



# Kartering grondwaterspiegeldiepte in de provincie Flevoland

Actualisatie van een deel van het Grondwaterspiegeldieptemodel (WDM) voor de Basisregistratie Ondergrond (BRO)

D.J.J. Walvoort, P. Gerritsen en M. Knotters

| WOt-Rapport 153



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH



## **Kartering grondwaterspiegeldiepte in de provincie Flevoland**

---

Dit WOt-rapport is gemaakt conform het Kwaliteitsmanagementsysteem (KMS) van de unit Wettelijke Onderzoekstaken (WOT) Natuur & Milieu, onderdeel van Wageningen University & Research.

WOT Natuur & Milieu voert wettelijke onderzoekstaken uit op het beleidsterrein natuur en milieu. Deze taken worden uitgevoerd om een wettelijke verantwoordelijkheid van de minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) te ondersteunen. WOT Natuur & Milieu zorgt voor rapportages en data voor (inter)nationale verplichtingen op het gebied van agromilieu, biodiversiteit en bodeminformatie, en werkt mee aan producten van het Planbureau voor de Leefomgeving zoals de Balans van de Leefomgeving.

### **Disclaimer WOt-publicaties**

De reeks 'WOt-rapporten' bevat onderzoeksresultaten van projecten die kennisorganisaties voor WOT Natuur & Milieu hebben uitgevoerd.

WOt-rapport 153 is het resultaat van onderzoek dat gefinancierd is door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV).

# Kartering grondwaterspiegeldiepte in de provincie Flevoland

Actualisatie van een deel van het Grondwaterspiegeldieptemodel (WDM) voor de Basisregistratie Ondergrond (BRO)

Dennis Walvoort, Paul Gerritsen, Martin Knotters

Wageningen Environmental Research

BAPS-projectnummer WOT-04-013-004

**Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu**

Wageningen, september 2023

---

**Wot-rapport 153**

ISSN 1871-028X

DOI 10.18174/634188

---

## Referaat

Walvoort D.J.J., P. Gerritsen, M. Knotters (2023). *Kartering grondwaterspiegeldiepte in Flevoland; Actualisatie van een deel van het grondwaterspiegeldieptemodel van de Basisregistratie Ondergrond (BRO)*. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-rapport 153

Doel van dit project is actuele kaarten te maken van grondwaterspiegeldiepte-karakteristieken voor Flevoland, en de nauwkeurigheid van deze kaarten te kwantificeren. Daarmee draagt dit project bij aan de ontwikkeling van een landsdekkend Grondwaterspiegeldieptemodel dat sinds 2022 beschikbaar is via de Basisregistratie Ondergrond. Het grondwaterspiegeldieptemodel wordt o.a. toegepast bij ruimtelijke planvorming, schadeberekeningen, natuurherstel en -ontwikkeling, bodemdalingsprognoses, aanwijzing van beschermingszones in het kader van de Europese Habitatrichtlijn, onderbouwing van derogatieaanvragen voor de Europese Nitraatrichtlijn in het verleden, en beoordeling van werking en risico's van gewasbeschermingsmiddelen. De kartering in Flevoland is uitgevoerd op basis van een steekproef waarbij de waarnemingen gelijkmatig over het gebied zijn verdeeld. In totaal zijn in 2018 op 246 locaties grondwaterspiegeldiepten gemeten. Op basis van deze gegevens zijn kaarten van grondwaterspiegeldiepte-karakteristieken vervaardigd. De nauwkeurigheid van deze kaarten is gekwantificeerd en de inhoud van de kaarten is gevalideerd middels kruisvalidatie.

*Trefwoorden:* grondwaterspiegeldiepte, GHG, GLG, Gt, Flevoland, nauwkeurigheid, WDM, Basisregistratie Ondergrond

*Mapping water table depth in Friesland: Update of part of the Water Table Depth Model of the Key Registry of the Subsurface (BRO)*

The aim of this project is to make up-to-date maps of water table depth characteristics for the province of Flevoland and to quantify the accuracy of the maps. This project contributes to the ongoing development of the Water Table Depth Model (WDM) for the whole country, which has been available since 2022 from the National Key Registry of the Subsurface (BRO). The WDM has many uses, including for spatial and land use planning, calculating crop damage, nature restoration and habitat creation, soil subsidence forecasting, designation of special areas of conservation (EU Habitats Directive), supporting applications for derogation under the EU Nitrates Directive and assessment of the effectiveness and risks of plant protection products. The mapping in Flevoland was based on measurements at locations distributed evenly across the area. In 2018 water table depths were measured at 246 sites. These data were used to make maps of water table depth characteristics. The accuracy of these maps was quantified and the contents of the maps validated by means of cross-validation.

*Foto omslag:* Paul Gerritsen

© 2023 **Wageningen Environmental Research**  
Postbus 47, 6700 AA Wageningen  
Tel: (0317) 48 01 00; e-mail: [dennis.walvoort@wur.nl](mailto:dennis.walvoort@wur.nl)

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu (unit binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research),  
Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 54 71, [info.wnm@wur.nl](mailto:info.wnm@wur.nl), [www.wur.nl/wotnatuurenmilieu](http://www.wur.nl/wotnatuurenmilieu).

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/634188> of op [www.wur.nl/wotnatuurenmilieu](http://www.wur.nl/wotnatuurenmilieu). WOT Natuur & Milieu verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

- 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.

WOT Natuur & Milieu aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

---

# Woord vooraf

Het onderzoek dat wij in dit rapport beschrijven draagt bij aan de actualisatie van het grondwaterspiegeldieptemodel voor Nederland, dat onderdeel is van de Basisregistratie Ondergrond (BRO). De BRO is een centrale registratie met publieke gegevens over de Nederlandse ondergrond (<https://basisregistratieondergrond.nl/inhoud-bro/bro/>). Het grondwaterspiegeldieptemodel geeft een ruimtelijk beeld van de gemiddeld kleinste en grootste grondwaterspiegeldiepte (GHG en GLG). De actualisatie van het grondwaterspiegeldieptemodel vindt gefaseerd plaats, te beginnen in Laag-Nederland.

Het veldwerk in Flevoland vond plaats in 2018 en in dat jaar werd ook een eerste model van de grondwaterspiegeldiepte gemaakt. In 2019 en 2020 deden we bij de kartering van de grondwaterspiegeldiepte in het holocene deel van de provincie Friesland echter nieuwe inzichten op waarmee we de geactualiseerde kaart van Flevoland konden verbeteren. Daarvan doen wij verslag in dit rapport.

Kenmerkend voor de totstandkoming van een grondwaterspiegeldieptemodel zijn de veldcampagnes. Daarin wordt op een groot aantal locaties een gerichte opname van de diepte van de grondwaterspiegel in een boorgat verricht voor het berekenen van de gemiddeld kleinste en gemiddeld grootste grondwaterspiegeldiepte. Ook worden peilbuisgegevens gebruikt.

Wij bedanken het waterschap Zuiderzeeland voor het beschikbaar stellen van informatie over peilbeheer en peilbuisgegevens. Wij bedanken alle grondeigenaren voor het verlenen van toestemming om hun percelen voor dit doel te betreden. De mooie gesprekken met landeigenaren zijn niet alleen gezellig, maar geven in veel gevallen ook zeer interessante informatie over tal van onderwerpen die van waarde zijn voor dit onderzoek.

Tevens bedanken wij onze collega's Pieter Dijk, Willy de Groot, Falentijn Assinck en Eduard Hummelink voor het uitvoeren van deze veldcampagnes. Collega Fokke Brouwer bedanken wij voor zijn inzet bij het verstrekken van informatie over de actualisatie van de bodemkaart. Tot slot bedanken we Simone Verzandvoort en Daniël van de Craats voor hun review van dit rapport.

Dennis Walvoort, Paul Gerritsen, Martin Knotters





---

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>9</b>
<b>Summary</b>	<b>11</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>13</b>
1.1 Aanleiding en achtergrond	13
1.2 Doel	14
1.3 Toepassingen van het grondwaterspiegeldieptemodel	14
1.4 Opbouw van het rapport	14
<b>2 Materialen en methoden</b>	<b>16</b>
2.1 Aanpak	16
2.2 Selectie van tijdreeksen van grondwaterspiegeldiepten	17
2.3 Selectie van locaties voor de gerichte opnamen	18
2.4 Gerichte opnamen van GHG en GLG	19
2.5 Stambuisregressie	20
2.6 GxG-voorspellingen voor gerichte-opnamelocaties	21
2.7 Gebiedsdekkende GxG-voorspellingen	21
2.7.1 Afbakening van gebieden met vergelijkbare perceelontwatering	21
2.7.2 Kartering van ruimtelijke verdelingen van GxG	23
<b>3 Resultaten</b>	<b>24</b>
3.1 GxG's op peilbuis- en boorlocaties	24
3.2 Semivariogrammodellen	26
3.3 Kaarten van GxG's	27
3.3.1 Vlakkenkaarten	27
<b>4 Kruisvalidatie</b>	<b>29</b>
4.1 Methode	29
4.2 Resultaten	29
4.3 Grondwatertrappenkaart	31
<b>5 Discussie en aanbevelingen</b>	<b>33</b>
5.1 Opgeleverde kaarten en bestanden	33
5.2 Kwaliteit van de opgeleverde kaarten	33
5.3 Aanbevelingen	34
<b>Literatuur</b>	<b>35</b>
<b>Verantwoording</b>	<b>37</b>
<b>Bijlage 1 Geselecteerde peilbuizen, tijdreeksen van de grondwaterspiegeldiepte en afgeleide GxG's</b>	<b>38</b>
<b>Bijlage 2 Veldwerkprotocol opname grondwaterspiegeldiepte</b>	<b>47</b>



---

# Samenvatting

Doel van dit project is actuele kaarten te maken van de karakteristieken GHG, GLG en Gt van de grondwaterspiegeldiepte in Flevoland en de nauwkeurigheid van deze kaarten te kwantificeren. 'Actueel' betekent in deze context dat de kaarten de langjarig gemiddelde grondwaterspiegeldiepte weergeven, gegeven de huidige hydrologische en klimatologische condities. De kaarten geven dus geen instantaan beeld van de actuele grondwaterspiegeldiepte. Met dit doel draagt dit project bij aan de ontwikkeling van een landsdekkend grondwaterspiegeldieptemodel (WDM), waarin voor deelgebieden een actuele gemiddeld kleinste grondwaterspiegeldiepte (GHG), gemiddeld grootste grondwaterspiegeldiepte (GLG) (samen GxG) en grondwatertrappen (Gt) zijn gespecificeerd. Tevens zijn de ruimtelijke cumulatieve verdelingsfuncties van de GxG berekend. Dit grondwaterspiegeldieptemodel wordt vanaf 2023 door de Basisregistratie Ondergrond (BRO) via het BRO-loket en PDOK beschikbaar gemaakt voor iedereen.

Het grondwaterspiegeldieptemodel wordt toegepast bij ruimtelijke planvorming (onder meer het vaststellen van ruilwaarden), schadeberekeningen (in combinatie met bodemtypen), natuurherstel en -ontwikkeling, aanwijzing van beschermingszones in het kader van de Europese Habitatrichtlijn, onderbouwing van derogatieaanvragen voor de Europese Nitraatrichtlijn, bodemdalingsprognoses, en beoordeling van werking en risico's van gewasbeschermingsmiddelen.

Voor de kartering in Flevoland is gekozen voor een steekproefopzet die aansluit bij de spatial-coverage-steekproef, die werd uitgevoerd voor de actualisatie van de bodemkaart van dit gebied. Aan 206 punten met geoptimaliseerde ruimtelijke spreiding (spatial coverage) zijn 40 punten toegevoegd om informatie te krijgen over variatie in GxG op kortere afstanden. Het totaal aantal locaties waar gerichte opnamen van de GHG en GLG hebben plaatsgevonden bedroeg 246. Op deze zogenoemde 'gerichte-opnamelocaties' zijn metingen van de grondwaterspiegeldiepte verricht in de periode dat de GHG en GLG voorkomen. Het veldwerk voor de bodem- en grondwaterkarteringen vond in 2018 plaats.

Na een controle van de peilbuisgegevens die door het waterschap Zuiderzeeland waren verstrekt op een aantal kwaliteitskenmerken, zijn de gegevens van 60 peilbuizen bruikbaar bevonden voor dit onderzoek. Voor de locaties van de 60 peilbuizen is de relatie vastgesteld tussen GHG's en GLG's enerzijds, en grondwaterspiegeldiepten ten tijde van de gerichte opnamen anderzijds. Deze relatie is gebruikt om op gerichte-opnamelocaties GHG's en GLG's uit gemeten grondwaterspiegeldiepten te berekenen. Bij deze zogeheten stambuisregressie is rekening gehouden met de aanwezigheid van 'dieper-dan' of gecensureerde waarnemingen, door niet-parametrische regressiemodellen te gebruiken. De GHG en GLG op een gerichte-opnamelocatie is vervolgens berekend met de mediaan uit de verdeling die gesimuleerd is met een niet-parametrisch regressiemodel.

Naast de GxG's die uit tijdreeksen zijn berekend voor de peilbuislocaties en de GxG's die met behulp van stambuisregressie zijn berekend voor de gerichte-opnamelocaties, beschikten we over 1272 veldschattingen van GxG's op boorlocaties van de actualisatie van de bodemkaart (opname in 2017). Deze veldschattingen zijn gebaseerd op hydromorfe kenmerken in het bodemprofiel.

De verzamelde data zijn verwerkt tot kaarten van de GxG met behulp van geostatistische modellering. De simulaties werden voor alle gridcellen binnen een homogeen verondersteld deelgebied (stratum) samengevoegd om de ruimtelijke cumulatieve verdeling van GxG's van dat deelgebied te berekenen.

Het onderzoek heeft voor dit studiegebied de volgende producten opgeleverd:

- Bestand met 300 realisaties van GHG's en GLG's per 50 x 50 m-gridcel. Deze geven de nauwkeurigheid weer van de kaarten van GHG en GLG.  
De realisaties zijn geaggregeerd binnen strata met homogene perceelsontwatering. Ze geven daardoor de ruimtelijke verdeling van GHG en GLG in deze strata weer.
- Vlakkenkaarten van GHG's en GLG's voor vlakken met homogene perceelsontwatering.

- 
- Een grondwatertrappenkaart, gebaseerd op de modus van de Gt's die bepaald zijn uit de realisaties.
  - Een grondwatertrappenkaart, gebaseerd op de mediane GHG's en GLG's uit de realisaties.

De ruimtelijke cumulatieve verdelingsfuncties van GHG en GLG per stratum vormen de basis voor alle afgeleide kaarten. Naast de kaarten die hierboven zijn genoemd kunnen voor specifieke vraagstukken aparte kaarten worden afgeleid, zoals overschrijdingskanskaarten.

De verdeling van GHG, GLG en Gt is voor elke 50 m x 50 m-gridcel binnen een van de 565 strata gelijk, en geeft de ruimtelijke variatie en onzekerheid weer die er is binnen het betreffende stratum.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van tijdreeksen van de grondwaterspiegeldiepte, waargenomen in peilbuizen, van metingen in open boorgaten en van veldschattingen op basis van hydromorfe profielkenmerken. Hoewel er reeksen van 60 peilbuislocaties beschikbaar waren, lagen deze locaties ruimtelijk geclusterd. Wij bevelen aan om een meetnet met meer ruimtelijke spreiding en spreiding over meer uiteenlopende bodemkundig-hydrologische situaties op te zetten. Metingen in percelen, eventueel verzameld in het kader van participatieve monitoring, zouden in de toekomst wellicht bruikbare hulpinformatie kunnen vormen. De informatie over ruimtelijke variatie en onzekerheid die dit onderzoek geeft, kan zonder meer worden toegepast bij meetnetoptimalisatie. Bij toepassing in onzekerheids- en risicoanalyse bevelen wij aan om deze informatie bij te stellen met een factor die ontleend kan worden aan de uitkomsten van de kruisvalidatie.

---

# Summary

The aim of this project is to make up-to-date maps of average shallowest water table (GHG), average deepest water table (GLG) and water table class (Gt) in the province of Flevoland and to quantify the accuracy of these maps. In this context, 'up to date' means that the maps give the multi-year average water table depth under present hydrological and climatological conditions. The maps therefore do not give an accurate picture of the actual water table depth at any moment. This project is part of the ongoing development of the Water Table Depth Model (WDM) covering the whole of the Netherlands. For each subarea the model contains up-to-date data on GHG, GLG (together GxG) and Gt, as well as spatial cumulative distribution functions for the GxG. As of 2023 the map is publicly available from the National Key Registry of the Subsurface (BRO) via the BRO service desk and PDOK (government platform for high-quality geodata in the Netherlands).

The WDM is used for spatial and land use planning (including calculating agricultural exchange values), calculating crop damage (in combination with soil types), nature restoration and habitat creation, designation of special areas of conservation under the EU Habitats Directive, supporting applications for derogation under the EU Nitrates Directive, soil subsidence forecasting and assessment of the effectiveness and risks of plant protection products.

For the mapping in Flevoland the decision was made to use a sampling method consistent with the spatial coverage sampling for the update of the soil map for the same area. The 206 points with optimised spatial coverage were supplemented with 40 points to obtain information on the variation in GxG over shorter distances. The total number of sites where target sampling of GHG and GLG took place was therefore 246. At these 'target sampling points', measurements of the water table depth were made in the period that the GHG and GLG occur. The fieldwork for the soil and water table maps was carried out in 2018.

The groundwater observation well data supplied by the Zuiderzeeland regional water authorities were checked against a number of data quality attributes and data from 60 groundwater observation wells were found to be suitable for use in this study. For the 60 locations of the groundwater observation wells the relation between the GHGs and GLGs and the water table depths were determined for the time the groundwater depths in boreholes were recorded. This relation was used to calculate GHGs and GLGs for the borehole locations from the measured water table depths, using non-parametric regression models to take into account the presence of 'deeper-than' or right-censored observations. GHGs and GLGs at the borehole locations were then calculated using the medians of the distributions simulated using a non-parametric regression model.

In addition to the GxGs calculated using time series data from the groundwater observation wells and the GxGs calculated using non-parametric regression, 1,272 field estimates of GxGs at the borehole locations used for the update of the soil map (surveyed in 2017) were also available. These field estimates are based on hydromorphic properties of the soil profile.

Maps of the GxG were prepared from the data collected using a geostatistical model. The simulations for all grid cells within an area considered to be homogeneous were combined to calculate the spatial cumulative distribution of GxGs in that area.

For this study area the study delivered the following products:

- A database of 300 realisations of GHGs and GLGs per 50x50 m grid cell. These realisations show the uncertainty of the maps of GHG and GLG.  
The realisations were aggregated within strata with homogeneous field drainage and therefore show the spatial distribution of GHG and GLG in these strata.
- Maps of GHGs and GLGs for areas with homogeneous field drainage.
- A water table class map based on the mode of the Gts determined from the realisations.

- 
- A water table class map based on the median GHGs and GLGs from the realisations.

The spatial cumulative distribution functions of GHGs and GLGs per stratum form the basis of all derivative maps. In addition to the maps mentioned above, maps can also be derived for specific topics, such as the probability of exceedance of specific thresholds of water table depths.

Within each of the 565 strata, GHGs, GLGs and Gts are equally distributed across the 50x50 m grid cells and show the spatial variation and uncertainty within the strata.

This study made use of the following data sources: times series of water table depths observed in the groundwater observation wells, measurements made in open boreholes, and field estimates based on hydromorphic profile characteristics. Although time series were available for 60 groundwater observation wells, these wells were spatially clustered. We recommend setting up a monitoring network with a more even distribution of observation wells and covering a wider variety of soil hydrological conditions. In future, field measurement, possibly made by farmers or other landowners (participatory monitoring), could provide useful supporting information. The information on spatial variation and uncertainty obtained from this study can be used to optimise the monitoring network. When using this information in uncertainty and risk analyses we recommend adjusting it using a factor that can be derived from the results of the cross-validation.

---

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en achtergrond

Sinds het begin van de jaren vijftig van de vorige eeuw wordt de diepte tot de grondwaterspiegel systematisch in kaart gebracht. De elf provinciale kaarten van de zomer- en wintergrondwaterstand, schaal 1:200.000, van de Commissie Onderzoek Landbouwwaterhuishouding Nederland (COLN; Visser, 1958) vormden het eerste landelijke beeld van de diepte waarop zich de grondwaterspiegel bevindt. Deze kaarten waren gebaseerd op waarnemingen die tussen 1952 en 1955 ieder kwartaal werden verricht in circa 23.000 buizen die in elke vierkante kilometer van Nederland waren geplaatst, op tijdreeksen met een half-maandelijkse frequentie die werden verzameld in circa 2000 buizen en op tijdreeksen met een dagfrequentie uit 65 buizen.

Vanaf 1960 tot circa 1995 werd de diepte van de grondwaterspiegel simultaan met de bodem van Nederland gekarteerd op schaal 1:50.000. De gemiddelde diepten waartussen de grondwaterspiegel jaarlijks fluctueert werden uitgedrukt in de Gemiddeld Hoogste en Laagste Grondwaterstand (GHG en GLG, zie voor definities het kader aan het eind van dit hoofdstuk), die vervolgens werden geclassificeerd in grondwatertrappen (Gt's) die op de bodemkaart werden weergegeven (Van Heesen, 1970). Bij de kartering van Gt's werd gebruikgemaakt van waarnemingen in peilbuizen, metingen in boorgaten (dichtheid 1 per 6 à 8 hectare), hydromorfe profielkenmerken en landschappelijke kenmerken.

Door ingrepen in de waterhuishouding, bijvoorbeeld in het kader van landinrichtingsprojecten, verloor de informatie op de COLN-kaarten en Gt-kaarten aan actualiteit. Omdat er, onder meer voor de onderbouwing van het mestbeleid, behoefte was aan actuele informatie over de diepte van de grondwaterspiegel is tussen 1997 en 2005 een actualisatie uitgevoerd in het pleistocene, hoge deel van Nederland waar veelal een vrije afwatering is (Finke e.a., 2004, 2005). Bij deze kartering van de grondwaterdynamiek (Gd) werden de GHG's en GLG's afzonderlijk in kaart gebracht in een 25m x 25m-grid en werd de nauwkeurigheid van de informatie gekwantificeerd. Voor deze kartering werden grondwaterspiegeldiepten rond GHG- en GLG-niveau waargenomen in 14.572 boorgaten (één per 114 hectare) en werden tijdreeksen van 528 peilbuizen gebruikt. Uit de Gd-informatie kunnen Gt-kaarten worden afgeleid, maar bijvoorbeeld ook kaarten die de kans weergeven dat een bepaald niveau van GHG of GLG wordt overschreden.

De informatie over de grondwatertrappen in Laag-Nederland is tussen 2012 en 2014 steekproefsgewijs geactualiseerd (Hoogland e.a., 2014). Hierbij werd in 1237 boorgaten de grondwaterspiegeldiepte gemeten rond GHG- en GLG-niveau en werd gebruik gemaakt van tijdreeksen van 114 peilbuizen. Uit deze actualisatie en de genoemde Gd-kaarten is in 2018 een actuele Gt-kaart samengesteld (Knotters e.a., 2018).

Het Grondwaterspiegeldieptemodel (Water table Depth Model, WDM) is een registratie-object van de Basisregistratie Ondergrond (BRO), zie <https://basisregistratieondergrond.nl/>. Dit betekent dat landsdekkende informatie over GHG, GLG en Gt voor 50m x 50m-gridcellen beschikbaar wordt gesteld en actueel wordt gehouden. De actualisatie is in 2018 begonnen in de provincie Flevoland. Uit analyse van de voorlopige resultaten hiervan bleek, dat de actualisatiemethode meer rekening moest houden met variatie in GHG's en GLG's binnen percelen (Stuyt e.a., 2018). Hiertoe is de methodiek verder ontwikkeld, waarbij gebieden met vergelijkbare perceelontwatering worden onderscheiden op basis van informatie over bodemgesteldheid en peilbeheer. In dit rapport worden de methodiek en de resultaten gepresenteerd. Inmiddels is ook een actualisatie voor het holocene, lage deel van Friesland uitgevoerd (Gerritsen e.a., 2021; Knotters e.a., 2022a, b).

---

## 1.2 Doel

Het doel van dit onderzoek is actuele kaarten te maken van de karakteristieken GHG, GLG en Gt van de grondwaterspiegeldiepte in de provincie Flevoland en de nauwkeurigheid van deze kaarten te kwantificeren. 'Actueel' betekent in deze context dat de kaarten de langjarig gemiddelde grondwaterspiegeldiepte weergeven, gegeven de huidige hydrologische en klimatologische condities. De kaarten geven dus geen instantaan beeld van de grondwaterspiegeldiepte.

De kaart beperkt zich tot onverhard terrein buiten de bebouwde kom: geen stadstuinen of -parken, geen verhardingen, bermen en taluds.

## 1.3 Toepassingen van het grondwaterspiegeldieptemodel

Knotters e.a. (2015) beargumenteren dat actuele informatie van de grondwaterspiegeldiepte van hoge en bekende nauwkeurigheid bijdraagt aan de beperking van juridische, politiek-bestuurlijke, maatschappelijke en economische risico's en risico's voor het kennisstelsel. Dit komt tot uiting in onder meer de volgende toepassingen:

1. Ruimtelijke planvorming, onder meer het vaststellen van ruilwaarden.
2. Schadeberekeningen. Grondwatertrappen, GHG's en GLG's vormen in combinatie met bodemtypen de ingang van tabellen voor de bepaling van droogte- en natschade aan gewassen in termen van percentages opbrengstdepressie: Waterwijzer Landbouw (<https://waterwijzerlandbouw.wur.nl/>, Mulder e.a., 2018; Hack-ten Broeke e.a., 2019).
3. Natuurherstel en -ontwikkeling. Gemiddelde voorjaarsgrondwaterstanden (GVG's), die uit GHG's en GLG's kunnen worden afgeleid, worden in de Waternoodsystematiek gebruikt om het Gewenste Grond- en Oppervlaktewaterregime (GGOR) aan te geven (Runhaar en Hennekens, 2014). Met deze informatie kunnen beschermingszones worden aangewezen waardoor Nederland kan voldoen aan verplichtingen in het kader van de Europese Habitatrichtlijn (EG, 1992).
4. Onderbouwing van derogatieaanvragen voor de Europese Nitraatrichtlijn (tot voor kort; EG, 1991). Hiervoor moesten actuele gegevens over de bodem – ruwe data, bodem- en grondwatertrappenkaart – beschikbaar zijn.
5. Voor het voorspellen van bodemdaling (bodemdalingsprognose) wordt de GLG gebruikt.

## 1.4 Opbouw van het rapport

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de methodologie. Dit begint met een overzicht van de veldinventarisatie waarin grondwaterspiegeldiepten en hydromorfe bodemkenmerken zijn geregistreerd. Vervolgens wordt het gebruik van tijdreeksen van peilbuizen behandeld, welke worden gebruikt om GHG's en GLG's te schatten op de meetpunten van de grondwaterspiegeldiepte. Als laatste wordt de verwerking van data tot actuele kaarten van de GHG, GLG en Gt behandeld, inclusief de analyse van de nauwkeurigheid van deze kaarten. In hoofdstuk 3 worden de kaarten en analyses gepresenteerd die voortkomen uit deze studie. Hoofdstuk 4 beschrijft de validatie van de kaarten. Tot slot volgt in hoofdstuk 5 een discussie van de resultaten en worden enkele aanbevelingen gedaan.



## Definities

De definities in dit kader zijn overgenomen uit Ritzema e.a. (2012).

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

**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 14e en 28e).

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

**GxG:** verzamelterm voor GHG en GLG

**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 14e en 28e).

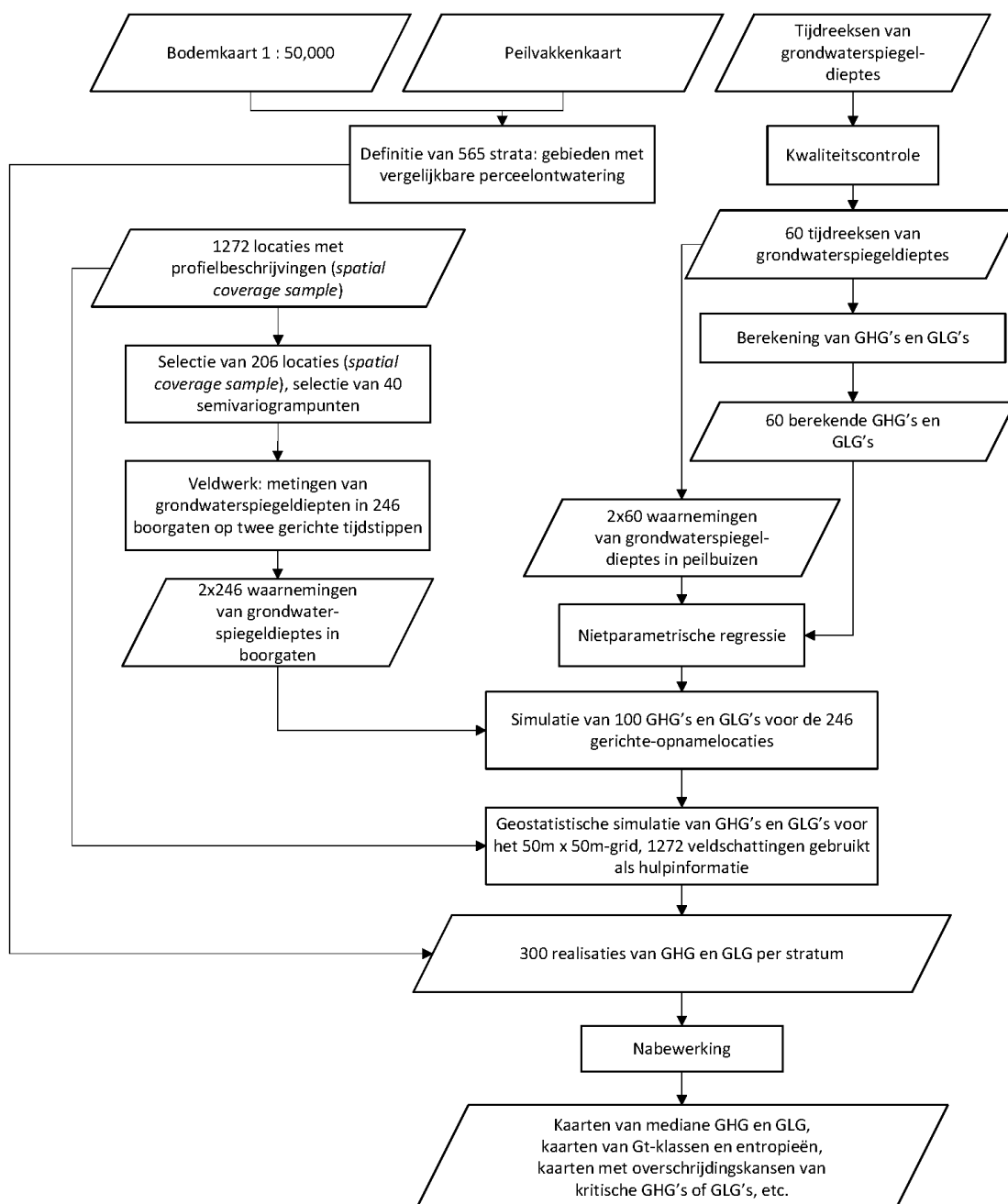
**Grondwatertrap (Gt):** typische combinatie van GHG- en GLG-klassen die op thematische kaarten kan worden weergegeven.

**Opmerking:** daar waar in deze definities uit Ritzema e.a. (2012) nog sprake is van 'grondwaterstand', moet tegenwoordig 'grondwaterspiegeldiepte' gelezen worden, omdat het de verticale afstand van het maaiveld tot de grondwaterspiegel betreft en dus niet de grondwaterstand t.o.v. één vast referentieniveau. De grondwaterspiegeldiepte betreft de diepte tot de bovenkant van het freatische grondwaterpakket, waarin de stijghoogte alleen afhangt van de hoogte van de waterkolom. De grondwaterspiegeldiepte is dus de diepte tot het niveau waarop het freatische grondwater drukhoogte 0 heeft.

## 2 Materialen en methoden

### 2.1 Aanpak

Figuur 1 geeft een stroomschema weer van de aanpak van de kartering van GHG, GLG en Gt in de provincie Flevoland. In de volgende paragrafen zullen de verschillende stappen worden toegelicht.



**Figuur 1** Stroomschema van de aanpak van kartering van GHG, GLG en Gt in de provincie Flevoland.

---

De aanpak om van puntinformatie van GHG en GLG op peilbuislocaties te komen tot gebiedsdekkende voorspellingen is als volgt samengevat:

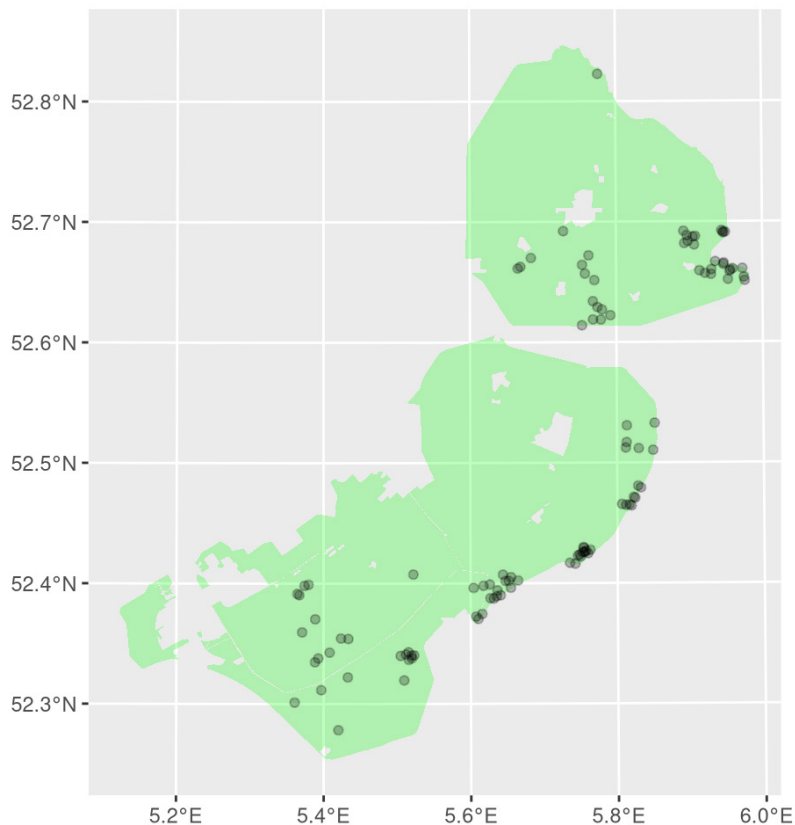
1. berekening van GHG en GLG uit tijdreeksen van grondwaterspiegeldiepten, waargenomen in 60 peilbuizen (paragraaf 2.2);
2. modellering van de lineaire relatie tussen GHG en GLG en de grondwaterspiegeldiepte op een tijdstip (stambuisregressie, paragraaf 2.5);
3. berekening van GHG's en GLG's voor 246 gerichte-opnamelocaties (paragraaf 2.3, 2.4), met behulp van het stambuisregressiemodel (paragraaf 2.6);
4. onderscheid van 565 deelgebieden (strata) met vergelijkbare perceelontwatering op basis van de bodemkaart 1 : 50.000 en een peilvakkenkaart (subparagraaf 2.7.1);
5. geostatistische modellering en stochastische simulatie van GHG en GLG, waarbij ook de 1272 veldschattingen van GHG en GLG worden gebruikt, en samenvatting van gesimuleerde GHG en GLG in ruimtelijke verdelingsfuncties voor 565 strata (subparagraaf 2.7.2).

## 2.2 Selectie van tijdreeksen van grondwaterspiegeldiepten

Uit de gegevens die door waterschap Zuiderzeeland beschikbaar waren gesteld is een selectie gemaakt van de peilbuizen waarin geschikte tijdreeksen van grondwaterspiegeldiepten zijn waargenomen, op basis van de volgende criteria:

1. Het filter moet ondiep zijn, dat wil zeggen in of vlak onder de zone waarin de freatische grondwaterspiegel fluctueert.
2. De peilbuis moet in het doelgebied (zie paragraaf 1.2) staan, dat wil zeggen in onverhard terrein buiten de bebouwde kom: niet in stadstuinen of -parken, niet in verhardingen, niet in bermen en taluds.
3. Er moet een tijdreeks gemeten zijn van ten minste 4 à 6 jaar lang, zonder effecten van ingrepen in de waterhuishouding, zonder onderbrekingen of lange perioden van droog staan. Dit is voor peilbeheerste gebieden voldoende gebleken om de GHG en GLG te berekenen (Knotters e.a., 2011).
4. De frequentie van de tijdreeks moet ten minste halfmaandelijks (14<sup>e</sup> en 28<sup>e</sup> van de maand) zijn, omdat de definities van GHG en GLG op deze frequentie zijn gebaseerd (zie kader hoofdstuk 1).
5. Tijdens de gerichte opnamen van grondwaterspiegeldiepten in boorgaten moet in de peilbuis handmatig kunnen worden gemeten, of moet de grondwaterspiegeldiepte automatisch worden geregistreerd.

Er zijn in totaal 60 peilbuizen geselecteerd waarvan de tijdreeksen gebruikt worden in de verdere analyses in deze studie. Voor iedere tijdreeks zijn een GHG en een GLG berekend. Bijlage 1 geeft een overzicht van de geselecteerde buizen, tijdreeksen en de berekende GxG's. Figuur 2 geeft de ligging van de geselecteerde 60 peilbuizen.



**Figuur 2** Ligging van de 60 geselecteerde peilbuizen.

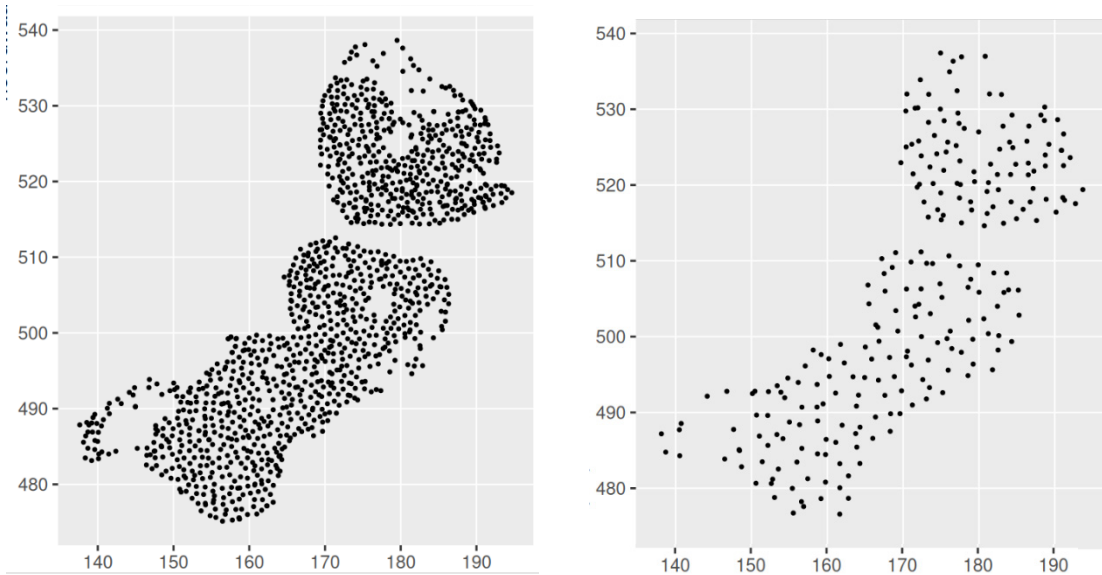
## 2.3 Selectie van locaties voor de gerichte opnamen

Bij aanvang van de actualisatie van het model grondwaterspiegeldiepte in 2018 werd ook gewerkt aan de actualisatie van de bodemkaart van Flevoland, schaal 1 : 50.000 (Brouwer e.a., 2018). Voor deze actualisatie moesten in totaal 1272 bodemkundige profielbeschrijvingen worden verricht volgens een *spatial coverage sample* met het *R-package spcosa* (Walvoort e.a., 2010). Bij deze profielbeschrijvingen zijn ook GxG-schattingen gemaakt op basis van hydromorfe kenmerken, die ook gebruikt zijn in deze studie. Bij een *spatial coverage sample* wordt de ruimtelijke verspreiding van de punten geoptimaliseerd ten behoeve van het in kaart brengen van ruimtelijke patronen. Om de doelmatigheid van het veldonderzoek te vergroten vormde de steekproef van 1272 punten de basis voor een *spatial coverage sample* van 206 punten voor gerichte opnamen van de grondwaterspiegeldiepte in boorgaten. Het aantal van 206 is bepaald door de capaciteit die beschikbaar was voor veldwerk. Voor dit *spatial coverage sample* zijn de centroiden van 206 compacte geografische eenheden met gelijke oppervlakten geselecteerd met behulp van het genoemde *R-package spcosa*. Vervolgens zijn hierbij de dichtstbijzijnde locaties gezocht uit het *spatial coverage sample* van 1272 dat is gemaakt voor de actualisatie van de bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50.000. Deze 206 geselecteerde locaties zijn in 2017 en 2018 bezocht voor zowel de actualisatie van de bodemkaart als de Gd-kartering.

Daarnaast zijn 40 extra locaties geselecteerd die ervoor dienen inzicht te krijgen in de variatie in GHG's en GLG's op kortere afstanden dan de kortste afstand tussen de 206 locaties van het *spatial coverage sample*. Dit inzicht in de variatie op korte afstanden is nodig om te modelleren hoe de verschillen in GHG en GLG tussen twee locaties afhangen van de afstand. Dit wordt gemodelleerd met een semivariogram en daarom noemen we de 40 extra punten semivariogrampunten. De 40 semivariogrampunten zijn eveneens met behulp van een *spatial coverage sample* geselecteerd. Bij deze punten zijn echter geen dichtstbijzijnde locaties met bodemkundige profielbeschrijvingen gezocht, maar er is geboord op de 40 locaties die *spcosa* heeft berekend en die tussen de 206 geselecteerde locaties met bodemkundige profielbeschrijvingen in liggen. Op deze wijze wordt ervoor gezorgd dat de kortste afstand van een semivariogrampunt tot één van de 206 locaties van het *spatial coverage sample* korter is dan de kortste afstand tussen de 206 locaties

onderling. Voor de 40 semivariogrampunten zijn nieuwe profielbeschrijvingen gemaakt, omdat ze immers niet samenvallen met locaties die in het kader van de actualisatie van de bodemkaart van Nederland zijn bezocht. Deze profielbeschrijvingen droegen bij aan de actualisatie van de bodemkaart voor de BRO (Brouwer e.a., 2018).

Figuur 3 geeft de locaties weer van de *spatial coverage samples* voor de actualisatie van de bodemkaart, schaal 1 : 50.000, en voor het model grondwaterspiegeldiepte.



**Figuur 3** Ligging van de 1272 boorlocaties voor de actualisatie van de bodemkaart, schaal 1 : 50.000 (links) en van de 246 boorlocaties voor gerichte opnamen van de GxG.

## 2.4 Gerichte opnamen van GHG en GLG



**Figuur 4** Handmatige meting van de grondwaterspiegeldiepte in een boorgat.

Opnamen van de grondwaterspiegeldiepte worden gedaan in open boorgaten (zie figuur 4). Daarbij wordt met behulp van een Edelmanboor een verticaal gat met een doorsnede van acht centimeter geboord, tot ongeveer tien centimeter onder de grondwaterspiegel (Hooghoudt, 1952). Veldmedewerkers schatten deze boordiepte in op basis van profielkenmerken zoals de vochttoestand, het al dan niet voorkomen van

---

gleyverschijnselen en/of het waarnemen van de gereduceerde zone in de bodem. Hiernaast kunnen factoren zoals oppervlaktewaterstand, informatie over drainage en reeds bestaande kaartinformatie over de grondwaterspiegeldiepte gebruikt worden bij het inschatten van de grondwaterspiegeldiepte op het moment van boren.

Na een instelperiode van meestal één à twee dagen wordt de grondwaterspiegeldiepte in de boorgaten gemeten door middel van een peilklokje aan een meetlint (zie figuur 4). Soms zijn er langere insteltijden nodig bij bodems die water erg moeilijk doorlaten (Vroon en Kiestra, 2010). Veldmedewerkers beschrijven elk bodemprofiel en schatten in welke instelperiode voldoende is voor een betrouwbare waarneming van de grondwaterspiegeldiepte. Nadat de grondwaterspiegel zich heeft ingesteld, worden in de open boorgaten de grondwaterspiegeldiepten door de veldmedewerkers gemeten. Tijdens deze opname wordt ook in alle geselecteerde peilbuizen de grondwaterspiegeldiepte automatisch (met drukopnemers) gemeten (zie paragraaf 2.2). Op de 246 geselecteerde locaties uit paragraaf 2.3 werden verspreid over 7, 8, 15 en 21 maart en 11 april 2018 gerichte opnamen van de GHG uitgevoerd, omdat de grondwaterspiegeldiepte zich toen rond GHG-niveau bevond en de weersomstandigheden stabiel waren. Verspreid over 26 juli en 1 en 2 augustus 2018 werden gerichte opnamen van de GLG uitgevoerd op dezelfde locaties, omdat de grondwaterspiegeldiepte zich toen rond GLG-niveau bevond onder stabiele weersomstandigheden.

Bij alle boorgatlocaties waar de grondwaterspiegeldiepte is gemeten zijn bodemkundige profielbeschrijvingen gemaakt tot een diepte van ten minste anderhalve meter. Indien de grondwaterspiegel binnen anderhalve meter zat op dat moment, is op een afstand van ongeveer twee meter een extra boorgat gemaakt om hierin een betrouwbare waarneming te doen van het grondwater, dus met de gewenste boorgatdiepte van ongeveer tien centimeter onder de grondwaterspiegel op dat moment. Op de andere locatie is dan een profielbeschrijving van ten minste anderhalve meter diepte gemaakt.

Tijdens het veldwerk werd expliciet gelet op het optreden van schijnspiegels. Een schijnspiegel is een freatisch vlak van een grondwaterlichaam gelegen op een slecht doorlatende laag, waaronder weer een onverzadigde zone voorkomt. Als er een stagnerende laag in het bodemprofiel werd aangetroffen, dan werden er twee gaten geboord: één tot op de stagnerende laag, en één gat tot in de permanent gereduceerde zone. In beide gaten werd de grondwaterspiegeldiepte gemeten en de kleinste grondwaterspiegeldiepte werd gebruikt voor de berekeningen, omdat deze relevant is voor plantengroei. Bijlage 2 geeft het veldprotocol voor de gerichte opnamen.

## 2.5 Stambuisregressie

Met de gerichte opnamen van grondwaterspiegeldiepten in peilbuizen is het mogelijk een relatie te leggen tussen de GxG's die zijn berekend uit langjarige meetreeksen in de peilbuizen en de grondwaterspiegeldiepten op het moment van de metingen in de open boorgaten. Deze relatie wordt vervolgens gebruikt om GxG's te berekenen voor de locaties van de boorgaten. De nauwkeurigste schattingen van GHG's en GLG's zijn mogelijk voor locaties van peilbuizen, omdat hier tijdreeksen zijn waargenomen waaruit de GHG's en GLG's kunnen worden berekend. Stambuisregressie houdt in dat de lineaire relatie wordt beschreven tussen deze berekende GHG's en GLG's en grondwaterspiegeldiepten die tijdens de gerichte opnamen in de betreffende peilbuizen zijn gemeten (Te Riele en Brus, 1991). Deze lineaire relatie wordt dan gebruikt om GHG's en GLG's te voorspellen uit grondwaterspiegeldiepten die tijdens de gerichte opnamen in boorgaten zijn gemeten.

Waarnemingen van grondwaterspiegeldiepten kunnen zogeheten gecensureerde waarnemingen bevatten. We weten dan alleen dat de grondwaterspiegel zich dieper dan een bepaald niveau bevindt, bijvoorbeeld dieper dan de onderkant van het waarnemingsfilter of het boorgat. Weglaten van deze gecensureerde waarnemingen of ze vervangen door de onderkant van de buis of de diepte van het boorgat, leidt tot systematische fouten. Daarom gebruiken we statistische methoden die rekening houden met gecensureerde waarnemingen. Er komen 'dieper-dan-' of rechts-gecensureerde waarnemingen voor bij zowel de metingen in peilbuizen als bij de boorgatmetingen. Rechts wil zeggen: aan de rechterkant van de frequentieverdeling van grondwaterspiegeldiepten is een limiet. Dit is de maximale diepte waartoe is geboord en dit wordt de censordiepte genoemd (niet te verwarren met de diepte van een sensor). Op een aantal locaties is geen

---

grondwaterspiegeldiepte gemeten binnen deze censordiepte. Dan weten we dus alleen dat de grondwaterspiegel zich dieper dan de censordiepte bevindt, maar niet hoeveel dieper. Met deze gecensureerde waarnemingen kan rekening worden gehouden door maximum-likelihoodregressie of niet-parametrische regressie toe te passen (Helsel, 2004). Wij pasten een procedure van niet-parametrische regressie toe (Knotters e.a. 2022a, b), die als volgt is samengevat:

1. De lineaire relatie tussen de grondwaterspiegeldiepte in de peilbuis tijdens een gerichte opname en de GxG op die locatie wordt gemodelleerd met niet-parametrische lineaire regressie (Akritas e.a., 1995). Bij niet-parametrische regressie worden de richtingscoëfficiënten van de lijnstukken tussen alle mogelijke puntenparen (in een *scatterplot*) berekend. Van richtingscoëfficiënten voor lijnstukken die gecensureerde waarnemingen verbinden met niet-gecensureerde waarnemingen weten we alleen dat deze groter of kleiner dan een bepaalde waarde zijn, op basis van de censordiepte. Vervolgens wordt de richtingscoëfficiënt van het lineaire regressiemodel berekend met de mediaan van alle hellingen tussen puntenparen. Deze methode wordt ook wel de Akritas-Theil-Sen-methode genoemd. Het intercept volgt uit de mediane richtingscoëfficiënt  $b_1$ . Deze is gelijk aan de mediaan van  $y_i - b_1 x_i$ , waarin  $y_i$  gelijk is aan de GxG, en  $x_i$  gelijk is aan de grondwaterspiegeldiepte gemeten in de gerichte opname ( $i=1, \dots, 60$ ).
2. De nauwkeurigheid van de regressieparameters kwantificeren we door een niet-parametrische *bootstrap* uit te voeren op de residuen (*non-parametric residual bootstrap*, Efron en Tibshirani, 1993). Deze *bootstrap* houdt in dat regressiemodellen worden gefit met de Akritas-Theil-Sen-methode op  $N_R$  aselechte trekkingen met teruglegging uit de dataset. Elke trekking heeft de omvang  $n$  van de oorspronkelijke dataset ( $n=60$ ). Het kan dus gebeuren dat één residu meer dan één keer wordt geselecteerd. Op deze manier worden  $N_R$  realisaties van het lineaire regressiemodel verkregen. Wij stellen het aantal *bootstrap*-realisaties van het stambuisregressiemodel,  $N_R$ , op 100.

## 2.6 GxG-voorspellingen voor gerichte-opnamelocaties

Op vier locaties van de gerichte opname van de GLG bevond de grondwaterspiegeldiepte zich onder de bodem van het boorgat. Dit zijn gecensureerde waarnemingen met de diepte van het boorgat als censorgrens. Met behulp van de modellen uit de stambuisregressie kunnen we voor deze locaties slechts voorspellen dat de GxG zich dieper dan een bepaalde waarde bevindt. Dit zijn dus 'gecensureerde voorspellingen'.

Met de  $N_R$  realisaties van het lineaire regressiemodel worden  $N_R$  voorspellingen van de GxG verkregen voor elke locatie  $i$ ;  $i = 1 \dots k$  van de gerichte opname. Bij elke voorspelling wordt aangegeven of deze gecensureerd is of niet.

## 2.7 Gebiedsdekkende GxG-voorspellingen

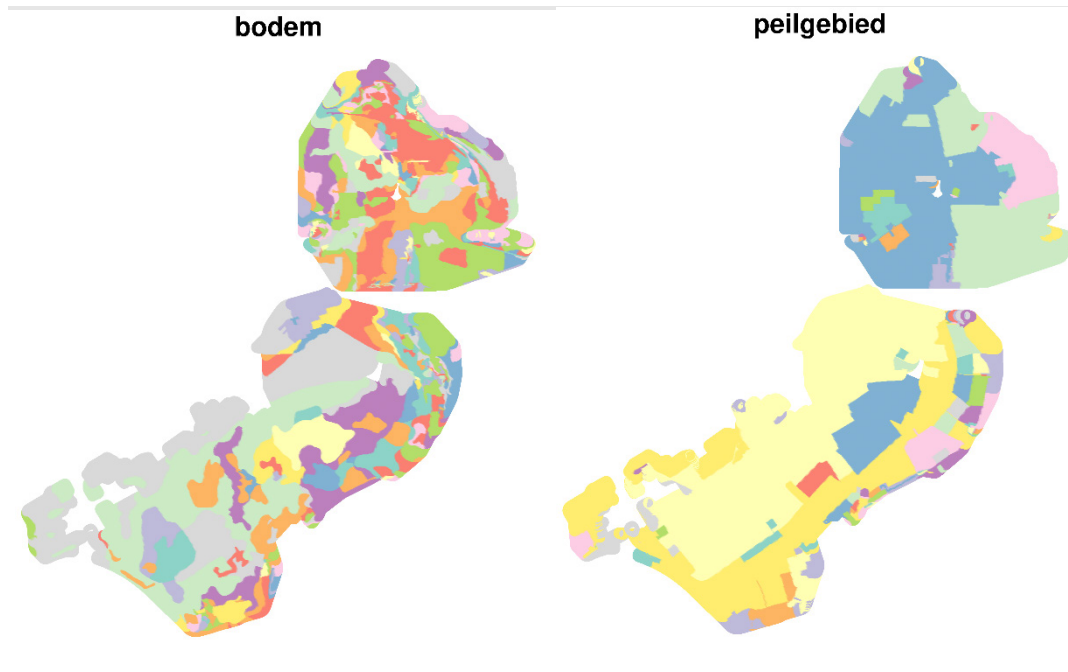
### 2.7.1 Afbakening van gebieden met vergelijkbare perceelsontwatering

In gebieden met beheerste peilen treedt relatief veel van de ruimtelijke variatie in grondwaterspiegeldiepten, GHG's, GLG's en Gt's op binnen percelen. In de winter zal in perioden met een aanhoudend neerslagoverschot de grondwaterspiegel een opbolling ten opzichte van het oppervlaktewaterpeil vertonen, terwijl in de zomer in perioden met een aanhoudend neerslagtekort de grondwaterspiegel een uitgezakt (hol) verloop zal laten zien. De ruimtelijke variatie van grondwaterspiegeldiepten binnen percelen is niet in kaart te brengen met de nagestreefde maximale resolutie van 50 m x 50 m. Daarom is ervoor gekozen om de ruimtelijke variatie binnen percelen te beschrijven voor gebieden met vergelijkbare perceelsontwatering. We onderscheiden gebieden met vergelijkbare perceelsontwatering op basis van de volgende criteria:

1. vergelijkbare bodemgesteldheid;
2. behorend tot hetzelfde peilgebied.

112 gebieden met gelijke bodemgesteldheid werden geselecteerd op basis van de bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50.000 (figuur 5 links). Door de bodemkaart over de kaart met peilgebieden (figuur 5

rechts) te leggen zijn vervolgens deelgebieden (strata) met, naar verwachting, relatief homogene perceelsontwatering onderscheiden (figuur 6). De combinatie van bodemgesteldheid en peilvakken leidt tot 565 strata met gelijk bodemcluster en oppervlaktewaterpeil. Wij veronderstellen dat de percelen binnen deze 565 strata een vergelijkbare ontwatering hebben, met vergelijkbare ruimtelijke variatie van grondwater-spiegeldiepten binnen de percelen.



**Figuur 5** Bodemkaart (links) en kaart met peilgebieden als basis voor stratificatie.



**Figuur 6** Deelgebieden (strata) met verondersteld homogene perceelsontwatering.



---

## 2.7.2 Kartering van ruimtelijke verdelingen van GxG

De kartering van de ruimtelijke verdelingen van GxG (combinaties van GHG en GLG) vindt voor de Noordoostpolder enerzijds en Oostelijk en Zuidelijk Flevoland anderzijds plaats. Voor elk stratum (figuur 6) wordt de ruimtelijke verdeling van GxG voorspeld met behulp van het *R-package* gstat (Pebesma, 2004) in de volgende stappen:

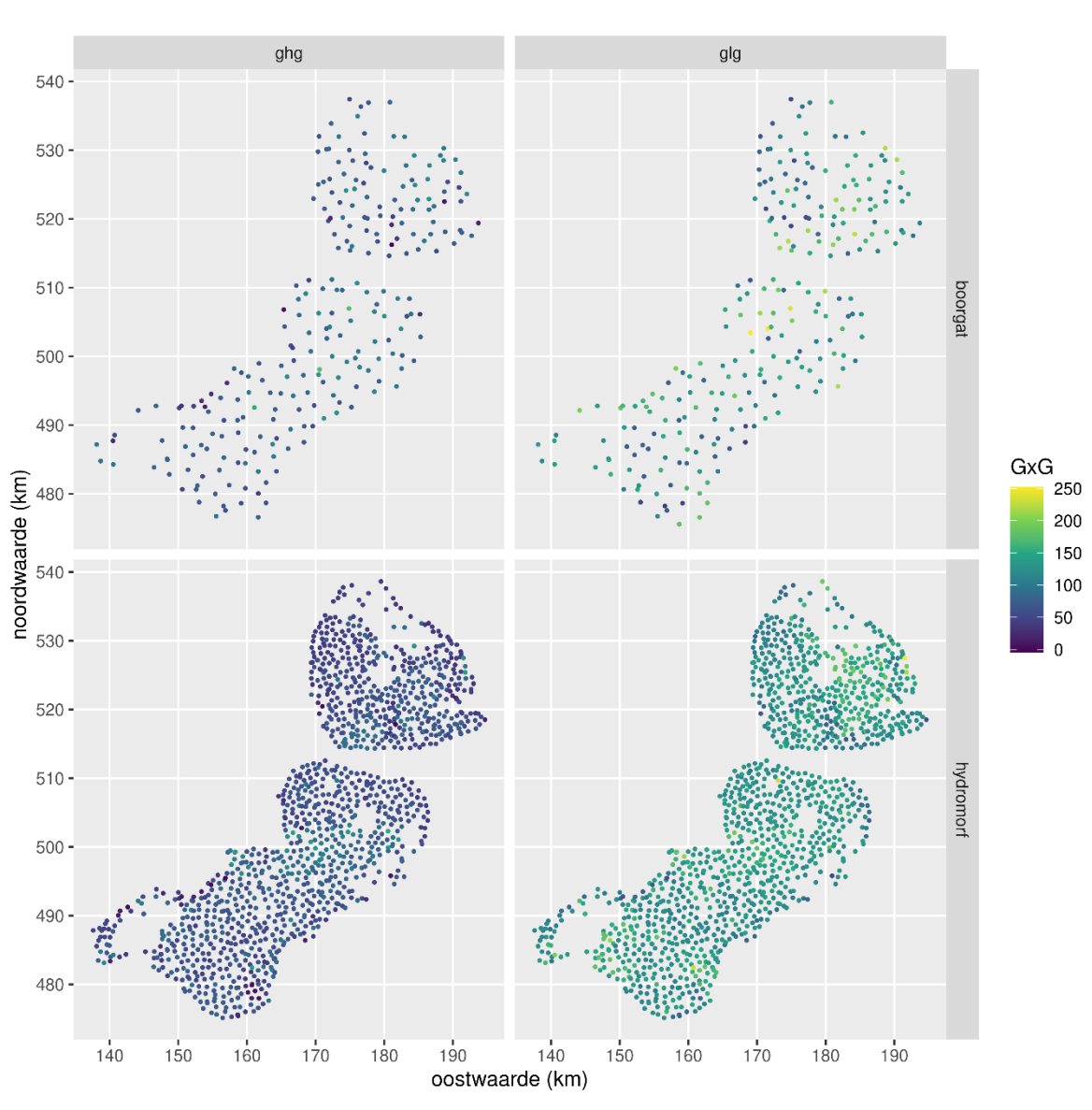
1. Verraster de strata naar een 50m x 50m-grid. Dit is de resolutie die voor het WDM wordt gebruikt.
2. Bereken het *sample* semivariogram van de GxG op basis van de GxG's die met stambuisregressie zijn berekend voor de gerichte-opnamelocaties.
3. Fit een model door dit *sample* semivariogram.
4. Gebruik dit model om een conditionele sequentiële Gaussische simulatie (sGs) uit te voeren (Deutsch en Journel, 1998). We simuleren 300 realisaties. We gebruiken de standaardfouten van de GxG-schattingen op basis van stambuisregressie (bootstrapping) en geschat op basis van expertkennis voor de bodemprofielen (hydromorfe kenmerken) als 'gewichten': hoe groter de nauwkeurigheid, hoe meer gewicht een GxG-waarde krijgt bij de ruimtelijke interpolatie en simulatie. Hiertoe wordt met gstat de methode van Delhomme (1978) uitgevoerd, waarbij de varianties (gekwadrateerde standaardfouten) die de onzekerheid over de GxG-schattingen uitdrukken worden afgetrokken van diagonaal van de covariantiematrix. Op die manieren krijgen GxG-waarden een hoger gewicht bij interpolatie en simulatie naarmate de nauwkeurigheid van die waarden groter is.
5. Per stratum wordt de cumulatieve ruimtelijke verdeling berekend op basis van de gesimuleerde GxG op alle gridpunten binnen dit stratum waarbij alle 300 realisaties samen zijn gevoegd.

Samengevat worden eerst verdelingen van GxG's gesimuleerd voor 50m x 50m-gridpunten en worden deze daarna samengevoegd om een cumulatieve ruimtelijke verdeling binnen een stratum te verkrijgen. De ruimtelijke variatie wordt dus beschreven op het niveau van de strata, waarbinnen we homogene perceelontwatering veronderstellen. Elke 50m x 50m-gridcel binnen een stratum bevat na deze aggregatie dus dezelfde ruimtelijke verdeling. Uit deze ruimtelijke verdelingen worden vervolgens 300 GxG's getrokken. Elke gridcel binnen een stratum heeft dezelfde 300 GxG's.

# 3 Resultaten

## 3.1 GxG's op peilbuis- en boorlocaties

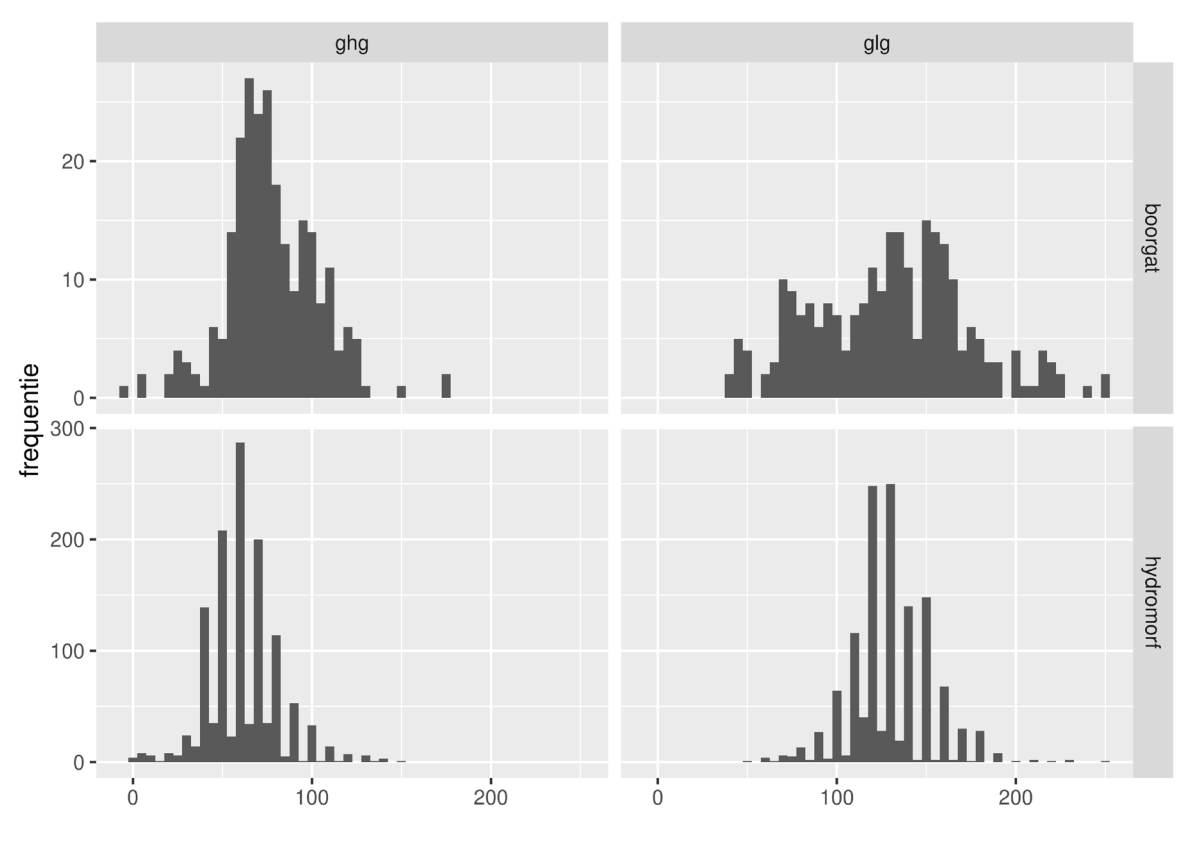
De GxG's die uit waargenomen tijdreeksen zijn berekend voor de peilbuislocaties staan in bijlage 1. Figuur 7 geeft de GxG's die zijn berekend uit de stambuisregressie voor de 246 gerichte-opnamelocaties en de GxG's die zijn geschat uit de hydromorfe kenmerken voor de 1272 locaties waar in 2017 bodemkundige profielbeschrijvingen zijn gemaakt voor de actualisatie van de bodemkaart, schaal 1 : 50.000 (Brouwer e.a., 2018).



**Figuur 7** GxG's, berekend uit stambuisregressie, op 246 gerichte-opnamelocaties (boven) en GxG's, geschat uit hydromorfe kenmerken, op 1272 locaties waar bodemkundige profielbeschrijvingen zijn gemaakt (onder).

Alvorens conditionele sequentiële Gaussische simulatie toe te passen om gebiedsdekkende kaarten van de GLG en GHG te maken (zie paragraaf 2.6.2), verifiëren we of de verdeling van GxG's kan worden benaderd met een normale (Gaussische) verdeling. De histogrammen in figuur 8 laten zien dat de GHG meer gepiekt is

en dat de GLG breder is verdeeld. De verdelingen zijn redelijk symmetrisch, de verdeling van GHG's is enigszins scheef naar rechts. Bij de verdelingen van veldschattingen op basis van hydromorfe kenmerken is een effect van afronding op 10 cm zichtbaar.

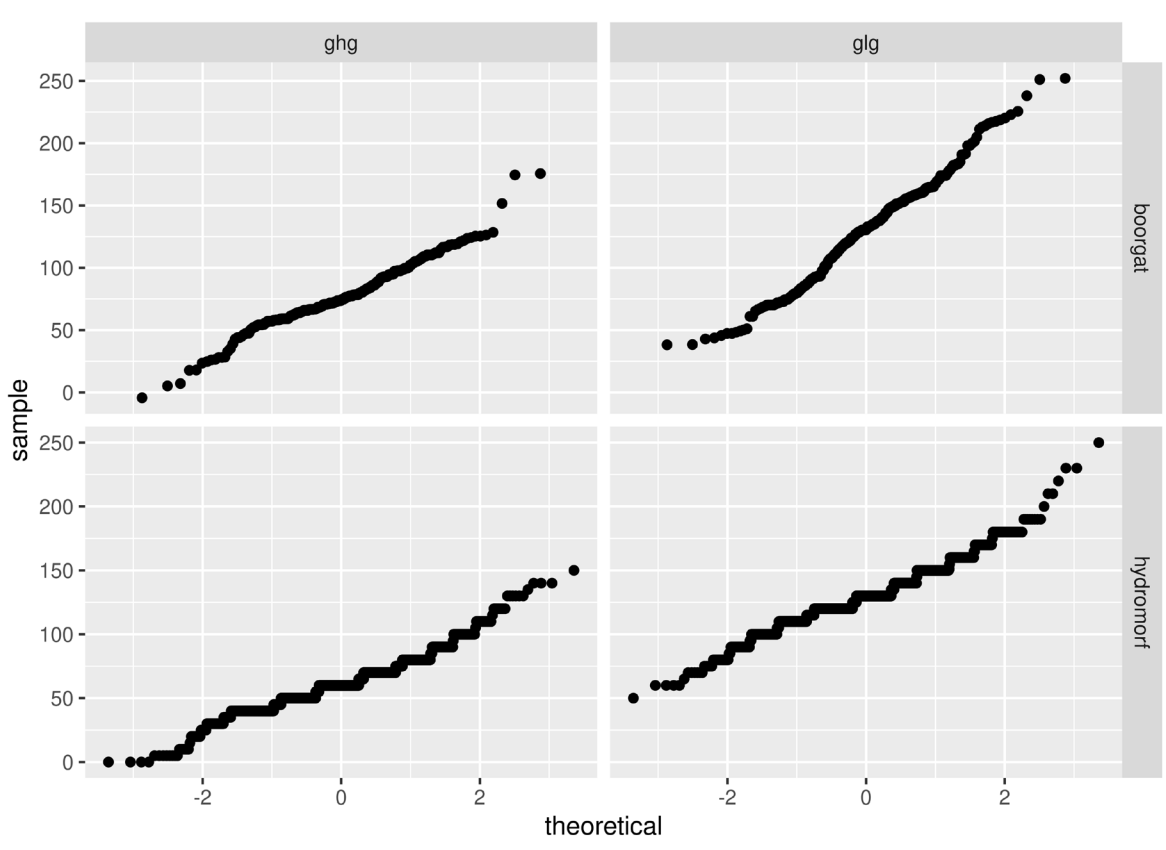


**Figuur 8** Histogrammen van GxG's (cm) op 246 gerichte-opnamelocaties (boven) en op 1272 locaties waar bodemkundige profielbeschrijvingen zijn gemaakt (onder).

In QQ-plots zijn de percentielen van de empirische verdeling uitgezet tegen de theoretische percentielen volgens de normale verdeling. Als de empirische verdeling gelijk is aan de normale verdeling, dan zou de QQ-plot dus een rechte lijn laten zien. De QQ-plots in figuur 9 laten zien dat de verdelingen aan de uiteinden afwijken van de normale verdeling, maar in het middentraject de normale verdeling volgen. Ook hier is het effect van een voorkeur tot afronden op tientallen van centimeters te zien bij de GxG-schattingen op basis van hydromorfe kenmerken. Tabel 1 vat de GxG-waarden samen die zijn berekend uit hydromorfe kenmerken op de 1272 boorlocaties voor de actualisatie van de bodemkaart en die zijn berekend met stambuisregressie voor de 246 locaties waar gerichte opnamen van de grondwaterspiegeldiepte hebben plaatsgevonden. Merk op dat voor de GLG enkele locaties minder zijn bezocht dan voor de GHG.

**Tabel 1** Samenvatting van de GxG's op gerichte-opnamelocaties en op locaties voor de actualisatie van de bodemkaart. Minima, maxima, percentielwaarden en MAD in cm -mv. MAD: mediaan van de absolute afwijkingen ten opzichte van de mediaan. Dit is een maat voor de variatie.

meetnet	statistiek	n	n_gecensureerd	min	p25	mean	median	p75	max	MAD
gerichte opname	GHG	246	0	-4	62	77	74	94	176	22
actualisatie bodemkaart	GHG	1272	0	0	50	62	58	70	150	15
gerichte opname	GLG	245	4	38	93	130	130	158	252	43
actualisatie bodemkaart	GLG	1269	14	50	120	130	128	140	250	15

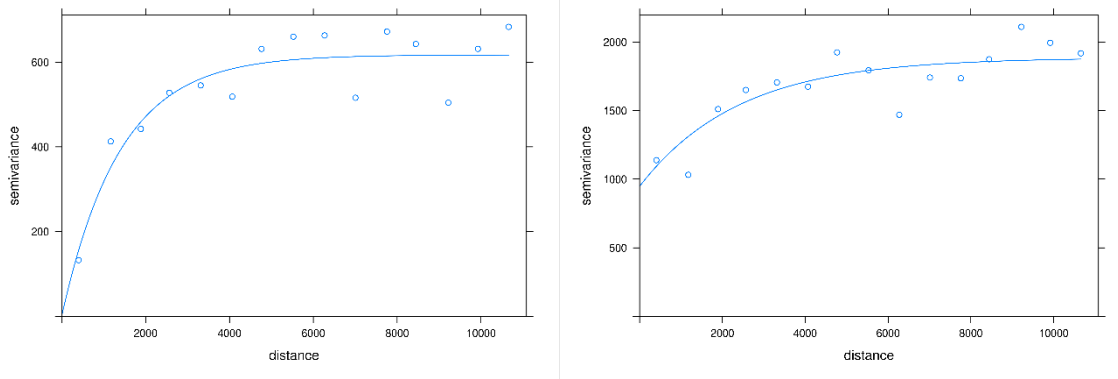


**Figuur 9** QQ-plots van GHG's en GLG's op 246 gerichte-opnamelocaties (boven) en 1272 locaties met bodemkundige profielbeschrijvingen (onder).

## 3.2 Semivariogrammodellen

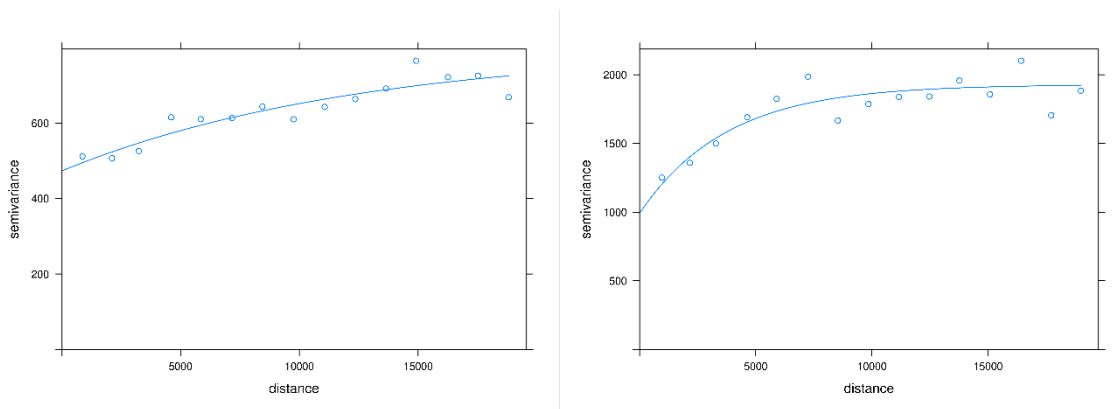
Bij de ruimtelijke aggregatie van de puntinformatie in figuur 7 tot kaarten van de ruimtelijke verdeling van GxG's worden modellen van ruimtelijke samenhang (semivariogrammen) gebruikt. De modellen voor de Noordoostpolder (figuur 10) en Noordelijk en Zuidelijk Flevoland (figuur 11) zijn afzonderlijk gefit op de *experimentele* semivariogrammen die berekend zijn uit de GxG's die voor de 246 gerichte-opnamelocaties zijn berekend, omdat de Noordoostpolder en Noordelijk en Zuidelijk Flevoland een verschillende ontstaansgeschiedenis hebben. De veldschattingen van GxG's op de 1272 boorlocaties zijn buiten beschouwing gelaten omdat deze minder nauwkeurig zijn en daardoor het beeld van ruimtelijke structuur zouden kunnen afvlakken.

Figuur 10 geeft de *experimentele* semivariogrammen en de gefitte exponentiële semivariogrammodellen voor de GHG en de GLG in de Noordoostpolder. Deze semivariogrammen laten zien dat tot een afstand van circa 4000 m sprake is van ruimtelijke afhankelijkheid. Verder valt op dat bij de GLG een semivariantie op zeer korte afstand (*nugget-effect*) van circa 1000 cm<sup>2</sup> is gemodelleerd terwijl deze in het semivariogrammodel voor de GHG ontbreekt.



**Figuur 10** Experimenteel semivariogram (cirkels) en exponentieel semivariogrammodel voor de GHG (links) en GLG in de Noordoostpolder. Semivariantie in  $\text{cm}^2$ , afstand in m.

Figuur 11 geeft de *experimentele semivariogrammen* en de gefitte exponentiële semivariogrammodellen voor de GHG en de GLG in Oostelijk en Zuidelijk Flevoland. In vergelijking met de Noordoostpolder zien we hier bij de GHG een *nugget-effect* en een ruimtelijke afhankelijkheid die zich over meer dan 15.000 m uitstrekt. Het semivariogrammodel voor de GLG is vergelijkbaar met het model dat voor de Noordoostpolder werd gevonden.

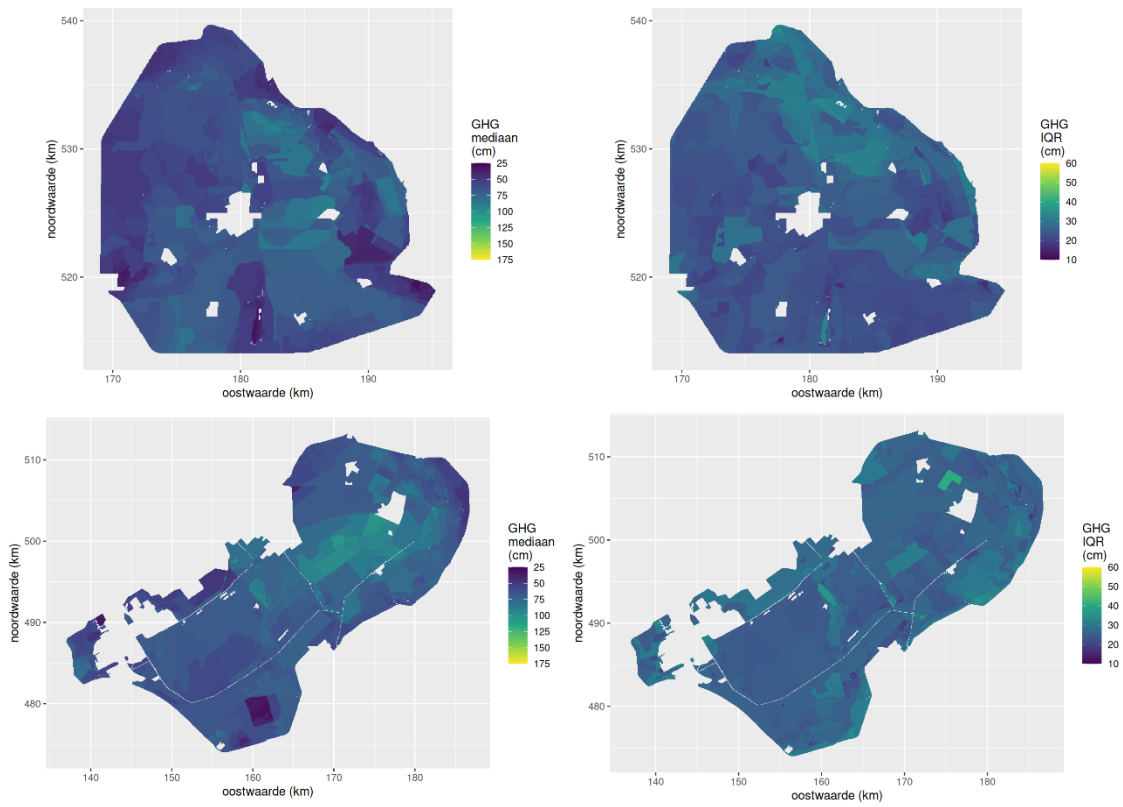


**Figuur 11** Experimenteel semivariogram (cirkels) en exponentieel semivariogrammodel voor de GHG (links) en GLG in Oostelijk en Zuidelijk Flevoland. Semivariantie in  $\text{cm}^2$ , afstand in m.

### 3.3 Kaarten van GxG's

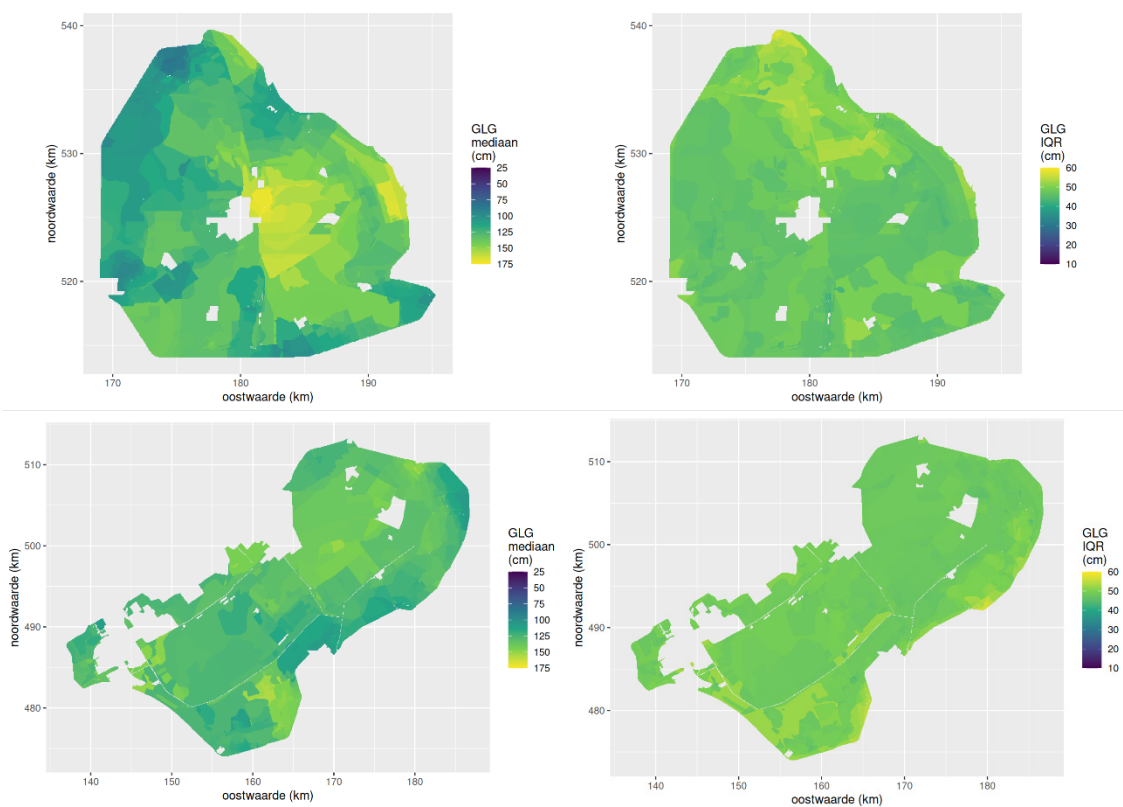
#### 3.3.1 Vlakkenkaarten

Figuur 12 geeft vlakkenkaarten die de ruimtelijke verdeling van GHG's binnen deelgebieden (strata) met verondersteld homogeen bodemtype en homogene perceelsontwatering samenvatten. De ruimtelijke verdeling is samengevat met de mediane GHG en de interkwartielafstand als maat voor de spreiding. In deze verdeling is zowel ruimtelijke variatie als voorspelbaarheid verdisconteerd. Een grote interkwartielafstand (groene en gele tinten) duidt op een grote spreiding in GHG's in een stratum.



**Figuur 12** Mediane GHG (links) en interkwartielafstand van GHG's binnen strata met homogene perceelsontwatering.

Figuur 13 geeft vlakkenkaarten die de ruimtelijke verdeling van GLG's binnen deelgebieden (strata) met verondersteld homogene perceelsontwatering samenvatten. Merk op dat de GLG meer ruimtelijke variatie vertoont dan de GHG.



**Figuur 13** Mediane GLG (links) en interkwartielafstand van GLG's binnen strata met homogene perceelsontwatering.

---

## 4 Kruisvalidatie

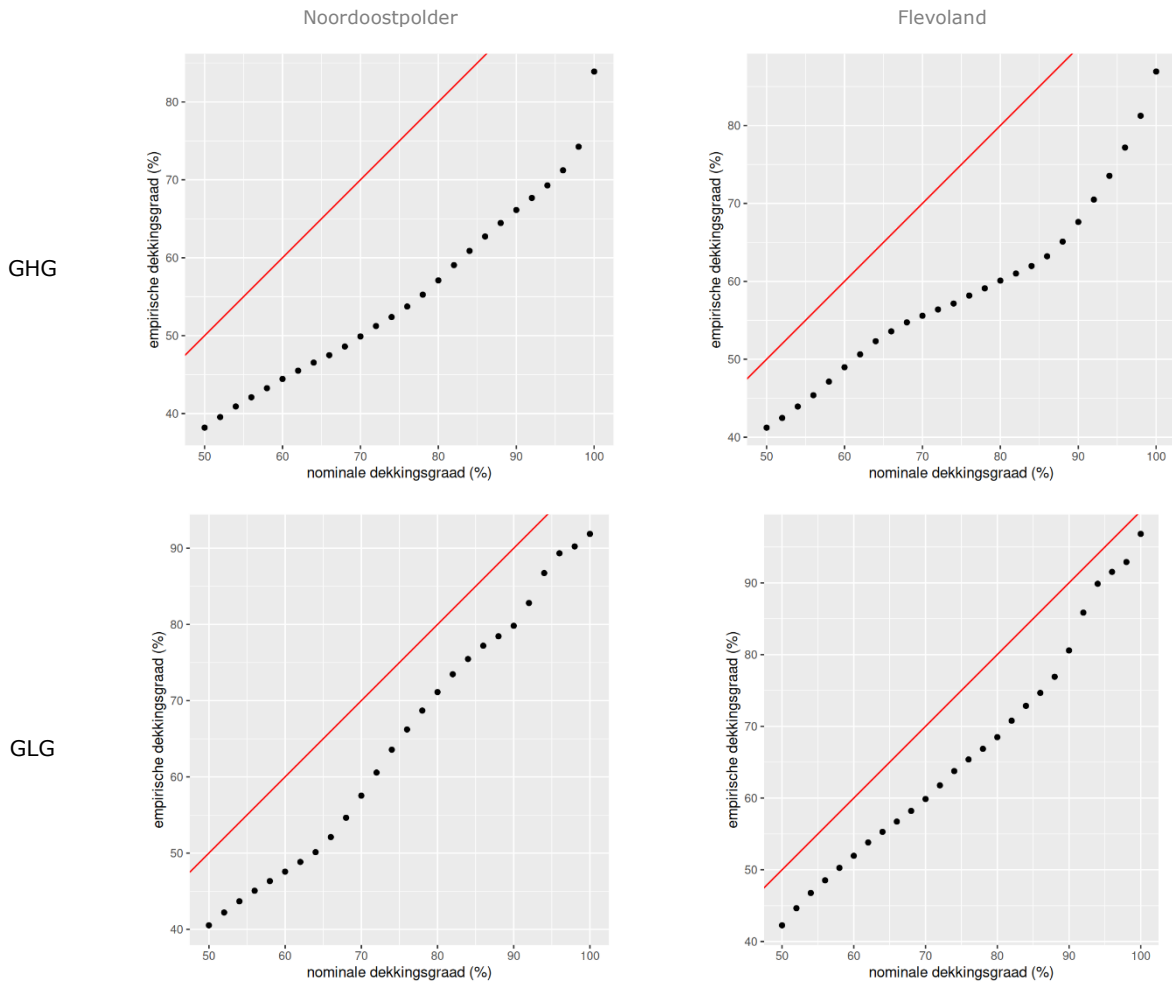
### 4.1 Methode

De GHG- en GLG-kaarten in respectievelijk figuur 12 en figuur 13 zijn gevalideerd middels een variant van *leave-one-out cross-validation*:

1. We laten een 'waarneming' weg (we beperken ons tot de gerichte opnamen, die zijn het meest nauwkeurig).
2. We construeren een cumulatieve ruimtelijke verdeling op basis van de 300 realisaties van elke cel binnen het stratum.
3. Op basis van die 300 realisaties berekenen we het  $x\%$ -voorspelinterval binnen het stratum.
4. We trekken 1000 realisaties uit een Gaussische verdeling met gemiddelde gelijk aan de weggelaten 'waarneming' en standaarddeviatie gelijk aan de standaardfout van de 'waarneming' (ten gevolge van stambuisregressie). Deze standaardfout is een maat voor de nauwkeurigheid van de GxG die berekend is voor de gerichte-opnamelocaties.
5. We turven hoeveel van die 1000 realisaties binnen het  $x\%$ -voorspelinterval valt en berekenen de empirische dekkinggraad. Deze empirische, door validatie vastgestelde dekkinggraad zou idealiter gelijk moeten zijn aan  $x\%$ , de nominale dekkinggraad, oftewel het door het model berekende betrouwbaarheidsinterval. Is de empirische dekkinggraad lager dan de nominale, dan onderschat het model de ruimtelijke variatie en onzekerheid. Is de empirische dekkinggraad groter, dan overschat het model de ruimtelijke variatie en onzekerheid.
6. We herhalen deze procedure voor alle 'waarnemingen' en voor  $x = 50, 52, \dots, 100$ .

### 4.2 Resultaten

Figuur 14 geeft de resultaten van de kruisvalidatie. Uit de resultaten blijkt dat de empirische dekkinggraad van de  $x\%$ -voorspelintervallen, zoals vastgesteld met kruisvalidatie, lager is dan de nominale dekkinggraad. Dit betekent dat het model de ruimtelijke variatie en onzekerheid onderschat. Bij de GLG wordt de breedte van het  $x\%$ -voorspelinterval minder onderschat dan bij de GHG. Opgemerkt moet worden dat de modellen van ruimtelijke samenhang (de semivariogrammen in figuur 10 en figuur 11) in de validatieprocedure als gegeven zijn beschouwd. Onzekerheid over de ruimtelijke samenhang is dus niet verdisconteerd. Verder moet worden opgemerkt dat de kruisvalidatie op puntniveau is uitgevoerd, terwijl toepassingen van de kaarten eerder op vlakniveau zullen plaatsvinden. Bij toepassing op vlakniveau zal de nauwkeurigheid waarschijnlijk groter zijn dan door kruisvalidatie op puntniveau is vastgesteld.



**Figuur 14** Resultaten kruisvalidatie. Empirische dekkinggraad van het x%-voorspellingsinterval uitgezet tegen de nominale dekkinggraad. De rode lijn geeft aan: empirische dekkinggraad = nominale dekkinggraad

Tabel 2 geeft de resultaten van de kruisvalidatie voor  $x = 90$ . De berekende 90%-voorspelintervallen bedekken minder dan 90% van de waarnemingen. De breedte van het 90%-voorspelinterval wordt bij de GLG met 8 en 9 procentpunten en bij de GHG met 22 en 20 procentpunten onderschat.

**Tabel 2** Resultaten kruisvalidatie (%). De empirische dekkinggraad is het percentage waarnemingen GHG binnen het 90%-voorspelinterval

deelgebied	Empirische dekkinggraad 90%-voorspelinterval GHG	Empirische dekkinggraad 90%-voorspelinterval GLG
Noordoostpolder	68	82
Flevoland	70	81



---

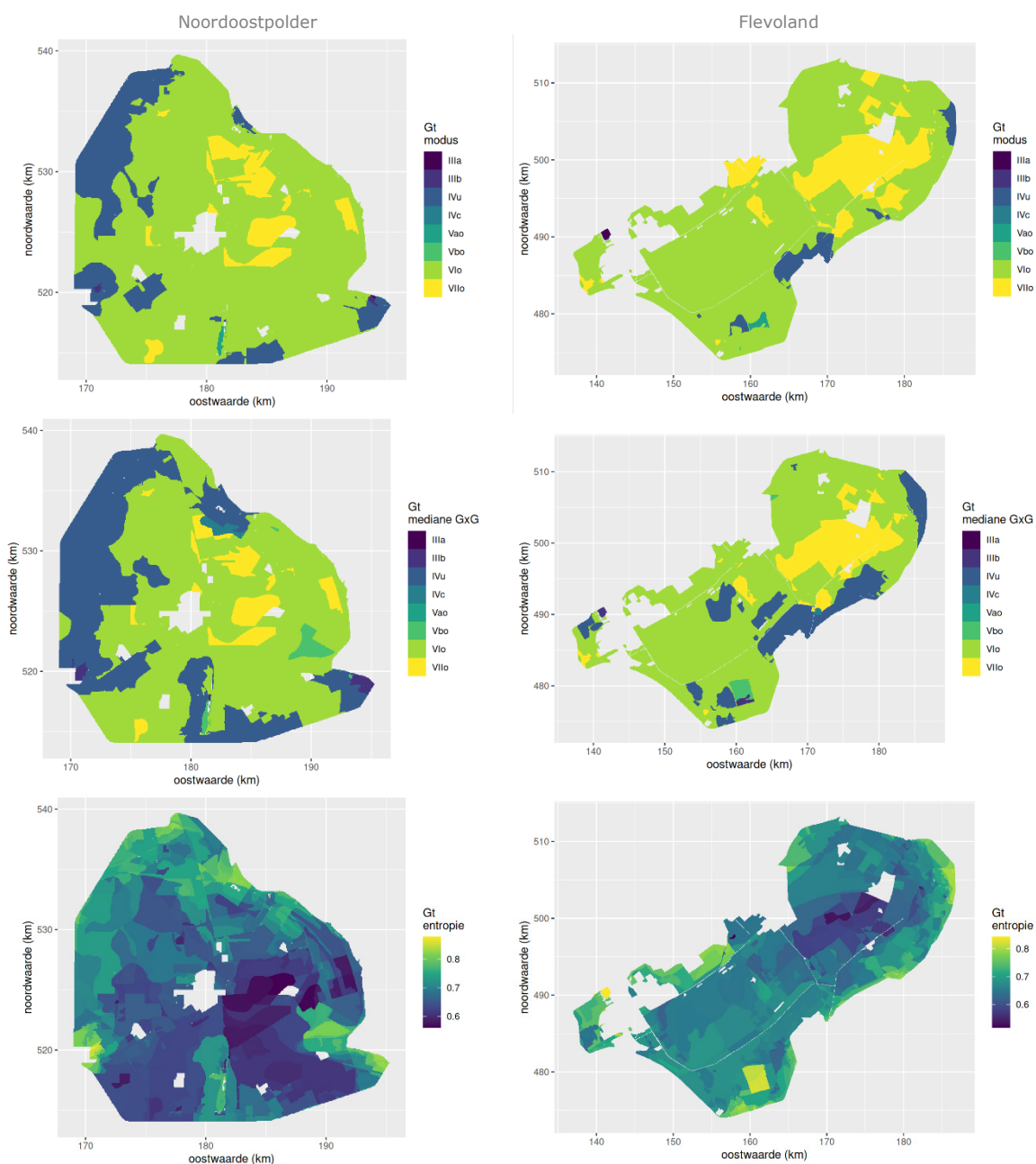
## 4.3 Grondwatertrappenkaart

De GHG's en GLG's die zijn gesimuleerd voor een stratum zijn op twee manieren geclassificeerd tot een grondwatertrap (Gt) voor dat stratum:

1. Voor elke combinatie van GHG en GLG die voorkomt in een stratum is de Gt bepaald en vervolgens is de meest voorkomende Gt toegekend aan het stratum. De meest voorkomende Gt wordt de modus genoemd. Deze methode sluit het meeste aan bij hoe een bodemkundige in het veld een Gt aan een *vlak* zou toekennen.
2. De Gt is bepaald uit de mediane GHG en GLG in het stratum. Deze methode kan leiden tot Gt's die in het *vlak* helemaal niet voorkomen.

Ruimtelijke variatie en onzekerheid in Gt's kunnen worden uitgedrukt met een (genormaliseerde) entropiewaarde, die 0 is als er slechts één Gt-klasse in een stratum voorkomt en één is als alle Gt-klassen even vaak voorkomen of even waarschijnlijk zijn in een stratum.

Figuur 15 geeft de Gt-kaarten volgens modus en mediaan en de entropiekaarten. De Gt-kaart op basis van mediane GxG's geeft meer spreiding in Gt-klassen te zien dan de Gt-kaart op basis van de modus. Daar waar de entropiewaarde hoog is, dus waar veel ruimtelijke variatie of onzekerheid is, blijken ook de grootste verschillen tussen de Gt-kaart volgens modus of mediaan op te treden.



**Figuur 15** Kaarten van grondwatertrappen (Gt's), afgeleid van gesimuleerde GHG's en GLG's volgens de modus (boven) en de mediaan (midden). De entropiekaarten (onder) geven de ruimtelijke variatie en onzekerheid binnen de strata weer: 0 betekent dat één Gt-klasse voorkomt, 1 betekent dat alle Gt-klassen even vaak voorkomen of even waarschijnlijk zijn.

---

## 5 Discussie en aanbevelingen

### 5.1 Opgeleverde kaarten en bestanden

Het doel van dit onderzoek was actuele kaarten te maken van de karakteristieken GHG, GLG en Gt van de grondwaterspiegeldiepte in Flevoland voor de BRO en de nauwkeurigheid van deze kaarten te kwantificeren. Het onderzoek heeft voor dit studiegebied de volgende producten opgeleverd:

- 300 realisaties van de GHG en GLG binnen strata met homogene perceelsontwatering. Ze geven de ruimtelijke verdeling van GHG en GLG in deze strata weer. Bovendien zit de nauwkeurigheid waarmee de GxG wordt voorspeld hierin verdisconteerd;
- vlakkenkaarten van GHG's en GLG's voor vlakken met homogene perceelsontwatering;
- een grondwatertrappenkaart, gebaseerd op de modus van de Gt's die bepaald zijn uit de realisaties;
- een grondwatertrappenkaart, gebaseerd op de mediane GHG's en GLG's uit de realisaties.

Het bestand met 300 realisaties van GHG's en GLG's per deelgebied (stratum) vormt de basis voor alle afgeleide kaarten. Naast de kaarten die hierboven zijn genoemd kunnen voor specifieke vraagstukken aparte kaarten worden afgeleid, bijvoorbeeld kaarten die de kans weergeven dat een bepaald kritisch niveau van GHG of GLG wordt overschreden.

### 5.2 Kwaliteit van de opgeleverde kaarten

Voor het gepresenteerde werk in de provincie Flevoland is gebruik gemaakt van een geostatistisch model om de ruimtelijke cumulatieve verdelingsfuncties te schatten, terwijl deze verdelingsfuncties in Laag-Friesland (Gerritsen e.a., 2021) zijn berekend uit de resultaten van een kanssteekproef. Daarmee is voor Laag-Friesland de nauwkeurigheid gekwantificeerd, terwijl voor Flevoland hiervoor een aanvullende validatie nodig was, omdat een model is gebruikt. De nauwkeurigheid van de GxG-kaarten is gekwantificeerd door middel van kruisvalidatie. Daarbij is de empirische dekkingsgraad van de voorspelintervallen met nominale dekkingsgraden variërend van 50 tot 100 % bepaald. Hieruit bleek dat de empirische dekkingsgraden kleiner zijn dan de nominale dekkingsgraden, dus dat ruimtelijke variatie en onzekerheid worden onderschat door het geostatistische model. Zo wordt de breedte van het 90%-voorspelinterval onderschat met 8 tot 22 procentpunten; de empirische dekkingsgraad van de 90%-voorspelintervallen is 68 tot 82 %. Hierbij moet opgemerkt worden dat onzekerheid als gevolg van het geostatistische model (semivariogram) niet is verdisconteerd in de berekening van de realisaties. Ook is er gevalideerd op puntniveau, terwijl toepassingen van de GxG-kaarten op hogere aggregatieniveaus zal zijn.

De Gt-kaart kan worden gemaakt op basis van de Gt die het vaakst uit de gesimuleerde GxG's in de strata wordt geclassificeerd (modus), of op basis van een classificatie van de mediane GxG's in de strata. Voor beide methoden is iets te zeggen. Als alle Gt-klassen bijna evenveel voorkomen of bijna even waarschijnlijk zijn in een stratum, dan kan de modale Gt leiden tot een kaartbeeld dat door experts niet als 'plausibel' wordt beoordeeld, ook al komt deze modale Gt het meeste voor of is deze het meest waarschijnlijk. De modale Gt is dan immers maar iets waarschijnlijker dan de andere Gt's. De Gt die is geclassificeerd op basis van de mediane GHG en GLG wordt in deze situatie mogelijk als 'plausibeler' gezien. Als een kaart niet plausibel wordt geacht op basis van expertkennis, dan is echter de vraag of dit ligt aan de kaart of aan de expertkennis. Een validatie van de kaart op basis van onafhankelijke waarnemingen verdient daarom de voorkeur boven een plausibiliteitsbeoordeling. Voor een discussie over plausibiliteitstoetsen verwijzen wij naar Knotters e.a. (2022c).

---

## 5.3 Aanbevelingen

Tijdens de uitvoering van dit onderzoek bleek dat er weliswaar 60 bruikbare tijdreeksen uit grondwaterpeilbuizen beschikbaar zijn, maar dat de locaties waarop deze reeksen zijn waargenomen ruimtelijk sterk geclusterd zijn. Overige peilbuizen in het projectgebied zijn om één of meerdere redenen, zoals beschreven in paragraaf 2.2, als niet bruikbaar beoordeeld voor dit onderzoek. Wij bevelen uitbreiding van het meetnet aan, gericht op het waarnemen van grondwaterspiegeldiepten in percelen, zodat er op termijn meer bruikbare, langjarige meetreeksen beschikbaar zijn. Dit zal de nauwkeurigheid van de kaarten vergroten. Daarbij is participatieve monitoring met sensormetingen in akkers, in samenwerking met landgebruikers, wellicht te overwegen (Hoogland e.a., 2020; Van de Wal, 2021). De kaarten uit dit onderzoek die een indicatie geven van ruimtelijke variatie en onzekerheid kunnen worden gebruikt bij de selectie van nieuwe peilbuislocaties. Dit zijn de kaarten met interkwartielafstanden van ruimtelijke cumulatieve verdelingen van GxG's in figuur 12 en figuur 13 en de entropiekaarten in figuur 15.

In dit onderzoek is er uit efficiëntie-overwegingen voor gekozen om de gerichte-opnamelocaties gericht te selecteren en een geostatistisch model te gebruiken bij het berekenen van ruimtelijke cumulatieve verdelingsfuncties van GxG's. Uit de validatie bleek dat de ruimtelijke variatie en onzekerheid met dit model worden onderschat. De informatie over onzekerheid is zonder meer geschikt voor toepassing in meetnet-optimalisatie, zoals hierboven aanbevolen. Voor toepassing in onzekerheids- en risicoanalyse bevelen we aan om de onzekerheidsmarges eerst te vergroten met een factor die ontleend kan worden aan de resultaten van de kruisvalidatie (figuur 14 en tabel 2).

---

# Literatuur

- Akritis, M.G., Murphy, S.A. and LaValley, M.P., 1995. The Theil-Sen estimator with doubly censored data and applications to astronomy. *Journal of the American Statistical Association* 90:170-177
- Brouwer, F., F. de Vries en D.J.J. Walvoort, 2018. Basisregistratie Ondergrond (BRO); Actualisatie bodemkaart: herkartering van de bodem in Flevoland. Wageningen, WOT Natuur & Milieu, WUR. WOt-technical report 143.
- Cate, J.A.M. ten, A.F. van Holst, H. Kleijer en J. Stolp, 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek; richtlijnen en voorschriften. Deel A: bodem. Wageningen, DLO Staring Centrum, Technisch Document 19a.
- Delhomme, J.P., 1978. Kriging in the hydrosociences. *Advances in Water Resources* 1(5): 251-266.
- Deutsch, C.V. en A.G. Journel, 1998. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press, New York.
- Efron, B. en R.J. Tibshirani, 1993. An Introduction to the Bootstrap. Chapman and Hall, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4541-9>
- EG, 1991. Richtlijn 91/676/EEG van de Raad van 12 december 1991 inzake de bescherming van water tegen verontreiniging door nitraten uit agrarische bronnen. Luxemburg, Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen L676.
- EG, 1992. Richtlijn 92/43/EEG van de Raad van 21 mei 1992 inzake instandhouding van de natuurlijke habitats en de wilde flora en fauna. Luxemburg, Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen L206.
- 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.
- Gerritsen, P., D.J.J. Walvoort en M. Knotters (2021). Kartering grondwaterspiegeldiepte in laag Friesland; Actualisatie van een deel van het grondwaterspiegeldieptemodel van de Basisregistratie Ondergrond (BRO). Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-rapport 131, Wageningen.
- Hack-ten Broeke, M.J.D., H.M. Mulder, R.P. Bartholomeus, J.C. van Dam, G. Holshof, I.E. Hoving, D.J.J. Walvoort, M. Heinen, J.G. Kroes, P.J.T. van Bakel, I. Supit, A.J.W. de Wit, R. Ruijtenberg, 2019. Quantitative land evaluation implemented in Dutch water management, *Geoderma* 338:536-545, doi:/10.1016/j.geoderma.2018.11.002.
- Heesen, H.C. van, 1970. Presentation of the seasonal fluctuation of the water table on soil maps. *Geoderma* 4: 257-278.
- Helsel, D.R., 2004. Nondetects and Data Analysis: Statistics for Censored Environmental Data. John Wiley and Sons, New York, 268 pp
- Hooghoudt, S.B., 1952. Waarnemingen van grondwaterstanden voor de landbouw. In: Verslagen technische bijeenkomsten 1-6, pp. 94-107, Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, 's-Gravenhage.
- Hoogland, F., A. Roelandse, S. Burger, M. Feltmann en J. Velstra, 2020. Participatieve monitoring: samen werken aan een betere waterkwaliteit. *Stromingen* 26: 59-71.
- Hoogland, T., M. Knotters, M. Pleijter en D.J.J. Walvoort, 2014. Actualisatie van de grondwatertrappenkaart van holoceen Nederland; resultaten van het veldonderzoek. Wageningen, Alterra, rapport 2612.
- Knotters, M., T. Hoogland en M. Pleijter, 2011. Actualisatie van de grondwatertrappenkaart van holoceen Nederland. Opzet van het onderzoek. Wageningen, Alterra-rapport 2280.
- Knotters, M., M.J.D. Hack, P.J.W. Hinssen, J.W.H. van der Kolk en J.P. Okx, 2015. Betekenis van BRO/BIS Nederland voor WOT Natuur & Milieu. Een risicoanalyse. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur en Milieu, Wageningen UR, WOt-interne notitie 121.
- Knotters, M., D. Walvoort, F. Brouwer, L. Stuyt en J. Okx, 2018. Landsdekkende, actuele informatie over grondwatertrappen digitaal beschikbaar. H<sub>2</sub>O-Online, 28 november 2018.

- 
- Knotters, M., D. Walvoort en P. Gerritsen, 2022a. Mapping water table depths in wetlands and polder areas by probability sampling. *Geoderma* 422: 115928; <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115928>.
- Knotters, M., D. Walvoort en P. Gerritsen, 2022b. Kartering van grondwaterspiegeldiepten in de polders en wetlands van Friesland. *Stromingen* 28(3): 5-22.
- Knotters, M., P. Baggelaar, E. van der Meulen en D. Walvoort, 2022c. Hoezo plausibel? Plausibiliteit in de hydrologie. *Stromingen* 28(2): 35-46.
- Mulder, M., M. Hack-ten Broeke, R. Bartholomeus, J. van Dam, M. Heinen, J. van Bakel, D. Walvoort, J. Kroes, I. Hoving, G. Holshof, J. Schaap, J. Spruijt, I. Supit, A. de Wit, R. Hendriks, J. de Haan, M. van der Voort, P. van Walsum, 2018. *Waterwijzer Landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie*. Stowa rapport; No. 2018-48. Stowa. <https://edepot.wur.nl/464525>
- Pebesma E.J., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences* 30:683-691.
- Riele, te W.J.M. en D.J. Brus, 1991. Methoden van gerichte grondwaterstandsmetingen voor het schatten van de GHG. Rapport 158, DLO-Staring Centrum, 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, H. en S. Hennekens, 2014. Hydrologische Randvoorwaarden Natuur Versie 3; Gebruikershandleiding. Wageningen, Nieuwegein, Utrecht, Alterra Wageningen UR, KWR Watercycle Research Institute, STOWA.
- Stuyt, L.C.P.M., M. Knotters, D.J.J. Walvoort, F. Brouwer en H.T.L. Massop, 2018. Basisregistratie Ondergrond – Gd-kartering Laag-Nederland 2018; Provincie Flevoland. WOt Natuur & Milieu, WUR, Wageningen, Technical report 145.
- Visser, W.C., 1958. De landbouwwaterhuishouding van Nederland. Commissie Onderzoek Landbouwwaterhuishouding van Nederland. Rapport 1. Delft, TNO.
- Vroon, H.R.J. en E. Kiestra, 2010. Bodemkundig-hydrologisch onderzoek Ooststellingwerf-Terwisscha: verkennend onderzoek langs een aantal raaien in het waterwingebied. Wageningen, Alterra-rapport 2079.
- Wal, H. van de, 2021. Quantifying the difference in measuring groundwater depth using the Aqua Pin and boreholes. Wageningen University, Internship report.
- Walvoort, D.J.J., D.J. Brus en J.J. de Gruijter, 2010. An R-package for spatial coverage sampling and random sampling from compact geographical strata by *k*-means. *Computers & Geosciences* 36(10): 1261-1267.

---

# Verantwoording

WOT-rapport: 153

BAPS-projectnummer: WOT-04-013-004

WOT Natuur & Milieu hecht grote waarde aan de kwaliteit van eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard deel uit van het kwaliteitsbeleid.

In dit project werden gegevens gebruikt die beschikbaar zijn gesteld en toegelicht door het Waterschap Zuiderzeeland, waarvoor onze hartelijke dank. Het project is zowel binnen het projectteam als binnen het gehele team Bodem, Water en Landgebruik van Wageningen Environmental Research meerdere malen formeel en informeel besproken. Wij bedanken onze collega's voor hun opbouwende opmerkingen. Wij bedanken Simone Verzandvoort en Daniël van de Craats voor hun review van dit rapport.

## Gereviewd door

functie: onderzoeker

naam: Simone Verzandvoort

datum: 17 februari 2023

## Gereviewd door

functie: onderzoeker

naam: Daniël van der Craats

datum: 29 maart 2023

## Akkoord Extern contactpersoon

functie: senior beleidsmedewerker

naam: Frans Lips

datum: 11 september 2023

## Akkoord Intern contactpersoon

naam: Dorothee van Tol-Leenders

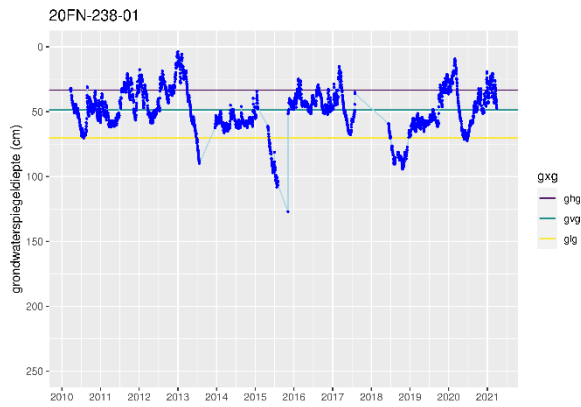
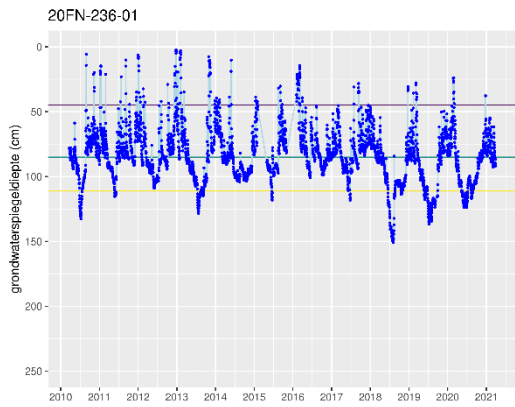
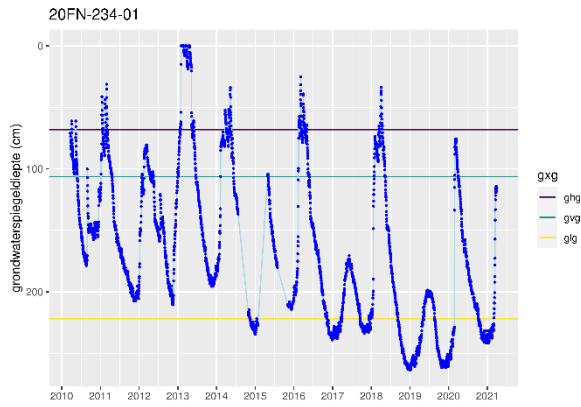
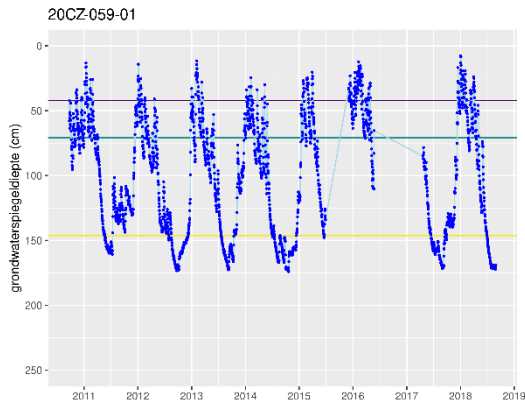
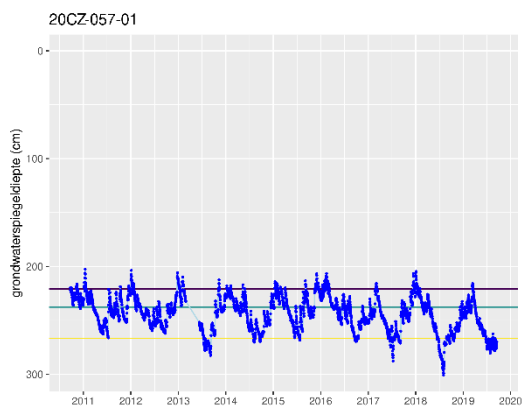
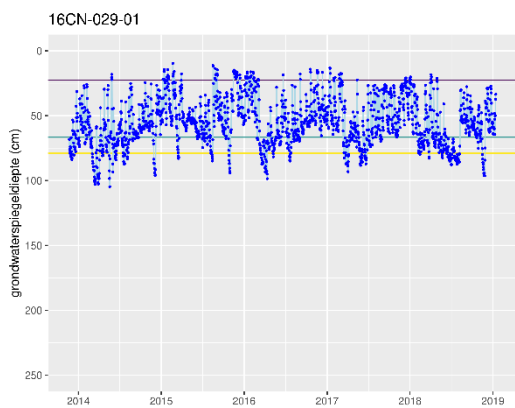
datum: 4 september 2023

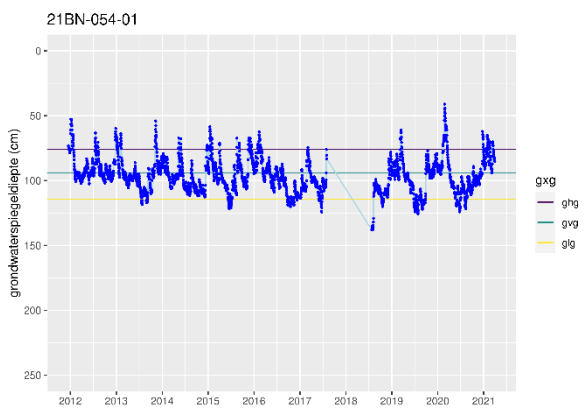
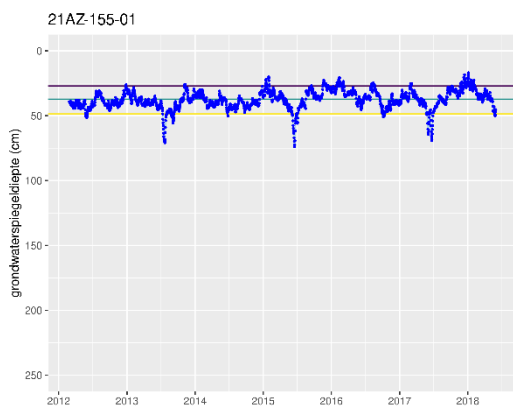
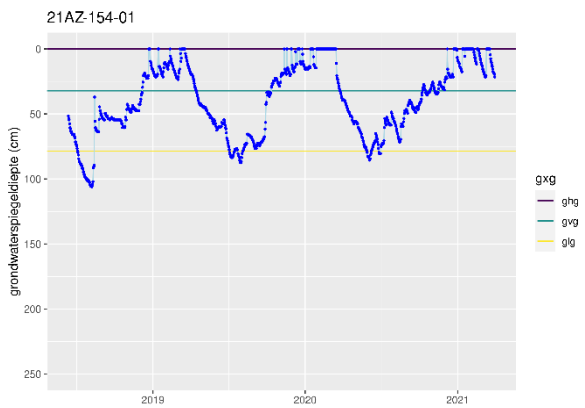
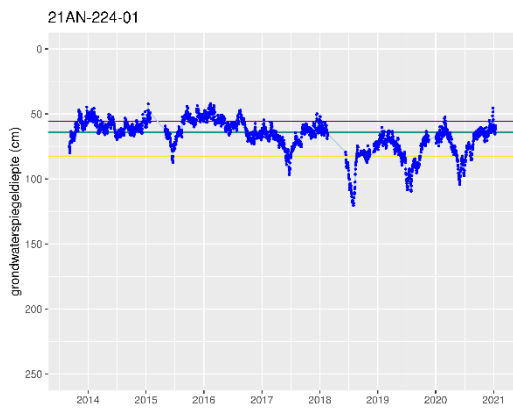
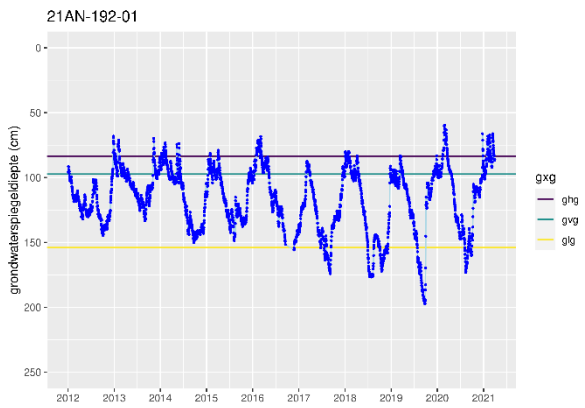
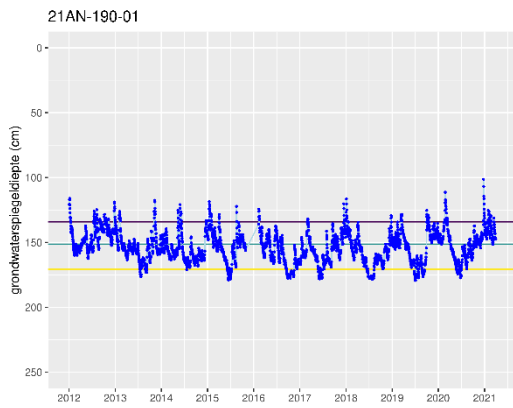
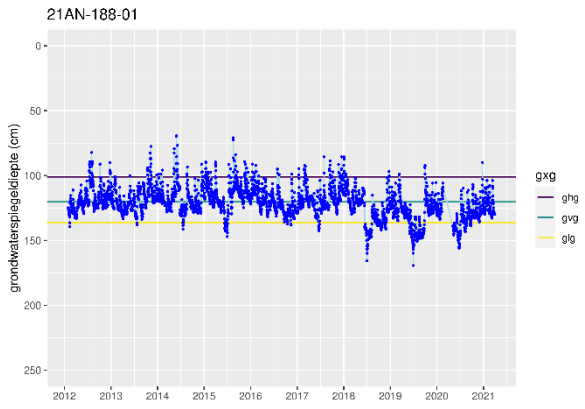
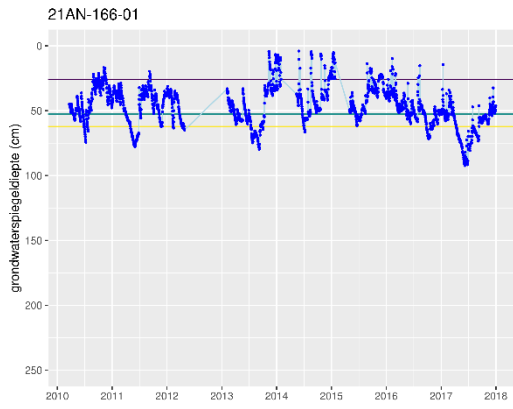
# Bijlage 1 Geselecteerde peilbuizen, tijdreeksen van de grondwater- spiegeldiepte en afgeleide GxG's

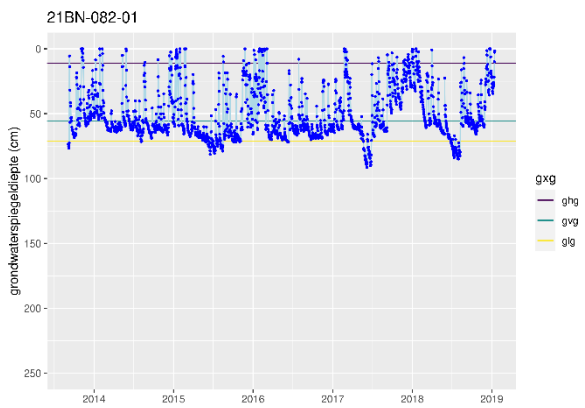
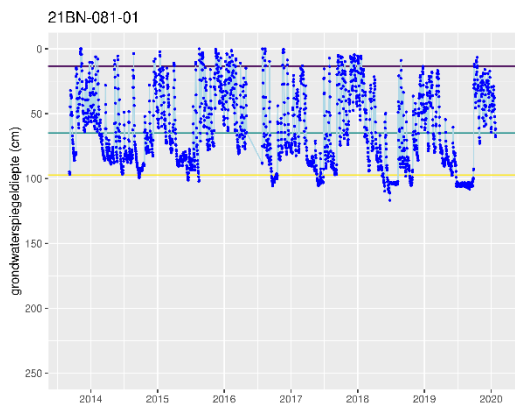
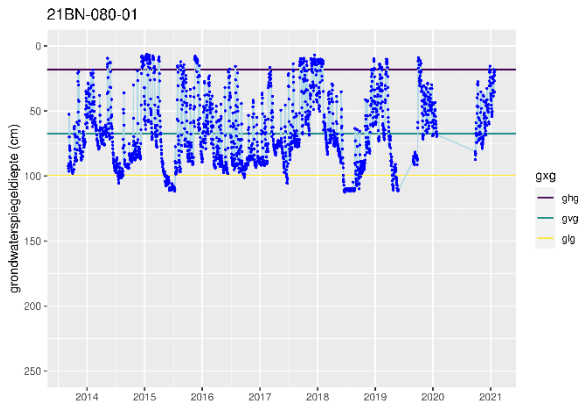
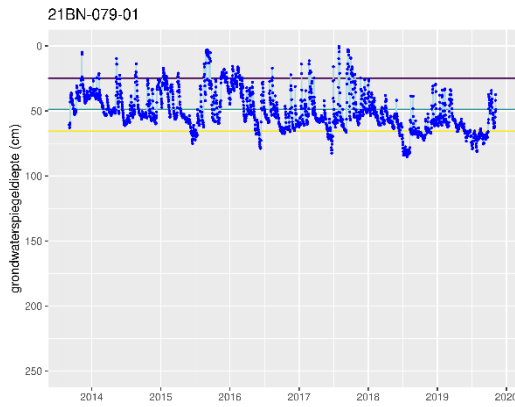
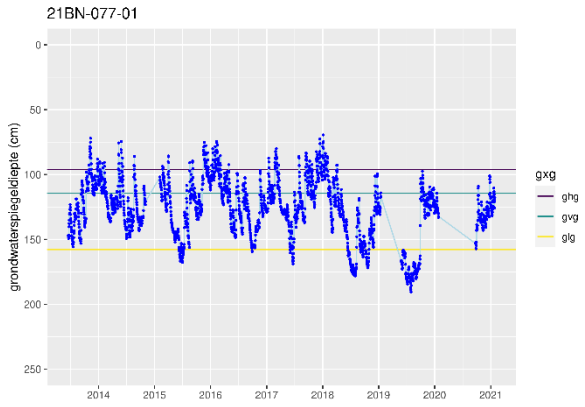
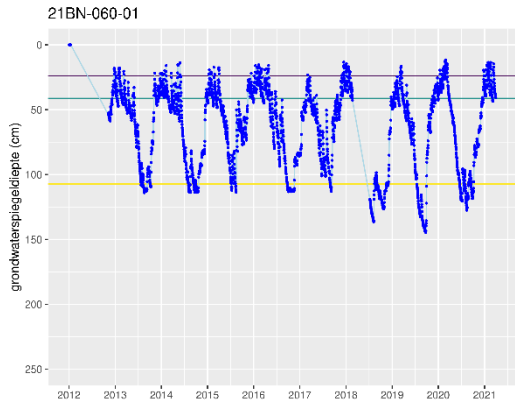
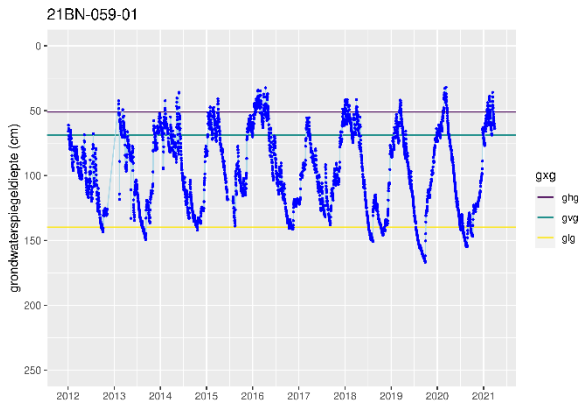
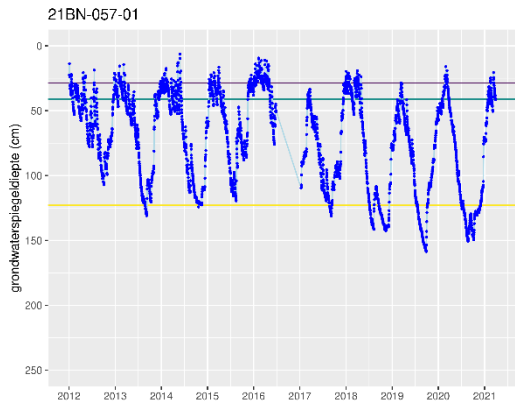
locatie	x	y	startdatum	einddatum	ghg	glg	gvg
16CN-029-01	181178	537353	2013-11-22	2019-01-14	23	79	67
20CZ-057-01	185030	502777	2010-09-23	2019-09-17	221	267	238
20CZ-059-01	186499	505120	2010-09-23	2018-08-29	42	146	71
20FN-234-01	174071	519513	2010-03-23	2021-03-31	68	222	106
20FN-236-01	178026	522815	2010-03-23	2021-03-31	45	111	85
20FN-238-01	179777	519701	2010-03-22	2021-03-31	33	70	49
21AN-166-01	180372	520578	2010-03-22	2017-12-31	26	62	53
21AN-188-01	189452	522467	2012-02-01	2021-03-31	101	136	120
21AN-190-01	189228	521719	2012-01-04	2021-03-31	134	171	151
21AN-192-01	190003	522325	2012-01-04	2021-03-31	84	154	97
21AN-224-01	180048	518895	2013-09-05	2021-01-14	56	82	64
21AZ-154-01	180912	518291	2018-06-12	2021-03-31	0	79	32
21AZ-155-01	180786	516343	2012-02-27	2018-05-31	27	49	37
21BN-054-01	192098	520052	2011-12-16	2021-03-31	76	114	94
21BN-057-01	193699	519398	2012-01-04	2021-03-31	29	123	41
21BN-059-01	192846	519808	2012-01-04	2021-03-31	51	140	69
21BN-060-01	190137	521595	2012-01-04	2021-03-31	24	107	41
21BN-077-01	192992	522784	2013-06-18	2021-01-27	96	158	114
21BN-079-01	190634	519211	2013-09-05	2019-11-06	25	66	49
21BN-080-01	191736	519318	2013-09-05	2021-01-27	18	100	68
21BN-081-01	191150	518971	2013-09-05	2020-01-27	13	97	65
21BN-082-01	191707	518875	2013-09-05	2019-01-15	11	71	56
21BZ-023-01	194831	518327	2012-04-01	2021-03-31	21	59	32
21BZ-030-01	193281	518419	2013-09-05	2021-01-27	20	38	33
26BZ-101-01	153627	489177	2011-04-01	2019-12-24	57	76	64
26BZ-102-01	153445	489290	2011-04-01	2019-04-11	71	83	77
26BZ-103-01	154104	490032	2011-04-01	2019-04-11	68	106	73
26BZ-104-01	154475	490135	2010-12-17	2019-04-11	38	60	49
26DN-058-01	155072	482978	2010-12-18	2019-12-30	86	109	105
26DN-059-01	155380	483327	2011-04-01	2019-10-03	39	63	54
26DN-063-01	153886	485737	2011-04-01	2019-12-24	63	84	71
26DN-064-01	155101	486945	2010-12-17	2019-10-03	67	90	78
26DZ-054-01	157241	476699	2011-04-01	2021-03-31	91	152	111
26DZ-056-01	153191	479250	2011-04-01	2021-03-31	132	148	140
26EZ-099-01	164176	491078	2015-05-02	2020-07-14	40	75	54
26FZ-131-01	179173	492095	2011-10-11	2019-03-31	171	195	184
26FZ-132-01	178679	492176	2011-10-11	2019-03-31	53	71	62
26FZ-134-01	179574	492933	2011-10-11	2018-10-16	40	77	60
26FZ-135-01	179669	492763	2011-10-11	2020-01-22	65	111	86
26FZ-136-01	179407	492859	2011-10-11	2020-01-22	57	94	76
26FZ-142-01	171314	488900	2012-01-17	2021-03-31	42	64	51
26FZ-146-01	173215	490842	2012-01-17	2021-03-31	53	94	80
26FZ-150-01	171247	490165	2012-02-13	2021-03-31	83	128	97
26FZ-161-01	170662	490039	2012-04-01	2021-03-31	66	120	81
26FZ-172-01	173871	490542	2012-01-19	2021-03-31	35	63	48
26FZ-173-01	172710	490489	2012-01-19	2021-03-31	16	55	37

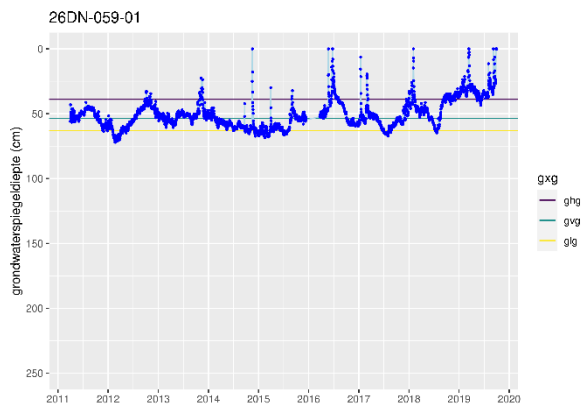
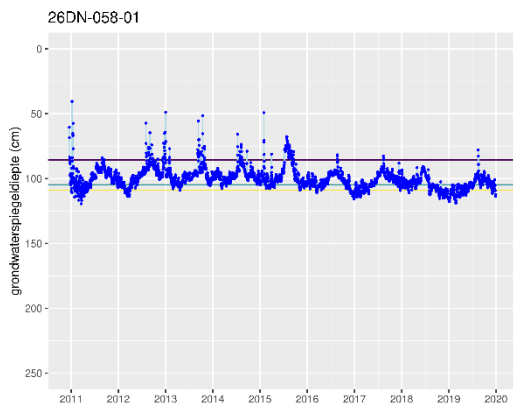
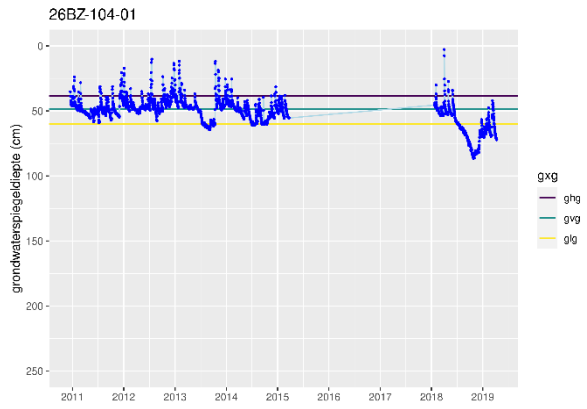
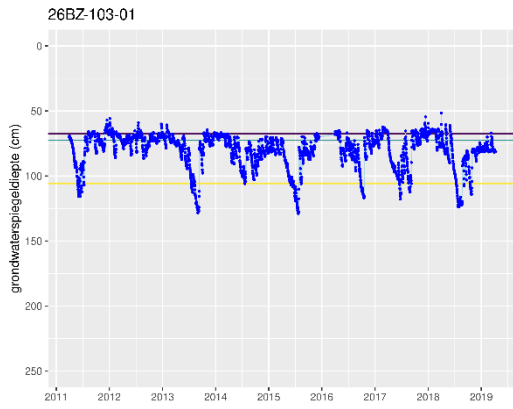
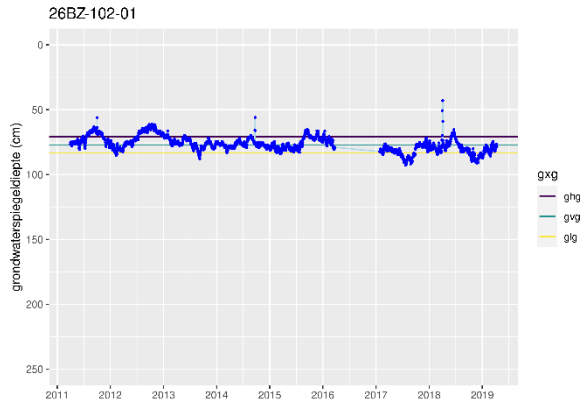
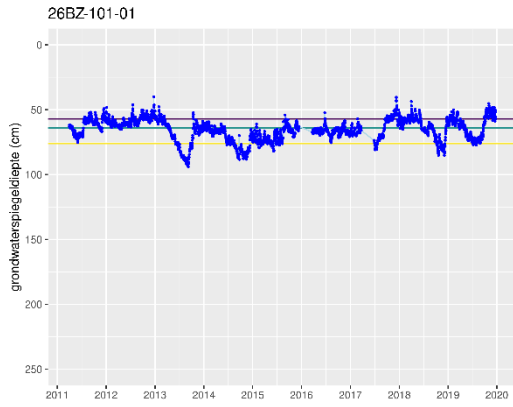
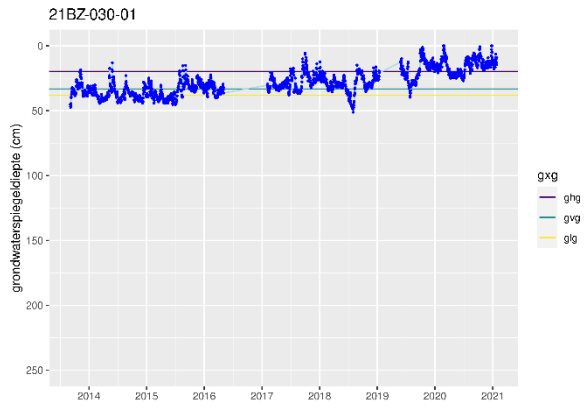
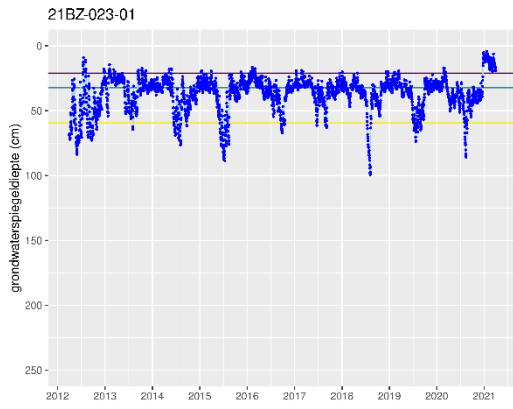


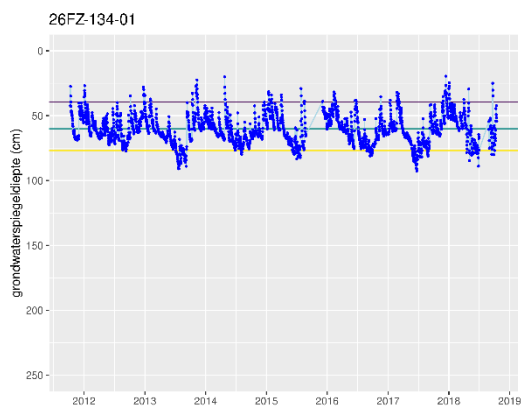
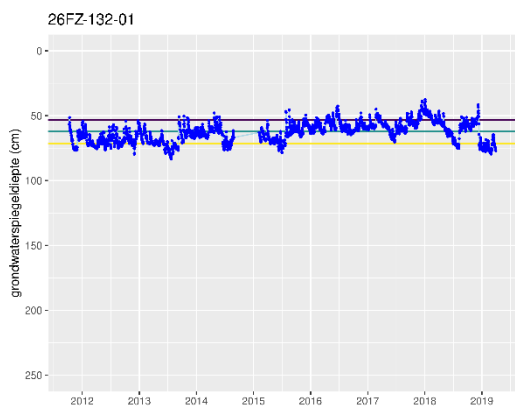
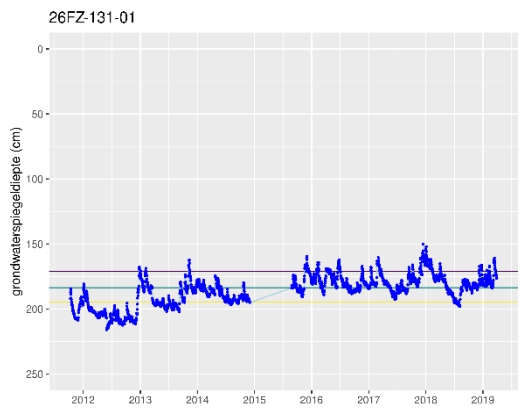
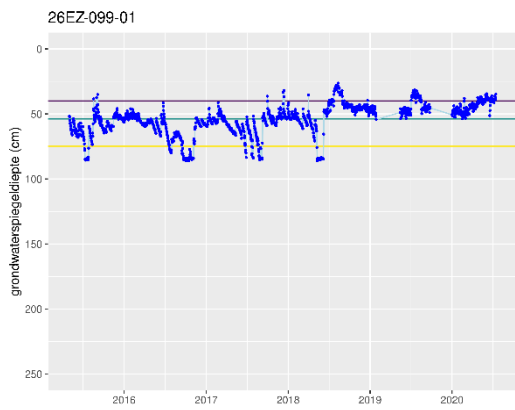
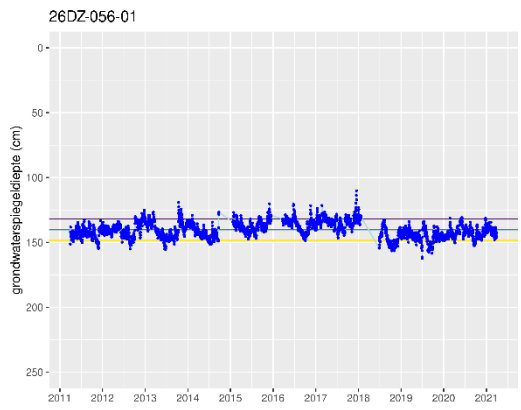
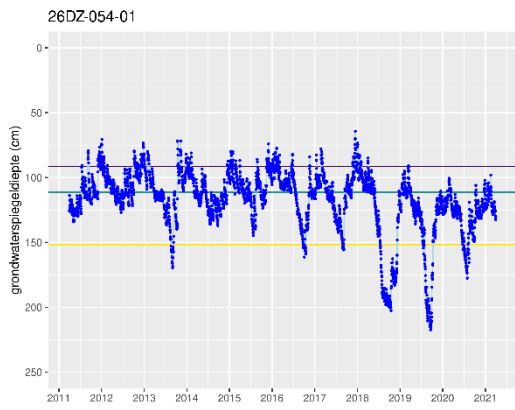
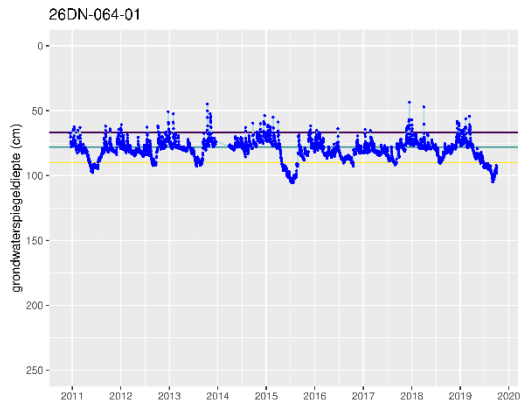
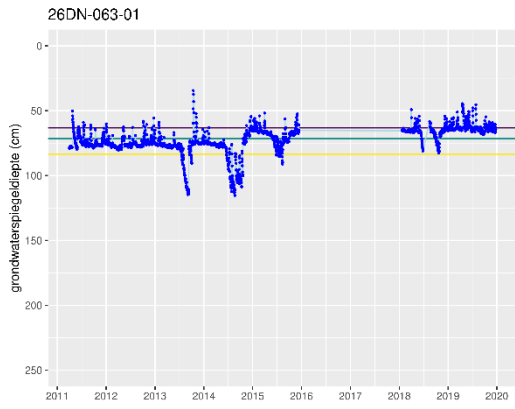
locatie	x	y	startdatum	einddatum	ghg	glg	gvv
26FZ-177-01	180006	493166	2013-03-18	2021-03-31	51	129	90
26FZ-183-01	179921	493626	2013-11-01	2021-03-31	46	78	64
26FZ-184-01	179970	493563	2013-11-01	2021-03-31	0	17	6
26HN-005-01	170203	486987	2015-01-01	2021-03-31	7	64	23
26HN-006-01	169999	487202	2012-03-30	2021-03-31	54	96	83
27AN-056-01	183492	497615	2010-03-26	2021-03-31	6	49	37
27AN-057-01	183876	497534	2010-03-26	2021-03-31	6	37	26
27AN-058-01	184194	497569	2010-03-26	2021-03-31	5	32	19
27AN-059-01	184368	497481	2010-03-26	2021-03-31	13	42	29
27AN-060-01	184578	498272	2010-03-26	2021-03-31	82	115	105
27AN-061-01	184711	498203	2014-04-01	2021-03-31	67	96	86
27AN-062-01	184980	499310	2010-02-10	2021-03-31	89	123	109
27AN-063-01	185240	499150	2010-02-10	2021-03-31	58	100	83
27AZ-009-01	180052	493204	2012-01-18	2021-03-31	14	86	49

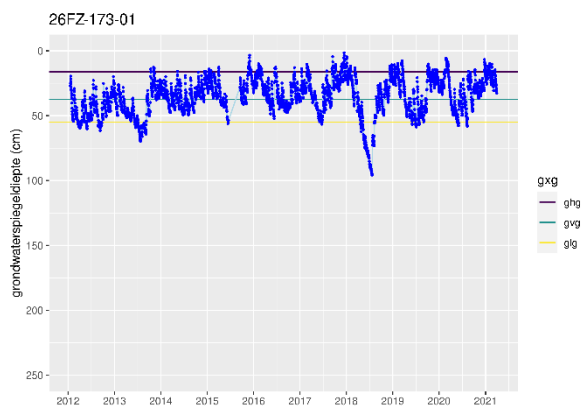
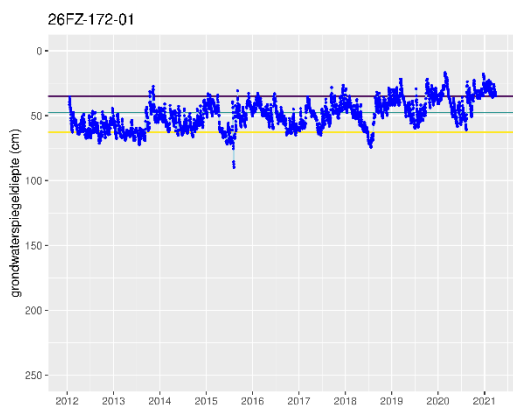
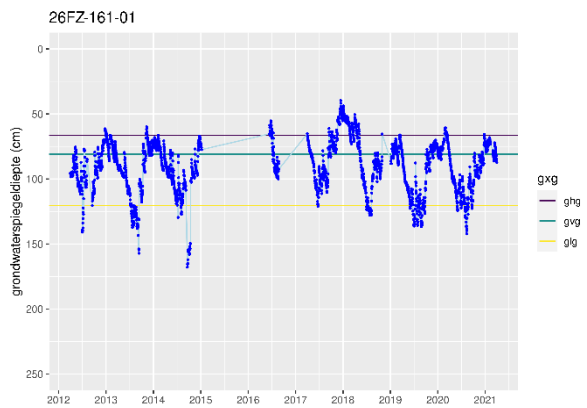
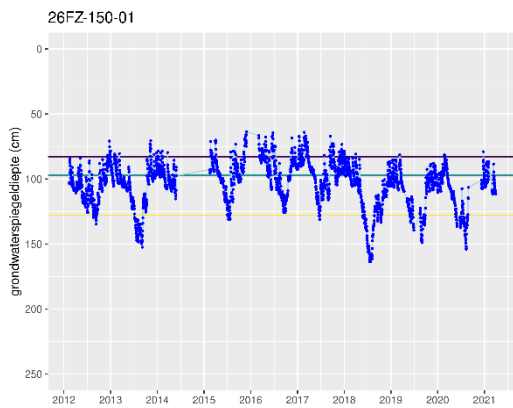
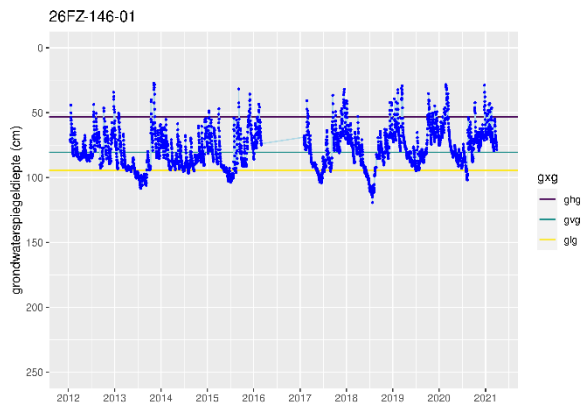
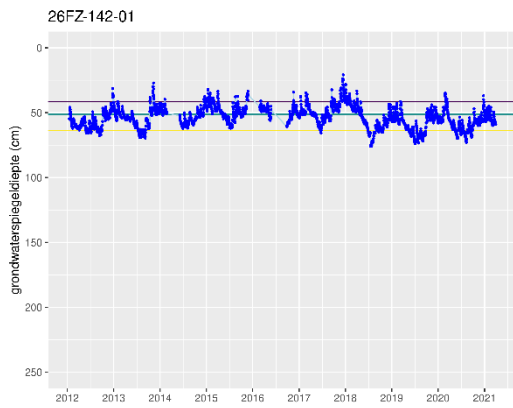
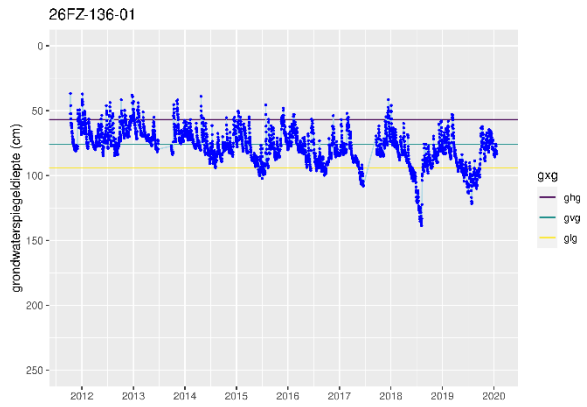
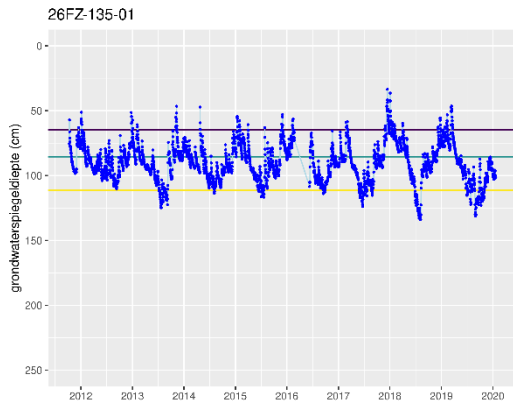


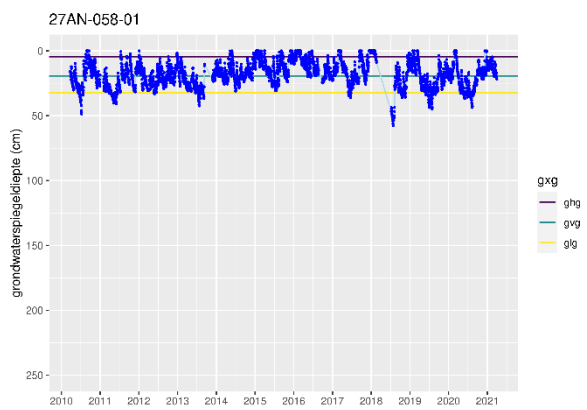
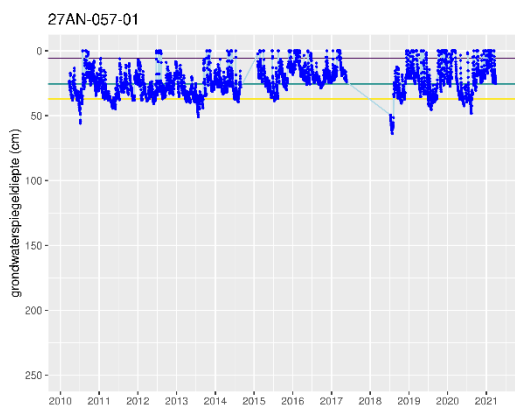
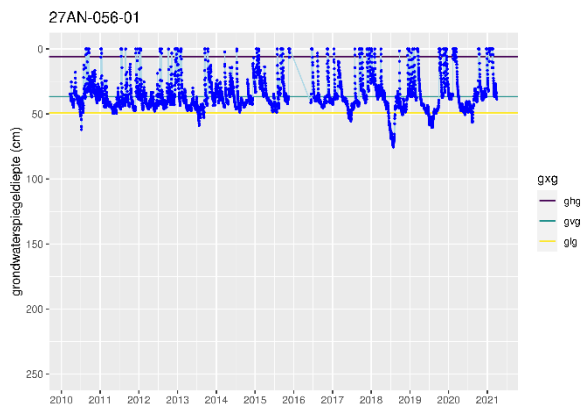
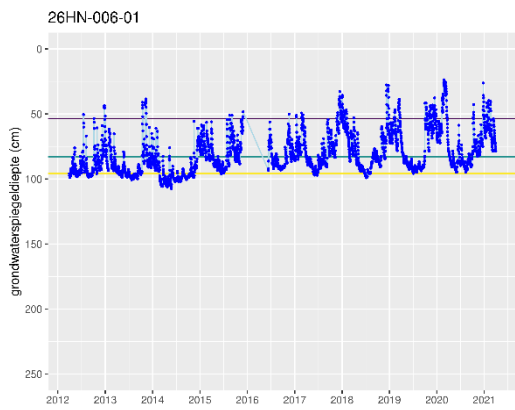
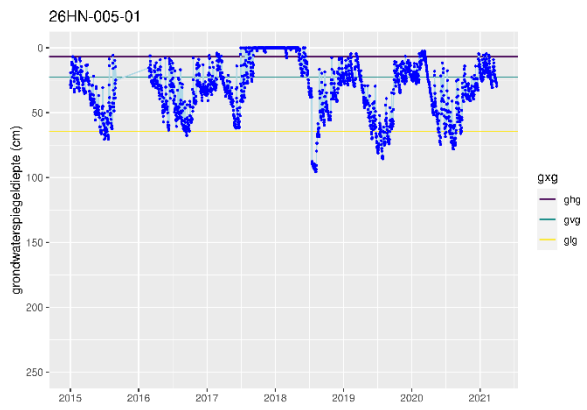
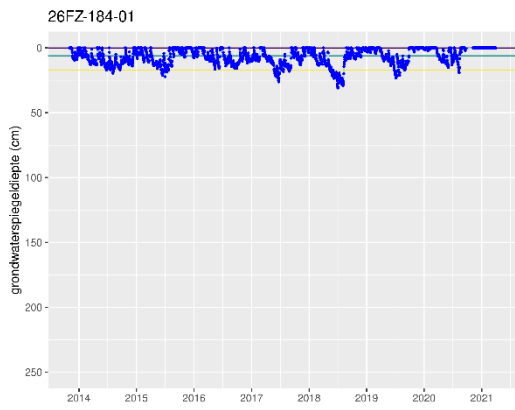
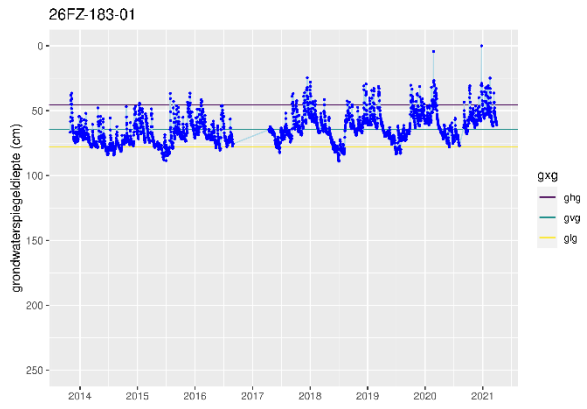
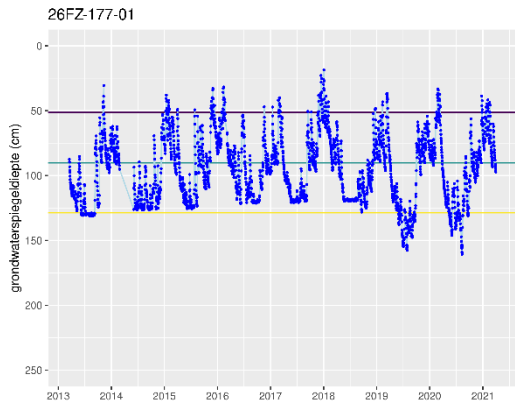


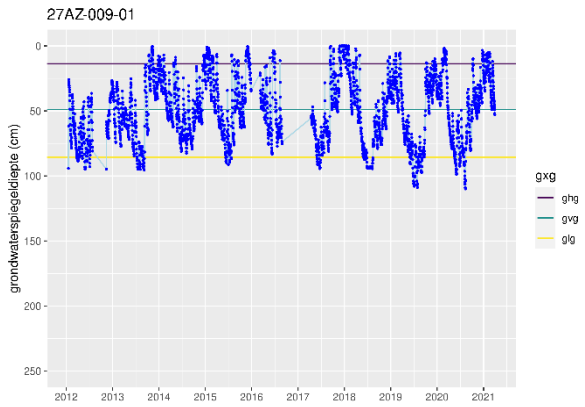
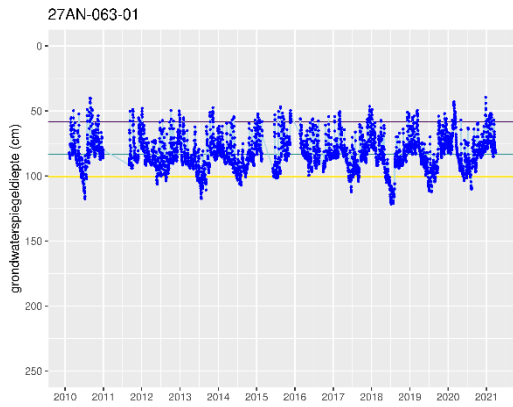
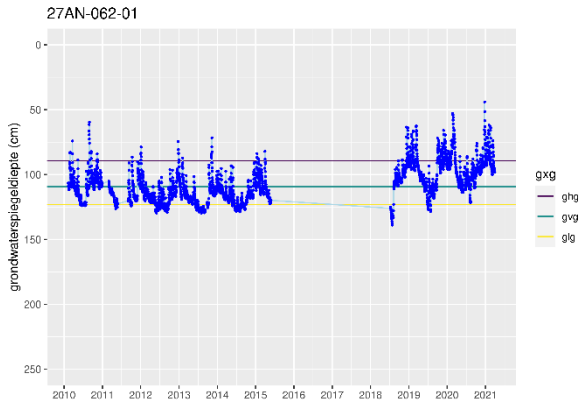
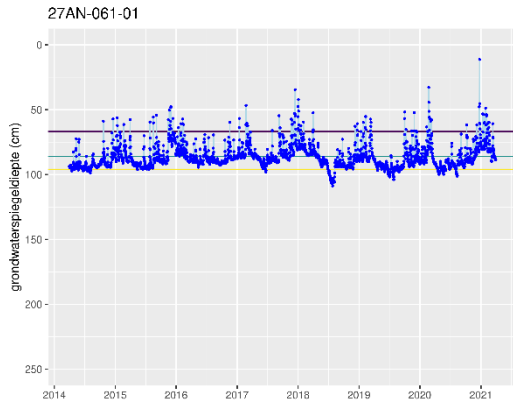
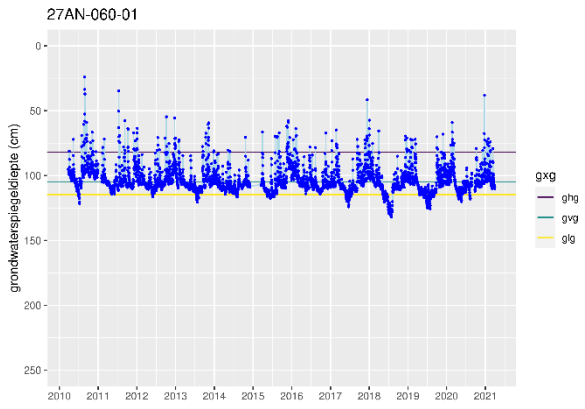
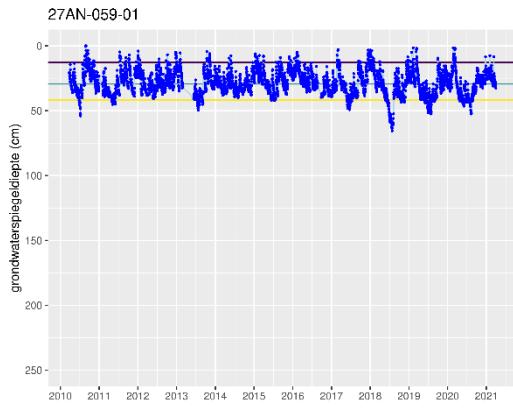














---

# Bijlage 2 Veldwerkprotocol opname grondwaterspiegeldiepte

## Toestemming

- Zoek contact met de eigenaar van het terrein waar een gerichte opname en boorbeschrijving gedaan moet worden.
- Leg uit waarvoor het onderzoek dient en wat je wilt gaan doen. Indien de landeigenaar graag onderzoeksresultaten ontvangt, maak dan een notitie. Indien er geen toestemming wordt verleend, komt de locatie te vervallen en zal worden vervangen door een reservepunt. Ga nooit zonder toestemming het veld in.

## Gerichte opname

- Benader de te onderzoeken locatie zo nauwkeurig mogelijk (binnen de nauwkeurigheid van de GPS). Houd bij het benaderen van de locatie altijd rekening met flora en fauna. Indien de locatie niet bereikbaar is te voet, te gevaarlijk is om te bereiken of er noemenswaardige schade ontstaat aan flora/fauna, komt de locatie te vervallen en zal worden vervangen door een reservepunt. Verleg nooit zelf de locatie meer dan 10 m.
- Voer de grondboring uit volgens de richtlijnen in Technisch Document 19A (Ten Cate e.a., 1995) en maak een profielbeschrijving tot een diepte van ten minste 1,5 m. Maak tijdens het boren een inschatting van de diepte van de grondwaterspiegel op dat moment. Als de grondwaterspiegel binnen 1,5 m zit, maak dan een extra boorgat op 2 m afstand van de eerste en boor deze uit tot een diepte van plm. 10 à 20 cm onder de verwachte grondwaterspiegel. Het profiel van deze boring hoeft niet te worden beschreven. Indien de grondwaterspiegel dieper dan 1,5 m zit, boor dan door tot 10 à 20 cm onder de verwachte grondwaterspiegel. Maak in dit geval een profielbeschrijving tot de volledige geboorde diepte.
- Maak op basis van het bodemprofiel de inschatting of er mogelijk een schijnspiegel is opgetreden of kan optreden, bijvoorbeeld op een slecht doorlatende laag. Indien dit het geval is, maak dan een extra boorgat, eentje tot op de slecht doorlatende laag en eentje onder de slecht doorlatende laag. Noteer bij alle boringen de boorgatdiepte.
- Laat het boorgat/de boorgaten open en dek deze zo nodig af, bijvoorbeeld als er vee in het perceel loopt of als je verwacht dat dit gaat gebeuren. Maak op basis van het bodemprofiel de inschatting hoelang het boorgat open moet blijven voor een nauwkeurige meting van de grondwaterspiegel. Minimaal 24-48 uur, maar soms is een langere insteltijd nodig, bijvoorbeeld in zware klei.
- Kom na de verwachtte insteltijd terug en meet de grondwaterspiegeldiepte met een meetklokje. Indien je bedenkingen hebt bij de insteltijd, laat dan (als het kan) het boorgat langer open en kom nog een keer terug. Noteer bij iedere waarneming de tijd van waarnemen en diepte van de grondwaterspiegel ten opzichte van maaiveld. Indien je tevreden bent met de waarneming, vul dan het boorgat weer op.
- Voornamelijk tijdens de GHG-meetcampagne kan het voorkomen dat bij sommige locaties gedeeltelijk plassen op maaiveld blijven staan. Indien je de verwachting hebt dat een gemaakt boorgat vol stroomt met water vanaf maaiveld en hierdoor een onrealistische weergave geeft van de grondwaterspiegel, maak hiervan dan een notitie. Laat indien mogelijk het boorgat langer open en kom, bijvoorbeeld een week later, nogmaals terug voor nog een waarneming.
- Lever de verzamelde data aan volgens de vooraf gemaakte formulieren.

## Recent verschenen WOt-rapporten

<b>131</b>	Gerritsen, P., D.J.J. Walvoort, M. Knotters (2021). <i>Kartering grondwaterspiegeldiepte in laag Friesland; Actualisatie van een deel van het grondwaterspiegeldieptemodel van de Basisregistratie Ondergrond (BRO).</i>	<b>143</b>	Salverda, I.E., M. Pleijte (2022). <i>Verkenning van het provinciale beleid voor overgangszones die grenzen aan natuur; Leren over governance-uitdagingen voor een integrale gebiedsaanpak.</i>
<b>132</b>	Haas, W. de, J.L.M. Donders (2021). <i>Vertrouwen in natuurbeleid? Naar een typologie van verzet.</i>	<b>144</b>	Kamphorst, D.A. en J.L.M. Donders (2022). <i>Natuur- en zorgcombinaties: barrières, kansen en opschaling; Een verkenning van institutionele barrières, kansen en opschalingsmogelijkheden voor natuurinclusieve innovaties in de zorg.</i>
<b>133</b>	Kuindersma, W., D.A. Kamphorst, F.H. Kistenkas (2021). <i>De gevolgen van de stikstofaanpak voor het natuurbeleid. Een voorlopige analyse van de gevolgen voor de decentralisatie naar provincies en de gebiedsgerichte uitvoering.</i>	<b>145</b>	Gerritsen, A.L., H.J. Agricola, C. Aalbers, E. Gies (2022). <i>Ruimtelijk-economische dynamiek van de landbouw; Rapport 2: Casestudies naar ontwikkelpaden, beïnvloedende factoren, effecten op natuur en aanknopingspunten voor beleid.</i>
<b>134</b>	Brouwer, F., G. Maas, K. Teuling, T. Harkema. en S. Verzanvoort (2021). <i>Bodemkaart en Geomorfologische Kaart van Nederland: actualisatie 2020-2021 en toepassing; Deelgebieden Gelderse Vallei-Zuid en -West en Veluwe-Zuid.</i>	<b>146</b>	Michels, R., M.J. Voskuilen, W.H.G.J. Hennen & P.C. Roebeling (2022). <i>Actualisatie normkosten natuur ten behoeve van kostenberekeningen.</i>
<b>135</b>	Houtkamp, J.M., A.M. Schmidt en P.J.F.M. Verweij (2021). <i>Reflectie PBL-rekeninstrumentarium voor natuur.</i>	<b>147</b>	Berkhout, P. en S. Galema (2022). <i>Duurzaam verdienen. Analyse verdienvermogen verduurzamingsmodellen landbouw.</i>
<b>136</b>	Breman B.C., W. Nieuwenhuizen, G.H.P. Dirx, R. Pouwels, B. de Knecht, E. de Wit, H.D. Roelofsens, A. van Hinsberg, P.M. van Egmond, G.J. Maas (2022). <i>Natuurverkenning 2050 – Scenario Natuurinclusief.</i>	<b>148</b>	Kistenkas, F.H. en D.A. Kamphorst (2022). <i>Value capturing in het landelijk gebied. Een verkenning van mogelijkheden en toepassing in vier praktijkvoorbeelden van zonne- en windenergie.</i>
<b>137</b>	Mattijssen, T.J.M., M. Visscher, W. Ganzevoort, M. Pleijte (2022). <i>Monitoring van burger-betrokkenheid bij natuur; Citizen science en doelgroep-panels.</i>	<b>149</b>	Kuindersma, W., D.A. Kamphorst, C. Walther, E. de Wit-De Vries, T.A. de Boer, M. Visscher (2022). <i>Duurzame landbouw in gebiedsprocessen. Barrières en oplossingsrichtingen in Engbertsdijkvenen, Ronde Hoep en Schiermonnikoog.</i>
<b>138</b>	Boer, T.A. de en F. Langers (2022). <i>Maatschappelijk draagvlak voor natuur in 2021 en trends in het draagvlak.</i>	<b>150</b>	Walther, C.M., D. Stomph en R.I. van Dam (2023). <i>Sociale impact van de landbouwtransitie.</i>
<b>139</b>	Bouwma, I.M., J.G. Nuesink, M.C. van Riel, J.A. Veraart, J.L.M. Donders, R.M.A. Wegman, R. Pouwels (2022). <i>De samenhang tussen de Kaderrichtlijn Water en de Vogel- en Habitatrichtlijn; Een landelijke analyse en een verdiepende studie in zes deelgebieden.</i>	<b>151</b>	Brouwer, F., F.B.T. Assinck, T.T.L. Harkema, C. Teuling en D.J.J. Walvoort (2023). <i>Actualisatie van de bodemkaart in de gemeente Vijfheerenlanden; Herkartering van de verbreding van veen.</i>
<b>140</b>	Hennekens, S.M., J. Holtland, N.M. van Rooijen, G.W.W. Wamelink & W.A. Ozinga (2022). <i>Planten als indicatoren voor pH en GVG; Een vergelijking van het ITERATIO- en Wamelink-indicatorsysteem voor pH en GVG.</i>	<b>152</b>	Kuindersma, W., J. van den Berg, F.G. Boonstra, D.A. Kamphorst (2023). <i>De weerbaarheid van beleidsintegratie in de veenweiden; Het gebied Aldeboarn-De Deelen.</i>
<b>141</b>	Vries, S. de., D.A. Kamphorst, F. Langers (2022). <i>Beleidsdenken over stedelijk groen en gezondheid; En de mate waarin dit zich laat onderbouwen vanuit het onderzoek.</i>	<b>153</b>	Walvoort D.J.J., P. Gerritsen, M. Knotters (2023). <i>Kartering grondwaterspiegeldiepte in Flevoland; Actualisatie van een deel van het grondwater-spiegeldieptemodel van de Basisregistratie Ondergrond (BRO).</i>
<b>142</b>	Schelhaas, M.J., S. Teeuwen, J. Oldenburger, G. Beerkens, G. Velema, J. Kremers, B. Lerink, M.J. Paulo, H. Schoonderwoerd, W. Daamen, F. Dolstra, M. Lusink, K. van Tongeren, T. Scholten, I. Pruijsten, F. Voncken, A.P.P.M. Clerckx (2022). <i>Zevende Nederlandse Bosinventarisatie; Methoden en resultaten.</i>		





---

### **Thema Basisregistratie Ondergrond**

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu  
Postbus 47  
6700 AA Wageningen  
T 0317 48 54 71  
E [info.wnm@wur.nl](mailto:info.wnm@wur.nl)  
[wur.nl/wotnatuurenmilieu](http://wur.nl/wotnatuurenmilieu)

ISSN 1871-028X

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, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers 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.

