



Validatie en toetsing LHM 4.1

Deelrapport 1: Grondwater



Opdrachtgever





Validatie en toetsing LHM 4.1



Deelrapport 1: Grondwater



PR4313.10
Maart 2021

Inhoud

1	Colofon	2
2	Inleiding	3
2.1	Aanleiding validatie en toetsing LHM 4.1	3
2.2	Dit deelrapport: validatie grondwater	3
2.3	Doelstelling	4
2.4	Uitgangspunten	4
3	Dataverwerking	5
3.1	Gebruikte meetdata	5
3.2	Analyse van meetreeksen	8
3.3	Afzonderlijk te beschouwen datasets	10
3.4	Validatie dataset	11
4	Toetsingscriteria en weging	13
4.1	Criteria	13
4.2	Ruimtelijke classificatie	14
4.3	Berekening statistieken	16
4.4	Weging	18
4.5	Clustering	19
5	Freatisch grondwater	20
5.1	Resultaten landelijk	20
5.2	Resultaten per hydrotype	29
5.3	Toetsingsresultaten overige deelgebieden	35
5.4	Validatie aan Gt-kartering	37
5.5	Validatie aan Gd-kartering	42
5.6	Validatie aan LSK-dataset	42
6	Stijghoogte	43
6.1	Eerste watervoerend pakket	43
6.2	Diepe watervoerende pakketten	46
6.3	Vergelijking met eerdere modelversies	49
7	Invloed modelresolutie op toetsing	51
8	Conclusies en discussie	55

8.1	Conclusies	55
8.2	Discussie	58
9	Literatuur	62
Bijlagen	63	
A	Statistieken freatische grondwaterstand per lithostratigrafische eenheid	64
B	Indeling in grondwatertrappen	66
C	Statistieken eerste watervoerend pakket	67
D	Statistieken diepe watervoerende pakketten	70
E	Validatie aan Gd-kartering	73
F	Validatie aan LSK dataset	75

1 Colofon

Voor u ligt een deelrapport dat de validatie en toetsing van het Landelijk Hydrologische Model (LHM) versie 4.1 beschrijft. Deze validatie en toetsing is uitgevoerd door HKV, Acacia Water en Berendrecht Consultancy in opdracht van Rijkswaterstaat. De begeleidingsgroep hiervoor was als volgt samengesteld:

- Jeroen Ligtenberg (Rijkswaterstaat, projectleider);
- Joost Heijkers (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden);
- Teun Spek (Provincie Gelderland);
- Mark Kramer (Hoogheemraadschap Rijnland);
- Wim Werkman (Rijkswaterstaat).

Verder waren Deltares en WenR betrokken bij de validatie en toetsing als inhoudelijk klankbord en als leverancier van de rekenresultaten van het LHM.

De validatie en toetsing zijn beschreven in de volgende deelrapporten:

- Deelrapport 1: Grondwater.
Auteur: Wilbert Berendrecht (Berendrecht Consultancy)
- Deelrapport 2: Onverzadigde zone.
Auteur: Michiel Pezij (HKV)
- Deelrapport 3: Oppervlaktewater.
Auteur: Nils van der Vliet (HKV)
- Deelrapport 4: Verzilting.
Auteurs: Annemieke van Doorn en Jouke Velstra (Acacia Water)
- Samenvattend hoofdrapport.
Auteur: Durk Klopstra (HKV) en bovengenoemden

2 Inleiding

2.1 Aanleiding validatie en toetsing LHM 4.1

Het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) is een geïntegreerd landsdekkend grond- en oppervlaktewatermodel van Nederland. Het LHM wordt binnen het Nationaal Water Model (NWM) ingezet voor diverse beleidsstudies op gebied van zoetwater (Deltaprogramma Zoetwater) en waterkwaliteit (hydrologische input voor modellering van nutriënten in grond- en oppervlaktewater, o.a. ten behoeve van de Nationale Analyse waterkwaliteit en KRW-Stroomgebied Beheerplannen. Daarnaast wordt het LHM door de Landelijke Coördinatie-commissie Waterverdeling (LCW) ingezet voor het maken van operationele verwachtingen.

Eind 2019 is LHM 4.0 beschikbaar gekomen. Deze versie bevat belangrijke en ingrijpende wijzigingen in vergelijking met vorige LHM-versies. De schematisatie en parameterisatie van de ondergrond is geactualiseerd en gebaseerd op actuele informatie in REGIS en GeoTOP. Daarnaast is - ten behoeve van een betere simulatie van de gewasverdamping - een dynamische koppeling gemaakt tussen MetaSWAP en het gewasgroeimodel WOFOST. Verder maakt deze LHM-versie gebruik van de nieuwste softwareversies van iMOD, inclusief een vernieuwde MetaSWAP-versie waarin de code meer robuust is gemaakt. Daarnaast zijn nog diverse overige wijzigingen doorgevoerd. Gezien de beoogde toepassing van deze nieuwe LHM-versie in waterkwaliteitsvraagstukken in 2021 en verder, is begin 2020 besloten om ten opzichte van de LHM 4.0-versie nog een beperkte verbeter- en kalibratieslag uit te voeren, die heeft geresulteerd in het LHM 4.1. Om inzicht te krijgen in de kwaliteit en daarmee het toepassingsbereik van het LHM 4.1, inclusief de benodigde toekomstige verbeteringen aan het LHM, is een uitgebreide toetsing en vergelijking aan metingen noodzakelijk.

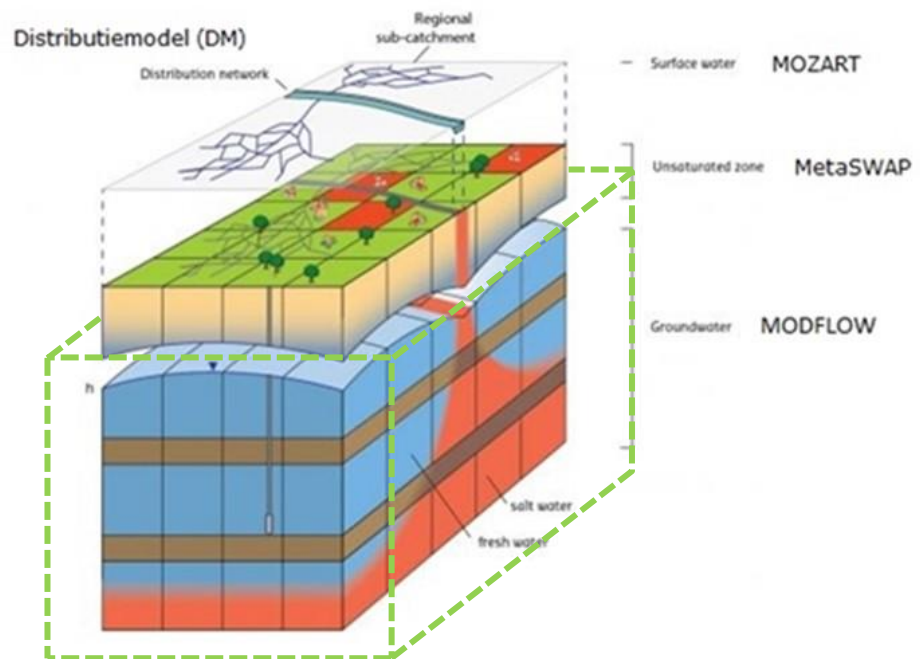
2.2 Dit deelrapport: validatie grondwater

Het LHM bestaat uit een koppeling van verschillende modellen (zie Figuur 2.1):

- MODFLOW (verzadigde zone)
- MetaSWAP (onverzadigde zone)
- MOZART (regionaal oppervlaktewater)
- Distributiemodel (DM, landelijk oppervlaktewater)
- WOFOST (gewasgroei)
- TRANSOL (Zoet-zout-modellering)

Dit deelrapport omvat de validatie van het verzadigde grondwater, zie omkadering in Figuur 2.1. Het betreft de freatische grondwaterstand en de stijghoogte in watervoerende pakketten.

*Figuur 2.1:
Opbouw van het
LHM (bron:
Deltares)*



2.3 Doelstelling

Het doel van de validatie van het LHM voor het onderdeel grondwater is tweeledig:

- Uitvoering van een validatie van de modelresultaten van LHM 4.1 voor stijghoogten en grondwaterstanden;
- Toetsing van LHM 4.1 – zoveel mogelijk op analoge wijze als bij LHM 3.0 – op basis van in deze opdracht te actualiseren toetsingscriteria.

2.4 Uitgangspunten

De LHM-modelberekeningen zijn door Deltares uitgevoerd met modelversie 4.1.1 op de LHM-rekenserver¹. Dit model bestaat uit 8 modellagen voor het verzadigde grondwater en bevat het gewasgroeimodel WOFOST. Het model is doorgerekend voor de periode 2011-2020. Op basis van de databeschikbaarheid is de validatie van het grondwaterdeel uitgevoerd over de periode 2011 t/m 2019.

¹ De run is gedraaid met iMODFLOW SVN-versie 2766 en MetaSWAP SVN-versie 1644

3 Dataverwerking

Voor een goede validatie van het grondwatermodel is het van groot belang om gebruik te maken van representatieve en betrouwbare meetdata. Dit vereist een zorgvuldige selectie en verwerking van beschikbare meetdata tot een validatieset.

In deze paragraaf worden de stappen beschreven die doorlopen zijn om van aangeleverde meetdata te komen tot een dataset waarmee de met het LHM gemodelleerde grondwaterstanden en stijghoogten gevalideerd kunnen worden.

3.1 Gebruikte meetdata

Dino-data

Voor de kalibratie van het LHM 4.1 (Jansen et al., 2020) is in maart 2020 vanuit de DINO-database de beschikbare data voor de periode vanaf 2011 opgevraagd. Hierin is dus alle data verwerkt die voor maart 2020 aan DINO is aangeleverd.

Voordat deze data nader is geanalyseerd, is een voorselectie gemaakt van buizen die hiervoor mogelijk bruikbaar zijn. Hiervoor zijn drie criteria gehanteerd:

1. De periode 2011 t/m 2019 moet tenminste drie hydrologische jaren bevatten waaruit een GHG en GLG bepaald kunnen worden. Dit is slechts een grove voorselectie. Verderop in de analyse worden nog wegingen toegekend aan de hand van het aantal hydrologische jaren, maar drie jaar wordt hier als het absolute minimum beschouwd;
2. Indien niet aan bovenstaand criterium wordt voldaan, wordt nog gekeken of de buis bruikbaar is voor validatie van de droogteperiodes in 2018 en 2019. Hiervoor moeten tenminste 24 metingen beschikbaar zijn in de periode 1 april – 1 oktober van betreffend jaar;
3. Indien een buis voldoet aan een van bovenstaande criteria, wordt gecontroleerd of het filter aan een LHM-modellaag toegekend kan worden. Hiervoor moet een filterstelling bekend zijn en moet de boven- en/of onderkant van het filter binnen een modellaag vallen. Voor filters waarbij de boven- of onderkant van het filter ontbreekt wordt een filterlengte van 1 m aangenomen. Indien een filter in meerdere modellen valt, wordt de laag geselecteerd waarin het grootste deel van de filter is gesitueerd².

² De eerste modellaag betreft de deklaag. Met name in Holoceen Nederland heeft deze modellaag een hoge verticale weerstand en beperkte dikte. Voor een juiste toekenning zo goed mogelijke laagtoekenning van de filters wordt hier de bovenkant van modellaag 2 als onderkant van laag 1 gebruikt.

Tabel 3.1 toont een overzicht van het aantal buizen dat is aangeleverd en het aantal buizen dat wel/niet voldoet aan genoemde criteria.

*Tabel 3.1:
Voorselectie DINO
buizen.*

	Aantal buizen
Aangeleverd met coördinaten en meetdata	38133
Niet bruikbaar voor validatie	17409
Buizen die voldoen aan criteria	18193

Regio-data

De verzamelde DINO-data zijn uitgebreid met meetreeksen die nog niet of ten dele in DINO zijn opgenomen. Deze aanvullende meetreeksen zijn opgevraagd bij drinkwaterbedrijven, provincies en waterschappen. We hebben van 19 waterbeheerders aanvullende meetreeksen ontvangen. De meeste overige waterbeheerders hebben laten weten dat de DINO-database voor hun beheergebied up-to-date is. Een uitgebreide beschrijving van de ontvangen data is opgenomen in de rapportage van fase 1 van dit project. Aanvullend op de daarin vermelde data heeft waterschap Vechtstromen data aangeleverd voor hun zuidelijk beheergebied. Verder heeft wetterskip Fryslân een kanttekening geplaatst bij de bruikbaarheid van de aangeleverde data voor validatie, omdat het met name projectmatige buizen ter beoordeling van (peil-)maatregelen betreffen. Daardoor is hun advies om de data minder weging te geven bij de validatie.

Tabel 3.2 toont voor alle regio-data een overzicht van het aantal buizen dat is aangeleverd en het aantal buizen dat wel/niet voldoet aan criteria zoals benoemd bij de DINO-data. Dit overzicht betreft unieke buizen; indien eenzelfde buis door meerdere partijen is aangeleverd, wordt deze slechts eenmaal gebruikt.

*Tabel 3.2:
Voorselectie
regiobuizen.*

	Aantal buizen
Aangeleverd met coördinaten en meetdata	17889
Niet bruikbaar voor validatie of duplicaat binnen regio	5148
Buizen die voldoen aan criteria	12741

Samengevoegde dataset

De buizen vanuit de regionale waterbeheerders en DINO zijn samengevoegd tot één dataset. In geval van duplicaten (identieke putcode in regionale en DINO-dataset) is er voorkeur gegeven aan de regionale data. Tabel 3.3 geeft een overzicht van het aantal buizen na samenvoeging van de datasets.

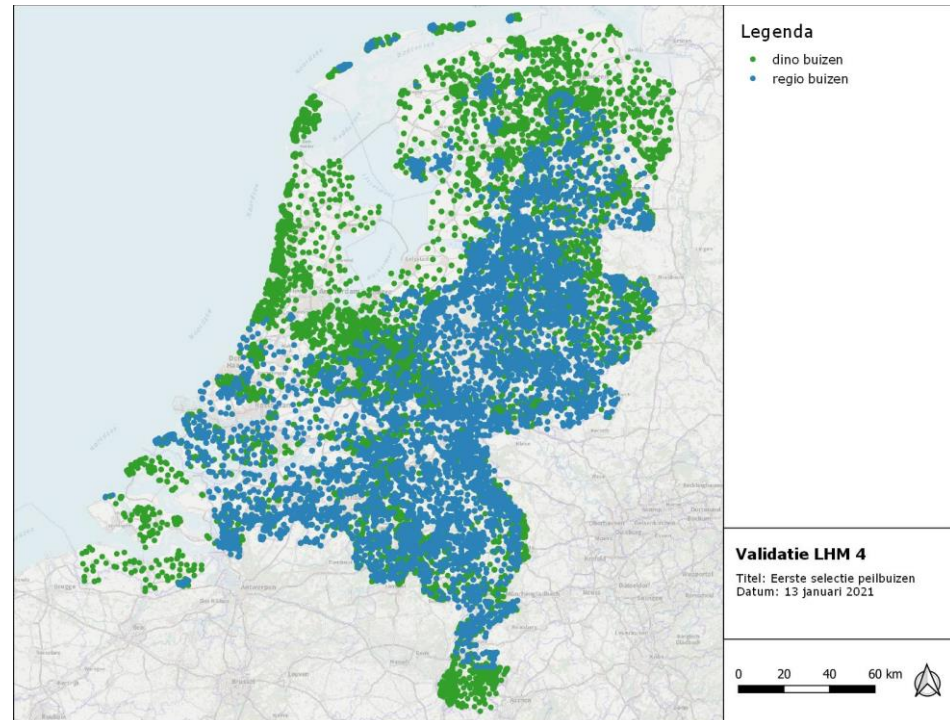
*Tabel 3.3:
Samenvoeging
voorselectie DINO
en regio buizen.*

	Aantal buizen
Totaal samengevoegde data	30934
Zonder duplicaten (regio en DINO)	24853
Waarvan regionale buizen	12741
Waarvan dino buizen	12112

Figuur 3.1 toont een ruimtelijke weergave van de peilbuislocaties voor zowel de DINO als regio-data. De figuur laat zien dat, alhoewel de meetpuntendichtheid ruimtelijk varieert, de landelijke dekking redelijk goed

is. Daar waar DINO-data beperkt aanwezig is (bijvoorbeeld delen van Zuid-Holland en Gelderland), vult de regionale data dit vrij goed aan.

*Figuur 3.1:
Overzicht van
peilbuislocaties van
DINO en regio.*



Selectie freatische en diepe buizen

Bij de validatie maken we onderscheid tussen de freatische grondwaterstand en stijghoogten. Bij stijghoogten wordt een verder onderscheid gemaakt tussen het eerste watervoerend pakket en diepere lagen.

Gegeven de modelschematisatie van de ondergrond is het te simplistisch om alleen modellaag 1 als freatisch te beschouwen en modellaag 2 als eerste watervoerend pakket. Doordat weerstand tussen modellagen kan ontbreken, is het beter om een indeling op basis van deze weerstand te maken, waarbij de weerstand wordt berekend als de dikte tussen 2 modellagen gedeeld door de verticale doorlatendheid k_{vv} . De grens tot waar een modellaag freatisch wordt beschouwd, is wanneer de cumulatieve weerstand groter dan 20 dagen wordt. Dezelfde werkwijze wordt gehanteerd voor het eerste watervoerend pakket. De resulterende indeling van het aantal buizen is opgenomen in Tabel 3.4.

*Tabel 3.4:
Indeling buizen in
freatisch, wvp1 en
diep.*

	Aantal buizen
Totaal	24853
Freatisch	15933
Eerste watervoerend pakket (wvp1)	6314
Diepe watervoerende pakketten	2606

Om te beoordelen of meetreeksen betrouwbaar genoeg zijn om te gebruiken bij de validatie, zijn alle meetreeksen individueel geanalyseerd. Hierbij zijn verschillende toetsen uitgevoerd. Sommige van de gebruikte toetsingscriteria zijn proefondervindelijk vastgesteld. Daarbij is telkens getracht om de criteria zodanig in te stellen dat in ieder geval de meest onbetrouwbare reeksen worden verwijderd, zonder dat daarmee ook veel bruikbare reeksen afvallen. Hiertoe zijn steekproefsgewijs visuele controles uitgevoerd.

Toets uitbijters

Voor het toetsen op uitbijters is de gemodificeerde Z-score test (Iglewicz en Hoaglin, 1992) toegepast. Metingen met een Z-score > 3 zijn als uitbijter aangemerkt en uit de meetreeks verwijderd.

Toets stap in meetreeks

Een stap kan zowel door een externe invloed (bijvoorbeeld een peilmaatregel) worden veroorzaakt als door een fout in het meetproces of bij de dataverwerking. In beide gevallen is het zeer waarschijnlijk dat deze informatie niet in het model zit. Er is voor gekozen om dergelijke reeksen niet mee te nemen in de validatie.

Om vast te stellen of er een stap in de reeks zit, is voor iedere maand in de meetperiode, met behulp van een tweezijdige t-test getoetst of het reeksgemiddelde voor en na deze datum identiek is. Hierbij is een minimale lengte van twee jaar voor beide periodes aangehouden. Er wordt aangenomen dat de stap plaatsvindt in de maand waar de waarschijnlijkheid dat de beide gemiddelden verschillen het grootst is (kleinste p-waarde). Voor betreffende maand wordt tenslotte de stapgrootte berekend als fractie van de standaarddeviatie van de meetreeks. Bij een p-waarde < 0.01 en een relatieve stapgrootte > 2.5 wordt de meetreeks niet meegenomen bij de validatie.

Bij de kalibratie van het LHM (Janssen et al., 2020) werd reeds geconstateerd dat in de DINO-meetdata van de Provincie Noord-Brabant een bekende en verklaarde systematische fout zit in de jaren 2017 en 2018. Door deze fout ontstaat ook een grote stap in de reeksen. Voor deze reeksen is besloten om alleen de data tot en met 2016 mee te nemen.

Toets respons op neerslag en verdamping

Met behulp van de PASTAS-package (Collenteur et al., 2019) voor Python zijn alle meetreeksen gemodelleerd op neerslag en verdamping. Aan de hand de resultaten van deze modellering is vastgesteld in welke mate de waargenomen dynamiek verklaard kan worden vanuit neerslag en verdamping. Uitgangspunt is dat een meetreeks bruikbaar is voor de validatie als de dynamiek in zekere mate verklaard kan worden. Met name buizen met veel fouten in de meetdata, buizen die zeer lokale (niet-natuurlijke) fenomenen meten, of buizen met kapotte meetapparatuur kunnen op deze wijze uit de dataset worden gefilterd.

Bij deze toets zijn de volgende criteria gehanteerd:

- Een buis wordt niet meegenomen indien minder dan 20% van de reeksvariantie verklaard kan worden uit neerslag en verdamping.
- Een buis wordt niet meegenomen indien minder dan 50% van de reeksvariantie verklaard kan worden en de standaardafwijking van het geschatte nulde moment M_0 groter is dan $0.5M_0$.

Voor de overige buizen geldt dat buizen met een verklaarde variantie van minder dan 50% een wegingsfactor 0.5 krijgen (zie hoofdstuk 4). Deze buizen worden dus wel meegenomen bij de validatie, maar hebben een kleiner gewicht bij het berekenen van ruimtelijke statistieken.

Toets lineaire trend

Bij de tijdreeksanalyse kan het deel dat niet uit neerslag en verdamping wordt verklaard (residu) een trend bevatten. Trends kunnen bijvoorbeeld veroorzaakt worden door veranderingen in onttrekkingsdebieten, maar ook door fouten in meetapparatuur.

Onderdeel van bovengenoemde tijdreeksmodellering is dan ook het uitvoeren van een trendtoets op het residu. Indien deze toets een significante lineaire trend aantoont, dan wordt opnieuw een tijdreeksmodel geschat, waarbij naast neerslag en verdamping ook een lineaire trend wordt meegenomen.

Indien de aldus geschatte trendhelling meer dan 5 cm/jaar bedraagt, wordt de buis niet meegenomen bij de validatie. Enerzijds omdat een GHG/GLG bij dergelijke trends minder zegt en anderzijds omdat relatief grote afwijkingen kunnen ontstaan door eventuele fouten in onttrekkingsdebieten die in het model zijn opgenomen. Deze fouten hebben dan een onevenredige invloed op de validatie statistieken.

Toets droogval

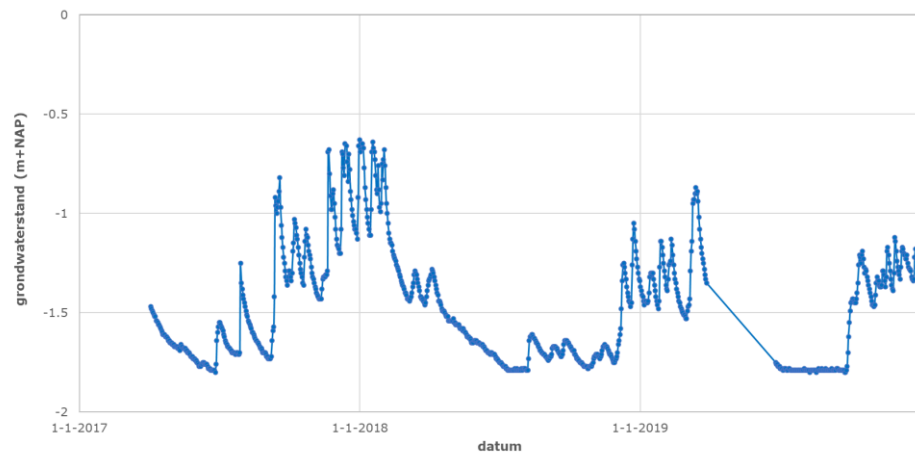
Indien een meetfilter onvoldoende diep is gesitueerd, kan het gebeuren dat in droge periodes het filter droogvalt. Buizen waar dit plaatsvindt zijn te herkennen aan meetreeksen met een afvlakking aan de onderzijde van de reeks, zie voorbeeld in Figuur 3.2.

De volgende procedure is gebruikt om droogvallende buizen automatisch te detecteren:

- Bereken voor de meetreeks de 1-, 10- en 99-percentielen (p_1 , p_{10} resp. p_{99});
- Bereken de range van de meetreeks als $p_{99} - p_1$, waarbij een minimale waarde van 0.05 m wordt gehanteerd;
- Er wordt aangenomen dat er sprake is van droogval indien $p_{10} < 0.05 * (p_1 + \text{range})$.

In woorden: indien de 10% laagste waarden dichtbij de 1% laagste waarden liggen, wordt aangenomen dat er sprake is van droogval.

Figuur 3.2:
Voorbeeld van
meetreeks met
droogval.



Buizen met droogval worden *niet* volledig uit de dataset verwijderd, omdat droogval alleen van invloed is op de GLG en dynamiek van de meetreeks. Deze buizen worden daarom wel gebruikt voor de GHG.

3.3

Afzonderlijk te beschouwen datasets

Voor enkele gebieden is bij voorbaat bekend dat het LHM hier (nog) niet geschikt voor is, of dat de lokale hydrologie zich niet goed laat beschrijven op de gebruikte modelresolutie van 250x250 m². Er is besloten om deze gebieden apart te beschouwen. Het betreft de volgende gebieden:

- **Waddeneilanden.** Er is bij de modelbouw relatief weinig aandacht besteed aan de modellering ter plaatse van de Waddeneilanden. Door deze buizen als aparte dataset mee te nemen, krijgen we een eerste indruk van de huidige modelkwaliteit in dit gebied.
- **Stedelijk/bebouwd gebied.** Ook peilbuizen binnen stedelijk of bebouwd gebied worden als aparte set meegenomen in de validatie. De geohydrologische heterogeniteit binnen bebouwd gebied is veelal groot en niet als zodanig opgenomen in het model. Voor de selectie van buizen in bebouwd gebied is data uit het Bestand Bodemgebruik 2015 (bron: CBS/Nationaal Georegister) gecombineerd met TOP10NL plaatsvlakken (bron: Kadaster). Alle BBG2015-eenheden, niet zijnde bos, natuur, landbouw of water, die binnen de plaatsvlakken vallen, worden aangemerkt als bebouwd gebied. Door deze selectie worden 'losse snippers' bebouwing in buitengebieden niet meegenomen, maar alleen de aaneengesloten dorpskernen en steden.
- **Nabij oppervlaktewater.** Peilbuizen nabij oppervlaktewater worden veelal sterk beïnvloed door het oppervlaktewaterpeil. De representativiteit van de in deze buizen gemeten grondwaterstand voor een 250x250 m² rekencel is beperkt. Er is besloten om alleen buizen nabij hoofdafwatering of grotere watervlakken apart te analyseren. Voor de selectie is gebruikgemaakt van het TOP10NL-bestand (bron: Kadaster). Uit dit bestand zijn de waterlijnen geselecteerd die zijn aangeduid als 'hoofdafwatering'. Kleine sloten

en greppels vallen daarbuiten. Daarnaast zijn watervlakken geselecteerd met een minimale oppervlakte van 1000 m². Alle buizen binnen een afstand van 12.5 m tot deze waterlijnen en -vlakken worden geselecteerd en apart beschouwd.

- **Beïnvloed door onttrekkingen.** Door de modelresolutie van 250 m beschrijft het model rond onttrekkingen niet exact een pompkegel. Dichtbij onttrekkingen zal het model numerieke afwijkingen geven ten opzichte van de metingen, waardoor validatie aan de hand van deze meetpunten een verstoring geeft. Als selectiecriteria wordt een afstand van 1 km rondom een pompput met een minimaal debiet van 150 m³/d aangehouden en dient de cumulatieve weerstand van eventuele scheidende lagen tussen meetfilter en pompput < 200 dagen te zijn.

3.4

Validatie dataset

Freatische peilbuizen

Uit de selectie freatische buizen (zie paragraaf 3.1) is op basis van de meetreeksanalyses (paragraaf 3.2) een verdere selectie gemaakt. Op advies van Provincie Zuid-Holland zijn de DINO-reeksen van de provincie uit de dataset verwijderd vanwege een te geringe betrouwbaarheid. Het resultaat van de selectie is weergegeven in Tabel 3.5 en Figuur 3.3 (links). In totaal blijven er 8443 freatische buizen over voor de validatie. Daarbovenop worden nog 5190 buizen gebruikt voor validatie van specifieke deelgebieden (Waddeneilanden, bebouwd gebied, nabij hoofdafwatering en beïnvloed door onttrekkingen).

Tabel 3.5:
Selectie freatische
buizen.

	Aantal buizen
Na samenvoeging DINO en regio	15933
Na verwijderen reeksen met stap (160)	15773
Na verwijderen reeksen met trend (308)	15465
Na verwijderen reeksen met lage datakwaliteit (1829)	13636
Na verwijderen DINO reeksen Zuid-Holland (3)	13633
Na verwijderen Waddeneilanden (471)	13162
Na verwijderen buizen in bebouwd gebied (3702)	9460
Na verwijderen buizen nabij hoofdafwatering (790)	8670
Na verwijderen buizen beïnvloed door onttrekkingen (227)	8443

In aanvulling op bovenstaande selectie, zijn buizen uit de dataset verwijderd die zijn gebruikt bij de kalibratie van het LHM. Dit is echter alleen noodzakelijk bij validatie van de GHG en GLG; voor de dynamiek kunnen deze buizen gewoon gebruikt worden. Buizen die de toets op droogval niet hebben doorstaan, worden alleen gebruikt voor de validatie van de GHG.

Peilbuizen in eerste watervoerend pakket

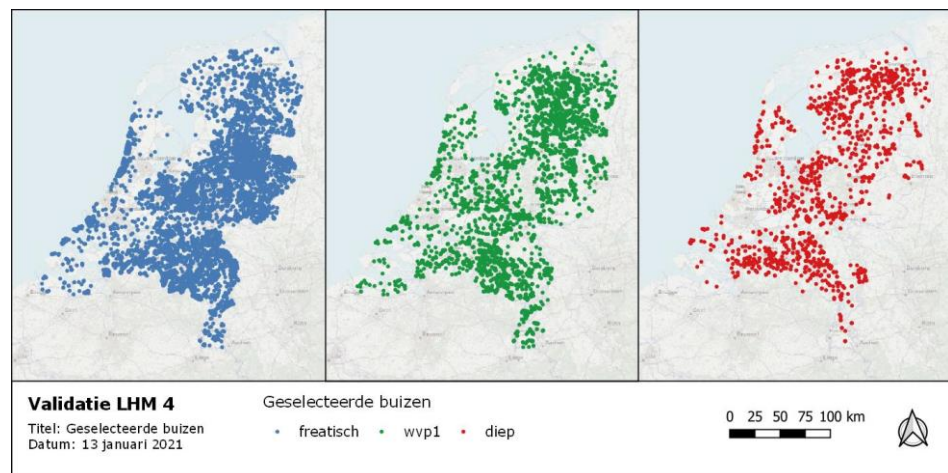
Net als bij de freatische buizen, is ook de set met buizen in het eerste watervoerend pakket verder uitgedund op basis van de meetreeks. Het

resultaat is opgenomen in Tabel 3.6 en Figuur 3.3 (midden). In totaal blijven er voor het eerste watervoerend pakket 3802 buizen over.

*Tabel 3.6:
Selectie buizen in
eerste watervoerend
pakket.*

	Aantal buizen
Na samenvoeging DINO en regio	6314
Na verwijderen reeksen met stap (84)	6230
Na verwijderen reeksen met trend (92)	6138
Na verwijderen reeksen met lage datakwaliteit (838)	5300
Na verwijderen DINO reeksen Zuid-Holland (12)	5288
Na verwijderen Waddeneilanden (45)	5243
Na verwijderen buizen in bebouwd gebied (762)	4481
Na verwijderen buizen nabij hoofdafwatering (476)	4005
Na verwijderen buizen beïnvloed door onttrekkingen (203)	3802

*Figuur 3.3:
Geselecteerde
buizen per diepte
categorie.*



Peilbuizen in diepe watervoerende pakketten

In de selectieprocedure van de diepere buizen zijn buizen ter plaatse van bebouwd gebied en hoofdafwatering niet verwijderd. Er wordt verondersteld dat de invloed van bebouwing en oppervlakte niet of nauwelijks meer merkbaar is in de diepere watervoerende pakketten. In totaal blijven 1795 buizen over voor de validatie, zie Tabel 3.7 en Figuur 3.3 (rechts).

*Tabel 3.7:
Selectie buizen in
diepe watervoerend
pakketten.*

	Aantal buizen
Na samenvoeging DINO en regio	2606
Na verwijderen reeksen met stap (103)	2503
Na verwijderen reeksen met trend (25)	2478
Na verwijderen reeksen met lage datakwaliteit (458)	2020
Na verwijderen DINO reeksen Zuid-Holland (17)	2003
Na verwijderen Waddeneilanden (13)	1990
Na verwijderen buizen beïnvloed door onttrekkingen (195)	1795

4 Toetsingscriteria en weging

4.1 Criteria

Tabel 4.1 en Tabel 4.2 tonen een overzicht van de criteria voor freatisch grondwater respectievelijk stijghoogte. Deze criteria zijn gebaseerd op de criteria uit de toetsingsrapportage van het LHM 3.0 (Hoogewoud et al., 2013). Hierop zijn echter enkele wijzigingen doorgevoerd:

1. De criteria worden getoetst per hydrotype in plaats van per district. Een hydrotype is een classificatie op basis van de geohydrologische opbouw van de ondiepe ondergrond. De indeling is gebaseerd op de geologische kaart van Nederland (1:600.000) en de indeling in slecht doorlatende lagen in de ondergrond. Er worden in totaal 22 hydrotypen (exclusief water) onderscheiden, zie paragraaf 4.2 voor een meer gedetailleerde beschrijving.
2. De indeling naar gebiedstypen met bijbehorende toetsingscriteria is bijgewerkt (zie paragraaf 4.2). Daarbij is de naamgeving voor peilbeheerste en vrij afwaterende gebieden aangepast naar holocene respectievelijk pleistocene gebieden.
3. Bij toetsing van de dynamiek kijken we, naast amplitude, nu ook expliciet naar het recessieverloop tijdens perioden van langdurige droogte. Daarbij stellen we als criterium dat in 80% van de gebieden het recessieverloop niet meer dan 25% afwijkt.
4. Voor stijghoogten kijken we niet alleen naar afwijkingen in gemiddelde stijghoogte, maar ook naar de dynamiek. Voor het eerste watervoerend pakket is gekozen voor een afwijking van maximaal 35% van de gemeten dynamiek; voor de diepere stijghoogte een afwijking van maximaal 50% van de gemeten dynamiek.

Een uitgebreide toetsing van het recessieverloop is nieuw ten opzichte van eerdere validaties. Het toetsingscriterium en bijbehorende definitie van het recessieverloop is experimenteel, in de zin dat deze naar aanleiding van de opgedane ervaringen in de toekomst aangepast en/of aangescherpt kunnen worden. In dit kader hebben we tijdens de validatie reeds onderzocht in hoeverre we de timing van de laagste grondwaterstand mee kunnen nemen als toetsingsparameter. Het gaat hierbij dan om het verschil tussen het voorspelde en gemeten moment waarop de laagste grondwaterstand optreedt.

Tenslotte bevat de validatie ook een analyse van het gemiddelde verloop van de grondwaterdynamiek, waarbij we kijken hoe goed het model in staat is om de mate van stijging en daling van de grondwaterstand te voorspellen. Dit biedt waardevolle informatie over hoe het model reageert op externe invloeden zoals neerslag en verdamping.

Voor de grondwatertrappen (Gt) is geen criterium gedefinieerd. De validatie aan de Gt-kartering wordt uitsluitend gebruikt als aanvullende validatie om, waar mogelijk, extra informatie over het model naar boven te krijgen. Zo geeft het mogelijk inzicht in eventuele fouten in bodemfysica.

*Tabel 4.1:
Toetsbare criteria
voor freatische
grondwaterstand.*

Indicator	Criterium
GHG	In 80% van de meetpunten in een gebied: Holoceen (voorheen peilbeheerst): < 20 cm afwijking Pleistoceen (voorheen vrij afwaterend): < 35 cm afwijking Sterk hellend: < 50 cm afwijking Afwijking van de mediaan < 15 cm
GLG	In 80% van de meetpunten in een gebied: Holoceen (voorheen peilbeheerst): < 30 cm afwijking Pleistoceen (voorheen vrij afwaterend): < 50 cm afwijking Sterk hellend: < 100 cm afwijking Afwijking van de mediaan < 15 cm
Dynamiek (GHG-GLG)	In 80% van de meetpunten in een gebied: Afwijking kleiner dan 25% van de gemeten dynamiek Afwijking van de mediaan < 15 cm
Recessieverloop droogteperiode	In 80% van de meetpunten in een gebied: Afwijking kleiner dan 25% van het gemeten recessieverloop (gradiënt)

*Tabel 4.2:
Toetsbare criteria
voor stijghoogten.*

Indicator	Criterium
Gemiddelde stijghoogte wvp 1	In 80% van de meetpunten maximaal 50 cm afwijking Afwijking van de mediaan < 15 cm
Dynamiek wvp 1	In 80% van de meetpunten afwijking kleiner dan 35% van de gemeten dynamiek
Gemiddelde stijghoogten diep	In 80% van de meetpunten maximaal 100 cm afwijking Afwijking van de mediaan < 15 cm
Dynamiek diep	In 80% van de meetpunten afwijking kleiner dan 50% van de gemeten dynamiek

4.2

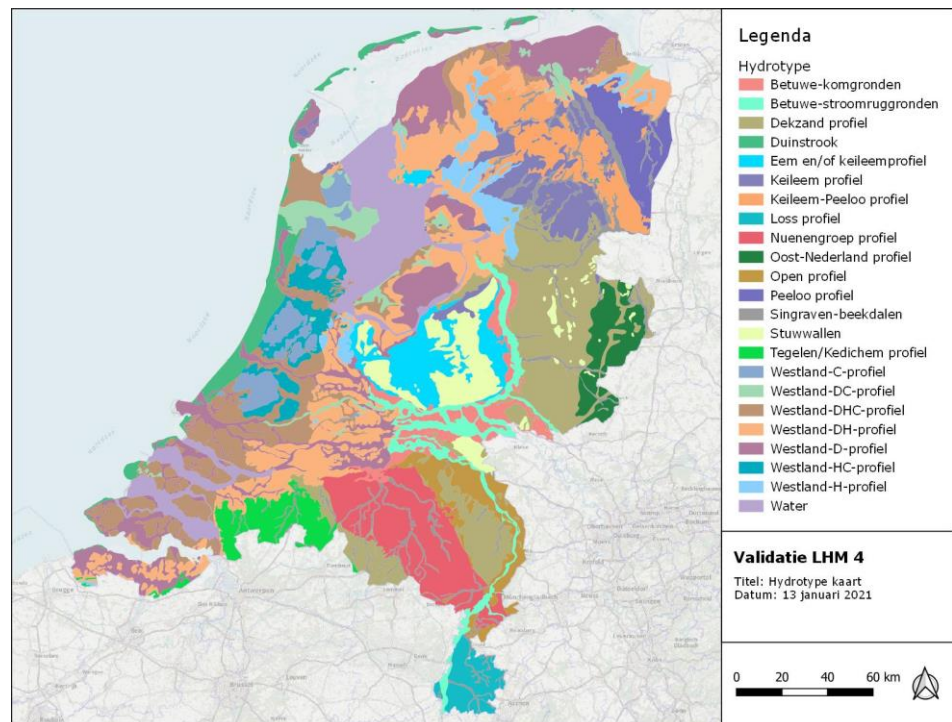
Ruimtelijke classificatie

Voor de toetsing van de berekende grondwaterstanden en stijghoogten worden meetlocaties ingedeeld in ruimtelijke eenheden. Op deze wijze kunnen de validatieresultaten beter geduid worden en is het mogelijk om onderscheid te maken in toetsingscriteria.

Hydrotypen

Voor toetsing van de validatieresultaten worden de meetpunten ingedeeld naar hydrotype. Figuur 4.1 toont een kaart met hydrotypen (Massop et al., 2000). De hydrotypenkaart geeft een indeling van Nederland op basis van de geohydrologische opbouw van de ondiepe ondergrond. De indeling is gebaseerd op de geologische kaart van Nederland (1:600.000) en de indeling in slecht doorlatende lagen in de ondergrond uit de studie "Kwetsbaarheid van het grondwater".

*Figuur 4.1:
Indeling van
Nederland op basis
van hydrotypen
(bron: Massop et al.,
2000).*



Gebiedstypen

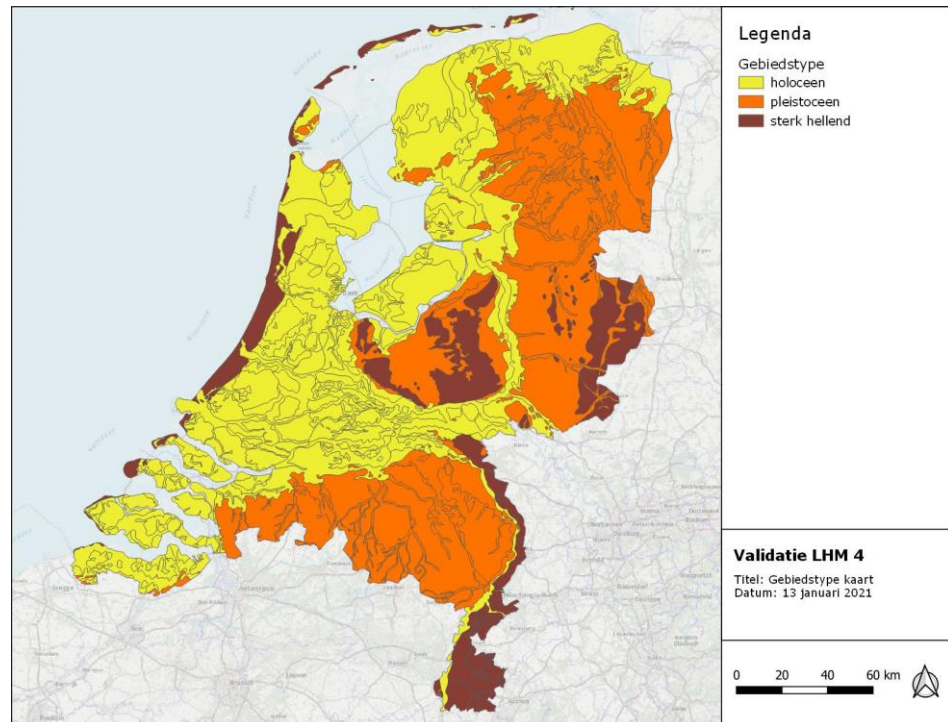
Naast een indeling naar hydrotypen, wordt bij de toetsing van de validatieresultaten ook onderscheid gemaakt naar gebiedstype. Bij eerdere validaties van het LHM werd onderscheid gemaakt naar peilbeheerst, vrij afwaterend en sterk hellend (Hoogewoud et al., 2013, Figuur 2.3). Navraag bij de NHI-helppdesk leerde echter dat deze indeling niet (meer) digitaal leverbaar is. Daarnaast bleek dat de indeling niet overeenkomt met de binnen LSW's gemaakte indeling van peilbeheerst en vrij afwaterend en dat de indeling gebaseerd was op districten, terwijl we nu uitgaan van een indeling op basis van hydrotypen.

Daarom is een nieuwe indeling gemaakt aan de hand van de hydrotypen, welke zoveel mogelijk overeenkomt met de oorspronkelijk indeling (ten behoeve van onderling vergelijk van toetsingsresultaten). Daarbij is de naamgeving ook aangepast, om verwarring met de indeling van 'peilbeheerst' en 'vrij afwaterend' binnen LSW's te voorkomen. Er is gekozen voor de drie volgende 3 gebiedstypen:

- Holocene (als vervanging voor peilbeheerst)
- Pleistoceen (als vervanging voor vrij afwaterend)
- Sterk hellend

Gebiedstype Holocene omvat de Westland profielen en Betuwe kom- en stroomruggonden. Pleistocene gebieden omvatten de overige hydrotypen, waarbij de Stuwwallen, Duinstrook, Oost-Nederland profiel en Zuid-Limburg plus het grensgebied in Limburg ten oosten van de Maas, als sterk hellend zijn aangemerkt. Zie Figuur 4.2.

Figuur 4.2
Indeling van
Nederland op basis
van gebiedstype



Lithostratigrafie

Voor de validatie van stijghoogten is het interessant om naast hydrotypen en gebiedstypen, ook onderscheid naar lithostratigrafische eenheden te maken. Zo kunnen we zien of het model voor bepaalde lithostratigrafische eenheden beter of slechter presteert dan gemiddeld. Dit kan helpen bij toekomstige modelverbeteringen. Voor de indeling is gebruik gemaakt van het Digitale Geologische model DGM v2.2 (bron: TNO). De hydrogeologische eenheden van REGIS die aan de basis liggen van het LHM, vallen samen met, of zijn onderdeel van, de in DGM onderscheiden lithostratigrafische eenheden.

4.3

Berekening statistieken

GHG, GLG en dynamiek (amplitude)

De GHG en GLG voor de gemeten grondwaterstanden zijn berekend aan de hand van de beschikbare meetdata. Veelal is er sprake van gaten in meetreeksen, varieert de meetfrequentie of beslaat de meetreeks slechts een deel van de validatieperiode. Dit heeft invloed op de berekende waarde van de GHG en GLG. Voor een consistente validatie is er daarom voor gekozen om de LHM-modeluitvoer te samplen conform de meetreeksen. Hierdoor wordt de gemodelleerde waarde op precies dezelfde wijze berekend als de gemeten waarde.

Voor de berekening van de GHG en GLG zijn de grondwaterstanden op de 14^e en 28^e van iedere maand gebruikt. Indien er op betreffende datum geen waarneming beschikbaar is, wordt de dichtstbijzijnde waarde binnen een range van +/-4 dagen gebruikt. Als binnen een hydrologisch jaar (april-maart) tenminste 20 waarnemingen beschikbaar zijn, dan worden de 3

laagste waarnemingen gemiddeld tot de LG3 en de 3 hoogste tot de HG3. De aldus voor ieder hydrologisch jaar berekende HG3's en LG3's zijn gemiddeld, wat resulteert in respectievelijk de GHG en GLG. De GHG en GLG zijn berekend ten opzichte van NAP. De dynamiek (amplitude) is berekend als het verschil tussen de GHG en GLG.

De GHG en GLG zijn waarden die zijn geïntroduceerd voor landbouwkundig gebruik en dus typisch bruikbaar voor dat doeleinde en voor landbouwgebieden. In gebieden met zeer diepe grondwaterstanden hebben deze waarden op zichzelf geen betekenis. Temeer omdat de hierboven beschreven berekeningswijze uitgaat van een seizoensmatig verloop van de grondwaterstand, terwijl diepe grondwaterstanden vaak een meer langjarig patroon in de dynamiek vertonen. Desondanks zijn de GHG en GLG nog steeds prima bruikbaar als statistiek bij het bepalen van *verschillen* tussen modelvoorspellingen en metingen, zeker ook omdat – zoals beschreven – de uitvoer van het LHM is gesampled conform de meetreeksen.

Bovenstaande geldt ook voor het vaststellen van verschillen in de stijghoogtedynamiek. Ook hiervoor gebruiken we bovenstaande berekeningswijze voor de GHG en GLG, om vervolgens de dynamiek te berekenen als het verschil tussen beide.

Recessieverloop droogteperiode

Voor het toetsen van het recessieverloop tijdens droogte zijn de langdurige droogteperiodes in 2018 en 2019 geanalyseerd. Het doel hiervan is om vast te stellen of de grondwaterstand voldoende uitzakt en op welk moment de laagste grondwaterstand optreedt en dus ook het herstel wordt ingezet.

Het recessieverloop wordt berekend als de gradiënt tussen de hoogste stand h_{max} in de periode 1 april – 1 juni en de laagste stand h_{min} in de periode na 1 juli:

$$g = \frac{h_{max} - h_{min}}{t_{max} - t_{min}}$$

De relatieve voorspelfout is dan:

$$e = \left(\frac{g_{model}}{g_{meet}} - 1 \right) * 100\%$$

Aangezien niet alle meetreeksen doorlopen tot na bovengenoemde droogteperiode, wordt er getoetst of de gevonden waarde h_{min} ook daadwerkelijk een minimum is en of na dit moment een stijging van de grondwaterstand wordt ingezet.

Het verschil tussen het gemodelleerde en gemeten moment dat de laagste grondwaterstand optreedt, is:

$$\Delta t = t_{min,model} - t_{min,meting}$$

Dynamiek (stijging en daling)

Aanvullend op de toetsing van het recessieverloop tijdens droogte, wordt het verloop van de grondwaterstand over de tijd geanalyseerd. Als maat hiervoor zijn de volgende statistieken bepaald:

- Relatieve fout grondwaterstijging: voor iedere meetreeks is berekend hoe een gemodelleerde stijging zich verhoudt tot een gemeten stijging van de grondwaterstand. Hiertoe is voor ieder tijdsinterval de gradiënt $g = \Delta h / \Delta t$ bepaald. Vervolgens berekenen we voor alle positieve gradiënten het gemiddelde \bar{g} . De relatieve voorspelfout is opnieuw:

$$e = \left(\frac{\bar{g}_{model}}{\bar{g}_{meet}} - 1 \right) * 100\%$$

- De relatieve fout voor de grondwaterdaling is op eenzelfde wijze berekend.

Bovengenoemde fouten zijn berekend op week- en maandbasis, zodat we een indruk krijgen van het gedrag op verschillende tijdschalen.

Toetsing

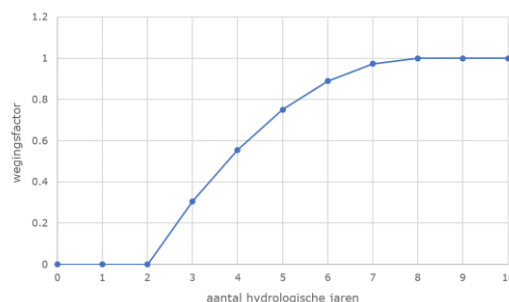
Ter plaatse van iedere peilbuis is de berekende modeluitvoer vergeleken met de gemeten waarden. Vervolgens is per buis getoetst of de modeluitvoer voldoet aan de in paragraaf 4.1 genoemde toetsingscriteria, afhankelijk van het gebiedstype waarin de peilbuis is gesitueerd. Indien aan het criterium wordt voldaan, krijgt de toetsuitkomst een waarde 1 en anders een waarde 0. Deze waarden worden per hydrotype bij elkaar opgeteld en gedeeld door het aantal buizen.

4.4

Weging

Omdat de betrouwbaarheid van meetdata en daarvan afgeleide statistieken niet voor elk meetpunt gelijk is, zijn er wegingsfactoren toegekend aan de meetpunten. Deze factoren zijn als volgt bepaald:

- Zoals in paragraaf 3.2 al is benoemd, krijgen buizen met een verklaarde variantie van minder dan 50% een wegingsfactor van 0.5;
- Aan korte meetreeksen wordt een lagere weging toegekend dan aan langere reeksen. Reeksen met minimaal 8 hydrologische jaren krijgen een wegingsfactor 1; bij minder hydrologische jaren neemt de wegingsfactor kwadratisch af tot 0, zie onderstaand figuur.



- Op advies van Wetterskip Fryslân krijgen de door hen aangeleverde buizen een lagere weging (zie paragraaf 3.1). Er is gekozen voor een wegingsfactor 0.5.

Bovengenoemde wegingsfactoren zijn multiplicatief, wat inhoudt dat als een buis meerdere wegingsfactoren heeft, de uiteindelijke wegingsfactor wordt berekend door deze factoren met elkaar te vermenigvuldigen.

4.5

Clustering

De ruimtelijke spreiding van meetpunten is onevenredig. In sommige gebieden wordt weinig gemeten; in andere gebieden, bijvoorbeeld rondom winningen of in projectgebieden, wordt intensief gemeten. Voor het berekenen van gebiedsstatistieken zijn meetpunten daarom geclusterd op basis van locatie met behulp van hiërarchische clustering (*complete linkage* methode), zoals beschikbaar binnen de Python Scipy package. Alleen punten die binnen eenzelfde hydrotype en gebiedstype liggen, worden binnen een cluster samengevoegd. Als drempelwaarde voor de clustering is een afstand van 1500 m aangehouden. Dit betekent dat binnen een cluster de maximale afstand tussen meetpunten 1500 m bedraagt.

Voor de berekening van de ruimtelijke statistieken zijn eerst voor ieder cluster de (gewogen) statistieken berekend. Ieder cluster krijgt daarbij een wegingsfactor op basis van de wegingsfactoren binnen het cluster. Vervolgens zijn de (gewogen) statistieken berekend van alle clusters en individuele meetpunten bij elkaar.

5 Freatisch grondwater

5.1 Resultaten landelijk

In eerste instantie is de gehele landelijke dataset geanalyseerd. Zoals beschreven in hoofdstuk 3, zijn voor de GHG en GLG de DINO-buizen die bij de kalibratie zijn gebruikt, uit de dataset gehaald. Daarbovenop zijn voor de GLG en dynamiek de buizen verwijderd waar droogval is gesignaleerd.

Opnieuw wordt hier benadrukt dat de GHG en GLG in principe zijn bedoeld voor landbouwkundig doeleinden. In gebieden met diepe grondwaterstanden hebben deze waarden geen betekenis. In deze validatie worden de GHG en GLG echter puur gebruikt als statistieken om voorspelde en gemeten grondwaterstandsreeksen met elkaar te vergelijken (zie paragraaf 4.3). In de tabellen en figuren van dit hoofdstuk worden de termen GHG en GLG dus in die context gebruikt.

De samenvattende statistieken van de validatie zijn weergegeven in Tabel 5.1. De bijbehorende spreiding van de voorspelfouten voor de GHG, GLG en dynamiek zijn als histogram weergegeven in Figuur 5.1.

In de tabel is zowel het aantal buizen N als het aantal clusters N* opgenomen. De gemiddelde fout ME voor de GHG en GLG is -0.65 m; de mediane fout of 50-percentiel (P50) is echter bijna 0. Dit betekent dat de ME sterk beïnvloed wordt door een aantal grote negatieve waarden. Dit is ook terug te zien in het histogram in Figuur 5.1. Hetzelfde zien we terug in het verschil tussen de gemiddelde absolute fout (MAE) en de mediane absolute fout (MedAE). Deze laatste is aanzienlijk lager en bedraagt voor zowel de GHG als GLG 0.3 m. De gemiddelde en mediane fout van de dynamiek is 0, terwijl de spreiding redelijk normaal verdeeld is rondom 0.

De met het LHM berekende freatische grondwaterstanden voldoen landelijk gezien niet aan het criterium dat minimaal 80% van de meetpunten moet voldoen aan de gestelde bandbreedtes voor GHG, GLG en dynamiek. De dynamiek wijkt het vaakst af; de GLG het minst vaak. Er wordt wel voldaan aan het criterium dat de mediane afwijking (P50) in absolute zin kleiner dan 0.15 m is.

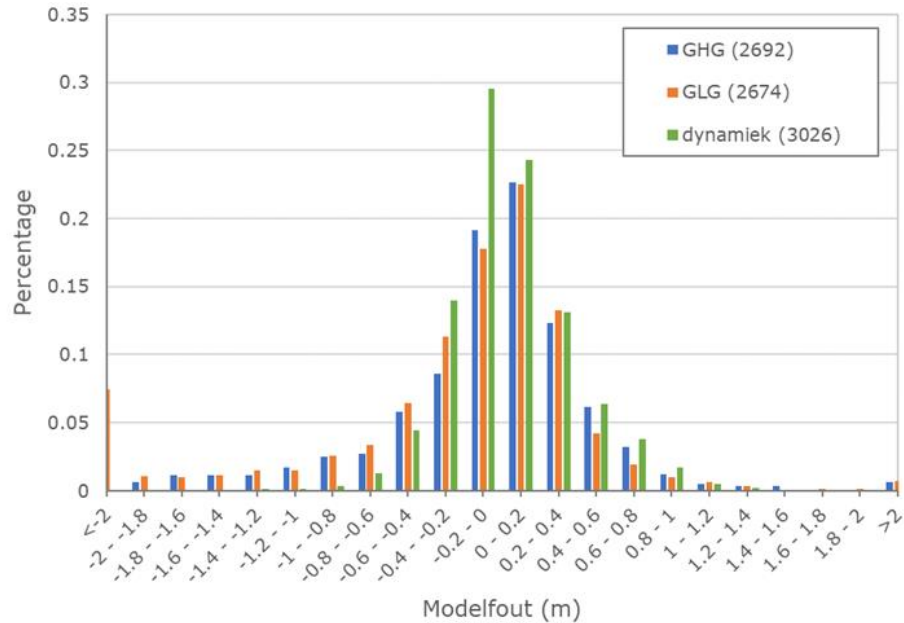
*Tabel 5.1:
Landelijke
statistieken
freatische
grondwaterstand
(fouten in meters).*

	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
GHG	6207	2692	-0.65	-0.02	1.03	0.30	2.98	54%
GLG	6094	2674	-0.65	-0.04	1.01	0.29	2.94	67%
Dynamiek	7440	3026	0.02	0.00	0.25	0.20	0.33	45%

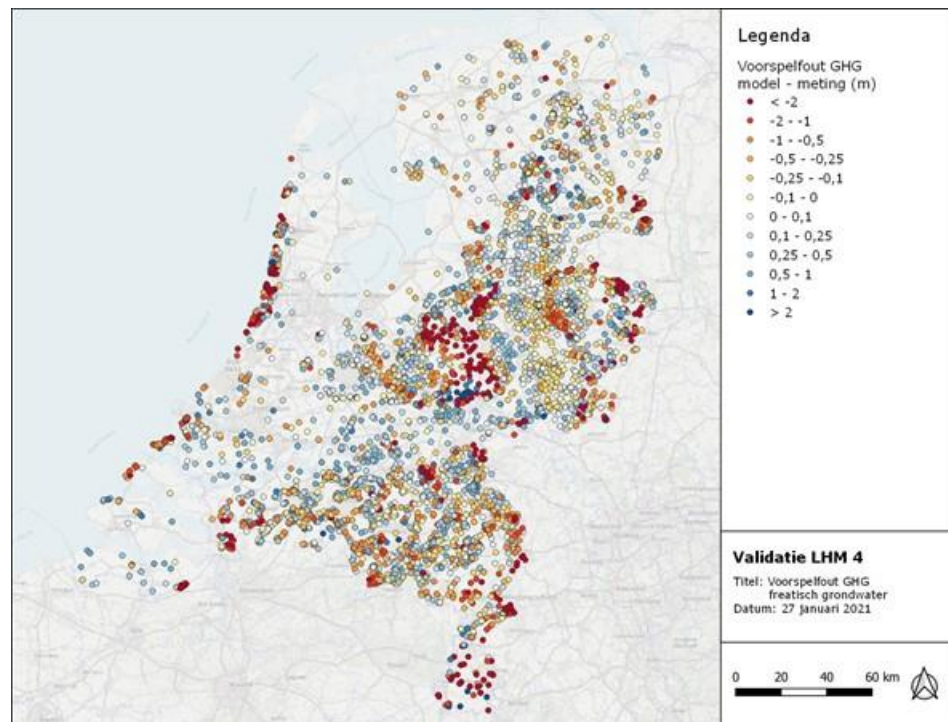
Figuur 5.2 tot Figuur 5.4 tonen de ruimtelijke spreiding van de voorspelfout. Hierin vallen direct de grote voorspelfouten in de hoger gelegen gebieden zoals de Veluwe, Limburg en westelijke duinstrook op. In deze gebieden is

het model aanzienlijk lager dan gemeten. Overwegend diepere voorspellingen komen verder voor in de Achterhoek, Twente en Salland, hoewel hier vooral de GHG te laag is; de GLG is in deze gebieden overwegend te hoog. Dit is terug te zien in de dynamiek (Figuur 5.4); deze is in grote delen van Oost-Nederland aanzienlijk geringer dan gemeten. Ook in Brabant wordt op veel locaties een te beperkte dynamiek voorspeld. Globaal vertoont de fout in de dynamiek min of meer een tweedeling: in holoceen Nederland is de dynamiek overwegend te groot; in de rest van Nederland is die overwegend te gering.

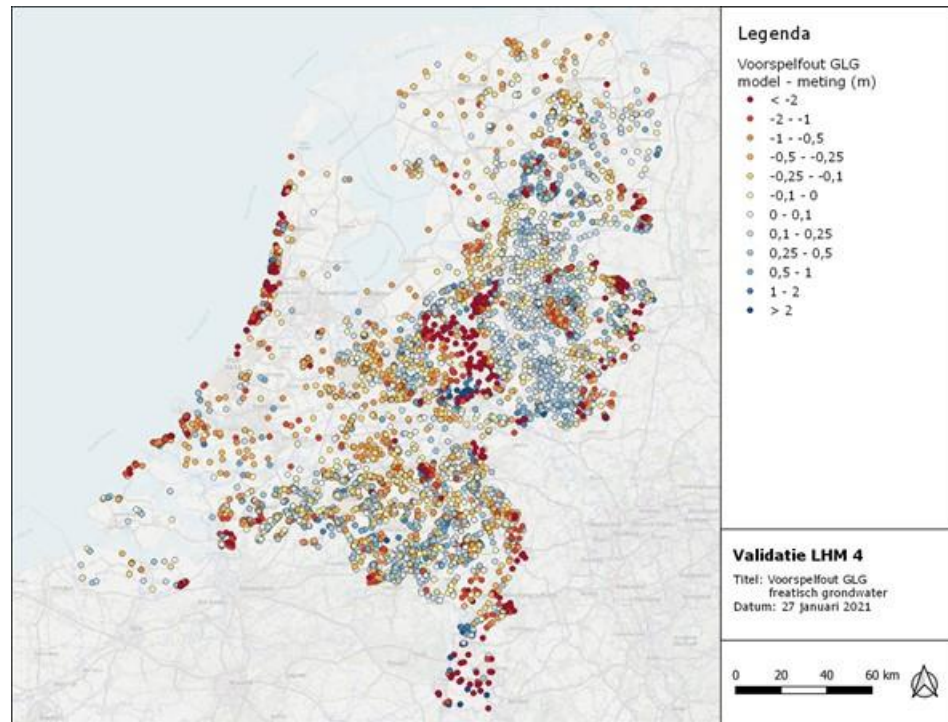
Figuur 5.1: Spreiding van voorspelfouten (landelijk).



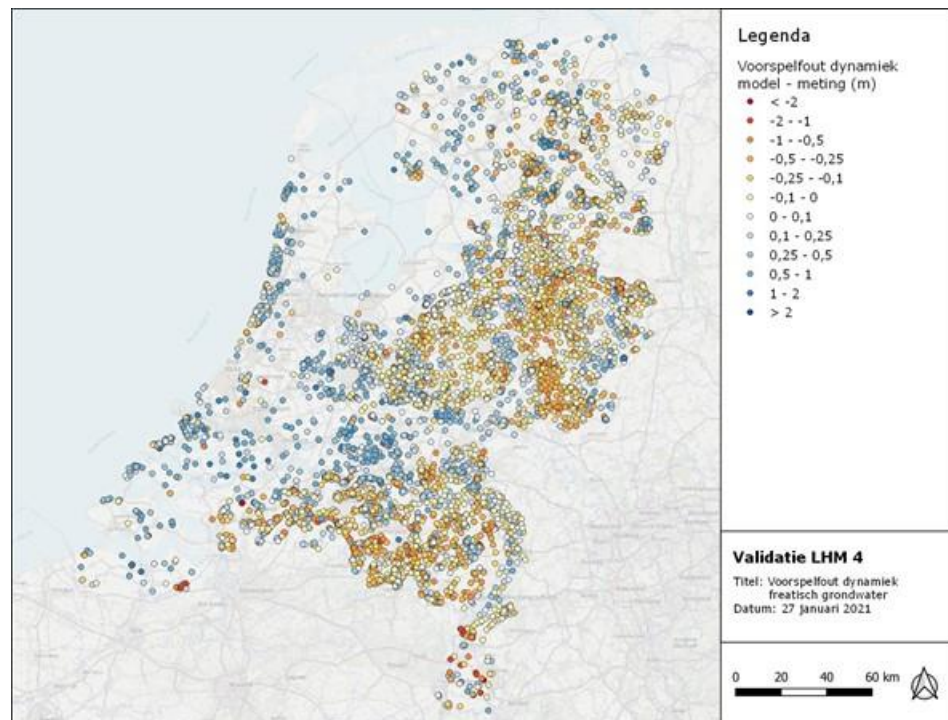
Figuur 5.2: Verschil tussen LHM-voorspelling en uit meetreeks afgeleide GHG.



*Figuur 5.3:
Verschil tussen LHM-
voorspelling en uit
meetreeks afgeleide
GLG.*



*Figuur 5.4:
Verschil tussen LHM-
voorspelling en uit
meetreeks afgeleide
dynamiek.*



Toetsingsresultaten per gebiedstype

Bij de toetsingscriteria voor GHG en GLG is onderscheid gemaakt naar de drie gebiedstypen holocene, pleistoceen en sterk hellend. Het is dan ook zinvol om de landelijke resultaten nader te analyseren per gebiedstype.

In Tabel 5.2 zijn per gebiedstype de statistieken voor de GHG en GLG opgenomen. Hierin is te zien dat het LHM in de pleistocene gebieden op relatief meer locaties voldoet aan de toetsingscriteria dan in de andere gebieden. In de sterk hellende gebieden is de score het laagst. Voor geen van de gebiedstypen wordt voldaan aan het criterium dat minimaal 80% van de locaties aan de vastgestelde bandbreedtes moet voldoen.

In de holocene gebieden is de gemiddelde absolute fout (MAE) voor de GHG en GLG het kleinste. Echter, de *mediane* absolute fout (MedAE) is voor de holocene en pleistocene gebieden nagenoeg gelijk. Dit betekent dat in de pleistocene gebieden een relatief klein aantal locaties met grote fouten voorkomen. Het gaat hier veelal om locaties nabij stuwwallen, maar ook enkele locaties verspreid over Brabant.

Als we kijken naar de mediane fout (P50), dan zien we dat in de pleistocene gebieden deze fout voldoet aan het toetsingscriterium (< 0.15 m). Echter, in de holocene gebieden voldoet de mediane fout van de GLG met -0.17 m niet aan het criterium. De P50 van de GHG (0.12 m) voldoet wel, maar is wel aan de hoge kant. In de sterk hellende gebieden is zowel de GHG als GLG structureel te laag.

De verdeling van de voorspelfouten komt goed tot uitdrukking in de histogrammen in Figuur 5.5 en Figuur 5.6. In de sterk hellende gebieden voorspelt het LHM een aanzienlijk lagere grondwaterstand dan gemeten. De histogrammen voor deze gebieden hebben een links scheve verdeling, waarbij in circa 32% van de locaties de modelvoorspelling meer dan 2 m te laag is. De verdeling van de voorspelfout voor de GLG in holocene gebieden heeft een duidelijk negatieve bias, wat ook tot uitdrukking komt in een ME van -0.25 m en P50 van -0.17 m (zie Tabel 5.2).

Tabel 5.2:
Statistieken
voorspelfout GHG,
GLG en dynamiek
voor freatische
grondwaterstand per
gebiedstype (fout in
meters).

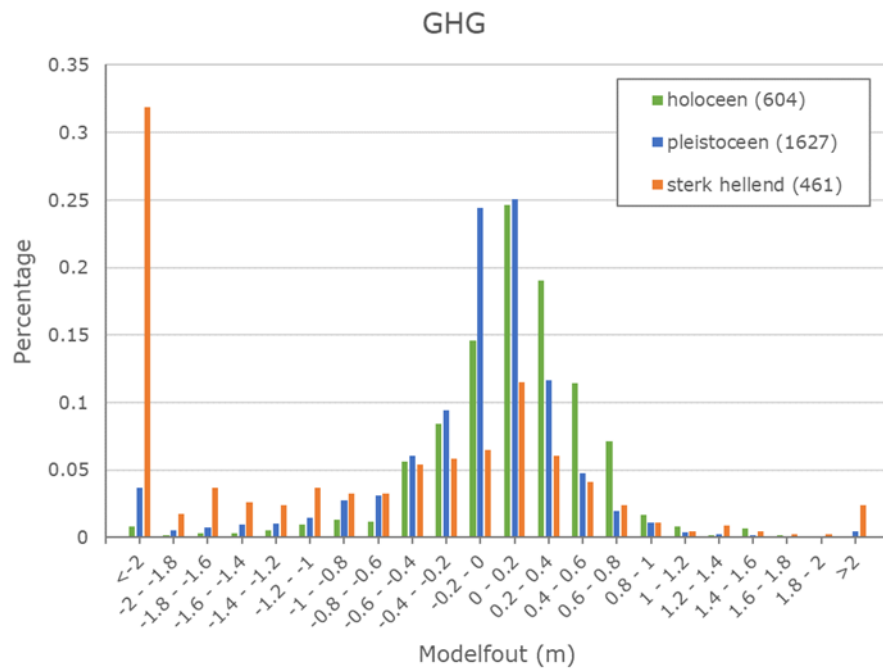
GHG	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
holocene	1051	604	0.04	0.12	0.41	0.27	0.83	39%
pleistoceen	4091	1627	-0.24	-0.03	0.52	0.24	1.24	64%
sterk hellend	1058	461	-2.63	-0.68	3.26	1.07	6.35	35%

GLG	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
holocene	1045	602	-0.25	-0.17	0.41	0.27	0.86	55%
pleistoceen	4013	1612	-0.16	0.04	0.50	0.24	1.21	77%
sterk hellend	1029	460	-2.59	-0.76	3.20	1.1	6.25	49%

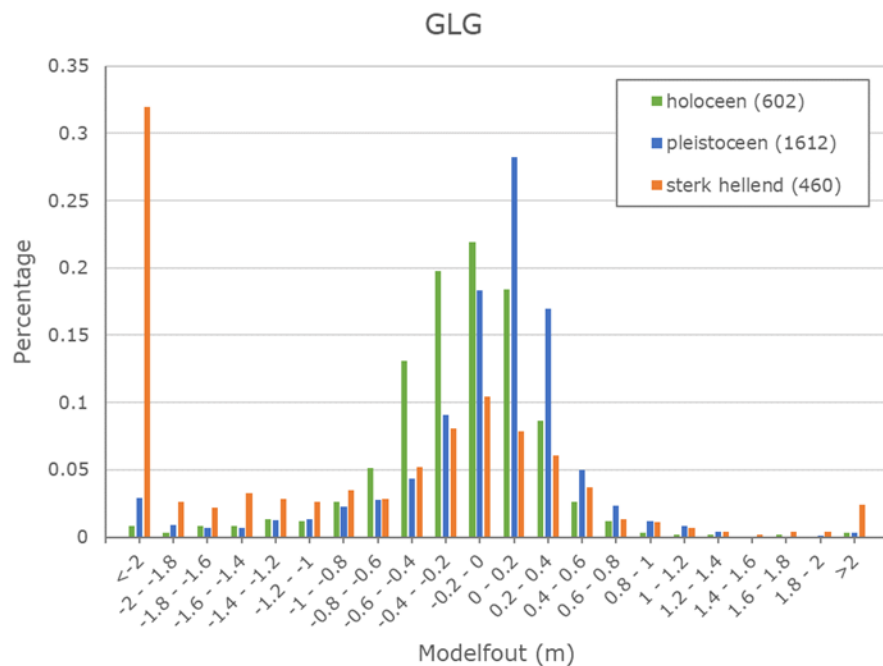
dynamiek	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
holocene	1450	756	0.29	0.28	0.38	0.34	0.47	28%
pleistoceen	4812	1776	-0.08	-0.07	0.22	0.18	0.28	52%
sterk hellend	1163	494	0.00	-0.01	0.21	0.15	0.30	44%

Alhoewel voor de toetsing van de dynamiek geen onderscheid wordt gemaakt naar gebiedstype, is het wel inzichtelijk om de statistieken voor de dynamiek ook uit te splitsen naar gebiedstype, zie Tabel 5.2. Uit de tabel blijkt dat de dynamiek in de holocene gebieden voor slechts 28% en in de sterk hellende gebieden voor 44% van de locaties voldoet; voor pleistocene gebieden voldoet net meer dan de helft. Kijkend naar de mediane fout blijkt dat in de holocene gebieden de dynamiek gemiddeld 28 cm te groot is en in de andere gebieden enkele centimeters te laag. Het ruimtelijke patroon dat al goed tot uitdrukking kwam in Figuur 5.4, wordt dus onderbouwd door de cijfers in Tabel 5.2.

Figuur 5.5: Spreiding van voorspelfouten voor GHG per gebiedstype (landelijk).



Figuur 5.6: Spreiding van voorspelfouten voor GLG per gebiedstype (landelijk).



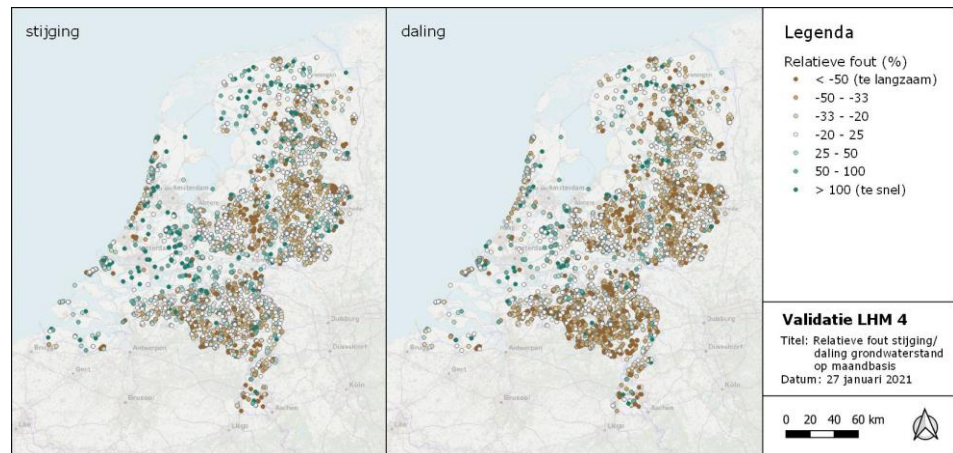
Analyse dynamiek (stijging en daling)

Alvorens het recessieverloop gedurende droogte te beschouwen, kijken we eerst naar het dynamisch gedrag van het grondwater over de gehele validatieperiode. Hiertoe is een strengere selectie van de gebruikte buizen toegepast. Er is gekozen om alleen die buizen te gebruiken waarvoor met behulp van de tijdreeksanalyse tenminste 70% van de gemeten variatie verklaard kan worden uit neerslag en verdamping. Daarnaast zijn ook hier droogvallende buizen niet meegenomen.

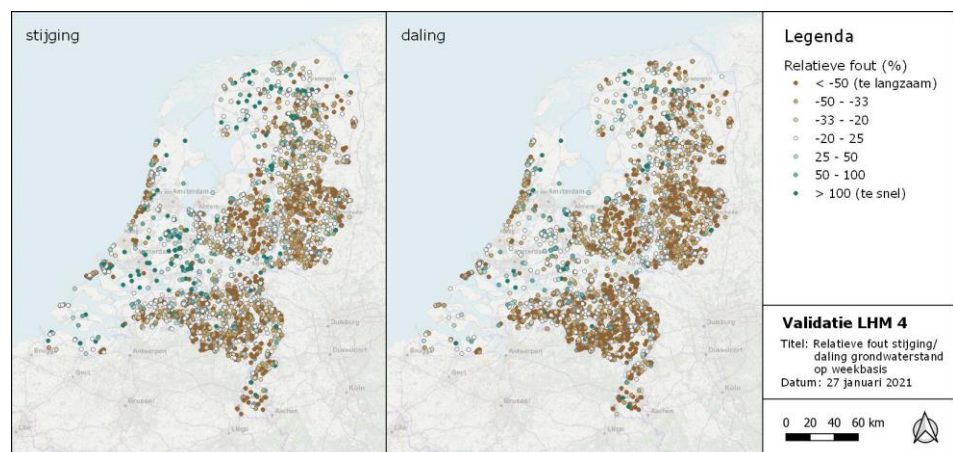
Figuur 5.7 toont de relatieve fout van de stijging en daling (dynamiek) van de grondwaterstand op maandbasis. Figuur 5.8 toont deze fout voor de dynamiek op weekbasis. De fout is uitgedrukt als percentage, waarbij een percentage groter dan nul een te sterke dynamiek voorstelt en een percentage kleiner dan nul een te geringe dynamiek.

Globaal bekeken komen de patronen in positieve en negatieve fouten (logischerwijs) overeen met het patroon in de amplitude (Figuur 5.4). Echter, door het onderscheid in stijging en daling zien we dat het model bij dalende grondwaterstanden meer achterblijft op de metingen dan bij stijgende. Met name in Oost-Nederland en delen van Brabant voorspelt het LHM een geringere uitzakking van de grondwaterstand.

*Figuur 5.7:
Relatieve fout in
stijging/daling van
de grondwaterstand
op maandbasis
(positieve waarde:
model stijgt/daalt te
snel).*



*Figuur 5.8:
Relatieve fout in
stijging/daling van
de grondwaterstand
op weekbasis
(positieve waarde:
model stijgt/daalt te
snel).*



Als we de fout in dynamiek op maandbasis vergelijken met die op weekbasis, dan vinden we op weekbasis grotere fouten en overheersen negatieve waarden. Met andere woorden: op weekbasis is de dynamiek overwegend te laag, wat duidt op een afvlakking van de variatie op de korte termijn. Dit komt goed tot uiting in Tabel 5.3, waarin per gebiedstype de ruimtelijke statistieken van de voorspelfout zijn opgenomen. De tabel bevat steeds 2 waarden: de eerste is de relatieve fout bij stijging; de tweede de relatieve fout bij daling.

De gemiddelde en mediane fout is voor de pleistocene en sterk hellende gebieden kleiner dan nul. Dit betekent dat gemiddeld de voorspelde dynamiek te vlak is; de grondwaterstand in het model stijgt minder snel en daalt minder snel dan gemeten. Dit is sterker bij een dalende dan bij een stijgende grondwaterstand. De voorspelde grondwaterstand zakt dus in de pleistocene en sterk hellende gebieden gemiddeld genomen onvoldoende uit. Verder zijn op weekbasis de fouten groter; variaties op korte termijn worden in deze gebieden (gemiddeld genomen) afgevlakt in het model.

In de holocene gebieden zijn de gemiddelde en mediane fout juist groter dan nul; de dynamiek is te sterk. Hier is het met name de stijging van grondwaterstanden die het meest afwijkt.

*Tabel 5.3:
Statistieken per
gebiedstype voor
relatieve fout (%) in
stijging/daling van
de grondwaterstand
op maand- en
weekbasis.*

Maandbasis	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE
holoceen	640	350	38 / 10	38 / 12	66 / 51	48 / 41
pleistoceen	3384	1300	-15 / -29	-15 / -29	38 / 51	32 / 45
sterk hellend	805	379	-17 / -29	-11 / -21	58 / 62	38 / 38

Weekbasis	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE
holoceen	640	350	23 / -2	29 / 0	74 / 55	51 / 41
pleistoceen	3384	1300	-32 / -41	-32 / -40	62 / 78	51 / 74
sterk hellend	805	379	-38 / -45	-32 / -38	82 / 100	58 / 66

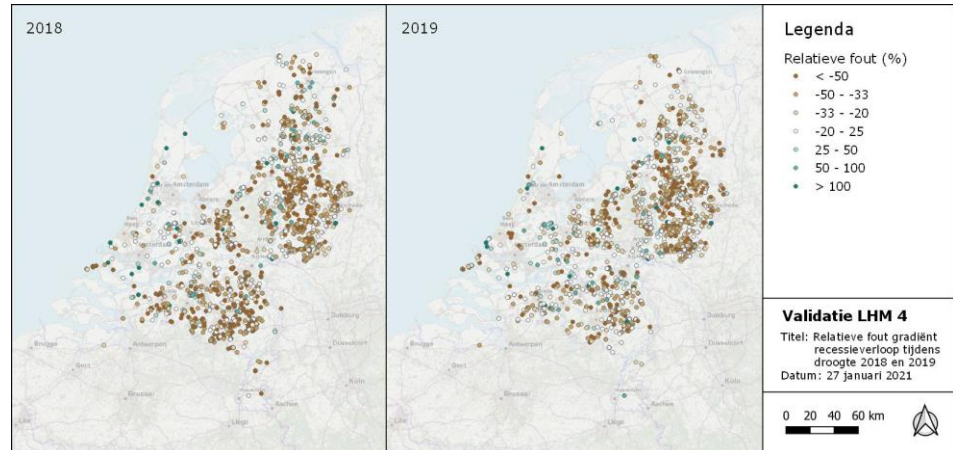
Toetsing recessieverloop droogteperiode

Naast het gemiddelde verloop van de grondwaterstand in de tijd over de gehele validatieperiode, is specifiek het recessieverloop gedurende de droogteperiodes in 2018 en 2019 getoetst, zie Figuur 5.9 en Tabel 5.4. Voor een goede interpretatie hiervan is het belangrijk om te melden dat bij de analyse van de resultaten is gebleken dat de gekozen definitie (gradiënt tussen maximale en minimale zomergrondwaterstand, zie paragraaf 4.2), niet altijd een goede maat is voor het recessieverloop. De berekende gradiënt blijkt behoorlijk gevoelig te zijn voor kortstondige dynamiek of juist een relatief vlak verloop van de grondwaterstand rondom het maximum en/of minimum. In dergelijke situaties kan er al gauw een verschuiving van enkele weken optreden, wat vervolgens doorwerkt in de berekende gradiënt en dus ook in de voorspelfout. Hierdoor ontstaat er relatief veel ruis in de foutberekening. Desalniettemin biedt de huidige analyse bruikbare inzichten.

Net als bij de gemiddelde daling over de validatieperiode, zien we dat in de langdurige droge periodes van 2018 en 2019 het recessieverloop in het LHM

achterblijft op de metingen (negatieve fout). In 2018 is dit wat sterker dan in 2019. In de pleistocene gebieden is de fout het grootst. In 2018 wordt voor slechts 23% van de locatie aan het toetsingscriterium voldaan; in 2019 is dit 30%. Voor de overige gebieden wordt in 2018 en 2019 voor 34% respectievelijk 38/39% aan het criterium voldaan.

Figuur 5.9: Relatieve fout in recessieverloop tijdens droogte 2018 en 2019 (positieve waarde: model daalt te snel).



Tabel 5.4: Statistieken relatieve voorspelfout recessieverloop (gradiënt) gedurende droogte 2018 en 2019 per gebiedstype, uitgedrukt in %.

2018	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	Toets
holoceen	295	214	-22.4	-18.7	69.8	44.5	35%
pleistoceen	1352	742	-41.1	-39.7	82.0	73.8	24%
sterk hellend	145	91	-33.9	-33.9	69.8	54.9	32%

2019	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	Toets
holoceen	248	184	-24.1	-14.9	69.8	41.3	38%
pleistoceen	1210	702	-33.9	-33.9	62.2	54.9	30%
sterk hellend	203	112	-25.9	-25.9	51.4	44.5	38%

Naast de gradiënt is ook het moment waarop de diepste grondwaterstand optreedt geanalyseerd. Tabel 5.5 bevat voor beide jaren de statistieken voor de voorspelfout voor dit moment, uitgedrukt in dagen. Een positieve waarde geeft aan dat in het LHM de diepste grondwaterstand op een later moment optreedt. Gemiddeld genomen blijkt in het LHM de laagste grondwaterstand in 2018 en 2019 later op te treden dan gemeten. Een eerste visuele inspectie van de reeksen laat echter zien dat de timing van de laagste grondwaterstand een erg gevoelige parameter is. Net als bij de gradiënt, kan door kortstondige variaties of juist zeer weinig dynamiek rondom het minimum dit minimum net op een ander tijdstip optreden. Hierdoor kunnen grote verschillen optreden. Dit levert aanzienlijke ruis in het resultaat op.

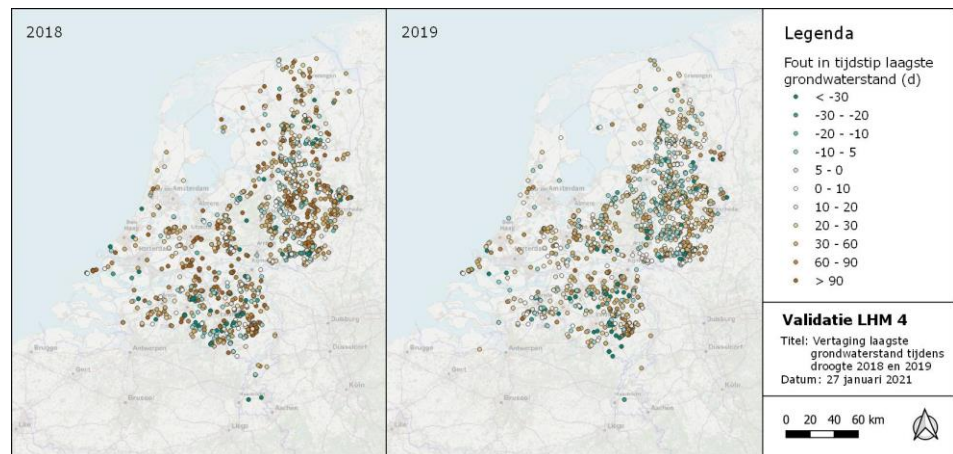
De ruimtelijke verdeling van de voorspelfout is weergegeven in Figuur 5.10. Hierin is te zien dat er geen heel duidelijke ruimtelijke patronen in de voorspelfout zijn waar te nemen. De statistieken in de tabel laten wel zien dat in het LHM de diepste grondwaterstand gemiddeld op een later moment optreedt dan gemeten. Wat opvalt is dat de mediane fout in holocene en sterk hellende gebieden groter is dan in pleistocene gebieden. Verder zijn de fouten in drogere jaar 2018 gemiddeld groter dan in 2019.

Tabel 5.5:
Statistieken
voorspelfout tijdstip
(dagen) laagste
grondwaterstand
gedurende droogte
2018 en 2019 per
gebiedstype.

2018	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE
holoceen	295	214	48.5	37.8	53.9	40.0
pleistoceen	1353	743	37.9	31.2	47.0	40.0
sterk hellend	145	91	39.5	42.0	53.9	45.0

2019	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE
holoceen	248	184	28.3	24.0	30.4	24.5
pleistoceen	1210	702	18.1	14.0	25.8	19.0
sterk hellend	203	112	28.2	30.5	33.4	33.3

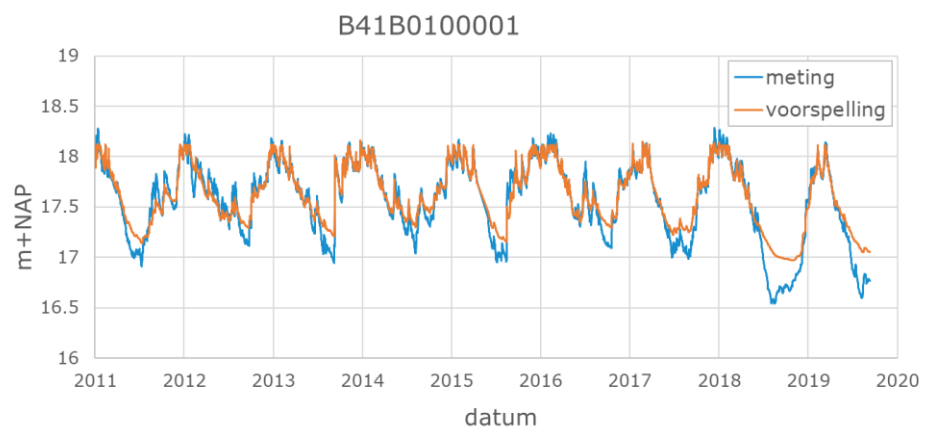
Figuur 5.10:
Voorspelfout voor
tijdstip waarop
laagste
grondwaterstand
optreedt gedurende
droogte van 2018 en
2019.



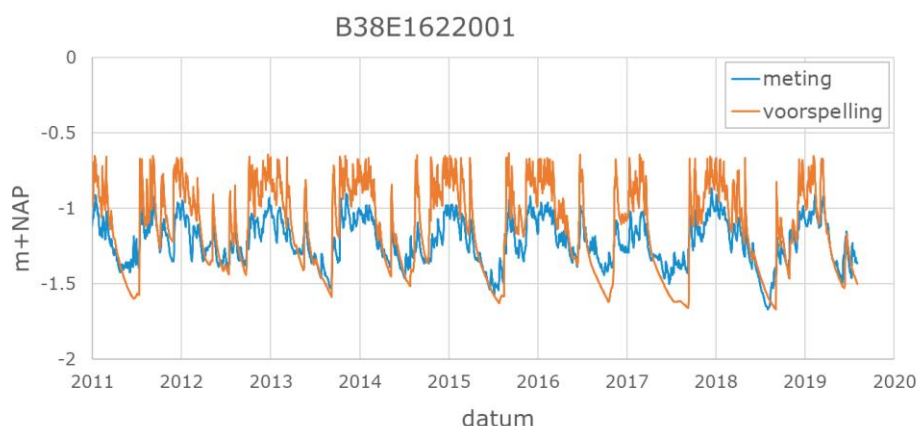
Ter illustratie is in Figuur 5.11 en Figuur 5.12 voor twee locaties het verloop van de gemeten en voorspelde grondwaterstand afgebeeld. Uiteraard is er een heel scala aan voorbeelden te tonen, maar deze reeksen illustreren goed hoe de voorspelde dynamiek in holocene en pleistocene gebieden afwijkt van de gemeten.

Figuur 5.11 bevat een typische reeks in het zandgebied van Oost-Nederland, waarbij het voorspelde recessieverloop in de zomer te beperkt is. De grondwaterstand zakt onvoldoende uit en de korte termijn variatie bij lage grondwaterstanden is geringer dan gemeten.

Figuur 5.11:
Voorbeeld van
beperkt
recessieverloop in
modelvoorspelling
voor locatie in Oost-
Nederland.



*Figuur 5.12:
Voorbeeld van reeks
in holoceen gebied
met overschatting
van dynamiek en
gedempt
recessieverloop.*



Het voorbeeld in Figuur 5.12 toont een meetreeks in West-Nederland (holoceen gebied). Hier is de overschatting van de dynamiek goed te zien. Deze is met name in de winterperiode te sterk. In de zomerperiode worden de fluctuaties op korte termijn juist weer gedempt.

Vergelijking met eerdere modelversies

De landelijke statistieken voor de GHG, GLG en dynamiek (amplitude) zijn vergeleken met de validatieresultaten van eerdere modelversies, zie Tabel 5.6 (bron: Hoogewoud et al. (2013), Tabel 2.2). Hieruit blijkt dat de validatieresultaten van LHM 4.1 een vergelijkbare nauwkeurigheid aangeven ten opzichte van LHM 3.0 en LHM 2.2, met een lichte verbetering in GHG en GLG en lichte verslechtering in dynamiek. In de toetsingsrapportage van LHM 3.0 is geen tabel met resultaten per gebiedstype (conform Tabel 5.2) opgenomen, waardoor een vergelijking per gebiedstype niet is uitgevoerd.

*Tabel 5.6:
Vergelijking
landelijke toetsings-
resultaten met die
van eerdere LHM-
versies.*

	LHM 2.2		LHM 3.0		LHM 4.1	
	P50	Toets	P50	Toets	P50	Toets
GHG	-0.05	52%	-0.03	51%	-0.02	54%
GLG	-0.06	65%	-0.07	66%	-0.04	67%
Dynamiek	0.01	47%	-0.02	47%	0.00	45%

5.2

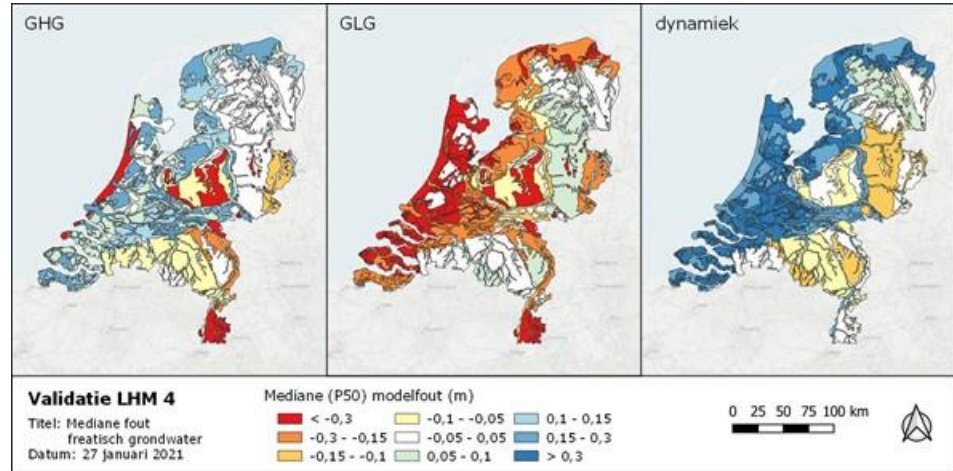
Resultaten per hydrotype

Zoals in hoofdstuk 4 is beschreven, is voor de toetsing van het LHM – naast een landelijke analyse – ook een analyse per hydrotype uitgevoerd. Hiermee worden de in paragraaf 5.1 beschreven resultaten verder gedifferentieerd.

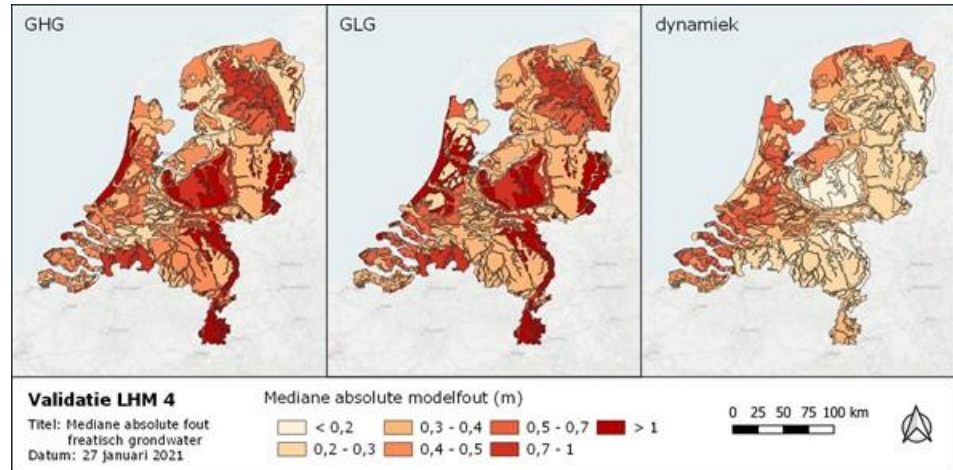
De resultaten zijn ruimtelijk weergegeven in Figuur 5.13 tot Figuur 5.15. De figuren toont per hydrotype voor zowel de GHG, GLG als dynamiek, respectievelijk de mediane voorspelfout, de mediane absolute voorspelfout en de scoring op het toetsingscriterium. Dit geeft een geaggregeerd beeld van de ruimtelijke spreiding van de voorspelfouten in relatie tot de hydrotypen. Belangrijke kanttekening hierbij is dat de hydrotypen geen aansluitende eenheden zijn; een bepaalde eenheid komt op meerdere plekken in

Nederland voor. De voorspelfouten worden over de gehele hydrotype-eenheid gemiddeld, waardoor er soms een licht vertekenend beeld kan ontstaan. Dit is met name het geval in de zandgebieden. Daarom dienen de figuren op basis van hydrotypen altijd in samenhang met de kaarten met puntmetingen (Figuur 5.2 - Figuur 5.4) beschouwd te worden.

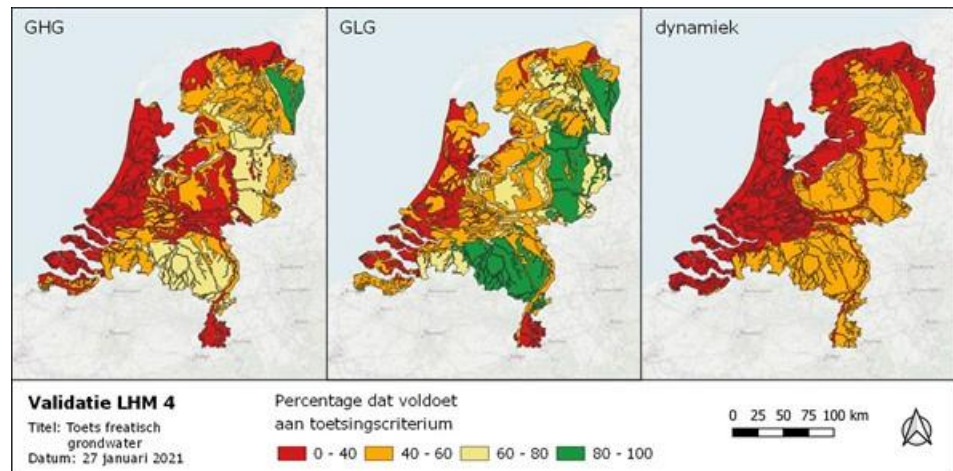
*Figuur 5.13:
Mediane fout
freatische
grondwaterstanden
per hydrotype.*



*Figuur 5.14:
Mediane absolute
fout freatische
grondwaterstanden
per hydrotype.*



*Figuur 5.15:
Percentage van
freatische
grondwaterstanden
dat voldoet aan
toetsingscriterium
per hydrotype.*



De statistieken per hydrotype zijn opgenomen in Tabel 5.7 (GHG), Tabel 5.8 (GLG) en Tabel 5.9 (dynamiek). De tabellen bevatten het aantal metingen N per hydrotype, het aantal clusters van metingen N^* , de gemiddelde fout ME (m), de mediane of 50-percentiel fout $P50$ (m), de gemiddelde absolute fout MAE (m), de mediane absolute fout $MedAE$ (m), de root mean squared error $RMSE$ (m) en het percentage meetpunten waar wordt voldoen aan de toetsingscriteria (laatste kolom).

Bij enkele hydrotypen is het aantal validatiemeetpunten gering. Dit geldt met name voor het Westland-C, Westland-HC en Westland-DC profiel. De statistieken voor deze hydrotypen zullen hierdoor een wat lagere betrouwbaarheid hebben.

De in paragraaf 5.1 gevonden ruimtelijke patronen zien we hier opnieuw terug. Ter plaatse van de Stuwwallen, het Löss-profiel en de Duinstrook is de GHG gemiddeld (aanzienlijk) te laag. Voor het Westland-C-profiel en de Betuwe-komgronden is de GHG te hoog. Voor deze laatste hydrotypen is de GLG juist weer te laag, wat resulteert in een aanzienlijke mediane fout in de dynamiek (Figuur 5.13, rechter afbeelding).

Als we kijken naar de absolute fout (Figuur 5.14), dan zien we dat voor de GHG en GLG de grootste fouten worden gevonden ter plaatse van het Löss-profiel, Oost-Nederland-profiel, de Stuwwallen en de Duinstrook. Maar ook de keileemprofielen in Noord-Nederland vertonen grotere absolute fouten. Bij de dynamiek worden de grootste fouten aangetroffen in de Westland-profielen. In de overige delen van Nederland is de absolute fout in de dynamiek veelal in de range van 0.2-0.3 m of zelfs kleiner dan 0.2 m.

Figuur 5.15 toont per hydrotype het percentage dat voldoet aan de toetsingscriteria conform Tabel 4.1. Voor de GHG wordt alleen binnen het Peelo-profiel aan het 80%-criterium voldaan. De Dekzand-, Nuenengroep-, Singraven-beekdalen- en Westland-H-profielen hebben een score tussen 60 en 80%. Voor de overige hydrotypen is het percentage (aanzienlijk) lager dan 60%.

Voor de GLG wordt het 80%-criterium behaald binnen de Dekzand-, Nuenengroep-, Peelo- en Singraven-beekdalen-profielen. Verder scoort een behoorlijk aantal hydrotypen tussen de 60 en 80%.

Voor de dynamiek wordt binnen geen enkele hydrotype voldaan aan het 80%-criterium. Hier komt opnieuw duidelijk de tweedeling tussen holocene en pleistocene gebieden naar voren.

In aanvulling op de in deze paragraaf opgenomen tabellen, bevat bijlage A de statistieken voor de GHG, GLG en dynamiek op basis van een indeling naar lithostratigrafische eenheid.

Tabel 5.7:
Statistieken GHG
freatische
grondwaterstand per
hydrotype (fout in
meters).

Hydrotype	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
Betuwe- komgronden	146	77	0.21	0.22	0.34	0.26	0.41	31%
Betuwe- stroomruggronden	122	81	-0.28	0.07	0.73	0.37	1.89	34%
Dekzand profiel	1626	633	-0.15	-0.02	0.36	0.17	0.74	73%
Duinstrook	228	79	-1.43	-1.23	1.81	1.40	2.27	17%
Eem en/of keileemprofiel	402	181	-0.60	-0.06	0.92	0.30	2.11	53%
Keileem profiel	285	135	-0.08	0.01	0.55	0.36	0.85	57%
Keileem-Peeloo profiel	236	92	-0.40	-0.04	0.81	0.28	2.27	54%
Löss profiel	46	23	-4.36	-6.58	10.14	9.73	13.15	13%
Nuenengroep profiel	776	278	-0.18	-0.05	0.42	0.28	1.16	65%
Oost-Nederland profiel	253	101	-2.97	-0.11	3.28	0.43	7.89	57%
Open profiel	326	134	-0.91	-0.17	1.19	0.40	2.88	48%
Peeloo profiel	63	38	-0.02	0.04	0.30	0.18	0.54	88%
Singraven- beekdalen	221	116	-0.31	-0.04	0.54	0.32	0.99	60%
Stuwwallen	412	191	-2.87	-1.08	3.32	1.54	5.70	30%
Tegelen/Kedichem profiel	275	87	-0.37	-0.06	0.80	0.42	1.63	50%
Westland-C-profiel	25	15	0.28	0.23	0.37	0.39	0.43	39%
Westland-D-profiel	215	129	0.14	0.19	0.41	0.35	0.51	31%
Westland-DC- profiel	20	15	0.02	-0.02	0.39	0.34	0.47	37%
Westland-DH- profiel	299	152	0.08	0.13	0.29	0.25	0.37	42%
Westland-DHC- profiel	139	84	0.02	0.06	0.46	0.26	0.68	40%
Westland-H-profiel	78	46	-0.07	0.05	0.25	0.14	0.49	70%
Westland-HC- profiel	7	5	-0.50	0.05	0.66	0.34	0.85	40%

Tabel 5.8:
Statistieken GLG
freatische grond-
waterstand per
hydrotype (fout in
meters).

Hydrotype	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
Betuwe- komgronden	145	77	0.00	0.01	0.23	0.17	0.32	75%
Betuwe- stroomruggronden	121	80	-0.38	-0.14	0.75	0.24	1.93	50%
Dekzand profiel	1593	630	-0.03	0.08	0.36	0.20	0.75	85%
Duinstrook	224	79	-1.64	-1.44	1.87	1.57	2.31	32%
Eem en/of keileemprofiel	398	180	-0.54	-0.05	0.86	0.26	2.05	72%
Keileem profiel	278	132	-0.06	0.08	0.59	0.40	0.89	64%
Keileem-Peeloo profiel	230	88	-0.44	-0.03	0.87	0.36	2.28	60%
Löss profiel	44	23	-4.30	-6.45	10.13	9.41	13.05	9%
Nuenengroep profiel	758	276	-0.09	0.00	0.39	0.26	1.13	81%
Oost-Nederland profiel	249	100	-2.90	-0.15	3.17	0.40	7.73	73%

Open profiel	319	133	-0.88	-0.21	1.13	0.43	2.78	56%
Peeloo profiel	62	38	-0.01	0.03	0.31	0.15	0.57	88%
Singraven-beekdalen	215	115	-0.17	0.01	0.43	0.22	0.88	81%
Stuwwallen	405	191	-2.79	-0.99	3.27	1.48	5.64	43%
Tegelen/Kedichem profiel	267	87	-0.27	0.00	0.71	0.37	1.41	67%
Westland-C-profiel	25	15	0.06	0.00	0.28	0.27	0.36	59%
Westland-D-profiel	214	129	-0.21	-0.19	0.37	0.28	0.49	57%
Westland-DC-profiel	20	15	-0.22	-0.32	0.28	0.32	0.38	50%
Westland-DH-profiel	297	152	-0.22	-0.20	0.33	0.25	0.42	58%
Westland-DHC-profiel	138	83	-0.50	-0.40	0.56	0.43	0.76	33%
Westland-H-profiel	78	46	-0.21	-0.08	0.31	0.18	0.50	61%
Westland-HC-profiel	7	5	-1.09	-0.56	1.12	0.56	1.30	10%

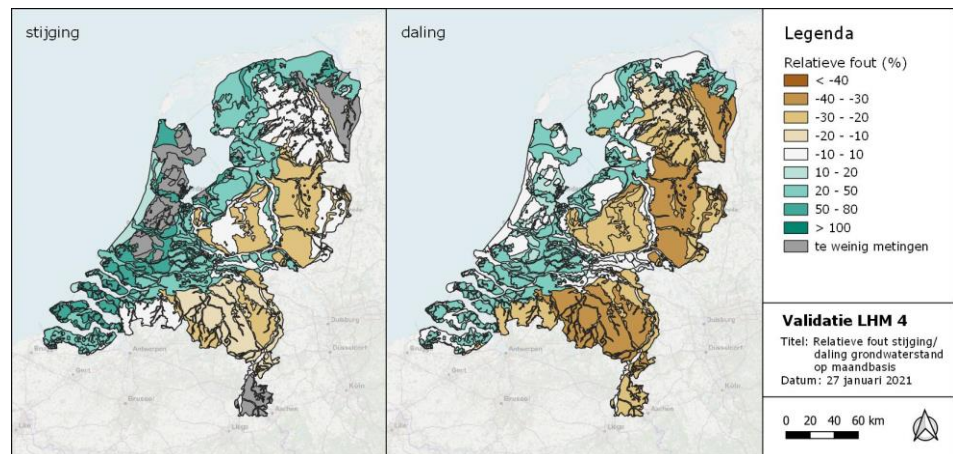
Tabel 5.9:
Statistieken
dynamiek freatische
grondwaterstand per
hydrotype (fout in
meters).

Hydrotype	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
Betuwe-komgronden	170	82	0.21	0.19	0.26	0.23	0.32	43%
Betuwe-stroomruggonden	134	88	0.12	0.19	0.33	0.29	0.43	39%
Dekzand profiel	1823	674	-0.12	-0.11	0.21	0.18	0.26	52%
Duinstrook	288	87	0.24	0.26	0.30	0.29	0.34	26%
Eem en/of keileemprofiel	529	203	-0.04	-0.04	0.19	0.17	0.23	56%
Keileem profiel	350	146	-0.01	-0.03	0.26	0.20	0.35	58%
Keileem-Peeloo profiel	330	113	0.03	0.06	0.25	0.17	0.32	51%
Löss profiel	44	23	0.01	-0.04	0.31	0.23	0.42	41%
Nuenengroep profiel	861	290	-0.09	-0.09	0.23	0.20	0.29	52%
Oost-Nederland profiel	283	114	-0.01	0.01	0.28	0.23	0.35	52%
Open profiel	330	136	-0.03	0.00	0.20	0.16	0.26	49%
Peeloo profiel	122	59	-0.03	-0.02	0.19	0.14	0.23	36%
Singraven-beekdalen	314	137	-0.12	-0.08	0.26	0.17	0.38	48%
Stuwwallen	425	200	-0.07	-0.06	0.14	0.11	0.17	43%
Tegelen/Kedichem profiel	276	88	-0.08	-0.04	0.26	0.20	0.35	53%
Westland-C-profiel	30	20	0.23	0.19	0.40	0.30	0.49	20%
Westland-D-profiel	343	168	0.33	0.27	0.42	0.37	0.50	27%
Westland-DC-profiel	28	19	0.41	0.37	0.52	0.48	0.60	22%
Westland-DH-profiel	416	199	0.32	0.33	0.38	0.35	0.45	25%
Westland-DHC-profiel	186	107	0.47	0.51	0.53	0.53	0.62	19%
Westland-H-profiel	133	66	0.13	0.11	0.22	0.17	0.27	29%
Westland-HC-profiel	10	7	0.49	0.51	0.54	0.51	0.59	0%

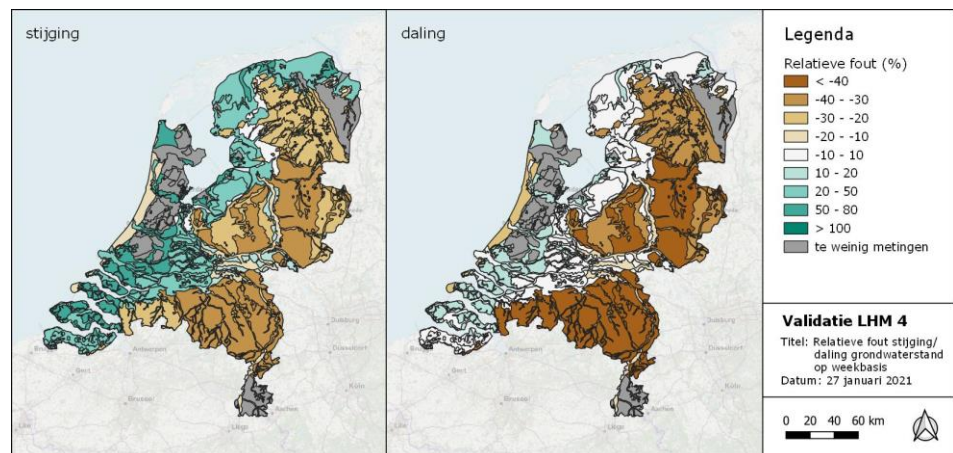
Analyse dynamiek en recessieverloop

In paragraaf 5.1 is al op landelijke schaal het dynamisch karakter van de grondwaterstand geanalyseerd. Hieronder zijn de resultaten gegregreerd op basis van de hydrotypen indeling. Figuur 5.16 en Figuur 5.17 tonen per hydrotype de mediane fout van de dynamiek op maand- resp. weekbasis, gemiddeld over de validatieperiode. Figuur 5.18 toont per hydrotype de mediane fout van het recessieverloop gedurende de droogte van 2018 en 2019. Hydrotypen met minder dan 20 waarden zijn niet meegenomen en grijs gekleurd.

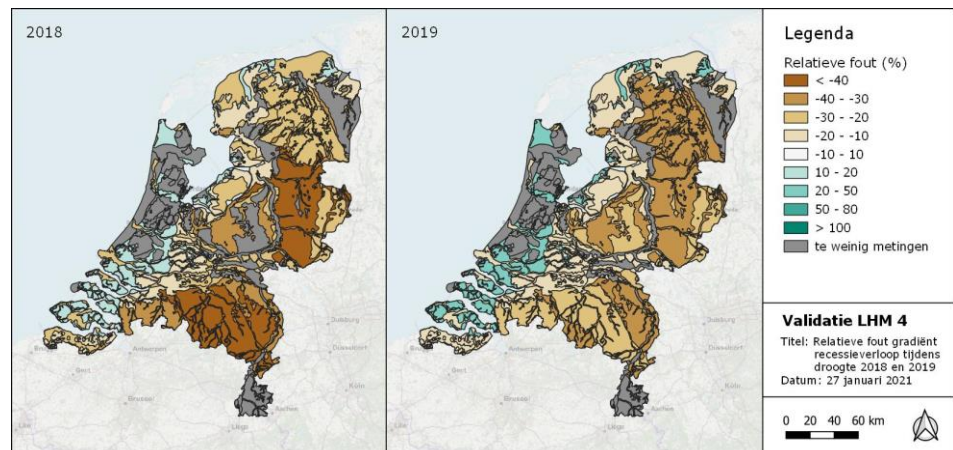
Figuur 5.16: Relatieve fout in stijging/daling van de grondwaterstand op maandbasis per hydrotype.



Figuur 5.17: Relatieve fout in stijging/daling van de grondwaterstand op weekbasis per hydrotype.



Figuur 5.18: Relatieve fout recessieverloop (gradiënt) gedurende droogte 2018 en 2019 per hydrotype, uitgedrukt in %.

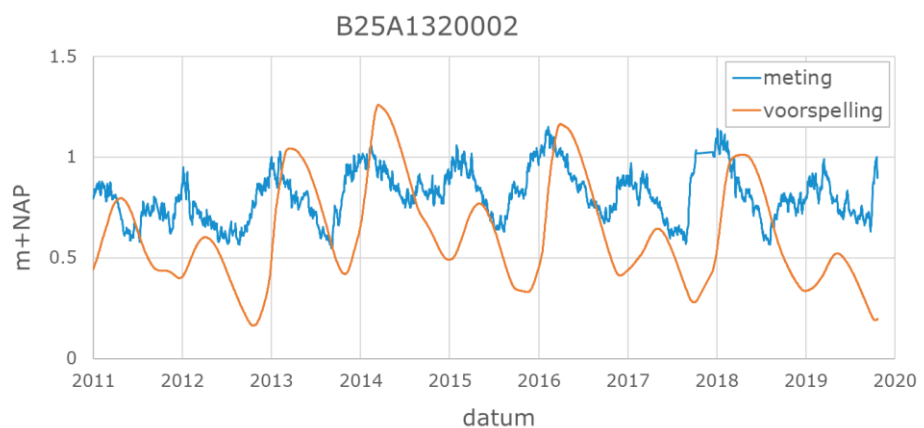


Ter plaatse van de Westland-profielen stijgt en daalt de grondwaterstand in het LHM gemiddeld te snel. In de pleistocene gebieden blijft de daling van de grondwaterstand in het LHM wat achter. Vooral ter plaatse van de Nuenengroep- en Dekzand-profielen dalen de grondwaterstanden minder snel dan gemeten. Voor deze gebieden is de fout op weekbasis groter dan op maandbasis, wat laat zien dat het LHM daar de variaties op korte termijn afvlakt.

Tijdens de droogteperiodes van 2018 en 2019 is het recessieverloop voor de meeste hydrotypen gemiddeld te beperkt. In 2018 is dit sterker dan in 2019. De verschillen tussen hydrotypen komen voor de droge periode globaal overeen met die voor de gehele validatieperiode; de grootste gemiddelde afwijkingen worden gevonden ter plaatse van de Nuenengroep-, Dekzand- en Keileem-profielen. In de holocene gebieden is de fout geringer met in het Westland-DHC-profiel juist een lichte overschatting van het recessieverloop. Dit laatste heeft te maken met de algehele overschatting van de dynamiek in de holocene gebieden.

Wat tenslotte nog opvalt is dat in de Duinstrook de stijging op maandbasis te sterk is, terwijl deze op weekbasis te beperkt is. Ter illustratie is in Figuur 5.19 de tijdreeks voor peilbuis B25A132002 weergegeven. Deze buis is gesitueerd in de Duinstrook en heeft op maandbasis een te sterke stijging en daarmee ook een te grote amplitude, terwijl op weekbasis de dynamiek te beperkt is. Hoogfrequente variaties in de meetreeks zijn niet terug te vinden in de LHM-voorspelling. Dit illustreert hoe door het gebruik van verschillende statistieken diverse fouten en patronen in beeld zijn te brengen.

*Figuur 5.19:
Voorspelde en
gemeten
grondwaterstand
voor peilbuis
B25A132002.*



5.3 Toetsingsresultaten overige deelgebieden

Een aantal deelgebieden is binnen de validatie apart geëvalueerd. Hieronder volgt een beknopte samenvatting van de resultaten. Om de vergelijking met het landelijk beeld te vergemakkelijken is Tabel 5.1 opnieuw weergegeven, zie Tabel 5.10.

Tabel 5.10:
Landelijke
statistieken
freatische
grondwaterstand
(herhaling).

	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
GHG	6207	2692	-0.65	-0.02	1.03	0.30	2.98	54%
GLG	6094	2674	-0.65	-0.04	1.01	0.29	2.94	67%
Dynamiek	7440	3026	0.02	0.00	0.25	0.20	0.33	45%

Waddeneilanden

Op de Waddeneilanden zijn de voorspelfouten (zoals verwacht) groter dan het landelijk gemiddelde. In Tabel 5.11 zijn de mediane (P50-) fouten voor de GHG en GLG -0.37 m resp. -0.75 m, wat duidt op een structureel te lage modelvoorspelling. Al deze waarden zijn in absolute zin groter dan de vastgestelde maximale waarde van 0.15 m. Daarnaast is de dynamiek overwegend te hoog. Verder wordt voor slechts een klein deel van de locaties voldaan aan de toetsingscriteria, waarbij vooral de GHG slecht scoort.

Tabel 5.11:
Statistieken
freatische
grondwaterstand
Waddeneilanden
(fouten in meters).

	N	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
GHG	441	-0.82	-0.37	1.28	0.75	2.91	27%
GLG	440	-1.06	-0.75	1.29	0.88	2.88	42%
Dynamiek	440	0.23	0.26	0.31	0.27	0.39	31%

Stedelijk/bebouwd gebied

De statistieken voor stedelijk/bebouwd gebied (Tabel 5.12) zijn redelijk in lijn met het landelijk beeld. De mediane waarde van de GLG is met -0.19 m lager dan landelijk en voldoet ook niet aan de maximale waarde van 0.15 m. Verder is de dynamiek over het algemeen groter dan het landelijk gemiddelde. Het percentage dat voldoet aan de toetsingscriteria is 10-15 procentpunt lager dan landelijk.

Tabel 5.12:
Statistieken
freatische
grondwaterstand
bebouwd gebied
(fouten in meters).

	N	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
GHG	2241	-0.46	0.01	0.87	0.33	2.26	44%
GLG	2213	-0.60	-0.19	0.90	0.36	2.20	54%
Dynamiek	2894	0.19	0.14	0.33	0.25	0.45	35%

Nabij oppervlaktewater

De statistieken voor de buizen nabij oppervlaktewater (hoofdafwatering en grotere watervlakken) zijn voor wat betreft de GHG en GLG redelijk in lijn met het landelijk beeld. Tabel 5.13 laat zien dat de mediane (P50) waarde voor de GHG en GLG slechts enkele centimeters bedraagt. Voor de dynamiek is deze met 0.08 m wat aan de hoge kant. Het percentage dat voldoet aan de toetsingscriteria is in lijn met die van de landelijke dataset; alleen de dynamiek blijft iets achter.

Tabel 5.13
Statistieken
freatische
grondwaterstand
nabij oppervlakte-
water (fouten in
meters)

	N	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
GHG	566	-0.35	0.03	0.70	0.26	2.01	57%
GLG	554	-0.41	-0.06	0.71	0.24	1.94	67%
Dynamiek	703	0.10	0.08	0.29	0.21	0.42	40%

Beïnvloed door onttrekkingen

Ter plaatse van onttrekkingen (in een straal van 100 m) is de voorspelde grondwaterstand gemiddeld aan de lage kant, zie Tabel 5.14. Voor zowel de GHG als GLG wordt niet voldaan aan het criterium van een P50 van maximaal 0.15 m. Ook de absolute fout is circa 0.2 – 0.3 m groter. De dynamiek daarentegen is redelijk in lijn met het landelijk beeld. Verder voldoen bij met name de GHG beduidend minder locaties aan de toetsingscriteria: 37% tegenover 54% landelijk.

Tabel 5.14:
Statistieken
freatische
grondwaterstand bij
onttrekkingen
(fouten in meters).

	N	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
GHG	210	-1.38	-0.25	1.65	0.62	4.20	39%
GLG	205	-1.19	-0.21	1.55	0.61	3.80	55%
Dynamiek	212	-0.06	-0.08	0.24	0.18	0.37	48%

5.4

Validatie aan Gt-kartering

In aanvulling op de validatie aan de hand van peilbuizen, is het LHM ook gevalideerd aan de hand van de grondwatertrappen (Gt-kartering) (Stuyt et al., 2016). Op deze kaart met schaal 1:50.000, weergegeven in Figuur 5.20, is de jaarlijkse fluctuatie van de grondwaterstand landsdekkend met zogeheten grondwatertrappen in kaart gebracht. Grondwatertrappen (Gt's) zijn klassen van niveaus waartussen de jaarlijkse fluctuatie van de grondwaterstand zich gemiddeld genomen afspeelt.

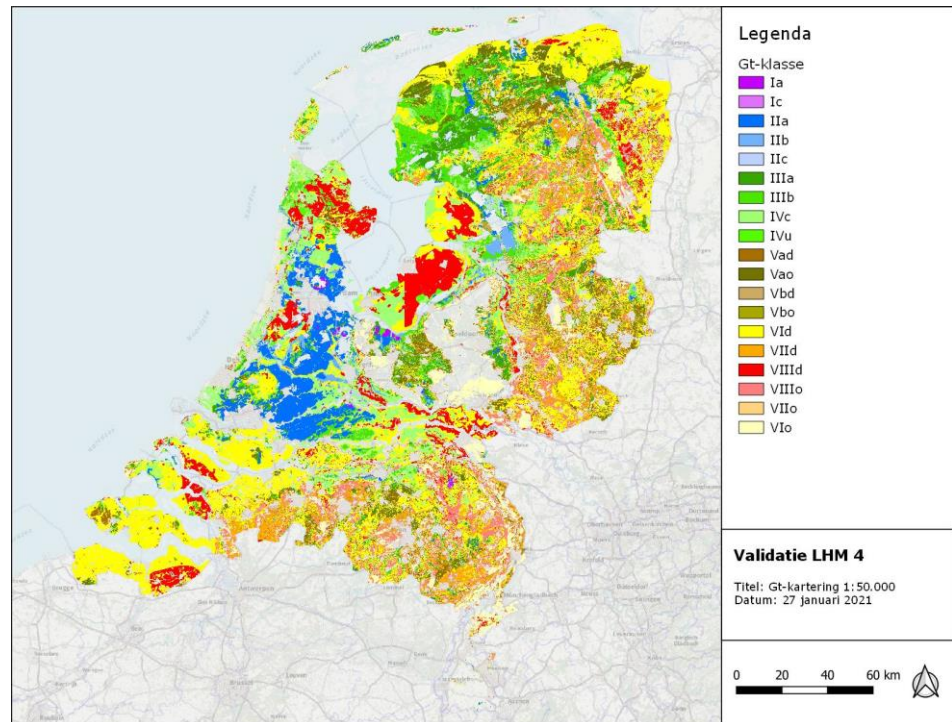
De huidige indeling bestaat uit 19 grondwatertrappen variërend van klasse I (ondiep) tot klasse VIII (diep). Deze klassen zijn afgeleid van GHG- en GLG-klassen, zie bijlage B. Naast de indeling in 19 klassen, wordt vaak ook gebruik gemaakt van de iets grovere indeling zoals opgenomen in Tabel 5.15. Voor de validatie van het LHM is gekozen om deze indeling te gebruiken.

Uitgangspunten en kanttekeningen

De Gt-kartering heeft een resolutie van 50x50 m². Het LHM daarentegen heeft een resolutie van 250x250 m². Dit maakt een vergelijking tussen beiden niet bepaald triviaal. Zeker omdat GXG-waarden zijn uitgedrukt ten opzichte van het maaiveld; door lokale hoogteverschillen in het maaiveld kunnen soms grote verschillen ontstaan in GXG's. Bij een vergelijking met 250 m data ontstaat hierdoor extra ruis.

Verder is het van belang om te realiseren dat de Gt-kartering is afgeleid van data die over een langere periode zijn waargenomen. De huidige rekenperiode voor het LHM loopt van 2011 tot 2020. Hoewel door de indeling in Gt-klassen hierdoor ontstane verschillen deels wegvallen, is het wel goed om dit in het achterhoofd te houden. Daarbij komt dat 2018 en 2019 droge zomers kenden. Om het effect hiervan op de validatie te reduceren, is ervoor gekozen om voor deze analyse de GXG en bijbehorende Gt's te berekenen over de periode van 1 april 2011 – 31 maart 2018.

*Figuur 5.20:
Landsdekkende
grondwatertrappen
kaart 1:50.000
(bron: WENR).*



*Tabel 5.15:
Indeling in
grondwater-trappen
(Gt's). Waarden in
m.*

Grondwatertrap (Gt)	GHG	GLG
I	< 0.25	< 0.50
II	< 0.25	0.50 - 0.80
III	< 0.25	0.80 - 1.20
IIIb	0.25 - 0.40	0.80 - 1.20
IV	0.40 - 0.80	0.80 - 1.20
V	< 0.25	> 1.20
Vb	0.25 - 0.40	> 1.20
VI	0.40 - 0.80	> 1.20
VII	0.80 - 1.40	> 1.20
VIII	> 1.40	> 1.20

Ondanks bovengenoemde verschillen tussen de kartering en modelvoorspellingen, is een eerste vergelijking tussen beiden gemaakt aan de hand van de volgende twee analyses:

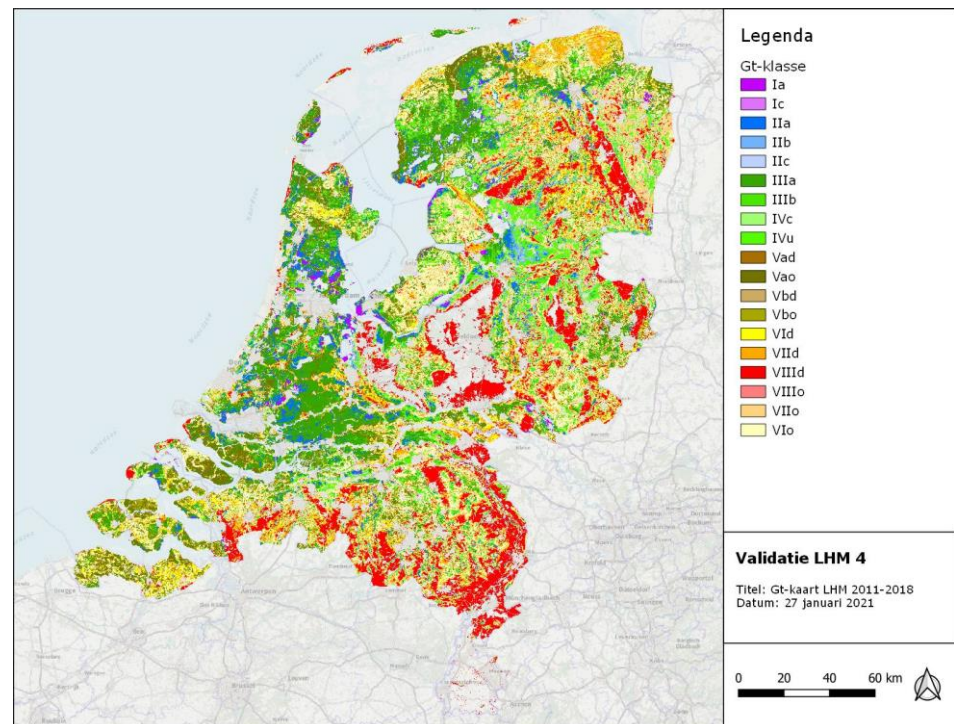
- Voor iedere 50 m rekencel is de gekarteerde Gt vergeleken met de LHM-voorspelling. Hiermee kan een eerste indruk worden verkregen hoe vaak het model de juiste Gt-klasse voorspelt.
- De met het LHM voorspelde GHG en GLG zijn vergeleken met de Gt-kartering. Daarbij is de volgende indeling gehanteerd:
 - GHG/GLG < gekarteerde GHG/GLG klasse (natter)
 - GHG/GLG valt binnen de gekarteerde GHG/GLG klasse
 - GHG/GLG > gekarteerde GHG/GLG klasse (droger)

Vergelijking Gt-klasse

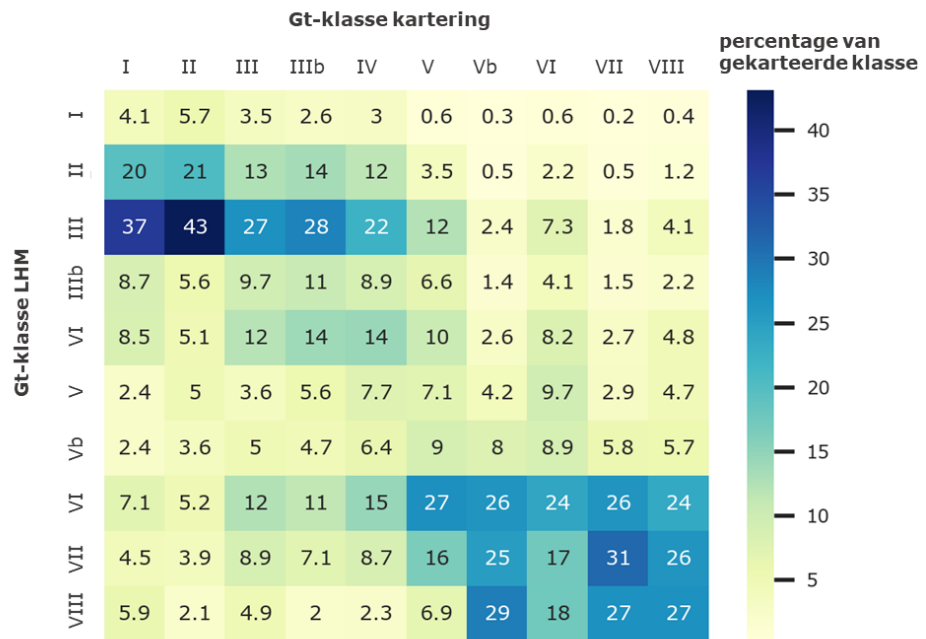
Figuur 5.21 toont de grondwatertrappen volgens het LHM berekend over de periode 2011-2018. Voor een eenduidige vergelijking met de kartering in Figuur 5.20 is dezelfde indeling op basis van 19 klassen gebruikt. Verder worden – conform de Gt-kartering – stedelijke gebied, open water en de diepe grondwaterstanden ter plaatse van de stuwwallen en duinstrook niet getoond.

Een vergelijking van beide kaarten laat zien dat in veel gebieden de modelvoorspellingen afwijken van de kartering. Een manier om deze verschillen te kwantificeren is door middel van een zogenaamde *heat map*. Figuur 5.22 toont een dergelijke *heat map* waarin de voorspelde Gt is uitgezet tegen de gekarteerde Gt. Per aangetroffen combinatie van gekarteerde en voorspelde Gt is vastgesteld hoe vaak deze procentueel voorkomt. Bijvoorbeeld: Figuur 5.22 laat zien dat binnen alle gekarteerde Gt II, 21% correct wordt voorspeld met het LHM, terwijl 43% van alle Gt II door het LHM als Gt III wordt voorspeld.

Figuur 5.21:
Grondwatertrappen
volgens LHM (2011-
2018).



*Figuur 5.22:
Heat map
voorspelde Gt-klasse
uitgezet tegen
gekarteerde Gt-
klasse als
percentage van
totaal aantal
waarden binnen
gekarteerde Gt-
klasse.*



Op de diagonaal van de *heat map* staan de percentage correct voorspelde Gt-klassen. Deze waarden worden ook wel de voorspelnaauwkeurigheid voor betreffende klasse genoemd en zijn opgenomen in Tabel 5.16. Hierin is tevens aangegeven hoe vaak een betreffende klasse voorkomt.

Over het geheel genomen wordt circa 20-25% correct door het LHM voorspeld. Gt VI, VII en VIII worden het vaakst correct voorspeld. Gezien de grotere ranges van deze klassen is dat op zich niet verwonderlijk. Voor Gt V en Vb geeft het LHM veelal een voorspelde Gt VI, VII of VIII. Verder valt op dat een niet gering percentage van de ondiepe Gt-klassen, door het LHM als diepe Gt-klasse worden voorspeld (linksonder in Figuur 5.22). Hier geldt dat het LHM zowel de GHG als GLG te diep voorspelt. Dit blijken veelal gebieden te zijn nabij stuwwallen, binnen de keileem profielen en bij lokale hoogteverschillen ter plaatse van polders in West-Nederland.

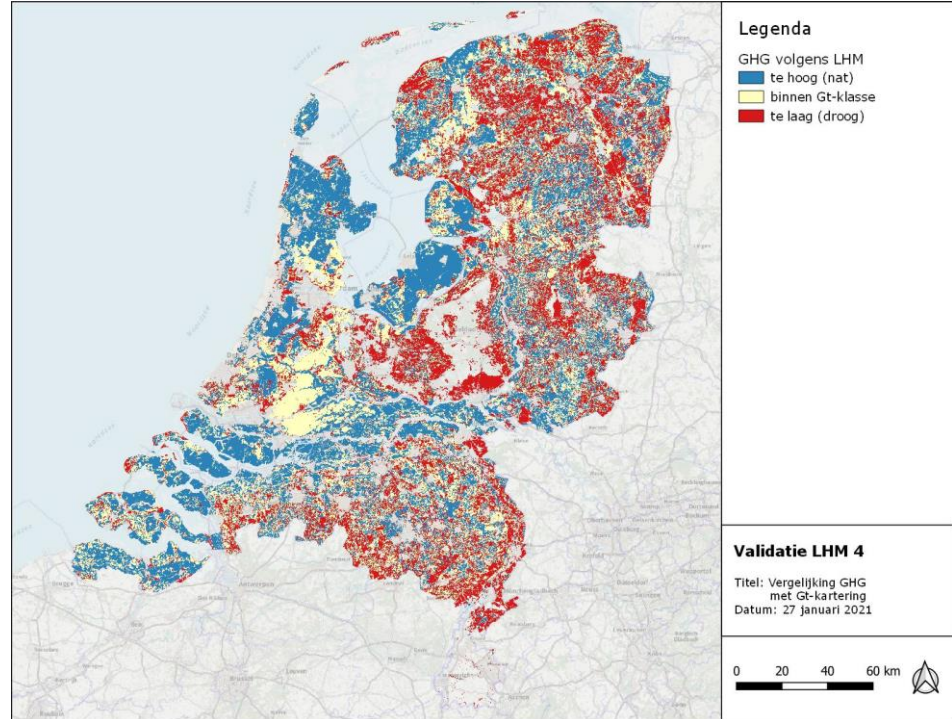
*Tabel 5.16:
Voorspelnaauwkeurig
heid per Gt-klasse*

Grondwatertrap (Gt)	Percentage voorkomen	Voorspel nauwkeurigheid
I	0.3%	4.1%
II	7.7%	20.6%
III	4.4%	27.0%
IIIb	7.8%	10.6%
IV	10.4%	14.4%
V	8.2%	7.1%
Vb	0.6%	8.0%
VI	38.2%	24.0%
VII	5.6%	31.3%
VIII	16.9%	27.0%

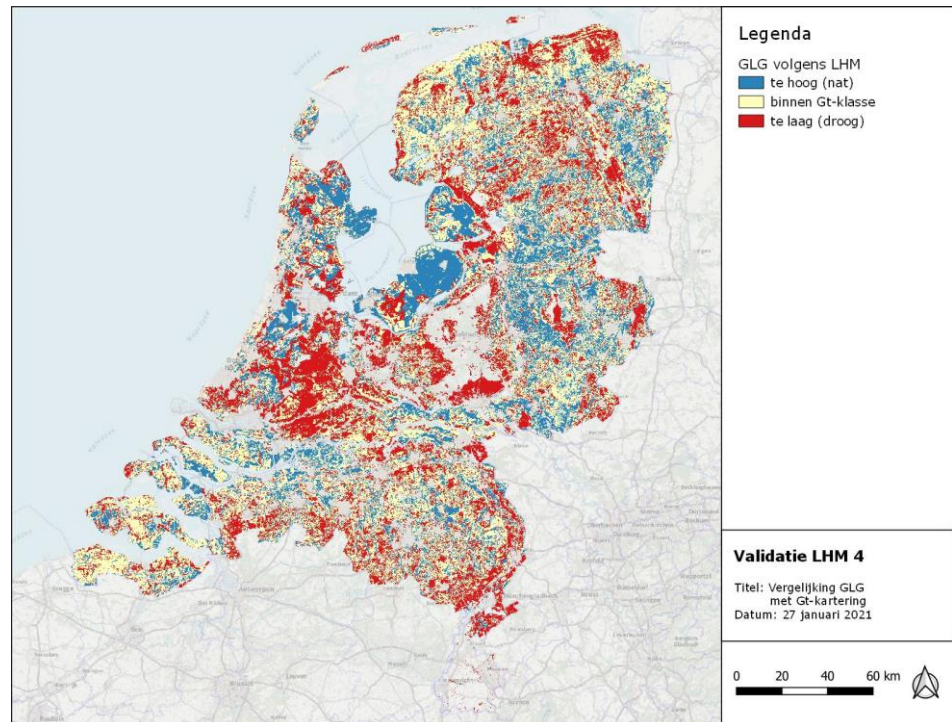
Vergelijking GHG en GLG

Om de verschillen nader te duiden tonen Figuur 5.23 en Figuur 5.24 hoe de GHG resp. GLG zich verhouden tot de gekarteerde Gt-klasse. Opnieuw wordt hier benadrukt dat de resolutie van de berekende GHG en GLG lager is dan die van de Gt-kartering. Hierdoor is de vergelijking niet volledig zuiver, maar desondanks biedt het een eerste inzicht in hoe het LHM zich verhoudt ten opzichte van de Gt-kartering.

*Figuur 5.23:
Vergelijking GHG
voorspelling met Gt-
kartering.*



*Figuur 5.24:
Vergelijking GLG
voorspelling met Gt-
kartering.*



De vergelijking van de GHG in Figuur 5.23 laat een beeld zien wat op hoofdlijnen overeenkomt met de mediane fouten die op basis van de peilbuisdata is gevonden. In Holoceen Nederland is de voorspelde GHG overwegend te hoog; in de rest van Nederland is de GHG afwisselend te hoog en te laag. In Noord-Nederland worden op basis van de Gt-kartering vrij veel gebieden aangetroffen waar het model een te lage GHG voorspelt. Mogelijk heeft dit te maken met het voorkomen van ondiepe keileem.

De vergelijking van de GLG met de Gt-kartering (Figuur 5.24) geeft op hoofdlijnen ook hetzelfde beeld als de vergelijking met peilbuisdata. Met name in West-Nederland is het beeld echter meer gedifferentieerd. Zo is Zeeland in Figuur 5.24 overwegend geel en blauw gekleurd, wat aangeeft dat de GLG daar binnen de gekarteerde Gt-klasse valt of te laag is. Op basis van de vergelijking met meetdata (en met name bij de indeling naar hydrotype in Figuur 5.13), ontstond het beeld dat de GLG in Zeeland gemiddeld aanzienlijk te laag is. Als we echter naar de gekarteerde Gt-klasse kijken, zien we dat in Zeeland overwegend Gt-klasse VI_d wordt aangetroffen. Deze klasse heeft een GLG van > 1.80 m-mv. Een te lage GLG valt daardoor altijd binnen de Gt-klasse. Voor Gt-klassen met een diepe GLG (>1.2 of >1.8 m-mv) kan dus alleen worden vastgesteld of de voorspelde GLG hoger is dan de Gt-klasse, maar niet of deze lager is.

5.5 Validatie aan Gd-kartering

Deze validatie is uitgevoerd door Deltares en betreft een vergelijking voor de pleistocene gebieden tussen de voorspelde grondwaterstanden en de grondwaterstanden volgens de Gd- kartering (grondwaterdynamiek) uit de BRO. De resultaten zijn opgenomen in Bijlage E. Op hoofdlijnen komt een beeld naar voren dat vergelijkbaar is met de resultaten uit de eerdere paragrafen: de voorspelde GHG's zijn afwisselend hoger en lager dan gekarteerd. In Oost-Nederland zijn de voorspelde GLG's overwegend natter dan gekarteerd. In Brabant vertoont de afwijking van de GLG een gemengd beeld van te hoog en te laag voorspelde grondwaterstanden, ten opzichte van de Gd-kartering.

5.6 Validatie aan LSK-dataset

Deze validatie is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research. De resultaten zijn opgenomen in Bijlage F. Ook hier zijn de resultaten op hoofdlijnen vergelijkbaar met de resultaten uit de eerdere paragrafen. Bij de validatie aan de LSK-dataset wordt wel een kleinere fout gevonden in de sterk hellende gebieden. Dit komt omdat – in tegenstelling tot bij de meetreeksen – bij de LSK-dataset diepe grondwaterstanden niet zijn meegenomen. En met name deze diepe grondwaterstanden worden door het LHM te laag voorspeld.

6 Stijghoogte

6.1 Eerste watervoerend pakket

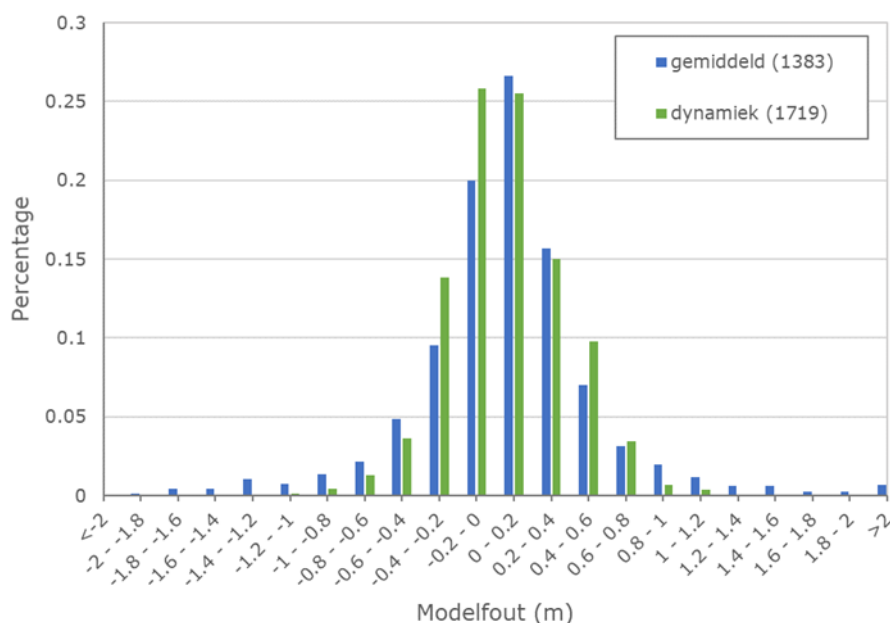
De modelresultaten voor het eerste watervoerend pakket zijn getoetst op de fout in tijdgemiddelde stijghoogte per peilbuis en de fout in de dynamiek. De statistieken zijn opgenomen in Tabel 6.1. De spreiding van de voorspelfouten voor de gemiddelde stijghoogte en dynamiek zijn door middel van een histogram weergegeven in Figuur 6.1. De gemiddelde en mediane fout wijken voor zowel het gemiddelde als de dynamiek slechts enkele centimeters af van nul. De fouten zijn redelijk normaal verdeeld, waarbij de verdeling van het gemiddeld wel iets plat is met meer waardes in beide staarten. Voor de gemiddelde stijghoogte wordt voor 78% van de locaties voldaan aan het toetsingscriterium van een maximale fout van 0.5 m. Dit is dus net niet de gewenste 80%. De dynamiek voldoet voor 58% van de locaties.

De voorspelfouten voor de gemiddelde stijghoogte en dynamiek zijn ruimtelijk weergegeven in Figuur 6.2 resp. Figuur 6.3. Opvallend is dat de stijghoogte ter plaatse van het Drents-Friese Keileemplateau overwegend te hoog is. In grote delen van Brabant is de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket juist aan de lage kant. In Zuid-Limburg worden grote afwijkingen aangetroffen met zowel te lage als te hoge stijghoogten.

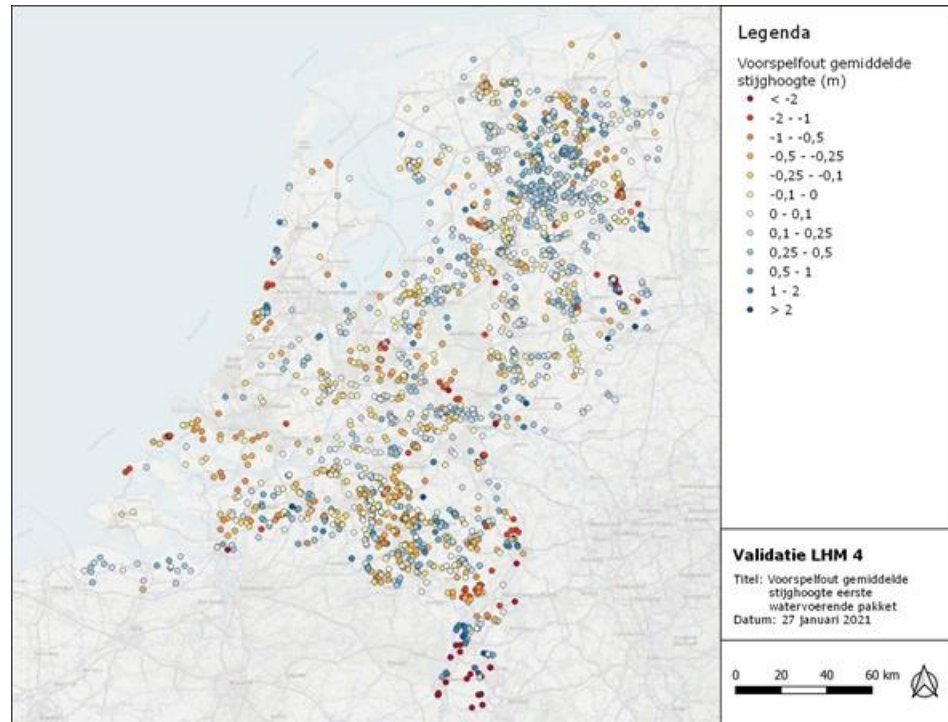
Tabel 6.1: Landelijke statistieken stijghoogte eerste watervoerend pakket (fouten in meters).

	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
Gemiddeld	2614	1383	-0.05	0.05	0.54	0.23	2.87	78%
Dynamiek	3512	1719	0.03	0.03	0.24	0.20	0.32	58%

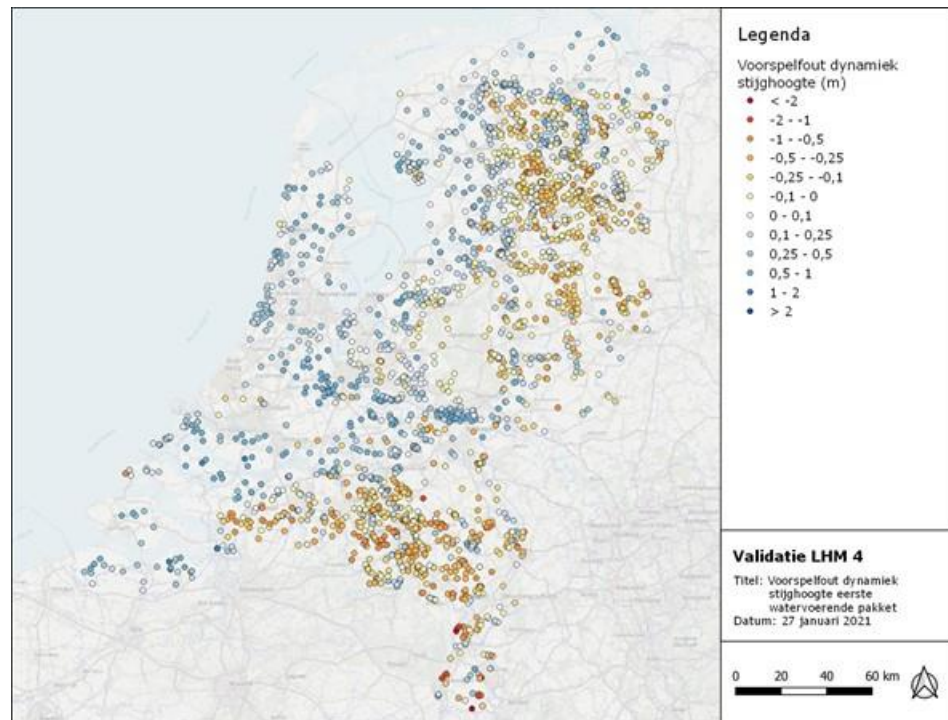
Figuur 6.1: Spreiding van voorspelfouten eerste watervoerend pakket (landelijk).



*Figuur 6.2:
Verschil tussen LHM-
voorspelling en uit
meetreeks afgeleide
gemiddelde
stijghoogte voor
eerste watervoerend
pakket.*



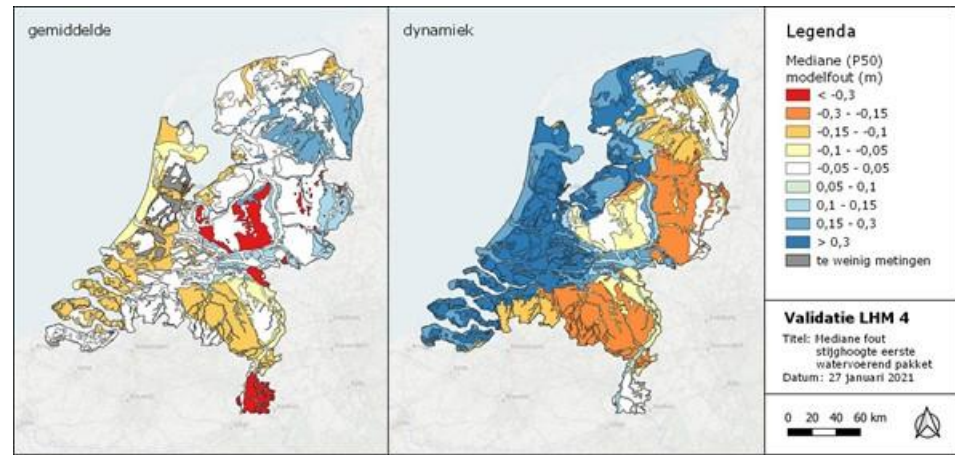
*Figuur 6.3:
Verschil tussen LHM-
voorspelling en uit
meetreeks afgeleide
dynamiek voor
stijghoogte eerste
watervoerende
pakket.*



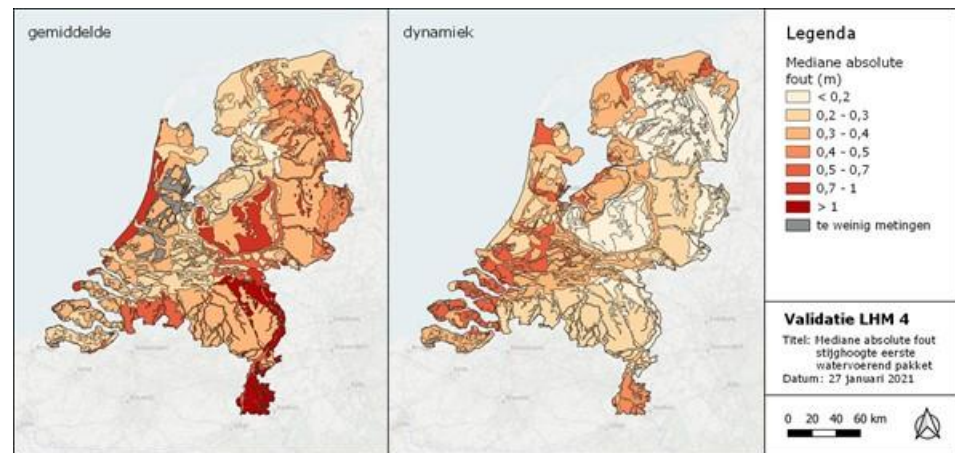
Bij de dynamiek zien we dat de voorspelfout grofweg een ruimtelijke tweedeling gemaakt kan worden, met een te geringe dynamiek in de pleistocene gebieden en te grote dynamiek in holocene gebieden. Dit komt overeen met het beeld van de freatische grondwaterstand.

Alhoewel de toetsingscriteria landelijk worden beoordeeld, zijn de afwijkingen en toetsing – net als bij het freatisch grondwater – afgebeeld per hydrotype. Hierbij wordt wel de kanttekening geplaatst dat het aantal peilbuislocaties afneemt met de diepte, waardoor voor sommige hydrotypen slechts enkele meetlocaties overblijven, welke niet per definitief representatief hoeven te zijn voor betreffende hydrotype. Daarom is ervoor gekozen om resultaten niet af te beelden indien binnen een hydrotype minder dan 10 (clusters van) meetlocaties zijn gesitueerd. Desalniettemin zijn er met name ter plaatse van de Westland-profielen nog steeds relatief weinig metingen en dienen de resultaten voor die hydrotypen in dat licht bekeken te worden.

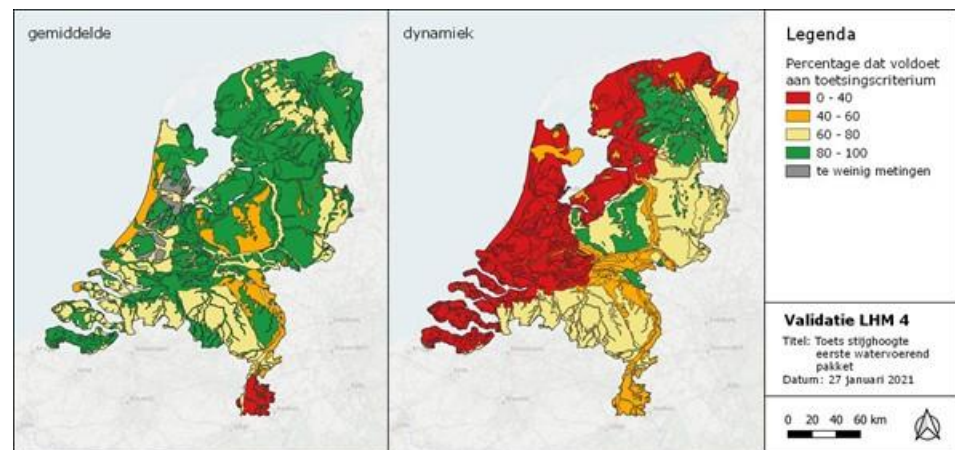
*Figuur 6.4:
Mediane fout
stijghoogte eerste
watervoerend
pakket per
hydrotype.*



*Figuur 6.5:
Mediane absolute
fout stijghoogte
eerste watervoerend
pakket per
hydrotype.*



*Figuur 6.6:
Percentage van
stijghoogten in
eerste watervoerend
pakket dat voldoet
aan toetsings-
criterium per
hydrotype.*



De mediane fouten in Figuur 6.4 bevestigen het eerder geschetste beeld, met de duidelijke tweedeling in de fout in dynamiek en overwegend te hoge stijghoogten ter plaatse van de keileem profielen en te lage stijghoogten ter plaatse van de Stuwwallen-, Löss-, Nuenengroep- en Westland-D- en -DHC-profielen.

Bij de absolute fouten in Figuur 6.11 springen de grote afwijkingen in Limburg (Löss- en Open profiel), de Stuwwallen-, de Duinstrook- en het Tegelen/ Kedichem-profiel in het oog. Bij de dynamiek worden de grootste fouten juist aangetroffen ter plaatse van het Westland-DHC-profiel.

Tenslotte toont Figuur 6.6 per hydrotype het percentage dat voldoet aan het toetsingscriterium. Voor de gemiddelde stijghoogte wordt binnen een aanzienlijk deel van Nederland voldaan aan het criterium van maximaal gemiddeld 0.5 m afwijking. Ter plaatse van het Löss-profiel wordt het minst voldaan aan het criterium en ook het Open profiel, de Stuwwallen en de Duinstrook scoren slechter dan gemiddeld. Wat betreft de dynamiek voldoen alleen de Keileem-profielen en de Stuwwallen aan het criterium van maximaal 35% afwijking. Voor vrijwel geheel Holoceen Nederland wordt in minder dan 40% van de locaties voldaan.

Bijlage C bevat tabellen met de statistieken per hydrotype. Daarnaast zijn ook twee tabellen opgenomen met statistieken per lithostratigrafische eenheid.

6.2

Diepe watervoerende pakketten

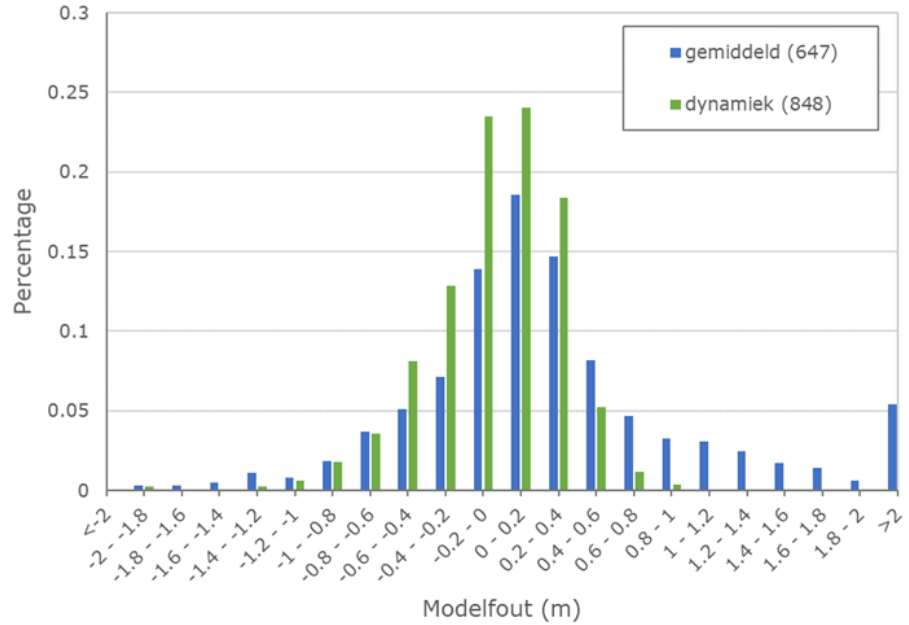
De modelresultaten voor de diepe watervoerende pakketten (tweede en dieper) zijn, net als die voor het eerste watervoerend pakket, getoetst op de fout in tijdgemiddelde stijghoogte per peilbuis en de fout in de dynamiek. De statistieken zijn opgenomen in Tabel 6.2. De spreiding van de voorspelfouten voor de gemiddelde stijghoogte en dynamiek zijn met een histogram weergegeven in Figuur 6.7. De gemiddelde en mediane fout voor de gemiddelde stijghoogte is 0.19 resp. 0.14 m en voldoet daarmee net aan het criterium van maximaal 0.15 m mediane fout. De voorspelfout voor de gemiddelde stijghoogte is sterk scheef verdeeld en bevat relatief veel waarden groter dan 2 m. Desalniettemin wordt voldaan aan het criterium dat 80% van de locaties een voorspelfout van minder dan 1 m heeft.

De voorspelfout voor dynamiek is wel redelijk normaal verdeeld, met een gemiddelde rond 0 en weinig grote uitschieters. De dynamiek voldoet voor 64% van de locaties aan het criterium van een maximale afwijking van 50%.

*Tabel 6.2:
Landelijke
statistieken
stijghoogte diepe
watervoerende
pakketten (fouten in
meters).*

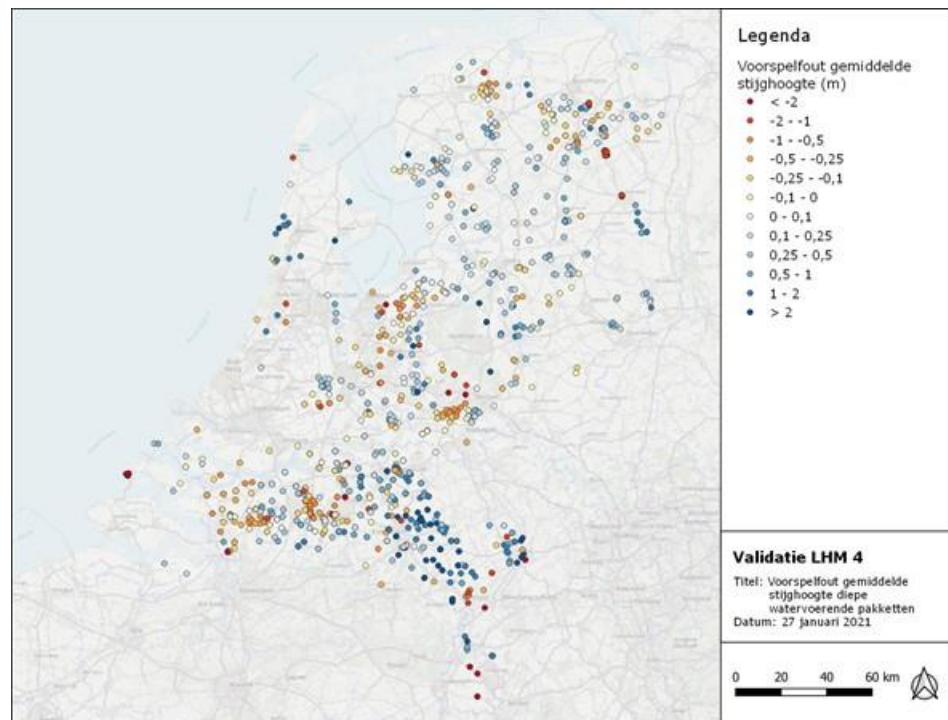
	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
Gemiddeld	1357	647	0.19	0.14	0.71	0.37	1.91	80%
Dynamiek	1736	848	-0.04	-0.01	0.26	0.21	0.34	64%

*Figuur 6.7:
Spreiding van
voorspelfouten diepe
watervoerende
pakketten
(landelijk).*

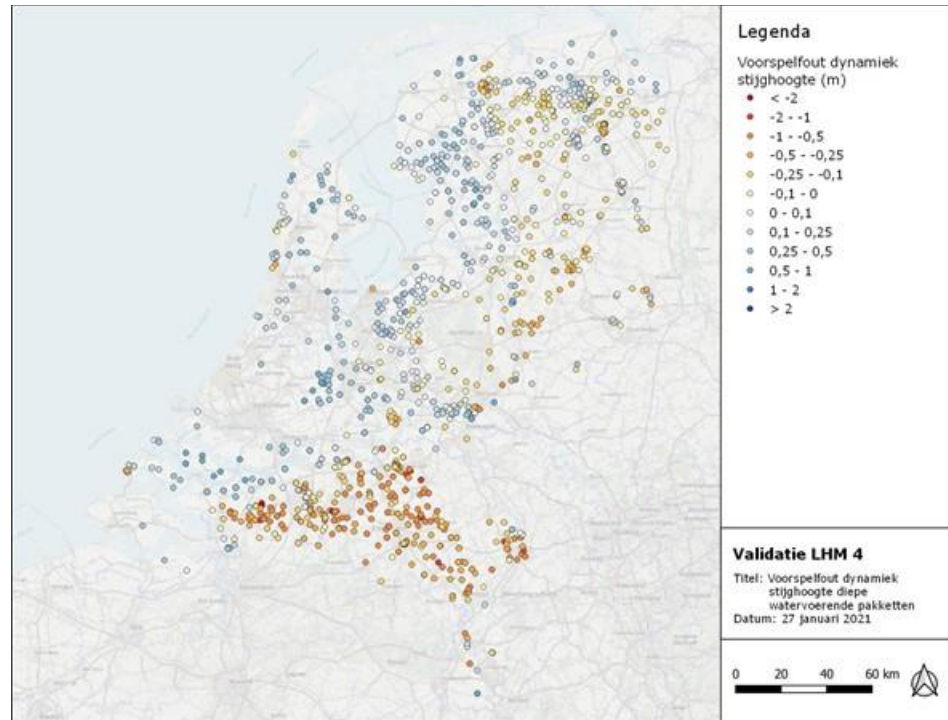


De voorspelfouten voor de gemiddelde stijghoogte zijn ruimtelijk weergegeven in Figuur 6.8. Opvallend is dat de stijghoogte in grote delen van de Roerdalslenk 1-2 m te hoog is. Dit in tegenstelling tot het eerste watervoerend pakket waar de stijghoogte juist aan de lage kant is. Uit de veranderingsrapportage van LHM 4.1 (Janssen et al, 2020) blijkt dat bij de kalibratie de stijghoogte in de Roerdalslenk al enkele decimeters is verlaagd, door middel van het verlagen van de kD-waarden in de Roerdalslenk en vooral ook in het gebied ten oosten daarvan. Desondanks is de stijghoogte nog steeds structureel te hoog. Het lijkt dan ook aannemelijk dat hier (ook) andere oorzaken aan ten grondslag liggen, zoals foutieve of ontbrekende onttrekkingsdata of fouten in modelrandvoorwaarden.

*Figuur 6.8:
Verskil tussen LHM-
voorspelling en uit
meetreeks afgeleide
gemiddelde
stijghoogte voor
diepe watervoerende
pakketten.*



Figuur 6.9: Verschil tussen LHM-voorspelling en uit meetreeks afgeleide dynamiek voor stijghoogte diepe watervoerende pakketten.

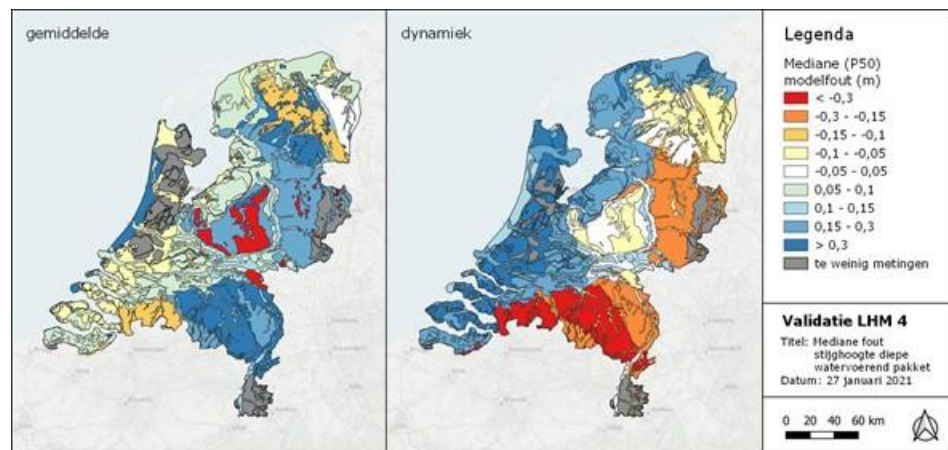


De voorspelfouten voor de dynamiek zijn ruimtelijk weergegeven in Figuur 6.9. Het ruimtelijk beeld van de fout in de dynamiek is opnieuw vergelijkbaar met die van de freatische grondwaterstand: te grote dynamiek in de holocene gebieden en te beperkte dynamiek in de pleistocene gebieden.

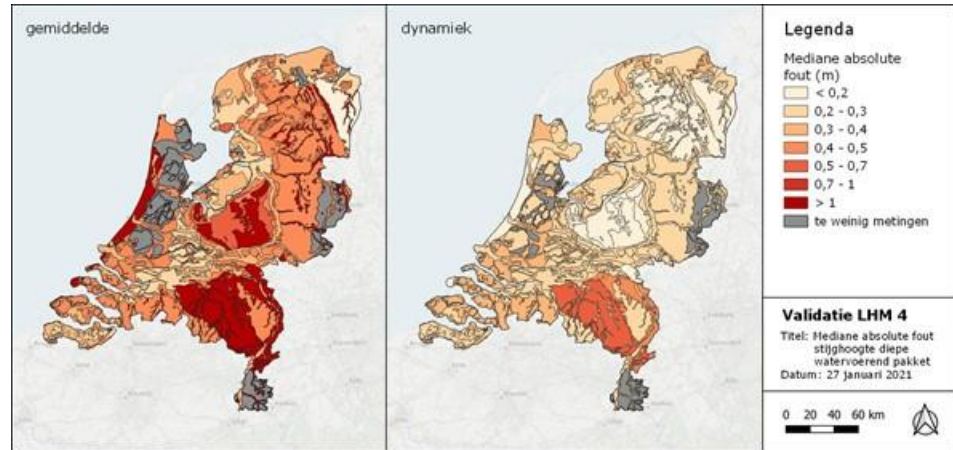
Conform de resultaten voor het eerste watervoerend pakket, tonen Figuur 6.10 - Figuur 6.12 per hydrotype de mediane fout, mediane absolute fout en het percentage dat voldoet aan de toetsingscriteria. Nadrukkelijker nog dan voor het eerste watervoerend pakket, geldt hier dat de ruimtelijke spreiding van meetpunten tussen en binnen de hydrotypen beperkt is. Daarom dienen onderstaande figuren altijd in het licht van Figuur 6.8 en Figuur 6.9 gezien te worden.

Bijlage D bevat tabellen met de statistieken per hydrotype. Daarnaast zijn ook twee tabellen opgenomen met statistieken per lithostratigrafische eenheid.

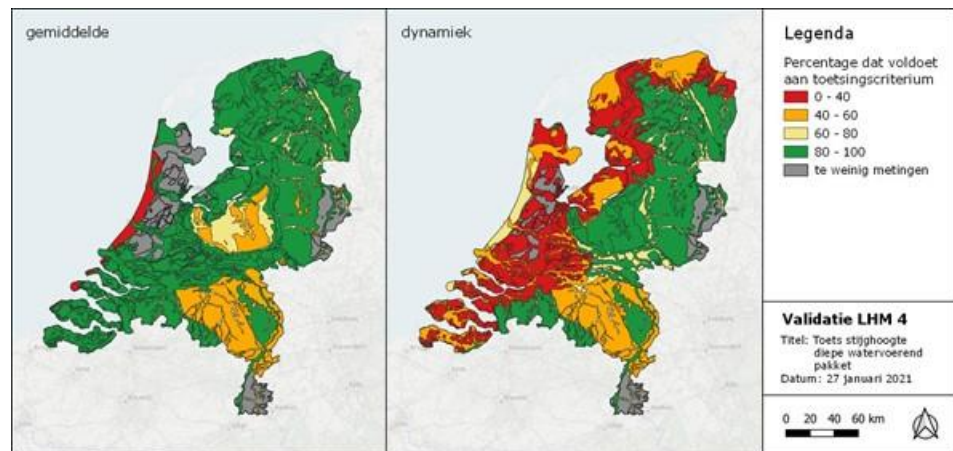
Figuur 6.10: Mediane fout stijghoogte diepe watervoerende pakketten per hydrotype.



*Figuur 6.11:
Mediane absolute
fout stijghoogte
diepe watervoerende
pakketten per
hydrotype.*



*Figuur 6.12:
Percentage van
stijghoogten in diepe
watervoerende
pakketten dat
voldoet aan
toetsingscriterium
per hydrotype.*



6.3 Vergelijking met eerdere modelversies

De landelijke statistieken voor de gemiddelde stijghoogte in de watervoerende pakketten zijn vergeleken met de validatieresultaten van eerdere modelversies, zie Tabel 6.3 (bron: Hoogewoud et al. (2013), Tabel 2.6). Bij de validatie van de eerdere versies is aangenomen dat modellaag 2 het eerste watervoerend pakket is. De validatieresultaten zijn daarom destijds per modellaag gepresenteerd. Bij de huidige validatie daarentegen is de selectie van modellagen voor het eerste watervoerend pakket bepaald aan de hand van het voorkomen van weerstandbiedende lagen. Daarom kunnen de resultaten niet een-op-een, maar wel qua orde grootte worden vergeleken.

Tabel 6.3 laat zien dat landelijk de gemiddelde stijghoogte is toegenomen. Was deze in LHM 3.0 nog gemiddeld te laag, nu is deze gemiddeld te hoog. Bij de toetsing liggen de percentages gemiddeld in dezelfde orde grootte.

*Tabel 6.3:
Vergelijking
landelijke toetsings-
resultaten voor
eerste watervoerend
pakket met die van
eerdere LHM-
versies.*

	LHM 2.2		LHM 3.0		LHM 4.1	
	P50	Toets	P50	Toets	P50	Toets
Modellaag 2	onbekend	70%	-0.01	71%	0.05	78%
Modellaag 3	onbekend	87%	-0.05	89%		
Modellaag 4	onbekend	86%	-0.11	89%		
Modellaag 5	onbekend	82%	-0.04	90%	0.14	80%
Modellaag 6	onbekend	72%	-0.03	72%		
Modellaag 7	onbekend	74%	-0.30	78%		

7 Invloed modelresolutie op toetsing

In de toetsingsrapportage LHM 3.0 (Hoogewoud et al., 2013) zijn resultaten opgenomen van onderzoek naar het effect van schaalverschillen tussen meting en model op de toetsingsresultaten. Door celgemiddelde waarden te vergelijken met puntmetingen wordt er ruis geïntroduceerd. Dit kan de toetsing nadelig beïnvloeden: de bandbreedte van de toetsingscriteria wordt al voor een deel ingenomen door deze ruis.

Een manier om hiermee om te gaan is om het LHM naar te schalen. Hoogewoud en Bootsma (2019) beschrijven een techniek waarbij aan de hand van hoge-resolutie basisgegevens tijdgemiddelde statistieken (zoals de GHG en GLG) worden neergeschaald. Mede op advies van Deltares is echter besloten om deze techniek niet toe te passen, omdat de benodigde inspanning te groot wordt geacht in relatie tot de zekerheid van (de meerwaarde van) het resultaat.

Een andere benadering is om de berekende statistieken (GHG en GLG) van de puntmetingen te vertalen naar een gemiddelde waarde voor de betreffende modelcel waarin het meetpunt is gesitueerd. Een relatief eenvoudige werkwijze hiervoor is om gebruik te maken van regionale hoge-resolutie modellen, zoals MIPWA. Dergelijke modellen hebben een resolutie van 25 m. Ter plaatse van een meetpunt kunnen we het hoge-resolutie model gebruiken om de puntwaarde te vertalen naar een gemiddelde voor een 250 m gridcel. Hiertoe worden de volgende stappen doorlopen:

1. Schaal het 25 m model op naar 250 m resolutie door berekening van het gemiddelde van de GHG respectievelijk GLG;
2. Bereken voor iedere 25 m cel het verschil tussen de oorspronkelijke waarde en dit gemiddelde;
3. Corrigeer de uit de metingen afgeleide GHG en GLG voor dit verschil.

De aldus verkregen schatting van de "cel-representatieve" GHG respectievelijk GLG wordt vervolgens vergeleken met de door het LHM berekende waarden. Een voordeel van deze methode is dat het – buiten opschaling – geen extra berekeningen vergt. Daarmee is de methode zeer robuust en inzichtelijk. Ander groot voordeel is dat de methode een aparte schalingsfactor levert voor de GHG en GLG. Nadeel is dat er een ander model aan ten grondslag ligt. Hoewel regionale modellen en het LHM steeds meer gebruik maken van dezelfde basisdata, zullen modeldata verschillen, al was het maar omdat een andere periode is doorgerekend. Echter, aan de meeste schalingstechnieken ligt een bepaald (afwijkend) model ten grondslag. In dat opzicht wijkt bovenbeschreven methode dus niet af van andere methoden. Met name de eenvoud en robuustheid van de methode maakt het aantrekkelijk om toe te passen.

Binnen deze validatie is ervoor gekozen om beschreven methode in eerste instantie toe te passen op het MIPWA-gebied, zodat het effect op de toetsingsresultaten geëvalueerd kan worden. Hierbij is alleen gekeken naar de GHG en GLG van de freatische grondwaterstanden.

In Tabel 7.1 en Tabel 7.2 zijn voor het MIPWA-gebied per gebiedstype de statistieken voor de voorspelfout van respectievelijk de GHG en GLG opgenomen op basis van gecorrigeerde en ongecorrigeerde GXG's. De resultaten voor de ongecorrigeerde GXG zijn gebaseerd op dezelfde gegevens als in hoofdstuk 5, maar dan voor alleen het MIPWA-gebied.

Uit de tabellen volgt dat de correctie voor schaalverschillen nauwelijks effect heeft op de uiteindelijke gebiedsgemiddelde statistieken. De verschillen zijn marginaal. Op het eerste gezicht lijkt dit verrassend. Maar het is wel degelijk te verklaren aan de hand van statistieken van kansdichtheidsverdelingen.

*Tabel 7.1:
Statistieken
voorspelfout GHG
voor MIPWA-gebied
o.b.v. gecorrigeerde
en ongecorrigeerde
(tussenhaakjes)
GHG, in meters.*

	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE
holoceen	266	168	-0.01 (-0.03)	0.05 (0.04)	0.29 (0.28)	0.22 (0.21)	0.42 (0.41)
pleistoceen	1526	662	-0.10 (-0.10)	0.01 (0.00)	0.45 (0.46)	0.22 (0.22)	1.10 (1.11)
sterk hellend	219	91	-3.46 (-3.45)	-0.09 (-0.15)	3.79 (3.83)	0.49 (0.50)	8.50 (8.51)

*Tabel 7.2:
Statistieken
voorspelfout GLG
voor MIPWA-gebied
o.b.v. gecorrigeerde
en ongecorrigeerde
(tussenhaakjes)
GLG, in meters.*

	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE
holoceen	266	168	-0.23 (-0.22)	-0.19 (-0.18)	0.32 (0.31)	0.24 (0.23)	0.45 (0.43)
pleistoceen	1488	652	-0.04 (-0.04)	0.08 (0.07)	0.46 (0.46)	0.21 (0.22)	1.11 (1.12)
sterk hellend	215	90	-3.36 (-3.36)	-0.18 (-0.14)	3.69 (3.71)	0.55 (0.58)	8.34 (8.34)

Als we ervan uitgaan dat de voorspelfout X_M een normale verdeling volgt, $N(0, \sigma_M^2)$, met gemiddelde 0 en standaarddeviatie σ_M , en de schaalcorrectie X_S een normale verdeling $N(0, \sigma_S^2)$, met gemiddelde 0 en standaarddeviatie σ_S , dan is – onder de aanname dat X_M en X_S ongecorrigeerd zijn – de variantie van de gecombineerde voorspelfout $X_T = X_M + X_S$:

$$\sigma_T^2 = \sigma_M^2 + \sigma_S^2$$

Als we nu kijken naar de varianties van de voorspelfout en schaalcorrectie, dan vinden we de waarden zoals opgenomen in Tabel 7.3.

*Tabel 7.3:
Varianties van
voorspelfout en
schaalcorrectie per
gebiedstype.*

	GHG		GLG	
	σ_M^2	σ_S^2	σ_M^2	σ_S^2
holoceen	0.15	0.0169	0.14	0.0091
pleistoceen	1.18	0.0229	1.22	0.0110
sterk hellend	59.9	0.163	57.7	0.1599

Alhoewel de sample statistieken niet volledig normaal verdeeld zijn (en dus strikt genomen de varianties niet zondermeer opgeteld kunnen worden), is het duidelijk dat de variantie van de huidige voorspelfout 1-2 ordes groter is dan die van de schaalcorrectie. Dit betekent dat de variantie van de gecombineerde voorspelfout nagenoeg gelijk is aan die van de voorspelfout. En dat betekent eenvoudig gezegd dat, zolang de variantie van de voorspelfout orde groter is dan die van de schaalcorrectie, de invloed van de schaalcorrectie verwaarloosbaar is.

Om een indicatie te geven van het effect van de schaling voor de situatie waarin de voorspelfouten de toetsingscriteria benaderen, zijn op basis van de toetsingscriteria en de variantie van de schaalcorrectie statistieken voor bijbehorende theoretische kansdichtheidsfuncties afgeleid. Aangezien de toetsingscriteria voor GHG en GLG gebaseerd zijn op absolute voorspelfouten, is hier gebruik gemaakt van de kansdichtheidsfunctie voor een half-normale verdeling. De cumulatieve kansdichtheidsfunctie voor deze verdeling is:

$$F(x; \sigma) = \text{erf}\left(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}}\right)$$

met σ de standaarddeviatie en $\text{erf}()$ de errorfunctie. Het gemiddelde is

$$\sigma \frac{\sqrt{2}}{\pi}$$

en percentielen worden berekend als:

$$Q(F; \sigma) = \sigma\sqrt{2}\text{erf}^{-1}(F)$$

met $\text{erf}^{-1}()$ de inverse errorfunctie. De toetsingscriteria zijn 80-percentielen van deze half-normale verdeling. Vanuit deze 80-percentielen zijn de standaarddeviaties σ_* en varianties σ_*^2 van onderliggende kansverdeling afgeleid. Vervolgens is de variantie van de schaalcorrectie hierbij opgeteld. Deze variantie is opnieuw berekend op basis van het gehele MIPWA-gebied (en dus niet alleen ter plaatse van de peilbuizen, zoals in Tabel 7.3). Vanuit deze gesommeerde variantie is een nieuw 80-percentiel afgeleid, zie Tabel 7.4. Dit is een toetsingscriterium waarin de fout ten gevolge van schaling is verwerkt, gegeven de aanname dat:

- het verschil tussen het 25 m MIPWA model en het daarvan afgeleide gemiddelde 250 m model een maat is voor de fout ten gevolge van modelschaal;
- de berekende statistieken voor de schaalcorrectie in het MIPWA-gebied representatief zijn voor heel Nederland;
- de modelfout en fout ten gevolge van schaling normaal verdeeld zijn.

Tabel 7.4:
Correctie van 80%-
criterium voor
theoretisch effect
van schaling.

	80%-criterium	σ_*^2	σ_ξ^2	σ_T^2	P80
GHG					
holoceen	0.20	0.0244	0.0409	0.0653	0.33
pleistoceen	0.35	0.0746	0.0275	0.0924	0.39
sterk hellend	0.50	0.1522	0.0987	0.2509	0.64
GLG					
holoceen	0.30	0.0548	0.0203	0.0751	0.35
pleistoceen	0.50	0.1522	0.0085	0.1607	0.51
sterk hellend	1.00	0.6089	0.0650	0.6739	1.05

8 Conclusies en discussie

8.1 Conclusies

Voor de validatie van de grondwatercomponent van het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) versie 4.1 is aan de hand van verschillende databronnen getoetst hoe het model presteert over de periode 2011 t/m 2019. Er is gebruik gemaakt van grondwater meetreeksen vanuit de DINO-database, aangevuld met data vanuit regionale waterbeheerders en drinkwaterbedrijven, welke nog niet in DINO zijn opgenomen. Aanvullend zijn de Gt-kartering, Gd-kartering en het bestand van de Landelijke Steekproef Kaartenheden (LSK) gebruikt. Deze LSK-dataset bevat voor 1193 locaties schattingen van de GHG en GLG op basis van gerichte opnamen en stambuisregressie gedurende de periode 1988-2001.

Freatisch grondwater

Op basis van de validatieresultaten voor het freatisch grondwater aan de hand van bovengenoemde datasets, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Toetsingsresultaten (landelijk) zijn vergelijkbaar met eerdere LHM-versies, met een lichte verbetering bij toetsing van de GHG en GLG:
 - GHG: 54% van de locaties voldoet aan de criteria
 - GLG: 67% van de locaties voldoet aan de criteria
 - Dynamiek: 45% van de locaties voldoet aan de criteria
- Er zitten duidelijke ruimtelijke patronen in de voorspelfouten:
 - Holocene gebieden: te grote dynamiek
 - Rivierkleigebieden vooral te hoge GHG
 - Zeekleigebieden vooral te lage GLG
 - Pleistocene gebieden: dynamiek aan de geringe kant
 - Zuid-Nederland overwegend te lage GHG
 - Oost- en Noord-Nederland overwegend te hoge GLG
 - Stuwwallen, Oost-Nederland, Duinstrook en Limburg: grondwaterstand overwegend (veel) te laag
- Het recessieverloop tijdens droogteperiodes is gemiddeld te traag/beperkt (met name in zandgebieden). In 2018 is dit sterker dan in 2019. Verder heeft het LHM de neiging om in de zomerperiodes korte termijn dynamiek af te vlakken.
- Vergelijking tussen validatieresultaten aan de hand van de LSK-dataset en resultaten op basis van de meetreeksen laat zien dat de LSK-dataset landelijk een kleinere gemiddelde absolute fout voor de GHG en GLG geeft. Als we de toetsingsresultaten per gebiedstype vergelijken, dan wordt met name in sterk hellend gebied met de LSK-dataset kleinere fouten gevonden. Verder zijn er kleine verschillen in de mediane fouten van de GHG en GLG: bij de LSK-dataset zijn de mediane fouten 0.07 m resp. 0.00 m; bij de meetreeksen -0.02 m resp. -0.04 m.

Met name de validatie van het recessieverloop maakt duidelijk dat in de pleistocene gebieden extra aandacht is vereist voor de grondwateraanvulling, de werking van MetaSWAP en interactie tussen MetaSWAP en Modflow. De grondwaterstand zakt over het algemeen te weinig uit en het model heeft de neiging om de dynamiek op korte termijn af te vlakken. Tijdens de regioessies waarin de resultaten zijn besproken, kwam de rol van preferente stroming ter sprake als een mogelijke oorzaak van deze afvlakking. Door deze preferente stroming reageren lage grondwaterstanden directer op buien dan door het LHM wordt voorspeld.

Bij de validatie aan de Gt-kartering bleek in keileemgebieden de gekarteerde grondwaterstanden over het algemeen hoger te liggen dan de LHM-voorspellingen. Bij het doorvoeren van verdere modelverbeteringen verdient het de aanbeveling om voor deze gebieden goed te kijken of dit al dan niet (mede) veroorzaakt wordt door de conceptuele keuze om *confined* te rekenen. In dit concept kan de grondwaterstand namelijk in theorie onbeperkt wegzakken, terwijl dit in werkelijkheid niet het geval is.

De gevonden afwijkingen in de holocene gebieden geven aanleiding om de interactie met het topsysteem nader te onderzoeken. Aanbevolen wordt om reeksen van gemodelleerde en gemeten grondwaterstanden ruimtelijk af te beelden om zo meer gedetailleerde patronen in de afwijkingen te vinden. Modelparameters die hierbij van belang zijn, zijn de waterloopweerstand en de aanwezigheid, diepteligging en weerstand van buisdrainage. Daarnaast speelt in de holocene gebieden de deklaag een belangrijke rol. In de huidige schematisatie zit alle weerstand onder in de eerste modellaag, terwijl deze in werkelijkheid toeneemt met de diepte van de deklaag. Een verdere afstemming hierop van de schematisatie en/of parameterisatie, zou tot verbetering van het model kunnen leiden.

Verder verdienen de ondergrondschematisatie en -parametrisatie ter plaatse van de sterk hellende gebieden (Stuwwallen, Oost-Nederland, Duinstrook en Limburg) de nodige aandacht. Deze gebieden hebben veelal een complexe ondergrond, wat een goede modellering bemoeilijkt. Maar de structureel te lage grondwaterstanden die het LHM hier voorspelt, zullen in de toekomst wel verbeterd moeten worden. De aanbeveling is om bij het onderzoek naar mogelijke modelverbeteringen in deze gebieden ook de grondwateraanvulling te betrekken.

Separate deelgebieden

Bij de validatie van het freatisch grondwater is een viertal deelgebieden apart geëvalueerd. De verwachting is dat in deze gebieden de voorspelfouten om verschillende redenen, structureel afwijken van het landelijk gemiddelde.

- Waddeneilanden: de voorspelfouten zijn (zoals verwacht) groter dan het landelijk gemiddelde, waarbij de GHG en GLG gemiddeld aanzienlijk te laag zijn en de dynamiek overwegend te hoog.

- Stedelijk/bebouwd gebied: de statistieken voor stedelijk/bebouwd gebied zijn qua absolute fouten redelijk in lijn met het landelijk beeld. De GLG is echter gemiddeld circa 0.2 m te laag; de grondwaterstand zakt in stedelijk gebied veelal te diep weg.
- Nabij oppervlaktewater (hoofdafwatering en grotere watervlakken): de validatiestatistieken zijn voor wat betreft de GHG en GLG in lijn met het landelijk beeld. Doordat de vergelijking op landelijke schaal is uitgevoerd, zegt dit nog niet direct iets over lokale verschillen. Binnen de scope van deze validatie was er geen ruimte om in te zoomen op deze lokale verschillen en eventuele relaties met het oppervlaktewaterpeil. Een dergelijke analyse zal wellicht nuttige aanknopingspunten bieden voor verdere (lokale) modelverbeteringen.
- Beïnvloed door onttrekkingen: buizen in een straal van 100 m rondom grondwaterwinningen zijn apart geanalyseerd, omdat werd verwacht dat de modelresolutie leidt tot grotere afwijkingen van de gemodelleerde onttrekkingskegel. De voorspelde GHG en GLG voor deze buizen blijken inderdaad gemiddeld circa 0.2-0.25 m te laag. Ook de absolute fouten zijn gemiddelde groter dan het landelijk gemiddelde. Naast modelresolutie zullen hier ook fouten in onttrekkingsdebieten en ondergrond parametrisatie bijdragen aan grotere voorspelfouten.

Stijghoogte watervoerende pakketten

Voor de stijghoogte in de watervoerende pakketten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De toetsingsresultaten zijn globaal in lijn met eerdere LHM-versies
 - Eerste watervoerend pakket: 78% van de locaties voldoet aan de criteria.
 - Diepe watervoerende pakketten: 80% van de locaties voldoet aan de criteria.
- De gemiddelde stijghoogte is toegenomen. Deze was in eerdere versies te laag en is nu te hoog.
- Het ruimtelijk patroon in de voorspelfout van de dynamiek is vergelijkbaar met die van de freatische grondwaterstand. In holocene gebieden is de dynamiek gemiddeld te groot, in pleistocene gebied gemiddeld te gering.
- In Oost-Brabant is de stijghoogte in diepere watervoerende pakketten 1-2 meter te hoog.

Aangezien het ruimtelijk patroon van de voorspelfout van de dynamiek in de watervoerende pakketten globaal overeenkomt met die van het freatisch grondwater, is de aanbeveling om bij nader onderzoek naar modelverbeteringen deze pakketten in samenhang te analyseren. Hoe werken modelfouten in het topsysteem en freatisch pakket door naar de watervoerende pakketten? En andersom: hoe kunnen mogelijke fouten in de ondergrond parameterisatie doorwerken in het freatisch pakket? Hierbij bieden de statistieken per lithostratigrafische eenheid, zoals opgenomen in bijlage C en D, waardevolle handvatten.

Verder is het advies om toekomstige modelverbeteringen (met betrekking tot modeldata en/of -concepten) vanuit het ongekalibreerde model door te voeren. Na het doorvoeren en toetsen van deze verbeteringen kan dan – indien gewenst – een hernieuwde automatische kalibratie uitgevoerd worden. Hiermee wordt zoveel mogelijk voorkomen dat er “aan de verkeerde knoppen wordt gedraaid” en dat met parameteraanpassingen het model wordt “gefit” op de metingen.

8.2

Discussie

In vergelijking met eerdere validaties van het LHM zijn enkele wijzigingen in de werkwijze doorgevoerd. Onderstaand worden deze wijzigingen kort geëvalueerd. Tenslotte volgt een korte discussie met betrekking tot het uitgevoerde onderzoek naar het effect van modelschaal.

Gebruik regionale data

In aanvulling op de DINO-dataset zijn meetdata opgevraagd bij regionale waterbeheerders. Dit heeft geleid tot een aanzienlijke uitbreiding van de validatie dataset, zowel wat betreft het aantal meetlocaties als wat betreft de actualiteit van de data (de meest recente data is nog niet altijd aangeleverd aan DINO). Bij eerdere validaties bleek in de DINO-database met name een gebrek aan meetlocaties in Noord- en Zuid-Holland en Zeeland. De regionale data hebben tot een iets hogere meetpunt dichtheid in deze provincies geleid, maar de dichtheid blijft in deze provincies nog achter op andere delen van Nederland.

Aanvullende toetsingscriteria

Bij de validatie van het freatisch grondwater zijn extra criteria opgenomen voor het recessieverloop in droge periodes. Evaluatie van dit recessieverloop biedt waardevolle informatie over hoe het model reageert in drogere periodes. Dit is dan ook een nuttige aanvulling op de evaluatie van de amplitude (GHG-GLG). Het advies is om bij toekomstige validaties het recessieverloop opnieuw mee te nemen in de analyse.

Daarbij verdient de definitie van het recessieverloop nog wel aandacht. De gradiënt van het recessieverloop en met name de timing van de laagste grondwaterstand blijken gevoelig te zijn voor korte termijn fluctuaties. Kleine verschillen rondom het minimum kunnen ervoor zorgen dat de laagste grondwaterstand ‘toevallig’ enkele weken eerder of later optreedt. Het is dus wenselijk om een meer robuuste maat voor het recessieverloop te vinden, passend bij het soms grillige verloop van de grondwaterstand. Vervolgens kan dan ook worden gekeken of het huidige criterium van 25% afwijking in de gradiënt nog passend is, of dat deze bijgesteld moet worden.

Naast de focus op droogteperiodes is de analyse van de stijging en daling over de gehele validatieperiode ook zeer bruikbaar. Een mogelijke verbetering hierbij is om de zomer- en winterperiodes apart te beschouwen, omdat deze veelal een ander dynamisch patroon laten zien.

Voor de stijghoogten is een criterium toegevoegd voor de dynamiek. Ook dit biedt waardevolle aanvullende informatie, omdat patronen in de dynamiek informatie geven over mogelijke onderliggende parameterafwijkingen in het model.

Indeling in hydrotypen

Bij de validatie van LHM 3.0 is een indeling gehanteerd op basis van districten. Voor de huidige validatie is gevraagd om een indeling op basis van hydrotypen te gebruiken. Een hydrotype is een classificatie van de geohydrologische opbouw van het topsysteem in goed en slecht doorlatende lagen. Daarmee is het een logische keuze voor de indeling. Bij de interpretatie van de resultaten blijkt het echter een nadeel dat (enkele) hydrotypen ruimtelijk verspreid in Nederland voorkomen. Zo komen Westland-profielen in zowel Zeeland, Noord- en Zuid-Holland, Flevoland als Friesland voor. Bij de berekening van statistieken per hydrotypen worden de fouten in al deze gebieden gemiddeld, terwijl er regionaal verschillen kunnen optreden. In het licht hiervan biedt een alternatieve indeling zoals beschreven in Vermooten et al. (2005) wellicht een nog betere bruikbaarheid. Deze indeling omvat 7 hoofdeenheden en in totaal 27 (grotendeels) aaneensluitende deelgebieden.

Uitgebreidere toetsing bij selectie van meetreeksen

Voor de validatie is de betrouwbaarheid van de onderliggende datasets van groot belang. Daarom zijn bij de selectie van meetreeksen aanvullende toetsingen uitgevoerd. De insteek hierbij is geweest om in ieder geval reeksen met de grootste 'fouten' en/of afwijkende patronen uit de dataset te filteren. Daarbij blijft altijd de discussie of deze afwijkende patronen juist geen waardevolle validatie-informatie geven en daarom in de dataset moeten blijven. Dit hebben we deels opgelost door enkele subsets te scheiden van de basisdataset en deze apart te beoordelen. Maar dan nog steeds zijn er nu reeksen niet meegenomen die op zichzelf mogelijk waardevolle informatie bieden, bijvoorbeeld reeksen met een sterke trend. Het gaat hier echter veelal om zeer lokale fenomenen of om afwijkingen die heel specifiek zijn te relateren aan bijvoorbeeld fouten in onttrekkingsdebieten. In een landelijke validatie-analyse waarin we vooral gebiedsgemiddelde statistieken hebben berekend, kunnen deze reeksen onevenredig veel invloed hebben op de ruimtelijke statistieken en daarmee andere patronen minder zichtbaar maken. Daarom is ervoor gekozen om dergelijke buizen niet mee te nemen. Maar in het verdere proces van modelverbeteringen, waarin ook lokaal wordt ingezoomd, is het advies om deze reeksen alsnog mee te nemen.

De uitgevoerde toetsingen van de meetreeksen zijn allen gericht op het dynamisch patroon van de meetreeks. Absolute niveaus kunnen helaas niet gecontroleerd worden. Uitgangspunt is echter dat dit door de meetnetbeheerder is gedaan. Daarom zijn alleen meetreeksen meegenomen die door de beheerder zijn gevalideerd. Desalniettemin zullen er nog steeds reeksen in de dataset zitten met fouten in absoluut niveau. De verwachting is dat dit relatief beperkt zal zijn en geen invloed heeft op de landelijke/regionale resultaten.

Laagtoekenning o.b.v. weerstand

Bij de validatie van LHM 3.0 is aangenomen dat modellaag 1 de freatische grondwaterstand representeert, modellaag 2 het eerste watervoerend pakket en de overige modellagen de diepere watervoerende pakketten. Bij de huidige validatie is deze indeling gemaakt op basis van het daadwerkelijk voorkomen van weerstand. Op locaties waar weerstand ontbreekt, worden diepere modellagen dus ook als freatisch beschouwd en bevindt het eerste watervoerende pakket zich op grotere diepte. Als grenswaarde voor de weerstand is 20 dagen gehanteerd. Een andere waarde zal leiden tot een iets gewijzigde indeling, maar qua orde grootte is dit een plausibele waarde die leidt tot een landelijk representatieve verdeling in freatische en watervoerende pakketten.

Weging en clustering van buizen

De samengestelde dataset op basis van de DINO-database en data vanuit de regionale partijen leidt tot een onevenwichtige ruimtelijke spreiding van de data. Met name rondom winningen worden vaak hogere meetdichtheden aangetroffen. Daarom is een clusteringstechniek toegepast, waardoor dichtbij elkaar gelegen buizen (maximale afstand van 1500 m) samen worden gevoegd alvorens de gebiedsstatistieken worden berekend. Desondanks zal op wat grotere schaal de spreiding in enkele regio's nog steeds onevenwichtig kunnen zijn. Dit geldt bijvoorbeeld in Noord- en Zuid-Holland, Zeeland en Flevoland, waar de meetdichtheid gering is en de spreiding suboptimaal.

Verder hebben meetreeksen bij de toetsing en selectie een wegingsfactor meegekregen. Het voordeel van het gebruik van wegingsfactoren is dat bijvoorbeeld korte meetreeksen (vanaf drie jaar) wel meegenomen kunnen worden, maar minder bijdragen aan de validatie statistieken. De grootte van de wegingsfactoren is in zekere zin arbitrair. Tijdens de validatie is daarom in beperkte mate gevarieerd met de wegingsfactoren om zo de gevoeligheid van de validatieresultaten vast te kunnen stellen. De variaties leverde echter geen opvallende verschillen in resultaten.

Effect van modelschaal

In aanvulling op de eerder uitgevoerde analyses met betrekking tot de invloed van modelschaal (Hoogewoud et al., 2013) zijn de validatieresultaten voor het LHM 4.1 vergeleken met resultaten waarbij de metingen zijn gecorrigeerd voor variaties binnen een LHM rekencel. Dit is uitgevoerd voor het MIPWA-modelgebied, waarbij correctiewaarden zijn afgeleid uit het verschil tussen hoge resolutie (25x25 m²) en celgemiddelde 250x250 m² GXG-waarden. Uit deze vergelijking blijkt dat de variantie van de correctiewaarden aanzienlijk kleiner is dan de variantie van de voorspelfouten. Hierdoor is de invloed van de correctiewaarden op de validatie statistieken verwaarloosbaar; de statistieken veranderen nagenoeg niet als gevolg van de correctie. Uiteraard zal een correctie voor modelschaal relatief meer invloed krijgen als de voorspelfout afneemt. Hierbij wordt benadrukt dat er alleen is gekeken naar het effect op gebiedsgemiddelde statistieken. Door het toepassen van een schaalcorrectie kunnen lokaal nog steeds betere GXG's voorspeld worden.

De analyse in hoofdstuk 7 geeft ook een indicatie voor wat de toetsingscriteria zouden worden rekening houdend met de fout door modelschaal. Voordat een dergelijke aanpassing van de toetsingscriteria daadwerkelijk toegepast wordt, dienen de gehanteerde uitgangspunten met betrekking tot de representativiteit van de berekende schaalfout getoetst te worden. Het betreft hier met name de vraag in hoeverre fouten in het MIPWA-model zelf doorwerken in de berekende statistieken. Daarnaast wordt er 'slechts' een vertaalslag gemaakt tussen een 25 m en 250 m rekenrooster, terwijl peilbuizen puntmetingen betreffen. Kortom: er ontstaat ook al ruis door vergelijking van een 25 m-model met puntmetingen. De verwachting is alleen dat deze ruis aanzienlijk kleiner is dan de ruis ten gevolge van het verschil tussen 250 m en 25 m resolutie. Tenslotte zouden, om de representativiteit voor heel Nederland te vergroten, meerdere regionale modellen gebruikt kunnen worden om de kansverdeling van de schaalfout te bepalen.

9 Literatuur

Collenteur, R.A., M. Bakker, R. Caljé, S.A. Klop en F. Schaars (2019). Pastas: open source software for the analysis of groundwater time series. Groundwater. doi: 10.1111/gwat.12925.

Hoogewoud J.C. en H. Bootsma (2019). Neerschaling van gemodelleerde grondwaterstanden en fluxen voor de Waterwijzer Natuur - Een methodebeschrijving en validatie, toegepast op landsdekkende NWM resultaten.

Hoogewoud, J.C., G.F. Prinsen, J.C. Hunink, A.A. Veldhuizen, F.J.E. van der Bolt en W.J. de Lange (2013). Toetsingsrapportage NHI 3.0. Rapport nr. 1206107-000, Deltares.

Iglewicz, B. en D. Hoaglin (1992). Volume 16: How to Detect and Handle Outliers, The ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques, Edward F. Mykytka, Ph.D., Editor.

Janssen, G.M.C.M., P.E.V. van Walsum, I. America, J.R. Pouwels, J.C. Hunink, P.T.M. Vermeulen, A. Meshgi, G.F. Prinsen, N. Mulder, M. Visser en T. Kroon (2020). Veranderingsrapportage LHM 4.1, Actualisatie van het lagenmodel, het topsysteem en de bodemplant relaties. Deltares rapport 11205261-000-BGS-0001.

Massop, H.T.L., T. Kroon, P.J.T. van Bakel, W.J. de Lange, M.J.H. Pastoors en J. Huygen (2000). Hydrologie voor Stone; Schematisatie en parameterisatie. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling en Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne. Alterra-rapport 038. Reeks Milieuplanbureau 9.

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

Vermooten J.S.A., L. Vasak, J. Griffioen, G.T. Klaver, R.W. Vernes en H.J.T. Weerts (2005). Afbakening van het topsysteem voor de kartering van de reactiviteit van de Nederlandse ondergrond. TNO-rapport NITG 05-121-A.

Bijlagen

A Statistieken freatische grondwaterstand per lithostratigrafische eenheid

De statistieken voor de voorspelfout van de GHG en GLG zijn ingedeeld naar lithostratigrafische eenheid op basis van het Digitale Geologische Model (DGM v2r2, bron: TNO). Onderstaande tabellen bevatten het resultaat hiervan, waarbij de statistieken voor eenheden met minder dan 10 (geclusterde) meetlocaties zijn weggelaten.

*Tabel A.1:
Statistieken GHG
voor freatische
grondwaterstand per
lithostratigrafische
eenheid (fout in
meters).*

Eenheid	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE
Fm. Appelscha	26	22	0.00	-0.01	0.38	0.31	0.53
Fm. Beegden	381	209	-0.77	-0.09	1.04	0.32	3.53
Fm. Breda	23	14	-5.67	-0.93	5.67	0.93	9.45
Fm. Boxtel	2746	1309	-0.33	-0.04	0.57	0.24	1.62
Fm. Drachten	44	35	0.27	0.19	0.43	0.33	0.53
Fm. Drenthe	303	199	-0.31	-0.04	0.82	0.33	1.60
Gestuwde afz.	370	208	-3.97	-1.14	4.33	1.33	7.67
Eem Fm.	3	3					
Fm. Gulpen	7	6					
Holoceen	1016	585	-0.39	0.03	0.78	0.35	3.23
Fm. Holset	1	1					
Kiezeloooliet Fm.	17	16	-1.33	-0.27	1.41	0.32	4.43
Fm. Kreftenkeye	541	296	0.06	0.06	0.25	0.17	0.38
Fm. Koewacht	1	1					
Fm. Maastricht	12	6					
Fm. Oosterhout	27	14	-1.46	-0.01	1.77	0.46	3.37
Fm. Peelo	83	49	0.03	0.02	0.42	0.27	0.57
Fm. Peize-Waalre	103	73	-0.29	-0.02	0.57	0.22	1.03
Fm. Rupel	2	2					
Fm. Sterksel	239	153	-0.41	-0.12	0.60	0.32	1.15
Fm. Stamproy	182	76	-0.11	0.00	0.57	0.32	1.03
Fm. Tongeren	4	3					
Fm. Urk	52	44	0.33	0.07	0.69	0.35	1.26
Fm. Urk, Lp. Tynje	4	4					
Fm. Vaals	3	3					

Tabel A.2:
Statistieken GLG
voor freatische
grondwaterstand per
lithostratigrafische
eenheid (fout in
meters).

Eenheid	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE
Fm. Appelscha	26	22	0.11	-0.02	0.44	0.31	0.61
Fm. Beegden	376	208	-0.71	-0.14	1.03	0.35	3.55
Fm. Breda	22	14	-5.43	-0.90	5.45	0.90	9.15
Fm. Boxtel	2670	1298	-0.26	0.00	0.54	0.23	1.57
Fm. Drachten	44	35	0.33	0.25	0.39	0.27	0.51
Fm. Drenthe	298	194	-0.30	-0.07	0.82	0.36	1.54
Gestuwde afz.	368	207	-3.84	-0.99	4.25	1.41	7.56
Eem Fm.	3	3					
Fm. Gulpen	7	6					
Holoceen	1004	582	-0.68	-0.30	0.80	0.35	3.25
Fm. Holset	1	1					
Kiezeloooliet Fm.	17	16	-1.26	-0.23	1.35	0.33	4.39
Fm. Kreftenkeye	537	295	0.08	0.09	0.24	0.17	0.38
Fm. Koewacht	1	1					
Fm. Maastricht	12	6					
Fm. Oosterhout	27	14	-1.14	-0.05	1.61	0.58	2.91
Fm. Peelo	82	48	0.05	0.05	0.44	0.27	0.60
Fm. Peize-Waalre	103	73	-0.31	-0.06	0.55	0.25	1.02
Fm. Rupel	1	1					
Fm. Sterksel	235	152	-0.30	-0.06	0.50	0.26	1.04
Fm. Stamproy	180	75	-0.03	0.04	0.53	0.28	0.98
Fm. Tongeren	4	3					
Fm. Urk	52	44	0.39	0.08	0.78	0.39	1.31
Fm. Urk, Lp. Tynje	4	4					
Fm. Vaals	3	3					

B Indeling in grondwatertrappen

*Tabel B.1:
Indeling in
grondwatertrappen.*

Grondwatertrap (Gt)	Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) in cm-mv	Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) in cm-mv
Ia	< 25	< 50
Ic	> 25	< 50
IIa	< 25	50 - 80
IIb	25 - 40	50 - 80
IIc	> 40	50 - 80
IIIa	< 25	80 - 120
IIIb	25 - 40	80 - 120
IVu	40 - 80	80 - 120
IVc	> 80	80 - 120
Va	< 25	> 120
Vao	< 25	120 - 180
Vad	< 25	> 180
Vb	25 - 40	> 120
Vbo	25 - 40	120 - 180
Vbd	25 - 40	> 180
VI	40 - 80	> 120
Vio	40 - 80	120 - 180
VId	40 - 80	> 180
VII	80 - 140	> 120
VIIo	80 - 140	120 - 180
VIIId	80 - 140	> 180
VIII	> 140	> 120
VIIIo	> 140	120 - 180
VIIIId	> 140	> 180

C Statistieken eerste watervoerend pakket

In deze bijlage zijn de statistieken opgenomen voor de voorspelfouten in het eerste watervoerend pakket, zowel op basis van een indeling naar hydrotype (Tabel C.1 en C.2) als naar lithostratigrafische eenheid (Tabel C.3 en C.4). Statistieken voor hydrotypen/eenheden met minder dan 10 (geclusterde) meetlocaties zijn weggelaten.

*Tabel C.1:
Statistieken
gemiddelde
stijghoogte eerste
watervoerend
pakket per
hydrotype (fout in
meters).*

Hydrotype	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
Betuwe-komgronden	135	67	0.14	0.14	0.27	0.19	0.47	94%
Betuwe-stroomruggronden	106	63	-0.20	0.04	0.62	0.18	1.77	76%
Dekzand profiel	317	150	0.04	0.04	0.36	0.19	0.61	82%
Duinstrook	53	28	-0.23	-0.07	0.77	0.35	1.07	52%
Eem en/of keileemprofiel	68	50	0.01	0.03	0.35	0.25	0.54	88%
Keileem profiel	237	119	0.21	0.24	0.38	0.29	0.49	81%
Keileem-Peeloo profiel	224	100	0.09	0.03	0.43	0.29	0.58	69%
Löss profiel	30	19	-1.52	-2.96	8.72	3.52	13.32	7%
Nuenengroep profiel	269	125	-0.09	-0.11	0.34	0.23	0.48	80%
Oost-Nederland profiel	17	13	0.34	0.11	0.42	0.23	1.03	79%
Open profiel	39	20	-0.81	-0.08	1.42	0.53	4.68	48%
Peeloo profiel	31	20	0.13	0.16	0.14	0.16	0.16	100%
Singraven-beekdalen	436	205	-0.21	0.11	0.64	0.22	6.00	80%
Stuwwallen	43	25	-0.71	-0.39	0.84	0.40	1.23	54%
Tegelen/Kedichem profiel	70	50	0.13	0.02	0.56	0.34	0.81	62%
Westland-C-profiel	11	10	0.18	0.01	0.32	0.20	0.48	87%
Westland-D-profiel	118	75	0.02	0.04	0.28	0.18	0.41	84%
Westland-DC-profiel	12	10	-0.11	-0.07	0.24	0.17	0.31	89%
Westland-DH-profiel	233	136	0.01	0.04	0.25	0.18	0.34	87%
Westland-DHC-profiel	64	49	-0.17	-0.13	0.35	0.29	0.45	78%
Westland-H-profiel	89	44	0.09	0.05	0.20	0.09	0.35	89%
Westland-HC-profiel	5	5	-0.06	0.18	0.41	0.57	0.49	61%

*Tabel C.2:
Statistieken
dynamiek eerste
watervoerend
pakket per
hydrotipe (fout in
meters).*

Hydrotipe	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
Betuwe- komgronden	147	68	0.20	0.26	0.27	0.28	0.31	40%
Betuwe- stroomruggronden	108	63	0.15	0.14	0.38	0.27	0.48	48%
Dekzand profiel	341	162	-0.16	-0.16	0.23	0.20	0.29	65%
Duinstrook	91	47	0.23	0.23	0.25	0.24	0.29	25%
Eem en/of keileemprofiel	91	61	0.02	0.04	0.14	0.11	0.18	76%
Keileem profiel	351	154	-0.11	-0.10	0.17	0.14	0.22	87%
Keileem-Peeloo profiel	354	139	0.01	0.02	0.16	0.14	0.22	87%
Löss profiel	30	19	-0.19	0.01	0.46	0.16	0.94	43%
Nuenengroep profiel	306	138	-0.25	-0.23	0.29	0.25	0.35	63%
Oost-Nederland profiel	20	15	0.02	-0.04	0.20	0.20	0.26	66%
Open profiel	45	23	-0.06	-0.08	0.19	0.18	0.23	58%
Peeloo profiel	64	33	-0.06	-0.02	0.11	0.08	0.17	70%
Singraven- beekdalen	683	257	-0.08	-0.07	0.19	0.14	0.24	70%
Stuwwallen	48	26	-0.06	-0.08	0.12	0.10	0.14	85%
Tegelen/Kedichem profiel	71	51	-0.12	-0.13	0.25	0.23	0.29	72%
Westland-C-profiel	28	26	0.29	0.33	0.30	0.33	0.34	18%
Westland-D-profiel	148	98	0.30	0.29	0.32	0.30	0.40	35%
Westland-DC- profiel	30	23	0.31	0.23	0.33	0.25	0.40	43%
Westland-DH- profiel	307	172	0.32	0.36	0.36	0.37	0.41	16%
Westland-DHC- profiel	87	67	0.53	0.54	0.53	0.54	0.58	5%
Westland-H-profiel	132	64	0.13	0.11	0.19	0.16	0.25	37%
Westland-HC- profiel	14	13	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37	0%

*Tabel C.3:
Statistieken
gemiddelde
stijghoogte eerste
watervoerend
pakket per
lithostratigrafische
eenheid (fout in
meters).*

Eenheid	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE
Fm. Appelscha	50	41	0.02	0.04	0.40	0.26	0.60
Fm. Beegden	80	62	-0.13	0.01	0.62	0.32	0.99
Fm. Breda	25	17	-2.74	0.03	3.18	0.38	6.98
Fm. Boxtel	764	425	0.01	0.04	0.29	0.19	0.46
Fm. Drachten	231	134	0.29	0.28	0.40	0.32	0.51
Fm. Drenthe	129	102	0.01	0.12	0.45	0.21	0.71
Gestuwde afz.	15	12	0.25	0.17	0.99	0.27	1.54
Eem Fm.	46	42	-0.02	-0.04	0.34	0.21	0.57
Fm. Gulpen	14	6					
Holoceen	34	29	0.02	0.06	0.24	0.13	0.33
Fm. Holset	1	1					
Kiezeloooliet Fm.	37	22	0.30	0.27	0.71	0.67	0.84
Fm. Kreftenkeye	447	283	0.00	0.04	0.28	0.18	0.47
Fm. Koewacht	10	10	0.16	0.20	0.20	0.21	0.24

F. Maassluis	5	4					
Fm. Maastricht	4	2					
Fm. Oosterhout	37	27	0.07	0.20	0.55	0.31	1.06
Fm. Peelo	179	109	0.09	0.12	0.35	0.26	0.46
Fm. Peize-Waalre	177	150	-0.06	-0.01	0.49	0.29	0.71
Fm. Rupel	1	1					
Fm. Sterksel	126	90	-0.04	-0.03	0.28	0.16	0.44
Fm. Stamproy	55	32	0.29	0.01	0.65	0.39	0.93
Fm. Tongeren	8	6					
Fm. Urk	108	85	0.11	0.09	0.32	0.24	0.45
Fm. Urk Lp. Tynje	22	20	0.08	0.04	0.28	0.22	0.39
Fm. Vaals	2	1					

*Tabel C.4:
Statistieken
dynamiek eerste
watervoerend
pakket per
lithostratigrafische
eenheid (fout in
meters).*

Eenheid	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE
Fm. Appelscha	94	67	-0.03	-0.03	0.14	0.13	0.17
Fm. Beegden	84	64	-0.22	-0.21	0.27	0.22	0.34
Fm. Breda	26	18	0.10	-0.06	0.33	0.26	0.42
Fm. Boxtel	1067	549	0.01	0.02	0.25	0.22	0.31
Fm. Drachten	318	187	-0.05	-0.06	0.17	0.15	0.22
Fm. Drenthe	162	129	0.00	0.01	0.19	0.15	0.26
Gestuwde afz.	19	15	-0.13	0.06	0.32	0.23	0.42
Eem Fm.	66	59	0.14	0.09	0.20	0.12	0.29
Fm. Gulpen	14	6					
Holoceen	50	44	0.09	0.07	0.23	0.22	0.28
Fm. Holset	1	1					
Kiezelooliet Fm.	39	24	-0.20	-0.20	0.23	0.20	0.27
Fm. Kreftenkeye	539	341	0.25	0.28	0.33	0.31	0.40
Fm. Koewacht	10	10	0.48	0.42	0.48	0.42	0.58
F. Maassluis	5	4					
Fm. Maastricht	4	2					
Fm. Oosterhout	55	34	-0.04	-0.05	0.25	0.16	0.37
Fm. Peelo	329	175	-0.04	-0.04	0.16	0.13	0.20
Fm. Peize-Waalre	212	179	-0.07	-0.07	0.24	0.18	0.31
Fm. Rupel	1	1					
Fm. Sterksel	143	102	-0.03	-0.06	0.27	0.21	0.34
Fm. Stamproy	55	32	-0.06	0.01	0.21	0.16	0.30
Fm. Tongeren	8	6					
Fm. Urk	159	120	-0.02	-0.03	0.18	0.15	0.23
Fm. Urk Lp. Tynje	34	29	0.13	0.14	0.16	0.15	0.20
Fm. Vaals	2	1					

D Statistieken diepe watervoerende pakketten

In deze bijlage zijn de statistieken opgenomen voor de voorspelfouten in de diepe watervoerende pakketten, zowel op basis van een indeling naar hydrotype (Tabel D.1 en D.2) als naar lithostratigrafische eenheid (Tabel D.3 en D.4). Statistieken voor hydrotypen/eenheden met minder dan 10 (geclusterde) meetlocaties zijn weggelaten.

*Tabel D.1:
Statistieken
gemiddelde
stijghoogte diepe
watervoerende
pakketten per
hydrotype (fout in
meters).*

Hydrotype	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
Betuwe-komgronden	64	26	0.14	0.10	0.46	0.23	0.62	93%
Betuwe-stroomruggronden	36	23	0.05	0.13	0.37	0.33	0.44	99%
Dekzand profiel	96	55	0.17	0.22	0.44	0.33	0.59	91%
Duinstrook	19	11	0.89	0.63	1.62	1.25	2.01	34%
Eem en/of keileemprofiel	39	30	0.39	0.30	0.64	0.42	0.89	78%
Keileem profiel	62	34	0.27	0.32	0.50	0.40	0.67	88%
Keileem-Peeloo profiel	105	39	-0.05	-0.10	0.50	0.27	0.68	81%
Löss profiel	6	3						
Nuenengroep profiel	251	92	0.95	0.85	1.23	0.96	1.53	53%
Oost-Nederland profiel	4	3						
Open profiel	19	12	1.60	1.02	1.86	1.48	2.43	47%
Peeloo profiel	23	12	-0.06	0.02	0.19	0.15	0.22	100%
Singraven-beekdalen	139	57	-0.54	0.14	1.30	0.27	5.52	80%
Stuwwallen	23	16	-0.28	-0.49	1.31	0.74	1.94	59%
Tegelen/Kedichem profiel	146	56	-0.11	-0.13	0.47	0.44	0.59	90%
Westland-C-profiel	4	4						
Westland-D-profiel	108	49	0.02	0.08	0.34	0.26	0.45	95%
Westland-DC-profiel	16	8						
Westland-DH-profiel	145	80	0.09	0.10	0.30	0.22	0.46	96%
Westland-DHC-profiel	26	19	-0.08	-0.07	0.41	0.26	0.57	86%
Westland-H-profiel	19	14	0.35	0.29	0.41	0.34	0.50	98%
Westland-HC-profiel	4	4						

*Tabel D.2:
Statistieken
dynamiek diepe
watervoerende
pakketten per
hydrotipe (fout in
meters).*

Hydrotipe	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE	Toets
Betuwe- komgronden	64	26	0.08	0.15	0.24	0.23	0.28	67%
Betuwe- stroomruggronden	38	24	0.00	-0.02	0.22	0.19	0.27	81%
Dekzand profiel	108	64	-0.21	-0.21	0.24	0.21	0.30	89%
Duinstrook	35	17	0.09	0.11	0.20	0.18	0.24	68%
Eem en/of keileemprofiel	41	32	-0.03	0.03	0.12	0.08	0.19	88%
Keileem profiel	104	54	-0.02	-0.02	0.11	0.10	0.14	88%
Keileem-Peeloo profiel	153	61	-0.05	-0.05	0.14	0.12	0.16	95%
Löss profiel	6	3						
Nuenengroep profiel	256	93	-0.51	-0.47	0.51	0.47	0.58	43%
Oost-Nederland profiel	4	3						
Open profiel	23	12	-0.40	-0.28	0.43	0.31	0.54	47%
Peeloo profiel	44	21	-0.07	-0.06	0.07	0.06	0.11	96%
Singraven- beekdalen	185	69	-0.19	-0.14	0.27	0.18	0.35	77%
Stuwwallen	24	17	-0.07	-0.09	0.10	0.09	0.12	94%
Tegelen/Kedichem profiel	146	56	-0.34	-0.35	0.38	0.35	0.46	93%
Westland-C-profiel	13	13	0.28	0.31	0.28	0.31	0.30	21%
Westland-D-profiel	127	65	0.21	0.18	0.24	0.20	0.30	48%
Westland-DC- profiel	31	22	0.26	0.19	0.27	0.20	0.34	44%
Westland-DH- profiel	232	129	0.23	0.25	0.25	0.26	0.29	27%
Westland-DHC- profiel	42	28	0.40	0.39	0.40	0.39	0.46	25%
Westland-H-profiel	51	33	0.18	0.20	0.22	0.20	0.27	39%
Westland-HC- profiel	6	6						

*Tabel D.3:
Statistieken
gemiddelde
stijghoogte diepe
watervoerende
pakketten per
lithostratigrafische
eenheid (fout in
meters).*

Eenheid	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE
Fm. Appelscha	48	38	-0.06	0.04	0.46	0.23	0.70
Fm. Beegden	16	12	-0.09	0.12	0.62	0.65	0.73
Fm. Breda	58	48	0.61	0.54	0.96	0.74	1.45
Fm. Boxtel	7	7					
Fm. Drachten	6	6					
Fm. Drenthe	35	30	0.14	0.17	0.35	0.23	0.49
Gestuwde afz.	4	3					
Eem Fm.	17	15	0.02	0.04	0.24	0.15	0.31
Fm. Gulpen	3	1					
Kiezelooid Fm.	79	58	1.47	1.14	1.69	1.20	2.13
Fm. Kreftenkeye	18	13	0.26	0.31	0.28	0.31	0.36
Fm. Koewacht	1	1					
F. Maassluis	98	84	0.04	0.07	0.63	0.35	1.07
Fm. Maastricht	3	2					

Fm. Oosterhout	230	147	0.20	0.18	0.58	0.43	0.84
Fm. Peelo	98	54	0.07	0.12	0.48	0.24	0.67
Fm. Peize-Waalre	488	321	0.24	0.10	0.63	0.36	0.97
Fm. Sterksel	53	38	-0.15	-0.09	0.43	0.23	0.64
Fm. Stamproy	10	9					
Fm. Urk	67	58	0.07	0.11	0.39	0.24	0.56
Fm. Urk Lp. Tynje	17	16	0.09	0.08	0.24	0.22	0.30

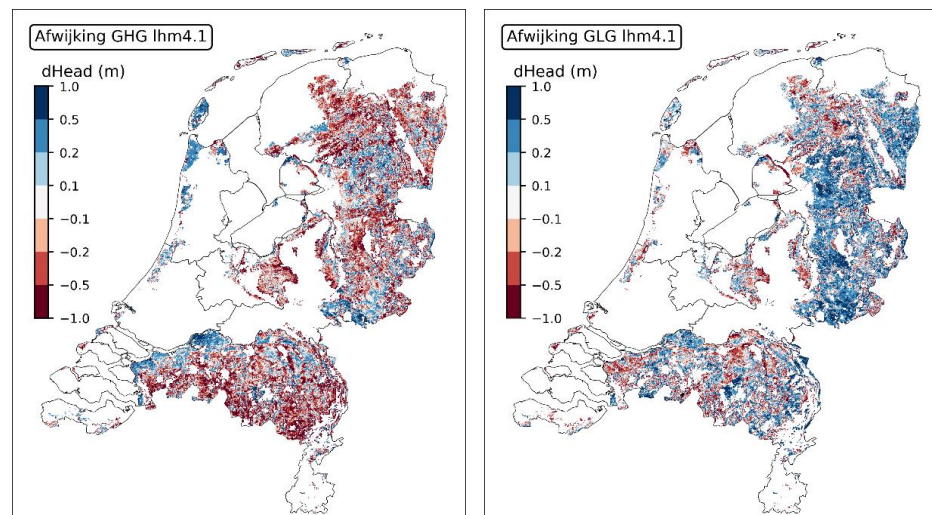
*Tabel D.4:
Statistieken
dynamiek diepe
watervoerende
pakketten per
lithostratigrafische
eenheid (fout in
meters).*

Eenheid	N	N*	ME	P50	MAE	MedAE	RMSE
Fm. Appelscha	96	78	0.09	0.09	0.15	0.11	0.19
Fm. Beegden	16	12	-0.33	-0.28	0.34	0.28	0.40
Fm. Breda	59	49	-0.32	-0.26	0.39	0.31	0.48
Fm. Boxtel	9	9					
Fm. Drachten	15	14	0.13	0.13	0.15	0.14	0.18
Fm. Drenthe	53	48	0.12	0.10	0.20	0.17	0.25
Gestuwde afz.	6	5					
Eem Fm.	34	27	0.24	0.24	0.29	0.26	0.34
Fm. Gulpen	3	1					
Kiezeloooliet Fm.	79	58	-0.55	-0.49	0.55	0.49	0.64
Fm. Kreftenkeye	24	19	0.14	0.16	0.26	0.25	0.32
Fm. Koewacht	1	1					
F. Maassluis	106	91	-0.10	-0.10	0.27	0.23	0.36
Fm. Maastricht	3	2					
Fm. Oosterhout	256	165	-0.22	-0.23	0.31	0.27	0.41
Fm. Peelo	179	102	0.01	-0.01	0.14	0.13	0.16
Fm. Peize-Waalre	572	385	-0.06	-0.01	0.29	0.23	0.39
Fm. Sterksel	60	42	-0.17	-0.20	0.29	0.23	0.35
Fm. Stamproy	10	9					
Fm. Urk	109	91	0.12	0.15	0.20	0.19	0.24
Fm. Urk Lp. Tynje	44	39	0.24	0.23	0.24	0.24	0.29

E Validatie aan Gd-kartering

Onderstaande tekst is aangeleverd door Deltares naar aanleiding van de door hen uitgevoerde validatie aan de Gd-kartering.

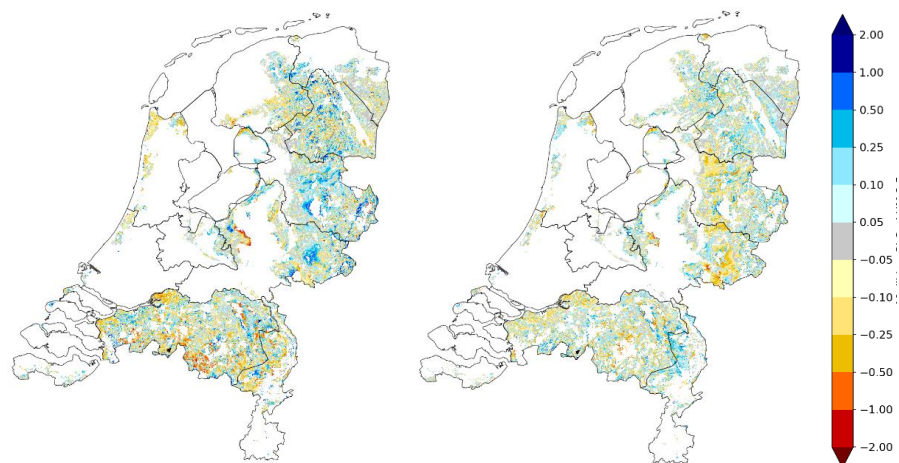
De gesimuleerde grondwaterstanden kunnen voor pleistoceen Nederland ook worden vergeleken met grondwaterstanden volgens de Gd (grondwaterdynamiek) kartering uit de BRO (Stuyt et al., 2016). Figuur E.1 toont de afwijkingen tussen de berekende GHG en de GLG en de waarden uit deze kartering. Uit dit beeld komt naar voren dat overwegend ondiepere GHG's zijn gekarteerd dan berekend. In Oost-Nederland zijn de GLG's natter dan gekarteerd. In Brabant vertoont de afwijking van de GLG een gemengd beeld van te hoog en te laag berekende grondwaterstanden, ten opzichte van de Gd-kartering. Voor de nieuwe modelresultaten is er dus op basis van de berekende GLG op het eerste zicht geen eenduidige bevestiging van een te droog model, zoals geconcludeerd in de waterkwaliteitsberekeningen op basis van LHM 3.5 (Van der Bolt et al, 2020). Bij verder inzoomen, is er wel een onderscheid waarneembaar, waarbij met name buiten de beekdalen relatief lage grondwaterstanden worden berekend t.o.v. de Gd-kartering. Opgemerkt wordt dat de Gd-kartering waarschijnlijk neigt naar het accentueren van ondiepe waarnemingen. Dit heeft te maken met de wijze waarop de metingen in het veld zijn verricht; er wordt per definitie gefocust op ondiepe waarnemingen (tot circa 1.5 m onder maaiveld), en wanneer in het veld vanaf het maaiveld een signaal is voor de aanwezigheid van een ondiepe grondwaterstand, wordt de waarneming gestaakt. Voordat een conclusie kan worden getrokken uit de vergelijking met de Gd-kartering zal dit eerst worden geverifieerd en besproken met de bodemexperts in Wageningen.



Figuur E.1 De afwijking tussen LHM 4.1 enerzijds en de grondwaterkarakteristieken uit de BRO (Stuyt et al., 2016) anderzijds. Links toont de afwijking in de GHG en rechts toont de afwijking de GLG. In de blauwe gebieden zijn de grondwaterstanden in het LHM ondieper dan de grondwaterkarakteristieken uit de BRO, in rode gebieden zijn ze dieper. De GHG en GLG zijn afgeleid voor de periode april 1981 – april 2011. Waarden met een GXG groter dan 2.5 m zijn gemaskeerd.

Figuur E.2 toont de modelverbetering van LHM 4.1 t.o.v. LHM 3.5, uitgedrukt als afname van het absolute verschil tussen enerzijds de gemodelleerde GHG (links) en GLG (rechts) anderzijds de Gd-kartering (Stuyt et al., 2016). In Figuur E.2 zijn vooral modelverbeteringen waarneembaar in Drenthe (GHG), Oost-Nederland (GHG) en op de horsten in Brabant en Noord-Limburg (GLG en in beperkte mate GHG); dit is weergegeven in blauwe tinten in de figuur. Ook is waarneembaar dat in een deel van de gebieden een modelverbetering van de GHG gepaard gaat met een verslechtering van de GLG, bijvoorbeeld op de oostelijke zandgronden, en vice versa. Bijvoorbeeld het gebied rond de IJssel en het gebied ten zuidwesten van Eindhoven.

Ten opzicht van LHM 3.5 worden de afwijkingen in de noordelijke regio's in de GLG en GHG wat kleiner in LHM 4.1. In het oostelijk zandgebied is de GHG aanzienlijk kleiner geworden ten opzichte van de kartering, maar de afwijking in GLG groter. In het centrale zandgebied worden de verschillen met zowel de gekarteerde GLG als GHG gemiddeld enkele cm groter. In het zuidelijk zandgebied is de afwijking van de berekende GHG t.o.v. de kartering vergroot, terwijl het verschil met de berekende GLG is afgenomen.



Figuur E.2 Modelverbetering van LHM 4.1 t.o.v. LHM 3.5, uitgedrukt als afname van het absolute verschil tussen enerzijds de gemodelleerde GHG (links) en GLG (rechts) anderzijds de Gd-kartering (Stuyt et al., 2016). Blauwe tinten geven modelverbetering aan, gele tinten modelverslechtering.

Op basis van voorgaande vergelijkingen wordt geconcludeerd dat in het pleistocene gebied gemiddeld de afwijkingen t.o.v. de Gd-kartering iets zijn verbeterd voor de GHG. De afwijking verschillen per regio, waarbij t.o.v. LHM 3.5 zowel verkleining als vergroting van de afwijking met de Gd-karteringen kunnen plaats vinden, gepaard gaande met vooral wijzigingen in de GHG; de afwijking in de GLG is gemiddeld gelijk, maar kan regionaal zowel wat verbeteren als verslechteren. Het beeld van beperkte verschuivingen in de GLG wordt bevestigd wanneer wordt gekeken naar de cumulatieve frequentieverdeling van de afwijking t.o.v. de Gd-kartering, bij de GHG zijn meer verschuivingen waarneembaar.

F Validatie aan LSK dataset

Deze bijlage bevat het Briefrapport validatie LHM 4.1 aan de hand van de LSK dataset, opgesteld door Wageningen Environmental Research.

Briefrapport validatie LHM 4.1

Martin Knotters, Wageningen Environmental Research, 8 februari 2021

Inleiding

In opdracht van Deltares zijn voorspellingen met LHM 4.1 (Janssen e.a., 2020) van GHG en GLG gevalideerd met de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK) als referentiedata. De gevolgde aanpak is gelijk aan de aanpak die beschreven is door Knotters e.a. (2013). In dit briefrapport is GxG de samenvatting voor GHG en GLG.

Materialen en methode

Het bestand van de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK) bevat schattingen van de GHG en GLG voor 1193 locaties, die volgens een gestratificeerde enkelvoudig aselechte steekproef zijn geselecteerd (Finke e.a., 2001). Bij de LSK zijn deelgebieden (strata) onderscheiden op basis van bodemtype en grondwatertrappen, zodat zowel een goede spreiding over verschillende bodemkundige en hydrologische situaties als een goede ruimtelijke spreiding is bewerkstelligd. De GxG's van deze locaties zijn geschat op basis van gerichte opnamen en stambuisregressie gedurende de periode 1988-2001. De standaardafwijking van de fout in GxG varieert van 10 tot 25 cm. Verder kunnen door regression to the mean ondiepe GxG's te diep worden geschat en diepe GxG's te ondiep, waardoor de ruimtelijke variatie in GxG's mogelijk wordt onderschat.

Met het LHM 4.1 zijn GxG's berekend uit ruimtelijke voorspellingen van het grondwaterstandsverloop voor de periode 1997-2005, die samenvalt met de periode waarin de inventarisaties voor de kaart van de grondwaterstandsdynamiek (Gd) plaatsvonden. Deze periode is gelijk aan die in eerdere validaties van GxG-voorspellingen met NHI/NHM is gebruikt, zodat onderlinge vergelijking mogelijk is. De LHM-voorspellingen van de GxG's zijn gemaakt voor een grid van 250x250 m.

Voor elke locatie i van de LSK is het verschil berekend tussen de GxG-waarde uit de LSK-dataset en de GxG-waarde die met NHM 4.1 is voorspeld:

$$e_i = \hat{z}_{i,LSK} - \hat{z}_{i,LHM4.1}$$

waarin \hat{z} de diepte van de grondwaterspiegel in cm beneden maaiveld is.

De kwaliteit van modelvoorspellingen is met verschillende validatiematen uitgedrukt, die inzicht geven in systematische en toevallige verschillen en in de frequentieverdeling van de verschillen:

- ME = gebiedsgemiddeld verschil tussen GxG volgens LSK en GxG volgens LHM 4.1. Dit is een maat voor het systematische verschil of bias. Omdat de LSK is gebaseerd op een kanssteekproef kan ook de standaardfout van het geschatte gebiedsgemiddelde verschil worden berekend. Deze standaardfout kan worden gebruikt om te beoordelen of het gebiedsgemiddelde verschil significant van 0 afwijkt. Als het gebiedsgemiddelde verschil meer dan tweemaal de standaardfout is verwijderd van 0, dan kan het als significant worden beoordeeld (bij een significantieniveau van 5 %).
- P50 = mediaan van de verschilwaarden. Als de verschilwaarden symmetrisch verdeeld zijn zal deze gelijk zijn aan de ME. Naarmate de verdeling schever is, zullen ME en P50 meer van elkaar verschillen.
- RMSE = wortel uit het gemiddelde gekwadrateerde verschil, MSE, tussen GxG volgens LSK en GxG volgens LHM 4.1. Dit is een maat voor het totale verschil of onnauwkeurigheid.
- SDE = standaardafwijking van de verschillen tussen GxG volgens LSK en GxG volgens LHM 4.1. Dit is een maat voor het toevallige verschil of imprecisie.
- MAE = gemiddelde van de absolute verschillen tussen GxG volgens LSK en GxG volgens LHM 4.1. Dit is evenals de RMSE een maat voor het totale verschil, maar minder gevoelig voor uitschieters.
- De cumulatieve frequentieverdeling van de verschilwaarden. Hieruit kunnen intervallen worden berekende waarbinnen een bepaald percentage van de fouten ligt (bijvoorbeeld 95 %). Ook kunnen oppervlaktepercentages worden berekend waarbinnen de fout niet groter is dan een bepaalde waarde, bijvoorbeeld 50, 75 of 100 cm. In deze studie zijn de percentielwaarden P2,5,

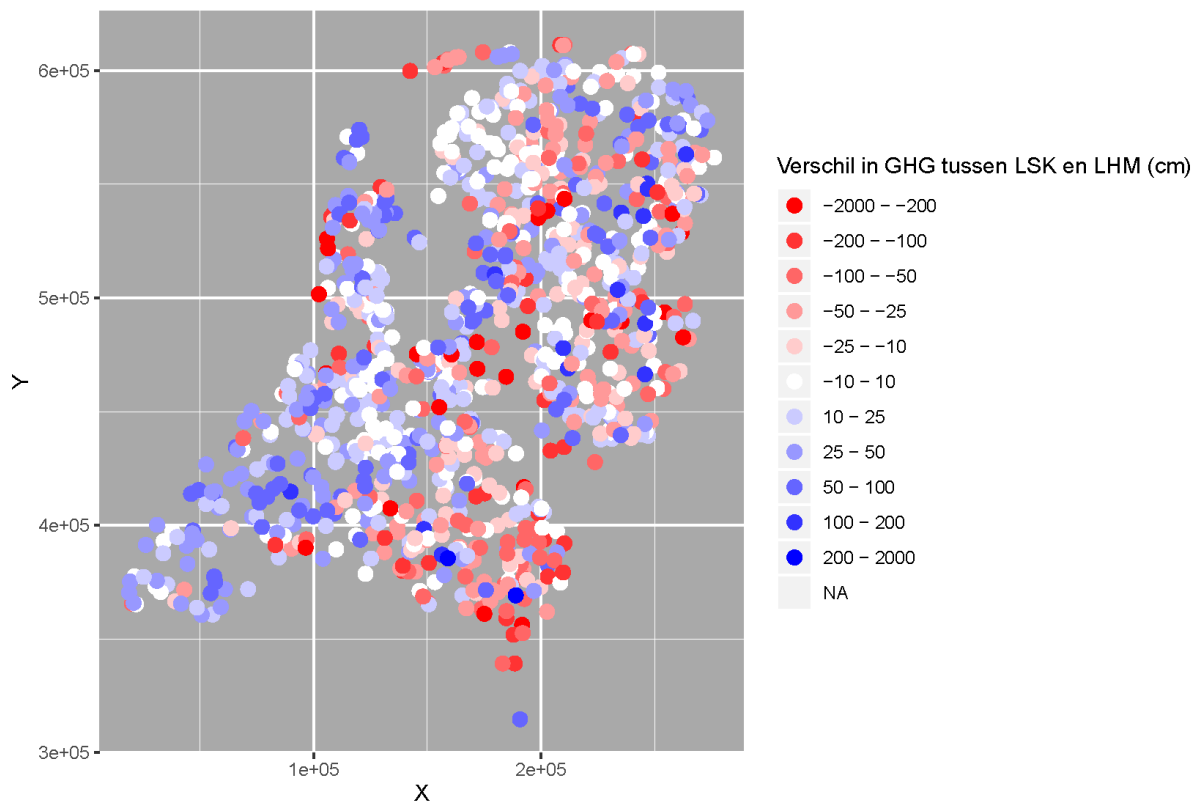
P25, P50, P75 en P97,5 berekend, waaronder respectievelijk 2,5, 25, 50, 75 en 97,5 % van de fouten ligt. Merk op dat P50 de mediaan is.

Resultaten

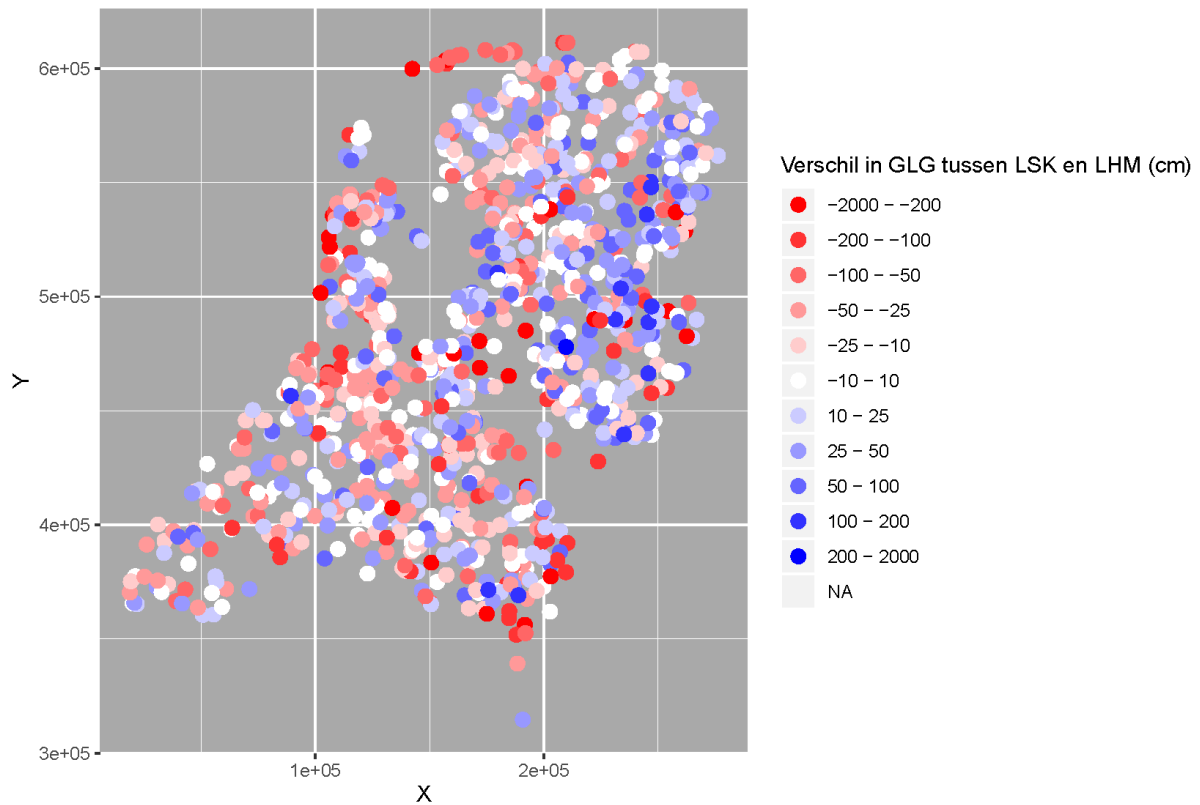
Tabel 1 geeft de samenvattende statistieken van de validatie van GxG's die zijn voorspeld met LHM 4.1, met de LSK-data als referentieset. Figuur 1 en 2 geven de ruimtelijke verdelingen weer van de verschillen tussen GxG-voorspellingen met LHM 4.1 en de LSK-data.

Tabel 1 Validatieresultaten in cm voor voorspellingen van GxG's met LHM 4.1 voor het gebied waarvoor LSK-schattingen van GxG's beschikbaar zijn. ME: gemiddelde fout. RMSE: root mean squared error. SDE: standaardafwijking van de fout. MAE: gemiddelde absolute fout. De Px-waarden geven de x-de percentielen van de cumulatieve frequentieverdeling aan. P50: mediaan. Standaardfouten tussen haakjes (vgl. tabel 3.1 in Alterra-rapport 2440)

GHG					GLG				
ME	RMSE	SDE	MAE	P2,5; P25; P50; P75; P97,5	ME	RMSE	SDE	MAE	P2,5; P25; P50; P75; P97,5
-10.6 (4.2)	140.0	139.7	50.2	-187;-22;7;32;89	-13.3 (4.0)	131.5	130.9	47.8	-186;-27;0;27;91



Figuur 1 Verschillen tussen GHG's uit de LSK en het LHM 4.1

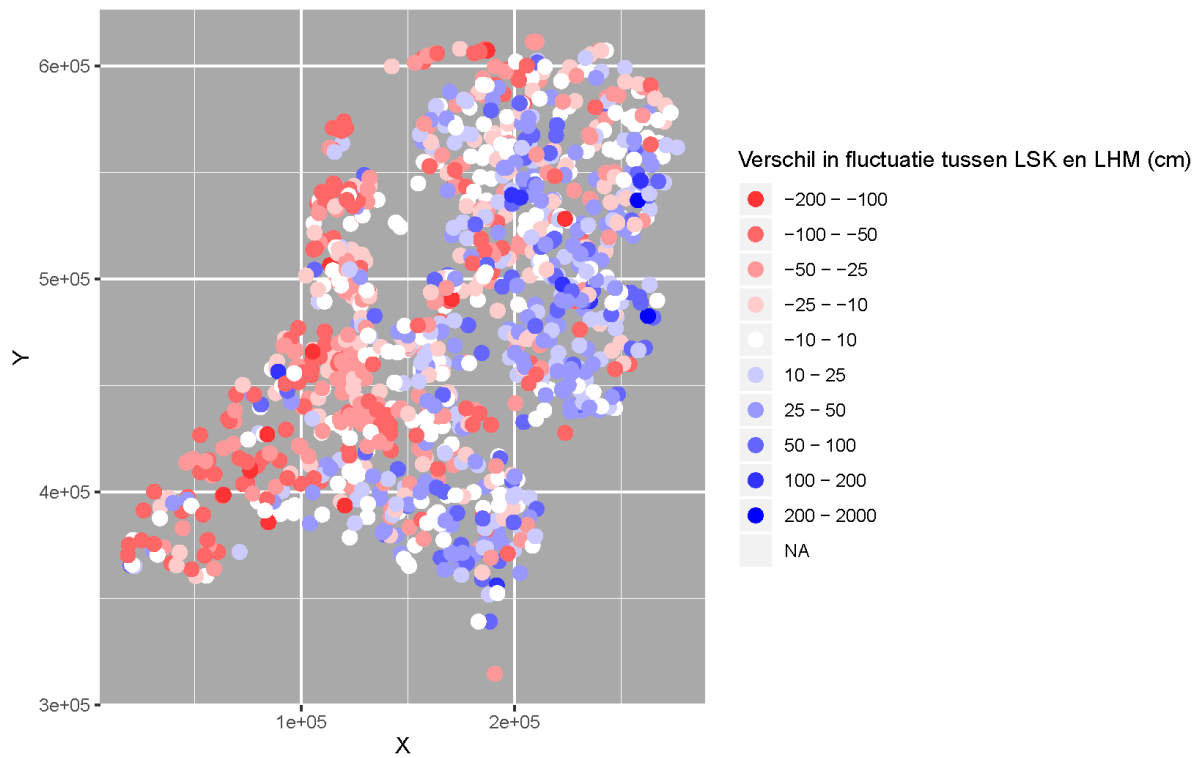


Figuur 2 Verschillen tussen GLG's uit LSK en LHM 4.1

Tabel 2 vat de validatieresultaten samen voor de amplitude van de seizoensfluctuatie van de grondwaterstand en Figuur 3 laat de ruimtelijke verdeling van de verschillen zien in fluctuatie volgens de LSK-data en volgens LHM 4.1.

Tabel 2 Validatieresultaten in cm voor voorspellingen met LHM 4.1 van de amplitude van seizoensfluctuatie (GLG-GHG), voor het gebied waarvoor LSK-schattingen van GxG's beschikbaar zijn. ME: gemiddelde fout. RMSE: root mean squared error. SDE: standaardafwijking van de fout. MAE: gemiddelde absolute fout. De Px-waarden geven de x-de percentielen van de cumulatieve frequentieverdeling aan. P50: mediaan. Standaardfouten tussen haakjes (vgl. tabel 3.2 in Alterra-rapport 2440)

ME	RMSE	SDE	MAE	P2,5; P25; P50; P75; P97,5
-3.6 (1.3)	44.9	44.7	34.9	-89;-34;-3;25;84



Figuur 3 Vershil in fluctuatie (GLG-GHG) tussen LSK en LHM 4.1

Tabel 3 en 4 geven de validatieresultaten voor respectievelijk GHG en GLG per grondwatertrap (Gt-klasse). Deze resultaten laten zien dat de verschillen tussen LSK en LHM 4.1 het grootst zijn bij Gt Vb. Dit is een grondwatertrap met een grote fluctuatie: GHG's ondieper dan 40 cm en GLG's dieper dan 120 cm.

Tabel 3 Validatieresultaten GHG-voorspellingen LHM 4.1, per Gt-klasse. ME: mean error (cm). RMSE: root mean squared error (cm). SDE: standard deviation of error (cm). MAE: mean absolute error (cm). n: aantal validatiepunten (-). Standaardfouten tussen haakjes (vgl. tabel 3.4 in Alterra-rapport 2440)

Gt-klasse	ME(s.e.)	RMSE	SDE	MAE	n
I	-13(5)	57	56	35	115
II	-11(11)	151	151	39	200
IIIb	-3(4)	42	42	31	115
III	-18(7)	60	58	34	65
IV	14(5)	58	56	38	130
Vb	-75(52)	426	422	114	65
V	-17(10)	114	113	47	137
VI	2(4)	58	59	42	210
VII	-20(21)	162	162	63	91
VIII	-17(90)	146	171	24	65

Tabel 4 Validatieresultaten GLG-voorspellingen LHM 4.1, per Gt-klasse. ME: mean error (cm). RMSE: root mean squared error (cm). SDE: standard deviation of error (cm). MAE: mean absolute error (cm). n: aantal validatiepunten (-). Standaardfouten tussen haakjes (vgl. tabel 3.5 in Alterra-rapport 2440)

Gt-klasse	ME(s.e.)	RMSE	SDE	MAE	n
I	-42(7)	82	70	52	115
II	-28(11)	154	152	44	200
IIIb	-14(4)	43	41	31	115
III	-9(7)	61	60	36	65
IV	6(5)	54	54	35	130
Vb	-72(49)	395	391	103	65
V	-4(8)	94	94	45	137
VI	-4(4)	58	57	40	210
VII	-9(21)	135	137	44	91
VIII	-12(96)	133	164	20	65

Tabel 5 geeft de mate aan waarin de GxG-voorspellingen met LHM 4.1 voldoen aan de criteria die zijn opgesteld door Hoogewoud e.a. (2013). De voorspellingen voldoen alleen aan het criterium dat aan de mediane afwijking is gesteld.

Tabel 5 NHI 3.0 criteria voor GHG, GLG en dynamiek (ontleend aan tabel 2.2 uit Hoogewoud e.a., 2013b), en resultaten van toetsing van voorspellingen met LHM 4.1 aan GxG-schattingen van de LSK (vgl. tabel 3.6 in Alterra-rapport 2440)

Indicator	Criterium	Toetsresultaten
GHG (landelijk)	In 80% van de meetpunten in een gebied: Peilbeheerst: max. 20 cm afwijking Vrij afwaterend: max. 35 cm afwijking Sterk hellend: max. 50 cm afwijking Afwijking van de mediaan < 15 cm	42% 59% 40% Mediaan = 7 cm
GLG (landelijk)	In 80% van de meetpunten in een gebied: Peilbeheerst: max 30 cm afwijking Vrij afwaterend: max 50 cm afwijking Sterk hellend: max 100 cm afwijking Afwijking van de mediaan < 15 cm	59% 69% 73% Mediaan = 0 cm
Dynamiek (GHG-GLG)	In 80% van de meetpunten in een gebied: Afwijking kleiner dan 25 cm van de gemeten dynamiek Afwijking van de mediaan < 15 cm	44% Mediaan = -3 cm

Discussie en conclusie

Bij de interpretatie van de validatieresultaten moet rekening worden gehouden met het feit dat de LSK-referentiedata een bepaalde nauwkeurigheid hebben. GxG's kunnen immers alleen worden geschat. Idealiter zouden voorspelde tijdreeksen van grondwaterstanden worden vergeleken met waargenomen grondwaterstandsreeksen. Er is echter geen validatiemetnet van peilbuizen voor dit doel beschikbaar. Niettemin geven de validatieresultaten op basis van de LSK een globaal inzicht in de nauwkeurigheid van de GxG-voorspellingen van LHM 4.1 en geeft vergelijking met de resultaten van eerdere versies van het LHM inzicht in de ontwikkeling.

Ten opzichte van eerdere validatieresultaten (Knotters e.a., 2013) lijkt de systematische overschatting van GxG's te zijn afgenomen, maar is de toevallige fout toegenomen. Aan de criteria die gesteld zijn in Hoogewoud e.a. (2013) wordt hierdoor nog niet voldaan bij LHM 4.1.

Referenties

- Finke, P.A., J.J. de Gruijter en R. Visschers, 2001. Status 2001 Landelijke Steekproef Kaarteenheden en toepassingen. Rapport 389, Alterra Wageningen UR.
- Hoogewoud, J.C., G.F. Prinsen, J.C. Hunink, A.A. Veldhuizen, F.J.E. van der Bolt en W.J. de Lange, 2013. Toetsingsrapportage NHI 3.0. Rapport nr. 1206107-000, Deltares.
- Janssen, G.M.C.M., P.E.V. van Walsum, I. America, J.R. Pouwels, J.C. Hunink, P.T.M. Vermeulen, A. Meshgi, G.F. Prinsen, N. Mulder, M. Visser en T. Kroon., 2020. Veranderingsrapportage LHM 4.1; Actualisatie van het lagenmodel, het topsysteem en de bodemplant relaties. Deltares rapport 11205261-000-BGS-0001.
- Knotters, M., T. Hoogland en D.J. Brus, 2013. *Validatie van grondwaterstandskarten met de Landelijke Steekproef Kaarteenheden*. Wageningen, Alterra-rapport 2440. <https://edepot.wur.nl/276389>



Hoofdkantoor

HKV lijn in water BV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Nevenvestiging

Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

0320 29 42 42

info@hkv.nl

www.hkv.nl