

Veranderingsrapportage LHM 4.3

Actualisatie van het Landelijk Hydrologisch Model in 2022 en 2023



Veranderingsrapportage LHM 4.3

Actualisatie van het Landelijk Hydrologisch Model in 2022 en 2023

Auteur(s)

Gijs Janssen
Paul van Walsum
Peter Vermeulen
Rianne Meeusen
Janneke Pouwels
Geert Prinsen
Ilja America - van den Heuvel
Esmée Mes
Joost Delsman
Hendrik Kok
Timo Kroon

Veranderingsrapportage LHM 4.3

Actualisatie van het Landelijk Hydrologisch Model in 2022 en 2023

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer J. Ligtenberg
Trefwoorden	Landelijk Hydrologisch Model, LHM, NHI.

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	24-08-2023
Projectnummer	11208056-005
Document ID	11209235-000-BGS-0001 Veranderingsrapportage LHM 4.3
Pagina's	146
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Gijs Janssen	
	Paul van Walsum	
	Peter Vermeulen	
	Rianne Meeusen	
	Janneke Pouwels	
	Geert Prinsen	
	Ilja America - van den Heuvel	
	Esmee Mes	
	Joost Delsman	
	Hendrik Kok	
	Timo Kroon	

Samenvatting

In de zomer van 2023 is een nieuwe release van het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) opgeleverd: LHM versie 4.3. In 2022 en 2023 zijn in de nieuwe release veranderingen doorgevoerd die in verschillende projecten tot stand zijn gekomen. Het gaat onder meer om verbeterpunten die volgen na verdere analyse en toepassing van LHM 4.2, aanbevelingen uit regionale sessies in het kader van het Delta Programma Zoetwater, ontwikkelingen in het kader van het regionale grondwatermodel AZURE en actualisatie van data binnen het NHI.

In de ondergrond zijn diverse aanvullende verbeteringen (o.a. JIRA-issues) meegenomen, onder andere het herstellen van de parametrisatie van breuken, kD-waarden in het topsysteem en specifieke regionale issues bij bijvoorbeeld de Randmeren en Zeeland. In delen van Nederland zijn, op basis van informatie uit het NHI, onttrekkingsgegevens vernieuwd. Ook is de berekening geactualiseerd, op basis van recent opgeleverde informatie in het NHI.

De kalibratieprocedure voor de ondergrond is gewijzigd t.o.v. LHM 4.2. Daarbij is gebruik gemaakt van een nieuwe bron met betrekking tot de freatische grondwaterstanden, te weten het in de Basisregistratie Ondergrond opgenomen Model Grondwaterspiegeldiepte. Behalve schattingen van de GXG geeft dit model ook de onzekerheden van die schattingen, die als wegingen in de kalibratiemethodiek worden meegenomen.

Wat betreft de onverzadigde zone zijn zowel aanpassingen doorgevoerd in de modelcode als in de database van MetaSWAP. Op basis van nieuwe inzichten die zijn opgedaan bij ontwikkeling van het regionale model AZURE is de rekenwijze voor afhandeling van processen in de bodemkolom aangepast. Verder is de database nabij verzadiging aangepast op basis van literatuuronderzoek. Deze wijzigingen zijn ook aangegrepen om eerder doorgevoerde aanpassingen voor kleibouwstenen te resetten en de andere parameters te heroverwegen, zodat de simulatie rond droge en natte omstandigheden goed wordt gesimuleerd en waar mogelijk dichter aansluit bij uitgangspunten in de Waterwijzer Landbouw. Tot slot zijn voor DP Zoetwater kleine wijzigingen doorgevoerd in het landgebruik en de bijbehorende gewasparameters.

Naast aanpassingen in de data en de modelcodes, wordt in de nieuwe LHM release ook gebruik gemaakt van nieuwe voorbewerkingsscripts. In samenwerking met DP Zoetwater zijn de scripts voor het afleiden van invoer voor het topsysteem herzien en uitgebreid getest, zodat ook maatregelen op meer reproduceerbare wijze kunnen worden afgeleid. Daarbij zijn de beslisregels voor de toepassing van verschillende informatiebronnen op onderdelen aangepast, wat in diverse regio's heeft geleid tot wijziging van de invoer, in het bijzonder voor de parameters voor de ontwatering. Bovendien is voor de ondiepe ontwatering gebruikt van recentere modelinvoer.

Voor de simulatie van het oppervlaktewater in MOZART en het Distributiemodel zijn op basis van terugkoppelingen in regionale sessies van DP Zoetwater diverse wijzigingen doorgevoerd, om de schematisering beter aan te laten sluiten bij de huidige waterbeheerpraktijk. Dit betreft aanpassingen in het waterverdelingsnetwerk, de regionale wateraanvoer-, en afvoercharacteristieken, alsmede het doorvoeren van actuele gegevens voor de verdringingsreeks.

Verder is gebruik gemaakt van actuele modelcodes en modelkoppelingen, waarbij met name wijzigingen zijn doorgevoerd in de rekencode van MetaSWAP om het doorrekenen van maatregelen verbeterd te kunnen simuleren in het kader van DP Zoetwater.

Tot slot hebben ervaringen met het LHM 4.2 en de binnenkomende issues via de helpdesk de behoefte onderstreept om meer grip te hebben op de modelinvoer van het LHM. Hiertoe is een Invoer Controle Tool geschreven, die de gehele (MODFLOW) modelinvoer op een groot aantal punten controleert en standaard bij toekomstige releases kan worden uitgevoerd.

Inhoud

Samenvatting		5
1	Inleiding	10
1.1	Aanleiding voor release LHM 4.3	10
1.2	Leeswijzer	11
2	Aanpassingen in het grondwatermodel	12
2.1	Invoerparameters voor de ondergrond	12
2.1.1	Aanpassing breuken	12
2.1.2	Fout in transmissiviteiten Holoceen	15
2.1.3	Vernieuwde deklaagweerstand Flevopolders en Veluweflanken	16
2.2	Regionale watersystemen en de ontwatering	18
2.2.1	Overzicht gebruik van vernieuwde topsysteem routine en informatiebronnen	18
2.2.2	Herziene kennistabel voor de ontwateringsdiepten	18
2.2.3	Toelichting wijziging beslisregels bij het gebruik van verschillende informatiebronnen	19
2.2.4	Effect wijzigingen ontwateringskenmerken op de modelinvoer	21
2.2.5	Gevolgen van de wijzigingen in het topsysteem op de modelresultaten	25
2.3	Invoer voor het hoofdwatersysteem	26
2.3.1	Gebruik van nieuwe peilen op basis van ISG-tooling	26
2.3.2	Gevolgen van het gebruik van de ISG-informatie	29
2.4	Aanpassingen in de kalibratiemethode	30
2.4.1	Gebruikte optimalisatiegegevens	30
2.4.2	Optimalisatietechniek	32
2.4.3	Parameter Optimalisatie	32
2.4.4	Sub-modellen	36
2.4.5	Resultaten	38
2.4.6	Conclusie	44
3	Aanpassingen van het bodem-water-plant-atmosfeer systeem	46
3.1	Inleiding	46
3.2	Berekening	46
3.2.1	Aanpassing berekend areaal	46
3.2.2	Aanpassing triggers berekening	48
3.2.3	Gevolgen van de wijzigingen van berekening	50
3.3	Aanpassingen parametrisatie glastuinbouw	51
3.4	Aanpassing MetaSWAP-database en wijziging berekening rond storende lagen	52
3.4.1	Overzicht beschrijving aanpassing	52
3.4.2	Gevolgen van de wijzigingen	55
3.5	Introductie van vanggewas	57

3.6	Activeren van de berekening van zuurstofstress	58
3.7	Overige wijzigingen in MetaSWAP parameters	62
3.8	Effecten van de MetaSWAP aanpassingen in vergelijking tot LHM 4.2	66
4	Aanpassingen in het oppervlaktewatersysteem	69
4.1	Inleiding	69
4.2	Actualisatie van verdringingsreeksen in MOZART en DM	69
4.3	Aanvullende wijzigingen in MOZART	74
4.3.1	Wijziging in de LSW-schematisatie in Zeeland	74
4.4	Aanvullende wijzigingen in DM	76
4.4.1	Aanpassingen in het hoofdwatersysteem	76
4.4.2	Hoge Zandgronden Oost	77
4.4.3	Hoge Zandgronden Zuid	78
4.4.4	Zuid-Westelijke Delta	78
4.4.5	Regio Noord	78
4.4.6	Regio West	79
4.4.7	Regio Rivierengebied	81
4.5	Effecten van de wijzigingen in DM	81
5	Onderhoud software	84
5.1	Inleiding	84
5.2	Wijzigingen in MODFLOW	84
5.3	Wijzigingen in MetaSWAP	85
5.4	Wijziging in de voor- en nabewerkingsprogrammatuur	86
5.4.1	Inzet van nieuwe topsysteemscripts	86
5.4.2	Grid2metaswap	86
5.4.3	Wijziging in de aansturingsfile Setup_LHM	86
5.4.4	LHM Invoer Controle Tool	87
6	Resultaten LHM 4.3	89
6.1	Inleiding	89
6.2	Resultaten grondwater	89
6.3	Resultaten bodem-plant-atmosfeer systeem	91
6.3.1	Verdamping	91
6.3.2	Berekening	92
6.3.3	Droogte- en natschade	93
6.4	Resultaten oppervlaktewater	97
6.4.1	Watervraag	97
6.4.2	Debieten over het netwerk	99
6.5	Toetsing	101
7	Conclusies en aanbevelingen	104
7.1	Conclusies	104
7.2	Aanbevelingen	105

8	Referenties	107
A	Wijziging MetaSWAP t.b.v. maatregelen DPZW	110
B	Wijziging prioriteiten van de verdringingsreeks	115
C	Resultaten testberekeningen aanpassingen DM	118
D	Kalibratieresultaten	128
E	Toegepaste modelparameters in MetaSWAP	143

1 Inleiding

1.1 Aanleiding voor release LHM 4.3

Jaarlijks wordt een nieuwe release van het LHM opgeleverd, waarin nieuwe inzichten en data worden meegenomen. LHM 4.1 en LHM 4.2 zijn uitgebreid gevalideerd (HKV et al, 2021, Deltares, 2022) en besproken in regionale sessie voor DP Zoetwater. Daaruit is naar voren gekomen dat het gewenst is het model te verbeteren en aanvullende functionaliteiten op te nemen voor maatregelen voor het Deltaprogramma. Voor waterkwaliteitsberekeningen is aanbevolen niet meer gebruik te maken van LHM 3.5, maar over te stappen op de meest recente versie van LHM. Daarvoor is in 2022 en 2023 gewerkt aan het verwerken van verbeterpunten in een nieuwe release LHM 4.3.

De belangrijkste aanbevelingen voor LHM die volgen uit versies 4.2 en 4.1 zijn;

- Oppakken van tekortkomingen in het oppervlaktewater van LHM. Hiervoor is in 2023 een ontwikkeling voorzien die naar verwachting eind 2024 zal resulteren in LHM 5.
- Herzien van de parametrisering van de ondiepe ondergrond. Ook dit is een grotere ontwikkeling die zal leiden tot aanzienlijke veranderingen in het landelijk model. Binnen het NHI zijn hiervoor voorbereidende werkzaamheden uitgevoerd, die in latere versies van LHM kunnen worden toegepast.
- Verbeteren van de in LHM 4.2 toegepaste kalibratiemethode, onder meer door:
 - nadere regionale analyse van de resultaten van de kalibratie, het verder optimaliseren van de zoneringen en overstappen naar bodemtypen i.p.v. hydrotypen;
 - nadere definitie van de te hanteren bandbreedtes van de parameters, met name van de parameters die tijdens de kalibratie sterk zijn aangepast;
 - verkennen van andere keuzes ten aanzien van weegfactoren;
 - gebruik maken van betere meetsets, onder meer door het nauwgezet screenen van peilbuizen;
 - ontwikkelen van een procedure om aanpassingen uit de kalibratie van MODFLOW (specifiek de grondwateraanvulling) te verwerken in MetaSWAP, al dan niet in samenhang met aanpassing van de database van MetaSWAP;
 - onderzoeken van verdere verbetermogelijkheden van de korte-termijn dynamiek (het recessieverloop tijdens droogte in orde van dagen-weken) in MetaSWAP.
- Nadere analyse en verbetering van de berekening.
- Verbetering van de doorstroomde dikte met het oog op waterkwaliteitsberekeningen en berekeningen in Transol.
- Verwerken van nieuwe informatie over ontwateringsdiepte.
- Uitbreiding van de functionaliteiten voor maatregelen voor DP Zoetwater. In het bijzonder gaat het hier om het op meer reproduceerbare wijze kunnen afleiden van modelschematiseringen voor toepassing van maatregelen.

Na oplevering van LHM 4.2 is geconstateerd dat de uitvoer weliswaar uitgebreid is beoordeeld, maar dat de invoer voor de ondergrondmodellering als gevolg van de kalibratie niet-plausibele waarden vertoonde. Daarom, en aansluitend op eerdere aanbevelingen is besloten t.b.v. nieuwe versies van LHM te werken aan een geautomatiseerde procedure om de invoer van het grondwatermodel uitgebreid te controleren.

Tot slot is specifiek voor DP Zoetwater in regioessies naar voren gekomen dat de parameters in het landelijk model op onderdelen dienen te worden aangescherpt. Hiervoor is het gewenst in de nieuwe versie diverse wijzigingen in het oppervlaktewater door te voeren.

1.2 Leeswijzer

Achtereenvolgens worden de aanpassingen in de ondergrond, de onverzadigde zone en het oppervlaktewater besproken (resp. in hoofdstuk 2, 3 en 4). Hoofdstuk 5 gaat in op de aanpassingen in de software. In hoofdstuk 6 komen de verschillende wijzigingen samen. Hoofdstuk 7 eindigt met de conclusies en aanbevelingen voor volgende versies van het LHM.

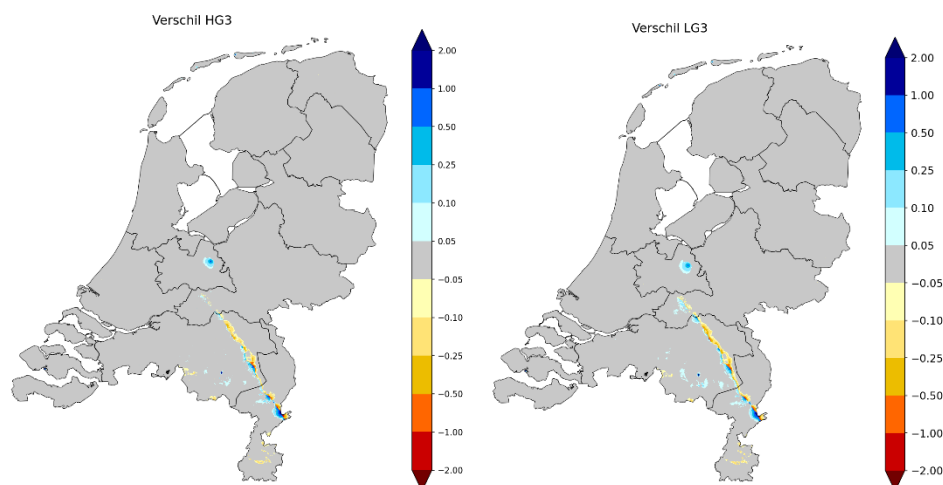
2 Aanpassingen in het grondwatermodel

2.1 Invoerparameters voor de ondergrond

2.1.1 Aanpassing breuken

Bij de uitgebreide validatie van de invoer van LHM 4.2 is geconstateerd dat breuken niet goed zijn geschematiseerd in recente versies van het LHM. Vanaf het gebruik van de software release iMOD 5.0 is een wijziging doorgevoerd in de rekencode iMODFLOW, waar bij de toepassing van LHM tot op heden onvoldoende rekening mee is gehouden. In de praktijk betekent dit dat vanaf LHM 4.0 de invoer voor de breukenmodule (HFB) in het landelijk model volledig “dicht” stond, terwijl deze breuken in de praktijk (enigszins) doorlatend moesten zijn, waarbij een hoge weerstand was beoogd. Deze fout is hersteld in LHM 4.3.

Het effect van het opheffen van deze fout op de freatische grondwaterstanden (HG3 en LG3) wordt getoond in Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Effect op de HG3 (links) en LG3 (rechts) van 2003 van het herstel van de breukenparametrisatie.

2.1.1.1 Nieuwe onttrekkingsgegevens uit het NHI

Binnen het NHI zijn in het kader van het Grondwater Data en Tooling project vergunningsplichtige drink- en industriewateronttrekkingen geïnventariseerd bij drinkwaterbedrijven, provincies en waterschappen (RHDHV & SWECO, 2023 in prep). Deze gegevens zijn ook recent geactualiseerd in de NHI Grondwater Onttrekkingen Database (GWO). De onttrekkingen zijn voor die tijd (in het voorjaar van 2023) overgedragen aan het LHM-project voor toepassing in de nieuwe versie van LHM. In de aangeleverde data zijn onder meer de locaties, de boven- en onderkant van de filters en de debieten (m³ per dag, per maand, per jaar) opgenomen.

RHDHV heeft een tool (HydroMonitorIPFconvert.exe) ontwikkeld om de gegevens om te werken naar modelinvoer (IPF bestanden voor de locaties i.c.m. zogenaamde “associated text files” voor de tijdsafhankelijke debieten). Deze tool is ook ingezet voor het LHM en de uitvoer van de tool is nagenoeg onveranderd opgenomen in het LHM. Wel zijn in aanvulling op de tool alle locaties van een bepaalde bronhouder samengevoegd tot één IPF-invoerbestand (de tool zelf resulteert in een IPF bestand per puttenveld). Verder is een mediaan onttrekkingsdebiet per filter berekend voor gebruik in stationaire varianten van het

LHM. De tool kent zelf niet de onttrekkingsfilters aan modellagen toe; deze toekenning wordt (zoals voorheen) gedaan door de voor het LHM gebruikte versie van iMODFLOW.

Tabel 2-1 geeft een overzicht van de bronhouders die (tijdig) data aangeleverd hebben aan het NHI en waarvan de informatie in LHM 4.3 meegenomen is.

Tabel 2-1 Bronhouders waarvan data m.b.t. grondwateronttrekkingen beschikbaar waren t.b.v. LHM 4.3.

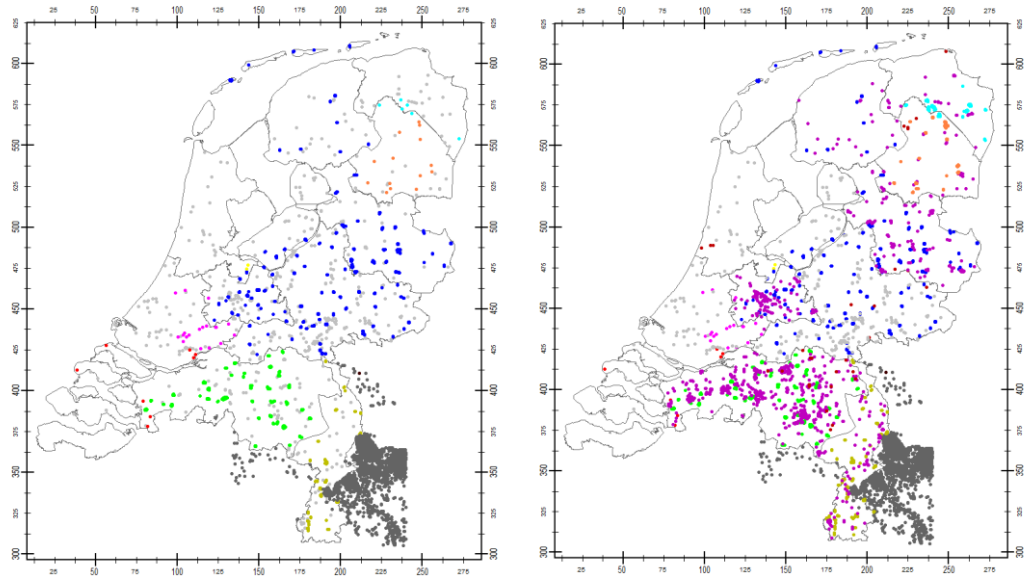
Provincies	Drinkwaterbedrijven	Waterschappen
Noord-Brabant	Brabant Water	Aa en Maas
Limburg	WML	Noorderzijlvest
Utrecht	WMD	Rijn en IJssel
Drenthe	WBG	
Friesland	Vitens	
Groningen	Dunea	
Overijssel		

In LHM 4.2 waren reeds de eerder beschikbare gedetailleerde dynamische onttrekkingsgegevens opgenomen van Vitens, Brabant Water en WML zoals die destijds al in HydroMonitor format t.b.v. de GWO-database beschikbaar waren. Deze data zijn in LHM 4.3 geheel vervangen door de nieuwe NHI data. De data van de overige drinkwaterbedrijven uit Tabel 2-1 zijn nieuw t.o.v. LHM 4.2; LHM 4.2 bevatte voor de betreffende beheergebieden alleen stationaire debieten. De nieuwe data voor deze drinkwaterbedrijven zijn alle opgenomen in LHM 4.3, met uitzondering van Dunea. De onttrekkingen van Dunea zijn mede op aanraden van RHDHV niet opgenomen in de modelschematisering, omdat ongeveer evenveel onttrokken wordt als geïnfiltrerd. Met de relatief grove schematisering van het LHM is het weinig zinvol de wisselwerking tussen infiltratie en onttrekking expliciet in het model op te nemen.

LHM 4.3 onderscheidt na opname van de nieuwe onttrekkingen en na herorganisatie van de modelinvoer, de volgende onttrekkingen van grondwater:

1. NHI
 - Dit betreft onttrekkingen die nu beschikbaar zijn in de GWO, en recent zijn vernieuwd t.o.v. LHM 4.2, zie Tabel 2-1 (m.u.v. Dunea).
2. Non-NHI
 - onttrekkingen in Nederland die niet behoren tot de NHI-set en zijn overgenomen uit LHM 4.2. Dit betreft drinkwateronttrekkingen van Evides, Oasen, PWN en overige vergunningsplichtige onttrekkingen van provincies die niet (tijdig) hebben aangeleverd aan het NHI.
3. Buitenland
 - onttrekkingen in België en Duitsland.
4. Modelranden
 - onttrekkingen die zijn ingebracht om een fluxrandvoorwaarden te simuleren op de landsgrens.

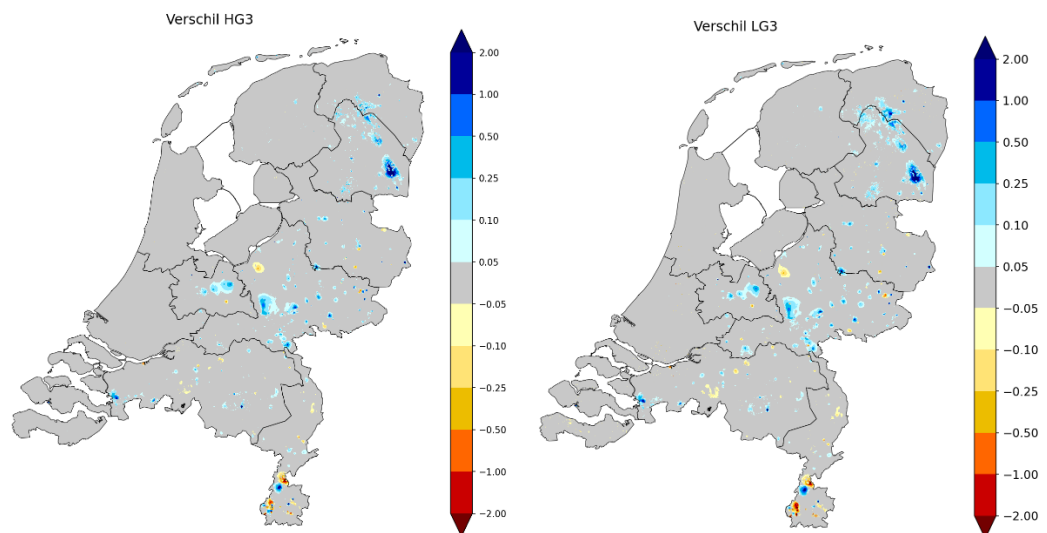
Figuur 2-2 geeft de verdeling van de verschillende categorieën onttrekkingen over Nederland weer voor LHM 4.2 en LHM 4.3. Figuur 2-3 toont het effect van de nieuwe set onttrekkingen op de HG3 en LG3, berekend voor het jaar 2014. Verschillen zijn nagelopen; deze worden simpelweg verklaard vanuit wijzigingen in onttrekkingslocaties en -debieten.



Figuur 2-2 Links: Onttrekkingen in LHM 4.2, Rechts: Onttrekkingen in LHM 4.3.

Legenda links: mosterdgeel: WML, groen: Brabant Water, rood: Evides, lichtpaars: Oasen, donkerblauw: Vitens, geel: PWN, lichtblauw: Waterbedrijf Groningen, oranje: WMD, grijs: overige vergunningsplichtige onttrekkingen, zwart: buitenlandse onttrekkingen.

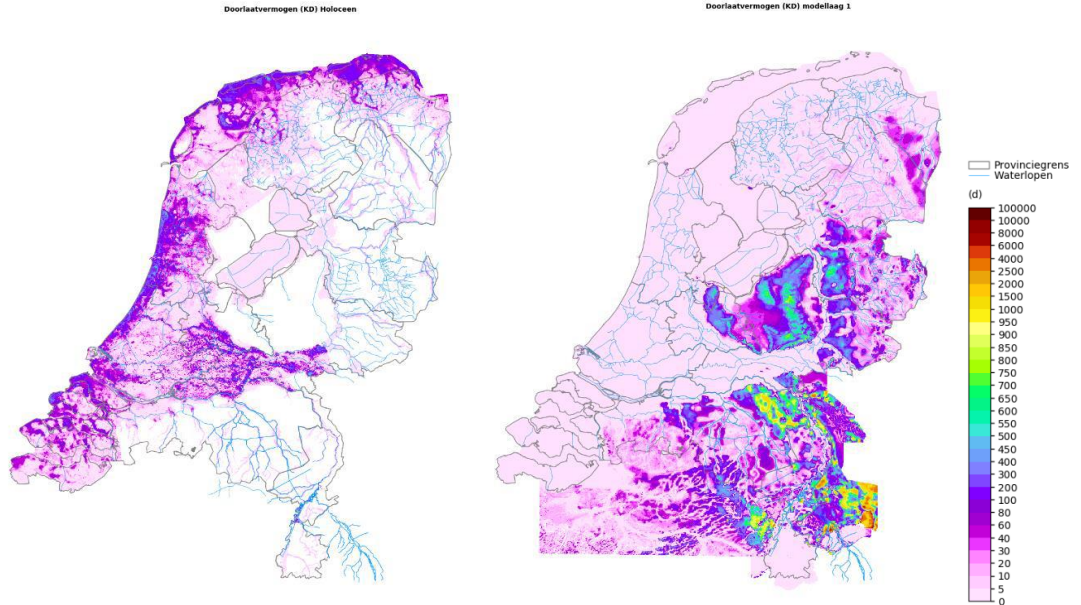
Legenda rechts: mosterdgeel: WML, groen: Brabant Water, rood: Evides, paars: Oasen, donkerblauw: Vitens, geel: PWN, lichtblauw: Waterbedrijf Groningen, oranje: WMD, donkerpaars: bronhouder provincie, grijs: overige vergunningsplichtige onttrekkingen, zwart: buitenlandse onttrekkingen.



Figuur 2-3 Effect van de update van de onttrekkingen in LHM 4.3 t.o.v. LHM 4.2, uitgedrukt als het verschil in HG3 (links) en LG3 (rechts) voor het jaar 2014. Blauw geeft aan dat LHM 4.3 een nattere situatie berekent; geel een drogere situatie.

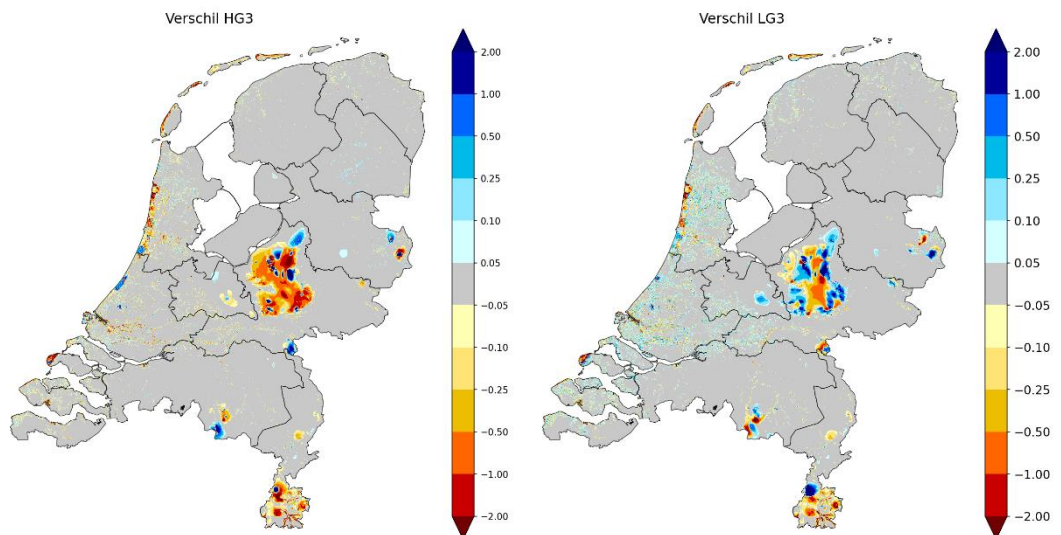
2.1.2 Fout in transmissiviteiten Holoceen

Bij controle van de modelinvoer is een fout geconstateerd in het doorvoeren van afgeleide transmissiviteiten voor de Holoceen deklaag naar de modelschematisatie in LHM 4.0, waarbij een deel van de informatie uit GeoTOP niet was meegenomen. In Figuur 2-4 (links) is de transmissiviteit van de Holoceen deklaag afgebeeld zoals die op basis van onder andere GeoTOP was afgeleid ten behoeve van LHM 4.0 (Hunink et al., 2020). De rechterfiguur toont de kD van de eerste modellaag van LHM 4.0. Hierin is de transmissiviteit van de deklaag (dus uit de linkerfiguur) niet opgenomen, terwijl dat wel had moeten gebeuren.



Figuur 2-4 Links: afgeleide kD (m²/d) voor het Holoceen t.b.v. LHM 4.0 (Bron: Hunink et al., 2020). Rechts: kD (m²/d) van modellaag 1 LHM 4.0 (Bron: Hunink et al., 2020).

De effecten van het herstel hiervan zijn in beeld gebracht met een dynamische verschilrun voor 2003, zie Figuur 2-5. Overwegend zijn de effecten bescheiden. De grotere effecten op de Veluwe zijn te verklaren door toegenomen doorlatendheid van de kwelzones van de hoger gelegen gebieden waardoor deze gebieden gemakkelijker ontwateren.



Figuur 2-5 Verschil in HG3 en LG3 als gevolg van het corrigeren van de transmissiviteit van het Holoceen, berekend voor het jaar 2003. Blauwe kleuren geven een vernatting weer; rode kleuren een verdroging.

De transmissiviteit van de Holocene deklaag is in het LHM verdisconteerd in de KD van de eerste modellaag (KD1). Deze laag heeft in de laagindeling van de quasi-3D schematisering van het LHM in het Holoceen geen dikte, omdat de deklaag ook als scheidende laag wordt gezien (met een weerstand C1). Bij het uitvoeren van stroombaanberekeningen met het LHM dient de gebruiker zich hiervan bewust te zijn; de laagdikte van nul resulteert in oneindige snelheden. Bij stroombaanberekeningen moet deze laag daarom uitgesloten worden, bijvoorbeeld door de stroombanen net onder de laag te laten starten en ook direct te termineren bij het bereiken van deze laag. Daarnaast geldt dat, om de KD-waarden van deklaag terug te kunnen rekenen naar K-waarden, niet met een dikte D gerekend moet worden die verkregen wordt door het verschil te nemen tussen de bovenkant en onderkant van modellaag 1 (want dat verschil is nul), maar tussen de bovenkant van laag 1 en de bovenkant van laag 2.

2.1.3 Vernieuwde deklaagweerstand Flevopolders en Veluweflanken

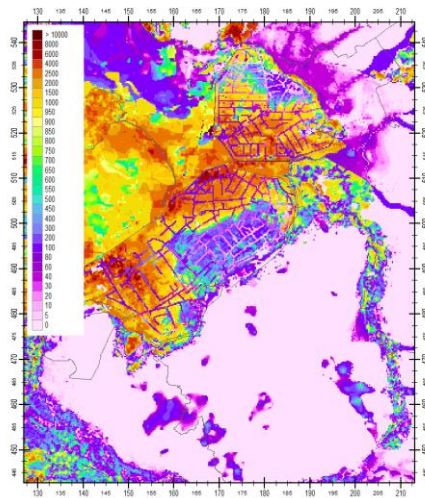
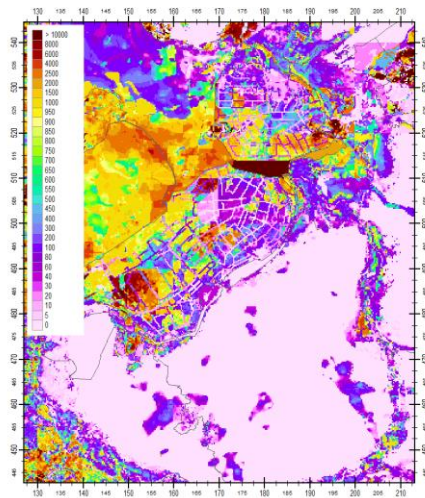
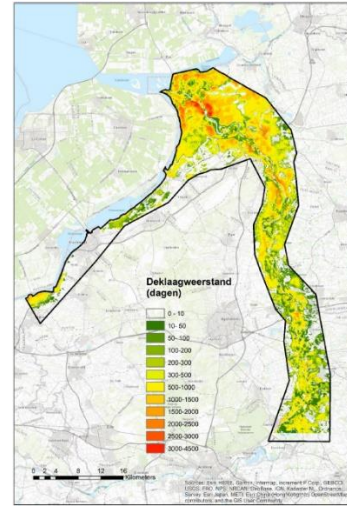
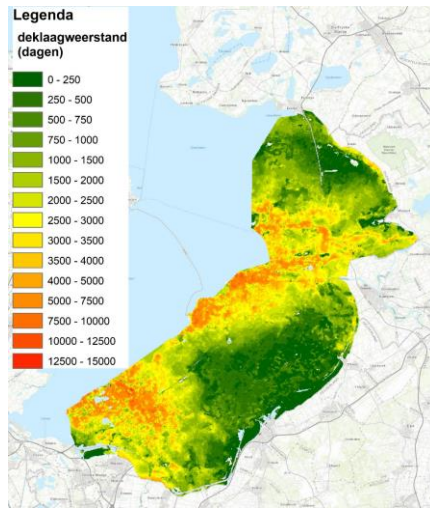
In 2021 en 2022 heeft TNO-GDN ten behoeve van het AZURE-model een nieuwe deklaagweerstandkaart gepubliceerd voor de Flevopolders en de randmeren (Gunnink, 2021) alsmede voor de Veluweflanken (Gunnink en Heerema, 2022). Deze nieuwe deklaagweerstandskarten zijn ingebracht in LHM 4.3. Figuur 2-6 (bovenste deel) toont de nieuwe informatie en de oude deklaagweerstand (links onder) en nieuwe deklaagweerstand (rechts onder) voor het geactualiseerde gebied.

De verschillen tussen beide versies zijn groot, met vooral in het zuiden, noorden en westen van Flevoland hogere weerstanden en in het oosten van Flevoland lagere weerstanden. Te zien is verder dat in de nieuwe schematisering meer deklaagweerstand aanwezig is onder de randmeren.

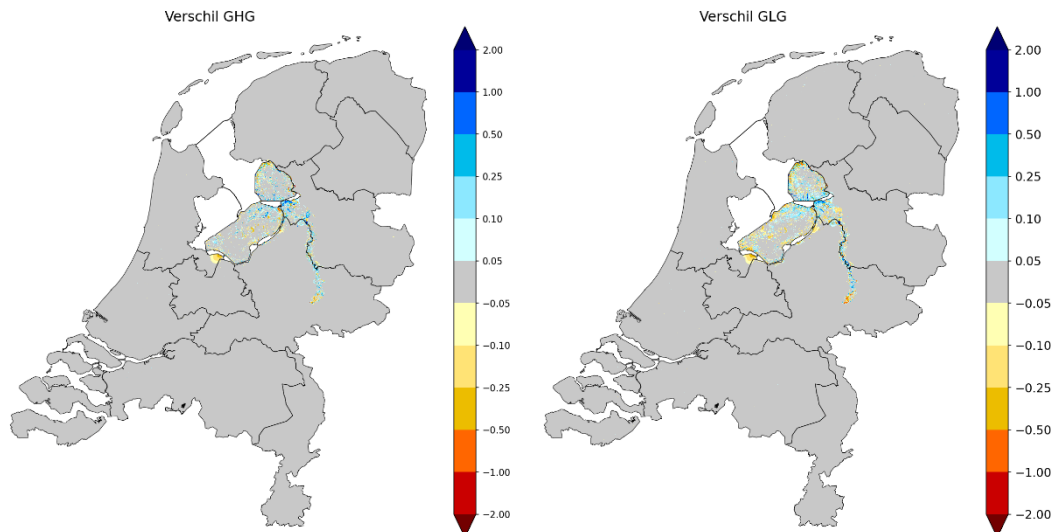
In de oude schematisering van de deklaagweerstand van de Flevopolders (welke nog afkomstig is van het STONE model) is een correctie toegepast als gevolg van gedeeltelijke of gehele doorsnijding door waterlopen. Een dergelijke correctie is ook met de nieuwe deklaagweerstand kaart nodig omdat anders de watergangen een te hoge drainageweerstand toegekend krijgen.

Idealiter zouden de doorsnijdende waterlopen aan twee modellen toegekend worden; zowel aan de deklaag als aan het eerste watervoerend pakket. Op beide delen zou dan de drainageformule van De Lange toegepast kunnen worden om de bijbehorende drainageweerstanden te berekenen. Een opsplitsing van het regionale systeem naar meerdere modellen zou resulteren in een vergroting van het aantal waterloopsystemen in het model, wat consequenties heeft voor de modelkoppelingen met MetaSWAP en MOZART. Het doorvoeren van deze nieuwe structuur bleek niet haalbaar binnen de projectmatige randvoorwaarden voor het ontwikkelen van LHM 4.3. Daarom is ervoor gekozen om de locatie en weerstanden bij de insnijding (volgens de oude weerstandskaat) te handhaven t.o.v. LHM 4.2, en toe te passen op de nieuwe deklaaggegevens. Verdere verbeteringen, consistent met de nieuwe deklaagweerstand, wordt daarmee uitgesteld tot de ontwikkeling van LHM 5.

Figuur 2-7 toont de effecten van de gewijzigde deklaagweerstand op de GXG. De effecten zijn vrij beperkt, met overwegend wat nattere condities bij toegenomen deklaagweerstand (als gevolg van slechtere ontwatering) en wat drogere condities bij afgenomen deklaagweerstand.



Figuur 2-6 Boven links: het modelgebied van de nieuwe modellering van de Holocene deklaagweerstand in de Flevopolders en Veluwevelden. Bron: Gunnink (2021). Boven rechts: het modelgebied van de nieuwe modellering van de Holocene deklaagweerstand op de Veluwevelden. Bron: Gunnink en Heerema (2022). Onder links: de (gekalibreerde) deklaagweerstand van LHM 4.2. Onder rechts: de deklaagweerstand volgens de nieuwe schematisering in LHM 4.3 (ongekalibreerd) inclusief verwerking van de insnijding van waterlopen.



Figuur 2-7 Effect van de vernieuwde deklaagweerstand in de Flevopolder en op de Veluwevelden op de GHG (links) en de GLG (rechts), berekend over 2011-2012.

2.2 Regionale watersystemen en de ontwatering

2.2.1 Overzicht gebruik van vernieuwde topsysteem routine en informatiebronnen

In het LHM wordt een in Python geautomatiseerde routine gebruikt voor de voorbereiding van de invoer van het bovenste deel van het hydrologische systeem voor MODFLOW (Schoonderwoerd et al, 2023). Door toepassing van een geactualiseerd script kunnen ook maatregelen in het LHM op meer reproduceerbare wijze worden geïmplementeerd, wat belangrijk is voor toepassing in DP Zoetwater. Voor aanvullende informatie over het nieuwe topsysteemsript wordt verwezen naar Hoofdstuk 5.

In het topsysteemsript wordt de invoer voor LHM voor het bovenste deel van het hydrologische systeem gerealiseerd. In het bijzonder gaat het om het parametriseren van de karakteristieken van de ontwateringssystemen, met kenmerken zoals peilen en weerstanden. Het script was al eerder ontwikkeld (Schoonderwoerd et al, 2021), maar nog niet toegepast in eerdere versies van het LHM, omdat het parallel aan LHM 4.1 was ontwikkeld en er bij de ontwikkeling van LHM 4.2 geen tijd voor was om dit mee te nemen. Na toepassing op de ontwikkelversie LHM 4.3 en bestudering van de uitvoer van het script is besloten ook een aantal beslisregels te herzien en bovendien gebruik te maken van enkele actuelere invoerbestanden. Er is met het in gebruik nemen van het nieuwe topsysteemsript tevens een fout opgelost in de doorwerking van de gekozen (MODFLOW-) peilen naar de peilen in MOZART. De Mozart peilen bleken niet overal volledig consistent meer met de peilen in MOZART.

In de paragrafen 2.2.2 t/m 2.2.4 zijn de belangrijkste wijzigingen in de invoer van LHM 4.3 beschreven t.o.v. LHM 4.2. In paragraaf 2.2.2 wordt eerst ingegaan op het gebruik van herziene kennistabellen, die worden toegepast in het script als geen andere informatiebronnen beschikbaar zijn. In paragraaf 2.2.3 wordt ingegaan op herziening van de belangrijkste beslisregels voor het gebruik van de verschillende beschikbare informatiebronnen voor het regionale systeem en de drainagesystemen. De effecten van de wijziging op de invoer zijn beschreven in paragraaf 2.2.4. Daaruit komt naar voren dat de peilen en waterdieptes van het primaire, secundaire en tertiaire ontwateringssystemen aanzienlijk zijn aangepast ten opzichte van LHM 4.2. De conductances en infiltratiefactoren zijn voor deze systemen hetzelfde gebleven. De gevolgen van de wijzigingen van het topsysteem zijn beschreven in paragraaf 2.2.5.

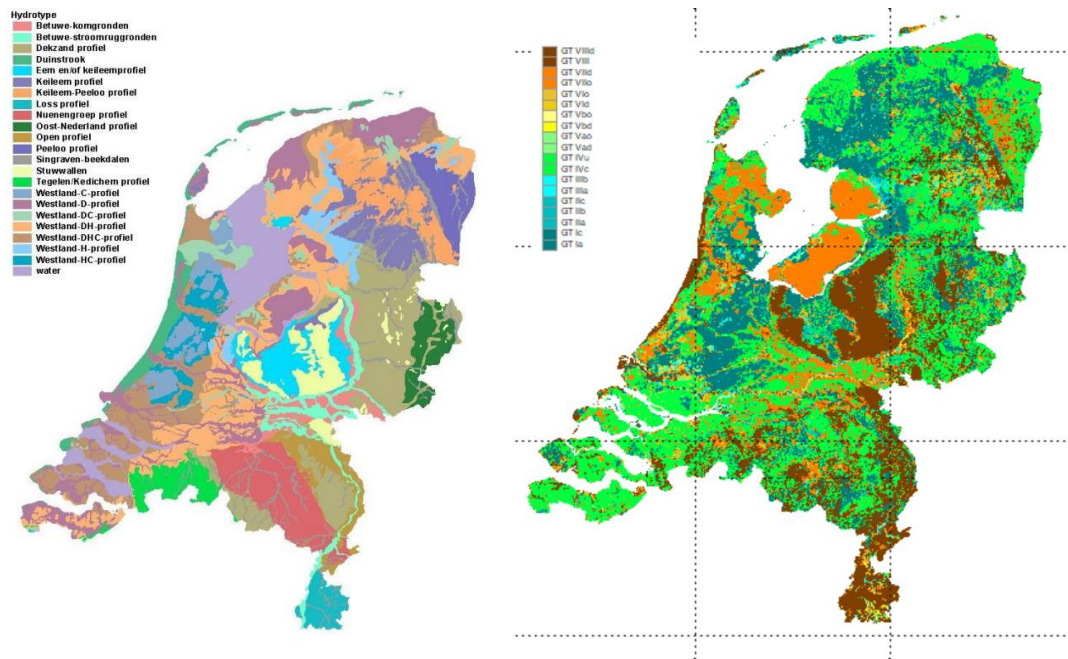
2.2.2 Herziene kennistabel voor de ontwateringsdiepten

Waar geen andere informatie over de waterlopen beschikbaar is, is voor de parametrisering van de waterlopen in het LHM tot nu toe gebruik gemaakt van de kennistabellen van Massop et al. (2006). In deze tabellen wordt onderscheid gemaakt naar primaire, secundaire en tertiaire watergangen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de indeling in hydrotypen (Massop et al, 2000) en slootbreedten op basis van Top10-bestanden.

Op basis van analyse van de resultaten van LHM 4.2 voor de waterkwaliteit (Deltares, 2022), is beoordeeld dat de afvoer van de ontwateringssystemen niet overal representatief is, en dat aanscherping van de modelinvoer nodig is voor waterkwaliteitsberekeningen. Hiervoor zijn de tabellen beoordeeld en met de huidige inzichten aangescherpt (Van der Gaast, 2022). Dit heeft geleid tot nieuwe tabellen, opgeleverd met karakteristieken van de watergangen zoals talud, breedte, bodemdiepte en drooglegging. Omdat deze tabellen de nieuwe inzichten meenemen, gebruikmakend van de informatie van Massop et al. (2006), is besloten voor LHM 4.3 om deze tabellen in alle ontwateringssystemen toe te passen en het topsysteemsript hiervoor aan te passen.

Een belangrijke verschil in de nieuwe tabellen is het onderscheid van de watergangen; er wordt niet meer alleen uitgegaan van een onderverdeling van primaire, secundaire en tertiaire systemen, maar eerst onderscheid gemaakt in een afwateringssysteem en een ontwateringssysteem. Het primaire systeem en een deel van het secundaire systeem behoren tot de afwatering. De rest van het secundaire systeem en het tertiaire systeem behoren tot de ontwatering. Het onderscheid wordt gemaakt op basis van de indeling in hydrotypen (Massop et al, 2000, zie figuur 2.8) en slootbreedten (op basis van actuele Top10-bestanden).

Nieuwe karakteristieken zijn geproduceerd (Van der Gaast, 2022) door gebruik te maken van kenmerken voor talud en drooglegging, die afhankelijk zijn van respectievelijk bodemtype en de grondwatertrappenkaart. Voor de laatste is in LHM 4.3 nu ook gebruik gemaakt van de actuele geproduceerde kaart voor de Model Grondwaterspiegeldiepte (WDM), die recent is gepubliceerd in de BRO (zie Figuur 2-8). Voor het LHM is de onderverdeling van primair, secundair en tertiair wel behouden en zijn de kenmerken van ontwatering en afwatering toegekend. De waterdiepten konden niet direct worden afgeleid van de vernieuwde kennistabellen, hiervoor zijn extra beslisregels toegepast. De effectieve wijziging in modelinvoer voor het LHM door het gebruik van de aangepaste karakteristieken wordt in samenhang met de andere aanpassingen als gevolg van het toepassen van het nieuwe topsysteemsript beschouwd in de volgende paragraaf.



Figuur 2-8 Hydrotypekaart op basis van Massop et al. (2000) en GT kaart op basis van WDM data als basis voor indeling modelwaardes volgens Massop et al. (2006) en Van der Gaast (2022).

2.2.3

Toelichting wijziging beslisregels bij het gebruik van verschillende informatiebronnen

De regels om informatie voor peilen toe te kennen aan het LHM zijn herzien. Dit is gedaan door opnieuw te kijken naar de bronbestanden die worden gebruikt in het topsysteemsript en de effecten van verschillende wijze van toepassing van de bronbestanden te analyseren.

Uiteindelijk zijn 3 bronnen naar voren gekomen die als meest betrouwbaar kunnen worden aangemerkt. Het gaat om:

1. Peilinformatie: peilinformatie van de waterschappen (in m+NAP) (met name beschikbaar in peilgestuurd Nederland);
2. Regiopeil: de peildata van de regionale modellen (in m+NAP) (met name beschikbaar in vrij afwaterend Nederland);
3. AHN - Drooglegging: de drooglegging zoals afgeleid door Van der Gaast (2022). De data zijn met behulp van het maaiveld omgezet naar peilen (in m+NAP).

De eerste twee bronnen zijn al als primaire bron aanwezig in vorige versies van het LHM; de informatie dateert nog van 2017. Eerste genoemde bron betreft informatie van shapefiles die zijn aangeleverd door de waterschappen; de regiopeilen zijn afkomstig van invoer regionale modeltoepassingen (zie veranderingsrapportage LHM 3.3). De drooglegging (verschil tussen maaiveld en ontwateringspeil) is gebaseerd op de nieuwe data van Van der Gaast (2022).

De regels voor het afleiden van peilen zijn als volgt:

- Primair: overal waar peilinformatie (bron 1) aanwezig is, is die bron toegekend; waar die informatie nog niet beschikbaar was is, indien aanwezig het Regiopeil (bron 2) toegekend. Watergangen die dan nog geen peil hebben, krijgen vervolgens de AHN-drooglegging (bron 3) toegewezen. Daarbij is de drooglegging voor het afwateringssysteem gebruikt.
- Secundair: dezelfde prioritering als voor het primaire systeem, maar afhankelijk van het hydrotype is de drooglegging voor het afwateringssysteem of het ontwateringssysteem toegepast.
- Tertiair: Voor het tertiaire systeem worden de kenmerken van de ontwatering (Van der Gaast, 2022) als betrouwbaarder gezien dan het regiopeil. Daarom is de waarde van het peil gelijkgesteld aan het maximum van de peilinformatie en de AHN-drooglegging. Ook hier is de drooglegging voor het ontwateringssysteem gebruikt.

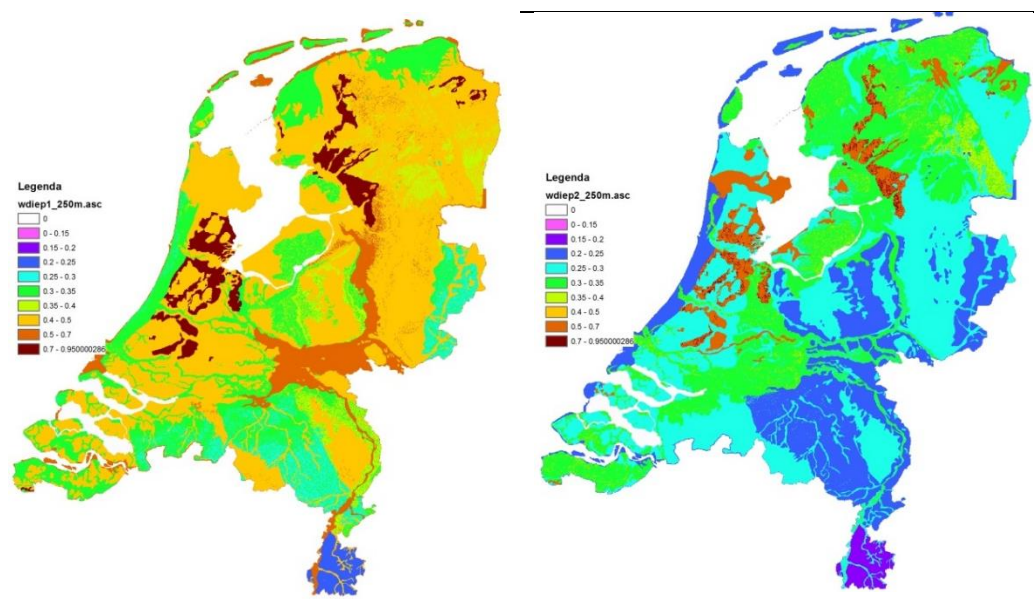
Op het resultaat hiervan zijn vervolgens in het topsysteemschrift de volgende twee correctieregels toegepast voor alle systemen:

- Daar waar het peil volgens bovengenoemde beslisregels boven maaiveld uitkwam, is het peil gecorrigeerd naar 50 cm onder maaiveld.
- Waar natte natuur aanwezig is, is een minimaal peil van 20 cm onder maaiveld toegepast (dus: een peil van 20 cm onder maaiveld of hoger).

De beslisregels in het script zijn door de beschreven aanpassingen vereenvoudigd, waardoor er uiteindelijk minder informatiebronnen worden gebruikt. Bovendien is de uitwerking uniformer toepasbaar; er zijn in tegenstelling tot eerdere versies van het topsysteemschrift nu geen verschillen meer in benadering tussen peilgestuurd en vrijafwaterend Nederland. De uitwerking in deze gebieden kan echter wel verschillend zijn, omdat de uitvoer van het script afhankelijk is van de beschikbaarheid van data in de gebieden. Peilinformatie is als gevolg van de inventarisatie in 2017 beschikbaar in peilgestuurd Nederland, terwijl het regiopeil voornamelijk beschikbaar is voor vrijafwaterende gebieden. De drooglegging heeft wel een landelijke dekking en dient zowel in het vrijafwaterend als het peilgestuurd gebied als opvulling waar in de andere bestanden geen informatie beschikbaar is.

Naast de oppervlaktewaterpeilen worden in de scripts ook de bodemhoogten afgeleid. In het topsysteemschrift wordt de bodemhoogte voor het primaire en secundaire systeem afgeleid met de waterdiepte, als verschil tussen het peil en de waterdiepte. Voor het tertiaire systeem is de waterdiepte niet relevant, omdat de bodemhoogte hier gelijk wordt gesteld aan het peil; dit principe is in LHM 4.3 gehandhaafd.

De waterdiepte voor het primaire en secundaire systeem zijn gespecificeerd per hydrotype en beschreven door Massop et al (2006) en te vinden op het dataportaal van NHI. Besloten is om na vaststelling van de oppervlaktewaterpeilen in het topsysteemschrift, deze waterdiepten toe te passen (i.e. direct van het oppervlaktewaterpeil voor de wintersituatie af te trekken), om zodoende de modelinvoer voor de bodemhoogte op eenvoudig herleidbare en eenduidige wijze af te leiden. De gehanteerde waterdiepten voor het primaire en secundaire systeem zijn weergegeven Figuur 2-9.



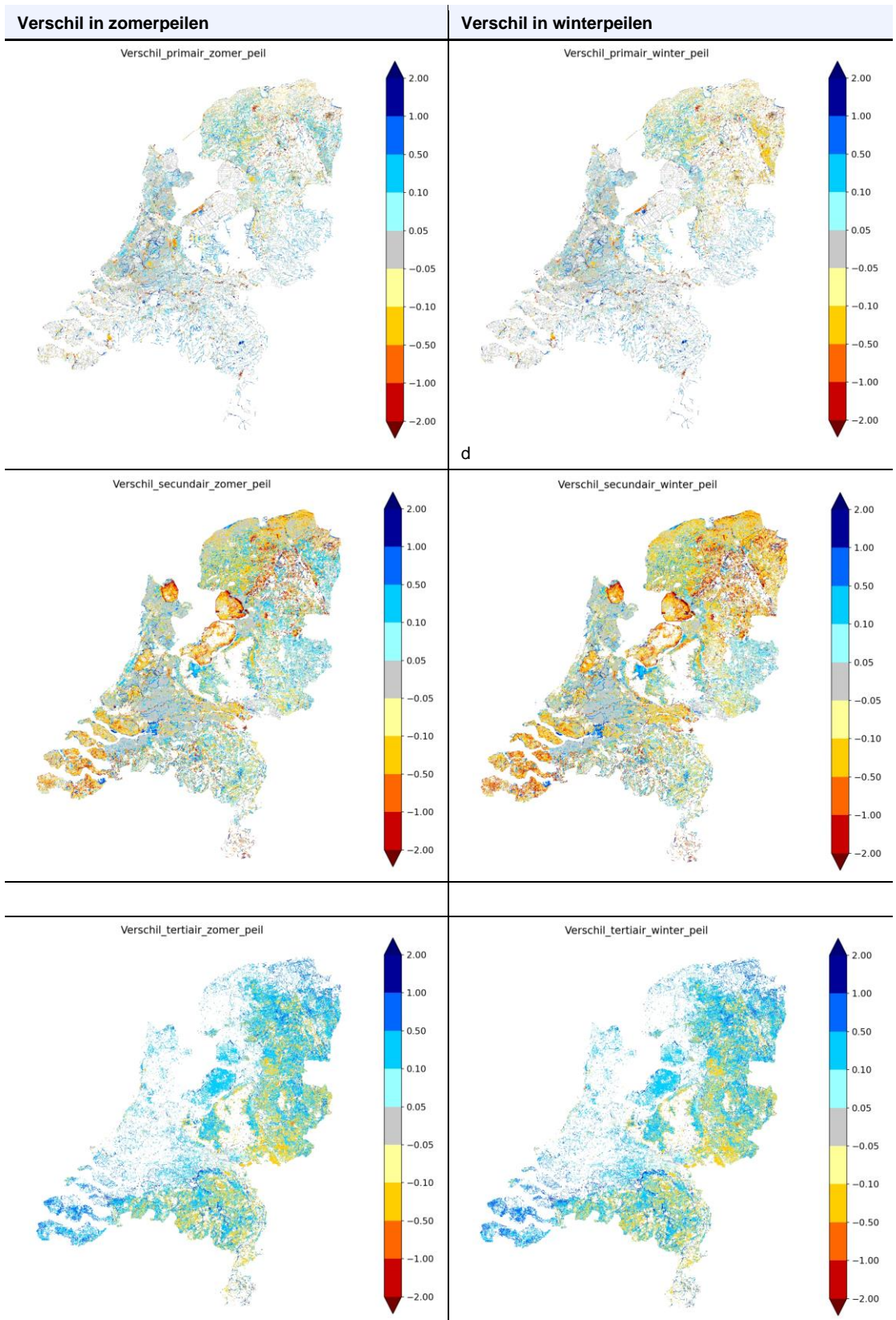
Figuur 2-9 De gehanteerde waterdiepte in LHM 4.3 (weergegeven in m) voor het primair systeem (links) en het secundair systeem (rechts) (bron: Massop et al, 2006).

2.2.4 Effect wijzigingen ontwateringskenmerken op de modelinvoer

2.2.4.1 Verschil in oppervlaktewaterpeilen

Figuur 2-10 laat de verschillen in de invoer voor oppervlaktewaterpeilen zien tussen LHM4.2 en LHM4.3. In zowel de primaire, secundaire als tertiaire watersystemen zijn aanzienlijke verschillen in modelinvoer waarneembaar; waarbij zowel verhoging als verlagingen voorkomen. Voor het primaire systeem zijn de verschillen kleiner dan voor de secundaire en tertiaire systemen, omdat het primaire systeem sterker leunt op gegevens afkomstig van de waterschappen. Met name voor het secundaire watersysteem zijn de verschillen groot. De grootste verschillen zijn vooral goed waarneembaar in Noordoost-Nederland, waar met name de winterpeilen in LHM 4.3 overwegend lager zijn dan in LHM 4.2. Voor het tertiaire systeem zijn er overwegend verhogingen van de peilen waarneembaar. Voor het tertiair wordt opgemerkt dat er in het model praktisch geen onderscheid wordt gemaakt tussen zomer en winterpeilen. Bovendien komt in een groot deel van holoceen Nederland geen tertiair voor en is er dus ook geen verschil waarneembaar.

Uit de grote verschillen in invoer die ontstaan door de aanpassingen, wordt het belang van kennistabellen en beslisregels duidelijk in de landelijke modellering. Ook kan worden geconcludeerd dat de wijze van toepassing veel vrijheidsgraden kent met grote gevolgen. Idealiter wordt in het LHM voor de kenmerken van de ontwatering veel meer gebruik gemaakt van informatie van de waterschappen. De komende jaren is voorzien hierin aanzienlijke stappen in te zetten in het LHM, en bij de opbouw van de schematisering van de regionale wateren veel meer gebruik te maken actuele data van de waterschappen. In het najaar van 2022 zijn voor een volgende versie van het LHM hiervoor acties ondernomen door Rijkswaterstaat en de waterschappen (De Graaff en Bruins, 2023).



Figuur 2-10 Het verschil in waterpeil tussen LHM 4.2 en 4.3 van het primaire, secundaire en tertiaire systeem voor de winter en de zomer. De gele kleuren geven een lager peil aan in LHM 4.3 en de blauwe kleuren geven een hoger peil aan in LHM 4.3.

2.2.4.2 Wijzigingen diepte buisdrainage

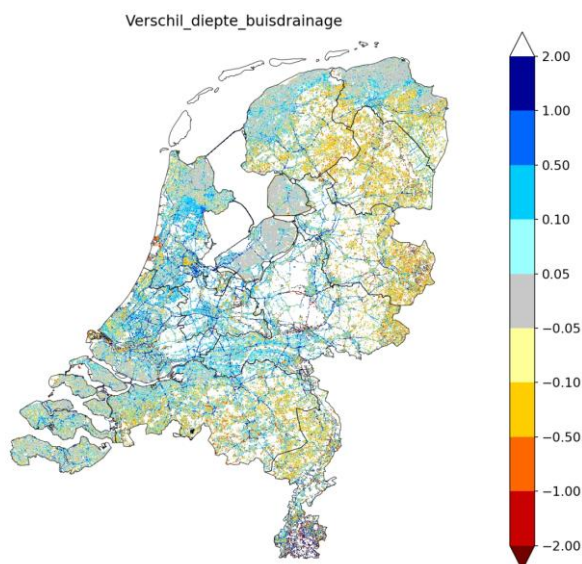
De broninformatie voor het voorkomen van buisdrainage is ongewijzigd ten opzichte van LHM 4.2; dit is dezelfde kaart die WENR eind 2022 heeft opgeleverd.

Voor het afleiden van de drainagediepte gelden de volgende beslisregels:

- Indien de buisdrainagediepte volgens de WENR-kaart hoger ligt dan minimaal 10cm boven het hoogste oppervlaktewaterpeil in de cel (= het hoogste peil over de zomer- en winterpeilen van zowel het primaire als secundaire systeem) dan wordt de buisdrainagediepte volgens de WENR-kaart toegepast.
- Indien de buisdrainagediepte volgens de WENR-kaart lager ligt dan bovengenoemde grens, dan wordt bovengenoemde grens gehanteerd als buisdrainagediepte.

In LHM 4.2 werd een vlakdekkende peilenkaart toegepast om bovenstaande evaluatie uit te voeren op locaties zonder een primair en/of secundair oppervlaktewatersysteem. Er is besloten deze peilenkaart niet meer te gebruiken omdat deze niet meer gereproduceerd kon worden. In LHM 4.3 wordt op locaties zonder primair en/of secundair systeem teruggevallen op de buisdrainagekaart van WENR. Omdat de evaluaties uitgevoerd worden op 25x25 meter, zijn er veel gridcellen waar geen primair of secundair systeem aanwezig is; het gebruik van de buisdrainagekaart van WENR in plaats van het vlakdekkende peilenbestand heeft daarom veel impact op de uiteindelijk buisdrainagediepte in het model.

In Figuur 2-11 is het verschil in invoer van de drainagebasis weergegeven tussen LHM4.2 en 4.3. In de vrijafwaterende delen van Nederland is de buisdrainage dieper komen te liggen (gele delen) en in West-Nederland is de buisdrainage effectief minder diep dan in LHM4.2.

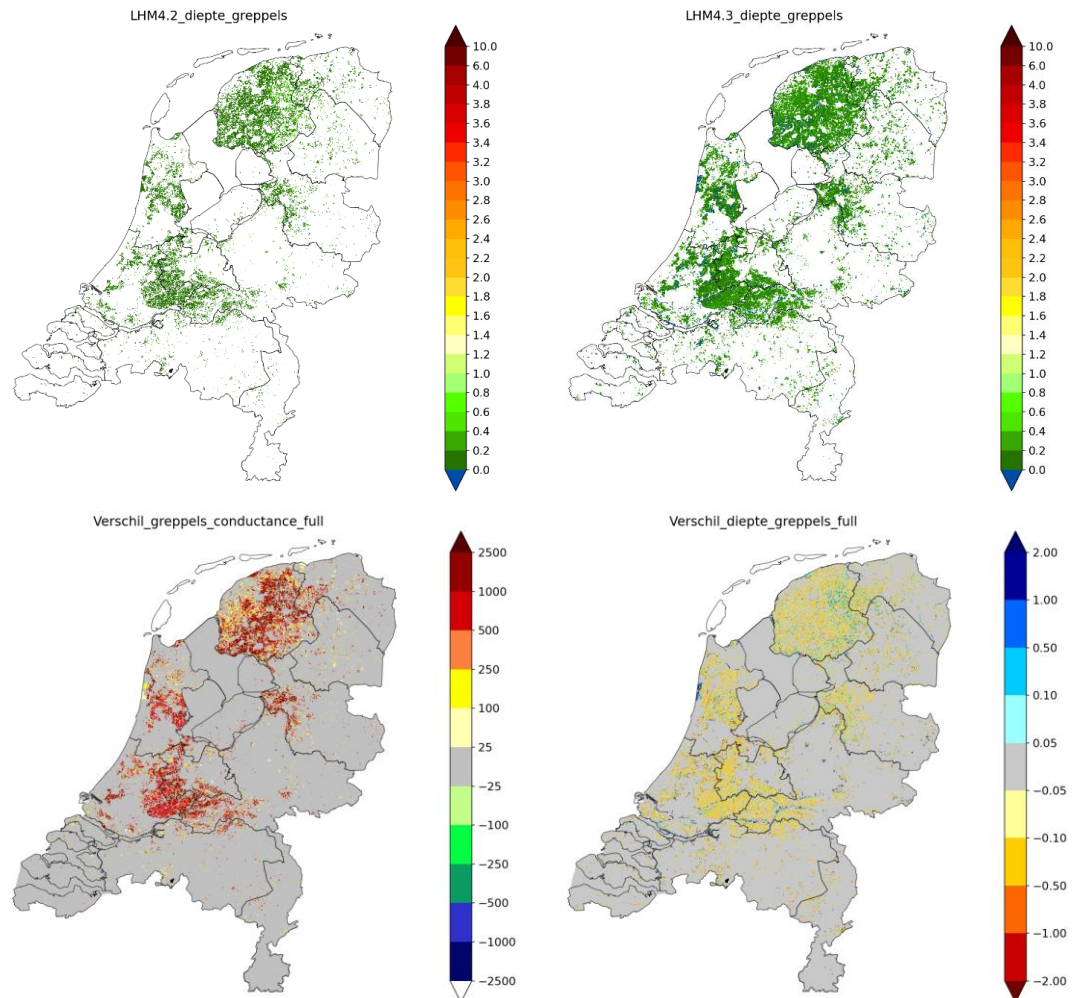


Figuur 2-11 Diepte van buisdrainage LHM 4.3 t.o.v. LHM 4.2. De gele waarden geven dieper gelegen drainage aan en de blauwe waarden geven ondieper gelegen drainage aan.

2.2.4.3 Wijziging van de greppelsystemen

De methode voor het afleiden van greppels is niet gewijzigd, maar het gebied waarvoor greppels worden afgeleid is wel uitgebreid ten opzichte van LHM 4.2. De reden is het gebruik van de achterliggende bronbestanden, te weten de BOFEK 2020-kaart die wordt gebruikt voor het definiëren van veenweidegebieden in Utrecht en Holland en een landelijke maaiveldgreppelkaart voor Nederland. De BOFEK-kaart is aangepast van BOFEK 2012 in LHM4.2 naar BOFEK 2020 in LHM4.3. Dit betreft wijzigingen in de ligging van de veenweidegebieden in Utrecht en Holland. De maaiveldgreppelkaart voor Nederland is in eerdere versies van het LHM aangepast. De precieze aanpassingen zijn niet meer te herleiden en daarom is in het nieuwe topsysteemschrift teruggegaan naar het bronbestand

van de landelijke maaiveldgreppelkaart. Dit zorgt voor een uitbreiding van de greppellocaties. Dit is weergegeven in Figuur 2-12. In LHM4.3 zijn in bijvoorbeeld Friesland meer greppellocaties aanwezig. De verschillen in verschilkaart van de diepte van de greppels wordt alleen veroorzaakt door de uitbreiding van de maaiveldgreppels. Aan de dieptewaarden hebben geen veranderingen plaatsgevonden. Tot slot wordt opgemerkt dat in het nieuwe topsysteemsript de waarde voor de weerstand van greppels is verhoogd van 1 dag naar 30 dagen; deze waarde komt meer overeen met de verwachte weerstand van greppels.



Figuur 2-12 Wijziging van de ligging en diepte van de greppelsystem in LHM 4.3 . Linksboven de ligging van de greppels en de greppeldiepte (m) in LHM 4.2, rechtsboven hetzelfde voor LHM 4.3. Linksonder het verschil in conductance; rechtsonder het verschil in greppeldiepte (m).

2.2.4.4 Wijziging in de surface overland flow

In LHM 4.3 is voor de surface overland flow (SOF) een aanpassing doorgevoerd waardoor er geen SOF meer berekend wordt waar grote plassen aanwezig zijn. De weerstand is hetzelfde gebleven, namelijk 30 dagen.

De diepte van de surface overland flow in het nieuwe topsysteemsript is ongewijzigd; voor peilgestuurd Nederland is een waarde van 0.15 m-mv gehanteerd, en voor vrijafwaterend Nederland op 0.25 m-mv.

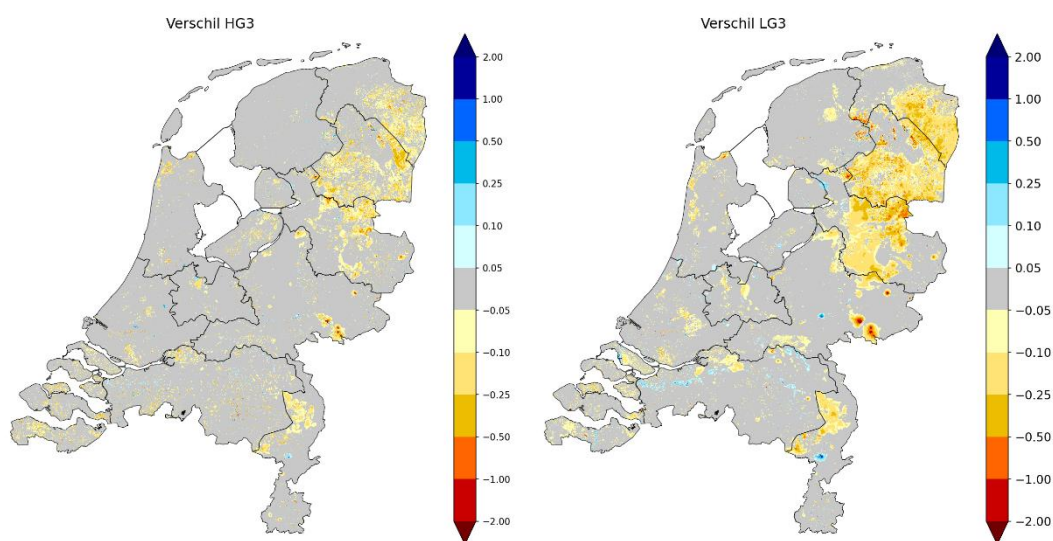
2.2.5 Gevolgen van de wijzigingen in het topsysteem op de modelresultaten

De wijzigingen voor het topsysteem zijn a.d.h.v. testberekeningen voor het jaar 2003 beoordeeld. Daarbij zijn de effecten van de wijzigingen van het topsysteem vergeleken met LHM 4.2. Hierbij zijn wel voor beide berekeningen dezelfde conductances toegepast, t.w. die van LHM 4.3 ongekalibreerd. Dit is gedaan omdat anders door de verschilplaatjes meespeelt dat LHM 4.2 gekalibreerd is, terwijl de uitvoer van het nieuwe topsysteemsript dat niet is, en de interesse juist uitgaat naar het effect van de gewijzigde peilen en bodemhoogtes.

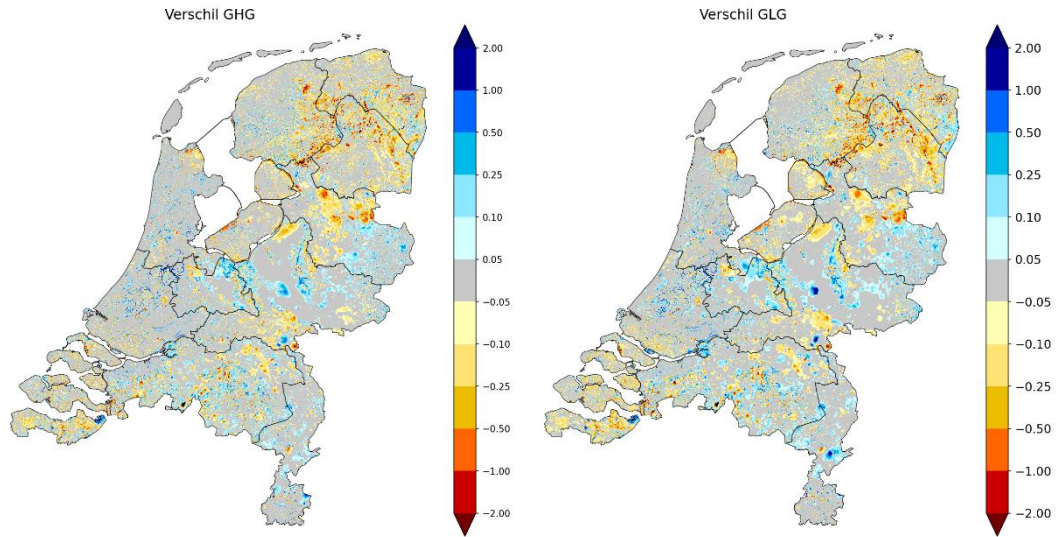
Figuur 2-13 laat zien dat het oplossen van de inconsistenties tussen MOZART- en MODFLOW-peilen resulteert in een verdroging, vooral in Noord-Oost Nederland. Dit heeft te maken met het feit dat hier vooral ook de peilopzet in het zomerhalfjaar in MOZART de grootste afwijkingen vertoonde met de in MODFLOW gehanteerde peilopzet. Dit verschil werkt in de winter ook deels door maar het effect is in het zomerhalfjaar uiteraard het grootst.

Figuur 2-14 toont het gecombineerde effect van de peilwijzigingen in combinatie met de bodemhoogte wijzigingen voor het primaire, secundaire en tertiaire systeem. Het effect van de bodemhoogte wijzigingen en van de peilwijzigingen van het tertiaire systeem zijn hier ondergeschikt. Het totale effect is vooral terug te leiden op de veranderingen in peilen van het primaire en vooral het secundaire systeem.

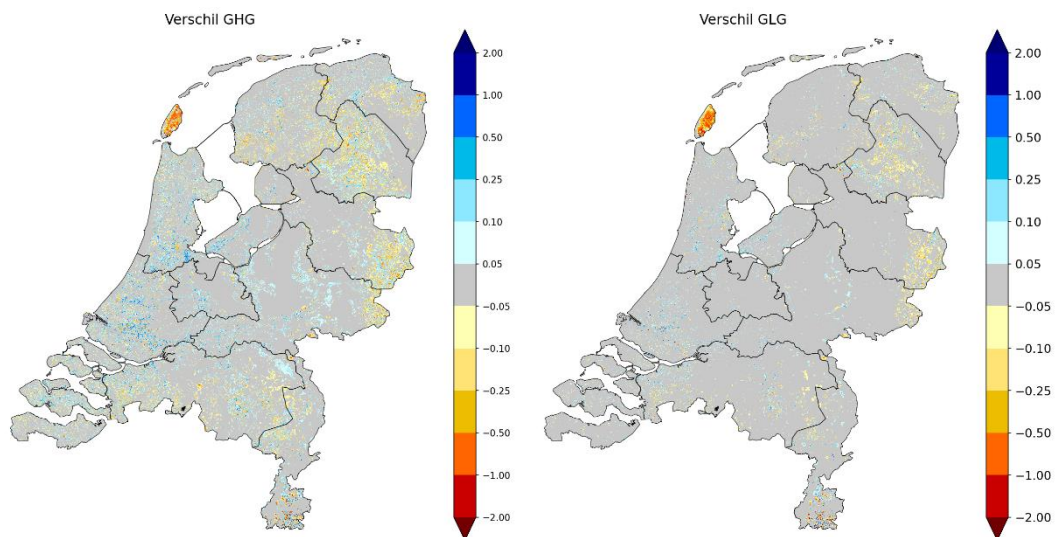
Het gecombineerde effect van de gewijzigde buisdrainage, greppels en maaiveldafvoer wordt gegeven in Figuur 2-15. De effecten zijn beperkt, wel schijnt de overwegend ondiepere ligging van buisdrainage in het Holoceen en de overwegend diepere ligging ervan in het Pleistoceen in het verschilplaatje door. De grotere verschillen op Texel zijn het gevolg van het toevoegen van buisdrainage; in LHM 4.2 was in het geheel nog geen buisdrainage aanwezig op Texel, omdat deze eigenschappen van het topsysteem hier nog niet waren toegekend aan de Waddeneilanden.



Figuur 2-13 Verschil in HG3 en LG3 tussen LHM 4.3 en LHM4.2 voor 2003 als gevolg van het oplossen van de peileninconsistentie in MOZART.



Figuur 2-14 Verschil in HG3 en LG3 tussen LHM 4.3 en LHM4.2 als gevolg van de update van de peilen in het primaire, secundaire en tertiaire systeem, berekend voor het jaar 2003. Blauwe kleuren geven een vermatting weer; rode kleuren een verdroging.



Figuur 2-15 Verschil in HG3 en LG3 tussen LHM 4.3 en LHM4.2 als gevolg van de gecombineerde wijzigingen voor de buisdrainage, greppels en overland flow, berekend voor het jaar 2003. Blauwe kleuren geven een vermatting weer; rode kleuren een verdroging.

2.3 Invoer voor het hoofwatersysteem

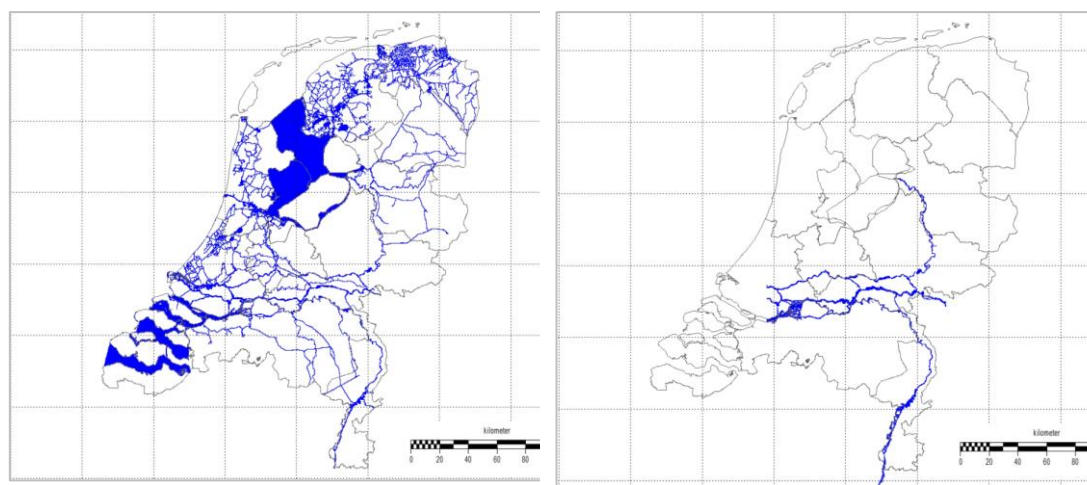
2.3.1 Gebruik van nieuwe peilen op basis van ISG-tooling

De ISG¹-tooling betreft scripts die tot nu toe uitsluitend voor regionale grondwatermodellen zijn toegepast en waarmee ISG-invoer files (iMOD invoer-formaat) gemaakt kunnen worden voor de grote rivieren (Rijn, Maas, Waal, Julianakanaal, IJssel, en benedenrivierengebied).

¹ ISG is een bestandsformaat van iMOD dat dynamische invoer (verbreiding, peilen, etc.) van oppervlaktewateren faciliteert.

Met de tool worden waterstandsmetingen van RWS aan de hand van betrekkinglijnen geïnterpoleerd voor de rivieren. Daarbij wordt ook de bathymetrie gebruikt, alsmede zomer- en winterdijkhoogten voor het bepalen van de breedte van de rivier. Voor een verdere beschrijving van de scripts wordt verwezen naar de specifieke documentatie van de ISG-tools (Engel, 2022).

Met de ISG-scripts wordt een ISG-file gecreëerd voor de grote rivieren. De ISG-invoer files bevatten gegevens over peilen en de bodemhoogte die kunnen worden toegepast in MODFLOW. De uitvoer van de ISG-scripts is standaard op dagbasis beschikbaar. De ISG-files kunnen vervolgens worden omgezet naar een raster met behulp van de iMOD batch-functie ISGGRID. Dit raster kan vervolgens gebruikt worden in het LHM. Opgemerkt wordt dat in het hoofdwatersverdelingsnetwerk van LHM momenteel meer wateren zijn opgenomen dan nu worden gebruikt in de ISG-tool, zie **Error! Reference source not found.** De scope van de huidige ISG-tool wordt bepaald door de rivieren die momenteel door regionale modellen in ISG-files zijn opgenomen. Mogelijk zal de scope in de toekomst uitbreiden.



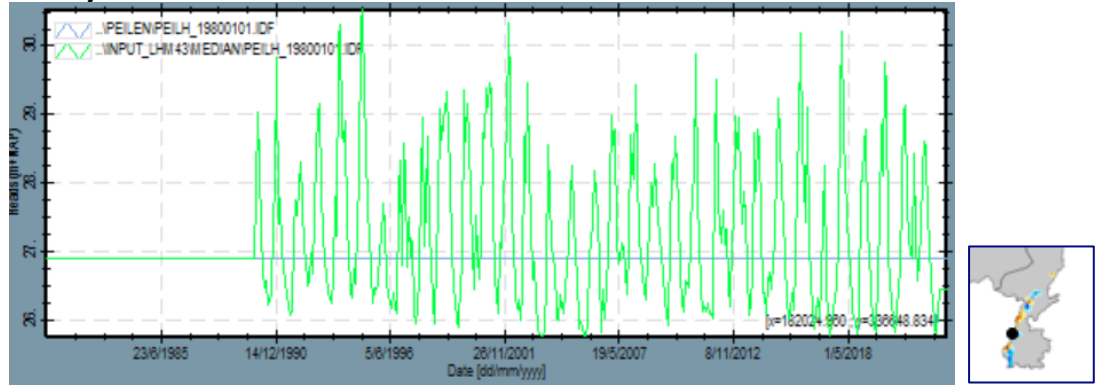
Figuur 2-16 Weergave van watergangen die nu aanwezig zijn in het hoofdwatersysteem van het LHM (links) en watergangen waarvoor informatie beschikbaar is in de ISG-invoer rechts), geproduceerd met de ISG-tooling (stand van zaken december 2022).

De ISG-scripts produceren dynamische peilen voor de watergangen. Ook voor de uiterwaarden kan rekening worden gehouden met de bathymetrie en de door de tijd wijzigende breedte van de rivier. In principe is in daarmee in de ISG-tools ook informatie beschikbaar over de dynamiek van de uiterwaarden, maar dergelijke dynamiek kan niet worden meegenomen in het LHM, omdat niet voorzien is in een dynamisch landoppervlak. De ISG uitvoer is daarom voor LHM 4.3 alleen toegepast voor de ligging van het hoofdwatersysteem, die is overgenomen uit de vorige versie van LHM.

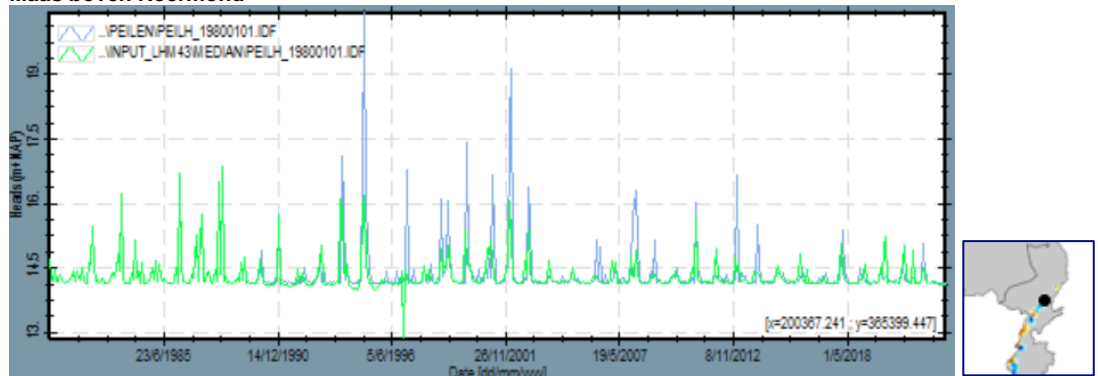
Voor het hoofdwatersysteem zijn uitsluitend de peilen geactualiseerd op basis van de ISG-uitvoer; dit is op korte termijn de belangrijkste variabele voor de MODFLOW-berekeningen. Voor toepassing van overige parameters, te weten de bodemhoogte, de conductance en infiltratie, is eerst verder onderzoek nodig naar de bruikbaarheid, ook in relatie tot eerder gemaakte keuzes in de schematisatie van LHM. Voor toepassing in LHM is de temporele resolutie van de ISG-uitvoer (1990-2021) opgeschaald naar maandelijks gemiddelde waarden. In Figuur 2-16 is de tijdreeks van de peildata weergegeven van 1980 tot 2021 voor een aantal interessante punten in het watersysteem. In de figuur is te zien dat in de jaren voor 1990 de peilen niet gewijzigd zijn, omdat hiervoor geen uitvoer uit de ISG-tools beschikbaar is.

Locatie

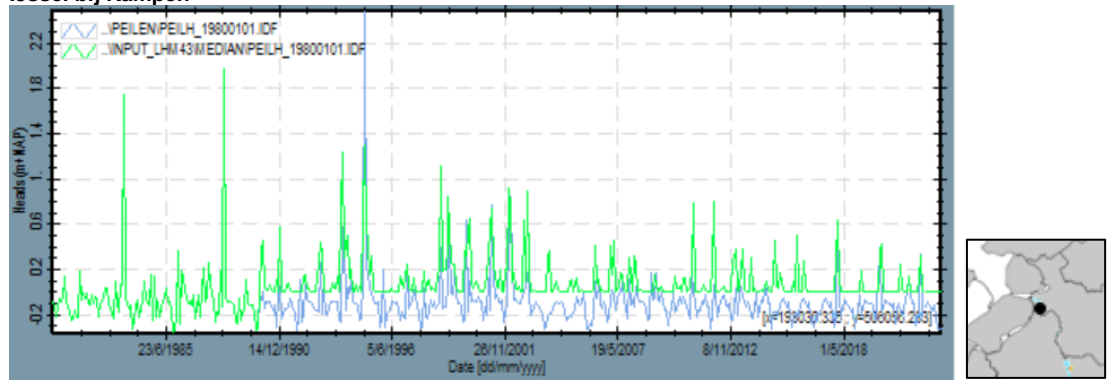
Maas bij Geleen



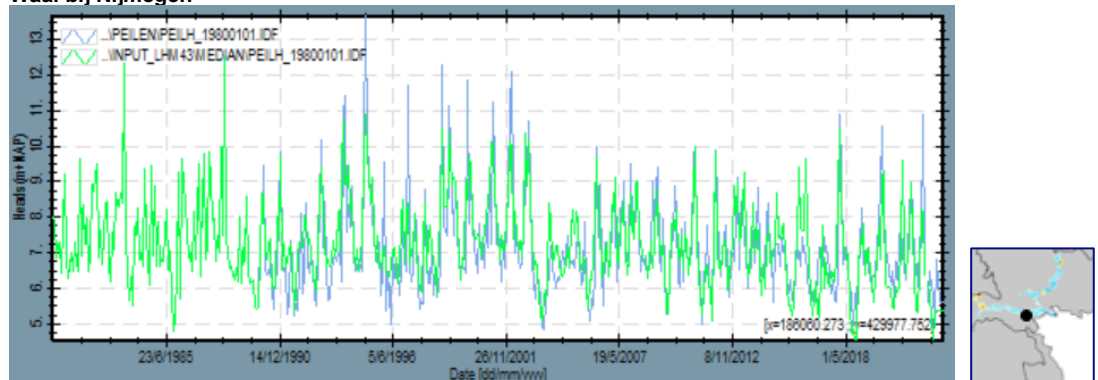
Maas boven Roermond



IJssel bij Kampen



Waal bij Nijmegen



Figuur 2-16 De peilen van LHM4.3 en LHM4.2 voor de periode 1980-2021, weergegeven voor 4 locaties. Groen geeft de peilen in LHM4.3 weer en blauw de peilen in LHM 4.2

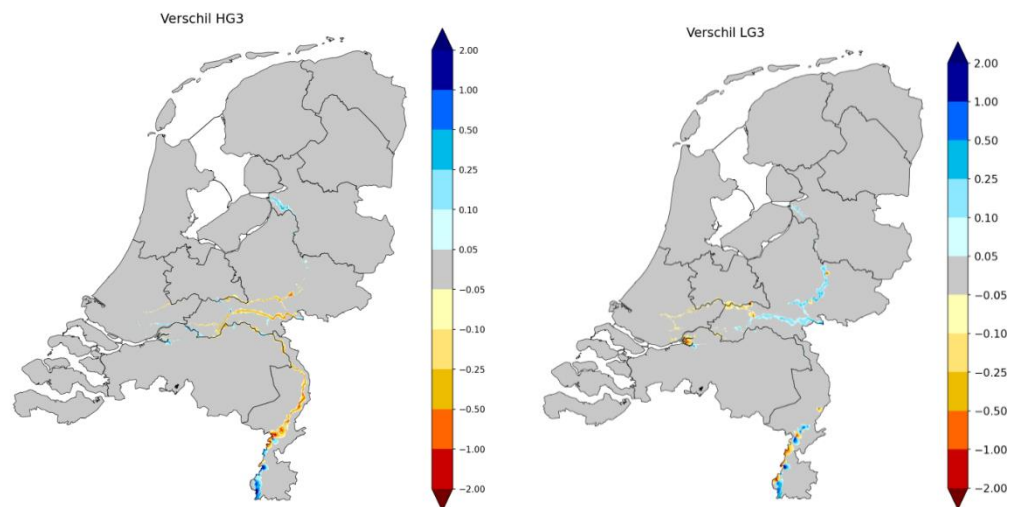
Over het algemeen laat de invoer op basis van de ISG-tools een vergelijkbare variatie zien als de peilen in LHM4.2 maar soms zijn er ook grote verschillen waarneembaar. De Maas in Zuid Limburg bijvoorbeeld maakte tot op heden gebruik van een vast peil. In de ISG-data in LHM 4.3 is nu gebruik gemaakt van meetdata, wat per definitie leidt tot sterke verbetering van de dynamiek. Bij de Maasplassen laten de peilen in de Maas dezelfde trend in pieken zien; wel bevatten de oude peilen hogere pieken. Mogelijk is de uitdemping van de pieken overschat door verbreding bij de Maasplassen. Rond 1996 is ook een piekje naar beneden te zien. Mogelijk heeft dit te maken op meetfouten in de gebruikte meetdata in de ISG-tooling.

Voor de IJssel bij Kampen is een opmerkelijk verschil in peilen waarneembaar; de peilen in LHM4.3 zijn zeker 10 à 20 cm hoger dan de oude peilen. Mogelijk kloppen de oude afvoerrelaties of metingen (van met name lagere afvoeren) niet voor dit punt, dit kan in volgende versies verder worden onderzocht.

De patronen van de peilen van de Waal bij Nijmegen zijn vergelijkbaar in beide modelversies, maar de absolute peilen verschillen wel. De verschillen zijn volledig toe te schrijven aan de wijze waarop het peil is afgeleid. De nieuwe afleiding van de peilen met behulp van de ISG-tooling wordt hierbij als beter beoordeeld dan de voorheen gehanteerde methode, waarbij afvoeren en peilen werden toegekend, op basis van interpolatie van berekeningsresultaten uit Sobek voor verschillende karakteristieke jaren.

2.3.2 Gevolgen van het gebruik van de ISG-informatie

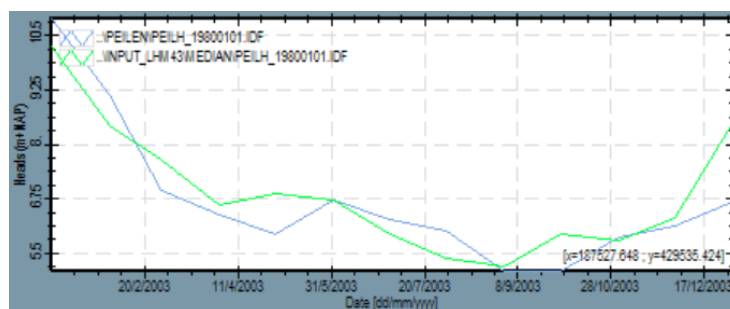
Voor de nieuwe peilen in het hoofdwatersysteem is een testberekening uitgevoerd voor wijzigingen van de peilen in LHM 4.3. het jaar 2003, en vergeleken met LHM 4.2. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 2-17.



Figuur 2-17 Verschil in HG3 en LG3 tussen LHM 4.2 en LHM4.2 met nieuwe peilen hoofdwatersysteem, berekend voor het jaar 2003. Blauwe kleuren geven een vernatting weer; rode kleuren een verdroging.

Voor het meest benedenstroomse deel van de IJssel ligt het basispeil hoger dan de tot nu toe gebruikte peilen, wat voor een verhoging van de grondwaterstand zal zorgen, zowel in de zomer als de winterperiode. Voor Zuid-Limburg was tot nu toe in het LHM een vast peil gehanteerd, zonder seizoensfluctuaties.

De nieuwe fluctuaties zorgen voor duidelijke wijziging van de berekende grondwaterstanden. Veel andere verschillen in LG3 en HG3 worden door kleinere verschillen in de invoer in waterstanden veroorzaakt. Als voorbeeld wordt ingezoomd op de verschillen in peilen in 2003 voor de Waal bij Nijmegen (zie figuur 2.19). In de winter is een lager peil gegenereerd, en in de zomer een hoger peil. Dit maakt duidelijk dat de maandelijkse peilen lokaal duidelijke verschillen vertonen t.o.v. LHM 4.2, waarbij zowel verhogingen als verlagingen voorkomen.



Figuur 2-18 Gehanteerde peilen in LHM 4.3 (groen) en LHM 4.2 (blauw), voor de Waal bij Nijmegen.

2.4 Aanpassingen in de kalibratiemethode

2.4.1 Gebruikte optimalisatiegegevens

Voor de kalibratie van niet-freatische grondwaterstanden is dezelfde set peilbuismetingen gebruikt als bij de kalibratie van LHM 4.2 (Janssen et al., 2022). Voor de kalibratie van freatische grondwaterstanden was in LHM 4.2 (Janssen et al., 2022) besloten om geen gebruik te maken van peilbuismetingen, maar van een afgeleide vlakdekkende Gt-kaart. De reden daarvoor is dat was geconstateerd dat een groot deel van de peilbuizen/filters niet goed gepositioneerd is en niet representatief werd geacht voor de freatische grondwaterstand. Voor gebruik van deze waarnemingen zou eerst een grondige evaluatie plaats moeten vinden van de positionering in het (geo)hydrologische systeem. Dergelijke evaluatie is tijdrovend vanwege het grote aantal meetlocaties (vele duizenden). De Gt-kaart is juist gebaseerd op (niet-ontsloten) metingen die die grondwaterstand wel goed weergeven.

In de vorige kalibratieronde werd gebruik gemaakt van de GXG-schattingen op basis van karteerbare kenmerken (Van der Gaast et al., 2010). Recent is binnen de BRO het Model Grondwaterspiegeldiepte (WDM) beschikbaar gekomen. Het WDM geeft voor gridcellen van 50 bij 50 meter de GHG, de GLG en de grondwatertrappen (Gt). Het model is met statistische methodiek tot stand gekomen, waarbij onder meer de Bodemkaart is gebruikt. De nauwkeurigheid van het Model Grondwaterspiegeldiepte is gekwantificeerd in de vorm van 300 realisaties (mogelijke waarden) van GHG en GLG per gridcel. Uit deze informatie kunnen Gt-kaarten worden gemaakt, maar dus ook kaarten van GHG en GLG afzonderlijk². Bij evaluatie van LHM 4.2 is door WENR geadviseerd om de nieuwe Model Grondwaterspiegelkaart toe te passen op de modelkalibratie. Mede op basis van dit advies is deze nieuwe kaart daarom toegepast bij de kalibratie van LHM 4.3.

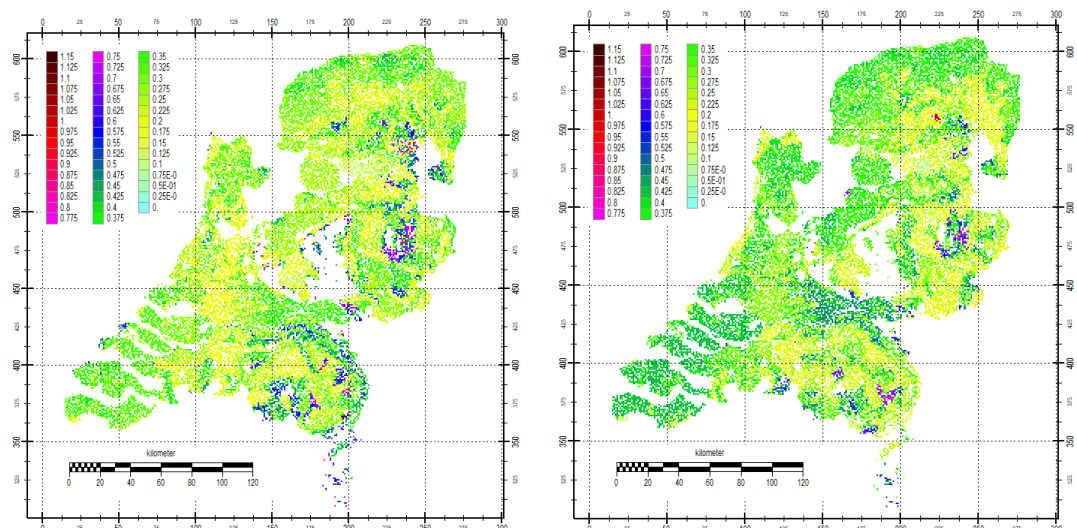
² Bron: <https://basisregistratieondergrond.nl/inhoud-bro/registratieobjecten/modellen/model-grondwaterspiegeldiepte-wdm/>.

Een van de grote voordelen van gebruik van het WDM in de kalibratie is de middels de 300 realisaties gegeven onzekerheden van de GXG-schattingen. Deze onzekerheden kunnen in de kalibratie gebruikt worden door wegenen mee te geven aan de 'metingen'. Dit levert een eerlijke methodiek op, omdat meetwaarden met kleinere onzekerheid meer invloed krijgen dan de meetwaarden met een grotere onzekerheid. Hiermee wordt dus voorkomen dat onzekere meetwaarden tot grote parameteraanpassingen leiden.

De WDM-kartering is, vergelijkbaar met toepassing van de kartering Karteerbare Kenmerkenkaart in LHM 4.2 (Janssen et al., 2022), gebruikt om een synthetische dataset te genereren waarbij er per vierkante kilometer één punt wordt gesampeld en toegevoegd aan de kalibratieset. Aanvullend hierop zijn de onzekerheden toegevoegd die gebaseerd zijn op de standaard deviatie voor de bepaling van de GHG en GLG, zoals afgeleid uit de 300 realisaties in de WDM-dataset. Op deze wijze draagt ieder 'synthetisch meetpunt' met een afgeleide GHG en GLG-waarde bij samen met de onzekerheid (standaarddeviatie) behorend bij dat punt. Punten met een grote standaard deviatie dragen omgekeerd kwadratisch (dit is de wegingsfactor) evenredig bij in de doelfunctie, zie Figuur 2-19. De witte gebieden in de figuur zijn de gebieden met diepe grondwaterstanden, waar geen informatie beschikbaar is volgens de model-grondwaterspiegeldieptekaart.

Langs de flanken van de hogere zandgronden is de standaarddeviatie duidelijk hoger voor zowel de GHG als de GLG (>0.75 meter). Dit levert significant kleinere wegingsfactoren op (weging is 1.78). De standaarddeviatie van de GLG op de Pleistoceen Nederland is beduidend kleiner (circa 0.2 meter en een weging van 25) terwijl die GHG in diezelfde gebieden een wat kleinere weging heeft (standaarddeviatie is circa 0.3 en een weging van 11.1). In holoceen Nederland zijn de standaarddeviaties voor de GHG en GLG beide circa 0.3 en 0.4 meter.

De uiteindelijke wegingsfactor is geschaald met een factor 0.25 voor het aantal niet-freatische peilbuismetingen (7158) gedeeld door het aantal locaties in de WDM-dataset (29314). Dit is gedaan omdat anders de WDM-dataset een onevenredig aandeel in de kalibratie zou krijgen. Een wegingsfactor van 0 is toegepast voor meetpunten met een standaarddeviatie groter dan 1 meter in de GLG en/of GHG, om dergelijke onzekere meetpunten uit te sluiten voor de optimalisatie. Uit figuur 2.20 blijkt dat dit om een beperkt aantal locaties gaat.



Figuur 2-19 Overzicht van de toegekende standaarddeviatie voor de synthetische meetpunten op basis van de WDM-kartering voor de GHG (links) en de GLG (rechts).

2.4.1.1 Niet-stationaire optimalisatie

Bij de optimalisatie van LHM 4.2 is een techniek ontwikkeld die het mogelijk maakt om een landsdekkende niet-stationaire optimalisatie uit te voeren (Janssen et al., 2022). Deze techniek is weer toegepast op LHM 4.3. De niet-stationaire kalibratie wordt als een flinke verbetering beschouwd ten opzichte van de eerdere stationaire optimalisatie van LHM 4.1 (Janssen et al., 2020), aangezien hiermee ook de dynamiek, of meer specifiek; de GLG en GHG, kan worden gekalibreerd.

2.4.2 Optimalisatietechniek

Het doel van de optimalisatie (de doelfunctie) is het verkrijgen van een combinatie van parameters die een zo laag mogelijke som heeft van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstanden (en GxG-waarden). In de optimalisatie is ervan uitgegaan dat (absolute) residuen die kleiner zijn dan 1 cm worden genegeerd. Dit om te voorkomen dat hard aan parameters “getrokken” wordt, terwijl die niet tot significante modelverbetering leiden.

Tijdens de kalibratie zijn de doorlatendheden van de bodem en de doorlatendheden van de waterbodems van de watergangen geoptimaliseerd. Vervolgens zijn met de geoptimaliseerde waarden op dagelijkse basis de afwijkingen ten opzichte van de metingen gekwantificeerd.

In de kalibratie is gebruik gemaakt van de automatische optimalisatiemethodiek iPEST binnen iMOD (Vermeulen et al., 2022). Deze methode is gebaseerd op het Levenberg-Marquardt algoritme (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) en PEST (Doherty, 2015). iPEST maakt gebruik van een automatische parameterregularisatie, waarbij ongevoelige parameters automatisch worden uitgefilterd, om te voorkomen dat parameters onevenredig worden aangepast om een bepaalde doelfunctie te bereiken. Daarvoor richt de methode zich op de meest gevoelige parameter, omdat daar de meeste winst te behalen is met de kleinste verandering. Daarnaast worden parameters die sterk gecorreleerd zijn gegroepeerd en vervolgens in de procedure min-of-meer evenredig aangepast. Dit is zeer efficiënt, het nadeel is wel dat voor een dergelijke groep van parameters het achteraf niet eenduidig te bepalen is welke parameter in zo'n groep een specifieke bijdrage heeft geleverd.

2.4.3 Parameter Optimalisatie

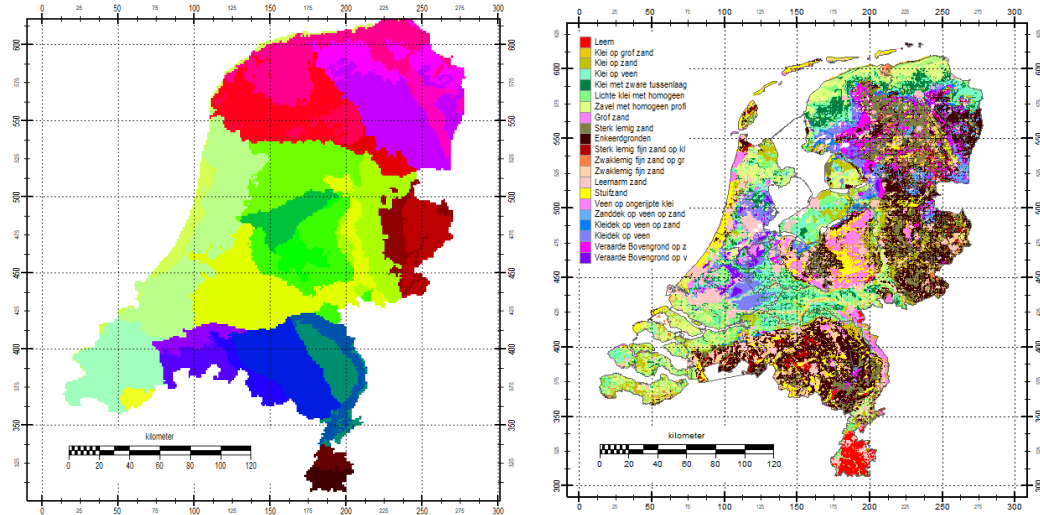
2.4.3.1 Model configuratie

Voor de kalibratie van het grondwater is het berekeningsresultaat van MetaSWAP uit de meest recente LHM-run (aanvankelijk LHM 4.2, maar later een tussentijdse ontwikkelversie met de beschreven aanpassingen in MetaSWAP) in de vorm van een grondwateraanvulling opgelegd als bovenrandvoorwaarde voor het MODFLOW-model. Daarnaast zijn de gehanteerde MOZART-infiltratie factoren ontleend aan de LHM 4.2-run en eveneens als vaste model invoer gebruikt in de MODFLOW-berekening.

Voor de zeer rekenintensieve optimalisatie in iPEST is het voor de rekenintensieve optimalisatie noodzakelijk om het landelijke MODFLOW-model zowel temporeel als ruimtelijk te vergroven. Dit is uitgebreid beschreven door Janssen et al. (2022). Een belangrijke stap hierbij is dat eerst representatieve grondwaterstanden zijn gegenereerd op de 14^e en 28^e daagse dag van elke maand, om de rekestijden van het model tijdens de kalibratie beheersbaar te maken. Aldus is een basis MODFLOW-model verkregen dat rekent op grotere tijdstappen en dat rekent zonder de interactie met MetaSWAP en MOZART en DM, en hierdoor sneller rekent.

2.4.3.2 Parameters en zonerings

Voor de kalibratie zijn vervolgens de parameters volgens logische fysische eenheden gezoneerd. Op deze wijze ontstaat er een parameteraanpassing die alle afhankelijkheden nog heeft en hierdoor op LHM-niveau plausibelere aanpassingsvlakken (namelijk: uitgelijnd naar de fysisch logische zonerings) geeft. Voor de onderverdeling van parameters is de indeling in GeoTOP-gebieden gebruikt (Vermooten et al., 2005), zie Figuur 2-20 (links). Daarnaast is gebruik gemaakt van de bodemkaart die vereenvoudigd is naar 21 PAWN-eenheden (volgens Wösten et al, 1988). Deze combinatie van eigenschappen is vervolgens gebruikt als zonerings bij de kalibratie van de parameters.



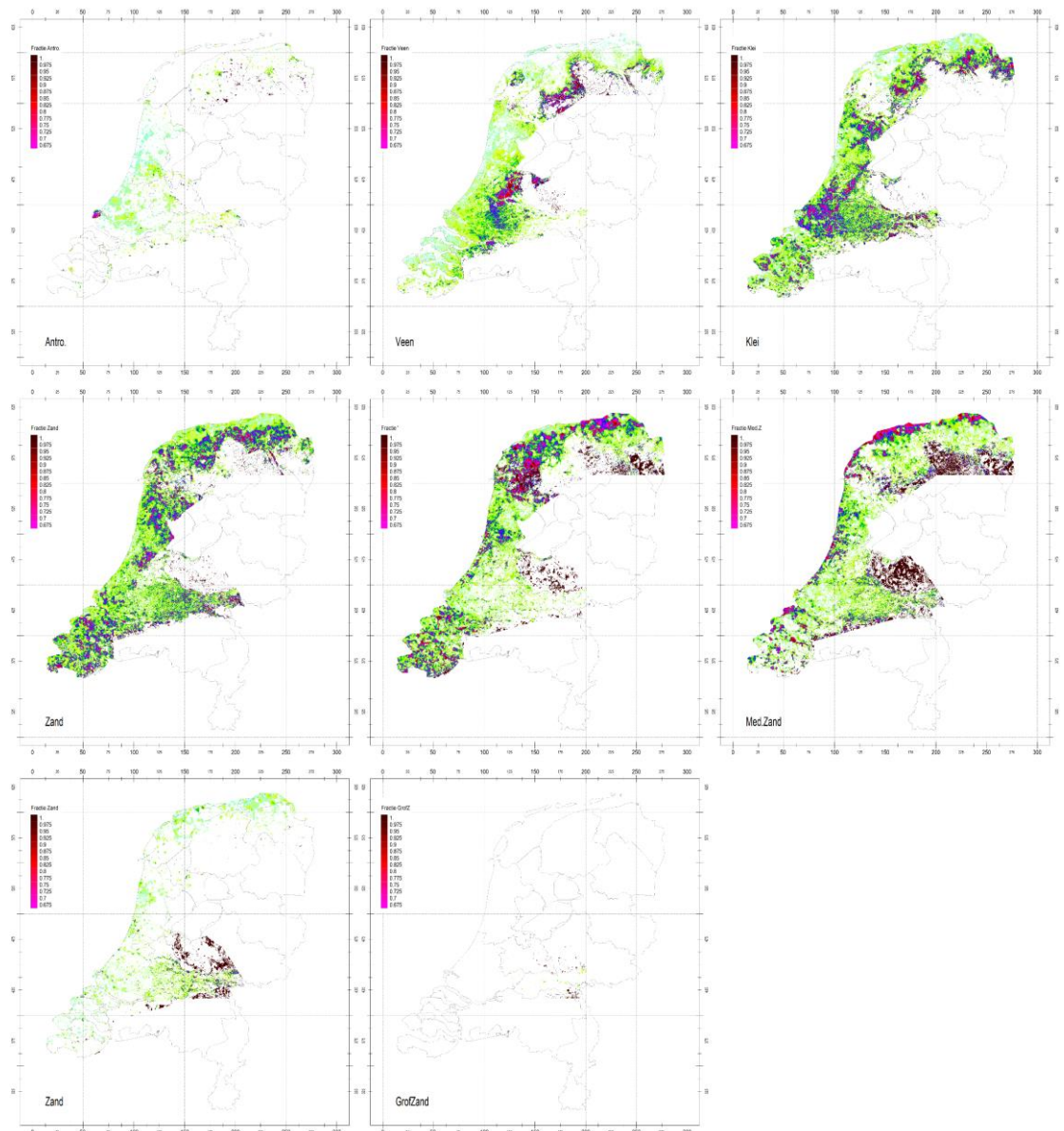
Figuur 2-20 (links) Overzicht van GeoTOP-gebieden met elk een karakteristieke (hydro)geologische opbouw van de diepe ondergrond (Vermooten et al., 2005); rechts) de indeling in de hoofdcategorieën van de bodemkaart (PAWN-eenheden).

Bij de optimalisatie van het LHM is een selectie gemaakt van parameters waarvan verondersteld is dat deze de grootste onzekerheid in het model hebben. Bedacht moet worden dat een grote onzekerheid is iets anders dan een grote onnauwkeurigheid. Een waterpeil kan bijvoorbeeld als gevolg van een onzorgvuldige opname onnauwkeurig zijn, maar over het algemeen is dit een gemeten parameter, die niet gepaard gaat met grote onzekerheden. Het waterpeil is daarom bijvoorbeeld niet meegenomen in de model optimalisatie. De relatie tussen het oppervlaktewater en het grondwater daarentegen wordt niet gemeten en kent een grote onzekerheid. Deze interactie tussen grond- en oppervlaktewater wordt in het model vertegenwoordigd door de conductance van de watergangen en wordt daarom wel meegenomen in de optimalisatie.

De volgende lijst van parameters en zonerings zijn gehanteerd bij de optimalisatie van het grondwatermodel:

- De doorlatendheden van het hoofdwatersysteem zijn ingedeeld in 21 PAWN-eenheden. Het hoofdwatersysteem grijpt soms in twee modellagen aan en voor die locaties zijn de parameters tevens gegroepeerd tot één groep. In totaal zijn er 21 parameters toegekend aan de doorlatendheid van het hoofdwatersysteem. Dit geldt ook voor de infiltratiefactor.
- De doorlatendheden van het primair-, secundaire en tertiaire systeem zijn aan elkaar gekoppeld. Hierdoor blijft de verdeling van deze systemen na de optimalisatie identiek. Die onderlinge verdeling wordt voor een groot deel bepaald door de relatieve natte oppervlakken van de systemen en deze is daardoor minder onzeker dan de gecombineerde conductance. De doorlatendheden zijn onderverdeeld in de 27 GeoTOP-eenheden. Tevens zijn de infiltratiefactoren voor alle drie de systemen, op overeenkomstige wijze, toegevoegd aan de parameter set.

- De doorlatendheden van de drie onderscheiden drainagesystemen (buisdrainage, greppels en de overland flow) zijn ingedeeld in de 21 PAWN-eenheden. Dit levert $3 \times 21 = 63$ parameters op.
- De gespannen bergingscoëfficiënt is onderverdeeld in 1 parameter per modellaag vanaf model laag 2. De bergingscoëfficiënt van de eerste modellaag is een parameter die door MetaSWAP wordt bepaald en wordt daarom niet meegenomen in de optimalisatie. Per modellaag is de bergingscoëfficiënt opgesplitst in zogenaamde GeoTOP-gebieden (27). In totaal zijn er hierdoor 189 bergingscoëfficiënten geoptimaliseerd.
- De horizontale- (kD van de watervoerende model lagen) en verticale doorlatendheden (C van de scheidende model lagen) van alle geohydrologische eenheden binnen de gekarteerde geologische formaties van REGIS v2.2 zijn gehanteerd in de optimalisatie. Daarbij zijn de aanpassingen die gedaan zijn voor de opbouw van het lagenmodel voor LHM v4.0 (Hunink et al, 2019) meegenomen. Het gaat hierbij om 123 geohydrologisch eenheden. Binnen het LHM v4.3 worden 8 modellagen onderscheiden waarbinnen deze 123 geohydrologische eenheden zijn opgenomen. De fracties die ieder van de eenheden inneemt binnen iedere modellaag zijn aparte parameters die gegroepeerd zijn, zodat de hele eenheid eenzelfde aanpassingsfactor krijgt. Tot slot zijn deze eenheden verder onderverdeeld in zogenaamde GeoTOP-eenheden (27). In totaal levert dit 1558 parameters op, waarvan 994 horizontale doorlatendheden en 564 verticale doorlatendheden.
- Het Holoceen Complex (de deklaag) wordt binnen REGIS als de eenheid HLC weergegeven. Aangezien deze eenheid bestaat uit sterk afwisselende geohydrologische eenheden is ervoor gekozen om de HLC-eenheid op te splitsen in fracties van de hoofdlithologiën 1) Antropogeen, 2) Veen, 3) Klei, 4) Kleiig Zand, 5) Medium Zand, 6) Grof Zand en 7) Grind, zie Figuur 2-21. Op deze wijze is de HLC verder opgesplitst in 7 extra eenheden en de 27 GeoTOP eenheden. In totaal zijn er 153 eenheden gebruikt voor de optimalisatie van de HLC-eenheid.



Figuur 2-21 Berekende fractie per lithologie binnen de verbreiding van de HLC-formatie.

Tijdens de optimalisatie van het LHM 4.2 is ook de grondwateraanvulling geoptimaliseerd. Daar is nu van afgezien, omdat deze parameter niet direct terug kan worden vertaald naar het gekalibreerde LHM-model in combinatie met MetaSWAP en MOZART-DM. Bij ontwikkeling van LHM 4.2 is beredeneerd dat hierdoor eventuele onvolkomenheden in deze uitvoerparameters van MetaSWAP worden afgewenteld op andere te optimaliseren parameters. Dit argument is nu terzijde geschoven omdat uit de kalibratie van LHM 4.2 is gebleken dat deze werkwijze de verbetering in het LHM sterk teniet kunnen doen.

In tabel 2-2 zijn de 2.059 MODFLOW-parameters weergegeven die zijn gehanteerd in de optimalisatie. Voor groepen van parameters zijn ook acceptabele bandbreedte vermeld waarbinnen kan worden geoptimaliseerd. Op basis van de ervaring van de kalibratie in LHM 4.2 is de bandbreedte voor de optimalisatie van LHM 4.3 sterk verkleind, om te voorkomen dat (ongevoelige) parameters te veel worden aangepast.

Tabel 2-2 Overzicht van de parameters en de minimale- en maximale vermenigvuldigingsfactoren.

Parameter	Aantal Parameters	Vermenigvuldigingsfactor	
		minimaal	maximaal
Elastische bergingscoëfficiënten	189	0,1	10,0
Transmissiviteiten per model laag	994	0,5 (0.1) ³	2,0 (10.0) ³
Verticale Weerstand tussen model lagen	564	0,1	10,0
Deklaag weerstand	153	0,1	10,0
Watergang Doorlatendheden HWS	27	0,1	10,0
Watergang Doorlatendheden Primair, Secundair, Tertiair	21	0,1	10,0
Watergang Infiltratiefactoren HWS	27	0,1	10,0
Watergang Infiltratiefactoren Primair, Secundair, Tertiair	21	0,1	10,0
Drainage Doorlatendheden Buis-en Greppelsystemen en Overlandflow	63	0,1	10,0
Totaal	2.059		

2.4.4 Sub-modellen

Bij toepassing van een conventionele optimalisatietechniek zouden er minstens 2.059 gevoeligheids simulaties nodig zijn, die ongeveer vier uur per simulatie in beslag zouden nemen. Hierdoor zou de optimalisatie van het landelijke ondergrondmodel meer dan achttien maanden duren. Door verschillende computers te gebruiken zou de rekentijd in de praktijk kunnen worden gereduceerd. Als er ook rekening mee wordt gehouden dat er in de praktijk altijd meerdere gevoeligheidscycli nodig zijn, wordt duidelijk dat een alternatieve benadering nodig is voor de optimalisatie. Daarom is gekozen voor het gebruik van sub-modellen.

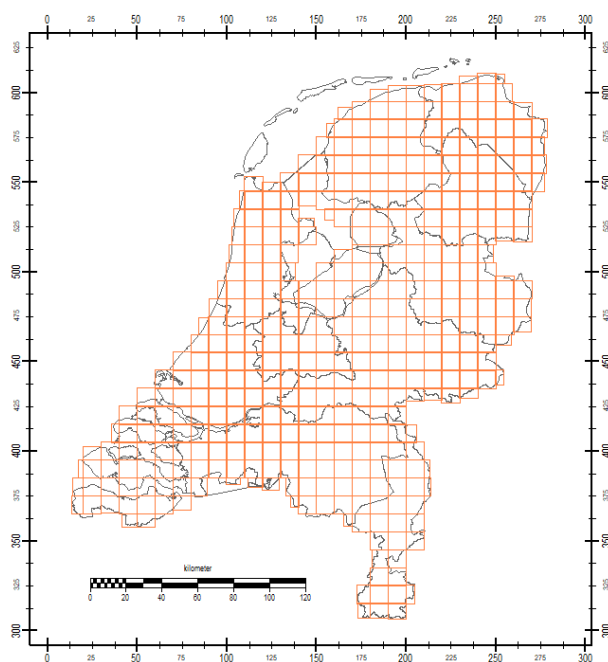
Voor Nederland is een set van 416 sub-modellen gedefinieerd, waarbij delen van het model die niet met waarnemingen zijn bedekt, zijn weggelaten, zie Figuur 2-22. Dit betreft dan de Waddeneilanden, het IJsselmeergebied, en delen van België en Duitsland. Dit alleen al vermindert de numerieke belasting met bijna 50%. Elk sub-model is maximaal 15 x 15 km groot en bevat maximaal 28.800 modelcellen. Elk submodel overlapt 5 km met een naastgelegen model. Dit is nodig om de parameters, via het overlappende deel, gevoelig te maken voor metingen buiten het submodel.

De submodellen kennen een aanzienlijk kleinere looptijd, namelijk gemiddeld 25 seconden in plaats van circa vijf uur voor het hele model. Door een aanzienlijk beperkter verbruik van de hardware in vergelijking tot optimalisatie van het landelijk model, kunnen de beschikbare processoren veel beter worden benut. Aanzienlijke performanceverbetering wordt ook gehaald doordat niet alle parameters in elk sub-model voorkomen, waardoor er voor sub-modellen dus minder gevoeligheden hoeven te worden berekend. Voor het hele model waren er 2.059 parameters. Voor de submodellen worden gemiddeld 127 geoptimaliseerd; met een minimum van 23 en een maximum van 303 parameters per submodel.

De methode voor de kalibratie is in verschillende ronden verbeterd. In de definitieve kalibratieronde zijn in totaal 53.195 gevoeligheidsanalyses uitgevoerd met de sub-modellen. Met een gemiddelde simulatietijd van 25 seconden, het gebruik van 15 rekenknoten met elk vier processoren kon de benodigde tijd voor de kern van de optimalisatie van LHM worden gereduceerd tot 0,5 dag voor alle gevoeligheden. Aanvullend is voor de nabewerking van de residuen wel extra tijd nodig, net als voor het exporteren van bijgewerkte modelinvoer als gevolg van de parameteroptimalisatie. Ook is er tijd nodig voor de voorbereiding van lokale gevoeligheden (Jacobianen) uit de sub-modellen tot een globale Jacobiaan en voor het vervolgens berekenen van de geactualiseerde parameter vector. Inclusief de controleslagen tussen de activiteiten door, kon de totale (uiteindelijke) kalibratiecyclus uiteindelijk binnen een werkweek worden uitgevoerd.

³ Tussen haakjes de waarde weergegeven voor de kalsteen en complexen VEVO, HTC, HOQ, MTQ, GUQ, VAC, AKC, DTC, MSC, OOC, HLC

De optimalisatie van LHM 4.3 is inhoudelijk verbeterd ten opzichte van LHM 4.2, door een geavanceerdere wijze van aggregatie van de geoptimaliseerde parameters. Neem bijvoorbeeld een doorlatendheid van een bepaalde geologische laag die binnen een groot aantal submodellen voorkomt. In LHM 4.2 werden dergelijke parameters na optimalisatie per submodel integraal samengevoegd met beperkte aanpassing op de overgangen. Dit leverde aanpassingsvlakken op waarin de sub-modellen nog duidelijk herkenbaar waren in de geoptimaliseerde modelinvoer, waardoor de geaggregeerde invoer voor een parameter te sterk kon variëren per submodel. In de optimalisatie van LHM 4.3 is voor de gehydrologische parameters op basis van de optimalisatie eerst het totale veld van gevoeligheden geaggregeerd, en op basis daarvan is over dit gehele veld de geoptimaliseerde parameter vastgesteld. Deze aggregatie verlaagt de resulterende efficiëntie van de kalibratie ten opzichte van het geoptimaliseerde submodel, maar leidt wel tot meer plausible aanpassing van de geoptimaliseerde invoer voor het landelijk model, doordat de gekalibreerde waarden in LHM 4.3 wel consistent zijn tussen de submodellen. De methodiek is uitgebreider beschreven in een publicatie (Vermeulen et al, 2023, in prep).



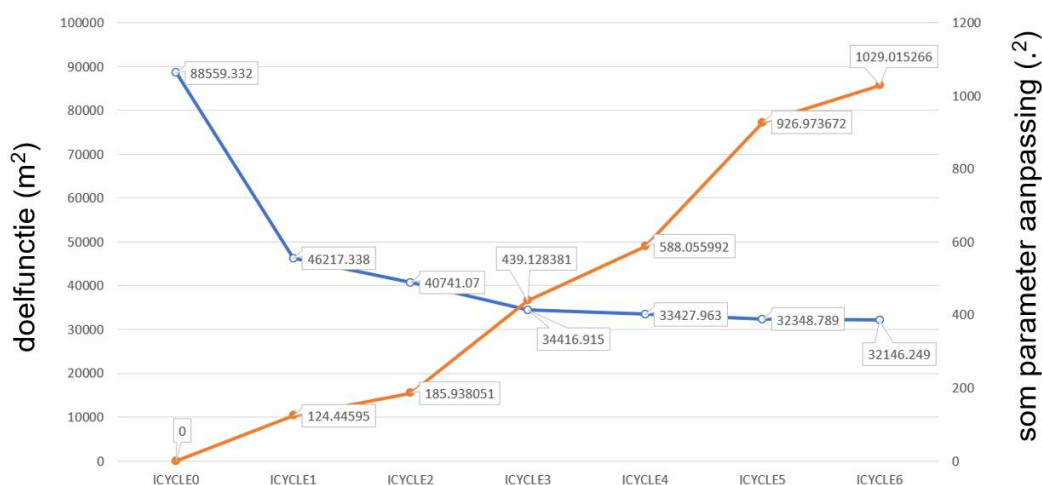
Figuur 2-22 Verdeling van de 416 submodellen die gebruikt zijn in de parameter optimalisatie van LHM 4.3.

2.4.5 Resultaten

2.4.5.1 Efficiëntie

De uiteindelijke kalibratie heeft 6 iteratie cycli doorlopen waarbij de totale doelfunctie (minimaliseren van de som van de kwadratische residuen van GHG en GLG⁴, dus twee residuen per meetpunt) met circa 64% is verminderd, zie Figuur 2-23 (blauwe lijn). Initieel bedroeg de doelfunctie ruim 88.000 m²; na 6 iteraties is dit verminderd tot circa 32.000 m². De grootste verbetering ten opzichte van de doelfunctie heeft plaats gevonden in de eerste iteraties. Na 3 iteraties neemt de verbetering aanzienlijk af. Enerzijds komt dat door de begrensde bandbreedtes waarbinnen de parameters nog verder konden wijzigen. Anderzijds doordat de parameters in het model daadwerkelijk minder gevoelig zijn voor verdere aanpassing van de modelparameters richting de doelfunctie.

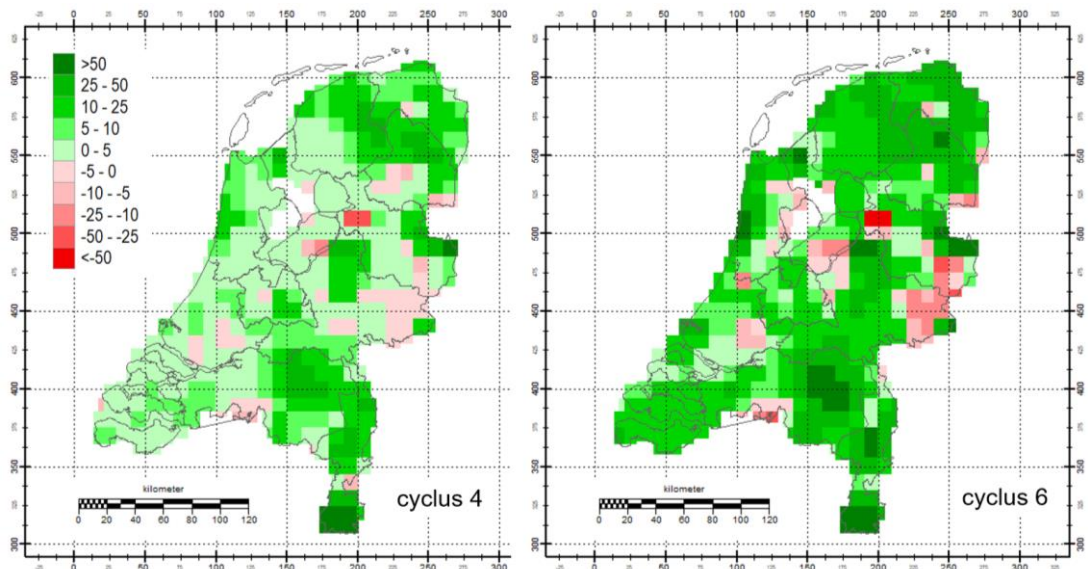
In Figuur 2-23 is in rood ook de som van de cumulatieve kwadratische parameter aanpassing per iteratie weergegeven. Opvallend is dat in de eerste iteratie een significante verbetering van de doelfunctie (blauwe lijn) wordt berekend, terwijl hiervoor een kleine parameter aanpassing nodig is. Daarna neemt de effectiviteit duidelijk af; vanaf de vierde iteratie is er een duidelijke afvlakking van de doelfunctie waarneembaar, en is er veel parameter aanpassing nodig om tot verbetering te leiden. De verbeteringen in de laatste iteraties zitten vooral in verbeteringen in kleinere residuen. Tijdens de kalibratie zijn de verbeteringen per cyclus bijgehouden; tussen de vijfde en zesde cyclus bedroeg de verbetering nog slechts 0.5%. Daarom is besloten na de zesde cyclus niet verder te kalibreren en de optimalisatie te beëindigen.



Figuur 2-23 Overzicht van de verminderde doelfunctie (blauw) en toename in parameter aanpassing (rood).

De resulterende efficiëntie ten opzichte van de beginsituatie over de submodellen is ook ruimtelijk weergegeven in Figuur 2-24. Delen van Noord-Brabant, de Veluwe, Friesland en Groningen tonen sterke verbetering (>50%) terwijl het overige deel beperkt verbeterd (tussen de 10-25%) of zelfs verslechtert. De gemiddelde verbetering over alle sub-modellen bedraagt circa 18 procent; in totaal zijn 362 sub-modellen verbeterd, maar tegelijkertijd zijn 54 sub-modellen verslechterd ten gunste van het verbeteren van het groter geheel van de submodellen.

⁴ Ook over de niet-freatische (gespannen) metingen wordt een 'GXG' berekend volgens dezelfde definitie als voor de freatische metingen, om de doelfunctie te kunnen berekenen. Strikt genomen spreekt men in geval van niet-freatische situaties niet van GXG's (omdat de laatste G staat voor 'grondwaterstand' en er in niet-freatische situaties geen sprake is van grondwaterstanden), maar voor het gemak wordt hier dezelfde terminologie gebruikt.



Figuur 2-24 Berekende efficiëntie (%) per submodel, links voor iteratie 4, rechts voor iteratie 6.

2.4.5.2 Residuen

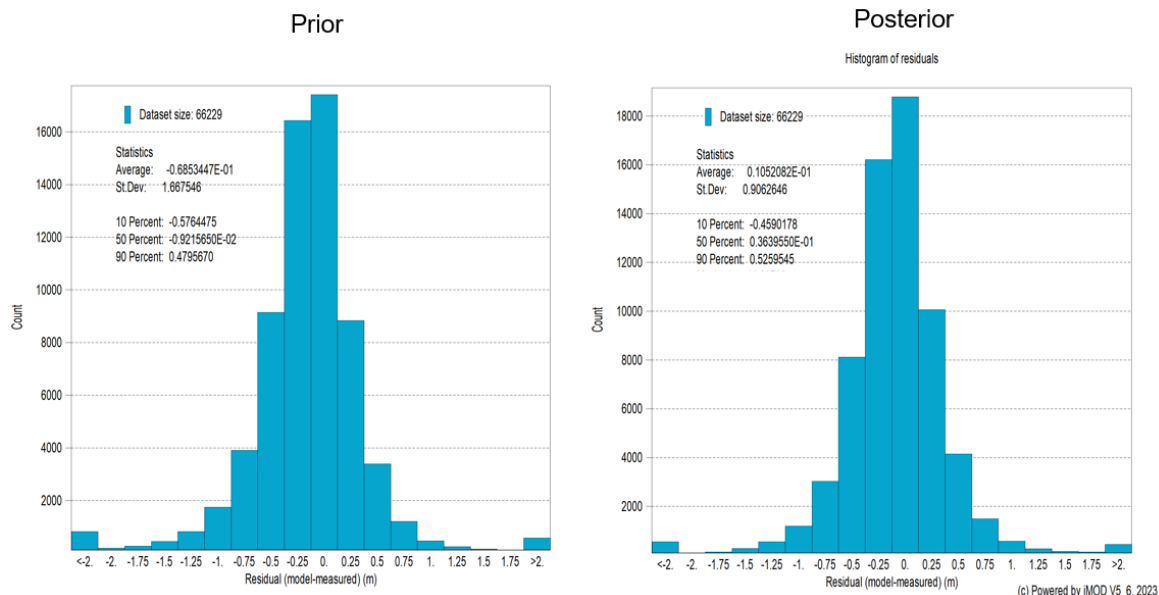
In figuur 2-25 is een histogram van de verdeling van residuen weergegeven voor het initiële model (prior) voorafgaand aan de kalibratie, en voor het resultaat na de kalibratie (posterior). Vóór de kalibratie bedroeg de gemiddelde afwijking -0.07 meter, met een standaard deviatie van 1.66 meter. Na de 6^e iteratie is de gemiddelde afwijking verkleind tot 0.01 meter en is de standaardafwijking van de residuen gereduceerd tot 0.90 meter. De 10- en 90 percentielen zijn na de kalibratie min-of-meer gelijk aan het prior model.

Over het algemeen is het gekalibreerde model natter (hogere grondwaterstanden) dan het model voor kalibratie, conform de verwachting. De histogrammen per modellaag zijn weergegeven in Bijlage D1.1.

Wat betreft de freatische grondwaterstanden (laag 1) is het model -0.15 meter te laag, dat wordt enigszins vertekend doordat laag 1 alleen de freatische meetpunten omvat voor gebieden met diepe grondwaterstanden, zoals de Veluwe, Utrechtse Heuvelrug, Duinen etc. De WDM meetpunten geven aan dat de residuen gemiddeld -0.05 meter te laag zijn. De modellagen 2 tot en met 5 geven een overeenkomstig beeld met een gemiddelde positieve afwijking van 0.06 meter met gelijke 10- en 90-percentielen van -0.75 tot $+1.29$ meter.

Zoals eerder vermeld is in de kalibratie gebruik gemaakt van wegingsfactoren. Dit maakt het mogelijk ook de gewogen histogrammen weer te geven. Deze zijn opgenomen in Bijlage D1.2. De gewogen residuen laten een minder grote spreiding van residuen zien dan de ongewogen residuen. Dit is ook logisch, aangezien de kalibratie afhankelijk is gemaakt van deze weegfactoren, door (bij de freatische waarnemingen) de standaarddeviatie direct mee te laten wegen in de doelfunctie voor de kalibratie.

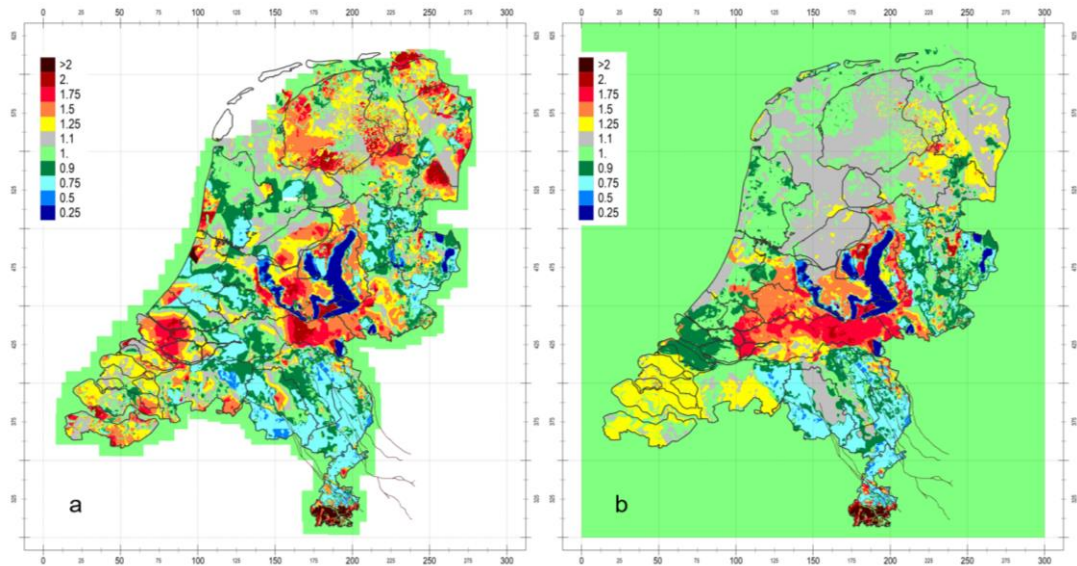
In bijlage D1.3 en D1.4 zijn de residuen per laag weergegeven. In Bijlage D.2 en Bijlage D.3 zijn de residuen ook per locatie weergegeven.



Figuur 2-25 Histogram van de residuen verdeling van het prior (links) en posterior (rechts) model. De x-as geeft de ondergrenzen aan van de klassen.

2.4.5.3 Parameters

In Figuur 2-26a is de parameter aanpassing van de transmissiviteit (kD) van modellaag 2 weergegeven op basis van de 416 individuele submodellen. Er is een sterke variatie tussen submodellen waarneembaar, vooral in de noordelijke provincies en Zeeland. Een verhoging van de kD voor één submodel kan voor een verlaging van de residuen zorgen, terwijl dit voor een ander naastgelegen sub-model juist voor een verhoging kan zorgen, afhankelijk van de complexe samenhang van gevoeligheden en residuen per sub-model. Na de optimalisatie van submodellen, worden de resultaten geaggregeerd (zie paragraaf 2.4.4), wat leidt tot de parameteraanpassing voor deze tweede modellaag, zoals weergegeven in Figuur 2-26b. In gebieden zoals de Veluwe, Noord- en Zuid Limburg en de Hondsrug is duidelijk een vergelijkbaar beeld te zien. Voor overige gebieden ontstaat er na de aggregatie een duidelijk gewijzigd, 'rustiger' beeld in de parameter aanpassingen. Hoewel daarbij op lokale schaal een verslechtering ten opzichte van de meetpunten kan optreden, resulteert dit op (super) regionale schaal tot verbetering.



Figuur 2-26 a) Parameter aanpassing voor de KD van modellaag 2 voor de 416 individuele submodellen, b) de parameter aanpassing na aggregatie van de submodellen. De legenda geeft de ondergrenzen van de klassen aan.

Uit dit voorbeeld wordt duidelijk dat in het geaggregeerde resultaat minder effectief is dan de aanpassingen in de individuele submodellen, maar dat met de aggregatie wel een meer consistente geologische benadering wordt bereikt.

In de bijlagen D.4 t/m D.9 zijn de parameter aanpassingen weergegeven per parameter en per model laag of systeem. Hieronder worden de belangrijkste kenmerken en wijzigingen per parameter aanpassingen afzonderlijk toegelicht.

Ondergrondparameters

Transmissiviteiten (KD)

De kD voor de modellen 1 tot en met 3 zijn verlaagd voor de Utrechtse Heuvelrug, de Veluwe, het IJsseldal en Limburg, om hiermee een hogere grondwaterstand te krijgen, zie Bijlage D.4. Enerzijds kan dit zijn om te corrigeren voor de verzadiging van het freatische systeem, anderzijds kan het een correctie zijn op een onderschatting van de aanwezige horizontale anisotropie. De Hondsrug valt op door een verhoging van de kD in bijna alle modellen, dit geldt ook voor de formaties in de Centrale Slenk. De kD waarden worden het meest aangepast in het Pleistocene deel van Nederland, waar het oppervlaktewater een minder dominante rol heeft.

Verticale weerstanden (C)

De verticale weerstand wordt in het duingebied fors verhoogd met een forse waarde, zie Bijlage D.5. Ook de weerstand van de kleien in de het Rivierengebied worden significant verhoogd, net als de ondiepe- en diepere kleien nabij de Hondsrug. Tevens valt op dat de goed ontwikkelde diepere kleien in de Centrale Slenk in weerstand toenemen. De diepere kleien nemen juist in weerstand iets af, evenzo in Groningen, zie bijlage D.5. Over het algemeen lijken de meeste kleien in weerstand toegenomen te zijn.

Bergingscoëfficiënten (S)

De freatische bergingscoëfficiënt is niet geoptimaliseerd aangezien deze bepaald is uit een eerdere LHM-berekening met MetaSwap. De elastische bergingscoëfficiënten voor de modellen 2 tot en met 8 zijn wel geoptimaliseerd. De aanpassingsfactoren zijn weergegeven in bijlage D.9. Een verhoging van de bergingscoëfficiënt zal de dynamiek van de grondwaterstand dempen, terwijl een verlaging deze juist laat toenemen. Uit de kalibratie blijkt de parameter beperkt gevoelig en voor alle modellen is eenzelfde patroon waarneembaar, waarbij veelal een kleine verhoging of verlaging wordt berekend. In het zandige Salland, Maasdal en Peelhorst lijkt een iets grotere bergingscoëfficiënt een positieve invloed te hebben op de berekende GHG- en GLG waarden.

Conductance van watergangen

De aanpassingsfactoren voor de conductance van de watergangen zijn weergegeven in bijlage D.6, voor zowel de hoofdwatgangen als de primaire-, secundaire en tertiaire watergangen. De laatste drie zijn als één groep behandeld.

Hoofdwatgangen

Bij deze aanpassingen is een duidelijke onderverdeling te zien tussen Holoceen- en Pleistoceen Nederland. Voor het Holoceen zijn de weerstanden van de watergangen verhoogd (vermindering conductance met een factor 0.9), ook relatief ten opzichte van het Pleistoceen (factor is 1.5). De weerstand dat het grondwater ondervindt bij de stroming naar de watergangen is in dit gebied initieel te hoog ingeschat. In combinatie met een overwegend verlaagde kD, wordt de waterlopen conductance dus verhoogd, om te voorkomen dat de grondwaterstanden té hoog worden berekend.

De aanpassingsfactor voor de infiltratiefactor is over het algemeen verlaagd met een factor 0.5, zie bijlage D.7. Hierdoor wordt de instroom vanuit de grote rivieren naar het grondwater bemoeilijkt. Lokaal, vooral in het Rivierengebied, worden de infiltratiefactoren juist vergroot met een factor 2.

Primaire, secundaire en tertiaire watergangen'

Een toename in conductance (afname van de weerstand naar de watergang) is duidelijk te zien voor het Rivierengebied, het IJsseldal, Oost-Nederland en het stroomgebied van de Maas. Bijna alle overige primaire, secundaire en tertiaire watergangen laten juist een verlaging zien. In sterk ontwaterende gebieden, zoals Noord-Nederland, Zeeland en beekdalen in Brabant, zal een verlaging van de conductance een grondwaterstandsverhoging tot gevolg hebben.

Te lage grondwaterstanden worden daarnaast al snel positief beïnvloed door een sterkere infiltratie vanuit het oppervlaktewater. In de aanpassingsfactoren voor de infiltratiefactoren voor de hoofdwatgangen (bijlage D.7) is heel duidelijk te zien dat deze bijna overal wordt verhoogd. Een hogere infiltratiefactor betekent dat, veelal in de zomer bij wateraanvoer, meer grondwater aangevuld wordt vanuit het oppervlaktewater. Initieel onderschat het LHM deze infiltratie.

Drainage

De aanpassingsfactoren voor de drainage zijn weergegeven in bijlage D.8 en bestaat uit individuele aanpassingen voor de buis- en greppeldrainage en de overlandflow (oppervlakkige afstroming).

Buisdrainage

De intensiteit van de ligging van de buisdrainage (landbouw) wordt verreweg gedomineerd door de verbreiding van het Holoceen. Hier wordt over het algemeen de drainage weerstand gelijk gehouden. In het Rivierengebied lijkt de initiële drainageweerstand te hoog en wordt deze met een factor 1.5 verlaagd. Op het Pleistocene deel van Nederland, neemt de weerstand van de buisdrainage (voornamelijk in steden en wegen) juist iets toe (circa 1.2, doorlatendheid keer 0.8). Beide aanpassingsfactoren zijn consistent met de aanpassingen in conductance voor de primaire- secundaire en tertiaire watergangen. Zuid-Limburg valt op door een significant verhoogde conductance (factor 1.5). Dit heeft wellicht te maken met een verhoogde doorlatendheid door verkarsting in de beekdalen.

Greppeldrainage

De gevoeligheid van de greppeldrainage, en hierdoor ook de verkregen aanpassingsfactor is meer dan bij de buisdrainage, dit komt mede door de zeer beperkte verbreiding van de greppeldrainage in het model (met name Friesland en West-Rivierenland). Deze komt op een verhoging met een factor van maximaal 1.75. In de overige gebieden betreft het zeer lokale gebieden met greppeldrainage waarbij deze eerder in weerstand toenemen dan afnemen.

Overlandflow

De overlandflow (oppervlakkige afvoer) is een bijzondere parameter omdat deze eigenlijk alleen optreedt wanneer grondwater uittreedt aan maaiveld en als oppervlaktewater afstroomt en het model verlaat. De ingeschatte weerstand hiervan is initieel gesteld op een constant waarde van 30 dagen, deze is na de kalibratie vermindert naar 10-20 dagen. In Pleistoceen Nederland is deze verhoogd naar 40 dagen. Verminderde afvoer heeft hier tot effect dat er meer neerslagoverschot beschikbaar is om de te diepe grondwaterstanden te voeden.

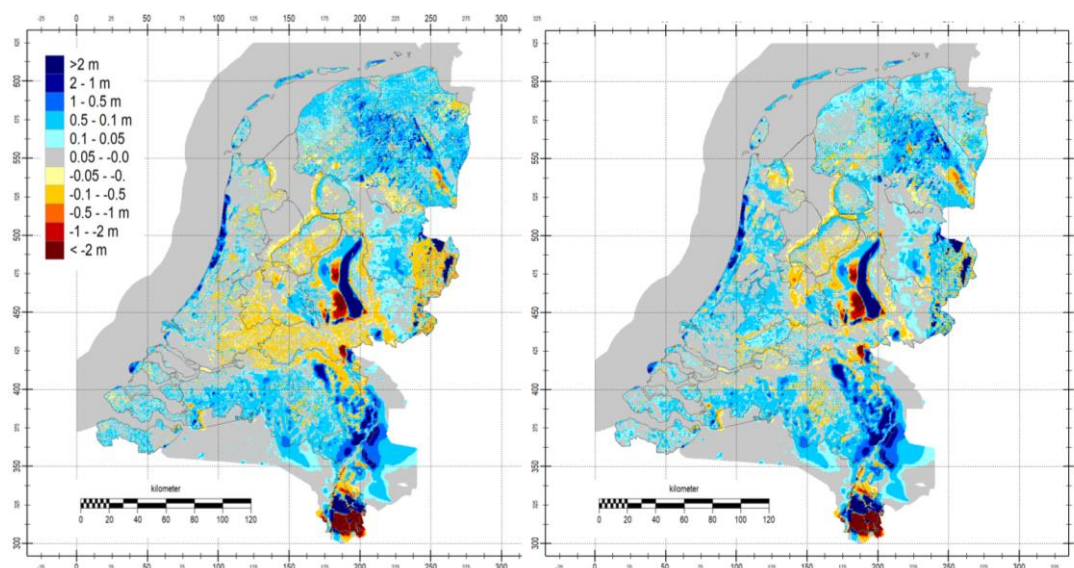
2.4.5.4 GxG

Met het gekalibreerde model zijn de GxG's berekend en vergeleken met de GxG's van het priori-model. Het verschil hier tussen is weergegeven in Figuur 2-27. In blauw zijn de gebieden weergegeven die vernatten, in geel/oranje/rood, de gebieden die verdrogen. Wat opvalt is dat zowel de GHG als de GLG merendeels vernatten in Friesland/Groningen, Veluwe, Salland, en Noord-Brabant. Door de doorgevoerde parameteraanpassingen komen de grondwaterstanden hier gedurende het gehele jaar omhoog.

Een sterke verdroging lijkt op te treden Zuid-Limburg. In werkelijkheid betreft het hier een lokale verbetering van de GxG's in de beekdalen die door een vergroting van de kD (voornamelijk de bovenste delen van de kalkstenen) verlagen. De sterke fluctuatie van de watervoerendheid van de meeste ondiepe model lagen en het aanwezig zijn van schijngrondwaterspiegels, maken dit gebied lastig te modelleren binnen de huidige concepten van MODFLOW2005. Uit recente test berekeningen met MODFLOW6 blijkt dat het aan te raden is om bij een migratie naar MODFLOW6 het onverzadigd doorrekenen expliciet te modelleren.

Midden Nederland was initieel te nat in haar GHG en verdroogt nu. Haar GLG was ook te nat, maar deze blijft min-of-meer hetzelfde. De situatie in Zeeland is omgekeerd, deze was initieel te droog in haar GHG en wordt natter. Haar GLG is ook te droog, maar aan deze situatie verandert na de kalibratie weinig. In Oost-Nederland is de initiële GHG te droog en de GLG te nat. Deze situatie neigt naar een verkleining van de freatische bergingscoëfficiënt, hiermee wordt de GHG namelijk natter en de GLG droger. Dit gebied wordt ook tijdens de kalibratie aangemerkt als een gebied met een zeer lage efficiëntie, of zelfs kleine verslechtering, zie Figuur 2-24.

De bovenstaande resultaten op de GxG zijn afwisselend gunstig en ongunstig. In de gunstige situatie heeft de kalibratie een verbetering aangebracht, in de ongunstige situatie is er eenzelfde situatie gebleven of in een aantal gevallen is die zelfs iets verslechterd. Over het algemeen heeft de kalibratie moeite om de GLG's voldoende te verhogen. Het vergroten van de waterdieptes in dergelijke gebieden kan de infiltratie vanuit de watergangen verder vergroten waardoor GLG's verhoogd kunnen worden.



Figuur 2-27 Berekend effect van de 6e iteratie op de GHG (links) en GLG (rechts).

2.4.6 Conclusie

Uit de kalibratie van het ondergrondmodel kan worden geleerd dat met de nieuwe methode voor kalibratie van submodellen het mogelijk is om het hele LHM niet-stationair te kalibreren binnen acceptabele rekentijden. Uiteindelijk bleek voor de laatste optimalisatiecyclus dat binnen circa een week de gehele kalibratie voor 6 iteraties kan worden uitgevoerd, inclusief de voorbereiding en de aggregatie.

Een verschil ten opzichte van de kalibratie van LHM 4.2 is dat voor LHM 4.3 ervoor gekozen is om de resultaten van submodellen te aggregeren naar grotere geologische eenheden (REGIS). Hierdoor wordt een deel van de aanvankelijk gevonden verbetering in de submodellen teniet gedaan, ten gunste van consistentie binnen geohydrologische eenheden. De resulterende model invoer van LHM 4.3. wordt hierdoor als meer plausibel beoordeeld dan de modelinvoer van LHM 4.2.

De grootschalige optimalisatie van het ondergrondmodel heeft geresulteerd in een set van parameter aanpassingen die op landelijke en supra regionale schaal resulteert in verbeteringen van de berekende residuen in het grondwater. Naast significant verbeterde gebieden komen er regionaal ook gebieden voor die verslechteren, als gevolg van de gevonden set parameters.

Naar verwachting zal verdere analyse, opschoning en verbeterde weging van de meetset in de toekomst leiden tot verdere verbetering van de resultaten. Een duidelijk voorbeeld is te vinden in Oost-Nederland, waar verslechtering in de kalibratie optreedt, omdat enkele meetpunten bij de Stuwwal van Ootmarsum een grotere afwijking kennen en deze punten de optimalisatie van het hele submodel negatief beïnvloeden.

Het verder opsplitsen van de PAWN-eenheden in GeoTOP eenheden, zoals deze gebruikt worden bij de bepaling van de kD- en C-waarden, is ook een mogelijkheid om de methode in de toekomst te verbeteren. De doorlooptijd van de optimalisatie zou hiermee enigszins vertraagd kunnen worden omdat er meer parameters dienen te worden berekend, hoewel het aantal parameters per submodel hierdoor naar verwachting niet heel veel zal veranderen.

3 Aanpassingen van het bodem-water-plant-atmosfeer systeem

3.1 Inleiding

In het bodem-water-plant systeem zijn de volgende aanpassingen verricht:

- De arealen voor berekening zijn gewijzigd op basis van recent afgeleide informatie in het NHI. Binnen het LHM project zijn vervolgens nog enkele aanpassingen doorgevoerd in de berekeningsparameters, op basis van nieuwe informatie uit het NHI, regionale kennis en literatuur van WECR.
- Naar aanleiding van aanpassingen in MetaSWAP die zijn verricht voor het regionale modelinstrumentarium AZURE is gerekend met een nieuwe database voor MetaSWAP in combinatie met de aanpassingen in de modelcode.
- Daarbij zijn ook ingebrachte specifieke instellingen voor zware klei bouwstenen gereset, omdat met de nieuwe database en modelcode dan beter aan de verwachtingen voor berekening van droogteschade wordt voldaan.
- Berekening met zuurstofstress is geïntroduceerd in de nieuwe berekeningen met LHM en er wordt gerekend met een vanggewas.
- Aanvullend zijn (kleine) aanpassingen voor gewassen doorgevoerd, vooral ten behoeve van berekeningen van maatregelen voor DP Zoetwater. Ook is een fout hersteld in de parametertoekenning van glastuinbouw.
- Diverse specifieke parameters voor MetaSWAP zijn beoordeeld en herzien, onder meer om meer realistisch geachte droogteschade en natschade te modelleren. Daarbij zijn ook recente inzichten meegenomen die zijn opgedaan bij vergelijking van MetaSWAP uitvoer met informatie uit satellietbeelden (Meshgi et al, 2022).

Naast de wijzigingen in de parameters van MetaSWAP, die beschreven zijn in dit hoofdstuk, zijn wijzigingen in de modelcode doorgevoerd. Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 5 en bijlage A. Aangezien de instellingen in MetaSWAP binnen LHM 4.3 ook van meerwaarde kunnen zijn voor andere modeltoepassingen, zijn in bijlage E technische aanwijzingen gegeven over de uiteindelijk toegepaste modelinstellingen in MetaSWAP.

3.2 Berekening

3.2.1 Aanpassing berekend areaal

In LHM 4.2 is de beregeningskaart geactualiseerd op basis van inzichten uit de droogtestudie Hoge Zandgronden (Janssen et al., 2022). Op basis van feedback van regionale partijen in het kader van DP Zoetwater bleek deze beregeningskaart bij nader inzien in het westen van Nederland niet plausibel te zijn, omdat er te weinig modelcellen potentieel berekend konden worden, terwijl voor de zandgronden werd ingeschat dat de berekende berekening in LHM 4.2 te hoog werd gesimuleerd. Recent is binnen het NHI door KnowH2O en Eleaf gewerkt aan een actuele kaart voor berekening, op basis van informatie uit satellietbeelden en gegevens over registratie van berekening, zoals bekend bij WECR. Aan documentatie van deze kaart wordt nog gewerkt, de kaart is in overleg met het projectteam NHI al wel toegepast in de nieuwe LHM-versie.

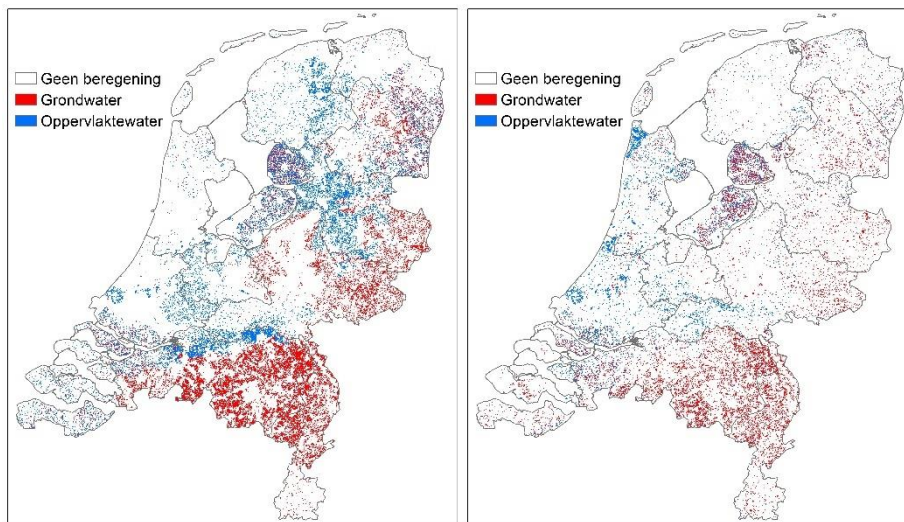
In Figuur 3-1 zijn de locaties weergegeven waar beregend kan worden in LHM 4.2 en LHM 4.3, gebaseerd op de kaart uit het NHI. Deze kaart is verkregen door de polygonenkaart van NHI (op perceelsniveau) te verrasteren, en er voor te zorgen dat bij de verschaling naar 250 m cellen het beregend areaal tot circa 5% verschil beperkt blijft, zowel voor heel Nederland, als voor de afzonderlijke provincies. Op de resulterende kaart zijn daarna onderstaande aanpassingen verricht (in onderstaande volgorde) ten opzichte van de kaart die is gebaseerd op informatie in het NHI:

- Voor alle kapitaalintensieve gewassen in LHM is beregning toegekend:
 - LGN-code 7 (boomteelt)
 - LGN-code 9 (boomgaard)
 - LGN-code 10 (bollen)
 - LGN-code 21 (fruitkwekerijen)
 - LGN-code 22 (sportvelden)

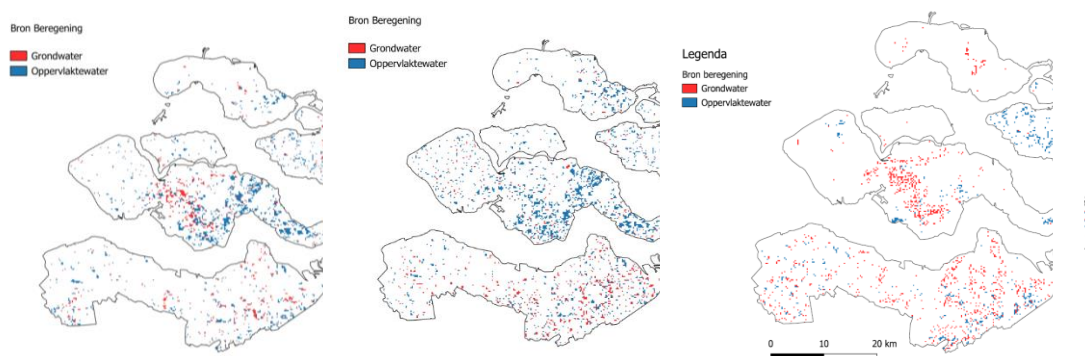
Voor deze gewassen is in het Pleistocene deel van Nederland beregning uit grondwater toegekend; in het Holocene deel van Nederland uit oppervlaktewater.

- Alle beregning van aardappelen die uit oppervlaktewater werden beregend, zijn gecorrigeerd naar beregning uit grondwater, aangezien in de praktijk wegens kans op bruinrot vooral beregning uit grondwater plaats vindt. In werkelijkheid geldt er alleen een landelijk verbod voor pootaardappelen en is een verbod voor andere aardappelen alleen in bepaalde gebieden van toepassing, maar uit praktische overwegingen (e.g. het LGM maakt geen onderscheid tussen typen aardappelen) is landsdekkend voor grondwater als beregeningsbron voor aardappelen gekozen.
- Zeeland is apart behandeld omdat de kaart uit het NHI mede door tussentijdse feedback van dit waterschap niet voldoende plausibel werd geacht. Bekende patronen van beregning uit grondwater in 'zoete' gebieden, zoals vooral vanuit vergunningsgegevens bekend is, werden hierin onvoldoende herkend. Daarom is op de volgende wijze invoer aangemaakt:
 - In Zeeland zijn de bekende grondwateronttrekkingslocaties voor landbouw verrasterd naar de 250 m resolutie van het LHM. Hier is beregning uit grondwater aan toegekend.
 - Beregning uit oppervlaktewater volgens de NHI-kaart is gehandhaafd voor gebieden waar wateraanvoer mogelijk is. Dit betreft Tholen, St. Philipsland, de Reigerbergsche Polder en de Eerste Bathpolder.
 - Voor de overige gebieden is voor beregning uit oppervlaktewater vertrouwd op een overzicht van vergunde onttrekkingen van het waterschap. Bij gebrek aan gedetailleerdere informatie zijn de cellen waarin zich een dergelijke vergunde onttrekkingslocatie bevindt toegevoegd aan het areaal dat beregend wordt vanuit oppervlaktewater.

De resulterende invoerkaart voor het LHM (Figuur 3.1) toont duidelijke verschillen met de kaart die gebruikt is in LHM 4.2. Het beregende areaal in LHM 4.3 is aanzienlijk verkleind, t.o.v. LHM 4.2 (364000 ha vs 642000 ha). Dit is overeenkomstig de verwachtingen; bij de rapportage van LHM 4.2 was al geconstateerd dat met het gebruik van de nieuwe beregeningskaart te veel werd beregend in het model (Janssen et al, 2022). De doorgevoerde wijzigingen sluiten verder goed aan bij de hierboven genoemde constatering dat in LHM 4.2 het beregend areaal in LHM 4.2 te klein was in het westen en juist te groot in de zandgebieden.



Figuur 3-1 De beregeningskaart in LHM 4.2 (links) en LHM 4.3 (rechts). Rood is berekening uit grondwater, blauw uit oppervlaktewater.



Figuur 3-2 De beregeningskaart in Zeeland in LHM 4.2 (links), de resultaten zoals die op basis van de informatie in NHI zou zijn afgeleid (midden) en de kaart die is doorgevoerd in LHM 4.3 (rechts). Rood is berekening uit grondwater, blauw uit oppervlaktewater.

3.2.2 Aanpassing triggers berekening

Om te komen tot meer realistisch geachte beregeningsdebieten in het model waren de triggers voor berekening aangepast in LHM 4.2 (Janssen et al, 2022). Aanvankelijk zijn in de eerste testberekeningen met LHM 4.3 de instellingen voor berekening hetzelfde gehouden als in LHM 4.2, maar op basis van de analyse van de berekeningsresultaten is besloten een aantal instellingen die zijn gerealiseerd in LHM 4.2 weer ongedaan te maken. Bovendien zijn nog enkele aanscherpingen gerealiseerd op basis van feedback vanuit DP Zoetwater en op basis van recente literatuur van WECR.

Uit de eerste testberekeningen voor bijvoorbeeld het zeer droge jaar 2018 bleek bijvoorbeeld dat in de provincie Noord-Brabant circa 70 Mm³ per jaar berekend wordt, terwijl bekend is dat de berekening in een zeer droog jaar in de praktijk daar meer dan 100 Mm³ per jaar bedraagt. Ook de berekening in gemiddelde jaren werd als te laag beoordeeld. Uit informatie uit het bedrijvennet (WECR, 2022) blijkt bijvoorbeeld dat de berekening van alleen de akkerbouw-, groente- en voedergewassen in Nederland voor een langjarig gemiddelde situatie minimaal ca 67 Mm³ / jaar bedraagt. Op basis van deze eerste indicaties is besloten de berekeningstriggers grotendeels terug te zetten naar de instellingen in LHM 4.1.

Na bestudering van de tussenresultaten met de nieuwe beregeningskaart en herstelde beregeningstriggers, en vergelijking met resultaten van andere studies waarin beregening een rol speelt (Stokkers et al, 2022 en Querner en Schunselaar, 2021) zijn uiteindelijk de volgende aanpassingen in beregeningsparameters doorgevoerd:

- Terugzetten van de beregeningsperiode (in het bestand 'luse_svat.inp'), conform de instellingen in LHM 4.1 (zie tabel 3-1). Dit leidt er toe dat (ten opzichte van LHM 4.2) vaker wordt beregend.
- De droogtestress waarmee de beregening wordt getriggerd (de 'pressure head begin sprinkling', in het invoerbestand luse_svat.inp⁵) is gewijzigd. In LHM 4.2 was deze voor landbouwgewassen 0.85 (m.u.v. graan dat niet beregend wordt). Deze waarde is aangepast naar 0.925, mede op basis bestudering van toetsing van aannames in andere modelstudies (Querner en Schunselaar, 2022).
- Bij laag salderende gewassen zoals gras, (consumptie)aardappelen, bieten, en maïs is de beregeningsgift in overeenstemming gebracht met de gemiddelde langjarige gift die uit analyse van informatie uit de bedrijveninformatie van WEER naar voren komt (Stokkers et al, 2022).
- Op basis van informatie die in regionale sessies voor DP Zoetwater naar voren kwam is de beregeningsintensiteit van boomgaard, fruitteelt en boomteelt verhoogd van 3.6 naar 5 mm/dag. Deze verhoging was al eerder doorgevoerd bij modelberekeningen voor DP Zoetwater fase 2 en onderbouwd op basis van regionale studies en expertkennis van Waterschap Rivierenland (Hunink et al., 2018). De combinatie van parameters voor beregeningsgift en beregeningsperiode (zie tabel 3.1) is hierin mee in overeenstemming gebracht.
- Op basis van informatie die naar voren kwam in regioessies van DP Zoetwater is de beregeningsgift voor glastuinbouw verhoogd naar 10 mm. Om de watervraag in deze gebieden verder te verbeteren zijn ook aanvullende aanpassingen verricht in de schematisering van de MetaSWAP-eenheden. Dit wordt in de volgende paragraaf toegelicht.

⁵ Als dit getal tussen de 0 en 1 ligt, wordt beregening getriggerd door droogtestress in plaats van door de drukhoogte. Als het getal hoger is, wordt al bij minder droogtestress beregend.

Tabel 3-1: Parameters voor beregeningsperiode en beregeningsgift per gewas in LHM 4.2 en 4.3.

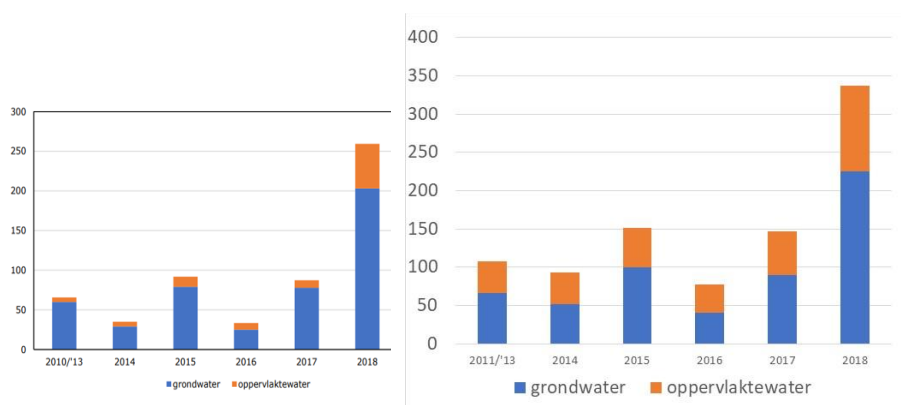
Code	Gewas in LHM	Beregeningsperiode (dag)		Beregeningsgift (mm)	
		LHM 4.2	LHM4.3	LHM 4.2	LHM 4.3
1	Gras	14	10	20	16
2	Mais	10	7	20.	22
3	Aardappelen	10	7	20.	21
4	Bieten	10	7	20.	20
5	Granen	0	0	0.	0.
6	Overige	10	7	20.	14
7	Boomteelt	10	7	35.	35
8	Glastuinbouw	1	1	10.	10.
9	Boomgaard	10	7	25.	35
10	Bollen	4	2	10.	10.
11	Loofbos	0	0	0.	0.
12	Naaldbos	0	0	0.	0.
13	Moeras	0	0	0.	0.
14	Duinvegetatie	0	0	0.	0.
15	Kale	0	0	0.	0.
16	Water	0	0	0.	0.
17	Natuurlijk	0	0	0.	0.
18	Stedelijk	0	0	0.	0.
19	Donker	0	0	0	0
20	Heidevegetatie	0	0	0	0
21	Fruitlekerijen	10	7	35	35
22	Sportvelden	10	7	25	25
23	Onbemest gras	14	10	20	20
24	Mais met groen	10	7	20	20
25	Aardappel vroeg	10	7	20	20

3.2.3 Gevolgen van de wijzigingen van berekening

Tabel 3-2 geeft voor een jaar met extreme beregeningsgiften (2018) het verschil weer tussen totale beregeningsgift voor LHM 4.2 en LHM 4.3. Te zien is dat LHM 4.3 fors minder berekening berekent. Figuur 3-3 geeft een vergelijking van het LHM 4.3-resultaat met gerapporteerde beregeningshoeveelheden in het bedrijveninformatienet van WECR. Uit deze vergelijking blijkt dat de LHM-totalen wat hoger liggen dan de door WECR gerapporteerde getallen. De beregeningshoeveelheden uit grondwater komen daarbij redelijk goed overeen met de WECR-getallen of zijn wat hoger; de beregeningshoeveelheden uit oppervlaktewater zijn hoger dan de getallen van WECR. De jaar-tot-jaar dynamiek in de beregeningshoeveelheden komt goed overeen tussen beide datasets, wat ook verwacht kan worden aangezien deze dynamiek voornamelijk door de meteorologische condities wordt bepaald.

Tabel 3-2 Beregeningsgift [Mm3/jaar] in 2018 uit oppervlaktewater en grondwater, voor LHM 4.2 en LHM 4.3.

	Oppervlaktewater	Grondwater
LHM 4.2	134	295
LHM 4.3	112	226



Figuur 3-3 Links: verbruik van grondwater en oppervlaktewater voor gewasberegening in Nederland in miljoen m3 per jaar, 2010 – 2018. Bron figuur: bedrijveninformatienet van Wageningen Economic Research. Rechts: verbruik van grondwater en oppervlaktewater voor gewasberegening in Nederland in miljoen m3 per jaar zoals berekend door LHM 4.3, 2011-2018.

3.3 Aanpassingen parametrisatie glastuinbouw

In de schematisering van de glastuinbouw is de wortelzonedikte t.o.v. LHM 4.2 gewijzigd van 40 cm naar 0.05 cm. Bij herziening van de wortelzonekaart in LHM 4.2 was de waarde niet correct overgenomen; dit is nu hersteld naar de bedoelde waarde.

De aanpassing van de wortelzonedikte geeft geen noemenswaardige verandering van de HG3 / LG3 en verdamping op landelijke schaal.

Voor de volledigheid wordt hieronder een compleet overzicht van de gehanteerde parameters voor glastuinbouw gegeven, aangezien de informatie over deze parameters verspreid is weergegeven in verschillende rapportages van LHM.

De schematisering van glastuinbouw in het LHM is gericht op simulatie van de watervraag voor irrigatie, rekening houdend met de waterreservoirs, die zijn gemodelleerd als vijverbekken. Glastuinbouw wordt in het model als volgt geschematiseerd:

- Het lokale waterreservoir heeft een inhoud van 100 mm, dit wordt geschematiseerd als plasvorming, met een pondingdrempel van 0.1 m (in svat2swnr_roff.inp).
- De beschikbare opslag in de ondergrond is 10 mm.
- Zodra het reservoir leeg is en de bodem onverzadigd raakt, wordt een beregeningsgift van 10 mm toegekend, bij een trigger voor beregening van -0.01 (in luse_svat.inp).

Alle SVAT-eenheden met glastuinbouw hebben verder dezelfde kenmerken meegekregen, zodat het model onafhankelijk is van de lokale grondsoorten. De volgende parameters zijn toegekend:

- De bodemeenheid is 77;
- De schalingsfactor voor de bodemfysica is op 1.0 gezet (in `uscl_svat.inp`)
- De wortelzonedikte is gezet op 0.05 cm. De gewasbedekking staat op 1.0 (in `fact_svat.inp`);
- De gewasfactor staat op 0.8 (in `fact_svat.inp`);

De Feddes parameters p1 en p2 zijn op 1.0 m gezet en de parameters p3 en p4 op resp. -0.29 en -0.29 m.

3.4 Aanpassing MetaSWAP-database en wijziging berekening rond storende lagen

3.4.1 Overzicht beschrijving aanpassing

Voor MetaSWAP is een aangepaste database gemaakt en zijn aanpassingen in de modelcode verricht (Van Walsum, 2022). De aanleiding voor deze aanpassingen was het verzoek van het regionale modelconsortium AZURE om beter om te kunnen gaan met storende lagen in ondiepe profielen en bypassflow in kleischeuren. Hiervoor is in opdracht van AZURE een (optionele) functie in MetaSWAP toegevoegd, waarbij rekening kan worden gehouden met een fractie voor bypassflow, die direct kan doorstromen van de onverzadigde zone en versneld tot grondwateraanvulling kan komen (Kok et al, 2022). De fractie kan nu afhankelijk worden gemaakt van de verzadigingsgraad van de wortelzone. Hieronder volgt eerst een samenvatting van deze ontwikkeling.

Tijdens de uitvoering van de werkzaamheden voor AZURE is geconstateerd dat MetaSWAP niet goed omgaat met storende lagen in ondiepe profielen. Wanneer water percoleert en een storende laag bereikt met zeer lage doorlatendheid, blijkt namelijk dat in MetaSWAP de grenzen van de database worden bereikt. In de berekening wordt dan een noodprocedure in gang gezet. Hierbij wordt overdreven overdruk gecreëerd in de betreffende box in MetaSWAP, waardoor het water alsnog door een storende laag heen wordt gedrukt. Bovendien werd de drukhoogte nadien op een evenwichtsprofiel gezet, in plaats van op een waarde overeenkomend met verzadiging. Dit is fysisch niet plausibel en leidt in de berekeningsresultaten tot te veel vernatting onder de storende laag, en te weinig vernatting boven deze laag.

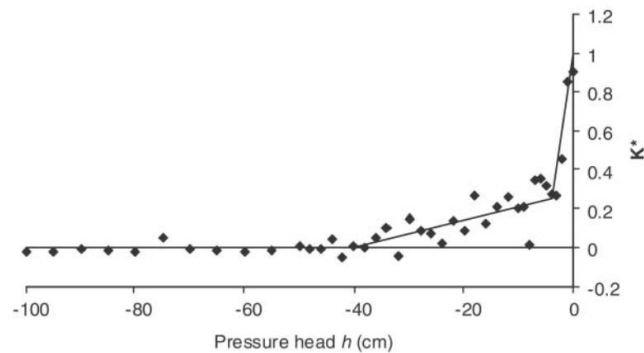
In een aangepaste versie van MetaSWAP voor AZURE is dit verbeterd door in de modelcode ervoor te zorgen dat in deze situatie het overschot aan water van onderen naar boven wordt herverdeeld naar de bovenliggende boxen. Daarbij wordt eerst een box tot verzadiging gevuld, waarna de bovenliggende box wordt gevuld. Als de bovenste box ook verzadigd is en ook de pondingdrempel benut is, stroomt het resterende overschot direct oppervlakkig af. Geconcludeerd is dat de aanpassingen hebben geleid tot verbeteringen in MetaSWAP voor storende lagen en besloten is deze wijzigingen door te voeren in de nieuwe versie van MetaSWAP. Voor meer details wordt verwezen naar Kok et al. (2022) en de *MetaSWAP Implementation proposal*- en *Testreports 71* (Van Walsum, 2022).

De bovengenoemde aanpassingen in MetaSWAP leidden aanvankelijk tot onrealistisch veel run-off. Na nadere bestudering en literatuuronderzoek kwam naar voren dat het nodig is om de gebruikte k-h relaties van zware gronden nabij verzadiging te herzien. Ook recente validatie van MetaSWAP-resultaten aan de hand van satellietwaarnemingen wijzen op benodigde aanpassing van bodemparameters, om correcte berekening van zuurstofstress bij met name kleigronden te kunnen realiseren.

Al eerder was binnen NHI geconstateerd dat het gedrag in kleigronden tot onjuiste berekeningsresultaten leidde; in 2016 zijn daarom enkele afwijkende bodembouwstenen vervangen door bestaande lichte kleibouwstenen (Bos-Burgering et al, 2018). Dit was destijds een pragmatische stap en geen daadwerkelijke verbetering van de processen in de modellering.

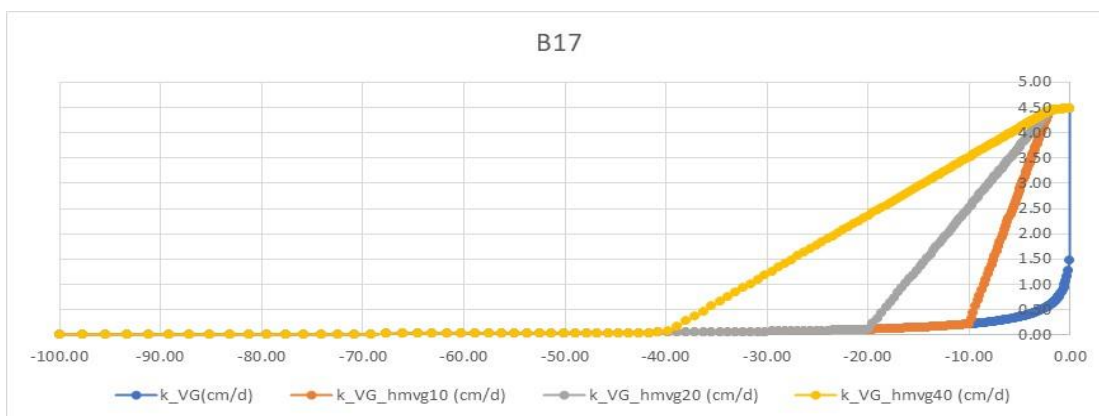
Voor het genereren van de bodemdatabase van MetaSWAP wordt gebruik gemaakt van Van Genuchten-relaties. Uit literatuuronderzoek blijkt dat Van Genuchten zelf al eerder heeft gewezen op wiskundige beperkingen van de originele Van Genuchten relaties voor de kleigronden, als gevolg van niet-lineariteiten nabij verzadiging⁶. Die worden door Van Genuchten erkend als zijnde een artefact. Bij Richards modellen kan dit een probleem vormen voor de stabiliteit. Voor MetaSWAP is het gevolg dat de Ksat-waarde niet wordt bereikt in de percolatie-tabellen van de database. Daardoor ontstaat overdreven veel run-off. Voor het aanpakken van het stabiliteitsprobleem heeft Hydrus een optie die ook in SWAP beschikbaar is. Maar die beperkt zich tot de laatste twee centimeter van de k-h relatie.

Door Schaap en Van Genuchten (2006) is een meer fundamentele methode voorgesteld om de k-h relaties in de Van Genuchten-relaties te herzien (zie Figuur 3-4). Daarbij blijft het gevoelige midden-traject van de k-h curve ongewijzigd en wordt alleen de k-h relatie nabij verzadiging aangepast vanaf -40 cm. De aanpassing uit 2006 pakt het probleem van het k-h artefact aan op een meer omvattende manier dan de stabiliteit fix in Hydrus en SWAP. Dat heeft ook gevolgen voor de inhoudelijke kant van de simulatie. Bij gebruik van de originele Van Genuchten parameterisering moet het model voor kleigronden namelijk onrealistisch vaak naar verzadiging om te kunnen percoleren. Daardoor ontstaat kunstmatig veel zuurstofstress bij kleigronden. Implementatie van deze methode heeft voor MetaSWAP en SWAP dus meervoudige gevolgen, en werkt ook door in andere modellen voor waterkwaliteit (denitrificatie in het ANIMO-model).



Figuur 3-4 Parameterisering van k-h relaties in Schaap en Van Genuchten (2006) die in vereenvoudigde vorm is gebruikt voor het aanmaken van de nieuwe MetaSWAP database. De k-schaal is log-getransformeerd.

⁶ Bron: https://www.pc-progress.com/Documents/RVGenugten/Air_entry_option.pdf



Figuur 3-5 Onderzochte opties voor aanpassing van de k-h relatie van origineel Van Genuchten (blauw), met een vereenvoudigde implementatie van Schaap en Van Genuchten (2006). In LHM 4.3 is gekozen voor de optie met aanpassing vanaf -10 cm (oranje), vooruitlopend op mogelijke herziening van bodemfysische parameters van zwaar getextureerde gronden.

De aangepaste methode is geïmplementeerd in de voorbereiding voor het aanmaken van de database van MetaSWAP. Dit resulteert in specifieke bodembouwstenen in aanpassingen nabij verzadiging. Daarbij is de methode van Schaap en Van Genuchten vereenvoudigd tot een aanpassing op een lineaire schaal tussen een drukhoogte van -10 en -2 cm en een vrijwel constante waarde (K_{sat}) tussen -2 en 0 cm, zie Figuur 3-5. De aanpassing van Schaap en Van Genuchten tussen -40 en -10 cm (Figuur 3-4) is achterwege gelaten omdat daarvoor aangepaste analytische Van Genuchten parameters nodig zijn (op log-schaal). Dat is een veel meer omvangrijke actie dan de hier doorgevoerde noodreparatie die primair gericht is op het terugdringen van de overdreven runoff in de berekeningsresultaten. Bij toekomstige herziening van de Staringreeks bouwstenen kan worden overwogen de analytische formules van Schaap en Van Genuchten (2006) wel uit te voeren.

Bij de aanpassing door Schaap en Van Genuchten (2006) is te zien (Figuur 3-4) dat een sterke stijging is geïntroduceerd, vanaf -2 cm. Dit is bedoeld om de invloed van macroporiën op de doorlatendheid te simuleren. Dit is bewust niet toegepast in het LHM, omdat het niet overeenkomt met de manier waarop de macroporiën in MetaSWAP zijn geschematiseerd, namelijk als apart van de bodemmatrix. Het effect van die extra doorlatendheid wordt binnen LHM gesimuleerd via de bypass-optie. Voor meer details van de wijze waarop dit is verwerkt en de specifieke criteria die zijn toegepast in de voorbereiding van MetaSWAP wordt verwezen naar de *Implementation proposal* en *Testreports 76* van MetaSWAP (Van Walsum, dec 2022).

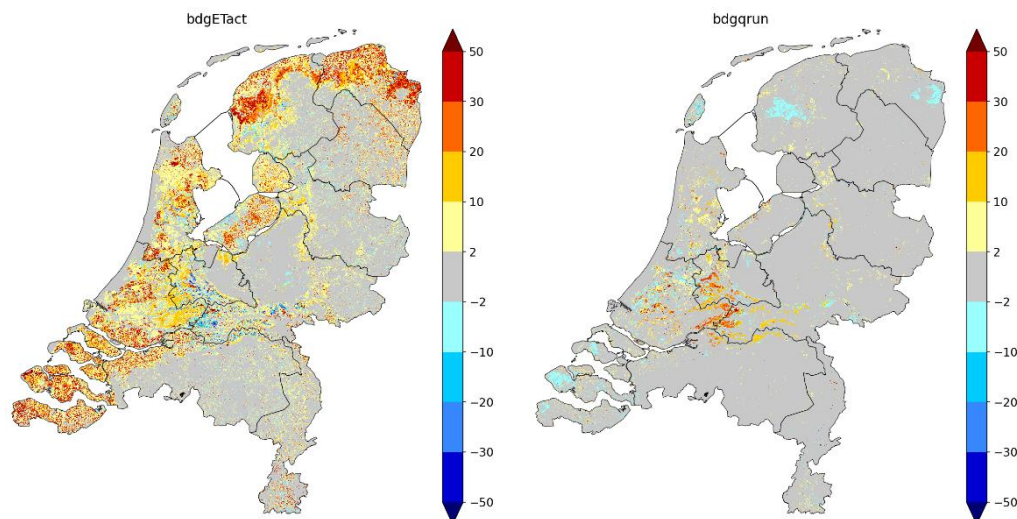
Opgemerkt wordt dat in de aangepaste procedure eerst de eerder doorgevoerde reparatie van kleibouwstenen in LHM 3.4⁷ zijn hersteld. Deze reparatieactie in 2018 had toen voornamelijk als doel om de berekende verdampingsreductie beter aan te laten sluiten bij patronen in satellietdata. Daarom wordt aanbevolen op korte termijn de nieuwe berekeningsresultaten met de aangepaste MetaSWAP database opnieuw te vergelijken met satellietbeelden, om te kijken of de uitgevoerde wijzigingen tot betere overeenstemming leiden.

Voor meer achtergrondinformatie over de aangepaste MetaSWAP database in combinatie met de nieuwe modelcode van MetaSWAP, waarbij beter wordt omgegaan met storende lagen, wordt verwezen naar de rapportage voor AZURE (Kok et al, 2022) en het bijbehorende *Implementation proposal* en *Testreport 71* (Van Walsum, 2022).

⁷ In LHM 3.4 zijn ondergrondbouwstenen O12 vervangen door O11, en O13 door 12. Daarnaast vervanging van bovengrond bouwsteen B11 door B10.

3.4.2 Gevolgen van de wijzigingen

In Figuur 3-5 is het effect van de hierboven genoemde wijzigingen in MetaSWAP weergegeven voor de berekende verdamping en de surface run-off. Uit de figuur is af te leiden dat de verdampingsreductie aanzienlijk is afgenomen op de kleigronden. Dit is in de gewenste richting, omdat bekend is dat de verdampingsreductie in kleigronden tot nu toe als te hoog is beoordeeld. Nadere vergelijking van de berekende verdamping met patronen van satellietbeelden is gewenst om dit verder te verifiëren. Tegelijkertijd is de run-off in beperkte mate gewijzigd, waarbij zowel toenames als afnames waarneembaar zijn. Dit is te verklaren doordat bij de aanpassingen voor AZURE de resultaten van MetaSWAP voor verschillende bodemeenheden zoveel mogelijk gelijk zijn gehouden aan de rekenresultaten van SWAP.

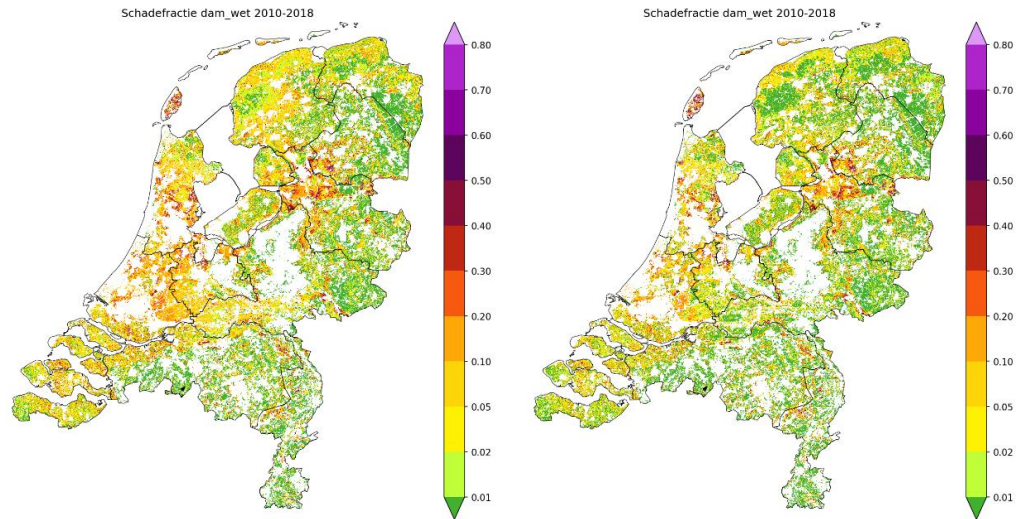


Figuur 3-5 Effect van de aanpassingen in de MetaSWAP tabel en modelcode op de berekende verdamping (links) en de run-off (rechts) voor de periode 2010-2018, in mm. Rode kleuren duiden op meer verdamping in de ontwikkelversie van LHM 4.3, resp. meer run-off.

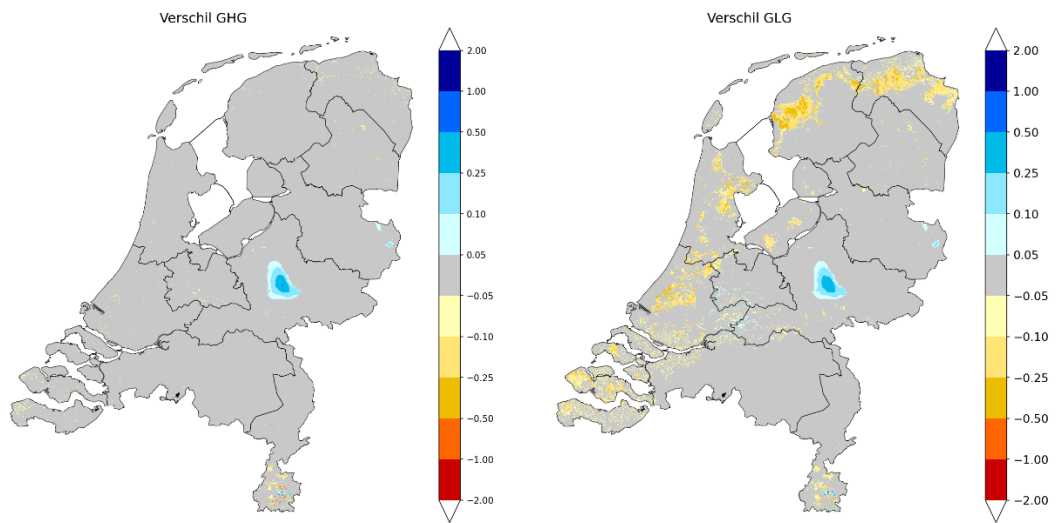
De aanpassingen in MetaSWAP hebben niet alleen invloed op de berekende verdamping, en daarmee de berekening van de droogteschade, maar eveneens op de natschade. In Figuur 3-6 zijn de berekende natschades weergegeven voor LHM 4.2 en voor de tussenversie met (alleen) de wijzigingen van de database en het rekenhart van MetaSWAP. Zie ook de uitleg over berekening van natschade verderop in dit hoofdstuk.

De berekeningsresultaten laten zien dat de natschade door de aanpassingen in de berekeningsmethode van MetaSWAP voor kleigronden sterk is gereduceerd, soms met een factor 1/3. Bekend is (onder meer uit de Waterwijzer Landbouw) dat de natschade tot op heden waarschijnlijk te hoog wordt berekend in de kleigronden, dus dat de aanpassingen in de gewenste richting zijn. Opgemerkt dat wel is besloten – mede op basis van de tussenresultaten van de landbouwschades – nog verdere aanpassingen te verrichten in de bodemparameters van MetaSWAP, waardoor de berekende schade verder wijzigt. Dit wordt in de volgende paragrafen beschreven.

In Figuur 3-7 zijn de effecten van de aanpassingen in de database en rekencode van MetaSWAP weergegeven op de berekende GHG en GLG. De verlaging van de GLG is conform de verwachting, en een gevolg van de hogere verdamping. De GHG-resultaten worden praktisch niet beïnvloed door de aanpassingen. In de beïnvloede gebieden blijven de grondwaterstanden onverminderd hoog, ook bij wijziging van de run-off. Opvallend zijn de wijzigingen in de Veluwe; hier is een verhoging van zowel de GLG als GHG waarneembaar die niet werd verwacht. Na analyse blijkt dat in de testsom onbedoeld ook een aanpassing in de bossen op de Veluwe is meegenomen, dit effect kan hier dus worden genegeerd.



Figuur 3-6 De natschade van landbouwgewassen (eenheid: fractie van potentiële opbrengst) in LHM 4.2 (links) en met de beschreven aanpassingen in de database en in de code van MetaSWAP (rechts).



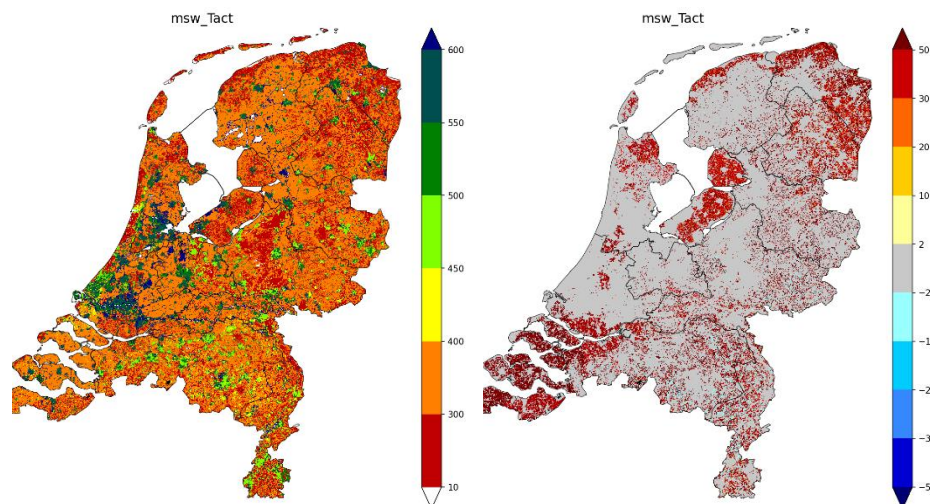
Figuur 3-7 Effect van de aanpassingen in de MetaSWAP database en de code van MetaSWAP, weergegeven als veranderingen in GHG (links) en GLG (rechts) voor de periode 2010-2018 (verandering in meter). De blauwe vlek op de Veluwe blijkt een onbedoeld effect en kan hier worden genegeerd.

3.5 Introductie van vanggewas

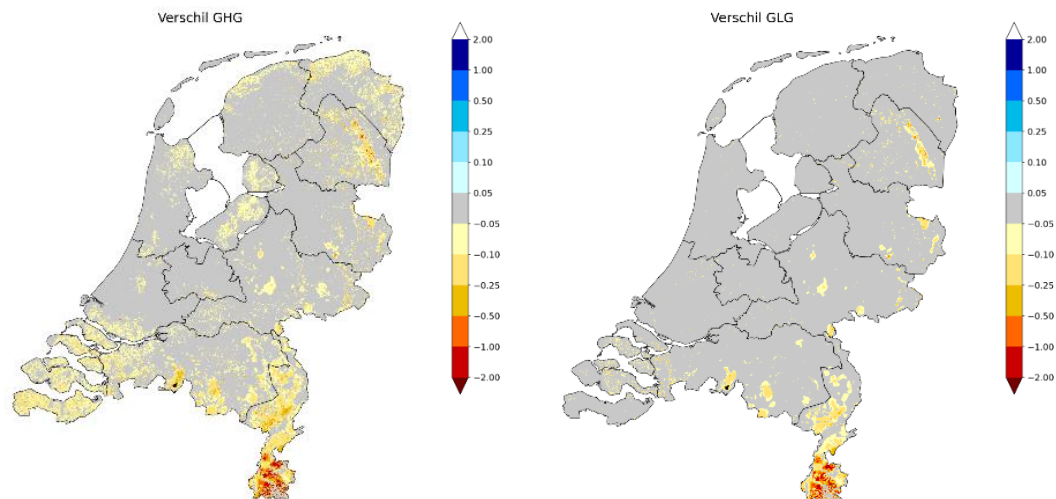
Op basis van ervaringen in de Waterwijzer Landbouw is aangeraden om te rekenen met een vanggewas voor de winter en het vroege voorjaar (pers. communicatie Martin Mulder, 2021). Het in de praktijk toepassen van een vanggewas is inmiddels zelfs een wettelijke verplichting. Deze ontwikkeling is gerealiseerd binnen MetaSWAP in het kader van DPZW (Pouwels et al, 2022) en in LHM 4.3 als wijziging doorgevoerd in het landgebruik. De introductie van een vanggewas sluit ook aan bij de wens om in waterkwaliteitsberekeningen in het Landelijk waterkwaliteitsmodel (LWKM) met vanggewassen te kunnen rekenen. Daarnaast wordt door de introductie van een vanggewas voorkomen dat te hoge zuurstofstress wordt berekend. Het vanggewas zorgt namelijk voor drogere condities in het voorjaar, waardoor er in het voorjaar geen onrealistisch hoge zuurstofstress optreedt. Voor de wijze van implementatie van het vanggewas in LHM wordt verwezen naar Pouwels et al, 2022. De belangrijkste kenmerken en resultaten zijn uit dit memo overgenomen en hieronder samengevat.

Voor de implementatie van het vanggewas is de invoer van MetaSWAP uitgebreid met de gewasfile vanggewas.crp. Verder is in de file luse_svat.inp gespecificeerd met welk landgebruikstype wordt geroteerd. Het vanggewas zelf wordt nader beschreven als uitbreiding in de file vg2crop_svat.inp. In deze file is in navolging van de Waterwijzer Landbouw gespecificeerd dat het vanggewas 15 dagen na (de oogst van) het hoofdgewas begint te groeien, en één dag voordat het hoofdgewas (in het volgende jaar) wordt gezaaid (of gepoot) wordt gestopt.

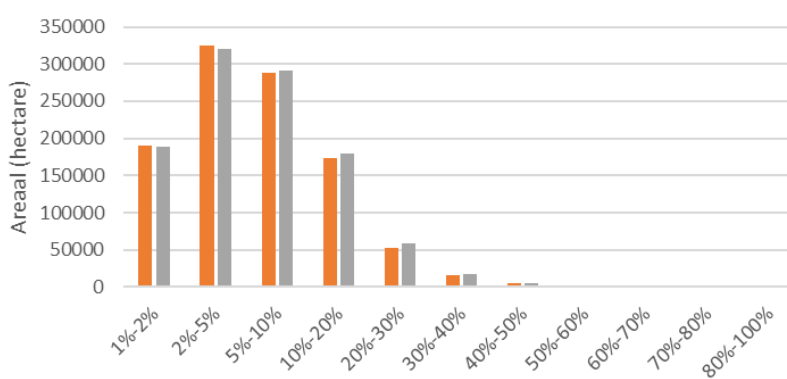
Door de implementatie van een vanggewas in de winter en het vroege voorjaar zal er in het winterhalfjaar meer verdamping plaatsvinden (Figuur 3.8), waardoor grondwaterstanden zakken (figuur 3.9) en droogteschade iets kan toenemen (Figuur 3.10). In Zuid-Limburg daalt de grondwaterstand sterker dan in de rest van het land, omdat hier relatief weinig oppervlaktewatermiddelen aanwezig zijn die het effect dempen. Op de Veluwe (met ook weinig ontwateringsmiddelen) is dit effect minder zichtbaar omdat het aandeel landbouwgrond daar beperkter is daardoor het effect relatief beperkt is.



Figuur 3-8 Berekende langjarig gemiddelde actuele transpiratie (mm/jaar) in de uitgangssituatie (links) en de wijziging van transpiratie na introductie van het vanggewas (rechts), berekend over de periode 2010-2018.



Figuur 3-9 Effect van implementatie vanggewas op de berekende GHG (links) en GLG (rechts) voor de periode april 2010- april 2018 (wijzigingen grondwaterstanden in meters).



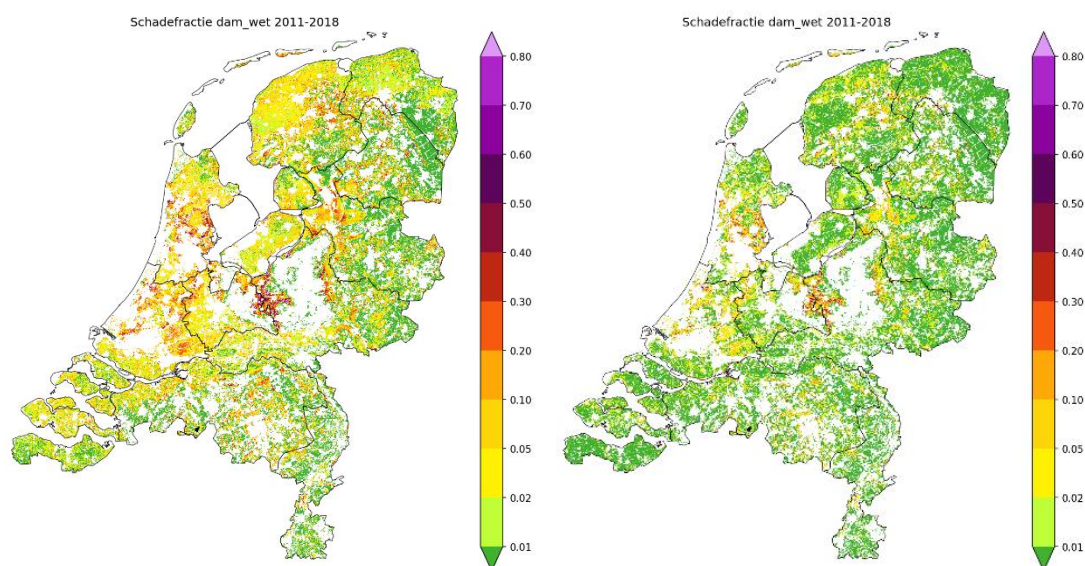
Figuur 3-10 Verdeling van de gemiddelde droogteschade (%) in 2010-2018 over het landbouw areaal in LHM, weergegeven voor de uitgangssituatie (oranje) en de situatie na introductie van het vanggewas (grijs).

3.6 Activeren van de berekening van zuurstofstress

In LHM 4.2 kon worden gerekend met zuurstofstress; in LHM 4.3 is berekening met zuurstofstress daadwerkelijk geïntroduceerd, in combinatie met het vanggewas. De berekening was al mogelijk in eerdere versies van MetaSWAP, en nu samen met de uitsplitsing van gewasschades in de nieuwste MetaSWAP versie in iMOD 5.6 (zie verder paragraaf 5.3) aangezet in LHM 4.3.

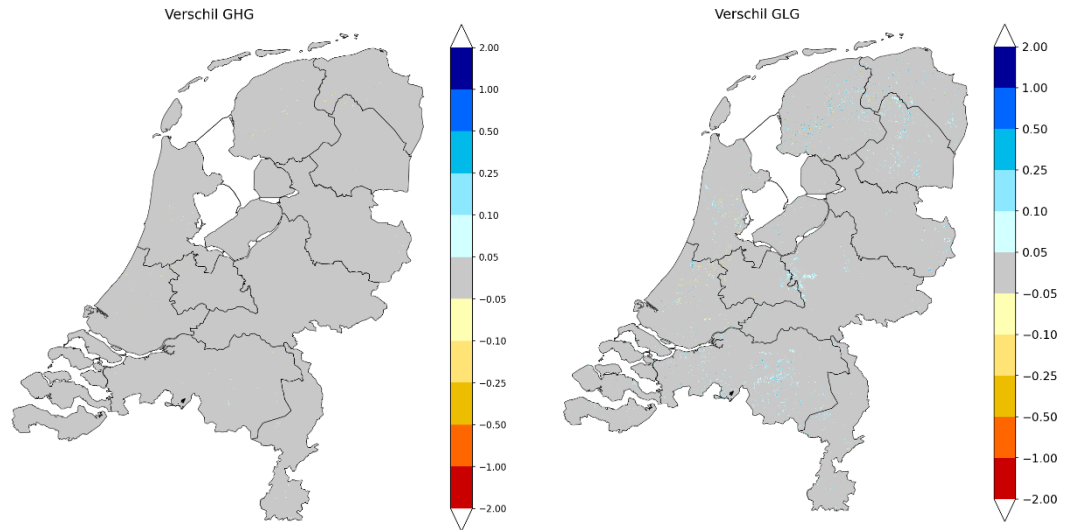
Er is voor natte situaties met de testbank een technische vergelijking gemaakt met SWAP voor de bodemfysische parameters van de nieuwe database, zie Testrapport 82 (Van Walsum, 2023). Tevens is gesimuleerd wat de invloed is van de optie `oxygenstress_mdl = 3` (2 = SWAP), om de hieronder genoemde zelfversterkende vernatting tegen te gaan. Uit het testrapport blijkt tevens dat het middelen van het vochtprofiel over 2 dagen bij de berekening van zuurstofstress (`postmswo2_opt=2`) heel weinig verschil geeft, maar het scheelt wel aanzienlijk in de rekentijd.

Voor droogte wordt in de literatuur wel vaker een waarde van 0.7 voor Jarvis gehanteerd, maar voor zuurstofstress is er geen literatuurwaarde bekend. Het is aannemelijk dat er bij zuurstofstress meer compensatie mogelijk is door de beschikbaarheid van water met een geringe onderdruk in het deel van het profiel waar geen zuurstoftekort is. Het effect van verschillende instellingen van de Jarvis_zuurstof op de natschade is onderzocht. In Figuur 3.11 worden een bandbreedte in de natschade getoond met links een Jarvis_zuurstof van 0.7, die als bovengrens kan worden beschouwd, en rechts een waarde van 0.4, die als ondergrens wordt ingeschat. Na nadere analyse van de overige uitvoer van MetaSWAP bij het gebruik van verschillende waarden voor Jarvis_zuurstof is besloten om in LHM 4.3 verder te werken met een Jarvis_zuurstof waarde van 0.4. Daarbij wordt opgemerkt dat de berekende natschade op voorhand onzeker is en niet gevalideerd is. Validatie van de nieuwe berekeningsresultaten van MetaSWAP onder meer door vergelijking met informatie die is afgeleid uit satellietbeelden is op korte termijn voorzien en zal de uitkomsten verder moeten duiden. Vooruitlopend op deze analyse wordt veiligheidshalve voorlopig aanbevolen om rekening te houden met de berekende bandbreedte in de uitkomsten van de berekende natschade.



Figuur 3.11 Effect van wijziging van de Jarvis_zuurstofstress parameter op de berekenende schade (%) door zuurstofstress in de periode 2011-2018, links Jarvis 0,7; rechts Jarvis 0.4.

In MetaSWAP is bij de implementatie van zuurstofstress de reductie van actuele transpiratie toegevoegd aan de kale bodemverdamping. Hierdoor treedt er geen versterkende terugkoppeling op die ervoor zou zorgen dat zuurstofstress steeds nattere condities veroorzaakt. Dit ook de reden waarom er bij de introductie van zuurstofstress nagenoeg geen effecten te zien zijn in de langjarig berekende GHG en GLG (zie Figuur 3.12). Er is enige stijging waarneembaar, als gevolg van de iets toegenomen run-off.



Figuur 3.12 Effect van het berekenen van zuurstof schade op de gesimuleerde GHG en GLG voor de periode april 2011- april 2018 (wijzigingen grondwaterstanden in meters).

Wanneer gewassen in de modelberekening beïnvloed worden door zuurstofstress zal de transpiratie afnemen (zie Figuur 3-13). De interceptieverdamping neemt ook af doordat de gewassen minder bladeren kunnen produceren en/of kleiner worden. Dat laatste heeft ook tot gevolg dat meer straling de bodem bereikt, waardoor de bodemverdamping iets toeneemt. Maar de afname van de interceptieverdamping zelf wordt niet zoals bij de transpiratiereductie toegevoegd aan de bodemverdamping om zelfversterkende vernatting tegen te gaan. Die extra toevoeging zou namelijk tot gevolg hebben dat de afname van de totale evapotranspiratie volledig gecompenseerd zou worden, wellicht zelfs meer dan dat, wat conceptueel niet te verdedigen is. Het model berekent als gevolg van zuurstofstress een netto afname van de totale evapotranspiratie, zoals het hoort.

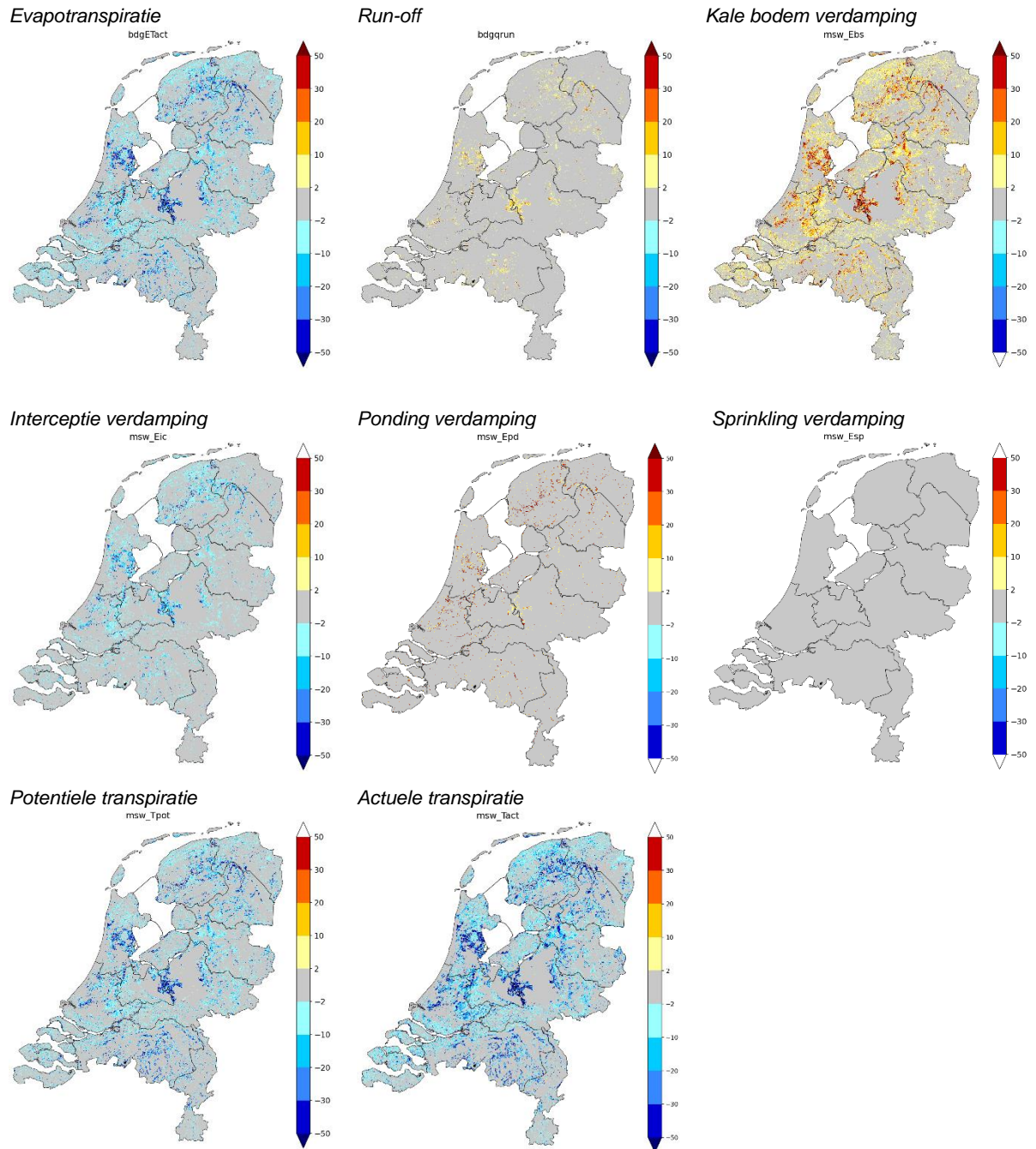
De netto afname van de totale evapotranspiratie resulteert in een lichte stijging van grondwaterstanden. Daardoor ontstaan plaatselijk meer plassen, waardoor meer ponding verdamping en run-off plaatsvindt. Beregeningshoeveelheden en sprinkling verdamping veranderen heel weinig.

De “potentiële” verdamping neemt als gevolg van zuurstofstress af doordat die wordt berekend aan de hand van de (gereduceerde) *actuele* gewasontwikkeling; zo is die term nu eenmaal gedefinieerd, net zoals in SWAP.

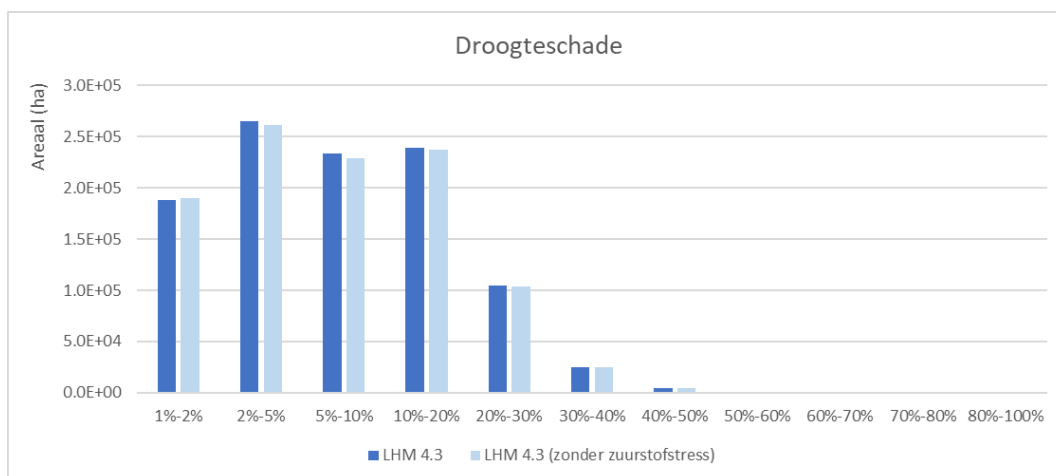
Dat er een netto afname is van de totale evapotranspiratie als gevolg van zuurstofstress duidt erop dat het tegengaan van de zelfversterkende vernatting via het toevoegen van de transpiratiereductie niet 1:1 doorwerkt. Dat komt vooral door het effect op de interceptie dat niet meegenomen wordt in de verhoging van de bodemverdamping. De iets verhoogde run-off gaat deels ook ten koste van de totale verdamping.

Uit Figuur 3.13 blijkt hoe het meenemen van zuurstofstress de berekeningsresultaten in MetaSWAP beïnvloedt. Niet alleen draagt dit direct bij aan de natschade berekeningen, er is ook een terugkoppeling van de berekende zuurstofstress op de berekende droogteschade, zoals te zien is in figuur 3.14.

Gemiddeld gezien neemt de droogteschade in veen-, zand- en kleigronden respectievelijk af met 1.7%, 2.4% en 0.7% bij het rekenen met zuurstofstress. Dit wordt veroorzaakt doordat de plant kleiner blijft wanneer de gewasontwikkeling negatief beïnvloed wordt door zuurstofstress. Hierdoor neemt de verdamping en de daarmee gepaard gaande watervraag af. Omdat de waterlevering (grondwatercondities) nagenoeg hetzelfde blijft, neemt de droogteschade iets af.



Figuur 3-13 Effect van kwantificering zuurstof schade op de berekende MetaSWAP uitkomsten, berekend over de periode april 2011- april 2018 in mm/jaar, door het verschil te beoordelen van LHM 4.3 met en zonder zuurstofstress. Rode kleuren geven een toename van de jaarlijkse flux weer als gevolg van het niet meenemen van zuurstofschade; blauwe kleuren tonen een afname van de jaarlijkse flux.



Figuur 3-14 Gemiddelde jaarlijkse droogteschade (%) op verschillende bodemtypes (boven), en de langjarig gemiddelde droogteschades (%) en bijbehorende arealen (hectare) voor LHM 4.3 met en zonder zuurstofstress. Het gemiddelde is berekend over de periode 2011-2018.

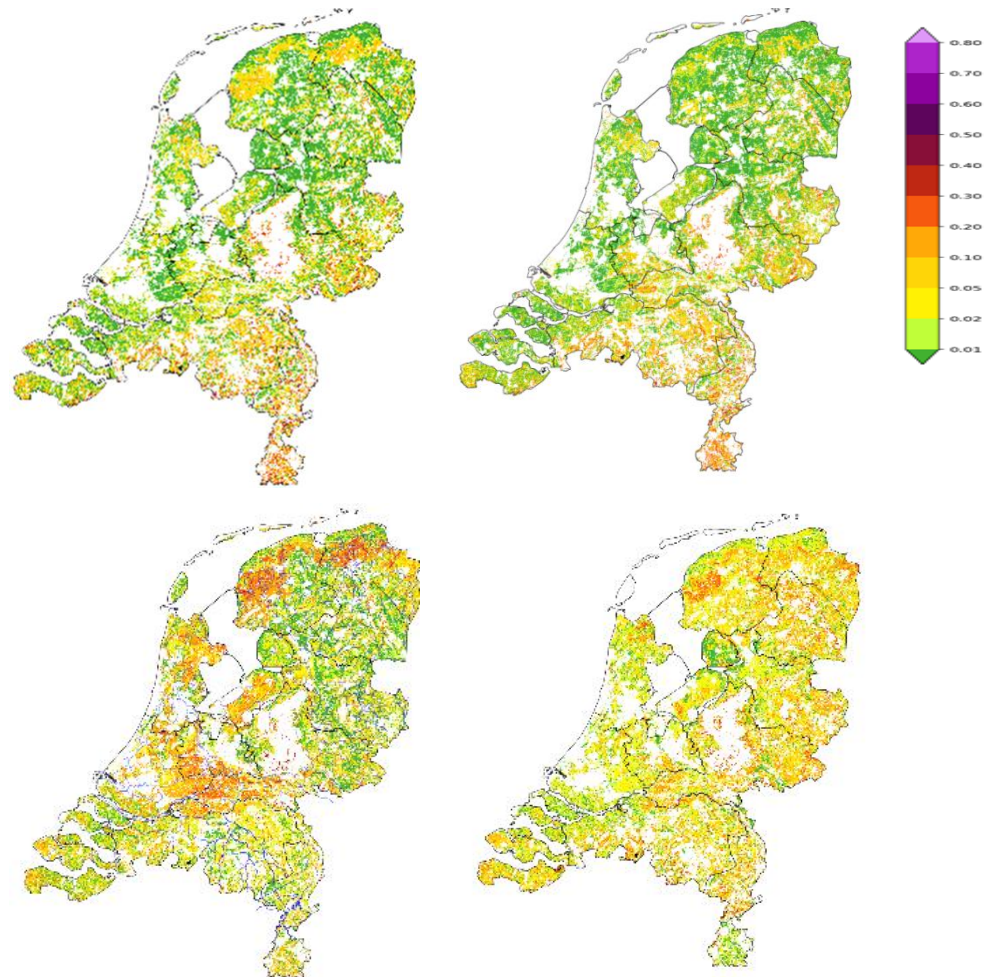
3.7 Overige wijzigingen in MetaSWAP parameters

Na introductie van de nieuwe database en de overige processen zijn de instellingen van MetaSWAP uitgebreid geanalyseerd. In verschillende modeltestruns zijn modelinstellingen systematisch gewijzigd, en daarbij zijn steeds de berekende droogteschade, natschade, evapotranspiratie, gewasverdamping (transpiratie) en de capillaire nalevering beoordeeld. Tijdens dit proces is geconcludeerd dat met de recente aanpassingen in de modelcode en de database van MetaSWAP een aantal eerder doorgevoerde aanpassingen moest worden herzien.

Bij de herziening zijn ook ervaringen van de vergelijking van LHM 4.2 met satellietinformatie meegenomen. Voor LHM 4.2 was door modelexperts geconcludeerd dat de berekende droogteschade op zowel de zandgronden als de kleigronden nog niet aan de verwachting voldeed. Op de zandgronden werd - mede op basis van vergelijking met informatie afgeleid uit satellietbeelden - de berekende droogteschade in de drogere jaren door de experts als te laag beoordeeld. In de kleigronden was de berekende droogteschade juist als waarschijnlijk te hoog beoordeeld (Meshgi et al, 2021).

Door de modelexperts is bij de vergelijking met satellietinformatie nadrukkelijk benoemd dat de satellietinformatie ook als een soort modelbenadering moet worden gezien, omdat hier ook aannames en concepten zijn toegepast. Aangezien er voor de berekende droogte- en natschade daarmee geen harde informatie is om de modeluitvoer mee te kunnen vergelijken, is ook een vergelijking gemaakt met andere modelbenaderingen, namelijk de Waterwijzer Landbouw en de Helptabellen.

In Figuur 3-15 zijn ter illustratie enkele figuren voor de berekende droogteschade weergegeven, voor LHM 4.2, een ontwikkelversie van LHM 4.3 waarbij ten opzicht van LHM 4.2 aanpassingen van de database en de rekencode zijn opgenomen (maar nog niet de overige aanpassingen in LHM 4.3) en ter vergelijking ook berekeningen met de Waterwijzer Landbouw-tabel en de Help tabellen zijn gepresenteerd.



Figuur 3-15 Tussenberekening van de droogteschade in het LHM voor de periode 2011 – 2018. Linksboven: LHM 4.2. Rechtsboven: LHM 4.2 na toepassing van de nieuwe database en droogteparameters, maar vóór aanpassing van overige parameters. Linksonder ter vergelijking: toepassing van de Waterwijzer Landbouw-tabel in combinatie met LHM, en rechtsonder resultaat van berekening met de Helptabel. De legenda geeft de schade fractie weer; bijv. 0.20 (overgang oranje naar licht rood) duidt op 20% langjarige droogteschade.

Na analyse van dergelijke informatie, zowel voor langjarige berekeningen, als voor individuele droge en natte jaren, is geconcludeerd dat voor LHM 4.3 aanvullende aanpassingen in de bodemparameters nodig zijn. Uit de tussenresultaten van LHM blijkt bijvoorbeeld dat de droogteschade op de kleigronden te ver is doorgeschoten is naar de te lage kant, terwijl de droogteschade op zandgronden nog te weinig verschil vertoont met versie LHM 4.2 en dus volgens de modelexperts dan nog te laag is. Berekeningen van de Waterwijzer Landbouw en de HELP-tabellen (figuur 3.15, onder) ondersteunen dit beeld. Daarbij wordt opgemerkt dat de bekend is dat de Waterwijzer Landbouw op de kleigronden te hoge droogteschade berekent. Dit is een bekend issue binnen de Waterwijzer waar aan wordt gewerkt. Ook bij toepassing van de nieuwe bodemfysische bouwstenen in LHM 4.1 kwam dit al naar voren.

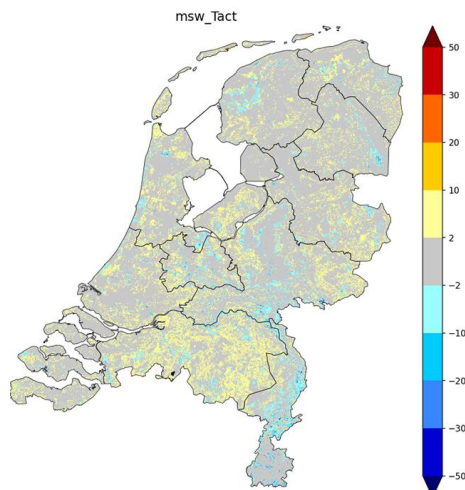
Analyse van de oorzaak van de lagere droogteschade op de kleigronden leverde op dat de GLG hier te ver uitzakt in vergelijking met peilbuismetingen en de WDM-kaart. Dit komt ook overeen met bevindingen bij het gebruik van MetaSWAP in een recente regionale modelstudie voor de provincie Zeeland. Geconcludeerd is dat te grote capillaire opstijging de oorzaak is van de te lage droogteschade; minder capillaire opstijging resulteert in hogere GLG's en tegelijkertijd meer droogteschade. Uit beide analyses komt naar voren dat de toegepaste schalingsfactor van 10 voor de klei-doorlatendheid, zoals is gehanteerd in LHM 4.2 nu (met gebruik van de nieuwe database en aanpassingen in de modelcode) moet worden terug gebracht naar 1.5. Daarbij is ook de schalingsfactor van het vochtbergend vermogen aangepast naar 1.176. Daarnaast is een aantal wijzigingen met kleiner effect doorgevoerd, die in combinatie met de overgang naar de nieuwe database en de aangepaste schalingsfactoren worden toegepast. Dit wordt hier verder toegelicht.

Voor de afregeling van de database zijn de volgende parameters beschikbaar:

- *fprzuni*; hiermee wordt het drukhoogteprofiel berekend dat als invoer dient van de Feddes-parameters voor transpiratiereductie. Deze wegingsparameter op het interval 0 tot 1 bepaalt in welke mate het steady-state profiel wordt vervangen door het vrijwel uniforme profiel dat ontstaat als de grondwaterstand heel diep zou zijn bij dezelfde hoeveelheid vocht in de wortelzone. Deze weging is nodig omdat de profielen in de database bovenin veel te ver uitgedroogd zijn in situaties met een relatief ondiepe grondwaterstand. Het gebruik van die profielen in zuivere vorm leidt daardoor tot teveel droogteschade in vergelijking tot het SWAP-model.
- *cebs*: de doorlatendheid van de wortelzone waarbij de bodemverdamping verder wordt gereduceerd ten opzicht van de waarde verkregen met de Boesten-methode.

Bij de oplevering van de tot nu toe gebruikte database voor LHM was destijds een grove kalibratie gedaan per bodemeenheid. Uit analyses met een testbank blijkt dat een betere fit met SWAP wordt verkregen door uniforme waarden voor beide parameters te gebruiken. Uiteindelijk leverden uniforme waarden (voor alle bouwstenen) van 0.9 en 1.0 E-13 m/d voor respectievelijk *fprzuni* en *cebs* de beste fit op, en deze waarden zijn gehanteerd als standaardwaarden in de nieuwe database. Desgewenst kunnen ze door de gebruiker worden overruled. Voor meer details wordt verwezen naar *Implementation proposal* en *Testreport 81* (Van Walsum, 2023).

In Figuur 3-16 is ter illustratie van de analyses die hier ten grondslag aan liggen een tussenresultaat gepresenteerd voor het effect van bijstelling van de MetaSWAP database door aanpassing van de parameter *fprzuni* naar een uniforme waarde van 0.75. In de figuur is te zien dat door de aanpassing in de database de transpiratie op de zandgronden iets toeneemt. In Limburg neemt de transpiratie iets af, dit komt door aanpassingen van de oorspronkelijke kalibratie van MetaSWAP, specifiek voor leemgronden. Zoals hierboven is beschreven is uiteindelijk besloten de waarde op 0.9 te zetten (een iets grotere aanpassing).



Figuur 3-16 Effect van een gevoeligheidsanalyse waarbij de gevarieerde waarden van *fpzuni* in de database in MetaSWAP zijn gezet op 0.75. Het effect is weergegeven voor de berekende gewasverdamping, als verschil t.o.v. LHM 4.2 berekend voor de jaren 2011 – 2018. Geel is een toename, blauw een afname van de berekende transpiratie.

Vanuit de Waterwijzer Landbouw is een tabel aangeleverd voor de maximale wortelzonedikte in combinatie met een bepaalde bodemeenheid. Deze informatie is in het bestand *area_svat.inp* verwerkt. Ook zijn nieuwe gewasfiles aangeleverd vanuit de Waterwijzer Landbouw. Voor de verwerking van de laatste inzichten in de Waterwijzer is in MetaSWAP in de nieuwe files een extra parameter *aeratecrit* = 0.5 opgenomen. In de berekening betekent dit dat de wortelgroei stopt wanneer de zuurstofstress reductiefactor beneden deze waarde komt. Voorheen gebeurde dat pas bij een waarde van 0. Voor meer achtergrondinformatie over deze aanpassing wordt verwezen naar *Implementation proposal 78* (Van Walsum, 2023).

In zowel LHM4.2 als 4.3 wordt een database gebruikt met een uniforme wortelverdeling. Bij diepe wortelzones geeft dat een overschatting van de beschikbare hoeveelheid vocht. In LHM 4.2 was daarom afgezien van de Jarvis-compensatie. Inmiddels is geconstateerd dat bij LHM 4.2 in het geval van dikke wortelzones te weinig droogteschade wordt berekend. Daarom is besloten om in LHM4.3 een andere aanpak te volgen.

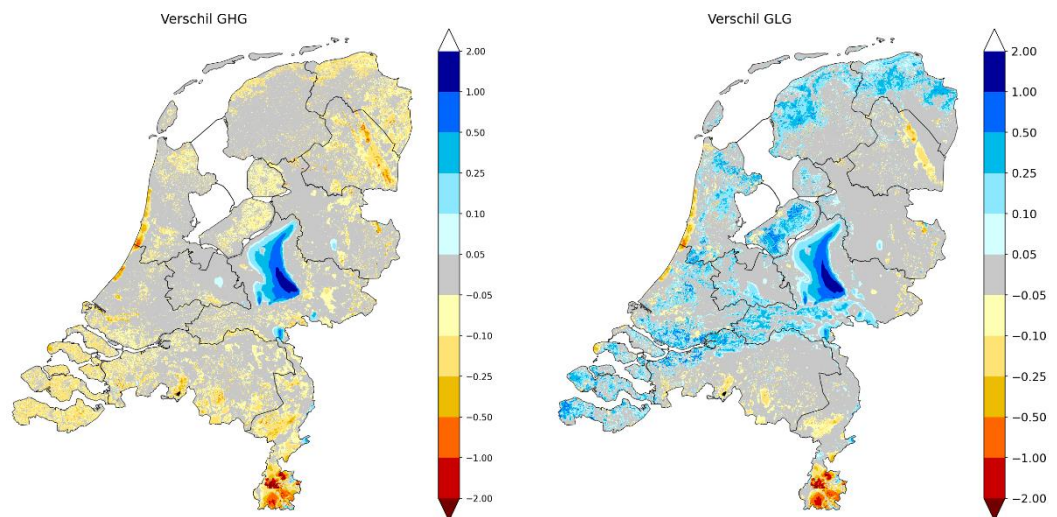
Voor de worteldichtheid in LHM 4.3 wordt aangenomen dat deze in werkelijkheid begint af te nemen bij een diepte van 30 cm. Om dat te verwerken in combinatie met de uniforme wortelverdeling wordt de extra wortelzonedikte boven 30 cm met de helft gekort (via *dprztfunc=0.3* in *para_sim.inp*). Dus bijvoorbeeld een dikte van 100 cm wordt teruggebracht naar 65 cm. Tegelijkertijd wordt de Jarvis parameter (voor droogte) van 0.7 weer ingevoerd, aansluitend bij de Waterwijzer Landbouw. Verder is in het bestand *fact_svat.inp* een aantal hiaten in de wortelzone diktes aangevuld voor de niet met WOFOST gesimuleerde gewassen. Daarmee wordt voorkomen dat de wortelzonedikte automatisch op de waarde in *area_svat.inp* wordt gezet.

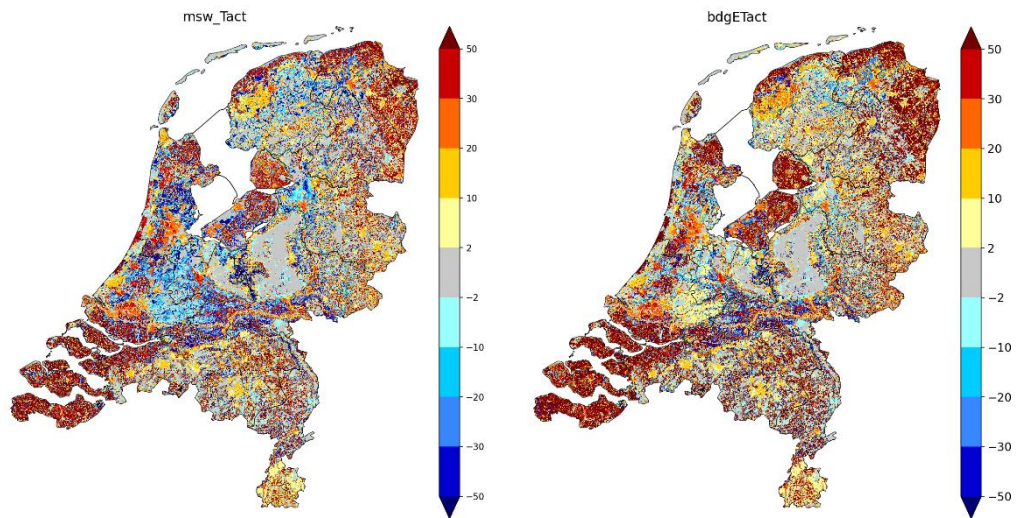
Na bestudering van de uiteindelijk berekende droogteschade en natschade, met name op de zandgronden, is besloten de bypassfractie van zowel zandgronden als kleigronden te handhaven op 0.10 (vergelijkbaar met LHM4.2).

In de vorige versie van het LHM zijn, om de verdamping in bosgebied te verhogen, de schalingsfactoren voor bodemvocht (de zgn. theta-schalingsfactoren) voor SVATs met bosvegetatie verhoogd naar 1.15. Deze factor voor bossen was bij de eerste ontwikkelversies van LHM 4.3 niet meegenomen, maar is uiteindelijk in de file *uscl.inp* wel weer terug gezet voor de zandgronden. Uit eerdere vergelijking met satellietbeelden bij de validatie van LHM 4.1 (HKV, 2021) bleek namelijk dat de verdamping in bosgebied (met name in grote infiltratiegebieden) in droge jaren te laag was en dat bleek opnieuw voor ontwikkelversies van LHM 4.3. Als motivatie voor de verhoging van de schalingsfactoren wordt aangevoerd dat bosgronden een strooisellaag hebben, die niet is onderkend bij het gebruiken van standaard bodemfysische karakteristieken en bodeminventarisatie in het veld. Deze laag draagt wel bij aan het waterbergend vermogen in de bossen en wordt daarom op deze wijze gerepresenteerd in het model. Voor de kleigronden is – vanwege de consistentie met de overige wijzigingen in dit gebied – de factor voor bossen van 1.15 gewijzigd naar 1.176.

3.8 Effecten van de MetaSWAP aanpassingen in vergelijking tot LHM 4.2

Figuur 3-17 toont het gecombineerde effect van de in dit hoofdstuk beschreven aanpassingen in MetaSWAP op de GXG en de verdamping. Het meest opvallende effect van de MetaSWAP aanpassingen op de GXG is de verhoging van de GLG in het Holoceen, Dit wordt vooral veroorzaakt door het terugzetten van de schalingsfactor Ksat in de file *uscl_svat.inp* (van 10 naar 1.5) in klei- en veengebieden. Dit resulteert in minder capillaire opstijging, daardoor in minder verdamping en daardoor ook in minder uitzakking van de grondwaterstanden in de zomer.



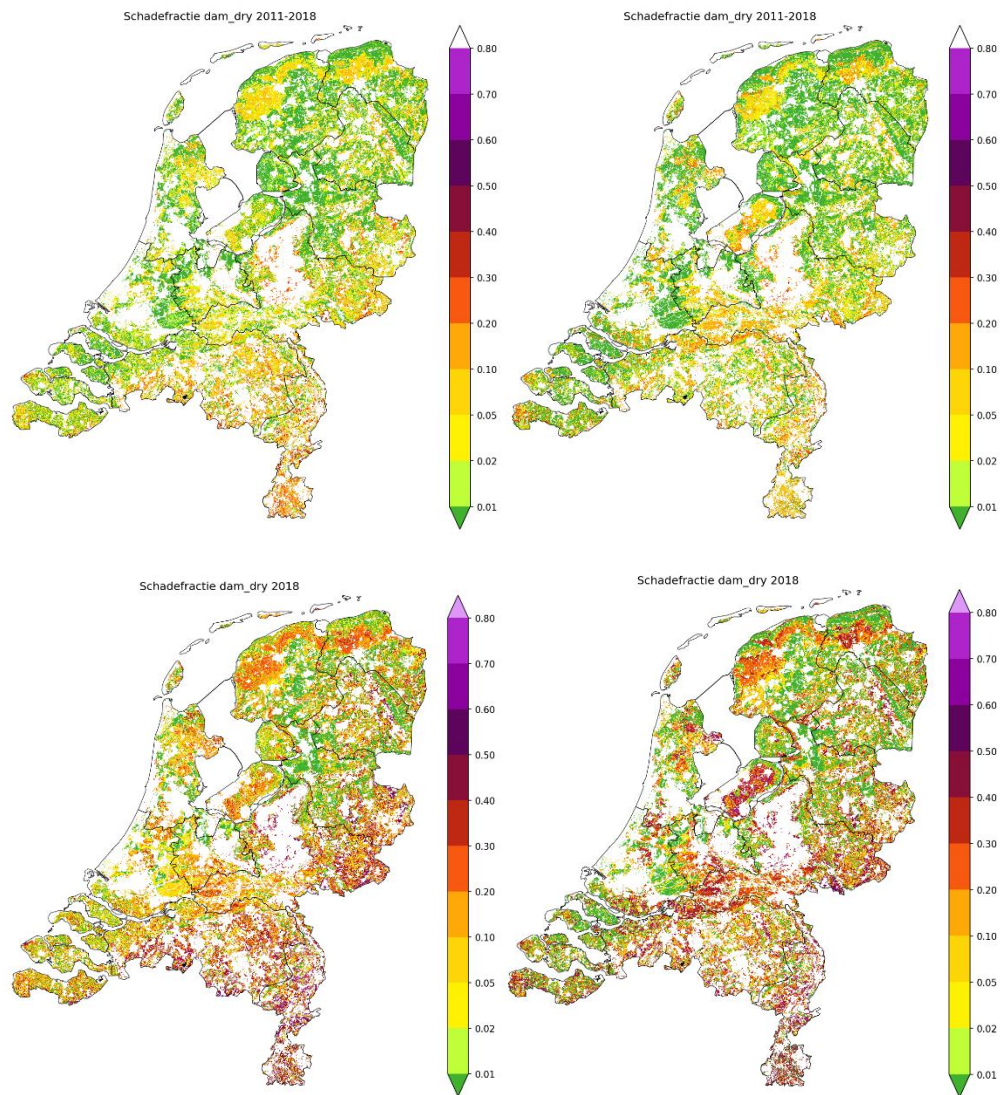


Figuur 3-17 Gecombineerd effect van alle wijzigingen in MetaSWAP op de modeluitkomsten, weergegeven voor een langjarig gemiddelde situatie (2011 – 2018). Boven: effecten op GHG en GLG (blauw = ondiepere GXG, rood = diepere GXG). Linksonder: effect op actuele transpiratie (blauw = minder verdamping, rood = meer verdamping). Rechtsonder: effect op actuele evapotranspiratie.

De MetaSWAP aanpassingen resulteren netto verder veel in een lichte verlaging van de GHG, zowel in klei- als in zandgebieden, en evenzo van de GLG in de zandgebieden. Dit wordt veroorzaakt door het netto opgetelde effect van de overige wijzigingen, waarvan T1, het toepassen van Jarvis = 0.7 en het aanpassen van het vochtbergend vermogen met de factor 1.176 de belangrijkste zijn.

Ondanks de verminderde capillaire opstijging wordt in de kleigebieden op veel plekken een fors hogere verdamping berekend (zie de onderste figuren in Figuur 3-17). Dit wordt vooral veroorzaakt door de toepassing van vanggewassen, zoals eerder getoond door Pouwels et al. (2022) die in de betreffende gebieden een toename van de actuele transpiratie van meer dan 50 mm/jaar lieten zien.

In klei- en veengebieden zonder vanggewas resulteert het reduceren van de schalingsfactor Ksat in een reductie van de verdamping, wat veel van de donkerblauwe gebieden in de onderste figuren van Figuur 3-17 kan verklaren.



*Figuur 3-18 Effect van de gecombineerde MetaSWAP aanpassingen op de droogteschade. Links: droogteschade volgens LHM 4.3 **zonder** de MetaSWAP-aanpassingen; rechts: droogteschade volgens LHM 4.3 **inclusief** de MetaSWAP aanpassingen. Boven: langjarig gemiddelde droogteschade 2011-2018. Onder: droogteschade voor 2018.*

4 Aanpassingen in het oppervlaktewatersysteem

4.1 Inleiding

Vanuit het DP Zoetwater project zijn in regioessies de uitgangspunten voor de modellering in het LHM besproken en op onderdelen aangescherpt. Dit betreft zowel aanpassingen in het waterverdelingsnetwerk, de regionale wateraanvoer-, en afvoercharacteristieken, als het doorvoeren van actuele gegevens voor de verdringingsreeks. De aanpassingen worden in dit hoofdstuk samengevat. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar het achtergrondrapport van DPZW (Pouwels et al, 2023, in prep.).

4.2 Actualisatie van verdringingsreeksen in MOZART en DM

De verdringingsreeks in het LHM is geactualiseerd op basis van gesprekken met de regionale waterbeheerders en informatie uit de regionale verdringingsreeksen. Per waterschap zijn gesprekken gevoerd om te bepalen welke gebruikers er binnen dat waterschap aanwezig waren en welke gebruiker de hoogste prioritering toegewezen kreeg. Daarbij is in enkele gevallen door de waterbeheerder ook weer verwezen naar de Landelijke Verdringingsreeks. De informatie is toegekend aan MOZART en DM en heeft geleid tot herziening van de opzet van de verdringingsreeks in LHM 4.3.

De regionale verdringingsreeksen volgen op de landelijke verdringingsreeks en bestaan uit vier categorieën. De rangorde van belangen binnen categorieën 1 en 2 is op nationaal niveau vastgelegd, maar de rangorde binnen categorie 3 en 4 kan regionaal variëren. Een voorbeeld van regionale uitwerking is weergegeven in Figuur 4-1. De regionale invulling wordt gespecificeerd en vastgesteld per regionaal droogteoverleg (RDO, zie Figuur 4-2).

Categorie 1	Categorie 2	Categorie 3	Categorie 4
het waarborgen van de veiligheid tegen overstroming en het voorkomen van onomkeerbare schade	Nutsvoorzieningen	Kleinschalig hoogwaardig gebruik	Overige belangen (economische afweging ook voor natuur)
1.1 De stabiliteit van waterkeringen 1.2 Het voorkomen van klink en zettingen 1.3 Natuur, voor zover het gaat om het voorkomen van onomkeerbare schade	2.1 Drinkwatervoorziening (leveringszekerheid) 2.2 Energievoorziening (leveringszekerheid)	3.1 Gebruik industrieel proceswater 3.2 Tijdelijke beregening kapitaalintensieve gewassen	4.1 Peilhandhaving 4.2 Doorspoelen en onttrekking voor beregening van akkerbouw 4.3 Beregening van gras/maïs 4.4 Doorspoelen 4.5 Overige belangen
Gaat voor 2 ->	Gaat voor 3 ->	Gaat voor 4 ->	

Figuur 4-1 Regionale uitwerking van de verdringingsreeks voor de regio IJsselmeergebied (Waterverdeling regio IJsselmeergebied, 2021).

Voor het verwerken van de regionale uitwerking van de verdringingsreeksen zijn verschillende benadering toegepast voor enerzijds RDO-Gelderland, RDO-Zuid-West met de deelgebieden 'Volkerak-Zoommeer en Mark-Dintel-Vlietsysteem' en 'Brabantse Delta', en anderzijds de regio's RDO-Noord, RDO-Twentekanaal, RDO-West-Midden en RDO-Zuid-West, met de overige deelgebieden. Voor meer toelichting op de uitwerkingen wordt verwezen naar Pouwels et al, 2023 (in prep.). In deze rapportage worden de resultaten op samengevat.

Voor ieder Local Surface Water (LSW) in LHM is bepaald bij welk RDO dit hoort, en vervolgens zijn in MOZART (per LSW) en DM de prioriteringsregels toegekend, die gelden voor het betreffende RDO. Als er in een regionale verdringingsreeks geen onderverdeling is gemaakt in een bepaalde categorie, is de hoogste prioriteit toegekend aan alle gebruiksfuncties in de betreffende categorie. De (regio specifieke) wijze van toekenning is binnen het LHM vastgelegd in de Topsysteem voorbereidingsprogrammatuur.



Figuur 4-2 Indeling gebieden in Regionaal Droogte Overleggen (RDO's) binnen Nederland (Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat, 2020).

Bij de toekenning van de informatie uit de regionale verdringingsreeksen in LHM 4.3 zijn met behulp van GIS-bestanden (die ook vaker zijn gebruikt bij het maken van invoer van LHM) criteria opgesteld, wanneer een bepaalde categorie wel of niet van toepassing is in een local surface water (LSW). Deze criteria zijn samengevat in tabel 4.1 en 4.2 voor respectievelijk MOZART en DM. Wanneer er bij een categorie een X is vermeld, dan geeft dit aan dat deze categorie per regio verschillend is uitgewerkt, en dus de specifieke categorie per regio zal verschillen. Voor verdere specificatie wordt verwezen naar Pouwels et al, 2023 (in prep.).

In Appendix B is voor de toekenning van informatie over de verdringingsreeksen aan de LSW's weergegeven voor LHM 4.3 en LHM 4.2. Daarbij wordt opgemaakt dat de weergave verschilt voor de 2 modelversies, omdat de wijze van toekenning van informatie aan het LHM is vernieuwd in LHM 4.3.

Tabel 4.1 Samenvatting van criteria die zijn gehanteerd bij de toekenning van categorieën uit de regionale verdringingsreeksen aan de MOZART-LSW's in LHM 4.3.

Categorie	Toelichting verdringingsreeks	Prioriteit in MOZART	Toegepast criterium per LSW
1.2	Voorkomen van klink en zetting	2	Areaal veen volgens de BOFEK kaart moet tenminste 10 ha zijn, en ten minste 1% van het areaal in de peilbeheerste LSW.
1.3	Voorkomen van onomkeerbare schade aan natuur	2	Het areaal kwetsbare natuur binnen het peilbeheerste gebied bedraagt minimaal 1 ha.
3.2	Berekening kapitaalintensieve gewassen (incl. glastuinbouw)	6	In de LSW is minimaal 25 ha beregend kapitaalintensief gewas aanwezig in het betreffende peilbeheerste LSW en/of 10 ha beregend glastuinbouwgebied.
4.1 /4.x	Peilhandhaving kapitaalintensieve gewassen, glastuinbouw en overig specifiek areaal	7 of 8	Minimaal 25 hectare kapitaalintensieve gewassen binnen het peilbeheerste LSW, en/of 10 ha glastuinbouw en/of overig specifiek areaal
4.2/4.x	Doorspoeling akkerbouw, kapitaalintensieve gewassen en glastuinbouw	7 of 8	Minimaal 25 hectare van kapitaalintensieve gewassen binnen het peilbeheerste LSW, en/of 10% van het areaal akkerbouw en/of 10 ha glastuinbouw
4.3 / 4.x	Berekening gras en mais en of akkerbouw	7, 8 of 9	Minimaal 10% van het areaal binnen het peilbeheerste LSW
4.4	Doorspoeling stadswateren en overig	9	Minimaal 25% stedelijk gebied of overige areaal t.o.v. het areaal van het peilbeheerste LSW

Tabel 4.2 Samenvatting van criteria die zijn gehanteerd bij de toekenning van categorieën uit de regionale verdringingsreeksen aan DM in LHM 4.3.

Categorie	Toelichting verdringingsreeks	Prioriteit in DM	Label gebruikersfunctie
1.1	Stabiliteit van Waterkeringen	1	Alleen voor veiligheid
2.1	Leveringszekerheid drinkwatervoorziening en doorspoeling Afsluitdijk	3	Veiligheid en drinkwater
2.2	Leveringszekerheid energievoorziening	4	Veiligheid, drinkwater en energie
3.x	Kritiek peil 1 meren	5	Veiligheid, industrie, drinkwater en energie
3.1	Gebruik industrieel proceswater	5	Veiligheid, industrie, drinkwater en energie
4.x	Kritiek peil 2 meren	7	Berekening glastuinbouw en kapitaalintensieve gewassen, algehele peilhandhaving, veiligheid, industrie, drinkwater en energie.
4.x	Doorspoeling akkerbouw, kapitaalintensieve gewassen en glastuinbouw	8	Doorspoeling en berekening glastuinbouw en kapitaalintensieve gewassen, doorspoeling akkerbouw, algehele peilhandhaving, veiligheid, industrie, drinkwater en energie.
4.4	Doorspoeling stadswateren en overig	10	Alle gebruikers
4.x	Streefpeil meren	11	Alle gebruikers

De prioriteitsstelling in DM en MOZART (tabel 4.1 en 4.2) zijn verder op elkaar afgestemd en meer flexibel gemaakt, zodat het LHM beter kan aansluiten op de in de praktijk gebruikte verdringingsreeksen. Dit betekent concreet dat de prioriteiten in MOZART meer flexibel kunnen worden toegekend aan peilbeheer (WM), beregening (A), doorspoeling (WF), drink- en industriewater onttrekkingen (P en I). In eerdere versies van het LHM was de toekenning beperkt tot de prioriteiten 2 tot en met 6 gehanteerd (zie ook appendix B). In MOZART wordt prioriteit 1 in LHM 4.3, net als in eerdere versies, toegepast voor het verwerken van tekorten na de vorige tijdstep.

Figuur 4-3 geeft de nieuwe prioritering in DM en MOZART, en daarbij ook de omschrijving van de categorie in de landelijke verdringingsreeks.

Prioritering	Verdringingsreeks categorie	Gebruikersfuncties
1	1.1. De stabiliteit van waterkeringen	Alleen voor veiligheid
3	2.1. Leveringszekerheid drinkwatervoorziening + doorspoeling Afsluitdijk	Veiligheid en drinkwater
4	2.2. Leveringszekerheid energievoorziening	Veiligheid, drinkwater en energie
5	3.X. Kritiek peil 1 - Meren	Veiligheid, industrie, drinkwater en energie
	3.1. Gebruik industrieel proceswater	
7	4.X. Kritiek peil 2 - Meren	Beregening glastuinbouw en kapitaalintensieve gewassen, algehele peilhandhaving, veiligheid, industrie, drinkwater en energie
8	4.X. Doorspoeling akkerbouw, kapitaalintensieve gewassen en glastuinbouw	Doorspoeling en beregening glastuinbouw en kapitaalintensieve gewassen, doorspoeling akkerbouw, algehele peilhandhaving, veiligheid, industrie, drinkwater en energie
10	Doorspoeling stadswateren en overig	Alle gebruikers
11	4.X. Streefpeil meren	Alle gebruikers

Figuur 4-3 Nieuwe prioriteitsstelling in MOZART en DM, zoals is doorgevoerd in LHM 4.3

Voor implementatie van de regionale verdringingsreeks zijn verder de volgende specifieke wijzigingen in prioriteiten in de invoerfiles van DM (*Fixed.txt*, *Lnks.txt* en *NDS.txt*) doorgevoerd:

In de invoerfile *Fixed.txt*:

- Drinkwater heeft consequent prioriteit 3 gekregen; industriewateronttrekkingen prioriteit 5. In LHM varieerde deze prioriteit; veelal was het prioriteit 2 voor drinkwater, maar soms ook prioriteit 1. Industriewater was voornamelijk prioriteit 4.
- Bij schut- en lekverliezen (voor o.a. het Twentekanaal, Dorkwerd en diverse andere sluizen) is de prioriteit gewijzigd van 1 (in LHM 4.2) naar 2 (in LHM 4.3).
- RWZI lozingen waren hebben prioriteit 3 gekregen (gekoppeld aan de prioriteit van de drinkwater), in plaats van prioriteit 1

In de invoerfile *NDS.txt* :

- Voor het handhaven van streefpeil werd in LHM 4.2 prioriteit 9 gehanteerd, dit is gewijzigd in prioriteit 11 in LHM 4.3.
- De kritische peilen voor peilbeheer zijn op prioriteit 5 en 7 gezet in LHM 4.3. Deze stonden bij diverse stuwpanden op de Maas en bij sommige regionale boezemsystemen (Friesland, Groningen, Zuiderdiep) nog op prioriteit 1-2. Uitzondering zijn de kritische peilen voor het IJsselmeergebied; deze zijn ongewijzigd (prioriteit 5 en 7).
- Voor de volledigheid wordt vermeld dat de prioriteit voor het handhaven van het minimum ongewijzigd is; deze blijft de hoogste prioriteit (1) houden.

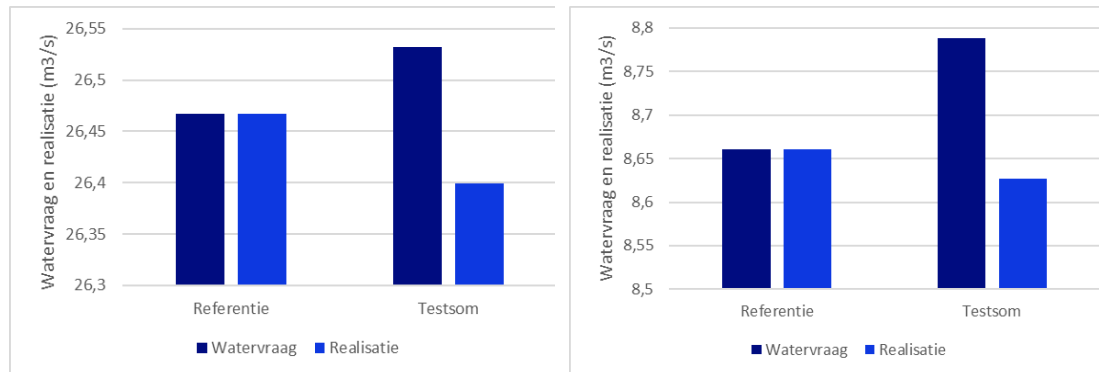
In de invoerfile *Lnks.txt* zijn voor doorspoeling de prioriteiten als volgt gewijzigd:

- Voor de Randmeren Oost-Markermeer werden prioriteiten 3 en 5 gehanteerd; dit is gewijzigd naar prioriteit 3 en 6 in LHM 4.3.
- Doorspoeling Hagestein Lek had prioriteit 2 en 8, in LHM 4.3 is dit gewijzigd naar prioriteit 3 en 10.
- Doorspoeling Beatrixsluizen had prioriteit 2; dit is gewijzigd naar prioriteit 3.
- Doorspoeldebieten ter voorkoming van zoutindringing of voor waterkwaliteit zijn gewijzigd van prioriteit 8 naar prioriteit 10. Voor doorspoeldebieten gerelateerd aan bestrijding van zoutindringing in verband met drinkwateronttrekkingen (Afsluitdijk, Weesp ARK) is de prioriteit gehandhaafd op- of juist gezet op 3.
- In de Brabantse kanalen zijn de gewenste debieten die schut/lekverliezen representeren verlaagd van prioriteit 2-6 (in LHM 4.2) naar prioriteit 2-10 in LHM 4.3.
- Schut/Lekverlies van het Maas-Waalkanaal is gewijzigd van prioriteit 1 naar prioriteit 2.
- Voor doorspoeling in het Lateraalkanaal (ten behoeve van waterkwaliteit) werd deels hoge prioriteit 3 gehanteerd en deels lage prioriteit 8; de prioriteiten zijn in LHM 4.3 gewijzigd naar respectievelijk 3 en 10.
- Voor de Weerdsuis is de prioriteit van doorspoeling (ten behoeve van waterkwaliteit) gewijzigd van prioriteiten 4 en 6 naar prioriteiten 5 en 10.
- Voor de Utrechtse Vecht zijn de prioriteiten voor doorspoeling gewijzigd van 1 en 8 naar prioriteiten 3 en 10.
- De doorspoeldebieten voor het beheergebied van Brabantse Delta (de Dintel, Roosendaalse/Steenbergse Vliet) zijn gewijzigd van prioriteit 6 naar prioriteit 7.
- Voor de Noordervaart is de doorspoeling Katsberg gewijzigd van prioriteiten 2 en 8 naar prioriteit 2, vanwege de aanwezigheid van kwetsbare natte natuur in het veengebied Peel.

De aanpassingen in de verdringingsreeks zijn in een extra testsom onderzocht, waarbij is ingezoomd op twee districten (district 503, Friesland en district 475, Zuid-Holland), zie Figuur 4-4). In deze testberekening zijn bewust nog geen (overige) wijzigingen in de schematisatie van DM meegenomen, om het afzonderlijke effect van wijzigingen in de schematisering van de verdringingsreeks in LHM beter te kunnen beoordelen. Dit betekent bijvoorbeeld dat het IJsselmeer (in DM) op streefpeil gehandhaafd blijft en vragen in Noord-Nederland (waaronder Friesland) met dezelfde prioriteit worden gekort.

In Figuur 4-4 is te zien dat de watervraag in de districten in Zuid-Holland en Friesland groter is geworden door implementatie van de nieuwe informatie uit de verdringingsreeksen. In Zuid-Holland wordt een watervraag voor DM berekend voor peilbeheer en berekening. De realisatie voor dit district neemt af als gevolg van implementatie van nieuwe informatie over de regionale verdringingsreeksen; er treedt dus meer watertekort op. In Friesland is hetzelfde waarneembaar.

De toename van de watervraag ten opzichte van de realisatie is vooral toe te schrijven aan een toename in de beregeningsvraag, die door de lagere prioriteit in de nieuwe schematisatie meer tekorten laat zien. Aangezien het gewas in de berekening nog steeds niet water heeft gehad en droog is, leidt de niet gerealiseerde watervraag ook in de daaropvolgende tijdstappen tot een toename van de watervraag, en een vergroting van het verschil met de realisatie. Uit de testsommen blijkt dat wijziging van de prioritering in de verdringingsreeks sterk kan doorwerken in de berekende watertekorten in het LHM.



Figuur 4-4 De watervraag en realisatie (m³/s) in Friesland (district 503, links) en Zuid-Holland (district 475, rechts), voor zowel de uitgangssituatie (referentie, LHM 4.2) als de wijziging met wijziging van de prioritering in de verdringingsreeks (testsom).

4.3 Aanvullende wijzingen in MOZART

4.3.1 Wijziging in de LSW-schematisatie in Zeeland

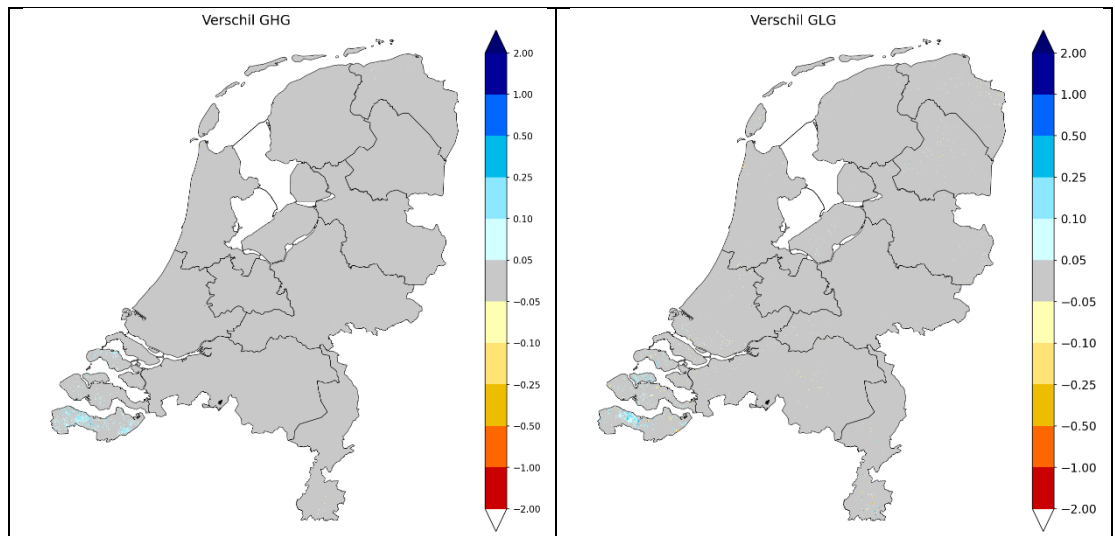
De LSW's in Zeeland zijn geschematiseerd als peilbeheerste LSW's (type P). In Zeeland wordt een watervraag berekend die niet kan worden geleverd omdat er geen aanvoer vanuit het netwerk is. Hierdoor worden (standaard) tekorten berekend, die onrealistisch zijn, omdat Zeeland geen wateraanvoer mogelijk is.

Om te voorkomen dat onrealistische tekorten worden berekend, zijn de LSW's omgezet naar type V (vrijafwaterend), met een Qh-relatie die past bij strak peilbeheer. Op deze manier is het duidelijk dat er geen wateraanvoer mogelijk is en worden er geen peilbeheertekorten meer berekend. Wel kunnen er berekeningstekorten worden berekend als er geen water beschikbaar is in de sloot. Dit komt beter overeen met de werkelijkheid.

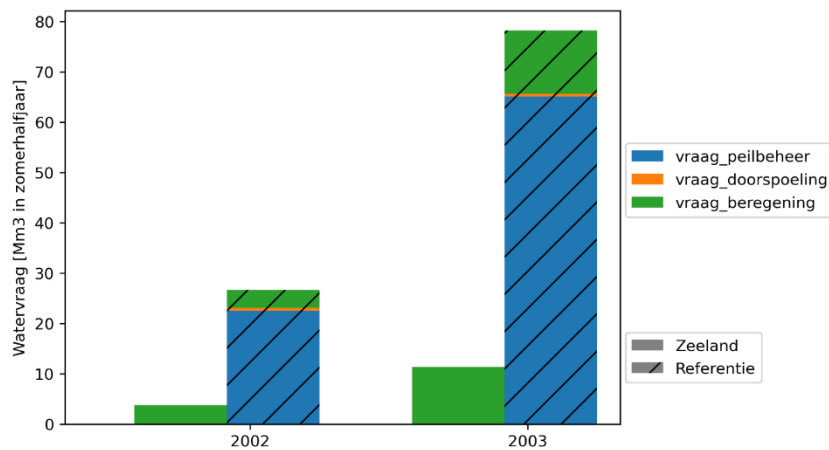
Een ander issue is dat in het voorzieningsgebied van de landbouwwaterleiding in Zeeland ('Zak van Beveland') met het LHM berekeningstekorten voor fruitteelt worden berekend, omdat er in Zeeland geen wateraanvoermogelijkheid is voor alle watervragen. In werkelijkheid wordt voor de berekening van fruitteelt echter gebruikt gemaakt van een landbouwwaterleiding en treden er dus geen tekorten op.

Om dit te implementeren in het model zou aan de onttrekking voor berekening moeten worden voldaan zonder dat er wateraanvoer is voor peilbeheer. Aangezien dit niet direct mogelijk is in MOZART is een aantal alternatieve opties verkend om dit alsnog mogelijk te maken. Uiteindelijk is er voor gekozen om de specifieke LSWs het type W te geven. Dat staat dus voor vrijafwaterende LSWs die water kunnen vragen voor berekening, zonder dat ze water vragen voor (strak) peilbeheer. Hierdoor wordt de beregeningsvraag en beregeningsgift uit de landbouwwaterleiding correct in de simulatie meegenomen, zonder dat dit water ten goede komt aan peilbeheer.

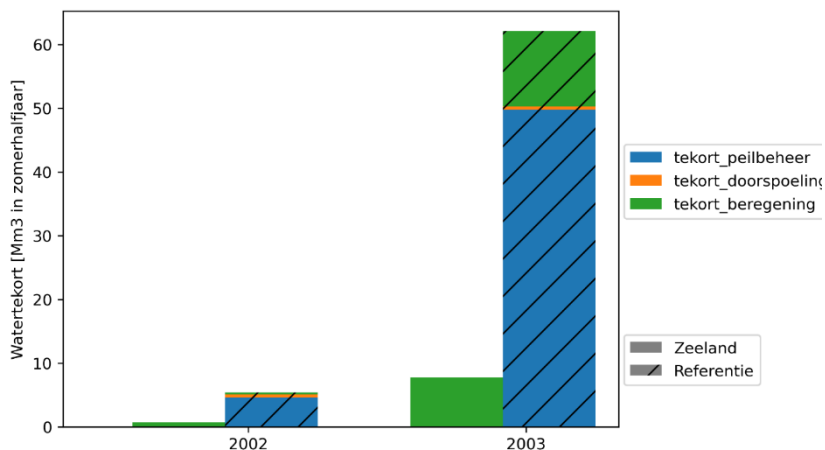
Figuur 4-5 t/m Figuur 4-7 laten de effecten zien van de gewijzigde schematisering. Uit de figuren is af te leiden dat er door de aanpassing geen water meer wordt gevraagd voor de functie 'peilbeheer'.



Figuur 4-5 Verandering van de HG3 (links) en LG3 (rechts) als gevolg van de aanpassingen in de schematisering van Zeeland. Blauwe kleuren geven een verhoging van de grondwaterstand, in meter.



Figuur 4-6 De watervraag in de regio 'Zuidwestelijke delta zonder wateraanvoer', uitgesplitst naar type gebruiker. De watervraag is weergegeven voor LHM 4.2 ('Referentie') en voor de modelsom met aangepaste schematisering in Zeeland ('Zeeland', gearceerd)



Figuur 4-7 De watertekorten in de regio 'Zuidwestelijke delta zonder wateraanvoer', uitgesplitst naar type gebruiker. De tekorten zijn weergegeven voor LHM 4.2 ('Referentie') en voor de modelsom met aangepaste schematisatie in Zeeland ('Zeeland')

4.4 Aanvullende wijzigingen in DM

In het kader van DP Zoetwater zijn de uitgangspunten voor de modellering in het LHM besproken en op diverse punten aangescherpt in het Distributiemodel. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de wijzigingen in LHM. Voor aanvullende informatie, inclusief een beschrijving van de wijzigingen ten behoeve toekomstige maatregelen wordt verwezen naar het achtergrondrapport van DPZW (Pouwels et al, 2023, in prep.).

4.4.1 Aanpassingen in het hoofwatersysteem

Capaciteit Bernhardsluizen

Uit de sessies met Zoetwaterregio's zijn diverse issues over de Bernhardsluizen en Irenesluizen naar voren gekomen. Op basis van de informatie uit deze sessies is besloten om de capaciteit onbeperkt te zetten (130 m³/s).

KZH (Klimaatbestendige Zoetwateraanvoer Hoofdsysteem)

In het kader van dit issue is de aanvoer van water uit de Waal via het ARK naar het Markermeer ingebouwd in LHM 4.3. Standaard staat deze aanvoermogelijkheid uit, omdat het nog geen huidig beleid is.

Streefpeil IJsselmeer

In de afgelopen droge jaren is gebleken dat de in het peilbesluit beschikbare ruimte om het peil IJsselmeer/Markermeer in de zomer op te zetten tot -0.10 m NAP moeilijk te realiseren is in de praktijk. Opzet naar -0.15 m NAP is wel haalbaar gebleken, en het streefpeil voor de zomer (vanaf april) is daarom hiervoor aangepast in LHM 4.3, voor zowel het IJsselmeer als het Markermeer.

Watervragen en onttrekkingen IJsselmeergebied

Op basis van aanvullende informatie uit de bestuursovereenkomst regio IJsselmeergebied (MinlenW, provincies, waterschappen) is de volgende invoer in LHM 4.3 aangepast:

- Watervragen drinkwater en proceswater industrie
 - (HHNK) ECN Petten 0.6 m³/s koelwater en 0.3 m³/s proceswater
 - (Hunze en Aa's): drinkwateronttrekkingen van 0.8 naar 1.0 m³/s
 - (Vechtstromen): 0.1 m³/s proceswater Norit Purit.
 - (AGV): drinkwater Loosdrecht 3.5 m³/s.
- Verhoging van de doorspoeling Afsluitdijk in verband met het zoethouden van de drinkwater inlaat Andijk 40 m³/s in droge jaren, daarom is hoge prioriteit gegeven (prioriteit 2), conform de verdringingsreeks Noord-Nederland. In eerdere versies van LHM werd alleen een doorspoeling van 10 m³/s gehanteerd voor visintrek, met lage prioriteit.

Doorspoelbehoefte Oranjesluizen

Uit regionale analyse van de water- en stoffenbalans van het Markermeer blijkt dat de doorspoeling van de Oranjesluizen de laatste jaren orde 3-4 m³/s bedraagt. In DM was - met het opschroeven van de doorspoeling van het ARK bij Weesp - de doorspoeling bij de Oranjesluizen al verlaagd, maar minder ver. In LHM 4.3 is daarom de doorspoelvraag van de Oranjesluizen verder verlaagd en zijn de volgende debieten gehanteerd:

- 4 m³/s in juni, juli en augustus;
- 3 m³/s in april/mei en in september;
- 2 m³/s in maart en oktober; en
- 1 m³/s in november tot en met februari.

Referentie afvoerverdeling volgens IRM (bodempligging 2018)

De afvoerverdeling over de Waal, Nederrijn en IJssel in het bovenrivierengebied is in LHM 4.3 aangepast volgens berekeningen IRM 2018 in het programma Integraal Riviermanagement. Hierdoor wordt er rekening mee gehouden dat als gevolg van bodemdaling van de Waal en de IJssel de afvoerverdeling bij laagwater en midden hoog water wordt beïnvloed. Als gevolg van de aanpassingen gaat er effectief minder water via de IJssel naar het IJsselmeer.

4.4.2 Hoge Zandgronden Oost

Inlaatcapaciteit Apeldoorns kanaal

Op aanwijzing van het waterschap is de inlaatcapaciteit in het Apeldoorns kanaal bij Dieren in het model opgehoogd van 0.0 naar 0.83 m³/s, verdeeld over district 23 en district 231.

Inlaat Grebbesluit

De Grebbesluit (bij Rhenen) en het Valleikanaal/Eem is in het model opgenomen als een district-netwerk koppeling (dus niet als een tak in DM); de Grebbesluit is een inlaat voor district 28 (Zuidwest Veluwe) en district 281 (Zuidwest Veluwe – afwatering Nederrijn) met een maximum inlaat van 3 m³/s.

Correctie verdeelsleutels District 181

Bij verificatie bleek dat door aanpassingen in LHM 4.2 de verdeelsleutels voor lozingen van dit district in het Vechtstromengebied niet precies optelden tot 1.00. Dat is gecorrigeerd in de LHM 4.3 invoer.

4.4.3 Hoge Zandgronden Zuid

Toevoeging inlaat Sambeek

Sinds 2019 is er via de Sambeekse Uitwatering, net benedenstrooms van de sluis Sambeek, als tijdelijke maatregel in de praktijk in droge zomers water ingelaten. Volgens informatie van het waterschap Aa en Maas is besloten dat dit een definitieve maatregel wordt, die in de praktijk al is geïmplementeerd. Daarom is in de DWKEYS.TXT voor district 61, Maaskant-Bovengebied, een inlaat uit DM knoop 6010, Sambeek, toegevoegd met een capaciteit van 0.2 m³/s.

4.4.4 Zuid-Westelijke Delta

Doorspoeling VZM na implementatie nieuwe zout-zoetscheiding Krammer

In LHM 4.3 is een aparte tak Krammer toegevoegd, van knoop 6018 naar knoop 201, met een gewenst debiet van 8.8 m³/s. Gezien de doorspoeling Eendracht (22.5 m³/s) en de netto verdamping neemt de gewenste inlaat in de zomer daarmee toe van 35 naar 40 m³/s.

Afvoer BovenMark

Het waterschap Brabantse Delta geeft aan dat afvoer vanuit België van de BovenMark in recente LHM berekeningen is overschat. In LHM was voor jaren waarvoor geen data beschikbaar waren de afvoer geschat op basis van regressie-relaties, maar daarin worden de (extreem) lage afvoeren en (extreem) hoge afvoeren overschat. De rivierafvoeren voor de BovenMark zijn aangepast op basis van afvoermetingen voor de periode 2011-2022, die zijn aangeleverd door het waterschap. De nieuwe waarden zijn daarmee ca 1 m³/s lager dan in de eerdere regressievergelijkingen.

Aanvoer water uit VZM

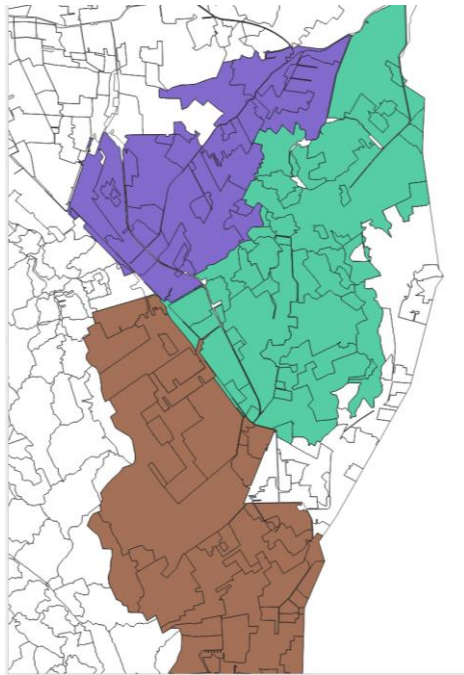
In het model is district 950 gesplitst in twee districten: een district ten oosten van het Bathse Spuikanaal (949), en het restant van het district 950 ten westen van het Bathse Spui kanaal om in het model water te kunnen inlaten vanuit het Volkerak-Zoommeer via het Bathse Spuikanaal, zoals ook in de droge zomer van 2018 is gerealiseerd. Voor de Ossendrechtse polders is in het nieuwe district 649 in de DWKeys file de mogelijkheid toegevoegd om water in te laten uit het Volkerak-Zoommeer (knoop 6019). De inliggende LSW's zijn zodanig aangepast dat zij in verbinding staan met de gesplitste districten (949 en 950).

4.4.5 Regio Noord

Aanpassing Districtsindeling Hunze en Aa's en verbeteringen kenmerken

Waterschap Hunze en Aa's heeft aangegeven dat de districtsindeling op enkele punten moet worden aangepast. Zo hoort MOZART local surface water (lsw) 100217 dat peilgebied stuw Vleddermond voorstelt, niet bij district 604, maar bij district 10. Figuur 4-8 toont de aangepaste districtsindeling. Verder zijn de volgende aanpassingen verricht:

- de volgende LSW's zijn verschoven van district 604 naar district 605: 100225, 100218, 100219, 100224, 100226, 100229, 100222, 100221, 100228, 100289, 100162, 100234, 100227, 100315, 100297 en 100325.
- Het winterstreefpeil is voor het hele district 605 op +2.46 m NAP gezet. Effectief is daarmee een afwijkend streefpeil in één LSW gecorrigeerd.



Figuur 4-8 MOZART districten en local surface water in het zuidelijk beheersgebied van Hunze en Aa's, met in bruin district 10, in groen district 605, en in paars district 604. District 606 is het witte gebied grenzend aan district 10 en district 605.

Doorspoelbehoefte inlaat Fryslân

Binnen het beheersgebied van Fryslân is de doorspoelbehoefte nader beschouwd, in samenhang met de gewenste inlaat voor Fryslân. Omdat de gewenste inlaatcapaciteit in het model niet wordt gehaald is er voor gekozen om de doorspoeling bij Harlingen op 5.0 m³/s te laten staan en de doorspoeling bij Dokkum jaarrond op 5.8 m³/s te zetten (totaal 10.8 m³/s).

4.4.6 Regio West

Inlaat Kromme Rijn en Caspargouwse wetering

De inlaat Kromme Rijn wordt sinds kort voorzien van een aanvoergemaal met capaciteit 6 m³/s (inlaat uit de Nederrijn). Dit is voldoende om in inlaat in het gebied van de Kromme Rijn te voorzien. De inlaat Caspargouwse wetering is dan volgens de regio niet meer nodig om water naar de Kromme Rijn aan te voeren, en kan dan alleen gebruikt worden voor het voorzien van districtswatervragen nabij die inlaat. Dit is geïmplementeerd in het LHM door de capaciteit van tak 4034 in DM op 6 m³/s te zetten, en de inlaat niet meer afhankelijk te laten zijn van het peil in het stuwpand Hagestein.

Doorvoercapaciteit van Ringvaart naar Rotte (Schieland)

In LHM 4.2 is voor de doorvoer van de Ringvaartboezem via de Hennipsloot naar de Rotteboezem een capaciteit van 3.25 m³/s geïmplementeerd. Uit de gesprekken met de regio blijkt dat dit in de praktijk veel minder is, tot 0.6 m³/s. De capaciteit is daarom aangepast in LHM 4.3 naar 0.6 m³/s (file: LNKS.txt voor tak 4036).

Aanpassing Klimaatbestendige Water Aanvoer

In LHM 4.2 was de KWA nog zonder doorvoer bij de Waaiersluis en doorvoer via Krimpenerwaard geïmplementeerd. Op basis van praktijkervaringen in de periode 2018-2020 en modelberekeningen is in LHM 4.3 nu ook de optie van doorvoer bij de Waaiersluis en doorvoer via de Krimpenerwaard opgenomen. Hiervoor zijn de volgende aanpassingen verricht in de invoerfiles NDS.Txt, LNKS.Txt en DWKeys.txt:

- Een deel van de inlaat van district Lopikerwaard is verplaatst van knoop 4095 (Gekanaliseerde Hollandsche IJssel) naar knoop 4104 (voorzien vanuit de Lek via gemaal de Koekoek).
- In plaats van dat Rijnland alleen vraagt via Bodegraven, wordt nu ook via Gouwe/Gouda water gevraagd. Hiervan is max. 4 m³/s via de Waaiersluis naar Gouda en max. 11 m³/s via Bodegraven. De capaciteit van de Enkele Wiericke bij Hekendorp is gezet op 6.6 m³/s.
- De doorvoercapaciteit bij Doorslag is nog ongewijzigd 7 m³/s, inlaat Koekoek blijft 4.9 m³/s (deels inlaat district Lopikerwaard via knoop 4104 en 4095).
- De verdeelsleutels zijn vervolgens afgestemd op de nieuwe, aangepaste capaciteiten.
- Voor district Krimpenerwaard (district 45) zijn de inlaatfracties in de DWKEYS aangepast. Gezien de toegenomen capaciteit van de inlaat uit de Lek krijgt deze een grotere fractie (1e trap tot q=5.0 50% uit de Lek).

Extra aanpassing Krimpenerwaard

Tijdens de ontwikkeling van LHM 4.3 bleek bij testruns dat de combinatie MOZART-DM een groot aantal iteraties nodig had (1500 iteraties!) op het tijdstip september 2016. De modelinvoer van DM (NDS.txt en LNKS.txt) zijn hiervoor aangepast. Specifiek is de tak 4040 door de Krimpenerwaard gesplitst in 2 takken, waarbij het gewenste debiet van 2 m³/s op de tak richting knoop 4040 is verlegd naar de eerste tak die aantakt op de Lek.

Sluis lekverliezen van HDSR naar ARK en Lek

De lekverliezen van sluizen van HDSR naar het Amsterdam-Rijn Kanaal (ARK) en de Lek zijn aangepast in LHM 4.3. In totaal is er een lekverlies van ongeveer 2 m³/s naar het ARK en 1 m³/s naar de Lek. Door gewenste debieten (in de file LNKS.txt) en lozingen/onttrekkingen (in de file FIXED.txt) is ervoor gezorgd dat dit lekverlies is opgelegd bij Noordersluis, de Zuidersluis (naar het ARK) en bij de Koninginnesluis (naar de Lek).

Doorspoeling Vinkeveen

Waternet heeft een waterkwaliteitsscherm, en er wordt via dat scherm effectief water doorgespoeld vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal via de Vinkeveense plassen naar het Noordzeekanaal. Dit is in LHM in DM opgenomen door een nieuwe knoop te introduceren in Amstelland (knoop 40922) en twee nieuwe takken (tak 40242 en tak 40243) toe te voegen, met een gewenste debiet van 1 m³/s op tak 40242. Via verdeelsleutels in DM wordt ervoor gezorgd dat dit water wordt aangevoerd uit het ARK (knoop 6041) en wordt afgevoerd naar knoop 6042 op het Noordzeekanaal.

Gemaal van de Burg doorspoeling

De doorspoelvraag van Gemaal Van den Burg (Delfland) was in LHM 4.2 nog 0.5 m³/s. Op aanwijzing van regio West is dit doorspoeldebiet gereduceerd tot 0.1 m³ per seconde.

Parksluizen doorspoelvraag

Op basis van informatie uit de regio West is het zoutlekdebiet van de Nieuwe Maas naar Delfland vergroot naar 0.4 m³/s.

4.4.7 Regio Rivierengebied

Naamgeving Gorinchemse Kanaalsluis – Kolffgemaal

De naamgeving van de districtsinlaat is aangepast in de DWKeys.txt file en in de DM invoerfile met takgegevens (LNKS.txt).

Verificatie districten zonder inlaatcapaciteit

Na controle bleek dat er in een beperkt aantal districten zonder inlaatcapaciteit wel peilbeheerste lsw's waren. Bij districten die eerder gesplitst waren in een deel met wateraanvoer en een deel zonder wateraanvoer bleek het type lsw niet altijd goed te zijn gedefinieerd. Daarom zijn enkele lsw's verschoven van het district zonder wateraanvoer naar het naastliggende district met wateraanvoer. Voor een paar districten is nu wel een kleine inlaatcapaciteit opgenomen (bv. voor district 23, Veluwe).

Aanpassing polderdoorspoeling

Voor de modelberekeningen van fase 2 van het Deltaprogramma Zoetwater is de doorspoeling van polders geactualiseerd, op basis van informatie en gesprekken met verschillende waterbeheerders. Deze actualisatie was nog niet meegenomen in het LHM, en is daarom nu geïmplementeerd.

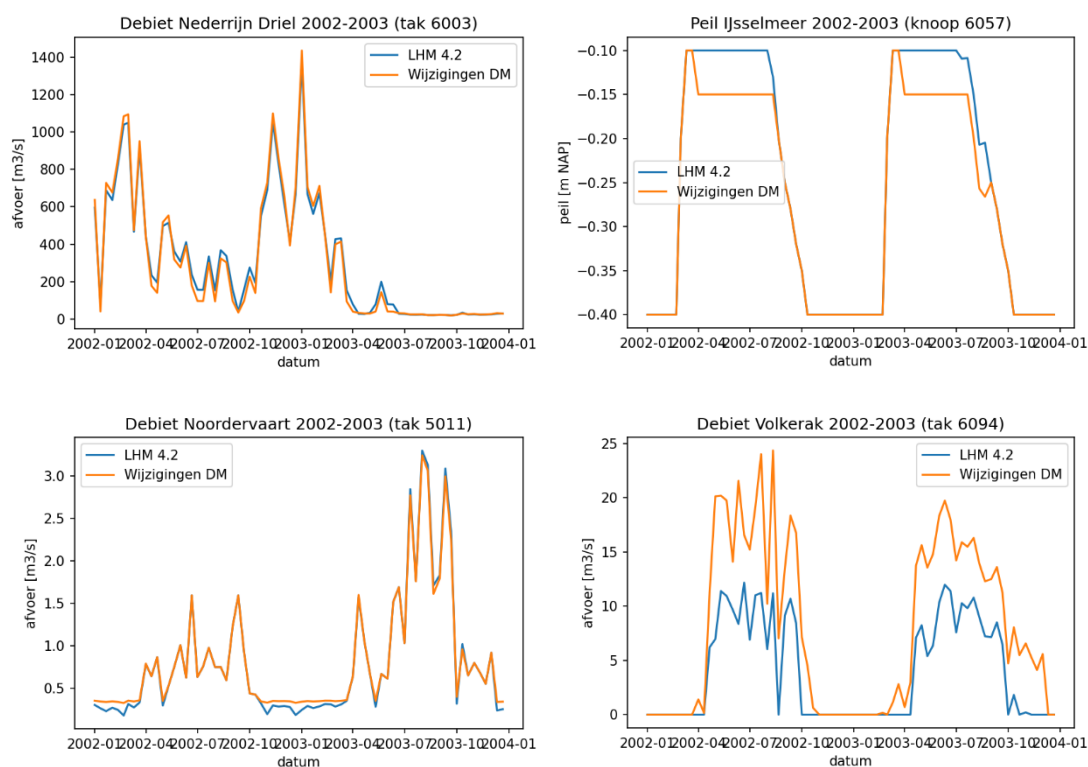
Dinkel toevoegen aan dmdecadeafvoeren

De Dinkel is in LHM 4.2 toegevoegd aan de schematisering. De Dinkel-afvoeren over de landsgrens waren nog niet toegevoegd aan het bestand dmdecadeafvoeren.txt. Deze afvoer is in LHM 4.3 toegevoegd met een vaste waarde van 0.1 m³/s.

4.5 Effecten van de wijzigingen in DM

De wijzigingen in DM zijn getest voor de hydrologische jaren 2002-2003 en vergeleken met de resultaten van LHM 4.2. In de testsom is gebruik gemaakt van een gekoppelde versie van DM en MOZART, waarbij de wijzigingen in MetaSWAP en MODFLOW niet zijn meegenomen, zodat de focus ligt op verificatie van het effect van de specifieke DM wijzigingen.

Vanwege de grote hoeveelheid informatie zijn in deze paragraaf ter illustratie enkele voorbeelden van uitkomsten getoond (zie figuur 4.9); aanzienlijk meer modelresultaten in het waterverdelingsnetwerk in DM zijn weergegeven in bijlage C. Voor verdere informatie en uitgebreide toelichting op de resultaten wordt verwezen naar het achtergrondrapport van DPZW (Pouwels et al, 2023, in prep.).



Figuur 4-9 Voorbeeld van berekende uitvoer van DM, berekend voor 2002 en 2003, voor- en na aanpassingen in het Distributiemodel. Linksboven: berekende afvoeren van de IJssel. Rechtsboven: peil van het IJsselmeer. Linksonder: afvoer van de Noordervaart. Rechtsonder: Debiet van de Volkerak. In blauw de uitvoer van LHM 4.2, in oranje de uitvoer als gevolg van de aanpassingen in DM.

Hieronder wordt een toelichting op de resultaten in figuur 4.9 gegeven:

- Bij dezelfde opgelegde afvoeren bij Lobith heeft de Nederrijn iets hogere afvoeren in het hoge afvoerbereik, en iets lagere afvoeren in het lage afvoerbereik in vergelijking met LHM 4.2. Dit is conform de verwachting.
- Als gekeken wordt naar de overige afvoerverdeling over de Rijntakken (zie bijlage C), dan valt de berekende IJsselaflow op, aangezien de berekende afvoer in LHM 4.3 hoger is dan in LHM 4.2. Dit is minder eenduidig te verklaren op basis van alleen de nieuwe invoer, ook de huidige afvoerverdeling moet worden beschouwd. Deze is gebaseerd op het stuwprogramma 2012, dat voor een beperkt bereik (Lobith afvoeren tussen 1500 en 2600 m³/s) de verdeling aangeeft. Zowel bij lage afvoeren als bij hoge afvoeren zijn de oorspronkelijke verdeelsleutels handmatig bijgesteld, wat leidt tot afwijkingen in de berekeningen.
- Het peilbeheer voor het IJsselmeer (zie figuur 4.9) is correct geïmplementeerd in LHM 4.3. Uit de modelresultaten blijkt dat voor LHM 4.2 het zomerpeil op -0.10 m NAP gehandhaafd wordt, terwijl in LHM 4.3 het peil op -0.15 m NAP zit.
- Uit de resultaten van het debiet op de Noordervaart (zie figuur 4.9), blijken kleine verschillen die toegeschreven worden aan de extra inlaatcapaciteit van districten en aangepaste prioriteiten.

- Vergelijking van het debiet door het Volkerak (zie figuur 4.9) laat zien dat er meer water van het Hollands Diep naar het Volkerak wordt geleid. Door het expliciet opgeven van het gewenste debiet bij de Krammersluizen wordt er nu bij Bath (tak 6097) wat minder water naar de Westerschelde wordt afgevoerd, vooral in de winter, want in de zomer is er door het gewenste debiet dat bij de Eendracht is opgegeven nauwelijks een verschil.

Voor de overige figuren in bijlage C wordt het volgende opgemerkt:

- De verificatie laat zien dat de nieuwe aanvoerroute ARK-Markermeer (KZH) in LHM 4.3. standaard niet gebruikt wordt; dat is correct.
- Uit de resultaten blijkt dat door aanpassing van de capaciteit van de Bernhardsluizen de debieten via de Irenesluizen nauwelijks zijn aangepast.
- De wijziging van de debieten over de Oranjesluizen komen overeen met wat verwacht wordt op basis van aanpassing van de invoer.
- De verhoging van de doorspoeling van de Afsluitdijk werkt correct in LHM 4.3.
- De doorspoeling bij de Afsluitdijk is in LHM 4.3 verhoogd t.o.v. LHM 4.2, conform de aanpassing.
- Voor de diverse aanvullende aanpassingen in de regionale watersystemen zijn de resultaten over het algemeen eveneens conform de verwachting en in overeenstemming met de aangepaste invoer.

Voor verdere toelichting op de effecten van de aanpassingen op de berekeningsresultaten wordt verwezen naar het achtergrondrapport van DPZW (Pouwels et al, 2023, in prep.).

5 Onderhoud software

5.1 Inleiding

In Tabel 5-1 is overzicht gegeven van de gebruikte software in LHM 4.3. De grootste wijzigingen in de software hebben plaatsgevonden in MetaSWAP (paragraaf 5.3). De nieuwe MetaSWAP-versie is onderdeel van een nieuwe iMOD versie, iMOD 5.6. De wijzigingen zijn in dit hoofdstuk samengevat. Meer informatie over de wijzigingen in de software wordt gegeven in de releasenotes van iMOD 5.6 (Deltares, 2023).

In de software van MOZART en DM zijn geen wijzigingen doorgevoerd, voor deze modellen zijn uitsluitend wijzigingen in de schematisering doorgevoerd. Wel is de actuele versie van MOZART en DM opnieuw gekoppeld aan de nieuwste MetaSWAP en MODFLOW-versie⁸.

Ook in de voorbereidingen zijn diverse wijzigingen doorgevoerd. Voor het aanmaken van invoer voor het topsysteem is gebruik gemaakt van de nieuwe versie van de topsysteemprogrammatuur, zoals beschreven in Hoofdstuk 2. Ook enkele andere scripts zijn aangepast.

Tabel 5-1 Overzicht van de versienummers (SVN) van de gebruikte software in LHM 4.3 en LHM 4.2.

Software	Versie LHM 4.2	LHM 4.3
Aansturing pythonscript	1113	1113
iMODFLOW	2766	3678
MetaSWAP (inc. TRANSOL)	1516	2248
MOZART	1136	1136
MOZART/DM preprocessing meteo	922	922
MOZART preprocessing overig	1193	1193
DM	1146	1146

5.2 Wijzigingen in MODFLOW

Ten opzichte van LHM 4.2 is in LHM 4.3 gebruik gemaakt van een nieuwe MODFLOW versie, die beschikbaar is sinds iMOD 5.5 (voorjaar 2023). In de MODFLOW versie is een bug hersteld voor de savestate optie. Voor een beschrijving wordt verwezen naar de release notes van iMOD 5.5.

Er zijn in de code verder geen wijzigingen doorgevoerd in de berekeningswijze in het grondwater zelf. In iMOD 5.6, waar de nieuwe versie van MetaSWAP is opgenomen, die wordt gebruikt in LHM 4.3, zijn geen aanvullende aanpassingen in de rekencode van MODFLOW opgenomen. Wel wordt ten overvloede gewezen op eerdere aanpassing in de rekencode vanaf iMOD 5, voor het afhandelen van breuken, zie hiervoor de eerder gemaakte opmerkingen in paragraaf 2.1.1.

Verder wordt opgemerkt dat in de preprocessing routines van iMOD wel enkele wijzigingen zijn doorgevoerd, die in de gecombineerde toepassing met MetaSWAP van invloed kunnen zijn op het berekenen van maatregelen met LHM. Hiervoor wordt verwezen naar de opmerkingen in het begin van de releasenotes van iMOD 5.5.

⁸Deze koppeling is geduid als `Driver_iMODFLOW55_svn3677_MetaSWAP8122_DPZWtak_svn2224.exe`.

5.3 Wijzigingen in MetaSWAP

In de modelcode van MetaSWAP is een groot aantal wijzigingen doorgevoerd. Tijdens de ontwikkeling van LHM 4.3 is gewerkt met een Beta-versie van iMOD 5.6. Aanvullend zijn in deze code nog enkele maatregelen voor toepassing binnen DP Zoetwater toegevoegd, en vervolgens getest. Het resultaat is uitgebracht als iMOD 5.6. Voor een compleet overzicht van de aanpassingen in MetaSWAP wordt verwezen naar de bijlage van aanpassingen in MetaSWAP in de releasenotes van iMOD 5.6. De opgeleverde versie 4.3 is (na oplevering) ook toegepast in combinatie met iMOD 5.6, om te verifiëren dat de modelresultaten van LHM 4.3 niet zijn gewijzigd bij toepassing van de officiële iMOD release.

In de nieuwe release iMOD 5.6 komen verschillende ontwikkelsporen van MetaSWAP samen, die zijn gerealiseerd in:

- Beheer en onderhoudswerkzaamheden in 2022 en 2023, in het kader van NHI. Daarbij zijn diverse issues opgepakt, die door de gebruikers zijn gemeld. Hiervoor wordt verwezen naar de releasenotes van iMOD 5.4, 5.5 en 5.6.
- Extra functionaliteiten voor maatregelen, die ontwikkeld zijn in het kader van het TKI project conceptuele modelontwikkelingen NHI, zijn opgenomen in de hoofdversie van MetaSWAP. Het betreft berekeningen met regelbare drainage en subirrigatie. Voor meer details wordt verwezen naar de wiki-website⁹ van dit TKI-project, en de aanvullende aanpassingen die zijn doorgevoerd ten behoeve van DPZW, zoals is toegelicht in bijlage A.
- Ontwikkelingen in het kader van AZURE, waarin beter wordt omgegaan in storende lagen, desgewenst in combinatie met een nieuwe database voor MetaSWAP. De wijzigingen zijn toegepast in de LHM-release en beschreven in paragraaf 3.4.1 en 3.4.2. Voor aanvullende achtergrondinformatie wordt verwezen naar Kok et al (2022) en implementation proposal en testproposal 071, 076 en 81 (van Walsum 2022, 2023).
- Voor de koppeling met WOFOST is in 2021 een uitsplitsing van de berekende gewasproductieschades gemaakt als gevolg van droogtestress, zuurstofstress en indirecte schade als gevolg van vertraagde groei in het voorjaar. De details zijn beschreven in implementation proposal en testproposal 69 (Van Walsum 2021). . Uitsplitsing van gewasschades maakte al onderdeel van de MetaSWAP-versie die is toegepast in LHM 4.2, maar in 2022 zijn nog enkele kleine correcties in de administratie van de gewasschades in de modelcode doorgevoerd op basis van bevindingen die naar voren kwamen bij een vergelijking van LHM-resultaten met satellietbeelden. Voor meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar Testprosal 69 (Van Walsum, 2022) en de vergelijking van modelresultaten van het LHM met satellietinformatie (Meshgi et al, 2022).
- Voor DP Zoetwater zijn extra functionaliteiten toegevoegd en getest in de nieuwe versie van MetaSWAP om effecten te kunnen berekenen van:
 - o regelbare drainage is ook toepasbaar gemaakt voor LHM, desgewenst in combinatie met subirrigatie. Daarbij is een uitbreiding gerealiseerd voor beperking van wateraanvoer.
 - o Druppelirrigatie, inclusief extra functionaliteiten voor zogenaamde diepe druppelirrigatie.
 - o Beregeningsverboden: functionaliteiten zijn toegevoegd om effecten van een beregeningsverbod te kunnen berekenen.
 - o Zuiniger beregenen: functionaliteiten zijn toegevoegd om effecten van zuiniger beregenen te berekenen.

⁹ <https://publicwiki.deltares.nl/display/TKIP/DEL143+-+Conceptuele+modelverbetering+NHI>

De laatst genoemde categorie aanpassingen in MetaSWAP betreffen vooral een toename in functionaliteiten die geen invloed hebben op de berekeningsresultaten van LHM, maar wel meer mogelijkheden voor de toepassing van LHM, o.a. en behoefte van DPZW. Deze extra functionaliteiten t.b.v. berekening van maatregelen zijn verder beschreven in bijlage A.

5.4 Wijziging in de voor- en nabewerkingsprogrammatuur

5.4.1 Inzet van nieuwe topsysteemscripts

De basis voor de nieuwe topsysteemroutine is ontwikkeld in 2021 (Schoonderwoerd et al, 2021). Het script is nu voor het eerst toegepast in de release van LHM. De nieuwe scripts zijn tegelijkertijd opgeleverd met LHM 4.1 en daarom nog niet eerder toegepast in LHM 4.1. Tijdens het ontwikkelen van LHM 4.2 bleek onvoldoende tijd beschikbaar om over te stappen op het nieuwe script, in combinatie met de veranderingen die moesten worden doorgevoerd.

Ten behoeve van berekeningen van DPZW is het nieuwe script nu wel toegepast voor LHM 4.3, aangezien de invoerparameters voor het topsysteem met de nieuwe programmatuur beter herleidbaar en inzichtelijk worden gegenereerd, waardoor ook maatregelen op deze wijze kunnen worden afgeleid.

De voorbewerkingsscripts die voor het genereren van invoergegevens voor het topsysteem zijn gebruikt zijn recent herzien (Schoonderwoerd et al, 2022), in samenwerking met DP Zoetwater, om ook voor de maatregelen in DP Zoetwater de modelinvoer verder herleidbaar en inzichtelijk te maken. Een voorbeeld hiervan is de toekenning van informatie uit regionale verdringingsreeksen (zie paragraaf 4.2). Bij de herziening van het script is er ook voor gekozen de volgorde van toekennen van informatiebronnen te wijzigen, en bovendien een recente informatiebron toe te voegen. Een uitgebreide beschrijving en het effect van deze wijzigingen is te vinden in paragraaf 2.2.

5.4.2 Grid2metaswap

In het programma grid2metaswap is ervoor gezorgd dat de svat-indeling niet meer automatisch wordt toegekend, maar dat dit gebeurt op basis van een invoerkaart met svat-nummers. Dit was nodig om de MetaSWAP modelinvoer van de Waddeneilanden en het stuk België en Duitsland op een correcte manier aan te maken. Deze gebieden zijn in LHM 4.0 (Hunink et al., 2020) toegevoegd aan het model, maar de preprocessing was daar nog niet gereed voor gemaakt. Dit is nu aangepast. Bovendien is het script op onderdelen aangepast, om ook maatregelen voor Zoetwater aan te kunnen passen. Hiervoor wordt verwezen naar de opmerkingen over Grid2metaswap voor de aanpassing van druppelirrigatie en het berekenen van beregeningsverboden, zie bijlage A1 en A3.

5.4.3 Wijziging in de aansturingsfile Setup_LHM

Bij toekomstige toepassing van LHM 4.3 zal naar verwachting gebruik worden gemaakt van nieuwe aansturingsscripts. Het script nhi.py wordt vervangen door Setup_LHM. Het vernieuwde aansturingsscript van LHM is ontwikkeld in het kader van DPZW, parallel aan de ontwikkeling van release LHM 4.3, en dus nog niet gebruikt bij de ontwikkeling van LHM 4.3. Het aangepaste script zal wel worden toegepast voor de berekeningen van maatregelen voor DP Zoetwater.

Hieronder volgt een beschrijving van het script. Voor aanvullende informatie en laatste aanpassingen in het script wordt verwezen naar de achtergrondrapportage van DP Zoetwater (Pouwels, 2023).

Met Setup_LHM kunnen vanuit de modelinvoer runs met het LHM worden aangestuurd. Bij toepassing van de voorganger, nhi.py, bleek de objectgeoriënteerde benadering in dat script de gegevensstroom te belemmeren, wat het onderhouden en ontwikkelen van de programmatuur bemoeilijkte. Daarom is in Setup_LHM gekozen voor een andere aanpak, waarbij een aantal Python-scripts wordt gebruikt en elk Python-script een taak heeft om een specifieke set bestanden te maken. De afhankelijkheid tussen de scripts wordt verzorgd door de workflowmanager Snakemake.

De huidige workflow bestaat uit de volgende Python-scripts:

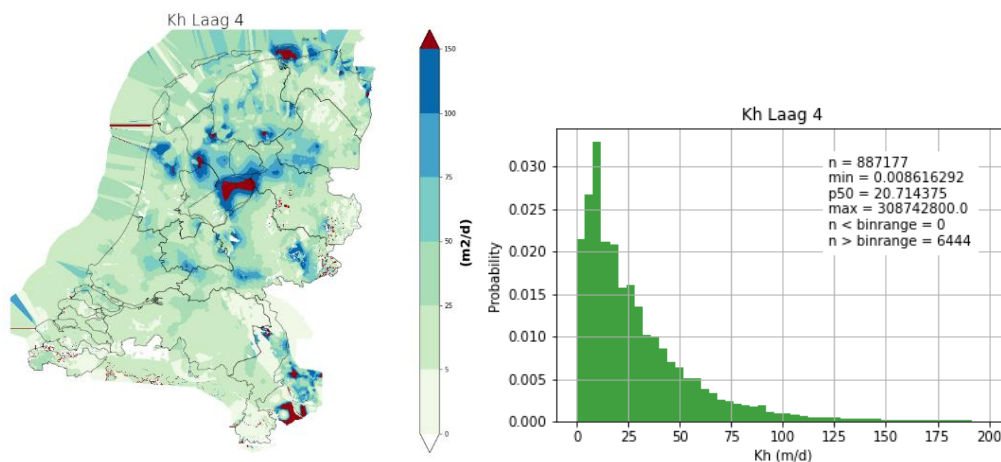
- append_borders.py
- convert_to_runfile.py
- copy_files.py
- create_para_post.py
- create_parasim.py
- example_imodflow.py
- mod2svat_to_dxc.py
- prepare_init_svat.py
- prepare_modsimmozart.py
- prepare_solute_coliii.py
- prepare_start_idfs.py
- read_toml.py
- run_grid2metaswap.py
- run_meteo.py
- run_mozartin.py
- write_control_files.py
- write_dm_prm.py
- write_dm_sobek.py
- write_imodflow.py
- write_metegrid.py
- write_meteo_inp.py
- write_meteostat.py
- write_meteostat_dm.py
- write_meteoval.py
- write_mozart_dm_bat.py
- write_mozart_dm_controller.py
- write_mozart_prm.py

De specificaties van de LHM-run die klaarzet zijn beschreven in het bestand *lhm.toml*. Dit bestand bevat alle paden naar bestanden die nodig zijn om Setup_LHM uit te voeren. Verder bevat het bestand *lhm.toml* enkele belangrijke instellingen, zoals de starttijd, eindtijd en de modeldirectory.

5.4.4 LHM Invoer Controle Tool

Ervaringen met LHM 4.2 en binnenkomende issues hebben de behoefte onderstreept om meer grip te hebben op de modelinvoer van het LHM. Gezien de veelheid aan modelinvoerbestanden, de complexiteit van het model en de dynamiek in de ontwikkeling van de modelinvoer bleek een uitgebreidere modelcontrole nodig. Daarom is tijdens de ontwikkeling van LHM 4.3 besloten tot de bouw van een “LHM Invoer Controle Tool”. Dit is een Pythonscript dat alle MODFLOW-invoer van het LHM inleest, visualiseert en controleert op een groot aantal aspecten. De visualisatie gebeurt zowel met behulp van 2D figuren, bijv. per modellaag, per ontwateringssysteem, als met histogrammen.

In figuur 5.7 zijn voorbeelden van het werken met de tool gegeven. In de 2D figuren worden extreme waarden geaccentueerd met opvallende kleuren. In de histogrammen worden tevens enkele statistieken van de parameterverdeling gegeven. In de figuur is te zien dat voor een bepaalde parameter, in het voorbeeld de horizontale doorlatendheid van modellaag 4, er enkele zones zijn (in rood) met een Kh-waarde hoger dan 150 m/d.



Figuur 5-7 Voorbeeld van invoervisualisatie door de LHM Invoer Controle Tool. Getoond wordt de Kh van modellaag 4 (in m/d) van een ontwikkelversie van LHM.

De tool voert verder een aantal consistentiechecks uit. Deze bestaan uit:

- Het loggen van het aantal voorkomens van extreme waarden (per laag of systeem);
- Het visualiseren van de locaties van extreme waarden in 2D figuren;
- Het visualiseren van de verdeling van (extreme) waarden in histogrammen;
- Het onderling vergelijken van afhankelijke parameters, en visualisatie ervan. Daarbij worden ook verdachte waarden weggeschreven in een log bestand.

De LHM Invoer Controle Tool is ingezet bij de ontwikkeling van LHM 4.3 en kan eveneens bij toekomstige analyses van het model worden ingezet.

6 Resultaten LHM 4.3

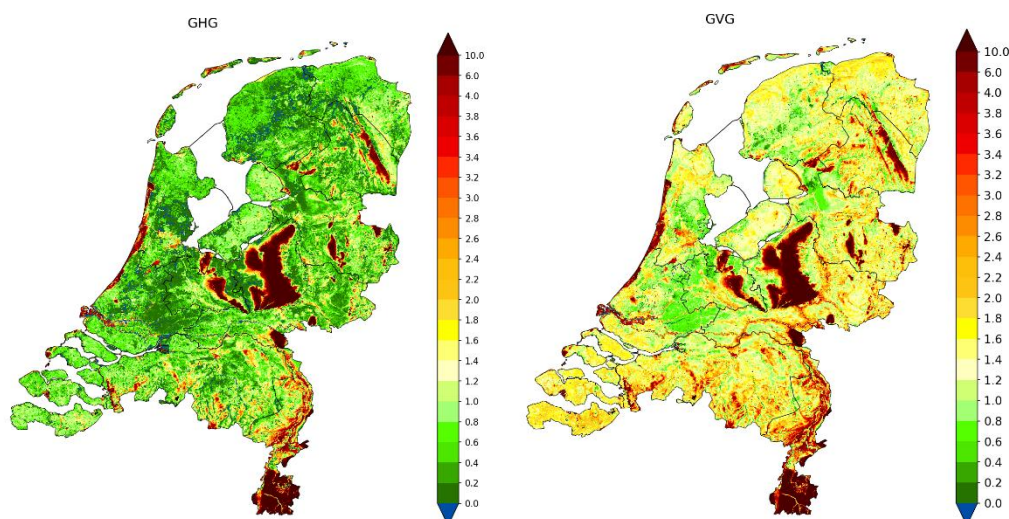
6.1 Inleiding

In voorgaande hoofdstukken zijn de afzonderlijke wijzigingen beschreven in de schematisering en de parameterisering van de ondergrond, de onverzadigde zone en het oppervlaktewater, inclusief de aanpassingen in de software die zijn doorgevoerd. Dit hoofdstuk gaat in op de resultaten van de gezamenlijke wijzigingen in het LHM. Hiervoor is een langjarige berekening uitgevoerd waarin alle hiervoor beschreven aanpassingen zijn verwerkt in het landelijk model.

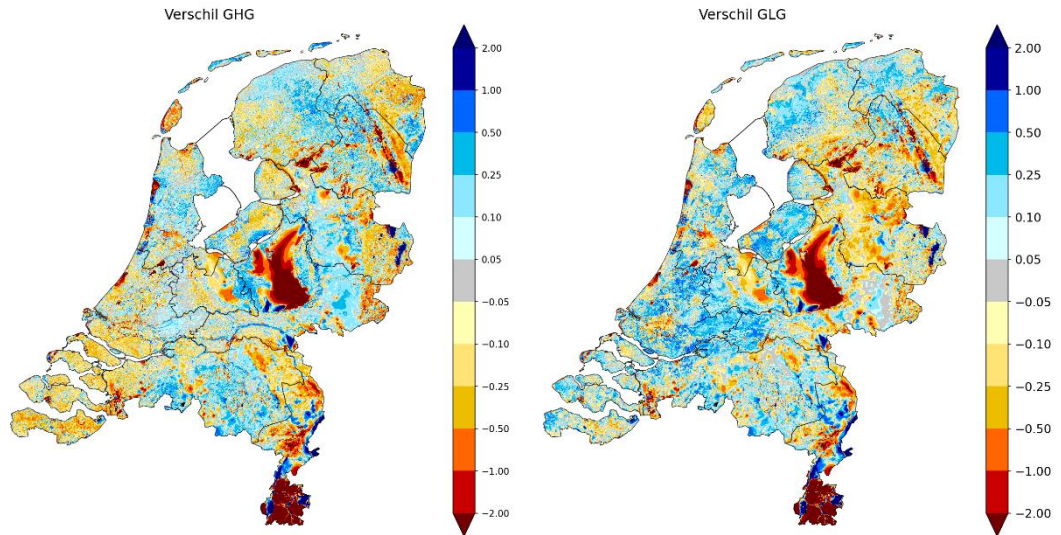
De berekening is uitgevoerd voor de periode 2009 – 2018. Daarbij zijn de jaren 2009 en 2010 als inspeeljaren gebruikt en de modeluitkomsten geanalyseerd voor de referentieperiode 2011 – 2018, of voor specifieke jaren binnen deze periode. De resultaten van LHM 4.3 zijn vergeleken met de modelresultaten van LHM 4.2 (Janssen et al., 2022).

6.2 Resultaten grondwater

In Figuur 6-1 zijn de GHG en de GLG weergegeven voor LHM 4.3 berekend over de periode april 2011 - april 2018. In Figuur 6-2 is de verandering weergegeven in de berekende GHG en GLG ten opzichte van LHM 4.2.



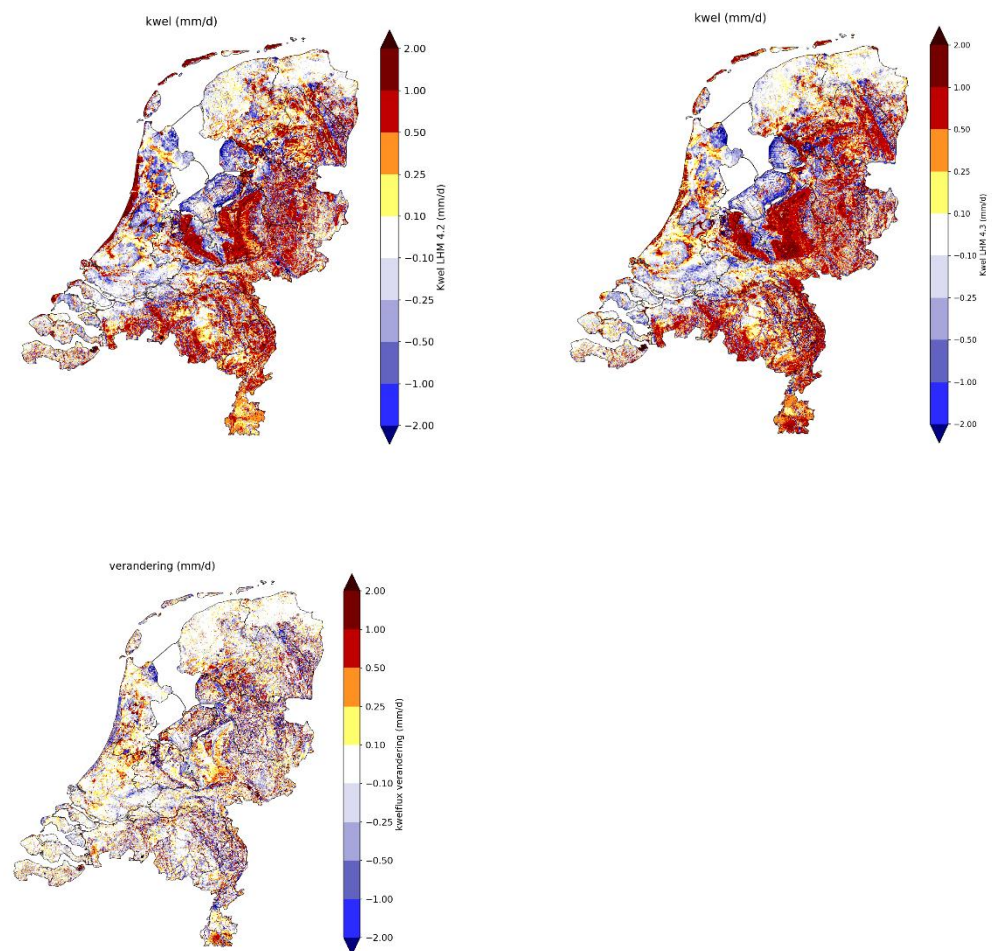
Figuur 6-1 GHG (links) en de GLG (rechts) voor LHM 4.3 (in m-mv). De GHG en GLG zijn afgeleid voor de periode april 2011- april 2018.



Figuur 6-2 Verandering van de berekende GHG (links) en de GLG (rechts) als gevolg van alle aanpassingen tussen LHM 4.3 en LHM 4.2. De GHG en GLG zijn afgeleid voor de periode april 2011-april 2018. Blauwe kleuren geven aan dat LHM 4.3 hogere grondwaterstanden heeft dan LHM 4.2.

De verschillen tussen LHM 4.3 en 4.2 zijn het gevolg van een complexe optelsom, niet alleen van de individuele modelaanpassingen in parameters en in de software van met name MODFLOW en MetaSWAP; ook het resetten van de MODFLOW- parameters van LHM 4.2 en vervolgens de nieuwe kalibratie hebben bijgedragen aan de regionale wijzigingen. De patronen tonen regionaal grote verschillen; in delen van het land is een verhoging van zowel GHG als GLG waarneembaar, bijvoorbeeld in de Centrale Slenk (in het oosten van Brabant). In andere delen zijn juist verlagingen waarneembaar (bijvoorbeeld het oosten van Overijssel en de grotere infiltratiegebieden zoals de Veluwe en diverse stuwwallen en Limburg. Ook zijn er grote delen waar de berekende GHG min of meer gelijk blijft of droger wordt, terwijl de GLG wel vernet, bijvoorbeeld in grote delen van het groene hart. Nadere validatie moet aantonen in hoeverre de veranderingen ook inderdaad verbeteringen betekenen. Hier wordt in paragraaf 6.5 nader op ingegaan.

In Figuur 6-3 is de kwel en wegzijgingskaart voor LHM 4.2 en LHM 4.3 weergegeven, samen met de veranderingen t.o.v. LHM 4.2. Uit de figuur blijkt een diffuus beeld van toename en afname van kwel. Ook hier geldt dat door het grote aantal wijzigingen het lastig is de berekende veranderingen in kwelpatronen toe te kennen aan individuele modelwijzigingen. Het terugzetten van de kalibratie van LHM 4.2 en de herkalibratie van LHM 4.3 speelt hier sowieso sterk doorheen. Aanvullende validatie van LHM 4.3 die uitgevoerd zal worden t.b.v. de toepassing van LHM 4.3 binnen LWKM zal naar verwachting meer duiding geven in welke mate de resultaten van LHM 4.3 ook meer plausibel zijn.

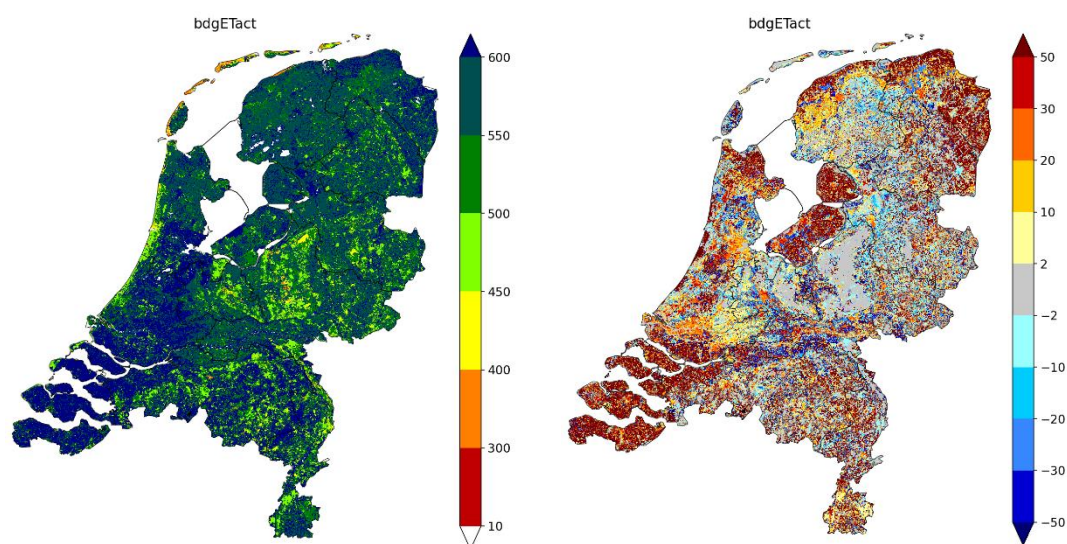


Figuur 6-3 Gemiddelde kwel en wegzijging kaart (flux tussen 1e en 2e modellaag) voor LHM 4.2 (linksboven), LHM 4.3 (rechtsboven) en de verandering van gemiddelde kwel en wegzijging tussen LHM 4.3 en LHM 4.2 (onder) over de periode januari 2011- december 2018. Boven: rood = wegzijging, blauw = kwel. Onder: rood = afname kwel of toename wegzijging, blauw = toename kwel of afname wegzijging.

6.3 Resultaten bodem-plant-atmosfeer systeem

6.3.1 Verdamping

In Figuur 6-4 is de berekende actuele verdamping weergegeven voor LHM 4.3, en het verschil ten opzichte van LHM 4.2. De verschillen zijn aanzienlijk en zijn voor het overgrote deel het gevolg van de MetaSWAP-aanpassingen zoals beschreven in Hoofdstuk 3. Dit blijkt bijvoorbeeld uit de grote overeenkomst van de figuur met Figuur 3-17(rechtsonder). Deze aanpassingen zijn met goede redenen doorgevoerd (zie Hoofdstuk 3) en verwacht wordt dat de verdamping daarmee in de goede richting veranderd is. Nadere validatie van de verdamping zal in 2023 plaatsvinden in een vervolgstudie in opdracht van STOWA. Bij nadere bestudering zijn ook verschillen waarneembaar. Dit is grotendeels toe te schrijven aan de gewijzigde interactie tussen het grondwatermodel en MetaSWAP. Door de aanpassingen in MODFLOW, o.a. de kalibratie van de ondergrond, kunnen bijvoorbeeld hogere grondwaterstanden leiden tot meer verdamping, als er meer water beschikbaar is in en rond de wortelzone. Maar ook andere wijzigingen leiden tot aangepaste verdamping, bijvoorbeeld de afname van de berekening in het zandgebied leidt direct tot kleinere gewas verdamping.



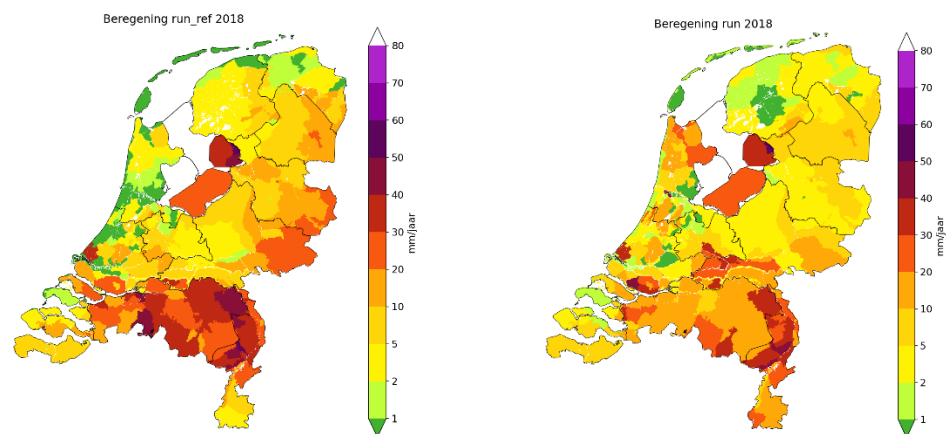
Figuur 6-4 Gemiddelde berekende totale verdamping (ETact, mm/jaar) met LHM 4.3 (links) en het verschil met LHM 4.2 (rechts) voor de periode 2011 – 2018. Blauw is een verlaging van de verdamping; rood is een verhoging van de verdamping.

6.3.2 Berekening

Figuur 6 5 toont op districts niveau de ruimtelijke wijzigingen in totale berekening uit oppervlaktewater en het grondwater, zowel voor LHM 4.2 als LHM 4.3. De figuren tonen nogmaals dat in LHM 4.3 minder wordt berekend t.o.v. LHM 4.2, vooral op de zandgronden. In het holocene deel van Nederland, waar vooral berekening uit oppervlaktewater voorkomt is er een minder eenduidig beeld voor de langjarige berekening, regionaal zijn zowel toe- als afnames waarneembaar.

Het uiteindelijke effect van de berekening in het model is een samenspel van effecten. Naast de wijziging (grotendeels afname) van de beregende arealen spelen secundaire effecten mee. Bijvoorbeeld de hoger berekende grondwaterstanden in veel gebieden in het pleistoceen dragen ook bij aan netto minder berekening, ondanks dat de triggers voor berekening zijn terug gezet naar de meer waarden van LHM 4.1. Wanneer de berekende beregeningsdebieten per jaar worden weergegeven (zie Tabel 6-1), wordt extra duidelijk dat een combinatie van wijziging van beregeningsarealen, drijvende krachten en wijzigingen van de triggers ook niet een eenduidig effect door de tijd. Voor de zandgronden is er wel een eenduidige verlaging, als gevolg van wijziging van de arealen en de verhoging grondwaterstanden. Maar voor de wijzigingen van de oppervlaktewaterberekening worden door de jaren heen zowel toenames als afnames ten opzichte van LHM 4.2 berekend, wat een duidelijke aanwijzing is voor het samenspel tussen wijziging van berekeningstriggers en gewijzigde berekeningen in de bodem, als gevolg van de berekende grondwaterdynamiek.

In Tabel 6-1 is te zien dat voor de meer gematigde jaren een toename van berekening uit oppervlaktewater wordt berekend. Voor het droge jaar 2018 daarentegen is een afname berekend. Een verklaring is dat de afname in de beregeningsarealen juist in een zeer droog jaar een relatief grote rol speelt, aangezien het model in zo'n zeer droog jaar al voldoende worden getriggerd door de sterk uitzakkende grondwaterstanden.



Figuur 6-5 Berekende totale berekening per LSW (oppervlaktewater + grondwater (rechts) in LHM 4.2 (links) en LHM 4.3 (rechts), weergegeven voor 2018. Beregeningshoeveelheden zijn gemiddeld over het totale oppervlak van de LSW.

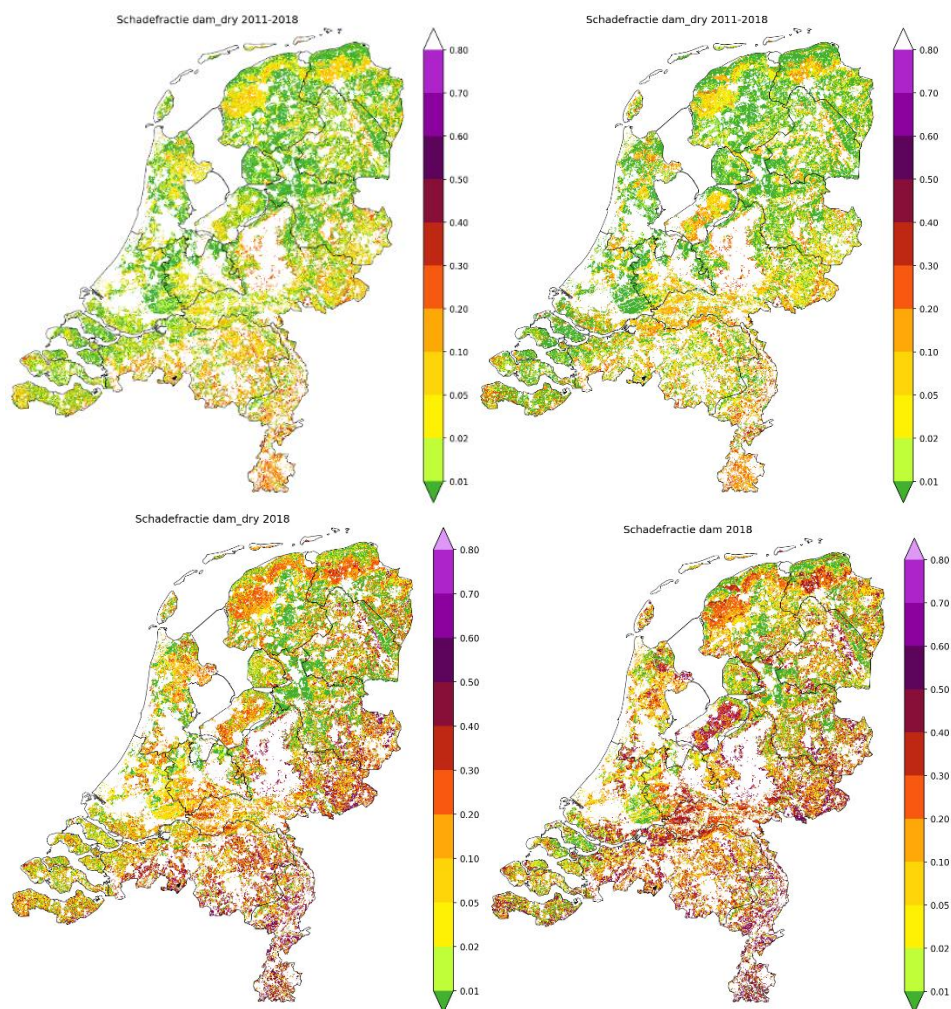
Tabel 6-1 Beregeningshoeveelheden (Mm^3) in LHM 4.2 en LHM 4.3, uitgesplitst naar oppervlaktewater en grondwater

	LHM 4.2			LHM 4.3		
	Oppervlaktewater	Grondwater	Totaal	Oppervlaktewater	Grondwater	Totaal
2011	57	119	176	43	70	113
2012	19	49	68	30	42	72
2013	37	122	160	49	88	136
2014	32	61	93	41	51	93
2015	46	155	201	52	100	152
2016	26	41	67	37	41	78
2017	51	135	186	57	90	147
2018	121	295	417	112	226	337

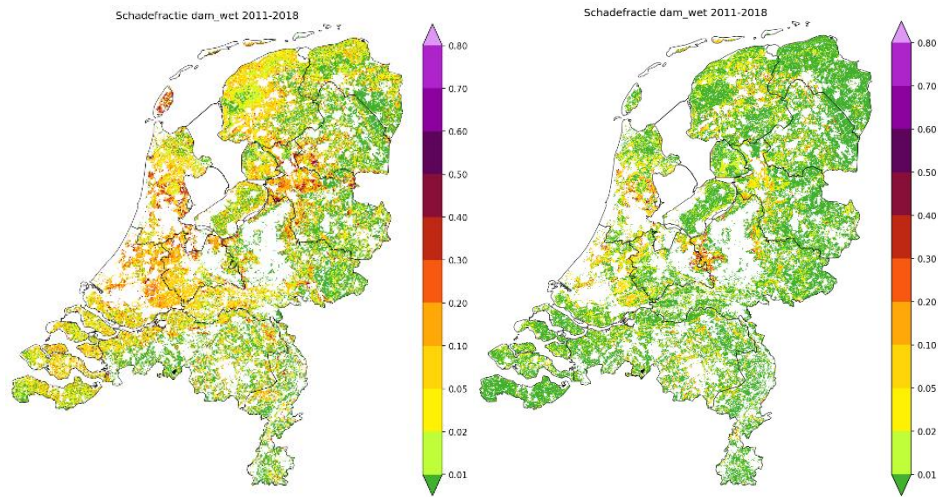
6.3.3 Droogte- en natschade

Figuur 6-6 toont de berekende droogte- en natschade voor LHM 4.2 en LHM 4.3. De langjarig gemiddelde droogteschade is in LHM 4.3 in grote delen van de zandgronden tussen de 5 en 15%, wat conform de verwachting is voor deze periode. Dat lijkt aan de hoge kant, doorgaans worden meer waarden tussen 5 en 10% verwacht voor een langjarige periode. Bedacht moet worden dat ook het jaar 2018 onderdeel maakt van de langjarige berekening, en dit jaar trekt het langjarig gemiddelde over de 8 jaren met circa 2 procent omhoog.

De patronen voor droogteschade in LHM 4.2 en LHM 4.3 zijn redelijk vergelijkbaar, maar er zijn regionaal wel duidelijk verschillen waarneembaar. Een voorbeeld is de grotere droogteschade (verdampingsreductie) op de kleigronden in het rivierengebied en Flevoland, terwijl de GLG wel overwegend is toegenomen. De grotere droogteschade is het gevolg van de wijziging in de bodemfysische database (zie paragraaf 3.4) en de bijstelling in parameters voor droogte (zie paragraaf 3.8). In delen van de zandgrond, bijvoorbeeld in het oosten van Brabant is de droogteschade afgenomen, door de ondieper berekende grondwaterstanden, ondanks bijstelling van droogteparameters. Als ook de droogteschade in een zeer droog jaar 2018 wordt beschouwd, dan blijkt dat de mate waarin het model reageert op droogtestress regionaal wat is gewijzigd, door bijstelling van de droogteparameters (zie paragraaf 3.8).



Figuur 6-6 Berekende droogte in LHM 4.2 (links) en LHM 4.3 (rechts) in procenten opbrengstreductie. Boven langjarige gemiddelde berekend over de jaren 2011-2018. Onder gemiddeld over 2018.

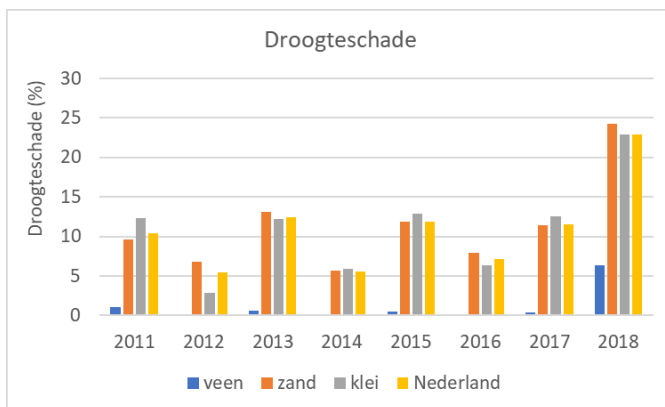


Figuur 6-7 Berekende schade door zuurstofstress, gemiddeld over de jaren 2011-2018, in procenten opbrengstreductie. Links: LHM 4.2. Rechts: LHM 4.3.

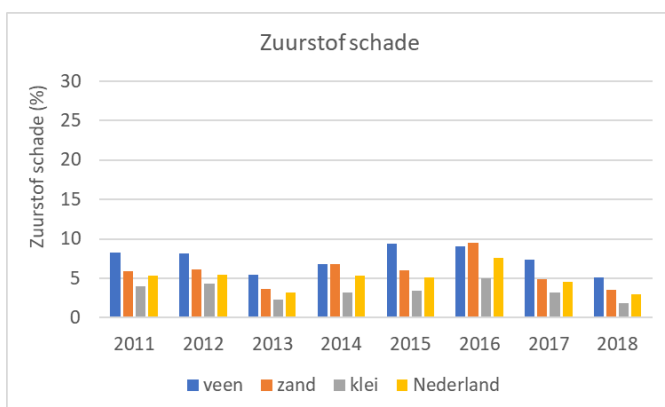
Bij de berekening van zuurstofstress zijn aanzienlijk grotere wijzigingen waarneembaar dan de berekening van de droogteschade. De berekende natschade, met name op de kleigronden, is aanzienlijk lager dan in LHM 4.2, wanneer in deze versie ook wordt gerekend met zuurstofstress. De verklaringen hiervoor zijn:

- Aanpassing van zware klei bouwstenen in de MetaSWAP database, waarbij door aanpassing van de k-h relatie de natschade later optreedt, ondanks het resetten van de lichte kleibouwstenen, naar de originele zwaardere kleibouwstenen (zie sectie 3.4.1).
- De Zuurstofstress wordt meer gecompenseerd door de lagere Jarvis parameter (zie sectie 3.6).
- Verhoging van de k-h relatie van kleigronden met een factor 1.5 (na aanvankelijke reset van deze factoren bij gebruik van de nieuwe MetaSWAP database, zie sectie 3.7). Dat heeft gevolgen voor zowel de droogtestress als de zuurstofstress. Beide gaan hierdoor omlaag, vanwege respectievelijk de toegenomen capillaire opstijging en het makkelijker kunnen percoleren. De keuze wordt verantwoord geacht gezien de relatief grote onzekerheid van de doorlatendheid in de Van Genuchten parameters (Heinen, 2018).
- Om de aanvankelijk te hoog geachte droogteschade van kleigronden verder terug te dringen is de pF-curve met een factor 1.176 verruimd in het hele profiel via de optie voor de schalingsfactor in MetaSWAP (zie sectie 3.7). Hiermee wordt voor kleigronden de berging in de wortelzone vergroot en tevens de 15% reductie van de berging beneden 0.5 m-mv geneutraliseerd.

In de figuur 6.8 en 6.9 is een uitsplitsing gemaakt van respectievelijk de berekende droogteschade en schade door zuurstofstress in LHM 4.3.



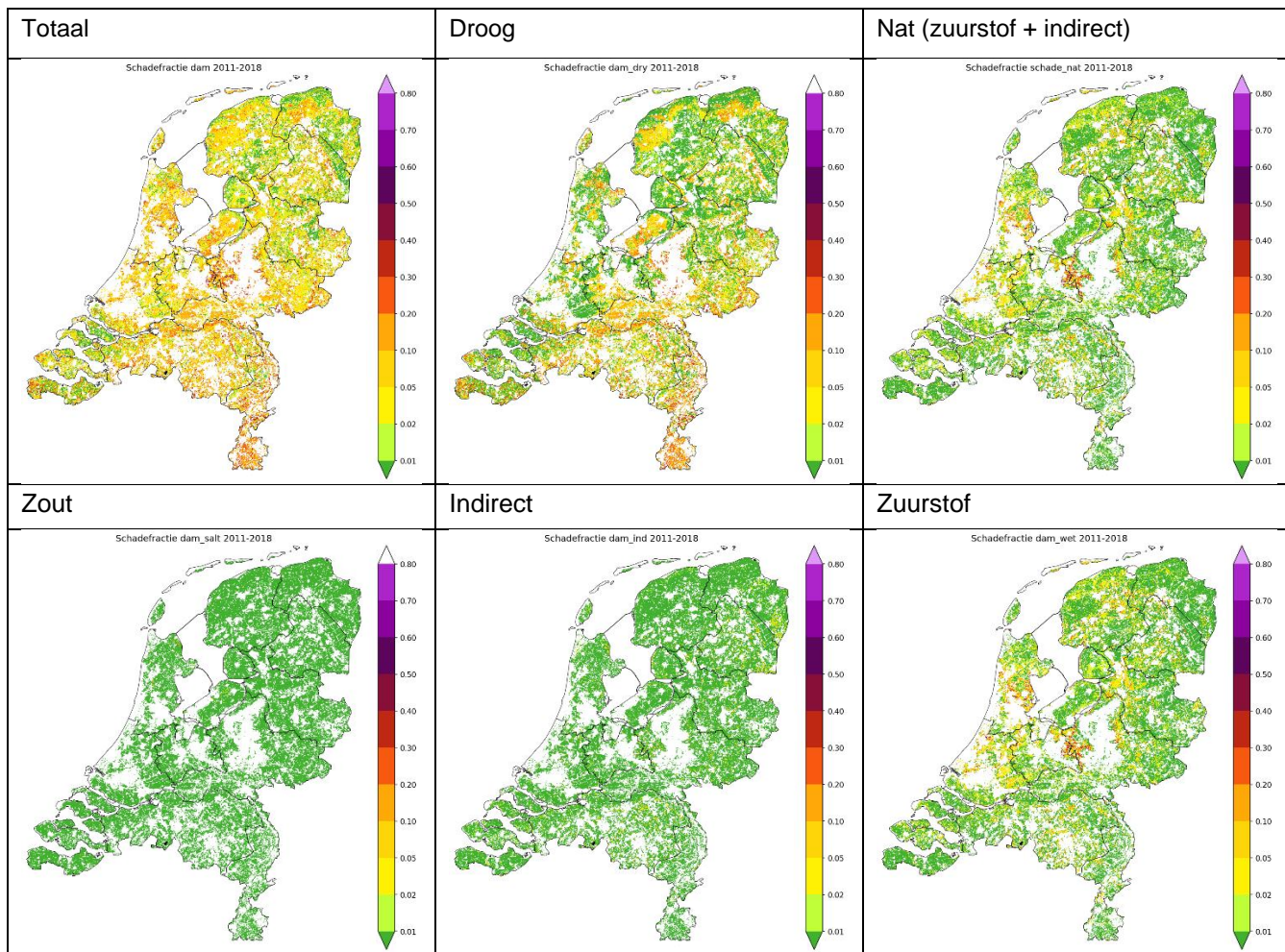
Figuur 6.8 Jaarlijks gemiddelde jaarlijkse droogteschade voor een indeling in zand, veen en klei en voor heel Nederland, gemiddeld over alle landbouwgewassen die met WOFOST berekend worden.



Figuur 6.9 Jaarlijks gemiddelde schade door zuurstofstress (rechts) voor een indeling in zand, veen en klei en voor heel Nederland gemiddeld over alle landbouwgewassen die met WOFOST berekend worden.

Uit figuur 6.8 is af te leiden dat de droogteschade op zand en kleigronden gemiddeld nagenoeg even groot zijn. Dit is opvallend maar heeft twee belangrijke verklaringen. Ten eerste worden de berekende grondwaterstanden in LHM 4.3 in delen van de zandgronden te ondiep gemodelleerd (in paragraaf 6.5 wordt hier verder op ingegaan). Daarnaast wordt op de zandgronden aanzienlijk meer berekend dan op de kleigronden. Aanbevolen wordt om in aanvullende validatie van de schadeberekeningen ook een simulatie uit te voeren zonder berekening, om dit effect nader te kwantificeren. Verder valt op in uit figuur 6.8 (en figuur 6.6) dat nauwelijks droogteschade op veengronden berekend wordt. Dit betreft een beperkt deel van Nederland waar het grondwater grotendeels erg ondiep is. Alleen in 2018, een extreem droog jaar, was er meer dan 6% droogteschade. Daarentegen wordt de meeste schade door zuurstofstress berekend op veengronden (zie figuur 6.9), gemiddeld rond tussen de 5 en 10%. Voor Nederland is gemiddeld tussen de circa 2.5 en 7 procent natschade berekend. De natschade kan lokaal sterk variëren van jaar tot jaar. In 2016 bijvoorbeeld zijn er op de zandgronden hoge schades als gevolg van zuurstofstress berekend (gemiddeld bijna 10 procent), dit is te verklaren door de lokaal intense regenbuien met regionaal wateroverlast in dat jaar.

In de nieuwe MetaSWAP code die in LHM 4.3 is gehanteerd is het mogelijk een uitsplitsing te maken naar alle berekende landbouwschades. Dit is weergegeven in figuur 6.10.



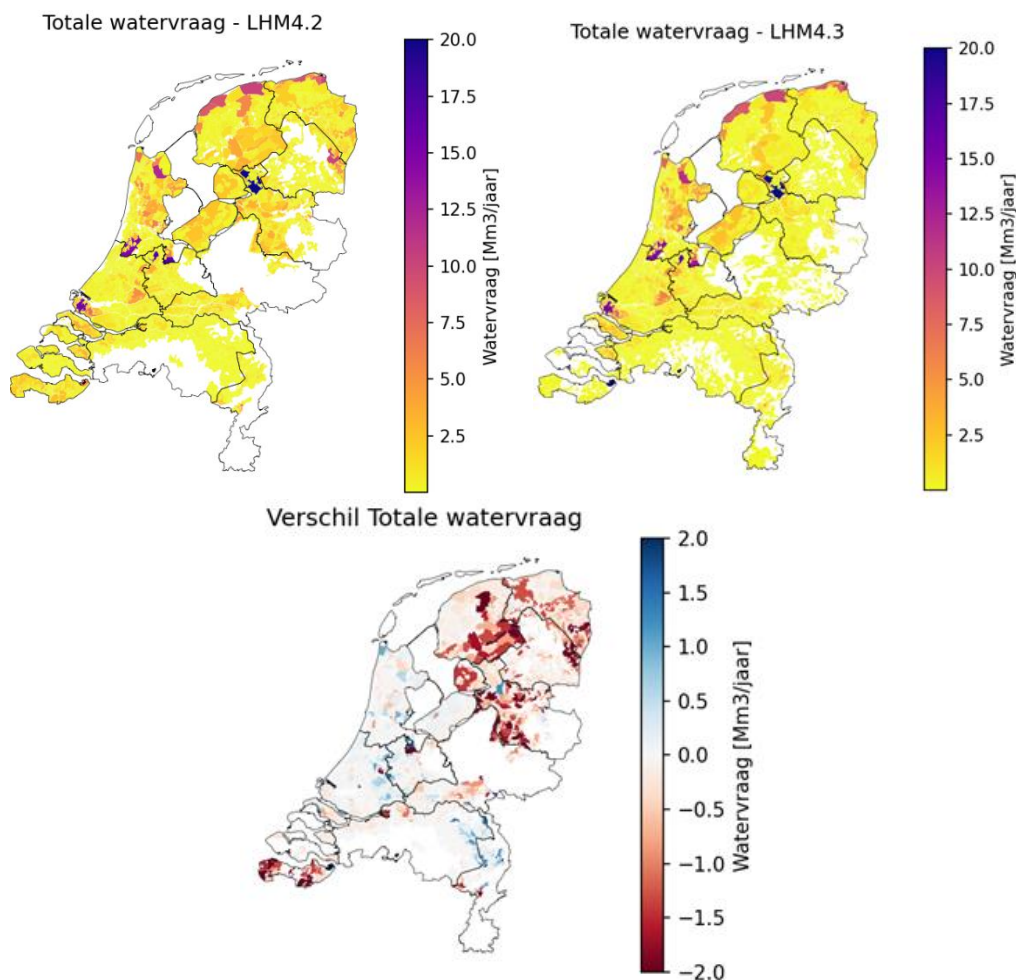
Figuur 6.10 Langjarig gemiddelde landbouwschades (%) voor LHM 4.3, berekend over de periode 2011-2018

De totale berekende landbouwschade kan – voor de gewassen waar met WOFOST wordt gerekend - worden opgedeeld in droogteschade, schade door zuurstofstress, indirecte schade, en zoutschade. De zuurstofstress en de directe schade samen vormen de natschade. Voor de indirecte schade wordt opgemerkt dat deze alleen standaard wordt berekend voor bouwland. De indirecte schade op graslanden kan aanvullend bepaald worden door een extra referentierun te draaien van een situatie van de meest voorkomend gewenste voorjaarsgrondwaterstand (ca 1m-mv). Dit wordt aanbevolen voor aanvullende validatie van de berekende landbouwschades. Hoewel de zoutschade berekeningen ook zijn getoond, worden deze in LHM als niet realistisch beschouwd, omdat dit aanvullende studie vereist.

6.4 Resultaten oppervlaktewater

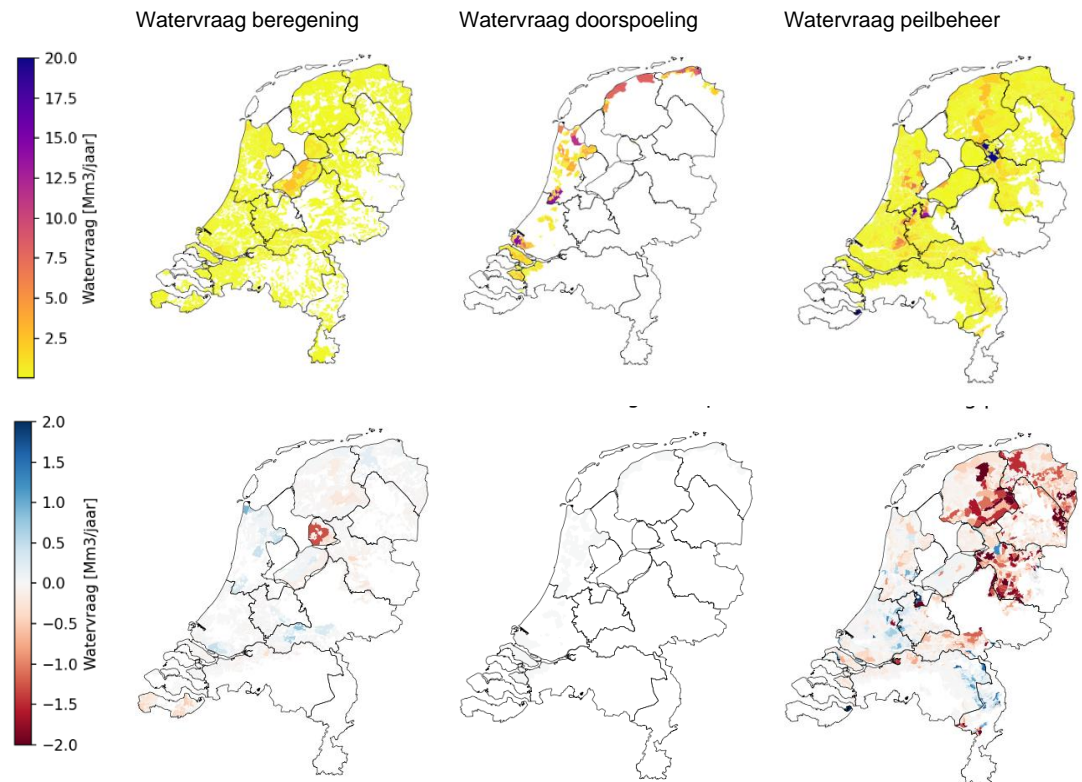
6.4.1 Watervraag

De berekende vraag naar oppervlaktewater in MOZART is optelsom van de vraag naar peilbeheer, beregening en doorspoeling. De totale en uitgesplitste watervraag en de verschillen met LHM 4.2 worden getoond in Figuur 6-11 en Figuur 6-12.



Figuur 6-11 De berekende langjarige watervraag uit oppervlaktewater in LHM 4.2 en LHM 4.3 per LSW in MOZART, en het verschil tussen beiden (rood duidt op een afname in de watervraag).

Wat met name opvalt zijn de gereduceerde watervraag voor peilbeheer t.o.v. LHM 4.2 in Zeeuws-Vlaanderen en in noordoost-Nederland. Voor Zeeuws-Vlaanderen is de eenvoudige verklaring dat deze regio geheel vrij-afwaterend is gemaakt in de nieuwe MOZART-schematisering en er daarom geen watervraag meer berekend wordt. In noordoost-Nederland gelden verschillende verklaringen. Allereerst speelt hier de hersynchronisatie van de MOZART-peilen met de MODFLOW-peilen. Zoals beschreven in Hoofdstuk 2 heeft dit geresulteerd in een lager zomerpeil, met geringere infiltratie en minder watervraag tot gevolg. Tot slot speelt mee dat de weerstanden van de watergangen in deze regio behoorlijk vergroot zijn t.o.v. LHM 4.2, wat ook een remmende werking heeft op de infiltratie en dus op de watervraag.

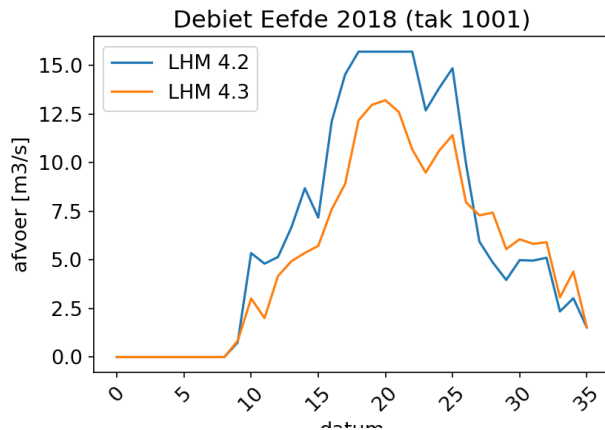


Figuur 6-12 Uitsplitsing van de watervraag uit oppervlaktewater in LHM 4.3 en de verschillen met LHM 4.2, weergegeven voor de langjarige berekening en per LSW in MOZART (rood duidt op een afname van de watervraag).

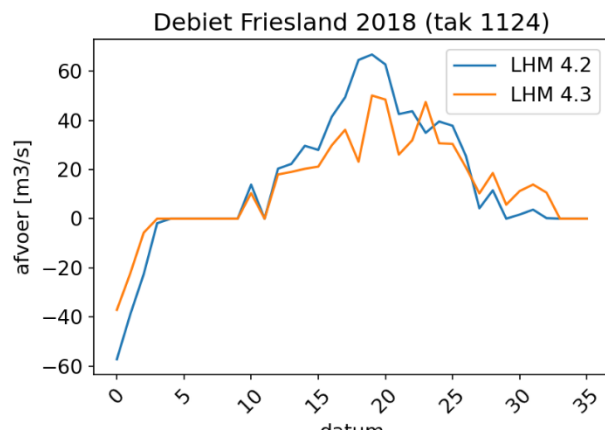
6.4.2 Debieten over het netwerk

In Figuur 6-13 t/m Figuur 6-15 zijn enkele karakteristieke voorbeelden weergegeven voor de landelijke waterverdeling in het droge jaar 2018. Hiertoe zijn dezelfde voorbeelden gekozen als in de veranderingsrapportage van LHM 4.2.

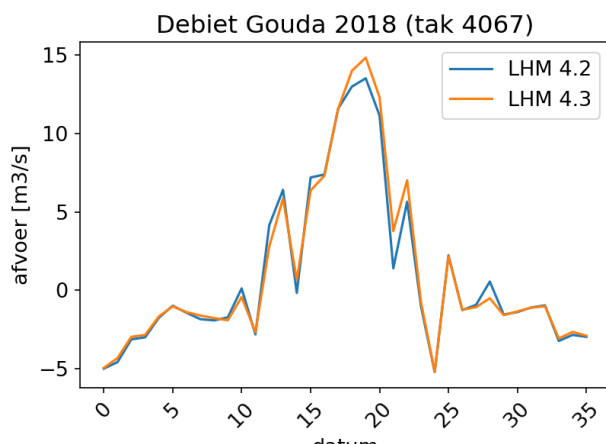
De berekende debieten in het waterverdelingsnetwerk vertonen op veel locaties wijzigingen t.o.v. LHM 4.2, die tot behoorlijke verschillen in debieten in het netwerk kunnen leiden in een droog jaar zoals 2018. Dit is het gevolg van de gewijzigde schematisering, zowel in het waterverdelingsnetwerk dat op veel locaties is aangepast (zie Hoofdstuk 4), als de veranderingen in de geohydrologie en de bodem. Bijvoorbeeld de verhoogde verdamping in kleigebieden (door lagere droogtestress in de bodem), kan leiden tot lagere grondwaterstanden in de zomer, waardoor de vraag naar oppervlaktewater kan toenemen. Maar ook dit is niet eenduidig; de aanpassingen in de ontwatering dragen sterk bij aan wijziging van de berging in het regionale watersysteem en kunnen dit effect dus versterken of teniet doen. De aanpassing in het netwerk komen daar bovenop, bijvoorbeeld bij Gouda dragen de wijzigingen in de implementatie van de KWA ook bij aan (geringe) wijzigingen in de berekende afvoeren in het droge jaar door bijstelling van de KWA (zie Bijlage C).



Figuur 6-13 Inlaat Eefde voor 2018 voor LHM 4.3 en LHM 4.2. Op de x-as staan decadenummers. Afvoer is negatief gedefinieerd en aanvoer (inlaat) positief.



Figuur 6-14 Inlaat en afvoer Friesland voor 2018 voor LHM 4.3 en LHM 4.2. Op de x-as staan decadenummers. Afvoer is negatief gedefinieerd en aanvoer (inlaat) positief.



Figuur 6-15 Inlaat en afvoer Gouda voor 2018 voor LHM 4.3 en LHM 4.2. Op de x-as staan decadenummers. Afvoer is negatief gedefinieerd en aanvoer (inlaat) positief.

6.5 Toetsing

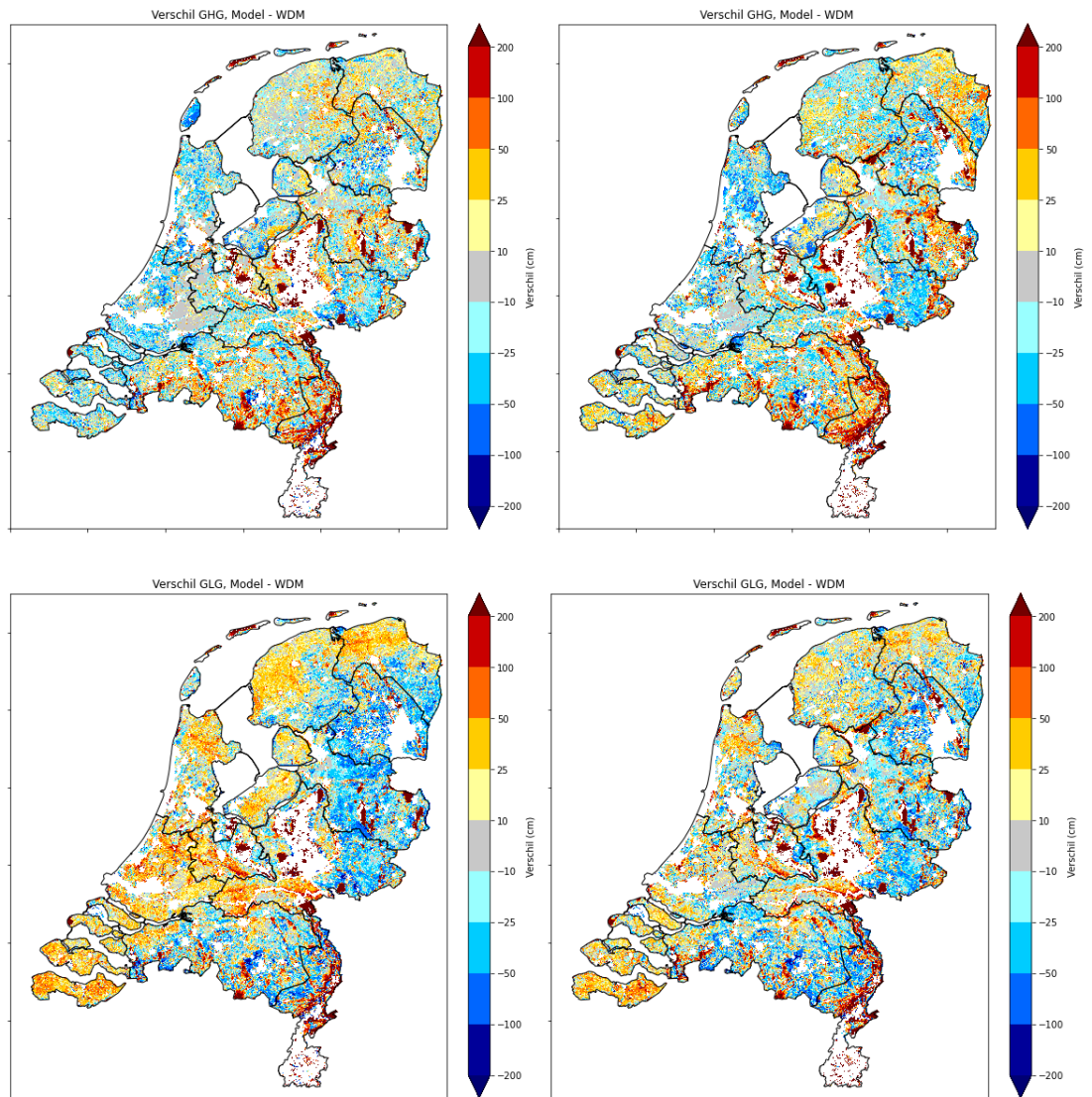
De freatische grondwaterstanden zoals berekend met LHM 4.3 worden in deze paragraaf getoetst aan het Waterspiegel Diepte Model (WDM) en aan freatische peilbuismetingen. Figuur 6-16 vergelijkt zowel LHM 4.3 als LHM 4.2 met de GXG informatie uit het WDM.

Omdat de WDM-kaart tevens is gebruikt in de kalibratie (zij het niet in zijn geheel maar op geselecteerde locaties), is de hier gepresenteerde toetsing aan die kaart niet bedoeld als een validatie, in de zuivere zin van dat woord. De vergelijking met de WDM-kaart is hier vooral gedaan ter informatie en als een plausibiliteitscheck. Een zuivere validatie kan uitgevoerd worden aan de hand van LSK-metingen. Deze validatie zal naar verwachting nog plaatsvinden in een aparte validatiestudie t.b.v. de inzet van LHM 4.3 voor waterkwaliteitsberekeningen.

LHM 4.3 presteert in de vergelijking met de GHG uit de WDM-kaart in het algemeen wat minder goed dan LHM 4.2. Enkele gebieden in Noord-Holland worden (meer) te nat. De vernatting hier t.o.v. LHM 4.2 is vooral veroorzaakt door het terugdraaien van de kalibratie van LHM 4.2; in die kalibratie werden de kleigebieden fors droger (zie Figuur 7.10 in de veranderingsrapportage LHM 4.2). De kalibratie van LHM 4.3 trekt de GHG in deze gebieden minder omlaag, waarschijnlijk als gevolg van de beperktere beweegruimte voor de parameters die is gehanteerd in de kalibratie van LHM 4.3 t.o.v. die van LHM 4.2. Dit is overigens een algemeen geldende verklaring voor de lichte achteruitgang in de match met WDM voor de GHG; door de strengere instellingen krijgt de kalibratie minder de gelegenheid het verschil met de WDM-kaart te verkleinen. Een fysisch logischere ruimtelijke verdeling van de parameteraanpassingen en realistischere parameteraanpassingen zijn echter belangrijker dan kost wat kost de WDM-kaart te benaderen.

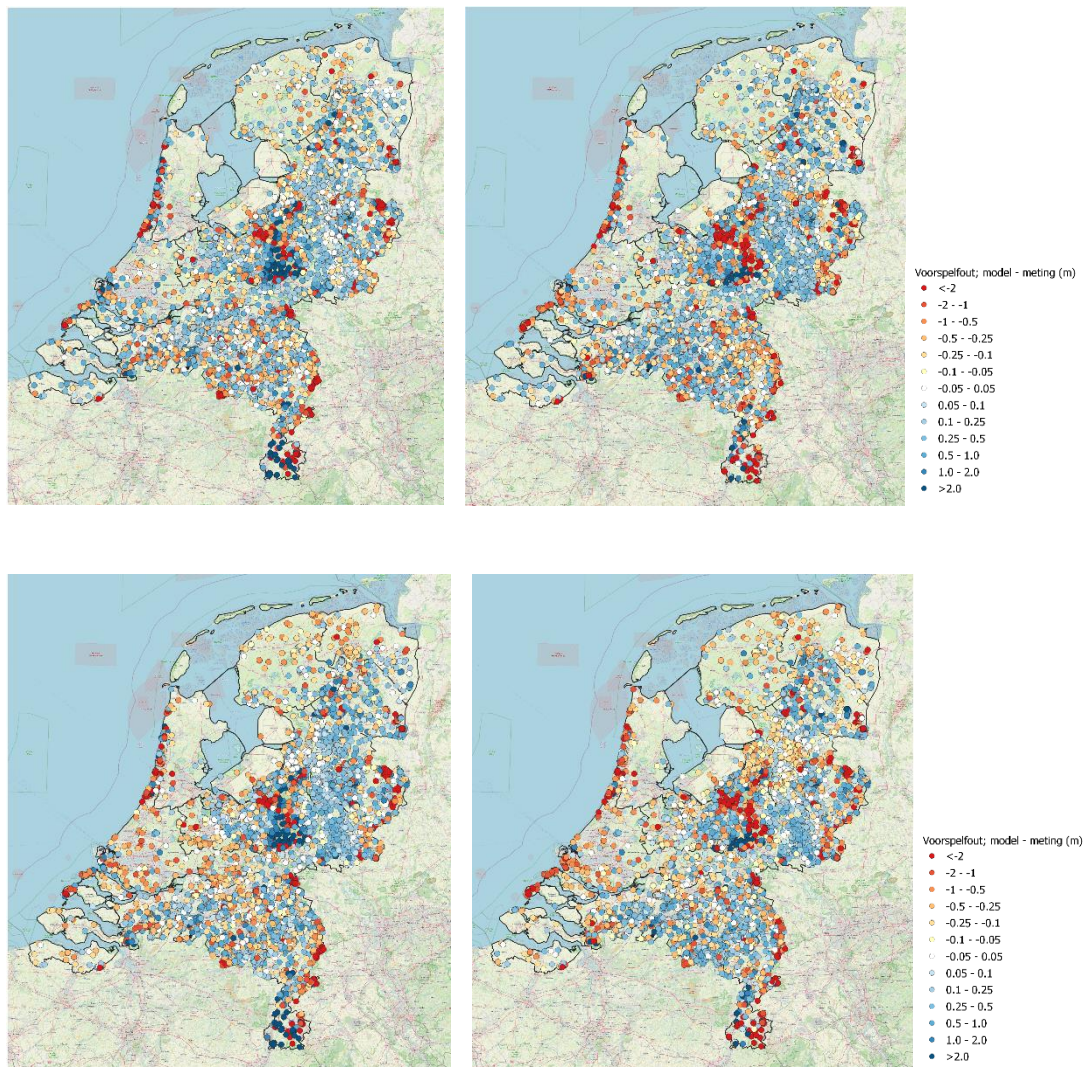
Andere gebieden waar de GHG in LHM 4.3 meer te nat wordt berekend dan in LHM 4.2 zijn oost-Gelderland, west-Drenthe en zuid-Groningen. In deze gebieden lijkt niet zozeer het terugdraaien van de kalibratie van LHM 4.2 een rol te spelen, want die kalibratie maakte het in deze gebieden natter of in elk geval in veel mindere mate droger dan in Noord-Holland. De nieuwe kalibratie van LHM 4.3 maakt het in deze gebieden natter, waarschijnlijk om sterk te droog berekende gebieden in de omgeving natter te krijgen. Vanwege de grotere gehanteerde (doch fysisch logischere) zoneringen t.o.v. de LHM 4.2-kalibratie kan de LHM 4.3-kalibratie minder gericht kleinere gebieden verbeteren.

De overeenkomst van het LHM met de GLG van het WDM daarentegen is in LHM 4.3 duidelijk beter dan in LHM 4.2. De strengere kalibratie-instellingen worden hier ruimschoots gecompenseerd door de aanpassingen aan MetaSWAP die gunstig uitpakken voor deze overeenkomst. Zoals Figuur 6-16, linksonder laat zien werd in LHM 4.2 de GLG in het Holocene overwegend te droog berekend en in het Pleistoceen overwegend te nat. Figuur 3-17 liet zien dat het netto effect van de MetaSWAP aanpassingen precies in de goede richting werken: een nattere GLG in het Holocene en overwegend een drogere GLG in het Pleistoceen. Een uitzondering is Noord-Brabant, wat in LHM 4.2 een gemêleerd beeld gaf en in LHM 4.3 licht natter wordt berekend. Dit betekent mogelijk een verbetering, gezien de ervaring in het LWKM dat hier te lage afvoeren worden berekend. Nadere validatie moet hier uitsluitsel over geven.



Figuur 6-16 Vergelijking van GHG (boven) en GLG (onder) met het Model Waterspiegeldiepte volgens LHM 4.2 (links) en LHM 4.3 (rechts).

Figuur 6-17 toont de vergelijking van de GXG zoals berekend met het LHM met die uit freatische peilbuismetingen. Voor deze vergelijking is dezelfde selectie van 7092 freatische peilbuisreeksen gebruikt als in de veranderingsrapportage van LHM 4.2 (Janssen et al., 2022). In diezelfde veranderingsrapportage is de geschiktheid van de dataset waar deze selectie van afkomstig is uitgebreid ter discussie gesteld. Desalniettemin geeft deze vergelijking met peilbuismetingen hetzelfde beeld als de vergelijking met de WDM-kaart. Veranderingen in de vergelijking in het Holoceen tussen LHM 4.2 en LHM 4.3 komen wel minder goed tot uiting vanwege het beperkte aantal freatische peilbuizen in west-Nederland.



Figuur 6-17 Vergelijking van GHG (boven) en GLG (onder) zoals berekend met LHM 4.2 (links) en LHM 4.3 (rechts) met de freatische peilbuismetingen.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

In LHM 4.3 is een groot aantal aanpassingen doorgevoerd welke beantwoorden aan:

- bij gebruik van LHM 4.2 geconstateerde issues;
- in regionale sessies voor DP Zoetwater naar voren gekomen benodigde aanpassingen;
- gewenste maatregelen voor het Deltaprogramma.

Hieronder wordt groepsgewijs opgesomd welke aanpassingen zijn doorgevoerd en welke effecten deze aanpassingen hebben op de resultaten van het LHM.

Bodem-Water-Plantsysteem

In het MetaSWAP deel van het LHM is de beregeningskaart geupdate en zijn triggers voor beregening aangepast, wat netto geresulteerd heeft in minder totale beregening t.o.v. LHM 4.2. De veronderstelling is dat dit een verbetering is t.o.v. LHM 4.2, omdat bekend was dat in LHM 4.2 in de zandregio's teveel beregend werd. De door LHM 4.3 berekende beregeningshoeveelheden liggen op landelijke schaal redelijk in lijn met schattingen van WECR, zij het dat de totale berekende hoeveelheden wat hoger liggen.

Voor MetaSWAP is een aangepaste database gemaakt en zijn aanpassingen in de modelcode verricht om beter om te kunnen gaan met storende lagen in ondiepe profielen en bypassflow in kleischeuren. Deze aanpassingen leiden tot minder reductie van de gewasverdamping, meer run-off en verlaging van de GLG. Ten behoeve van DP Zoetwater zijn diverse processen toegevoegd. Middels uitgebreide gevoeligheidsanalyse van de instellingen voor wortelgroei, wortelopname, bypass flow en schalingsfactoren zijn de invoerparameters aangepast voor verbeterde berekening van de droogteschade, natschade en GLG.

Ondergrond

In het MODFLOW deel van het LHM is de parametrisatie van breuken hersteld, zijn de onttrekkingen geupdate, zijn nieuwe deklaagweerstandskarten van TNO-GDN voor de Flevopolders en de Veluweflanken toegepast. Daarnaast is het ontbreken van transmissiviteit in de Holocene deklaag sinds LHM 4.0 hersteld. De effecten van deze aanpassingen op de berekende grondwaterstanden zijn relatief beperkt en bovendien, op het herstel van de deklaagtransmissiviteit na, vrij lokaal van aard.

Daarnaast heeft een update plaatsgevonden van het topsysteem. Het betreft een herziene afleiding van peilen en bodemhoogtes van het regionale systeem, herziene buisdrainage- en greppelschematisering en een nieuwe afleiding van peilen voor het hoofdwatersysteem vanuit via regionale modellen beschikbare ISG-bestanden.

De kalibratiesystematiek voor het MODFLOW-deel is op onderdelen verbeterd; terwijl parameters via logische patronen en binnen realistische bandbreedtes worden aangepast is een reductie van de doelfunctie bereikt van 62%. Wel dient vermeld te worden dat, hoewel met de kalibratietechniek is aangetoond dat een landelijke, niet-stationaire kalibratie mogelijk is, dit wel een zeer zware rekenexercitie is en daarmee in de praktijk uitdagingen biedt wat betreft inpasbaarheid in de beperkte doorlooptijden van LHM releases.

Achteraf wordt beoordeeld dat de kalibratie van LHM 4.2 te veel is los gelaten; in LHM 4.3 zijn de toegestane bandbreedtes voor de parameteraanpassingen kleiner gehouden en de parameteraanpassingen zijn via de aangepaste zoneringen ook beter in toom gehouden. Een consequentie daarvan is dat de kalibratie minder vrijheid heeft om de residuen (afwijkingen tussen model en metingen) te verkleinen. Dit is tot uiting gekomen als een wat minder goede overeenkomst van de GHG van LHM 4.3 met die van het WDM en van freatische peilbuismetingen dan LHM 4.2. De MetaSWAP-aanpassingen hebben, vooral in de kleigebieden, een dermate goede uitwerking gehad op de GLG dat de beperktere bewegingsvrijheid van de kalibratie ruimschoots is gecompenseerd; de overeenkomst met de GLG volgens WDM en freatische peilbuismetingen is in LHM 4.3 dan ook (veel) beter dan in LHM 4.2.

Oppervlaktewater

Vanuit het DP Zoetwater project zijn in regiosessies de uitgangspunten voor de modellering van het oppervlaktewater in het LHM besproken en op onderdelen aangescherpt. Dit betreft een groot aantal aanpassingen, zowel in het waterverdelingsnetwerk, de regionale wateraanvoer-, en afvoercharacteristieken als het doorvoeren van actuele gegevens voor de verdringingsreeks. Verwacht wordt dat het meenemen van de ingebrachte regiokennis en de actualisaties het model aan de invoerkant hebben verbeterd.

7.2 Aanbevelingen

Uit de ontwikkeling van LHM 4.3 kunnen een aantal belangrijkste lessen worden getrokken, die leiden tot de volgende aanbevelingen voor volgende releases:

- De keuze en wijze van toepassing van bronbestanden, kennistabellen en beslisregels voor de parametrisatie van het topsysteem kent veel vrijheidsgraden met grote gevolgen. Idealiter wordt in het LHM voor de kenmerken van de ontwatering veel meer gebruik gemaakt van informatie van de waterschappen. De komende jaren is voorzien hierin aanzienlijke stappen in te zetten in het LHM, en bij de opbouw van de schematisering van de regionale wateren veel meer gebruik te maken actuele data van de waterschappen. In het najaar van 2022 zijn voor een volgende versie van het LHM hiervoor acties ondernomen door Rijkswaterstaat en de waterschappen (De Graaff en Bruins, 2023). Aanbevolen wordt de kennis en data die dit oplevert op te nemen in de volgende LHM-versie.
- Bij de ontwikkeling van LHM 4.3 is de beheersbaarheid van het complexe instrumentarium een beperkende factor gebleken. Historisch gegroeide en met losse scripts/deelworkflows geregelde complexe afhankelijkheden in de modelinvoer, alsmede wisselingen in het team van specialisten dat aan het LHM werkt, compliceren het samenstellen van consistente modelinvoer. Er wordt daarom aanbevolen de volgende LHM-versie, welke gebaseerd zal worden op nieuwe modelcodes voor de ondergrond en het oppervlaktewater, op te bouwen in één enkele geautomatiseerde workflow. Deze workflow bewaakt de afhankelijkheden genereert invoer voor zowel de ondergrond, het topsysteem als de oppervlaktewatermodules en idealiter in een later stadium tevens voor de onverzadigde zone module.

- Gezien de toenemende inzet van het LHM wordt aanbevolen een referentiedocument aan te leggen en te onderhouden dat in detail de opbouw en inhoud van de meest recente versie van het landelijk instrumentarium beschrijft, zodat gebruikers en ontwikkelaars eenvoudiger de gemaakte keuzes en de argumentaties daarachter kunnen terugvinden. Voor het begrip van de nieuwe LHM-versie is het lastig een overzicht te krijgen, omdat dit moet worden gegenereerd uit de verschillende veranderingsrapportages en aanvullende documentatie over de programmatuur. Toename van de transparantie in de uitgangspunten past bij een belangrijk en veelgebruikt landelijk instrumentarium als het LHM. Ook de review en kwaliteitsborging van het instrument als geheel zou hierdoor sterk worden vereenvoudigd.
- Er lijkt verbetering mogelijk in de instellingen van de kalibratiemethodiek. Het verbeteren van te droog gemodelleerde gebieden lijkt regelmatig ten koste te gaan van andere regio's, die juist te nat kunnen worden. Het wordt aanbevolen verder onderzoek te doen naar verbetering van de kalibratie-instellingen, in combinatie met verbetering van weegfactoren na analyse van de betrouwbaarheid van metingen.
- In de toekomst kan ook worden overwogen de parameters voor de onverzadigde verder te betrekken in de optimalisatie. Aanvullend op de kalibratie van het grondwatermodel zijn nu instellingen voor bijvoorbeeld droogte- en natschade gewijzigd, na analyse van het effect van verschillende modelinstellingen. Hierbij is een aantal uitgangspunten gehanteerd, bijvoorbeeld door waar mogelijk aan te sluiten bij keuzes in de Waterwijzer Landbouw. Verdere verfijning en afregeling van de modelinstellingen biedt naar verwachting betere modeluitkomsten, in combinatie met de kalibratie van het grondwater.

Op basis van de opgedane ervaring bij de doorgevoerde wijzigingen van LHM4.2 naar LHM4.3, worden verder de volgende specifieke zaken aanbevolen:

- Verbeteren van de schematisering van insnijdende waterlopen in de polders in relatie tot deklaagweerstand. (zie paragraaf Par. 2.1.3; uitgesteld tot LHM 5)
- Herziening van de schematisatie van het hoofdwatersysteem, waarbij ook eerder gemaakte keuzes rond bodemhoogte, conductance en infiltratie opnieuw moeten worden beschouwd in relatie tot parameters die worden gehanteerd in de ISG-tooling (zie paragraaf 2.3).
- Nadere validatie van de berekeningsresultaten voor de onverzadigde zone, onder meer aan de hand van informatie die is afgeleid uit satellietbeelden, om aanvullend op de hier beschreven hydrologische resultaten een beter oordeel te kunnen geven over de toepasbaarheid van de landbouwschadeberekeningen in MetaSWAP.

8 Referenties

- Bos-Burgering, L.M.T., J.A.C. Hunink, A.A. Veldhuizen, G. Prinsen, P.E.V. van Walsum, J.R. Pouwels en T. Kroon. Veranderingsrapportage LHM 3.4.0; ontwikkelingen ten behoeve van landelijke analyse van de zoetwatervoorziening 2018. Deltares rapport 1120224-000-BGS0001, 2018.
- Deltares, Uitwisseling tussen Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal en Markermeer, Deltares rapport 11205273-002-BGS-0005 (april 2021)
- Van der Geest, H.G., Vonk, J.A., Ouboter, M.R.L., Reconstructie water- en stoffenbalans Markermeer 1976-2015 (2018)
- Graaff, B.J.A. de en R. Bruins. Datawinning voor het Landelijk Waterkwaliteitsmodel. HKV rapport, mei 2023.
- Gunnink, J. 2021. Deklaagweerstand Flevopolders. TNO-rapport 2021-R10844.
- Gunnink, J. en C. Heerema. 2022. Deklaagweerstand Veluweflanken. TNO-rapport 2022-R11859.
- HKV, Acacia Water en Berendrecht Consultancy. Validatie en toetsing LHM 4.1. Samenvattend hoofdrapport.
- HKV, Knelpuntenanalyse zoetwaterregio West-Nederland, Vertrekpunt 2e fase Deltaprogramma Zoetwater, (versie mei 2018)
- Hunink, J., J. Delsman, G. Prinsen, L. Bos - Burgering, N. Mulder, M. Visser (2018) Vertaling van Deltascenario's 2017 naar modelinvoer voor het Nationaal Water Model. Deltares rapport 11202240-009-ZWS, 2018.
- J.C. Hunink, P.E.V. van Walsum, P.T.M. Vermeulen, J.R. Pouwels, H.P. Bootsma, G.M.C.M. Janssen, W. Swierstra, G.F. Prinsen, A. Meshgi, A.A. Veldhuizen, W.J. de Lange, J. Hummelman, L.M.T. Bos-Burgering en T. Kroon. Veranderingsrapportage LHM 4.0; Actualisatie van het lagenmodel, het topsysteem en de bodem-plant relaties. Deltares rapport 11203718-000-BGS-0001, 2019.
- Janssen, G., Walsum, P., Vermeulen, P., Pouwels, J., Van der Gaast, J., Meshgi, A., America, I., Hunink, J., Prinsen, G. en Kroon, T. 2022. Veranderingsrapportage LHM 4.2. Deltares rapport 11206816-001-BGS-0002
- Kok, H., P.W.T van Walsum en T. Kroon, 2022, Update onverzadigde zone AZURE. Deltares memo, 1 nov. 2022.
- Koops, R. (2022, 6 december). Regionale uitwerking verdringingsreeks – regio Oost. Verkregen van Sharon Muurling [RWS].
- Kroon et al, 2022 (of vd Gaast et al, 2022, n.t.b.). Plausibiliteitstoets LHM 4.2 xxx
- Massop H.Th.L., J.W.J. van der Gaast en E. Hermans. 2006. Kenmerken van het ontwateringstelsel in Nederland. Wageningen, Alterra-rapport 1397.

- 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 parametrisatie. Wageningen, ALTERRA, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling en Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Miliehygiëne. Alterrapport 038. Reeks Milieuplanbureau 9.
- 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 parametrisatie. Wageningen, ALTERRA, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling.
- Mes, E., Delsman, J. 2022. Hantering regionale verdringingsreeks. Deltares memo (in prep.)
- Meshgi, A., J. Beckers en T. Kroon, 2022. Comparison of computational results of MetaSWAP with satellite data.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, de provincies Drenthe, Flevoland, Fryslân, Groningen, Noord-Holland, Overijssel, de waterschappen Amstel Gooi en Vecht, Drents-Overijsselse Delta, Hunze en Aa's, Noorderzijlvest, Vallei en Veluwe, Vechtstromen, Zuiderzeeland, het Wetterskip Fryslân en het hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier: Bestuursovereenkomst waterverdeling regio IJsselmeergebied. Afspraken over de regionale uitwerking van de landelijke verdringingsreeks, februari 2022.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2021, 18 februari). Drogteseizoen 2020. Geraadpleegd van 543408 (wur.nl)
- Pouwels, J. 2022. Verbetering voorbereidingssoftware LHM. Deltares memo KPP project beheer en onderhoud LHM, 29 nov 2022.
- Pouwels, J., I. America en P. van Walsum. 2022. Opsplitsing gewasschages en uitbreiding modelconcepten stressfactoren in MetaSWAP. Deltares memo 31 maar 2022.
- Pouwels, J., J. Delsman, E. Mes, G. Prinsen, I. America-van den Heuvel, H. Kok en Marjolein Mens. Ontwikkeling LHM ten behoeve van het Deltaprogramma Zoetwater. Technische achtergrondrapportage.
- Quist, W. (2022, 25 januari). Memo: Toepassen verdringingsreeks Drogtere regio Zuidwest. Verkregen van Edwin Arens [Brabantse Delta].
- Regionale uitwerking van de Verdringingsreeks. (2022, 15 maart). Verkregen van Babeth Bosma [Waterschap Rivierenland].
- Regionale uitwerking van de Verdringingsreeks Zuidwestelijke Delta. (2022, 6 maart). Verkregen van Edwin Arens [Brabantse Delta].
- Van den Braak, W.E.W., De Graaff, B.J.A., Bakker, M.R., & Van Wijk, G.P. (2006, november). Herziening schematisatie oppervlaktewater MOZART in 'peilbeheerst' Nederland. Geraadpleegd van Herziening schematisatie oppervlaktewater MOZART in peilbeheerst Nederland - PDF Free Download (docplayer.nl)
- Van Velthoven, N. (2022, 13 oktober). Regioronde DPZW: gewenste aanpassingen hydrologisch modelinstrumentarium. Geraadpleegd van 20221013 Rapport Berenschot - Regioronde DPZW.pdf [intern gebruik]

- Waterverdeling regio IJsselmeergebied. (2021, 12 november). Geraadpleegd van https://www.infomil.nl/publish/pages/197989/ondersteunend-achtergronddocument-waterverdeling_15nov2021.pdf
- Rijkswaterstaat, Waterschap Aa en Maas, Waterschap De Dommel, Waterschap Brabantse Delta, Waterschap Limburg. Waterakkoord Midden-Limburgse en Noord-Brabantse kanalen 2021, definitieve versie 1.2. (Juni 2022).
- Schaap, M. G., & van Genuchten, M. T. (2006). A Modified Mualem–van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation. *Vadose Zone Journal*, 5(1), 27–34. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0005>
- Stokkers, R., Jager, J. en Van Asseldonk, M.A.P.M. 2022. Berekening in de Nederlandse landbouw op gewas- en regioniveau in de periode 2010-2019. Analyses met het Bedrijveninformatienet.
- Schoonderwoerd, E., N. Mulder en H. Bootsma. 2021. Beschrijving werking topsysteem script LHM. Schoonderwoerd, E., H. Bootsma. en Meeusen R. Beschrijving werking topsysteem script LHM, 2022.
- Van der Gaast, J., 2022 Memo Actualisatie Karakteristieken Oppervlaktewater Fase1 versie1
- Vermooten, J.S.A., Vasak, L., Griffioen, J., Klaver, G.T., Vernes, R.W.en Weerts, H.J.T. 2005. Afbakening van het topsysteem voor de kartering van de reactiviteit van de Nederlandse ondergrond. TNO Bouw en Ondergrond, rapport NITG 05-121-A.
- Waterschap Vallei en Veluwe, meetreeksen Grebbesluis en Apeldoorns Kanaal (Dieren)
- Waterschap Brabantse Delta, meetreeksen inlaat Oosterhout, Bovenmark, Dintelsas en Benedensas
- Waterschap Hunze en Aas (diverse mails)
- Wetterskip Fryslan (diverse mails)
- Wösten, J.H.M.,F. de Vries, J. Denneboom en A.F. van Holst. Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, 1 : 250000, ten behoeve van de PAWN-studie, Stichting voor Bodemkartering, 1988.

A Wijziging MetaSWAP t.b.v. maatregelen DPZW

In deze bijlage wordt een toelichting gegeven op de uitbreiding van MetaSWAP t.b.v. de berekening van maatregelen voor DP Zoetwater.

A.1 Implementatie maatregel druppelirrigatie

Druppelirrigatie wordt gezien als mogelijke maatregel in veel gebieden om water te besparen omdat er minder water verloren gaat aan verwaaiing en interceptieverdamping. De functionaliteiten voor druppelirrigatie zijn in een eerder traject ontwikkeld (Hunink, 2021) en ten behoeve van DPZW verder getest en uitgebreid. Daarnaast is de mogelijkheid om zuiniger te beregenen door middel van 'diepe druppelirrigatie' toegevoegd in MetaSWAP en getoetst.

Binnen MetaSWAP is het mogelijk om berekening te berekenen waarbij het model op basis van het dynamisch berekend vochttekort en de beregeningsinstellingen bepaalt of er beregend wordt. Bij reguliere berekening gaat een deel van het onttrokken water voor berekening verloren aan beregeningsverliezen (zoals verwaaiing) en extra interceptieverdamping. Bij het testen van de maatregelen voor LHM 4.3 is aangenomen dat er 10% van het onttrokken water ten behoeve van berekening verloren gaat. Bij druppelirrigatie komt het beregeningswater direct op de bodem waar het kan infiltreren en beschikbaar is voor de plant. In de zuinigere variant van 'diepe druppelirrigatie' wordt water op 5 cm diepte toegediend zodat er minder bodemverdamping ontstaat. Met deze techniek zijn proeven gedaan op het WUR agro-innovatiecentrum de Marke (Walvoort en van Schooten, 2019).

Druppelirrigatie was al mogelijk in MetaSWAP, maar diepe druppelirrigatie nog niet. De aanpassingen hiervoor in de MetaSWAP code zijn beschreven in implementation proposals 68 en 73 van MetaSWAP, en in de bijbehorende testrapporten 68 en 73 (Van Walsum, 2022).

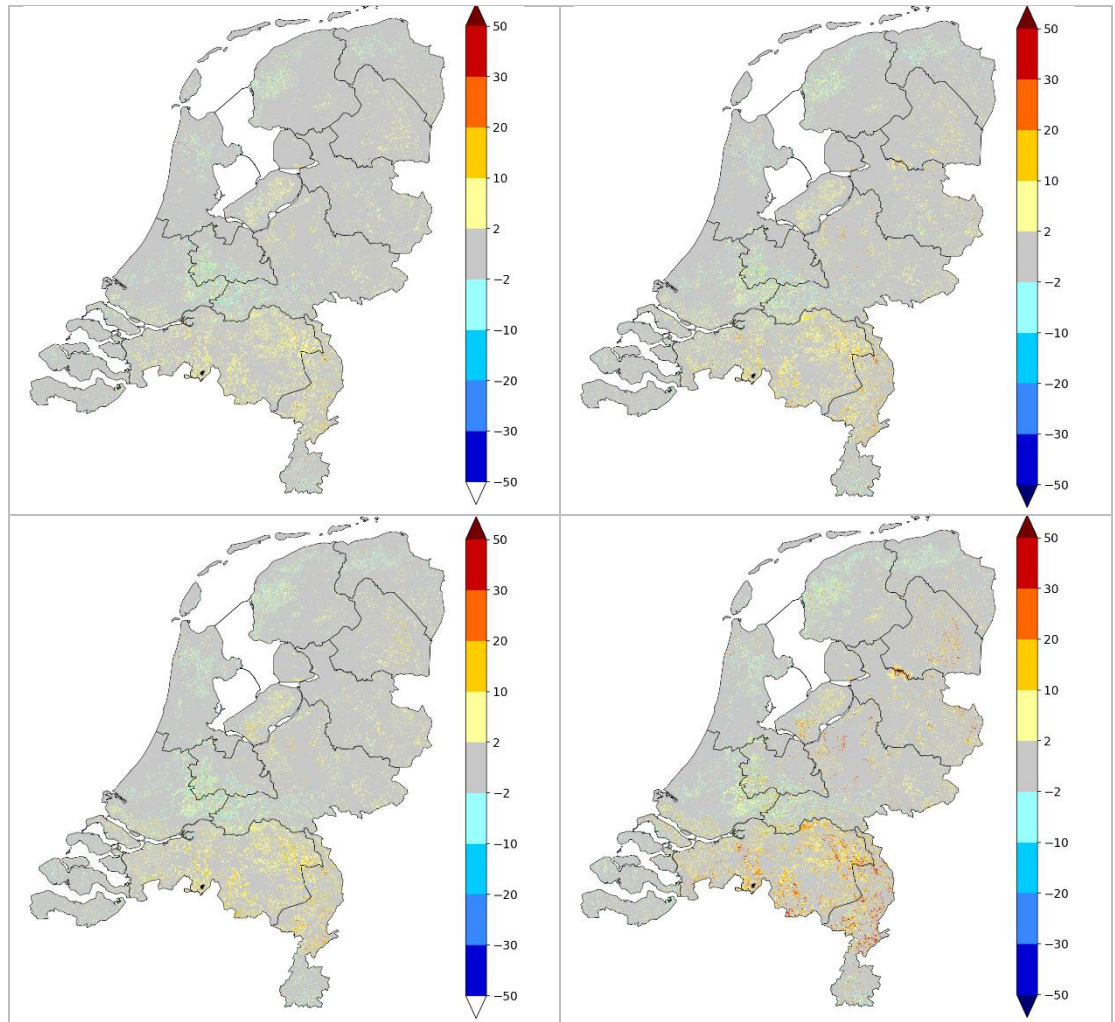
De maatregel is in MetaSWAP gespecificeerd in het bestand *scap_svat.inp*. Voor elke beregende modelcel zijn er drie opties in dit bestand: 0 = berekening; 1 = druppelirrigatie en 2 = Deep-drip.

De voorbewerkingsmodule *grid2metaswap*, die gridbestanden omzet naar de MetaSWAP invoertabellen, is uitgebreid met het bestand *drip_irrigation.asc*. Daarin kan de gebruiker het type berekening specificeren. In de LHM modelsom moet de gebruiker daarnaast zelf de gewenste modeluitvoer (*idgw*, *idsw*, *iddgw* en *iddsw*) aanzetten in het bestand *sel_key_svat_per.inp*.

Tabel A1 laat zien dat de berekende beregeningsgift met het LHM nauwelijks afneemt bij het gebruik van druppelirrigatie en Deep-Drip. De afname bij druppelirrigatie is 2% en de afname bij Deep-Drip is 4-6%. Figuur A.1 laat zien dat de transpiratie (zowel potentieel als actueel) in het zuidelijk zandgebied een geringe toename heeft bij het gebruik van druppelirrigatie.

Tabel A.1 Beregeningsgiften voor Referentiesituatie, situatie met alle beregening als druppelirrigatie en situatie met alle beregening als deep_drip. Alles in Mm3/jaar

Jaar	Referentie	Druppelirrigatie	Deep_drip
2002	69.8	68.5	67.0
2003	217.0	212.1	204.6



Figuur A.1 Verschil in de ranspiratie (boven) en actuele transpiratie (onder) in mm/jaar, door gebruik van druppelirrigatie (links) en deep-drip (rechts), ten opzichte van standaard beregening. Rode kleuren geven een verhoging van de transpiratie.

A.2 Aanpassing functionaliteiten regelbare drainage en subirrigatie

Regelbare drainage met subirrigatie (ook wel 'peilgestuurde drainage met subirrigatie' genoemd) is een maatregel om water in percelen af te kunnen voeren, vast te kunnen houden en aan te kunnen voeren, waarmee actief gestuurd kan worden op optimale condities voor het gewas op percelen. Bij 'regelbare drainage' monden de drainagebuizen niet uit boven het slootpeil, maar liggen ze dieper waardoor ze onder water in de sloot uitmonden. Op die manier zorgen variaties in het slootpeil ook voor variaties in het drainagepeil. Een andere mogelijkheid is dat de drainagebuizen uitmonden op een verzamelleiding, waar het water opgezet kan worden. Bij 'regelbare drainage met subirrigatie' vindt wateraanvoer plaats naar de sloot of verzamelleiding, en vindt infiltratie plaats via de drainagebuizen.

De maatregel 'Regelbare drainage met subirrigatie' is in 2020-2021 ontwikkeld en ingebouwd in MetaSWAP, in het kader van Lumbricus, en opgenomen in iMOD 5.4. Als invoer worden de modelcellen opgegeven waar regelbare drainage wordt toegepast en de sturingsvariabelen (bijv. drainageniveaus, kalenderdagen, sturing uit grond- of oppervlaktewater). Voor een uitgebreide verwijzing wordt verwezen naar de releasenotes van iMOD 5.4 en de manual van MetaSWAP.

De RDI (Regelbare Drainage-Infiltratie) is feitelijk in MetaSWAP ingebouwd, terwijl in MODFLOW de drainageflux wordt berekend. De feitelijke implementatie is daardoor complex; MetaSWAP corrigeert de drainageflux uit MODFLOW, immers is er minder drainage bij toepassing van RDI dan zonder toepassing van RDI. De verminderde drainage wordt opgeteld bij de grondwateraanvulling om netto de gewenste waterconservering te bereiken.

In de tot nu toe gecombineerde toepassing van MODFLOW en MetaSWAP is geen rekening gehouden met de waterbeschikbaarheid. In de huidige schematisering is onbeperkt wateraanvoer mogelijk, wat niet realistisch is. Voor de implementatie van regelbare drainage en subirrigatie (uit oppervlaktewater) in het LHM is ervoor gezorgd dat de wateraanvoer gekoppeld is aan MOZART, waardoor eventuele watertekorten in MOZART de wateraanvoer van RDI kunnen beperken in de berekeningen.

Het blokkeren van de watervraag is geïmplementeerd door de watervraag toe te voegen aan de beregeningsvraag. MetaSWAP heeft namelijk standaard al een watervraag voor beregeningswater uit oppervlaktewater, die kan worden geblokkeerd bij een watertekort. Met de vraag voor het blokkeren van MODFLOW drainage wordt een deel van het water afgevangen dat vanuit MODFLOW naar MOZART gaat. Bij het verdelen van de realisatie wordt dan in MetaSWAP de volgende prioriteitsvolgorde aangehouden:

1. Water nodig voor druppelirrigatie/beregening;
2. Water nodig voor blokkeren van de MODFLOW drainage;
3. Water nodig voor subirrigatie.

Een complicatie treedt op als MOZART op basis van eigen prioritering niet genoeg water toekent voor de blokkade van MODFLOW drainage via regelbare drainage. De software is niet uitgebreid om dit te voorkomen, zoals idealiter zou gebeuren. Maar om te voorkomen dat er een waterbalansfout ontstaat moet in een dergelijke situatie de blokkade van drainage ongedaan worden gemaakt in de realisatiestap van MetaSWAP. Het water mag dan niet worden toegevoegd aan de grondwateraanvulling van MODFLOW zoals normaal wel gebeurt bij een geslaagde blokkade. Hier is nu voor gezorgd door een lopende balans bij te houden van het beschikbare water voor drainageblokkade en zo nodig de drainageblokkade niet toe te staan.

Het kan ook voorkomen dat er juist een overschot is van water voor drainageblokkade. Dat overschot kan ontstaan als de toekenning voor subirrigatie niet 100% is. Dan komt het grondwater in de realisatiefase minder hoog dan in de vraagfase en is er minder water nodig voor de drainageblokkade. Om te voorkomen dat dit teveel aan water wordt verspild is nu ingebouwd dat het overschot wordt toegevoegd aan de beschikbaarheid van water in de *volgende* realisatiecyclus.

De technische achtergrond van de softwareontwikkelingen is implementation proposal 80 en tesreport 80 van MetaSWAP (Van Walsum, 2022).

Voor het LHM is in Python een speciaal voorbereidingsscript gemaakt, omdat bestaande scripts voor regionale drainage, die worden toegepast in regionale modellen, niet kunnen worden toegepast in LHM, vanwege de andere aansturing van MetaSWAP in het LHM. Bij een LHM modelsom met Regelbare Drainage en Subirrigatie moeten de volgende bestanden en instellingen mee:

- Bestand modsub_svat.inp in MetaSWAP folder (deze wordt aangemaakt via de voorbereidingstools);
- Bestand flexdsub_svat.inp in MetaSWAP folder;
- Gewenste modeluitvoer (qdrmod, qdrmoddem, qdrmodmax, qdrmodsurp, qsubk, qsubikc, qsubikcdem) specificeren in sel_key_svat_per.inp;
- *Subirrigation_mdl* op 1 zetten in para_sim.inp.

Gezien de grootte van de MODFLOW cellen (250 x 250 m²) is het advies om per MODFLOW cel een apart peilvak te maken. Dat geeft ook het maximale rendement van de regelbare drainage. Voor toepassing dient er verder rekening mee te worden gehouden dat bij parallele berekeningen het noodzakelijk is dat het stuurpunt en de modelcellen van het beregeningsverbod in dezelfde partitie liggen.

A.3 Uitbreiding functionaliteiten voor een beregeningsverbod

In tijden van droogte kan een waterschap voor een deel van het beheersgebied een beregeningsverbod afkondigen. Daarbij mag er tijdelijk niet beregend worden uit grondwater of oppervlaktewater.

Het is in LHM mogelijk gemaakt om een beregeningsverbod uit grondwater door te voeren. De uitwerking is beschreven in implementation en testproposal 75 (Van Walsum, 2023).

Het beregeningsverbod treedt in het model in werking als de grondwaterstand in de vooraf gespecificeerde modelcel, bijvoorbeeld in een natuurgebied, uitzakt onder een bepaald niveau. Bij het activeren van een beregeningsverbod moet de gebruiker aangeven:

- Welke modelcellen (SVAT nummers) vallen onder het beregeningsverbod;
- Naar welke modelcel (doel-SVAT) wordt gekeken om te bepalen of het beregeningsverbod in werking treedt;
- Bij welke grondwaterstand in deze modelcel het verbod in werking treedt.

De gebruiker kan dit opgeven in de gridbestanden *bereg_verbod_stuur_svat.asc* en *bereg_verbod_target_ivl.asc*. De voorbereidingsmodule *grid2metaswap* is uitgebreid met deze gridbestanden.

Bij een modelsom die parallel (op meerdere rekenkernen) wordt gedraaid is het noodzakelijk dat het stuurpunt en de modelcellen van het beregeningsverbod in dezelfde partitie liggen.

A.4 Zuiniger beregenen

In de huidige praktijk is beregening bijna altijd gericht op maximale productie. Daarbij is de watervraag voor beregening één van de grote watervragers van grond- en oppervlaktewater. De grootste schade aan de gewasopbrengst ontstaat als het gewas in die situatie helemaal verloren gaat. Je kunt daarom ook water toedienen met als doel maximale voedselzekerheid: irrigeren om het gewas te laten overleven.

Daarbij kan water bespaard worden door minder frequent te beregenen, of de beregeningsgift te verkleinen. Bij een kleinere gift verlies je minder water als gevolg van een onverwachte regenbui daarna. Want dan is de gift voor niets geweest. Maar de toedieningskosten blijven hoog.

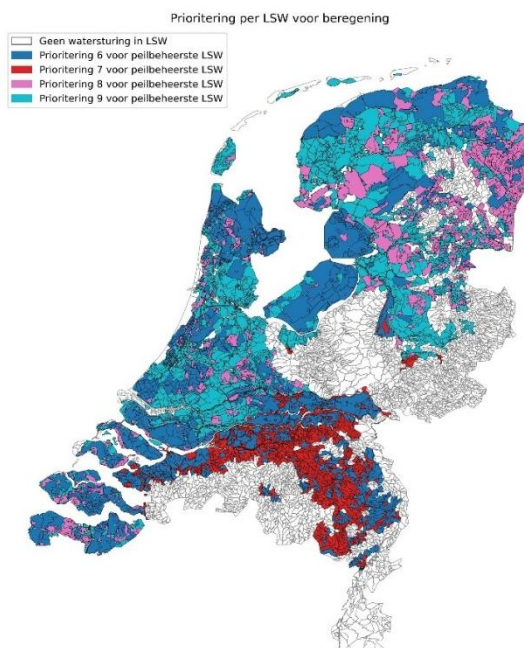
Bij druppelirrigatie is het in de praktijk met weinig meerkosten mogelijk om per dag te beslissen of er wel of niet water toegediend gaat worden. Het is immers niet veel meer dan het aan- en uitzetten van een pomp, zonder het gesleep met materieel zoals bij beregening. De gift voor een dag kan beperkt worden tot de maximale waterbehoefte, die in de orde van 5 mm/d zal liggen.

Een van de mogelijke implementaties in LHM is het aanpassen van het moment waarop beregend wordt (de zogenaamde beregenings-trigger). In het model wordt in LHM 4.3 beregend bij een transpiratiereductie van 15 procent als gevolg van droogte-stress (alfa = 0.85). Deze alfa kan bijvoorbeeld op 0.5 gezet worden. Deze implementatie is getest met het LHM. Bij een trigger-alpha van 0.5 is in het droge jaar 2003 slechts de helft van het beregeningswater nodig.

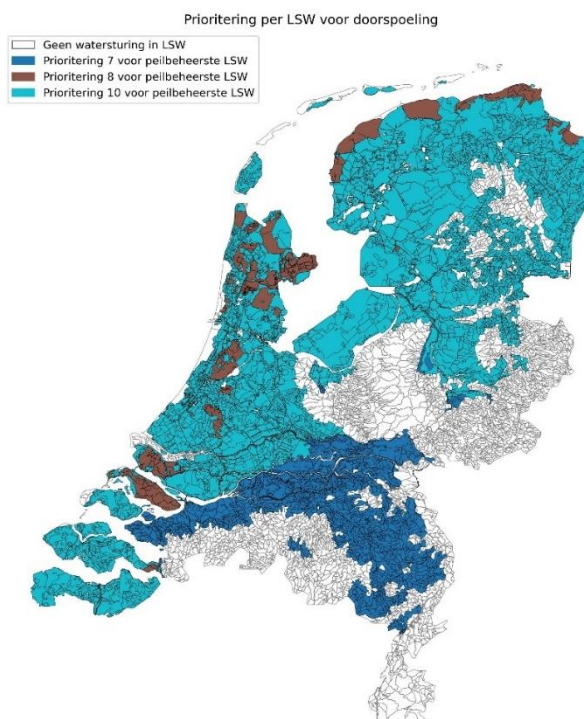
Het implementeren van een kleinere gift met korter interval alleen bij druppelirrigatie is niet direct mogelijk in het model. Wel is het mogelijk om nieuwe landgebruikstypes te definiëren met een kleinere gift, en deze klassen te gebruiken in modelcellen met druppelirrigatie.

B Wijziging prioriteiten van de verdringingsreeks

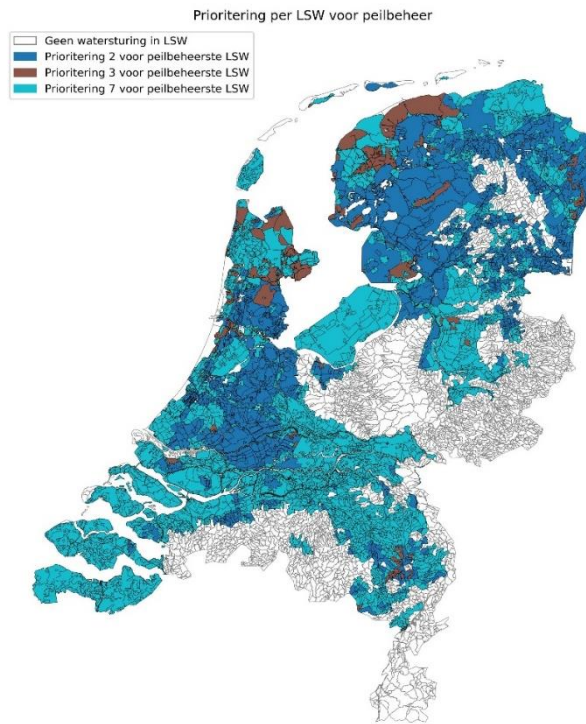
Toekenning van categorieën van de verdringingsreeks in MOZART



Figuur B.1: Prioriteringen per LSW voor beregning in LHM 43.



Figuur B.2: Prioriteringen per LSW voor doorspoeling. De kleuren geven de prioritering aan.



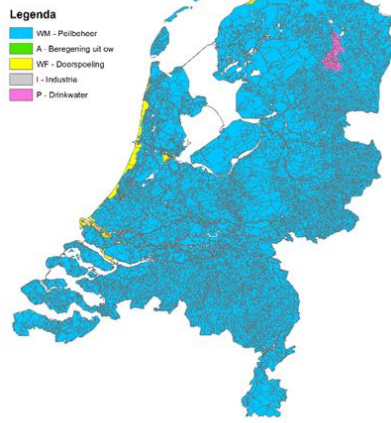
Figuur B.3 Prioriteringen per LSW voor peilbeheer. De kleuren geven de prioritering aan.

Verschil met prioriteiten in LHM 4.2

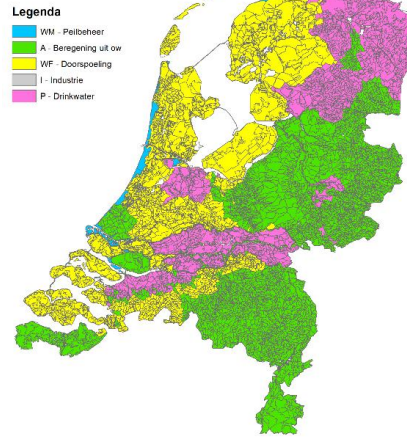
De oude en nieuwe methodologie voor prioritering binnen Mozart verschillen volledig van elkaar. In de oude aanpak werden er binnen Mozart vijf prioriteiten toegekend in plaats van de zeven/tien prioriteiten in de nieuwe aanpak; waarbij de hoogste prioriteit (1) alleen was toegekend aan het netwerk (in DM). Dit werd gedaan op basis van gebruiker (berekening, peilbeheer, doorspoeling, industrie en drinkwater) en op niveau van de oude waterschappen.

In de volgende figuur is weergegeven welke functies horen bij de prioriteiten 2 t/m 6 in LHM 4.2.

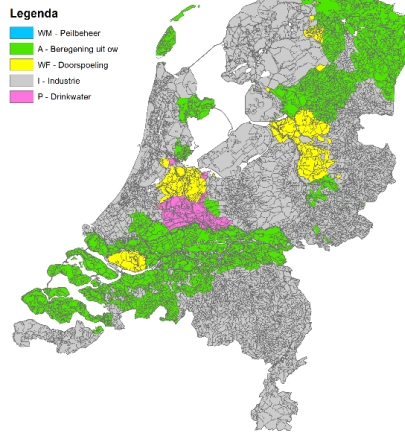
MOZART Prioriteit 2



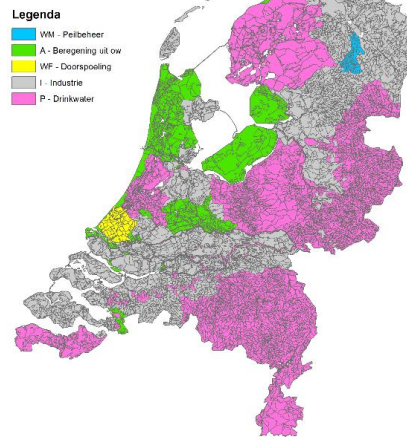
MOZART Prioriteit 3



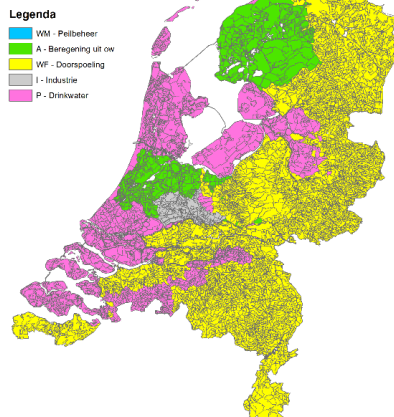
MOZART Prioriteit 4



MOZART Prioriteit 5



MOZART Prioriteit 6



Figuur B.4 Duiding van prioriteiten van de verdringsreeks in LHM 4.2

C Resultaten testberekeningen aanpassingen DM

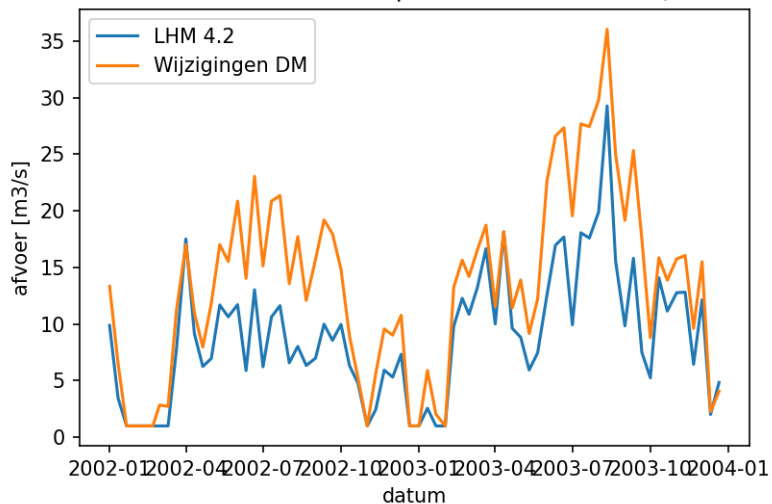
In deze bijlage worden de DM resultaten van de testsom LHM 4.3 vergeleken met de resultaten van LHM 4.2.

De testsom is een integrale testsom, dat wil zeggen een LHM som waarin DM on-line gekoppeld draait met Mozart en MetaSwap/Modflow. Echter, wijzigingen in modelinvoer in die andere modules zijn nog niet meegenomen, zodat de focus ligt op verificatie van het effect van de specifieke DM wijzigingen.

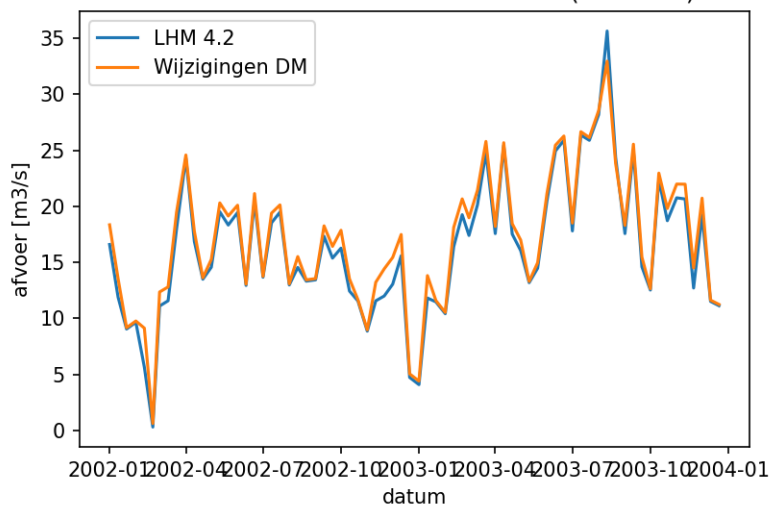
De testsom is gemaakt voor de hydrologische jaren 2002-2003 volgens de DM modelinvoer. 2003 was een vrij droog jaar, en in de simulatie is dan ook de inzet van de KWA in verband met de lage Rijnafvoeren en zoutindringing in het Rijn-Maasmonding gebied zichtbaar.

De conclusies bij de figuren zijn op hoofdlijnen benoemd in paragraaf 4.5. Voor nadere toelichting op de resultaten en meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar het achtergrondrapport van DPZW (Pouwels et al, 2023 in prep.).

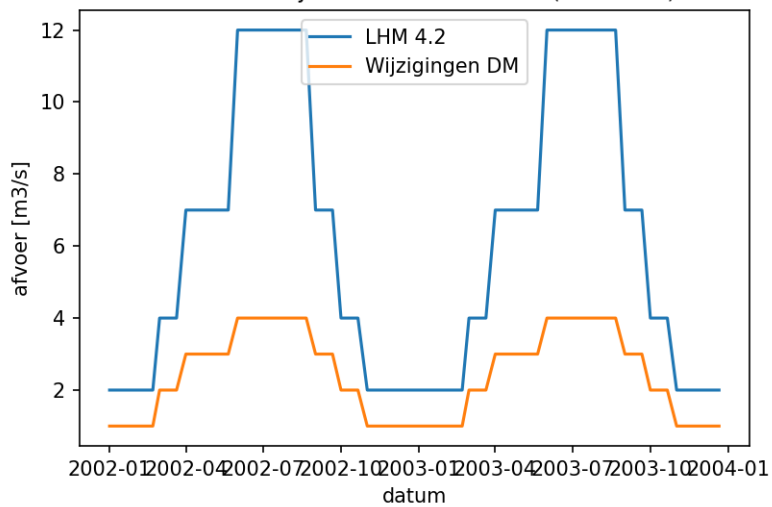
Debiet Bernhardsluis Betuwepand ARK 2002-2003 (tak 6104)

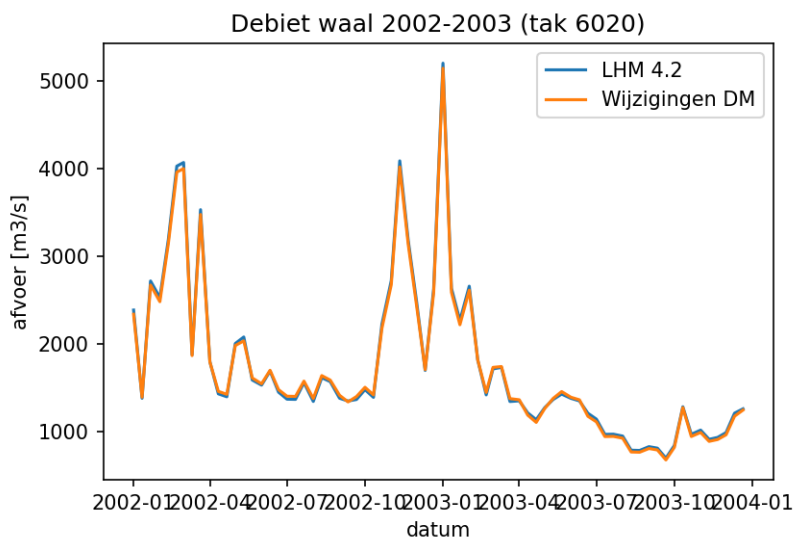
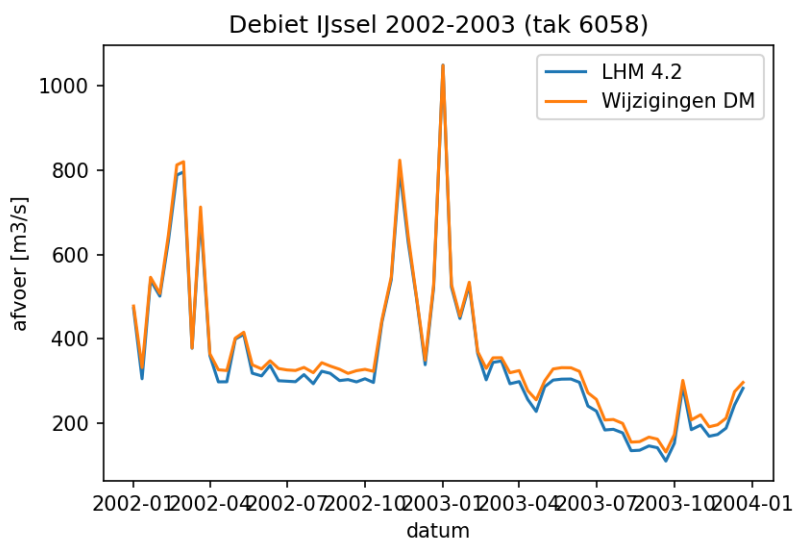
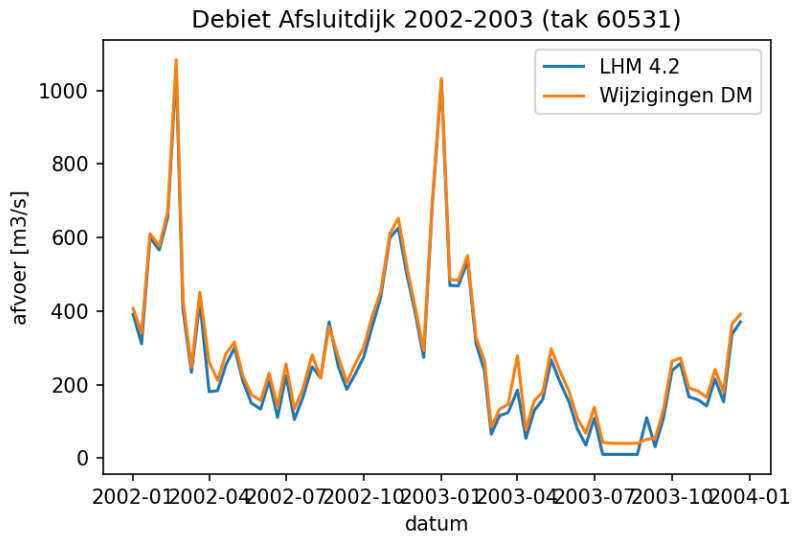


Debiet Irenesluizen ARK 2002-2003 (tak 6012)

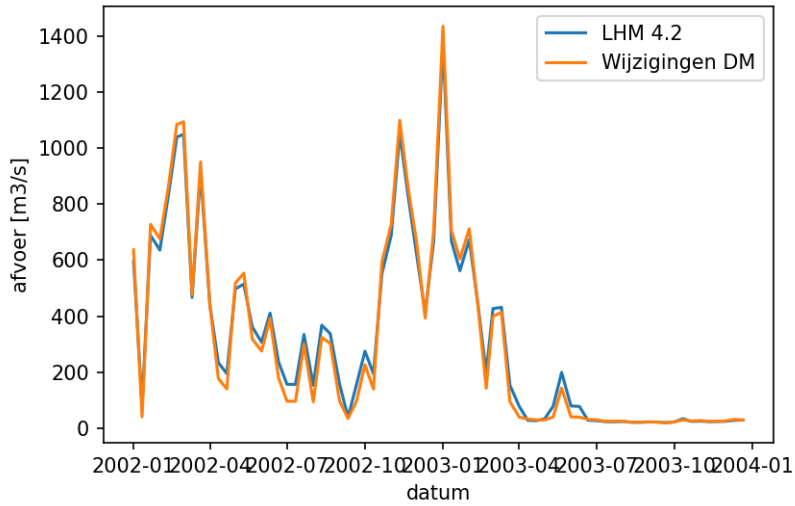


Debiet Oranjesluizen 2002-2003 (tak 6070)

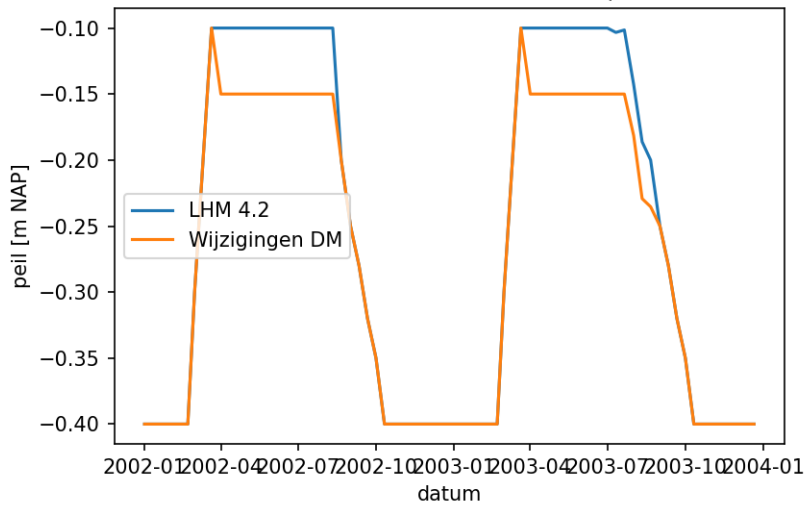




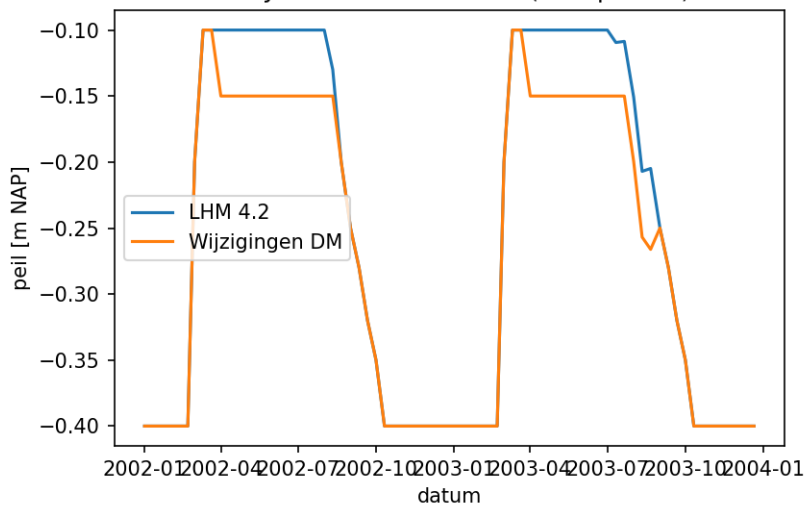
Debiet Nederrijn Driel 2002-2003 (tak 6003)



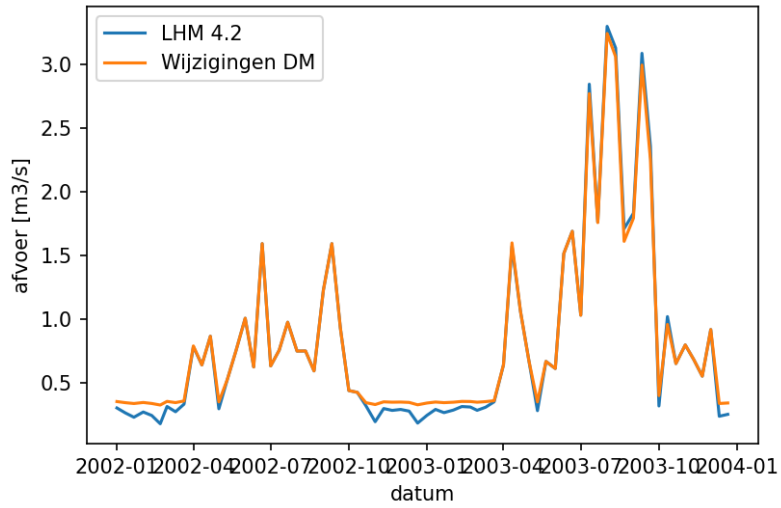
Peil Markermeer 2002-2003 (knoop 6058)



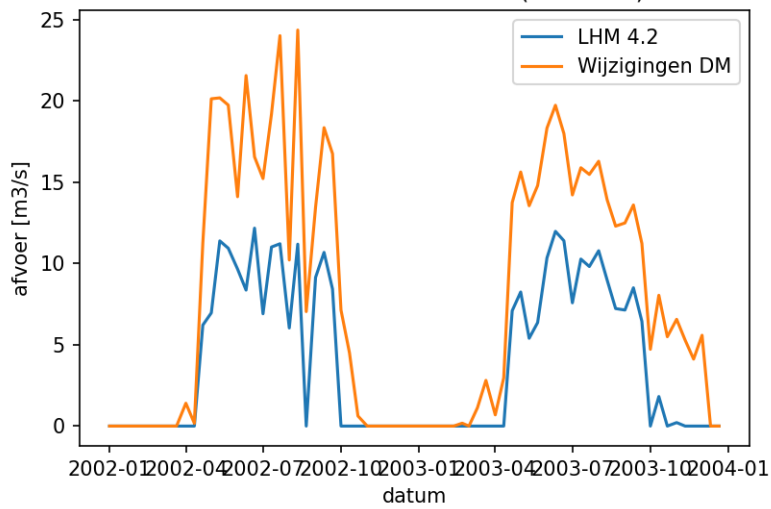
Peil IJsselmeer 2002-2003 (knoop 6057)



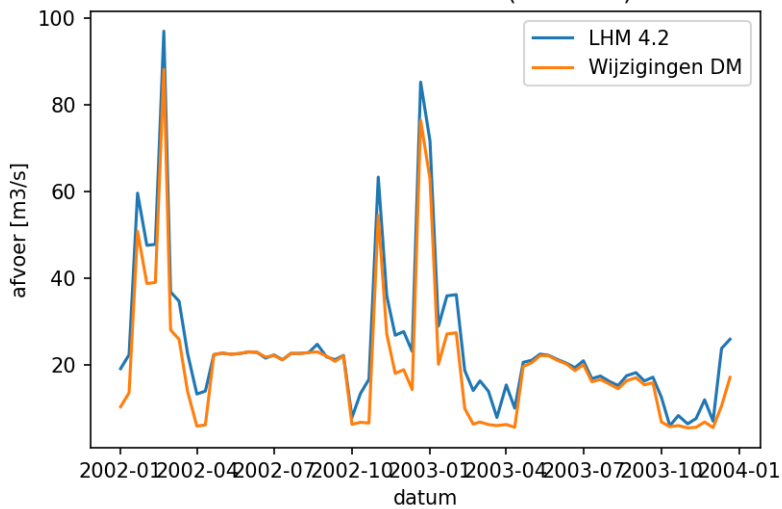
Debiet Noordervaart 2002-2003 (tak 5011)



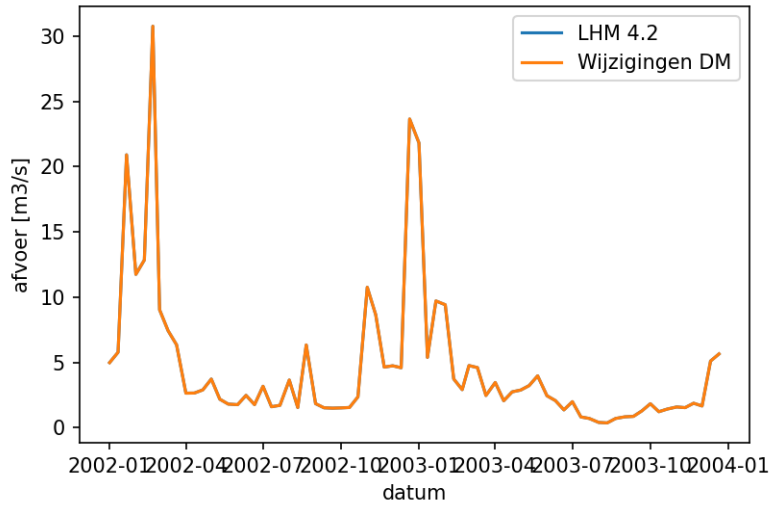
Debiet Volkerak 2002-2003 (tak 6094)



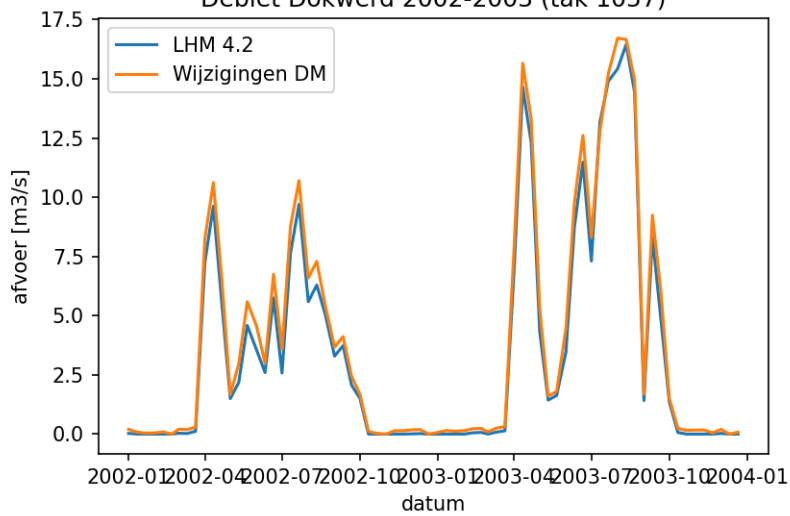
Debiet Bath 2002-2003 (tak 6097)



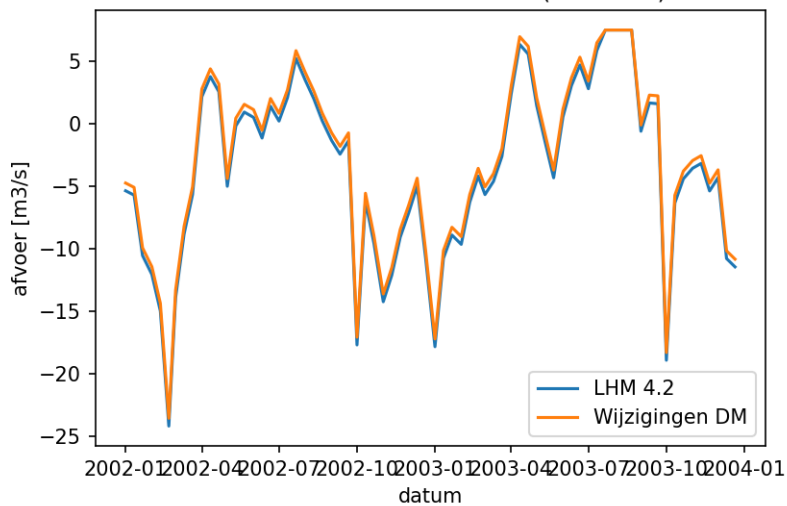
Debiet Bovenmark 2002-2003 (tak 5035)

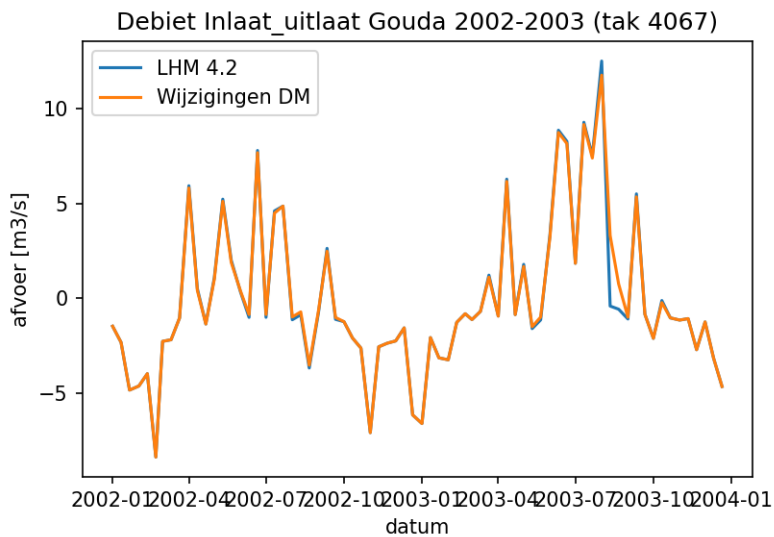
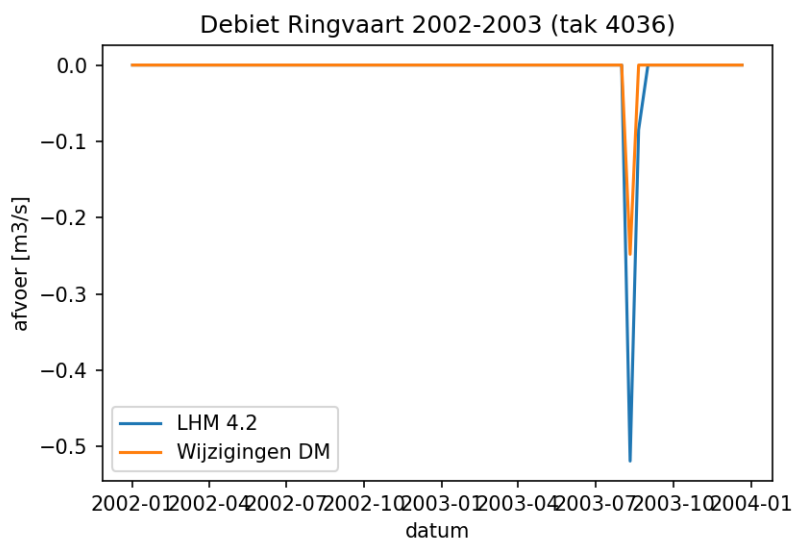
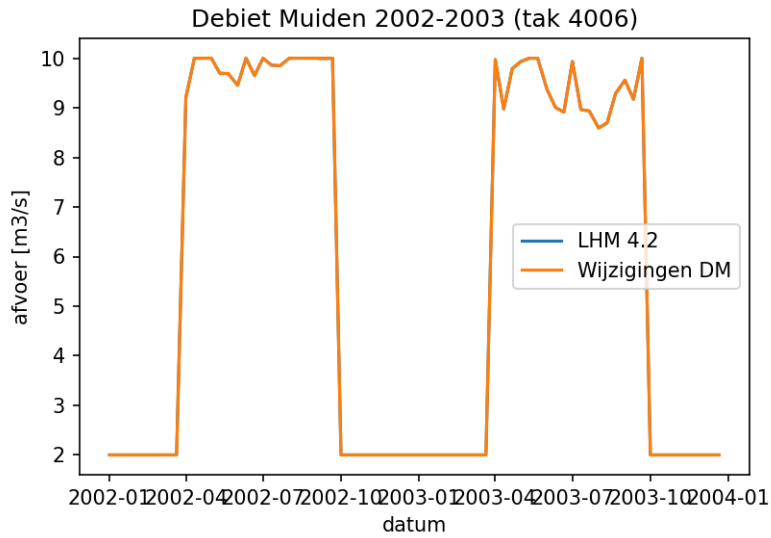


Debiet Dokwerd 2002-2003 (tak 1057)

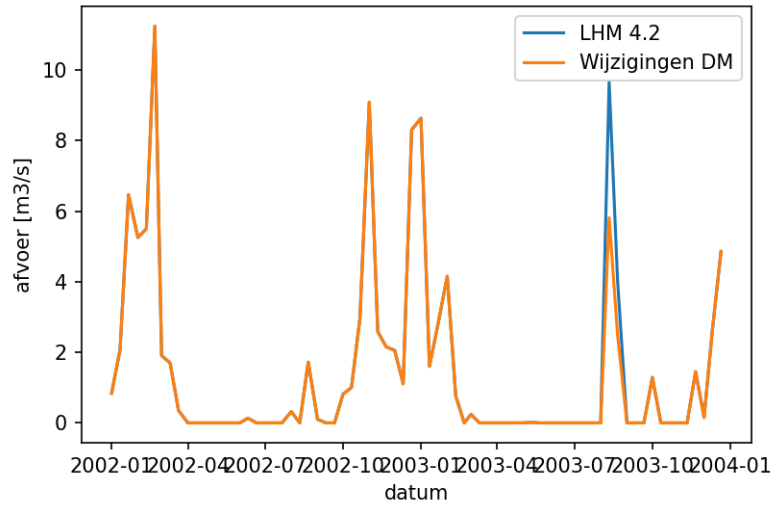


Debiet Veendam 2002-2003 (tak 1026)

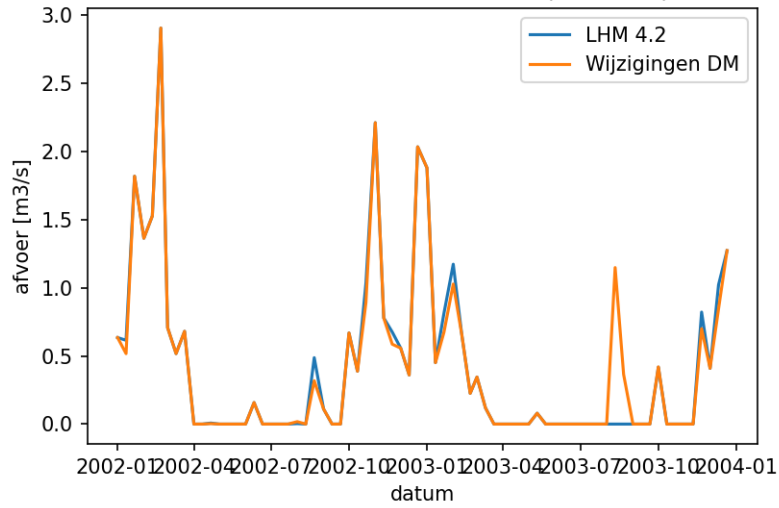




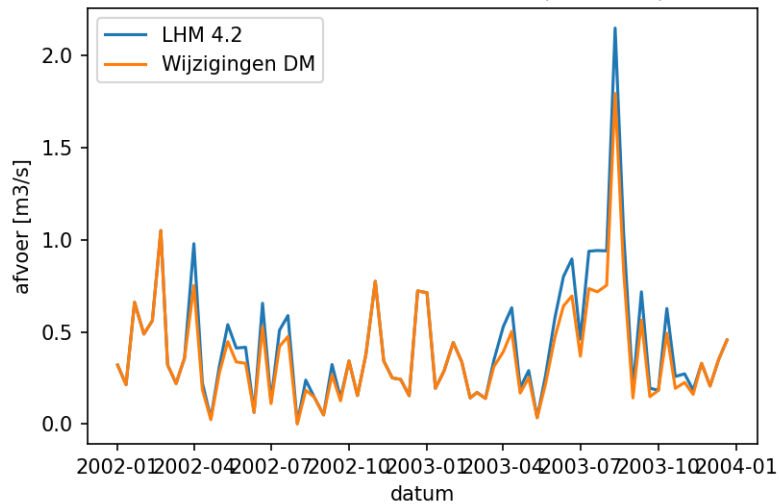
Debiet Bodegraven 2002-2003 (tak 4070)

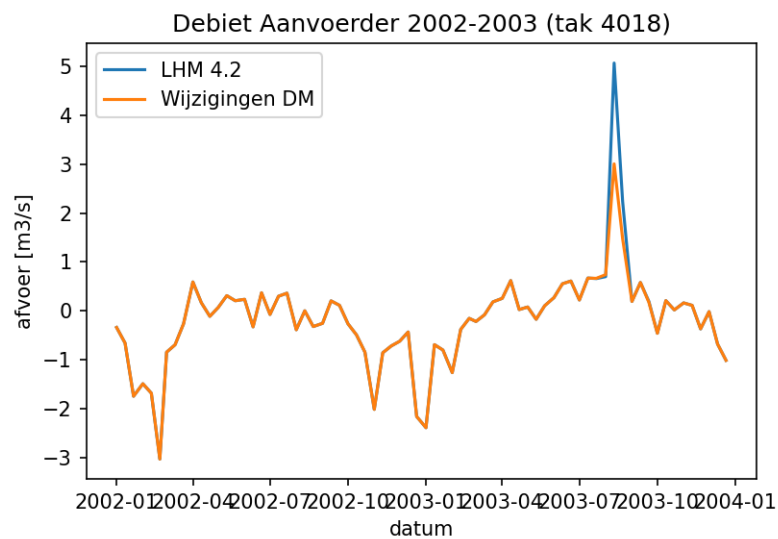
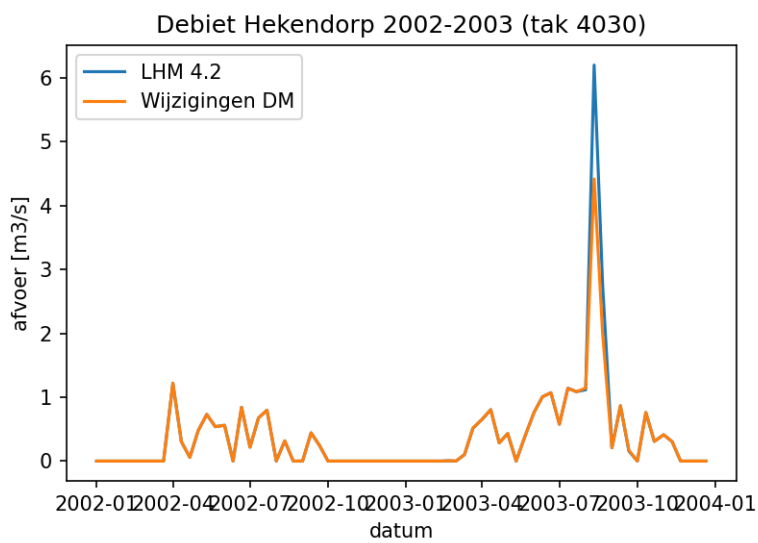
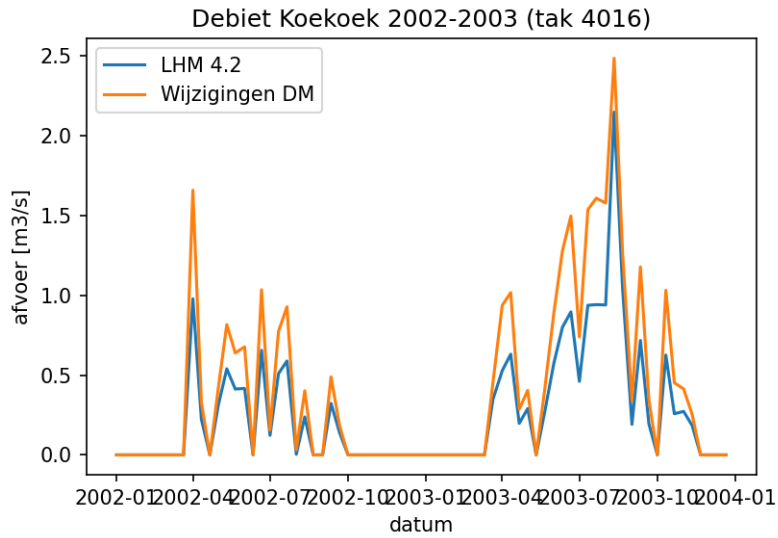


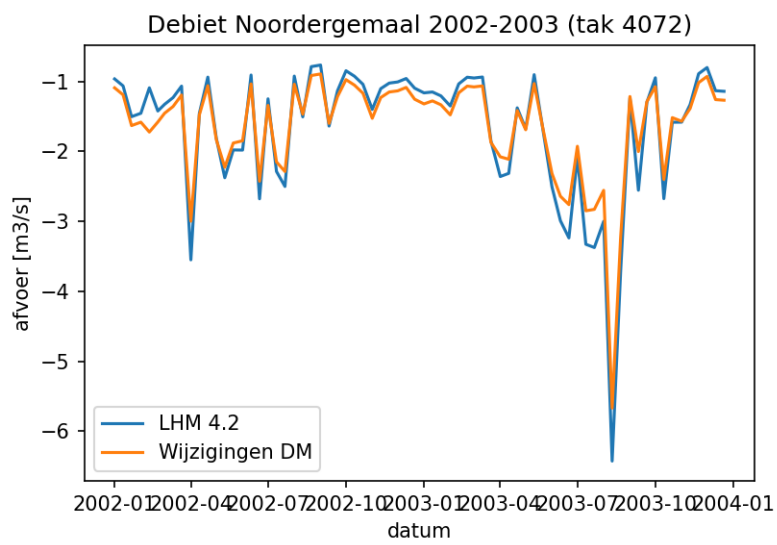
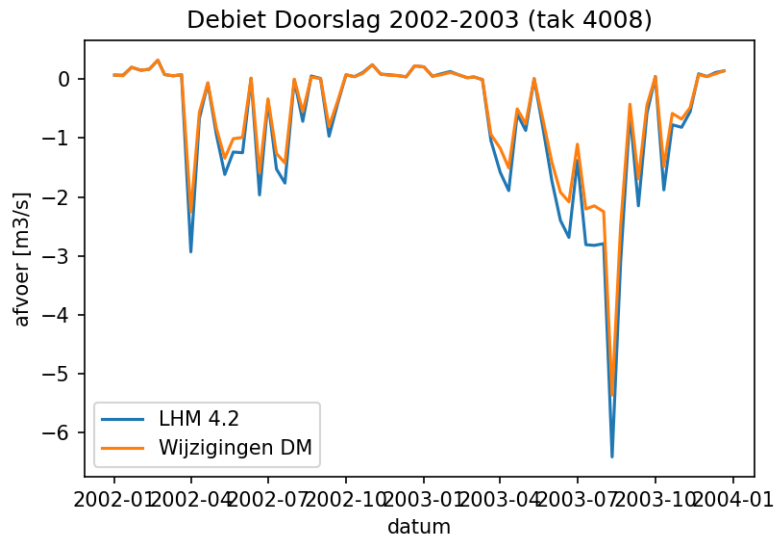
Debiet Waaiersluis 2002-2003 (tak 4059)



Debiet Keulevaart 2002-2003 (tak 4010)



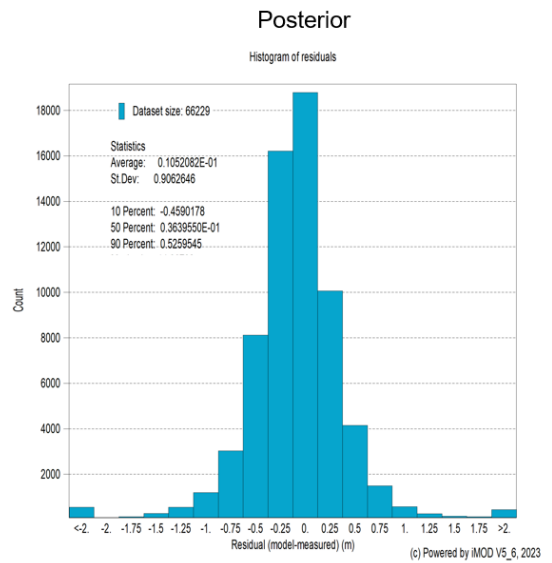
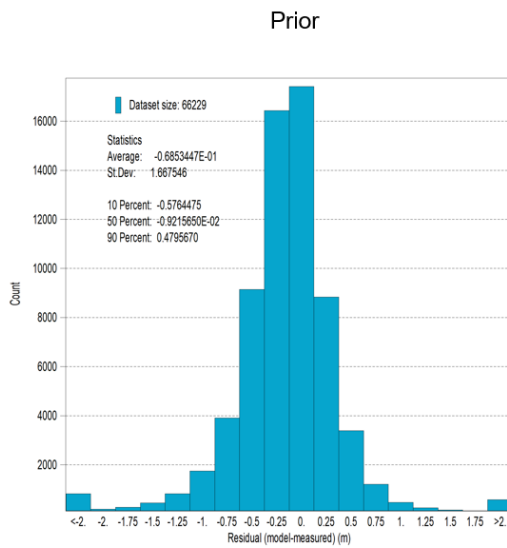




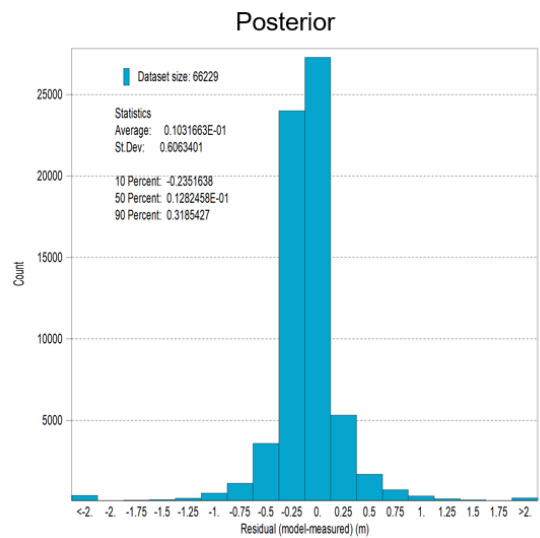
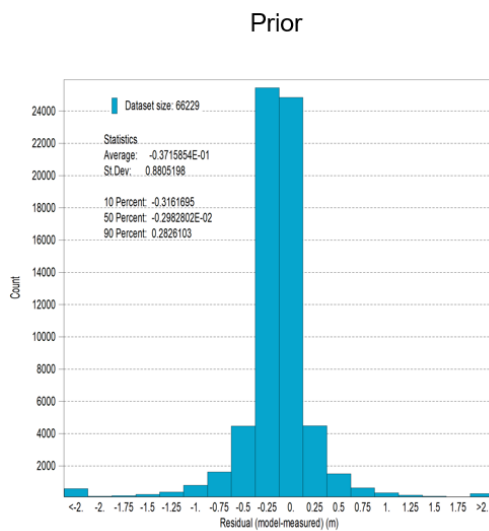
D Kalibratieresultaten

D.1 Berekende residu histogrammen

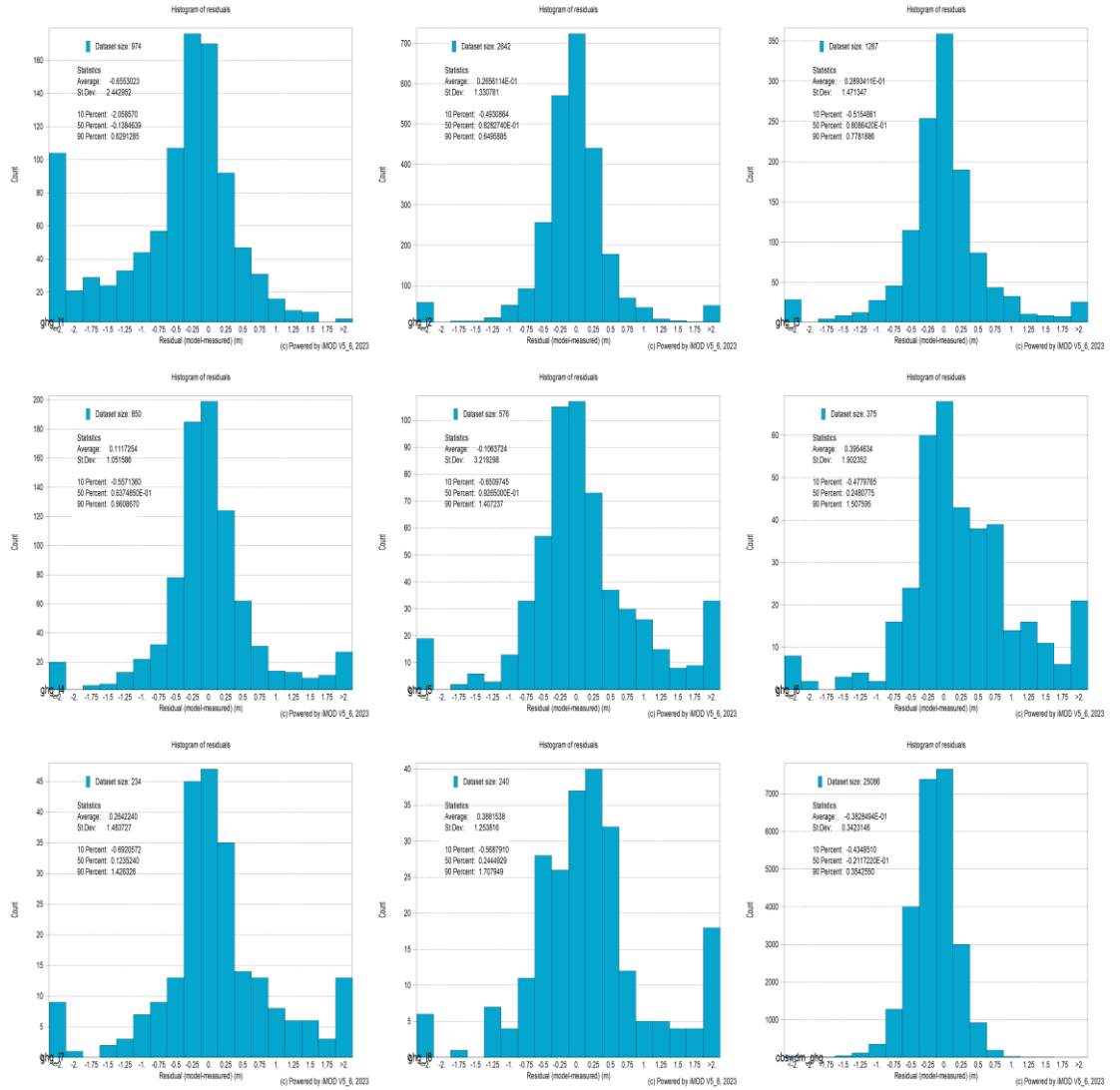
Normaal residu



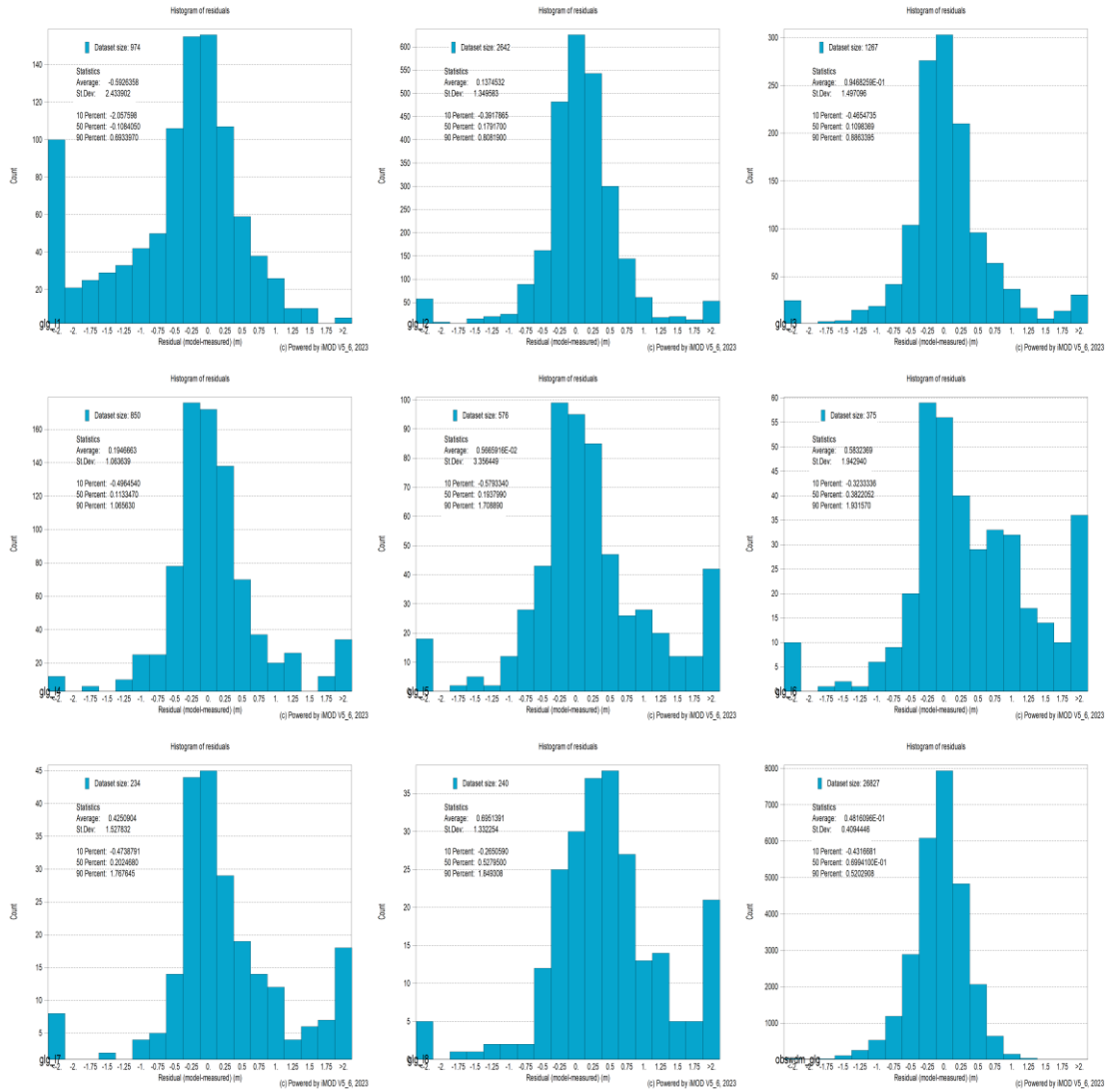
Residu naar gewicht



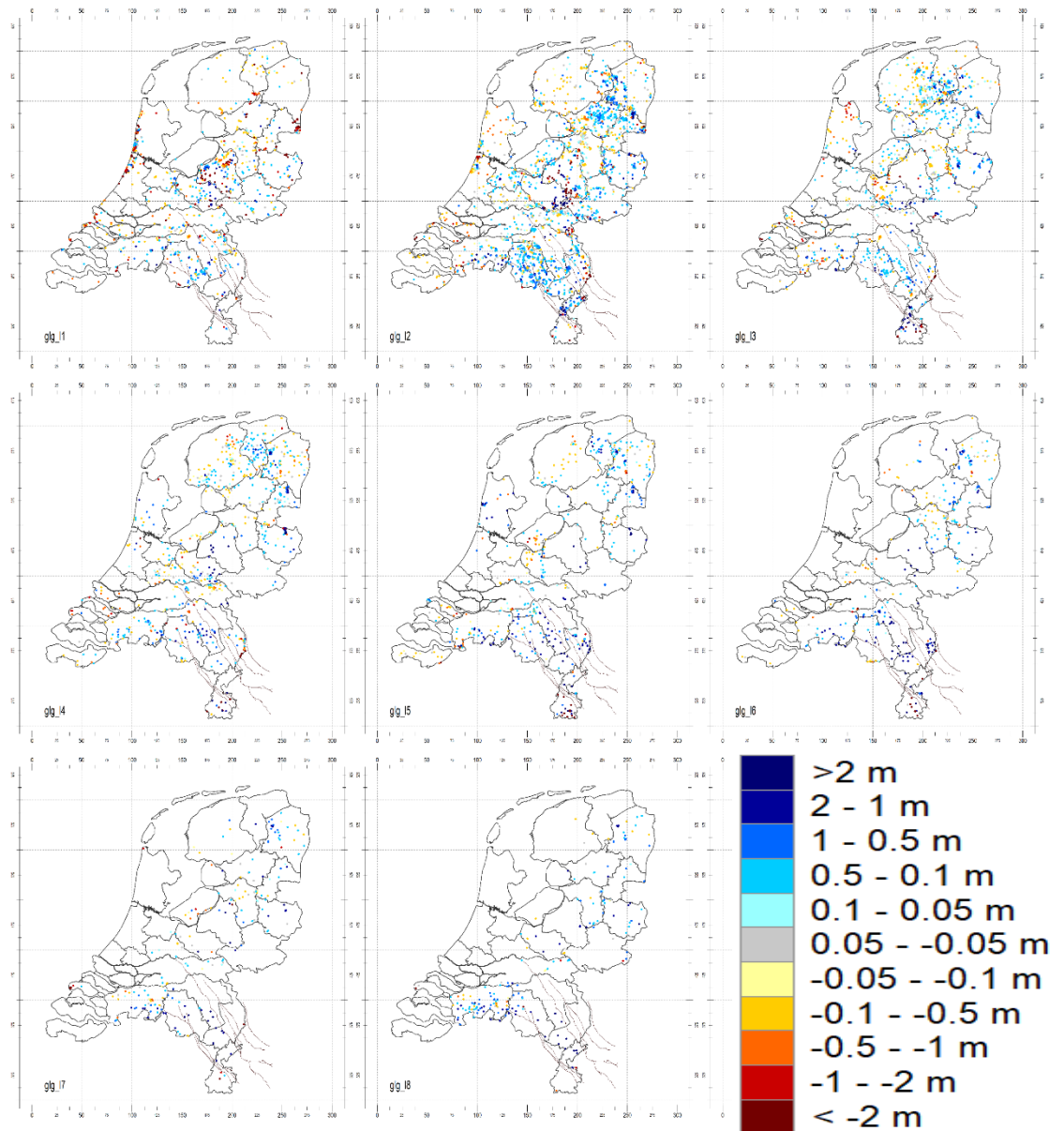
Residu per modellaag voor de GHG



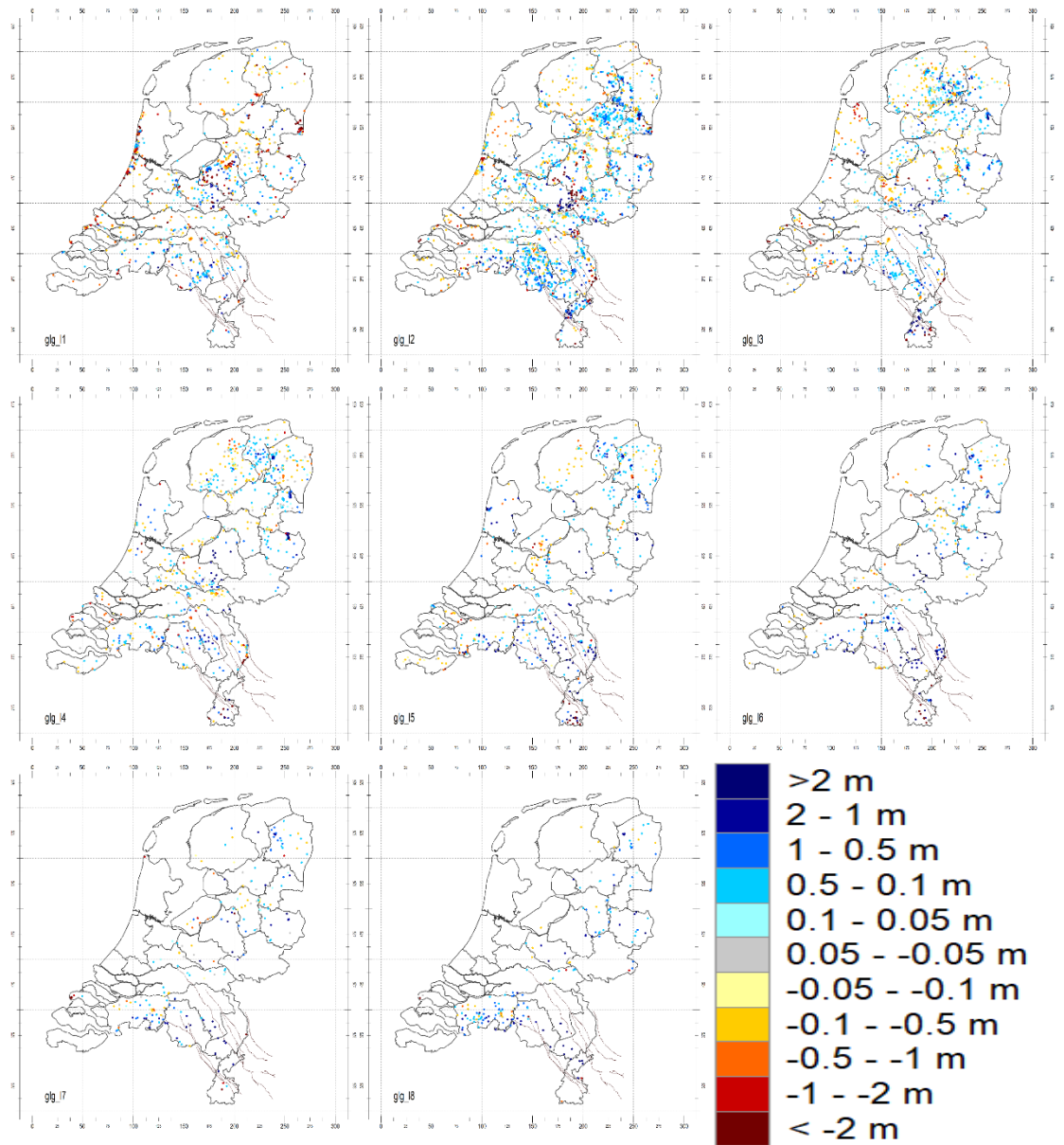
Residu per modellaag voor de GLG



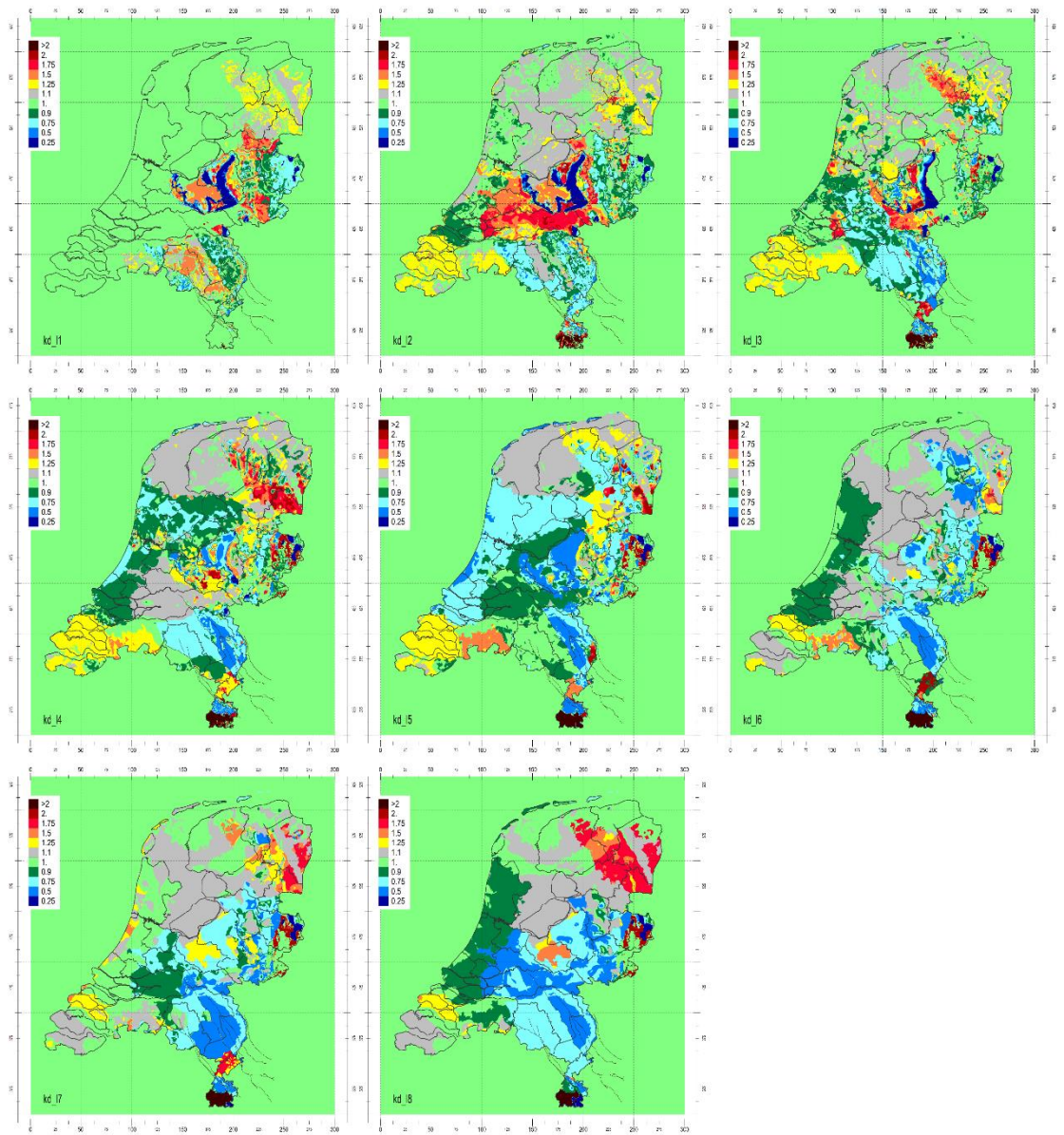
D.2 Berekende residuen voor de GHG



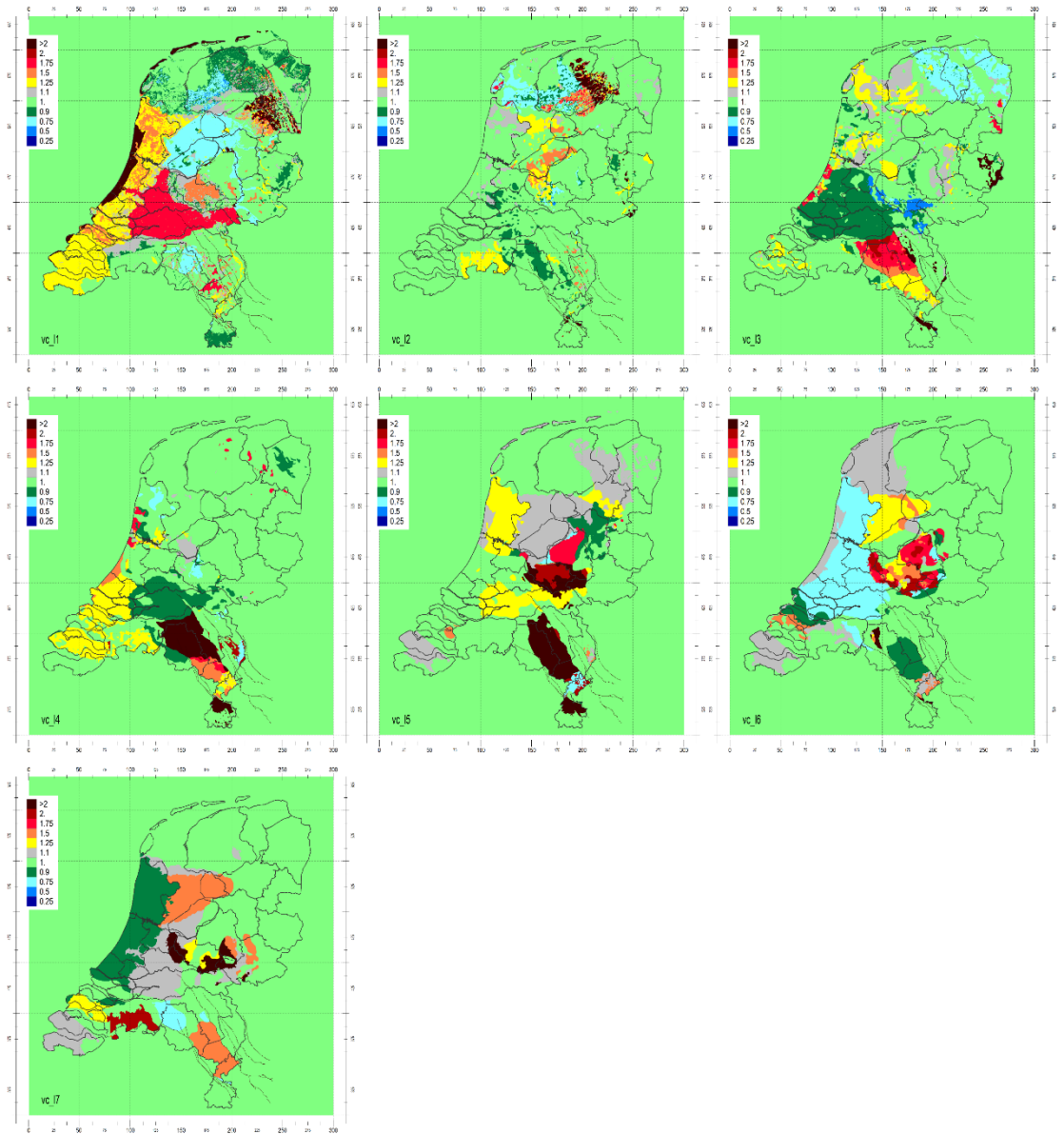
D.3 Berekende residuen voor de GLG



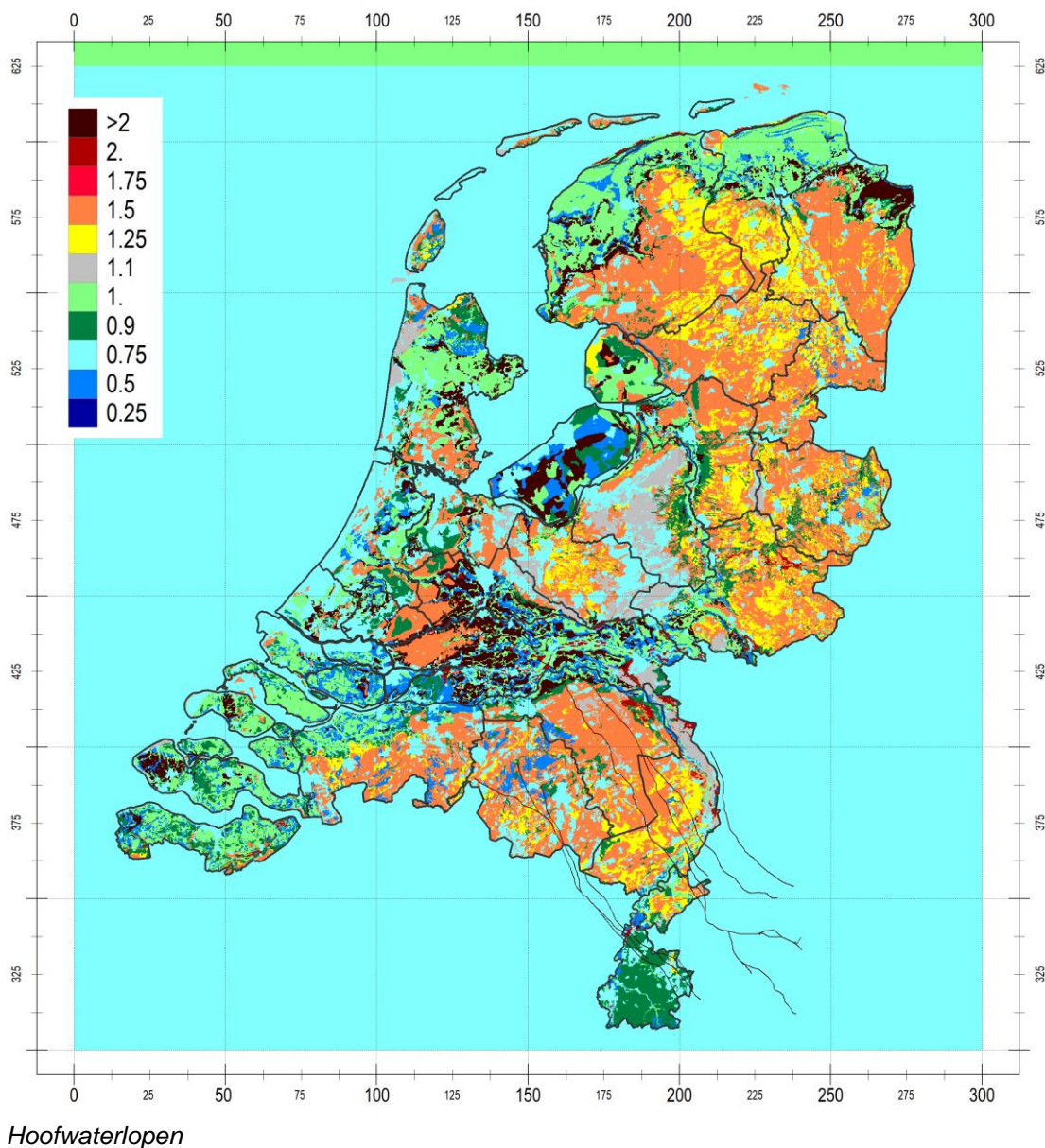
D.4 Berekende parameter aanpassingen voor de KD

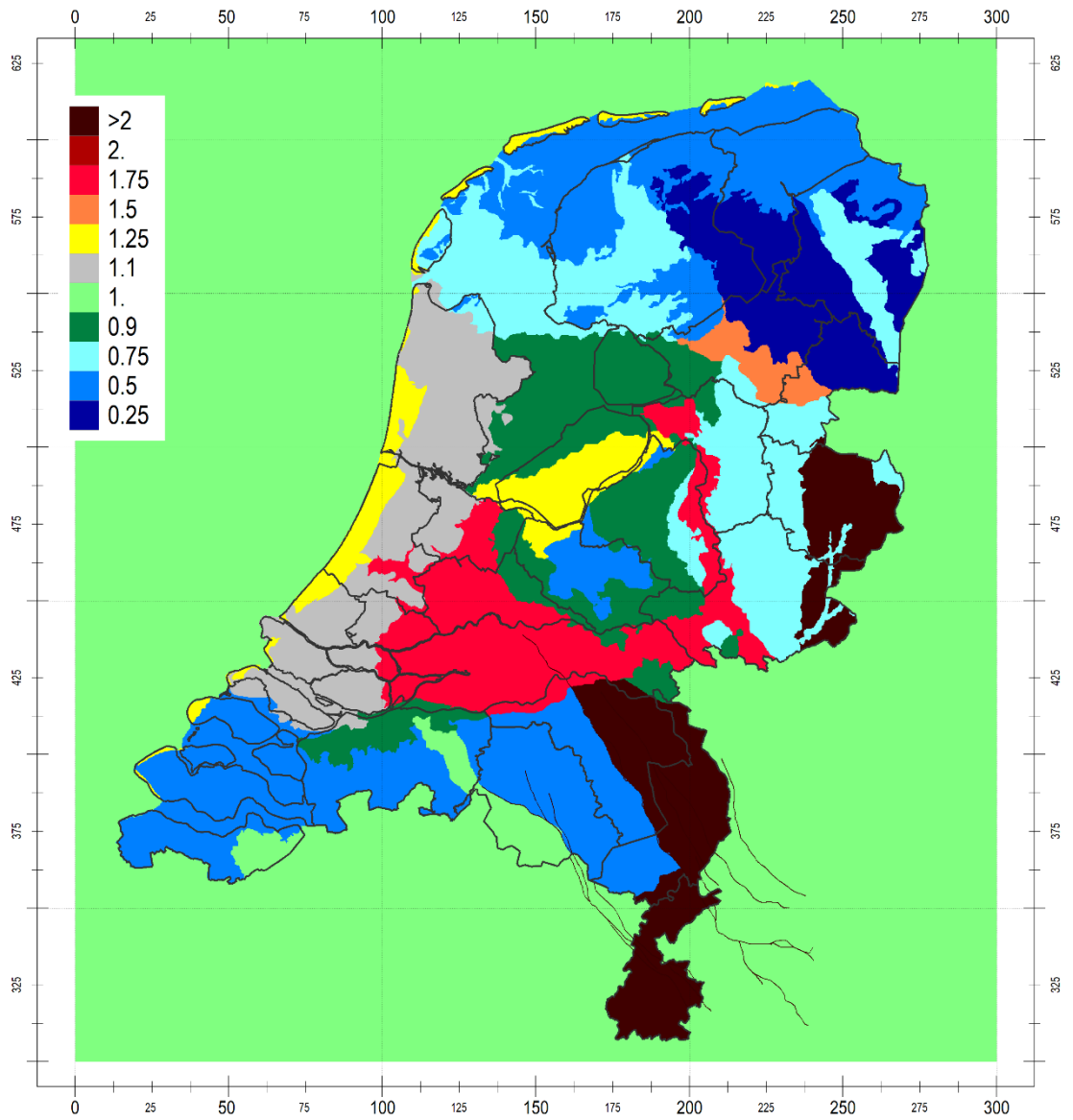


D.5 Berekenende parameter aanpassingen voor de verticale weerstand C



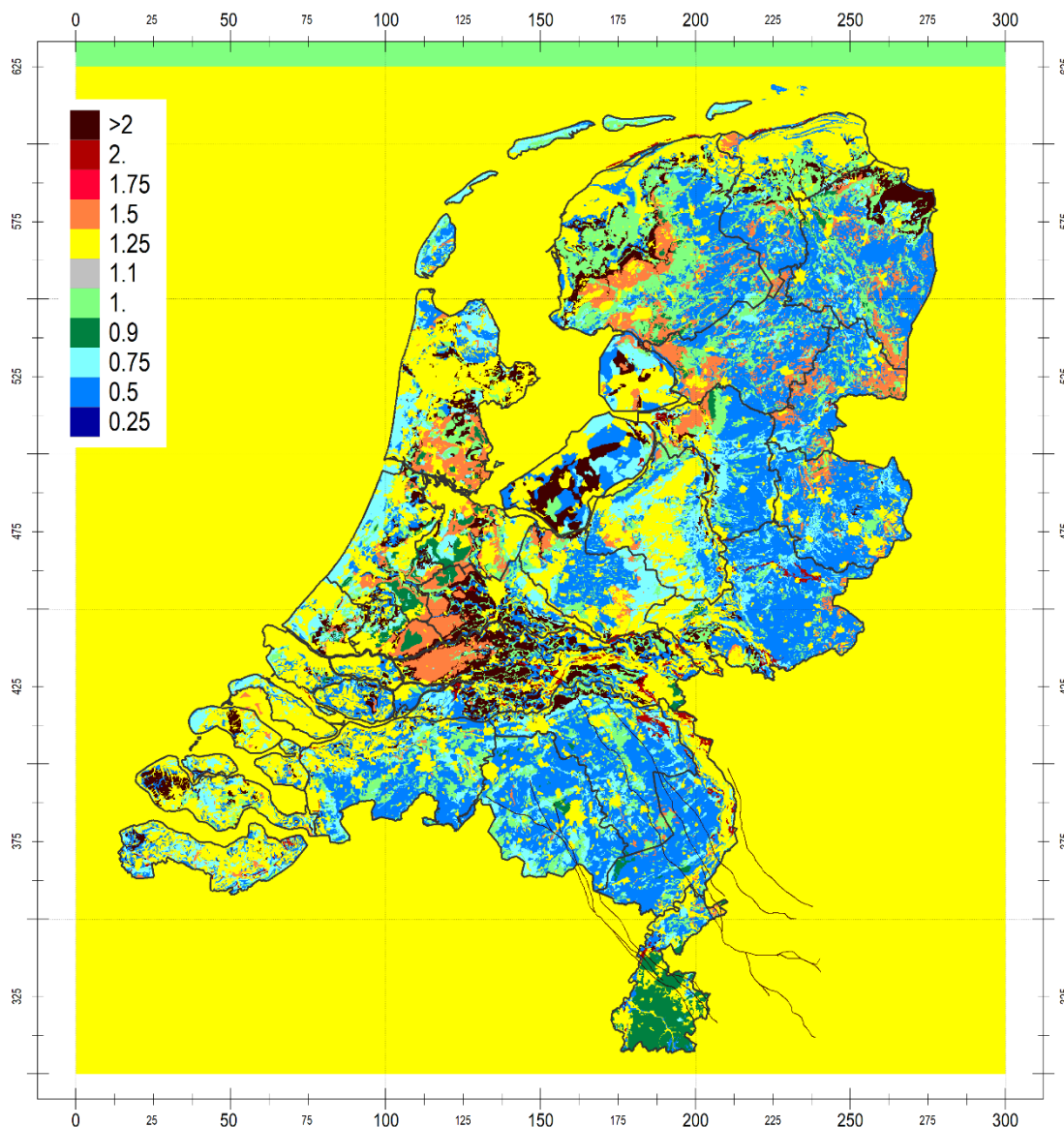
D.6 Berekende parameter aanpassingen voor de Waterlopen Conductance



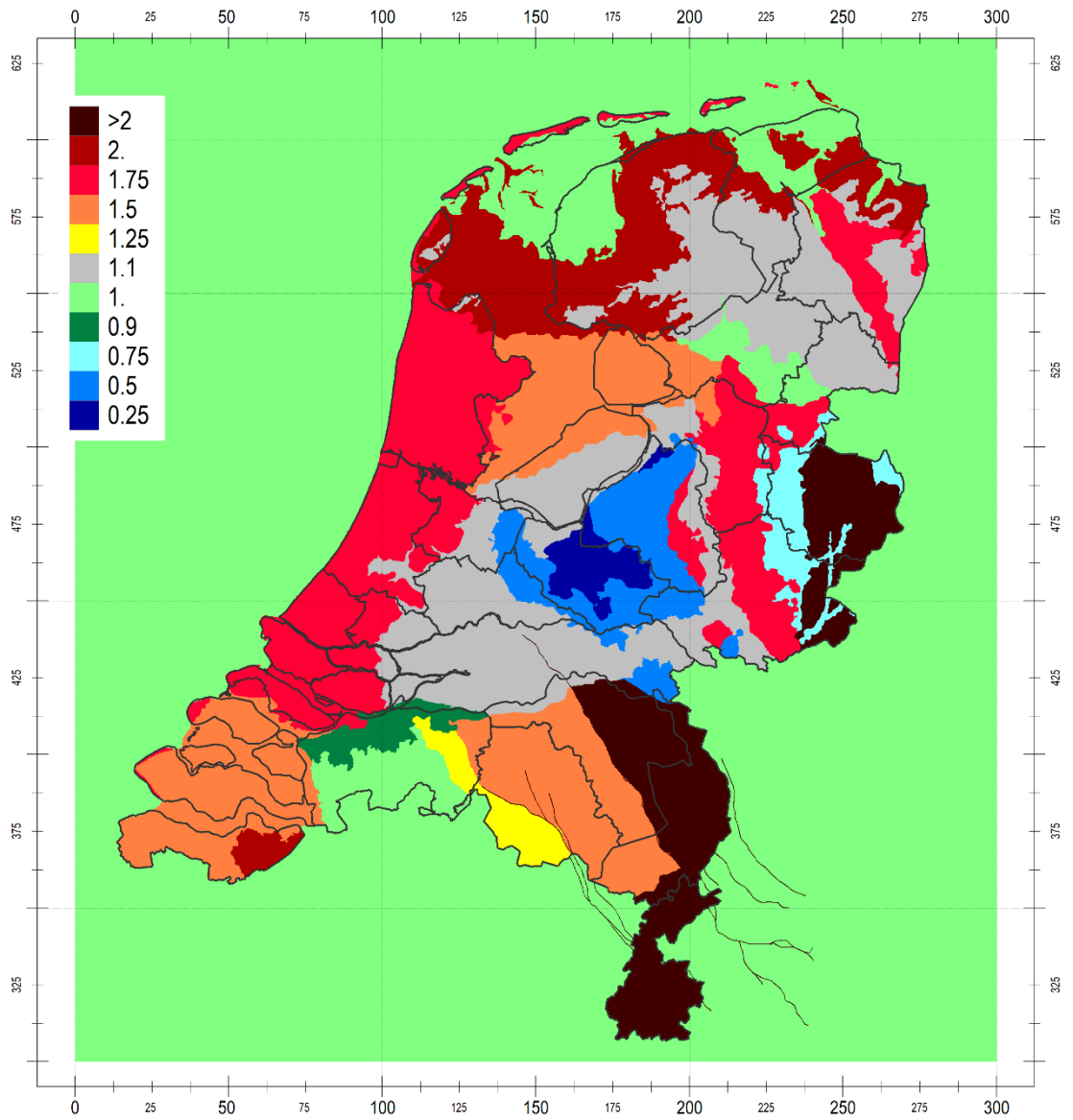


Primaire- Secundaire en Tertiaire Watergangen

D.7 Berekende parameter aanpassingen voor de Waterlopen Infiltratiefactoren

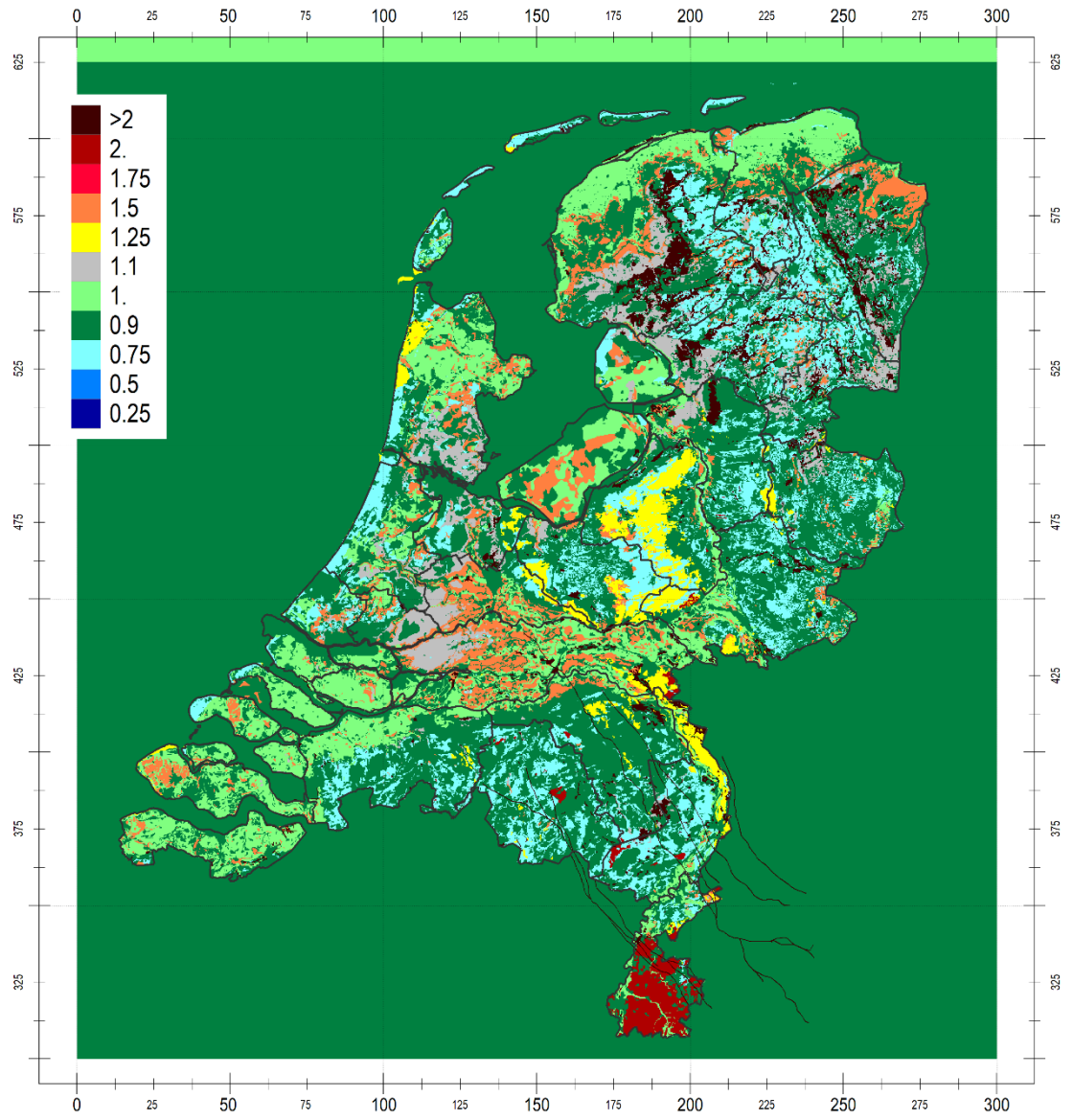


Hoofwaterlopen

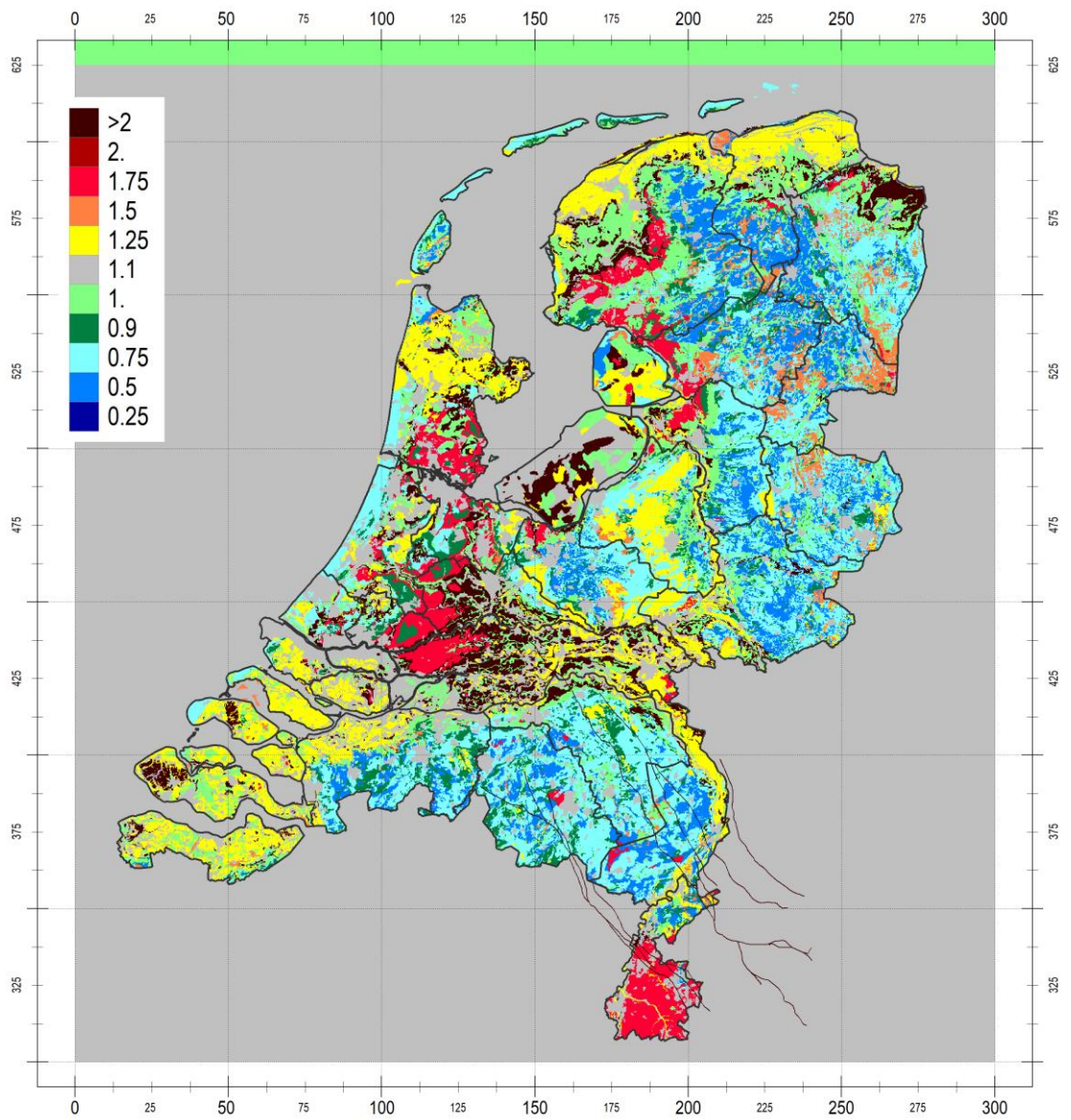


Primaire- Secundaire en Tertiaire Watergangen

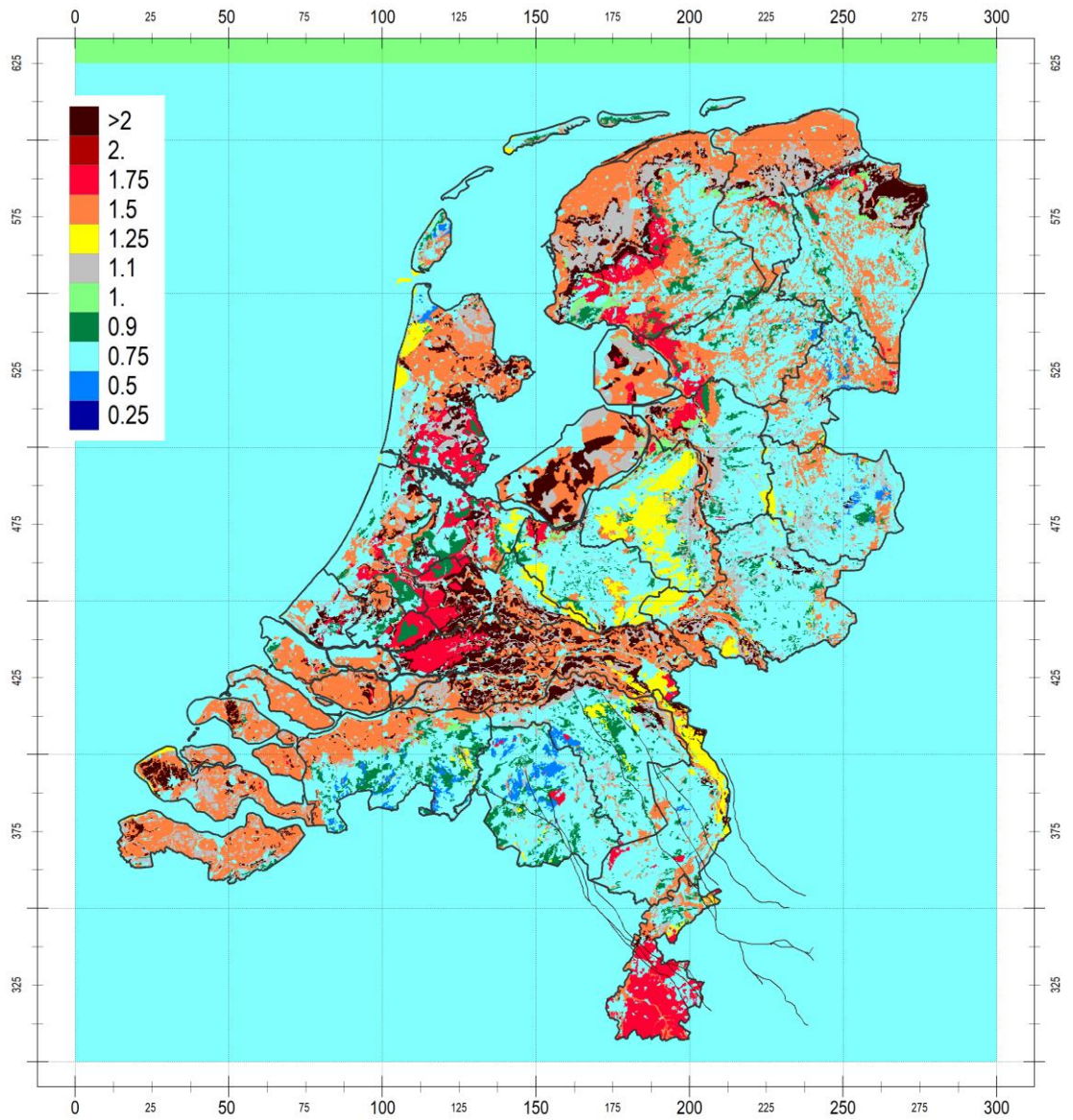
D.8 Berekende parameter aanpassingen voor de Drainage



Buisdrainage

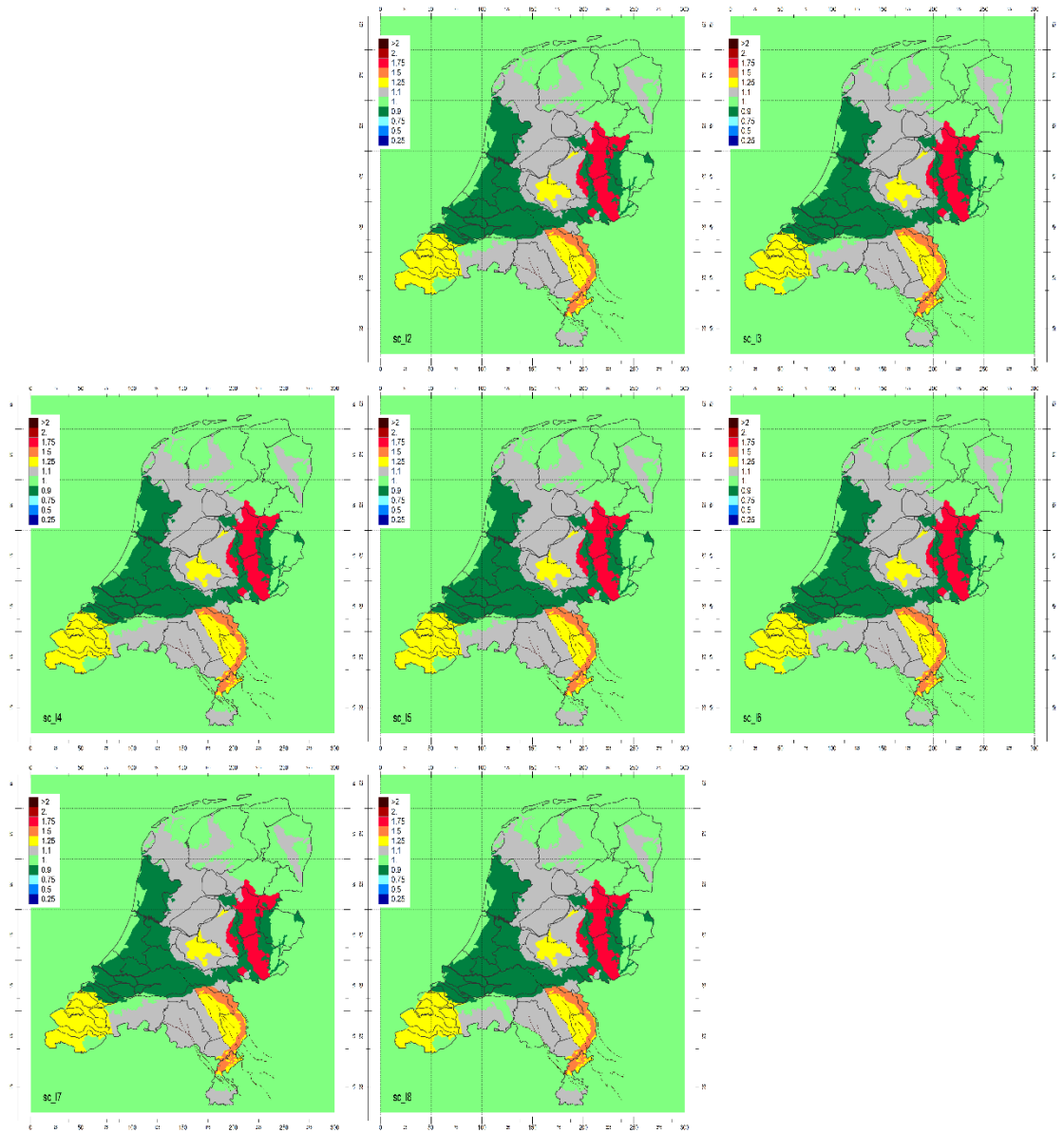


Greppeldrainage



Overlandflow

D.9 Berekende parameter aanpassingen voor de SC



E Toegepaste modelparameters in MetaSWAP

Introduction

Deze bijlage geeft een aanvullende uitleg van de instellingen van MetaSWAP binnen LHM 4.3, zoals toegepast op de nieuwe MetaSWAP-versie in iMOD 5.6. Het betreft een aanvulling op de releasenotes van MetaSWAP, als onderdeel van iMOD 5.6. Vanwege de verspreiding van de iMOD releases zijn deze in het Engels weergegeven. De beschreven instellingen in MetaSWAP kunnen ook dienen als voorbeeld voor regionale modeltoepassingen. De bijbehorende LHM-invoerbestanden kunt u opvragen bij de NHI-helppdesk.

Parameter settings

Care should be taken with the following settings end up in PARA_SIM.INP, since these are done via the iMOD input:

```
vegetation_mdl      =      3 ! Vegetation model      (1/2/3) 1= simple, 2= WOFOST,      3=2 + feedback
evapotranspiration_mdl =      3 ! Evapotranspiration model (1/2/3) 1= simple, 3= PenMon full
soilevaporation_mdl =      1 ! 0 = old model, 1 = new (default)
indirectdamage_mdl  =      1 ! 0= reference with, 1 = reference without indirect damage
oxygenstress_mdl    =      3 ! 0= without, 1= Feddes, 2= Bartholomeus, 3 = RB with feedback to soil evap.
postmswo2_opt       =      2 ! Refresh interval (d) of theta-profile for o2stress
saltstress_mdl      =      0 ! Salt stress model      (0/1) 0= none  1 = Maas-Hoffman
dprztfunc           =      0.3 ! knikpunt in wortelverdeling (m)
postmsw_opt         =      2 ! Online postmsw      (0/1/2) 0= not  1 = full , 2 = just for WOFOST and O2
co2                 =      404.21 ! CO2 concentration in parts per million
```

Land use modelling

The file WORTELZONE.CSV contains information about the maximum rooting depth per soil type of the SCR654-database. Its header is

soil_id	WWL-crop id	RDS (cm)
1	1	120
2	1	120
3	1	15

The WWL-crop id's are explained in Table 3 of :

https://waterwijzerlandbouw.wur.nl/downloads/2.0/WWL_tabel.pdf

The respective values should be entered in the *dprzk* column of AREA_SVAT.INP, positions 65-72. The WWL-crop ids do not cover forest and open water of the NHI-list. For NHI-lu 9, 11, 12, 15, 16, and 19 a *dprzk* of 1.500 m should be entered.

The new version of the file FACT_SVAT.INP contains more information about the root zone depths of non-WOFOST vegetation. This information avoids that the model sets the rootzone depth to the maximum value of the soil.

The use of crop factors has been depreciated for agricultural crops. It should be realized that some of the factors are not up to date, and do not include the use of a 'vanggewas', which is now a legal obligation in NL, and should therefore also be included in the model, which can only be done by using WOFOST. So implementation of WOFOST should include the 'vanggewas' in combination with the rotation scheme. This implementation is done with the given rotation scheme of LUROTA_SVAT.INP in combination with the new VG2CRP_SVAT.INP. The LUSE_SVAT.INP should be expanded like has been done for LHM4.3.

The LUSE_SVAT.INP file should also be taken care of. One important change in the new version is the trigger for sprinkling, which has now been set at 0.925 instead of 0.85 as previously. Another important change is the use of a Jarvis_wet parameter of 0.4. As explained in the LHM43 report this parameter is rather uncertain for oxygen stress. It is thought to be in the interval [0.4,0.7]. So an alternative for the used 0.4 in LHM can be the middle of the interval, 0.55. If that is implemented, this should be done by entering ".55" in the columns 33-35. The fixed format allows the lack of separation from the preceding parameter.

The new crop files on now include the new *aeratecrit* parameter, and some of the crop resistances have been updated. So the user's files should be updated.

For WOFOST and oxygen stress it is not necessary to use the most extensive version of PostMetaSWAP. But PostMetaSWAP is needed for supplying the temperature profile. This can be achieved by setting *postmsw_opt* = 2, to the 'minimum' option. The option does still need a list of times that the PostMetaSWAP is called, in TIOP_SIM.INP. The interval between the profiles should not be more than 10 d. But at the other extreme, 1 d consumes a lot of extra CPU time, and is not recommended.

By using the SEL_KEY_WOF_PER.INP file the model will write the idf's needed for calculating the crop damage maps. A postprocessing procedure has been developed for converting the idf-output to maps of drought damage (in %) and oxygen stress damage (%) and indirect damage (%).

Database

The new database is now based on the original soil schematization of the SCR654 report. It also contains a repair of the Van Genuchten relationships for heavy textured soils. Documentation is available in Implementation_proposal/test_report 76.

The new release should only be used in combination with the new database, otherwise excessive runoff will be generated. Vice versa, the new database should only be used in combination with the new release.

The file *P_SCR654_SR2018_cd_ssq_ae_hmvg10_lhm43R.zip* contains both the SCR654 database with 370 units and the BOFEK2020 version.

For using the database in accordance with LHM4.3 the file scaling factors in USCL_SVAT.INP should be adjusted:

- The factor for the conductivity should be given a value of 1.5 for the SCR654 spu's 1-66 and 213-355
- The factor for the theta should be given a value of 1.176 for SCR654 spu's 1-66 and 213-355, and a value of 1.15 for SVATs with permanent trees, lu= 9, 11, 12, and 19

As an alternative for applying the rules to determine the scaling factors it is possible to use the LHM-grids. But it should be realized that these grids are for a resolution of 250*250 m. An inaccuracy is involved if this is applied on a regional model with a resolution of for instance 25*25 m, which means the dependency on the land use and soil type is not accurately taken into account.

The database has been finetuned with respects to the following parameters:

- FPRZUNI_SVAT.INP
- HZN_CEBS.CSV

If there is a file FPRZUNI_SVAT.INP in the user's directory, it should be removed. Otherwise the file contained in the new database will be overruled.

Truncation of soil profiles

The LHM model has been truncated at a depth of 13 m using file DBOT_SVAT.INP. For regional models it is advised to truncate at a depth of 5 m.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl