



Validatie Waterwijzer Landbouw

H.M. Mulder, M.J.D. Hack-ten Broeke, W.M.L. Meijninger

Validatie Waterwijzer Landbouw

H.M. Mulder, M.J.D. Hack-ten Broeke, W.M.L. Meijninger

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en gesubsidieerd door TKI-Deltatechnologie ('Conceptuele modelverbetering NHI', projectcode DEL143).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, april 2023

Gereviewd door:
Rob Ruijtenberg (STOWA)

Akkoord voor publicatie:
Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider van Bodem, Water en Landgebruik

Rapport 3248
ISSN 1566-7197

STOWA 2023-10

Mulder, H.M., M.J.D. Hack-ten Broeke, W.M.L. Meijninger, 2023. *Validatie Waterwijzer Landbouw*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3248. STOWA 2023-10. 90 blz.; 41 fig.; 8 tab.; 50 ref.

Waterwijzer Landbouw is het instrumentarium waarmee effecten van hydrologie en klimaat op landbouwkundige gewasproductie kan worden gekwantificeerd. Om in te schatten in hoeverre het instrument voldoet is validatie nodig. Enkele resultaten zijn beschreven in dit rapport. Modelresultaten van Waterwijzer Landbouw zijn vergeleken met waarnemingen van lokale datasets afkomstig van proefbedrijven. Op regionaal en landelijke niveau is een vergelijking gemaakt met satellietbeelden van de Groenmonitor. Ook is er een vergelijking gemaakt met de resultaten van de HELP-tabel.

Watervision Agriculture (in Dutch: Waterwijzer Landbouw) is used to quantify the effects of hydrology and climate on agricultural crop production. To assess the extent to which the instrument is adequate, validation is required. Some of the results are described in this report.

The crop development simulated by Watervision Agricultural was compared with local observations obtained from experimental farms and on a regional and national level with satellite images of the vegetation index. Also a comparison with the so called HELP-tabel was made.

Trefwoorden: hydrologie, klimaat, SWAP, WOFOST, gewasopbrengst, opbrengstderving

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/591168> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2023 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

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

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



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3248 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Shutterstock

Inhoud

Verantwoording	5
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Vergelijking met HELP-tabel	11
1.2 Validaties SWAP-WOFOST	11
1.3 Validaties voor Waterwijzer Landbouw	12
2 Vergelijking HELP-tabel	14
2.1 Verschil in modelconcept en aansturing	14
2.2 Meteorologische condities	15
2.3 Groeiseizoen	16
2.4 Bodemschematisatie	17
2.5 Dynamische gewasmodule in Waterwijzer Landbouw	20
3 Lokale validatie	23
3.1 Grasland	25
3.1.1 Ruurlo	25
3.1.2 Zegveld	26
3.2 Mais	27
3.2.1 Cranendonck	27
3.2.2 Dijkgraaf	27
3.3 Aardappel	28
3.3.1 Borgerswold	28
3.3.2 Rusthoeve	30
3.3.3 Vredepeel	30
3.4 Evaluatie	31
4 Regionale validatie	35
4.1 Variatie groenindex	35
4.1.1 Voorbeelden op perceelniveau	35
4.1.2 Voorbeelden stroomgebied De Raam	36
4.1.3 Voorbeeld landelijk	40
4.2 Vergelijking Groenmonitor met WWL-regionaal voor De Raam	42
4.3 Landelijke vergelijking Groenmonitor met WWL-tabel	45
4.3.1 Verklarende variabelen voor ruimtelijke variatie groenindex	46
4.3.2 Verklaring ruimtelijke variatie groenindex	53
4.3.3 Vergelijking Groenmonitor	54
5 Conclusies en aanbevelingen	57
5.1 Vergelijking HELP-tabel	57
5.2 Lokale validatie	58
5.3 Regionale validatie	59
Referenties	61

Bijlage A	Proefvelden grasland	64
Bijlage B	Proefvelden mais	70
Bijlage C	Proefvelden aardappel e.a.	77
Bijlage D	Afleiden nieuwe beregeningskaart De Raam	83
Bijlage E	Bewortelbare zone	89

Verantwoording

Rapport: 3248

Projectnummer: 5200047260

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: projectleider STOWA

naam: Rob Ruijtenberg

datum: februari, 2023

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: februari, 2023

Woord vooraf

Het onderzoeksproject 'Validatie Waterwijzer Landbouw' is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research. Dit rapport is het resultaat van twee deelonderzoeken. Het deel met specifieke aandacht voor het beheersgebied van waterschap Aa en Maas, beschreven in Sectie 4.2, is gefinancierd door STOWA en waterschap Aa en Maas. De vergelijking met Groenmonitor was onderdeel van TKI-project conceptuele modelverbetering ten behoeve van NHI en is gefinancierd vanuit de topsector Water (TKI-Deltatechnologie) en door ACSG, STOWA en Vitens. Het werk zoals beschreven in hoofdstuk 2 over vergelijking met HELP is gepresenteerd op de gebruikersmiddag Waterwijzer Landbouw in 2022 en eerder gepubliceerd in rapport 'Bodemgeschiktheidskaarten voor landbouw in de provincie Noord-Brabant' (Mulder e.a., 2022b), gefinancierd door de provincie Noord-Brabant.

De voortgang van deze werkzaamheden werden regelmatig voorgelegd aan en besproken met de begeleidingscommissie van het TKI-NHI project onderdeel Waterwijzer Landbouw, bestaande uit Rob Ruijtenberg (STOWA, voorzitter), Jacques Peerboom (NHI, plaatsvervangend voorzitter) en Joost Heijkers (NHI), Saske Klerkx (ACSG), Wim Werkman (Rijkswaterstaat), Tom Hoogland (Vitens), Frank van der Bolt (Waterschap Aa en Maas), Ebbing van Tuinen (Witteveen+Bos), Janneke Pouwels (Deltares).

Samenvatting

Om te weten hoe bruikbaar simulatiemodellen zijn, is toetsing en validatie nodig. Dit betekent volgens het STOWA-handboek het "vergelijken van modeluitvoer met een onafhankelijke (dat wil zeggen niet in de kalibratie gebruikte) set meetgegevens, teneinde te kunnen vaststellen of het model 'goed' is (of het concept goed is, het model het verleden kan reproduceren met de vereiste nauwkeurigheid en of het model geschikt is om alle vragen te beantwoorden)".

De uitdaging bij toetsing en validatie van Waterwijzer Landbouw (WWL), dat gebaseerd is op de modellen SWAP en WOFOST, is dat data nodig zijn om zowel hydrologie als gewasgroei te kunnen toetsen. De gewasgroei mag daarbij alleen afhankelijk zijn van meteorologische omstandigheden, bodem en hydrologie en moeten onafhankelijk zijn van bijvoorbeeld agrarisch beheer of nutriëntenbeschikbaarheid. In de praktijk is deze combinatie van omstandigheden moeilijk te vinden. Met aandacht voor deze uitdagingen zijn tot nu toe toch verschillende validatiestudies uitgevoerd.

In deze studie zijn modelresultaten vergeleken met waarnemingen aan de hand van lokale datasets van proefbedrijven (hoofdstuk 3) en is een vergelijking gemaakt met resultaten van satellietwaarnemingen (groenindex) op regionale en landelijke schaal (hoofdstuk 4). Ook is – op veler verzoek – een vergelijking gemaakt met de resultaten van de HELP-tabel. Daarmee begint dit rapport in hoofdstuk 2.

Modelresultaten van WWL en HELP-tabel zijn moeilijk met elkaar te vergelijken. Beide methoden verschillen in aanpak en uitgangspunten. In deze studie laten we aan de hand van gevoeligheidsanalyses zien wat het effect op de gesimuleerde gewasopbrengstderving is wanneer een andere klimatologische periode wordt doorgerekend en wat het effect is wanneer er een ander groeiseizoen wordt gehanteerd. Omdat beide methoden uitgaan van een andere bodemschematisatie zullen bij een regionale vergelijking tussen beide methoden verschillende bodemtypen met elkaar worden vergeleken, wat kan leiden tot grote verschillen. Ten slotte wordt in deze studie ingegaan op de verschillen in bepaling van gewasgroei en wat dat betekent voor de uitsplitsing van schade als gevolg van te droge of te natte omstandigheden.

De modelvalidatie aan de hand van lokale gegevens van proefbedrijven voor gras, mais en aardappelen laat zien dat de resultaten redelijk tot goed overeenkomen met de waarnemingen. Bovendien blijkt dat de opeenvolgende versies van de WWL-tabel dankzij doorgevoerde verbeteringen ook steeds beter presteren. Voor de veldexperimenten met betrekking tot gras geldt dat de afwijking ten opzichte van de metingen het grootst zijn voor de eerste grassneden van het jaar. Hieruit volgt de aanbeveling om een verkenning te doen naar alternatieve modules voor de simulatie van gras. De uitgevoerde modelvalidatie aan de hand van lokale gegevens heeft betrekking op een beperkt aantal proeven. Derhalve blijft het een aanbeveling om te beschikken over meer validatiemateriaal waaraan het modelinstrumentarium getoetst kan worden.

Ten slotte is in deze studie een regionale vergelijking gemaakt met satellietbeelden die de groenindex bepalen. Deze satellietbeelden bevatten informatie waaruit de actuele gewastoeestand kan worden afgeleid. De vergelijking richt zich met name op de zomer van 2018 en is uitgevoerd voor het stroomgebied van De Raam (WWL-regionaal) en voor Nederland (WWL-tabel). Door een groot neerslagtekort in deze periode mag aangenomen worden dat de reductie in groenindex met name is veroorzaakt door het ondervinden van droogtestress. Deze studie laat zien dat de variatie in de waargenomen groenindex redelijk goed voorspeld kan worden aan de hand van informatie over het landgebruik, beregening, bodemtype, meteorologische en hydrologische condities. Dit zijn dezelfde variabelen waarmee we de opbrengstderving voorspellen in WWL.

Voor het stroomgebied van De Raam komen de modelresultaten voor mais goed overeen met de waarnemingen van de groenindex. Voor gras is het resultaat minder duidelijk, maar is eenzelfde trend zichtbaar. Hier geldt dat de vergelijking betrekking heeft op verschillende perioden, waardoor ook een minder duidelijk resultaat verwacht mag worden. Dit beeld wordt versterkt bij de landelijke vergelijking waarbij de modelresultaten betrekking hebben op het gehele weerjaar. Wel komt bij de landelijke

vergelijking naar voren dat de gesimuleerde opbrengstderving sterk afhankelijk is van de bodemeenheden. Hieruit volgt de aanbeveling om deze vergelijking opnieuw uit te voeren waarbij gebruik wordt gemaakt van microscopische wateropname en de aanbeveling om de rekenregels met betrekking tot de bewortelbare diepte te herzien.

1 Inleiding

Modellen zijn altijd een benadering van de werkelijkheid. Om te weten hoe bruikbaar simulatiemodellen zijn, is toetsing en validatie nodig. In het STOWA-handboek *Good Modelling Practice* (STOWA/RIZA 1999) staat wat onder validatie moet worden verstaan, namelijk het "vergelijken van modeluitvoer met een onafhankelijke (dat wil zeggen niet in de kalibratie gebruikte) set meetgegevens, teneinde te kunnen vaststellen of het model 'goed' is (of het concept goed is, het model het verleden kan reproduceren met de vereiste nauwkeurigheid en of het model geschikt is om alle vragen te beantwoorden)". Verificatie is volgens het STOWA-handboek de "controle of het wiskundige model correct geïmplementeerd is in het computerprogramma" (Knotters e.a., 2022).

De uitdaging voor Waterwijzer Landbouw¹ (WWL), dat gebaseerd is op de modellen SWAP en WOFOST, is dat data nodig zijn om zowel hydrologie als gewasgroei, bij voorkeur gelijktijdig, te kunnen toetsen. De gewasgroei mag daarbij eigenlijk alleen afhankelijk zijn van meteorologische omstandigheden, bodem en hydrologie en bij voorkeur onafhankelijk zijn van bijvoorbeeld agrarisch beheer of nutriëntenbeschikbaarheid. In de praktijk is deze combinatie van omstandigheden moeilijk te vinden. Dit geldt voor veld- en regionale studies, maar ook voor meer gecontroleerde veldproeven. Met aandacht voor deze uitdagingen zijn tot nu toe toch verschillende validatiestudies uitgevoerd.

Ook zijn in het verleden plausibiliteitstoetsen uitgevoerd. Dan was er niet per se sprake van validatie aan de hand van meetgegevens, maar dan zijn de resultaten getoetst aan wat hydrologen of andere experts beschouwen als geloofwaardige resultaten. Hieronder noemen we alle uitgevoerde studies en benoemen we of er sprake is van validatie of van een plausibiliteitstoets.

1.1 Vergelijking met HELP-tabel

In 2018 is de WWL (Werkgroep Waterwijzer Landbouw 2018) gelanceerd als opvolger van onder andere de HELP-methodiek waarmee het effect van hydrologische omstandigheden op landbouwproductie is te bepalen. Omdat deze effectmodules veelvuldig worden toegepast bij schadeberekeningen, is het van belang om te weten in hoeverre de modelresultaten onderling verschillen. Een vergelijking met de HELP-methodiek is in 2021 uitgevoerd voor het stroomgebied van De Raam (Mulder e.a., 2022) waarbij is geconcludeerd dat de globale patronen redelijk met elkaar overeenkomen, maar ook dat lokaal de verschillen erg groot kunnen zijn. Op aanbeveling van onder andere de Wetenschappelijke Adviescommissie NHI² heeft een vervolgstudie plaatsgevonden (als onderdeel van het TKI-project conceptuele modelverbetering ten behoeve van NHI en een project uitgevoerd in opdracht van provincie Noord-Brabant) om de verschillen tussen de HELP-methodiek en WWL beter te duiden (zie hoofdstuk 2).

1.2 Validaties SWAP-WOFOST

De onderliggende modellen SWAP (Van Dam e.a., 2008; Kroes e.a., 2017) en WOFOST (Van Diepen e.a., 1989; Boogaard e.a., 2014; de Wit e.a., 2019) zijn in het verleden met enige regelmaat getest. Dit betrof zowel beide modellen apart als de combinatie van deze twee modellen. Informatie over SWAP is te vinden op de SWAP-website.³ Het rekenhart van SWAP is technisch getoetst⁴ door een vergelijking met analytische oplossingen voor infiltratie in (gelaagde) bodemprofielen. Hieruit blijkt een zeer goede overeenkomst. In verschillende (inter)nationale studies is SWAP(-WOFOST) gevalideerd met hydrologische data (bijvoorbeeld:

¹ <https://waterwijzerlandbouw.wur.nl/index.html>

² <https://www.stowa.nl/nieuws/wetenschappelijke-adviescommissie-nhi-overwegend-positief-over-waterwijzer-landbouw>

³ <https://www.swap.wur.nl>

⁴ https://swap.wur.nl/Documents/SWAP4_Addendum.pdf

Bonfante e.a., 2010; Ma e.a., 2011) of met hydrologie en gewasgroeidata (bijvoorbeeld: Eitzinger e.a., 2004; Kroes e.a., 2018; Hu e.a., 2019). In Van Dam e.a. (2008) worden verschillende validatiestudies beschreven. Gewas-specifieke validatiestudies van WOFOST staan genoemd op de [WOFOST-website](#)⁵ (onder 'Documentation WOFOST').

1.3 Validaties voor Waterwijzer Landbouw

Bij de ontwikkeling van Waterwijzer Landbouw is er op een aantal momenten ook getoetst aan data. Een lijst van rapporten en wetenschappelijke publicaties staat op [Publicatie-overzicht STOWA Waterwijzer](#)⁶, met ook enkele validatiestudies. Vroeg in de ontwikkelingsfase heeft validatie en een plausibiliteitstoets plaatsgevonden met meetgegevens van proeflocaties Zegveld, Cabauw en Roswinkel (Hack-ten Broeke e.a., 2013). Uit deze studie bleek dat de toenmalige versie, met als basis SWAP – inclusief simulatie van zuurstofstress volgens Bartholomeus e.a. (2008) – en WOFOST, de gewasverdamping met acceptabele nauwkeurigheid kon schatten. Er is in deze studie ook gekeken naar grasopbrengst met een oude koppeling tussen SWAP en het [Bedrijfs Begrotings Programma Rundvee](#)⁷ (BBPR: Schils e.a., 2007; Waterpas: De Vos e.a., 2006). Hierbij is vergeleken met gemeten opbrengsten. De conclusie was dat de modeluitkomsten voldoende reëel waren voor schattingen voor de Nederlandse agrarische praktijk.

In 2015 is door Kroes e.a. (2015) de gesimuleerde gewasopbrengst voor grasland en snijmais gevalideerd voor enkele locaties in Nederland (proeflocaties Zegveld en Ruurlo, Cranendonck en Dijkgraaf) en in 2018 is door Mulder e.a. (2018) met data van proefboerderij Texel ondervonden dat met SWAP-WOFOST gesimuleerde zoutconcentraties in de bodem en opbrengstderving als gevolg van zoutstress goed overeenkwamen met metingen. Na de eerste oplevering van Waterwijzer Landbouw in 2018 heeft de ontwikkeling van het modelinstrumentarium niet stilgestaan. Bij nieuwe opleveringen van Waterwijzer Landbouw zijn veranderingen aangebracht in zowel modelinvoer als concept. Het ligt daarom voor de hand om de bovengenoemde validatiestudies opnieuw uit te voeren (zie hoofdstuk 3).

Door gebruikers wordt vaak voorgesteld om een vergelijking van WWL-resultaten te maken met gewasopbrengsten van het [BedrijvenInformatieNet](#)⁸ (BIN) van Wageningen Economic Research (WECR). In een eerder stadium van de ontwikkeling van WWL heeft WECR-collega Stijn Reinhard een eerste vergelijking uitgevoerd voor maïsopbrengsten voor de jaren 2006 t/m 2010 met BIN. De resultaten lieten toen zien dat de gewasopbrengsten uit het BIN minder variatie vertonen dan de WWL-resultaten voor dezelfde weerjaren. Dat heeft te maken met agrarisch beheer en met het gegeven dat de opbrengsten niet zijn gemeten, maar vooral zijn ingeschat door de betrokken boeren. Op de [BIN-website](#)⁹ is te zien dat met name in de droge jaren 2018 en 2019 de gewasopbrengsten wel zichtbaar anders zijn. Het kan dus interessant zijn om deze exercitie voor de recente droge jaren te herhalen, maar dan wel op regionale schaal.

Ook andere suggesties zijn aangedragen als mogelijk bruikbare data voor validatie. Door verschillende gremia worden gewasgroeigegevens verzameld, zoals door het CBS en voor DLV-Kringloopwijzer. Dit betreft echter steeds schattingen en geen metingen. Deze gewasgegevens zijn bovendien mede beïnvloed door management, nutriëntenvoorziening en andere aspecten van bedrijfsvoering. Ook is het idee aangedragen in verschillende overleggen met gebruikers om gegevens van rassenproeven te gebruiken, maar deze worden niet aan derden ter beschikking gesteld.

Tot slot is recentelijk (2021) een validatiestudie van Waterwijzer Landbouw uitgevoerd voor zowel regionale simulaties als voor enkele specifieke percelen binnen het beheersgebied van waterschap Aa en Maas (Mulder e.a., 2021). Om gericht te kunnen toetsen op de effecten van hydrologische condities, is geëvalueerd op

⁵ <https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/environmental-research/facilities-tools/software-models-and-databases/wofost.htm>

⁶ <https://waterwijzer.nl/publicaties>

⁷ <https://www.wur.nl/nl/show/bedrijfs-begrotings-programma-rundvee-bbpr.htm#:~:text=Met%20het%20computerprogramma%20BBPR%20berekent,normatieve%20uitgangspunten%20van%20een%20melkveebedrijf>

⁸ <https://www.wur.nl/nl/Onderzoek-Resultaten/Onderzoeksinstituten/Economic-Research/Over-ons/Data-modellen-en-tools/Bedrijveninformatienet.htm>

⁹ <https://www.agrimatie.nl/Default.aspx?subpubid=2232>

droge perioden uit de jaren 2018-2020 en een periode van wateroverlast uit het jaar 2016. Deze validatie is uitgevoerd met zowel de WWL-tabel als WWL-regionaal en de gewasgroei is vergeleken met groenindex (NDVI) data van de Groenmonitor.¹⁰ De timing van de gewastranspiratie en ontwikkeling van oogstbaar product, als gevolg van droogtestress, kwam op perceelniveau goed overeen met de dynamiek in de groenindex. Dit onderzoek heeft een vervolg gekregen, waarvan de resultaten worden beschreven in hoofdstuk 4.

¹⁰ <https://www.groenmonitor.nl/>

2 Vergelijking HELP-tabel

2.1 Verschil in modelconcept en aansturing

Waterwijzer Landbouw (WWL) verschilt in aanpak en uitgangspunten van de HELP-tabel, waarmee de landelijke bodemgeschiktheidskaarten in het verleden gemaakt werden. De belangrijkste verschillen zijn weergegeven in Tabel 2-1. De onderdelen voor WWL hebben betrekking op de variant WWL-tabel. Informatie over de methode van de HELP-tabel is ontleend aan Van Bakel e.a. (2005).

Tabel 2-1 Belangrijkste verschillen tussen HELP-tabel en de WWL-tabel voor de bepaling van bodemgeschiktheid.

	HELP-tabel (1987; 2002; 2005)	WWL-tabel (metamodel 3.0.0)
<i>Rekenwijze en invoergegevens</i>		
Onderliggende modellen of concepten	Opbrengstderving door vochttekorten: statisch (opgelegd) groeiverloop in LAMOS. Modellen MUST, MUSTLD Opbrengstdepressie door wateroverlast: expertkennis gebaseerd op veldonderzoek en daarop gebaseerde inzichten en relaties tussen grondwaterstand en invloed op draagkracht, bewerkbaarheid, luchthuishouding, stikstofmineralisatie, bodemtemperatuur en structuur van de bodem.	Dynamische gewasontwikkeling en gewasopbrengst in SWAP-WOFOST.
Terugkoppeling en interacties meegenomen?	Nee; transpiratiereductie wordt gelijkgesteld aan reductie in gewasopbrengst.	Ja; transpiratiereductie beïnvloedt gewasontwikkeling.
Periode klimaatgegevens	1956-1986	1981-2020
Gewasvariëteiten	4 gewasgroepen (1987) 14 gewasgroepen	Door veredeling veranderd t.b.v. weerbaarheid tegen droogte, ziekten en plagen.
Uitvoertijdstep	Decade (alleen groeiseizoen).	Dag (jaarrond).
Bodemfysische informatie	Vertaling o.b.v. bodemcode in: 14 HB-bodemgroepen (2002); 72 HELP-bodemtypen (2005).	Bodemfysische eenheden in: BOFEK2020 (79 eenheden).
Bodembeheer	Bedrijfseconomische optimale teelttechnieken (periode 1960-1980).	Bedrijfseconomische optimale teelttechnieken (periode 1980-2010).
<i>Modelresultaten</i>		
Opbrengstderving	Droogteschade o.b.v. modelsimulaties, natschade o.b.v. expertkennis	Indirecte effecten, droogte- en zuurstofstress o.b.v. modelsimulaties.
Biomassa	Langjarig gemiddelde gewasopbrengst (praktisch potentiële productie genoemd) wordt als bekend verondersteld en moet door de gebruiker worden opgegeven.	De potentiële gewasopbrengst wordt gesimuleerd en is afhankelijk van meteorologische condities. De actuele gewasopbrengst wordt daarnaast nog beïnvloed door ongunstige hydrologische omstandigheden. Met de WWL-tabel zijn de gewasopbrengsten opvraagbaar per weerjaar of voor een langjarig gemiddelde periode.
Temporele resolutie	Langjarig gemiddelde opbrengstderving. Vertaling naar een bepaald jaar is niet mogelijk.	Langjarig gemiddelde opbrengstderving voor huidige en toekomstige klimaatperiode. Opbrengstderving per jaar direct opvraagbaar voor periode 1981-2020.
Correcties	Correctiefactoren toegepast op resultaten.	Geen correctiefactoren; afwijkingen verklaard of opgelost door gevoeligheidsanalyses en validatie van het modelinstrumentarium.

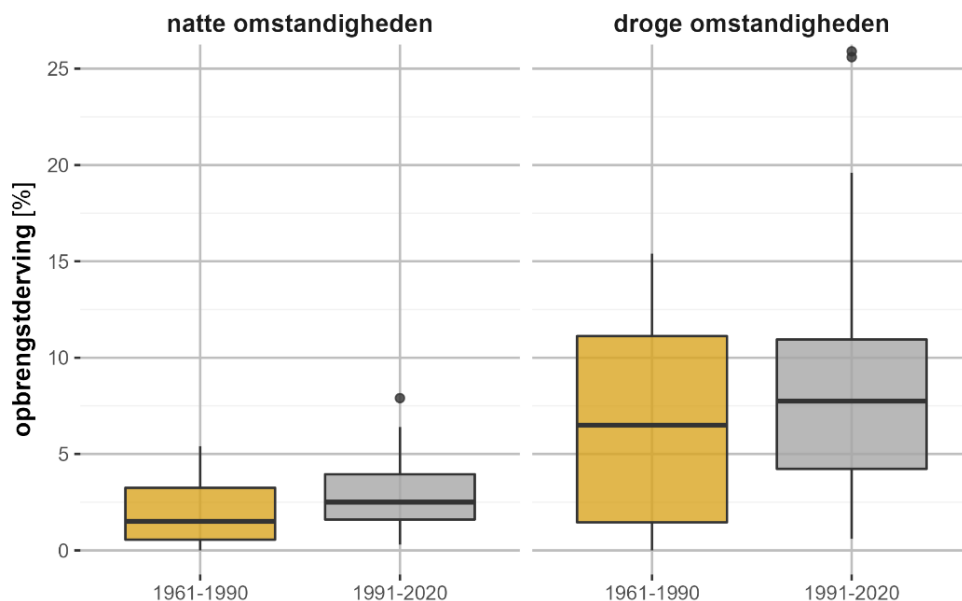
Vanwege de verschillen in aanpak en uitgangspunten tussen beide methoden zijn er verschillen in modelresultaten te verwachten. Het is feitelijk niet mogelijk om deze verschillen te verklaren, omdat informatie ontbreekt over de werkwijze waarmee de modelresultaten van de HELP-tabel verkregen zijn. De gebruikte kennis en simulatiemodellen voor de HELP-tabel zijn verloren gegaan of alleen gedeeltelijk opgeslagen. Daardoor is reproductie van de resultaten van de HELP-tabel niet meer mogelijk.

Om toch enigszins inzicht te geven in waarom resultaten voor een bodemgeschiktheidsbeoordeling verschillen bij gebruik van WWL-tabel en de HELP-tabel, kunnen we het SWAP-WOFOST-modelinstrumentarium – voor zover mogelijk – aansturen met de randvoorwaarden die gebruikt zijn bij de HELP-methodiek. Op deze manier laten we zien hoe de verandering van meteorologische condities en de duur van het groeiseizoen doorwerken in het eindresultaat van de WWL-tabel. Dit demonstreren we in de volgende paragrafen.

2.2 Meteorologische condities

De resultaten van de HELP-tabel zijn gebaseerd op een andere klimaatperiode dan de resultaten van WWL, namelijk de periode 1956-1986. Om te analyseren wat het effect is van een andere klimaatperiode op de gesimuleerde opbrengstderving, zijn berekeningen met SWAP-WOFOST uitgevoerd voor de perioden 1961-1990 en 1991-2020 voor relatief natte en droge omstandigheden met grasland (intensief maaien) op een zwak lemige zandgrond (BOFEK-eenheid 3015). De meteorologische condities zijn afkomstig van weerstation De Bilt. Voor natte omstandigheden hebben we gekozen voor karakteristieken van de grondwaterspiegeldiepte van ongeveer 50 cm -mv voor de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG), en 100 cm -mv voor de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG). Voor droge omstandigheden is dit 80 cm -mv voor de GHG, en 180 cm -mv voor de GLG.

In vergelijking met de klimaatperiode 1961-1990 zien we een toename in de hoeveelheid neerslag (7%), gemiddelde temperatuur (+ 1.1 °C) en zonnestraling (5%). In Figuur 2-1 is de langjarig gemiddelde opbrengstderving onder relatief natte en droge hydrologische omstandigheden weergegeven. De resultaten laten een toename zien van de gesimuleerde opbrengstderving onder zowel natte als droge omstandigheden.



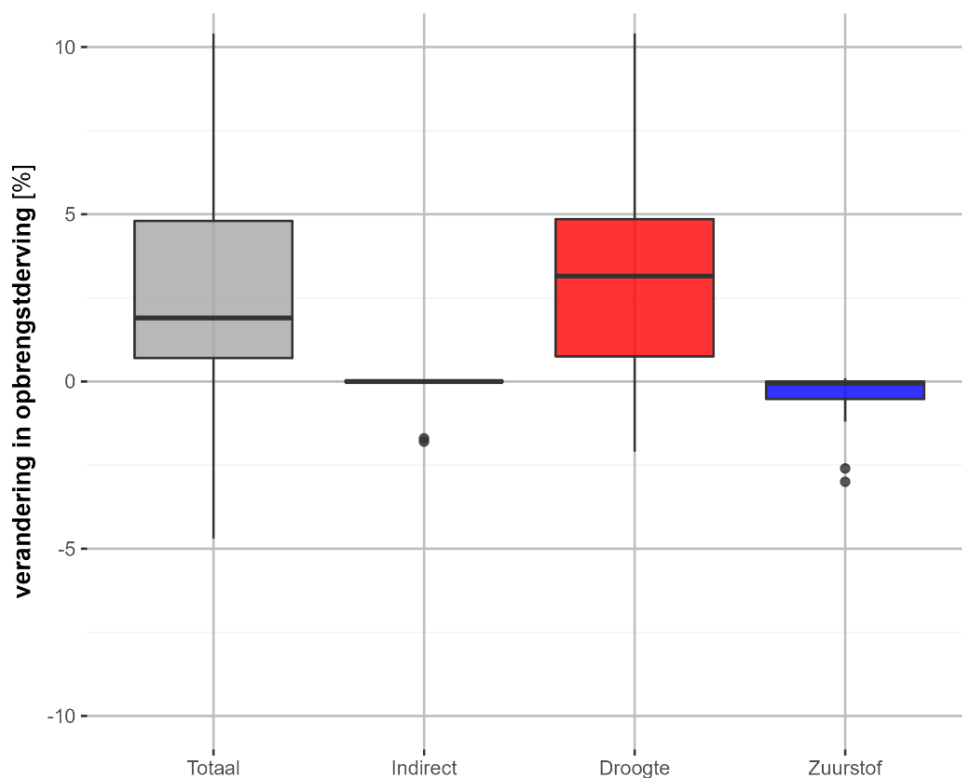
Figuur 2-1 Langjarig gemiddelde opbrengstderving voor verschillende klimaatperioden onder relatief natte en droge hydrologische omstandigheden met grasland (intensief maaien) op een zwak lemige zandgrond (BOFEK-eenheid 3015); spreiding in modelresultaten wordt veroorzaakt door verschillende jaren in de gehanteerde klimaatperiode.

2.3 Groeiseizoen

Voor het afleiden van de HELP-tabel zijn simulaties uitgevoerd voor 10-daagse perioden met het LAMOS-model, maar alleen voor de periode van het groeiseizoen. Het groeiseizoen begon in deze simulaties telkens op 1 april, waarbij de GVG als initiële grondwaterstand werd gehanteerd. Het groeiseizoen eindigde in de simulaties voor gebruik in de HELP-tabel op 30 september.

In Waterwijzer Landbouw worden simulaties uitgevoerd op dagbasis voor de gehele klimaatperiode en niet voor de afzonderlijke groeiseizoenen. Zo is de diepte van de grondwaterspiegel in het voorjaar voor ieder jaar anders. In het geval van grasland is de start van de daadwerkelijke groei afhankelijk van de temperatuur in het voorjaar. Eind oktober wordt de totale oogst van grasland vastgesteld en wordt er geen rekening meer gehouden met ongunstige hydrologische condities. Het groeiseizoen waarover stress wordt geregistreerd, is daarmee langer dan verondersteld in de HELP-tabel.

In Figuur 2-2 is de verandering in opbrengstderving weergegeven als met Waterwijzer Landbouw wordt gerekend met een groeiseizoen dat loopt van 1 april tot en met 30 september. De spreiding in resultaten – weergegeven met een boxplot – wordt veroorzaakt door de verschillende jaren in de klimaatperiode 1991-2020. De simulatie is uitgevoerd voor grasland (intensief maaien) op een zwak lemige zandgrond (BOFEK-eenheid 3015) en met meteorologische condities afkomstig van weerstation De Bilt onder relatief droge hydrologische omstandigheden (GHG 80 cm -mv en GLG 180 cm -mv). Als rekening wordt gehouden met een vast groeiseizoen, zien we een toename van de totale opbrengstderving van gemiddeld 2%. Deze wordt vooral veroorzaakt door een toename in droogtestress. Incidenteel kan dit verschil oplopen tot ongeveer 10% meer schade.



Figuur 2-2 Verandering in opbrengstderving voor de periode 1991-2020 voor de situatie waarin het groeiseizoen start vanaf 1 april en eindigt op 30 september, gesimuleerd voor grasland (intensief maaien) op een zwak lemige zandgrond (BOFEK-eenheid 3015) onder relatief droge omstandigheden (met GHG 80 cm -mv en GLG 180 cm -mv); spreiding in modelresultaten wordt veroorzaakt door verschillende jaren in de klimaatperiode 1991-2020.

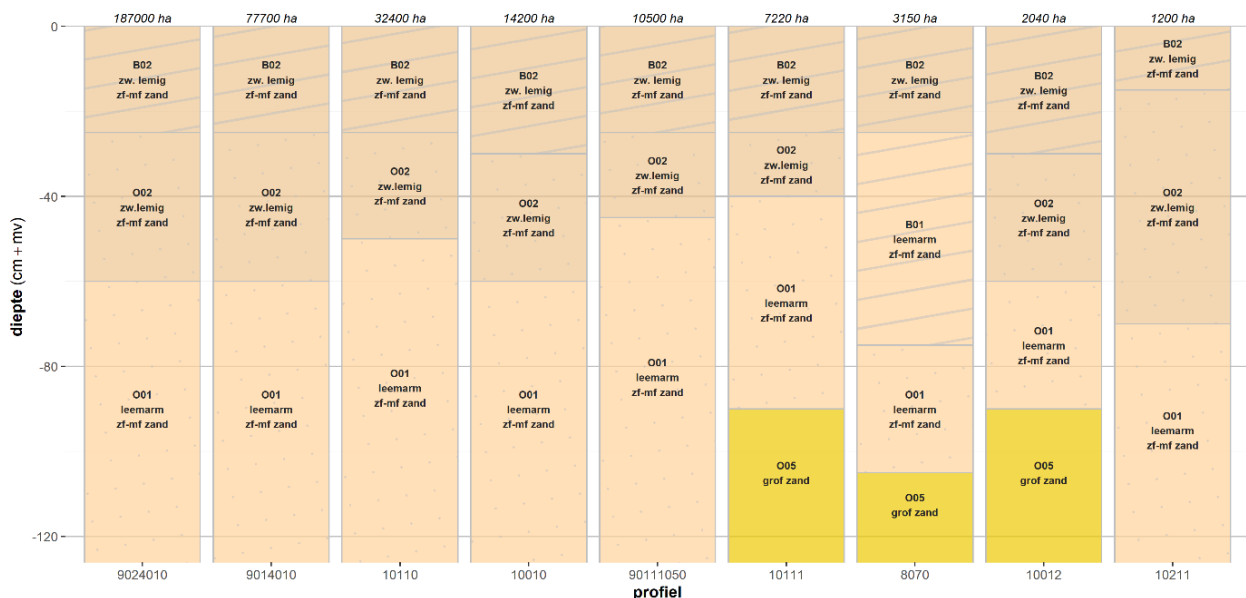
2.4 Bodemschematisatie

De WWL-tabel en de HELP-tabel geven de opbouw en samenstelling van de bodem op verschillende manieren weer. Voor bodemeenheden van de Bodemkaart van Nederland¹¹ (versie 2020) kan een vertaling worden gemaakt naar zowel bodemtypen zoals gebruikt in de WWL-tabel als naar bodemtypen gebruikt in de HELP-tabel. Dit geeft verschillende bodemtypen voor de twee methoden. Bij regionale studies kan het daardoor voorkomen dat één bodemtype van de WWL-tabel wordt vergeleken met verschillende bodemtypen van de HELP-tabel en andersom. Om een indicatie te geven hoe groot de verschillen kunnen zijn tussen modelresultaten van de WWL-tabel en de HELP-tabel, wordt hieronder een rekenvoorbeeld gegeven waarbij gekeken wordt naar de meest voorkomende zandgrond in Nederland. Maar eerst volgt een toelichting op hoe de vertaling van bodemeenheden bij de WWL-tabel en de HELP-tabel tot stand is gekomen.

Bodemschematisatie in WWL

De WWL-tabel (versie 3.0.0) maakt gebruik van bodemfysische informatie van de Bodemfysische Eenhedenkaart (BOFEK2020¹²; Heinen e.a., 2021; 2022). De eenheden op de BOFEK2020 zijn gebaseerd op de Bodemkaart van Nederland. In de Bodemkaart van Nederland hebben kaarteenheden een zogenaamd 'afgeleid profiel'. Een afgeleid profiel is een beschrijving van het bodemprofiel tot een diepte van 1.2 m, gemaakt uit waarnemingen en analyses aan wanden en boorgaten gelegen in kaartvlakken die tot dezelfde bodemeenheid op de Bodemkaart behoren (De Vries, 1999). Er zijn 368 afgeleide profielen behorend bij de Bodemkaart van Nederland.

Aan de bodemhorizonten in ieder afgeleid profiel zijn bouwstenen uit de Staringreeks¹³ toegekend, waarvan we de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken kennen (Heinen e.a., 2020). Op basis van die karakteristieken zijn voor alle afgeleide profielen acht fysische kengetallen berekend. Hiermee zijn de afgeleide profielen geclusterd, waarbij profielen in hetzelfde cluster vergelijkbare fysische eigenschappen bezitten. Het clusteren is apart gedaan voor vijf hoofdgroepen van bodems in Nederland: veengronden, moerige gronden, zandgronden, klei- en zavelgronden en leemgronden. Per cluster wordt het bodemprofiel gekozen dat het meest voorkomt (over de grootste oppervlakte). Een voorbeeld van de meest voorkomende zandgrond in Nederland, BOFEK-cluster 3015, is gegeven in Figuur 2-3.



Figuur 2-3 Afgeleide bodemprofielsschetsen in cluster 3015 van BOFEK2020; gesorteerd naar voorkomen in Nederland.

¹¹ <https://basisregistratieondergrond.nl/inhoud-bro/registratieobjecten/modellen/bodemkaart-sgm/>

¹² <https://www.wur.nl/nl/show/bodemfysische-eeenhedenkaart-bofek2020.htm>

¹³ De Staringreeks is een verzameling van waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland, uitgegeven sinds 1987.

Bodemschematisatie in HELP-tabel

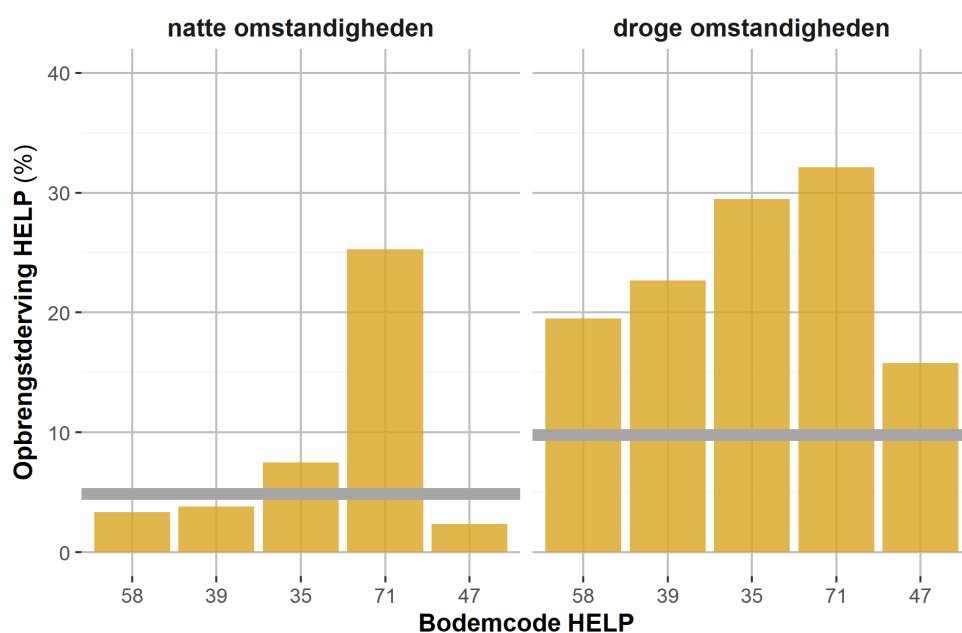
Bij de HELP-methode worden 72 verschillende bodemeenheden onderscheiden. Van deze bodemeenheden ontbreekt in de HELP-tabel een profielschets, maar de bodemcode die verwijst naar de Bodemkaart van Nederland is wel bekend. Op basis van de bodemcode kan een koppeling worden gemaakt met de bodemprofielschetsen van de Bodemkaart van Nederland. In Tabel 2-2 zijn de bodemprofielschetsen behorend bij cluster 3015 in BOFEK2020 weergegeven met een vertaling naar HELP-bodemeenheden.

Tabel 2-2 Bodemprofielschetsen behorend bij cluster BOFEK 3015 vertaald naar HELP-bodemeenheden.

Profiel	HELP
9024010	58
9014010	58
10110	39
10010	39
9011050	35
10111	71
8070	47
10012	71
10211	35

Resultaten met bodemschematisatie HELP

In Tabel 2-2 is te zien dat de bodemprofielschetsen binnen het cluster BOFEK 3015 behoren tot vijf verschillende HELP-bodemtypen. Voor deze bodemtypen kunnen resultaten worden opgevraagd van de HELP-tabel onder relatief natte en relatief droge omstandigheden. In Figuur 2-4 zijn hiervan de resultaten weergegeven voor het gewas grasland (zonder kosten van herinzaai). Voor relatief natte omstandigheden is gekozen voor een Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) van 50 cm -mv en een Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) van 100 cm -mv. Voor relatief droge omstandigheden is gekozen voor een GHG van 80 cm -mv en een GLG van 180 cm -mv. De totale opbrengstderving volgens de HELP-tabel varieert onder natte omstandigheden tussen 2 en 26% (tegenover 5% volgens de WWL-tabel). Onder droge omstandigheden varieert de opbrengstderving tussen 15 en 33% (tegenover 10%).



Figuur 2-4 Langjarig gemiddelde opbrengstderving (%) voor bodemprofielschetsen van bodemcluster BOFEK 3015 onder relatief natte en droge hydrologische omstandigheden, bepaald met de HELP-tabel; de horizontale lijn geeft de opbrengstderving weer, berekend met de WWL-tabel.

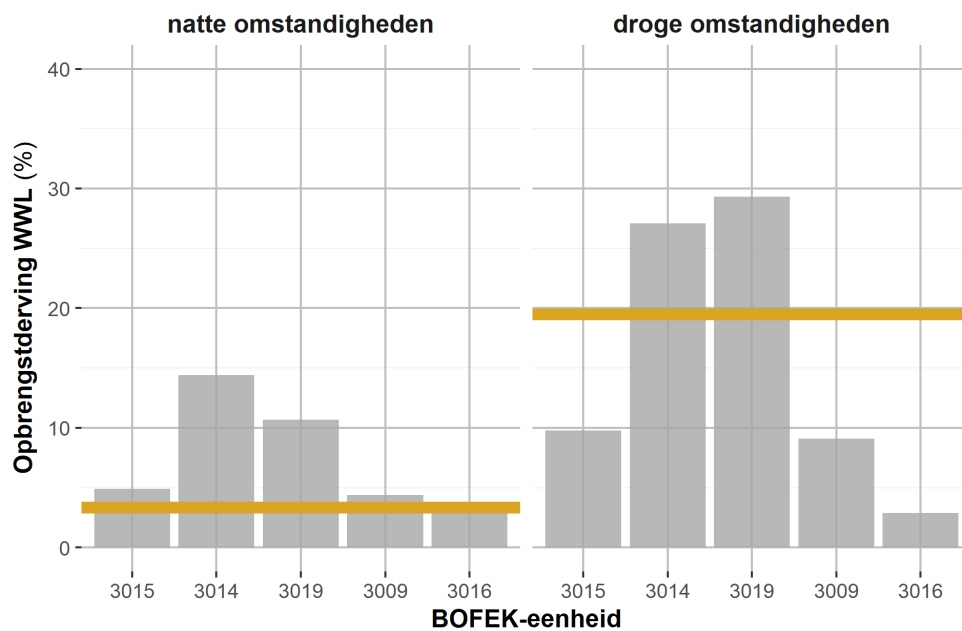
Resultaten met bodemschematisatie WWL

Op vergelijkbare wijze kunnen we ook de analyse doen, geredeneerd vanuit een HELP-bodemeenheid. 8 van de 368 beschikbare bodemprofielbeschetsen worden vertaald naar HELP-bodemcode 58. In Tabel 2-3 zijn de bodemprofielbeschetsen behorend bij HELP-bodemeenheid 58 weergegeven met een vertaling naar een eenheid uit BOFEK2020. In totaal wordt er een vertaling gemaakt naar vijf verschillende BOFEK-eenheden.

Tabel 2-3 Bodemprofielbeschetsen behorend bij HELP bodemeenheid 58, vertaald naar BOFEK-eenheden.

Profiel	BOFEK2020
9024010	3015
9014010	3015
9034010	3014
4140	3019
9023010	3009
10241	3019
9013010	3009
4015	3016

De resultaten van de WWL-tabel (WWL-metarelaties 3.0.0) voor deze BOFEK-eenheden zijn onder relatief natte en droge omstandigheden weergegeven in Figuur 2-5. De resultaten zijn hierbij weergegeven voor het gewas grasland (beheerd met intensief maaien), waarbij de meteorologische condities afkomstig zijn van weerstation De Bilt.



Figuur 2-5 Langjarig gemiddelde opbrengstderving (%) voor bodemprofielbeschetsen behorende bij HELP-bodemeenheid 58 onder relatief natte en droge hydrologische omstandigheden, bepaald met de WWL-tabel (versie 3.0.0); de horizontale lijn geeft de opbrengstderving weer, berekend met de HELP-tabel.

De totale opbrengstderving gegeven door de WWL-tabel varieert onder natte omstandigheden tussen 3 en 15% (tegenover 3% verkregen met de HELP-methodiek) en onder droge omstandigheden tussen 2 en 30% (tegenover 20%).

Uit de bovenstaande analyse blijkt dat bij regionale studies, waarbij modelresultaten van de WWL-tabel en de HELP-tabel met elkaar worden vergeleken, het kan voorkomen dat één bodemtype van de WWL-tabel wordt vergeleken met verschillende bodemtypen van de HELP-tabel en andersom. Dit kan tot grote verschillen leiden in modelresultaten. Als we ons richten op de totstandkoming van de clustering van

bodemprofielen, dan is het aannemelijk om te veronderstellen dat een clustering op basis van bodemfysische eigenschappen, zoals gehanteerd is bij BOFEK2020, beter is voor het berekenen van effecten van hydrologie op gewasgroei dan een clustering op basis van een bodemcode.

2.5 Dynamische gewasmodule in Waterwijzer Landbouw

De opbrengstderving voor de meest voorkomende akkerbouwgewassen en grasland wordt in WWL gesimuleerd met een dynamische gewasmodule. De simulatie van de potentiële gewasontwikkeling is hierbij afhankelijk van de meteorologische condities en verschilt dus van jaar tot jaar. De simulatie van de actuele gewasontwikkeling wordt daarnaast ook beïnvloed door ongunstige hydrologische condities, zoals te droge of te natte omstandigheden. Doordat de gewasontwikkeling wordt beïnvloed, zal ook de watervraag van het gewas in het resterende deel van het groeiseizoen worden beïnvloed. We spreken dan van een hydrologische terugkoppeling.

Voor boomteelt is er geen dynamische gewasmodule beschikbaar en maakt WWL gebruik van een statische gewasmodule. Bij het afleiden van de HELP-tabel voor het kwantificeren van de droogteschade is in alle gevallen een statische gewasmodule gebruikt. Bij een statische gewasmodule wordt de gewasontwikkeling van tevoren opgelegd en wordt de gewasontwikkeling niet beïnvloed door meteorologische condities of ongunstige hydrologische omstandigheden. Bij een statische gewasmodule is er dan ook geen sprake van een hydrologische terugkoppeling. Vanwege deze redenen heeft het gebruik van een dynamische gewasmodule de voorkeur bij modelstudies waarin interactie tussen de hydrologische condities en de gewasontwikkeling centraal staat (Van Walsum e.a., 2012; Bartholomeus e.a., 2013).

Als de groei van het gewas wordt beschreven met een statische gewasgroeimodule, wordt een direct verband verondersteld tussen de gesimuleerde transpiratiereductie en een reductie in de gewasopbrengst. Een voorbeeld van een dergelijke beschrijving is onderstaande Vergelijking 2.1, die is gebaseerd op een publicatie van FAO (Steduto e.a., 2012). De potentiële gewasopbrengst wordt hierin bekend verondersteld.

$$\left(1 - \frac{Y_{act}}{Y_{pot}}\right) = K_y \left(1 - \frac{T_{act}}{T_{pot}}\right) \quad (2.1)$$

Met Y_{pot} en Y_{act} respectievelijk de potentiële en actuele gewasopbrengst ($\text{kg}_{ds} \text{ha}^{-1}$), K_y een gewasresponsfactor (-) en T_{pot} en T_{act} respectievelijk de potentiële en actuele transpiratie (mm).

Om het aandeel aan van de verschillende stressoren in de totale opbrengstderving te bepalen, wordt in Waterwijzer Landbouw gekeken naar de verhouding van de transpiratiereductie die wordt veroorzaakt door de verschillende stressoren. Voor de bepaling van droogtestress gaat dat als volgt:

$$S_{dry} = 1 - \frac{Y_{pot} - Y_{act}}{Y_{pot}} \left(\frac{\Sigma T_{reddry}}{\Sigma T_{reddry} + \Sigma T_{redwet}} \right) \quad (2.2)$$

met S_{dry} droogtestress (%), T_{reddry} en T_{redwet} (mm) transpiratiereductie als gevolg van respectievelijk droogtestress en zuurstofstress. Een beschrijving als in Vergelijking 2.2 past bij een statische gewasmodule, omdat er geen rekening wordt gehouden met de hydrologische terugkoppeling. Er is nog geen goede beschrijving die past bij een dynamische module. Daarom hanteren we in Waterwijzer Landbouw de beschrijving van het aandeel van de verschillende stressoren voor gewasopbrengst ook bij de dynamische gewasmodule. Het aandeel van de verschillende stressoren in de totale opbrengstderving, vastgesteld met de bovenstaande methodiek, kan daarom in WWL met dynamische gewasgroeimodellering slechts als indicatie worden gebruikt.

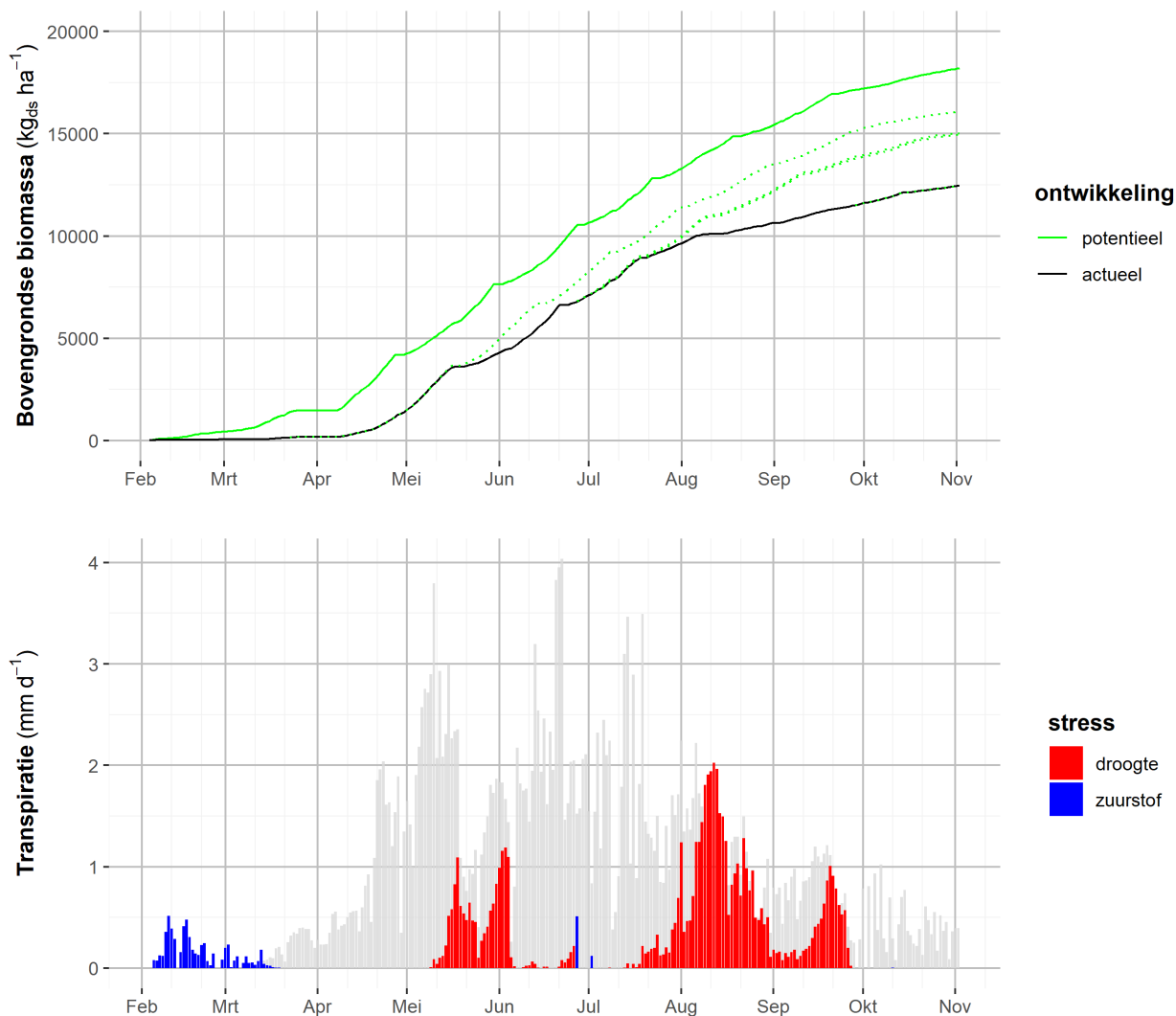
Er is wel een manier om bij de specificatie van de opbrengstderving rekening te houden met de hydrologische terugkoppeling. Daarvoor is een rekenintensieve methode beschikbaar. Als voorbeeld kijken we naar een simulatie die is uitgevoerd in het stroomgebied van de Raam in de studie van Mulder e.a. (2021). We richten ons in dit voorbeeld alleen op het jaar 2020. In Figuur 2-6 zijn de resultaten van de simulatie weergegeven.

Gedurende dit jaar wisselen perioden van ongunstige hydrologische condities elkaar af. Aan het begin van het groeiseizoen is er voornamelijk zuurstofstress als gevolg van zeer natte omstandigheden. Vanaf half

maart tot half mei zijn de omstandigheden gunstig voor gewasgroei. Daarna volgen twee droge perioden (eind mei-begin juni en half augustus-eind september; rood in de onderste grafiek), met tussendoor een gunstige periode als gevolg van neerslag. De potentiële gewasopbrengst ligt net iets boven $18.200 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ ha}^{-1}$ en de gesimuleerde opbrengstderving komt uit op 31.5%.

Als we het aandeel van droogtestress en zuurstofstress in de totale opbrengstderving kwantificeren met behulp van Vergelijking 2.2, dan komen we uit op 28.5% droogtestress en 3.1% zuurstofstress.

Om te bepalen hoe de ongunstige perioden met transpiratiereductie doorwerken in de totale opbrengstderving, zijn additionele berekeningen uitgevoerd met de dynamische gewasmodule. Nadat een ongunstige periode van aaneengesloten zuurstof- dan wel droogtestress heeft plaatsgevonden, starten we een nieuwe berekening waarbij de gewasontwikkeling vanaf dat moment niet meer wordt beïnvloed door de ongunstige omstandigheden. Het gewas groeit dan volgens een beschrijving van de potentiële gewasontwikkeling (volgens de groene stippellijn weergegeven in Figuur 2-6). Via deze rekenwijze weten we precies hoe ongunstige omstandigheden doorwerken gedurende het groeiseizoen. Aan het einde van het groeiseizoen kunnen we vervolgens de reductie in gewasopbrengst als gevolg van te droge en te natte perioden optellen. In dit voorbeeld komen we dan uit op een opbrengstreductie van $3564 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ ha}^{-1}$ als gevolg van droogtestress (19.6%) en $2179 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ ha}^{-1}$ als gevolg van zuurstofstress (12.0%). Het aandeel droogtestress in de totale opbrengstderving is daarmee aanzienlijk kleiner (19.6%) dan volgens de berekeningswijze waarin geen rekening wordt gehouden met een hydrologische terugkoppeling (28.5%).



Figuur 2-6 Gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen inclusief oogst (boven) en de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling en transpiratiereductie als gevolg van te natte en te droge omstandigheden in de wortelzone (onder); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling, in het blauw transpiratiereductie als gevolg van zuurstofstress en in het rood transpiratiereductie als gevolg van droogtestress.

Het bovenstaande voorbeeld laat zien dat bij een dynamische gewasmodule interacties tussen stressoren optreden die van invloed zijn op de simulatie van de opbrengstderving. Vanwege deze interactie kunnen afzonderlijke stressoren, die gesimuleerd worden met een dynamische gewasgroeimodule, niet vergeleken worden met de stressoren van een statische gewasgroeimodule. Een vergelijking tussen droogtestress gesimuleerd met de WWL en droogtestress volgens de HELP-methodiek is daarmee principieel onjuist.

Bij het hanteren van dynamische gewasmodules is het lastig om de totale gewasopbrengstderving te specificeren in afzonderlijke schadetermen. Omdat bij schaderegelingen in Nederland aparte rekenregels worden gehanteerd voor schade als gevolg van te natte of te droge omstandigheden, is het aan te bevelen om een procedure te ontwikkelen voor het specificeren van de totale opbrengstderving als er gebruik is gemaakt van een dynamische gewasmodule zoals in WWL. Vanwege de interactie tussen verschillende stressoren is het op termijn ook aan te bevelen om de rekenregels voor de schaderegeling te herzien.

3 Lokale validatie

Tijdens de ontwikkeling van Waterwijzer Landbouw zijn de prestaties van het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST gevalideerd. Na de eerste oplevering van Waterwijzer Landbouw in 2018 zijn verschillende modelonvolkomenheden aan het licht gekomen, zoals te weinig droogtestress op voornamelijk zandgronden onder droge omstandigheden en te veel droogtestress onder natte omstandigheden bij bodemeenheden met (zeer) zware klei in het bodemprofiel. Naar aanleiding van deze bevindingen is onder andere een update van de bodemfysische eigenschappen doorgevoerd en is rekening gehouden met het compenseren van transpiratiereductie. De wijzigingen in modelinvoer en -aansturing hebben geleid tot een update van WWL (versie 2.0.0: Mulder e.a., 2021).

De update van de bodemfysische eigenschappen hebben ervoor gezorgd dat voornamelijk op zandgronden onder droge omstandigheden meer droogtestress wordt gesimuleerd waarmee een deel van de modelonvolkomenheden is opgelost. Tegelijkertijd is geconstateerd dat de droogtestress op bodemeenheden met klei in het bodemprofiel nog steeds wordt overschat. Na de oplevering van de WWL-metarelaties 2.0.0 in 2020 is daarom gelijk gestart met het onderzoeken naar mogelijke oorzaken die hieraan ten grondslag liggen. Dit heeft uiteindelijk geleid tot aanpassingen in zowel het modelconcept als de modelaansturing voor de wortelontwikkeling (versie 3.0.0).

Aan de hand van de bovenstaande wijzigingen in modelconcept, -invoer en -aansturing rijst de vraag in hoeverre deze wijzigingen de modelprestaties beïnvloeden. Om deze vraag te beantwoorden, voeren we opnieuw een validatie uit zoals eerder is uitgevoerd door Kroes e.a. (2015). Het gaat hierbij in totaal om negen veldproeven waarbij aandacht uitgaat naar de simulatie van de actuele gewasontwikkeling van gras, mais en aardappelen, zie Tabel 3-1 en Figuur 3-1 voor de ligging.

Tabel 3-1 Proefvelden ten behoeve van validatie Waterwijzer Landbouw.

Gewas	Locatie	Periode	Bodem
Grasland	Ruurlo (veld 16)	1980-1984	Veldpodzolgrond
Grasland	Ruurlo (veld 48)	1980-1984	Veldpodzolgrond
Grasland	Zegveld (veld 3)	2003-2005	Koopveengrond
Mais	Cranendonck	1974-1982	Enkeerdgrond
Mais	Dijkgraaf	2007	Beekeerdgrond
Aardappel e.a.	Borgerswold (veld 3)	1992-1994	Veldpodzolgrond
Aardappel e.a.	Borgerswold (veld 13)	1992-1994	Dampodzolgrond
Aardappel e.a.	Rusthoeve (veld B7)	2011-2013	Poldervaaggrond
Aardappel	Vredepeel (veld 26)	2002	Gooreerdgrond

Bij de selectie van veldproeven is er rekening mee gehouden dat de gewasontwikkeling voornamelijk is beïnvloed door te natte of te droge hydrologische omstandigheden en dat beïnvloeding van andere stressoren (zoals niet-optimale nutriëntenvoorziening, zoutschade en ziektes en plagen) minder aan de orde waren. Voor de genoemde veldproeven maken we een vergelijking met modelresultaten die verkregen zijn met de modelaansturing volgens WWL-versie 1.0.0, 2.0.0 en 3.0.0, zie Tabel 3-2. De modelaansturing kan hierbij afwijken ten opzichte van de validatie zoals uitgevoerd door Kroes e.a. (2015). Zo zijn de bodemfysische eigenschappen vertaald naar bouwstenen van de Staringreeks. Voor WWL-versie 1.0.0 betreft dit de Staringreeks van 1987 (Wösten, 1987) en voor WWL-versie 2.0.0 en 3.0.0 betreft dit de Staringreeks 2018 (Heinen e.a., 2020). Ook is de modelaansturing met betrekking tot wateronttrekking door gewassen gewijzigd door rekening te houden met compensatie van transpiratiereductie (Jarvis, 2011). Bij WWL-versie 3.0.0 is het vermogen tot compensatie van transpiratiereductie afhankelijk gesteld van de dikte van de wortelzone en alleen van toepassing op de transpiratiereductie veroorzaakt door zuurstofstress. Daarnaast zijn de wortelverdelingsfunctie en de controle op te veel zuurstofstress onder in de wortelzone aangepast.



Figuur 3-1 Locaties proefvelden met grasland (groen), mais (oranje) en aardappelen (bruin).

Tabel 3-2 Wijzigingen in aansturing modelinstrumentarium ten opzichte van de eerste oplevering (versie 1.0.0).

WWL-versie	SWAP-versie	Bodemfysische eigenschappen	Compensatie wateronttrekking	Beworteling
1.0.0	4.1.0	Staringreeks 1987	Geen	Controle op maximale zuurstofstress Exponentiële wortelverdeling
2.0.0	4.1.83	Staringreeks 2018	Jarvis	
3.0.0			Jarvis*	Controle op 50% zuurstofstress Lineaire wortelverdeling

* alternatieve Jarvis-compensatie

Bij WWL-versie 3.0.0 wordt op basis van bodemkundige informatie (denk aan dichtheid, pH-waarde en textuur) de dikte van de wortelzone gelimiteerd. Omdat deze informatie bij de meeste veldproeven ontbreekt, gaan we er bij het uitvoeren van de modelsimulaties van uit dat de dikte van de wortelzone bodemkundig niet wordt gelimiteerd. Ten slotte maken we bij deze validatie gebruik van de standaard gewasinstellingen voor WOFOST zoals gehanteerd in WWL.

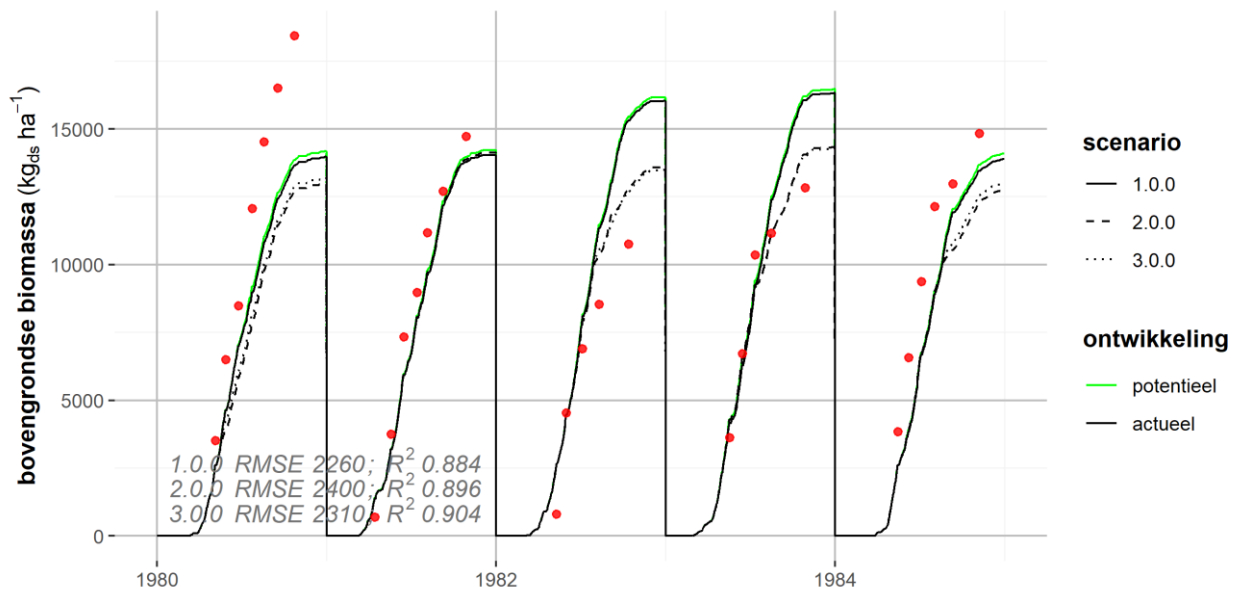
Hieronder maken we onderscheid tussen veldproeven uitgevoerd met gras, mais en aardappel (eventueel afgewisseld met een ander gewas) waarbij alleen de resultaten met betrekking tot oogstbaar product wordt gevisualiseerd. De potentiële gewasontwikkeling, welke alleen afhankelijk is van de meteorologische condities, wordt hierbij weergegeven in het groen. De actuele gewasontwikkeling weergegeven in het zwart betreft de gewasontwikkeling welke is beïnvloed door te droge of te natte omstandigheden. In welke mate droogte- of zuurstofstress wordt ondervonden, is onder andere afhankelijk van de modelaansturing (WWL-versie). Overige modelresultaten met betrekking tot simulatie van biomassa, bodemvochtcondities, bodemtemperatuur en grondwaterstandsverloop zijn, indien gemeten, weergegeven in Bijlage 0 (grasland), Bijlage 0 (mais) en Bijlage 0 (aardappel e.a.). In de figuren zijn de modelprestatie-maten RMSE en R^2 telkens weergegeven, waarbij RMSE dezelfde eenheid heeft als de y-as van de betreffende figuur.

3.1 Grasland

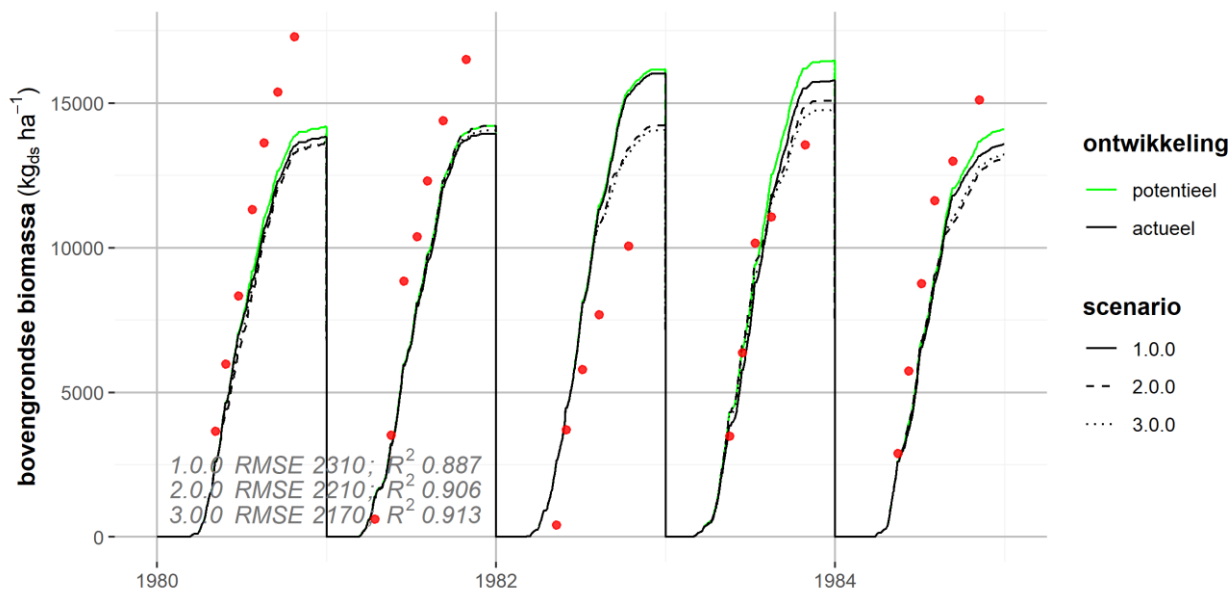
3.1.1 Ruurlo

In Ruurlo werd in de periode 1980 tot en met 1984 onderzoek gedaan naar de stikstofwerking van geïnjecteerde runderdrijfmest op grasland (Sniijders e.a., 1987). De veldproeven uitgevoerd op veld 16 en 48 zijn meegenomen in de validatie. Op beide velden was sprake van relatief hoge mestgiften, zodat van een nutriëntentekort waarschijnlijk geen sprake kan zijn geweest. De modelschematisatie, met uitzondering van de instellingen weergegeven in Tabel 3-2, zijn overgenomen van Kroes e.a. (2011). De modelinstellingen voor veld 16 en 48 zijn vergelijkbaar, met uitzondering van de grondwaterstand (die is gebruikt als onderrandvoorwaarde): op veld 16 is de grondwaterstand 12 cm dieper.

De resultaten van de validatie op veld 16 en 48 zijn respectievelijk weergegeven in Figuur 3-2 en Figuur 3-3. Het valt op dat de gemeten gewasopbrengst in 1980 aanzienlijk hoger is dan de gesimuleerde gewasopbrengst voor zowel veld 16 als veld 48, dit geldt ook voor het jaar 1981 op veld 48. Verder valt op dat de modelresultaten verkregen met WWL-versie 1.0.0 nauwelijks beïnvloed worden door te droge of te natte omstandigheden. In 1982 en 1983 is dit met de WWL-versies 2.0.0 en 3.0.0 duidelijk wel het geval, hetgeen wordt veroorzaakt door een update van de bodemfysische eigenschappen. In 1982 laten de meetwaarden op beide velden zien dat er minder gewasopbrengst wordt gehaald ten opzichte van de andere jaren. Hierover wordt ook een melding gemaakt in de rapportage van Sniijders e.a. (1987): "in Ruurlo werd in 1982 vanwege droogte de bemesting van de vierde snede gehalveerd". In deze periode wordt door het modelinstrumentarium ook veel droogtestress gesimuleerd (zie Figuur A-1 en Figuur A-2).



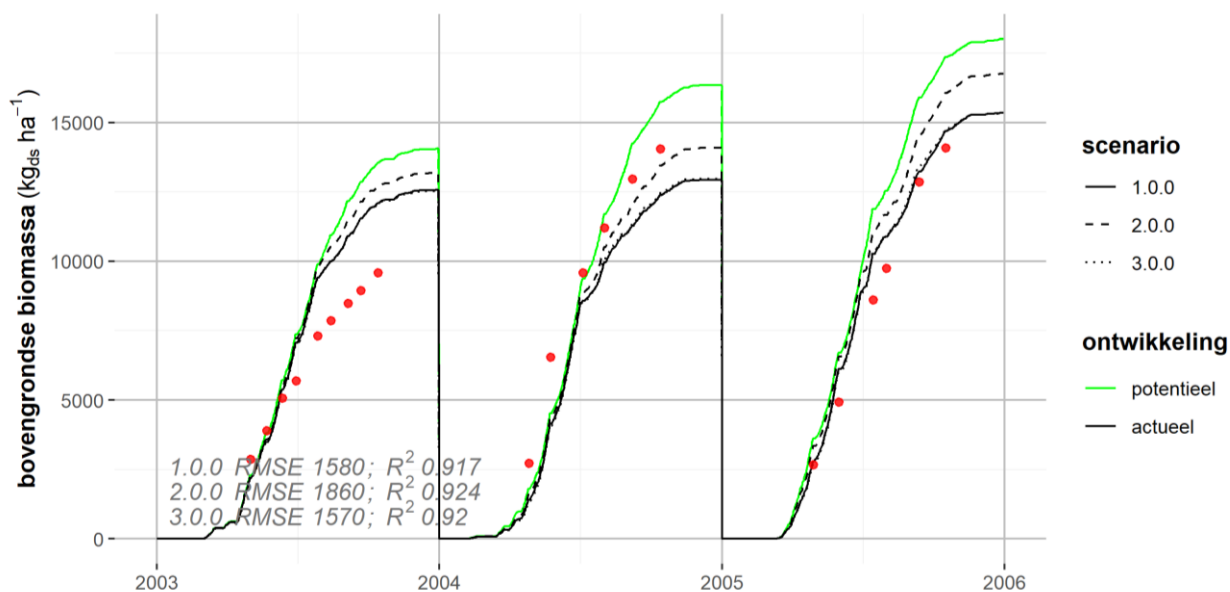
Figuur 3-2 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen, inclusief oogst voor grasland voor veldproef Ruurlo (veld 16); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.



Figuur 3-3 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen, inclusief oogst voor grasland voor veldproef Ruurlo (veld 48); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

3.1.2 Zegveld

In 2003 tot en met 2005 is in Zegveld onderzoek gedaan naar lachgasemissies bij beheerde veengronden (Stolk e.a., 2011). De modelresultaten zijn weergegeven in Figuur 3-4. In alle jaren is er sprake van een gesimuleerde opbrengstderiving. In 2003 wordt dit voornamelijk veroorzaakt door te droge omstandigheden en in 2004 en 2005 vooral door te natte omstandigheden (zie Figuur A-3). In 2003 wordt meer gewasopbrengst gesimuleerd dan gemeten, wat kan duiden op een onderschatting van de droogtestress. Gedurende de zomerperiode van dit jaar droogt de bodem op een diepte van 35 cm ook sterker uit dan bij de simulaties het geval is (zie Figuur A-4). Mogelijk dat de bodemhydrologische condities te sterk beïnvloed worden door het slootpeil, dat als randvoorwaarde is gebruikt. In deze periode ontbreken veel meetwaarden met betrekking tot het vaststellen van het slootpeil.



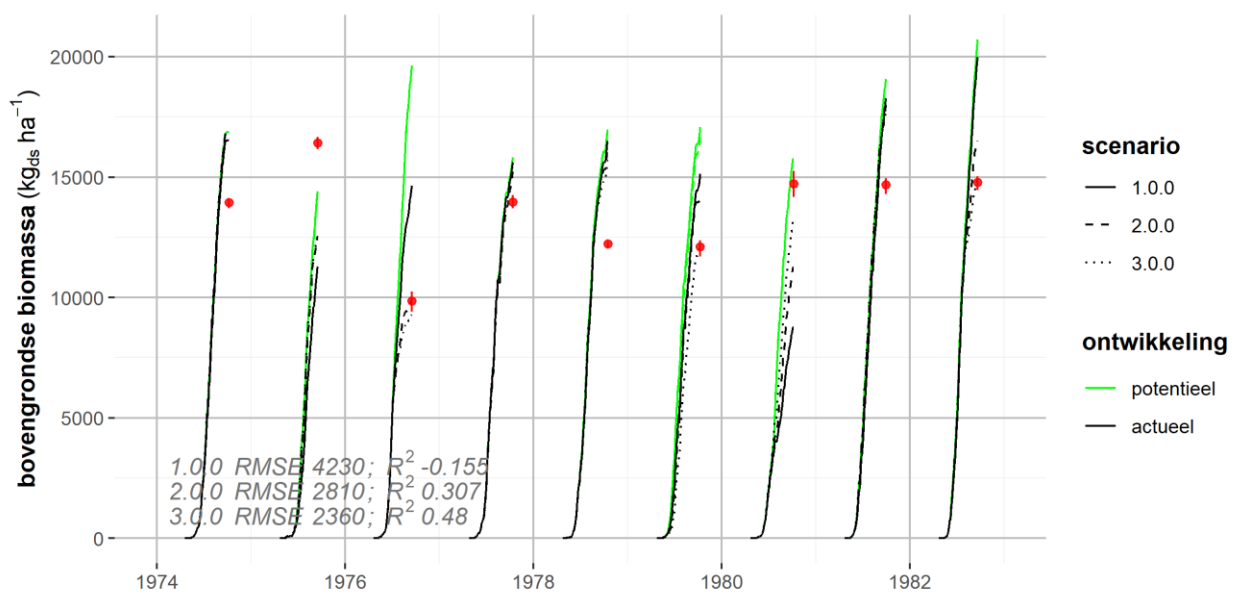
Figuur 3-4 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen, inclusief oogst voor grasland voor veldproef Zegveld (veld 3); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

In 2004 en 2005 benaderen de modelsimulaties de gemeten gewasopbrengst redelijk. Ten opzichte van WWL-versie 2.0.0 simuleert versie 3.0.0 iets meer opbrengstderving. Door een lineaire wortelverdeling aan te houden (i.p.v. een exponentiële verdeling), wordt de onderzijde van de wortelzone gevoeliger voor ongunstige omstandigheden. Onder natte omstandigheden zoals hier het geval is, kan dat resulteren in meer opbrengstderving.

3.2 Mais

3.2.1 Cranendonck

Gedurende de periode 1972 tot en met 1982 is onderzoek uitgevoerd naar de invloed van grote giften runderdrijfmest op de gewasontwikkeling van snijmais, bodemvruchtbaarheid en waterverontreiniging (Schröder, 1985). De modelresultaten zijn weergegeven in Figuur 3-5, waarbij de spreiding in meetwaarden per jaar wordt veroorzaakt door verschillende toedieningshoeveelheden van runderdrijfmest (variërend van 200-300 ton ha⁻¹).

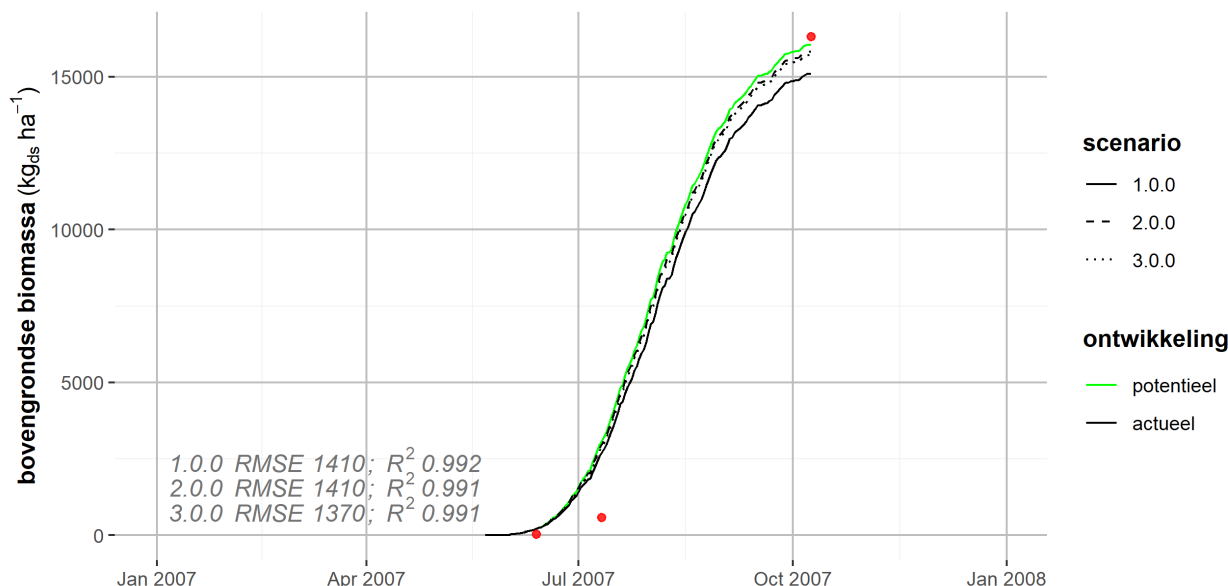


Figuur 3-5 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van mais voor veldproef Cranendonck (veld 16); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

Opvallend aan de vergelijking zijn de modelresultaten voor het extreem droge jaar 1976, in tegenstelling tot WWL-versies 2.0.0 en 3.0.0 laat WWL-versie 1.0.0 bijna geen opbrengstderving zien als gevolg van te droge omstandigheden. De variatie van de meetwaarden door de jaren heen wordt redelijk gevolgd door WWL-versies 2.0.0 en 3.0.0, wat terug te zien is in een positieve Pearson correlatie coëfficiënt (R^2) voor de modelprestatie.

3.2.2 Dijkgraaf

Het onderzoek bij Dijkgraaf was vooral gericht op het meten van de actuele verdamping (Elbers e.a., 2010). Het onderzoek had bij Dijkgraaf betrekking op het jaar 2007, waarbij ook de gewasopbrengst van snijmais is gemeten. Als we naar de modelresultaten kijken die zijn weergegeven in Figuur 3-6, dan lijkt de gesimuleerde gewasontwikkeling iets te vroeg op gang te komen en aan het einde van het groeiseizoen iets te laag te eindigen. Omdat het onderzoek betrekking heeft op slechts één enkel jaar is het aantal waarnemingen zeer gering en hebben modelprestatiematen weinig zeggingskracht.



Figuur 3-6 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van mais voor veldproef Dijkgraaf; met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

Naast de metingen van de bovengrondse biomassa zijn er ook metingen beschikbaar van de afzonderlijke gewasdelen (vrucht/kolf, bladeren, stengels en wortels; zie Figuur B-3). De simulatie van de hoeveelheid bladeren wordt overschat door het modelinstrumentarium. Als gevolg daarvan gaat er later in het groeiseizoen relatief veel energie naar het onderhoud van de bladeren en blijft er minder energie over voor de vorming van de kolf. Mogelijk dat hierdoor het gesimuleerde gewicht van de maiskolf wordt onderschat.

Daarnaast zijn er metingen beschikbaar van de verdamping (eddy-correlatie) en verschillende dieptemetingen van het watergehalte en de bodemtemperatuur (zie Bijlage 0). Bij de vergelijking van de gesimuleerde en gemeten verdamping valt op dat vooral voorafgaand aan het groeiseizoen (eind mei) de verdamping wordt onderschat en tijdens het groeiseizoen juist wordt overschat.

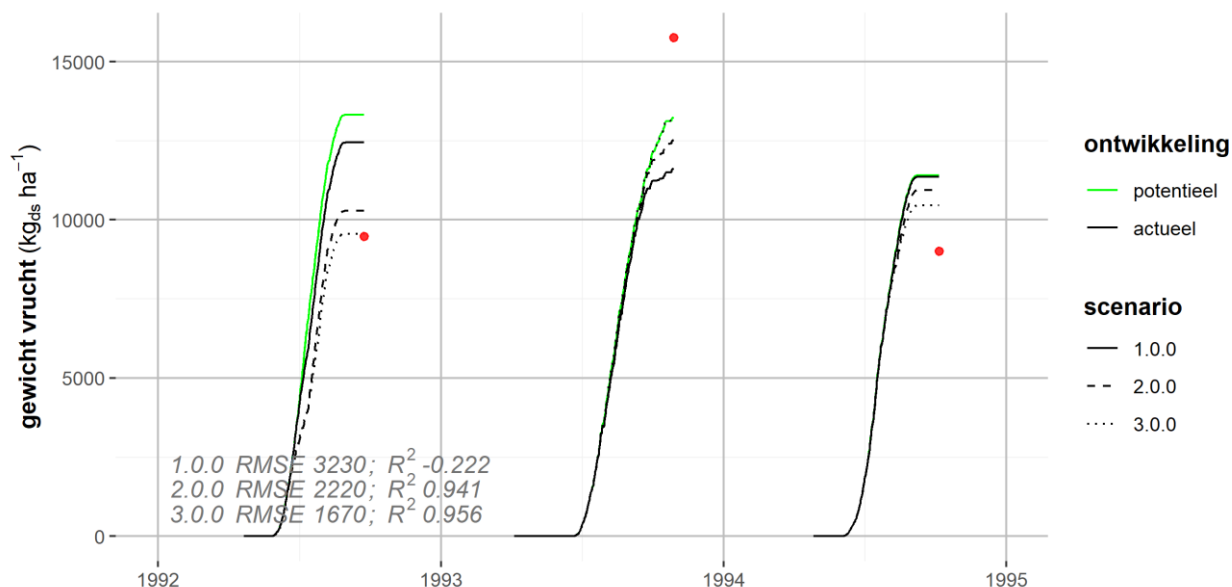
De vergelijking met betrekking tot het watergehalte laat veel te wensen over. Mogelijk dat de meetwaarden op 5 en 50 cm diepte zijn omgewisseld, daarover bestaat enige onduidelijkheid. Maar los daarvan is er een duidelijke afwijking in het niveau van het watergehalte zichtbaar. Het is bekend dat dit kan optreden bij metingen van het vochtgehalte. Onduidelijk is of de meetopstelling is gekalibreerd, wat wel een vereiste is om het juiste niveau te meten. De gesimuleerde fluctuatie in het watergehalte valt wel goed samen met de gemeten fluctuatie.

3.3 Aardappel

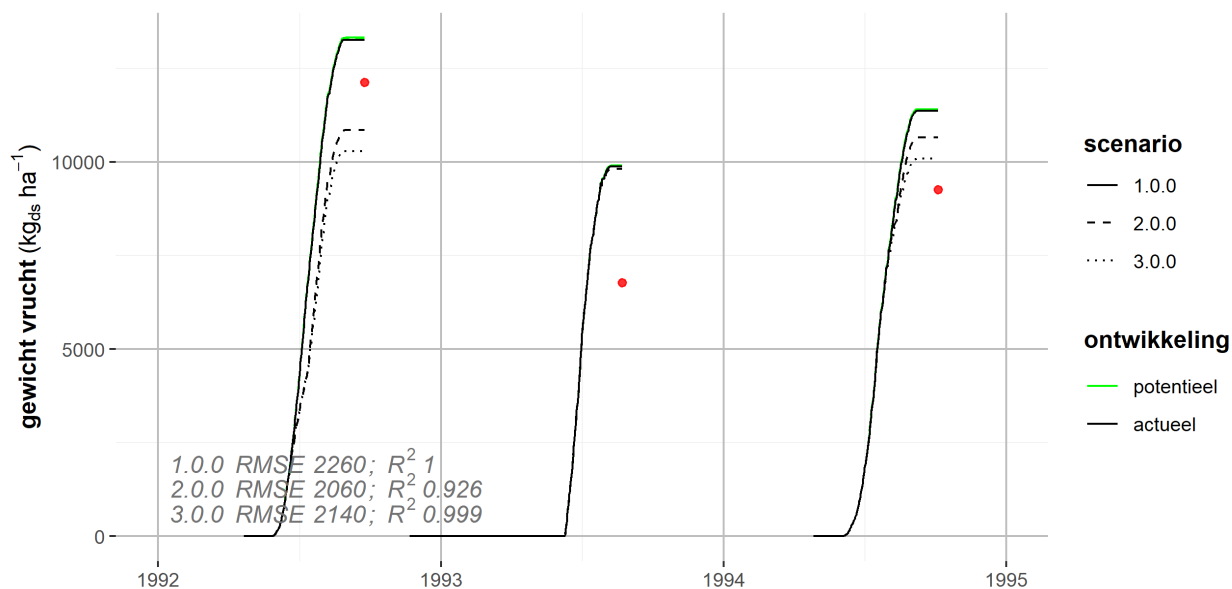
3.3.1 Borgerswold

In 1992 tot en met 1994 is onderzoek uitgevoerd naar stikstofemissie naar het grondwater van geïntegreerde en gangbare bedrijfssystemen in de akkerbouw op de proefboerderijen Borgerswold en Vredepeel (Dijkstra e.a., 1995). Op twee velden zijn metingen van de gewasopbrengst beschikbaar waarbij in de jaren 1992 en 1994 aardappelen zijn geteeld. In het tussenliggende jaar zijn respectievelijk suikerbieten en wintertarwe geteeld op veld 3 en 13 (zie Figuur 3-7 en Figuur 3-8). In de zomermaanden zakt de grondwaterstand uit tot circa 150-180 cm -mv en gaat gepaard met de simulatie van droogtestress. Voor de jaren 1992 en 1994 wordt door WWL-versies 2.0.0 en 3.0.0 meer droogtestress gesimuleerd dan versie 1.0.0, wat verklaard wordt door de update van de bodemfysische eigenschappen. Op basis van de gehanteerde wortelverdeling (exponentieel bij WWL-versie 2.0.0 en lineair afnemend bij WWL-versie 3.0.0)

zou je in eerste instantie minder droogtestress verwachten bij 3.0.0. Het vermogen tot het compenseren van de reductie in wateronttrekking is echter ook minder groot, waardoor er uiteindelijk meer opbrengstderving wordt gesimuleerd door WWL-versie 3.0.0. In 1993 zien we een tegenovergesteld beeld en wordt door WWL-versie 3.0.0 praktisch geen opbrengstderving gesimuleerd. De opbrengstderving bij WWL-versies 1.0.0 en 2.0.0 wordt in dit jaar juist door te natte omstandigheden veroorzaakt.



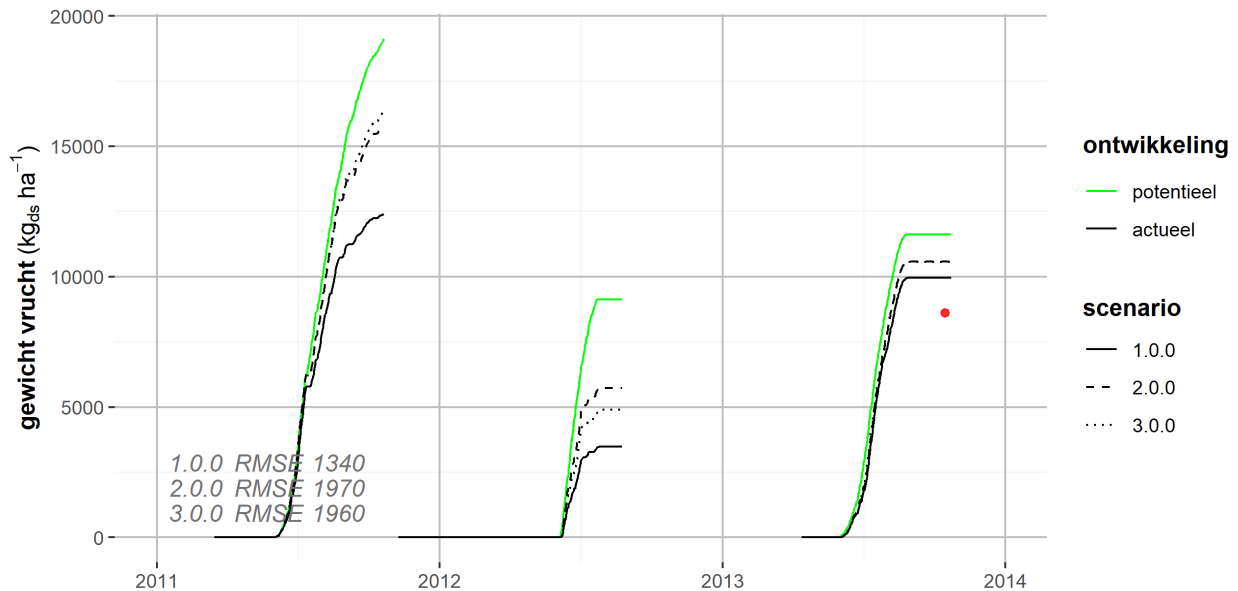
Figuur 3-7 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van aardappel voor veldproef Borgerwold (veld 3); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.



Figuur 3-8 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van aardappel voor veldproef Borgerwold (veld 13); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

3.3.2 Rusthoeve

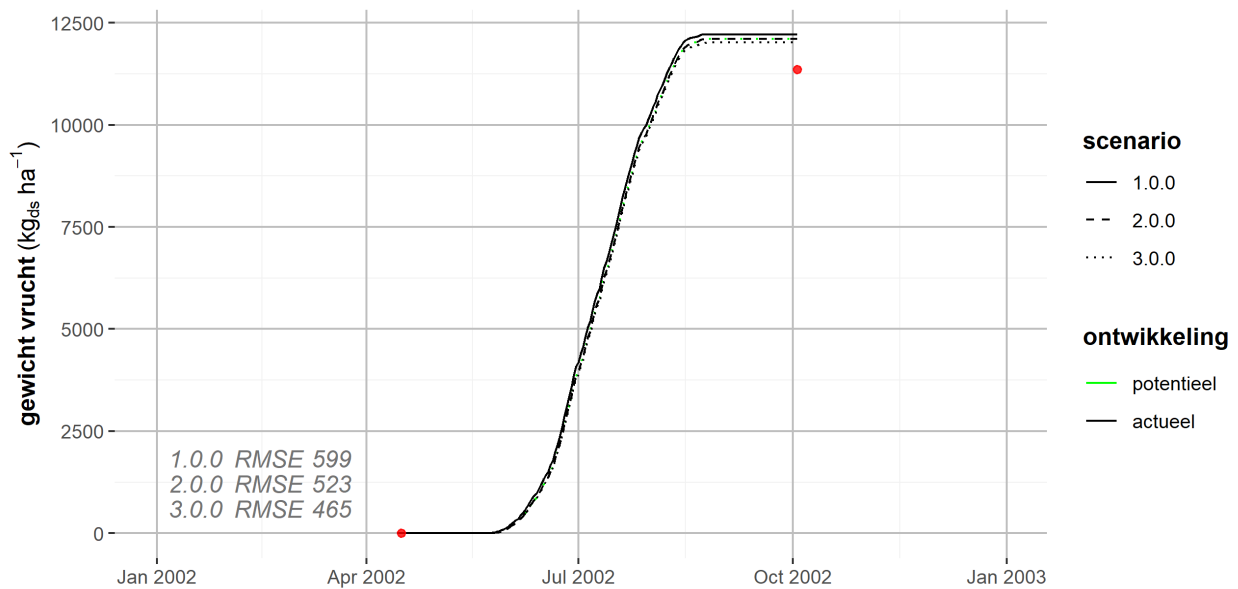
In 2011 tot en met 2013 is een praktijkproef uitgevoerd met regelbare drainage (Schipper e.a., 2015). In Figuur 3-9 zijn de resultaten weergegeven, alleen voor 2013 zijn gewasopbrengsten gemeten. De gesimuleerde opbrengstderiving wordt voornamelijk door te natte omstandigheden veroorzaakt. Ten opzichte van de gemeten waarde komen de resultaten van de simulaties te hoog uit. Mogelijk dat er te weinig opbrengstderiving wordt gesimuleerd of dat de potentiële gewasopbrengst te hoog uitkomt. Op basis van een enkel jaar is dat niet aan te geven.



Figuur 3-9 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van aardappel voor veldproef Rusthoeve (veld B7); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

3.3.3 Vredepeel

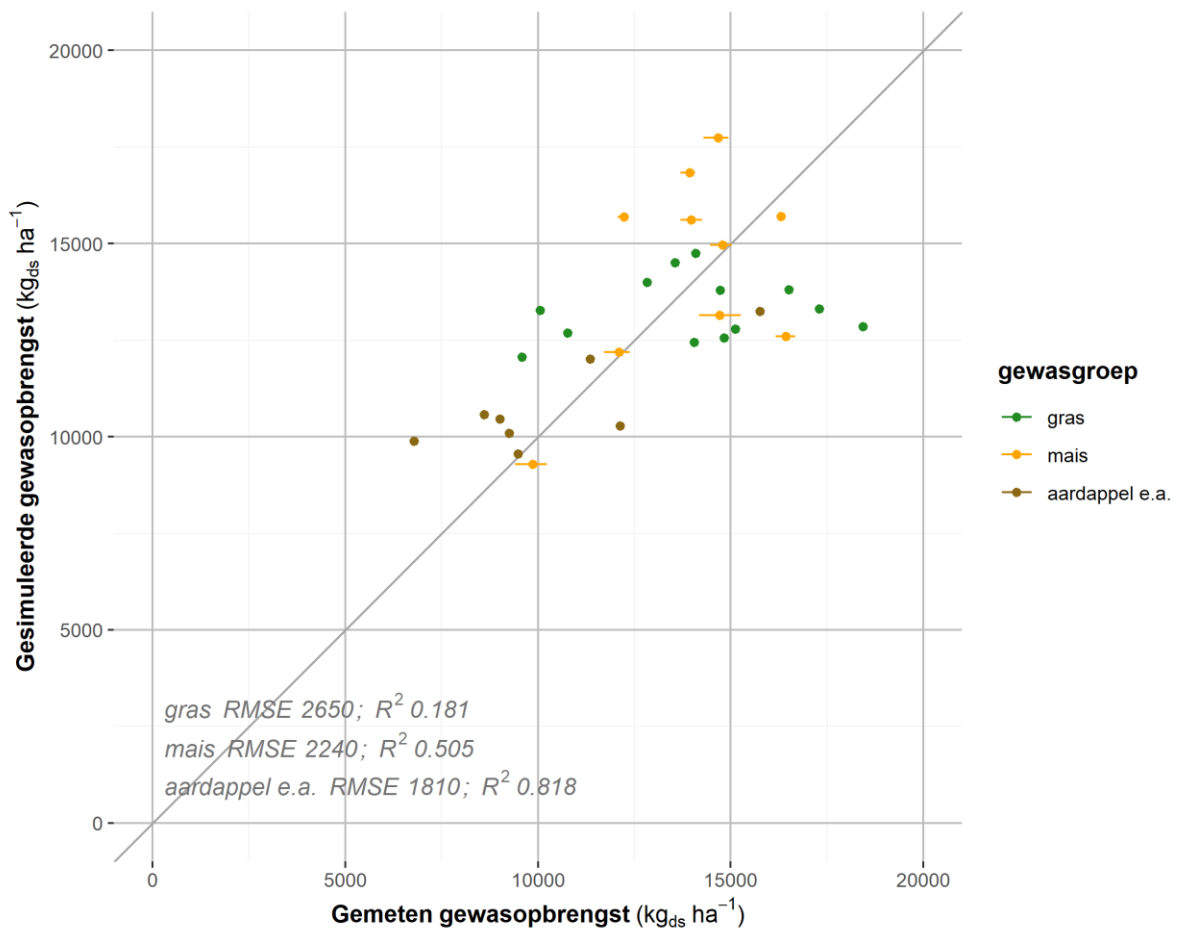
In 2002 zijn experimenten gedaan voor het project 'Telen met toekomst' en is onderzoek gedaan naar lachgas (Van Groenigen e.a., 2005a; 2005b). De modelschematisatie met betrekking tot het model SWAP zijn overgenomen van Stolk e.a. (2012). De simulatie van de gewasopbrengst met betrekking tot oogstbaar product komt iets te hoog uit (zie Figuur 3-10), waarbij de gesimuleerde gewasontwikkeling nauwelijks wordt beïnvloed door ongunstige omstandigheden. De simulatie van de bovengrondse biomassa is min of meer gelijk aan de meetwaarde (zie Figuur C-4).



Figuur 3-10 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van aardappel voor veldproef Vredepeel (veld 26); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

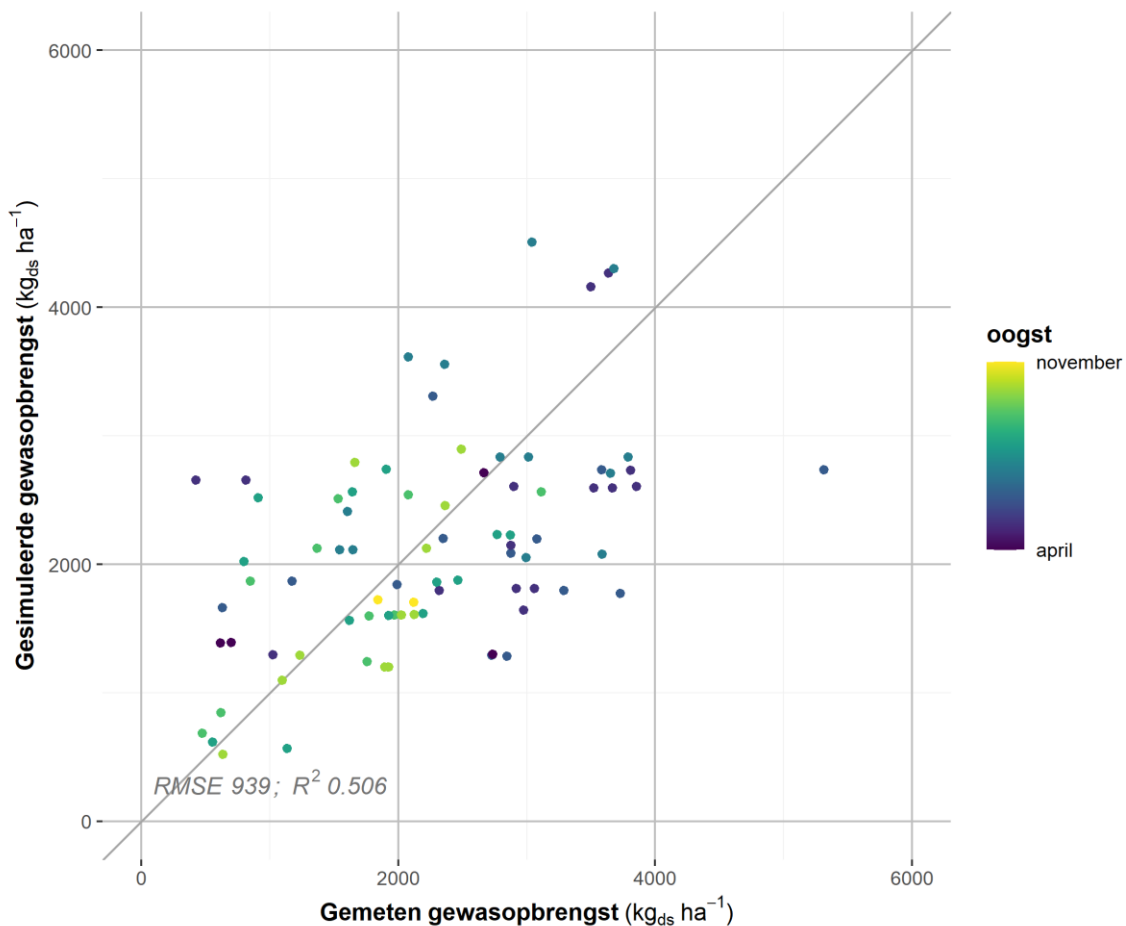
3.4 Evaluatie

Hierboven hebben we voor de afzonderlijke proeven kunnen zien hoe de modelresultaten zich verhouden tot de metingen en hoe de modelresultaten van verschillende WWL-versies zich onderling verhouden. In Figuur 3-11 zijn de gemeten en gesimuleerde gewasopbrengsten van alle veldproeven tegen elkaar uitgezet, waarbij de modelresultaten zijn verkregen met WWL-versie 3.0.0. De modelresultaten van mais en aardappelen benaderen de metingen over het algemeen goed en volgen de 1:1-lijn. De resultaten voor gras liggen ook min of meer op de 1:1-lijn, maar de metingen laten wel meer variatie zien dan bij de modelresultaten.



Figuur 3-11 Gemeten en gesimuleerde gewasopbrengst (oogstbaar product; jaartotalen in $\text{kg}_{\text{ds}} \text{ha}^{-1}$); simulatie uitgevoerd met instellingen volgens WWL-versie 3.0.0.

Als we ons richten op de afzonderlijke grassneden in plaats van de jaartotalen, dan valt op dat de afwijking ten opzichte van de metingen groter is voor de eerste grassneden van het jaar, zie Figuur 3-12. Dit wordt met name gestuurd door het moment waarop wordt verondersteld dat het gras gaat groeien waarvoor nu een temperatuursom wordt gehanteerd. Het is interessant om te analyseren of de modelprestaties verbeteren indien gebruik wordt gemaakt van alternatieve grasmodules waarbij de groei meer gericht is op de bodemtemperatuur, zoals LINGRA.



Figuur 3-12 Gemeten en gesimuleerde gewasopbrengst voor afzonderlijke grassneden ($kg_{ds} ha^{-1}$); simulatie uitgevoerd met instellingen volgens WWL-versie 3.0.0.

Wanneer we kijken naar de modelprestatie van de verschillende WWL-versies, weergegeven in Tabel 3-3, dan zien we een duidelijke verbetering in modelprestaties naarmate WWL zich verder ontwikkelt. Aan de Pearson correlatie coëfficiënt is te zien dat de modelresultaten de metingen steeds beter benaderen. Ook de RMSE neemt bij alle gewasgroepen af naarmate WWL zich verder ontwikkelt. Kanttekening die hierbij geplaatst moet worden, is dat de modelprestaties betrekking hebben op een beperkt aantal proeven.

Tabel 3-3 Modelprestaties met betrekking tot simulatie van de gewasopbrengst weergegeven voor verschillende WWL-versies.

	RMSE	R ²
Gras		
1.0.0	3080	-0.24
2.0.0	2800	0.01
3.0.0	2650	0.18
Mais		
1.0.0	4040	-0.14
2.0.0	2670	0.34
3.0.0	2240	0.5
Aardappel e.a.		
1.0.0	2480	0.56
2.0.0	2000	0.87
3.0.0	1810	0.82

Bovenstaande evaluatie heeft betrekking op negen veldproeven waarvan een aantal betrekking heeft op een korte periode van één tot enkele jaren. Langjarige veldproeven zoals uitgevoerd bij Cranendonck laten een behoorlijke variatie zien in gemeten gewasopbrengsten. Dat de modelresultaten deze variatie kunnen benaderen, geeft vertrouwen in het modelinstrumentarium. Het zou mooi zijn als we in de toekomst kunnen beschikken over meer van dit soort langjarige veldproeven.

De variatie in gewasopbrengst tussen verschillende jaren geeft echter nog geen volledig beeld van de opbrengstderving die is opgetreden. Daarvoor hebben we ook informatie nodig van wat de gewasopbrengst geweest zou zijn onder gunstige hydrologische omstandigheden. Onder ideale omstandigheden beschikken we dus over veldproeven uitgevoerd in tweevoud, waarbij onderscheid wordt gemaakt in gunstige en ongunstige hydrologische condities. Op deze manier kan inzicht worden verkregen in zowel de actuele gewasontwikkeling als in een benadering van de potentiële gewasontwikkeling en daarmee de opbrengstderving. Daarnaast blijft het van belang om naast metingen van de gewasopbrengst ook te beschikken over metingen van de hydrologische condities (drukhoogte op verschillende diepten en grondwater) en dat de beïnvloeding van overige stressoren zo veel mogelijk wordt voorkomen.

4 Regionale validatie

Bij de regionale validatie richten we ons op ruimtelijke patronen van de gesimuleerde opbrengstderving. Voor de toetsing maken we gebruik van satellietbeelden die de groenindex (NDVI; Normalized Differential Vegetation Index) meten. De beelden van de NDVI-groenindex zijn hierbij afkomstig van de [Groenmonitor](#).¹⁰

Een vergelijking van de gesimuleerde opbrengstderving met de Groenmonitor is reeds uitgevoerd voor het stroomgebied van De Raam (Mulder e.a., 2021b; 2022a). Daarbij kwamen twee aanbevelingen naar voren:

- Opnieuw een vergelijking maken tussen gesimuleerde opbrengstderving en de Groenmonitor met een verbeterde beregeningskaart;
- Een vergelijking met de Groenmonitor op landelijke schaal.

Beide aanbevelingen hebben in 2022 een vervolg gekregen en de resultaten worden in dit hoofdstuk beschreven. We beginnen met het beschrijven van de variatie in de groenindex die in de satellietbeelden is te zien.

4.1 Variatie groenindex

De NDVI groenindex is een indicator van de hoeveelheid groene biomassa met een waarde tussen de 0 en 1, waarbij open water een groenindex heeft van 0 en kale bodems een waarde van ongeveer 0.1. De eerste vegetatie (bijvoorbeeld grassprietjes die boven de grond komen) geeft waarden van 0.3. Bij 0.6 à 0.7 is het gewas gesloten en een gewas met meerdere bladlagen geeft waarden tot bijna 1.

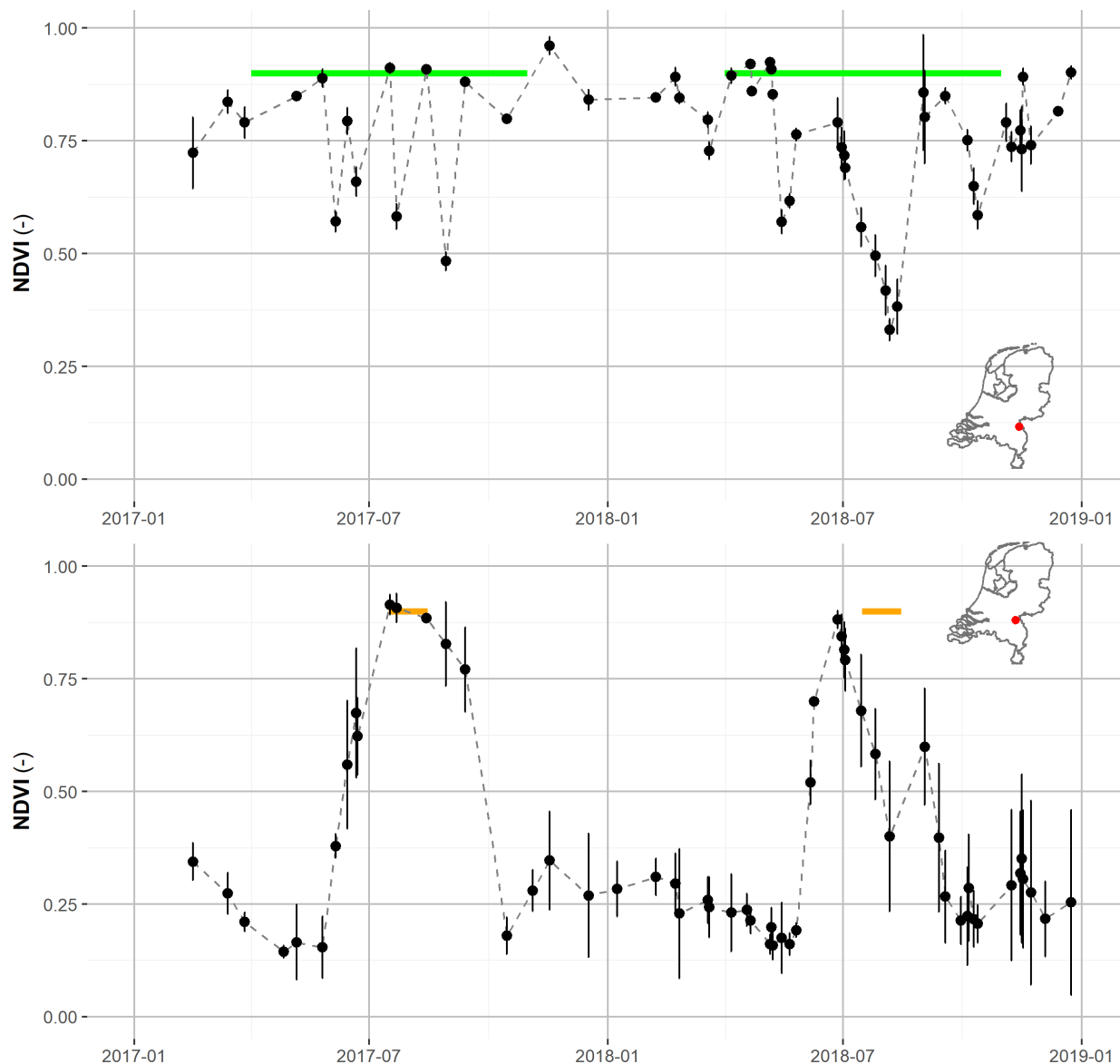
De beelden van de groenindex bevatten informatie waaruit de actuele gewastoestand kan worden afgeleid, het geeft echter geen beeld van wat de gewastoestand had kunnen zijn onder optimale omstandigheden. Ter illustratie volgen hieronder voorbeelden op verschillende niveaus.

4.1.1 Voorbeelden op perceelniveau

Bij grasland kunnen maaisneden of begrazing zorgen voor een tijdelijk daling van de groenindex. Dat is terug te zien in Figuur 4-1 (boven) waarin een tijdreeks van de groenindex voor een grasland perceel is weergegeven. Wanneer de perceel gemiddelde groenindex (zwarte stip) met elkaar worden verbonden, dan is in 2017 een duidelijk zaagsnede te zien als gevolg van maaisneden. In 2018 is daarentegen een periode zichtbaar waarbij opeenvolgende observaties van de groenindex gedurende een lange periode een neerwaartse trend laat zien, hetgeen duidt op ongunstige omstandigheden. Zijn de omstandigheden gunstig en zijn maaimomenten (of beweiding) niet aan de orde, dan kan de groenindex oplopen tot een waarde van 0.9 of meer (zie groene lijn).

Bij mais spelen de gewasopkomst en afrijping van het gewas een belangrijke rol, zie Figuur 4-1 (onder). Een lage temperatuur zal leiden tot een vertraging in de gewasopkomst en het later afrijpen van het gewas. Een vergelijking met beelden van de groenindex uit andere jaren zegt dan wel iets over de gewasontwikkeling zelf, maar niet zoveel over de beïnvloeding van ongunstige hydrologische omstandigheden op de gewasontwikkeling.

Voor snijmais mag verondersteld worden dat het gewas volledig tot ontwikkeling is gekomen in de periode van half juli tot half augustus. Onder gunstige hydrologische omstandigheden (alsmede gunstige nutriëntenvoorziening) zal de groenindex in deze periode oplopen tot een waarde van 0.9 of hoger. Zijn de omstandigheden langdurig ongunstig, dan zien we bij mais ook een reductie in de groenindex optreden.

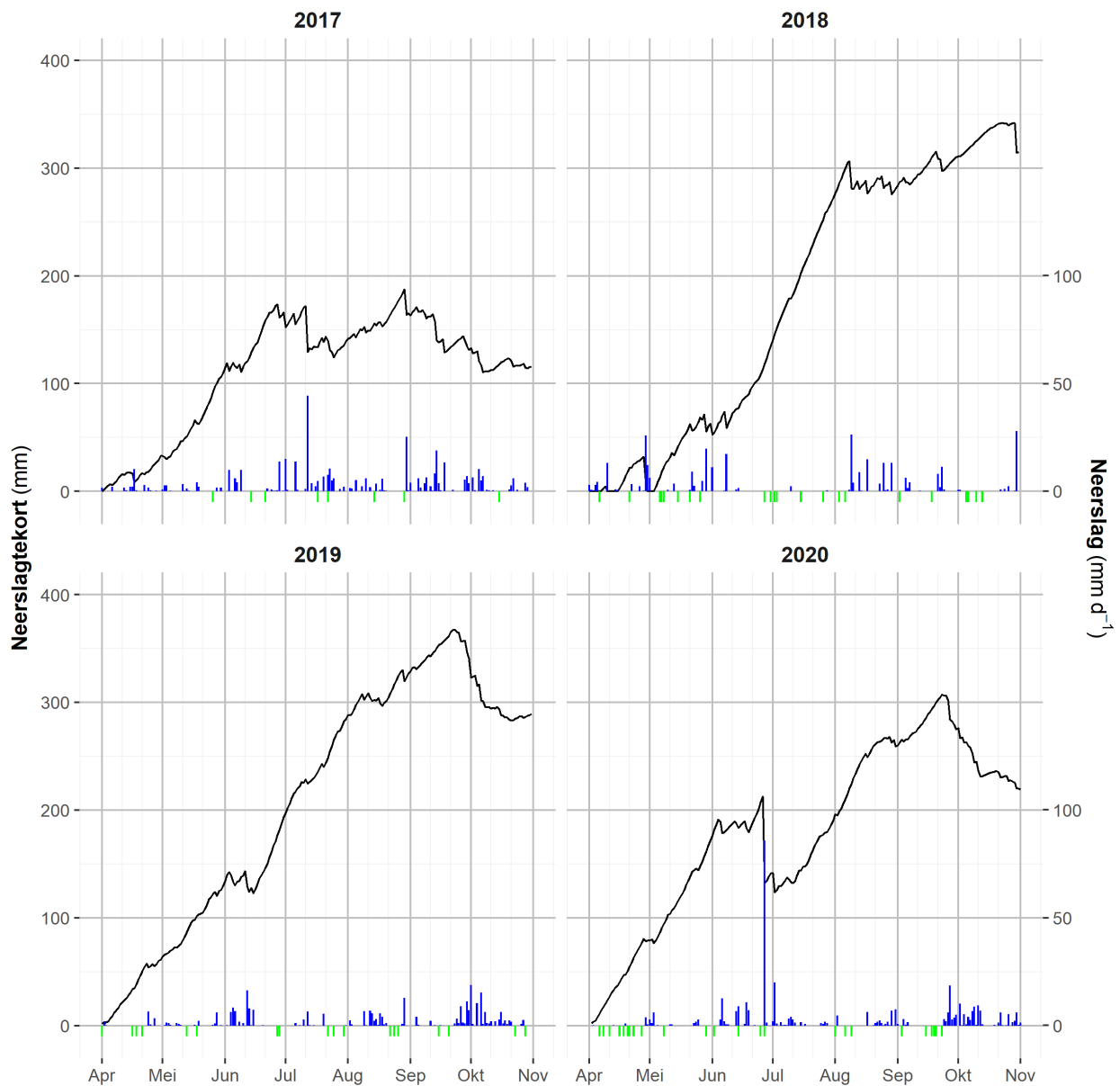


Figuur 4-1 Observaties van de groenindex voor een perceel met gras (boven) en snijmais (onder) in het stroomgebied van De Raam; de zwarte stippen tonen de gemiddelde NDVI-waarde en de verticale strepen geven met twee keer de standaarddeviatie de variatie binnen het perceel aan; indicatie van de potentiële groenindex is weergegeven met de groene en oranje lijn (bron: *Groenmonitor*).

4.1.2 Voorbeelden stroomgebied De Raam

Zoals we hierboven hebben laten zien, is het mogelijk om een indicatie te krijgen van de reductie in de groenindex. Informatie waardoor de groenindex is gereduceerd, ontbreekt echter. In deze studie zijn we vooral geïnteresseerd in perioden waarbij er gedurende een lange tijd sprake is van een neerslagtekort waarbij we aannemen dat de groenindex gedurende deze periode voornamelijk wordt gereduceerd door droogtestress. Indien de groenindex tijdens een droge periode hoog blijft, kan dat een indicatie zijn dat het perceel wordt beregend of dat ongeacht de aanzienlijke droogte de bodemhydrologische condities het gewas van voldoende vocht kunnen voorzien. Om te beoordelen hoe droog een bepaald moment van het jaar is, kunnen we kijken naar het cumulatief neerslagtekort vanaf 1 april (zie Figuur 4-2). Hierbij gebruiken we de neerslag en de referentieverdamping (Makkink) van het nabijgelegen weerstation Volkel. In de figuur worden naast het cumulatieve neerslagtekort ook de dagelijkse neerslaghoeveelheden weergegeven (blauw) en de dagen waarop NDVI-beelden voor vrijwel het gehele stroomgebied van De Raam beschikbaar zijn (groen).¹⁴

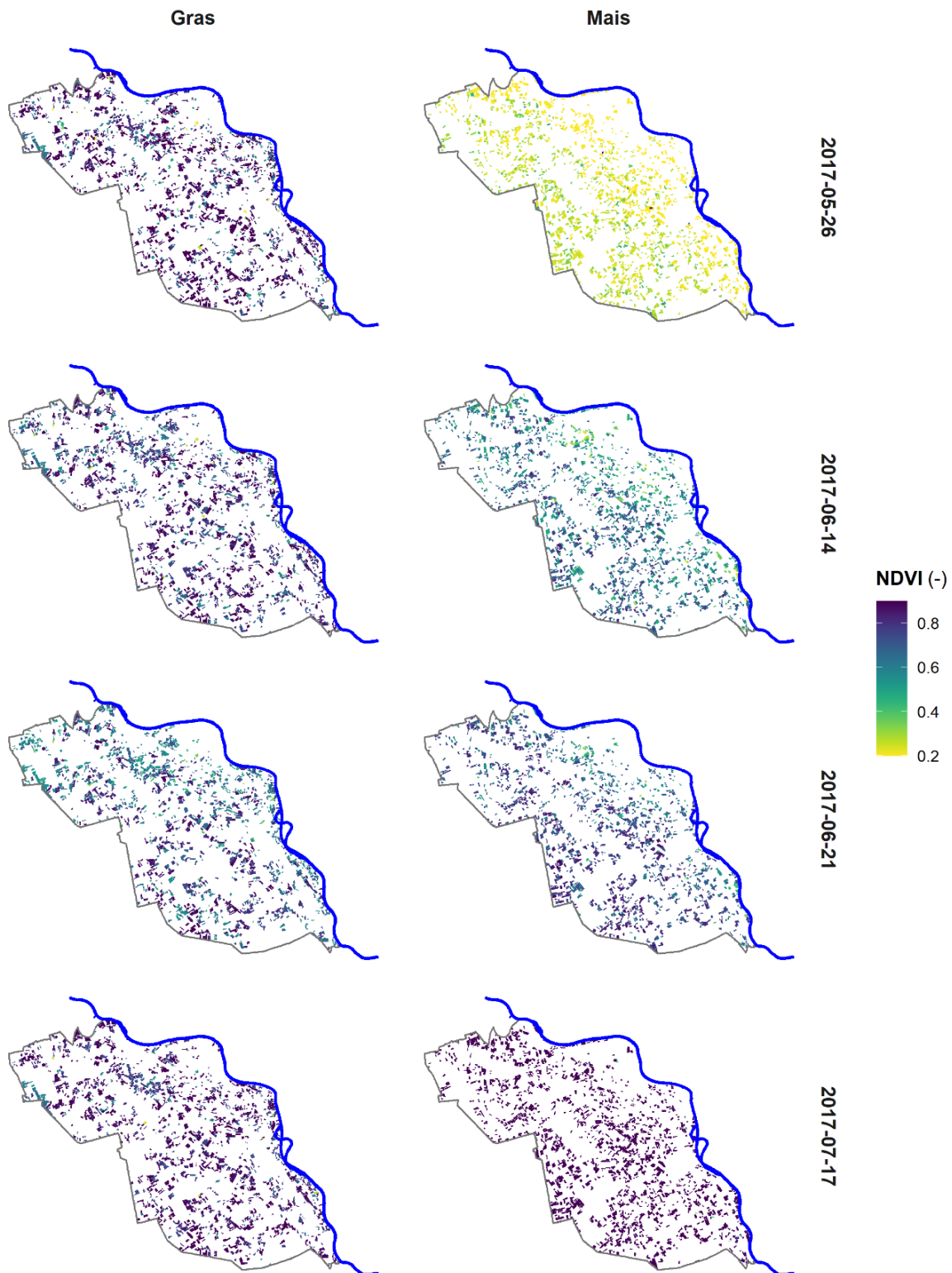
¹⁴ Door bewolking kan het voorkomen dat niet op alle dagen NDVI-beelden beschikbaar zijn of slechts gedeeltelijk beschikbaar zijn. We selecteren hier alleen de NDVI-beelden met een dekking van ten minste 80% van het stroomgebied voor De Raam.



Figuur 4-2 Cumulatief neerslagtekort van april tot en met oktober (zwart), neerslag weerstation Volkel (blauw) en dagen waarop NDVI-beelden beschikbaar zijn (groen) voor de jaren 2017-2020.

Een daling van de groenindex gedurende een droge periode is zeer waarschijnlijk een indicatie van droogtestress. Maar de daling kan ook door andere factoren worden veroorzaakt. Hieronder illustreren we dat aan de hand van twee voorbeelden.

In 2017 is het neerslagtekort in de maand juni opgelopen tot ongeveer 170-180 mm. Daarna volgt er een periode met neerslag waarbij het cumulatieve neerslagtekort terugloopt naar circa 130-140 mm. Gedurende deze periode zijn er vier NDVI-beelden beschikbaar, namelijk van 26 mei, 14 juni, 21 juni en 17 juli. In Figuur 4-3 zijn de beelden van de NDVI groenindex weergegeven, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen gras- en maispercelen.



Figuur 4-3 Weergave eerste vier NDVI-beelden voor 2017 voor het stroomgebied van De Raam; de kleuren geel tot paars geven de NDVI groenindex weer afgekapt op een waarde van minimaal 0.2 en maximaal 0.9.

In het beeld van 26 mei 2017 is een duidelijk verschil te zien in de groenindex van gras- en maispercelen. De percelen met gras hebben vrijwel in het gehele stroomgebied een hoge groenindex (meerdere bladlagen, $NDVI > 0.7$). De gewasontwikkeling van mais bevindt zich nog in het stadium van gewasopkomst, hetgeen tot uiting komt in een lage groenindex (kale bodem tot eerste vegetatie, $NDVI < 0.4$). In de opvolgende beelden is duidelijk te zien dat de groenindex van mais steeds verder toeneemt. Bij grasland zien we in de beelden van 14 en 21 juni op veel percelen juist een daling in de groenindex, zie Tabel 4-1.

Tabel 4-1 Gemiddelde groenindex per NDVI-beeld voor percelen in het stroomgebied van De Raam uitgesplitst naar gewas.

NDVI-beeld	Gras	Mais
2017-05-26	0.81	0.25
2017-06-14	0.78	0.61
2017-06-21	0.71	0.72
2017-07-17	0.83	0.90

Tijdens deze periode loopt het neerslagtekort op van circa 130 naar 160 mm waarmee in eerste instantie aan droogtestress gedacht kan worden. Maar aangezien deze periode wordt gevolgd door een periode met neerslag ligt het meer voor de hand dat de daling in de groenindex wordt beïnvloed door het oogsten van grasland. Het beeld van 17 juli geeft vrijwel in het hele stroomgebied een optimale groenindex-waarde weer. Ook in de overige beschikbare NDVI-beelden van 2017 is er geen duidelijke aanwijzing of er sprake is geweest van droogtestress.

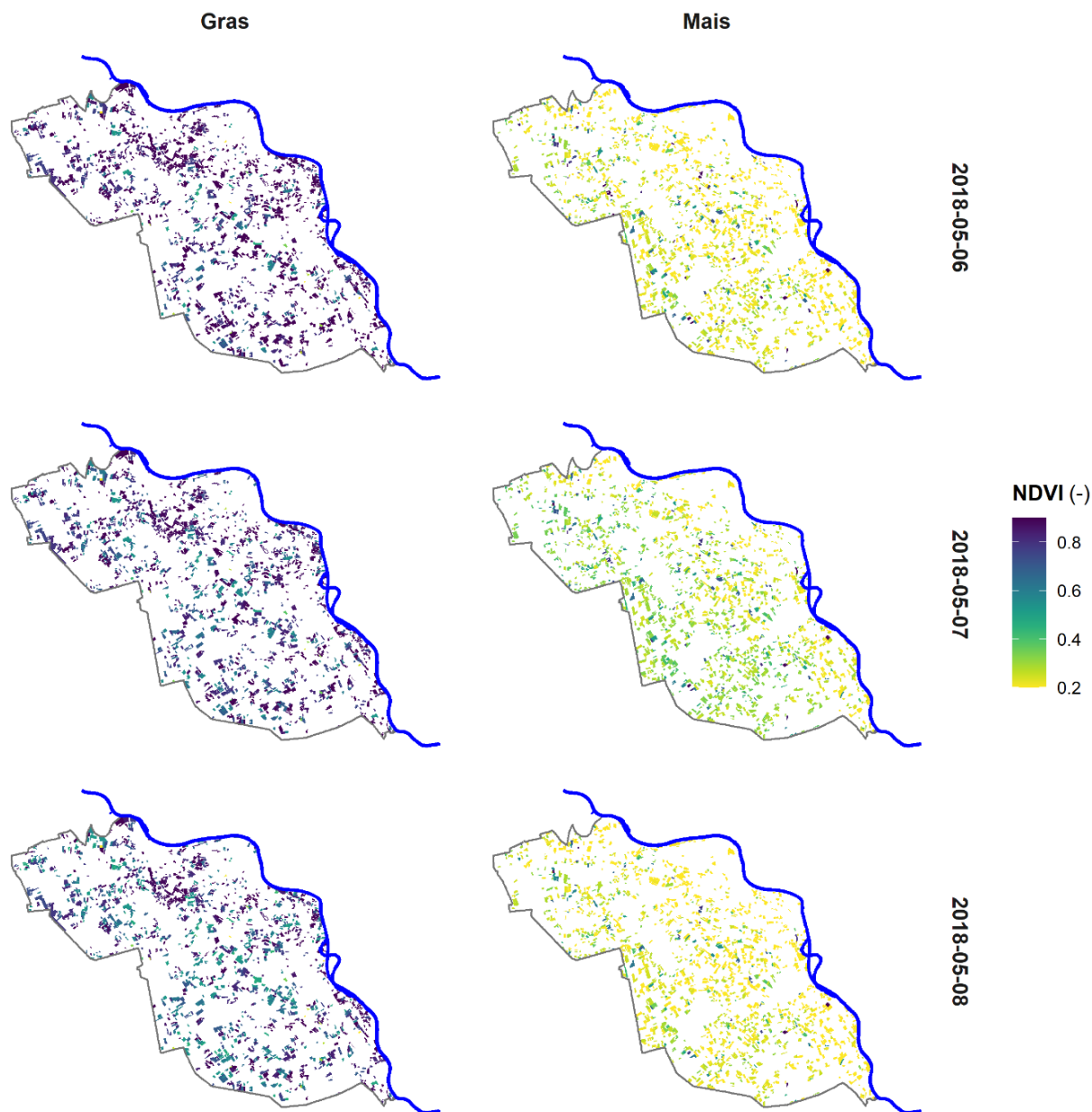
Mede door het beschikbaar komen van Sentinel-2B (waardoor de opname frequentie verdubbelt) zijn er vanaf 2018 frequenter NDVI-beelden beschikbaar (en vanwege het mooie weer neemt de kans op wolkenvrije beelden toen). Naast Sentinel-2A+B wordt ook gebruikgemaakt van Landsat 7- en 8-beelden. Door het gebruik van meerdere satellieten kan het voorkomen dat er voor opeenvolgende dagen NDVI-beelden beschikbaar zijn, zoals in 2018 op 6, 7 en 8 mei, zie Figuur 4-4. Wat hierbij opvalt, is dat de graslandpercelen overwegend een dalende trend laten zien in de groenindex (waarschijnlijk als gevolg van maaisneden), terwijl bij de maispercelen de groenindex eerst toeneemt en vervolgens afneemt, zie ook Tabel 4-2.

Tabel 4-2 Gemiddelde groenindex per NDVI-beeld voor percelen in het stroomgebied van De Raam uitgesplitst naar gewas.

NDVI-beeld	Bron	Gras	Mais
2018-05-06	Sentinel-2B	0.82	0.28
2018-05-07	Landsat 8	0.78	0.32
2018-05-08	Sentinel-2A	0.73	0.26

Een verklaring voor dit gedrag is waarschijnlijk dat er gebruik wordt gemaakt van verschillende satellieten of satellietbronnen. Landsat heeft een andere resolutie (30 m) dan Sentinel (10 m) en ook zijn de sensor eigenschappen verschillend. Om ervoor te zorgen dat de Landsat en Sentinel zo veel mogelijk op elkaar aansluiten, worden de Landsat-beelden handmatig gecorrigeerd naar Sentinel-2. Alle satellietbronnen worden omgezet naar beelden met een resolutie van 25 m.

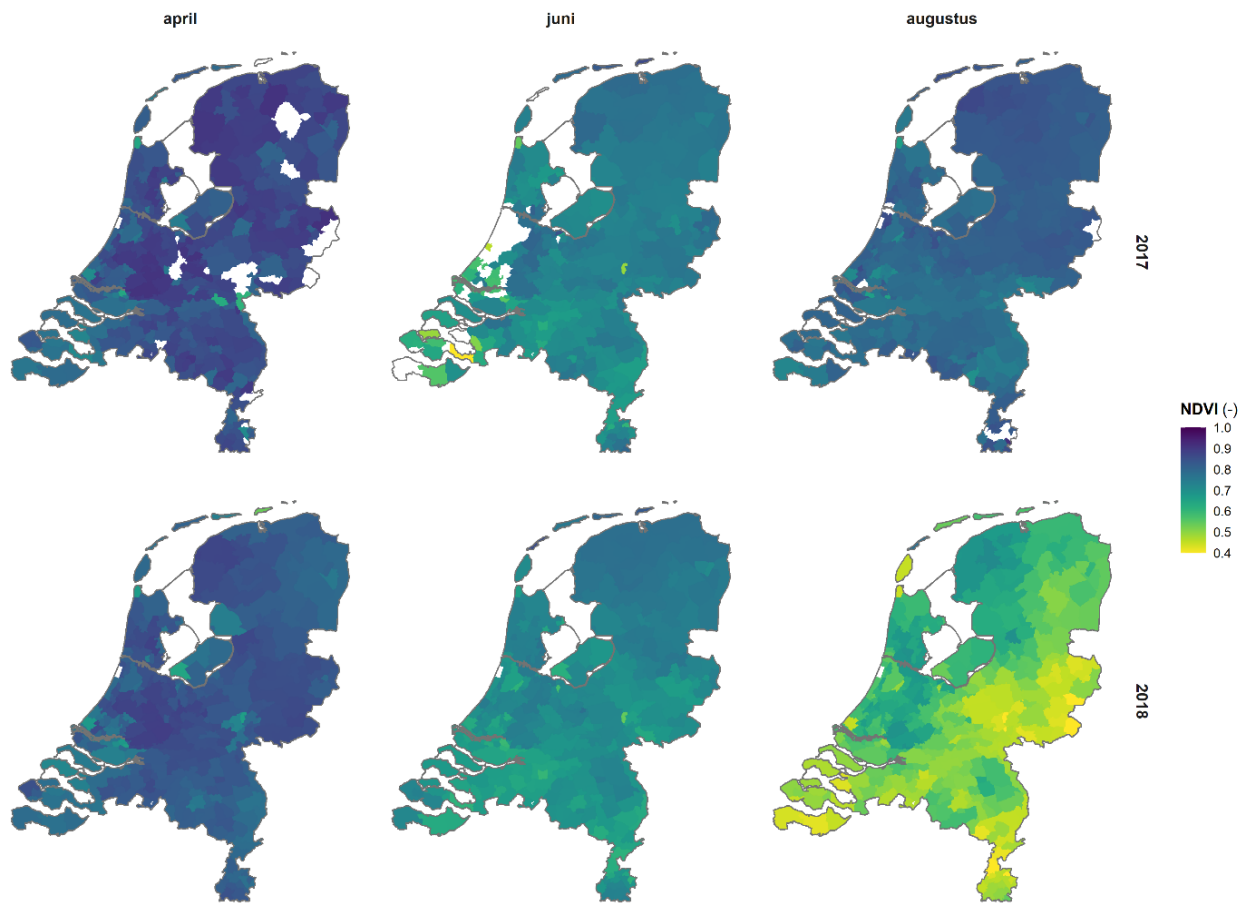
Hoewel de beelden van de groenindex veel informatie bevatten van de actuele gewastoestand, kan op basis van de bovenstaande bevindingen geconcludeerd worden dat een juiste interpretatie van de beelden soms lastig is te maken.



Figuur 4-4 Weergave opeenvolgende NDVI-beelden voor mei 2018 voor het stroomgebied van De Raam; de kleuren geel tot paars geven de NDVI groenindex weer afgekapt op een waarde van minimaal 0.2 en maximaal 0.9.

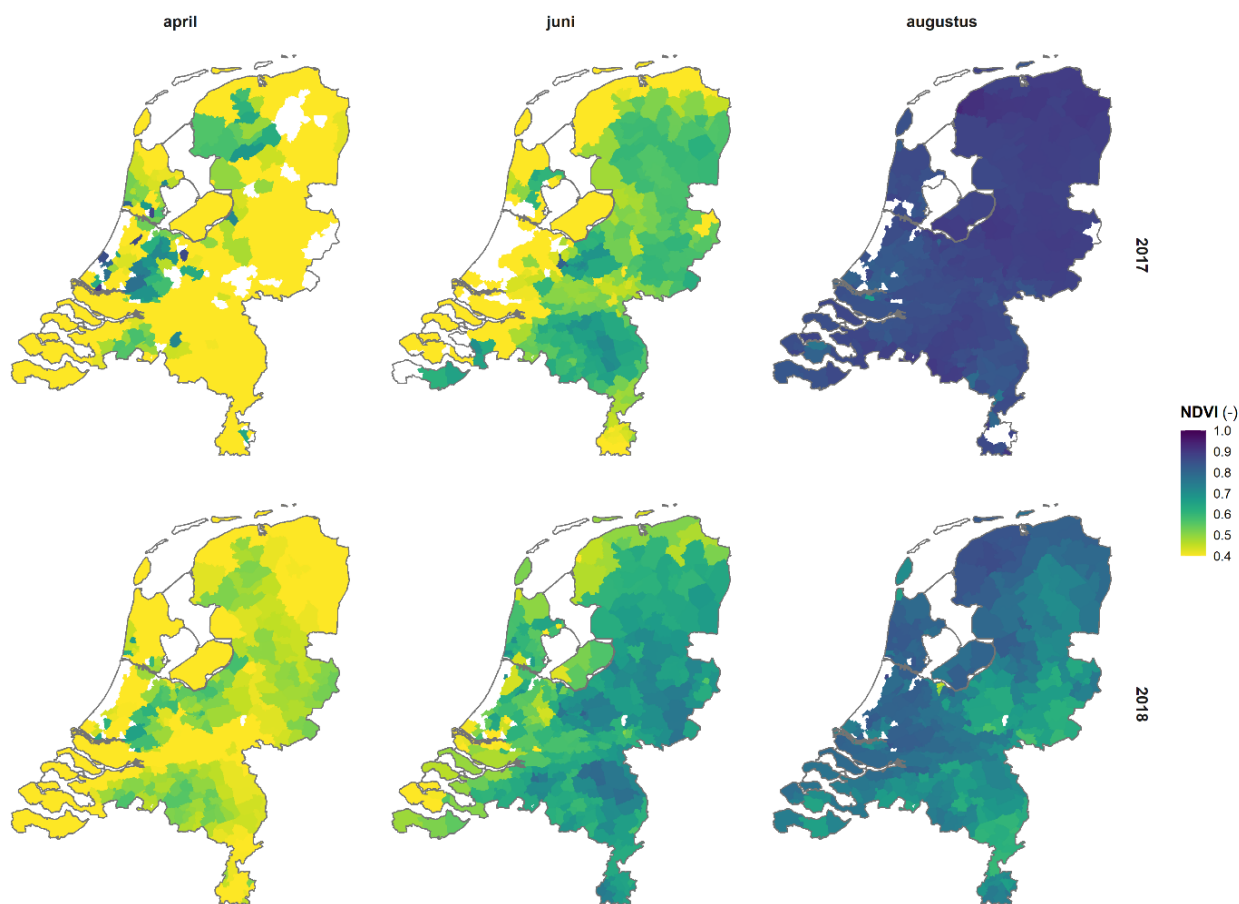
4.1.3 Voorbeeld landelijk

Om een beeld te krijgen hoe de variatie in groenindex er landelijk uitziet, kiezen we ervoor om de NDVI-beelden te aggregeren in ruimte en tijd. Regionale patronen in de groenindex hopen we later terug te zien in de modelresultaten van Waterwijzer Landbouw (beschreven in Sectie 4.3). In Figuur 4-5 is de maandelijks gemiddelde NDVI-waarde voor percelen met grasland per gemeente weergegeven voor de maanden april, juni en augustus in 2017 en 2018. In april en juni van 2017 en 2018 zijn de ruimtelijke patronen van de groenindex min of meer vergelijkbaar. In april is de gemiddelde groenindex overwegend hoog en in juni is er sprake van een kleine afname. In augustus is er een duidelijk verschil zichtbaar tussen 2017 en 2018. Tevens valt op dat in 2018 de percelen gelegen in het noordwesten van Nederland een hogere groenindex hebben dan de percelen in het zuidoosten. Uit deze beelden is af te leiden dat ook in de droge zomer van 2018 verschillende regio's van Nederland van voldoende water zijn voorzien. Wateraanvoer in West- en Noord-Nederland via het IJsselmeer en de rivieren maakt dat in deze gebieden de groenindex behoorlijk hoog was. Ook lijkt het erop dat het gemiddelde beeld weergeeft in welke gemeentes in Zuid- en Oost-Nederland grasland veelal beregend is.



Figuur 4-5 Maandelijks gemiddelde groenindex van alle graslandpercelen per gemeente voor april, juni en augustus in 2017 en 2018 (bron: Groenmonitor).

Bij percelen met snijmais (Figuur 4-6) zien we duidelijk andere patronen in de tijd als gevolg van de gewasontwikkeling. In april is het mais nog niet overal ingezaaid dan wel opgekomen en in juni is het gewas nog niet volgroeid. In juni 2018 is de gemiddelde groenindex hoger dan in 2017, maar in augustus is dit juist andersom het geval. In vergelijking met de graslandpercelen zien we in augustus 2018 weliswaar een hogere groenindex bij de maispercelen, maar ook hier valt op dat percelen gelegen in het noordwesten van Nederland een hogere groenindex hebben dan de percelen in het zuidoosten.



Figuur 4-6 Maandelijks gemiddelde groenindex van alle maispercelen per gemeente voor april, juni en augustus in 2017 en 2018 (bron: Groenmonitor).

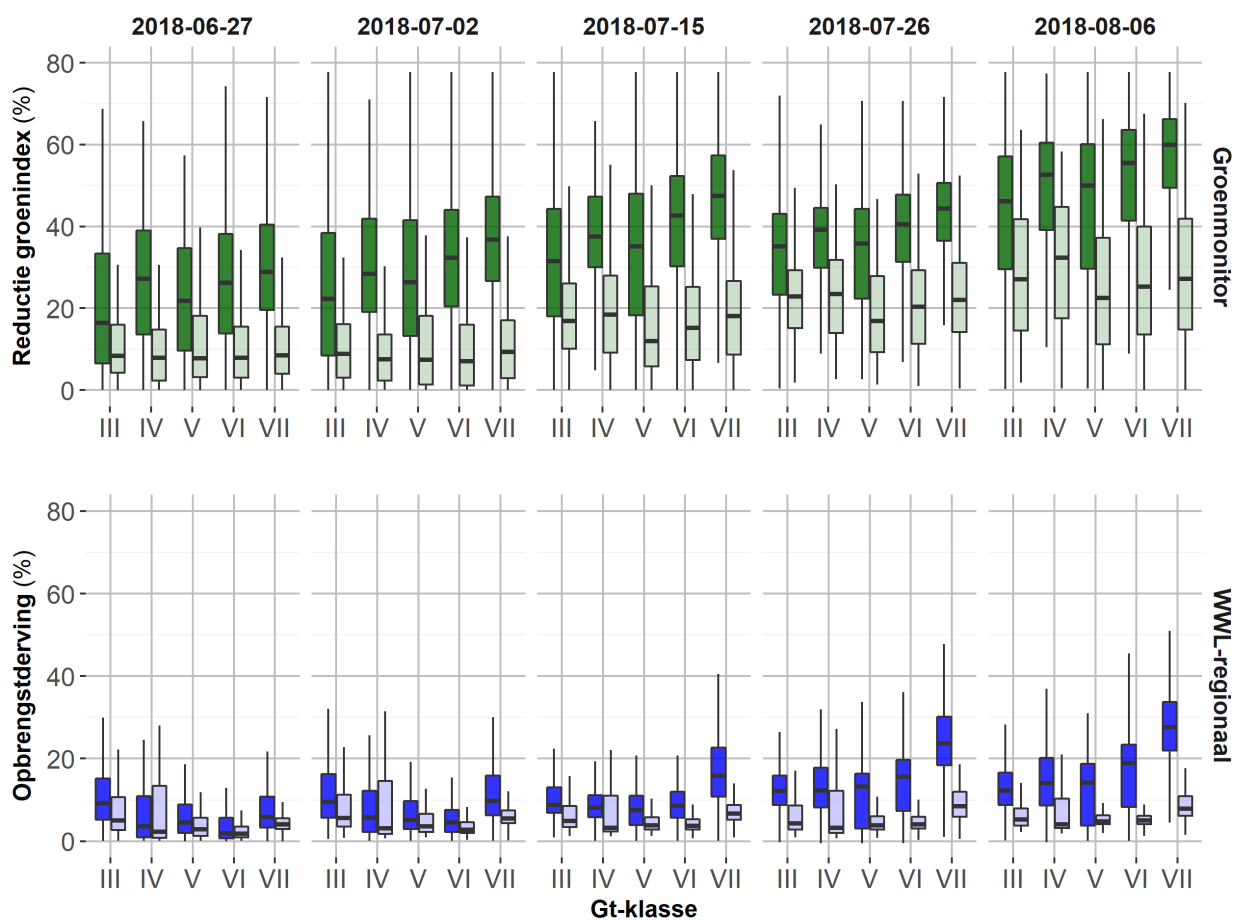
4.2 Vergelijking Groenmonitor met WWL-regionaal voor De Raam

Een vergelijking van de gesimuleerde opbrengstderving met de Groenmonitor is reeds uitgevoerd voor het stroomgebied van De Raam (Mulder e.a., 2021b; 2022a). Als aanbeveling kwam hierbij naar voren om de vergelijking opnieuw uit te voeren met een verbeterde beregeningskaart. In opdracht van het Waterschap Aa en Maas en STOWA is ervoor gekozen om een beregeningskaart af te leiden op basis van informatie afkomstig van de Groenmonitor in combinatie met modelberekeningen die de beregeningsbehoefte in kaart brengen. In Bijlage 0 beschrijven we de methodiek voor het afleiden van deze nieuwe beregeningskaart. Aan de hand hiervan maken we opnieuw een vergelijking tussen de gesimuleerde opbrengstderving met WWL-regionaal en de reductie van de groenindex gedurende de zomer van 2018. De verwachting is dat een vergelijking met deze nieuwe beregeningskaart beter aansluit bij de werkelijkheid, omdat er een betere inschatting is van waar wel of niet beregend wordt en dus een vochttekort of opbrengstderving optreedt.

Voor de vergelijking van de gesimuleerde gewasopbrengstderving met de reductie van de groenindex focussen we op vijf momenten in de droge zomer van 2018, waarbij we beschikken over beelden van de groenindex. Het eerste moment is aan het begin van de droge periode en betreft 27 juni 2018. Bij het nabijgelegen weerstation Volkel is dan al 19 dagen geen neerslag geregistreerd. Het laatste moment is aan het eind van de droge periode en betreft 6 augustus 2018. We maken een vergelijking tussen de reductie in de groenindex met de reductie in de gesimuleerde gewasopbrengst (bovengrondse delen) waarbij de resultaten worden uitgesplitst door rekening te houden met berekening (wel en niet-beregend) en de hydrologische condities (Gt-klassen III t/m VII). De gesimuleerde gewasopbrengst is verkregen met WWL-regionaal (aansturing volgens WWL-versie 3.0.0), waarbij de hydrologische randvoorwaarde is gebaseerd op

het grondwaterstandverloop gesimuleerd met het GRAM. Het grondwaterstandverloop is hierbij opgelegd als veertiendaagse drukhoogte aan de onderzijde van het bodemprofiel. Berekeningen zijn alleen uitgevoerd voor percelen met gras dan wel mais, waarbij het landgebruik is gebaseerd op de Basisregistratie Percelen. Het landgebruik kan daarmee afwijken van het landgebruik zoals gehanteerd in GRAM. Er is niet onderzocht in hoeverre hierdoor de hydrologische randvoorwaarden en daarmee de modelresultaten worden beïnvloed. Verder is de bodemschematisatie afkomstig van de Bodemkaart van Nederland en zijn de meteorologische condities – met uitzondering van de neerslag – afkomstig van het nabijgelegen weerstation Volkel. Neerslag is afkomstig van radarbeelden (met een resolutie van 1 km).

Op voorhand is het goed om te realiseren dat het hier gaat om een vergelijking van verschillende grootheden. Een reductie in de groenindex als gevolg van ongunstige hydrologische omstandigheden zegt namelijk niet veel over de mate van beïnvloeding van de gewasontwikkeling en daarmee de reductie van de gewasopbrengst. Wel mag verwacht worden dat wanneer er een reductie van de groenindex optreedt als gevolg van ongunstige hydrologische condities, dit gepaard gaat met een reductie van het oogstbare product. In Figuur 4-7 zijn de resultaten voor alle graspercelen weergegeven.

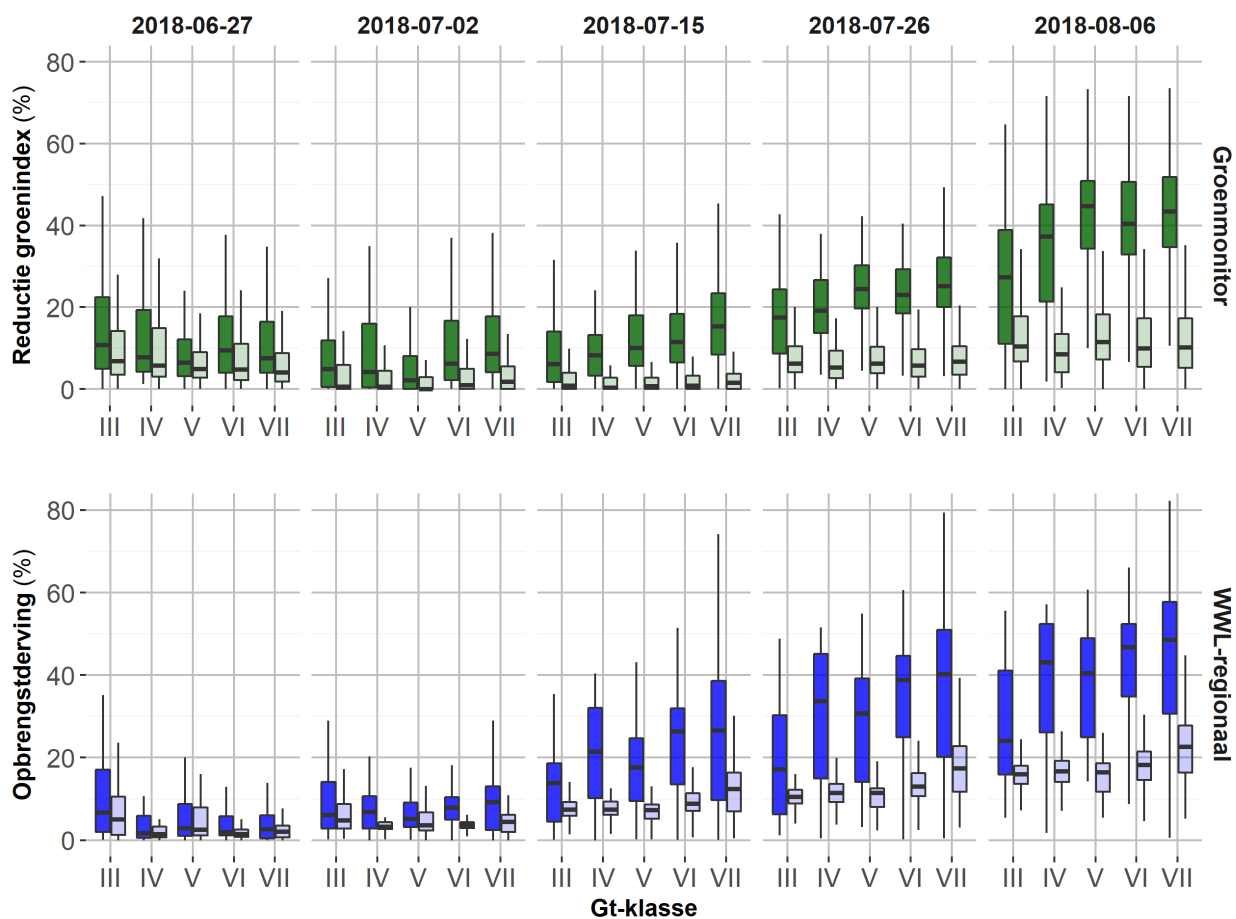


Figuur 4-7 Spreiding in reductie groenindex (Groenmonitor; groen) en gesimuleerde opbrengstderving (WWL-regionaal; blauw) voor alle graspercelen binnen het stroomgebied van De Raam weergegeven met boxplots, waarbij de resultaten zijn uitgesplitst naar wel of geen beregning respectievelijk weergegeven in donkere en lichte kleuren en de hydrologische condities zijn beschreven via grondwatertrappen (Gt-klasse) op de y-as.

Zoals verwacht, stijgt de reductie in groenindex naarmate de droge periode aanhoudt. Ook is er een duidelijk verschil te zien in de reductie van groenindex tussen percelen die wel of niet beregend zijn. Bij percelen die niet beregend zijn, is er daarnaast een duidelijke toename van de reductie te zien indien er sprake is van droge hydrologische condities (Gt VI en Gt VII). Deze toename is bij beregende percelen minder groot.

Bij de modelresultaten van WWL-regionaal is dit gedrag in mindere mate ook zichtbaar. Het verschil tussen beregende en niet-beregende percelen lijkt echter minder groot te zijn en de mate van opbrengstderving lijkt te worden onderschat. Of er daadwerkelijk sprake is van onderschatting, is lastig vast te stellen. Zoals hierboven aangegeven, betreft het een vergelijking van verschillende grootheden (NDVI is niet hetzelfde als gewasopbrengst). Daarnaast speelt mee dat de door het modelinstrumentarium gesimuleerde opbrengstderving betrekking heeft op een cumulatief effect tot dat moment, terwijl de reductie in groenindex een momentopname betreft en daarmee alleen betrekking heeft op een enkele grassnede. Door een gunstig voorjaar (het neerslagtekort tot begin juni 2018 is niet sterk opgelopen, zie Figuur 4-2) mag worden verondersteld dat de hydrologische condities relatief gunstig waren tijdens de eerste grassnede. Dit resulteert daarmee in een lagere cumulatieve opbrengstderving later in het groeiseizoen. Hiermee wordt duidelijk dat management bij grasland een belangrijke rol speelt. Een betere vergelijking zou zijn wanneer de reductie van de groenindex wordt vergeleken met de reductie van de gewasopbrengst van een specifieke grassnede. Wel is er dan informatie nodig wanneer de grassnede is begonnen. Deze informatie is echter niet bekend.

Management speelt in mindere mate een rol bij de gewasontwikkeling van mais. De resultaten voor alle maispercelen zijn weergegeven in Figuur 4-8. De vergelijking tussen de reductie in groenindex en de gesimuleerde reductie in gewasopbrengst komen goed met elkaar overeen. Zowel bij de groenindex als bij de modelresultaten is vanaf 15 juli een duidelijke toename zichtbaar van de reductie.

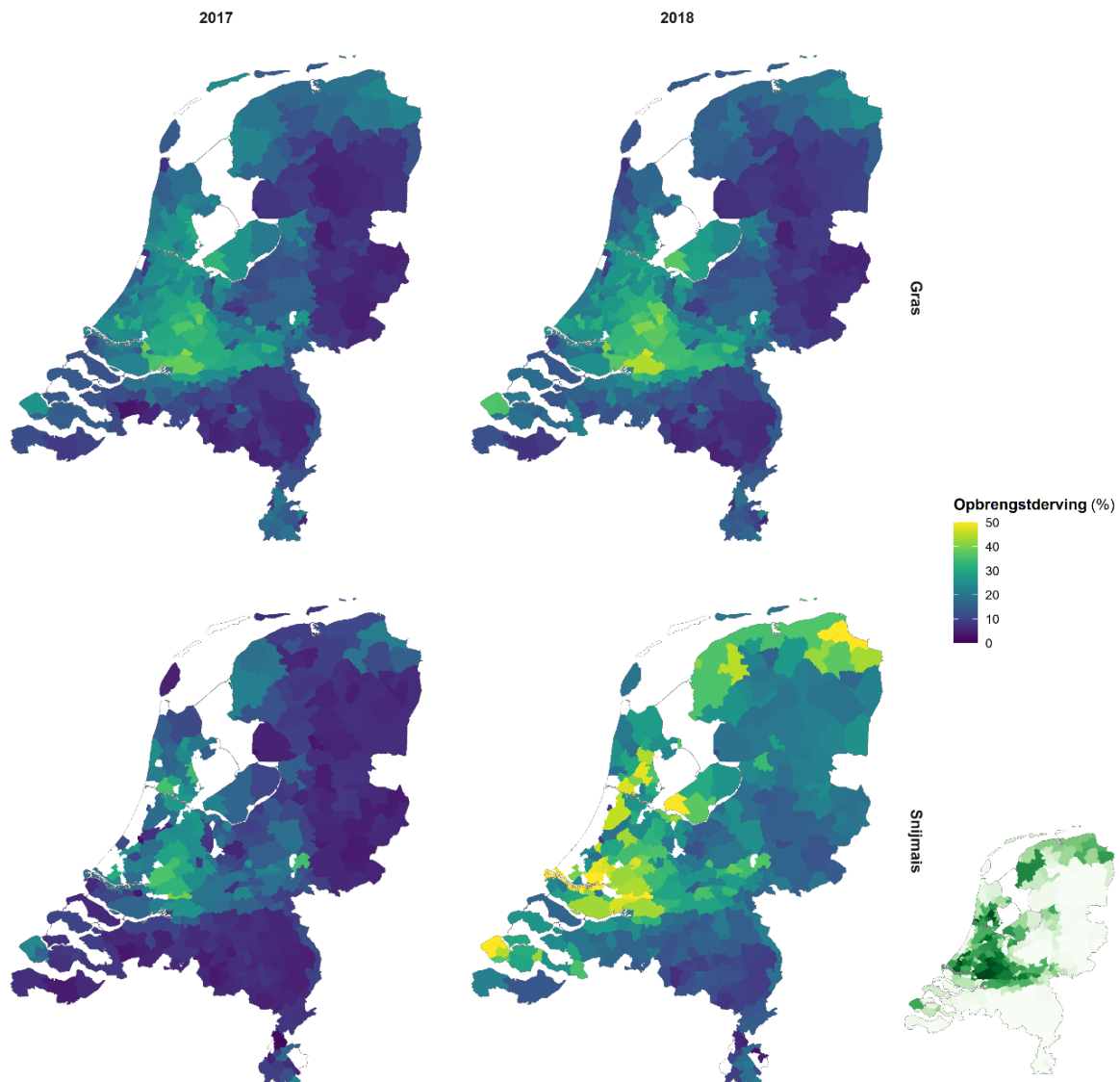


Figuur 4-8 Spreiding in reductie groenindex (Groenmonitor; groen) en gesimuleerde opbrengstderving (WWL-regionaal; blauw) voor alle maispercelen in het stroomgebied van De Raam weergegeven met boxplots, waarbij de resultaten zijn uitgesplitst naar wel of geen berekening respectievelijk weergegeven in donkere en lichte kleuren. De hydrologische condities zijn beschreven via grondwatertrappen (Gt-klasse) op de y-as.

De modelresultaten met betrekking tot de uitsplitsing in hydrologische condities komen ook goed met elkaar overeen. Opvallend is dat bij de eerste momentopname (26 juni) een hogere opbrengstderving wordt gesimuleerd onder nattere hydrologische condities (Gt III). De simulatie van de gewasontwikkeling wordt dan beïnvloed door te natte omstandigheden. Ook bij de Groenmonitor zien we bij deze momentopname een hogere reductie onder natte omstandigheden, hetgeen waarschijnlijk veroorzaakt wordt door een vertraging in het groeiseizoen. Of deze vertraging is veroorzaakt door het later inzaaien als gevolg van te natte omstandigheden of als gevolg van zuurstofstress is niet te achterhalen.

4.3 Landelijke vergelijking Groenmonitor met WWL-tabel

Voor de landelijke vergelijking met de Groenmonitor voeren we met de WWL-tabel een berekening uit waarbij informatie ten behoeve van de aansturing, zoals landgebruik, beregening, bodemtype en de hydrologische condities, is ontleend aan landelijk beschikbare datasets (de gebruikte datasets staan beschreven in Sectie 4.3.1). Voor informatie met betrekking tot meteorologie valt de keuze op een van de vijf hoofdstations (Eelde, De Bilt, De Kooy, Vlissingen of Maastricht). In dit geval hebben we voor elke rekenenheid gekozen voor het dichtstbijzijnde hoofdstation. In Figuur 4-9 zijn de resultaten weergegeven voor de weerjaren 2017 en 2018, waarbij de resultaten zijn uitgesplitst naar type gewas en gemiddeld per gemeente.



Figuur 4-9 Gemiddelde opbrengstderving van alle grasland- en maispercelen per gemeente voor 2017 en 2018 gesimuleerd met de WWL-tabel (versie 3.0.0); het voorkomen van bodemeenheden met zware tot zeer zware klei in het profiel is rechtsonder weergegeven, van weinig voorkomend (lichtgroen) tot veelvoorkomend (donkergroen).

De resultaten van WWL hebben in deze analyse betrekking op de cumulatieve opbrengstderving over een heel groeiseizoen, terwijl de reductie van de groenindex (weergegeven in Figuur 4-5 en Figuur 4-6) betrekking heeft op een kortere periode. Daarnaast betreft het een vergelijking tussen verschillende grootheden, omdat gewasopbrengst en NDVI nu eenmaal niet identiek zijn. Dat neemt niet weg dat er ten opzichte van de Groenmonitor een aantal duidelijke verschillen zichtbaar zijn.

Op bodemeenheden met zware tot zeer zware klei in het bodemprofiel (zie Figuur 4-9 rechtsonder) wordt te veel opbrengstderving gesimuleerd. Dit probleem is reeds eerder geconstateerd (Mulder e.a., 2021a) en is tevens aanleiding geweest om onderzoek te doen naar alternatieve concepten voor simulatie van wateropname en een nieuw concept voor simulatie van adaptieve wortelverdeling (Marius e.a., 2023). De eerste resultaten wijzen erop dat deze alternatieve concepten kunnen leiden tot realistischere modelresultaten.

Een ander opvallend verschil is dat er bij grasland minder opbrengstderving wordt gesimuleerd dan bij mais. In Sectie 4.2 hebben we al geconstateerd dat de periode waarover opbrengstderving bepaald wordt, verschillend doorwerkt voor gras en mais. Gras dat al geoogst is, zal niet meer worden beïnvloed door ongunstige omstandigheden later in het seizoen. Daarnaast spelen de instellingen van de bodemkundig maximale dikte van de wortelzone een belangrijke rol. De dikte van de wortelzone bepaalt voor een groot deel het wateraanbod voor het gewas. Vooral op zandgronden is vaak sprake van een te hoge dichtheid of een te lage pH-waarde dat zorgt voor limitering van de bewortelbare zone, waardoor de maximale dikte van de wortelzone vaak kleiner of gelijk is aan 40 cm (zie Bijlage 0). Het wateraanbod van gras en mais is dan min of meer vergelijkbaar, maar de watervraag van mais zal in de zomermaanden hoger zijn, waardoor de gevoeligheid voor droge omstandigheden groter is. Dit komt tot uiting in de berekende opbrengstderving. Een belangrijke aanbeveling is om de rekenregels voor de bodemkundige limitatie van de wortelzone in WWL te herzien met een betere afhankelijkheid van het type gewas. Het is voorstelbaar dat maiswortels beter in staat zijn om door een verdichte bodemlaag te dringen dan gras.

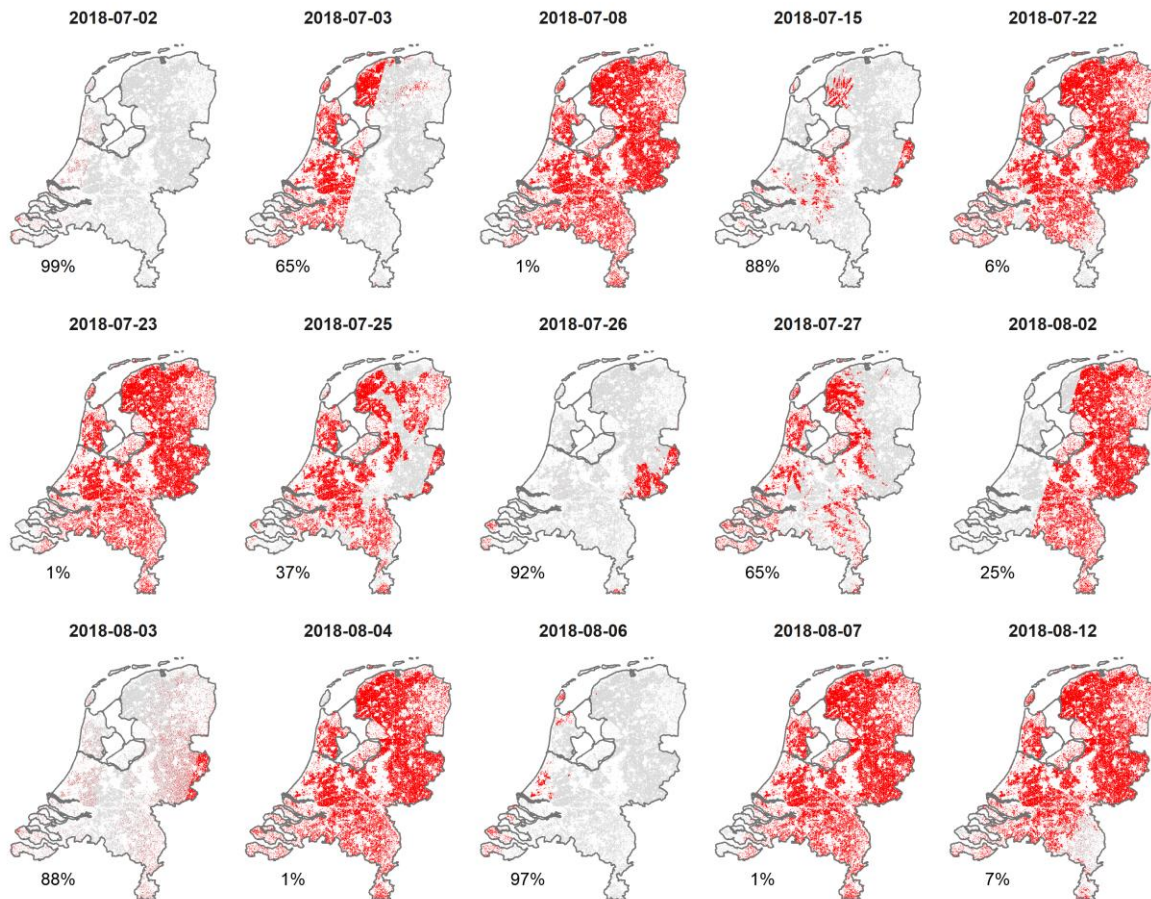
4.3.1 Verklarende variabelen voor ruimtelijke variatie groenindex

Om te achterhalen waardoor de ruimtelijke patronen van de groenindex in augustus 2018 worden veroorzaakt, onderzoeken we in deze studie vijf mogelijk verklarende variabelen:

- landgebruik: Basis Registratie Percelen
- neerslagtekort: weerstations KNMI
- berekening: beregeningskansenkaart voor 2018 (van de Brink e.a., 2022)
- bodemtype: BOFEK 2020 (Heinen e.a., 2021; 2022)
- hydrologische condities: WDM (Knotters e.a., 2022)

Hieronder gaan we kort in op de verschillende variabelen, waarbij elke variabele wordt uitgezet tegenover de perceelgemiddelde NDVI-waarde van alle gras- en maispercelen in Nederland. Zo krijgen we een beeld van het voorspellend vermogen van de betreffende variabele. Daarnaast zijn er tal van andere variabelen die een mogelijke rol spelen, maar waarvan niet direct ruimtelijk informatie beschikbaar is. Denk bijvoorbeeld aan botanische samenstelling van het grasland of verschillende gewasvariëteiten en aan de beschikbaarheid van voedingsstoffen.

Gedurende het groeiseizoen van 2018 zijn er verschillende NDVI-beelden beschikbaar die afkomstig zijn van verschillende satellietbronnen (Landsat-8, Sentinel 2A en B). De bewerking van de satellietbronnen tot NDVI-beelden verschillen onderling, doordat de satellietbronnen een andere resolutie hebben en er een andere methodiek wordt gehanteerd voor atmosferische correctie. Daarnaast is de ruimtelijke dekking van de NDVI-beelden afhankelijk van de bewolgingsgraad, zie Figuur 4-10. Het middelen van verschillende NDVI-beelden kan dan tot variantie leiden die op basis van de verklarende variabelen niet verklaard kan worden. In deze studie gebruiken we daarom alleen het NDVI-beeld van 6 augustus 2018 vanwege de hoge dekkingsgraad en het moment in het groeiseizoen (aan het einde van een droge periode waarbij onder gunstige omstandigheden een optimale groenindex verwacht mag worden bij snijmais).



Figuur 4-10 Landelijke dekking NDVI-waarde voor alle gras- en maispercelen in Nederland; rood geeft aan dat er geen observatie beschikbaar is (bron: *Groenmonitor*).

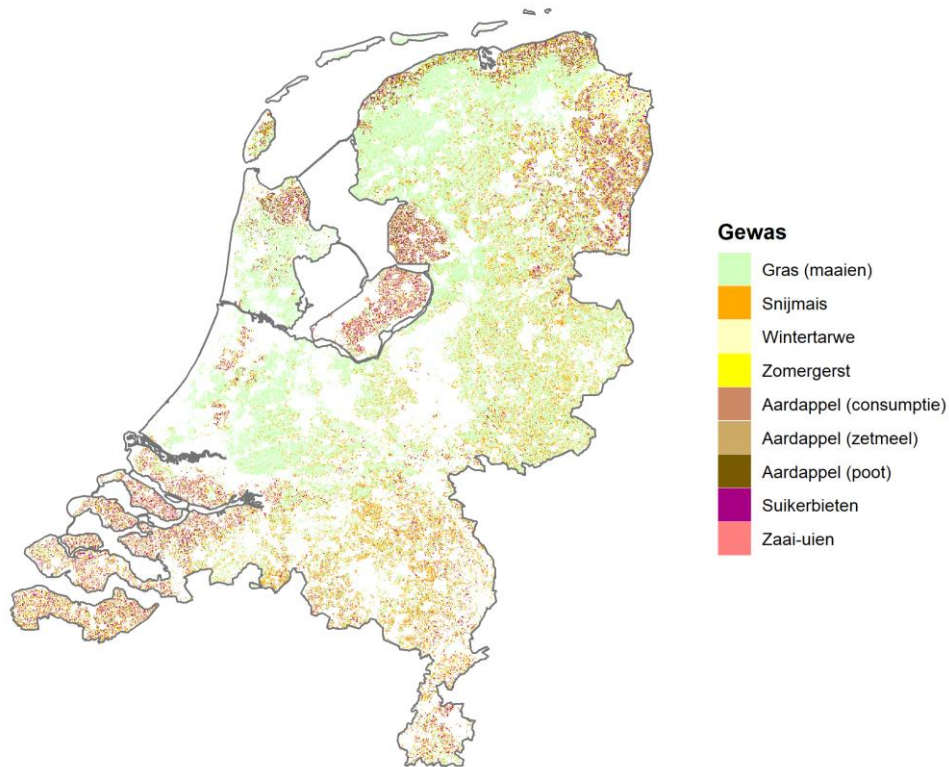
Landgebruik

Informatie met betrekking tot het landgebruik is ontleend aan de BRP - Gewaspercelen.¹⁵ De BRP - Gewaspercelen bestaat uit de locatie van landbouwpercelen in Nederland met daaraan gekoppeld het geteelde gewas. Het bestand is een selectie van informatie uit de Basisregistratie Percelen (BRP) van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

De omgrenzingen van de landbouwpercelen zijn gebaseerd op de begrenzings uit het RVO Referentieregister. De gebruiker van het perceel dient jaarlijks zijn gewaspercelen in te tekenen en aan te geven welk gewas wordt geteeld op het betreffende perceel. Van elk jaar wordt een dataset gegenereerd van peildatum 15 mei. De variatie in geteelde gewassen is groter dan het aantal gehanteerde landgebruiksvormen in de modelberekeningen. We werken daarom met zogenaamde gidsgewassen: een gewas dat representatief wordt geacht voor een grotere groep gewassen, zie Figuur 4-11.

In Figuur 4-5 en Figuur 4-6 hebben we al kunnen zien dat de patronen van de groenindex in augustus 2018 voor grasland en snijmais min of meer vergelijkbaar zijn, maar ook dat snijmais een hogere groenindex heeft dan grasland.

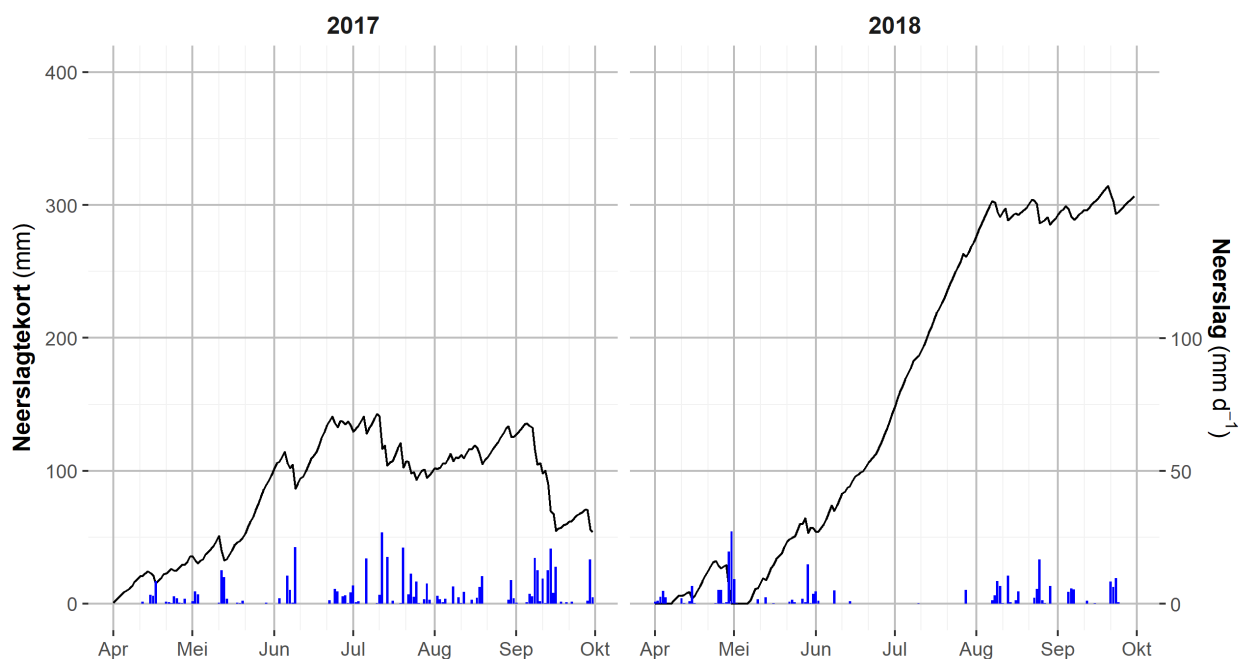
¹⁵ <https://data.overheid.nl/dataset/10674-basisregistratie-gewaspercelen--brp->



Figuur 4-11 Landgebruik in 2018 (bron: BRP).

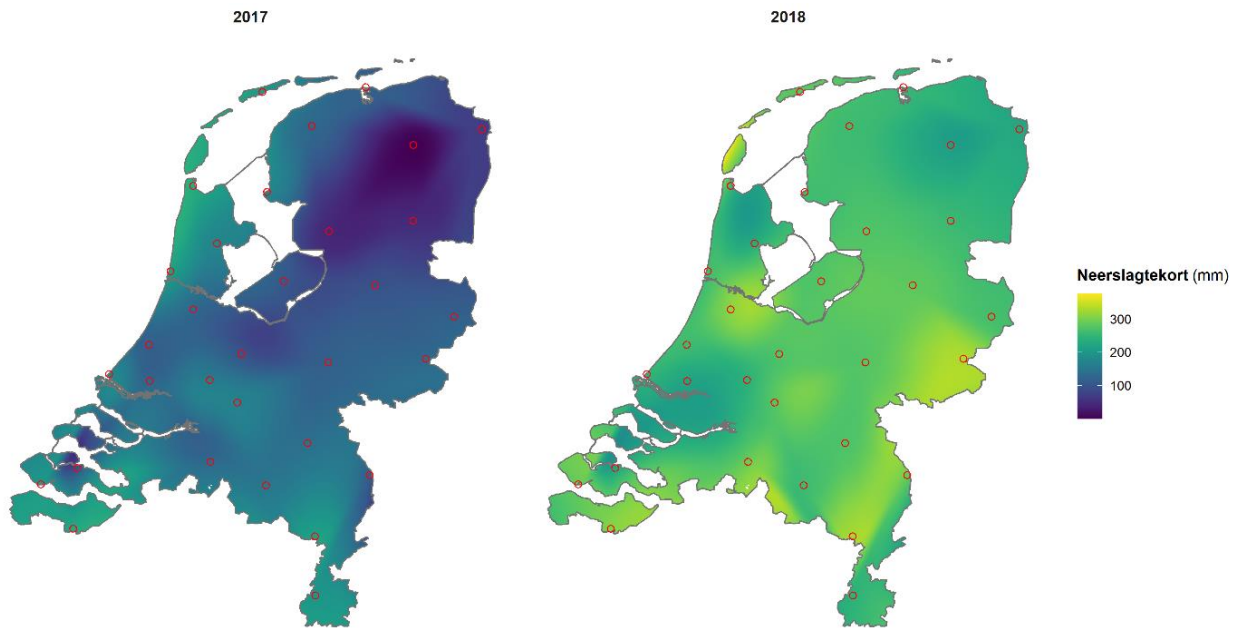
Neerslagtekort

De gemiddelde groenindex wijkt in augustus 2018 af van het jaar ervoor. Een duidelijke verklaring hiervoor is het neerslagtekort in 2018 (gedefinieerd als de cumulatieve referentieverdamping vanaf 1 april volgens Makkink (1957) minus de neerslag). Kijken we bijvoorbeeld naar het neerslagtekort gemeten bij het weerstation De Bilt dan zien we dat het neerslagtekort in 2018 tot augustus hoog oploopt in vergelijking met 2017, zie Figuur 4-12.



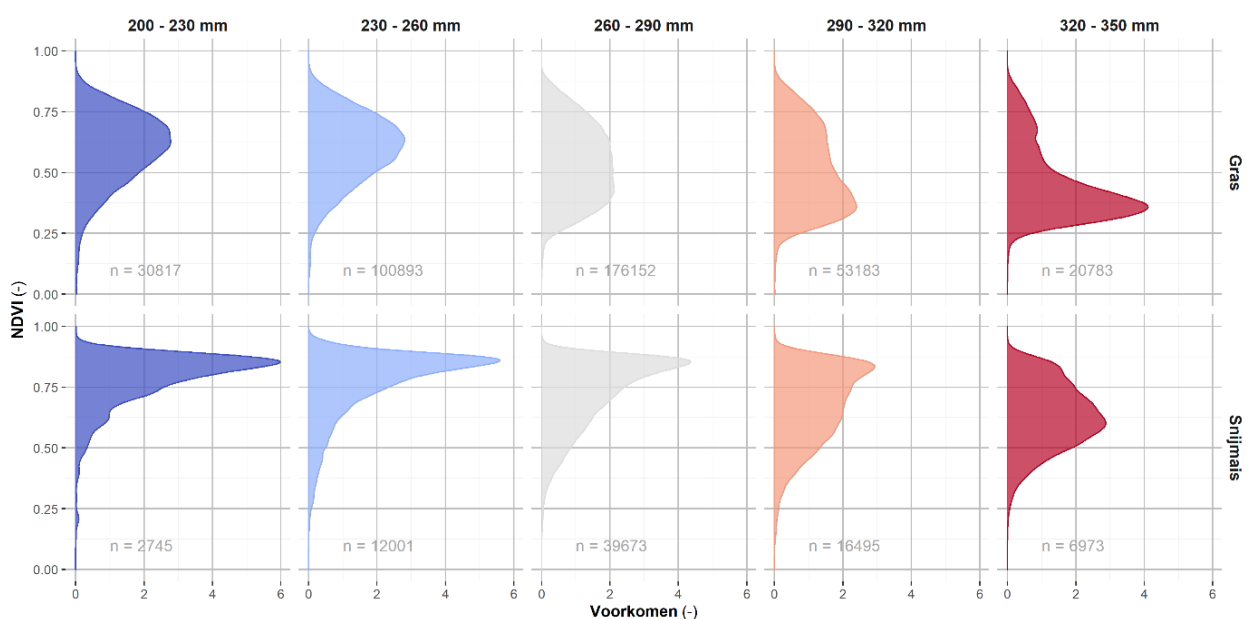
Figuur 4-12 Neerslagtekort vanaf 1 april voor het weerstation De Bilt in 2017 en 2018 (bron: KNMI).

Voor een mogelijke verklaring van de variatie in ruimtelijke patronen is in Figuur 4-13 een landelijk beeld gepresenteerd van het neerslagtekort eind juli 2017 en 2018. Hiervoor zijn de meteorologische gegevens met betrekking tot de referentieverdamping en de neerslag gedownload van alle weerstations en vervolgens geïnterpoleerd volgens de methode van Renka en Brown (1998).



Figuur 4-13 Neerslagtekort eind juli 2017 en 2018; in het rood zijn de locaties van de weerstations weergegeven (bron: [KNMI](#)).

De geïnterpoleerde kaartlaag geeft een indicatie van het neerslagtekort op een willekeurige locatie in Nederland. Daarmee is het mogelijk om een overzicht te genereren hoe het neerslagtekort doorwerkt in de gemiddelde NDVI-waarde per perceel. Dat is gedaan in Figuur 4-14 waarbij de groenindex bepaald op 6 augustus 2018 van alle gras- en maispercelen is uitgezet tegenover het neerslagtekort. Bij beide gewassen is te zien dat de groenindex een dalende trend laat zien naarmate het neerslagtekort oploopt. Bij gras is een duidelijke neergaande trend zichtbaar vanaf een neerslagtekort van 260-290 mm. Deze neergaande trend lijkt bij mais later ingezet te worden dan bij gras (290-320 mm).



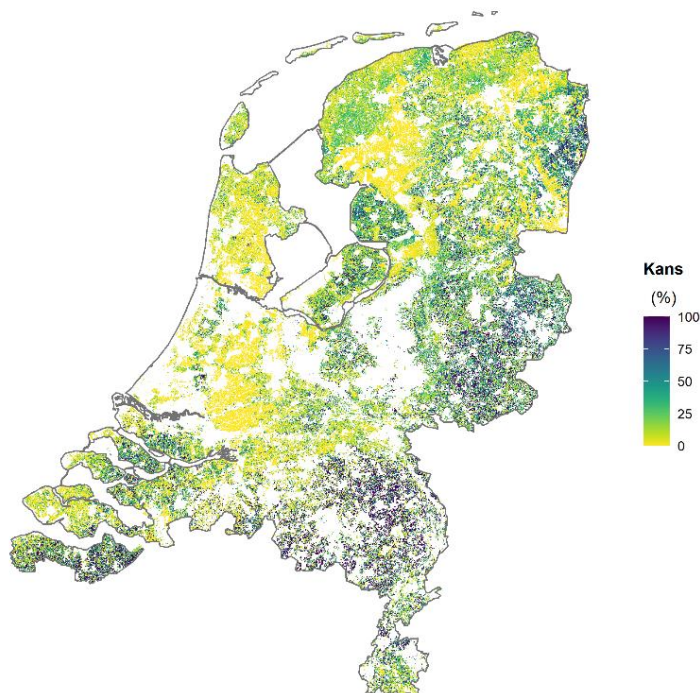
Figuur 4-14 Voorkomen van alle gras- en maispercelen waarbij het neerslagtekort is uitgezet tegen de NDVI-waarde van 6 augustus; het gekleurde oppervlak is telkens gelijk aan 1.

De spreiding in de NDVI-waarde per klasse neerslagtekort is vrij groot. Mogelijk dat de interpolatie van de meteorologische condities tot landelijke beelden van neerslagtekort te grof is. Het gebruik van dag-neerslagstations levert wellicht een beter verband op, maar dat is in deze studie niet verder onderzocht.

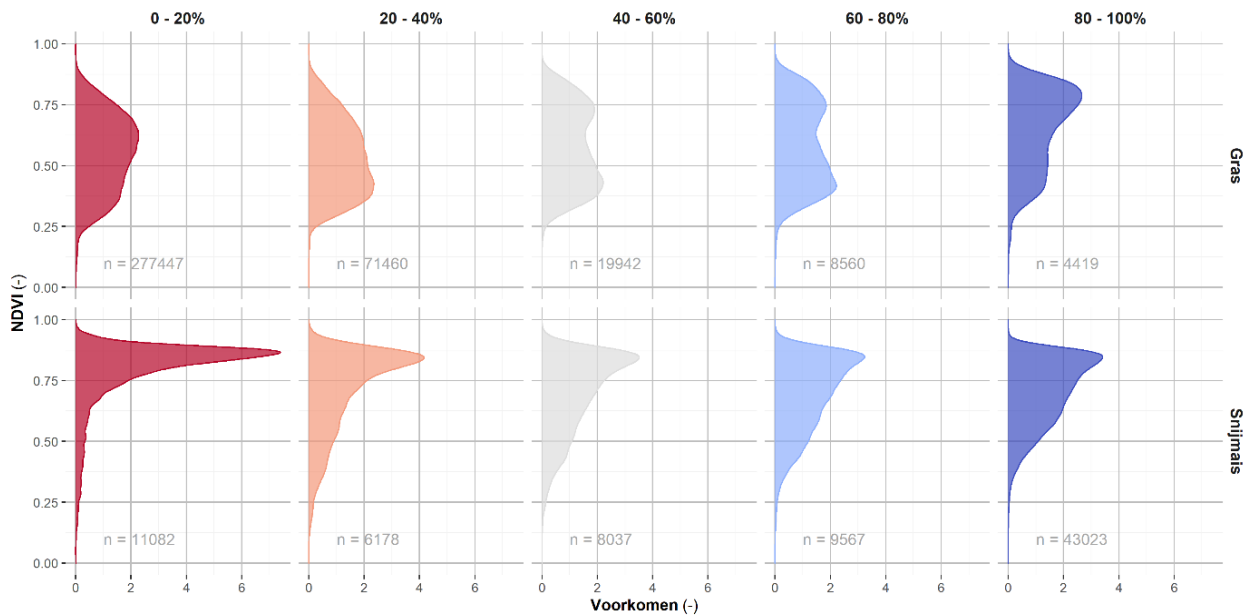
Beregening

Beregening van landbouwpercelen wordt in Nederland niet structureel geregistreerd: noch de hoeveelheden, noch de locaties. In opdracht van STOWA en de ESA hebben eLEAF en HydroLogic een potentiële beregeningskaart opgesteld voor het jaar 2018 (Van de Brink e.a., 2022). De beregeningskaart geeft per perceel een kans weer dat dit perceel tijdens het groeiseizoen van 2018 is beregend, zie Figuur 4-15.

In Figuur 4-16 is de NDVI-waarde van alle gras- en maispercelen bepaald op 6 augustus 2018 uitgezet tegenover de beregeningskans. Bij graspercelen is een stijging in de groenindex te zien naarmate de beregeningskans toeneemt. Tegelijkertijd is er op slechts 1% van alle graslandpercelen met enige zekerheid te zeggen dat er beregening heeft plaatsgevonden. Bij maispercelen zien we opvallend genoeg juist een dalende trend in de groenindex naarmate de beregeningskans toeneemt. Dat kan wellicht te maken hebben met het gegeven dat beregening bij mais vooral tijdens de ontkieming en bloeifase plaatsvindt om de gewasontwikkeling te bevorderen, maar dat er minder snel tot beregening wordt overgegaan om droogtestress te voorkomen. Op meer dan de helft van alle maispercelen in Nederland (55%) geeft de beregeningskanskaart aan dat er met enige zekerheid wordt beregend.



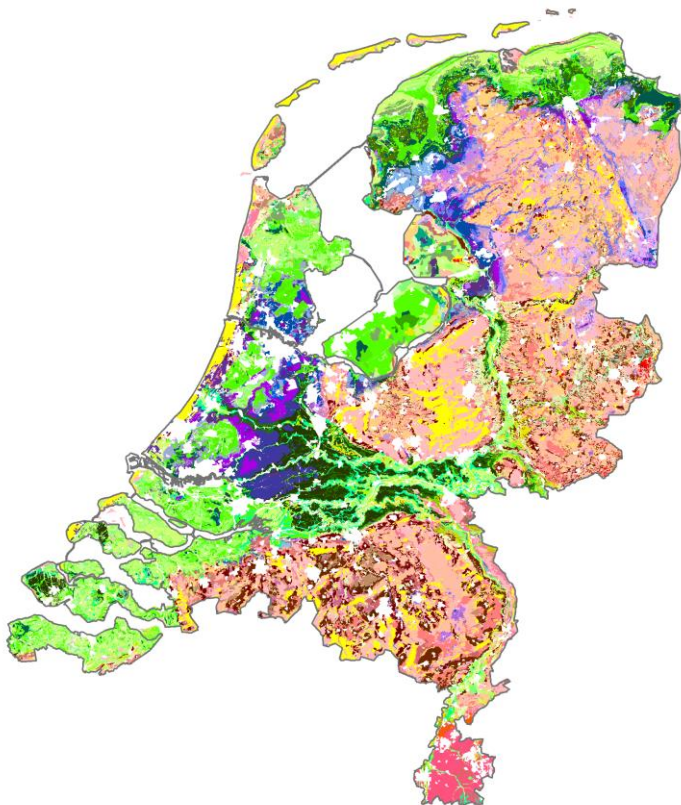
Figuur 4-15 Kans op beregening in 2018 (bron: Van de Brink e.a., 2022).



Figuur 4-16 Voorkomen van alle gras- en maispercelen waarbij de beregeningskans is uitgezet tegen de NDVI-waarde van 6 augustus; het gekleurde oppervlak is telkens gelijk aan 1.

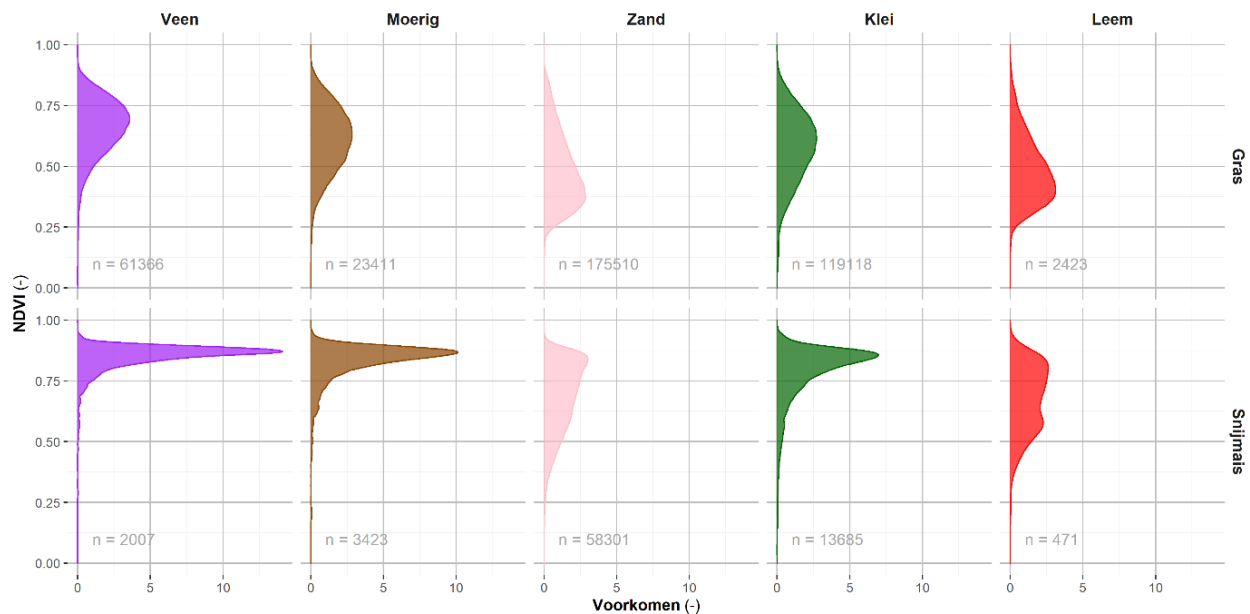
Bodemtype

De invoer voor bodemtype is afkomstig van de Bodemfysische Eenhedenkaart van Nederland: [BOFEK2020](#) (Heinen e.a., 2021; 2022), zie Figuur 4-17. BOFEK2020 is een GIS-bestand van bodemfysische eenheden. Dit zijn gebieden met een overeenkomstig bodemfysisch gedrag (zie Sectie 2.4 voor toelichting).



Figuur 4-17 Bodemfysische eenhedenkaart van Nederland; [BOFEK2020](#) (Heinen e.a., 2022).

Wanneer we de NDVI-waarde van alle gras- en maispercelen bepaald op 6 augustus 2018 uitzetten tegenover de vijf hoofdgroepen van bodems in Nederland, dan zien we dat vooral bij zand- en leemgronden een sterkere reductie van de groenindex (zie Figuur 4-18).



Figuur 4-18 Voorkomen van alle gras- en maispercelen waarbij het bodemtype is uitgezet tegen de NDVI-waarde van 6 augustus; het gekleurde oppervlak is telkens gelijk aan 1.

Hydrologische condities

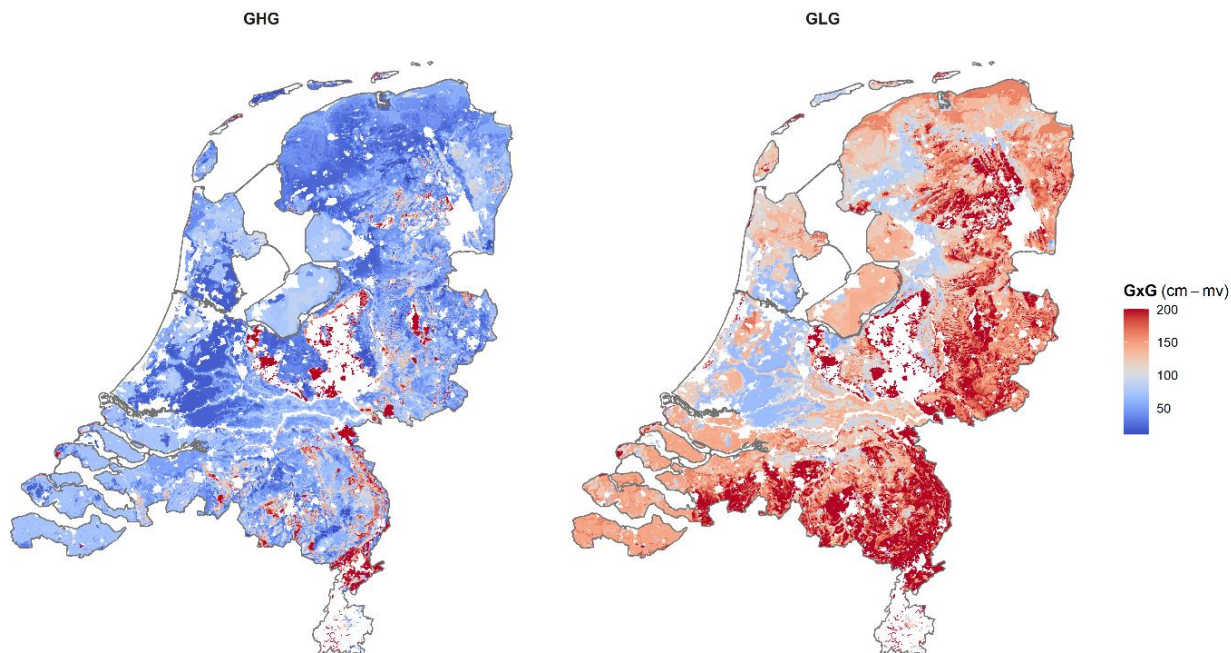
Invoer over de verticale afstand van het maaiveld tot de grondwaterspiegel is belangrijk voor het beoordelen van de bodemgeschiktheid voor de teelt van gewassen. Deze invoer is afkomstig van het Model Grondwaterspiegeldiepte: WDM¹⁶ (Knotters e.a., 2022). Het WDM geeft weer tussen welke dieptes ten opzichte van het maaiveld de grondwaterspiegel jaarlijks gemiddeld genomen fluctueert. Het model geeft langjarige gemiddelden van de kleinste grondwaterspiegeldiepte (GHG) en de grootste grondwaterspiegeldiepte (GLG) voor rastercellen van 50 bij 50 m. Het WDM is onderdeel van de Basisregistratie Ondergrond (BRO).¹⁷

Het WDM is gebaseerd op metingen van de grondwaterstand in peilbuizen, een groot aantal aanvullende metingen in tijdelijke boorgaten (de zogenaamde 'gerichte opnames') en een aantal GIS-lagen, zoals maaiveldhoogte en bodemkaart. Het WDM voor Noord-Brabant is grotendeels ontwikkeld rond het jaar 2000. De GHG en GLG zijn geconditioneerd op het klimaat (30 jaar), zodat ze minder afhankelijk zijn van situaties met extreem weer.

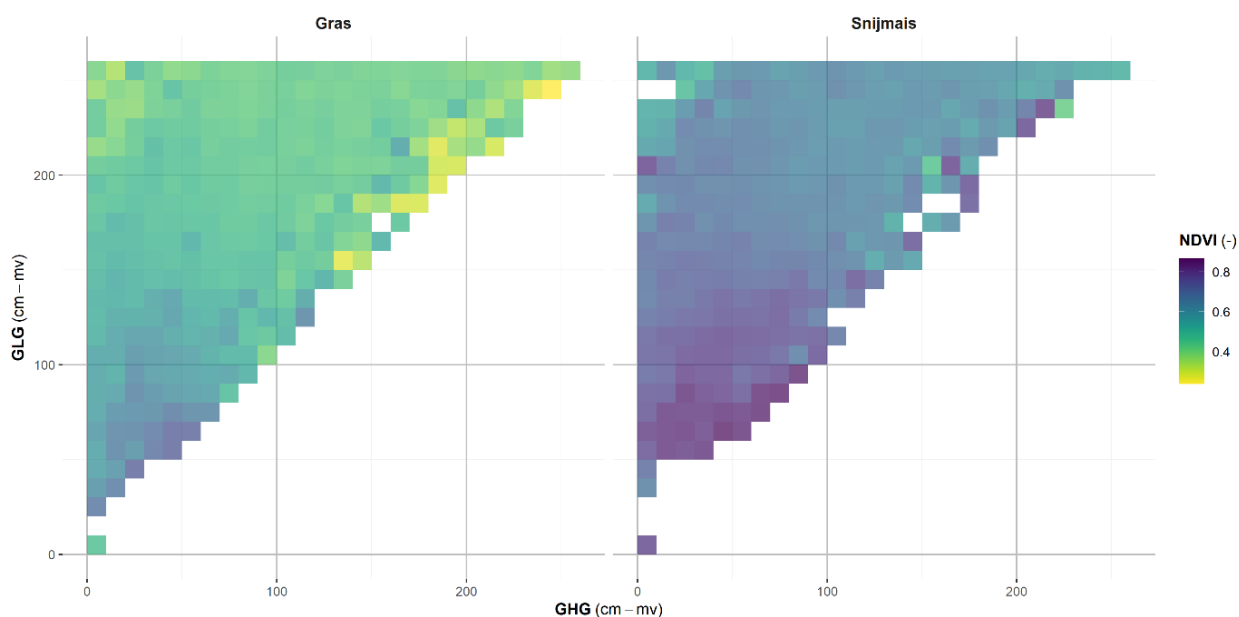
In deze studie maken we gebruik van de mediane waarden voor GHG en GLG, zie Figuur 4-19. Wanneer we deze informatie combineren met de perceelgemiddelde NDVI-waarde van 6 augustus 2018, zien we zowel bij de graspercelen als bij maispercelen een duidelijk afnemende trend in de groenindex naarmate de hydrologische condities droger worden, zie Figuur 4-20.

¹⁶ <https://basisregistratieondergrond.nl/inhoud-bro/registratieobjecten/modellen/model-grondwaterspiegeldiepte-wdm/>

¹⁷ <https://www.broloket.nl/ondergrondmodellen>



Figuur 4-19 Mediane waarden voor GHG en GLG (WDM) (Knotters e.a., 2022).



Figuur 4-20 Gemiddelde NDVI-waarde van 6 augustus 2018 onder verschillende hydrologische omstandigheden; uitgesplitst naar gras- en maispercelen.

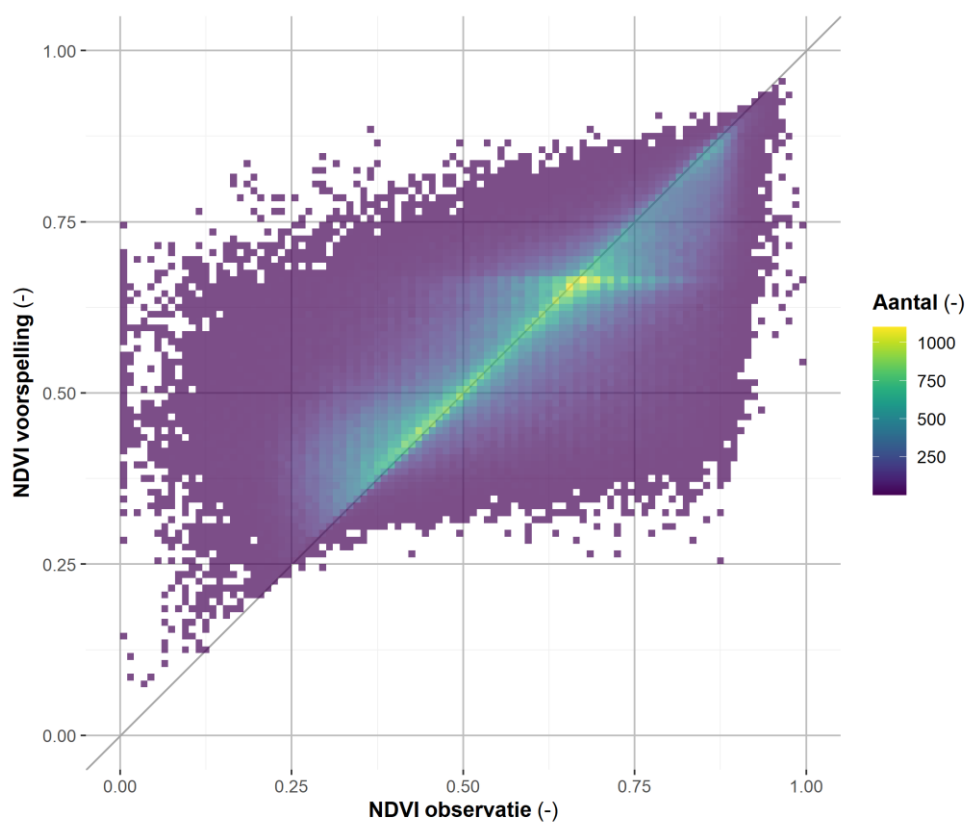
4.3.2 Verklaring ruimtelijke variatie groenindex

Hierboven hebben we gezien dat elk van de afzonderlijke variabelen in meer of mindere mate de patronen van de groenindex op 6 augustus 2018 beïnvloeden. De vraag is nu hoe goed de variabelen gezamenlijk deze patronen kunnen voorspellen. Als model gebruiken we hiervoor een 'random forest'-model (Breiman, 2001). Bij dit model wordt als het ware een heel 'bos' (forest) aan beslisbomen (regression trees) afgeleid, die samen de groenindex voorspellen ('ensemble modelling'). Dit type model staat bekend om zijn goede voorspelkracht.

Voor het voorspellen van de NDVI-waarde met het 'random forest'-model maken we eerst een database aan. Als basis gebruiken we hiervoor het percelenbestand van 2018 waarvoor het type gewas al bekend is. Informatie met betrekking tot het neerslagtekort, de beregeningskans, het bodemtype en de hydrologische condities worden in eerste instantie geschaald naar kaartlagen met een resolutie van 50 m. Vervolgens wordt per perceel de dominante BOFEK-eenheid bepaald en gemiddelde waarden voor de overige variabelen. Via deze werkwijze beschikken we over een database met alle gras- en maispercelen waarvoor de NDVI-waarde op 6 augustus 2018 beschikbaar is, met daaraan gekoppeld informatie van de verklarende variabelen. In totaal bevat de database 459715 waarnemingen. Vervolgens proberen we met behulp van deze database de groenindex te voorspellen met behulp van de volgende formule:

$$NDVI = f(\alpha_{neerslagtekort}, \alpha_{bereggeningskans}, \alpha_{BOFEK}, \alpha_{GHG}, \alpha_{GLG}) \quad (4.1)$$

Met dit model wordt 46% van de variantie in de groenindex op 6 augustus 2018 verklaard, zie Figuur 4-21. Hieruit kunnen we concluderen dat de gewasontwikkeling voor een belangrijk deel afhankelijk is van het neerslagtekort, beregening, bodemtype en de hydrologische condities, hetgeen ook de verklarende variabelen zijn waarmee we de opbrengstderving voorspellen in Waterwijzer Landbouw.



Figuur 4-21 Geobserveerde en voorspelde NDVI-waarde van 6 augustus 2018.

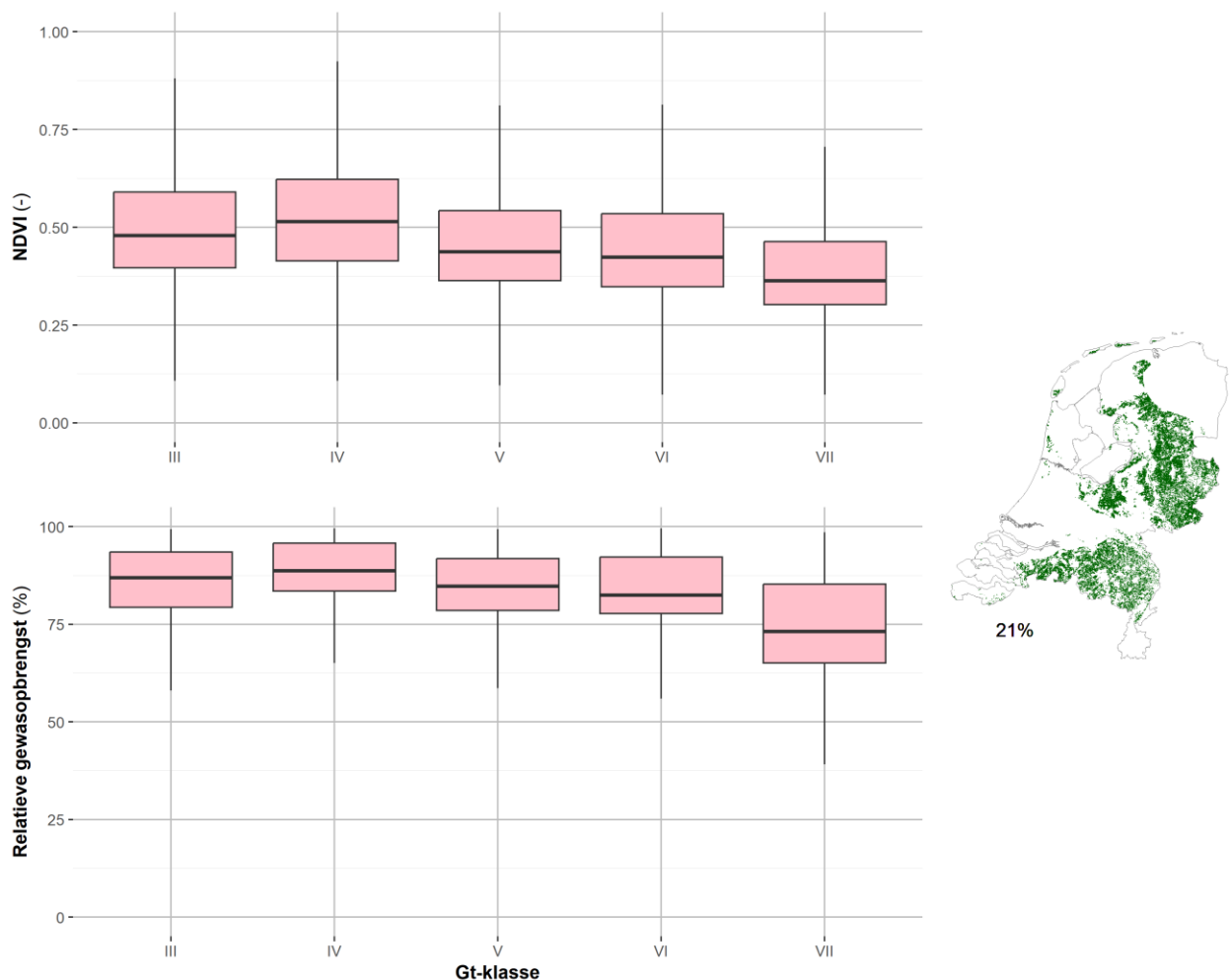
Tegelijkertijd constateren we ook dat iets meer dan de helft van de variantie niet kan worden verklaard. Dat komt enerzijds omdat we geen rekening houden met opbrengstderving als gevolg van te zoute omstandigheden, ziekten en plagen of limitatie van voedingsstoffen. Anderzijds speelt mee dat de verklarende variabelen, zoals in deze studie gehanteerd, gepaard gaan met onzekerheid. Mogelijk dat met het hanteren van andere informatiebronnen meer van de variantie in de groenindex kan worden verklaard.

4.3.3 Vergelijking Groenmonitor

De database beschreven in Sectie 4.3.2 gebruiken we ook voor de vergelijking met de opbrengstderving in 2018 berekend met de WWL-tabel. De eigenschappen die gekoppeld zijn aan de percelen bepalen de aansturing van de WWL-tabel. Uitzondering hierop is het neerslagtekort en de beregeningskans, want deze

zijn geen invoer voor de WWL-tabel. Informatie over neerslagtekort wordt indirect bepaald aan de hand van meteorologische condities afkomstig van weerstations. Voor de aansturing van de WWL-tabel hebben we in dit geval gekozen voor het dichtstbijzijnde hoofdstation (Eelde, De Bilt, De Kooy, Vlissingen of Maastricht). Bij de aansturing van de WWL-tabel kan alleen gekozen worden of een perceel wel of niet is beregend. De beregeningskanskaart moet dus worden omgezet in een binaire kaart. Het bepalen van een grenswaarde wanneer een perceel wel of niet is beregend, is echter zeer lastig (Van de Brink e.a., 2022). In deze studie gaan we ervan uit dat er bij een beregeningskans groter dan 25% sprake is van beregening.

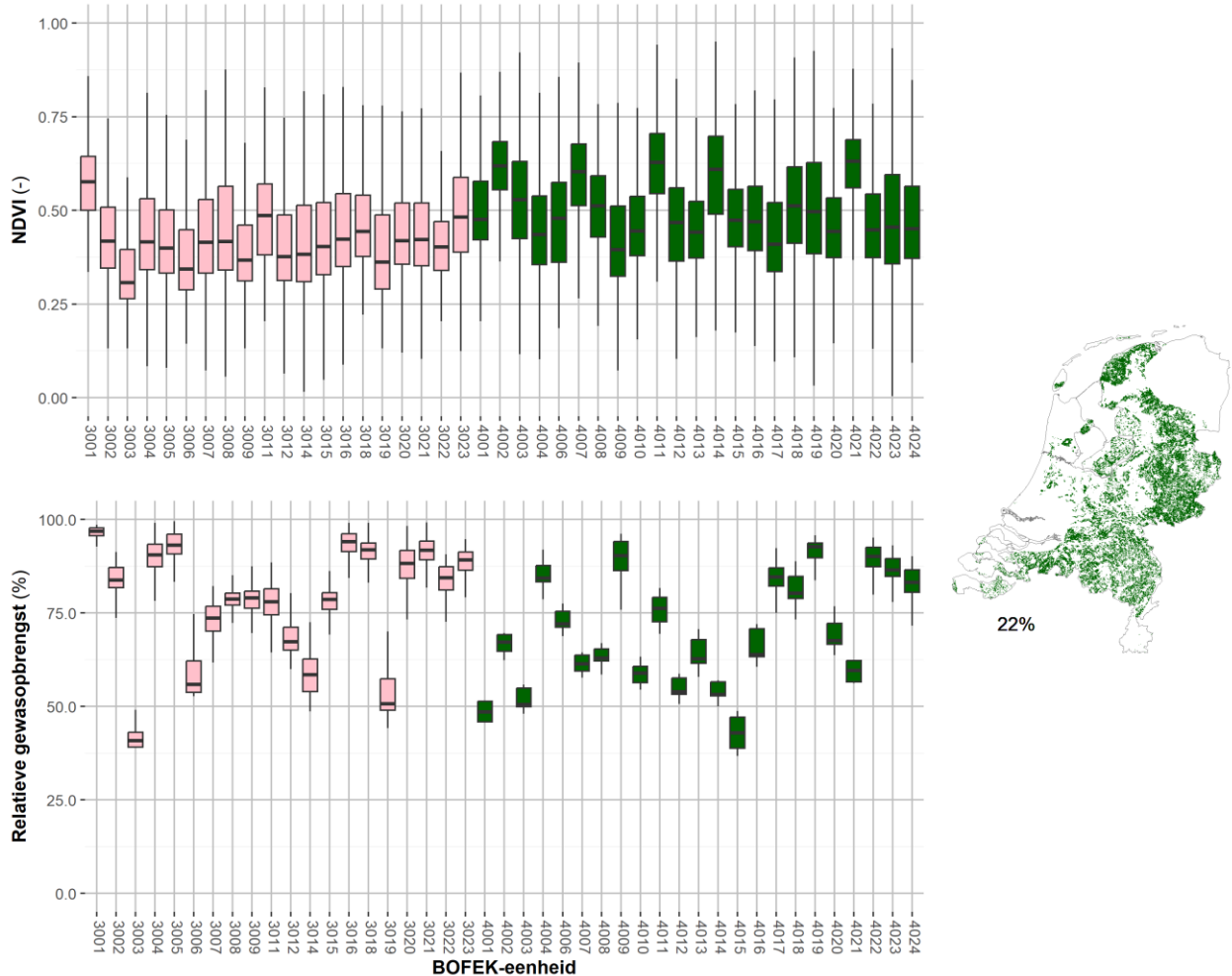
Op basis van deze database kunnen we bepaalde selecties maken. Bijvoorbeeld een selectie van alle graslandpercelen op zandgronden met een gemiddeld neerslagtekort groter dan 250 mm en een beregeningskans lager dan 25%. In Figuur 4-22 is deze selectie uitgevoerd waarbij de spreiding in NDVI-waarden en de gesimuleerde relatieve gewasopbrengst zijn weergegeven met boxplots uitgesplitst naar Gt-klasse.



Figuur 4-22 Spreiding in de geobserveerde NDVI-waarde op 6 augustus 2018 (boven) en met de WWL-tabel (versie 3.0.0) gesimuleerde relatieve gewasopbrengst voor 2018 (onder) voor graspercelen op zandgronden waarbij het neerslagtekort groter is dan 250 mm en een beregeningskans kleiner dan 25%; percelen die aan de selectie voldoen, zijn in het groen weergegeven (rechts).

Zo op het eerste oog komen de resultaten goed overeen. Vanaf Gt IV tot en met Gt VII is zowel een neergaande trend zichtbaar in de geobserveerde NDVI-waarde als bij de gesimuleerde relatieve gewasopbrengst van de WWL-tabel. Wel is de reductie in de NDVI-waarde groter dan de reductie in de relatieve gewasopbrengst. Zoals geconstateerd in Sectie 4.2 komt dit doordat de vergelijking betrekking heeft op een andere periode (momentopname van NDVI versus het resultaat van een doorgerekend groeiseizoen tot dat moment).

Om een beeld te krijgen hoe verschillende bodemeenheden zich tot elkaar verhouden, is het ook mogelijk een selectie te maken van alle graslandpercelen onder relatief droge omstandigheden (Gt VI en VII) met een gemiddeld neerslagtekort groter dan 250 mm en een beregeningskans lager dan 25%, zie Figuur 4-23.



Figuur 4-23 Spreiding in de geobserveerde NDVI-waarde op 6 augustus 2018 (boven) en met de WWL-tabel (versie 3.0.0) gesimuleerde opbrengstderving voor 2018 (onder) voor graspercelen op zand- en kleigronden waarbij het neerslagtekort groter is dan 250 mm en een beregeningskans kleiner dan 25%; percelen die aan selectie voldoen zijn in het groen weergegeven (rechts).

Op basis van deze vergelijking moeten we constateren dat de resultaten niet goed overeenkomen. Het valt op dat de resultaten van WWL sterk afhankelijk zijn van de bodemeenheden wat bij de groenindex veel minder tot uiting komt, hoewel ook de groenindex een grote spreiding laat zien. Zoals in Sectie 4.3.2 is aangegeven, kan deze grote spreiding worden veroorzaakt doordat we geen rekening houden met alle processen die de opbrengstderving beïnvloeden (te zoute omstandigheden, ziekten en plagen, etc.). Ook speelt mee dat de gehanteerde informatiebronnen, zoals de bodemkaart, gepaard gaan met onzekerheid. Daarnaast valt op dat de reductie in groenindex op kleigronden iets minder groot is in vergelijking met de zandgronden. Bij de gesimuleerde opbrengstderving zien we dat niet terug.

De aanbevelingen die zijn gemaakt op basis van de visuele vergelijking aan het begin van dit hoofdstuk zijn ook van hier toepassing. Het is interessant om te analyseren hoe de gesimuleerde gewasopbrengst gaat veranderen indien gebruik wordt gemaakt van microscopische wateropname (Heinen e.a., 2023). Daarnaast is het interessant om te onderzoeken hoe de bewortelbare zone beter kan worden ingeschat voor de berekeningen.

Bovenstaande analyse is gedaan voor graslandpercelen. Een vergelijkbare selectieprocedure kunnen we ook maken voor alle maispercelen. Maar omdat het overgrote deel van de maispercelen waarschijnlijk wordt beregend (beregeningkans groter dan 25%), blijven te weinig percelen over om de vergelijking te maken.

5 Conclusies en aanbevelingen

Modellen zijn altijd een benadering van de werkelijkheid. Om te weten hoe bruikbaar simulatiemodellen zijn, is toetsing en validatie nodig. De uitdaging voor Waterwijzer Landbouw (WWL), dat gebaseerd is op de modellen SWAP en WOFOST, is dat data nodig zijn om zowel hydrologie als gewasgroei (bij voorkeur gelijktijdig) te kunnen toetsen. De onderliggende modellen zijn in het verleden met enige regelmaat getest. Dit betrof zowel beide modellen apart als de combinatie van deze twee modellen. Een overzicht van toetsen die hebben plaatsgevonden, is weergegeven in hoofdstuk 1 van dit rapport en wordt bijgehouden op de [Waterwijzer Landbouw-website](#).¹⁸ Deze studie richt zich op een vergelijking met de HELP-tabel, lokale validatie aan de hand van proefveldgegevens en een regionale vergelijking met metingen van de groenindex.

5.1 Vergelijking HELP-tabel

In 2018 is de WWL gelanceerd als opvolger van de HELP-methodiek, TCGG-tabellen en Waternood, om het effect van hydrologische omstandigheden op landbouwproductie te bepalen. Omdat deze effectmodules veelvuldig werden toegepast bij schadeberekeringen, is het van belang om te weten in hoeverre de modelresultaten onderling verschillen. Vanwege de verschillen in aanpak en uitgangspunten tussen de methoden zijn er verschillen in modelresultaten te verwachten. Omdat we niet meer beschikken over de simulatiemodellen waarmee de opbrengstderving van de HELP-tabel is berekend, is het feitelijk niet mogelijk om de verschillen in modelresultaten te verklaren. Wel is het mogelijk om op basis van gevoeligheidsanalyses, uitgevoerd met het SWAP-WOFOST-modelinstrumentarium, een indicatie te krijgen in welke orde en richting de modelresultaten veranderen indien de modelaansturing wordt aangepast.

In dit onderzoek zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd waarbij is gekeken naar de verandering van meteorologische condities en naar de duur van het groeiseizoen. Ten opzichte van de klimaatperiode 1956-1986 waarop de HELP-tabel is gebaseerd, zien we in de periode 1981-2020 een toename in de hoeveelheid neerslag, gemiddelde temperatuur en zonnestraling. Als gevolg van de verandering in meteorologische condities zien we een toename in de gesimuleerde opbrengstderving. Voor de HELP-tabel is gerekend met een vast groeiseizoen van 1 april tot 1 oktober. De simulatie van de opbrengstderving neemt af wanneer wordt overgegaan op een flexibel (en veelal langer) groeiseizoen dat gebaseerd is op meteorologische condities.

Bij ruimtelijke toepassingen van de WWL-tabel en de HELP-tabel kan het voorkomen dat modelresultaten van verschillende bodemtypen met elkaar worden vergeleken. De WWL-tabel en de HELP-tabel geven de opbouw en samenstelling van de bodem op verschillende manieren weer. Voor bodemeenheden van de Bodemkaart van Nederland kan een vertaling worden gemaakt naar zowel bodemtypen zoals gebruikt in de WWL-tabel als naar bodemtypen gebruikt in de HELP-tabel. Dit geeft verschillende bodemtypen voor de twee methoden. Bij regionale studies kan het daardoor voorkomen dat één bodemtype van de WWL-tabel wordt vergeleken met verschillende bodemtypen van de HELP-tabel, en andersom. Dit kan tot grote verschillen leiden in modelresultaten en zorgt er eigenlijk voor dat vergelijking op regionale schaal niet mogelijk is. Als we ons richten op de totstandkoming van de clustering van bodemprofielen, dan is het aannemelijk om te veronderstellen dat een clustering op basis van bodemfysische eigenschappen, zoals gehanteerd is bij BOFEK2020, beter is voor het berekenen van effecten van hydrologie op gewasgroei dan een clustering op basis van een bodemcode.

Zowel de WWL-tabel als de HELP-tabel geeft aan welk aandeel van de opbrengstderving is veroorzaakt door te droge of te natte omstandigheden, maar dit is op grond van verschillende gewasgroei-modules. Bij de HELP-tabel wordt de gewasontwikkeling van tevoren opgelegd. Tijdens de simulatie wordt bijgehouden of voldaan kan worden aan de watervraag die hoort bij de gewasontwikkeling en zo wordt de droogteschade

¹⁸ https://waterwijzerlandbouw.wur.nl/downloads/WWL_validatie_website.pdf

bepaald. Indien niet aan de watervraag voldaan kan worden, is er sprake van transpiratiereductie. Deze transpiratiereductie heeft dus geen invloed op de opgelegde gewasontwikkeling. In werkelijkheid wordt de gewasontwikkeling natuurlijk wel beïnvloed en bij dynamische gewasgroei-modules zoals WOFOST als onderdeel van WWL wordt hiermee rekening gehouden. Stress aan het begin van het groeiseizoen zal van invloed zijn op stressmomenten voor het gewas later in het groeiseizoen. Bovendien wordt in SWAP-WOFOST (in tegenstelling tot de HELP-tabel) zowel de natschade als gevolg van zuurstofstress als de droogteschade berekend. Hoewel het gebruik van een dynamische gewasmodule is te prefereren, is het lastig om aan te geven welk aandeel een bepaalde stressor heeft in de totale opbrengstderving. De huidige procedure die hiervoor wordt gehanteerd, dient slechts als indicatie, omdat er geen rekening wordt gehouden met interactie tussen verschillende stressfactoren voor het gewas. Het is daarom aan te bevelen om hiervoor een nieuwe procedure te ontwikkelen. Vanwege de hierboven beschreven interactie kunnen afzonderlijke stressoren, zoals gesimuleerd met een dynamische gewasgroeimodule, niet vergeleken worden met de stressoren van een statische gewasgroeimodule. Een vergelijking tussen droogtestress gesimuleerd met WWL en droogtestress volgens de HELP-methode valt daarom eigenlijk niet te maken. Omdat bij schaderegelingen in Nederland aparte rekenregels worden gehanteerd voor schade als gevolg van te natte of te droge omstandigheden, is het aan te bevelen om nader onderzoek te doen naar de juiste duiding van beide stressfactoren en dienovereenkomstig ook de rekenregels te herzien.

Op basis van een modelvergelijking zoals tussen de WWL-tabel en de HELP-tabel kunnen geen conclusies worden getrokken welk model beter presteert. Hiervoor is een gedegen uitgevoerde validatie nodig aan de hand van veldexperimenten zoals tijdens de ontwikkeling van WWL is uitgevoerd.

5.2 Lokale validatie

Tijdens de ontwikkeling van WWL zijn de prestaties van het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST gevalideerd. Na de eerste oplevering van Waterwijzer Landbouw in 2018 zijn verschillende modelonvolkomenheden aan het licht gekomen. Stapsgewijs zijn aanpassingen doorgevoerd in modelconcept, -invoer en -aansturing, hetgeen heeft geleid tot updates van WWL. Hiermee rijst de vraag in hoeverre deze wijzigingen de modelprestaties beïnvloeden. Om deze vraag te beantwoorden, is opnieuw een validatie uitgevoerd voor negen veldproeven waarbij aandacht uitgaat naar de simulatie van de actuele gewasontwikkeling van gras, mais en aardappelen. We maken hierbij een vergelijking met modelresultaten die verkregen zijn met de modelaansturing volgens WWL-versie 1.0.0, 2.0.0 en 3.0.0. Op deze manier wordt niet alleen inzicht verschaft in hoe de modelresultaten zich verhouden tot de metingen, maar ook in hoe de verschillende WWL-versies zich onderling verhouden.

We zien een duidelijke verbetering in modelprestaties naarmate WWL zich verder ontwikkelt. De modelresultaten verkregen met WWL-versie 3.0.0 van mais en aardappelen benaderen de metingen over het algemeen goed. Dit geldt ook voor de veldexperimenten met gras, maar de metingen laten hier wel meer variatie zien dan bij de modelresultaten. Vooral de eerste grassneden van het jaar laten een grote afwijking zien ten opzichte van de metingen, wat met name wordt gestuurd door het moment waarop wordt verondersteld dat het gras gaat groeien. Het is interessant om te analyseren of de modelprestaties verbeteren indien gebruik wordt gemaakt van alternatieve grasmodules waarbij de groei meer gericht is op de bodemtemperatuur, zoals LINGRA. Ook speelt mee dat het effect van een zware snede op de daaropvolgende snede procesmatig lastig is te omschrijven met onze modellen.

Een kanttekening die bij de vergelijking ook geplaatst moet worden, is dat de modelprestaties betrekking hebben op een beperkt aantal proeven waarvan een aantal veldproeven betrekking heeft op een korte periode van één tot enkele jaren. Hoewel validatie voor elk van deze veldproeven nuttig is, laten langjarige veldproeven zoals uitgevoerd bij Cranendonck een behoorlijke variatie zien in gemeten gewasopbrengsten. Dat de modelresultaten deze variatie kunnen benaderen, geeft vertrouwen in het modelinstrumentarium. Het zou mooi zijn als we in de toekomst kunnen beschikken over meer van dit soort langjarige veldproeven. Daarnaast is het aan te bevelen om in de toekomst (veld)proeven uit te voeren waarbij zowel gunstige als ongunstige hydrologische omstandigheden een rol spelen. Mogelijk kunnen we daarvoor aansluiten bij experimenten die bij andere projecten in gang zijn gezet. Op die manier kan dan inzicht worden verkregen in zowel de actuele gewasontwikkeling als een benadering van de potentiële gewasontwikkeling en daarmee de

opbrengstderving. Daarnaast blijft het van belang om naast metingen van de gewasopbrengst ook te beschikken over metingen van de hydrologische condities (drukhoogte op verschillende diepten en grondwater) en dat de beïnvloeding van overige stressoren zo veel mogelijk wordt voorkomen. In gecontroleerde omstandigheden zoals in kassen is dit goed mogelijk. Zo worden in 2023 in het kader van het project BoVer kasproeven uitgevoerd waarbij gekeken wordt naar de wortelontwikkeling onder verdichte en tegelijk droge omstandigheden. Hiermee wordt inzicht verkregen in het adaptieve vermogen van het gewas op zijn omgeving. Aan de hand van dit soort proeven is het mogelijk om de procesbeschrijving te toetsen en mogelijk te verbeteren. Hierbij aansluiten is wenselijk.

5.3 Regionale validatie

Bij de regionale validatie richten we ons op ruimtelijke patronen van de gesimuleerde opbrengstderving. Voor de toetsing maken we gebruik van satellietbeelden die de groenindex (NDVI; Normalized Differential Vegetation Index) bepalen. De beelden van de groenindex bevatten informatie waaruit de actuele gewastoestand kan worden afgeleid, maar dit geeft logischerwijs geen beeld van wat de gewastoestand had kunnen zijn onder optimale omstandigheden.

De vergelijking met de beelden van de groenindex zijn uitgevoerd voor het stroomgebied van De Raam en voor Nederland. Op voorhand is het goed om te realiseren dat het hier gaat om een vergelijking van verschillende grootheden, een reductie in de groenindex is namelijk niet direct te vertalen naar gewasontwikkeling en de reductie van de gewasopbrengst. Wel zal een reductie van de groenindex als gevolg van ongunstige hydrologische condities gepaard gaan met een reductie van het oogstbare product.

De vergelijking voor het stroomgebied van De Raam richt zich op meerdere momenten gedurende de droge zomer van 2018. Naarmate de droge periode aanhoudt, stijgt de reductie in groenindex. Ook is er een duidelijk verschil te zien in de reductie van groenindex tussen percelen die wel of niet beregend zijn. Bij percelen die niet beregend zijn, is er daarnaast een duidelijke toename van de reductie te zien indien er sprake is van droge hydrologische condities.

De vergelijking tussen groenindex en WWL voor 2018 laat zien dat de gesimuleerde opbrengstderving voor mais goed overeenkomt met de waarnemingen van de groenindex voor beregende en niet-beregende percelen. Voor grasland is het resultaat minder duidelijk, maar is eenzelfde trend te zien. Voor grasland lijkt de gesimuleerde opbrengstderving te worden onderschat. De gesimuleerde opbrengstderving bij grasland heeft echter betrekking op een cumulatief effect, terwijl de reductie in groenindex een momentopname betreft. Dit resulteert daarmee automatisch in een lagere opbrengstderving.

Voor de landelijke vergelijking met beelden van de groenindex is een berekening uitgevoerd met de WWL-tabel. Het gemiddelde landelijke beeld van groenindex en gewasopbrengstderving als functie van grondwatertrap komen goed met elkaar overeen. De gesimuleerde gewasopbrengstderving is sterk afhankelijk van de bodemeenheden, wat bij de groenindex minder tot uiting komt. De vergelijking laat zien dat de opbrengstderving bij bodemeenheden met zware tot zeer zware klei in het profiel wordt overschat. Op deze bodemeenheden wordt het afgeraden om de huidige versie van WWL (3.0.0) toe te passen. In een aanpalend onderzoek (Heinen e.a., 2023) is geconstateerd dat microscopische wateropname en aanpassingen aan de beworteling veelbelovend zijn om met WWL ook realistische berekeningen uit te voeren voor deze bodemeenheden. Het verdient aanbeveling om deze verbeteringen uit te voeren en te toetsen op landelijke schaal. Daarnaast is het aan te bevelen om de rekenregels met betrekking tot de bodemkundige limitatie van de wortelzone te herzien, welke voor een groot deel het wateraanbod voor het gewas bepalen. Mogelijk kan deze limitatie afhankelijk worden gemaakt van het type gewas.

Om te achterhalen waardoor de ruimtelijke patronen van de groenindex in augustus 2018 worden veroorzaakt, hebben we in dit onderzoek vijf mogelijk verklarende variabelen onderzocht: landgebruik, neerslagtekort, beregening, bodemtype en hydrologische condities. Elk van de afzonderlijke variabelen beïnvloedt in meer of mindere mate de patronen van de groenindex aan het einde van de droge zomer van 2018. Uit analyse blijkt dat 46% van de variantie in de groenindex op 6 augustus 2018 verklaard kan worden indien alle verklarende variabelen worden gebruikt. Deze verklarende variabelen zijn dezelfde waarmee we

de opbrengstderving voorspellen in Waterwijzer Landbouw. Tegelijkertijd betekent dit ook dat iets meer dan de helft van de variantie niet kan worden verklaard. Dat komt enerzijds omdat we geen rekening houden met opbrengstderving als gevolg van te zoute omstandigheden, ziekten en plagen of limitatie van voedingsstoffen. Anderzijds spelen onzekerheden in waarnemingen en onzuiverheden in de invoergegevens een belangrijke rol (denk aan onzuiverheden in de bodem- en beregeningskaart en onzuiverheden in de meteorologische en hydrologische condities). Mogelijk dat met het hanteren van andere informatiebronnen meer van de variantie in de groenindex kan worden verklaard.

Referenties

- Bartholomeus, R. P., J. M. Witte, P. M. van Bodegom, J. C. van Dam, en R. Aerts. 2008. *Critical Soil Conditions for Oxygen Stress to Plant Roots: Substituting the Feddes-Function by a Process-Based Model*. Journal of Hydrology 360 (1-4): 147–65. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.029>.
- Bartholomeus, R. P., J. G. Kroes, P. J. T. van Bakel, M. J. D. Hack-ten Broeke, D. J. J. Walvoort en J. M. Witte. 2013. *Actualisatie schadefuncties landbouw; Fase 1 op weg naar een geactualiseerd en klimaatbestendig systeem van effect van waterbeheer op gewasopbrengst*. STOWA rapport 2013-22. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/265383>
- Bonfante, A., A. Basile, M. Acutis, R. De Mascellis, P. Manna, A. Perego, en F. Terribile. 2010. *SWAP, CropSyst and MACRO Comparison in Two Contrasting Soils Cropped with Maize in Northern Italy*. Agricultural Water Management 97 (7): 1051–62. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.02.010>.
- Boogaard, H. L., A. J. W. de Wit, J. Roller, en C. A. van Diepen. 2014. *User's guide for the WOFOST Control Centre 2.1 and WOFOST 7.1.7 crop growth simulation model*. Alterra, Wageningen University & Environmental Research.
- Breiman, L. 2001. *Random forests*. Machine learning 45 (1): 5–32.
- de Vos, J. A., P. J. T. van Bakel, I. E. Hoving, en J. G. Conijn. 2006. *Waterpas-Model: A Predictive Tool for Water Management, Agriculture, and Environment*. Agricultural Water Management 86 (1-2): 187–95. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.024>.
- de Vries, F. 1999. *Karakterisering van Nederlandse gronden naar fysisch-chemische kenmerken*. 654. DLO-Staring Centrum.
- de Wit, A. J. W., H. L. Boogaard, D. Fumagalli, S. Janssen, R. Knapen, D. van Kraalingen, I. Supit, R. van der Wijngaart, en K. van Diepen. 2019. *25 Years of the WOFOST Cropping Systems Model*. Agricultural Systems 168 (januari): 154–67. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.06.018>.
- Dijkstra, J. P., M. J. D. Hack-ten Broeke, F. G. Wijnands, en B. M. A. Kroonen-Backbier. 1995. *Stikstofemissie naar het grondwater van geïntegreerde en gangbare bedrijfssystemen in de akkerbouw op proefboerderijen Borgerwold en Vredepeel; Simulatie van de vocht- en nitraathuishouding op de proefboerderij Vredepeel voor de jaren 1990-1993*. Rapport 287.2. DLO-Staring Centrum. <https://edepot.wur.nl/302997>.
- Eitzinger, J., M. Trnka, J. Hösch, Z. Žalud, en M. Dubrovský. 2004. *Comparison of CERES, WOFOST and SWAP Models in Simulating Soil Water Content During Growing Season Under Different Soil Conditions*. Ecological Modelling 171 (3): 223–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.08.012>.
- Elbers, J. A., E. J. Moors, en C. M. J. Jacobs. 2010. *Gemeten actuele verdamping voor twaalf locaties in Nederland*. STOWA rapport 2010-36. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/163481>.
- Groenendijk, P., P. Schipper, R. Hendriks, J. van den Akker, en M. Heinen. 2017. *Effecten van verbetering bodemkwaliteit op waterhuishouding en waterkwaliteit : deelstudies Goede Grond voor een duurzaam watersysteem*. Rapport 2811. Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/418283>.
- Hack-ten Broeke, M. J. D., J. G. Kroes, R. F. A. Hendriks, R. P. Bartholomeus, P. J. T. van Bakel, en I. E. Hoving. 2013. *Actualisatie schadefuncties voor de landbouw, tussenfase 2a: plausibiliteitstoets SWAP en enkele verkennende berekeningen*. STOWA rapport 2013-37. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/286135>.
- Heinen, M., G. Bakker, en J. H. M. Wösten. 2020. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks: Update 2018*. WENR rapport 2978. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/512761>.
- Heinen, M., F. Brouwer, K. Teuling, en D. J. J. Walvoort. 2021. *BOFEK2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland: update bodemfysische eenhedenkaart*. WENR rapport 3056. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/541544>.
- Heinen, M., H. M. Mulder, G. Bakker, J. H. M. Wösten, F. Brouwer, K. Teuling, en D. J. J. Walvoort. 2022. *The Dutch Soil Physical Units Map: BOFEK*. Geoderma 427 (december): 116123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116123>.

- Heinen, M., H. M. Mulder. 2023. *Microscopische wateropnamemodellen en dynamische wortelverdeling in SWAP*. WENR rapport 3230. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/583541>
- Hu, S., L. Shi, K. Huang, Y. Zha, X. Hu, H. Ye, en Q. Yang. 2019. *Improvement of Sugarcane Crop Simulation by SWAP-WOFOST Model via Data Assimilation*. Field Crops Research 232 (February): 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.12.009>.
- Jarvis, N. J. 2011. *Simple physics-based models of compensatory plant water uptake: concepts and eco-hydrological consequences*. Hydrology and Earth System Sciences 15 (11): 3431–46. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3431-2011>.
- Knotters, M., P. Baggelaar, E. van der Meulen, en D. J. J. Walvoort. 2022. *Hoezo plausibel? Plausibiliteit in de hydrologie*. Stromingen: vakblad voor hydrologen 28 (2): 35–46.
- Kroes, J. G., R. P. Bartholomeus, J. C. van Dam, M. J. D. Hack-ten Broeke, I. Supit, R. F. A. Hendriks, A. J. W. de Wit, 2015. *Waterwijzer Landbouw, fase 2. Modelleren van het bodem-water-plantsysteem met het gekoppelde instrumentarium SWAP-WOFOST*. STOWA rapport 2015-16. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/347511>.
- Kroes, J. G., en I. Supit. 2011. *Impact Analysis of Drought, Water Excess and Salinity on Grass Production in The Netherlands Using Historical and Future Climate Data*. Agriculture, Ecosystems & Environment 144 (1): 370–81. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.09.008>.
- Kroes, J. G., I. Supit, J. C. van Dam, P. E. V. van Walsum, en H. M. Mulder. 2018. *Impact of Capillary Rise and Recirculation on Simulated Crop Yields*. Hydrology and Earth System Sciences 22 (5): 2937–52. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2937-2018>.
- Kroes, J. G., J. C. van Dam, R. P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R. F. A. Hendriks, H. M. Mulder, I. Supit, en P. E. V. van Walsum. 2017. *SWAP version 4*. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/416321>.
- Ma, Y., S. Feng, Z. Huo, en X. Song. 2011. *Application of the SWAP Model to Simulate the Field Water Cycle Under Deficit Irrigation in Beijing, China*. Mathematical and Computer Modelling 54 (3-4): 1044–52. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.034>.
- Makkink, G. F. 1957. *Testing the Penman Formula by Means of Lysimeters*. Journal of the Institution of Water Engineers 11 (3): 277–88.
- Mulder, H. M., P. J. T. van Bakel, A. de Vos, G. van Straten, M. Heinen, en J. G. Kroes. 2018. *Zouttolerantie aardappelen SWAP-WOFOST toepassing op Zilt Proefbedrijf Texel*. STOWA rapport 2018-01. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/431372>.
- Mulder, H. M., P. Dik, M. Heinen, R. P. Bartholomeus, J. C. van Dam, en M. J. D. Hack-ten Broeke. 2021a. *Opties binnen Waterwijzer Landbouw in 2020: Van WWL-tabel 2.0.0 tot maatwerk met WWL-regionaal*. STOWA rapport 2021-03. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/542532>.
- Mulder, H. M., W. M. L. Meijninger, en M. J. D. Hack-ten Broeke. 2021b. *Validatie waterwijzer landbouw vergelijking modelresultaten Groenmonitor, GRAM en HELP*. STOWA rapport 2021-48. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/556066>.
- Mulder, H. M., W. M. L. Meijninger, J. Iwema, en M. J. D. Hack-ten Broeke. 2022a. *Validatie Waterwijzer Landbouw met Groenmonitor en vergelijking met HELP*. Stromingen: vakblad voor hydrologen 28 (1): 3–16.
- Mulder, H. M., D. J. J. Walvoort, F. Brouwer, T. P. Tol-Leenders en S. J. E. Verzandvoort. 2022b. *Bodemgeschiktheidskaarten voor landbouw in de provincie Noord-Brabant: Een toepassing van Waterwijzer Landbouw*. WENR rapport 3206. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/576638>.
- Renka, R. J., en R. Brown. 1998. *Remark on Algorithm 761*. ACM Trans. Math. Softw. 24 (4): 383–85. <https://doi.org/10.1145/293686.293689>.
- Schils, R. L. M., M. H. A. de Haan, J. G. A. Hemmer, A. van den Pol-van Dasselaar, J. A. de Boer, A. G. Evers, G. Holshof, J. C. van Middelkoop, en R. L. G. Zom. 2007. *DairyWise, A Whole-Farm Dairy Model*. Journal of Dairy Science 90 (11): 5334–46. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-842>.
- Schipper, P. N. M., M. Heinen, P. Janssen, L. Stuyt, en P. Dik. 2015. *Praktijkproef Regelbare Drainage proefbedrijf Rusthoeve 2010-2014; Eindverslag praktijkproef naar de effecten van regelbare en verdiept aangelegde drains op klei in Zeeland*. Alterra-rapport 2639. Alterra, Wageningen-UR. <https://edepot.wur.nl/350634>.
- Schröder, J. 1985. *De invloed van grote giften runderdrijfmest op de groei, opbrengst en kwaliteit van snijmais en op de bodemvruchtbaarheid en waterverontreiniging: Maarheeze (zandgrond) 1974-1982*.

- Rapport, (Verslag / Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond no. 31) - 101. Lelystad: P.A.G.V. <https://edepot.wur.nl/342089>.
- Snijders, P. J. M., J. J. Woldring, J. H. Geurink, en H. G. van der Meer. 1987. *Stikstofwerking van geïnjecteerde runderdrijfmest op grasland: verslag van een onderzoek naar de effecten van stikstof uit geïnjecteerde en bovengronds aangewende runderdrijfmest op de opbrengst en de kwaliteit van gras*. Rapport Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij en Paardenhouderij P.R.: 103; Lelystad. Centrum voor agrobiologisch onderzoek (CABO), Wageningen. <https://edepot.wur.nl/39564>.
- Steduto, P., T. C. Hsiao, E. Fereres, en D. Raes. 2012. *Crop yield response to water*. FAO Irrigation and drainage paper 66. Food; agriculture organisation of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i2800e/i2800e.pdf>.
- Stolk, P. C., R. F. A. Hendriks, C. M. J. Jacobs, J. Duyzer, E. J. Moors, J. W. van Groenigen, P. S. Kroon, A. P. Schrier-Uijl, E. M. Veenendaal, en P. Kabat. 2011. *Simulation of Daily Nitrous Oxide Emissions from Managed Peat Soils*. *Vadose Zone Journal* 10 (1): 156–68. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0029>.
- Stolk, P. C., en J. G. Kroes. 2012. *Water en nutriënten gelimiteerde gewasopbrengst: koppeling van de modellen SWAP-ANIMAO-WOFOST*. Alterra-rapport 2346. Alterra, Wageningen-UR. <https://edepot.wur.nl/221614>.
- STOWA/RIZA. 1999. *Vloeiend Modelleren in het Waterbeheer, Handboek Good Modelling Practice*. STOWA rapport 99-05, Rijkswaterstaat-RIZA-rapport 99.036. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://www.stowa.nl/publicaties/handboek-good-modelling-practice-vloeiend-modelleren-het-waterbeheer>.
- ten Cate, J. A. M. 1995. *Handleiding bodemgeografisch onderzoek: richtlijnen en voorschriften*. Rapport, Technisch document 19A. DLO-Staring Centrum. <https://wur.on.worldcat.org/oclc/67215392>.
- van Bakel, P. J. T., J. Huinink, H. Prak, en F. J. E. van der Bolt. 2005. *HELP-2005, uitbreiding en actualisering van de HELP-tabellen ten behoeve van het Waternood-instrumentarium*. STOWA rapport 2005-16. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/27040>.
- van Dam, J. C., P. Groenendijk, R. F. A. Hendriks, en J. G. Kroes. 2008. *Advances of Modeling Water Flow in Variably Saturated Soils with SWAP*. *Vadose Zone Journal* 7 (2): 640–53. <https://doi.org/10.2136/vzi2007.0060>.
- van de Brink, M., J. Brombacher, J. Degen. 2022. *Ontwikkeling van een landelijke beregeningskaart: biedt satellietinformatie hulp?* STOWA rapport 2022-05. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- van Diepen, C. A., J. Wolf, H. Keulen, en C. Rappoldt. 1989. *WOFOST: A Simulation Model of Crop Production*. *Soil Use and Management* 5 (1): 16–24. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x>.
- van Groenigen, J. W., P. J. Georgius, C. van Kessel, E. W. J. Hummelink, G. L. Velthof, en K. B. Zwart. 2005a. *Subsoil 15N-N2O Concentrations in a Sandy Soil Profile After Application of 15N-Fertilizer*. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72 (1): 13–25. <https://doi.org/10.1007/s10705-004-7350-6>.
- van Groenigen, J. W., K. B. Zwart, D. Harris, en C. van Kessel. 2005b. *Vertical Gradients of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in Soil Atmospheric N_2O —temporal Dynamics in a Sandy Soil*. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 19 (10): 1289–95. <https://doi.org/10.1002/rcm.1929>.
- van Walsum, P. E. V., I. Supit. 2012. *Influence of ecohydrologic feedbacks from simulated crop growth on integrated regional hydrologic simulations under climate scenarios*. *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (6): 1577–93. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1577-2012>.
- Werkgroep Waterwijzer Landbouw. 2018. *Waterwijzer Landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie*. STOWA rapport 2018-48. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/464525>.
- Wösten, J. H. M. 1987. *Beschrijving van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken uit de Staringreeks met analytische functies*. Rapport / Stichting voor Bodemkartering, nr. 2019. STIBOKA. <https://edepot.wur.nl/344867>.

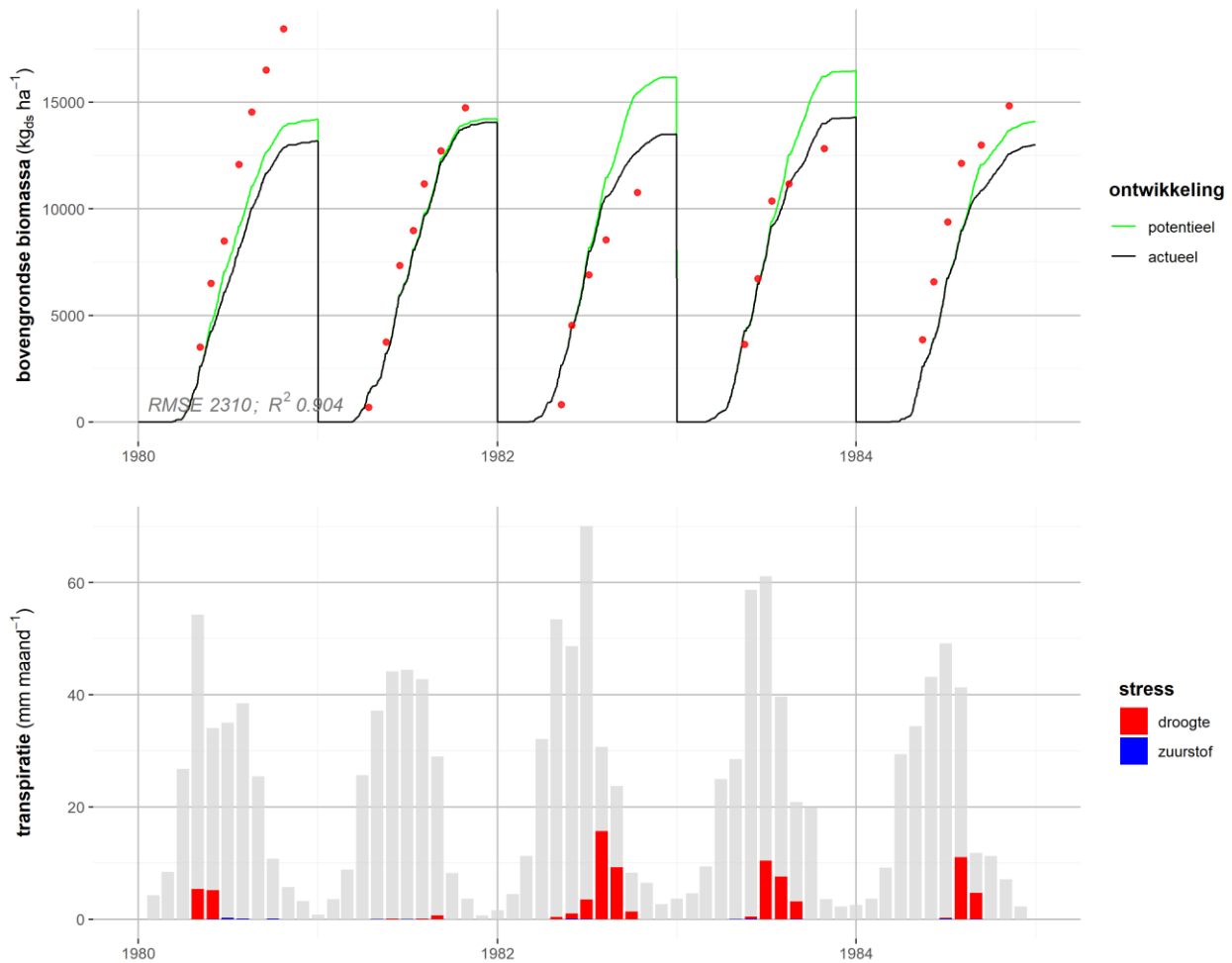
Bijlage A Proefvelden grasland

A.1 Ruurlo

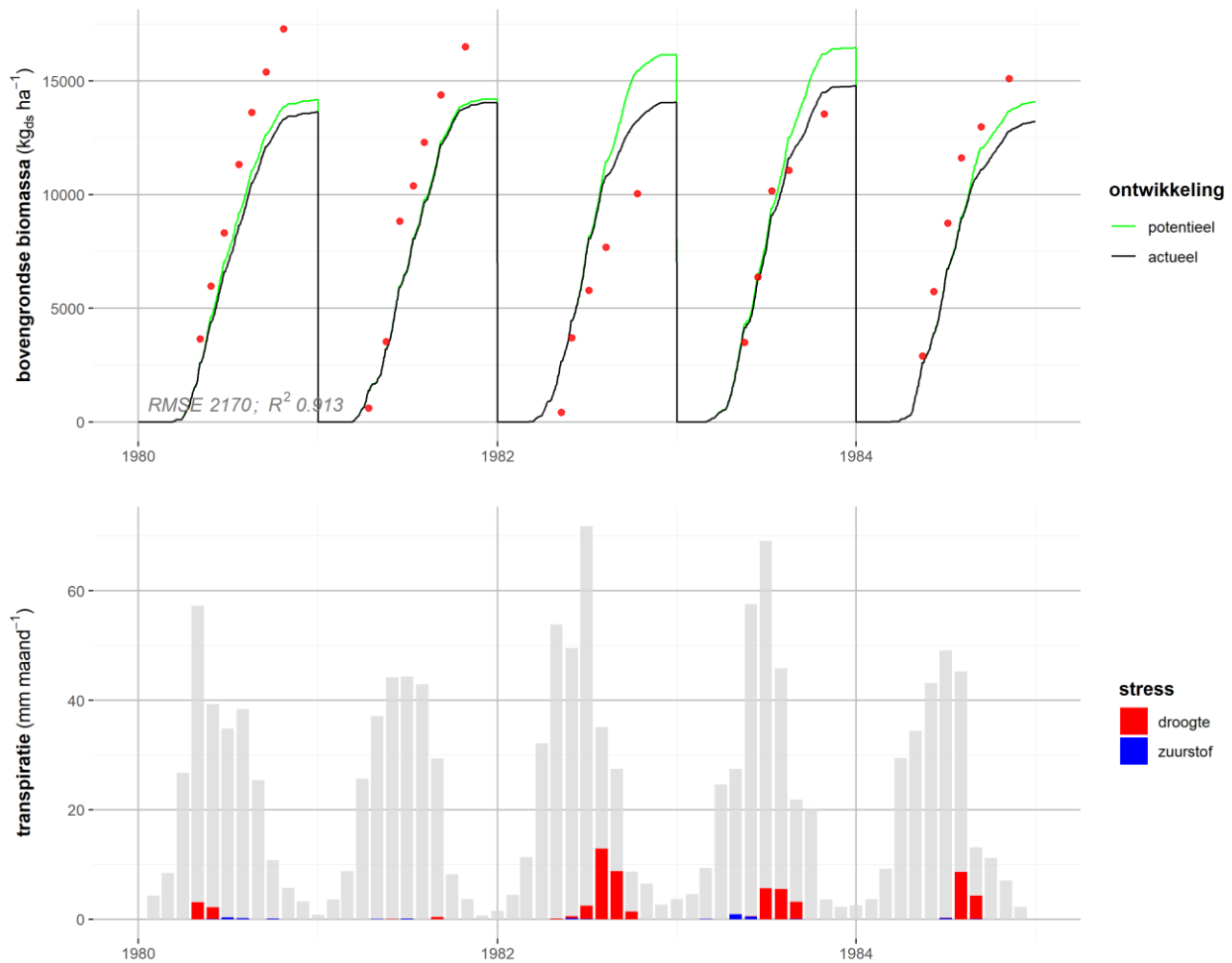
Onderzoek naar de stikstofwerking van geïnjecteerde runderdrijfmest op grasland (Snijders e.a., 1987).

Tabel A-1 Informatie met betrekking tot modelaansturing SWAP-WOFOST voor Ruurlo.

Algemeen	
Locatie	Ruurlo veld 16 en 48
Periode	1980-1984
SWAP	
Meteorologische condities	Weerstation De Bilt
Neerslag	Weerstation De Bilt (dagelijkse waarden incl. duur)
Drainage	Sloot met een diepte van 55 cm -mv.
Onderrand	Gemeten grondwaterstand; gemiddelde grondwaterstand van 105 cm -mv (variërend van 30-180 cm -mv) voor veld 16, op veld 18 is de grondwaterstand 12 cm hoger.
WOFOST	
Gewas	Grasland (maaïen)



Figuur A-1 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen inclusief oogst voor grasland bij Ruurlo veld 16 (boven), met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; maandelijkse transpiratiereductie als gevolg van ongunstige omstandigheden (onder), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling.



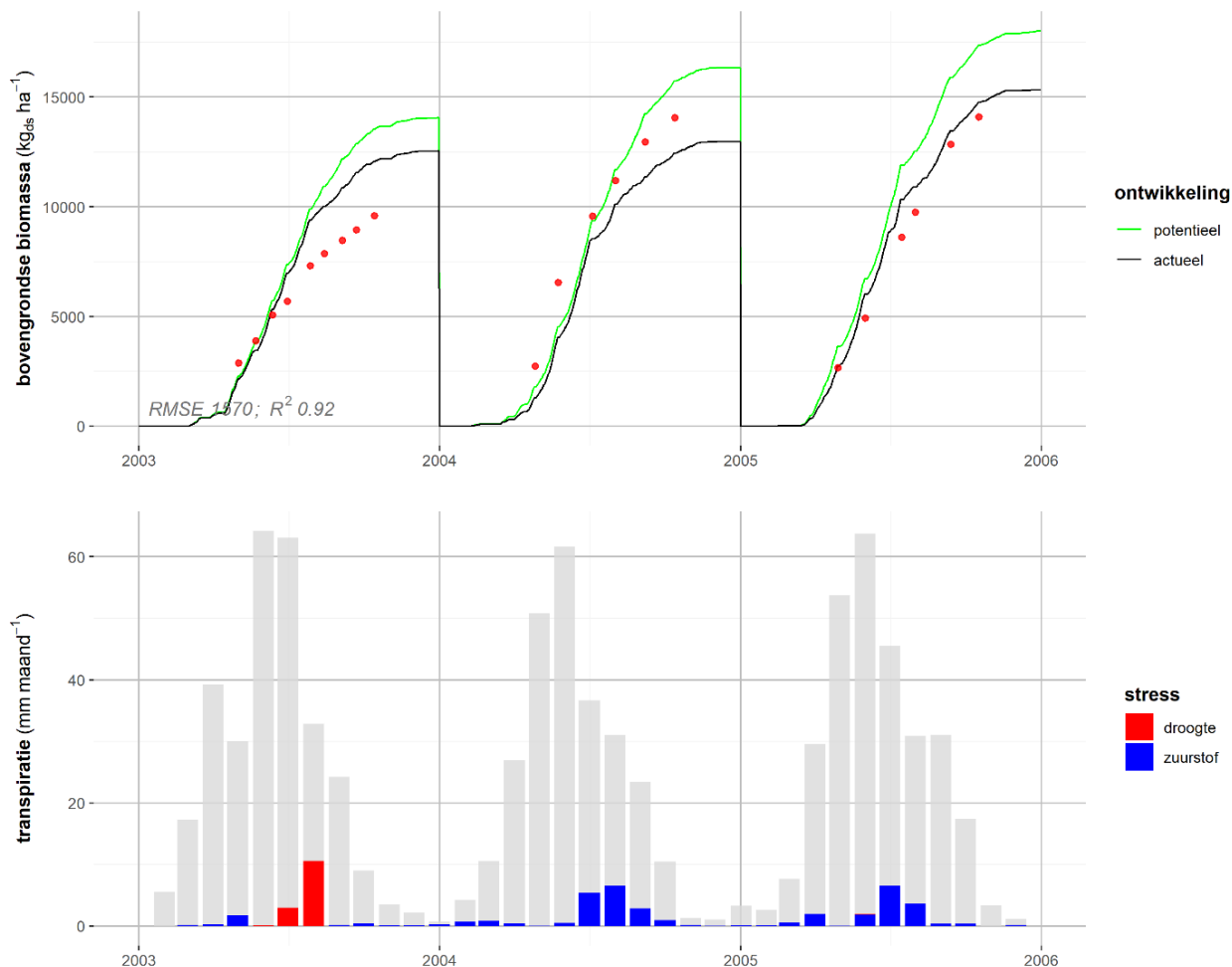
Figuur A-2 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen inclusief oogst voor grasland bij Ruurlo veld 48 (boven), met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; maandelijkse transpiratiereductie als gevolg van ongunstige omstandigheden (onder), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling.

A2 Zegveld

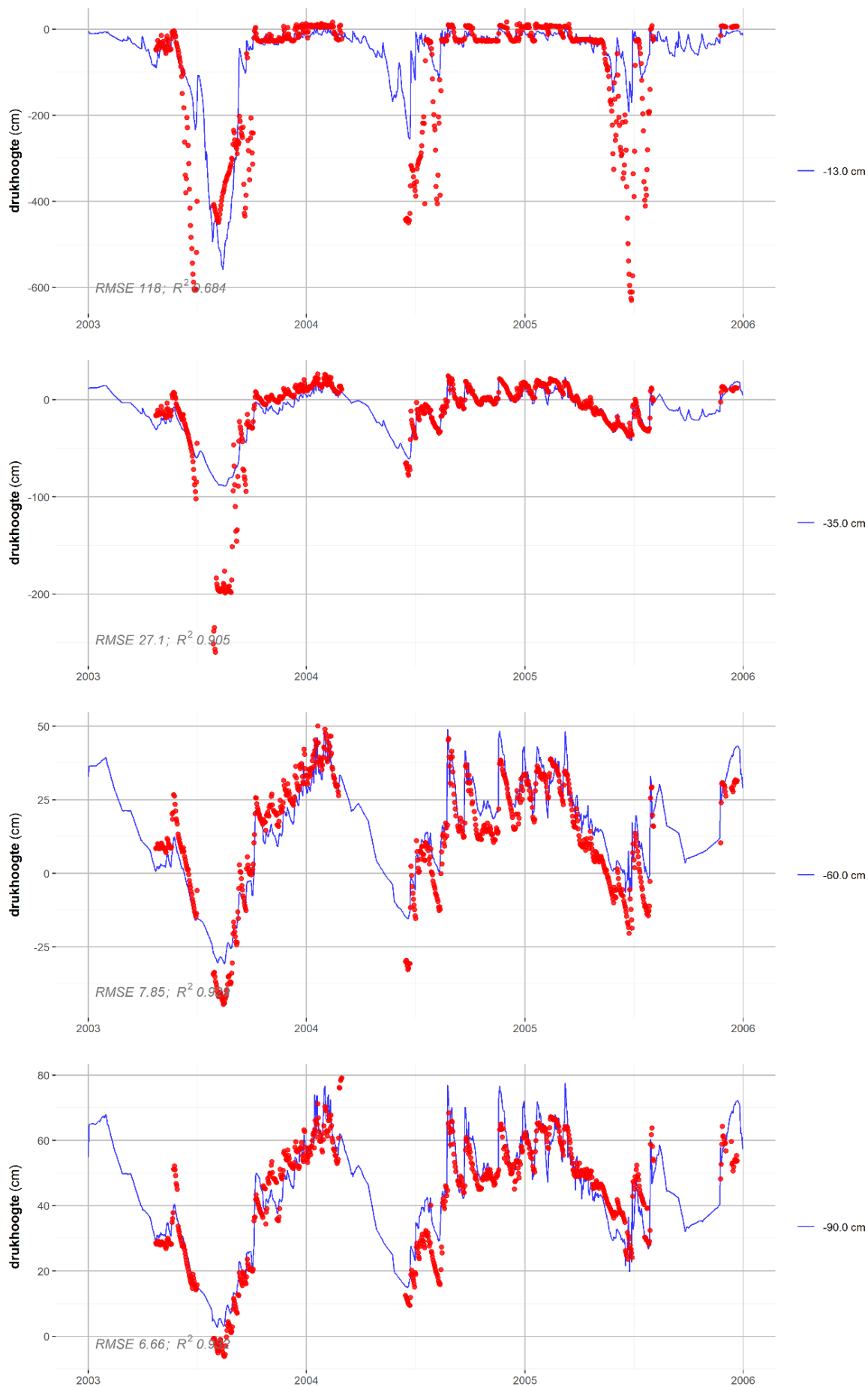
Onderzoek naar lachgasemissies bij beheerde veengronden (Stolk e.a., 2011).

Tabel A-2 Informatie met betrekking tot modelaansturing SWAP-WOFOST voor Zegveld.

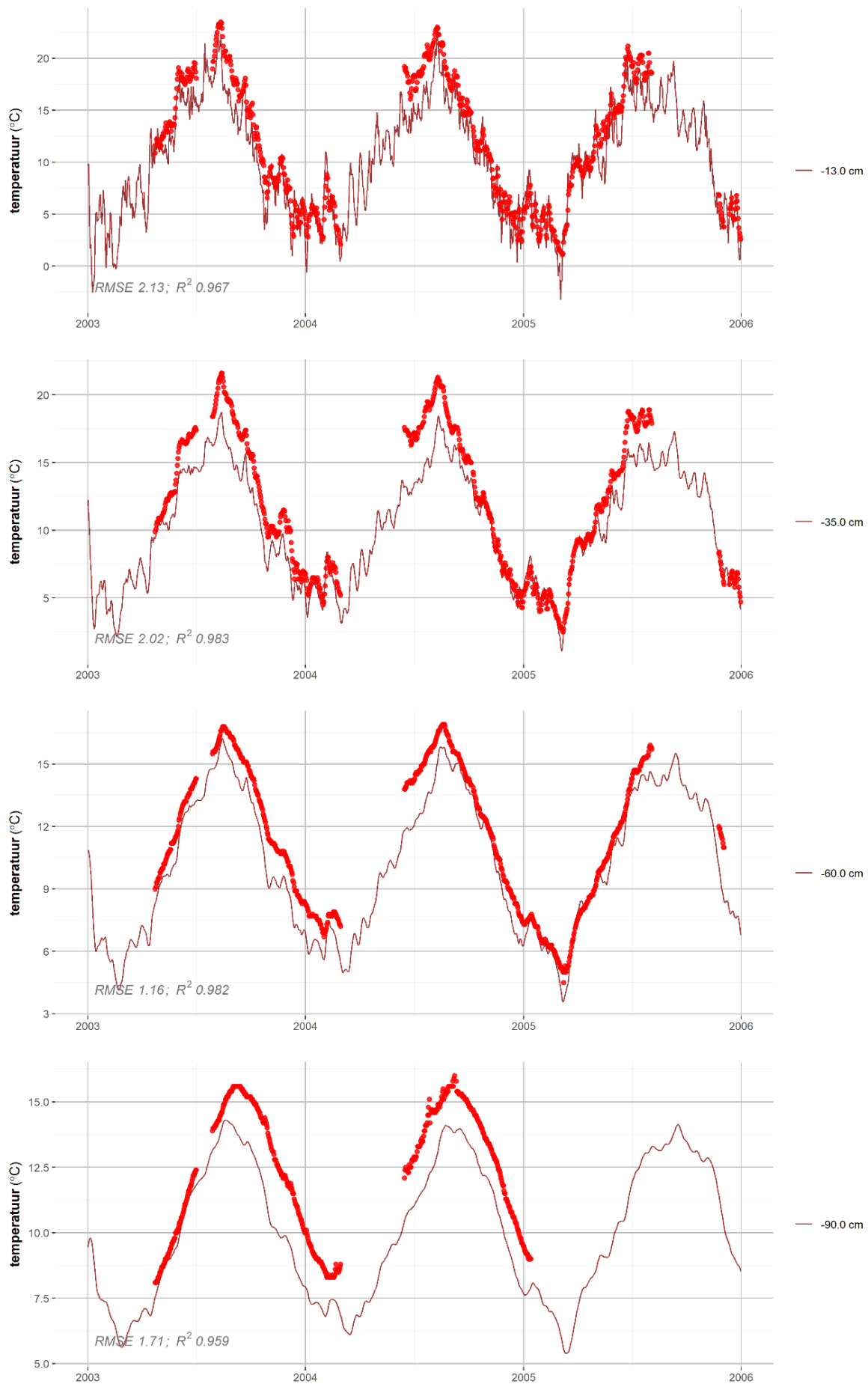
Algemeen	
Locatie	Zegveld veld 3
Periode	2003-2005
SWAP	
Meteorologische condities	Weerstation De Bilt
Neerslag	Neerslagstation Zegveld (dagelijkse waarden)
Drainage	Sloot met gemeten slootpeil; gemiddelde slootpeil van 46 cm -mv (variërend van 28-67 cm -mv)
Onderrand	Gemeten grondwaterstand; gemiddelde grondwaterstand van 43 cm -mv (variërend van 9-85 cm -mv)
WOFOST	
Gewas	Grasland (maaien)



Figuur A-3 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen inclusief oogst voor grasland bij Zegveld veld 3 (boven), met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; transpiratiereductie als gevolg van ongunstige omstandigheden (onder), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling.



Figuur A-4 Gemeten en gesimuleerde drukhoogte op vier verschillende diepten bij Zegveld veld 3, met in het blauw de gesimuleerde drukhoogte en in het rood de gemeten waarde.



Figuur A-5 Gemeten en gesimuleerde bodemtemperatuur op vier verschillende diepten bij Zegveld veld 3, met in het donkerrood de gesimuleerde bodemtemperatuur en in het rood de gemeten waarde.

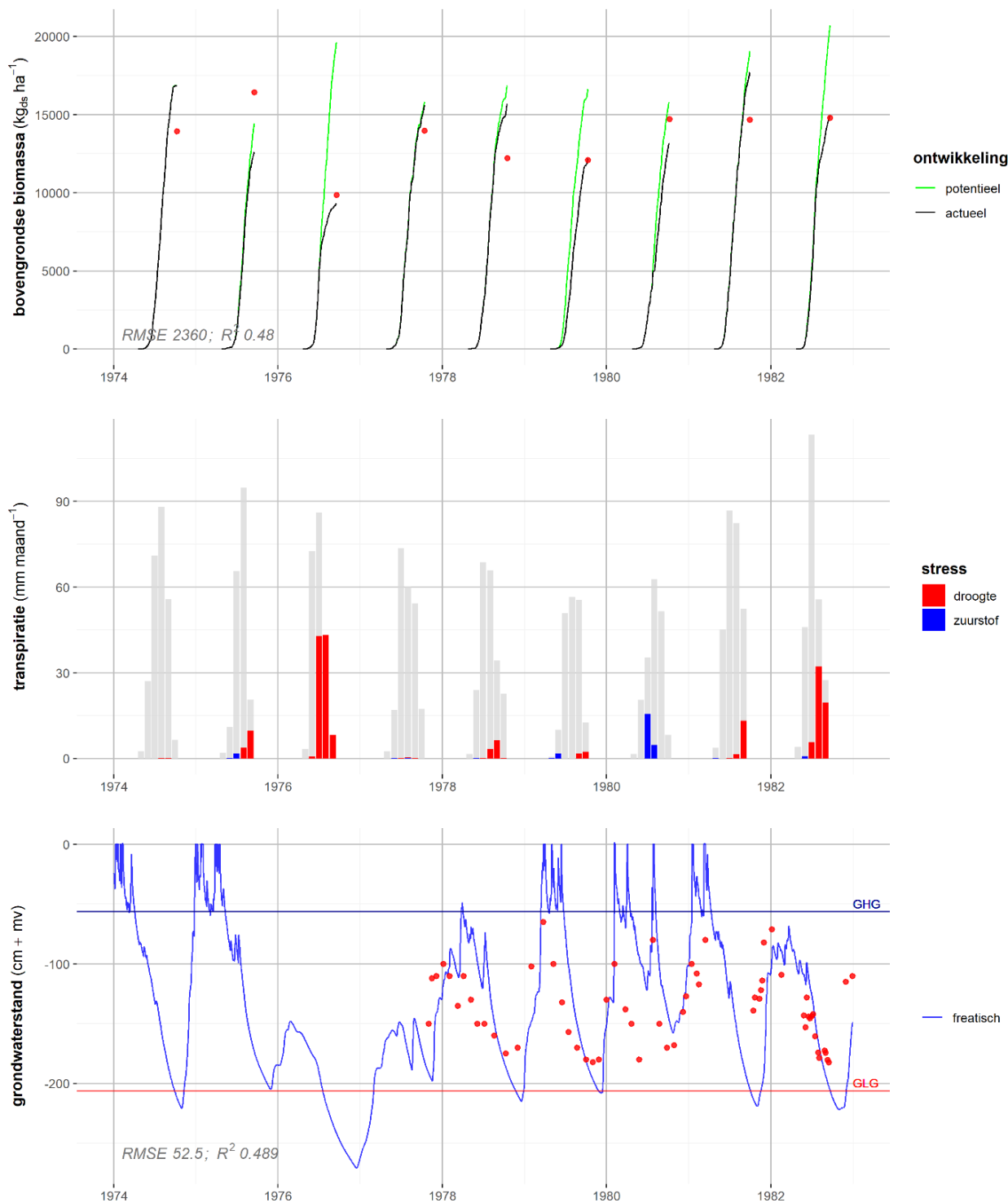
Bijlage B Proefvelden mais

B.1 Cranendonck

Onderzoek uitgevoerd naar de invloed van grote giften runderdrijfmest op de gewasontwikkeling van snijmais, bodemvruchtbaarheid en waterverontreiniging (Schröder, 1985).

Tabel B-1 Informatie met betrekking tot modelaansturing SWAP-WOFOST voor Cranendonck.

Algemeen	
Locatie	Cranendonck; toedieningshoeveelheden van runderdrijfmest variërend van 200-300 ton ha ⁻¹)
Periode	1974-1982
SWAP	
Meteorologische condities	Weerstation Maastricht
Neerslag	Neerslagstation Maarheeze (dagelijkse waarden)
Drainage	Verdisconteerd in onderrand
Onderrand	Q(h)-relatie; onderrandflux afhankelijk van grondwaterstand
WOFOST	
Gewas	Snijmais



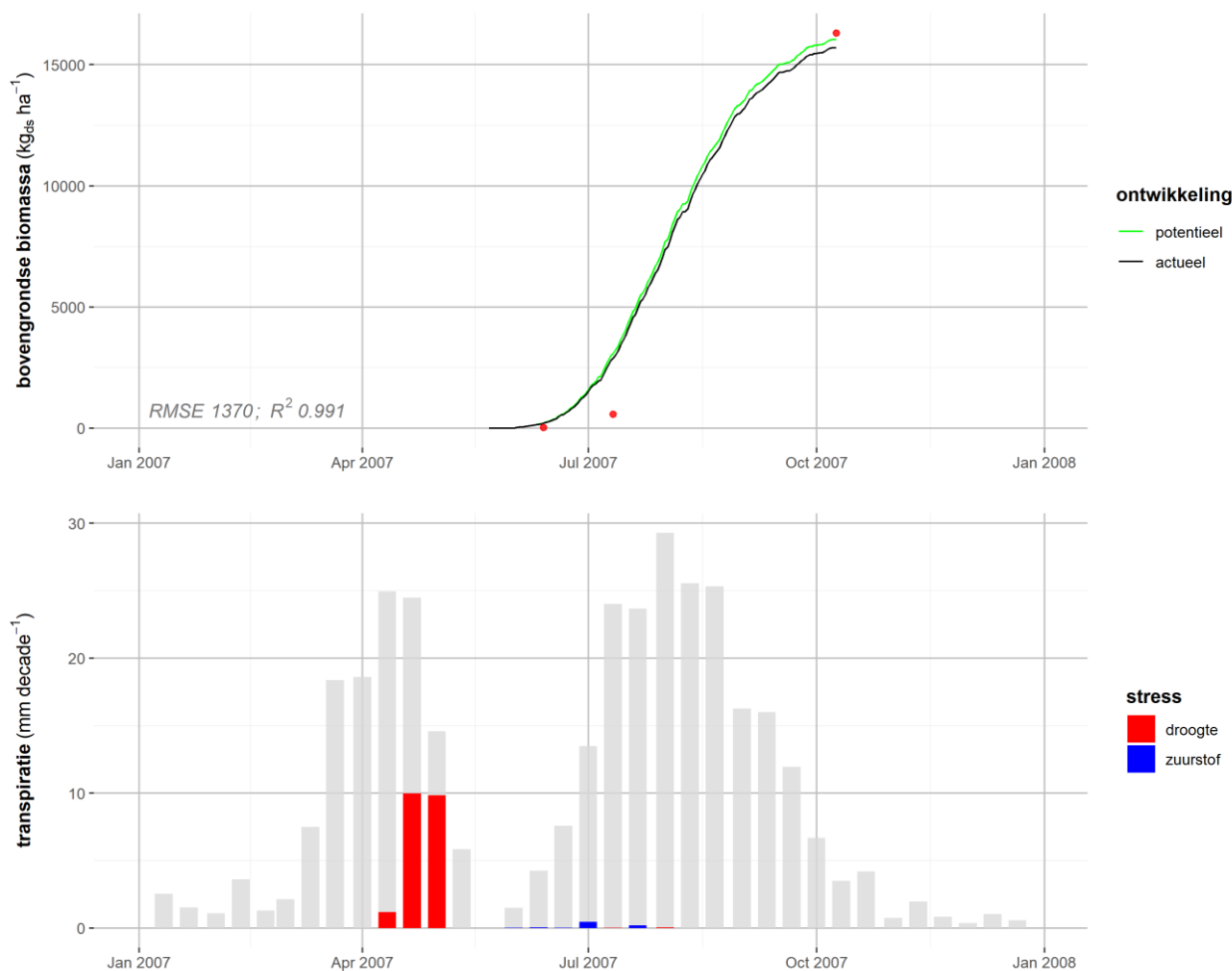
Figuur B-1 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen voor snijmais bij Cranendonck (boven), met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; transpiratiereductie per decade als gevolg van ongunstige omstandigheden (midden), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling; gemeten en gesimuleerde grondwaterstand (onder); met in het blauw de gesimuleerde grondwaterstand en in het rood de meetwaarden.

B.2 Dijkgraaf

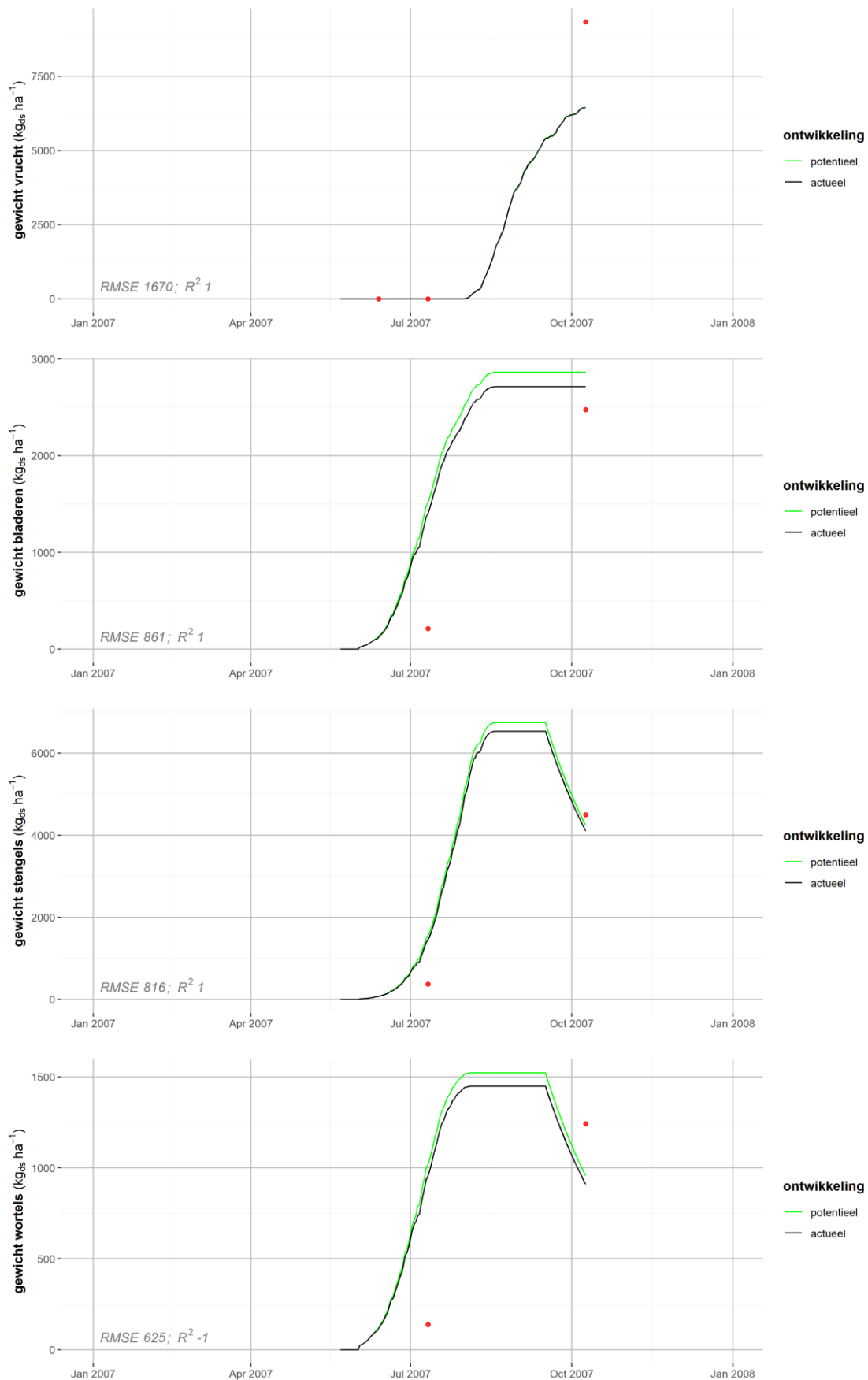
Onderzoek vooral gericht op het meten van de actuele verdamping (Elbers e.a., 2010).

Tabel B-2 Informatie met betrekking tot modelaansturing SWAP-WOFOST voor Dijkgraaf

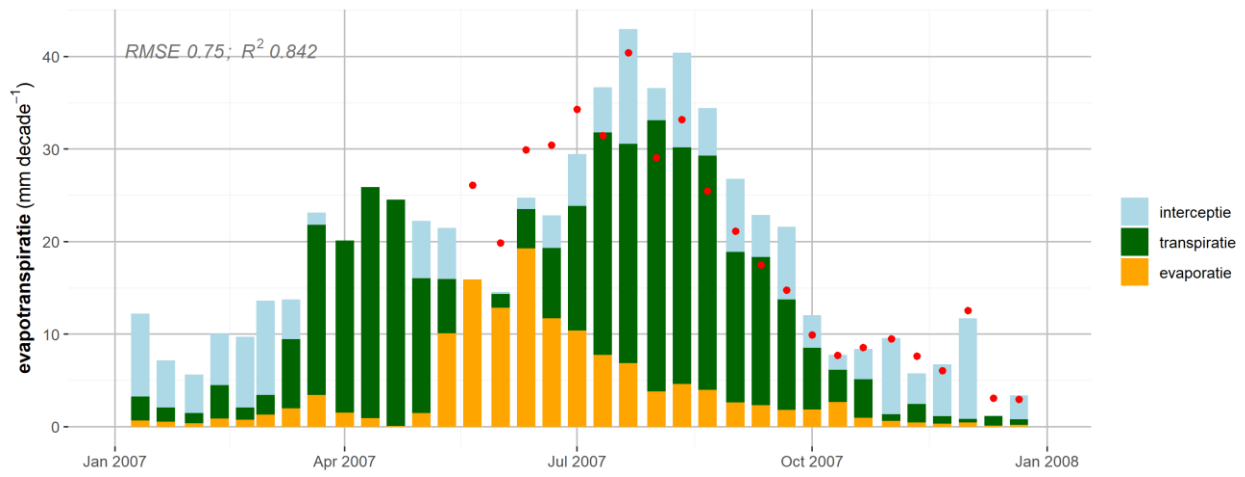
Algemeen	
Locatie	Dijkgraaf
Periode	2007
SWAP	
Meteorologische condities	Weerstation Deelen
Neerslag	Neerslagstation Wageningen (PD) (dagelijkse waarden)
Drainage	Verdisconteerd in onderrand
Onderrand	Gemeten grondwaterstand; gemiddelde grondwaterstand van 94 cm -mv (variërend van 41-135 cm -mv)
WOFOST	
Gewas	Snijmais



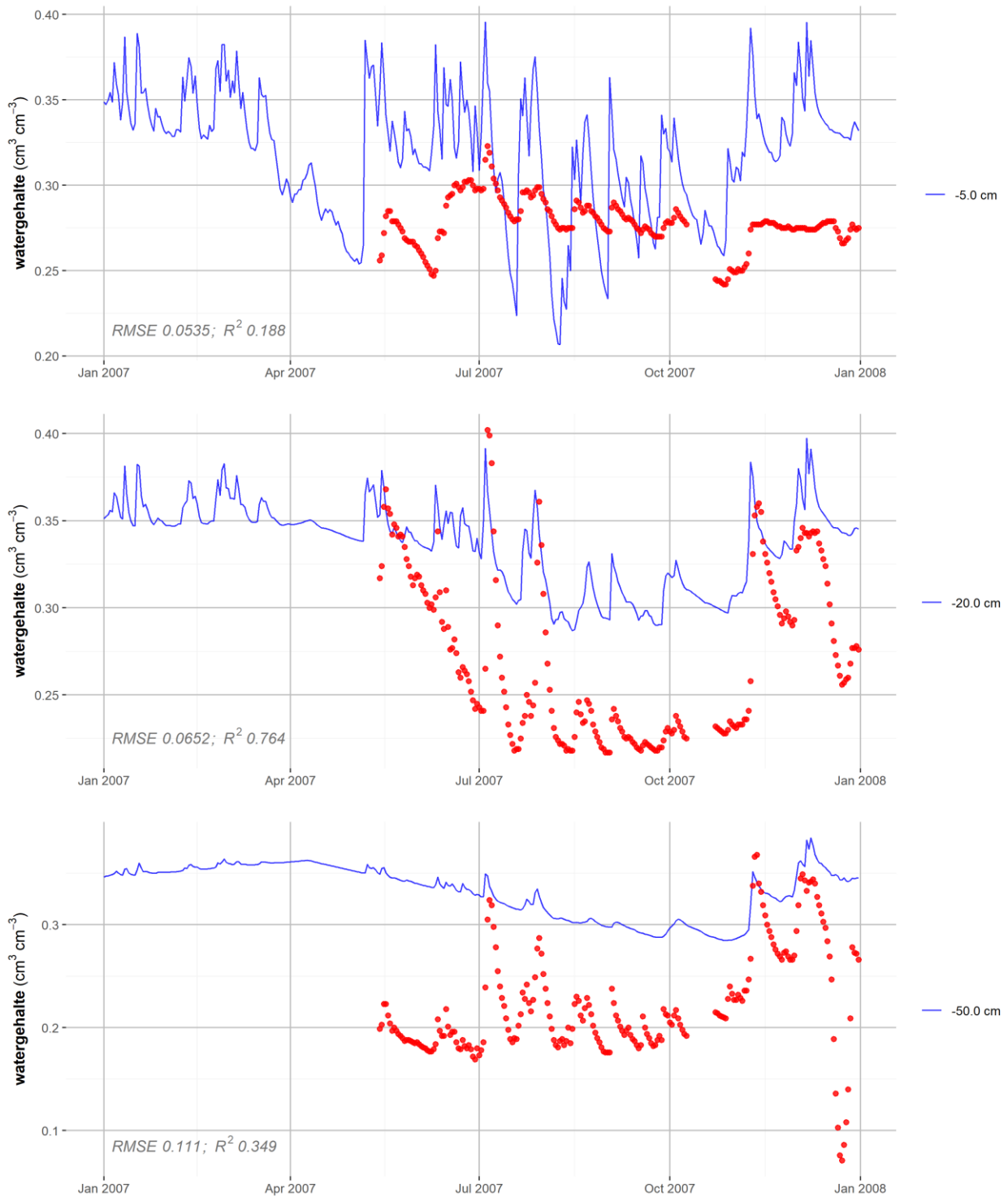
Figuur B-2 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen voor snijmais bij Dijkgraaf (boven), met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; transpiratiereductie als gevolg van ongunstige omstandigheden (onder), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling.



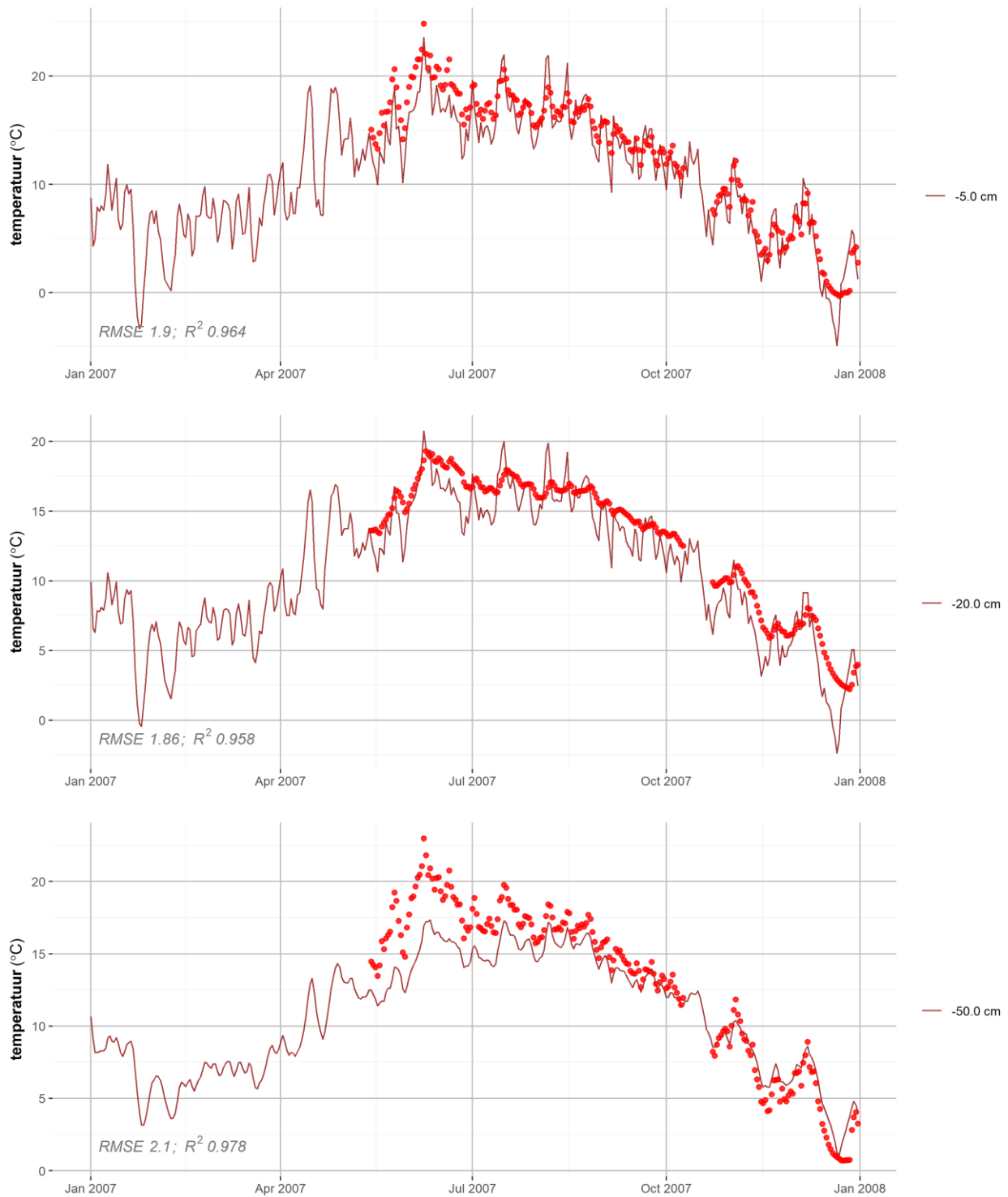
Figuur B-3 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van verschillende plantonderdelen voor snijmais bij Dijkgraaf (boven), met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; Transpiratiereductie als gevolg van ongunstige omstandigheden (onder), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling.



Figuur B-4 Gemeten en gesimuleerde evapotranspiratie bij Dijkgraaf; met in het lichtblauw, groen en oranje respectievelijk de gesimuleerde interceptieverdamping, transpiratie en evaporatie en in het rood de gemeten evapotranspiratie; alle waarden zijn geaggregeerd naar decaden. RMSE weergegeven in mm d⁻¹.



Figuur B-5 Gemeten en gesimuleerd watergehalte op drie verschillende diepten bij Dijkgraaf; met in het blauw de gesimuleerde drukhoogte en in het rood de gemeten waarde.



Figuur B-6 Gemeten en gesimuleerde bodemtemperatuur op drie verschillende diepten bij Dijkgraaf; met in het donkerrood de gesimuleerde bodemtemperatuur en in het rood de gemeten waarde.

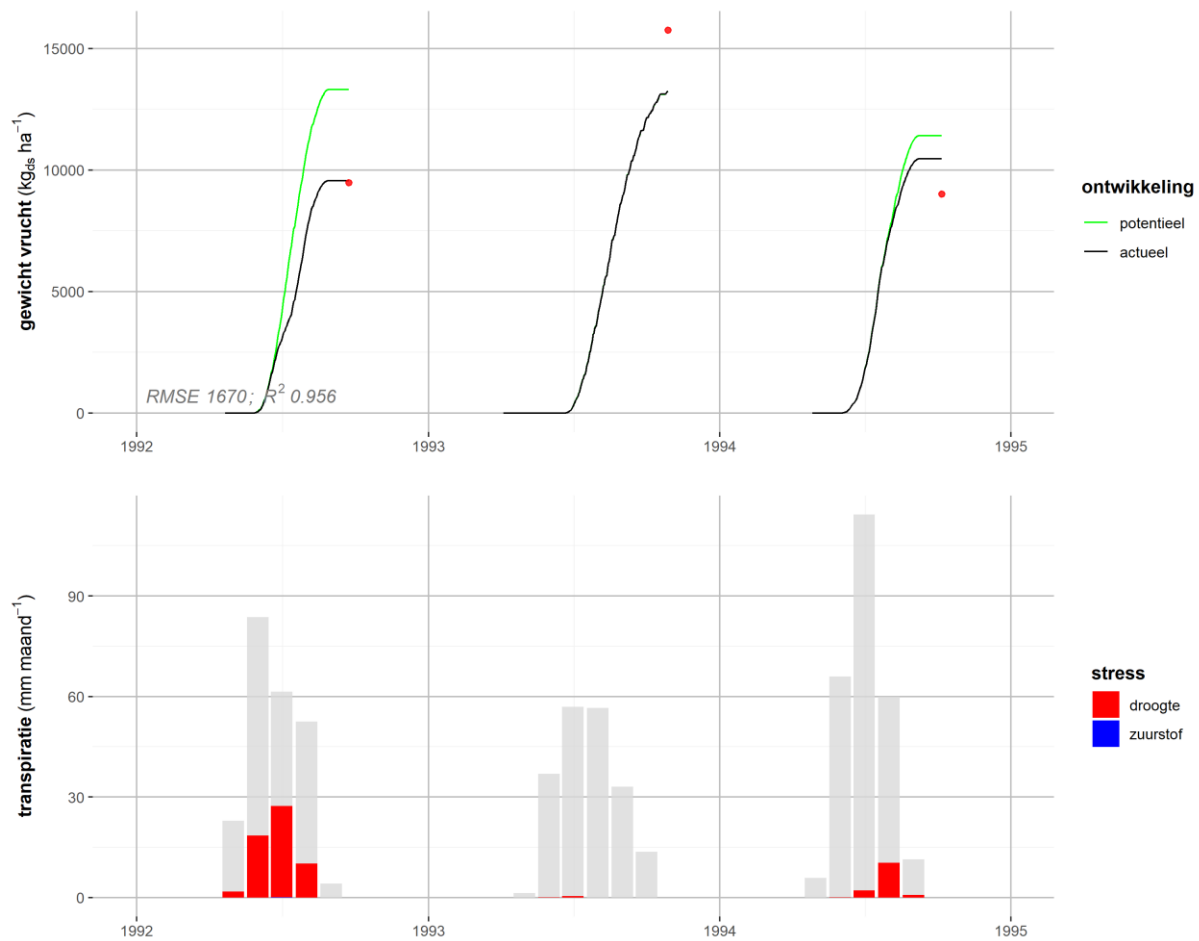
Bijlage C Proefvelden aardappel e.a.

C.1 Borgerswold

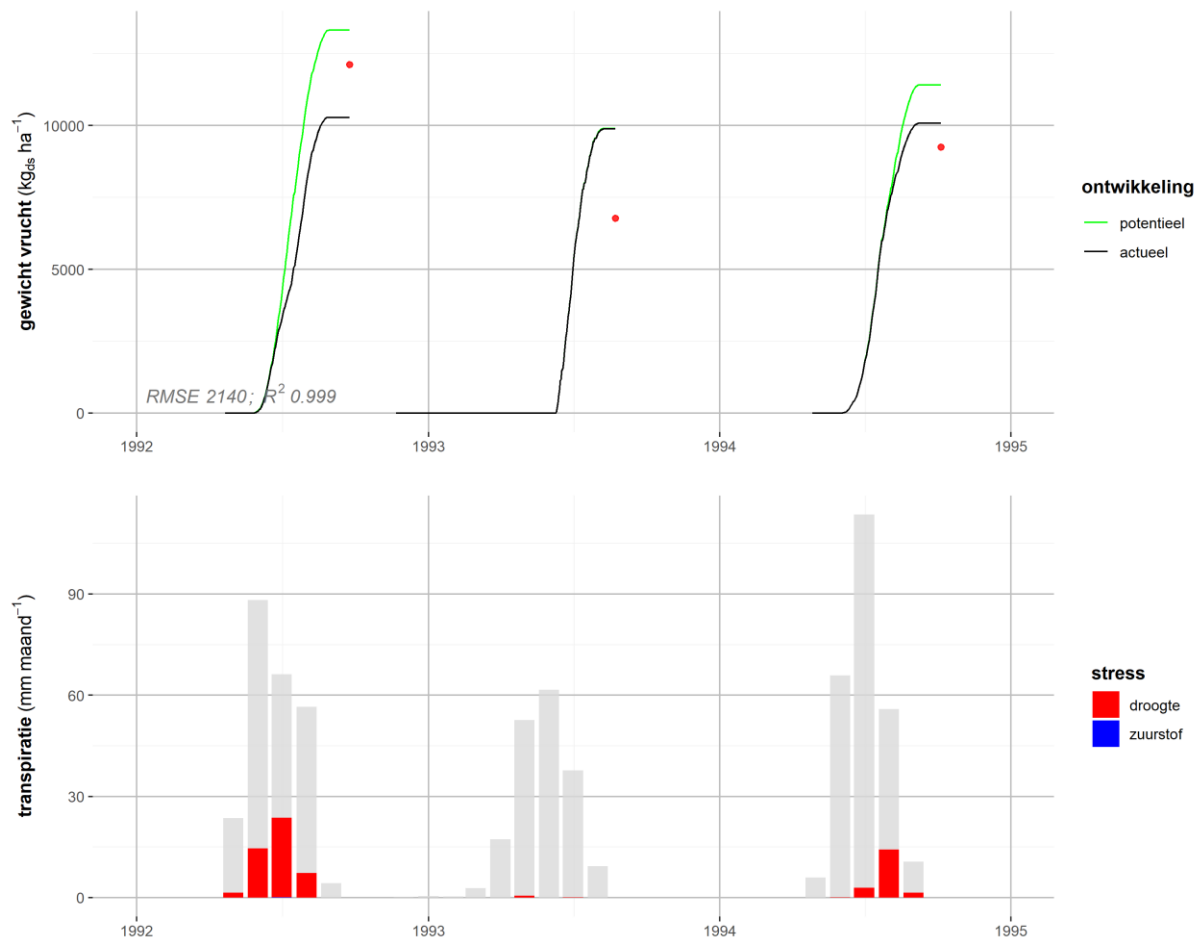
Onderzoek uitgevoerd stikstofemissie naar het grondwater van geïntegreerde en gangbare bedrijfssystemen in de akkerbouw op proefboerderijen Borgerswold en Vredepeel (Dijkstra e.a., 1995).

Tabel C-1 Informatie met betrekking tot modelaansturing SWAP-WOFOST voor Borgerswold.

Algemeen	
Locatie	Borgerswold veld 3 en 13
Periode	1992-1994
SWAP	
Meteorologische condities	Weerstation Eelde
Neerslag	Neerslagstation Eelde (dagelijkse waarden incl. duur)
Drainage	Verdisconteerd in onderrand
Onderrand	Gemeten grondwaterstand; gemiddelde grondwaterstand van 110 cm -mv voor veld 3 (variërend van 21-178 cm -mv) en 120 cm -mv voor veld 13 (variërend van 47-163 cm -mv)
WOFOST	
Gewas	Aardappel (1992 en 1994) afgewisseld met suikerbieten (veld 3; 1993) en wintertarwe (veld 13; 1993)



Figuur C-1 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van de organen voor aardappel bij Borgerswold veld 3 (boven), met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; transpiratiereductie per decade als gevolg van ongunstige omstandig (onder), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling.



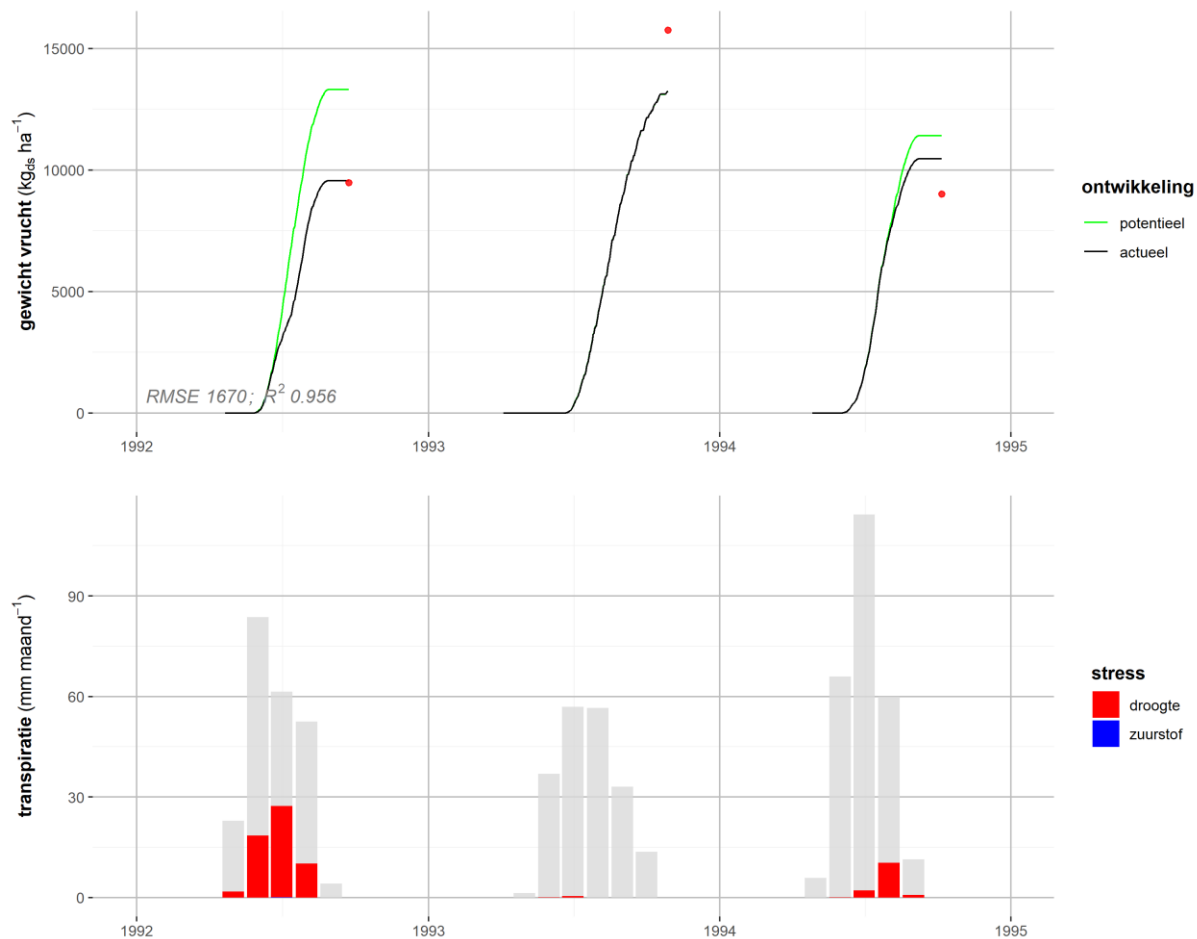
Figuur C-2 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van de organen voor aardappel bij Borgerwold veld 13 (boven), met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; transpiratiereductie per decade als gevolg van ongunstige omstandig (onder), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling.

C.2 Rusthoeve

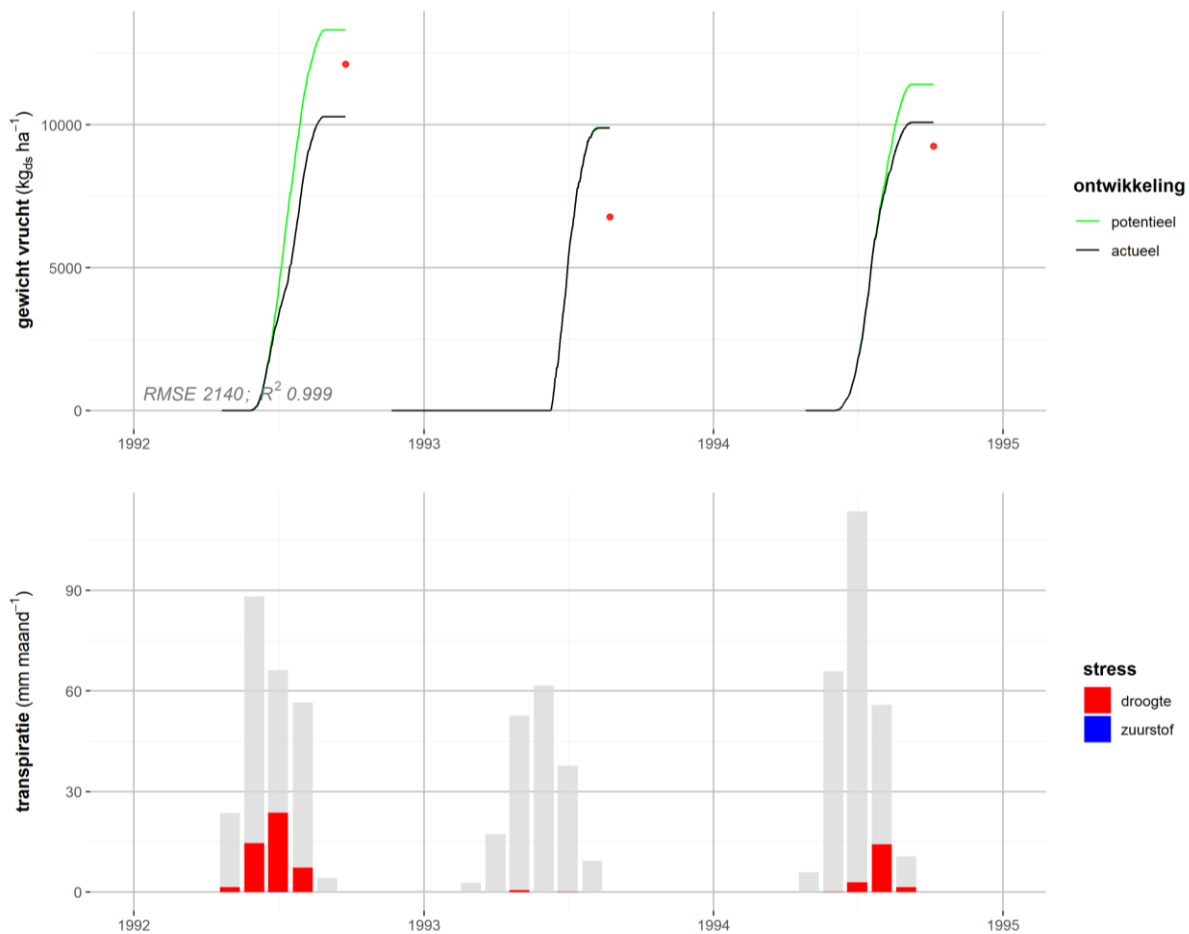
Dit onderzoek betreft een praktijkproef met regelbare drainage (Schipper e.a., 2015).

Tabel C-2 Informatie met betrekking tot modelaansturing SWAP-WOFOST voor Rusthoeve.

Algemeen	
Locatie	Rusthoeve veld B7
Periode	2011-2013
SWAP	
Meteorologische condities	Weerstation Vlissingen
Neerslag	Neerslagstation Kortgene (dagelijkse waarden incl. duur)
Drainage	Twee drainagesystemen; eerste systeem met een variërend slootpeil tussen 60-120 cm -mv (augustus-oktober) met een lage weerstand en een tweede systeem met buisdrainage op een diepte van 150 cm -mv met een hoge weerstand
Onderrand	Gemeten grondwaterstand; gemiddelde grondwaterstand van 110 cm -mv (variërend van 7-187 cm -mv)
WOFOST	
Gewas	Aardappel (2013) afgewisseld met suikerbieten (2011) en wintertarwe (2012)



Figuur C-3 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van de organen voor aardappel bij Borgerwold veld 3 (boven), met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; transpiratiereductie per decade als gevolg van ongunstige omstandigheden (onder), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling.



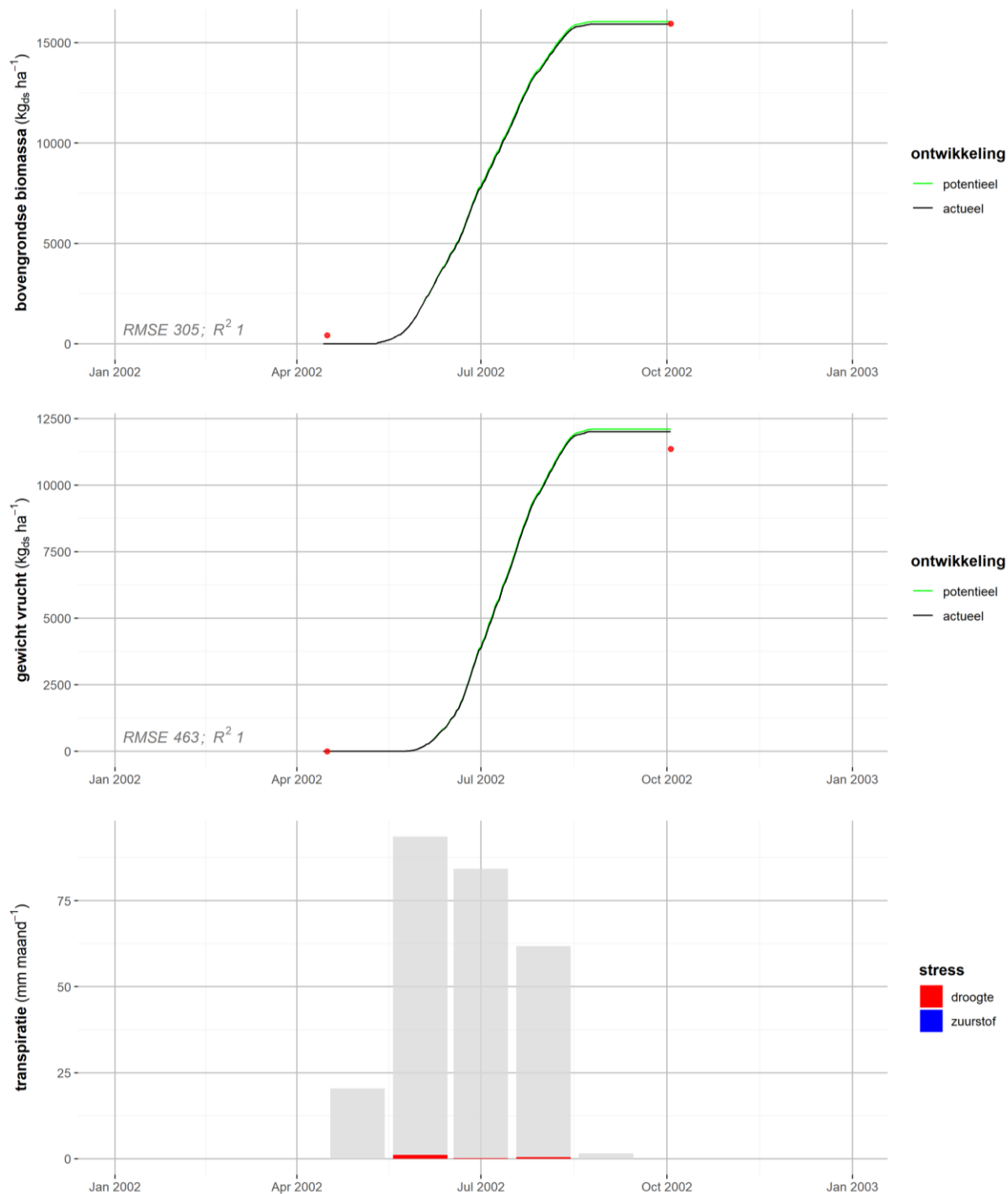
Figuur C-4 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van de organen voor aardappel bij Borgerwold veld 13 (boven), met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; transpiratiereductie per decade als gevolg van ongunstige omstandigheden (onder), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling.

C.3 Vredepeel

In 2002 zijn experimenten gedaan voor het project 'Telen met toekomst' en is onderzoek gedaan naar lachgas (Van Groenigen e.a., 2005a; 2005b). De modelschematisatie met betrekking tot het model SWAP is overgenomen van Stolk e.a. (2012).

Tabel C-3 Informatie met betrekking tot modelaansturing SWAP-WOFOST voor Vredepeel.

Algemeen	
Locatie	Vredepeel veld 26
Periode	2002
SWAP	
Meteorologische condities	Weerstation Eindhoven
Neerslag	Neerslagstation Eindhoven (dagelijkse waarden incl. duur)
Drainage	Twee drainagesystemen; eerste systeem met een vast slootpeil van 100 cm -mv met een weerstand van 250 d en een tweede systeem met een vast slootpeil van 200 cm -mv met een weerstand van 1000 d
Onderrand	Gemeten grondwaterstand; gemiddelde grondwaterstand van 107 cm -mv (variërend van 32-146 cm -mv)
WOFOST	
Gewas	Aardappel



Figuur C-5 Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van de bovengrondse delen (boven) en organen (midden) voor aardappel bij Vredepeel veld 26, met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde; transpiratiereductie per decade als gevolg van ongunstige omstandigheden (onder), met in het rood en blauw respectievelijk de reductie door te droge en te natte omstandigheden en in het grijs de potentiële transpiratie gegeven de actuele gewasontwikkeling.

Bijlage D Afleiden nieuwe beregeningskaart De Raam

Analyse grasland

Zoals we in sectie 4.1 hebben gezien, speelt bij grasland het management een belangrijke rol. Bij een graslandperceel dat wordt beregend, kan de groenindex op enkele beelden laag uitvallen indien er een maaisnede heeft plaatsgevonden. Wel is het aannemelijk om te veronderstellen dat een perceel dat beregend wordt, gemiddeld een hogere groenindex heeft over het gehele groeiseizoen. Het is dan de vraag vanaf welke gemiddelde NDVI-waarde er waarschijnlijk sprake is geweest van beregening. Om daar meer inzicht in te krijgen, is in Figuur D-1 een frequentieverdeling gemaakt van de NDVI-waarden van alle graslandpercelen in het stroomgebied van De Raam op dagen waarop het cumulatieve neerslagtekort sterk oploopt. Hierbij zijn de NDVI-beelden in het voorjaar zijn buiten beschouwing gelaten. Gedurende deze periode mag verondersteld worden dat het vochtleverend vermogen van de bodem nog voldoende is. De kans dat er significant droogtestress wordt ervaren door het gewas is dan relatief klein.

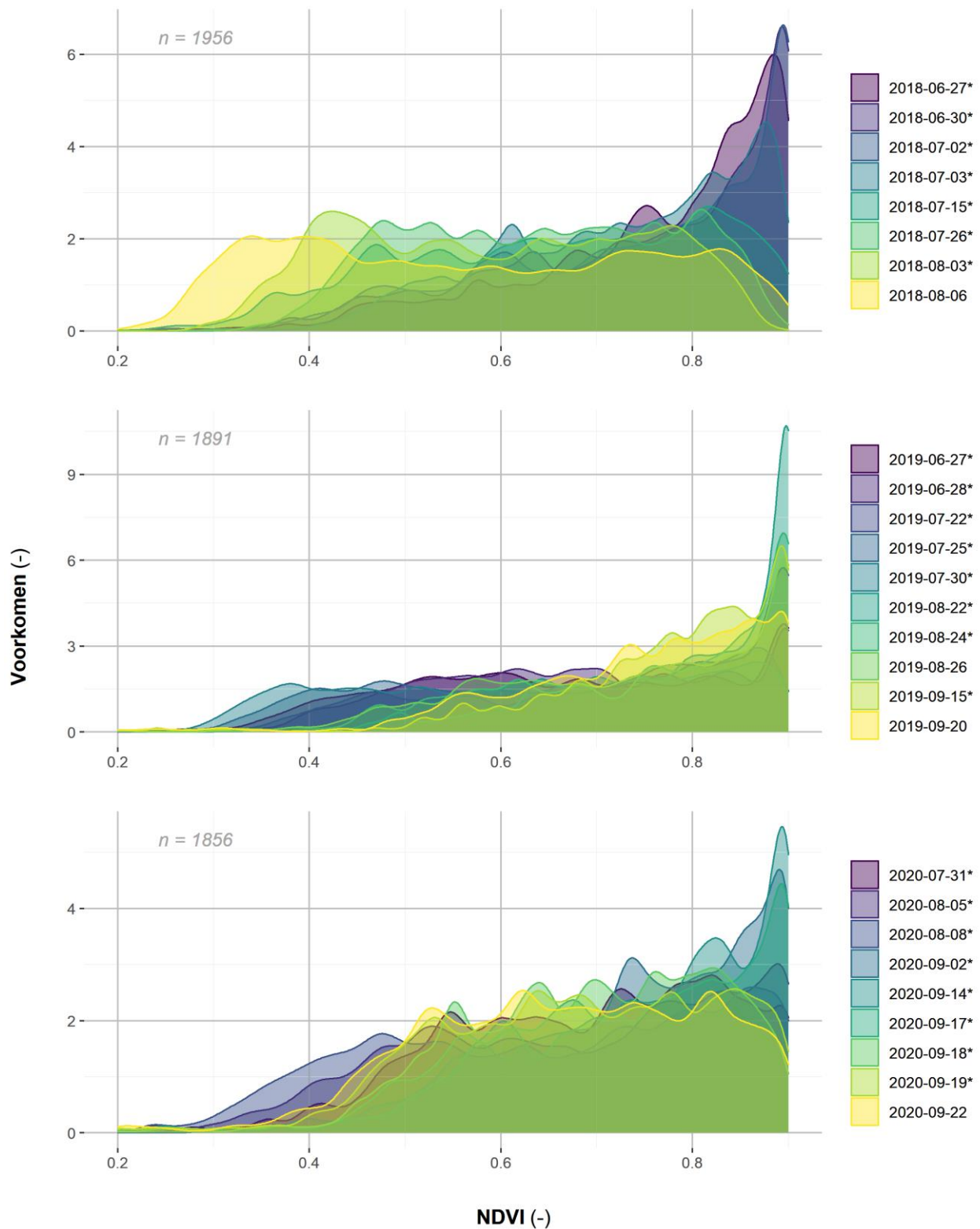
Als we kijken naar de NDVI-frequentieverdeling van 2018, zien we in de NDVI-beelden gedurende de periode van eind juni tot begin augustus een duidelijke afnemende trend in de groenindex. Tijdens deze periode neemt het neerslagtekort snel toe, met droogtestress tot gevolg. In 2019 en 2020 zijn ook perioden te herkennen waarbij de groenindex in het stroomgebied van De Raam afneemt gedurende korte perioden. Maar in tegenstelling tot 2018 is er geen sprake van een continue afname. Daarentegen is er ook niet echt sprake van een langdurige periode zonder neerslag zoals in 2018 het geval was.

Omdat we het liefst alleen informatie willen gebruiken waarbij de reductie van de groenindex wordt veroorzaakt door droogtestress, hebben we gekeken of we bepaalde data waarop management waarschijnlijk heeft plaatsgevonden uit de analyse kunnen laten. Hierbij kun je bijvoorbeeld denken aan momentopnamen voorafgaand aan voorspelling van neerslag (zie Figuur D-1). Het uitsluiten van deze informatie heeft natuurlijk ook een nadeel: je verliest veel informatie indien er geen sprake is geweest van management. Er is daarom gekozen om gebruik te maken van alle beelden die beschikbaar zijn. Wellicht is het mogelijk om op perceelniveau aan te kunnen geven of een reductie in de groenindex het gevolg is geweest van maaisnede dan wel droogtestress. Bij een maaisnede verwacht je een sterke daling in de groenindex en bij droogtestress verwacht je een daling die geleidelijk verloopt. Voor dit onderzoek gaat het te ver om dit uit te zoeken.

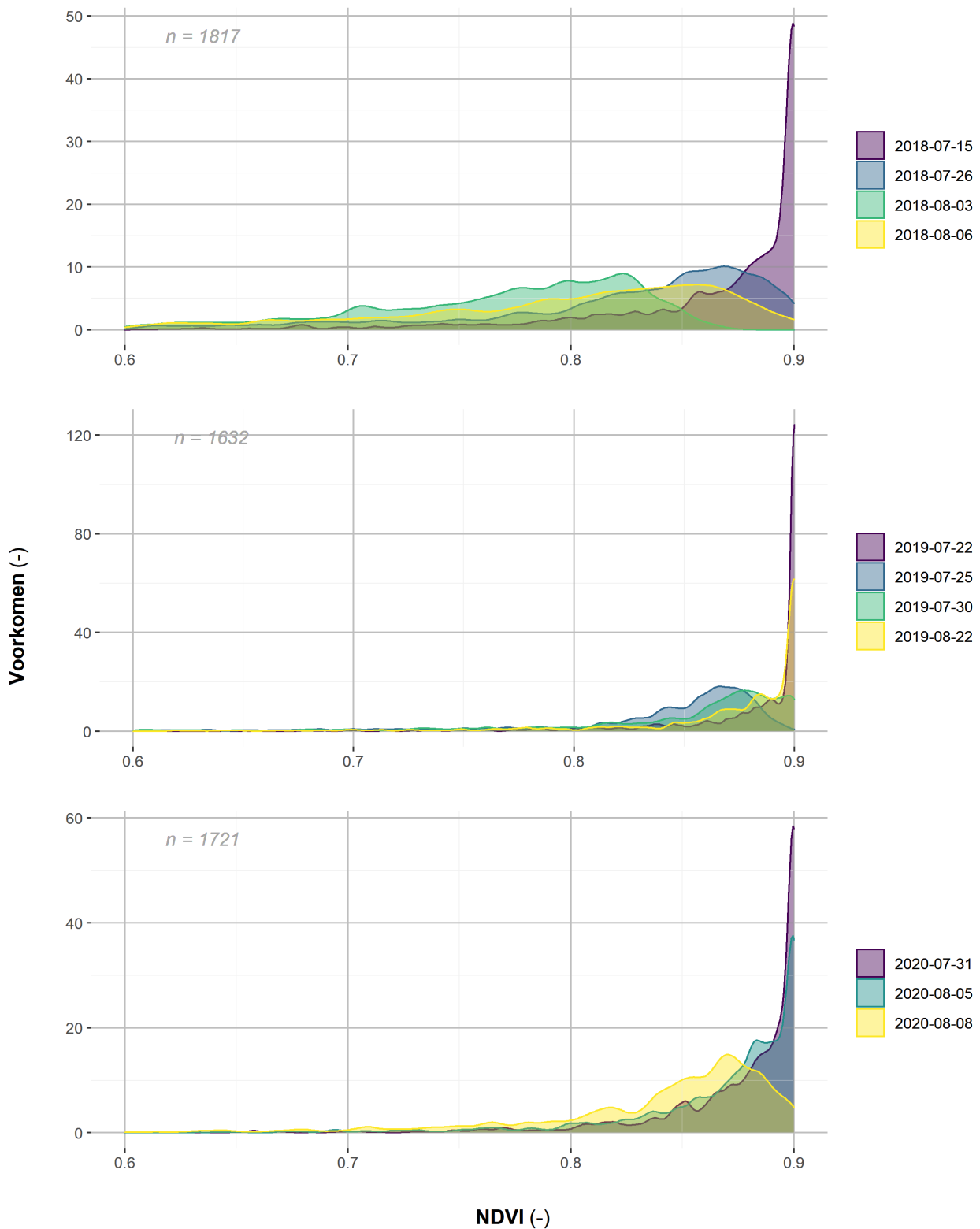
Analyse maispercelen

Een vergelijkbare analyse kunnen we uitvoeren voor alle percelen met snijmais, zie Figuur D-2. Zoals eerder aangegeven, is de periode waarin een optimale groenindex mag worden verwacht aanzienlijk korter dan bij grasland (half juli tot half augustus). Er zijn daardoor minder satellietbeelden geschikt voor de analyse. In de figuur is duidelijk te zien dat snijmais veel minder spreiding heeft in de groenindex vergeleken met grasland. In 2018 is er een afnemende trend in de groenindex zichtbaar in de eerste drie opeenvolgende beelden. Opvallend is een kleine toename van de groenindex ten opzichte van 3 augustus, terwijl er in de periode van 3 tot 6 augustus geen neerslag is geregistreerd (bij het weerstation Volkel en satellietbeelden van de neerslag). De toename van de groenindex tussen 3 en 6 augustus wordt veroorzaakt doordat de NDVI-beelden afkomstig zijn van verschillende satellieten (Sentinel en Landsat).

In 2019 zien we in eerste instantie een globale afname van de groenindex. Maar na 25 juli is er sprake van een gemiddelde toename in de opeenvolgende beelden van 30 juli en 22 augustus. Deze periode gaat gepaard met een periode waarin regelmatig sprake is van neerslag (zie ook de stagnatie in het neerslagtekort in Figuur 4-2). In 2020 zijn er drie beelden beschikbaar gedurende een periode waarin het neerslagtekort snel oploopt. In deze periode is een geleidelijke afname te zien van de groenindex.



Figuur D-1 Voorkomen van NDVI-perceelwaarden van alle graslandpercelen in het stroomgebied van De Raam gedurende de droge zomerperiode van 2018 (boven), 2019 (midden) en 2020 (onder); weergegeven in de kleuren paars (vroeg in het seizoen) tot geel (laat in het seizoen); data zonder het asterisk-symbool betreffen NDVI-beelden vlak voor een nattere periode.



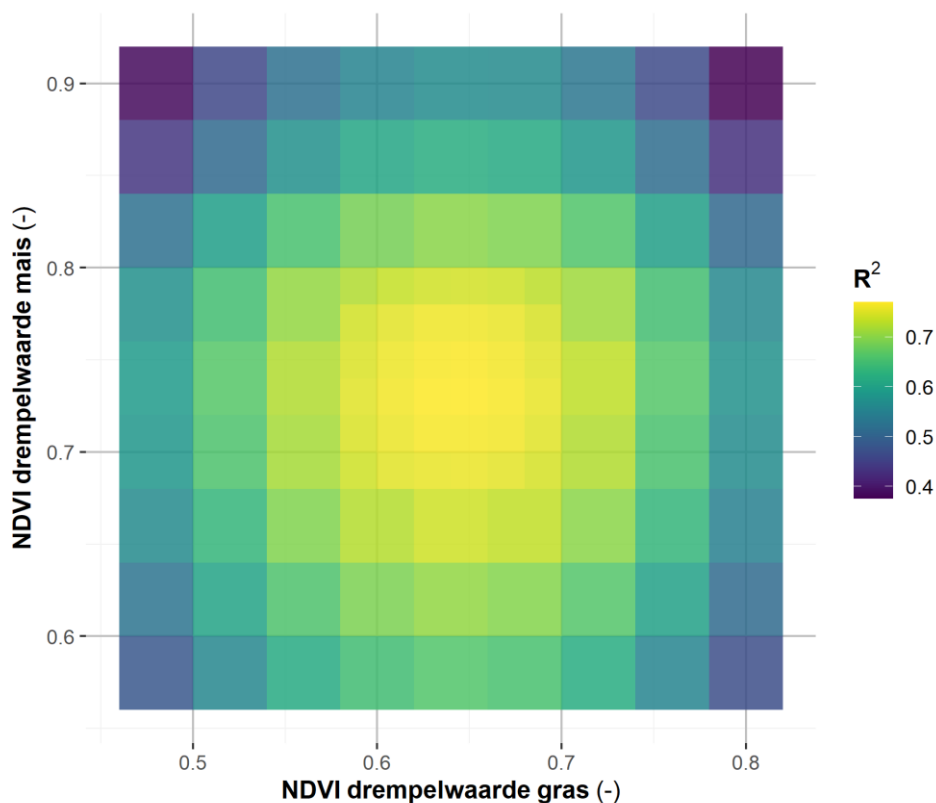
Figuur D-2 Voorkomen van NDVI-perceelwaarden van alle maislandpercelen in het stroomgebied van De Raam gedurende de droge zomerperiode van 2018 (boven), 2019 (midden) en 2020 (onder); weergegeven in de kleuren paars (vroeg in het seizoen) tot geel (laat in het seizoen).

Beregeningscriterium op basis van NDVI-waarde

Om een inschatting te maken of een bepaald perceel wordt beregend of niet, moeten we een drempelwaarde vaststellen. Indien de groenindex hoger is dan de drempelwaarde nemen we aan dat er sprake is geweest van beregening. Omdat de gepresenteerde frequentieverdelingen geen ruimtelijke samenhang weergeven, kan het voorkomen dat op basis van verschillende satellietbeelden een bepaald perceel de ene keer wel boven een drempelwaarde uitkomt en de andere keer niet. Er is daarom gekozen om eerst een gemiddelde

groenindex per perceel te bepalen op basis van satellietbeelden tijdens perioden waarop het neerslagtekort oploopt. Op basis van de frequentieverdelingen hebben we ervoor gekozen om aparte drempelwaarden te hanteren voor grasland en snijmais.

Voor het afleiden van de drempelwaarden is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor 2018. Hierbij stellen we een relatie tussen de gemiddelde NDVI-perceelwaarde, met als verklarende variabelen het gewas (gras of snijmais), bodemtype (BOFEK2020-eenheid), de hydrologische toestand (karakteristieken GHG en GLG afkomstig van GRAM¹⁹) en of er beregning heeft plaatsgevonden (afhankelijk van gehanteerde drempelwaarden voor gras en mais). Als model gebruiken we hiervoor een 'random forest'-model (Breiman 2001). Bij dit model wordt als het ware een heel 'bos' (forest) aan beslisbomen (regression trees) afgeleid, die samen de variantie in groenindex voorspellen ('ensemble modelling'). Op basis van deze gevoeligheidsanalyse hebben we gekozen voor een gemiddelde NDVI-drempelwaarde van 0.65 voor gras en 0.73 voor mais, zie Figuur D-3.

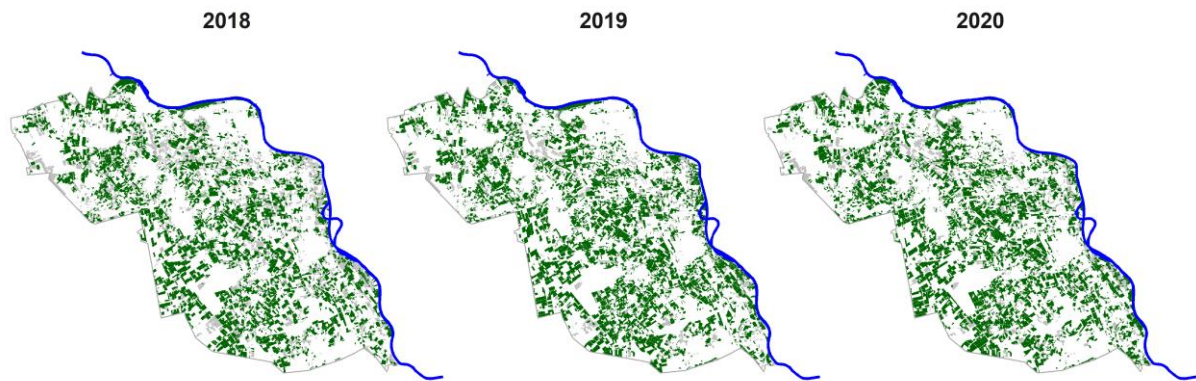


Figuur D-3 Gevoeligheid beregning drempelwaarden voor gras en mais op de verklarende variantie in gemiddelde NDVI-waarden.

Relatief groene percelen

Voor de jaren 2018 tot en met 2020 zijn er ruimtelijke beelden te genereren van percelen die een gemiddelde groenindex hebben van boven en onder de NDVI-drempelwaarde, zie Figuur D-4. In 2018 is 55% van alle percelen relatief groen. In 2019 en 2020 zijn er meer percelen die boven de NDVI-drempelwaarde uitkomen, respectievelijk 71% en 68%. Een verklaring hiervoor is dat er in 2019 en 2020 geen sprake was van een langdurige periode zonder neerslag. Met deze analyse is er een scheiding gemaakt tussen percelen met gemiddeld een hogere groenindex in vergelijking tot andere percelen. Op basis van deze analyse kunnen we echter nog niet concluderen of deze groenere percelen ook daadwerkelijk zijn beregend.

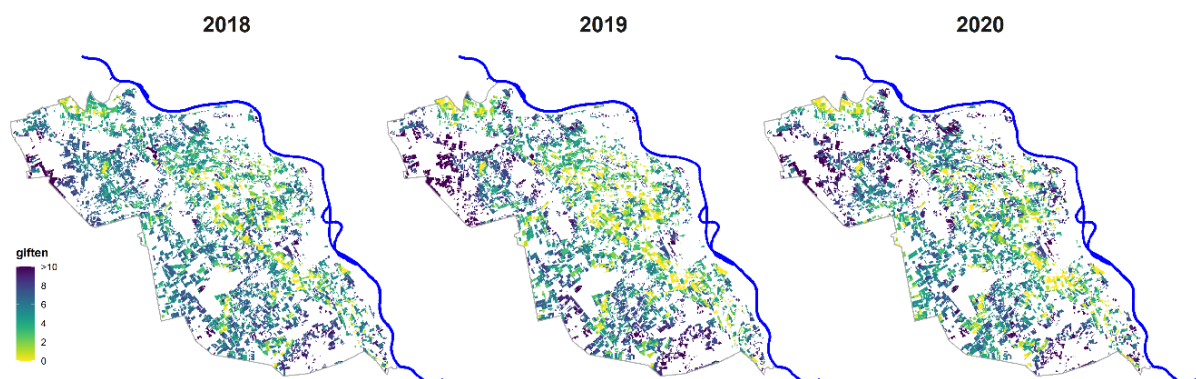
¹⁹ Grondwatermodel Aa en Maas.



Figuur D-4 Locaties van alle gras- en maispercelen in het stroomgebied van De Raam waarbij percelen met een relatief hoge groenindex in het groen zijn weergegeven voor de jaren 2018-2020.

Beregeningsbehoefte

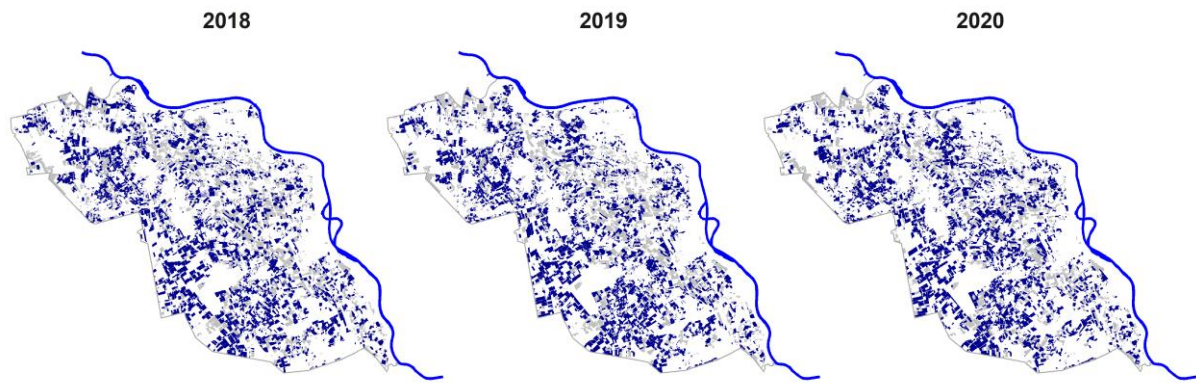
Een relatief hoge groenindex kan het gevolg zijn van beregening, maar ook het gevolg zijn van gunstige hydrologische bodemcondities. Met behulp van het SWAP-WOFOST-modelinstrumentarium proberen we percelen met gunstige hydrologische bodemcondities uit te sluiten. Daarvoor voeren we voor elke ruimtelijke eenheid (gridcel; 25m-resolutie) een SWAP-WOFOST-berekening uit met zowel gras (intensief maaien) als snijmais waarbij er sprake is van beregening indien er te veel droogtestress wordt ervaren door het gewas. Informatie met betrekking tot bodemtype, het verloop van de grondwaterspiegel en meteorologie voor de aansturing van het modelinstrumentarium zijn hierbij ontleend aan GRAM. Het aantal gesimuleerde beregeningsgiften voor de jaren 2018-2020 is weergegeven in Figuur D-5.



Figuur D-5 Aantal beregeningsgiften per jaar voor alle gras- en maispercelen in het stroomgebied van De Raam voor de periode 2018-2020 gesimuleerd met SWAP-WOFOST.

Beregeningskaart De Raam

De resultaten weergegeven in Figuur D-4 en Figuur D-5 kunnen we vervolgens combineren tot een beregeningskaart. Indien een perceel relatief groen is en er meer dan twee beregeningsgiften zijn gesimuleerd, gaan we ervan uit dat het perceel in de praktijk ook daadwerkelijk is beregend. Het hanteren van een minimaal aantal beregeningsgiften is aannemelijk vanwege de afschrijvingskosten van beregeningsinstallaties. In Figuur D-6 zijn de beregeningskaarten voor alle gras- en maispercelen weergegeven. Hierbij wordt in 2018 49% van alle percelen beregend. In 2019 en 2020 is dat 56%.



Figuur D-6 Beregeningskaarten per jaar voor alle gras- en maispercelen in het stroomgebied van De Raam voor de periode 2018-2020 op basis van de Groenmonitor en SWAP-WOFOST-simulaties.

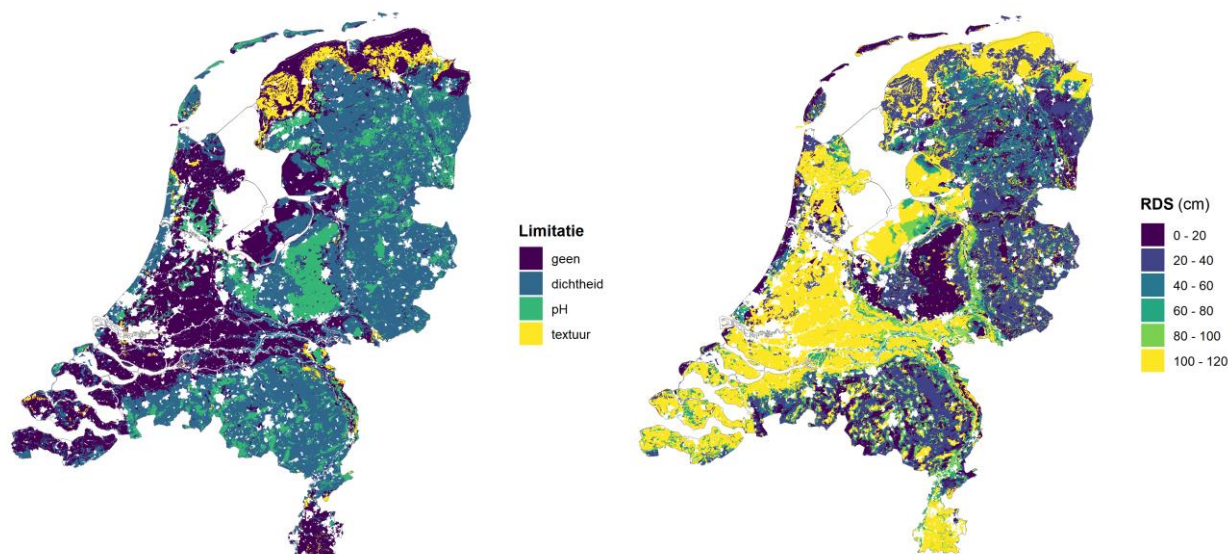
Bijlage E Bewortelbare zone

De dikte van de wortelzone bepaalt voor een groot deel het wateraanbod voor het gewas. Ondanks het belang van een goede inschatting voor de maximale dikte van de bewortelbare zone gaat het instellen ervan gepaard met veel onzekerheid. In het verleden is een tweetal studies uitgevoerd waarbij is gekeken wat bodemkundig de maximale dikte van de wortelzone is (Ten Cate 1995; Groenendijk e.a., 2017). Hieruit blijkt onder andere dat de maximale dikte kan worden beperkt door een te lage pH-waarde, een te hoge dichtheid, textuur of aeratie (zie Figuur E-1).

Bij Waterwijzer Landbouw hanteren we de volgende vuistregels:

- een pH-waarde kleiner dan 4.0;
- een dichtheid van 1600 kg m⁻³ tot 1200 kg m⁻³, afhankelijk van het lutumgehalte (respectievelijk 20% en 65%; lineair verband);
- voor het bepalen van de limitatie veroorzaakt door textuur is gekeken naar de bodembeschrijving. Verschillende oorzaken kunnen hieraan ten grondslag liggen. Een bodemkundige textuursprong (grof zandige lagen die dieper liggen dan de bouwvoor), blokkades in de vorm van vast gesteente (bij de kalkverweringsgronden; KK), voorkomen van katteklei en knip/knippig (bodemcode gMn53C);
- bij luchtgehalten van minder dan 10 à 15% wordt de beworteling sterk beperkt. Een slechte aeratie kan worden veroorzaakt door zowel een hoge grondwaterstand, als een slechte bodemstructuur, als een sterke opdrachtheid. Limitatie als gevolg van een slechte bodemstructuur of een sterke opdrachtheid wordt vooralsnog niet meegenomen. Een slechte aeratie als gevolg van een te hoge grondwaterstand wordt wel rekening mee gehouden in de SWAP-WOFOST modelsimulatie door de zuurstofstress in het onderste bodemcompartiment van de wortelzone te monitoren. Deze limitatie is daarmee afhankelijk van de tijd.

Bovenstaande vuistregels resulteren in een bodemkundige bewortelbare zone die is weergegeven in Figuur E-1. De gehanteerde vuistregels kunnen ertoe leiden dat er geen bewortelbare zone aanwezig is. Daarom hebben we gekozen om een minimale bewortelingsdiepte aan te houden die afhankelijk is van het type gewas. Voor gras en groenteteelt wordt een minimumdikte aangehouden van 10 cm, voor akkerbouw en boomteelt is dit respectievelijk 20 en 50 cm.



Figuur E-1 Bodemkundige limitatie van de bewortelbare zone als gevolg van een te lage pH-waarde, een te hoge dichtheid of textuur, bepaald met behulp van de bodemprofielgegevens van de Bodemkaart van Nederland; met links de oorzaak van de limitatie en rechts de maximale bewortelbare zone (cm).

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

Wageningen Environmental Research
Rapport 3248
ISSN 1566-7197



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

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



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

Rapport 3248
ISSN 1566-7197

STOWA 2023-10

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

