmogelijke opgave.

Zo begint het rapport 'A world that counts'³ van de 'UN Expert Advisory Group on a Data Revolution for Sustainable Development'⁴. Deze adviesgroep doet aanbevelingen die ervoor moeten zorgen dat het verzamelen, opslaan en verstrekken van gegevens beter wordt afgestemd op de informatie die we nodig hebben om de vorderingen op weg naar de Sustainable Development Goals (SDG's) in de gaten te kunnen houden.

De doelstellingen van de Basisregistratie Ondergrond komen in grote lijnen overeen met die van de UN Expert Advisory Group. Wel moet worden opgemerkt dat met betrekking tot de realisatie van de Landelijke Voorziening van de BRO er nog onvoldoende aandacht is voor aansluiting bij de internationale bodemwereld. De relatie met SDG's is geen ontwerpcriterium.

³ A World That Counts. Mobilising the data revolution for sustainable development. Report prepared at the request of the United Nations Secretary-General, by the Independent Expert Advisory Group on a Data Revolution for Sustainable Development, November 2014

⁴ www.undatarevolution.org/report/

Tabel 2 Aanbevelingen van de 'UN Expert Advisory Group on a Data Revolution for Sustainable Development' van de Verenigde Naties en analyse van de mate waarin de BRO hieraan voldoet.

Aanbeveling	Bijdrage	Opmerkingen
Ontwikkelen van consensus betreffende principes en standaarden	De binnen het project verzamelde gegevens en de gerealiseerde actualisatie van de Bodemkaart 1:50000 worden via de BRO gepubliceerd. BRO draagt bij aan een nationale data exchange standaard voor boormonsterprofielen en het bodemkundig model	Nog onvoldoende aansluiting bij internationale data exchange standaarden zoals INSPIRE ML Soil en/of Soil ML v.w.b. boormonsterprofielen.
Ontwikkelen van systemen die voor iedereen toegankelijk zijn	BRO realiseert een voor iedereen toegankelijk systeem (de Landelijke Voorziening BRO)	Het enkel en alleen verstrekken van xml-bestanden zoals voorgenomen zal het gebruik van de data in ernstige mate in de weg staan. Mogelijk aansluiting bij PDOK om alternatieve uitlevering te realiseren
Voldoende middelen voor verbetering van data, modellen en de toegankelijkheid hiervan	De Ministeries van EZ en IenM dragen bij aan het realiseren van de Landelijke Voorziening BRO en aan de actualisatie van de daarbij horende data en modellen	De bijdrage van EZ en IenM loopt tot en met 2017
Leiderschap voor coördinatie	BRO is leidend en toonaangevend voor wat betreft aardwetenschappelijke en bodemkundige data	Er is voor de bodemkundige data nog onvoldoende aansluiting gezocht bij de internationale bodemwereld
Zorg voor quick wins in relatie tot de SDG data	Niet gerealiseerd	De potentiële bijdrage is onderwerp van studie

5.3 Bijdrage aan de Sustainable Development Goals (SDG's)

Nederland heeft de ambitie en streeft er naar alle door de regeringsleiders van de lidstaten van de Verenigde Naties in 2030 vastgestelde Duurzame Ontwikkelingsdoelen (SDG's)⁵ te behalen⁶. Ons Gt/Gd-project is gerelateerd aan een achttal SDG's; zie Figuur 23.



Figuur 23 Bijdrage van dit BRO-project aan de implementatie van Duurzame Ontwikkelingsdoelen (Global Goals for Sustainable Development of SDG's): 2, 6, 7, 11, 12, 13, 15 en 17.

⁵ www.globalgoals.org/nl/

⁶ Nederland Ontwikkelt Duurzaam: Plan van aanpak inzake implementatie SDGs. Brief MINBUZA-2016.600505 van de Minister voor Buitenlandse Handel en Ontwikkelingssamenwerking aan de Tweede Kamer, 30 september 2016

Elke SDG kent een aantal indicatoren⁷ waar onze gegevens en modellen een relatie mee kunnen hebben. Analyse van Tabel 3 leert dat de gegevens in de BRO niet overeenstemmen met de gewenste indicatoren, maar wel een rol kunnen spelen bij de totstandkoming ervan.

Tabel 3 Bijdrage van dit project (BRO, actualisatie Gt/Gd) aan Sustainable Development Goals (SDG's).

<div style="background-color: #f1c40f; padding: 10px;"> <h2 style="margin: 0;">2 GEEN HONGER</h2> <p style="font-size: 0.8em; margin: 0;">Een einde maken aan honger, zorgen voor voedselzekerheid en verbeterde voeding en duurzame landbouw stimuleren</p>  </div>		
Indicator	Bijdrage	Opmerking
Percentage duurzame landbouw, gericht op het behoud van ecosystemen, op klimaatbestendigheid en op een voortdurende verbetering van land- en bodemkwaliteit.	Uit de huidige gegevens kan voor een aantal bodemkwaliteit parameters een nulmeting worden afgeleid.	De combinatie van data en bodemkaart en het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB) is waarschijnlijk onvoldoende om een indicatie van het percentage duurzame landbouw te geven.

<div style="background-color: #00a0c9; color: white; padding: 10px;"> <h2 style="margin: 0;">6 SCHOON WATER EN SANITAIR</h2> <p style="font-size: 0.8em; margin: 0;">Zorgen voor beschikbaarheid en duurzaam beheer van water en sanitaire voorzieningen voor iedereen</p>  </div>		
Indicator	Bijdrage	Opmerking
Het percentage onbedreigde watervoorraad.	De bodemopbouwgegevens geven een indicatie van de kwetsbaarheid van onderliggende watervoerende pakketten.	

⁷ Report of the Inter-Agency and Expert Group on Sustainable Development Goal Indicators (E/CN.3/2016/2/rev.1), Annex IV

7 BETAALBARE EN DUURZAME ENERGIE

Zorgen voor toegang tot betaalbare, betrouwbare, duurzame en hernieuwbare energie voor iedereen



Indicator	Bijdrage	Opmerking
Het percentage bodems waarop, mede gegeven de waterbeschikbaarheid, energieteelt kan plaatsvinden (bio-energie).	De BRO Gt/Gd geeft een indicatie van de geschiktheid, af te leiden uit bodemopbouw en de ondiepe grondwatervoorkomens.	

11 DUURZAME STEDEN EN GEMEENSCHAPPEN

Duurzame steden en menselijke nederzettingen creëren die inclusief, veilig en veerkrachtig zijn.



Indicator	Bijdrage	Opmerking
Geschiktheid van bodems rondom stedelijke agglomeraties voor waterberging tijdens wateroverlast en watervoorziening in tijden van waterschaarste.	De BRO Gt/Gd geeft een indicatie van de geschiktheid, af te leiden uit bodemopbouw en de ondiepe grondwatervoorkomens.	

12 VERANTWOORDE CONSUMPTIE EN PRODUCTIE

Zorgen voor duurzame consumptie- en productiepatronen



Indicator	Bijdrage	Opmerking
Agrarische productie: het percentage landbouw gericht op het behoud van ecosystemen, op klimaatbestendigheid en op een voortdurende verbetering van land- en bodemkwaliteit.	Uit de gegevens van de BRO Gt/Gd kan voor een aantal bodemkwaliteit parameters een nulmeting worden afgeleid.	De combinatie van data en bodemkaart en het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB) is waarschijnlijk onvoldoende om een indicatie van het percentage duurzame landbouw te geven.

13 KLIMAATACTIE

Dringende maatregelen nemen ter bestrijding van klimaatverandering en de effecten ervan



Indicator	Bijdrage	Opmerking
Concrete acties tegen degradatie van bodems en ondiep grondwater (verdichting, oxidatie, vernatting, verzilting, verdroging).	BRO Gt/Gd geeft informatie over kwetsbare bodems, gecombineerd met dito grondwatervoorkomens.	

15 LEVEN OP HET LAND

Landecosystemen beschermen en herstellen en het duurzaam gebruik ervan bevorderen, bossen duurzaam beheren, woestijnvorming bestrijden, de aantasting van het land een halt toeroepen en ten goede keren, en het verlies van biodiversiteit stoppen



Indicator	Bijdrage	Opmerking
Het percentage aangetaste bodem (inclusief ondiep grondwater) ten opzichte van het totale landoppervlak.	Met behulp van de Bodemkaart met Gt zijn voor verschillende aantastingen schattingen gedaan van de diverse bodembedreigingen.	

17 PARTNERSCHAP OM DOELSTELLINGEN TE BEREIKEN

De wijze van tenuitvoerlegging versterken en het wereldwijde partnerschap voor duurzame ontwikkeling nieuw leven inblazen



Indicator	Bijdrage	Opmerking
Het aantal samenwerkingsovereenkomsten en -programma's inzake SDG gerelateerde gegevensverwerking	<ul style="list-style-type: none">• Samenwerking met TNO inzake BRO• Lid van het European Soil Bureau Network• Samenwerking met ISRIC - World Data Centre for Soils	

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Dit project 'actualisatie Gt/Gd' in het kader van de BRO had twee doelen. Het eerste doel was de geactualiseerde informatie over de fluctuatie van grondwaterstandsdieptes in hoog Nederland te harmoniseren met de actuele (i.c. 2014) Gt-kaart voor laag Nederland, tot één kaart met één legenda en gelijkmatig ruimtelijk detail voor heel Nederland, en geschikt voor *smart decision making* en risicoanalyses. Met betrekking tot dit eerste doel kan het volgende worden geconcludeerd:

1. De Gd-actualisatie die tussen 1999 en 2004 heeft plaatsgevonden in hoog Nederland bevatte voldoende informatie om per kaartvlak van de Bodem- en Gt-kaart, schaal 1:50.000, frequentieverdelingen van G×G's en Gt's af te leiden. Hiermee konden Gt's aan de kaartvlakken worden toegekend die de grondwaterstandssituatie van de periode 1999-2004 weergeven.
2. Vergeleken met de Bodem- en Gt-kaart, schaal 1:50:000, die tussen 1960 en 1990 is opgenomen, is op de actuele Gt-kaart van hoog Nederland een verschuiving naar drogere Gt's te zien. Vooral bij de Gt's III, IV en V op de oorspronkelijke kaart is een verschuiving naar Gt VI op de geactualiseerde kaart te zien.
3. De geactualiseerde Gt-kaart van hoog Nederland biedt informatie die vergelijkbaar is met de informatie op de geactualiseerde Gt-kaart van laag Nederland. Het ruimtelijk detailniveau van deze informatie is voor hoog Nederland echter groter dan voor laag Nederland: in hoog Nederland is elk vlak van de Bodem- en Gt-kaart, schaal 1:50.000, afzonderlijk beschreven, terwijl in laag Nederland 59 strata (deelgebieden) die uit meerdere vlakken bestaan, zijn beschreven. Vergeleken met de oorspronkelijke Bodem- en Gt-kaart is het aantal kaarteenheden in laag Nederland toegenomen van 12 tot 59. In hoog Nederland is het aantal kaarteenheden van de geactualiseerde kaart gelijk aan het aantal kaartvlakken, omdat elk kaartvlak apart is beschreven.
4. De geactualiseerde Gt-kaart van laag en hoog Nederland verschillen circa 10 jaar in actualiteit, omdat de kaart van laag Nederland is gebaseerd op veldopnames die tussen 2011 en 2014 hebben plaatsgevonden terwijl de kaart van hoog Nederland is gebaseerd op veldopnames die tussen 1999 en 2004 hebben plaatsgevonden.
5. Uit de geactualiseerde Gt-kaart van hoog Nederland kan informatie worden afgeleid die nodig is bij *smart decision making* en risicoanalyses, zoals
 - a. Kaarten waarmee de prioriteit van onderzoek voor actualisatie van grondwaterstandsgegevens kan worden bepaald (entropiekaarten en kaarten met varianties van voorspelfouten);
 - b. Realisaties van G×G's en Gt's die kunnen worden gebruikt in onzekerheids- en risicoanalyses en bij het rekenen met niet-lineaire modellen;
 - c. Kaarten met overschrijdingskansen van kritische niveaus, die kunnen worden benut bij risicoanalyses en waarmee kan worden beoordeeld in hoeverre aan normen wordt voldaan of doelstellingen zijn gehaald.

6.2 Aanbevelingen

Het tweede doel van dit project was het opstellen van een werkplan voor de productie van een landsdekkende Gd-kaart van Nederland in 2022. Op basis hiervan bevelen wij het volgende aan:

1. Door ingrepen in de waterhuishouding en door klimaatverandering kunnen veranderingen in het grondwaterregime zijn opgetreden. Om te kunnen vaststellen of-, en waar informatie over Gt en G×G is verouderd, is regelmatige herhaling van een analyse van de actualisatiebehoefte noodzakelijk. Finke *et al.* (1994, 1998) ontwikkelden een methode die erop was gericht om de actualisatiebehoefte van Gt-kaarten te bepalen. Deze methode zou moeten worden uitgebreid met doelfuncties die zijn gebaseerd op G×G's en regimecurves.

-
2. De recente opnames die ten behoeve van de Gt-actualisatie in laag Nederland zijn gedaan en in één database zijn samengebracht, zijn wellicht grotendeels bruikbaar voor het vervaardigen van een Gd-kaart.
 3. Wij bevelen aan om te inventariseren welke waarnemingen die voor detailkarteringen zijn verricht recent zijn en welke te gedateerd zijn om nog in een actualisatie te kunnen worden gebruikt.
 4. Wij bevelen aan om analoge gegevens die van belang zijn, zoals locaties en metingen van gerichte opnamen en zelf geplaatste grondwaterstandbuizen, te digitaliseren. Informatie rond gerichte opnamen, beschikbare peilbuizen en dergelijke komt immers in principe niet in het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS) terecht, maar moet boven tafel worden gehaald door de bijbehorende circa 65 rapporten te raadplegen.
 5. Ter voorbereiding van de kartering van de grondwaterdynamiek in laag Nederland zou de studie van Hoogland *et al.* (2005) moeten worden uitgebreid naar veengronden, zou het meten van grondwaterstanden in raaien binnen percelen als onderdeel van de meetcampagne moeten worden overwogen en zou meer informatie over de ruimtelijke variatie in drainageweerstand moeten worden verzameld.
 6. Wij bevelen aan om voor de Gd-kartering in laag Nederland relaties te zoeken tussen grondwaterstanden en nieuwe bronnen van gebiedsdekkend beschikbare hulpinformatie, en de toepassingsmogelijkheden te onderzoeken van nieuwe geostatistische methoden, zoals Area-to-Point Kriging (Kyriakidis, 2004; Kyriakidis en Yoo, 2005; Orton *et al.*, 2012).
 7. Wij bevelen aan om het meetnet voor de aanvullende metingen te optimaliseren met betrekking tot de gewenste ruimtelijke voorspelnauwkeurigheid.

Literatuuropgave

- Abrahamsen, P. and F. Benth, 2001. Kriging with inequality constraints. *Mathematical Geology*, 33: 719-744.
- Bierkens, M.F.P., 1995. Huidig en toekomstig onderzoek naar de ruimtelijke en temporele variabiliteit van het freatisch grondwaterniveau. Interne Mededeling 342, Staring Centrum, Wageningen.
- Bierkens, M.F.P. 2001. Spatio-temporal modelling of the soil water balance using a stochastic model and soil profile descriptions. *Geoderma* 103: 27-50.
- Bierkens, M., M. Knotters, en F. van Geer, 1999. Tijdreeksanalyse nu ook toepasbaar bij onregelmatige meetfrequenties. *Stromingen*, 5(2) :43-54.
- Bierkens, M.F.P., M. Knotters and T. Hoogland 2001. Space-time modeling of watertable depth using a regionalized time series model and the Kalman filter. *Water resources research*, vol 37, No. 5: 1277-1290.
- Bierkens, M.F.P. EN H.T.L. Massop, 2000. Optimalisatie meetlocaties grondwaterstanden waterschap De Aa; Representatieve locaties voor grondwaterafhankelijk peilbeheer. Wageningen, Alterra-rapport 10
- Bierkens, M.F.P. en T. Hoogland, 2003. Actualisatie van de Grondwaterdynamiek. Volledige herkartering of beperkte actualisatie? Wageningen, Alterra-rapport 602.
- Bot, B., 2011. Grondwaterzakboekje. Uitg. Bot Raadgevend Ingenieur, Rotterdam. ISBN-EAN: 978-90-817869-0-4, www.grondwaterzakboekje.nl
- Braat, L., A. van Amstel, A. Gerritsen, C. van Gool, N. Gremmen, C. Groen, H. Rolf, J.R. Runhaar en J. Wiertz. 1989. Verdroging van natuur en landschap in Nederland. Beschrijving en analyse. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Bracht, M. van, 1988. OLGA: On Line Grondwater Archief. Rapport PN88-11, DGV-TNO.
- Bruin, H. de, 1987. Van Penman naar Makkink. In Hooghart, J., (redactie) Neerslag en Verdamping, CHO-TNO Mededeling 39. CHO-TNO, Den Haag.
- Buringh, P., G.G.L. Steur and A.P.A. Vink, 1962. Some techniques and methods of soil survey in the Netherlands. *Neth. J. Agric. Sci.* 10(2):157-172.
- Cate, J.A.M. ten, A.F. van Holst, H. Kleijer en J. Stolp, 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek; richtlijnen en voorschriften. Deel B: Grondwater. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Technisch Document 19B.
- Chatfield, C., 1995. Model uncertainty, data mining and statistical inference. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*, 158:419-466.
- Cohen, A., 1991. Truncated and censored samples: theory and applications. Dekker Inc. New York.
- Davis, J., 2002. Statistics and data analysis in geology. Wiley, New York, third edition.
- Delft, S.P.J. van, J.R. Runhaar, T. Hoogland en P.C. Jansen, 2002. Verdrogingskartering in natuurgebieden; Proefkartering Strijper Aa. Wageningen, Alterra-rapport 566.1, Wageningen.
- Delft, S.P.J. van, J. Holtland, J.R. Runhaar, P. Mekking en P.C. Jansen, 2003. Verdrogingskartering in natuurgebieden; Proefkartering Beekvliet. Alterra-rapport 566.2, Wageningen.
- Delft, S.P.J. van, F. Brouwer en M.M. van der Werff, 2007. Natuurpotentie in vier NBL projecten in Gelderland en Overijssel; Geïntegreerd Bodemkundig en Hydrologisch onderzoek naar de mogelijkheden voor natuurontwikkeling. Alterra rapport 1434, Wageningen.
- Delhomme, J., 1978. Kriging in the hydrosociences. *Advances in Water Resources*, 1:251-266.
- Finke, P., 2000. Updating the (1:50,000) Dutch groundwater table class map by statistical methods: an analysis of quality versus cost. *Geoderma*, 97:329-350.
- Finke, P.A., D.J. Groot Obbink en A.F. van Holst, 1994. Methode voor de bepaling van de prioriteitsvolgorde van Gt-actualisatie. Rapport 322 Staring Centrum, Wageningen.
- Finke, P.A., D.J.J. Walvoort en F. de Vries, 1998. Prioriteiten voor actualisatie van grondwatertrappenbestanden 1:50 000 in een deel van Pleistoceen-Nederland. Rapport 631 Staring Centrum, Wageningen.
- Finke, P., T. Hoogland, M. Bierkens, D. Brus en F. de Vries, 1999. Pilot naar grondwaterkaarten in het Weerijsg gebied. Staring Centrum, Wageningen.

-
- Finke, P.A., T. Hoogland, M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, M. Knotters en F. de Vries, 1999. Pilot naar een nieuwe beschrijving van grondwaterkaarten in het Weerijds-gebied. Methodiekontwikkeling met extrapolatie naar een Plan van Aanpak voor Noord-Brabant. Staring Centrum, Wageningen.
- 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 en P.J.T. van Bakel, 2001. Beter werken met 'Waternood', Een proeftoepassing in het herinrichtingsgebied 'De Leijen'. Rapport 267, Alterra, Wageningen.
- Finke, P.A., M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2002a. Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap De Aa. Rapport 180, Alterra, Wageningen.
- Finke, P.A., M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2002b. Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap De Dommel. Rapport 381, Alterra, Wageningen.
- Finke, P.A., M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2002c. Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap De Maaskant. Rapport 382, Alterra, Wageningen.
- Finke, P.A., M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2002d. Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap Peel en Maasvallei. Rapport 383, Alterra, Wageningen.
- Finke, P.A., M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2002e. Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap De Dongestroom. Rapport 384, Alterra, Wageningen.
- Finke, P.A., M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2002f. Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap Land van Nassau. Rapport 385, Alterra, Wageningen.
- Finke, P.A., M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2002g. Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap Het Scheldekwartier. Rapport 386, Alterra.
- Finke, P.A., M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2002h. Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap Mark en Weerijds. Rapport 387, Alterra.
- Finke, P.A., M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, J.W.J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2002i. Klimaatrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap Alm en Biesbosch. Rapport 388, Alterra.
- Finke, P.A., D.J. Brus, M.F.P. Bierkens, T. Hoogland, M. Knotters and F. de Vries, 2004. Mapping groundwater dynamics using multiple resources of exhaustive high resolution data. *Geoderma* 123: 23-39.
- Finke, P.A., D.J. Brus, M.F.P. Bierkens, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2005. Kartering van de grondwaterdynamiek met behulp van geo-informatie van hoge resolutie. *Stromingen* 11(1): 27-41.
- Gaast, J.W.J. van der en H.Th.L. Massop, 2003. Karakterisering van de freatische grondwaterstand in Nederland; Bepaling van de G×G en xG3 voor 1995 op puntlocaties. Rapport 819, Alterra, Wageningen.
- Gaast J. van der en H.Th.L. Massop, 2005. De verdroging in beeld met historische en actuele grondwatertrappen op basis van karteerbare kenmerken. H2O 14/15.
- Gaast, J.W.J. van der, H.R.J. Vroon en M. Pleijter, 2006. De grondwaterdynamiek in het waterschap Regge en Dinkel. Rapport 1335, Alterra, Wageningen.
www2.alterra.wur.nl/Webdocs/PDFfiles/Alterrarapporten/AlterraRapport1335.pdf
- Gaast, J.W.J., H.Th.L. Massop, H.Th.L., R.J. Vroon en I.G. Staritsky, 2006. Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken. Rapport 1339 Alterra, Wageningen.
- Gaast, J.W.J. van der, H.R.J. Vroon en H.Th.L. Massop, 2010. Grondwaterregime op basis van karteerbare kenmerken. Amersfoort, Stowa, rapport 2010-41.
- 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.
- Heesen, H.C. van, 1971. De weergave van het grondwaterstandsverloop op bodemkaarten. *Boor en Spade* 17:127-149.

-
- Hoogland, T., J. Runhaar en M.F.P. Bierkens, 2002. DOENAT: Een applicatie voor de allocatie van natuurdoeltypen en berekening van de doelrealisatie; Modelbeschrijving en toepassingen. Rapport 400, Alterra, Wageningen.
- Hoogland, T., M.J.D. Hack-ten Broeke, E.E.J.M. Leeters, J. Runhaar en P.A.M. Visschedijk, 2003. Waterlood-toepassing voor raamplangebied Utrecht-West; Combinatiemogelijkheden voor Natuur en Recreatie. Rapport 638, Alterra, Wageningen.
- Hoogland, T., P.A. Finke en F. de Vries, 2003. Actualisatie grondwatertrappenkaart Waterschap Rijn en IJssel. Rapport 126, Alterra, Wageningen.
- Hoogland, T. en J.B.F. van der Horst, 2004. Grondwaterdynamiek in kaart en praktijk; Symposiumbundel. Rapport 899, Alterra, Wageningen.
- Hoogland, T., M.R. Hoogerwerf en A.J. van Kekem, 2004. Actualisatie grondwatertrappenkaart Waterschap de Dommel. Rapport 1008, 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.
- Hoogland, T., R. Visschers, J.W.J. van der Gaast en M. Knotters, 2005. Karteren van de grondwaterdynamiek in gebieden met een klei deklaag. Parameters voor grondwaterafhankelijk peilbeheer. Rapport 1127, Alterra, Wageningen.
- Hoogland, T., M. Knotters, M. Pleijter en D.J.J. Walvoort, 2014. Actualisatie van de grondwatertrappenkaart van holoceen Nederland. Rapport 2612, Alterra, Wageningen.
- Jansen, P.C., M. Knotters, D.J. Brus en J.B.F. van der Horst, 2003. Reconstructie van historische grondwaterstandskarakteristieken met grondwaterstanden gemeten in de periode 1952-1955. Wageningen, Rapport 614, Alterra, Wageningen.
- Kekem, A.J. van, T. Hoogland en J.B.F. van der Horst, 2005. Uitspoelingsgevoelige gronden op de kaart; werkwijze en resultaten. Rapport 1080, Alterra, Wageningen.
- Knotters, M. en van Walsum, P., 1994. Uitschakeling van weersinvloeden bij de karakterisering van het grondwaterstandsverloop. Rapport 350, Staring Centrum, Wageningen.
- Knotters, M. 2001. Regionalised time series models for water table depths. PhD Thesis, Wageningen University; Alterra Scientific Contributions 3.
- Knotters, M. 2002. Onzekerheid is welkom bij beslissingen in het grondwaterbeheer. *Stromingen* 8(4): 5-18.
- Knotters, M. and M.F.P. Bierkens, 1999. Tijdreeksmodellen voor de grondwaterstand: een kijkje in de black box. *Stromingen* 5 (3): 35-49.
- Knotters, M. en M.F.P. Bierkens, 1999. Hoe lang moet je de grondwaterstand meten om iets over de dynamiek te weten? *Stromingen* 5(4): 5-12.
- Knotters, M. and M.F.P. Bierkens. 2001. Predicting water table depths in space and time using a regionalised time series model. *Geoderma* 103 (2001) 51-77
- Knotters, M., M.F.P. Bierkens en T. Hoogland, 2001. Optimalisatie primair meetnet grondwaterstand Gelderland. Haalbaarheid gebruik hulpinformatie. Rapport 234, Alterra, Wageningen.
- Knotters, M. and M. F. P. Bierkens. 2002. Accuracy of spatio-temporal RARX model predictions of water table depths. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 16 (2002) 112–126. Springer Verlag.
- Knotters, M., H. Vroon, A. van Kekem and T. Hoogland, 2002. Hoe noodzakelijk is patroononderzoek voor een goede uitvoering van de Grondwaterwet? *H2O* 21: 30-32.
- Knotters, M., T. Hoogland en J. van der Gaast, 2003. Nieuwe informatie over de grondwaterdynamiek: wensen en mogelijkheden. Rapport 548, Alterra, Wageningen.
- Knotters, M., Hoogland, T., en Pleijter, M., 2011. Actualisatie van de grondwatertrappenkaart van holoceen Nederland. Opzet van het onderzoek. Rapport 2280, Alterra, Wageningen.
- Knotters, M., T. Hoogland and D.J. Brus, 2013a. Validatie van grondwaterstandskarten met de Landelijke Steekproef Kaarteenheden. Wageningen, Alterra-rapport 2440.
- Knotters, M., T. Hoogland and D. Brus, 2013b. Validatie van grondwaterstandskarten met behulp van de Landelijke Steekproef Kaarteenheden. *Stromingen* 19(3,4): 35-47.
- Kyriakidis, P. C., 2004. A geostatistical framework for area-to-point spatial interpolation. *Geographical Analysis*, 36, 259–289.
- Kyriakidis, P. C. en E. Yoo, 2005. Geostatistical prediction and simulation of point values from areal data. *Geographical Analysis*, 37, 124–151.

-
- Massop H. Th. L. en J. W. J. van der Gaast, 2003. Optimalisatie grondwatermeetnet Waterschap De Maaskant; Meetnet regio Oost en beschrijving grondwaterstanden periode 1990-2002. Rapport 864, Alterra, Wageningen.
- Miller, A., 1990. Subset selection in regression. Chapman and Hall, London.
- Orton, T.G., N.P.A. Saby, D. Arrouays, C. Walter, B. Lemerrier, C. Schvartz en R.M. Lark, 2012. Spatial prediction of soil organic carbon from data on large and variable spatial supports. I. Inventory and mapping. *Environmetrics* 23 (2), 129–147.
- Oude Voshaar, J. en Stolp, J., 1997. Schatting van GHG en GLG van tijdelijke peilbuizen met korte meetreeksen. Technisch Document 30, Staring Centrum, Wageningen.
- Pebesma, E. en Wesseling, C., 1998. Gstat, a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. *Computers and Geosciences*, 24(1):17-31, www.gstat.org
- Pebesma, E. en Heuvelink, G., 2001. Sequential simulation of Gaussian random fields with unknown mean function: an application to heavy metal pollution data. In: Fourth Conference of the Working on Pedometrics of the International Union of Soil Sciences, September 19-21, pages Abstract book, p. 84, Gent, Belgium.
- Pleijter, M., F. Brouwer en D.J. Brus, 2003. Kaarten met grondwaterstand nader bekeken. Kan de kwaliteit van grondwaterstandkaarten verbeterd worden door aanvullend veldwerk? Alterra-rapport 736, Wageningen.
- Ritzema, H.P., G.B.M. Heuvelink, M. Heinen, P.W. Bogaart, F.J.E. van der Bolt, M.J.D. Hack-ten Broeke, T. Hoogland, M. Knotters, H.T.L. Massop en H.R.J. Vroon, 2012. Meten en interpreteren van grondwaterstanden. Analyse van methodieken en nauwkeurigheid. Wageningen, Alterra-rapport 2345.
- Runhaar, J., P.J.T. van Bakel, M.F.P. Bierkens en P.A. Finke. 2002. Werken met Waternood. Proeftoepassing in het gebied De Leijen. *Stromingen* 8/1: 15-32.
- Sluijs, P. van der, 1982. De grondwatertrap als karakteristiek van het grondwaterstandsverloop. *H₂O* 15(3): 42-46.
- Steur, G.G.L. en W. Heijink, 1991. Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50000. Algemene begrippen en indelingen. Staring Centrum, Wageningen.
- Stowa, 1999. Handboek Good Modelling Practice. Stowa Rapport 99-05. <http://www.stowa.nl/Download?File=152&Type=Pub>
- Te Riele, W.J.M. en D.J. Brus, 1991. Methoden van gerichte grondwaterstandsmetingen voor het schatten van de GHG. Rapport 158, Staring Centrum, Wageningen.
- Te Riele, W. en Brus, D., 1992. Het gebruik van fysisch-geografische voorinformatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstanden en grondwaterkarakteristieken (GHG en GLG). Rapport 209, Staring Centrum, Wageningen.
- Te Riele, W., Querner, E., Knotters, M., en Pomper, A., 1995. Geostatistische interpolatie van grondwaterstandsdiepten met behulp van fysisch-geografische informatie en de resultaten van een regionaal stromingsmodel. Rapport 414, Staring Centrum, Wageningen.
- Thompson, M., 1978. Selection of variables in multiple regression: Part I. A review and evaluation. *International Statistical Review*, 46:1-19.
- Van der Sluijs, P., 1990. Hoofdstuk 11: Grondwatertrappen. In: W.P. Locher en H. de Bakker (red.), *Bodemkunde van Nederland. Deel 1 Algemene Bodemkunde*. Den Bosch, Malmberg.
- Van der Sluijs, P., 1982. De grondwatertrap als karakteristiek van het grondwaterstandsverloop. *H₂O*, 15:42-46.
- Vries, F. de, W.J.M. de Groot, T. Hoogland en J. Denneboom, 2003. De Bodemkaart van Nederland digitaal: Toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionele informatie. Alterra-rapport 811, Wageningen. Rapport 811, Alterra, Wageningen.
- Wesseling, J.G., 1991. CAPSEV; steady state moisture flow theory; program description; user manual. Report 37, Staring Centrum, Wageningen.
- Wösten, J., de Vries, F., Denneboom, J. en van Holst, A., 1988. Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, 1:250 000, ten behoeve van de PAWN-studie. Rapport 2055, Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 2797
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.



To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Rapport 2797
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

