Vlaanderen
verbeelding werkt

# OPSTELLEN VAN GXG-KAARTEN VOOR VLAANDEREN

Eindrapport

DEPARTEMENT
**OMGEVING**

VLAAMSE
**MILIEUMAATSCHAPPIJ**

www.vlaanderen.be

**OPSTELLEN VAN GXG-KAARTEN VOOR VLAANDEREN**

Deze studie had als doel om twee vorige studies met betrekking tot het karteren van grondwater te analyseren en op basis hiervan de best mogelijke methodiek op te stellen om het Gemiddeld Laagste Grondwaterpeil en het Gemiddeld Hoogste Grondwaterpeil (samen benoemd als GxG-waardes) in Vlaanderen in kaart te brengen. In grote mate slaagt deze studie daarin, zeker wat betreft de grondwaterstanden tot 10 m onder het maaiveld. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van meer dan 5000 metingen verspreid over Vlaanderen, die na selectie en bewerking gecombineerd werden met 60 mogelijke kaartlagen d.m.v. de *machine learning*-methode *gradient tree boosting*.

De verantwoordelijkheid voor de inhoud van dit rapport ligt bij de auteurs.

## COLOFON

**Verantwoordelijke uitgever**
Toon Denys, secretaris-generaal
Departement Omgeving
Koning Albert II-laan 15 bus 553, 1210 Brussel
omgeving.vlaanderen.be

**Auteurs**
Jorn Van de Velde, Tim Franken en Vincent Wolfs – Sumaqua

**Publicatiedatum**
Juni 2025

**Depotnummer**
D/2025/3241/211

**Wijze van citeren**
Van de Velde, J., Franken, T. en Wolfs, V. (2025). Opstellen van GxG-kaarten voor Vlaanderen: eindrapport. Studie in opdracht van het Departement Omgeving en de Vlaamse Milieumaatschappij, 93 pp.

**PARTNERS**

Sumaqua

DEPARTEMENT OMGEVING

VLAAMSE MILIEUMAATSCHAPPIJ

**omgeving.vlaanderen.be**
**vmm.vlaanderen.be**

# MANAGEMENTSAMENVATTING

Dit rapport omvat de resultaten van het project 'Opstellen van GxG-kaarten voor Vlaanderen'. Het beschrijft de desktopanalyse die uitgevoerd is om twee voorgaande studies te synthetiseren, de werkwijze die op basis daarvan is opgesteld en de resultaten die met deze werkwijze bekomen zijn. Deze twee voorgaande studies zijn:

- 'Actualisatie van de drainageklasse van de bodemkaart door koppeling van grondwaterstatistieken aan de bodemkaart', uitgevoerd door Antea i.s.m. UGent in opdracht van Departement Omgeving, afdeling Vlaams Planbureau voor Omgeving, verder afgekort als 'Actualisatie van de drainageklasse';
- 'Effecten van klimaatverandering op de freatische grondwaterstanden', uitgevoerd door Sumaqua in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, verder afgekort als 'Effecten van klimaatverandering'.

In deze twee studies zijn immers als tussenstap GxG-kaarten opgemaakt: kaarten van het gemiddelde laagste grondwater, GLG, en het gemiddeld hoogste grondwater, GHG, in Vlaanderen (waarbij 'GxG' als verzamelterm voor beide types gegevens gebruikt wordt). Gegeven dat het hier een tussenstap betrof, lag de focus doorgaans niet op deze kaarten, waardoor deze niet noodzakelijk met de meest optimale set aan inputs opgemaakt zijn, noch altijd grondig geëvalueerd zijn voor het inschatten van de GxG.

Voorliggend project heeft als doel om GxG-kaarten (incl. de onzekerheid op deze kaarten) op te maken uitgaande van de twee hierboven vermelde studies. Hiervoor was het nodig om beide voorgaande studies op verschillende vlakken te vergelijken en daarbij - door beperkte aanpassingen te doen - tot een synthese van de best mogelijke methode te komen. De te vergelijken elementen waren de gebruikte basisdata, de verklarende kaartlagen, de werkwijze, de omgang met modelstatistieken, onzekerheid en schaling daarvan, de omgang met randeffecten en sprongen en de impact van dit alles op het toepassingsgebied.

Uit de analyse blijkt dat er inderdaad gestreefd moet worden naar een combinatie van beide methodes. Door gebruik te maken van een brede initiële dataset (cf. 'Actualisatie van de drainageklasse') kan het geobserveerde grondwater in Vlaanderen goed weergegeven worden: in totaal worden meer dan 6000 filters gebruikt, waarvan meer dan 5000 filters voldoende hoogwaardige gegevens bevatten om ze te gebruiken voor de modelfit. Door een mix van de gebruikte kaartlagen kan de variabiliteit in grondwaterpeilen in Vlaanderen in grote mate verklaard worden. Hierbij worden zowel kaartlagen gebruikt die in beide eerdere studies gebruikt worden, als enkele kaartlagen die sindsdien gepubliceerd zijn. Door de filtergegevens en de kaartlagen te combineren in CatBoost, in lijn met 'Effecten van klimaatverandering', is het mogelijk om een zo robuust mogelijk *machine learning*-model op te bouwen en de onzekerheden goed in kaart te brengen. Dit model levert een verbetering op voor de grondwaterdieptes tot 10 m onder het maaiveld, al is het moeilijk om diepere grondwaterstanden correct weer te geven. Deze karteringsopdracht levert het best mogelijke eindresultaat op, al blijven er enkele uitdagingen gerelateerd aan de onzekerheden, modellering van diepere grondwaterstanden en discontinuïteiten. Het eindresultaat is een kaart die voor grote delen van Vlaanderen gebruikt kan worden voor verkennende studies, al zullen de kaarten vooral van toepassing zijn daar waar sprake is van een neerslagafhankelijke grondwaterspiegel.

# INHOUDSTAFEL


| | | |
|---|---|---|
| 1 | Inleiding | 6 |
| 2 | Desktopanalyse | 7 |
| 2.1 | Inleiding | 7 |
| 2.2 | Basisdata | 8 |
| 2.2.1 | Inleiding | 8 |
| 2.2.2 | Toegepaste definitie grondwaterpeil | 8 |
| 2.2.3 | Initiële dataset | 9 |
| 2.2.4 | Dataselectie | 10 |
| 2.2.5 | Verwerking datasets | 12 |
| 2.2.6 | Toegepaste definitie GxG | 14 |
| 2.2.7 | Opsplitsing trainings- & testdata en bepaling *ground truth* | 14 |
| 2.2.8 | Analyse van de resultaten | 15 |
| 2.2.9 | Conclusie | 16 |
| 2.3 | Kaartlagen | 17 |
| 2.3.1 | Inleiding | 17 |
| 2.3.2 | Bodemgegevens | 18 |
| 2.3.3 | Meteorologische gegevens: gemiddeld neerslagoverschot | 21 |
| 2.3.4 | Bodembedekking | 22 |
| 2.3.5 | Digitaal hoogtemodel | 24 |
| 2.3.6 | Geologie | 27 |
| 2.3.7 | Ruimtelijke positie | 28 |
| 2.3.8 | Waterlopen | 29 |
| 2.3.9 | Grondwaterwinningen en verlaging ten gevolge hiervan | 30 |
| 2.3.10 | Algemene discussie | 31 |
| 2.3.11 | Conclusie | 32 |
| 2.4 | Werkwijze | 33 |
| 2.4.1 | Inleiding | 33 |
| 2.4.2 | Methode | 33 |
| 2.4.3 | Hyperparameteroptimalisatie | 34 |
| 2.4.4 | Selectie van verklarende variabelen | 34 |
| 2.4.5 | Conclusie | 35 |
| 2.5 | Modelstatistieken en onzekerheid | 35 |
| 2.5.1 | Inleiding | 35 |
| 2.5.2 | Kadering onzekerheid en nauwkeurigheid | 35 |
| 2.5.3 | Nauwkeurigheid | 36 |
| 2.5.4 | Onzekerheid | 36 |
| 2.5.5 | Onzekerheid opschalen | 37 |
| 2.5.6 | Conclusie | 38 |
| 2.6 | Randeffecten en sprongen | 38 |
| 2.6.1 | Inleiding | 38 |
| 2.6.2 | Randeffecten en sprongen in voorgaande studies | 38 |
| 2.6.3 | Conclusie | 39 |
| 2.7 | Toepassingsgebied | 40 |
| 2.7.1 | Inleiding | 40 |
| 2.7.2 | Toepassingsgebied volgens voorgaande studies | 40 |
| 2.7.3 | Mogelijke verbeteringen van het toepassingsgebied | 40 |
| 2.8 | Conclusies | 41 |
| 3 | Uitwerking | 43 |
| 3.1 | Inleiding | 43 |
| 3.2 | Data: uitgangspunt | 43 |
| 3.3 | Dataselectie en initiële controles | 44 |
| 3.4 | opmaak Pastasmodellen | 46 |
| 3.5 | Berekening GxG's voor incidentele metingen | 49 |
| 3.6 | Kaartlagen | 50 |
| 3.7 | Modelfit | 52 |

3.8 Tussentijdse resultaten 53
3.8.1 Inleiding 53
3.8.2 Gebruiken we grondwatergegevens in mTAW of m-mv? 53
3.8.3 Gebruik coördinaten 56
3.8.4 Gebruik relatieve RMSE 58
3.9 Conclusies 60
4 Resultaten 61
4.1 Inleiding 61
4.2 Algemeen overzicht kaarten 61
4.2.1 Inleiding 61
4.2.2 GLG 61
4.2.3 GHG 62
4.2.4 Herschaling naar ruwere resoluties 63
4.2.5 Conclusies 64
4.3 Geselecteerde kaartlagen 64
4.3.1 Inleiding 64
4.3.2 GLG 65
4.3.3 GHG 66
4.3.4 Conclusies 68
4.4 Nauwkeurigheid 68
4.4.1 Inleiding 68
4.4.2 GLG 69
4.4.3 GHG 70
4.4.4 Conclusies 75
4.5 Onzekerheid 76
4.5.1 Inleiding 76
4.5.2 GLG 76
4.5.3 GHG 79
4.5.4 Conclusies 81
4.6 Randeffecten en sprongen 81
4.6.1 Inleiding 81
4.6.2 GLG 81
4.6.3 Conclusies 83
4.7 Vergelijking met vorige studies 83
4.8 Conclusies 85
5 Globale conclusies en aanbevelingen 85
5.1 Conclusies 85
5.2 Beschikbare gegevens 87
5.3 Aanbevelingen 87
Referenties 90
Bijlages 91

# 1 INLEIDING

Dit rapport is het eindrapport van het project ‘Opstellen van GxG-kaarten voor Vlaanderen’, uitgevoerd in opdracht van Departement Omgeving, Afdeling Vlaams Planbureau voor Omgeving (‘VPO’ in wat volgt) en de Vlaamse Milieumaatschappij (‘VMM’ in wat volgt). Binnen dit project is het de bedoeling om kaarten van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) en gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) (samen benoemd als ‘GxG’s’), in combinatie met de onzekerheid hierop, op te maken voor Vlaanderen en dit op verschillende ruimtelijke resoluties. Een gebiedsdekkende kartering van deze twee grondwaterstatistieken op basis van grondwatermetingen (puntgegevens) en andere gebiedsdekkende kaarten (bodem, bodembedekking, …) als verklarende variabelen kan een grote meerwaarde betekenen voor verschillende studies en onderzoeken, zoals bv. het ontwerp van buffer- en infiltratie-installaties bij (her)aanleg van straten of ecohydrologisch onderzoek en herstel. Bij deze karteringsopdracht is het de bedoeling om de beste methodes van 2 eerder uitgevoerde studies samen te voegen tot een methodiek om deze kartering finaal uit te kunnen voeren. Deze twee eerdere studies zijn:

- ‘Actualisatie van de drainageklasse van de bodemkaart door koppeling van grondwaterstatistieken aan de bodemkaart’, uitgevoerd door Antea i.s.m. UGent in opdracht van Departement Omgeving, afdeling Vlaams Planbureau voor Omgeving, verder afgekort als ‘Actualisatie van de drainageklasse’ (Van den Berg, et al., 2023);
- ‘Effecten van klimaatverandering op de freatische grondwaterstanden’, uitgevoerd door Sumaqua in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, verder afgekort als ‘Effecten van klimaatverandering’ (Franken & Wolfs, 2022).

In deze twee eerdere studies waren kaarten van dit type wel opgemaakt (telkens met behulp van een *machine learning*-methode), maar die waren geen finaal eindproduct. De kwaliteit van de opgemaakte tussentijdse kaarten is als gevolg daarvan niet altijd grondig geëvalueerd, en deze kaarten zijn niet gepubliceerd. In het geval van dit project, is het dus wel de bedoeling om deze kaarten publiek beschikbaar te stellen, **wat impliceert dat een grondige evaluatie van de voorheen gebruikte methodes nodig is en dat de beste combinatie van deze methodes gebruikt wordt.** Deze evaluatie van de beide eerdere studies en de selectie van methodiek zal besproken worden in Sectie 2, de desktopanalyse.

Op basis van de keuzes die gemaakt zijn in de desktopanalyse kon de werkwijze finaal uitgewerkt worden. **Uit welke stappen de werkwijze bestaat en wat daarvan de implicaties zijn op het eindresultaat, is het onderwerp van Sectie 3**. Hierbij worden ook nog enkele vragen besproken die als te onderzoeken uit de desktopanalyse kwamen, nl. welke definitie van het grondwaterpeil gebruikt moet worden, wat de impact is van het al dan niet gebruiken van coördinaten als verklarende kaartlaag en in welke mate het nodig is om de relatieve RMSE als objectieffunctie te gebruiken.

In **sectie 4** worden vervolgens de resultaten voorgesteld die verkregen worden wanneer de finale werkwijze uit Sectie 3 toegepast wordt. Hierbij is het mogelijk om met een (visuele) analyse van de gerealiseerde kaart, de gebruikte verklarende kaartlagen, de nauwkeurigheids- en onzekerheidsstatistieken en een vergelijking met de vorige studies **een overzicht op te maken van de finale kwaliteit van de kaartlagen**.

Tot slot **biedt Sectie 5 de mogelijkheid om de resultaten samen te vatten en enkele aanbevelingen te geven** m.b.t. bijkomende updates en mogelijke verbeteringen aan de grondwaterkartering.

# 2 DESKTOPANALYSE

## 2.1 INLEIDING

Deze sectie beschrijft de evaluatie van de methodes die binnen 'Actualisatie van de drainageklasse' en 'Effecten van klimaatverandering' toegepast zijn. Deze evaluatie werd uitgevoerd in de vorm van een desktopanalyse, waarbij de eerder gebruikte methodes met elkaar en de beschikbare literatuur (vooral met betrekking tot *digital soil mapping,* de wetenschappelijke term voor dit type oefeningen, en *machine learning*) of expertkennis vergeleken werden. Deze desktopanalyse is onderverdeeld volgens de verschillende facetten waarop de voorgaande studies vergeleken moeten worden. De vergeleken facetten zijn:

- De gebruikte basisdata;
- De gebruikte kaartlagen;
- De gebruikte werkwijze;
- De modelstatistieken, onzekerheid en gebruikte en finale resolutie;
- De randeffecten en sprongen;
- Het toepassingsgebied.

Vooraleer we over gaan naar deze evaluatie is het belangrijk om de inhoud en focus van beide voorgaande studies te vergelijken, aangezien dit helpt om de keuzes gemaakt in deze studies te kaderen. 'Actualisatie van de drainageklasse' focuste op de update van de drainageklasses van de bodemkaart, waarbij een grondwaterkartering een tussenstap vormde. Een van de belangrijkste effecten van de focus op drainageklasses was dat hierbij alle grondwaterpeilen lager dan 3 meter onder het maaiveld buiten beschouwing werden gelaten, aangezien deze onder dezelfde (en meest droge) drainageklasse vielen. Binnen 'Effecten van klimaatverandering' zijn verschillende *machine learning*-modellen opgesteld om de impact van klimaatverandering op grondwatergerelateerde indicatoren in te schatten. Hierbij was de grondwaterkartering eveneens een tussenstap en werd sterk gefocust op de relatie met peilgegevens uit de grondwaterstandsindicator (GWI), wat de resultaten ook beïnvloed kan hebben. Hoewel het nuances kunnen lijken, moeten deze en andere verschillen tussen beide studies zeker in het achterhoofd gehouden worden bij de evaluatie van de werkwijzes en gemaakte keuzes.

Op basis van deze desktopanalyse en de keuzes die hierin voorgesteld worden, kunnen in een volgende stap beide eerder toegepaste methodes ook effectief gecombineerd worden en kan de kartering effectief uitgevoerd worden. Deze stappen staan verder beschreven in Secties 3 en 4.

In Secties 2.2 tot en met 2.7 wordt telkens één van deze facetten, in de volgorde zoals hierboven weergegeven, besproken. In Sectie 2.8 wordt een globale conclusie gegeven. Bij dit geheel dient in het achterhoofd gehouden te worden dat de verschillende facetten in enige mate met elkaar verbonden zijn. De keuzes die voorgesteld worden met betrekking tot de gebruikte basisdata en kaartlagen, de twee belangrijkste onderdelen van de analyse, hebben dus een invloed op de mogelijke keuzes in de andere onderdelen.

## 2.2 BASISDATA

### 2.2.1 Inleiding

In het kader van deze desktopanalyse is de belangrijkste vraag wellicht **welke basisdata gebruikt moet worden**. In een *digital soil mapping*-oefening als deze heeft de gebruikte data immers een zeer grote invloed, die vaak groter is dan de invloed van de gebruikte werkwijze. De cruciale vragen die gesteld moeten worden met betrekking tot de basisdata, zijn:

- Welke grondwatergegevens zijn gebruikt?
- Welke grondwatergegevens kunnen beschouwd worden als de *ground truth* (i.e. de gegevens die als waarheid beschouwd worden en waarmee vergeleken wordt), gegeven de gebruikte GxG-definitie?

Deze vragen kunnen verder onverdeeld worden in een aantal deelvragen, die op basis van de rapporten van de voorgaande studies beantwoord kunnen worden. Deze deelvragen zijn:

- Welke **definitie van het grondwaterpeil** werd toegepast?
- Welke **gegevens** vormden het startpunt van de analyse, i.e. hoe wordt de dataset initieel vormgegeven?
- Welke vormen van **dataselectie** vinden plaats op deze gegevens (vooraleer *machine learning* toegepast wordt)?
- Welke verdere **verwerking van de gegevens** vindt (indien van toepassing) plaats?
- Welke **definitie van GxG** werd toegepast?
- Hoe werden de gegevens **opgedeeld in een trainings- en testdataset**, en wat werd daarbij beschouwd als *ground truth*?

Om de analyse verder te onderbouwen, is het relevant om naast de antwoorden op deze vragen ook de resultaten van beide studies bondig te beschouwen. Hoewel verschillende andere factoren ook een invloed hebben op het eindresultaat, zullen de gebruikte gegevens, zoals reeds vermeld, een grote rol spelen. De resultaten kunnen dus enkele inzichten bieden in de impact van de gebruikte datasets.

Elk van deze deelvragen, en een korte beschouwing van de resultaten, zal in de volgende secties behandeld worden. Finaal wordt dit alles samengevat in een conclusie met betrekking tot de gebruikte basisdata.

### 2.2.2 Toegepaste definitie grondwaterpeil

Deze sectie bespreekt op welke manier het grondwaterpeil gedefinieerd wordt: dit kan namelijk zowel in mTAW (absolute hoogte ten opzichte van de zeespiegel) of in m-mv (meter onder maaiveld, een relatieve en aan de locatie gebonden maat). Een overzicht van de definitie in de eerdere studies is gegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Overzicht van de definitie van het grondwaterpeil in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Omrekening naar m-mv (waar nodig met behulp van hoogte boven het maaiveld van de peilput of hoogte uit DHM). | • Gebruik van gegevens in m-mv, op basis van gegevens uit DOV. Omrekening vond waar nodig plaats op |

| | |
|---|---|
| | basis van gegevens in de DOV databank. |

Uit Tabel 1 blijkt dat beide studies gegevens in m-mv gebruiken. Hoewel er geen redenering gegeven is waarom deze keuze te verkiezen valt boven mTAW, zou uit de gelijklopende keuzes af te leiden moeten zijn dat dit te verkiezen optie is. Voor een aantal peilputten is wel een zekere omrekening nodig. In 'Actualisatie van de drainageklasse' zijn hiervoor stappen gegeven, in 'Effecten van klimaatverandering' is dit niet duidelijk gegeven (mogelijk zijn de gegevens wel allemaal beschikbaar voor de filters die in de GWI gebruikt worden). In enkele overleggen en discussies werd echter gesuggereerd dat een berekening in mTAW toch zinvol zou kunnen zijn, vooral wat betreft het beperken van sprongen (in combinatie met kaartlagen zoals het Digitaal Hoogtemodel, zie Sectie 2.3.5). Dit is echter in geen van beide studies onderzocht, en een verdere analyse van de impact hiervan is dus nodig. Om hierop een sluitend antwoord te kunnen bieden, is er voorgesteld om **de modellering voor een testgebied tweemaal uit te voeren**: éénmaal met de grondwaterpeilen in m-mv en éénmaal met de grondwaterpeilen in mTAW. Indien de RMSE van de resultaten met als input grondwaterpeilen in mTAW niet noemenswaardig slechter is dan deze van de resultaten met input in m-mv en ook aan andere kwaliteitseisen voldaan wordt, lijkt het beter om mTAW te gebruiken.

### 2.2.3 Initiële dataset

Deze sectie beschrijft welke gegevens in beide voorgaande studies gebruikt werden om de initiële dataset vorm te geven. Een verdere selectie en verwerking kan deze nog verfijnen of beter bruikbaar maken, maar het uitgangspunt wordt wel door deze eerste selectie bepaald. Een overzicht van de initiële datasets zoals gebruikt in de eerdere studies is gegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Overzicht van de initiële datasets in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • De initiële dataset bestond uit een brede set aan metingen (DOV, GWI, gemeentes en andere (semi-)publieke instanties, eigen metingen Antea). | • De initiële dataset bestond uit gegevens van DOV (meetnetten 1, 4, 5, 8, 9), waarvan echter maar een beperkt aantal gegevens gebruikt zijn voor de feitelijke modellering (zie Sectie 2.2.4, Dataselectie).<br>• Een groot deel van de gegevens van DOV is wel gebruikt voor de aanmaak van een verklarende kaartlaag, nl. de gemiddelde grondwaterstand, waardoor deze onrechtstreeks de modellering beïnvloeden. |

De initiële dataset kan moeilijk los gezien worden van de wijze waarop daaruit de feitelijk gebruikte data geselecteerd worden. Zoals in Tabel 2 geduid, vertrekken beide studies immers allebei (grotendeels) vanuit de gegevens beschikbaar in de Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV), maar maken vervolgens heel verschillende keuzes. In principe zou het echter te verkiezen zijn om te starten van zo'n breed mogelijke initiële dataset, en op basis van beredeneerde keuzes op vlak van dataselectie (zie Sectie 2.2.4), verwerking (zie Sectie 2.2.5) etc. de dataset optimaal te gebruiken.

Een breed uitgangspunt is optimaal. Dit was het geval bij beide studies, **maar de bijkomende data gebruikt in 'Actualisatie van de drainageklasse' maakt deze nog robuuster**. Door middel van

dataselectie kunnen irrelevante punten alsnog geëlimineerd worden. Een eerste aandachtspunt is wel de beschikbaarheid van gegevens: indien een databron niet continu geüpdatet wordt, kan die bij een update van de GxG-kaarten niet meer relevant zijn. Dat valt door een automatische en voldoende robuuste dataselectie echter wel op te lossen, waardoor deze niet a priori weggehaald moeten worden en er dus wel nog gebruik gemaakt van kan worden. Een tweede aandachtspunt is dat ten tijde van voorgaande studies, nog niet alle mogelijke metingen beschikbaar waren via DOV. Normaal gezien zouden alle gegevens die in 'Actualisatie van de drainageklasse' gebruikt zijn, sindsdien toegevoegd moeten zijn aan DOV. **Dat maakt het mogelijk om voor de nieuwe kartering te starten vanuit een datadump van DOV**, waarbij de dataset zoals in 'Actualisatie van de drainageklasse' gebruikt, aangeleverd wordt. Verder kunnen bijkomende gegevens enkel gebruikt worden indien deze heel eenvoudig verkregen, gedownload en in de verdere stappen verwerkt kunnen worden, en dit enkel voor de filters die reeds in de datadump aanwezig zijn. Op die manier valt eenvoudig en duidelijk te werk te gaan. Er is dan ook voorgesteld om deze werkwijze te volgen.

### 2.2.4 Dataselectie

Deze sectie beschrijft welke vormen van dataselectie toegepast werden op de initiële dataset, doorgaans met de focus op het weren van (potentieel) foutieve of verouderde gegevens. Een bondig overzicht van de voorheen gebruikte methodes is gegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Overzicht van de dataselectiemethodes zoals gebruikt in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Aanpassing van metingen die >20 cm boven het maaiveld uitkwamen naar 0 m-mv.<br>• Verwijdering van filters met GHG dieper dan 3 m-mv.<br>• Verwijdering datapunten die voor elk meetpunt >3*standaarddeviatie zijn op basis van sinusoïdaal model.<br>• Verwijdering totale tijdreeks indien standaarddeviatie meer dan 0,5 m is op basis van sinusoïdaal model.<br>• **Eindresultaat:** niet gekend in deze stap. | • Selectie op basis van kwaliteitscriteria:<br>  o Peilput nog in gebruik met meest recente meting van 2021;<br>  o Minimaal 60 metingen uit minimaal 5 verschillende jaren;<br>  o Minimaal maandelijkse metingen.<br>• Selectie op basis van freatisch karakter:<br>  o Vergelijking tussen diepte van de onderkant van de filter en de dikte van het freatisch pakket;<br>  o Bepaling freatisch karakter op basis van tijdreeksmodel.<br>• Weerhouden van één filter per peilput.<br>• Manuele controle (alle filters van GWI moeten aanwezig zijn + toevoeging filters early warning-net INBO).<br>• Controle voor representatieve filters:<br>  o GWI vormt de basis;<br>  o Selectie van bijkomende filters op basis van weerhouden dataset gegeven een aantal receptoren;<br>  o Minimaal 200 filters te weerhouden.<br>• **Eindresultaat:** 244 filters. |

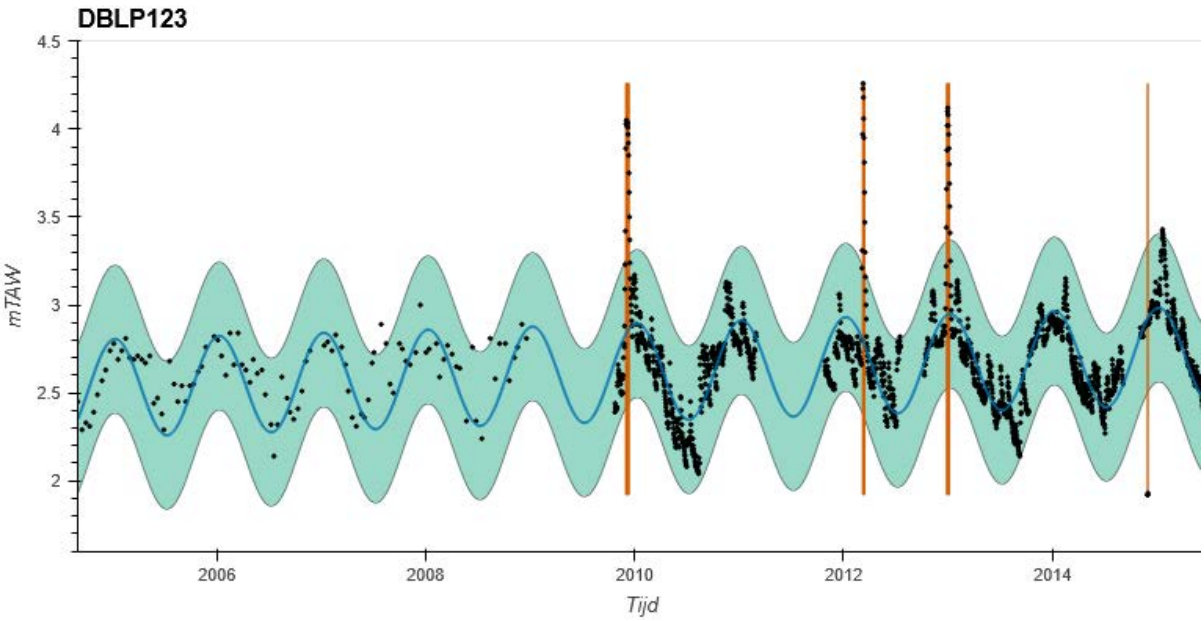
Omwille van de grote verschillen tussen de einddoelen van beide voorgaande studies, zijn er grote verschillen in de dataselectie en correctiecriteria, zoals te lezen valt in Tabel 3. In ‘Actualisatie van de drainageklasse’ lag de focus op het herberekenen van de drainageklasse en dus het bovenste deel van de bodem. In ‘Effecten van klimaatverandering’ lag de focus op de representativiteit, de link met GWI en de impact van klimaatverandering op grondwater in het algemeen en op een bepaald aantal receptoren. Indien van een brede dataset vertrokken wordt, lijkt het optimaal om beide methodes te combineren.

Hierbij is voorgesteld voor om de volgende criteria **zeker te weerhouden**:

- Aanpassing van metingen die >20 cm boven het maaiveld uitkwamen naar 0 m-mv (cf. ‘Actualisatie van de drainageklasse’)
- Criteria voor het freatisch karakter (cf. ‘Effecten van klimaatverandering’
    - Vergelijking tussen diepte van de onderkant van de filter en de dikte van het freatisch pakket.
- Weerhouden van één filter per locatie (cf. ‘Effecten van klimaatverandering’)

Initieel werd dan ook voorgesteld om de volgende criteria expliciet **niet te weerhouden**:

- Selectie op basis van GWI (cf. ‘Effecten van klimaatverandering’)
    - Dit criterium zou niet weerhouden worden omdat de focus breder is dan de focus in ‘Effecten van klimaatverandering’.
- Criteria voor de afwijkingen van de tijdreeks (cf. ‘Actualisatie van de drainageklasse’, zie Figuur 1):
    - Verwijdering datapunten die voor elk meetpunt >3*standaarddeviatie zijn op basis van sinusoïdaal model.
    - Verwijdering totale tijdreeks indien standaarddeviatie meer dan 0,5 m is op basis van sinusoïdaal model.
- Selectie van gegevens die maximaal 3 m-mv gelegen zijn (cf. ‘Actualisatie van de drainageklasse’)
    - Dit criterium zou niet weerhouden worden omdat in deze studie alle freatische grondwaterniveaus goed in kaart gebracht moeten worden. Het is dus niet de bedoeling om enkel te focussen op de bovenste zone.
- Bepaling freatisch karakter op basis van tijdreeksmodel (cf. ‘Effecten van klimaatverandering’)
- Selectie op basis van de kwaliteit van de tijdreeks (cf. ‘Effecten van klimaatverandering’)
    - Er werden in ‘Effecten van klimaatverandering’ verschillende criteria gebruikt om de kwaliteit van de tijdreeks te analyseren, vooral met betrekking tot de hoeveelheid en de frequentie van de gegevens:
        - Meetpunt nog in gebruik met de meest recente meting in 2021;
        - Minimaal 60 metingen uit minimaal 5 verschillende jaren;
        - Minimaal maandelijkse metingen.
    - Deze criteria zouden niet weerhouden worden omdat de combinatie van PIRFICT-modellering en het gebruikt van incidentele metingen (zie Sectie 2.2.5) een vlotter gebruik van minder kwalitatieve meetpunten mogelijk maken.




Figuur 1: Afbeelding uit Van den Berg, et al. (2023) ter illustratie van de analyse waarbij door middel van het sinusoïdaal model (blauwe lijn) en de standaardwijking daarop (groene band) artefacten (ter hoogte van de rode lijn) verwijderd worden.

Kortom, er is in onderling overleg met de opdrachtgever voorgesteld **om verschillende criteria uit beide voorgaande studies te combineren**. Hierbij lag de focus op een maximale bruikbaarheid van alle beschikbare grondwatergegevens (zie Sectie 2.2.3), onder meer door criteria m.b.t. diepte, frequentie en hoeveelheid gegevens niet meer te weerhouden, **waardoor de focus komt te liggen op enkele basiskwaliteitsvereisten**. Bij het gebruik van modellen later in de analyse kunnen filters met een niet-kwalitatieve modelfit immers ook verwijderd worden.

### 2.2.5 Verwerking datasets

Deze sectie beschrijft welke verdere vormen van dataverwerking plaatsgevonden hebben. Waar de dataselectie (Sectie 2.2.4) het mogelijk maakt om irrelevante of minder kwalitatieve peilputten, filters en metingen te verwijderen, kan een bijkomende dataverwerking zorgen dat meer weerhouden meetpunten effectief bruikbaar zijn. Doorgaans is het daarbij de bedoeling om op basis van discontinue tijdreeksen continue tijdreeksen te maken, die bruikbaardere input vormen voor de verdere analyse en toepassing van *machine learning*. Een overzicht van de methodes gebruikt in de eerdere studies is gegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Overzicht van de dataverwerkingsmethodes zoals gebruikt in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Op filters met veel gegevens, maar te ontoereikend om GxGs volgens de klassieke definitie te berekenen, is een PIRFICT-modellering uitgevoerd. Deze laat toe om, in combinatie met neerslag- en verdampingsgegevens, een volledigere tijdreeks op te maken.<br>o Hierbij werd enkel vertrokken van filters met minstens 50 grondwaterstandmetingen. | • Kalibratie en simulatie van SWAP-modellen om continue tijdreeksen te bekomen.<br>o Hierbij worden verschillende evaluatiecriteria toegepast.<br>o **Eindresultaat:** 217 filters met een voldoende performant model. |

| | |
|---|---|
| <ul><li>De finale parameters moeten hierbij geloofwaardig (= fysisch realistisch) zijn.</li><li>De optimalisatie moet slagen.</li><li>Hierbij zijn verschillende correlatieniveaus tussen de simulaties en metingen uitgetest om de modellen te beoordelen. Dit leverde verschillende startpunten op als trainingsset (zie Sectie 2.2.7).</li><li>**Eindresultaat:** 2072 filters met tijdreeksen die voldoen aan criteria.</li></ul>• Filters met incidentele metingen worden op basis van een regressie met filters met voldoende metingen (beschikbaar, of na PIRFICT-analyse) verwerkt tot gegevens over GxG. | |

Zoals Tabel 4 illustreert, gebruikten beide eerdere studies, vanwege de verschillende opzet, sterk verschillende modelleringstechnieken om op basis van discontinue tijdreeksen alsnog continue tijdreeksen te bekomen. Beide modelleringstechnieken (PIRFICT en SWAP) zijn sterk aanvaard binnen grondwatermodellering, maar hebben een andere focus. PIRFICT is een tijdreeksgebaseerde techniek, die toelaat om efficiënt inputs te vertalen naar tijdreeksen (zie o.a. Von Asmuth, et al. (2021)). SWAP is een fysisch-gebaseerd model (Kroes, et al., 2017), dat voor verschillende toepassingen gebruikt kan worden. Doordat deze modelleringstechniek fysisch-gebaseerd is, ze computationeel wel veeleisender dan de statistische en conceptueel opgebouwde PIRFICT-methodiek. Indien met een uitgebreide initiële dataset gestart wordt, zoals voorgesteld in Sectie 2.2.3, lijkt het omwille van de computationele efficiëntie relevant om m.b.v. tijdreeksmodellering verder te werken. Daarbij kan ook een efficiëntiewinst geboekt worden: ondertussen is de PIRFICT-methode beschikbaar d.m.v. de Python-package Pastas (Collenteur, et al., 2019), die in de methodiek in 'Effecten van klimaatverandering' gebruikt wordt voor dataselectie. Het uitgebreider gebruiken van Pastas laat een efficiëntere implementatie toe (meer high-level code) en kan er voor zorgen dataselectie en dataverwerking zo optimaal mogelijk samen gebruikt kunnen worden.

Naast het omzetten van discontinue naar continue tijdreeksen, als verwerkingsstap aanwezig in beide studies, is in 'Actualisatie van de drainageklasse' ook de verwerking van incidentele metingen onderzocht. Het bleek relevant te zijn om deze ook zodanig te verwerken dat ze bruikbaar kunnen zijn voor de kartering, op basis waarvan voorgesteld was om deze methodiek ook opnieuw toe te passen.

Met het oog op de verwerking van gegevens van een groter aantal filters was voorgesteld om, in lijn met 'Actualisatie van de drainageklasse', **de PIRFICT-methode en incidentele metingen te gebruiken**. Hierbij is er voor gekozen om de dataverwerking uit te voeren met behulp van Pastas. De Pastas-package voorziet immers meerdere types functies om grondwateraanvulling weer te geven, wat relevant kan zijn voor diepere grondwaterstanden. Daarnaast laat het gebruik van de incidentele metingen toe om zoveel mogelijk geselecteerde data effectief toe te passen voor de kartering.

### 2.2.6 Toegepaste definitie GxG

Deze sectie bespreekt welke definitie van de GxG's toegepast wordt. Dit is enerzijds belangrijk omdat er afwijkingen mogelijk zijn op de klassieke definitie zoals gegeven door Van Heesen (1970). In de klassieke definitie wordt het gemiddelde van de drie hoogste/laagste peilen per hydrologisch jaar over minstens acht hydrologische jaren aan gegevens gebruikt. Het is echter mogelijk om striktere, of minder strikte datavereisten te stellen, maar dit heeft een impact op de berekening. Anderzijds kan het aantal jaar waarop deze definitie toegepast wordt en welke jaren dan gekozen worden (bv. een reeks van drogere of nattere jaren) ook een invloed hebben op het finale resultaat. Een overzicht van de gebruikte definities is gegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Overzicht van de gebruikte GxG-definities in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Berekening enkel toegepast op gegevens vanaf 2010.<br>• Toepassing klassieke GxG-definitie op punten waarbij deze berekend kan worden in combinatie met berekening op punten waar deze na PIRFICT-modellering berekend kan worden. Hierbij moet minstens 8 jaar aan data beschikbaar zijn. | • SWAP-modellering op basis van gedetrende tijdreeksen voor 100 jaar (op basis van klimaat van de afgelopen 30 jaar).<br>• Toepassing klassieke GxG-definitie op deze tijdreeks (waarbij door gebruik van SWAP >8 jaar aan gegevens beschikbaar zijn). |

Beide eerdere studies gebruiken de klassieke GxG-definitie (zie Tabel 5), zoals beschreven in Van Heesen (1970). Het leek daarom logisch om die definitie ook toe te passen in het kader van deze studie. Een belangrijk punt van verschil tussen de studies is echter de dataset waar deze definitie op toegepast wordt. In 'Actualisatie van de drainageklasse' gebeurt de analyse op grondwatergegevens na 2010, waardoor de reële meteorologische condities van de voorbije jaren gebruikt worden. In 'Effecten van klimaatverandering' vindt de analyse op basis van een gedetrende tijdreeks plaats, waarbij vooral naar langetermijnstatistieken gekeken wordt. De laatste analyse is te verkiezen in functie van een vergelijking van verschillende klimaatscenario's (het doel van 'Effecten van klimaatverandering'), maar biedt mogelijk een onderschatting van recente veranderingen. Naar een helder beeld van de huidige situatie is veel vraag. Een kaart op basis van gedetrende gegevens is daarbij mogelijk moeilijker te interpreteren voor gebruikers. We stellen dus voor om, gegeven de voorliggende vragen, de methodiek op te bouwen met enkel recente gegevens. Dit sluit aan bij het voorstel zoals geformuleerd in Sectie 2.2.3 om met een datadump van DOV te werken: dit impliceert immers dat de exacte dataset zoals gebruikt in 'Actualisatie van de drainageklasse' hergebruikt kan worden.

Finaal is er voorgesteld om, zoals toegepast in beide voorgaande studies, **de klassieke GxG-definitie** toe te passen, maar deze wel te berekenen op gegevens voor de afgelopen 15 jaar (i.e. 2010 t.e.m. 2024). Dit laat toe om een voldoende representatief beeld te bekomen van de recente GxG-waardes. In lijn met de eerdere discussie over het gebruik van nieuwe gegevens van reeds gebruikte filters (zie Sectie 2.2.3) betekent dit dat voor de filters gebruikt in 'Actualisatie van de drainageklasse', bijkomende gegevens van DOV gedownload wordenom het tijdsbestek volledig te kunnen beschouwen.

### 2.2.7 Opsplitsing trainings- & testdata en bepaling *ground truth*

In deze sectie bespreken we hoe de gegevens opgedeeld worden in een trainings- en testdataset, waarbij die laatste minstens neerkomt op de *ground truth*. Deze opdeling kan een grote impact

hebben op het finale resultaat en moet daarom met kennis van zaken uitgevoerd worden, al kan dit ook door de *machine learning*-methodiek zelf gebeuren.

Tabel 6: Overzicht van de werkwijzes om de trainings- en testdata op te splitsen in de voorgaande studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Strikte opdeling tussen trainings- en testdataset:<br>o Test: GWI -17 punten + 60 bijkomende punten die niet in GWI zitten, maar wel een hoge kwaliteit hebben. **Dit komt in totaal neer op 197 peilputten verspreid over Vlaanderen.**<br>o Training: alle overige data, waarbij het criterium om PIRFICT-simulaties mee te nemen een correlatie van 0,5 met de metingen was, waarbij incidentele metingen zoveel mogelijk meegenomen zijn en waarbij punten die kwalitatief genoeg zijn voor een strikte definitie van GxG ook meegenomen zijn. **Dit komt in totaal neer op 2725 punten.** | • Geen strikte opdeling tussen trainings- en testdataset: elk van de 217 punten die na kalibratie met SWAP overbleven zijn toegepast in een *k-fold crossvalidation*-setup, waarbij 20 *folds* toegepast zijn. |

Zoals eerder besproken, is een zo groot mogelijke dataset beschouwen positief is voor het eindresultaat (zie Sectie 2.2.3). Het was daarbij echter de vraag of de strikte opsplitsing, waarbij GWI als *ground truth* beschouwd wordt (cf. 'Actualisatie van de drainageklasse') weerhouden moest worden. *K-fold crossvalidation* (cf. 'Effecten van klimaatverandering') wordt over het algemeen als robuuster beschouwd dan een strikte opsplitsing in trainings- en testdata, gezien er bij deze methodiek *overfitting* op de testdata kan plaatsvinden. Daarom was voorgesteld om *k-fold crossvalidation* toe te passen. Het relevante aantal *folds* zal bepaald moeten worden op basis van het overblijvende aantal filters na dataselectie (cf. Sectie 2.2.4) en dataverwerking (cf. Sectie 2.2.5).

Kortom, er was voorgesteld om in plaats van een klassieke training-test-opdeling, ***k-fold crossvalidation* toe te passen**. Deze methodiek laat toe om *overfitting* zoveel mogelijk te vermijden.

### 2.2.8 Analyse van de resultaten

Op basis van een analyse van de resultaten kunnen ook enkele uitspraken gedaan worden over de gebruikte datasets. Hierbij moet wel opgelet worden, aangezien de resultaten niet enkel door de (verwerking van) de inputdata beïnvloed worden. Niettemin heeft de initiële dataset, en hoe deze verwerkt wordt, een grote impact op het eindresultaat van de kartering.

Uit een vergelijking van de resultaten met effectief waargenomen grondwaterstanden blijkt dat in 'Effecten van klimaatverandering' doorgaans diepere peilen voorspeld worden dan in 'Actualisatie van de drainageklasse'. De keuze om diepere peilen ook mee te nemen in de analyse heeft dit wellicht sterk beïnvloed. Uit een preliminaire analyse van VMM voor enkele peilputten van VMM en INBO blijkt dat dit zeker op die laatste set aan peilputten een relevante impact heeft. De peilputten van INBO bemeten het oppervlakkig grondwater, met een focus op ecohydrologie. Gezien het

belang van ecohydrologie in de vraagstelling voor deze studie, zijn die resultaten wel als relevant te beschouwen. De resultaten in 'Actualisatie van de drainageklasse' zijn echter ook niet altijd correct: zeker voor diepere freatische grondwaterpeilen lijkt de kaart uit 'Effecten van klimaatverandering' correcter. Dit lijkt te volgen uit het feit dat in 'Actualisatie van de drainageklasse' geen peilputten met metingen dieper dan 3 m-mv beschouwd zijn.

De resultaten uitgebreid vergelijken is moeilijk omwille van de vele onderlinge verschillen tussen beide studies, maar uit preliminaire analyses **blijkt dus alvast het belang om voldoende ondiepe filters mee te nemen en voor voldoende variatie in de filters te zorgen**. De hierboven voorgestelde keuzes, nl. om met een ruime initiële dataset te beginnen (Sectie 2.2.3) en hier zoveel mogelijk gegevens van te gebruiken (Secties 2.2.4 en 2.2.5) sluiten hierbij aan.

### 2.2.9 Conclusie

Het is belangrijk om een zo goed en divers mogelijk beeld te hebben van de grondwaterniveaus in Vlaanderen. Er is dan ook voorgesteld om van een zo breed mogelijke initiële dataset, cf. 'Actualisatie van de drainageklasse', te vertrekken. Deze dataset moet optimaal gebruikt worden voor de kartering. Hiervoor zijn de volgende stappen te verkiezen:

- Een slimme combinatie van selectiecriteria uit beide studies;
- Toepassing van efficiënte, tijdreeksgebaseerde methodes (PIRFICT) (cf. 'Actualisatie van de drainageklasse');
- *K-fold crossvalidation* om de data in de trainingsfase optimaal te benutten en *overfitting* te vermijden (cf. 'Effecten van klimaatverandering').

Praktisch betekent dit dat optimaal vertrokken wordt van dezelfde datadump als van toepassing in 'Actualisatie van de drainageklasse'. Bijkomende peilgegevens van filters in deze datadump kunnen gebruikt worden indien deze gegevens eenvoudig van DOV gehaald kunnen worden. Op deze gegevens zal de dataselectie en -verwerking opnieuw toegepast moeten worden. Dit omdat voorgesteld is de selectiecriteria enigszins aan te passen en de PIRFICT-modellering op recentere gegevens toe te passen.

Enige testing is echter nog noodzakelijk. Het gaat hierbij om het gebruik van grondwaterpeilen in m-mv vs. mTAW is. Op basis van de rapporten en beperkte literatuurstudie valt hier niet eenvoudig weg een keuze in te maken. Daarom zullen voor beide mogelijkheden initieel modellen opgemaakt worden, zodat deze vergeleken kunnen worden.

## 2.3 KAARTLAGEN

### 2.3.1 Inleiding

Een tweede cruciale aspect voor een karteringsoefening met behulp van *machine learning* zijn de **gebruikte kaartlagen**. Deze zijn immers de verklarende variabelen en het al dan niet opnemen van een bepaalde kaart in de modellering kan een zekere impact hebben op het eindresultaat. Bij de opmaak van het model zullen de eigenschappen van de geselecteerde kaartlagen per locatie waar GxG-waardes beschikbaar zijn, immers gekoppeld worden aan de waardes op die locatie. De regressie die zo ontstaat, wordt gebruikt om op locaties waar wel kaartlagen ter beschikking zijn, maar geen grondwatermetingen, een inschatting te maken van de GxG-waardes. Hierbij wordt uitgegaan van rasterkaarten: deze zijn immers het gemakkelijkst te vertalen naar modelinput voor een *machine learning*-model.

Bij de evaluatie in deze Sectie zullen de kaarten gebruikt in één of beide studies overlopen worden. Als kader om te begrijpen waarom deze kaarten relevant zijn voor een *digital soil mapping*-oefening als deze, is het ‘scorpan’-model zeer bruikbaar (McBratney, et al., 2003). Dit model geeft aan dat een bodemeigenschap voorspeld kan worden op basis van 7 factoren:

- S (*soil*): gekende bodemeigenschappen (Sectie 2.3.2);
- C (*climate*): klimaateigenschappen en hun invloed op het landschap (Sectie 2.3.3);
- O (*organisms*): vegetatie, fauna en menselijke invloed op het landschap (Sectie 2.3.4);
- R: topografie en klassieke eigenschappen van het landschap (Sectie 2.3.5);
- P (*parent material*): onderliggende geologie (Sectie 2.3.6);
- A (*age*): tijd, een bepalend element voor bodemvorming (Sectie 2.3.6);
- N: ruimtelijke positie (Sectie 2.3.7).

Op de tijd na zijn de meeste van deze eigenschappen in kaart te brengen en zijn deze ook in kaart gebracht voor Vlaanderen. Dat impliceert dat dit kader een zeker houvast kan bieden in de evaluatie van de gebruikte kaartlagen. Gegeven dat er niet zozeer een klassieke bodemeigenschap gekarteerd wordt, maar het grondwaterniveau, zijn daarnaast ook nog bijkomende kaartlagen, die een belangrijke fysieke verklaring kunnen bieden voor grondwater, mee opgenomen en zullen deze ook geëvalueerd worden.

De kaartlagen zullen geëvalueerd worden op basis van hun selectie en verwerking van basisgegevens, de extent van de kaartlagen (waar zijn ze van toepassing) en hun resolutie. Naast deze gegevens, die voor elke kaartlaag op zich bepaald kunnen worden, werd in beide studies ook een analyse van de Shapley-waardes (Lundberg & Lee, 2017) gemaakt. Deze waardes laten toe om te duiden welke verklarende variabelen het belangrijkst zijn voor de finale predictie door middel van *machine learning* en zijn bijzonder toepasbaar in de context van *gradient tree boosting*-methodes (Lundberg, et al., 2020), die in beide voorgaande studies toegepast zijn (zie Sectie 2.4 voor een discussie van de toegepaste methodes). Deze analyses van de Shapley-waardes bieden dus een grote meerwaarde in het begrijpen van de relevantie van een kaartlaag. Na kalibratie van het model en kartering zal de Shapley-analyse voor het nieuwe model ook uitgevoerd worden, wat ons helpt om de relevantie van de verder voorgestelde kaartlagen in een nieuwe setup te begrijpen.

Het is echter niet de bedoeling om veel kaartlagen a priori al uit te sluiten. Dit kan ook als onderdeel van de modelopbouw en kalibratie plaatsvinden (*forward selection* of voorwaartse selectie, zie Sectie 2.4.4). Vooral basiseigenschappen zoals de resolutie zijn doorslaggevend om a priori een kaart al uit te sluiten, gezien sterk verschillen hierin voor een moeilijkere verwerking of een grote impact

op het eindresultaat kunnen zorgen. Een expliciete vraag van de opdrachtgever was bijvoorbeeld ook om de extent te onderzoeken, en mee te geven in welke mate grondwatergegevens van buiten Vlaanderen gebruikt kunnen worden. Daarnaast moet er met betrekking tot het gebruik van deze kaarten ook besproken worden op welke resolutie deze finaal gebruikt zullen worden en of er mogelijk bijkomende kaartlagen relevant zijn.

### 2.3.2 Bodemgegevens

#### 2.3.2.1 Inleiding

Bodemgegevens, zoals de drainageklasse en bodemvocht zijn belangrijke verklarende variabelen in elk *digital soil mapping*-project (cf. de 's' in 'scorpan)'. Bodemvocht in het bijzonder kan als relevant beschouwd worden voor grondwaterkartering, gezien er een relatie opgesteld kan worden tussen het aanwezige bodemvocht en het grondwaterpeil (zie Van den Berg, et al. (2023) voor een uitgebreide bespreking van deze relatie). Aan de andere kant is bodemvocht moeilijker in detail te onderzoeken dan de klassieke bodemeigenschappen. Naast deze klassieke bodemeigenschappen is recent in Vlaanderen ook de veenwaarschijnlijkheid in kaart gebracht, wat potentieel relevant kan zijn voor deze karteringsopdracht.

#### 2.3.2.2 Bodemkaart

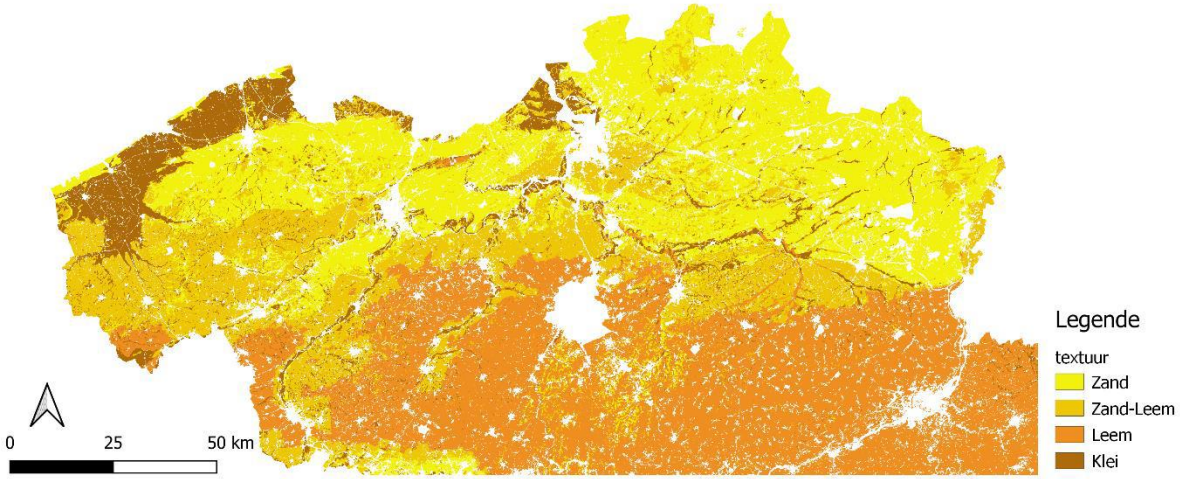
Een overzicht van het gebruik van de bodemkaart is gegeven in Tabel 7. De bodemkaart is beschikbaar in vectorieel format, en in principe voor heel België beschikbaar.

Tabel 7: Gebruik van gegevens van de Belgische Bodemkaart in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Gebruikt: drainageklasse en textuur (zonder aggregatie, verwerking als dummyvariabelen).<br>• Verwerking naar 10x10 m raster op basis van Geocube-Python package.<br>• Shapley-analyse geeft belang van drainageklasses aan. | • Gebruikt: drainageklasse en textuur.<br>• Aggregatie naar 4 textuurklassen en 3 drainageklassen.<br>• Bepaling van hydraulische conductiviteit in combinatie met GeoPearl databank.<br>• Aggregatie naar rasterniveau door percentage van elke klasse binnen een buffer van 500 m rond de finale pixel te beschouwen.<br>• Shapley-analyse geeft, afhankelijk van finale resultaat, belang van bepaalde drainageklasses en/of textuurklasses aan. Hydraulische conductiviteit kwam hier minder naar voor. |

De bodemkaart, of alleszins de onderliggende gegevens zijn hoe dan ook relevant voor deze kartering. **Hierbij zijn de textuurklasse en drainageklasse het belangrijkste en zeker mee te nemen in de analyse**. Hierbij stellen we voor om de werkwijze uit 'Effecten van klimaatverandering', met een aggregatie naar een beperkt aantal klassen (zie Figuur 2) en aggregatie op rasterniveau door middel van buffering, te volgen. Hier zijn we immers het best mee vertrouwd. Hierbij moet opgemerkt worden dat in 'Effecten van klimaatverandering' wel, en in 'Actualisatie van de drainageklasse' niet, gebruik gemaakt is van de GeoPearl-databank om hydraulische conductiviteit te bepalen. Hydraulische conductiviteit kwam bij de Shapley-analyse echter minder sterk naar voor,

maar hoeft daarom nog niet a priori uitgesloten te worden. We zullen deze waardes dus ook opnemen in de analyse.




Figuur 2: Overzicht van de geaggregeerde textuurklasses, uit Franken & Wolfs (2022).

Aangezien de bodemkaart een vectoriële kaart is, valt deze sowieso met behulp van code naar verschillende resoluties te verwerken.

Er zijn vandaag de dag wel veel afgeleiden van de bodemkaart beschikbaar, die een bijkomende meerwaarde kunnen bieden, áls ze goed en complementair gebruikt worden. Een grote relevantie is er bijvoorbeeld in de stedelijke regio's, die bij de bodemkartering onvoldoende in detail gekarteerd zijn. Het belangrijkste voorbeeld hiervan zijn de kaarten geproduceerd in het Bodemdatabank-STAT-project, die in Sectie 2.3.2.3 besproken zullen worden.

#### 2.3.2.3 Bodemdatabank-STAT

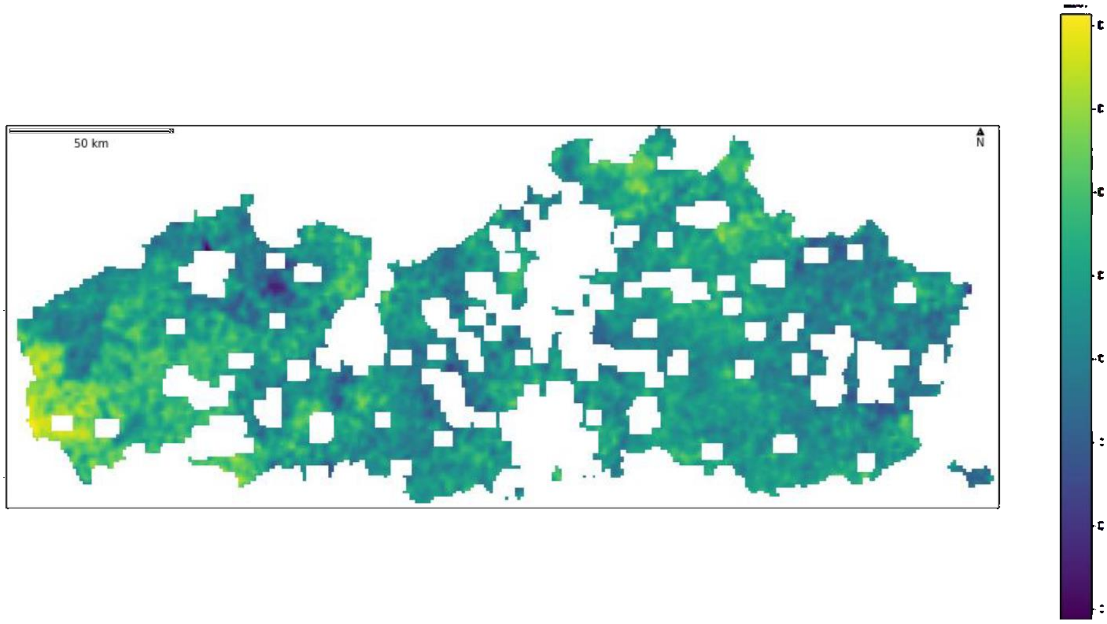
De kaarten verkregen in het Bodemdatabank-STAT-project (Wittemans, et al., 2023) zijn in geen van beide voorgaande studies gebruikt, gezien deze toen nog niet beschikbaar waren. Ze kunnen echter wel een grote meerwaarde bieden voor de grondwaterkartering, wat in de aanbevelingen in 'Actualisatie van de drainageklasse' reeds meegegeven was. In het Bodemdatabank-STAT-project werden, op basis van o.a. de bodemkaart, verschillende bodemeigenschappen gebiedsdekkend voor Vlaanderen gemodelleerd (dit betreft dus ook *digital soil mapping*). De kaartlagen die hierbij opgemaakt zijn en wellicht relevant zijn voor deze kartering, zijn:

- Fractie klei;
- Fractie leem;
- Fractie fijn zand;
- Fractie zand;
- Fractie grof zand.

Elk van deze kaarten is beschikbaar met een resolutie van 10 m en voor heel Vlaanderen. Gegeven dat deze kaarten gebiedsdekkend zijn (waar de bodemkaart in stedelijke context bv. weinig informatie biedt), **was voorgesteld om deze kaarten mee op te nemen in de analyse**. Door deze kaarten te gebruiken, vervalt ook het gebruik van eerdere kaarten zoals de bodemerodibiliteit die gelijkaardige informatie konden bieden, maar dan op basis van verouderde informatie en technieken.

#### 2.3.2.4 Soil Water Index

Een overzicht van het gebruik van de Soil Water Index is gegeven in Tabel 8. Deze kaart is beschikbaar met een resolutie van 1 km en in principe voor heel Europa, al is ze niet voor elke gridcel data beschikbaar (bv. niet voor stedelijke omgevingen, zie Figuur 3)




Figuur 3: Visualisatie van SWI-afgeleide zoals getoond in Van den Berg, et al. (2023), waarbij de vele ontbrekende cellen t.g.v. verstedelijking duidelijk uitkomen.

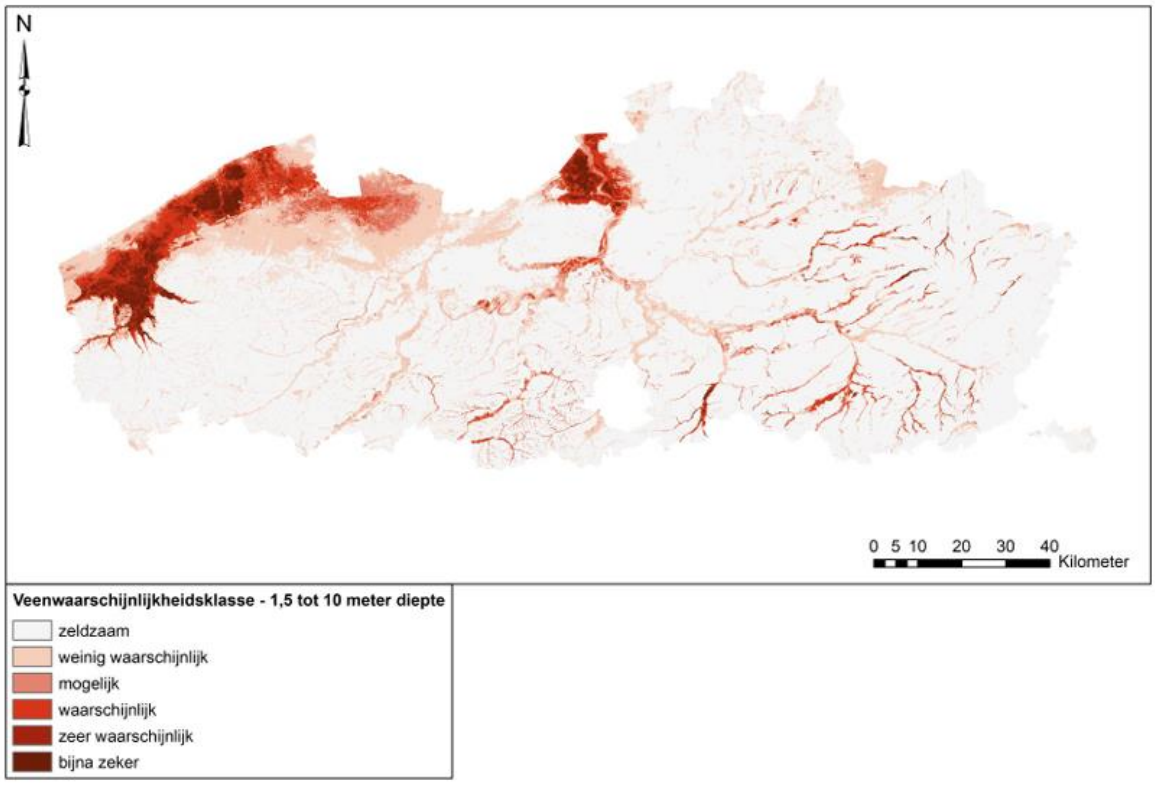
Tabel 8: Het gebruik van de Soil Water Index in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Gebruikt.<br>• Omzetting naar kwantielwaardes (0,1 en 0,9) voor verschillende diepte-intervallen.<br>• Shapley-analyse geeft een beperkte meerwaarde aan. | • Niet gebruikt. |

De SWI-gegevens hebben een ruwe resolutie, wat voor sprongen zorgt in het eindresultaat, en zijn niet gebiedsdekkend beschikbaar voor Vlaanderen (omwille van de verstedelijkingsgraad, zie Figuur 3). Bijkomend bleek de meerwaarde volgens de Shapley-analyse ook beperkt te zijn, hoewel niet onbestaande. Daarnaast worden door verschillende experts vragen gesteld bij de meerwaarde van deze kaart gezien de moeilijkheid om deze te combineren met verschillende andere kaartlagen en de bijkomende berekeningen die hiervoor nodig zijn. **Om deze redenen was voorgesteld om deze gegevensbron niet te weerhouden.**

#### 2.3.2.5 Veenwaarschijnlijkheidskaarten

De veenwaarschijnlijkheidskaarten (Swinnen, et al., 2023) maken het sinds kort mogelijk om in te schatten wat de kans op veen is voor heel Vlaanderen en dat voor verschillende types veen (in functie van diepte in de bodem). Er zijn namelijk drie veenwaarschijnlijkheidskaarten beschikbaar: voor oppervlakteveen, de bodem (tot 1,5 m) en het diepere bodemprofiel (1,5 tot 10 m, zie Figuur 4). De eerste twee kaarten zijn beschikbaar als raster met resolutie 5 m, de laatste kaarten enkel als raster met resolutie 50 m, en dit voor heel Vlaanderen.




Figuur 4: Veenwaarschijnlijkheidskaart voor de zone 1.5- 10 meter diepte, opgedeeld in zes waarschijnlijkheidsklassen.

Veen kan enkel daar voorkomen waar het grondwater voldoende dicht bij het maaiveld staat. Omgekeerd impliceert de aanwezigheid van veen dus ook een voldoende hoge grondwatertafel, tenzij het veen aan het afbreken is. Omwille van deze fysische relatie **was voorgesteld om de veenwaarschijnlijkheidskaarten mee op te nemen in de kartering**, waarbij het mogelijk is dat deze alsnog niet weerhouden zullen worden bij het gebruik van voorwaartse selectie.

### 2.3.3 Meteorologische gegevens: gemiddeld neerslagoverschot

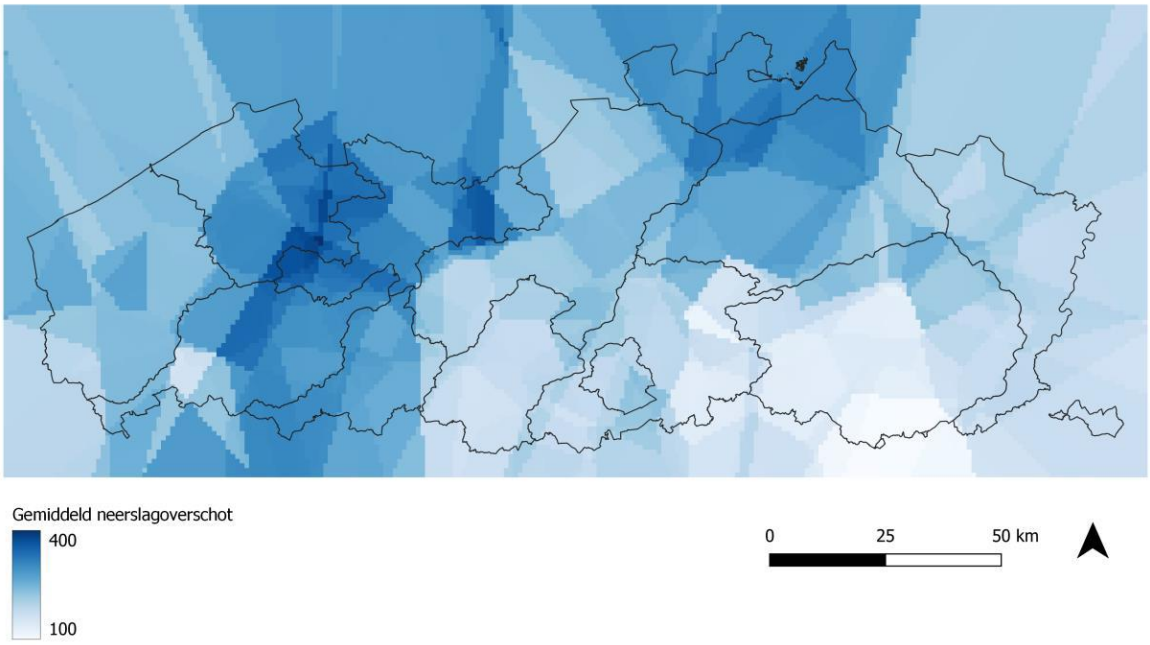
De langetermijngemiddeldes van de meteorologie geven een weerslag van het klimaat, een van de elementen in de scorpan-methode ('c'). Als deze op correcte manier berekend kunnen worden, kan het dan ook relevant zijn om deze in een kartering als deze in beschouwing te nemen. Hierbij is het mogelijk om voor Vlaanderen een kaart met resolutie naar keuze op te maken, gezien deze berekening altijd moet vertrekken van puntgegevens. Een overzicht van het gebruik in de eerdere studies staat in Tabel 9.

Tabel 9: Het gebruik van meteorologische gegevens in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Niet gebruikt. | • Gemiddeld jaarlijks neerslagoverschot tussen 2010 en 2020 opgemaakt op basis van neerslag- en verdampingsmetingen.<br>• Shapley-analyse: enig belang. |

Het gemiddeld jaarlijks neerslagoverschot kan sterk verschillen binnen Vlaanderen, zo blijkt uit 'Effecten van klimaatverandering' (zie Figuur 5). Dit heeft een invloed op de aanrijking van het freatisch grondwater, en kan dus helpen om lokale variatie te verklaren. Dit blijkt finaal ook uit

‘Effecten van klimaatverandering’, waarbij deze kaartlaag wel enige verklarende waarde had. **Daarom was voorgesteld om deze kaartlaag (as-is) te beschouwen in de nieuwe analyse** of hooguit met dezelfde gegevens opnieuw te berekenen voor de beoogde initiële resolutie. Hierbij werd wel aangestipt dat de grenzen in de kaart zoals eerder geproduceerd binnen ‘Effecten van klimaatverandering’ relatief hard zijn, wat een effect zou kunnen hebben op de output.




Figuur 5: De variatie in gemiddeld neerslagoverschot in Vlaanderen, uit Franken & Wolfs (2022).

### 2.3.4 Bodembedekking

#### 2.3.4.1 Inleiding

Bodembedekking valt onder de ‘o’ van de scorpan-methode en geeft aan in welke mate fauna, flora en in dit geval vooral de mens de bodem, bodemprocessen en in dit concrete geval grondwaterpeilen beïnvloeden. In de context van grondwaterpeilen worden hiermee nog niet alle processen voldoende omvat. Hiervoor zullen waterlopen (Sectie 2.3.7) en grondwaterwinningen (Sectie 2.3.9) ook beschouwd moeten worden.

#### 2.3.4.2 Hedendaagse bodembedekking (Bodembedekkingskaart)

De hedendaagse bodembedekking, weergegeven in de Bodembedekkingskaart (BBK) is ogenschijnlijk de meest variabele op vlak van bodembedekking. De BBK is beschikbaar voor heel Vlaanderen met een resolutie van 1 m of van 5 m, al wordt ze voor praktisch gebruik meestal verwerkt in een rasterisatie naar keuze. In Tabel 10 staat een overzicht van het gebruik van deze kaart in beide eerdere studies.

Tabel 10: Het gebruik van de Bodembedekkingskaart (BBK) in de eerdere studies.

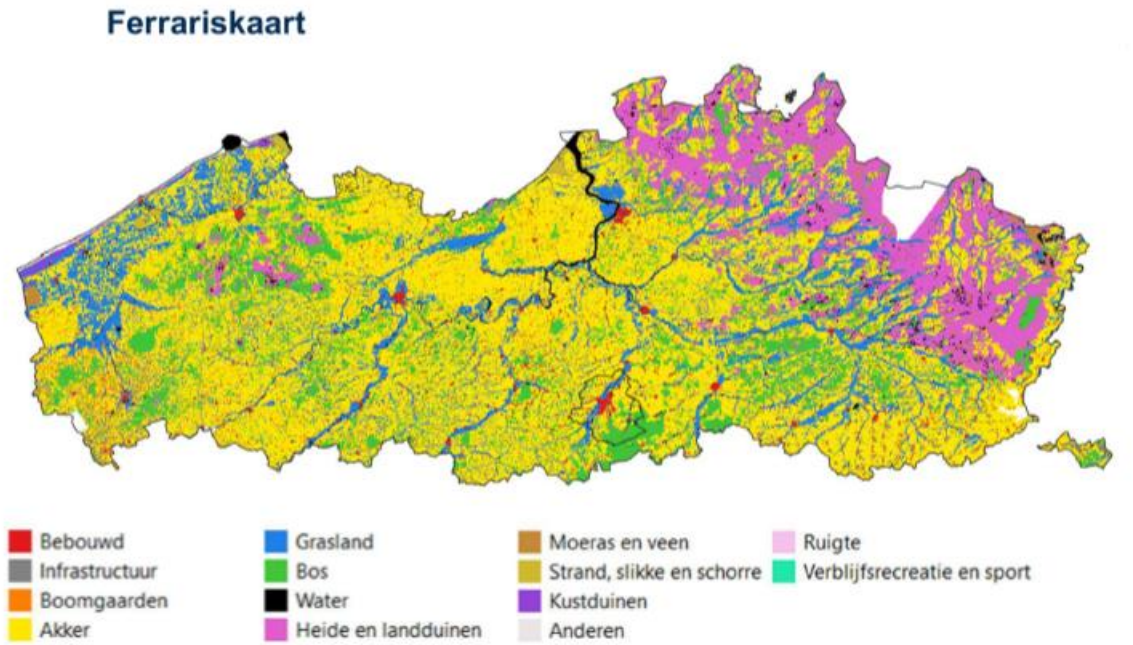
| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Bodembedekkingskaart gebruikt (in 1 m-versie, versie 2018).<br>• Bodembedekking per pixel:<br>o Er wordt finaal een raster met een resolutie van 10 m opgemaakt. Hierbij is het niet duidelijk hoe de waardes met | • Bodembedekkingskaart gebruikt (in 5 m-versie, versie 2018).<br>• Opdeling in landgebruiksklasses:<br>o 5 klasses: bebouwd, akker, gras, bomen, water.<br>o Voor elk van deze klasses wordt het percentage binnen |

| | |
|---|---|
| resolutie 1 m naar dit grid vertaald worden. Gezien met dummy-waardes gewerkt, is dit mogelijk op basis van de aanwezigheid van elke categorie die binnen het grid met resolutie 10 m aanwezig is.<br>• Shapley-analyse: zeer beperkt belang. | een buffer van 500 m rond de finale pixel bepaald.<br>• Shapley-analyse: zeer beperkt belang. |

De bodembedekkingskaart (BBK) lijkt een relevante variabele voor een karteringsmodel zoals hetgeen dat voorligt, maar uit beide analyses blijkt dat (ongeacht de verschillen in verwerking van deze kaart) dat deze maar een beperkt belang heeft. Niettegenstaande deze resultaten, lijkt het het beste om de bodembedekkingskaart niet a priori uit te sluiten. Echter, de vraag is dan wel welke procedure exact gevolgd moet worden voor de verwerking van de bodemkaart. Naar duidelijkheid en transparantie toe, **is voorgesteld om de procedure voor verwerking zoals eerder in 'Effecten van klimaatverandering' gebruikt, opnieuw te volgen**, en dit op de versie met een resolutie van 5 m uit 2021 om recente gegevens ter beschikking te hebben.

#### 2.3.4.3 Gedigitaliseerde historische kaarten

Sinds kort zijn verschillende historische kaarten digitaal beschikbaar (De Keersmaeker, et al., 2024). Hieronder vallen onder andere de Ferrariskaart (1778) (zie Figuur 6), de topografische kaart uit 1873 en de topografische kaart uit 1969. Verschillende landgebruikstypes zijn voor elk van deze kaarten digitaal gekarteerd, wat het mogelijk maakt om landgebruiksverandering doorheen de tijd of landgebruikstypes op het moment van kartering te onderzoeken. Deze gedigitaliseerde kaarten zijn allen beschikbaar voor Vlaanderen en zijn vectorieel (ze moeten dus verwerkt worden naar een raster naar keuze).




Figuur 6: Voorbeeld van de classificatie van landgebruik in Vlaanderen volgens de Ferrariskaart, uit (De Keersmaeker, et al., 2024).

Hoe ouder de kaart, hoe meer ‘functie vorm volgt’: wegens beperktere middelen waren in historische tijden (waarvan we de Ferrariskaart als redelijke afspiegeling kunnen beschouwen) de natste gebieden (i.e. hoogste grondwaterstand) grasland en de drogere gebieden bebouwing of akker. In de kaart van 1873 was dit ook nog in grote mate het geval. Bij de kaart uit 1969 was dit al minder, maar gegeven de beperktere bebouwing voor een deel van de locaties kan dit zeker ook nog opgaan. Deze kaarten kunnen dus een beeld geven van de locaties waar het te verwachten is dat er vroeger hoge(re) grondwaterstanden waren. Dit zijn niet per se de locaties waar we heden nog hogere grondwaterstanden verwachten, maar dit kan wel het geval zijn. Zeker waar vandaag de dag bebouwing is en dus verschillende andere kaartlagen niet altijd toereikend zijn, kan de inclusie van deze kaarten een meerwaarde bieden. **Er was dan ook voorgesteld om deze kaarten verkennend mee te nemen**.

Hierbij moest nog kort onderzocht worden op welke manier deze kaartlagen het best gebruikt kunnen worden en of dit binnen het kader van dit project relevant is. Wellicht zou een aanpak zoals voor de BBK (zie Sectie 2.3.4.2) het meest relevant en zou dit voor het beste vergelijkingsmateriaal zorgen. Hierbij werden in een straal van 500 rond een pixel de aanwezige landgebruiksklasses procentueel berekend. Of en hoe deze kaart finaal gebruikt is, wordt besproken in Sectie 3.6.

#### 2.3.4.4 Biologische waarderingskaart (BWK)

De Biologische waarderingskaart (BWK), geeft per perceel of groep van percelen met zeer gelijkaardige habitats (ecotopen) aan welke habitats er voorkomen en hoe biologisch waardevol deze zijn. Deze kaart is voor heel Vlaanderen vectorieel beschikbaar, al zijn er grote delen (alles wat bebouwd is) geen relevante waardes.

De biologische waarderingskaart kan in het kader van de grondwaterkartering relevant zijn omwille van twee redenen. Enerzijds laat deze toe om het element ‘o’ (organismen, bodembedekking) van de scorpanmethode te verfijnen met het oog op flora. Anderzijds zijn in Vlaanderen verschillende habitattypes gelinkt met de aanwezigheid van grondwater (of de aanwezigheid van grondwater doorheen een deel van het jaar). Waar deze vegetaties aanwezig zijn, is dus een bepaald grondwaterpeil te verwachten, of was dit grondwaterpeil tot voor kort aanwezig. Omwille van die fysisch-biologische relatie kan het relevant zijn om deze kaartlaag ook mee te nemen in deze karteringsoefening. Zeker gezien de vraag naar goede informatie m.b.t. ecohydrologie, lijkt een kaartlaag die vanuit ecohydrologie bijkomende informatie biedt zeker waardevol.

Gegeven dat deze kaart niet overal in Vlaanderen relevante waardes geeft en zeer uitgebreide informatie bevat is, **is het voorstel weerhouden om kort uit te testen op welke manier deze kaart het meest efficiënt verwerkt kan worden**. Indien blijkt dat het een te grote opgave is om deze te verwerken en uitgebreide ‘feature engineering’ nodig is, is het mogelijk dat deze niet weerhouden zal worden, al blijft deze kaart in dat geval mogelijk wel aan te bevelen voor volgende opdrachten in dit kader. Het resultaat hiervan staat beschreven in Sectie 3.6.

### 2.3.5 Digitaal hoogtemodel

#### 2.3.5.1 Inleiding

Op basis van het digitaal hoogtemodel kunnen verschillende topografische eigenschappen van het landschap beschreven worden (de ‘r’ uit de scorpan-methode). Het lijkt dan ook relevant om de verschillende mogelijke afgeleiden optimaal te gebruiken. Hierbij zijn er verschillende mogelijkheden, die in wat volgt beschreven staan.

#### 2.3.5.2 Hoogteligging op basis van digitaal hoogtemodel Vlaanderen II DTM

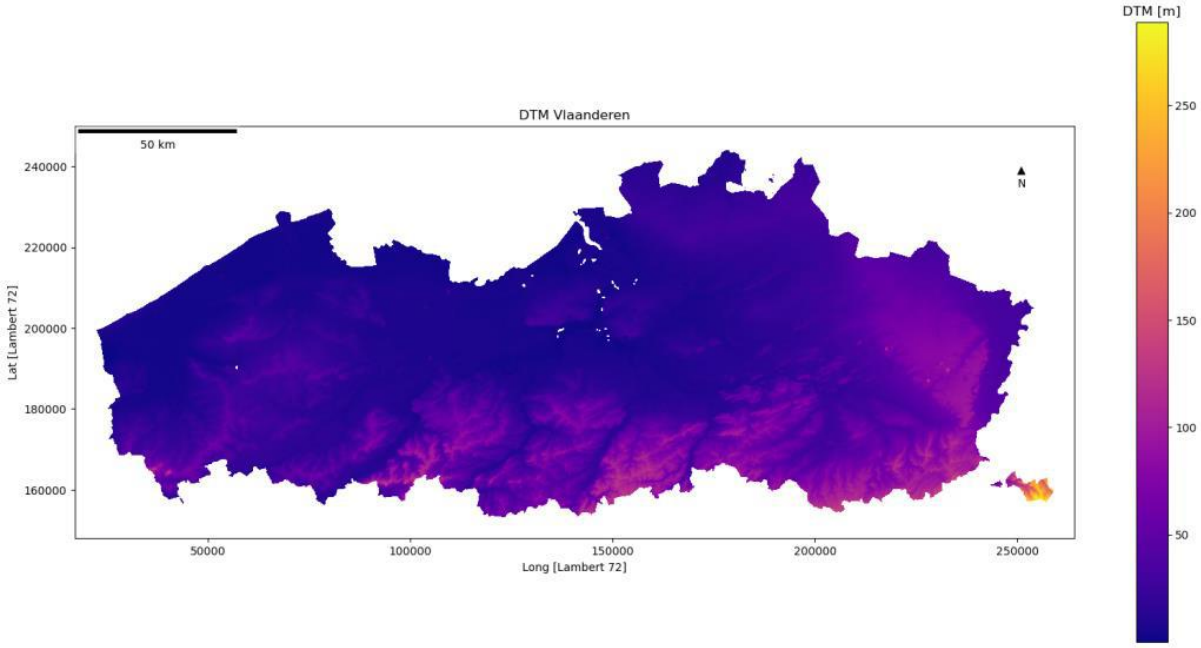
De hoogteligging is voor heel Vlaanderen beschikbaar in een resolutie van 1 m en van 5 m. Een overzicht van het gebruik in de eerdere studies is gegeven in Tabel 11.

Tabel 11: Het gebruik van DHMVII DTM in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • 1 m-raster gebruikt, zie Figuur 7.<br>• Maaiveldhoogte in mTAW.<br>• Shapley-analyse: belangrijke verklarende variabele. | • 5 m-raster gebruikt.<br>• Maaiveldhoogte in mTAW.<br>• Shapley-analyse: beperkt belang. |

De waarde die het eenvoudigst uit het digitaal hoogtemodel af te leiden valt, is de hoogteligging per rastercel. Wat hierbij opvalt, is dat de hoogteligging in 'Actualisatie van de drainageklasse' veel verklarender is dan in 'Effecten van klimaatverandering'. Dat zou veroorzaakt kunnen worden door de meer uitgebreide verwerking en uitgebreider gebruik van afgeleiden in 'Effecten van klimaatverandering'. Deze afgeleiden (bv. TPI, zie Sectie 2.3.5.4) blijken namelijk wel sterk verklarend te zijn. Gezien het model en de vraagstelling ook enigszins anders opgebouwd zijn in deze studie dan in de voorgaande studies, **was voorgesteld om zowel de hoogteligging zelf als andere afgeleiden van het digitaal hoogtemodel voorlopig te weerhouden**.

Naast het standaard DTM is er ook een hydrologisch DTM (het 'average resampled' DTM) aangemaakt, waarbij waterlopen en waterafvoer beter weergegeven zijn. In 'Effecten van klimaatverandering' is dit niet gebruikt, in 'Actualisatie van de drainageklasse' lijkt dit niet gebruikt te zijn. Deze versie van het DTM kan echter wel een meerwaarde bieden. **In plaats van met het klassieke DTM, is daarom beslist om in deze studie enkel het hydrologisch DTM te gebruiken.**




Figuur 7: DTM van Vlaanderen in mTAW, uit Van den Berg, et al. (2023).

#### 2.3.5.3 Hellingsgraad op basis van het digitaal hoogtemodel

Gezien de hellingsgraad afgeleid is van het digitaal hoogtemodel, is deze eveneens beschikbaar met een resolutie van 1 m of 5 m en voor heel Vlaanderen. Een overzicht van het eerdere gebruik is gegeven in Tabel 12.

Tabel 12: Het gebruik van de hellingsgraad in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Niet gebruikt. | • Berekend op basis van Digitaal Hoogtemodel (DHMVII) DTM, op basis van gangbare algoritmes.<br>• Shapley-analyse: beperkt belang. |

De hellingsgraad is maar in één van beide studies gebruikt en kwam daar niet als meest relevante verklarende variabele uit naar voor. Hoewel ook nog andere afgeleiden van het digitaal hoogtemodel beschouwd zullen worden, **was voorgesteld om deze kaartlaag alsnog te weerhouden**, gezien het gemakkelijke gebruik (relevante resolutie) en de mogelijkheid om deze al dan niet door de *machine learning*-methode zelf te laten weerhouden.

#### 2.3.5.4 Relatieve hoogteligging op basis van het digitaal hoogtemodel

Gezien de relatieve hoogteligging afgeleid is van het digitaal hoogtemodel, is deze eveneens beschikbaar met een resolutie van 1 m of 5 m en voor heel Vlaanderen. Een overzicht van het eerdere gebruik is gegeven in Tabel 13.

Tabel 13: Het gebruik van relatieve hoogteligging in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Relatieve hoogteligging per pixel, berekend vaste straal rond die pixel (40 m) op basis van DHMII.<br>• Shapley-analyse: belangrijke verklarende variabele. | • TPI op basis van DHMVII DTM, met verschillende venstergroottes (100 m, 500 m, 1000 m, 2500 m, 5000 m, 7500 m, 10000 m).<br>• Shapley-analyse: verschillende venstergroottes zijn sterk verklarend. |

De relatieve hoogteligging is zeker mee te nemen in dit vervolgonderzoek. Beide voorgaande studies gebruiken deze, en bij beide voorgaande studies komt deze afgeleide uit de Shapley-analyse als een belangrijke verklarende variabele. In 'Effecten van klimaatverandering' is dat zelfs voor verschillende venstergroottes. Op basis daarvan is voorgesteld om opnieuw niet met één venstergrootte, maar met verschillende venstergroottes aan de slag te gaan en zo de TPI te berekenen. Hierbij lijkt het relevant om ook een venstergrootte van 50 m toe te voegen, gezien deze in 'Actualisatie van de drainageklasse' ook relevant bleek te zijn. **Kortom, het finaal weerhouden voorstel was om TPI op te nemen in de analyse en wel met deze venstergroottes:**

- 50 m;
- 100 m;
- 500 m;
- 1000 m;
- 2500 m;
- 5000 m;
- 7500 m;
- 10000 m.

### 2.3.6 Geologie

#### 2.3.6.1 Inleiding

Geologie is volgens de scorpan-methode een belangrijke verklarende variabele voor bodemeigenschappen, zowel ter indicatie van het moedermateriaal als, afhankelijk van de kaartlaag, ter indicatie van de leeftijd van de bodem. Specifiek met het oog op kartering van het grondwaterpeil biedt geologie een bijkomende meerwaarde: de onderliggende geologie bepaalt immers, in functie van de waterdoorlatendheid, in welke mate water kan wegzakken en zich doorheen de bodem kan verplaatsen. Het is dus van belang om voldoende geologische gegevens in beschouwing te nemen, en er zijn dan ook verschillende kaartlagen beschikbaar in Vlaanderen.

#### 2.3.6.2 Dikte freatische aquifer

De dikte van de freatische aquifer is met een resolutie van 100 m beschikbaar voor heel Vlaanderen en afhankelijk van de versie voor enkele locaties daarbuiten (een deel van Frankrijk, Nederland, Wallonië). Het overzicht van het gebruik in de eerdere studies is gegeven in Tabel 14.

Tabel 14: Het gebruik van de dikte van de freatische aquifer in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Eigen analyse op basis van HCOV-v2, als diepte tot de top van de bovenste aquitard.<br>• Extent: Vlaanderen.<br>• Shapley-analyse geeft enig belang aan, maar dit is beperkt. | • Door VMM aangeleverde kaartlagen met de dikte van de freatische aquifer, in 5 versies.<br>• Extent buiten Vlaanderen.<br>• Shapley-analyse geeft voor verschillende versies een groot belang aan. |

Gezien het gebruik in beide studies, lijkt de dikte van de freatische aquifer een relevante hydrogeologische laag om mee in de analyse op te nemen. De versie (met 5 verschillende kaartlagen) zoals gebruikt in 'Effecten van klimaatverandering' geeft iets meer informatie, heeft een grotere extent en was reeds aangeleverd door VMM. Ook uit de Shapley-analyse blijkt het belang van deze kaartlagen, en dat meer in 'Effecten van klimaatverandering' dan in 'Actualisatie van de drainageklasse'. Wellicht zal dit het geval zijn omdat in 'Effecten van klimaatverandering' diepere freatische grondwaterlagen in de analyse opgenomen zijn. Dit was in 'Actualisatie van de drainageklasse' niet het geval, waardoor zo een informatiebron relatief minder belangrijk wordt. Gegeven dat de focus in deze nieuwe kartering breder zal zijn dan in 'Actualisatie van de drainageklasse', is de relevantie in 'Effecten van klimaatverandering' echter doorslaggevend. **Er was dus voorgesteld om deze kaarten, in de versie zoals eerder gebruikt in 'Effecten van klimaatverandering', opnieuw op te nemen in de analyse**.

#### 2.3.6.3 Dagzomende hydrogeologische laag

Zoals in Tabel 15 weergegeven, is de kaart van de dagzomende hydrogeologische laag enkel gebruikt in 'Actualisatie van de drainageklasse'. In het kader van deze studie was deze kaart opgemaakt met een resolutie van 100 m en dat voor heel Vlaanderen.

Tabel 15: Het gebruik van de dagzomende hydrogeologische kaart in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Eigen afleiding op basis van H3Dv2 & HCOV-v2.<br>• Shapley-analyse: zeer beperkt belang. | • Niet gebruikt. |

In ‘Actualisatie van de drainageklasse’ bleek deze kaart maar een beperkt belang in te hebben. Echter, gezien de focus op de bovenste 3 m in ‘Actualisatie van de drainageklasse’, is het mogelijk dat de waarde van deze laag groter wordt wanneer alle grondwaterpeilen onderzocht worden. **Er was dus voorgesteld om deze kaartlaag wel te weerhouden en door middel van de analyse te bekijken in welke mate ze toegepast kan worden**.

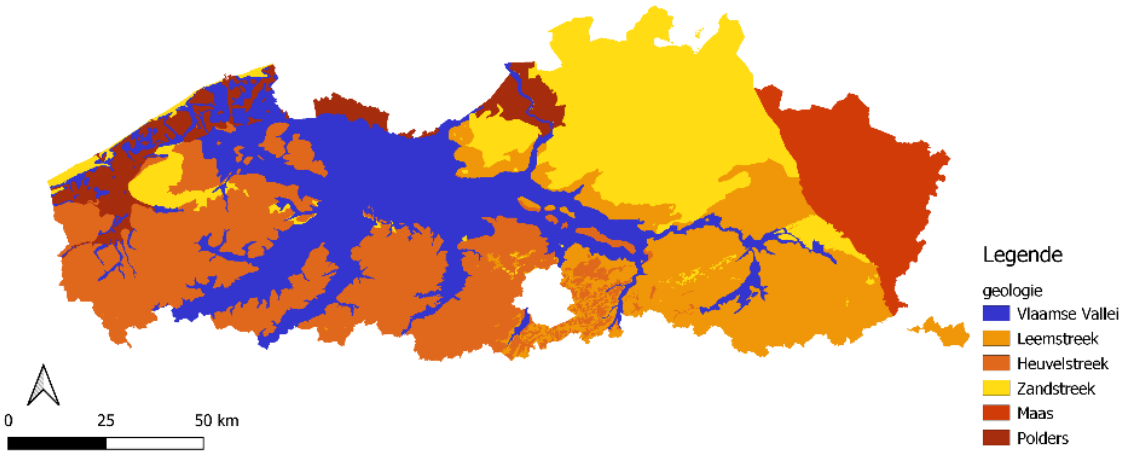
#### 2.3.6.4 Hydrogeologisch homogene zones

De hydrogeologisch homogene zones, waarvan het gebruik gegeven is in Tabel 16, zijn vectorieel opgemaakt en beschikbaar voor heel Vlaanderen.

Tabel 16: Het gebruik van de hydrogeologisch homogene zones in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Niet gebruikt. | • Aggregatie van de hydrogeologisch homogene zones (freatische grondwaterlagen) tot 6 hydrogeologische zones, zie Figuur 8.<br>• Shapley-analyse: beperkt belang. |

De hydrogeologisch homogene zones zijn enkel in ‘Effecten van klimaatverandering’ gebruikt, maar kunnen wel een meerwaarde bieden gezien ze de informatie geven over de gelijkenis in de ondergrond tussen verschillende punten. Hoewel de meerwaarde niet het grootst was in ‘Effecten van klimaatverandering’, **was voorgesteld om deze te weerhouden** en te bekijken hoe het model hiermee omgaat.




Figuur 8: Geaggregeerde hydrogeologische zones, zoals gebruikt in Franken & Wolfs (2022).

### 2.3.7 Ruimtelijke positie

De ruimtelijke positie, ‘n’ in de scorpan-methode, is vaak een relevante verklarende variabele in *digital soil mapping*: nabijgelegen locaties hebben immers een reële kans om gelijkaardige waardes voor een bepaalde te voorspellen variabele hebben. Het spreekt dan ook voor zich om te bekijken hoe dit toegepast is in beide voorgaande studies. Een overzicht daarvan is gegeven in Tabel 17.

Tabel 17: Het gebruik van coördinaten in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|

| | |
|---|---|
| • X- en Y-coördinaten (Lambert 72) gebruikt als predictor.<br>• Shapley-analyse: relatief grote relevantie. | • Niet gebruikt. |

In 'Effecten van klimaatverandering' is de ruimtelijke positie niet beschouwd, terwijl deze in 'Actualisatie van de drainageklasse' wel meegenomen zijn en daarbij een relatief grote relevantie bleken te hebben volgens de Shapley-analyse. Dit wijst er op dat, ondanks de reeds uitgebreide selectie aan verklarende variabelen, de positie nog een meerwaarde kan bieden. Aan de andere kant kan een grote relevantie van ruimtelijke positie ook impliceren dat andere relevante (en fysisch logischere) verklarende variabelen ontbreken (McBratney, et al., 2003). **Om die reden was voorgesteld om de coördinaten weliswaar te beschouwen als potentiële verklarende variabelen, maar ze enkel in het finale model op te nemen indien ze een duidelijk significante meerwaarde bieden**.

### 2.3.8 Waterlopen

#### 2.3.8.1 Inleiding

Om het grondwaterpeil te kunnen karteren, is informatie over de waterlopen en gerelateerde aspecten ook bijzonder belangrijk. Het grondwaterpeil hangt immers sterk samen met de nabijheid van waterlopen en de aanwezigheid van drainage. Dit valt al buiten het klassieke 'scorpan'-kader, maar gezien de fysische relevantie is het voor deze specifieke kartering wel van een hoge relevantie.

#### 2.3.8.2 Afstand tot waterlopen

Een overzicht van het gebruik van de afstand tot waterlopen in de eerdere studies is gegeven in Tabel 18. In beide studies was er sprake van een rasterisatie naar keuze op basis van een vectorieel bestand, en waren de gegevens finaal beschikbaar voor heel Vlaanderen.

Tabel 18: Het gebruik van afstand tot waterlopen in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Afstand tot de dichtstbijzijnde waterloop<br>  o De gebruikte waterlopenkaart is hierbij een combinatie van VHA, de wateroppervlaktes van Open Street Maps en een grachtenkaart opgemaakt door Antea.<br>• Shapley-analyse: best verklarend. | • Afstand tot watervlakken op basis van Watervlakkenkaart:<br>  o Vectoriële kaart voor Vlaanderen.<br>• Shapley-analyse: sterk verklarend voor gemiddeld grondwaterpeil. |

Afstand tot waterlopen wordt dus in beide studies gebruikt. Hoewel de wijze waarop dit berekend wordt sterk verschilt, is dit bij beide studies voor alvast een deel van de opgemaakte modellen een relevante verklarende variabele. Gegeven de verschillende kaartlagen die ondertussen beschikbaar zijn, zou het mogelijk moeten zijn om een zo uitgebreid mogelijke kaart te gebruiken, die verder bouwt op de principes in beide voorgaande studies**. Er was voorgesteld om de volgende kaarten te combineren en hiermee de afstand tot waterlopen of watervlakken in kaart te brengen voor elke pixel**:

- VHA;
- Watervlakken (versie 2024, zie Leyssen, et al. (2024));

- De officiële grachtenkaart ter vervanging van de kaart opgemaakt in 'Actualisatie van de drainageklasse'.
    - Opgelet: deze kaart is op het moment van schrijven nog niet publiek beschikbaar, maar het is toegelaten om deze te gebruiken in het kader van deze analyse.

Door deze kaarten te combineren, zal de (euclidische) afstand tot de waterlopen altijd zo correct mogelijk in beeld gebracht worden.

#### 2.3.8.3 Drainage

Drainage is in beide voorgaande studies op verschillende manier berekend. Een overzicht is gegeven in Tabel 19.

Tabel 19: Het gebruik van drainage in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Drooglegging:<br>o Verticale afstand tussen maaiveldniveau van pixel en smoothing met bilineaire interpolatie tussen drainagebasissen van waterlopenkaart (VHA + watervlakken + grachten interne analyse).<br>• Drainagedichtheid:<br>o Hoeveelheid 'drainerende cellen' binnen een venster van 200 x 200 m rond de betreffende pixel.<br>o 'Drainerende cellen' zijn niet goed gedefinieerd.<br>• Shapley-analyse: beide maten kunnen sterk verklarend zijn. | • Verticale afstand tot dichtstbijzijnde drainage:<br>o Verticale afstand (vanaf maaiveld) tot hoogte drainagebasis van dichtstbijzijnde punt VHA-waterloop.<br>• Drooglegging:<br>o Verticale afstand tussen maaiveldniveau van pixel en smoothing met bilineaire interpolatie tussen drainagebasissen van VHA-waterlopen.<br>• Shapley-analyse: beide maten voor drainage waren, afhankelijk van het model, sterk verklarend. |

Een maat voor drainage moet sowieso meegenomen worden, aangezien dit fysisch gezien een grote invloed heeft op de grondwatertafel. In beide studies is dit dan gebeurd en bleken de gebruikte kaartlagen relevant te zijn. Gegeven dat er verschillende kaartlagen gebruikt zijn, is de vraag daarbij wel welke daarvan dan best meegenomen worden. Drooglegging lijkt evident, aangezien dit nagenoeg gelijk berekend is in beide studies. In 'Effecten van klimaatverandering' bleek de verticale afstand tot de dichtstbijzijnde drainage vaak ook relevant te zijn, in 'Actualisatie van de drainageklasse' de drainagedichtheid ook. **Er was dan ook voorgesteld om alle drie de gebruikte kaartlagen mee te nemen als verklarende variabele**. Daarbij moeten deze drie kaartlagen dan wel opnieuw berekend worden op basis van de meest maximale kaartset, i.e. de combinatie van VHA, Vlaamse watervlakken en de nieuwe grachtenkaart. Dit zal het meest correcte resultaat opleveren.

### 2.3.9 Grondwaterwinningen en verlaging ten gevolge hiervan

Waar de waterlopen de natuurlijke toestand van het grondwaterpeil kunnen helpen verklaren, kan informatie over grondwaterwinningen de menselijke invloed nog beter helpen capteren. De grondwaterwinningen omvatten maar een deel van de menselijke invloed, drainages worden hierdoor bv. niet gecapteerd, maar zijn uiteraard al zeer relevant om mee in beschouwing te nemen, zeker gezien hier wel enige informatie over beschikbaar is. Zoals in Tabel 20 weergegeven, is dit

enkel beschouwd in 'Actualisatie van de drainageklasse', waarbij deze gegevens voor heel Vlaanderen beschikbaar waren in een resolutie naar keuze (op basis van puntgegevens).

Tabel 20: Het gebruik van verlaging t.g.v. grondwaterwinningen in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Kaart met verlaging ten gevolge van winningen, opgesteld op basis van gegevens vergunde installaties.<br>• Shapley-analyse: relatief belangrijk. | • Niet gebruikt. |

Hoewel maar in één van beide voorgaande studie gebruikt, lijkt de kaartlaag met verlaging ten gevolge van grondwaterwinningen wel relevant om in de beschouwing te nemen. Deze kaartlaag heeft immers wel enige relevantie in 'Actualisatie van de drainageklasse'. **Omwille van rekentijd was voorgesteld om deze kaart as-is te beschouwen en niet opnieuw te berekenen**.

### 2.3.10 Algemene discussie

Een van de vragen die gesteld kan worden met betrekking tot de beschikbare kaartlagen, is in welke mate grondwaterpeilgegevens buiten Vlaanderen mee gebruikt kunnen worden om zo een correct mogelijke kaart binnen Vlaanderen te bekomen. Gegeven de verschillende kaarten en hun toepassingsgebied/extent (zie Tabel 21), lijkt het evident om ons tot Vlaanderen te beperken wat modellering en datagebruik betreft. Er zijn immers maar enkele kaarten met een extent tot buiten Vlaanderen beschikbaar (de bodemkaart en de kaartlaag met de dikte van de freatische aquifer). Dit is op het totaal aantal kaarten te weinig om grondig mee aan de slag te kunnen gaan.

Tabel 21: Overzicht van de weerhouden kaartlagen, hun extent en hun resolutie.

| Voorgestelde kaartlaag | Extent | Resolutie |
|---|---|---|
| Belgische bodemkaart | België | Vectorieel |
| Kaarten Bodemdatabank-STAT-project | Vlaanderen | 10 m |
| Veenwaarschijnlijkheidskaarten | Vlaanderen | 5 m (ondiep), 50 m (bodemprofiel) |
| Gemiddeld neerslagoverschot | Vlaanderen | Rasterisatie naar keuze |
| BBK | Vlaanderen | 1 m en 5 m, maar verwerking is in rasterisatie naar keuze |
| Gedigitaliseerde historische kaarten | Vlaanderen | Rasterisatie naar keuze |
| Biologische waarderingskaart | Vlaanderen | Rasterisatie naar keuze |
| Digitaal hoogtemodel en afgeleiden | Vlaanderen | 1 m en 5 m |
| Dikte freatische aquifer | Vlaanderen en nabije omgeving | 100 m |
| Dagzomende hydrogeologische laag | Vlaanderen | 100 m |
| Hydrogeologisch homogene zones | Vlaanderen | Vectorieel |
| Afstand tot waterlopen | Vlaanderen | Rasterisatie naar keuze |
| Drainage (verschillende classificaties) | Vlaanderen | Rasterisatie naar keuze |

| | | |
|---|---|---|
| Verlaging ten gevolge van grondwaterwinningen | Vlaanderen | Rasterisatie naar keuze (maar as-is beschikbaar op 10 m) |

Een tweede vraag met betrekking tot de beschikbare kaartlagen is op welke resolutie deze gebruikt moeten worden en dus in welke mate verwerking nodig is. Als eindresultaat moeten kaarten met een resolutie van 5 m, 10 m, 25 m, 50 m en 100 m beschikbaar zijn. De meeste besproken verklarende kaartlagen zijn ofwel op 5 m, ofwel op 10 m beschikbaar of kunnen hier door middel van rasterisatie naar omgezet worden. Er is echter geen enkele resolutie waarop alle kaarten beschikbaar zijn, wat impliceert dat er altijd een resampling zal moeten gebeuren vooraleer het model getraind kan worden. Voldoende kaarten zijn op de fijnste resolutie van 5 m beschikbaar, wat impliceert dat het meeste informatie behouden blijft als op deze resolutie gewerkt wordt. Dit laat toe om de kartering uit te voeren op de schaal het nauwst gerelateerd aan de effectieve peilmetingen. Bijkomend moeten de finale grondwaterpeilkaarten dan immers enkel opgeschaald en niet neergeschaald worden. Om de kaarten die niet op 5 m beschikbaar zijn te gebruiken, kan met klassieke resamplingtechnieken gewerkt worden.

Een derde vraag is welke bijkomende kaartlagen een meerwaarde zouden kunnen bieden. Er zijn verschillende kaarten die op dit moment nog niet gebruikt worden en waarvoor een meerwaarde het geval zou kunnen zijn. Van de Bodemdatabank-STAT-kaart en de Grachtenkaart lijkt deze meerwaarde evident. Van enkele andere kaarten moet dit blijken uit de analyse. Zoals aangegeven kan deze meerwaarde door onder andere voorwaartse selectie (zie ook 2.4.4) en door een nieuwe Shapley-analyse in beeld gebracht worden. We stellen dan ook voor om de nieuwe kaarten (indien feature engineering beperkt is) maximaal te beschouwen en finaal te analyseren in welke mate ze effectief kunnen bijdragen.

Verschillende van de hier voorgestelde kaarten zijn gerelateerd met elkaar. In verschillende recente *digital soil mapping*-oefeningen wordt immers dezelfde basisdata gebruikt, zoals de bodemkaart of het digitaal hoogtemodel. Elke kaart voegt echter nog bijkomende data (zoals veenkarteringen in het kader van de veenwaarschijnlijkheidskaarten) toe, waardoor door het meenemen van bijkomende kaarten altijd nieuwe informatie aanwezig is. Niettemin is het van belang om de relaties tussen verschillende kaarten met het oog op evaluatie in het achterhoofd te houden. Door middel van voorwaartse selectie kan het model automatisch al verklarende kaartlagen met te beperkte bijkomende waarde en te hoge correlatie met reeds geselecteerde kaartlagen echter uitsluiten.

### 2.3.11 Conclusie

De meeste kaartlagen die tot nu gebruikt zijn, lijken relevant om op zijn minst nog mee in overweging te nemen (zie Tabel 21 voor een overzicht). Gezien het model de optimale combinatie van verklarende variabelen kan kiezen en weergeven m.b.v. voorwaartse selectie, lijkt a priori te veel kaarten niet weerhouden een slechte tactiek om zoveel mogelijk uit alle kaarten te halen. Enkel wanneer er grote verschillen in resolutie zijn, zoals in het geval van de kaarten afgeleid van SWI, is voorgesteld om deze kaarten niet te weerhouden. Er zijn daarnaast ook enkele nieuwe te gebruiken kaarten, waarvan het gebruik verder onderzocht moet worden. Het is relevant om in het kader van dit project te onderzoeken wat de meerwaarde van deze kaarten kan zijn.

## 2.4 WERKWIJZE

### 2.4.1 Inleiding

Deze sectie beschrijft de desktopanalyse voor de **werkwijze**. Hierbij ligt de focus vooral op de *machine learning*-methodes die gebruikt zijn (Sectie 2.4.2) en enkele onderdelen van de algemene *machine learning*-setup, zoals hyperparameteroptimalisatie (Secties 2.4.3 en 2.4.4). Andere aspecten van de werkwijze komen in eerdere of volgende onderdelen van de desktopanalyse aan bod komen.

### 2.4.2 Methode

Er zijn verschillende methodes beschikbaar voor *digital soil mapping* (zie onder andere Wittemans, et al., (2023) voor een overzicht met focus op de Vlaamse context). Heel vaak komen hierbij *gradient tree boosting*-methodes als beste keuze naar voor (zie o.a. Koch, et al. (2021) voor een voorbeeld uit Denemarken). Bij deze methodes wordt gebruik gemaakt van een ensemble van voorspellers, en meer specifiek van beslissingsbomen. Het moet dan ook niet verbazen dat deze groep van methodes ook in beide eerdere studies toegepast is. Hierbij is er in 'Actualisatie van de drainageklasse' en 'Effecten van klimaatverandering' echter voor verschillende versies gekozen (zie Tabel 22), waardoor deze kort vergeleken moeten worden.

Tabel 22: De gebruikte methodes in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • *Gradient tree boosting*:<br>o XGBoost. | • *Gradient tree boosting*:<br>o CatBoost. |

In beide studies wordt een *gradient tree boosting*-methode gebruikt, al is het in een verschillende vorm (XGBoost, zie Chen & Guestrin (2016) en CatBoost, zie Prokhorenkova, et al. (2017)) en dus met lichte verschillen. Deze verschillen kunnen afhankelijk van het type vraagstelling de doorslag geven voor het gebruik van de ene of de andere methode. Vergelijkingen van CatBoost en XGBoost zijn echter zeldzaam, en dat zeker in de context van hydrologie of water resources engineering. Een uitgebreide review van CatBoost door Hancock & Khoshgoftaar (2020) geeft aan dat deze methode te verkiezen is wanneer sterk heterogene data gebruikt wordt. Dat sluit aan bij de doelstellingen van deze studie, waarin verschillende databronnen gecombineerd worden. Szczepanek (2022) gaf aan dat CatBoost beter scoorde dan XGBoost in het kader van een hydrologische studie. Daarnaast zou CatBoost in principe beter moeten kunnen omgaan met categorisch gegevens en met ontbrekende gegevens, twee aspecten die in het kader van de kartering van grondwaterpeilgegevens wel kunnen voorkomen. Het gebruik van CatBoost m.b.t. categorische gegevens laat bijvoorbeeld toe om minder tijd te besteden aan feature engineering en omzetting van categorische variabelen naar dummy variabelen, wat een meerwaarde kan betekenen in het kader van deze studie.

Kortom, hoewel de verschillen tussen beide gebruikte methodes minimaal zijn, lijkt CatBoost enkele voordelen te hebben, zoals de vlottere omgang met categorische variabelen. Dit spreekt in het voordeel van CatBoost en **er was dus voorgesteld om de aanpak zoals eerder in 'Effecten van klimaatverandering' uitgevoerd te hernemen**. Dit laat bijkomend een vlotte overdracht van code toe, wat toelaat om efficiënter te werk te gaan.

### 2.4.3 Hyperparameteroptimalisatie

Bij een *machine learning*-methode spelen de zogenaamde hyperparameters een grote rol: dit zijn de parameters die de structuur van de kalibratie bepalen (en dus niet de parameters van het finale model). Er zijn verschillende technieken om deze hyperparameters in te stellen en te optimaliseren, dus het is relevant om te vergelijken hoe beide voorgaande studies dit uitgevoerd hebben. Een overzicht hiervan is gegeven in Tabel 23.

Tabel 23: De gebruikte hyperparameteroptimalisatiemethodes in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Raster met mogelijke hyperparametercombinaties. opgemaakt op basis van expertkennis<br>• Raster geëvalueerd met *k-fold crossvalidation*. | • Raster met mogelijke hyperparametercombinates automatisch opgemaakt voor 3 hyperparameters (diepte, *learning rate* & l2_leaf_reg).<br>• Geëvalueerd met automatische *grid search* met *k-fold crossvalidation*. |

De hyperparameteroptimalisatie in beide methodes is sterk gelijkend: telkens is een raster van mogelijke combinaties geëvalueerd m.b.v. *k-fold crossvalidation*. Dit impliceert dat deze methode overgenomen kan worden. Daarbij lijkt het het eenvoudigste om het volledige raster van een beperkte set aan hyperparameters (cf. 'Effecten van klimaatverandering') automatisch te verkennen, in plaats van een raster op te maken op basis van expertkennis. **Er was daarom voorgesteld om deze automatische hyperparameteroptimalisatie te hernemen**.

### 2.4.4 Selectie van verklarende variabelen

Niet alle verklarende variabelen die aangereikt worden, moeten in principe gebruikt worden. Het kan efficiënter zijn om maar een deel van de variabelen te gebruiken, en deze op een relevante manier te selecteren. Voor zover mogelijk worden de gebruikte methodes en hun implicaties in deze sectie kort vergeleken (zie Tabel 24).

Tabel 24: De gebruikte methodes voor selectie van de variabelen in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Geen expliciete selectie van variabelen. | • *Forward selection* (voorwaartse selectie). |

In 'Actualisatie van de drainageklasse' lijkt er geen expliciete selectie van verklarende variabelen in de methodiek opgenomen. Dat betekent dat alle verklarende variabelen altijd gebruikt worden. In 'Effecten van klimaatverandering' is er een voorwaartse selectie, waarbij de variabelen toegevoegd worden in functie van bijkomende verklarende waarde en variabelen niet meer toegevoegd worden wanneer ze onvoldoende verklarende waarde hebben. Op deze manier worden alle verklarende variabelen uitgetest, maar wordt finaal wel een robuust en zo eenvoudig mogelijk model opgesteld. **Er was voorgesteld om deze methode opnieuw toe te passen**, gezien ze meer flexibiliteit biedt en op die manier een ruimere input aan initiële verklarende kaartlagen en minder nood aan uitgebreide feature engineering toelaat. Vanuit deze optiek zijn in Sectie 2.3 de relevante kaartlagen ook besproken. Een bijkomend voordeel is dat de Shapley-analyse juistere informatie zal bevatten, gezien te sterk gecorreleerde variabelen door de voorwaartse selectie geweerd zullen worden.

### 2.4.5 Conclusie

Wat betreft de werkwijze leunen beide studies sterk tegen elkaar aan. Dit geeft aan dat de algemene methodiek zeer betrouwbaar is voor oefeningen zoals deze kartering (wat ook bevestigd wordt in (inter)nationale lectuur). Er zijn echter kleine verschillen tussen de finaal toegepaste methodes. **Over het algemeen kan de methodiek zoals deze in 'Effecten van klimaatverandering' toegepast is, hierbij als betrouwbaarder en robuuster beschouwd worden** doordat deze minder steunt op expertkennis en a priori selectie en meer op basis van het model en de beschikbare gegevens selecteerd. Er was dan ook voorgesteld om met Catboost, in combinatie met automatische hyperparameteroptimalisatie en voorwaartse selectie van de kaartlagen verder te gaan.

## 2.5 MODELSTATISTIEKEN EN ONZEKERHEID

### 2.5.1 Inleiding

Deze sectie beschrijft de desktopanalyse voor de **modelstatistieken, onzekerheid en gebruikte en finale resolutie**. Deze aspecten hangen samen: de modelstatistieken geven de nauwkeurigheid en onzekerheid aan. Deze nauwkeurigheid en onzekerheid hangen af van de gekozen resolutie voor de modellering. Bij opschaling naar andere resoluties, moet de onzekerheid ook correct gecapteerd worden. Om dit alles te duiden, zullen we in Sectie 2.5.2 eerst nog kort de begrippen 'nauwkeurigheid' en 'onzekerheid' duiden. Op die manier is het duidelijk vanuit welk referentiekader gesproken wordt. In Sectie 2.5.3 zal dan besproken worden hoe beide voorgaande studies 'nauwkeurigheid' evalueren en bespreken, terwijl 'onzekerheid' in Sectie 2.5.4 aan bod komt. Het opschalen van de onzekerheid wordt in Sectie 2.5.5 gekaderd, en in Sectie 2.5.6 volgt een conclusie.

### 2.5.2 Kadering onzekerheid en nauwkeurigheid

Nauwkeurigheid geeft aan in welke mate er een afwijking ('bias') is tussen de observaties/*ground truth* en predicties/modelresultaten. Een hogere nauwkeurigheid is over het algemeen beter, maar een zeer hoge nauwkeurigheid (zeker bij de kalibratieperiode) kan impliceren dat er *overfitting* plaats gevonden heeft, i.e. dat het model maar beperkt zal kunnen extrapoleren. Het is daarom belangrijk om enerzijds goed te valideren en anderzijds de kalibratie- en validatiestrategie zo op te bouwen dat *overfitting* geminimaliseerd wordt. Zoals beschreven in eerdere delen van de desktopanalyse, beogen we dit te doen d.m.v. *k-fold crossvalidation* (zie Sectie 2.2.7). Nauwkeurigheid wordt klassiek beschreven met maten zoals de 'Mean Squared Error' (MSE), 'Root Mean Squared Error' (RMSE), 'Mean absolute Error' (MAE), $R^2$-waarde, Nash-Sutcliffe Efficiency (vooral in hydrologische context)…

De onzekerheid geeft aan in welke mate variatie rond de resultaten verwacht wordt, of dus hoe groot de mogelijke spreiding op de resultaten is. Dit wordt meestal gecapteerd door de standaardafwijking en variantie, en afgeleide maten van beide (zoals het betrouwbaarheidsinterval). Bij nauwkeurigheid en onzekerheid is het ook van belang om de afweging die tussen beide genomen moet worden te vermelden, de zogenaamde *bias-variance trade-off*. Meestal is het niet mogelijk om beide perfect te krijgen: een hogere nauwkeurigheid (kleinere bias) gaat vaak gepaard met een hogere onzekerheid (grotere variantie) en omgekeerd. Het is meestal de bedoeling om hierin een balans te vinden en beide binnen redelijke grenzen te houden.

### 2.5.3 Nauwkeurigheid

Tabel 25: De in de eerdere studies gebruikte methodes om nauwkeurigheid te kwantificeren.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • RMSE.<br>• Histogram.<br>• Boxplot residuen. | • MAE.<br>• $R^2$. |

In Tabel 25 is een overzicht gegeven van de gebruikte nauwkeurigheidsmaten in de vorige studies. Voor de nauwkeurigheid worden in beide studies klassieke maten zoals RMSE, MAE en $R^2$ gebruikt. In feite kunnen elk van deze maten gebruikt worden in een *machine learning* set-up, al zal meestal maar op één van deze waardes gekalibreerd kunnen worden (de geselecteerde *loss function*), waarbij de andere waardes als controle gebruikt kunnen worden. Om de onzekerheid (zie Sectie 2.5.4) ook te kunnen capteren, is de beste keuze voor een *loss function* in CatBoost (zie Sectie 2.4.2) 'RMSEwithUncertainty'. Deze *loss function* heeft als voordeel dat ze naast een waarde voor een punt ook variantie berekent. Het gebruik van deze *loss function* zorgt ervoor dat RMSE sowieso bepaald zal worden. Daarnaast kunnen de MAE en $R^2$ ook nog berekend en weergegeven worden We stellen echter voor om enkel RMSE te bepalen: MAE is hier nauw aan gerelateerd en biedt dus weinig toegevoegde waarde. $R^2$ kan wel relevant zijn, maar is in deze context veel moeilijker te interpreteren dan RMSE, dat berekend wordt in de eenheid van kartering.

In 'Actualisatie van de drainageklasse' zijn daarnaast ook de verdelingen over Vlaanderen bestudeerd. Dit kan ook enige inzichten geven in de nauwkeurigheid: dit laat toe om niet alleen de globale afwijking, maar ook de afwijking voor extreme waardes beter te begrijpen. De boxplot van de residuen laat eveneens een diepgaandere analyse toe, maar dan met focus op de residuen (i.e. het verschil tussen de gemodelleerde en geobserveerde waardes) toe. Hoe groter de spreiding op deze boxplot, hoe lager de nauwkeurigheid. Als het gemiddelde van de boxplot afwijkt van 0, is er hoe dan ook een aanwezige bias. Bijkomende analyses op de residuen, zoals uitgevoerd in 'Actualisatie van de drainageklasse', laten dan nog toe om te begrijpen in welke situaties afwijkingen kunnen ontstaan. We stellen voor om deze toe te passen in functie van de mate waarin de code over te nemen valt.

Kortom, **de kalibratie zal sowieso gebruik maken van RMSE**. Hierbij zal niet enkel de absolute RMSE, maar ook de relatieve RMSE geanalyseerd worden. Deze waarde is mogelijk relevant omdat zowel diepe als ondiepe grondwaterstanden naast elkaar gebruikt worden. Uit testresultaten (zie 3.8.4) blijkt echter dat de relatieve RMSE reeds in balans is voor verschillende grondwaterdieptes, zelfs wanneer enkel de RMSE gebruikt wordt. De relatieve RMSE wordt daarom enkel als bijkomende maat gebruikt, en niet als objectieffunctie.

### 2.5.4 Onzekerheid

Tabel 26: Onzekerheidskwantificatie in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Kwantielmodel XGBoost. | • Geen analyse onzekerheid. |

Enkel in 'Actualisatie van de drainageklasse' is een analyse op de onzekerheid uitgevoerd (zie Tabel 26). Die werd uitgevoerd m.b.v. het model, waarbij het mogelijk is om een betrouwbaarheidsinterval op te stellen. Een gelijkaardige methode is mogelijk met behulp van de *loss function* RMSEwithuncertainty in CatBoost, waarbij de variantie en op basis daarvan onzekerheid van de

voorspelling ook in kaart gebracht kan worden. Door middel van de variantie kan immers een betrouwbaarheidsinterval opgesteld worden. Dit betrouwbaarheidsinterval laat toe om de onzekerheid van individuele puntvoorspellingen (per gridcel) te interpreteren. Hierbij is het niet mogelijk om een predictie-interval, waarbij de onzekerheid op de globale voorspelling weergegeven wordt, op te maken, of althans niet zonder grote bijkomende computationele kost. Voor het opmaken van een predictie-interval moeten namelijk methodes zoals bootstrapping e.d. toegepast worden.

Interessant bij de analyse van de onzekerheid is dat het mogelijk is om de totale onzekerheid uit te splitsen in data-onzekerheid (aleatorische onzekerheid) en kennisonzekerheid (epistemische onzekerheid). Data-onzekerheid is inherent aan de gegevens (cf. het gooien van een dobbelsteen) en kan niet gereduceerd worden met bijkomende data/sampling, kennisonzekerheid echter wel. Dit laat toe om te duiden of er regio's zijn in Vlaanderen waarbij de kennisonzekerheid bij een inschatting van GLG/GHG hoger is, en waarbij sampling in deze of gelijkaardige regio's dus een verbetering van de kartering zou kunnen opleveren. Om de data-onzekerheid en de kennisonzekerheid per rastercel te bepalen, wordt er gewerkt met een virtueel ensemble. Op basis van het opgestelde model wordt hierbij een ensemble van resultaten berekend. Standaard bestaat dit ensemble uit 10 leden. Hierbij is het in theorie mogelijk om 10 aparte modellen op te stellen, maar dit in functie van computationele efficiëntie is een techniek opgemaakt om op basis van één model een volledig ensemble op te bouwen. Dit vormt dus het virtueel ensemble (zie Malinin, et al. (2020) voor meer details). Per lid van het ensemble $i$ wordt hierbij een inschatting van de effectieve gemiddelde waarde $a_i$ en een variantie $s_i$ berekend. Het modelresultaat voor de betreffende rastercel is hierbij gelijk aan $\bar{a}$, berekend op basis van de vector aan voorspelde waardes door het ensemble $a = (a_0, \dots, a_{N-1})$, met $N$ het aantal leden van het ensemble. De data-onzekerheid per rastercel wordt daarnaast gegeven door het gemiddelde $\bar{s}$ van de vector aan varianties $s = (s_0, \dots, s_{N-1})$. De kennisonzekerheid is finaal de variantie van het ensemble wanneer deze op klassieke wijze berekend wordt:

$$\mathrm{Var}(a) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(a_i - \bar{a})^2,$$

wat toelaat om de totale onzekerheid, cf. de wet van de totale variantie, te definiëren als de som van data-onzekerheid en kennisonzekerheid (zie Malinin, et al. (2020) voor een uitgebreide bespreking van deze principes in de context van *gradient tree boosting*). Deze totale onzekerheid kan dan gebruikt worden om het betrouwbaarheidsinterval op te stellen en kan dus beschouwd worden als een standaardafwijking.

**Samengevat was voorgesteld om aan de hand van de *loss function* de totale onzekerheid te berekenen**, gezien hiervoor alle nodige tools ingebouwd zitten in CatBoost.

### 2.5.5 Onzekerheid opschalen

Het opschalen van de kaarten, en het daarbij berekenen van de onzekerheid, is in geen van beide studies toegepast of gekaderd in de mate van detail die verwacht wordt in het kader van deze studie. Zoals eerder aangegeven, zal initieel gewerkt worden op een resolutie van 5 m (zie Sectie 2.3.10. Deze resolutie sluit het nauwst aan bij de resolutie van de oorspronkelijke GxG-gegevens (puntgegevens). De nauwkeurigheid zal dan ook het meest relevant zijn op dit niveau. Deze kan voor de andere schaalniveaus wel meegegeven worden, maar indien er op grotere schaalniveaus (bv. 100 m-resolutie) al meerdere meetpunten zijn, dan zal dit al minder betekenisvol zijn. De onzekerheid is echter zeer betekenisvol op elk schaalniveau, zeker gezien dit kan helpen inschatten welk schaalniveau voor welke toepassing het best gebruikt wordt.

Zoals gezegd kan de onzekerheid op het laagste niveau ingeschat worden door middel van CatBoost. De totale onzekerheid kan hierbij uitgedrukt worden in functie van de variantie (voorspelde varianties voor data-onzekerheid, berekende varianties voor kennisonzekerheid, die opgeteld kunnen worden tot totale onzekerheid). Opschaling vindt plaats door uitmiddeling van de waardes die binnen dezelfde finale pixel liggen. Gegeven dat het model enkel maar voor de kleinste schaal opgemaakt wordt, betekent dit dat de onzekerheid ook mee geschaald moeten worden. Door de uitmiddeling zal de totale onzekerheid namelijk afnemen: de onderlinge verschillen binnen de pixel nemen echter af. Afhankelijk van de ondergrens van de onzekerheid, die vooral bepaald zal worden door de data-onzekerheid, is er echter ook een ondergrens aan de uitmiddeling van de onzekerheid.

Kortom: het is van belang om voor elk schaalniveau nauwkeurigheid en onzekerheid naast elkaar te blijven plaatsen, wat volgens ons mogelijk is door de tools binnen CatBoost en door een efficiënte opschaling. Dit valt onder andere te visualiseren met behulp van een betrouwbaarheidsinterval, dat ruimtelijk zal variëren onder invloed van de totale onzekerheid. **Hierbij was voorgesteld om de betrouwbaarheidsintervallen zodanig op te stellen dat voor elke resolutie en kaartlaag onzekerheidskaartlagen met enerzijds de 10%-grens en anderzijds de 90%-grens van het betrouwbaarheidsinterval**, i.e. de onder- en bovengrens van een betrouwbaarheidsinterval met 80% zekerheid, **meegegeven kunnen worden**.

### 2.5.6 Conclusie

Door middel van CatBoost kunnen nauwkeurigheid en onzekerheid op een eenvoudige manier in kaart gebracht worden. De onzekerheid zal vertaald worden naar betrouwbaarheidsintervallen, waarvoor standaardprocedures beschikbaar zijn. Bij de opschaling zullen de nauwkeurigheid en kennisonzekerheid variëren, wat ook door de betrouwbaarheidsintervallen gecapteerd kan worden. **Hierbij was voorgesteld om voor elk schaalniveau de 10%- en 90%-grens van deze betrouwbaarheidsintervallen mee te geven om de finale onzekerheid te kunnen duiden.**

## 2.6 RANDEFFECTEN EN SPRONGEN

### 2.6.1 Inleiding

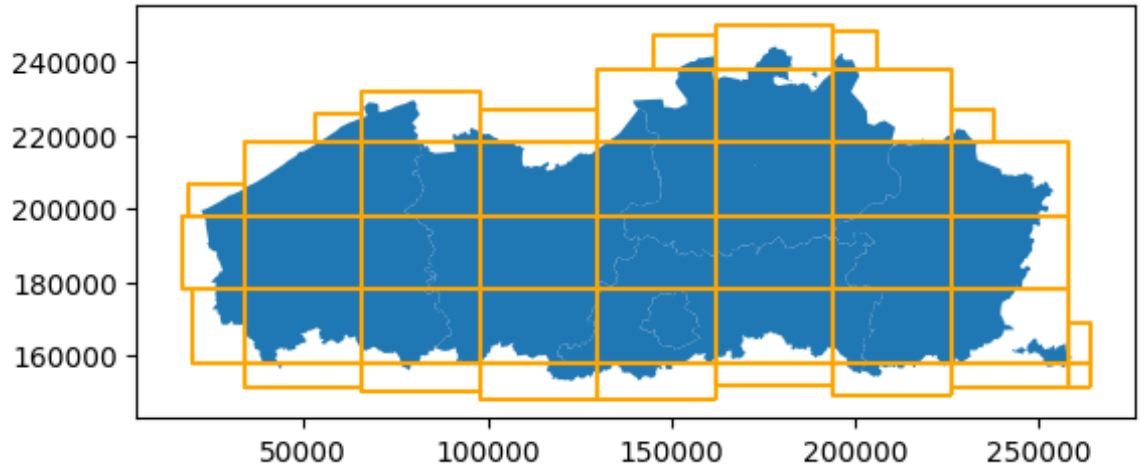
Deze sectie beschrijft de desktopanalyse voor de **randeffecten en sprongen**. Deze randeffecten en sprongen worden vooral bepaald door de keuzes zoals beschreven in vorige onderdelen van de desktopanalyse. In deze sectie zal dus vooral besproken worden hoe de keuzes in voorgaande secties de randeffecten en sprongen beïnvloeden en welke keuzes er nog gemaakt moeten worden.

### 2.6.2 Randeffecten en sprongen in voorgaande studies

Tabel 27: Omgang met randeffecten en sprongen in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Opdeling Vlaanderen in kaartbladen, waarbij een buffer toegepast werd om randeffecten te minimaliseren.<br>• Expliciete keuze om geen smoothing toe te passen. | • Vlaanderen integraal beschouwd in analyse.<br>• Smoothing door initiële kartering met resolutie van 5 m uit te voeren en dit op te schalen naar een resolutie van 100 m.<br>• Bijkomend filtering van waterlopen. |

Tabel 27 geeft een overzicht van de omgang met randeffecten en sprongen in de eerdere studies. Een belangrijk verschil tussen beide studies is de wijze waarop de gegevens voor Vlaanderen verwerkt werden. In 'Actualisatie van de drainageklasse' is Vlaanderen opgedeeld in kaartbladen (zie Figuur 9), in 'Effecten van klimaatverandering' zijn alle gegevens voor Vlaanderen integraal verwerkt. Hierbij zijn verschillende optimalisaties toegepast (*preprocessing*, dataselectie…) om dit computationeel vlot te laten verlopen. Bij beide studies waren echter nog sprongen aanwezig, onder meer (wellicht) door de keuze voor m-mv in plaats van mTAW (zie Sectie 2.2.2), het gebruikte DTM (zie Sectie 2.3.5.2) en het gebruik van de SWI ('Actualisatie van de drainageklasse', zie Sectie 2.3.2.4). Zoals reeds aangegeven, zullen wat betreft het eerste punt beide opties uitgetest worden, nl. een regressie in mTAW vs. een regressie in m-mv.




Figuur 9: Kaartbladen zoals toegepast in Van den Berg, et al., (2023).

Naast de hierboven beschreven test zullen, zoals aangegeven in Sectie 2.3.2.4, de kaartlagen op basis van SWI niet meer gebruikt worden. Als in combinatie hiermee de berekening integraal voor Vlaanderen uitgevoerd wordt (cf. 'Effecten van klimaatverandering'), kan de beste set-up gekozen worden. Gegeven dat er in beide voorgaande studies geen bijkomende smoothing (tenzij door opschaling, zie ook Sectie 2.5.5) is toegepast en dat dit in de literatuur ook niet gangbaar is (om lokale effecten en impacts van de verklarende variabelen helder te kunnen weergeven), is voorgesteld om dit ook niet bijkomend toe te passen. Afhankelijk van welke versie van het DTM geselecteerd wordt, kan een filtering van de waterlopen wel nog noodzakelijk zijn.

### 2.6.3 Conclusie

**Door een combinatie van testing en computationele aanpassingen menen we dat de meeste vormen van randeffecten en sprongen vermeden kunnen worden.** De meest waarschijnlijke bronnen van sprongen, nl. het gebruikte type waterpeil en de gebruikte DTM-kaart, zullen onderzocht worden. Daarnaast zullen de gegevens voor Vlaanderen integraal doorgerekend worden, opdat de sprongen en randeffecten door het gebruik van kaartbladen geminimaliseerd worden. Enkel aan de grenzen van Vlaanderen zal dit moeilijker zijn. In beide voorgaande studies wordt geen smoothing voorzien op het finale resultaat. In de literatuur wordt dit ook maar zelden toegepast, gegeven het belang van het behoud van de lokale informatie. De opschaling naar hogere resoluties (zie Sectie 2.5.5) kan bijkomend ook al beschouwd worden als een vorm van smoothing.

## 2.7 TOEPASSINGSGEBIED

### 2.7.1 Inleiding

Deze sectie beschrijft de desktopanalyse voor **het toepassingsgebied**. Deze analyse bestaat enerzijds uit de beschrijving en analyse van het toepassingsgebied volgens de voorgaande studies (Sectie 2.7.2) en anderzijds een discussie over hoe aanpassingen of toevoegingen aan de werkwijze het toepassingsgebied kunnen verbeteren (Sectie 2.7.3).

### 2.7.2 Toepassingsgebied volgens voorgaande studies

Tabel 28: Het toepassingsgebied en eventuele discussies hierover in de eerdere studies.

| Actualisatie van de drainageklasse | Effecten van klimaatverandering |
|---|---|
| • Expliciete discussie:<br>o Voor de meeste studies/projecten nuttig in exploratieve fase;<br>o Bijkomende waarde in stedelijke gebieden (bv. in functie van bemaling);<br>o Beperkte bruikbaarheid voor ecohydrologie, maar relevant als eerste inschatting. | • Geen expliciete discussie, wel toepassing op landbouw, grondwaterafhankelijke natuur, veenbodems en grondwaterwinningen. |

In Tabel 28 is een overzicht van het toepassingsgebied, zoals besproken in vorige studies, gegeven. De meest uitgebreide discussie van het toepassingsgebied is terug te vinden in 'Actualisatie van de drainageklasse'. Hierbij wordt goed gekaderd dat voor verschillende types studies GxG-kaarten een meerwaarde kunnen bieden in de exploratieve fase. Voor sommige studies, zoals bv. bemalingsstudies in stedelijk gebied, is de meerwaarde groot omwille van het voorheen moeilijk beschikbaar zijn van gegevens. Voor andere studies, zoals bv. ecohydrologische studies, zijn nauwkeurige, lokale peilgegevens nog steeds noodzakelijk om de finale keuzes te kunnen maken. Ook daarbij kan een exploratieve kaart echter wel nuttig zijn. Afhankelijk van het type studie, kan zo een GxG-kaart hoe dan ook relevant zijn. Wanneer verschillende tijdskaders (bv. in functie van klimatologie) met elkaar vergeleken worden, is er ook voor ecohydrologie een meerwaarde. Dit wordt aangetoond in 'Effecten van klimaatverandering', waar de impact van klimaatverandering vergeleken is voor landbouw, grondwaterafhankelijke natuur en veenbodems. Het type studie moet dus ook overwogen worden wanneer het toepassingsgebied besproken wordt.

### 2.7.3 Mogelijke verbeteringen van het toepassingsgebied

Zoals aangegeven in de discussie in 'Actualisatie van de drainageklasse', is de grootste uitdaging voor het toepassingsgebied de foutenmarge. Zowel uit de resultaten van beide studies, als door vergelijking met andere resultaten buiten de context van deze studies (zoals een vergelijking die intern bij VMM werd uitgevoerd) blijkt dat de fout vaak nog groot is, zeker met het oog op ecohydrologische toepassingen. Zoals beschreven in de voorgaande onderdelen van de desktopanalyse, is het de bedoeling om door middel van een optimale combinatie van beide voorgaande gebruikte datasets (zie Sectie 2.2), kaartlagen (zie Sectie 2.3) en werkwijzes (zie Sectie 2.4), de bestaande fout en onzekerheid zoveel mogelijk te verkleinen. In welke mate dat effectief lukt, zal moeten blijken uit de analyses van het eindresultaat, volgens de methodes beschreven in Sectie 2.5.

Specifiek is het wel nog relevant om de gebruikte kaartlagen te vermelden, en dan vooral de voorgestelde nieuw te gebruiken kaartlagen. Reeds in 'Actualisatie van de drainageklasse' werd vermeld dat het gebruik van kaartlagen zoals de grachtenkaart en de kaarten van het Bodemdatabank-STAT-project een meerwaarde kunnen betekenen. Daarnaast zijn er verschillende voorgestelde kaartlagen (BWK, veenwaarschijnlijkheidskaarten…) die, indien ze vlot toegepast kunnen worden, een meerwaarde kunnen betekenen in functie van ecohydrologische toepassingen, gezien deze vooral geselecteerd zijn op basis van de link tussen vegetatie, bodemtype en grondwaterpeil. In combinatie met het gericht in kaart brengen van de onzekerheid (cf. Sectie 2.5), kan de toepassing van deze kaarten tot inzichten leiden in welke mate ze bijdragen aan een vermindering van de fout met het oog op ecohydrologische toepassingen. Verschillende gegevens die nodig zijn om de effectieve grondwaterstand in kaart te brengen, ontbreken echter nog. Zo is de lokale menselijke invloed op het grondwaterpeil maar beperkt in kaart gebracht. Hoewel er enige informatie over grondwaterwinningen beschikbaar is, zijn er geen gecentraliseerde gegevens beschikbaar over stuwen, drainages… Omwille van die redenen is de kartering vooral geldig voor de neerslagafhankelijke grondwaterspiegel. Op vele locaties biedt dit echter al relevante informatie, en waar de aanname van een neerslagafhankelijke grondwaterspiegel niet geldig is, kan het verschil tussen de kartering en de feitelijke grondwaterstand een inschatting leveren van het verlies in wateropslag door drainage. Het is wel zo dat op dit moment stappen gezet worden om de ondiepe drainage in Vlaanderen te karteren (zie bestek OMG_VPO_2024_036). Op termijn kunnen deze gegevens een grote meerwaarde bieden om het grondwaterpeil in Vlaanderen nog beter in beeld te brengen.

## 2.8 CONCLUSIES

In dit hoofdstuk was het de bedoeling om de aanpak van de twee voorgaande studies waarin een grondwaterkartering was uitgevoerd, door Antea ('Actualisatie van de drainageklasse van de bodemkaart door koppeling van grondwaterstatistieken aan de bodemkaart') en Sumaqua ('Effecten van klimaatverandering op de freatische grondwaterstanden'), te vergelijken en zo tot de, met de huidige kennis, best mogelijke werkwijze voor een grondwaterkartering te komen. Hierbij was het niet de bedoeling om veel nieuwe kaartlagen, technieken e.d. voor te stellen, maar een synthese te maken van deze twee voorgaande studies en zo veel mogelijk het beste van beide studies te combineren.

Deze nood aan combinatie komt naar voor wanneer de conclusies gezamenlijk beschouwd worden. Wat de dataselectie en verwerking betreft, leunt de synthese nauw aan bij hetgeen dat in 'Actualisatie van de drainageklasse' uitgevoerd werd (op enkele uitzonderingen na). Wat betreft de gebruikte kaartlagen betreft het een mix van beide eerdere studies, terwijl op vlak van werkwijze, ondanks de beperkte verschillen tussen beide studies, vooral het eerdere werk uit 'Effecten van klimaatverandering' gevolgd wordt.

Een beperkt aantal vragen is nog verder te onderzoeken door dit uit te testen. Het gaat hierbij vooral om de definitie van het grondwaterpeil (in mTAW of m-mv).

Daarnaast stellen we ook voor om enkele kaartlagen en methodes te gebruiken die in geen van beide eerdere studies gebruikt zijn, wegens niet onderzocht of nog niet beschikbaar. Wat de kaartlagen betreft, gaat het over:

- De kaarten van het Bodemdatabank-STAT-project;
- De grachtenkaart;
- De veenwaarschijnlijkheidskaarten;

- De biologische waarderingskaart;
- De gedigitaliseerde historische kaarten.

Wat methodes betreft, stellen we voor om een *k-fold crossvalidation* toe te passen om *overfitting* te vermijden en willen we in CatBoost een *loss function* gebruiken die toelaat om onzekerheid vlot in kaart te brengen.

Door de combinatie van dit alles, menen we dat de finale kaarten die deze kartering moet opleveren, een verbetering zullen kunnen vertonen ten opzichte van de kaarten die in de vorige studies opgemaakt waren, waardoor deze relevant zullen zijn voor verschillende toepassingen.

# 3 UITWERKING

## 3.1 INLEIDING

Op basis van de conclusies van de desktopanalyse was het mogelijk om de werkwijze voor de kartering van de GxG-kaarten effectief uit te werken. Gezien er nog verschillende mogelijkheden en te onderzoeken aspecten waren, is het belangrijk om voldoende lang stil te staan bij de finale opbouw van de dataverwerking en modelopmaak en de keuzes die hierbij gemaakt zijn.

De gehele werkwijze is opgedeeld in 6 stappen, die allen in een aparte sectie uitgewerkt zijn:

- Sectie 3.2 beschrijft de data die als uitgangspunt gebruikt is;
- Sectie 3.3 beschrijft de dataselectie en de initiële controles die op de data plaatsvinden;
- Sectie 3.4 beschrijft de opmaak van de Pastasmodellen, en kadert waarom deze werkwijze gekozen is;
- Sectie 3.5 beschrijft de berekening van de GxG's voor de incidentele modellen;
- Sectie 3.6 beschrijft de gebruikte kaartlagen en waarom bepaalde kaartlagen uiteindelijk niet onderzocht zijn;
- Sectie 3.7 beschrijft tot slot de opmaak van de modelfit en de implementatiekeuzes die hierbij gemaakt moesten worden.

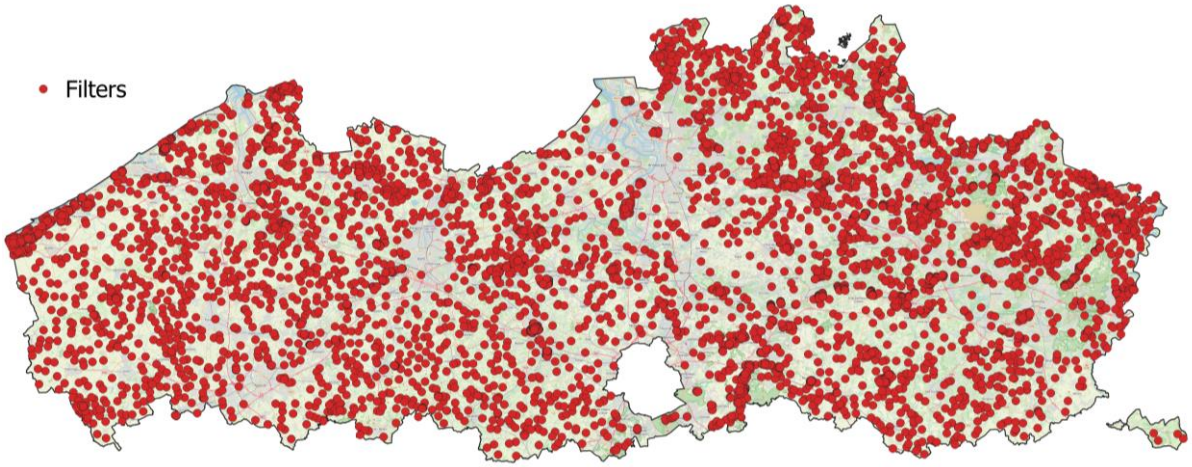
Zoals besproken in Sectie 2, waren er nog een aantal zaken te onderzoeken. In Sectie 3.8 worden daarom enkele tussentijdse resultaten besproken, die bepaalde keuzes kunnen helpen kaderen. In Sectie 3.9 volgen finaal de conclusies, waarin gekaderd wordt met welke keuzes de finale kaarten opgemaakt zullen worden.

## 3.2 DATA: UITGANGSPUNT

Zoals besproken in Sectie 2.2.3, was het de bedoeling dat de dataset zoals gebruikt in 'Actualisatie van de drainageklasse' eveneens de basis zou vormen voor de analyses. Alle grondwaterfilters die opgenomen waren in de dataset van 'Actualisatie van de drainageklasse' en waarvoor een unieke identifier beschikbaar was die gekend was in DOV, zijn opnieuw opgenomen in deze studie en dat waar mogelijk met gegevens van 2009 tot en met 2024. Dit was niet voor alle punten in de dataset van 'Actualisatie van de drainageklasse' mogelijk: enkele filters van o.a. private rechtspersonen en lokale overheden bleken niet beschikbaar te zijn via DOV of konden niet aan een filter in DOV gelinkt worden wegens geen geschikte identifier.

Dat enkele filters die in 'Actualisatie van de drainageklasse' gebruikt zijn niet opnieuw gebruikt konden worden, vormt niet noodzakelijk een probleem. Door alle in DOV beschikbare (publieke en niet-publieke) gegevens te gebruiken waarvoor reeds een identifier teruggevonden kon worden in de gegevens van 'Actualisatie van de drainageklasse', werd een dataset van 6540 meetpunten verspreid over Vlaanderen bekomen. Een kaart van de spreiding van deze gegevens is terug te vinden in Figuur 10. Hierbij zijn er wel twee zaken die opvallen. Als eerste is er een sterke clustering in sommige regio's. Zo is er onder andere in de Dijlevallei (natuurreservaat de Doode Bemde) en in de Scheldevallei (natuurreservaat de Kalkense Meersen, overstromingsgebied de Polders van Kruibeke) een sterke clustering. Dit komt doordat in natuurgebieden veel peilmetingen actief zijn die opgenomen zijn in het 'WATINA' (Water in Natuur)-netwerk van het INBO. Deze gegevens vormen meetnet 9 in DOV, dat een groot deel van de gebruikte peilgegevens omvat. Als tweede valt

in omgekeerde zin op dat er in de grote steden amper tot geen metingen beschikbaar zijn. Dit valt het sterkst op voor Gent en Antwerpen, maar bv. ook voor Kortrijk en Brugge. Dit wordt veroorzaakt doordat simpelweg niet alle meetpunten van lokale overheden in DOV beschikbaar zijn (wat bv. het geval is voor Antwerpen), of dat deze niet mee opgenomen worden in de gegevens van 'Actualisatie van de drainageklasse', maar ondertussen wel beschikbaar zijn op DOV (wat het geval is voor Gent). Bij een herneming van deze analyse zou idealiter met een bredere lijst van punten gewerkt worden, zodat gegevens die ondertussen beschikbaar gekomen zijn op DOV, alsnog mee in de werkwijze opgenomen kunnen worden.




Figuur 10: Verspreiding van de gebruikte filters doorheen Vlaanderen.

## 3.3 DATASELECTIE EN INITIËLE CONTROLES

De 6540 filters die beschikbaar zijn, zijn wellicht niet allemaal bruikbaar voor analyses in het kader van de GxG-kartering. Om de filters te verwijderen die niet relevant zijn en om enkele algemene statistieken op te kunnen maken, zijn er verschillende controlestappen die uitgevoerd worden. Zoals besproken in Sectie 2.2.4 focust deze controle op de basisvereisten en zal op basis van de Pastasmodellering een bijkomende controle uitgevoerd worden.

De verschillende controlestappen die finaal uitgevoerd zijn, zijn de volgende:

- Indien de beschouwde filter niet de bovenste filter was in een bepaalde peilput, werd deze niet weerhouden. Dit was het geval voor **117 filters.**
    - Let op: de bovenste filter kan soms tijdelijk droogvallen. Verdere analyse van de gegevens vanuit dit perspectief is niet uitgevoerd, maar indien in een bepaalde regio weinig meetpunten ter beschikking zijn door dit probleem, kan het wel relevant zijn om alsnog de tweede filter te selecteren.
- Indien het peil voor een tijdstap hoger was dan het maaiveld, werd het peil gereset naar het maaiveld.
- Indien in het tijdsvenster geen metingen aanwezig waren, werd de filter niet weerhouden. Dit was voor geen enkele filter het geval.
- Indien er minder dan 50 metingen beschikbaar waren voor een filter, kon deze filter niet gebruikt worden voor Pastasmodellering (maar wel voor een analyse op basis van incidentele metingen, zie 3.5). **Dit was het geval voor 2754 filters**.
- Indien de afstand tussen het maaiveld en de onderkant van de filter groter was dan de dikte van de freatische aquifer, werd de filter beschouwd als niet-freatisch en niet weerhouden. Hierbij was de dikte van de freatische aquifer bepaald met de kaartlagen die besproken zijn

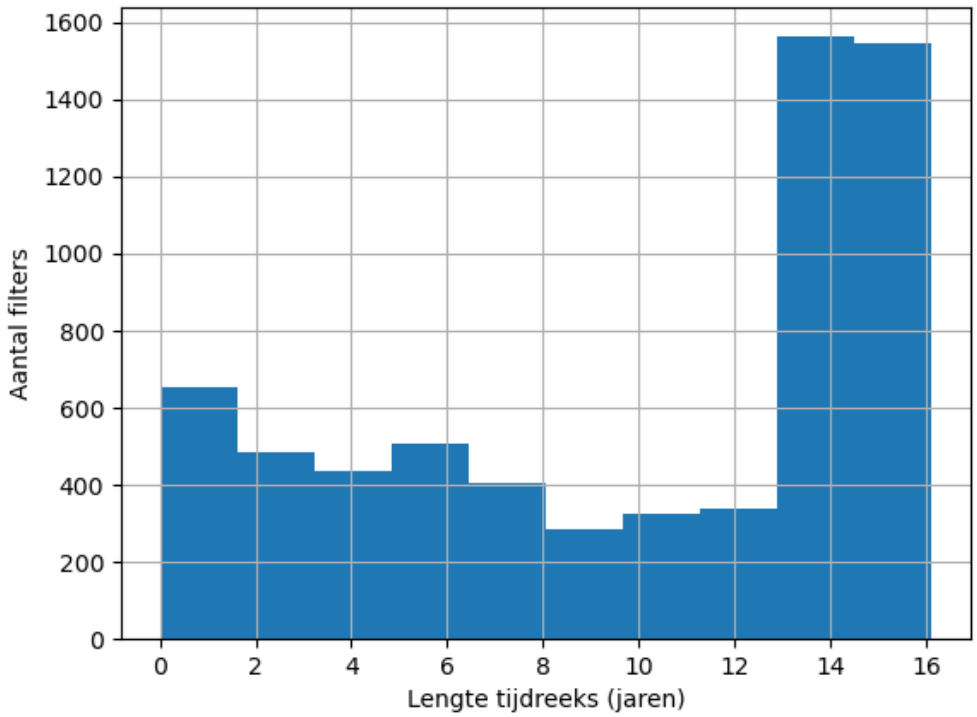
in Sectie 2.3.6.2. Hierbij werd de meest recente update van deze kaartlagen (gebaseerd op de H3D v2.1-kartering) gebruikt, waarbij de basis van de freatische aquifer bepaald werd door middel van de volgende aquitards: A0233, A0235, A0237, A0300, 0420, A0440, A0500, A0700, A0900, A1020 (en A1100 en A1300 waar geen van de andere aquitards aanwezig is). Dit resulteerde in 601 filters die niet weerhouden werden. **Na handmatige controle van deze filters werden er 550 alsnog wel weerhouden**. Bij deze handmatige controle werd er rekening gehouden met de positie van de bovenkant van de filter, boorbeschrijvingen, freatisch karakter van de tijdreeks, type meetnet en enkele andere indicatoren van het freatisch karakter.

Op basis van deze selectiecriteria, waren er **3618 filters beschikbaar waarvoor Pastasmodellen** opgesteld konden worden, **2754 filters met incidentele metingen** waarvoor GxG's opgesteld konden worden en **117 filters die niet verder beschouwd werden**.

Uit de handmatige controle van de schijnbaar niet-freatische filters volgen bijkomend nog **twee aanbevelingen**:

- Om een deel van de filters bij hermodelleringen automatisch correct te selecteren, is het aanbevolen om de afstand tussen maaiveld en de bovenkant van de filter in rekening te brengen in plaats van de afstand tot de onderkant van de filter. Dit is reeds geïmplementeerd in de opgeleverde code.
- Waarschijnlijk zal er zelfs dan nog een bijkomende controle uitgevoerd moeten worden op de filters die niet weerhouden zijn, en kan de modellering pas verder gaan nadat deze controle is uitgevoerd.

Zoals reeds aangehaald, worden ook enkele algemene statistieken uitgelezen bij deze selectieprocedure. Een relevant statistiek om de bruikbaarheid van filters voor een GxG-analyse in te schatten, is de lengte van de beschikbare tijdreeks. Volgens de klassieke GxG-definitie moet deze immers minstens 8 jaar (of ongeveer 3000 dagen) bedragen. In Figuur 11 is een histogram van de lengte gegeven, waarbij de lengte berekend als het aantal dagen tussen de eerste en de laatste meting. In deze figuur valt te zien dat een beduidend aantal filters minder dan 8 jaar aan metingen heeft. Dit impliceert dat het voor deze filters moeilijk is om GxG-waardes te berekenen, al kan enige extrapolatie (in het geval van de incidentele metingen) nog een oplossing bieden. Tegelijkertijd zijn er ook veel filters (ongeveer 3000) die het grootste deel van de beschouwde tijdsperiode (2009-2024) actief waren en waarvoor dus met zekerheid GxG-waardes bepaald kunnen worden.




Figuur 11: Histogram van de lengte (in aantal jaren tussen eerste meting en laatste meting) van de beschouwde filters.

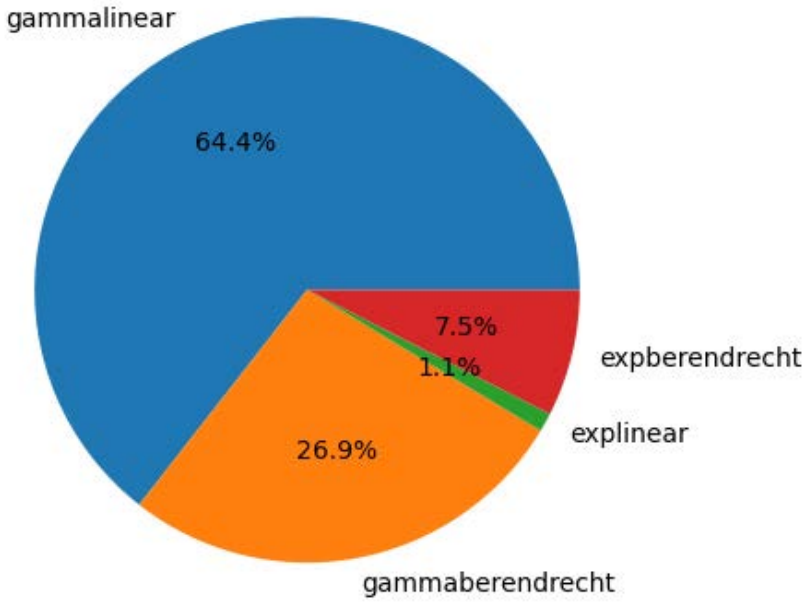
## 3.4 OPMAAK PASTASMODELLEN

Tijdens de desktopanalyse werd beslist om PIRFICT-modellering toe te passen om de tijdreeksen te interpoleren en zo meer tijdreeksen ter beschikking te hebben waarvoor op een efficiënte wijze GxG-waardes berekend konden worden. Hierbij werd het als mogelijkheid opgegeven om de python-package Pastas (Collenteur, et al., 2019) te gebruiken, gezien deze toelaat PIRFICT-modellering verder te automatiseren en de gebruikte code voor de analyse meer high-level te op te bouwen. De robuustheid en toekomstgerichtheid nemen op deze manier toe, wat met het oog op toekomstige herkarteringen relevant is. Daarnaast biedt de Pastas-package meer flexibiliteit naar modelformuleringen, wat gezien de grote verschillen tussen de filters (bv. zowel diepe als ondiepe filters) een grote meerwaarde kan bieden. Omwille van al deze redenen is er finaal verder gewerkt met Pastas.

Voor de 3618 filters die finaal weerhouden zijn (waarvan 3068 op basis van automatische selectie en 550 na controle, zie Sectie 3.3) werd een Pastasmodel gefit. Op basis van dit gefitte model kan dan voor de relevante tijdperiode een simulatie gemaakt worden. Deze gesimuleerde gegevens laten finaal toe om de GxGs te berekenen.

Op vlak van modelfit zijn verschillende mogelijke opties geïmplementeerd. Elk model bestaat uit een responsfunctie, een recharge-functie en eventueel een ruismodel (technische achtergrond hierover is terug te vinden in o.a. Von Asmuth, et al. (2021)). De responsfunctie geeft aan hoe de grondwaterstand op een bepaalde invloed (in dit geval neerslag) zal reageren: hiervoor werd de keuze toegelaten tussen de gamma- en exponentiële responsfuncties. De rechargefunctie dient om de grondwateraanvulling, als functie van neerslag en verdamping, te modelleren. Hiervoor is zowel een lineaire als non-lineaire (Berendrecht) functie mogelijk. Het ruismodel laat toe om de restterm na de fit van deze eerste functies te modellen, om zo in het ideale geval tot een restterm te komen die geen autocorrelatie vertoond en normaal verdeeld is (zogenaamde ‘white noise’). Hierbij is het mogelijk dat een AR(1), ARMA(1,1) of geen model geselecteerd wordt. Deze laatste optie kan zowel

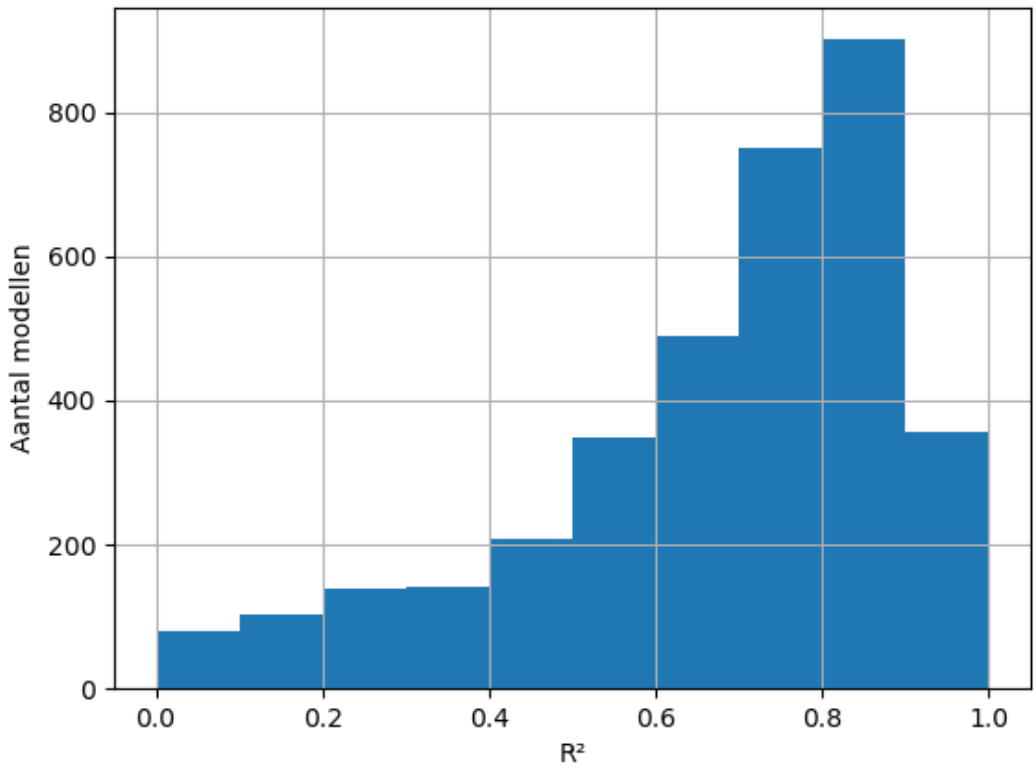
voorkomen in het geval dat de ruis na de fit van de andere modellen reeds als white noise beschouwd kan worden als wanneer een AR(1)- of ARMA(1,1)-model niet resulteert in een voldoende goede fit. Het taartdiagram in Figuur 12 geeft aan waartoe deze verschillende mogelijkheden resulteren. Hierbij is het finale model gekozen op basis van de beste RMSE. In een kleine 2/3$^{e}$ (64,4%) van de gevallen wordt een 'klassiek' model gekozen, met de gamma-responsfunctie en lineaire recharge. Dit komt overeen met de meest eenvoudige PIRFICT-modellering en ligt in lijn met de implementatie van PIRFICT in Van den Berg, et al. (2023). In enkele gevallen is een nog eenvoudiger model (exponentiële functie in combinatie met lineaire recharge) ook voldoende, maar dit beperkt zich tot iets meer dan 1% van de gevallen. In ongeveer 1/3$^{e}$ van de gevallen (34,4%) leverde een fit met de Berendrecht-rechargefunctie (non-lineair) de beste fit op, want aangeeft dat deze mogelijkheid een zeer relevante toevoeging was.




Figuur 12: Taartdiagram met de verdeling van verschillende types Pastasmodellen over alle filters waarvoor een model opgemaakt kon worden.

Het is echter niet zo dat voor elke filter een Pastasmodel opgemaakt kan worden. Van de in totaal 3618 filters, **was dit voor 108 filters niet mogelijk**. Dit werd onder andere veroorzaakt door incorrecte metingen, of een te korte tijdreeks. Een te korte tijdreeks kan, ondanks de dataselectie, voorkomen indien er een pauze in de metingen is. Wanneer meer dan 2 jaar niet gemeten wordt, zullen enkel de metingen na deze pauze weerhouden worden. Zo een hiaat kan de modelfit namelijk sterk verstoren. Zelfs al zijn er meer dan 50 metingen, dan kan dit nog voorkomen. Deze 108 filters werden wel opnieuw opgenomen bij de berekening van GxG's op basis van incidentele metingen.

Wanneer een model gefit wordt, is het ook mogelijk dat de modelfit onvoldoende kwalitatief is. Om dit te analyseren, werd de $R^2$-waarde gebruikt (zie Figuur 13). Indien de $R^2$-waardes lager is dan 0,30, werd het respectievelijke model niet weerhouden en werden de oorspronkelijke metingen opnieuw gerecupereerd als incidentele metingen. **Dit gaat in totaal over 319 filters.**

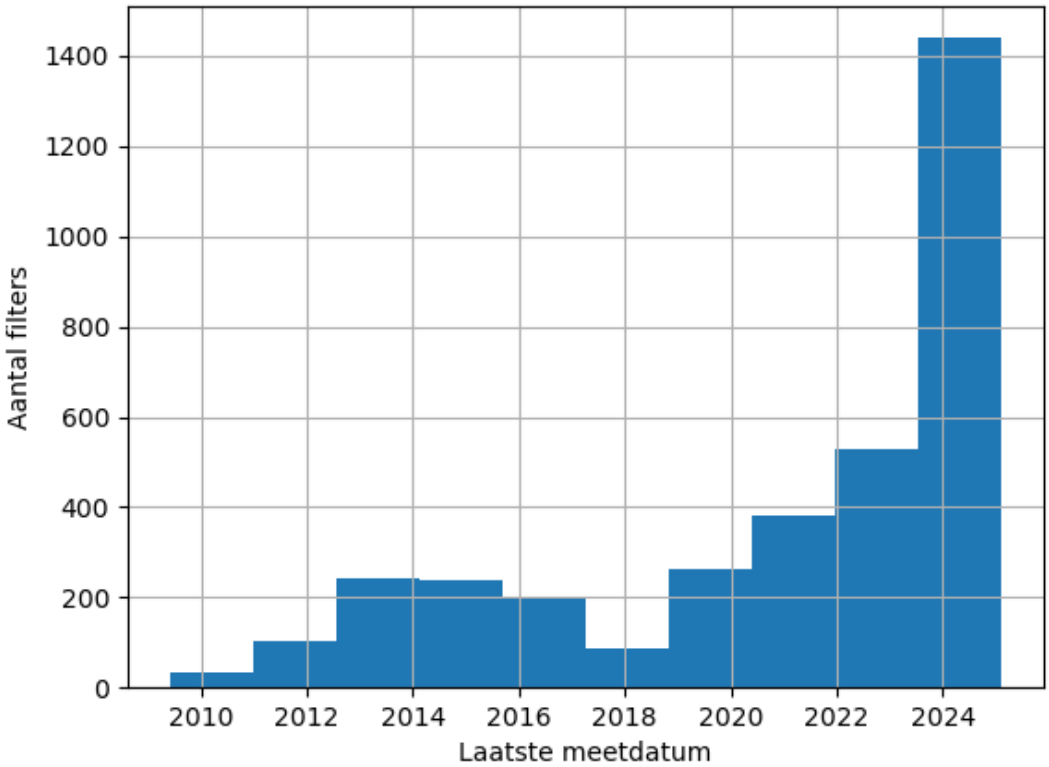



Figuur 13: Histogram van de $R^2$-waardes voor de gefitte Pastasmodellen.

Wanneer met de 3191 finaal weerhouden Pastasmodellen simulaties gemaakt worden, kunnen in principe de GxG-waardes berekend worden. Hiervoor is het wel van belang dat minstens 8 jaar aan metingen beschikbaar is: het Pastasmodel zal immers enkel interpoleren en een continue tijdreeks maken, maar niet extrapoleren. Dit impliceert dat mogelijk voor enkele Pastasmodellen geen GxG-waardes bepaald kunnen worden. Dit valt te illustreren door het histogram van de laatste meetdatum per filter (waarvoor een Pastas-model beschikbaar is) te bekijken, zie Figuur 14. Gegeven dat minstens 8 jaar aan gegevens nodig zijn, vallen alle filters met een laatste meetdatum in 2015 hoe dan ook weg. Naast deze filters, kunnen er ook filters die een aantal jaar in de tussenperiode meten, uitvallen. In totaal zijn er **611 Pastasmodellen waarvoor geen GxG-waardes bepaald konden worden** omwille van te weinig gegevens. De metingen van deze 611 filters werden vervolgens ook gebruikt als incidentele metingen.

Als laatste controle wordt nagegaan of de bekomen GxG-waardes realistisch zijn. Hierbij wordt nagegaan of het GLG hoger is dan het GHG (wat technisch onmogelijk is) en of er waardes zijn die hoger zijn dan 150 mTAW of lager zijn dan -20 mTAW (in functie van realistische verwachtingen binnen Vlaanderen). **Hierdoor worden tot slot de GxG-waardes 3 filters niet weerhouden**.

Het eindresultaat van alle controles is dat er voor **2577 filters**, verspreid over Vlaanderen, op basis van Pastasmodellen een realistische GxG-waarde berekend kon worden. Er is wel sprake van enige clustering in de filters waarvoor (a priori) voldoende gegevens beschikbaar waren voor een Pastasmodel. Dit impliceert dat het voor bepaalde regio's in Vlaanderen noodzakelijk is om ook met de incidentele metingen aan de slag te gaan, gezien er anders geen gefundeerde uitspraken gemaakt kunnen worden over de grondwaterstand in deze regio.




Figuur 14: Histogram met de verdeling van de laatste meetdatum over alle filters waarvoor een Pastasmodel opgesteld kon worden.

## 3.5 BEREKENING GXG'S VOOR INCIDENTELE METINGEN

Een groot deel van de filters bevat onvoldoende gegevens om een Pastasmodel op te maken (2754 filters) of het Pastasmodel, of de daarop gebaseerde resultaten, werd om verschillende mogelijke redenen niet weerhouden (zoals besproken in Sectie 3.4). Dit laatste was in totaal het geval voor 1038 filters, wat het totaal aantal filters waarop de methodiek voor incidentele metingen toegepast kan worden op 3792 brengt.

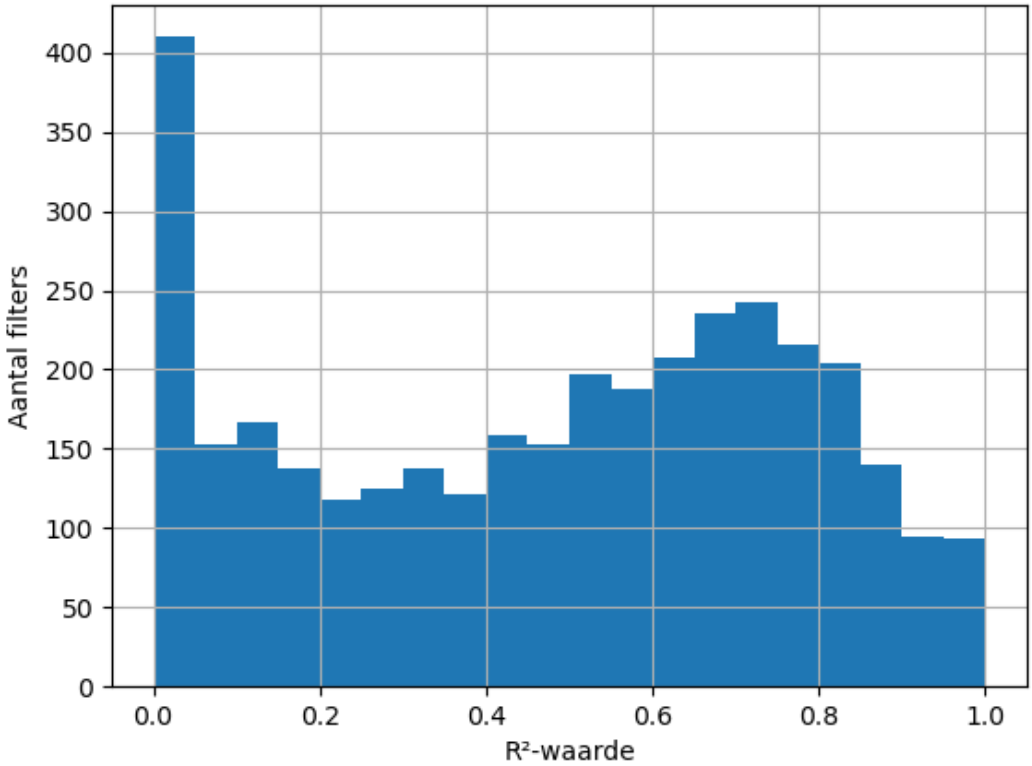
De methodiek voor de incidentele metingen, en de bijhorende code, is overgenomen 'Actualisatie van de drainageklasse'. Voor details over de methodiek verwijzen we dus naar Van den Berg, et al. (2023). Kort samengevat wordt voor elke filter met incidentele metingen de dichtstbijzijnde filter gezocht die aan de volgende voorwaarden voldoet:

- Er is een Pastasmodel opgemaakt dat aan alle vereisten voldoet;
- Op basis van dat Pastasmodel zijn GxG-waardes berekend;
- Er zijn minstens evenveel dagen in de Pastas-simulaties aanwezig als er in de filter met incidentele metingen zijn.

Wanneer aan deze voorwaarden voldaan wordt, wordt de filter geselecteerd en als referentiefilter beschouwd voor de filter met incidentele metingen. Gezien de ongelijke spreiding van de filters waarvoor Pastasmodellen opgesteld konden worden en het lagere aantal filters met Pastasmodellen t.o.v. filters waarvoor deze methodiek gebruikt wordt, zal het voorkomen dat sommige filters met Pastasmodellen meerdere keren geselecteerd worden en andere niet.

Wanneer een referentiefilter geselecteerd is, wordt er een lineaire regressie opgesteld tussen de observaties in de onderzochte filter en de simulaties van de referentiefilter. Op deze regressie

gebeurt een controle in lijn met de controle voor de Pastasmodellen: indien de $R^2$-waarde lager is dan 0,30 wordt deze filter niet weerhouden voor verdere analyses. Dit is het geval bij 1122 filters: een groot aantal, al ligt een tweede piek wel rond een $R^2$-waarde van 0,7 (zie Figuur 15).




Figuur 15: Histogram van de $R^2$-waardes voor de regressie van de filters met incidentele metingen.

Wanneer de regressie aanvaardbaar is, wordt deze gebruikt om de tijdreeks te interpoleren op basis van de referentiefilter en zo voldoende gegevens te bekomen voor de berekening van de GxG-waardes. Gegeven dat hierbij enkel referentiefilters gebruikt kunnen worden met voldoende gegevens voor het berekenen van een GxG (in lijn met de klassieke definitie), zijn er normaal gezien altijd voldoende jaren met gegevens beschikbaar. Wel is het mogelijk dat, door gebruik te maken van een regressie, onrealistische gegevens bekomen worden. Daarom wordt, net zoals bij de Pastas-analyse, een controle uitgevoerd op het voorkomen van filters waarbij het GLG hoger ligt dan het GHG of op waardes die buiten realistische grenzen (>150 mTAW of <-20 mTAW) vallen. Dit is het geval voor 57 filters, waarvan de berekende GxG-waardes bijgevolg niet weerhouden worden.

Deze methodiek resulteert finaal in **2613 filters waarvoor bijkomend GxG-waardes berekend kunnen worden**. Samen met de 2577 filters waarvoor m.b.v. Pastas GxG-waardes berekend kunnen worden, brengt dit **het totaal aantal filters met GxG-waardes voor Vlaanderen op 5190**. Hierbij zijn de aantallen tussen beide types modelleringen bijna gelijk, wat de finale berekening robuuster maakt.

## 3.6 KAARTLAGEN

Zoals besproken in Sectie 2.3 was het bij verschillende kaartlagen nog nodig om het gebruik te onderzoeken. Daarnaast waren er bij enkele andere kaartlagen nog kleine praktische nuances. Daarom wordt in wat volgt een overzicht gegeven van de verschillende beschouwde kaartlagen en op welke manier deze finaal gebruikt zijn.

- Belgische Bodemkaart: gegevens zijn gebruikt zoals opgemaakt door Franken & Wolfs (2022).
- Bodemdatabank-STAT: de kaartlagen met de percentages fijn zand, zand, grof zand, klei, en leem zijn gebruikt. Hierbij zijn de gegevens over de verschillende dieptes uitgemiddeld, om zo één kaartlaag per korrelgrootte te bekomen.
- Veenwaarschijnlijkheidskaarten: de verschillende kaarten (veen aan het oppervlak, veen in het bodemprofiel en veen in de ondiepe ondergrond) zijn gebruikt zoals beschikbaar.
- Meteorologische gegevens: het gemiddeld neerslagoverschot is, zoals in Franken & Wolfs (2022) berekend op basis van de aan de GWI gekoppelde meteorologische gegevens, en dat waar mogelijk voor de tijdsperiode 2009-2024.
- De hedendaagse bodembedekking is berekend op basis van de BBK-kaart van 2021, waarbij de methodiek zoals beschreven in Franken & Wolfs (2022) gevolgd is. Hierbij is enkel een categorie 'niet gekarteerd' toegevoegd, omdat deze categorie voorkomt bij enkele van de gedigitaliseerde historische landgebruikskaarten. Hierdoor zijn er finaal 6 kaarten, één voor elke klasse. Een vertaaltabel van de verschillende klasses van de oorspronkelijke kaart naar de gebruikte klasses bevindt zich in bijlage.
- De gedigitaliseerde historische landgebruikskaarten zijn verwerkt op dezelfde wijze als de hedendaagse bodembedekking. Vertaaltabellen tussen de verschillende klasses van deze kaarten en de finaal gebruikte kaarten bevinden zich in de bijlage.
- De biologische waarderingskaart (BWK) is finaal niet gebruikt. Het bleek complex om de informatie van de biologische waarderingskaart te aggregeren tot een werkbaar aantal klasses die nog steeds de relatie tussen vegetatie en grondwater weerspiegelen. Het is echter wel aanbevolen om dit verder te onderzoeken: binnen dit project was onvoldoende tijd om uitgebreide onderzoeksvragen te beantwoorden, maar de BWK of andere vegetatie-informatie kan wel degelijk een meerwaarde bieden.
- De hoogteligging van het hydrologisch DTM, met resolutie 5 x 5 m, is gebruikt.
- De hellingsgraad is gebruikt zoals eerder berekend. Deze berekening was op basis van het klassieke DTM (met resolutie 5 x 5 m), waarbij er van uit gegaan werd dat de impact op de hellingsgraad voldoende beperkt was.
- De TPI-kaarten zijn gebruikt zoals eerder berekend. Deze berekening was op basis van het klassieke DTM (met resolutie 5 x 5 m), waarbij er van uitgegaan werd dat de impact op de hellingsgraad voldoende beperkt was.
- De dikte van de freatische aquifer is gebruikt in de meest recent beschikbare vorm. Deze omvat vijf verschillende versies, die elk gebruikt zijn.
- De dagzomende hydrogeologische kaart is niet gebruikt, gezien deze kaart niet eenvoudig verkrijgbaar was in de overgedragen gegevens. Gezien nog andere geologische gegevens beschikbaar zijn, leek de impact hiervan beperkt.
- De hydrogeologisch homogene zones zijn gebruikt zoals voorheen.
- De x- en y-coördinaten zijn initieel gebruikt. Zie Sectie 3.8.3 voor een discussie van het gebruik hiervan.
- De afstand tot de waterlopen is bepaald op basis van de VHA-waterlopen, de watervlakken en de grachtenkaart.
- De drainageclassificaties zijn bepaald op basis van de VHA-waterlopen, de watervlakken en de grachtenkaart. Hierbij zijn enkel de verticale afstand tot drainage en de drooglegging gebruikt, gezien de drainagedensiteit te complex was om nog te berekenen binnen het tijdsbestek van de voorliggende opdracht.
- De verlaging ten gevolge van grondwaterwinning is gebruikt zoals opgeleverd i.f.v. 'Actualisatie van de drainageklasse'.

Er waren door deze keuzes en beperkingen uiteindelijk 62 kaartlagen beschikbaar als input voor het *machine learning*-model. Voor het opmaken van de modelfit en het berekenen van de gebiedsdekkende resultaten, is elke kaart geresampled naar een resolutie van 5 x 5 m. Bij kaarten met een grotere oorspronkelijke resolutie impliceert dat dat verschillende naburige cellen dezelfde waarde zullen hebben. Als zo'n kaart een grote invloed heeft op het eindresultaat, kan dat zorgen voor merkbare (en bij momenten) onrealistische sprongen in het eindresultaat. Dit moet opgevolgd en grondig geëvalueerd worden.

## 3.7 MODELFIT

Om het model op te bouwen, waren in totaal 5190 filters met GxG-waardes en 62 kaartlagen beschikbaar. Niet elk van deze 5190 filters kon effectief gebruikt worden: 35 filters bevonden zich net op of over de grens. Hierdoor was het niet mogelijk om voor deze filters waardes voor alle 62 kaartlagen te extraheren.

De modelaanpak ligt, zoals voorgesteld in Sectie 2.4, grotendeels in lijn met de werkwijze zoals deze eerder door Franken & Wolfs (2022) uitgewerkt was. Hierbij wordt de *gradient tree boosting*-package CatBoost (Prokhorenkova, et al., 2017) gebruikt, waarbij ruwweg de volgende stappen toegepast worden:

1. Als eerste stap worden de relevante verklaarde kaartlagen geselecteerd m.b.v. *forward selection*, waarbij de hyperparameters worden gekozen op basis van expert kennis.
2. Vervolgens worden de hyperparameters bepaald m.b.v. een automatisch opgemaakt raster van hyperparameterwaardes.
3. Finaal wordt het model gefit en worden de verschillende statistieken bepaald.

Waar relevant, wordt crossvalidatie toegepast om *overfitting* in de mate van het mogelijke te vermijden. Hierbij wordt klassieke *k-fold crossvalidation* toegepast. Als objectieffunctie is de in Catboost geïmplementeerde objectieffunctie 'RMSEwithUncertainty' gebruikt. Dit is het grootste verschil met de voorgaande implementatie: zoals in Sectie 2.5.4 beschreven, laat deze objectieffunctie toe om op een correcte wijze de onzekerheid te bepalen.

Initieel zijn er vier verschillende modellen opgemaakt:

- GLG in m-mv;
- GLG in mTAW;
- GHG in m-mv, in een 'delta'-configuratie;
- GHG in mTAW, in een 'delta'-configuratie.

De 'delta'-configuratie houdt in dat niet zozeer de absolute waarde van GHG gemodelleerd is, maar wel de verschilwaarde (delta) tussen GHG en GLG. Dit reduceert sterk de kans op de onrealistische situatie waarbij GHG < GLG, wat mogelijk is als beide volledig los van elkaar gemodelleerd worden. Een nadeel hiervan is dat de onzekerheid in theorie groter kan worden, gezien voor de opmaak van de finale kaart zowel GLG als GHG-delta-waardes nodig zijn. Dit betekent dat de onzekerheid van beide kaarten opgeteld moet worden om de finale onzekerheid te bepalen.

Voor elk van de gedefinieerde modellen was er voor elk van de gebruikte filters (5155 in totaal) een waarde beschikbaar, die aan de hand van het model gekoppeld werd met de best mogelijke set aan verklarende kaartlagen. Eenmaal het model gefit is, is het mogelijk om op basis van de verklarende kaartlagen een gebiedsdekkende kaart voor Vlaanderen op te maken.

## 3.8 TUSSENTIJDSE RESULTATEN

### 3.8.1 Inleiding

Uit de desktopanalyse kwam naar voor dat enkele vragen m.b.t. de werkwijze nog onderzocht en beantwoord moesten worden. Dit betrof:

- Het gebruik van grondwatergegevens in mTAW of in m-mv (Sectie 3.8.2);
- Het gebruik van coördinaten als mogelijke verklarende kaartlaag (Sectie 3.8.3);
- De relevantie van relatieve RMSE als objectieffunctie (Sectie 0).

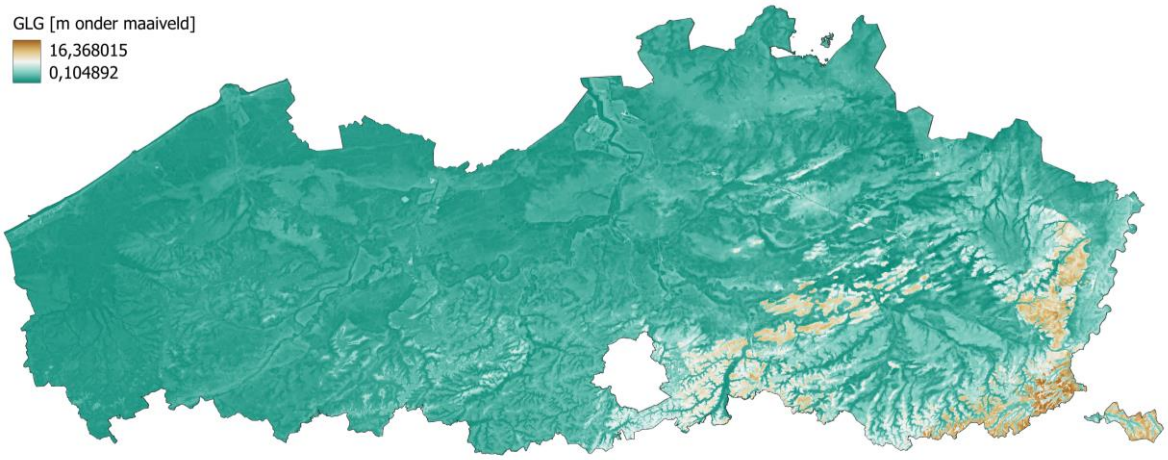
Een bespreking van elk van deze onderzoeksvragen staat beschreven in de aangegeven Secties.

### 3.8.2 Gebruiken we grondwatergegevens in mTAW of m-mv?

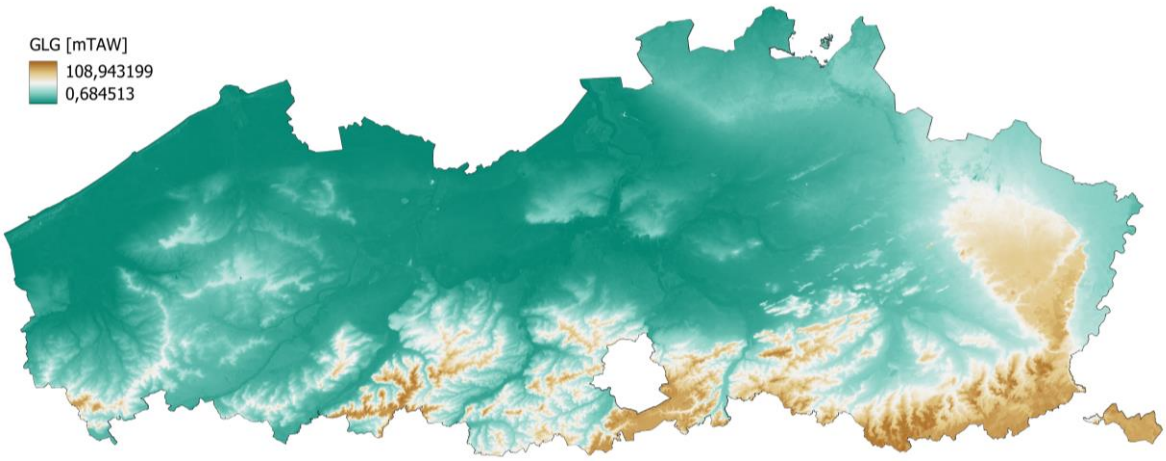
Hoewel grondwatergegeven standaard beschikbaar zijn en beschreven worden in meter onder maaiveld (m-mv), kan het ook nuttig zijn om deze te modelleren in mTAW. Het gebruik van mTAW kan mogelijk resulteren in een 'gladder' oppervlak, waarbij sprongen minder duidelijk aanwezig zijn. Daar tegenover staat dat dezelfde lokale eigenschappen kunnen leiden tot een gelijkaardig peil in m-mv, ongeacht of dit zich op bv. 10 mTAW of 80 mTAW bevindt.

Om het gebruik van mTAW tegenover m-mv te evalueren, beschouwen we enkel tussentijdse GLG-kaarten. Deze zijn opgemaakt met een andere combinatie aan verklarende kaartlagen dan de uiteindelijk beschikbare set, maar de belangrijkste conclusie zouden hierdoor niet beïnvloed mogen worden. Om deze reden zal er echter ook niet ingegaan worden op de onderliggende kaartlagen.

Als we als eerste de opgemaakte kaarten bekijken (met GLG in m-mv in Figuur 16 en GLG in mTAW in Figuur 17) dan valt op te merken dat beide kaarten de grootschalige geologische structuur van Vlaanderen goed weergeven. Het valt daarbij echter wel op dat de GLG-m-mv-kaart een veel fijnschaligere structuur vertoont dan GLG-mTAW. Enkel op basis van deze kaart valt echter niet te duiden of dit een nadeel is: het is mogelijk dat dit geen probleem vormt bij een fijnere analyse van de kaart.

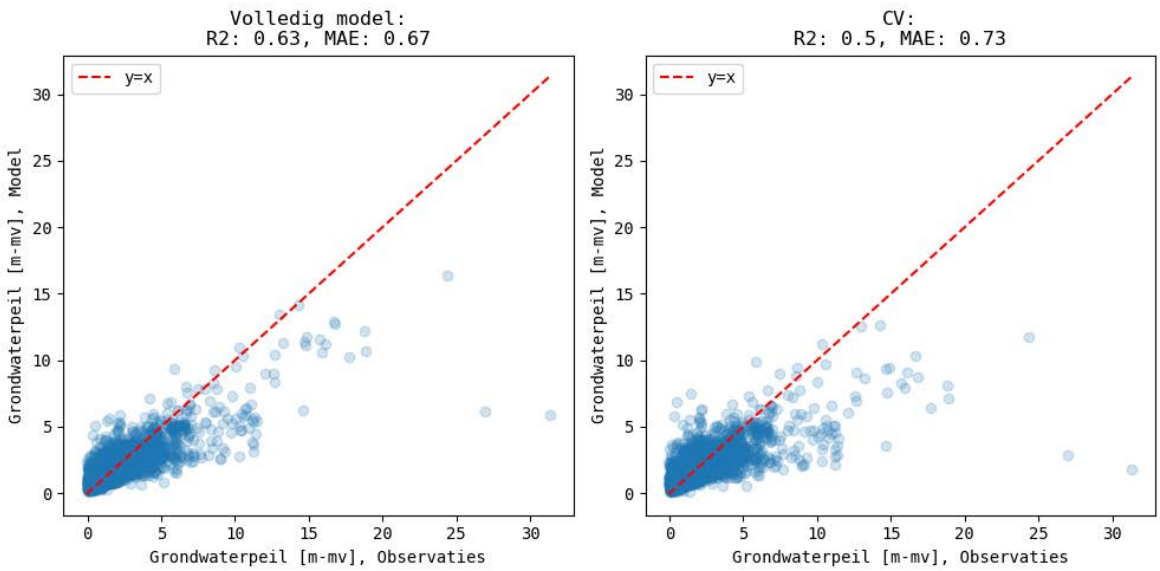



Figuur 16: Tussentijdse kaart voor GLG in m-mv.

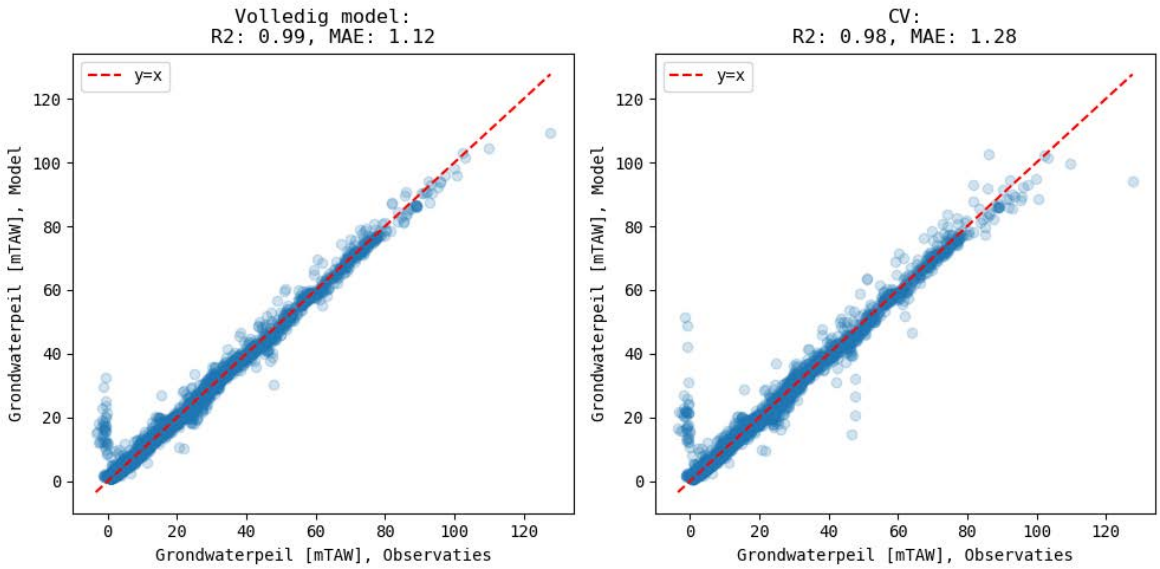



Figuur 17: Tussentijdse kaart voor GLG in mTAW.

Om de kwaliteit van het model te duiden, is het relevanter om de nauwkeurigheidsstatistieken te beschouwen. Deze staan in Figuur 18 en Figuur 19, voor respectievelijk GLG in m-mv en in mTAW. Bij deze figuren valt meteen op dat de $R^2$-waarde veel groter is voor de GLG in mTAW (0,99 voor het volledige model dan voor de GLG in m-mv (0,63 voor het volledige model). Bij GLG-mTAW liggen de punten dan ook veel nauwer nabij de y=x-as, wat impliceert dat voor de meeste punten de gemodelleerde waarde de effectieve waarde goed benadert. Een belangrijke nuance hierbij is wel dat het over de 'meeste' punten gaat: een aanzienlijk aantal punten met een laag peil in mTAW kan niet correct gemodelleerd worden (zie links op de figuren voor GLG in mTAW). Dit uit zich ook in een grotere MAE (1,12 voor GLG in mTAW tegenover 0,67 voor GLG in m-mv) en een grotere RMSE (niet op de figuur: 2,31 voor GLG in mTAW tegenover 1,35 voor GLG in m-mv). Hoewel de scatter plots voor GLG in m-mv dus een grotere spreiding vertonen, zijn ze wel evenwichtiger en zijn er geen grote uitschieters, op uitzonderlijke punten na. Dit alles lijkt te impliceren dat een modelfit in mTAW, waarbij de hoogte een belangrijke verklarende variabele is, voor een groot deel van de grondwaterpeilen weliswaar relevant is, maar ervoor zorgt dat de nuances bij de lagere grondwaterpeilen volledig verloren gaan. Dit was de dynamiek die ook enigszins naar voor kwam uit de kaarten.



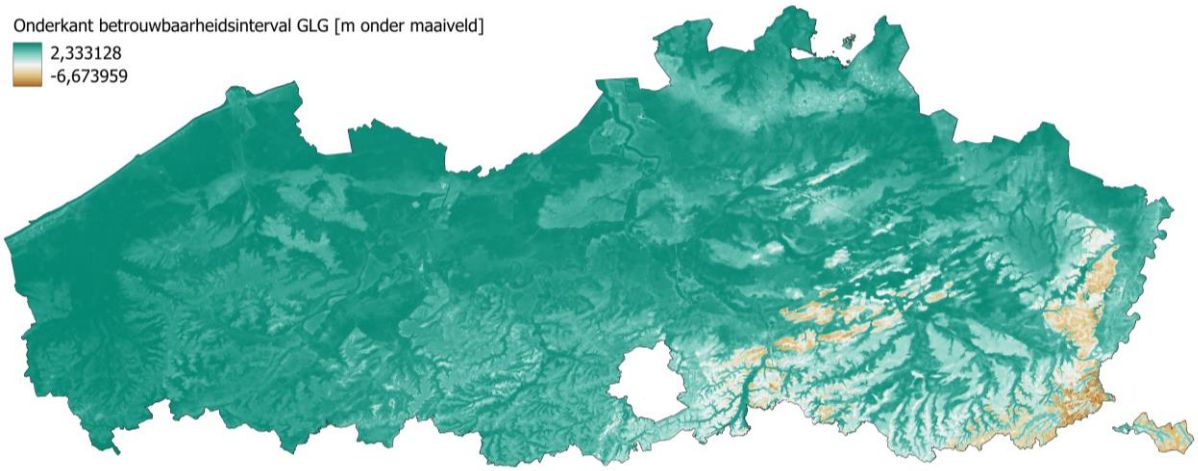

Figuur 18: Nauwkeurigheidsstatistieken voor GLG in m-mv, met de $R^2$, MAE en scatter plot voor zowel het volledige model als in crossvalidatie.



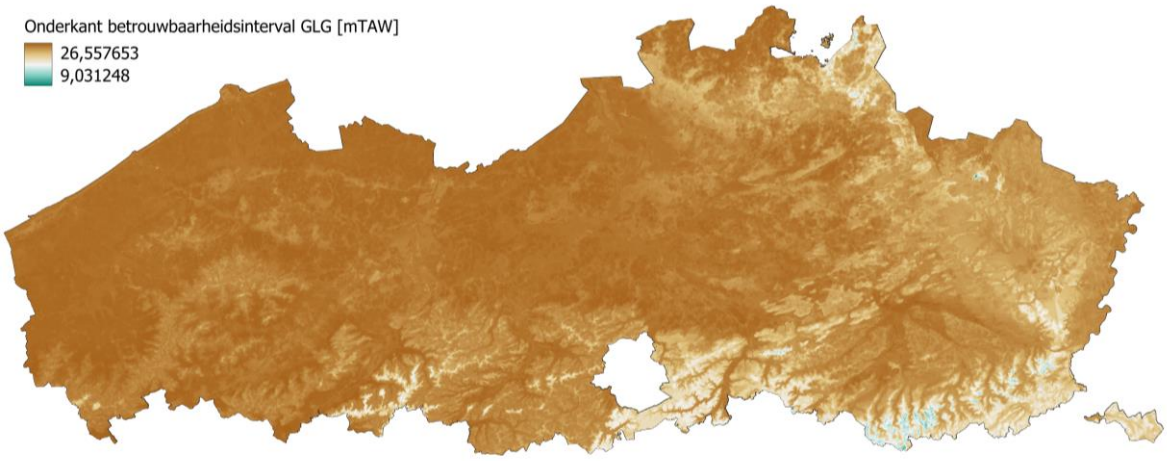

Figuur 19: Nauwkeurigheidsstatistieken voor GLG in mTAW, met de $R^2$, MAE en scatter plot voor zowel het volledige model als in crossvalidatie.

Als laatste is het relevant om naar de impact van de keuze van grondwaterdefinitie te kijken. Hiervoor staat in Figuur 20 en Figuur 21 de kaart met de onderkant van het betrouwbaarheidsinterval, en dit respectievelijk voor GLG in m-mv en GLG in mTAW. Het betrouwbaarheidsinterval zal in meer detail besproken worden in Sectie 4.5, maar hier is het alvast relevant om even stil te staan bij de waardes die dit betrouwbaarheidsinterval weergeeft. Bij GLG in m-mv ligt de onderkant van het betrouwbaarheidsinterval (wat omwille van de definitie het minst ondiepe punt waarop het GLG te verwachten is) afhankelijk van de locatie tussen 2,33 m onder het maaiveld en 6,67 m boven het maaiveld (wat betreft de tussentijdse kaart). Hoewel deze laatste waarde een grote onzekerheid aangeeft en op enkele locaties mogelijk onrealistische waardes impliceert, is dit een nog veel groter probleem in het geval van GLG in mTAW. Voor GLG in mTAW ligt de onderkant van het betrouwbaarheidsinterval, afhankelijk van de locatie, immers tussen 9,03 mTAW en 26,56 mTAW. Het laagste punt wordt maar op een beperkt aantal locaties bereikt. Deze

waardes worden sterk beïnvloed door de gemiddelde hoogte van (het grondwaterpeil) Vlaanderen (gezien in mTAW gerekend wordt), maar dit zorgt ervoor het betrouwbaarheidsinterval in grote delen van Vlaanderen (Vlaamse vallei, poldergebieden) boven het maaiveld uitkomt. Dit betekent dat het betrouwbaarheidsinterval in deze gebieden geen relevante indicatie van het grondwaterpeil kan geven, wat de analyse die reeds gemaakt was voor de nauwkeurigheidsstatistieken bevestigt.




Figuur 20: De onderkant van het betrouwbaarheidsinterval voor GLG in m-mv.




Figuur 21: De onderkant van het betrouwbaarheidsinterval voor GLG in mTAW.

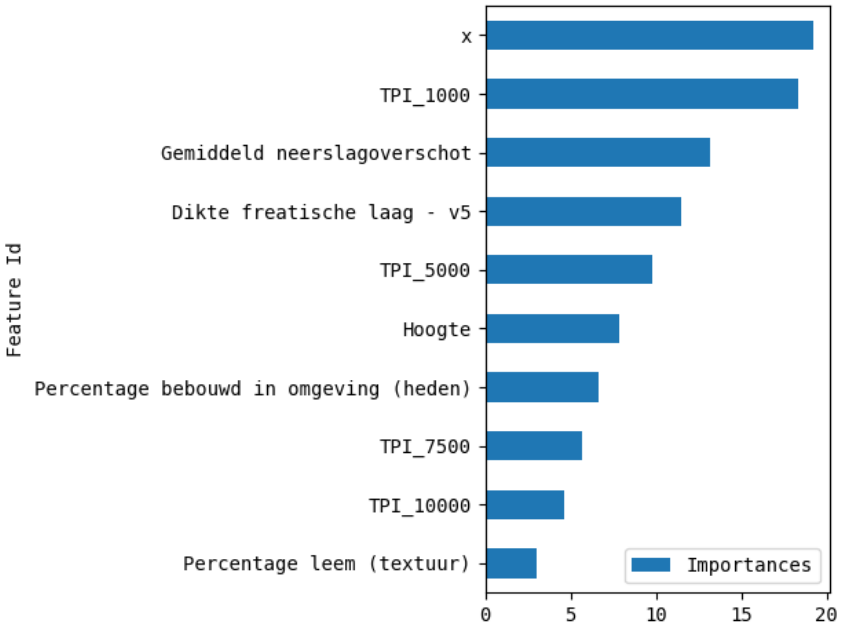
Wanneer de verschillende beschikbare gegevens samen beschouwd worden, moeten we besluiten dat het werken met grondwaterpeilen in mTAW grote onzekerheden impliceert. Hoewel deze werkwijze voor de hoger gelegen delen van Vlaanderen zeker relevante resultaten oplevert (en dus voor lokale studies geschikt kan zijn), zorgt dit voor sterke vertekeningen en foutieve inschattingen van het grondwaterpeil in de lager gelegen delen van Vlaanderen. Tegelijkertijd zijn dit net de regio's waar een correcte inschatting van het grondwaterpeil van groot belang is. **De finale kaarten zullen om deze reden in m-mv opgemaakt worden**.

### 3.8.3 Gebruik coördinaten

Zoals besproken in Sectie 2.3, is het vanuit het 'scorpan'-model niet onlogisch om ruimtelijke positie, i.e. coördinaten, te gebruiken als verklarende variabele. Hiermee kunnen immers dynamieken in kaart gebracht worden die met andere variabelen niet gecapteerd worden. Tegelijkertijd impliceert

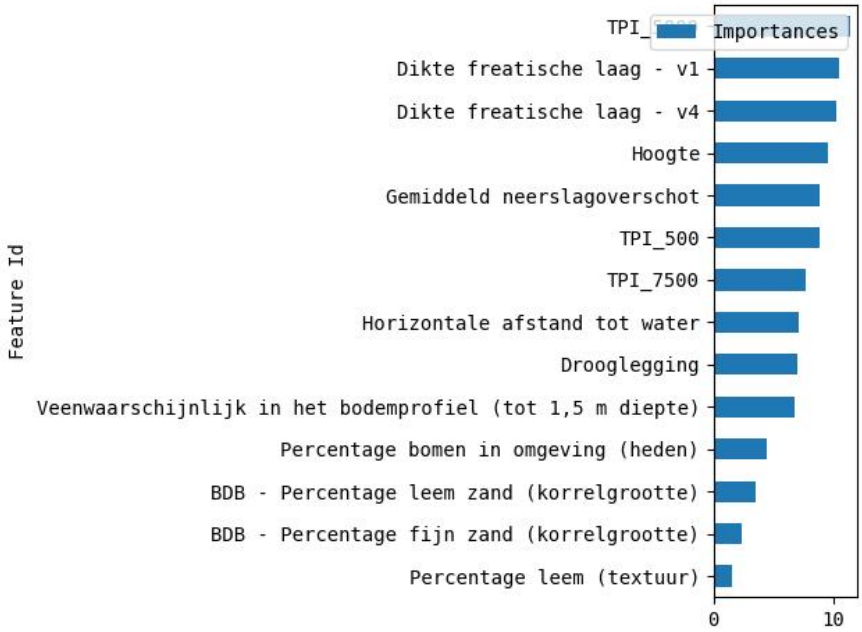
dit natuurlijk dat er een bepaalde verklarende variabele is die mist. Als het gebruik van de coördinaten een veel betere kaart oplevert dan een zonder, is het verantwoord om deze op te nemen als verklarende variabele. Als het resultaat zonder coördinaten echter amper verschilt van het resultaat met coördinaten, valt te verkiezen om zonder coördinaten te werk te gaan.

Deze vraag werd opnieuw aan de hand van het GLG in m-mv onderzocht. De kaart in Figuur 16 was opgemaakt met o.a. het x-coördinaat en had een $R^2$-waarde van 0,63 voor het volledige model. In Figuur 22 wordt het belang van de verschillende geselecteerde variabelen getoond, waarbij te zien valt dat het x-coördinaat het grootste belang heeft. Dit is niet onlogisch: gezien o.a. het reliëf (van laag naar hoog) en de bodemtextuur (van zand naar leem) een gradiënt vertonen in Vlaanderen, wordt hierdoor de grondwaterstand beïnvloed en zal het gebruik van het x-coördinaat dat reflecteren. Op deze manier wordt het echter moeilijker om bepaalde variabelen fysisch te duiden.

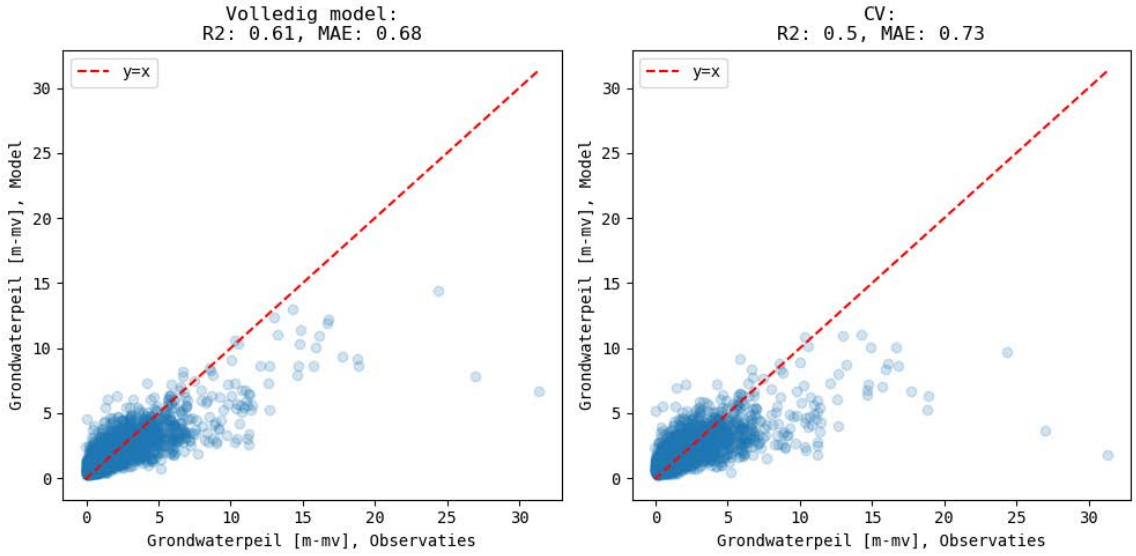



Figuur 22: Belang van de verschillende verklarende variabelen in de tussentijdse kaart van GLG in m-mv.

Als vergelijking is een nieuwe modelfit voor GLG in m-mv opgemaakt. In deze tweede tussentijdse kaart zijn de coördinaten niet meer gebruikt. Als we voor deze modelfit naar de invloed van verschillende variabelen kijken (Figuur 23) valt op dat er door het niet weerhouden van de coördinaten al een heel andere combinatie van verklarende kaartlagen geselecteerd wordt: onder andere de kaartlagen die de invloed van drainage weergeven ('Drooglegging' en 'Horizontale afstand tot water') worden nu geselecteerd. De vraag hierbij blijft echter hoe deze selectie van variabelen de kwaliteit van de modelfit beïnvloedt. Figuur 24 geeft aan de hand van de nauwkeurigheids-statistieken meer inzicht hierin. Hierbij blijkt dat de $R^2$-waarde voor het volledige model 0,61 bedraagt (en beperkt verschil met het model met coördinaten) en voor de crossvalidatie 0,5 (geen verschil met het model met coördinaten). Voor de MAE geldt eveneens dat het verschil met het model met coördinaten zeer beperkt is. Hieruit valt te besluiten dat **het gebruik van de coördinaten geen noodzaak is om een goede modelfit te bekomen**. Voor de finale modelfit zullen deze dan ook niet weerhouden worden en zullen dus maar 60 kaartlagen gebruikt worden.




Figuur 23: Belang van de verschillende verklarende variabelen in de tussentijdse kaart van GLG in m-mv zonder gebruik van coördinaten.

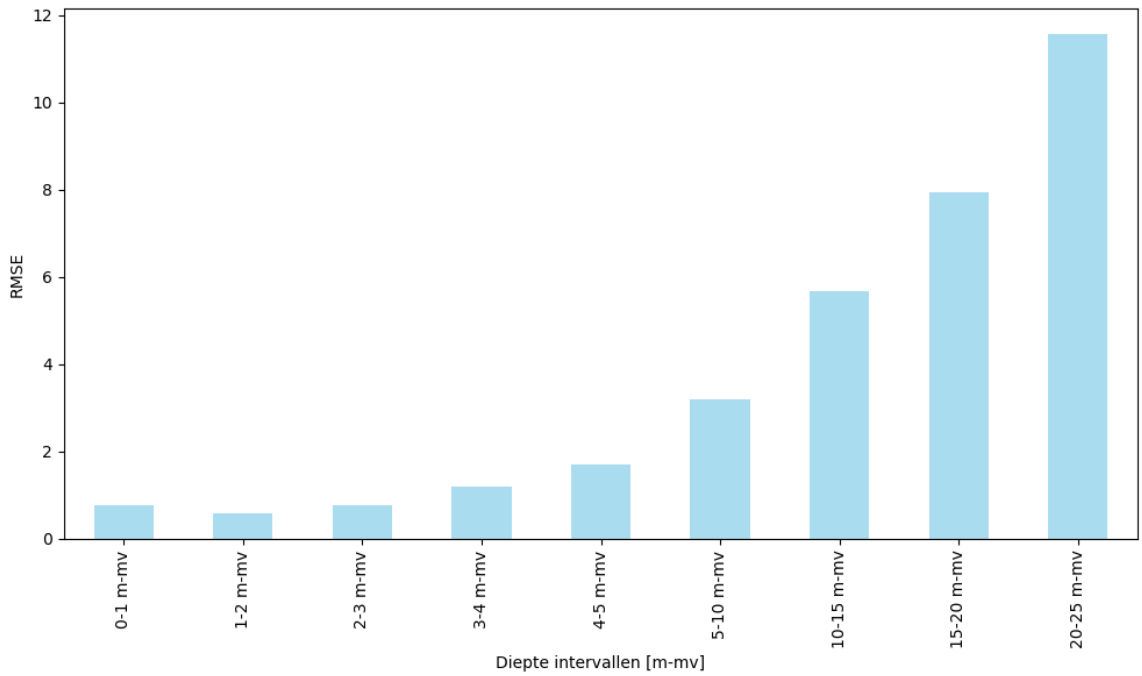



Figuur 24: Nauwkeurigheidsstatistieken voor GLG in m-mv, zonder gebruik van coördinaten, met de $R^2$, MAE en scatter plot voor zowel het volledige model als in crossvalidatie.

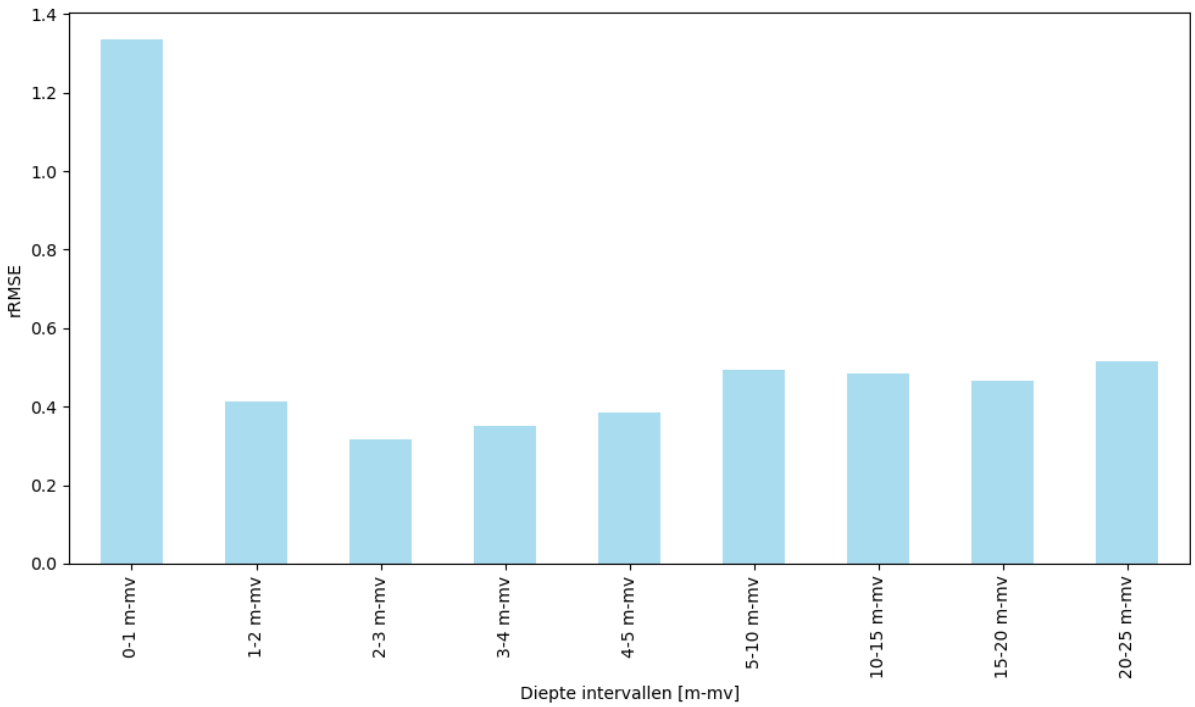
### 3.8.4 Gebruik relatieve RMSE

Gezien er een grote variëteit aan grondwaterdieptes gemodelleerd moet worden, kan het van belang zijn om als objectieffunctie een relatieve RMSE-waarde te gebruiken. Hierdoor wordt de RMSE-waarde beter geoptimaliseerd over de verschillende dieptes heen. De vraag is echter of dit nodig is en wat de relatieve RMSE-waardes zijn voor verschillende grondwaterdieptes, indien de klassieke RMSE gebruikt wordt als objectieffunctie. Om deze vraag te beantwoorden, hebben we RMSE en relatieve RMSE van de tussentijdse GLG in m-mv (waarvan de kaart getoond is in Figuur 16) voor verschillende grondwaterdieptes weergegeven in respectievelijk Figuur 25 en Figuur 26. Hierbij is de relatieve RMSE niet gebruikt als objectieffunctie, maar achteraf berekend door de RMSE

te delen door de gemiddelde waarde van de observaties (per diepte-interval). In Figuur 25 is duidelijk te zien dat de RMSE in absolute waardes toeneemt naarmate een dieper interval beschouwd wordt (met een RMSE van ongeveer 12 m voor het diepste interval). Als deze trend ook zou terugkeren (of zou omkeren) voor de relatieve RMSE, zou dit betekenen dat te veel gewicht gegeven zou worden aan diepe of aan ondiepe grondwaterstanden. Figuur 26 geeft aan dat de relatieve RMSE echter geen trend vertoont. Enkel het meest ondiepe grondwaterinterval vertoont een hoge relatieve RMSE, met een gemiddelde RMSE die iets meer dan 1,2 keer de gemiddelde geobserveerde waarde bedraagt. Gezien de zeer ondiepe waardes voor dit interval, is dit echter niet onlogisch en moeilijk te vermijden. Wanneer de andere grondwaterintervallen ook beschouwd worden, blijkt dat de relatieve RMSE eerder constant blijft over deze verschillende intervallen heen, met RMSE-waardes die voor elk interval ongeveer 0,3 tot 0,4 keer de waarde van de gemiddelde observatie voor dit interval bedragen. **De afwezigheid van een trend over de verschillende intervallen impliceert dat de RMSE als objectieffunctie voldoende robuust is** en dat een strengere objectieffunctie op basis van de relatieve RMSE niet nodig is.




Figuur 25: RMSE voor het tussentijdse GLG in m-mv, voor verschillende diepte-intervallen. De gebruikte intervallen zijn een GLG van 0 tot 1 m-mv, 1 tot 2 m-mv, 2 tot 3 m-mv, 3 tot 4 m-mv, 4 tot 5 m-mv, 5 tot 10 m-mv, 10 tot 15 m-mv, 15 tot 20 m-mv en 20 tot 25 m-mv.




Figuur 26: Relatieve RMSE voor het tussentijdse GLG in m-mv, voor verschillende diepte-intervallen. De gebruikte intervallen zijn een GLG van 0 tot 1 m-mv, 1 tot 2 m-mv, 2 tot 3 m-mv, 3 tot 4 m-mv, 4 tot 5 m-mv, 5 tot 10 m-mv, 10 tot 15 m-mv, 15 tot 20 m-mv en 20 tot 25 m-mv.

## 3.9 CONCLUSIES

Het blijkt mogelijk om met de werkwijze die op basis van de desktopanalyse het beste van beide eerdere studies combineerde, een degelijke werkwijze op te stellen die het mogelijk maakt om een inschatting te maken van de langetermijngrondwaterstanden in Vlaanderen. Door de Pastasmodellering en de verwerking van de incidentele metingen te combineren, zijn er 5155 filters met GxG-waardes die als *ground truth* gebruikt kunnen worden om modellen op te stellen. Door deze te combineren met 60 potentiële verklarende kaartlagen, is het mogelijk om deze modellen op te stellen op een manier die fysisch verklaarbaar is. Hierbij blijkt het niet nodig te zijn om coördinaat-waardes te gebruiken als verklarende kaartlaag.

Een robuust model kan bijkomend opgesteld worden op basis van de RMSE als objectieffunctie, en wordt het beste opgesteld door grondwaterpeilen in m-mv te beschouwen. Hoewel grondwaterpeilen in mTAW lokaal een meerwaarde kunnen bieden, zorgen deze voor een te slechte modelfit in de laaggelegen delen van Vlaanderen. **Finaal zijn in dit project dan ook kaarten voor GLG en GHG opgesteld worden door een model op te maken in m-mv**. Deze finale resultaten zullen besproken worden in Sectie 4.

# 4 RESULTATEN

## 4.1 INLEIDING

Uit de desktopanalyse (Sectie 2) en enkele onderzoeksvragen (Sectie 3) kwam een werkwijze naar voor die op redelijke wijze als de best mogelijke combinatie van de eerdere werkwijze beschouwd kan worden. Om het finale resultaat van deze werkwijze goed te beoordelen, moeten verschillende facetten naast elkaar gelegd worden. Deze worden daarom in de volgende secties besproken:

- In Sectie 4.2 wordt een algemene visuele analyse van de geproduceerde kaarten besproken.
- In Sectie 4.3 wordt deze analyse verder onderbouwd door dieper in te gaan op de geselecteerde kaartlagen.
- In Sectie 4.4 wordt besproken tot welke nauwkeurigheid de modelfit leidt.
- In Sectie 4.5 wordt de onzekerheid besproken.
- In Sectie 4.6 wordt de impact van de werkwijze op randeffecten en sprongen besproken.
- In Sectie 4.7 wordt een vergelijking gemaakt met de vorige studies.
- In Sectie 4.8 worden ten slotte alle puzzelstukken samengelegd om te duiden hoe deze kaarten bijdragen tot een beter inzicht in het grondwaterpeil in Vlaanderen.

## 4.2 ALGEMEEN OVERZICHT KAARTEN

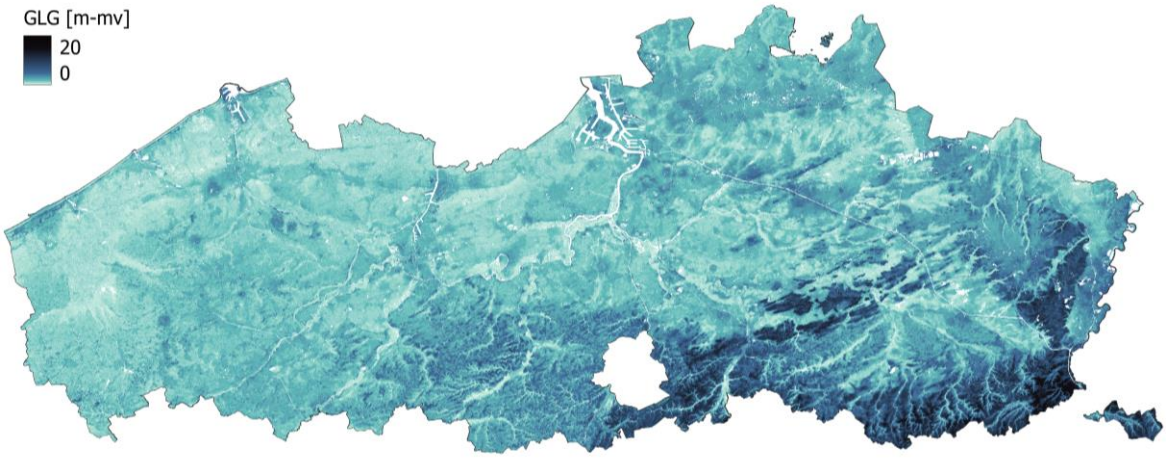
### 4.2.1 Inleiding

Om een globaal inzicht te krijgen in het eindresultaat, is het nuttig om eerst naar de geproduceerde kaarten (met resolutie 5 x 5 m) te kijken. Dit laat toe om te analyseren of op de schaal van Vlaanderen de verwachte grondwaterstanden (i.f.v. de geologische structuur en andere grootschalige structuren) goed gereproduceerd zijn. Dit wordt voor GLG en GHG besproken in respectievelijk Secties 4.2.2 en 4.2.3.

Gezien het de bedoeling is dat naast de kaart van 5 x 5 m ook andere resoluties beschikbaar zijn, wordt de herschaling van de kaarten in Sectie 4.2.4 vervolgens ook kort besproken. Finaal worden in Sectie 4.2.5 enkele eerste conclusies gegeven.

### 4.2.2 GLG

De kaart voor GLG in m-mv is getoond in Figuur 27. Deze kaart is opgemaakt door elk van de geselecteerde kaartlagen te gebruiken om een gebiedsdekkende kaart op te maken, waarna de waterlopen uitgefilterd worden. Deze filtering is gebaseerd op de waterlopen zoals beschikbaar in het GRB en de watervlakken op basis van de watervlakkenkaart (Leyssen, et al., 2024). Op deze figuur valt te zien hoe de waardes van het GLG sterk kunnen variëren, waarbij de diepste waardes bereikt worden op de heuveltoppen in het (zuid-)oosten van Vlaanderen. Over het algemeen lijkt het GLG hiermee de grootschalige geologie van Vlaanderen goed te volgen: de Vlaamse vallei en de polders hebben over het algemeen ondiepere waterpeilen, de Vlaamse Ardennen, Kempen, Kempens Plateau, het Hageland… vertonen diepere peilen. In deze regio’s is tegelijkertijd de invloed van beek- en riviervalleien duidelijk merkbaar, zoals bij de Bosbeek op het Kempens Plateau of de Dijlevallei ten zuiden van Leuven.

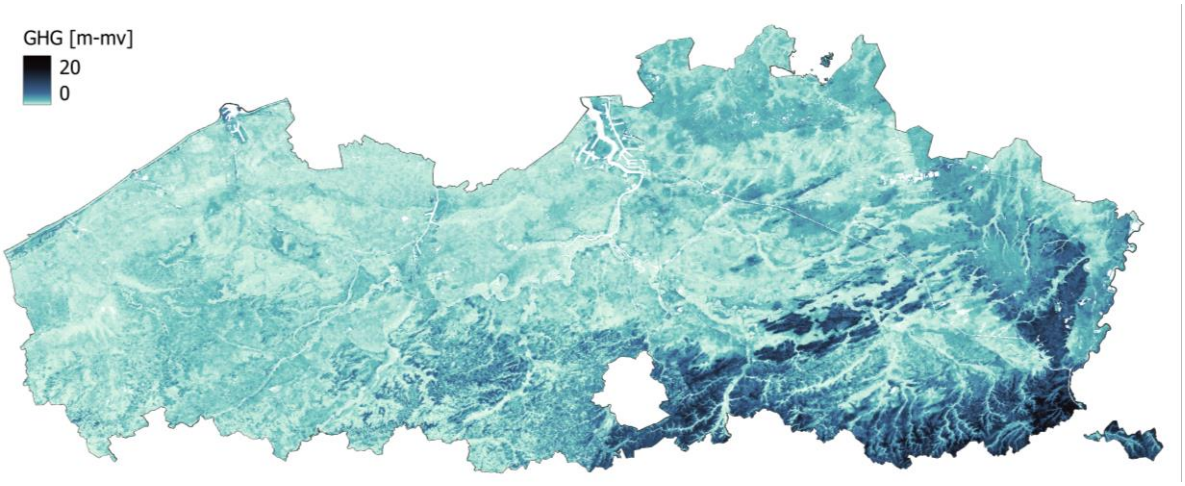



Figuur 27: GLG in m-mv (5 x 5 m).

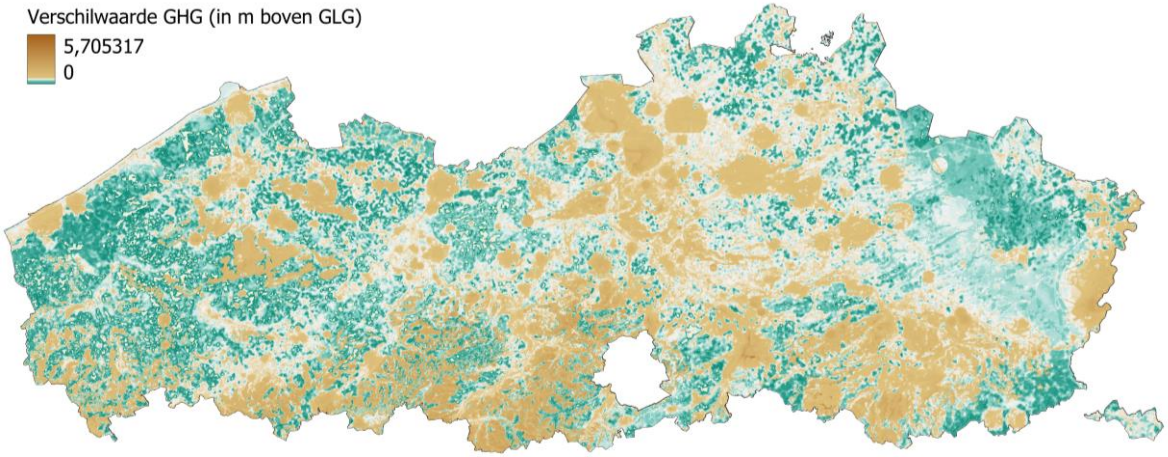
Wat bij het GLG licht merkbaar is, is de invloed van grondwaterwinningen. Zeker in West-Vlaanderen en in de buurt van Antwerpen, waar de peilen over het algemeen ondiep zijn, zijn de cirkels ten gevolge van de selectie van de kaart met grondwaterwinningen merkbaar. De invloed van de grondwaterwinningen zal ook verder besproken worden in Secties 4.3 en 4.6.

### 4.2.3 GHG

In Figuur 28 is de kaart van het GHG in m-mv, met een resolutie van 5 x 5 m, te zien. Gezien deze kaart opgebouwd is door de kaart van het GLG te combineren met de gemodelleerde verschilwaardes, volgt deze kaart net als het GLG de verwachte geologie van Vlaanderen goed. De waardes liggen om die reden ook binnen dezelfde grootteorde als die van het GHG. Het is om die reden relevant om wat GHG betreft niet alleen de finale kaart te beschouwen, maar ook de kaart met de verschilwaardes te bekijken. Deze kaart is getoond in Figuur 29. Voor een groot deel van Vlaanderen zijn de verschillen tussen GLG en GHG eerder klein, al kan dit lokaal wel oplopen volgens de kaart. Opvallend is dat in een beperkt aantal gevallen een negatieve verschilwaarde, i.e. een GHG-waarde die finaal lager is dan het GLG, gemodelleerd is. Deze negatieve verschilwaardes worden verwerkt en naar 0 m verschil gecorrigeerd. Negatieve verschilwaardes zijn fysisch onmogelijk en komen daarom ook niet voor in de *ground truth*-waardes. Het beperkte voorkomen van gemodelleerde negatieve verschilwaardes geeft aan dat het moeilijk is om de GHG-waardes correct in te schatten. Als laatste valt ook nog op dat de impact van de grondwaterwinningen nog explicieter aanwezig is in deze kaart: in heel Vlaanderen vallen de cirkels ten gevolge hiervan waar te nemen, en zeker in de Kempen zijn deze op kaart goed waarneembaar. We gaan dieper in op de invloed van grondwaterwinningen in Sectie 4.3.3, met de informatie van de geselecteerde kaartlagen mee in het achterhoofd.




Figuur 28: GHG in m-mv (5 x 5 m).

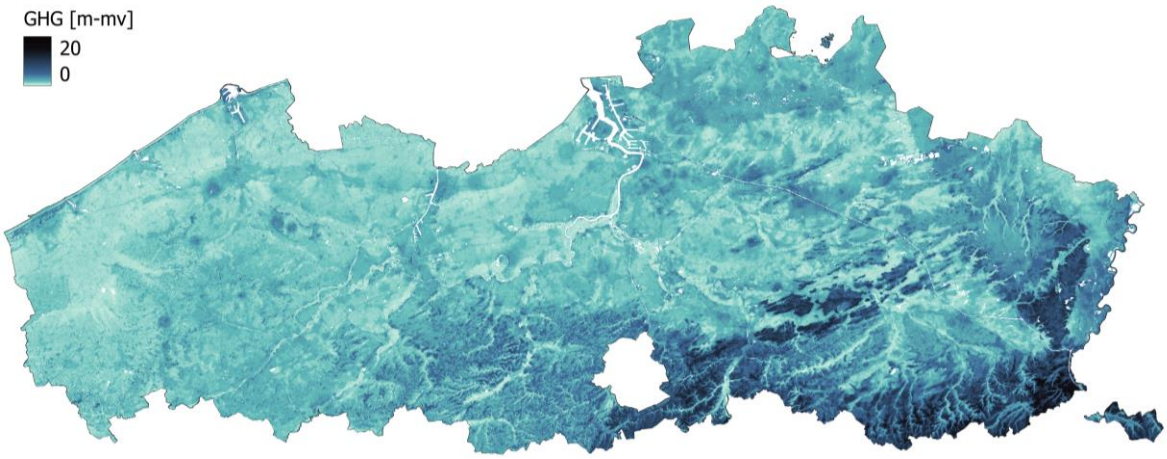



Figuur 29: Verschilwaardes van het GHG voor een resolutie van 5 x 5 m. Merk op dat bij deze kaart geen filtering voor de waterlopen is uitgevoerd.

### 4.2.4 Herschaling naar ruwere resoluties

Gezien als eindresultaat van dit project ook kaarten met resoluties van 10 x 10 m, 25 x 25 m, 50 x 50 en 100 x 100 m beschikbaar zijn, is het relevant om te duiden hoe deze kaarten opgemaakt worden op basis van de oorspronkelijk kaart. De kaart van 5 x 5 m dient telkens als basis om de andere resoluties aan te maken, waarbij deze kaart geresampled wordt naar de ruwere resoluties. Hierbij wordt telkens het gemiddelde genomen van alle cellen van de oorspronkelijke kaart die binnen de nieuwe cel komen te liggen. Bij de kaarten van 10 x 10 m en 25 x 25 m wordt de filtering voor de waterlopen ook uitgevoerd, bij de kaarten van 50 x 50 m en 100 x 100 m wordt deze achterwege gelaten omdat dit een te grote invloed uitoefent op de beschikbare informatie.

Als voorbeeld van een kaart met ruwere resolutie wordt in Figuur 30 de kaart voor 25 x 25 m getoond. Deze vertoont correct dezelfde dynamieken als de kaart met resolutie 5 x 5 m (Figuur 27), al valt op dat de fijnschalige structuur al enigszins beïnvloed wordt door de filtering van waterlopen.




Figuur 30: GLG in m-mv (25 x 25 m).

### 4.2.5 Conclusies

Hoewel enkel op basis van een visuele analyse van de kaartlagen geen finale uitspraken gedaan kunnen worden, valt wel al te besluiten dat het verloop van de grondwaterdiepte logisch lijkt o.b.v. kenmerken als topografie en de dikte van de freatische aquifer. Tegelijkertijd valt zelfs voor een visuele analyse al op dat bepaalde kaartlagen (zoals de grondwaterwinning) een grote invloed kunnen hebben. De analyse van de geselecteerde kaartlagen laat toe om nog meer inzicht in deze dynamiek te verkrijgen.

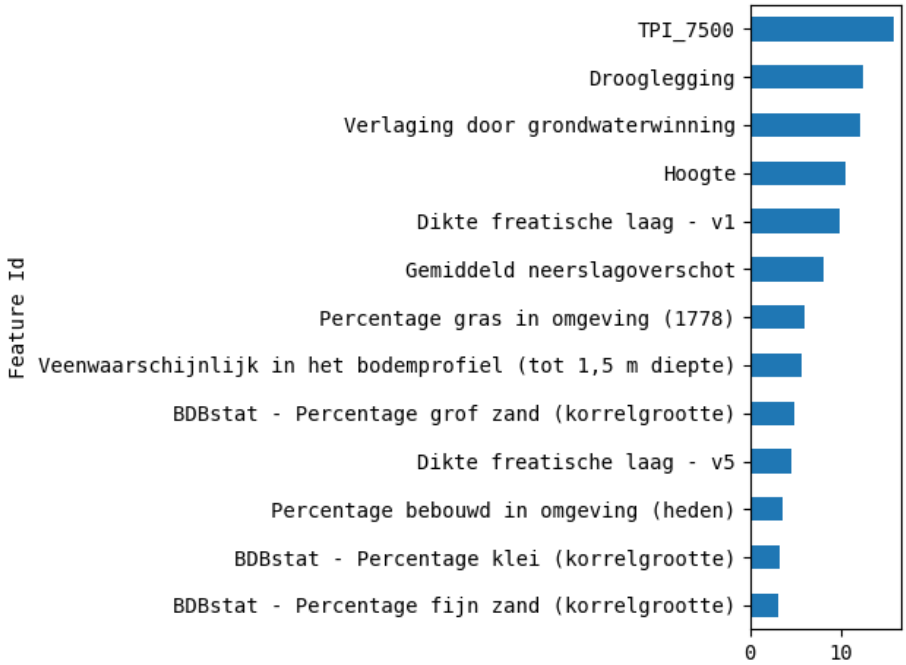
## 4.3 GESELECTEERDE KAARTLAGEN

### 4.3.1 Inleiding

Om te begrijpen hoe de kaarten getoond in Sectie 4.2opgebouwd zijn, is het relevant om na te gaan welke kaartlagen geselecteerd zijn als verklarende kaartlaag. Zoals beschreven in Secties 2.4.4 en 3.7 vindt de selectie plaats aan de hand van *forward selection*, waarbij eerst de meest verklarende kaartlaag wordt geselecteerd, vervolgens de tweede meest verklarende kaartlaag, enzovoort. Dit gaat door tot de selectie van bijkomende kaartlagen (met een lichte marge) geen verbetering meer vertoont. Deze selectie vindt echter plaats op basis van de RMSE. Afhankelijk van de filter waarop het model opgemaakt wordt, kan de kaartlaag nog meer of minder invloed hebben. Dit wordt goed in kaart gebracht door de SHAP-waardes (Lundberg & Lee, 2017), die toelaten om te analyseren hoe het model opgebouwd is. De SHAP-waardes geven voor elke kaartlaag aan hoe groot de invloed op het eindresultaat van de modellering voor verschillende punten is. Dit betekent dat een kaart een grote invloed kan hebben, maar dat de spreiding op deze invloed beperkt is. Evengoed kan een kaartlaag voor een aantal punten een zeer grote invloed hebben. Aan de hand van de SHAP-analyses voor GLG (Sectie 4.3.2) en GHG (Sectie 4.3.3) zal dit verder besproken worden. Om een algemener inzicht te krijgen in deze dynamiek, wordt ook de ‘feature importance’ gegeven, wat eveneens in deze secties besproken zal worden. De feature importance, of het belang van de kaartlaag, geeft aan in welke mate een bepaalde verklarende kaartlaag gemiddeld bijdraagt aan het eindresultaat. Waar de feature importance dus het gemiddeld belang van een kaartlaag helpt te duiden, geven de SHAP-waardes ook aan hoe het belang verspreid is over de verschillende observaties. Enkele conclusies op basis hiervan, zullen in Sectie 4.3.4 gegeven worden.

### 4.3.2 GLG

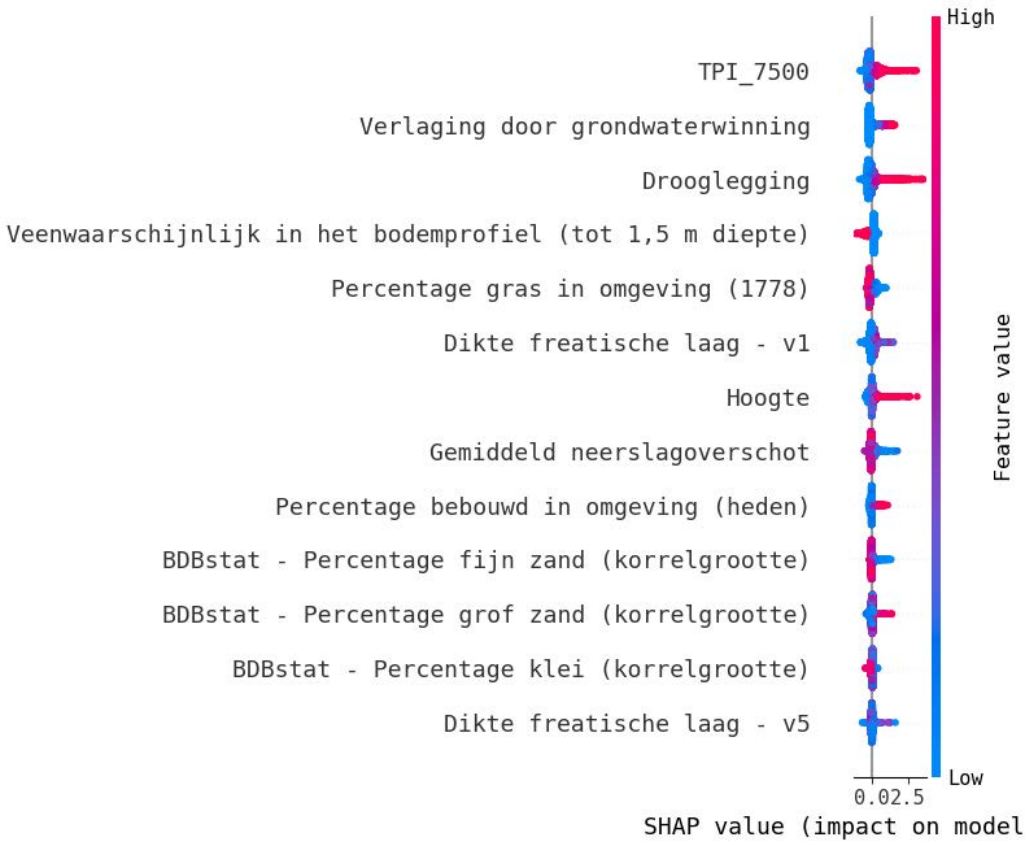
Het belang van de verschillende kaartlagen voor de GLG-kaart wordt getoond in Figuur 31. Hieruit blijkt dat er enerzijds verschillende te verwachten kaartlagen gekozen worden. De geselecteerde kaarten bevatten immers onder andere kaartlagen die de topologie (TPI_7500, hoogte), geologie (dikte van de freatische laag) en bodemtextuur (BDB-stat-kaarten) weergeven, waarbij verschillende van deze kaarten een grote impact hebben. Dat was te verwachten, gezien de kaart in Figuur 27 het verloop van de grondwaterdiepte logisch weergeeft. Anderzijds zijn er ook verschillende kaartlagen geselecteerd waar het relevant is om even bij stil te staan. Zo zijn 'drooglegging' en 'verlaging door grondwaterwinning' geselecteerd en hebben deze na TPI_7500 het grootste belang, wat impliceert dat de menselijke invloed zeer relevant is om de grondwaterpeilen te verklaren. Daarnaast is zowel een historische kaart als de veenwaarschijnlijkheidskaart geselecteerd. Dit geeft aan dat beide kaartensets een relevante indicatie geven van de grondwaterpeilen. In beide gevallen is dat fysisch te verklaren: het percentage gras in de omgeving in 1778 vertoont een sterke correlatie met de aanwezigheid van valleigebieden met hoge grondwaterstanden (gezien droge gebieden eerder akkers zijn) en de aanwezigheid van veen in het bodemprofiel is eveneens sterk gecorreleerd met de aanwezigheid van een voldoende hoog grondwaterniveau. Als laatste blijkt ook het gemiddeld neerslagoverschot enige relevantie te hebben: de neerslagverschillen binnen Vlaanderen kunnen dus in enige mate de grondwaterpeilen verklaren.




Figuur 31: Belang van de verschillende kaartlagen (in aflopende volgorde) voor de GLG-kaart.

De invloed van de verschillende geselecteerde kaartlagen op het eindresultaat valt, zoals eerder besproken, nog beter te begrijpen aan de hand van de SHAP-waardes. Deze zijn voor het GLG-model weergegeven in Figuur 32. Deze grafiek moet als volgt gelezen worden: voor elke verklarende kaartlaag is de verdeling gegeven van de invloed van deze kaartlaag op elk van de punten in de observaties (de 5155 filters met GxG-waardes). Hoe groter de spreiding, hoe meer enkele punten zeer sterk beïnvloed zijn door deze kaartlaag. De x-as geeft daarbij aan of deze invloed positief of negatief is, en de kleurgradiënt geeft aan of de waarde van de features hoog (rood) of laag is. Dit leert ons bijvoorbeeld dat een grote waarde voor drooglegging een sterke positieve invloed heeft op diepe grondwaterstanden. Met andere woorden: een grote waarde voor drooglegging zal in de finale kaart resulteren in een diepe grondwaterstand. Dit is fysisch logisch te verklaren, wat aangeeft

dat de SHAP-waardes helpen om het finale resultaat fysisch te interpreteren. Een eveneens grote invloed is merkbaar voor TPI_7500, de hoogte en in enige mate voor de grondwaterwinning, wat fysisch gezien allemaal eveneens verklaarbaar is. Verder zal de aanwezigheid van veen in het bodemprofiel (rood) leiden tot een ondiepere grondwaterstand (negatief op de x-as). Opnieuw volgt dit bodemkundige logica. Voor de meeste geselecteerde kaartlagen is de spreiding relatief beperkt (in vergelijking met TPI, drooglegging of hoogte), maar het geheel samen geeft wel aan hoe de kaartlagen een fysische logica volgen, en dat bepaalde punten op de kaart wel sterk beïnvloed kunnen worden door één of enkele kaartlagen.

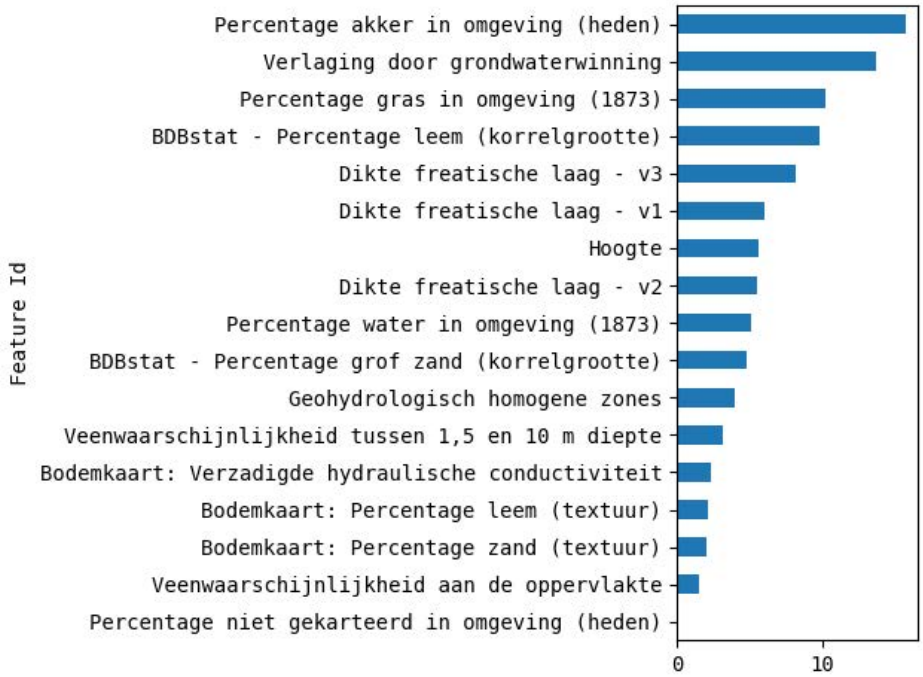



Figuur 32: SHAP-waardes voor de kaartlagen geselecteerd voor de GLG-kaart.

### 4.3.3 GHG

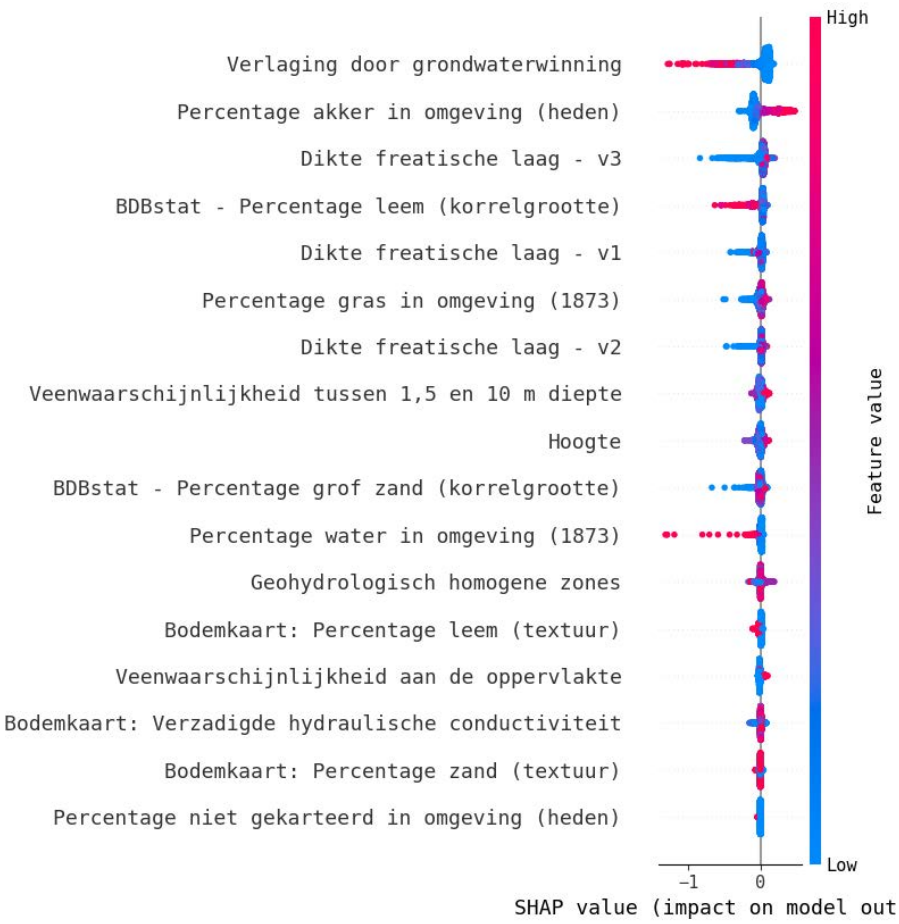
Het belang van de verschillende verklarende kaartlagen voor de opmaak van de GHG-kaart wordt getoond in Figuur 33. Let op: het gaat hierbij om de kaartlagen waarmee de verschilkaart is opgemaakt, gezien het verschil gemodelleerd is. Wat opvalt in vergelijking met het GLG (Figuur 31) is het grote aantal verklarende kaartlagen dat geselecteerd werd. Hierbij zijn opnieuw te verwachten kaartlagen, zoals geologische kaarten (geohydrologische homogene zones), hoogte en bodemeigenschappen (met zowel BDB-stat als bodemkaart-kaartlagen). Tegelijkertijd is het opvallend dat zowel bij de geologische kaarten als bij de bodemkaarten sterk gelijkende kaarten geselecteerd zijn: de subtiele verschillen tussen zowel de verschillende versies van de dikte van de freatische laag als tussen de BDB-stat-kaarten en textuurkaarten van de bodemkaarten blijken van belang te zijn. Naast deze logische kaarten, zijn er onder andere ook zowel hedendaagse als historische landgebruikskaarten geselecteerd. Hierbij vallen twee zaken op: enerzijds zijn zowel hedendaagse akkers (een indicatie voor droge zones) als gras in 1873 (een indicatie voor natte zones met een hoog GLG) zeer belangrijk voor het finale resultaat. Anderzijds wordt ook de kaart met het

percentage 'niet gekarteerd' in de omgeving geselecteerd. Deze kaart geeft, voor het heden, enkel aan hoe dicht een bepaald meetpunt bij de grens van Vlaanderen ligt. Dit geeft aan dat er in bepaalde grenszones mogelijk interacties of effecten zijn die door andere verklarende kaartlagen te weinig weergegeven worden. Net als bij het GLG, is ook de aanwezigheid van veen een relevante verklarende variabele voor het GHG, in die mate dat twee van de drie veenkaarten geselecteerd zijn. Als laatste, en volgens de grafiek een van de belangrijkste kaartlagen, is de verlaging door grondwaterwinning ook geselecteerd. Het belang van de winningen kwam al naar voor uit de fysische analyse van de kaart (zie onder andere Figuur 29), en wordt hiermee bevestigd.




Figuur 33: Belang van de verschillende kaartlagen (in aflopende volgorde) voor de GHG-kaart.

De SHAP-waardes (Figuur 34) voegen wel nog enige nuance toe aan de analyse van het belang van de kaartlagen. Zo blijken zowel hoge verlagingen van grondwaterwinningen als de aanwezigheid van water in 1873 te zorgen voor sterk negatieve waardes. Gezien de verschilwaardes negatief gedefinieerd zijn in het model, betekent dit dat er grote verschillen zijn. Voor de aanwezigheid van water valt te verklaren: nabij water kunnen er door de verschillen tussen winter- en zomerstanden grote verschillen zijn tussen GLG en GHG. De invloed van grondwaterwinningen is minder eenduidig en er kunnen verschillende factoren spelen, door de combinatie van type winning, het debiet, het regime, de natuurlijke grondwatertafel, het effect van de verlaging op de verdamping en drainage, ondergrond…. Daarnaast hoeft de impact van winningen op GLG en GHG hoeft niet noodzakelijk gelijk te zijn, zie van den Akker (2022). Kortom: de modelmatige output moet zeker nog aan de praktijk getoetst worden. Een relevante dynamiek vertoont ook het percentage leem volgens de BDB-stat-kartering: hoe meer leem, hoe groter de verschillen tussen GLG en GHG. Gezien leem voor een minder doorlatende bodem en dus minder drainage in het winterseizoen zorgt, is dit opnieuw niet onlogisch. Een omgekeerde dynamiek valt waar te nemen voor de dikte van de freatische laag: hoe dunner deze laag, hoe groter het verschil tussen GLG en GHG. Wat in vergelijking bij het GLG nog het meest opvalt, is dat de geselecteerde kaartlagen vooral een negatieve invloed hebben: gezien de negatieve definitie van de verschilwaarde is dit echter niet onlogisch. Enkel het percentage akker in de omgeving (in het heden) gaat hier tegenin: hoe meer akkers, hoe kleiner het verschil tussen GLG en GHG. Gezien akkers bij voorkeur een groot deel van het jaar droog zijn om ze kunnen bewerken, is dit opnieuw vanuit fysisch perspectief verklaarbaar.




Figuur 34: SHAP-waardes voor de kaartlagen geselecteerd voor de GHG-kaart.

### 4.3.4 Conclusies

Er is een grote verscheidenheid aan kaartlagen finaal geselecteerd, al behoren deze wel tot een beperkt aantal groepen: met behulp van bodemeigenschappen, meteorologie (enkel voor GLG) landgebruik, topologie, geologie en de menselijke invloed (door drooglegging en grondwaterwinning), worden de grondwaterpeilen schijnbaar al goed weergegeven. Hierbij valt als eerste op dat met deze selectie aan kaartlagen zowat het volledige 'scorpan'-model gecapteerd wordt, er mee rekening houden dat de coördinaten finaal niet weerhouden zijn. Tegelijkertijd voldoet scorpan zeker niet: om grondwaterpeilen correct weer te geven, is de menselijke invloed belangrijk en dit in zo'n mate dat enkel landgebruik niet volstaat. Als tweede valt op dat de nieuwe kaartlagen (BDB-stat, veenwaarschijnlijkheid, historisch landgebruik) een grote relevantie blijken te hebben en voor zowel GLG en GHG verschillende keren geselecteerd wordt. Dit geeft aan dat deze kaarten helpen om hiaten in te vullen die enkel met de set aan kaartlagen zoals eerder gebruikt, mogelijk niet ingevuld konden worden.

## 4.4 NAUWKEURIGHEID

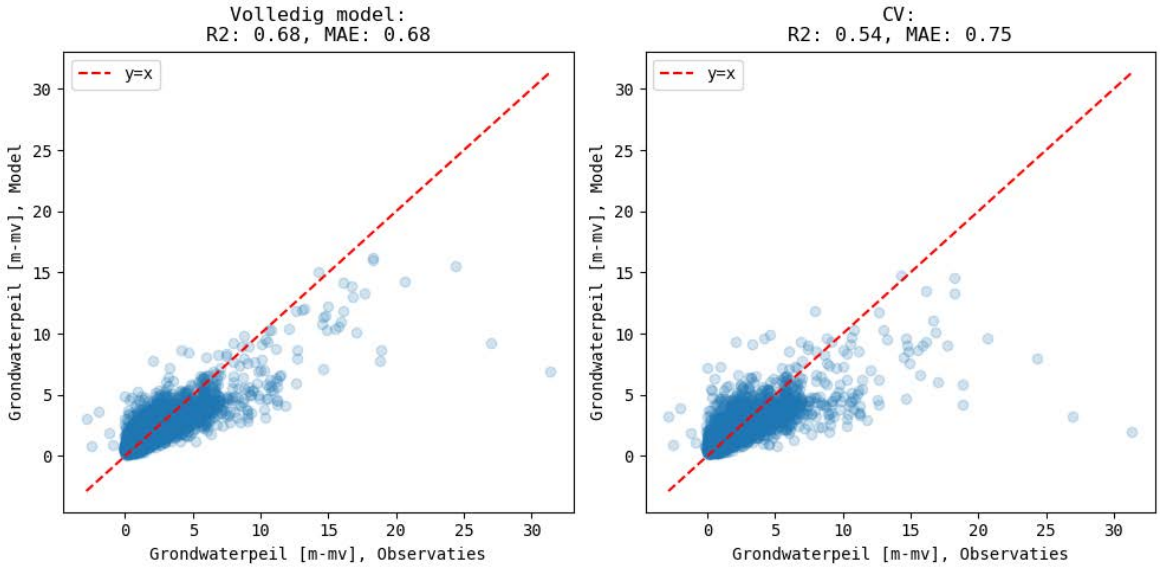
### 4.4.1 Inleiding

Om de nauwkeurigheid te beoordelen, zijn de $R^2$-waarde, RMSE en MAE van belang. Deze helpen om in te schatten in welke mate de selectie aan kaartlagen zoals besproken in Sectie 4.3 effectief tot een relevant resultaat leidt. Deze zullen voor GLG (Sectie 4.4.2) en GHG (Sectie 4.2.3) globaal besproken worden in functie van het opgestelde model, en tevens per diepte-interval. Om in te

kunnen schatten hoe bruikbaar de GxG-kaarten zijn voor verschillende doeleinden is het immers relevant om in te kunnen schatten wat de kwaliteit van de modellen voor verschillende dieptes is.

### 4.4.2 GLG

De nauwkeurigheidsstatistieken voor GLG en de bijhorende grafieken worden getoond in Figuur 35. Deze resultaten liggen in lijn met deze eerder getoond voor de tussentijdse resultaten (Figuur 18), al is door toevoeging van bijkomende kaartlagen het resultaat wel nog licht verbeterd (waarbij vooral de $R^2$ verbeterd is). Op enkele uitschieters na, liggen de resultaten dicht bij de y=x-as. Deze uitschieters geven wel aan dat het model moeite heeft met de diepere grondwaterstanden en deze moeilijk correct kan weergeven. Hoewel het hierbij maar over een beperkt aantal punten lijkt te gaan, gaat dit in oppervlakte van Vlaanderen natuurlijk over een grotere regio, namelijk de diepe grondwaterstanden onder plateaus en heuveltoppen in Figuur 27. Hiermee dient wel rekening gehouden te worden bij de analyse en het gebruik van de kaarten.




Figuur 35: Nauwkeurigheidsstatistieken voor GLG in m-mv, met de $R^2$, MAE en scatter plot voor zowel het volledige model als in crossvalidatie.

Globaal gezien geven de resultaten aan dat het model een redelijke performantie vertoont, met een $R^2$-waarde die voor het volledige model 0,68 bedraagt en in crossvalidatie nog steeds boven 0,5 uitkomt. De globale MAE is met ruim 0,5 m relatief groot, zeker voor de ondiepere grondwaterstanden. De MAE wordt sterk beïnvloedt door afwijkingen op de diepere grondwaterstanden. De RMSE bedraagt voor het volledige model 1,15 m, maar hierbij is de invloed van de uitschieters echter nog relevanter. Finaal oogt dit hiermee als een redelijk model.

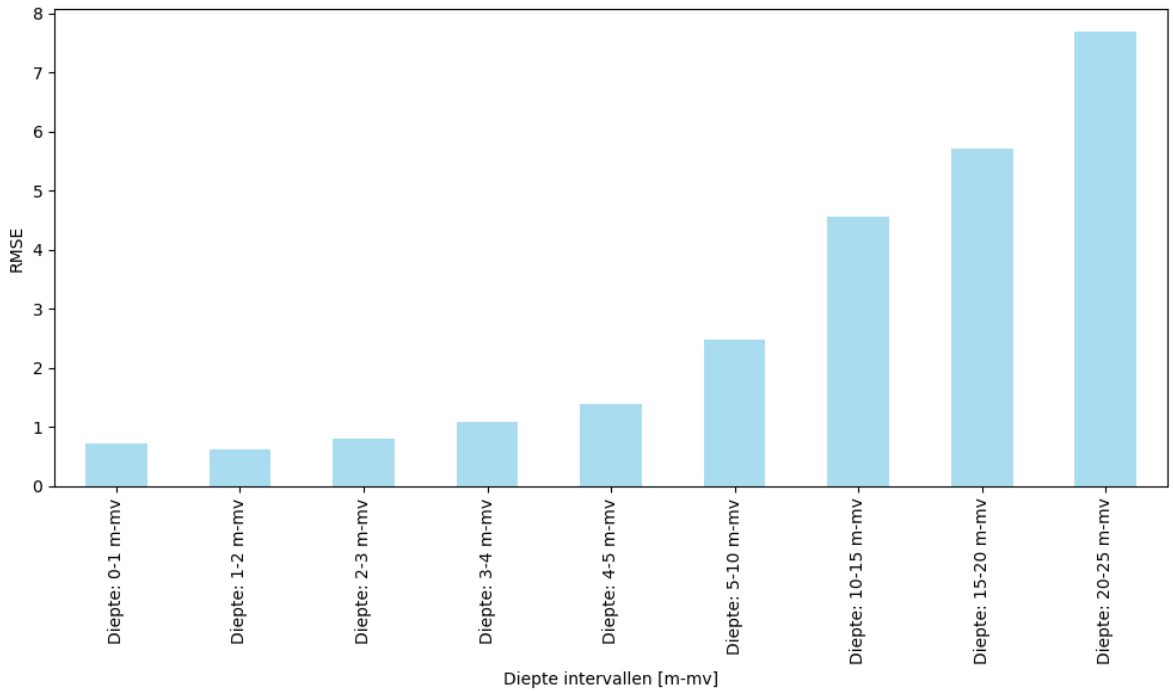
Om nog iets meer inzicht te krijgen in de mogelijke ruimte voor verbetering, kan ook naar de waardes voor de verschillende diepte-intervallen gekeken worden. De RMSE voor verschillende diepte-intervallen is gegeven in Figuur 36. Hierbij valt op dat hoewel de RMSE voor de eerste intervallen (tot 3 m) ongeveer constant blijft op iets minder dan 1 m, deze sterk toeneemt naarmate diepere GLG-waardes onderzocht worden. Dit ligt in lijn met de resultaten van Figuur 35, waarbij de punten meer onder de y=-x-as komen te liggen (of dus onderschat worden) naarmate de diepte toeneemt. De trend ziet er echter heel anders uit wanneer de relatieve RMSE (gedefinieerd als RMSE gedeeld door de gemiddelde waarde van de observaties) per diepte-interval geplot wordt (Figuur 37). Hierbij valt op hoe de relatieve RMSE zeer hoog is voor de meest ondiepe grondwaterpeilen, en daarna stabiliseert. Gezien de RMSE voor het minst ondiepe interval ongeveer 0,72 m bedraagt,

geeft deze grafiek aan hoe, met een gemiddelde waarde voor dat interval van ongeveer 0,57 m-mv, de gemodelleerde waardes een diepte van ongeveer 1,2 à 1,3 m-mv kunnen hebben. In absolute waardes is dit geen groot verschil, maar in functie van ecohydrologie of buffering kan dit wel al enige impact hebben. Globaal genomen valt uit Figuur 37 echter wel te besluiten dat ondanks de grote waardes die voor de RMSE kunnen voorkomen, deze allemaal wel in dezelfde lijn liggen.

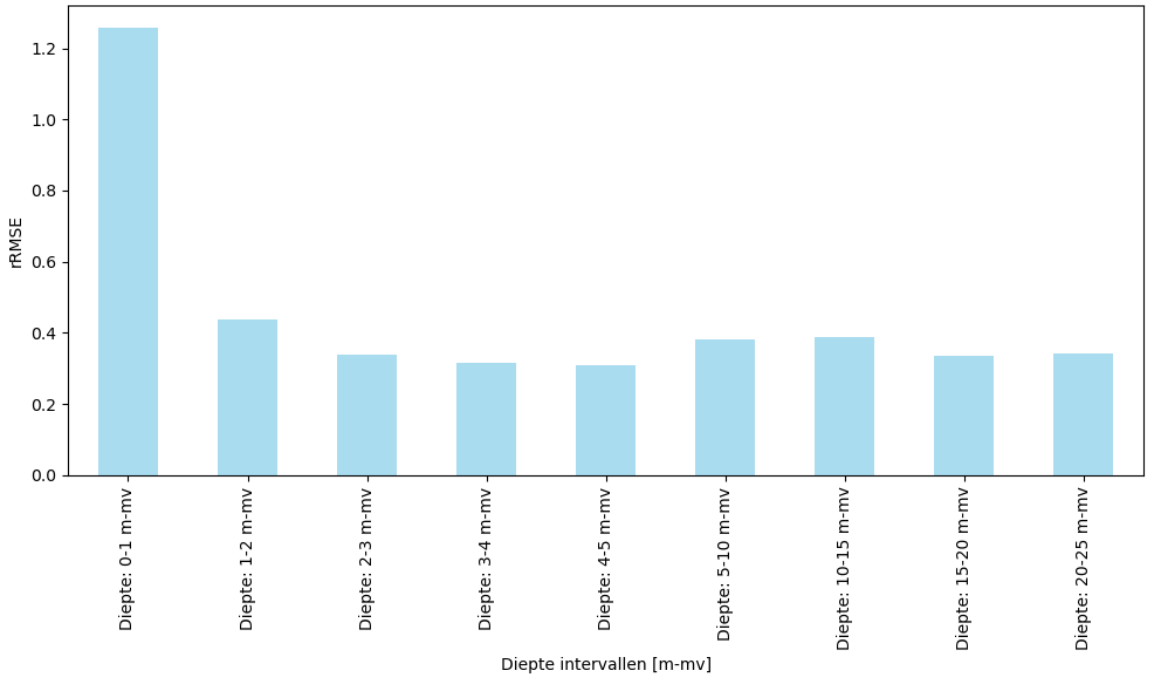
### 4.4.3 GHG

De nauwkeurigheidsstatistieken voor GHG liggen, althans wat de verschilwaardes betreft, in lijn met het GLG, al zijn de dynamieken die voor GLG waargenomen konden worden in het geval van GHG nog uitgesprokener. Over het algemeen kunnen voor GHG de verschilwaardes tussen 0 en 2,5 m relatief goed weergegeven worden: deze liggen dicht bij de y=x-as. Tussen 2,5 m en 5 m lijkt er al enige sprake te zijn van een onderschatting, maar deze is niet extreem. Alle observaties waarbij een verschil van meer dan 5 m waargenomen is, lijken echter afgetopt te worden op ongeveer 5 m: het is onmogelijk om deze waardes correct te modelleren, wat een sterke onderschatting geeft en bijgevolg een grote impact heeft de nauwkeurigheidsstatistieken. Merk hierbij op dat de impact wel vooral te zien is op de $R^2$ (die de modelfit aangeeft en beïnvloed wordt door de uitschieters). De MAE is in vergelijking daarmee relatief goed: met 0,42 voor het volledige verschil en maar een licht hogere MAE voor het model in crossvalidatie, waar de $R^2$-waarde in crossvalidatie al opvallend lager wordt. Deze MAE-waarde geeft aan dat voor een groot deel van de filters de fout op het verschil tussen GLG en GHG niet bijzonder groot is en dat dit verschil dus wel goed te modelleren valt. De RMSE bedraagt, in een vergelijkbare grootteorde, 0,71 voor het volledige model en 0,79 voor het model in crossvalidatie.

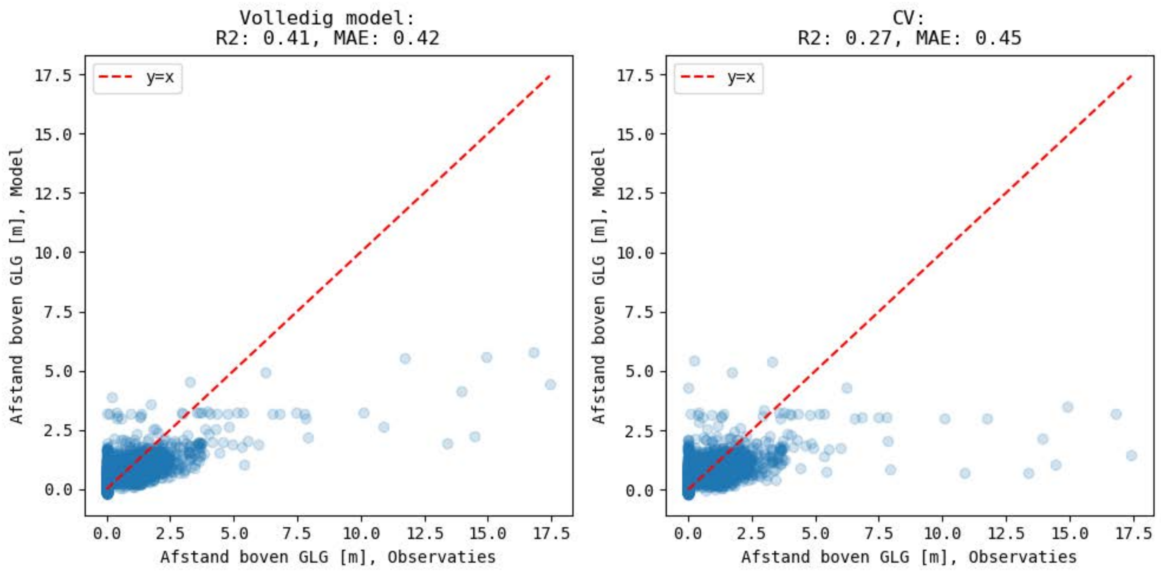
Ook voor de GHG is het interessant om de RMSE in functie van de verschillende intervallen te bekijken. In Figuur 39 is de bar plot van de RMSE-waardes in functie van de intervallen van de verschilwaardes te zien. Hierbij is het duidelijk te zien dat de RMSE sterk toeneemt naarmate de afstand tussen GLG en GHG groter wordt. Wanneer de relatieve RMSE beschouwd wordt (Figuur 40), keert dit beeld echter om. Opnieuw is het moeilijk om de kleinste waardes goed weer te geven: voor het laagste interval is de relatieve RMSE het grootst. Vervolgens dalen de waardes sterk, waarbij een lichte trend waarneembaar is: naarmate de afstand tussen GLG en GHG toeneemt, verkleint de relatieve RMSE, ondanks dat de absolute RMSE toeneemt. Hierbij is het wel belangrijk om in rekening te nemen dat het aantal waardes per interval zeer laag ligt: zo zijn er maar 7 filters met observaties tussen 10 en 15 m verschil met GLG. De robuustheid van de resultaten voor de grootste dieptes wordt hierdoor waarschijnlijk beïnvloed.



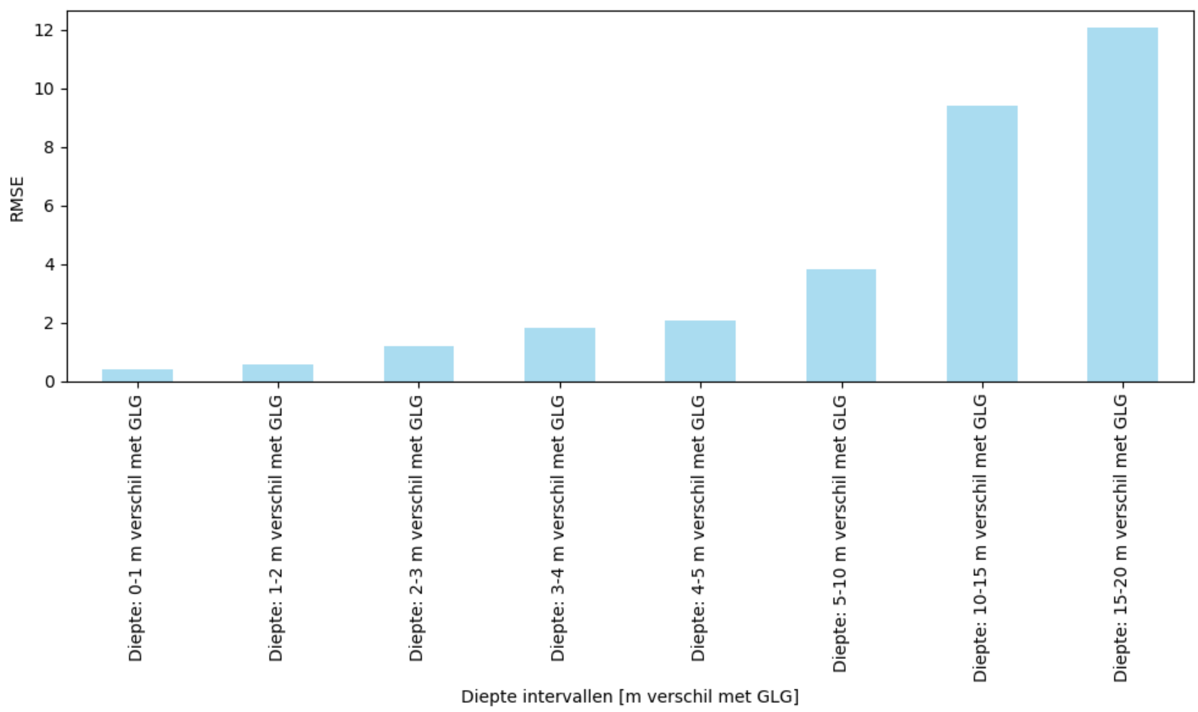

Figuur 36: RMSE voor GLG in m-mv, voor verschillende diepte-intervallen. De gebruikte intervallen zijn een GLG van 0 tot 1 m-mv, 1 tot 2 m-mv, 2 tot 3 m-mv, 3 tot 4 m-mv, 4 tot 5 m-mv, 5 tot 10 m-mv, 10 tot 15 m-mv, 15 tot 20 m-mv en 20 tot 25 m-mv.



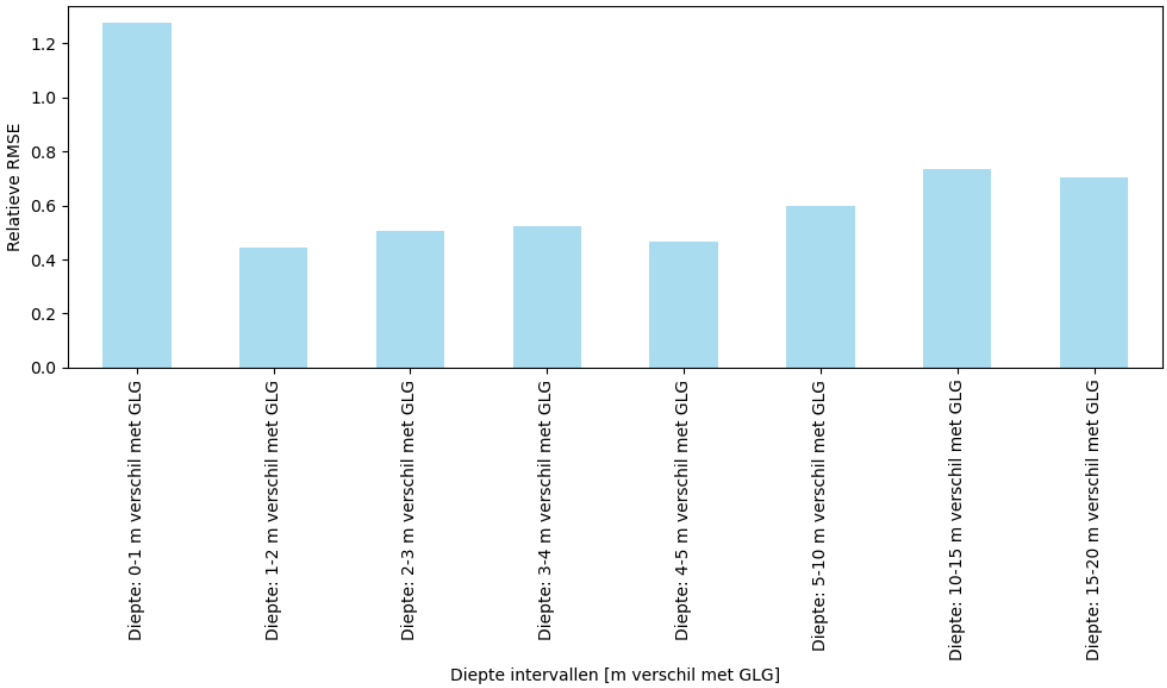

Figuur 37: Relatieve RMSE voor GLG in m-mv, voor verschillende diepte-intervallen. De gebruikte intervallen zijn een GLG van 0 tot 1 m-mv, 1 tot 2 m-mv, 2 tot 3 m-mv, 3 tot 4 m-mv, 4 tot 5 m-mv, 5 tot 10 m-mv, 10 tot 15 m-mv, 15 tot 20 m-mv en 20 tot 25 m-mv.




Figuur 38: Nauwkeurigheidsstatistieken voor GHG (verschilwaardes met GHG in m), met de R², MAE en scatter plot voor zowel het volledige model als in crossvalidatie.



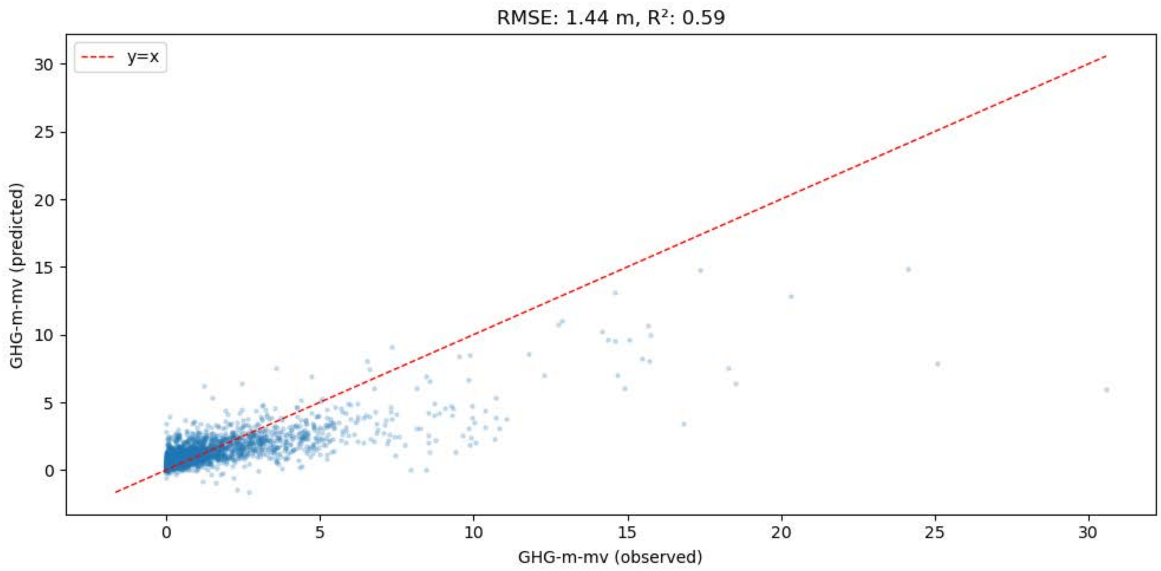

Figuur 39: RMSE voor GHG in m verschil met GLG, voor verschillende intervallen. De gebruikte intervallen zijn een verschil met het GLG van 0 tot 1 m, 1 tot 2 m, 2 tot 3 m, 3 tot 4 m, 4 tot 5 m, 5 tot 10 m, 10 tot 15 m, 15 tot 20 m en 20 tot 25 m.



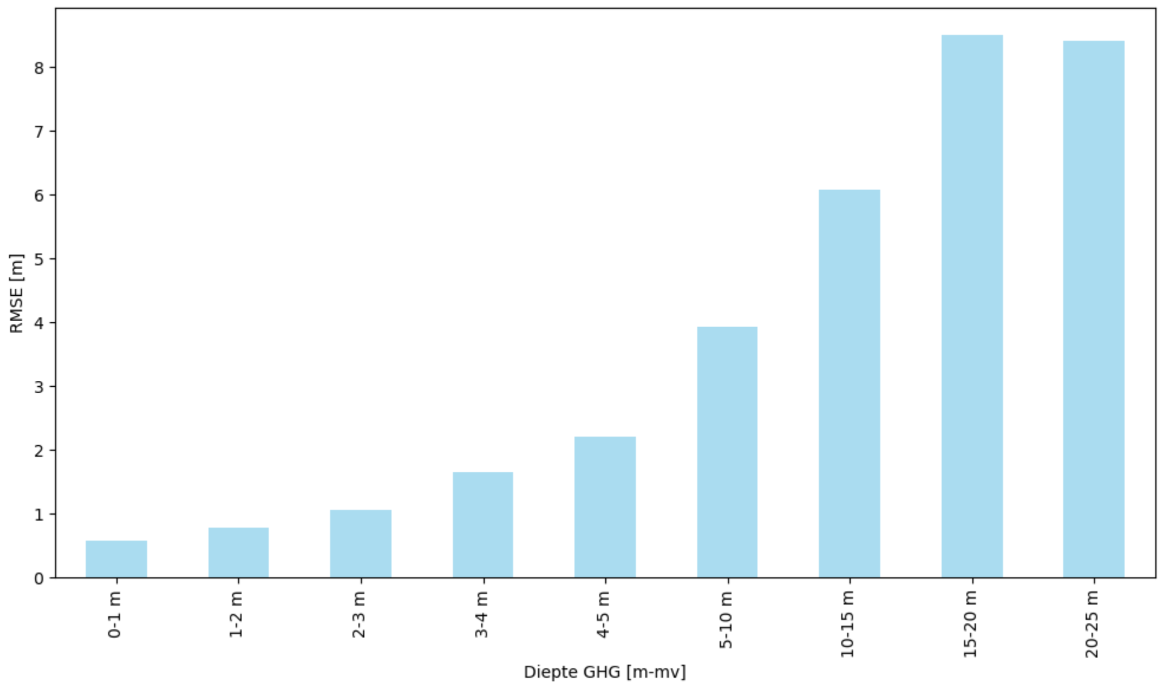

Figuur 40: Relatieve RMSE voor GHG in m verschil met GLG, voor verschillende intervallen. De gebruikte intervallen zijn verschil met het GLG van 0 tot 1 m, 1 tot 2 m, 2 tot 3 m, 3 tot 4 m, 4 tot 5 m, 5 tot 10 m, 10 tot 15 m, 15 tot 20 m en 20 tot 25 m.

Voor GHG zijn tot nu toe enkel de verschilwaardes besproken. Om een volledig inzicht te verkrijgen in het resultaat voor GHG, is het belangrijk om ook de performantie voor de effectieve waardes te onderzoeken. In Figuur 41 is een overzicht gegeven van deze nauwkeurigheidsstatistieken. Hierbij zijn deze bepaald door voor alle beschikbare filters de observatie te vergelijken met de gemodelleerde waarde voor dit punt. Gezien de gemodelleerde waarde hierbij bestaat uit de GLG-waarde, waarbij de gemodelleerde verschilwaarde opgeteld wordt, speelt de nauwkeurigheid van de GLG hierbij ook een rol. Dit is te merken in het finale resultaat, waarbij de combinatie van GLG en GHG finaal nauwkeuriger is ($R^2$ = 0,59) dan de verschilwaarde van GHG ($R^2$ = 0,41). Er is echter nog steeds een trend waar te nemen. Tussen het interval van 0 en 5 m-mv is de nauwkeurigheid zeer goed en volgen de waardes correct de y=x-as. Vanaf de GHG-waardes dieper zijn dan 5 m-mv, is er echter sprake van een onderschatting. Zoals reeds duidelijk was uit Figuur 39, wordt deze onderschatting zeer groot naarmate de diepte groter wordt: de hoogste gemodelleerde GHG-waarde bedraagt ongeveer 15 m-mv, terwijl de grootste waarde uit de observatie-dataset net iets meer dan 30 m-mv bedraagt. Het is mogelijk dat het model probeert om op basis van de beschikbare gegevens een zo goed mogelijk evenwicht te vinden tussen de ondiepe waardes en de diepere waardes, wat finaal voor moeilijkheden zorgt om het model goed te kunnen fitten voor alle dieptes. Tegelijkertijd gaf de plot voor de relatieve RMSE (Figuur 40) aan dat het evenwicht in verschilwaardes relatief goed zit en dat de diepe grondwaterstanden geenszins sterk over- of onderschat worden.

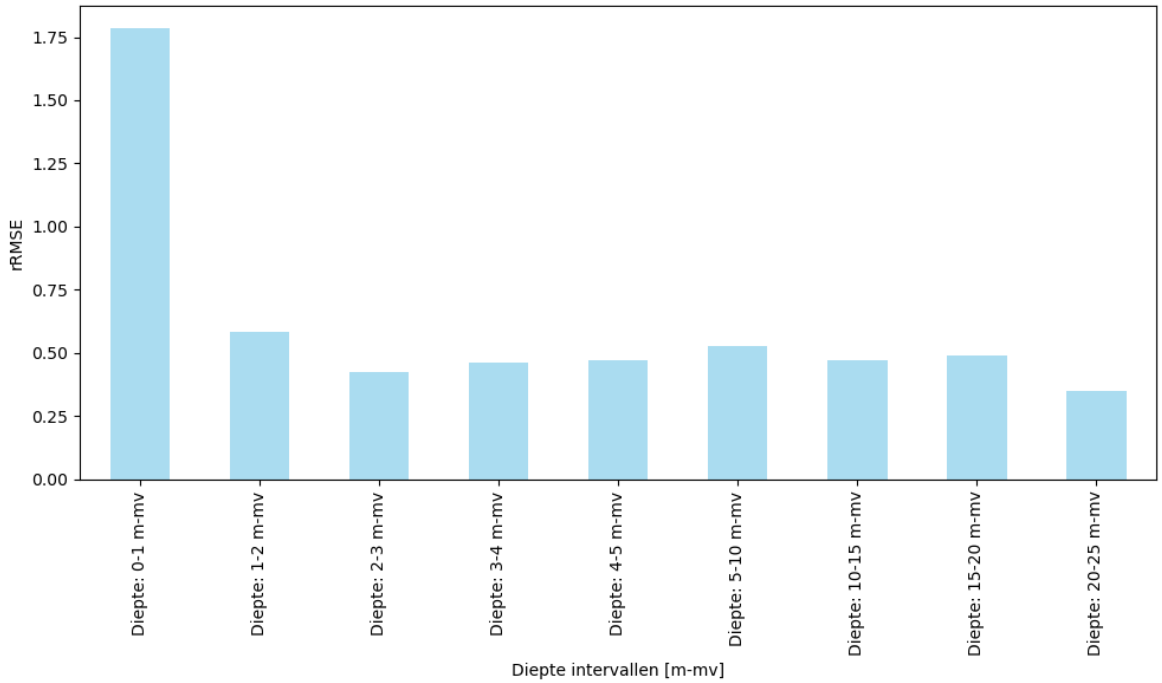
De bar plot met de RMSE per diepte-interval (Figuur 42) nuanceert dit beeld nog enigszins. Deze geeft aan dat er een zekere trend op de RMSE zit, waarbij de meest ondiepe waardes de laagste RMSE hebben (in lijn met GLG, zie Figuur 36). In lijn met de relatieve RMSE voor de verschilwaarde van GHG, geeft Figuur 43 aan dat de relatieve RMSE voor de finale GHG echter maar zeer beperkt varieert voor de verschillende diepte-intervallen en dat deze enkel voor het minst diepe interval hoog is.




Figuur 41: Nauwkeurigheidsstatistieken voor GHG [m-mv], met de RMSE, $R^2$ en scatter plot voor het volledige model.




Figuur 42: RMSE voor GHG[m-mv], voor verschillende diepte-intervallen. De gebruikte diepte-intervallen zijn 0 tot 1 m-mv, 1 tot 2 m-mv, 2 tot 3 m-mv, 3 tot 4 m-mv, 4 tot 5 m-mv, 5 tot 10 m-mv, 10 tot 15 m-mv, 15 tot 20 m-mv en 20 tot 25 m.




Figuur 43: Relatieve RMSE voor GHG[m-mv],, voor verschillende intervallen. De gebruikte intervallen zijn verschil met het GLG van 0 tot 1 m, 1 tot 2 m, 2 tot 3 m, 3 tot 4 m, 4 tot 5 m, 5 tot 10 m, 10 tot 15 m, 15 tot 20 m en 20 tot 25 m.

### 4.4.4 Conclusies

Uit de verschillende nauwkeurigheidsstatistieken blijkt dat het model voor GLG beter is dan het model voor de verschilwaardes van GHG. Het blijkt niet evident om deze verschilwaardes correct weer te geven: zeker voor de grotere verschillen tussen GLG en GHG blijkt de performantie sterk af te nemen. Het model heeft dus grote moeite om voldoende te leren uit het beperkte voorkomen van grote verschillen tussen GLG en GHG. Wanneer de volledige GHG-kaart opgemaakt wordt, blijkt echter dat in combinatie met de GLG-waardes de afwijking minder groot wordt o.b.v. de $R^2$-waarde.

Wanneer in detail naar de waardes voor de diepte-intervallen gekeken wordt, lijkt wel dat het model verbeterd kan worden door zowel de heel ondiepe grondwaterstanden (GLG en GHG) beter te kunnen modelleren als door de zeer diepe grondwaterstanden beter te modelleren. Op deze uitersten zitten de grootste afwijkingen: voor de ondiepe is dit het best waar te nemen door middel van de relatieve RMSE, voor de diepe door middel van de RMSE. Voor de diepe grondwaterstanden zijn er maar een beperkt aantal filters beschikbaar in vergelijking met de ondiepe grondwaterstanden: een uitbreiding van de observaties zal hier waarschijnlijk kunnen helpen. Tegelijkertijd zal het ook nodig zijn om de verklarende kaartlagen nog verder te verbeteren: zoals uit Sectie 4.3 bleek, zijn er een aantal kaarten die sterk doorwegen. Als deze kaarten dus incorrect zijn, zal dit zich al snel doorvertalen naar minder kwalitatieve resultaten. Voor de ondiepe grondwaterstanden zijn er veel filters beschikbaar: in dit geval zit de uitdaging er eerder in om de ruis die op deze gegevens zit goed te kunnen capteren door de verklarende kaartlagen. Kaartlagen die de nuances voor ondiepe grondwaterstanden kunnen capteren, kunnen dus een grote bijkomende waarde bieden voor de kartering.

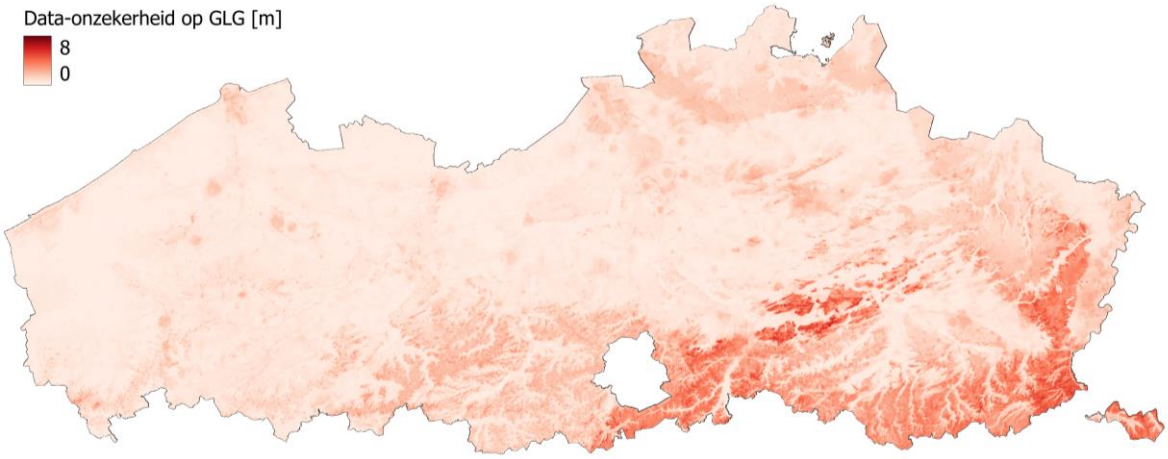
## 4.5 ONZEKERHEID

### 4.5.1 Inleiding

Naast de nauwkeurigheid, is het belangrijk om ook de onzekerheid in kaart te brengen. De onzekerheid helpt te duiden hoeveel we weten over de kartering en waar bijkomende gegevens (zowel observaties als kaartlagen) voor meer duiding kunnen zorgen. Om dit te analyseren, zullen voor zowel GLG (Sectie 4.5.2) als GHG (Sectie 4.5.3) de data-onzekerheid, de kennisonzekerheid en de totale onzekerheid in kaart gebracht worden. De data-onzekerheid geeft aan waar de data te complex is om een correcte modelfit te bepalen, gegeven de verklarende kaartlagen en wordt berekend met behulp van de objectieffunctie 'RMSEwithUncertainty' in CatBoost (Malinin, et al., 2020). De kennisonzekerheid geeft aan waar bijkomende metingen de onzekerheid verder kunnen inperken. Beide zijn een standaardafwijking, waarbij eerst de berekening zoals beschreven in 2.5.4 toegepast is, en vervolgens de vierkantswortel hiervan genomen is (zoals altijd de standaardafwijking berekend wordt op basis van de variantie). De totale onzekerheid is dan gebaseerd op de som van deze twee onzekerheden en is finaal ook weergegeven als een standaardafwijking. Merk hierbij op dat om de totale onzekerheid te berekenen, alle oorspronkelijke varianties opgeteld zijn en vervolgens pas de standaardafwijking berekend is door de vierkantswortel hiervan te nemen, cf. de wet van de totale variantie. Hierbij is het mogelijk om met behulp van CatBoost deze onzekerheden voor elk punt apart in kaart te brengen door voor elk van gemodelleerd punt een virtueel ensemble op te maken. Dit stelt ons bijgevolg in staat om een betrouwbaarheidsinterval op te maken dat in de ruimte gedifferentieerd is. Tot slot worden enkele conclusies m.b.t. de onzekerheid overlopen in Sectie 4.5.4.

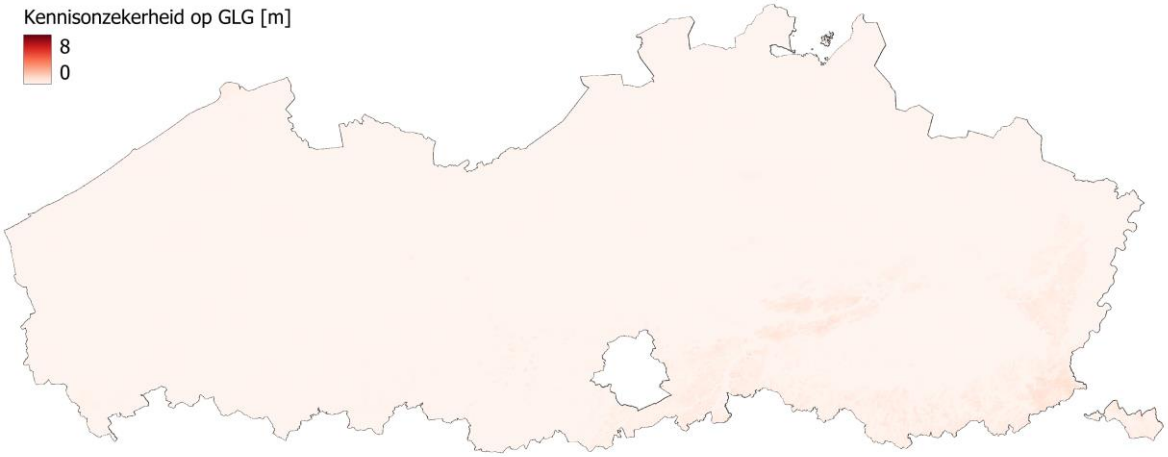
### 4.5.2 GLG

De data-onzekerheid op GLG wordt weergegeven in Figuur 44. Hierbij valt te zien hoe de data-onzekerheid in grote delen van Vlaanderen relatief beperkt is, met waardes die minder dan 1 m zijn. Tegelijkertijd neemt de data-onzekerheid in het zuidoosten van Vlaanderen sterk toe. Dit zijn de regio's met diepere grondwaterstanden, die zoals getoond in o.a. Figuur 35 moeilijker correct te modelleren zijn. Dit lijkt te impliceren dat de grondwaterstanden in deze regio's, met behulp van de beschikbare kaartlagen, moeilijk correct weer te geven zijn. Tegelijkertijd zijn ook de regio's waar grondwaterwinning actief is (en een grote invloed heeft, cf. Figuur 32) zichtbaar op de kaart, bv. in West-Vlaanderen of nabij Antwerpen. Dit impliceert dat hoewel de winningen relevant zijn om de grondwaterstanden in deze regio te verklaren, ze niet alles kunnen verklaren en daarom voor meer onzekerheid zorgen. De mate waarin de verlaging ten gevolge van de winningen ingeschat werd, kan hier in meespelen. Deze verlaging is immers ingeschat op basis van onvolledige datasets en met enige ruwheid om dit computationeel mogelijk te houden.



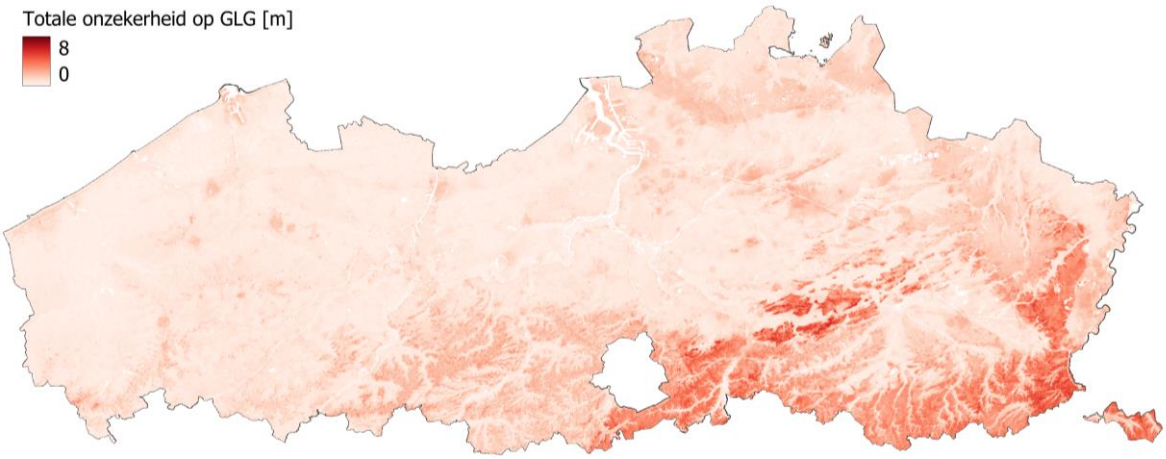

Figuur 44: Data-onzekerheid op GLG [m]. Merk op dat bij deze kaart geen filtering voor de waterlopen is uitgevoerd.

Wanneer de data-onzekerheid vergeleken wordt met de kennisonzekerheid (Figuur 45) valt op dat de grootteorde van deze laatste duidelijk kleiner is dan de grootteorde van de data-onzekerheid. De kennisonzekerheid valt te reduceren door meer metingen toe te voegen aan het model. Opnieuw is de onzekerheid het grootst in het zuidoosten van Vlaanderen. Het verschil tussen deze kaart en de data-onzekerheid geeft echter aan dat met enkel het toevoegen van meer metingen, de onzekerheid maar beperkt bijgestuurd kan worden.



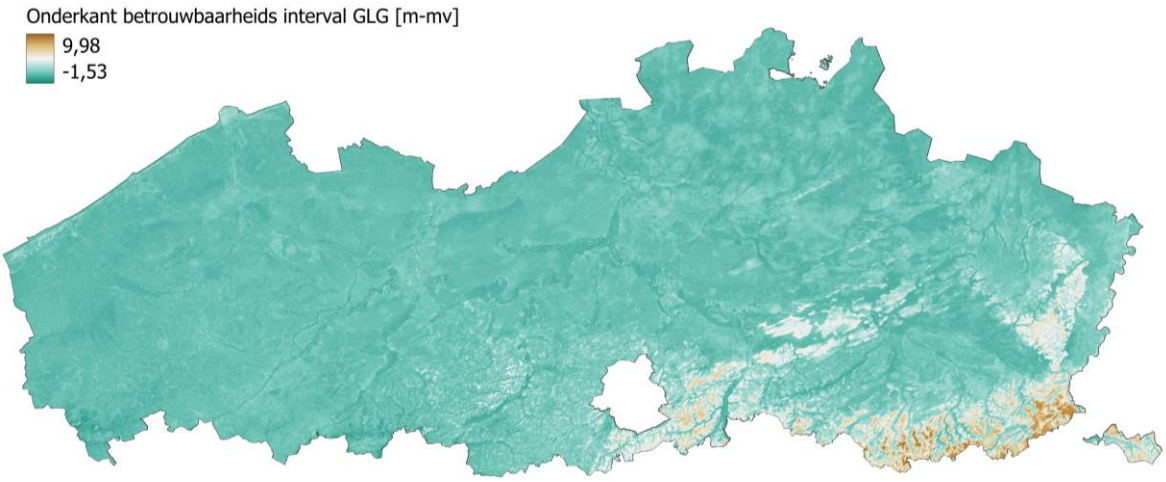

Figuur 45: Kennisonzekerheid op GLG [m]. Merk op dat bij deze kaart geen filtering voor de waterlopen is uitgevoerd.

De combinatie van data-onzekerheid en kennisonzekerheid is de totale onzekerheid. Deze wordt voor GLG gegeven in Figuur 46. Hierbij vallen de geografische tendensen duidelijker op, maar als gevolgd van de combinatie zijn deze wel in lijn met beide voorgaande kaarten.



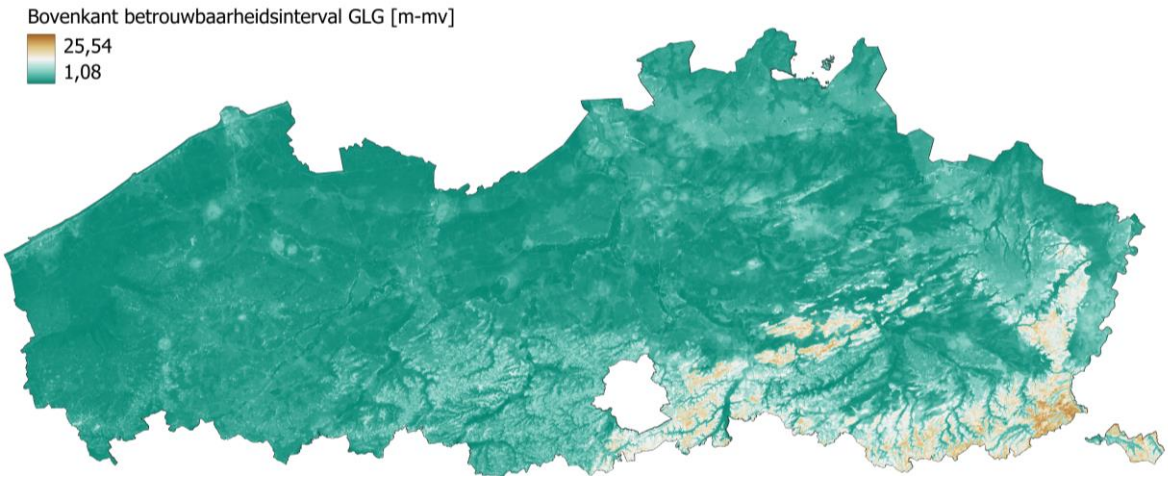

Figuur 46: Totale onzekerheid op GLG [m].

De totale onzekerheid vormt de basis van het betrouwbaarheidsinterval. Dit betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld door de totale onzekerheid als basis te gebruiken voor de klassieke berekening van het betrouwbaarheidsinterval. De totale onzekerheid kan immers beschouwd worden als een standaardafwijking (cf. Sectie 2.5.4). Bij de berekening van het betrouwbaarheidsinterval is het aantal samples gebaseerd op het aantal virtuele ensembles dat CatBoost per rastercel gebruikt om een inschatting van deze onzekerheden op te maken, namelijk 10. Dit resulteert vaak in een breed betrouwbaarheidsinterval. In Figuur 47 is zo te zien hoe de onderkant van het betrouwbaarheidsinterval (dat gezien de definitie in m-mv neerkomt op de hoogste effectieve verwachte waarde) varieert van sterk onder het maaiveld tot boven het maaiveld.




Figuur 47: De onderkant van het 80%-betrouwbaarheidsinterval voor GLG [m-mv]. Merk op dat bij deze kaart geen filtering voor de waterlopen is uitgevoerd.

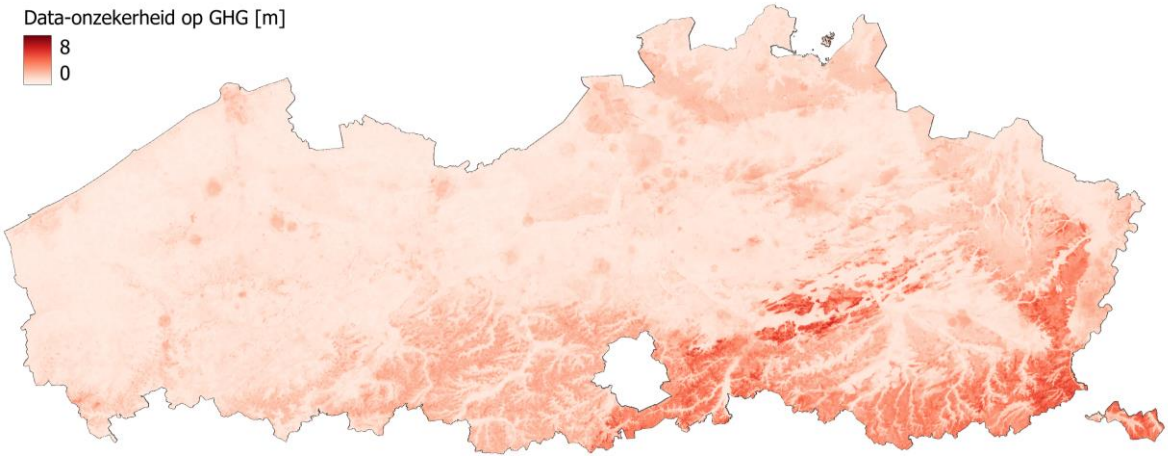
Omgekeerd ligt de (mathematische) bovenkant van het betrouwbaarheidsinterval in enkele regio's zeer diep onder het maaiveld (zie Figuur 48). Hoewel dit in grote delen van Vlaanderen beperkt is (met een maximale bovenkant rond 1 m), ligt deze bovenkant in regio's met een grote onzekerheid zelfs op een diepte van ongeveer 25 m-mv.



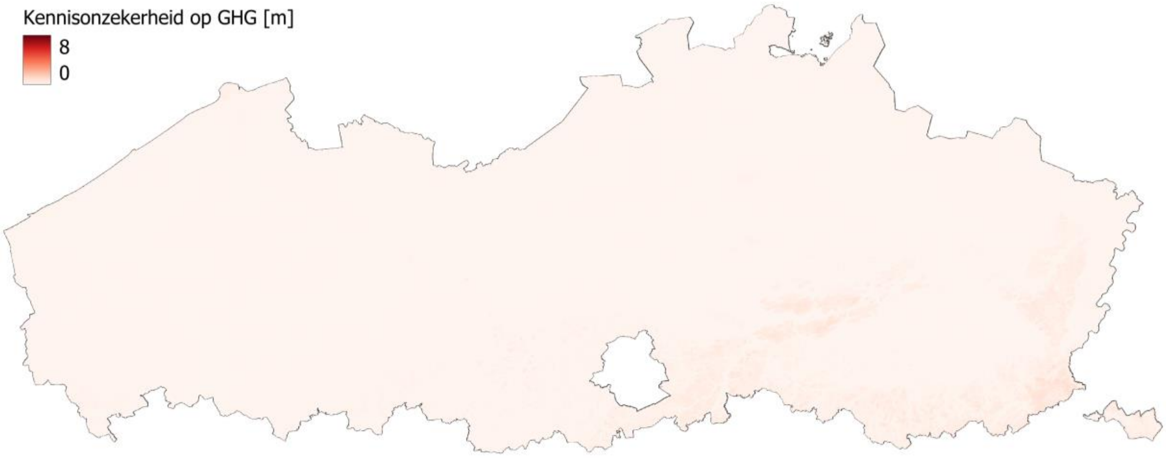

Figuur 48: De bovenkant van het 80%-betrouwbaarheidsinterval voor GLG [m-mv]. Merk op dat bij deze kaart geen filtering voor de waterlopen is uitgevoerd.

### 4.5.3 GHG

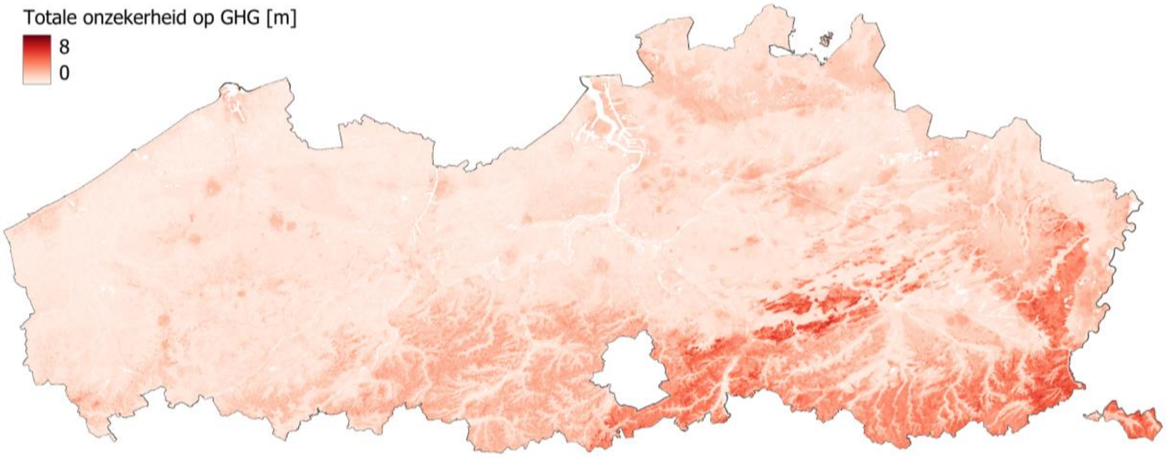
De resultaten voor GHG liggen in lijn met de resultaten voor GLG. Dit is logisch, gezien de onzekerheid op de GHG sterk beïnvloed wordt door de onzekerheid op GLG. De data-onzekerheid wordt immers bepaald door de data-onzekerheid van GLG te combineren met de data-onzekerheid op de verschilwaardes van GHG, en hetzelfde geldt voor de kennisonzekerheid en dus ook de totale onzekerheid. Zoals ook aangegeven in Sectie 3.7 zorgt de methodiek met de verschilwaarde dus zowel voor meer zekerheid m.b.t. fysisch realistische waardes, als dat ze zorgt voor een mogelijk grotere data-onzekerheid. Al bij al zijn de intervallen voor zowel data-onzekerheid (Figuur 49), kennisonzekerheid (Figuur 50), totale onzekerheid (Figuur 51), onderkant van het betrouwbaarheidsinterval (Figuur 52) als bovenkant van het betrouwbaarheidsinterval (Figuur 53) echter in lijn met de resultaten voor GLG, wat aangeeft dat de onzekerheid op de verschilwaardes van GHG beperkt is. Tegelijkertijd impliceert dit natuurlijk ook dat de betrouwbaarheidsintervallen voor GHG eveneens zeer breed zijn, wat de lokale interpretatie moeilijker maakt.



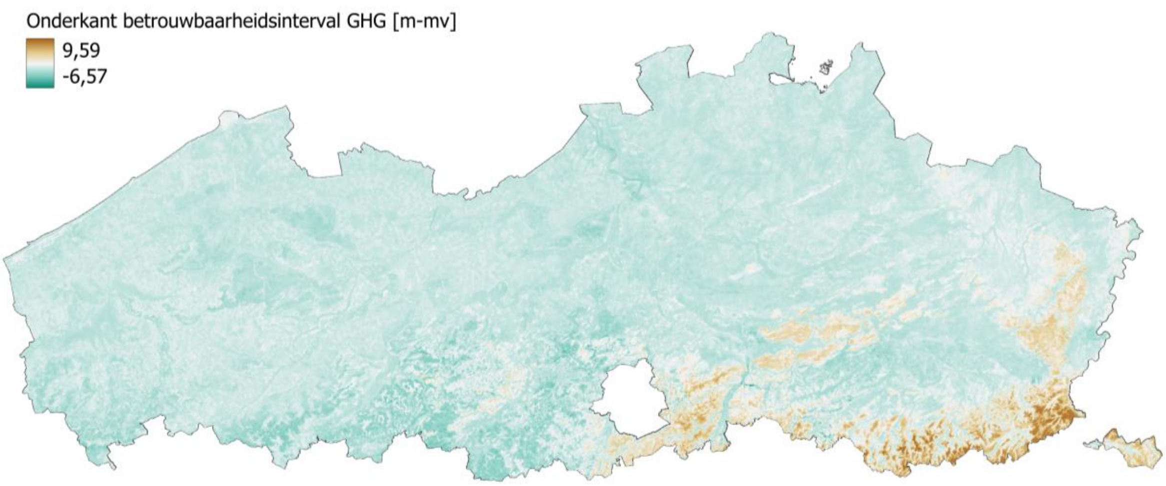

Figuur 49: Data-onzekerheid op GHG [m]. Merk op dat bij deze kaart geen filtering voor de waterlopen is uitgevoerd.



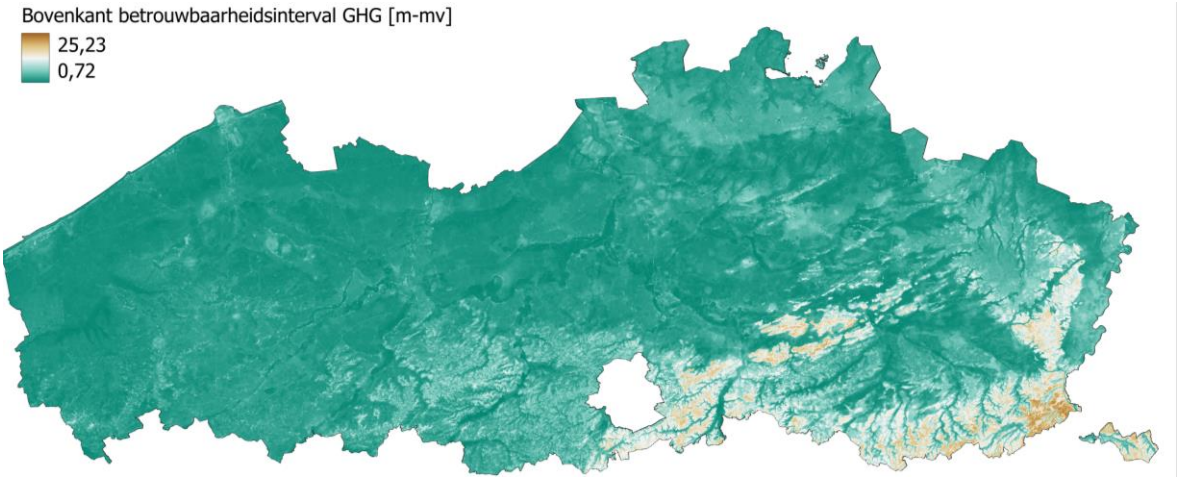

Figuur 50: Kennisonzekerheid op GHG [m]. Merk op dat bij deze kaart geen filtering voor de waterlopen is uitgevoerd.




Figuur 51: Totale onzekerheid op GHG [m].




Figuur 52: De onderkant van het 80%-betrouwbaarheidsinterval voor GHG [m-mv]. Merk op dat bij deze kaart geen filtering voor de waterlopen is uitgevoerd.




Figuur 53: De bovenkant van het 80%-betrouwbaarheidsinterval voor GHG [m-mv]. Merk op dat bij deze kaart geen filtering voor de waterlopen is uitgevoerd.

### 4.5.4 Conclusies

Globaal gezien is de onzekerheid op de resultaten relatief groot. Enerzijds valt dit te verklaren door de grote data-onzekerheid, die het grootst is daar waar weinig gegevens voorkomen en de verklarende kaartlagen niet alle dynamieken van deze gegevens kunnen verklaren. Het valt te verwachten dat, vooral door nog betere verklarende kaartlagen te voorzien, de data-onzekerheid verder weggewerkt kan worden. In de regio's met grote onzekerheid kan door bijkomende metingen ook de kennisonzekerheid bijgewerkt worden, maar deze is beduidend kleiner dan de data-onzekerheid. Anderzijds zorgt de relatief grote spreiding op de waardes in combinatie met een beperkte staalnamegrootte (10 virtuele ensembles) voor een breed betrouwbaarheidsinterval. Hoewel deze methodiek mathematisch een logische keuze vormt, kan het betrouwbaarheidsinterval wellicht verder verfijnd worden door mathematisch geavanceerdere methodes, zoals bootstrapping, toe te passen. Dit is echter computationeel complexer, waardoor het niet mogelijk was om dat binnen het bestek van deze opdracht uit te werken. Naar een goede interpreteerbaarheid van de kaarten toe, is het echter een aanbeveling om dit in de toekomst verder te onderzoeken en op die manier nog beter met grondwater aan de slag te kunnen gaan.

## 4.6 RANDEFFECTEN EN SPRONGEN

### 4.6.1 Inleiding

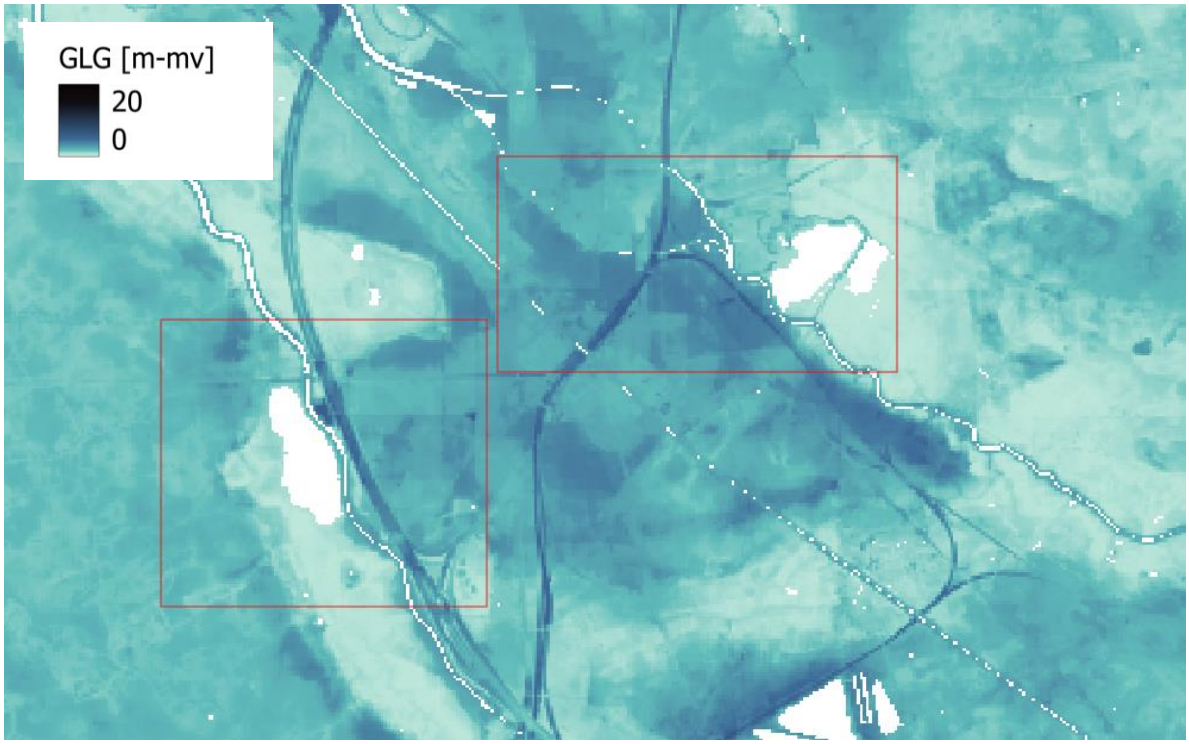
Wanneer een kaart van het grondwaterpeil in Vlaanderen opgemaakt wordt, is het de bedoeling dat deze kaart finaal zo 'smooth' mogelijk is, m.a.w. dat er geen fysisch onverklaarbare sprongen of randeffecten voorkomen. Door het gebruik van bepaalde kaartlagen, kan het echter voorkomen dat dit wel het geval is. Om enig inzicht te kunnen krijgen in de mate waarin dit voorkomt, en wat de mogelijke oorzaken zijn, is het van belang dit te onderzoeken. Dit zal hier voornamelijk plaatsvinden aan de hand van GLG, gezien de belangrijkste conclusies hetzelfde zijn voor GLG en GHG: GLG vormt immers een belangrijke basis voor de bepaling van GHG. De sprongen voor GLG zullen besproken worden in Sectie 4.6.2, in Sectie 4.6.3 volgen vervolgens enkele conclusies.

### 4.6.2 GLG

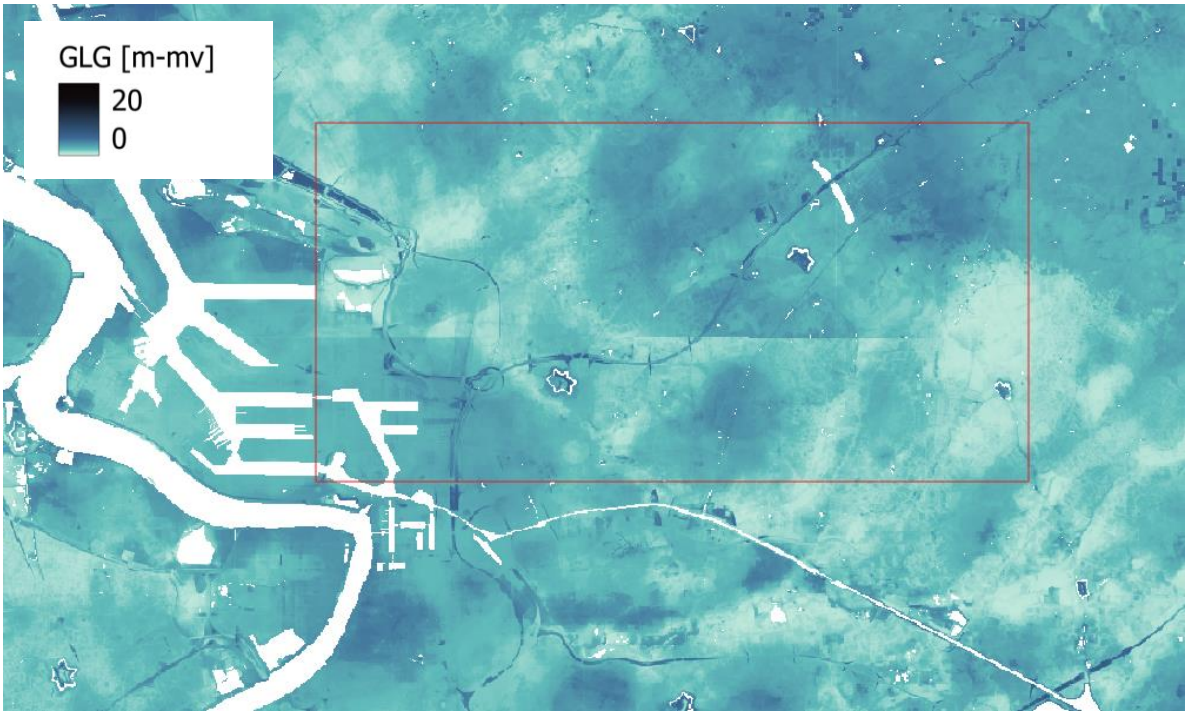
Bij GLG vallen er inderdaad op enkele locaties sprongen en randeffecten waar te nemen. In Figuur 54 en Figuur 55 zijn enkele voorbeelden van deze sprongen gegeven, voor respectievelijk Mechelen, en Antwerpen. Telkens gaat het over grootschalige structuren (met een grootte van 100 m en meer)

die terugkeren en een impact hebben op de finale kaart. Dit komt in de meeste gevallen doordat verklarende kaartlagen met een grote invloed voor een zekere doordruk in de finale kaart zorgen. Een helder voorbeeld hiervan is te vinden in Figuur 55, waarbij de aangeduide sprong herleid kan worden naar de kaart met verlaging ten gevolge van grondwaterwinningen. Deze kaart is as-is gebruikt zoals opgeleverd i.f.v. 'Actualisatie van de drainageklasse'. Gezien in 'Actualisatie van de drainageklasse' Vlaanderen in cellen verdeeld is, zijn deze zichtbaar indien de grondwaterwinning een zeer groot gebied (wat hier het geval was) beïnvloedde.

Over het algemeen zijn het kaarten met een ruim lagere resolutie dan de opgemaakte resolutie die voor deze impact zullen zorgen, en dan vooral wanneer deze kaarten een grote invloed uitoefenen. Als de SHAP-waardes er even terug bij gehaald worden (zie Figuur 32), dan is het aannemelijk dat de verlaging t.g.v. de grondwaterwinning, de dikte van de freatische laag en mogelijk ook het gemiddeld neerslagoverschot een invloed uitoefenen op het finale resultaat. Om te zorgen dat deze effecten minder groot zijn, zou het enerzijds nodig zijn om deze kaartlagen met een fijnere resolutie ter beschikking te hebben of zodanig te resamplen dat ze wel nog fysisch realistisch zijn, maar voldoende fijnschalige informatie bevatten om sprongen te vermijden. Anderzijds kan het ook een meerwaarde bieden om te onderzoeken of bijkomende kaarten nuttig zijn. Specifiek voor de verlaging ten gevolge van grondwaterwinning zou het het beste zijn om deze kaart voor Vlaanderen opnieuw aan te maken en ditmaal zonder Vlaanderen in cellen op te delen, maar dit is een computationeel zware taak en daardoor geen eenvoudige opgave.




Figuur 54: Enkele voorbeelden van sprongen nabij Mechelen.




Figuur 55: Een voorbeeld van een sprong nabij Antwerpen.

### 4.6.3 Conclusies

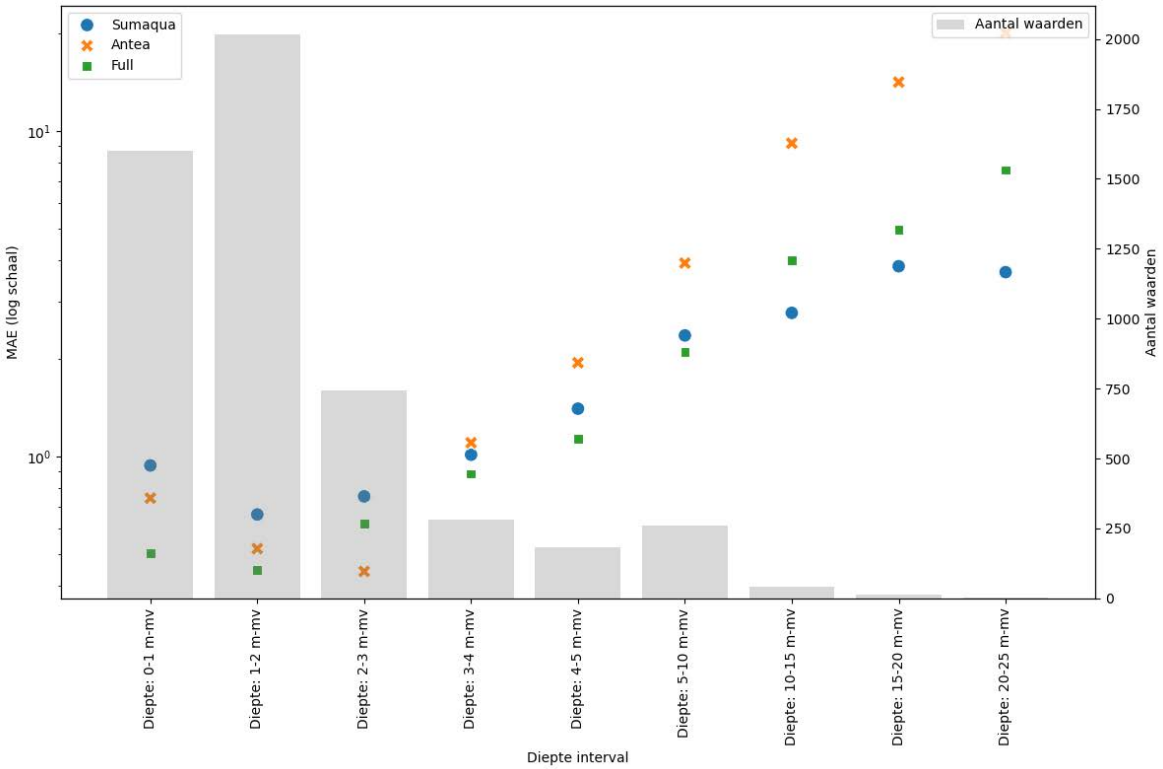
Uit verschillende voorbeelden blijkt dat er zeker nog sprongen waarneembaar zijn. De meest logische verklaring hiervoor zijn kaartlagen met een grote invloed op het eindresultaat die tegelijkertijd met een ruwe resolutie of in aparte cellen voor Vlaanderen opgemaakt zijn. Om dit te verhelpen, is het belangrijk om te onderzoeken of deze kaartlagen ook met een fijnere schaal ter beschikking gesteld kunnen worden of op een correcte wijze herschaald of resampled kunnen worden, zodat de sprongen verminderd kunnen worden.

## 4.7 VERGELIJKING MET VORIGE STUDIES

Gezien deze studie verder bouwt op twee eerdere studies, is het van groot belang om een vergelijking te maken met deze voorgaande studies: de bedoeling is immers om het beste van beide studies te combineren om op die manier een zo goed mogelijke kartering van de grondwaterstanden te bekomen. Om de verbetering te onderzoeken, zijn de resultaten van dit onderzoek en van de vorige studies vergeleken met de in dit onderzoek berekende *ground truth*. Dit laat toe om – met enige omzichtigheid – de studies te vergelijken. Zo was de *ground truth* in de vorige studies verschillend van degene hier gebruikt. In 'Effecten van klimaatverandering' was bv. de GWI gebruikt als *ground truth*, waar deze studie meer aanleunt bij hetgeen in 'Actualisatie van de drainageklasse' uitgevoerd is. In 'Actualisatie van de drainageklasse' daarentegen was het de bedoeling om enkel grondwaterstanden van minder dan 3 m-mv in kaart te brengen, wat eveneens een relevant verschil is. Tegelijkertijd hebben deze keuzes ook een impact op het eindresultaat, en is het belangrijk om die impact mee in kaart te brengen.

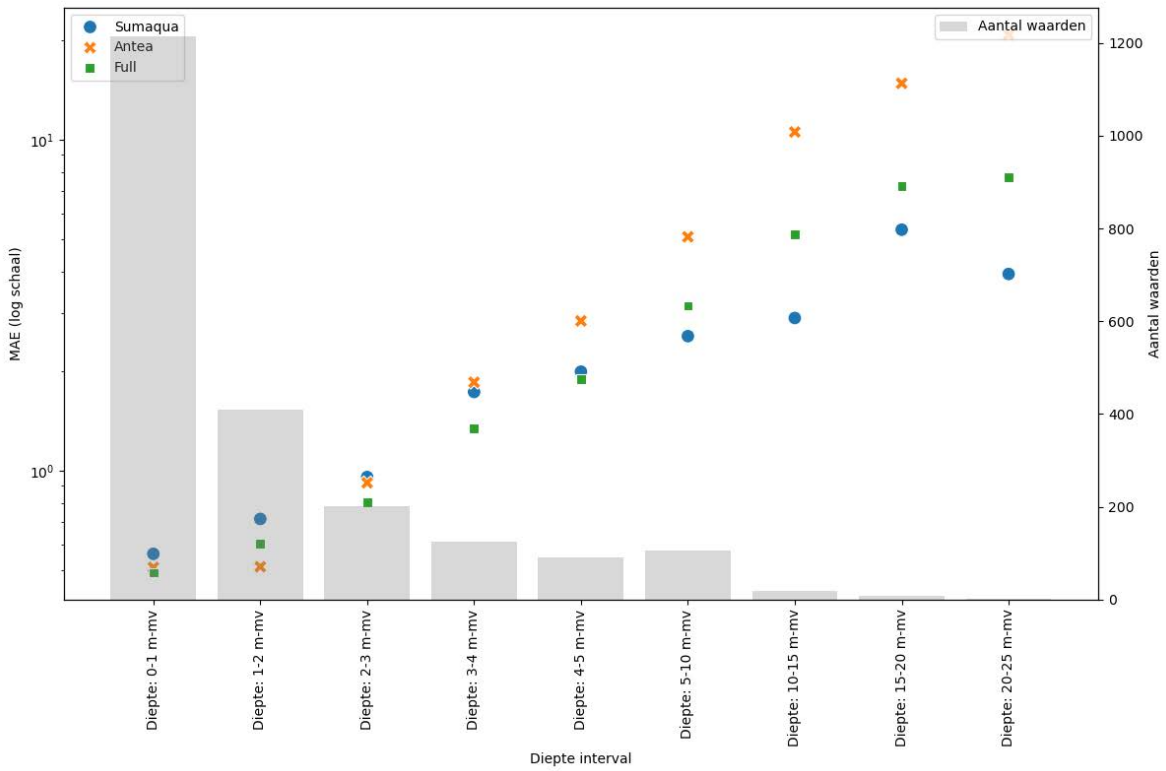
In Figuur 56 is het resultaat van deze vergelijking voor het GLG te zien. Hierbij valt op te merken dat, tot een diepte van 10 m-mv, de resultaten van deze studie, op één interval na, beter zijn dan die van de voorgaande studies. Voor grotere dieptes zijn de resultaten van 'Effecten van klimaatverandering' beter, al is het gegeven het beperkte aantal waardes moeilijk om hiervoor

gedetailleerde uitspraken te doen. Daarnaast liggen deze waardes wel nog steeds in dezelfde grootteorde. De resultaten van 'Actualisatie van de drainageklasse' zijn minder kwalitatief voor grotere dieptes. Dit volgt echter uit het opzet van de studie: gezien enkel waardes met een diepte van minder dan 3 m-mv gemodelleerd zijn, impliceert de aanwezigheid van een gemodelleerde waarde voor deze dieptes dat er een grote afwijking is. De intervallen worden immers opgemaakt op basis van de berekende *ground truth*.




Figuur 56: Vergelijking tussen het resultaat van GLG voor de verschillende studies. 'Full' is hierbij het gecombineerde model dat in deze studie gebruikt is. Op de primaire y-as staat de MAE (log-getransformeerd) in functie van de diepte-intervallen, op de secundaire y-as het aantal waardes beschikbaar voor dit interval. Hierbij zijn enkel de filters gebruikt waarvoor modelresultaten beschikbaar waren.

De resultaten voor GHG (Figuur 57) zijn zeer vergelijkbaar met deze voor GLG. De licht lagere performantie voor GHG komt in deze figuur ook wel naar voor: de resultaten zijn maar beter dan of vergelijkbaar met die van de vorige studies tot een diepte van 5 m-mv. Niettemin is het dus een sterk resultaat dat, ondanks de lagere modelperformantie voor de verschilwaardes, een goed model bekomen worden voor de ondiepe grondwaterstanden. Deze ondiepe grondwaterstanden zijn in vele studies het belangrijkst, en een correcte inschatting hiervan is dus zeer waardevol.




Figuur 57: Vergelijking tussen het resultaat van GHG voor de verschillende studies. 'Full' is hierbij het gecombineerde model dat in deze studie gebruikt is. Op de primaire y-as staat de MAE (log-getransformeerd) in functie van de diepte-intervallen, op de secundaire y-as het aantal waardes beschikbaar voor dit interval. Hierbij zijn enkel de filters gebruikt waarvoor modelresultaten beschikbaar waren.

## 4.8 CONCLUSIES

Hoewel de werkwijze zoals hier toegepast als beste uit de desktopanalyse komt en vervolgens nog verder verfijnd is, is het niet evident om de grondwaterpeilen in Vlaanderen optimaal te kunnen karteren. De grootschalige structuur, en op vele plaatsen ook de fijnschalige structuur, is correct, maar het is een uitdaging om voor elk diepte-interval goede resultaten te bekomen. Dit kan verbeterd worden door de geselecteerde kaartlagen nog verder af te stemmen op de gebruikte meetpunten, en de gebruikte meetpunten ook verder uit te breiden. Enkele kaartlagen hebben immers een grote impact en kunnen leiden tot uitdrukkelijk ondiepe of diepe waardes, maar de informatie om dit correct over Vlaanderen te kunnen extrapoleren volstaat nog niet. Zeker voor de diepere grondwaterstanden is het nodig om meer meetpunten te voorzien, zodat de relatie tussen de kaartlagen en de *ground truth* correcter opgebouwd kan worden. Verbeteringen (bv. hogere resolutie) en uitbreidingen van de kaartlagen kunnen er dan weer voor zorgen dat bepaalde dynamieken die nu onvoldoende gecapteerd worden, alsnog beter gecapteerd kunnen worden.

# 5 GLOBALE CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

## 5.1 CONCLUSIES

Deze studie had als doel om het beste van twee eerder uitgevoerde karteringsstudies te combineren. Deze twee studies, respectievelijk ‘Actualisatie van de drainageklasse van de

bodemkaart door koppeling van grondwaterstatistieken aan de bodemkaart', uitgevoerd door Antea i.s.m. UGent (afgekort als 'Actualisatie van de drainageklasse') en 'Effecten van klimaatverandering op de freatische grondwaterstanden' (afgekort als 'Effecten van klimaatverandering'), uitgevoerd door Sumaqua hadden als tussentijds resultaat allebei een kaart van de gemiddelde grondwaterstanden (Gemiddeld Laagste Grondwaterstand, GLG en Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand, GHG, samen benoemd als 'GxG-waardes'). Deze kaarten werden nog niet gepubliceerd. Door in dit project de werkwijze van beide studies zo goed mogelijk te combineren, was het mogelijk om één state-of-the-art grondwaterkaart van Vlaanderen te produceren die vanuit de Vlaamse Overheid als beste resultaat gepubliceerd kan worden.

De best mogelijke combinatie van beide studies bestond uit het combineren van een uitgebreide dataset aan grondwatergegevens met een uitgebreide set aan verklarende kaartlagen door middel van *gradient tree boosting*, een *machine learning*-methode. Hierbij werd uitgebreide dataselectie en *post-processing* uitgevoerd op de grondwatergegevens, om voor zoveel mogelijk filters effectief GxG-waardes te bepalen. Finaal werden op die manier 5155 filters met GxG-waardes gecombineerd met 60 mogelijke verklarende kaartlagen. De combinatie van de methodes zat in dit geheel vooral in de dataselectie, dataverwerking en de selectie van de kaartlagen: hier viel het meeste informatie samen te brengen. De andere onderdelen van de werkwijze vertoonden zeker ook verschillen, maar niet van die aard dat verwacht werd dat ze de resultaten sterk zouden beïnvloeden.

Finaal leidde de geselecteerde werkwijze tot een kartering die erin slaagt om voor een groot deel van Vlaanderen effectief het beste van beide werelden te vormen. Zowel de geproduceerde GLG-kaart (met een $R^2$-waarde van 0,68) als de GHG-kaart (met een $R^2$-waarde van 0,59) slagen er in om de grondwaterdynamiek goed weer te geven. Het gebruikte model selecteert daarbij kaartlagen die vanuit bodemfysisch perspectief logisch zijn: het model is dus geen *black box*, maar vormt een goede weerslag van de beschikbare kennis van de ondergrond. Wanneer de opgemaakte kaarten geanalyseerd worden in functie van de beschikbare *ground* truth en deze in functie van de verschillende diepte-intervallen vergeleken wordt, valt op dat de kwaliteit het hoogst is tot 10 m-mv en in de meeste gevallen een verbetering vormt ten opzichte van de eerder opgemaakte kaarten. Voor diepere intervallen is de kwaliteit gelijkaardig aan de vorige kaarten. De onzekerheid kan hierbij ook op een consequente manier in kaart gebracht worden, waarbij opvalt dat deze het grootst is in de regio's met diepere grondwaterstanden: dit reflecteert de moeilijkheid om deze grondwaterstanden correct te karteren. Verdere verbetering is dus nog mogelijk: voor de diepste grondwaterstanden (zowel GHG als GLG) was het niet eenvoudig om een model op te stellen dat op basis van de aangeleverde data een goede modelfit kon opmaken. Dit werd gereflecteerd door zowel de nauwkeurigheid (Sectie 4.4) als de data-onzekerheid (Sectie 4.5) van de GxG-kaarten. In de geologische regio's waar dit geval is, is verdere verfijning van de verklarende kaartlagen of een betere methodiek om de gegevens evenwichtig te verwerken nog nodig. Bijkomend onderzoek kan dus zeker relevant zijn; in Sectie 5.3 gaan we hier nog kort op in.

De finaal geselecteerde kaartlagen verdienen ook enige aparte aandacht. Enerzijds omdat verschillende kaartlagen een grote invloed uitoefenen op het eindresultaat: zo blijken zowel omgevingseigenschappen, bv. TPI of hoogte, als menselijke invloeden zoals drooglegging en verlaging t.g.v. grondwaterwinningen, een grote invloed uit te oefenen (zie Sectie 4.3). Finaal is er een hele reeks aan verschillende kaartlagen die de finale kaarten mee vormgeven. Dit uit zich helaas ook in sprongen die hier en daar nog voorkomen (zie Sectie 4.6). Anderzijds was er beslist om naast de kaartlagen die reeds in de vorige studies gebruikt werden, nieuwe kaartlagen die sindsdien gepubliceerd zijn, te onderzoeken. De nieuwe kaartlagen die onderzocht zijn, waren de kaarten gepubliceerd in het kader van Bodemdatabank-STAT (Wittemans, et al., 2023), de veenwaarschijnlijkheidskaarten (Swinnen, et al., 2023) en de gedigitaliseerde historische kaarten (De Keersmaeker, et al., 2024). Van elk van deze kaartdatasets, werden finaal kaarten geselecteerd

als relevant voor de kartering van grondwater. Dit geeft de relevantie van bijkomend onderzoek naar (kartering van) de Vlaamse bodem duidelijk aan.

Bij dit alles moet natuurlijk de kanttekening gemaakt worden dat een kartering maar zo goed is als de onderliggende gegevens. Bij deze kartering worden de GxG-waardes als *ground truth* beschouwd, maar de berekening van deze GxG-waardes bevat ook onzekerheden, die hier niet mee in beschouwing worden genomen. Er worden weliswaar controles uitgevoerd om de minst nauwkeurige waardes te verwijderen, maar dan nog is het resultaat maar een benadering van de werkelijkheid. Daarnaast is er ook geen zekerheid dat de onderliggende metingen de werkelijkheid volledig reflecteren. Zo was ten tijde van dit project het INBO bezig met een controle van verschillende peilmetingen, wat een impact kan hebben op een herkartering. Ook aan de kant van de kaartlagen zijn er verschillende onzekerheden wat betreft metingen, opmaak van de kaarten… Elk van deze zaken heeft zijn impact, maar finaal laten we die hier grotendeels buiten beschouwing.

Ondanks de nuances wat betreft de onzekerheden op de onderliggende gegevens, impliceren de verbeteringen ten opzichte van de vorige versies van de grondwaterkaart dat er een grote bruikbaarheid is van deze kaart. Hierbij situeert de bruikbaarheid en toepasbaarheid zich wel vooral in verkennende studies en daar waar het grondwaterpeil vooral neerslaggedreven is. De foutenmarges zijn nog steeds te groot om deze kaart rechtstreeks te gebruiken voor ontwerpstudies e.d. En hoewel verschillende menselijke invloeden (zoals drainage en winningen) in de mate van het mogelijke beschouwd worden, zijn de karteringen hiervan zeker niet perfect. Niettemin zijn er veel regio's waar tot nu toe maar beperkte grondwatergegevens ter beschikking waren. In deze regio's kan nu alvast een eerste inschatting gemaakt kan worden. Kortom: de kaarten leveren, zoals ze er nu voorliggen, al een grote meerwaarde op, en zullen ze tevens meer inzichten bieden die in de toekomst deze kartering nog verder kunnen verbeteren.

## 5.2 BESCHIKBARE GEGEVENS

De GxG-kaarten zoals opgemaakt in dit project zullen, inclusief de onzekerheden, ter beschikking gesteld worden via Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV). Hierbij is het de bedoeling om zowel de kaartlaag zelf, als het betrouwbaarheidsinterval en de totale onzekerheid ter beschikking te stellen. Op deze finale kaarten vindt een maskering plaats: alle waterlopen (op basis van de waterlopen in het GRB) en de watervlakken worden uit de kaart gefilterd, gezien er voor deze locaties in praktijk geen uitspraken over het grondwaterpeil gedaan kunnen worden. Daarnaast zullen deze kaarten op verschillende resoluties beschikbaar gesteld worden (5 m, 10 m, 25 m, 50 m, 100 m). Dit zal toelaten om verkennende analyses op te maken van het grondwater in Vlaanderen, zoals hierboven beschreven.

Tussentijdse resultaten en verklarende kaartlagen zullen ook doorgegeven worden aan de opdrachtgevers van deze studie (Departement Omgeving en Vlaamse Milieumaatschappij). Zij zullen deze waar mogelijk publiek ter beschikking stellen. Hetzelfde geldt voor de code, die ook ter beschikking gesteld zal worden aan de opdrachtgevers, zodat herkarteringen in de toekomst uitgevoerd kunnen worden. Voor de gegevens die ter beschikking gesteld worden, verwijzen we naar het bestand 'BestandenOverzicht -v0.1.xlsx'.

## 5.3 AANBEVELINGEN

De kaarten zoals nu opgemaakt, bieden inzicht in de gemiddelde grondwaterstanden van de voorbije 15 jaar (2010 t.e.m. 2024). Gezien het klimaat en landgebruik evolueren, zullen deze gegevens

gaandeweg verouderd raken en is het de bedoeling om nieuwe karteringen uit te voeren. Wanneer herkarteringen uitgevoerd worden, kunnen meteen verschillende uitdagingen die in dit project naar boven kwamen, nog verder onderzocht en verbeterd worden. Hieronder volgt een overzicht van enkele aanbevelingen die het mogelijk zouden moeten maken om een betere kartering van het grondwater te verkrijgen.

- De grootste uitdaging tot nu toe ligt in de correcte weergave van de diepe grondwaterstanden. Voor de grotere dieptes is de performantie van het huidige model namelijk het minst. Enerzijds valt dit te verbeteren door betere basisgegevens: meer metingen in diepe grondwaterstanden en mogelijk betere verklarende kaartlagen, die helpen om de nuances te verfijnen. Zo is het mogelijk dat een minder verregaande clustering van de hydrogeologisch homogene zones tot een verbetering kan leiden. Anderzijds zijn er ook ogenschijnlijk kleine aanpassingen in de werkwijze die tot een verbetering zouden kunnen leiden. Door met gewichten te werken die aan verschillende dieptes toegekend worden, of door de crossvalidatie uit te breiden naar gestratificeerde *k-fold crossvalidation*, is verbetering mogelijk. Wellicht zal een combinatie van maatregelen, zowel wat betreft data als wat betreft werkwijze, nodig zijn. Naast deze eerder methodologische aanpassingen, valt te bediscussiëren of GxG-kaarten wel het ideale concept zijn om de diepere grondwaterstanden te karakteriseren. Het concept van GxG's wordt immers voornamelijk gebruikt om de dynamiek te karakteriseren van de seizoenale variaties in eerder ondiepe grondwaterstanden met een zeer duidelijk freatisch karakter. Naarmate grondwaterstanden dieper worden neemt mogelijk de heterogeniteit van de ondergrond toe, met het mogelijk voorkomen van minder doorlatende lagen, een afname van het freatische karakter van het grondwater, het voorkomen van hangwatertafels of multi-level grondwatertafels, en variaties in de peilen die zich eerder over meerdere jaren voordoen dan de typisch seizoenale fluctuaties. Zulke diepe grondwaterstanden worden wellicht beter gekarakteriseerd door bv. een gemiddelde grondwaterstand over een bepaalde periode weer te geven (samen met een indicatie van minimale en maximale waarde voor die periode). In deze studie was het expliciete doel om GxG-kaarten voor heel Vlaanderen op te maken. Het is wel aan te bevelen om te onderzoeken hoe zowel peilen die jaarlijks variëren als peilen die multijaar-variaties vertonen op gepaste wijze gemodelleerd en gecombineerd kunnen worden in één set grondwaterdieptekaarten.
- Wat inputdata betreft, zijn er nog meer gegevens in DOV beschikbaar dan hetgeen dat tot nu toe gebruikt is. Dit kan helpen om de kartering van zowel ondiepe als diepe grondwaterstanden nog te verbeteren. Voorlopig zijn de gegevens gebaseerd op een datadump van DOV, gebaseerd op de in 'Actualisatie van de drainageklasse' gebruikte gegevens. De gegevens zoals ze uit DOV kwamen, ondergingen voor gebruik in dit onderzoek geen bijkomende verwerking buiten de datavalidatie die (mogelijk) gebeurt door de verschillende data-eigenaars en -beheerders van peildata in DOV. Het zou dus mogelijk moeten zijn om bijkomende gegevens, indien ze in hetzelfde format uitgelezen worden, te gebruiken en in de dataverwerkingsflow mee te nemen. Hiervoor dienen in principe dus geen extra stappen genomen te worden, al kan het bij nieuwe gegevens wel helpen om a priori reeds een kwaliteitscontrole en controle van het freatische karakter van de filter uit te voeren.
- Er zijn verschillende opties om de set met kaartlagen nog verder te verbeteren of uit te breiden. Zo is nog steeds maar een beperkt deel van de gegevens van het KMI vlot open source beschikbaar. Indien sommige gegevensbronnen wel open source beschikbaar zouden zijn, zoals door het KMI geproduceerde kaarten van langetermijngemiddelden van klimatologische variabelen, valt mogelijk een fijnere kaart met het gemiddeld

neerslagoverschot op te maken, wat zich zou kunnen vertalen naar een betere kartering. Daarnaast kan een correct gebruik van vegetatiekundige gegevens (vanuit BWK of een andere bron) wellicht helpen om fijne verschillen tussen filters beter in kaart te brengen en te modelleren. Hiervoor is het wellicht nodig om grondig in overleg te gaan met INBO, om de beste werkwijze hiervoor te kunnen vastleggen en aftoetsen. Als laatste is het relevant om de menselijke invloed nog beter in kaart te brengen. Zo is het belangrijk om de kaart van de verlaging ten gevolge van grondwaterwinningen te updaten, zodat deze effectief de laatste 15 jaar reflecteert en de winningen zo correct mogelijk weergeeft. Daarnaast kan de kartering van effectieve drainage, in plaats van inschattingen op basis van de grachtenkaart, veel inzicht bieden in de menselijke invloed op het grondwaterpeil.

- Wat de algemene impact van kaartlagen betreft, is nog meer onderzoek nodig naar neerschaling en resampling van de gebruikte kaartlagen. Verschillende kaartlagen met een ruwe resolutie zorgden voor sprongen in de finale kaarten, die idealiter weggewerkt worden. Neerschaling van deze kaarten is echter verre van eenvoudig, gezien dit een karteringsoefening op zich inhoudt. Idealiter worden alle kaartlagen dus op een resolutie waarop gekarteerd zal worden voorzien, maar dit is voor sommige kaartlagen evenmin een evidentie. In volgende kartering zal een belangrijke bijkomende vraag dus moeten zijn op welke manier het beste evenwicht tussen extra karteringswerk of bijkomende analyses en het voorkomen en de impact van sprongen gevonden wordt.
- Hoewel mathematisch correct berekend op basis van CatBoost, is het betrouwbaarheidsinterval op dit moment zeer breed en daardoor eerder onbruikbaar voor wie hier praktisch mee aan de slag wilt gaan. Het zou een mogelijkheid kunnen zijn om m.b.v. wiskundig geavanceerdere methodes, zoals bootstrapping e.d. een fijner betrouwbaarheidsinterval te bekomen. Dit zorgt dan wel voor meer computationele complexiteit: dit is een afweging die in toekomstige herkarteringen gemaakt zal moeten worden.

# REFERENTIES


Chen, T. & Guestrin, C., 2016. *XGBoost: A Scalable Tree Boosting System.* s.l., ACM.

Collenteur, R. A. et al., 2019. Pastas: Open source software for the analysis of groundwater time series. *Groundwater,* August, Volume 57, p. 877–885.

De Keersmaeker, L. et al., 2024. *Digitalisatie van historisch landgebruik en analyse van landgebruiksverandering in Vlaanderen (1778-2022). Resultaten van deep learning (AI) beeldclassificatie togepast op drie historische kaarten..* s.l.:s.n.

Franken, T. & Wolfs, V., 2022. *Effecten van klimaatverandering op de freatische grondwaterstanden.* s.l.:s.n.

Hancock, J. T. & Khoshgoftaar, T. M., 2020. CatBoost for big data: an interdisciplinary review. *Journal of Big Data,* November.Volume 7.

Koch, J. et al., 2021. High Resolution Water Table Modeling of the Shallow Groundwater Using a Knowledge-Guided Gradient Boosting Decision Tree Model. *Frontiers in Water,* September.Volume 3.

Kroes, J. G. et al., 2017. *SWAP version 4: Theory description and user manual..* s.l.:s.n.

Leyssen, A. et al., 2024. *Watervlakken 2024: polygonenkaart van stilstaand water in Vlaanderen. Uitgave 2024..* s.l.:s.n.

Lundberg, S. M. et al., 2020. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. *Nature Machine Intelligence,* January, Volume 2, p. 56–67.

Lundberg, S. M. & Lee, S.-I., 2017. A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems,* Volume 30, p. 4765–4774.

Malinin, A., Prokhorenkova, L. & Ustimenko, A., 2020. Uncertainty in Gradient Boosting via Ensembles.

Malone, B. P., McBratney, A. B. & Minasny, B., 2013. Spatial Scaling for Digital Soil Mapping. *Soil Science Society of America Journal,* April, Volume 77, p. 890–902.

McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L. & Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma,* November, Volume 117, p. 3–52.

Prokhorenkova, L. et al., 2017. CatBoost: unbiased boosting with categorical features.

Swinnen, W., Ottoy, S., Vancampenhout, K. & Verstraeten, G., 2023. *Veen in Vlaamse bodem en ondergrond in relatie tot klimaat en boven- en ondergronds ruimtegebruik: eindrapport.* s.l.:s.n.

Szczepanek, R., 2022. Daily Streamflow Forecasting in Mountainous Catchment Using XGBoost, LightGBM and CatBoost. *Hydrology,* December, Volume 9, p. 226.

van den Akker, C., 2022. Daling van de grondwaterstand door de winning in vrij afwaterende gebieden. *H2O,* 30 August.

Van den Berg, M. et al., 2023. *Actualisatie van de drainageklasse van de bodemkaart door koppeling van grondwaterstatistieken aan de bodemkaart.* s.l.:s.n.

Van Heesen, H. C., 1970. Presentation of the seasonal fluctuation of the water table on soil maps. *Geoderma,* September, Volume 4, p. 257–278.

Von Asmuth, J. et al., 2021. *Handleiding tijdreeksanalyse.* s.l.:s.n.

Wittemans, K. et al., 2023. *Bodemdatabank-STAT: Koppeling van statistische bodemgegevens aan de bodemkaart gebaseerd op de bodemdata van de DOV-bodemdatabank. Studie uitgevoerd in opdracht van het Vlaams Planbureau voor Omgeving (Departement Omgeving).*. s.l.:s.n.

# BIJLAGES

Tabel 29: Vertaaltabel voor de klasses van de BBK naar de 6 gebruikte landgebruiksklasses voor de GxG-kartering.

| | **Nieuwe klasse** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Oorspronkelijke klasse** | **Bebouwd** | **Akker** | **Gras** | **Bomen** | **Water** | **Niet gekarteerd** |
| Gebouwen | **x** | | | | | |
| Autowegen | **x** | | | | | |
| Overig afgedekt | **x** | | | | | |
| Spoorwegen | **x** | | | | | |
| Akker | | **x** | | | | |
| Gras | | | **x** | | | |
| Weiland | | | **x** | | | |
| Gras gebouwen | | | **x** | | | |
| Gras wegen | | | **x** | | | |
| Overig onafgedekt | | | **x** | | | |
| Bomen | | | | **x** | | |
| Bomen gebouwen | | | | **x** | | |
| Bomen wegen | | | | **x** | | |
| Water | | | | | **x** | |

Tabel 30: Vertaaltabel voor de klasses van de historische landgebruikskaart van 1778 naar de 6 gebruikte landgebruiksklasses voor de GxG-kartering.

| | Nieuwe klasse | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Oorspronkelijke klasse | Bebouwd | Akker | Gras | Bomen | Water | Niet gekarteerd |
| Niet gekarteerd | | | | | | x |
| Akker | | x | | | | |
| Bebouwing | x | | | | | |
| Berm | | | x | | | |
| Boomgaard | | | | x | | |
| Bos-loofbos | | | | x | | |
| Bos-naaldbos | | | | x | | |
| Bos-parkbos | | | | x | | |
| Landduinen | | | x | | | |
| Grasland | | | x | | | |
| Heide | | | x | | | |
| Heide-met-bos | | | x | | | |
| Kustduin of duingrasland | | | x | | | |
| Schorre | | | x | | | |
| Strand of slikke | | | x | | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tuinen | | | x | | | |
| Veen-moeras | | | x | | | |
| Water | | | | | x | |
| Weg | x | | | | | |

Tabel 31: Vertaaltabel voor de klasses van de historische landgebruikskaart van 1873 naar de 6 gebruikte landgebruiksklasses voor de GxG-kartering.

| | Nieuwe klasse | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Oorspronkelijke klasse** | **Bebouwd** | **Akker** | **Gras** | **Bomen** | **Water** | **Niet gekarteerd** |
| Akker | | x | | | | |
| Bebouwing-huizen | x | | | | | |
| bebouwing-stedelijk | x | | | | | |
| Boomgaard | | | | x | | |
| Bos-lofbos | | | | x | | |
| Bos-naaldbos | | | | x | | |
| Bos-park-parkbos | | | | x | | |
| Grasland | | | x | | | |
| Heide-heide | | | x | | | |
| Heide-heide-op-landduinen | | | x | | | |
| Kerkhof | x | | | | | |
| Kustduin of duingrasland | | | x | | | |
| Schorren-slikken | | | x | | | |
| Strand | | | x | | | |
| Tuinen | | | x | | | |
| Veen-moeras | | | x | | | |
| Water | | | | | x | |
| Weg-onverhard | x | | | | | |
| Weg-spoorweg | x | | | | | |
| Weg-verhard | x | | | | | |

Tabel 32: Vertaaltabel voor de klasses van de historische landgebruikskaart van 1969 naar de 6 gebruikte landgebruiksklasses voor de GxG-kartering.

| | Nieuwe klasse | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Oorspronkelijke klasse** | **Bebouwd** | **Akker** | **Gras** | **Bomen** | **Water** | **Niet gekarteerd** |
| Akker of vergraven terrein | | x | | | | |
| Bebouwing-huizen | x | | | | | |
| Bebouwing-stedelijk | x | | | | | |
| Boomgaard | | | | x | | |
| Boomkwekerij | | | | x | | |
| Bos-gemengdbos | | | | x | | |
| Bos-gemengdbos-nat | | | | x | | |
| Bos-loofbos-nat | | | | x | | |
| Bos-loofbos | | | | x | | |
| Bos-naaldbos | | | | x | | |
| Bos-naaldbos-nat | | | | x | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bos-populier of rijshout | | | | x | | |
| Bos-populier of rijshout-nat | | | | x | | |
| Grasland | | | x | | | |
| Grasland-nat | | | x | | | |
| Heide-op-landduinen | | | x | | | |
| Heide, ruigte of kapvlakte | | | x | | | |
| Heide, ruigte of kapvlakte-nat | | | x | | | |
| Kerkhof | x | | | | | |
| Kustduin of duingrasland | | | x | | | |
| Landduinen | | | x | | | |
| Schorren-slikken | | | x | | | |
| Serre | x | | | | | |
| Strand | | | x | | | |
| Terril | x | | | | | |
| Tuinen | | | x | | | |
| Veen-moeras | | | x | | | |
| Water | | | | | x | |
| Weg-onverhard | x | | | | | |
| Weg-spoorweg | x | | | | | |
| Weg-verhard | x | | | | | |