

# Verbetering en Validatie van Waterwijzer Landbouw 2024-2025



Werkgroep Waterwijzer Landbouw

Dit onderzoek is uitgevoerd door het consortium van TKI-Deltatechnologie-project WENR40: Verbetering en Validatie van Waterwijzer Landbouw

Wageningen Environmental Research

Wageningen, maart 2026

---

Gereviewd door: Pim Dik

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

Rapport ????

ISSN 1566-7197

---

Waterwijzer Landbouw is een modelinstrumentarium voor het kwantificeren van de effecten van hydrologie en klimaat op landbouwkundige gewasopbrengsten. Het systeem, gebaseerd op de modellen SWAP en WOFOST, wordt breed toegepast in Nederland. Ondanks eerdere verbeteringen bleken er tekortkomingen, onder andere in de beschrijving van droogteschade op kleigronden en wortelontwikkeling.

Het project *Verbetering en Validatie van Waterwijzer Landbouw (VV-WWL)* heeft deze knelpunten aangepakt door de introductie van mechanistische wateropname, adaptieve wortelgroei en geactualiseerde gewasparameters. Daarnaast is het model geschikt gemaakt voor nieuwe klimaatscenario's en uitgebreid gevalideerd met veld- en praktijkdata.

Watervision Agriculture is a modelling framework used to quantify the effects of hydrology and climate on agricultural crop yields. The system, based on the SWAP and WOFOST models, is widely applied in the Netherlands. Despite earlier improvements, several limitations remained, including shortcomings in the representation of drought stress on clay soils and root development.

The project *Improvement and Validation of Waterwijzer Landbouw (VV-WWL)* addressed these issues by introducing mechanistic water uptake, adaptive root growth, and updated crop parameters. In addition, the model has been adapted for use with new climate scenarios and has been extensively validated using field and practical data.

Trefwoorden: Waterwijzer Landbouw, SWAP, WOFOST, wateropname, gewasopbrengstderiving

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

© 2026 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](http://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 met een gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem volgens ISO 9001 en een milieumanagementsysteem dat voldoet aan de norm ISO 14001.

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

Wageningen Environmental Research Rapport ???? | ISSN 1566-7197

---

# Inhoud

<b>Verantwoording</b>	<b>7</b>
<b>Woord vooraf</b>	<b>9</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>11</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>15</b>
1.1 Aanleiding voor het project	15
1.2 Doel van het project	15
1.3 Beoogd Resultaat	16
1.4 Leeswijzer	16
<b>2 Bepaling landbouwkundige gewasopbrengst</b>	<b>17</b>
2.1 Kwantificeren van opbrengstderving en toewijzing van schade aan indirecte en directe effecten	17
2.1.1 Kwantificering van gewasopbrengst bij toepassen van de statische gewasgroeimodule	19
2.1.2 Kwantificering van gewasopbrengst bij toepassing van dynamische gewasgroeimodule	20
2.1.3 Vergelijking van potentiële gewasopbrengst bepaald met een statische en dynamische gewasgroeimodule	21
2.2 Onderverdeling van de directe effecten	22
2.2.1 Toewijzing aan stressfactoren bij empirische en mechanische wateropnameconcepten	23
2.2.2 Doorwerking van stress in het resterende groeiseizoen	28
<b>3 Doorontwikkeling Waterwijzer Landbouw</b>	<b>32</b>
3.1 Doorgevoerde wijzigingen vanaf WWL-versie 3.0.0	32
3.2 Toepassing in pilotstudies	36
3.3 Toekomstige doorontwikkelingen	43
3.3.1 Zoutstress	43
3.3.2 Stikstofstress	43
3.3.3 Alternatieve gewassen	44
<b>4 Toetsing Waterwijzer Landbouw</b>	<b>45</b>
4.1 Toetsing gecontroleerde veldproeven	45
4.2 Vergelijking met gegevens van het BIN	53
4.2.1 Koppeling BIN en Waterwijzer Landbouw	53
4.2.2 Samenhang tussen gewasopbrengsten	55
4.2.3 Regressieanalyse met behulp van een Linear Mixed Model	58
<b>5 Effect van klimaatverandering</b>	<b>62</b>

5.1	Scenario's klimaatverandering	62
5.2	Effect op neerslaghoeveelheden	63
5.3	Effect op de potentiële gewasopbrengst	65
5.4	Effect op de watervraag van het gewas	67
<b>6</b>	<b>Van modelinstrumentarium naar WWL-tabel</b>	<b>76</b>
6.1	Definiëren van modelruns	76
6.2	Afleiden metamodel ten behoeve van de WWL-tabel	78
6.3	Bevindingen bij toepassing WWL-tabel	84
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>89</b>
<b>Literatuur</b>		<b>93</b>
<b>Bijlage A</b>	<b>Bepaling van de verdamping</b>	<b>99</b>
<b>Bijlage B</b>	<b>Pilotstudies</b>	<b>105</b>
<b>Bijlage C</b>	<b>Modelprestaties gecontroleerde veldproeven</b>	<b>111</b>
<b>Bijlage D</b>	<b>Gevoeligheid simulatie zuurstofstress</b>	<b>116</b>
<b>Bijlage E</b>	<b>Simulatie van stikstoflimitatie</b>	<b>121</b>
<b>Bijlage F</b>	<b>Simulatie van zoutstress</b>	<b>125</b>

---

# Verantwoording

Rapport: [...](#)

Projectnummer: 5200048471, TKI: WENR40

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: hydrologisch onderzoeker

naam: Pim Dik

datum: [.....](#)

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: .....



# Woord vooraf

Dit rapport bevat een beschrijving van alle resultaten van TKI-Deltatechnologie-project 'Verbetering en Validatie van Waterwijzer Landbouw' (code WENR40). Voor dit project waren financiële bijdragen beschikbaar van Brabant Water, Rijkswaterstaat (WVL), STOWA en Vitens. In kind bijdragen voor dit TKI-project werden geleverd door ACSG, Arcadis, gemeente Altena, Haskoning, Sweco en TAUW. De betrokken onderzoeksinstituten waren Wageningen Environmental Research (WENR), Wageningen Social & Economic Research (WSER) en KWR. De projectleiding was in handen van WENR.

Leden van de werkgroep Waterwijzer Landbouw:

Martin Mulder (WENR)  
Mirjam Hack-ten Broeke (WENR)  
Marius Heinen (WENR)  
Pim Dik (WENR)  
Ruud Bartholomeus (KWR)  
Jos van Dam (WU)  
Dennis Walvoort (WENR)  
Allard de Wit (WENR)  
Idse Hoving (WLR)  
Gertjan Holshof (WLR)

De consortiumpartners vormden gezamenlijk een begeleidingsgroep, die bovendien was uitgebreid met een vertegenwoordiger van DAW.

De betrokkenen in het consortiumoverleg waren:

ACSG: Saske Klerks en Joris Schaap  
Arcadis: Marloes Arens, Arjen ter Harmsel  
Gemeente Altena: Aernout Ackerman  
Brabant Water: Jeroen Castelijns, Tom van Steijn  
Haskoning: Marc van den Heuvel, Anouk Horn  
KWR: Ruud Bartholomeus, Marjolein van Huijgevoort  
DAW: Hedwig Boerrigter  
Rijkswaterstaat (WVL): Jacques Peerboom  
STOWA: Rob Ruijtenberg, Michelle Talsma  
Sweco: Koen van der Hauw, Kees van Immerzeel  
TAUW: Rik Bulsink, Lise Huijser, Robert Lubben  
Vitens: Evi Derks, Tom Hoogland  
WENR: Pim Dik, Mirjam Hack-ten Broeke, Marius Heinen, Martin Mulder  
WSER: Tom Kisters, Stijn Reinhard, Sinne van der Veer

De eindredactie van dit rapport is uitgevoerd door Martin Mulder en Mirjam Hack-ten Broeke. De review is uitgevoerd door Pim Dik.



# Samenvatting

Waterwijzer Landbouw (WWL) is een veelgebruikt modelinstrumentarium om de effecten van hydrologie en klimaat op landbouwkundige gewasopbrengsten te bepalen. Het instrumentarium is gebaseerd op de modellen SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) en WOFOST (World Food Studies) en wordt toegepast door onder andere waterschappen, provincies, adviesbureaus en de Adviescommissie Schade Grondwater. Sinds de eerste release in 2018 zijn diverse verbeteringen doorgevoerd, maar in de praktijk bleken nog enkele beperkingen aanwezig, zoals onrealistische berekeningen van droogteschade op zware kleigronden en een onvoldoende realistische beschrijving van wortelontwikkeling.

Het TKI-project Verbetering en Validatie van Waterwijzer Landbouw (VV-WWL; 2024-2025) is opgezet om deze knelpunten aan te pakken en het instrumentarium verder te ontwikkelen. Belangrijke verbeteringen zijn onder andere de introductie van nieuwe modelconcepten voor microscopische wateropname en adaptieve wortelontwikkeling, het actualiseren van gewasparameters en het mogelijk maken van berekeningen met de nieuwste klimaatscenario's. Daarnaast richt het project zich op het valideren van de modelresultaten met beschikbare datasets en praktijksituaties, en op het beter inzichtelijk maken van onzekerheden en gevoeligheden in de modeluitkomsten.

Het uiteindelijke doel van het project is het opleveren van een verbeterd en gevalideerd WWL-instrumentarium, inclusief een nieuwe release van de WWL-tabel, die geschikt is voor toepassing in heel Nederland. Door de verbeteringen, validatie en praktijktests moet het vertrouwen van gebruikers in het instrumentarium verder worden vergroot. In deze samenvatting worden de belangrijkste resultaten van het project en de doorgevoerde ontwikkelingen in WWL weergegeven.

## *Bepaling landbouwkundige opbrengstderving*

In deze rapportage gaan we uitgebreid in op hoe met WWL de landbouwkundige gewasopbrengst en opbrengstderving als gevolg van ongunstige hydrologische omstandigheden worden bepaald. Het modelinstrumentarium maakt het mogelijk om effecten van zowel droogte als te natte omstandigheden te kwantificeren. De berekende opbrengstderving betreft uitsluitend kwantitatieve opbrengstverliezen; effecten op gewaskwaliteit blijven buiten beschouwing.

Opbrengstderving wordt gedefinieerd als het verschil tussen de potentiële gewasopbrengst en de actuele opbrengst onder de gegeven hydrologische omstandigheden. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen indirecte effecten en directe effecten. Indirecte effecten hebben met name betrekking op het management zoals verminderde draagkracht van de bodem, waardoor werkzaamheden zoals zaaien, oogsten of maaien worden vertraagd of bemoeilijkt. Directe effecten ontstaan door transpiratiereductie als gevolg van droogte- of zuurstofstress in de wortelzone. Alle overige vormen van stress, zoals zout-, nutriënten- of temperatuurstress, worden nog niet beschouwd in Waterwijzer Landbouw.

De berekening van potentiële en actuele gewasopbrengst verschilt afhankelijk van het gebruikte gewasgroeimodel. Bij een statische gewasgroeimodule wordt de gewasontwikkeling vooraf vastgelegd en wordt opbrengstderving afgeleid uit transpiratiereductie. Deze benadering wordt toegepast voor gewassen waarvoor geen WOFOST-parametrisatie beschikbaar is, zoals bloembollen, groente-, boom- en fruitteelt. Bij een dynamische gewasgroeimodule (WOFOST) wordt de gewasontwikkeling dynamisch gesimuleerd op basis van meteorologische omstandigheden, gewaskenmerken en stressfactoren. Hierdoor beïnvloeden stressmomenten ook de verdere gewasontwikkeling en waterbehoefte gedurende het groeiseizoen.

Het hanteren van een constante waterproductiviteit, zoals bij statische gewasgroei wordt gedaan, heeft zijn beperkingen. In extreme jaren kan dit leiden tot overschatting of onderschatting van de potentiële opbrengst, omdat processen zoals temperatuurstress en fotosynthese niet expliciet worden meegenomen. Bij dynamische gewasgroei wordt hiermee wel rekening gehouden.

Het toewijzen van opbrengstderving aan afzonderlijke stressoren gaat gepaard met onzekerheid. Zowel bij de beschrijving van wateropname (empirische versus mechanistische concepten) als bij de doorwerking van stress in de gewasgroei blijkt dat het lastig is om schade eenduidig toe te schrijven aan specifieke oorzaken

---

zoals droogte- of zuurstofstress. Mechanistische wateropnameconcepten verbeteren de simulatie van wateropname, maar maken de toewijzing aan individuele stressfactoren complexer. Ook kan een stressmoment vroeg in het groeiseizoen doorwerken in latere groeifasen, waardoor latere stressperioden de relatieve bijdrage van eerdere stressoren kunnen veranderen.

De analyse laat zien dat de totale opbrengstderving relatief robuust kan worden bepaald, maar dat de onderverdeling naar afzonderlijke stressoren met aanzienlijke onzekerheid gepaard gaat. Daarom wordt aanbevolen om bij evaluaties van hydrologische maatregelen vooral te kijken naar veranderingen in de actuele gewasopbrengst en de totale opbrengstderving, terwijl de uitsplitsing naar afzonderlijke stressfactoren vooral als indicatief moet worden beschouwd. Uiteindelijk gaat het bij de bestudering van de effecten van hydrologische maatregelen of klimaatverandering om het effect op de gewasopbrengst.

### *Doorontwikkeling Waterwijzer Landbouw*

WWL is sinds de eerste oplevering in 2018 verder ontwikkeld op basis van ervaringen uit pilotstudies en feedback van gebruikers. Sinds versie 3.0.0 (2021) zijn diverse aanpassingen doorgevoerd in de modelaansturing, parametrisatie en invoergegevens. Wijzigingen betreffen onder andere een update van het SWAP-WOFOST modelinstrumentarium, een nieuwe methode voor het bepalen van gewasopbrengstderving, verbeteringen in de beschrijving van wateropname en wortelontwikkeling, aanpassingen in bodemfysische eigenschappen en een herziening van het groeiseizoen en de watervraag.

Een belangrijke verbetering is de overgang van een empirisch naar een mechanistisch concept voor wateropname, gecombineerd met een adaptieve beschrijving van wortelontwikkeling. Daarnaast zijn nieuwe gewasvariëteiten toegevoegd, is de simulatie van interceptie aangepast en zijn meteorologische invoergegevens (zoals windsnelheid en meethoogte van temperatuur en luchtvochtigheid) nauwkeuriger verwerkt. Ook is de definitie van de potentiële gewasopbrengst aangepast, waardoor indirecte effecten van natte omstandigheden expliciet zichtbaar worden in de opbrengstderving.

De effecten van deze wijzigingen zijn onderzocht met WWL-regionaal voor twee pilotgebieden: de gemeente Altena en het stroomgebied van De Raam. In beide gebieden leidt de doorontwikkeling tot een lichte afname van de totale gesimuleerde opbrengstderving, een afname van zuurstofstress en een lichte toename van indirecte effecten. De invloed op droogtestress verschilt per gewas en locatie; bij diep-wortelende gewassen zoals granen kan droogtestress toenemen door de nieuwe beschrijving van wortelontwikkeling. De grootste veranderingen in modelresultaten hangen samen met de invoering van het mechanistische wateropnameconcept.

Voor toekomstige doorontwikkeling wordt verkend hoe aanvullende stressfactoren kunnen worden meegenomen, met name zoutstress en stikstofstress. Dit vereist uitbreiding van het modelinstrumentarium, aanvullende scenarioanalyses en koppeling met bestaande modellen zoals ANIMO. Daarnaast wordt onderzocht hoe alternatieve gewassen in WWL kunnen worden opgenomen, wat aanvullende gewasgegevens vereist. Deze uitbreidingen vragen nog aanzienlijke onderzoeksinspanningen voordat ze in een volgende WWL-versie kunnen worden geïmplementeerd.

### *Toetsing Waterwijzer Landbouw*

Modellen vormen altijd een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid. Daarom is toetsing nodig om te bepalen in hoeverre de modelresultaten bruikbaar zijn. Voor WWL is validatie complex omdat gewasopbrengstderving niet direct kan worden gemeten en omdat geschikte datasets nodig zijn waarin zowel hydrologie als gewasgroei betrouwbaar zijn vastgelegd voor zowel potentiële als actuele condities. Bovendien moet de gewasgroei daarbij voornamelijk worden bepaald door meteorologische omstandigheden, bodem en hydrologie, en niet door factoren zoals nutriëntenbeschikbaarheid, ziekten of agrarisch beheer. In de praktijk ontbreekt zo'n dataset.

De toetsing van WWL richt zich daarom op de vergelijking tussen gesimuleerde en gemeten actuele gewasopbrengsten. Als het modelinstrumentarium de actuele opbrengst goed kan reproduceren, geeft dit vertrouwen in de berekende opbrengstderving.

Uit gecontroleerde veldproeven met gras, snijmais en aardappel blijkt dat WWL de gemeten gewasopbrengsten over het algemeen goed kan reproduceren. Voor grasproeven in Zegveld wordt een goede overeenkomst gevonden tussen gemeten en gesimuleerde opbrengsten. Ook voor aardappelproeven in

Lelystad en Vredepeel is de overeenkomst groot. Ten opzichte van WWL-versie 3.0.0 is in versie 4.0.0 een lichte verbetering in modelprestaties zichtbaar.

Regionale veldwaarnemingen van aardappelopbrengsten (96 percelen in 2020–2021) zijn gebruikt voor een aanvullende toets. Ondanks het ontbreken van directe metingen van hydrologische condities volgt de gesimuleerde opbrengst de waargenomen opbrengst redelijk goed. Wel wordt de opbrengst soms overschat, wat onder andere kan samenhangen met ziekten, kwaliteitsverlies of andere factoren die niet in het model zijn opgenomen.

Tot slot is een vergelijking gemaakt met gerealiseerde opbrengsten uit het BedrijvenInformatieNet (BIN) voor meerdere gewassen. De analyse laat zien dat voor verschillende gewassen, zoals consumptie- en zetmeelaardappel, suikerbiet en zaaiui, een duidelijke positieve samenhang bestaat tussen gerealiseerde en gesimuleerde opbrengsten. Voor gras, snijmais, wintertarwe en pootaardappelen is de samenhang minder sterk. Dit kan deels worden verklaard door onzekerheden in de opbrengstgegevens, verschillen in definities (bijvoorbeeld droge stof versus versgewicht), bedrijfsmanagement en het feit dat sommige opbrengsten in het BIN niet direct worden gemeten maar worden berekend.

Samenvattend laten de verschillende toetsen zien dat WWL in staat is om variaties in gewasopbrengsten als gevolg van hydrologische en meteorologische omstandigheden redelijk goed te reproduceren.

### *Effect van klimaatverandering*

Het effect van klimaatverandering is inzichtelijk gemaakt door de neerslag, de potentiële gewasopbrengst en watervraag van gewassen te analyseren. De analyse is gebaseerd op klimaatscenario's van het KNMI met lage en hoge uitstoot van broeikasgassen in combinatie met een vernattend en verdrogend klimaat. Historische meteorologische gegevens (1991–2020) zijn gebruikt als referentie en naar de toekomst geprojecteerd voor de zichtjaren 2050, 2100 en 2150.

Over het algemeen is een toename van de jaarlijkse neerslag te zien in de verschillende klimaatscenario's. Tegelijkertijd worden zomermaanden droger, met name in juli en augustus. Hierdoor kan ondanks een hogere jaarlijkse neerslagsom toch een groter risico op droogte optreden. Bovendien kan een deel van de extra neerslag door hogere intensiteiten sneller afstromen en daardoor minder beschikbaar zijn voor gewassen.

Voor potentiële gewasopbrengst wordt in de meeste scenario's een toename verwacht. Dit komt vooral door hogere temperaturen, een langer groeiseizoen en een verhoogde CO<sub>2</sub>-concentratie, die bij veel gewassen (C3-gewassen) de fotosynthese en efficiëntie van lichtgebruik stimuleert. Voor grasland kan de potentiële opbrengst in hoge uitstootscenario's oplopen tot circa 30–40% in 2100. Bij zeer hoge temperaturen kan de opbrengst echter weer afnemen doordat fotosyntheseprocessen worden verstoord.

De watervraag van gewassen wordt beïnvloed door meerdere processen. Een hogere CO<sub>2</sub>-concentratie kan leiden tot lagere transpiratie, omdat planten hun huidmondjes minder ver hoeven te openen. Tegelijkertijd kunnen hogere temperaturen en meer straling de atmosferische verdamping verhogen, wat de totale watervraag juist kan laten toenemen. Zonder aanvullende correcties laten modelresultaten vaak een daling van de watervraag zien.

Uit een nadere analyse blijkt echter dat deze daling deels wordt veroorzaakt door methodische verschillen in meteorologische invoer voor toekomstscenario's, met name bij de bepaling van actuele vochtspanning en windsnelheid. Wanneer hiervoor correctiefactoren worden toegepast, verandert het beeld: de watervraag blijkt in veel scenario's toe te nemen ten opzichte van de huidige situatie. Voor grasland kan de watervraag in extreme scenario's zelfs meer dan 20% stijgen in 2100.

De analyse laat daarmee zien dat klimaatverandering waarschijnlijk leidt tot hogere potentiële gewasopbrengsten, maar ook tot een grotere watervraag en een groter risico op zomerdroogte. Correcte verwerking van meteorologische variabelen is essentieel om deze effecten realistisch te kunnen inschatten.

### *Van modelinstrumentarium naar WWL-tabel*

Het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST bevat uitgebreide proceskennis over bodem-water-gewasinteracties en is goed getoetst aan veldexperimenten, maar is relatief complex, rekenintensief en

---

vereist veel invoergegevens. Daarom is binnen WWL als een eerste quickscan een metamodel afgeleid: de WWL-tabel. Dit metamodel bootst de resultaten van SWAP-WOFOST na, maar met minder invoergegevens en aanzienlijk kortere rekentijden, waardoor het geschikt is voor toepassing op regionale schaal.

Voor het afleiden van het metamodel is een groot aantal modelruns uitgevoerd met SWAP-WOFOST, representatief voor uiteenlopende meteorologische, bodemkundige, hydrologische en agronomische omstandigheden in Nederland. Hierbij zijn zes weerstations, twee klimaatperioden (huidig klimaat en het toekomstscenario 2100 Hd), dertien gewassen, wel of geen beregening, 79 bodemprofielen (BOFEK2020) en 396 hydrologische configuraties gecombineerd. In totaal zijn bijna 10 miljoen modelberekeningen uitgevoerd. Van iedere simulatie zijn grondwaterstandskarakteristieken (GHG en GLG), gewasopbrengst, opbrengstderving (uitgesplitst naar stressoren) en beregeningshoeveelheden bepaald.

Het metamodel beschrijft de relatie tussen grondwaterstandskarakteristieken en opbrengstderving met behulp van functies voor indirecte effecten, droogtestress en zuurstofstress. Deze functies worden eerst gefit op basis van modelresultaten en vervolgens gecorrigeerd via een lineaire regressieanalyse. Hiermee wordt de voorspellende relatie tussen de uitkomsten van het metamodel en de oorspronkelijke SWAP-WOFOST-resultaten geoptimaliseerd. De modelprestaties zijn goed: voor de langjarig gemiddelde opbrengstderving heeft 95% van de metamodellen een RMSE afwijking kleiner dan circa 4%.

Daarnaast wordt bij de nieuwe WWL-tabel expliciet onzekerheid in de voorspelling gekwantificeerd. Deze onzekerheid heeft vooral betrekking op de mate waarin het metamodel de SWAP-WOFOST-resultaten kan reproduceren. Onzekerheid kan onder andere ontstaan door spreiding in modelresultaten, beperkingen in de functieform van het metamodel en onzekerheid in de toewijzing van schade aan afzonderlijke stressfactoren. Daarnaast blijven er onzekerheden bestaan in modelinvoer, parametrisatie en modelconcepten. Deze worden niet meegenomen in de gerapporteerde kwantitatieve onzekerheid.

De vernieuwde WWL-tabel is vervolgens in verschillende praktijkstudies getest door leden van het projectconsortium. Deze studies laten zien dat de veranderingen in modelresultaten afhankelijk zijn van bodemtype, gewas en hydrologische situatie. De praktijktoetsen tonen aan dat de nieuwe WWL-tabel over het algemeen realistischere resultaten oplevert dan versie 3.0.0, met name doordat overschatting van zuurstofstress bij natte omstandigheden is verholpen. Ook werd de gebruiksvriendelijkheid van de nieuwe versie positief beoordeeld. Wel blijft een beperking dat voor sommige alternatieve gewassen nog geen parametrisatie beschikbaar is, waardoor berekeningen daarvoor nog niet mogelijk zijn.

# 1 Inleiding

In deze inleiding nemen we allereerst de aanleiding en de doelstelling voor het TKI-project Verbetering en Validatie van Waterwijzer Landbouw (VV-WWL) over. In de laatste paragraaf is een leeswijzer opgenomen.

## 1.1 Aanleiding voor het project

Waterwijzer Landbouw (WWL) is het veel toegepaste modelinstrumentarium voor het bepalen van effecten van hydrologie en klimaat op landbouwkundige opbrengst. Het is gebaseerd op de simulatiemodellen SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) voor bodem-water-atmosfeer-plant interactie, gericht op simuleren van de vochthuishouding in de bodem, en WOFOST (WORld FOod Studies) voor het berekenen van gewasgroei. WWL wordt gebruikt door o.a. waterschappen, provincies, adviesbureaus en de Adviescommissie Schade Grondwater (ACSG). In 2018 is de eerste versie van WWL uitgebracht en sindsdien zijn verschillende verbeteringen doorgevoerd (Mulder e.a., 2019; 2021). Toch bleven er enkele hardnekkige problemen bestaan. Eén van deze problemen had betrekking op gronden met zware klei waarbij onrealistische hoge droogteschade wordt berekend. Ook de wortelontwikkeling van gewassen moest beter worden beschreven in het instrumentarium, want ook daar zagen we onrealistische worteldieptes en wortelgroei. Door te werken met nieuwe concepten zoals de microscopische wateropname en adaptieve wortelontwikkeling lijken de problemen met kleigronden sterk verbeterd. Toetsing van de resultaten aan waarnemingen en waar mogelijk aan de praktijk is daarbij cruciaal. Daarnaast was het de nadrukkelijke wens om te kunnen rekenen voor de nieuwste KNMI-klimaatscenario's uit 2023 om aan te sluiten bij de laatste inzichten.

## 1.2 Doel van het project

Verbeteren en valideren zijn de sleutelwoorden voor dit project, waarbinnen de volgende doelen zijn gesteld:

- a) Verbeteren WWL-instrumentarium (bestaande uit de producten WWL-tabel, WWL-regionaal en WWL-maatwerk) door middel van toepassen van microscopische wateropname en adaptieve wortelontwikkeling in SWAP en dit verbeterde instrumentarium toetsen aan de hand van pilotstudies in gebieden met verschillende bodemtypen;
- b) Aanvullen en verbeteren van gewasparameters om voor huidige en eventuele nieuwe gewassen de berekeningen met WOFOST te kunnen verbeteren;
- c) Verkennen in hoeverre het mogelijk is om in WWL ook rekening te houden met stikstofbeschikbaarheid en rekening te houden met zoutstress als gevolg van toenemende verzilting;
- d) Inzicht geven in effecten van de doorgevoerde verbeteringen (doelstelling a en b) door validatie van het instrumentarium aan oude en nieuwe datasets;
- e) Uitbrengen van een nieuwe release van WWL-tabel, waarbij ook aandacht wordt gegeven aan de KNMI-klimaatscenario's 2023;
- f) Inzicht geven in effect van onzekerheid van het model en gevoeligheid voor onzekerheid in de invoerdata om zo te kwantificeren wat de betrouwbaarheid is van het instrumentarium;
- g) Uitvoeren van een praktijktoets door gebruikers van het verbeterde WWL-instrumentarium;
- h) Delen van de opgedane kennis en resultaten met belanghebbenden en netwerkpartners.

In algemene zin is het overkoepelende doel ook om door verbetering en validatie een situatie te creëren waarbij de gebruikers van WWL met meer vertrouwen het instrumentarium kunnen toepassen. Naast inhoudelijke validatie is daarom juist een praktijktoets door verschillende gebruikers in het consortium uitgevoerd.

---

## 1.3 Beoogd Resultaat

Het resultaat van VV-WWL is een verbeterd WWL-instrumentarium op basis van de modellen SWAP en WOFOST en een nieuwe release van de WWL-tabel waarin de beoogde verbeteringen zijn doorgevoerd. Dat betekent toewerken naar een voor geheel Nederland geschikte versie van de WWL-tabel, waarbij ook aandacht wordt gegeven aan KNMI-klimaatscenario's 2023 en gewasparameters.

De modellen en de nieuwe release zijn voor zover mogelijk gevalideerd aan de hand van oude en nieuwe datasets en getoetst in praktijksituaties voor meerdere gebieden met verschillende bodemtypen.

In dit rapport is de samenvatting hiervan opgenomen. Alle resultaten zijn beschikbaar via de website <https://waterwijzerlandbouw.wur.nl/>

## 1.4 Leeswijzer

Dit rapport bevat onderzoeksresultaten van TKI-project VV-WWL en is tegelijkertijd een naslagwerk. In Hoofdstuk 2 is allereerst een uitgebreide beschrijving gegeven van de theorie en werkwijze van WWL met betrekking tot het kwantificeren en specificeren van de landbouwkundige gewasopbrengst.

Hoofdstuk 3 gaat in op de doorgevoerde wijzigingen in WWL op basis van recente ontwikkelingen. Dit hoofdstuk is gekoppeld aan doelstellingen a) t/m c): Met name in paragraaf 3.1 worden de doorgevoerde wijzigingen beschreven. Het effect van de doorgevoerde wijzigingen op de modelresultaten wordt beschreven aan de hand van twee pilotstudies in paragraaf 3.2. Dit sluit aan bij doelstelling a) voor zover het de toetsing in gebieden met verschillende bodemtypen betreft. Tenslotte gaat Hoofdstuk 3 in paragraaf 3.3 kort in op toekomstige gewenste doorontwikkeling van WWL waarbij aandacht uitgaat naar simulatie van opbrengstderiving als gevolg van stikstoftekorten of als gevolg van verzilting. Hiervoor is een verkenning uitgevoerd zoals bedoeld met doelstelling c). In bijlage E en F van deze rapportage wordt daar meer aandacht aan besteed.

De toetsing en validatie aan de hand van experimenten en de vergelijking met gegevens uit het BIN komt aan de orde in Hoofdstuk 4 (doelstelling d). Hoofdstuk 5 gaat in op het effect van klimaatverandering op de gewasopbrengst en de watervraag van het gewas. In Hoofdstuk 6 wordt de herziene methodiek voor het afleiden van het metamodel beschreven. Dit zal worden gebruikt voor de nieuwe release op de website (doelstelling e). Ook de bevindingen van de uitgevoerde praktijktests van de nieuwe release van WWL zijn in dit hoofdstuk opgenomen (paragraaf 6.3, gekoppeld aan doelstelling g). Ten slotte zijn in Hoofdstuk 7 onze conclusies en ook aanbevelingen voor de toekomst opgenomen.

Het rapport is zo geschreven dat grote delen zonder verdere aanpassing kunnen worden opgenomen in een nieuwe documentatie en gebruikershandleiding voor de WWL-website. Vandaar dat het soms uitgebreider is dan alleen een beschrijving van de resultaten van het project.

# 2 Bepaling landbouwkundige gewasopbrengst

WWL is het instrumentarium om effecten van hydrologie en klimaat op landbouwkundige opbrengst te bepalen. Het is gebaseerd op de simulatiemodellen SWAP (Kroes e.a., 2017; Heinen e.a., 2024) voor bodem-water-atmosfeer-plant interactie, gericht op het simuleren van de vochtthuishouding in de bodem, en WOFOST (Boogaard e.a., 2011; de Wit e.a., 2019) voor het berekenen van gewasgroei. Met dit instrumentarium is het mogelijk om effecten van te weinig water (droogteschade) en te veel water (natschade) te berekenen. We noemen deze effecten gezamenlijk opbrengstderving.

Het bepalen van landbouwkundige opbrengstderving als gevolg van ongunstige hydrologische omstandigheden heeft een lange geschiedenis. Verschillende instrumenten zijn hiervoor gebruikt, zoals HELP (Werkgroep HELP-tabel, 1987; van Bakel e.a., 2005), TCGB-tabel (Bouwmans, 1990) en AGRICOM (Mulder en Veldhuizen, 2017). In 2018 is WWL (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018) beschikbaar gekomen als opvolger van deze instrumenten. Het bepalen van de landbouwkundige opbrengstderving richt zich op de kwantitatieve opbrengstderving. Het effect van ongunstige hydrologische omstandigheden op de gewaskwaliteit, denk aan gehalten van suiker, zetmeel, vezels, eiwitten of aan voederwaarde, wordt bij al deze modelinstrumenten buiten beschouwing gelaten.

In dit hoofdstuk beschrijven we hoe we met WWL de opbrengstderving kwantificeren en hoe we schade toewijzen aan afzonderlijke schadeterminen (stressoren). Er wordt veel waarde gehecht aan de bijdrage van de afzonderlijke stressoren, zoals het aandeel droogte- of zuurstofstress in de totale opbrengstderving. Toch is het de vraag of we eigenlijk wel in staat zijn om afzonderlijke stressoren zoals droogte-, zuurstof- en zoutstress goed van elkaar te onderscheiden. In dit hoofdstuk gaan we daar nader op in.

We beginnen dit hoofdstuk met de werkwijze om de totale opbrengstderving en de toewijzing van schade aan zogenaamde indirecte en directe effecten te kwantificeren. In paragraaf 2.2 gaan we nader in op de specificering van de directe effecten en daarmee de toewijzing van schade aan droogte, zuurstof- en/of zoutstress.

## 2.1 Kwantificeren van opbrengstderving en toewijzing van schade aan indirecte en directe effecten

In WWL definiëren we de opbrengstderving als het verschil in gewasopbrengst gegeven een potentiële gewasontwikkeling en een actuele gewasontwikkeling beïnvloed door ongunstige bodemhydrologische condities:

$$Y_r = Y_p - Y_a \quad \text{Vergelijking 2-1}$$

Met  $Y_p$  en  $Y_a$  respectievelijk de potentiële en actuele gewasopbrengst en  $Y_r$  de opbrengstderving. De eenheid waarin we de gewasopbrengst en opbrengstderving uitdrukken is hierbij afhankelijk van het type gewas en betreft een hoeveelheid uitgedrukt in gewicht of aantallen per oppervlak.

Ongunstige bodemhydrologische condities kunnen op verschillende manieren de actuele gewasopbrengst beïnvloeden. We maken hierbij onderscheid in indirecte effecten en directe effecten:

- *Indirecte effecten*: opbrengstderving gerelateerd aan het management zoals de draagkracht. Het is mogelijk dat de draagkracht ontoereikend is om bepaalde werkzaamheden te verrichten aan het begin van het groeiseizoen, zoals ploegen en planten of zaaien van het gewas. Ook is het mogelijk dat door te natte condities de ontkieming wordt vertraagd of het oogstmoment van het gewas eerder in het seizoen moet plaatsvinden. Al deze effecten hebben invloed op de lengte van het groeiseizoen en daarmee op de actuele gewasopbrengst. Bij gras speelt de lengte van het groeiseizoen geen rol maar kunnen te natte condities tijdens het oogstmoment (maaien of beweiden) leiden tot berijdings- en vertrappingsverliezen.

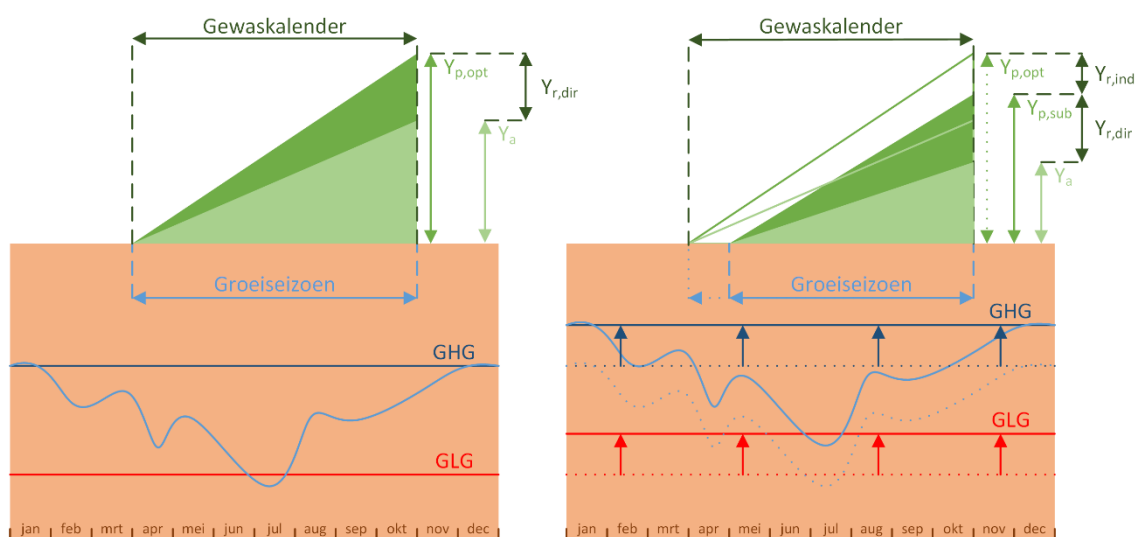
- *Directe effecten*: opbrengstderving als gevolg van transpiratiereductie door ongunstige bodemhydrologische condities. Gedurende het groeiseizoen kunnen te droge, te natte of te zoute bodemhydrologische condities de gewasontwikkeling nadelig beïnvloeden doordat er gedurende een periode niet aan de water- of zuurstofvraag van het gewas kan worden voldaan.

De totale opbrengstderving volgt uit de optelsom van schade als gevolg van indirecte en directe effecten:

$$Y_r = Y_{r,ind} + Y_{r,dir} \quad \text{Vergelijking 2-2}$$

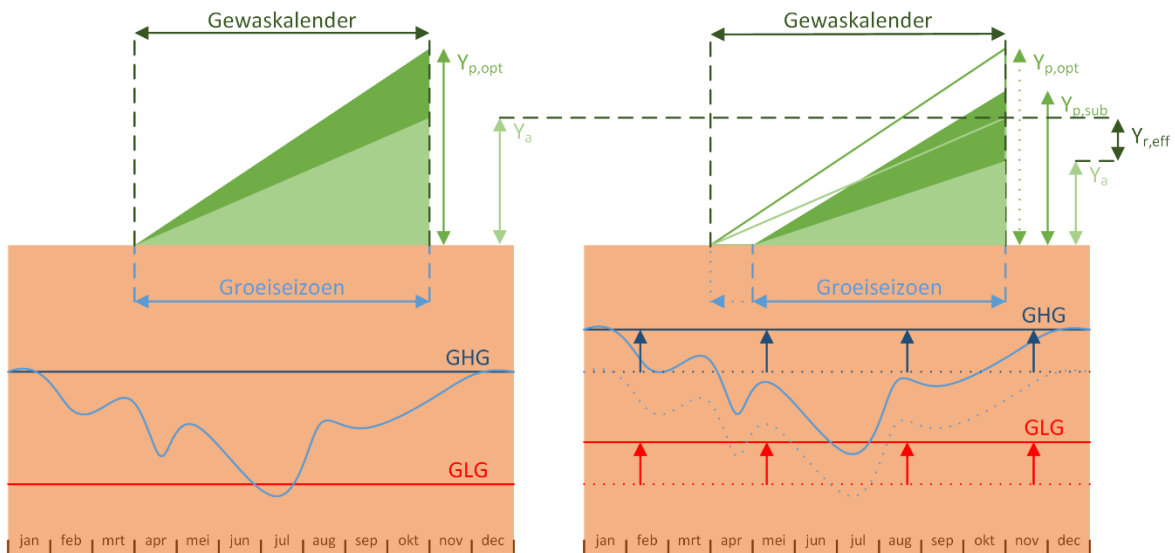
Met  $Y_{r,ind}$  en  $Y_{r,dir}$  respectievelijk de opbrengstderving als gevolg van indirecte en directe effecten. Het specificeren van directe effecten en indirecte effecten wordt hieronder geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld waarbij er sprake is van een vernattingsmaatregel. In Figuur 2.1 is links de gewasontwikkeling schematisch weergegeven voor een akkerbouwgewas voordat de hydrologische maatregel heeft plaatsgevonden (referentiesituatie) en rechts de situatie na de hydrologische maatregel. In het voorbeeld nemen we aan dat bij de referentiesituatie sprake is van een optimale lengte van het groeiseizoen. De totale opbrengstderving wordt daarmee alleen beïnvloed door de directe effecten ( $Y_{r,dir}$ ) en volgt daarmee uit het verschil tussen de potentiële gewasopbrengst ( $Y_{p,opt}$ ) en de actuele gewasopbrengst ( $Y_a$ ) aan het einde van het groeiseizoen.

Als gevolg van de vernattingsmaatregel (rechterdeel van Figuur 2.1) treedt er uitstel op van de voorbereidende werkzaamheden (ploegen/zaaien) waardoor er sprake is van een verkort groeiseizoen. Door het verkorten van het groeiseizoen introduceren we een zogenaamde tweede potentiële gewasopbrengst, namelijk een potentiële gewasopbrengst die hoort bij een suboptimaal groeiseizoen ( $Y_{p,sub}$ ). Het verschil tussen deze twee potentiële gewasopbrengsten duiden we aan als indirecte effecten ( $Y_{r,ind}$ ).



**Figuur 2.1** Illustratie van berekening van gewasopbrengst met SWAP-WOFOST voor een willekeurige situatie, waarbij links de referentiesituatie wordt weergegeven en rechts de situatie na een vernattingsmaatregel. Het donkergroene vlak in de figuur geeft de potentiële gewasontwikkeling aan en het lichtere groene vlak de actuele gewasontwikkeling. De opbrengstderving als gevolg van indirecte en directe effecten worden respectievelijk met  $Y_{r,ind}$  en  $Y_{r,dir}$  aangegeven.

In dit specifieke voorbeeld heeft een maatregel een negatief effect op de gewasopbrengst. Uiteraard kan een ingreep ook een positief effect hebben, bijvoorbeeld door een vermindering van droogte- of zuurstofstress. Om te bepalen wat voor effect de hydrologische maatregel heeft gehad op de gesimuleerde opbrengstderving is de uitsplitsing naar directe en indirecte effecten van minder belang. Het effect van de hydrologische maatregel volgt namelijk uit het verschil in de berekende actuele gewasopbrengst, dit is weergegeven met  $Y_{r,eff}$  in Figuur 2.2.



**Figuur 2.2** Illustratie van berekening van gewasopbrengst met SWAP-WOFOST voor een willekeurige situatie vergelijkbaar met Figuur 2.1. Het effect van de hydrologische maatregel volgt uit de verandering van de actuele gewasopbrengst welke is aangegeven met  $Y_{r,eff}$ .

Voor de bepaling van de mate van opbrengstderving moeten we rekening houden met de gewasgroeimodule die in de modelsimulatie is gebruikt. De bepaling van de opbrengstderving verloopt namelijk bij een statische gewasgroeimodule op een andere manier dan bij een dynamische gewasgroeimodule. Hieronder is per gewasmodule de bepaling van potentiële gewasopbrengst, de bepaling van de totale opbrengstderving en de toewijzing van schade aan indirecte en directe effecten nader beschreven.

### 2.1.1 Kwantificering van gewasopbrengst bij toepassen van de statische gewasgroeimodule

Bij statische gewasgroei wordt de gewasontwikkeling van tevoren opgelegd en daarmee de watervraag gedurende het groeiseizoen. Een statische gewasgroeimodule simuleert geen biomassa, maar op basis van de potentiële transpiratie en de reductie in transpiratie kan een indicatie worden gekregen van de actuele gewasopbrengst. De statische gewasgroeimodule gebruiken we in WWL alleen voor de gewassen waarvoor geen parametrisatie voor WOFOST beschikbaar is. Dit betreft bloembollen, groenteteelt, boomteelt en fruitteelt.

#### Potentiële gewasopbrengst

De potentiële gewasopbrengst van een specifiek weerjaar ( $Y_p$ ) wordt bepaald op basis van de potentiële transpiratie gedurende het specifieke jaar ( $T_p$ ), de gemiddelde potentiële transpiratie over een veeljarige periode ( $\bar{T}_p$ ) en de gemiddelde potentiële gewasopbrengst over een veeljarige periode ( $\bar{Y}_p$ ):

$$Y_p = \left( \frac{T_p}{\bar{T}_p} \right) \bar{Y}_p \quad \text{Vergelijking 2-3}$$

De langjarige gemiddelde gewasopbrengst (uitgedrukt in  $\text{kg ha}^{-1}$  of  $\text{stuks ha}^{-1}$ ) wordt hierbij als bekend verondersteld. De potentiële transpiratie van een specifiek weerjaar en van een langjarige gemiddelde periode volgen beide uit een modelsimulatie met SWAP. De bovenstaande vergelijking gaat hierbij uit van een optimale lengte van het groeiseizoen. In Bijlage A gaan we nader in op de simulatie van transpiratie.

#### Kwantificeren en specificeren van totale opbrengstderving

De totale opbrengstderving volgt uit de som van schade als gevolg van indirecte en directe effecten. Voor het kwantificeren van de indirecte effecten bepalen we de potentiële transpiratie behorende bij een optimaal groeiseizoen ( $T_{p,opt}$ ) en de potentiële transpiratie behorende bij een verkort of suboptimaal groeiseizoen ( $T_{p,sub}$ ):

$$Y_{r,ind} = \left(1 - \frac{T_{p,sub}}{T_{p,opt}}\right) Y_p$$

**Vergelijking 2-4**

Met  $Y_{r,ind}$  de opbrengstderving (kg ha<sup>-1</sup>; stuks ha<sup>-1</sup>) als gevolg van indirecte effecten. Voor het kwantificeren van de directe effecten kijken we naar de transpiratiereductie:

$$Y_{r,dir} = (Y_p - Y_{r,ind}) K_Y \left(1 - \frac{T_{a,sub}}{T_{p,sub}}\right)$$

**Vergelijking 2-5**

Met  $Y_{r,dir}$  de opbrengstderving (uitgedrukt in kg ha<sup>-1</sup> of stuks ha<sup>-1</sup>) als gevolg van directe effecten en  $T_{p,sub}$  en  $T_{a,sub}$  respectievelijk de potentiële en actuele transpiratie behorende bij het suboptimale groeiseizoen. Met de gewasresponsfactor  $K_Y$  kan worden aangegeven in welke mate het gewas gevoelig is voor ongunstige omstandigheden gedurende het groeiseizoen.

Bij zowel Vergelijking 2-4 en Vergelijking 2-5 hanteren we de term  $T_{p,sub}$  voor potentiële transpiratie gedurende het suboptimale groeiseizoen. Toch hoeft deze term in Vergelijking 2-4 niet gelijk te zijn aan de term in Vergelijking 2-5. Dat dit niet altijd opgaat heeft te maken met de manier waarop verdamping van het gewas wordt bepaald. Als er sprake is van een nat gewas zal de verdamping hoger zijn dan in het geval van een droog gewas. Verdamping vanaf het bladoppervlak (interceptieverdamping) ondervindt minder weerstand dan verdamping via de huidmondjes van het blad (transpiratie). Omdat de atmosferische watervraag niet verandert zal er sprake zijn van een gereduceerde transpiratie zolang het gewas nat is. Hieruit volgt dat een modelsimulatie uitgevoerd met of zonder berekening (waarbij interceptie optreedt) invloed heeft op de potentiële transpiratie en daarmee ook op de bepaling van de potentiële gewasopbrengst (Vergelijking 2-3). Hoe vaker een beregeningsgift wordt gegeven, des te lager wordt de potentiële transpiratie.

De definitie van de potentiële gewasopbrengst bij statische gewasgroei is dus niet helemaal zuiver te hanteren. Bij WWL hebben we ervoor gekozen om de potentiële transpiratie behorende bij een optimaal groeiseizoen en een suboptimaal groeiseizoen te bepalen op basis van een simulatie zonder berekening. Er treedt dan alleen interceptieverdamping op bij neerslag. Tijdens het (verkorte) groeiseizoen kijken we alleen naar de reductie van transpiratie ongeacht of er wordt beregend of niet.

## 2.1.2 Kwantificering van gewasopbrengst bij toepassing van dynamische gewasgroeimodule

### *Potentiële gewasopbrengst*

Bij de dynamische gewasgroeimodule is de potentiële gewasontwikkeling alleen afhankelijk van het CO<sub>2</sub>-gehalte, de zonnestraling, de temperatuur en de gewaskenmerken. De potentiële gewasopbrengst kan daarmee met een standalone WOFOST-berekening worden bepaald waarbij wordt uitgegaan van een optimaal groeiseizoen. Het oogstbare product is afhankelijk van het type gewas. Bij snijmais wordt het oogstbare product bepaald door de bovengrondse biomassa (som van biomassa van het opslagorgaan, het blad en de stengels). In het geval van wintertarwe, zomergerst, aardappel, suikerbiet en zaaiui wordt alleen de biomassa van het opslagorgaan geoogst.

De simulatie van de jaarlijkse grasopbrengst vormt hier een uitzondering op. Het gras begint te groeien wanneer een temperatuursom van 200 °C is bereikt vanaf januari. De potentiële opbrengst wordt bepaald op 31 oktober door de som te nemen van al het afgemaaid gras en grasopname middels begrazing zonder rekening te houden met eventuele verliezen als gevolg van berijding dan wel vertrapping. Op 31 oktober wordt een maaimoment verondersteld om de eventuele biomassa die op dat moment op het land staat mee te nemen in de eindopbrengst. Grasgroei in de maanden november en december wordt daarmee buiten beschouwing gelaten.

### *Kwantificeren van totale opbrengstderving*

De totale opbrengstderving wordt bepaald door het verschil in de gesimuleerde potentiële gewasopbrengst (gegeven een optimaal groeiseizoen) en actuele gewasopbrengst behorende bij een eventueel verkort groeiseizoen. Zoals hierboven al is aangegeven wordt bij simulatie van gras nog een maaimoment verondersteld op 31 oktober waarbij eventueel verliezen als gevolg van onvoldoende draagkracht kunnen optreden.

### Specificeren van indirecte effecten

Op basis van een simulatie uitgevoerd met het SWAP-WOFOST modelinstrumentarium is bekend of indirecte effecten zich hebben voorgedaan. Bij akkerbouwgewassen is daarmee de potentiële gewasopbrengst behorende bij een eventueel verkort groeiseizoen bekend. De indirecte effecten volgen uit het verschil tussen het potentieel gesimuleerde oogstbare product (bepaald met standalone WOFOST) en het potentieel gesimuleerde oogstbare product behorende bij het eventueel verkorte groeiseizoen.

$$Y_{r,ind} = Y_{p,opt} - Y_{p,sub} \quad \text{Vergelijking 2-6}$$

Bij gras spelen indirecte effecten alleen tijdens het maaien of de beweiding mogelijk een rol. Wanneer de draagkracht ontoereikend is tijdens deze oogstmomenten, wordt een deel van de oogst als verloren beschouwd. Door verandering van de bodemhydrologische condities als gevolg van een hydrologische maatregel wordt de grasgroei beïnvloed en daarmee ook het oogstmoment (dat afhankelijk is van de bovengrondse biomassa). Hierdoor kan het voorkomen dat de indirecte effecten een kleine toename laten zien terwijl de hydrologische condities droger worden.

### Specificeren van directe effecten

Bij akkerbouw wordt de schade als gevolg van directe effecten bepaald door het verschil in de potentiële gewasopbrengst (gegeven een suboptimaal groeiseizoen) en actuele gewasopbrengst:

$$Y_{r,dir} = Y_{p,sub} - Y_a \quad \text{Vergelijking 2-7}$$

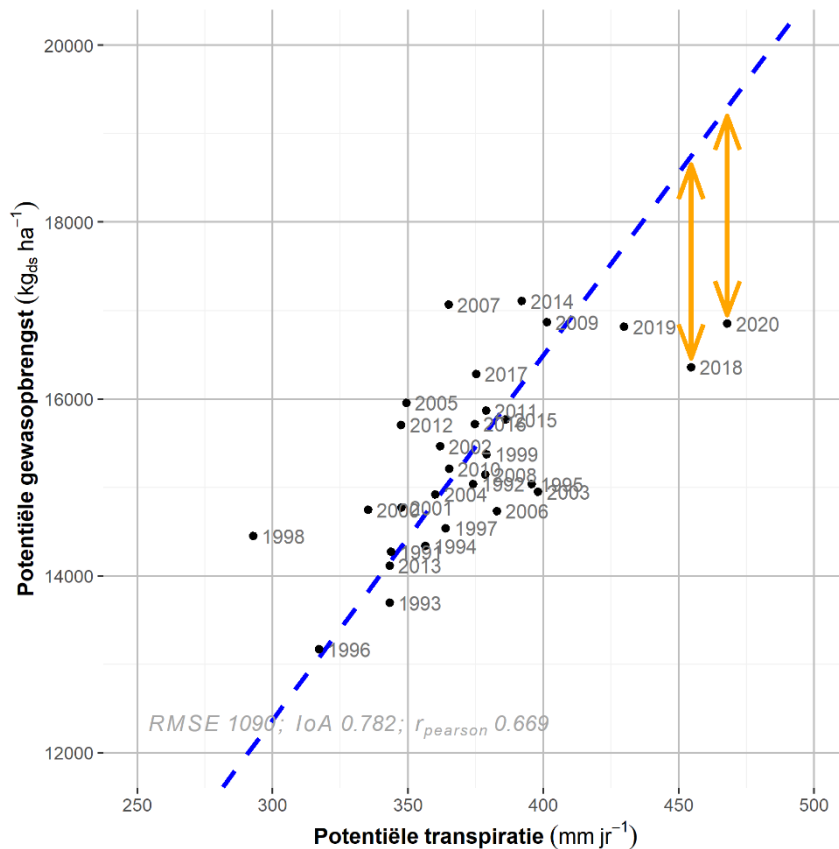
Bij gras worden directe effecten bepaald door het verschil in de potentiële gewasopbrengst en actuele gewasopbrengst plus eventuele berijdings- en vertrapingsverliezen die optreden bij de actuele gewasontwikkeling.

$$Y_{r,dir} = Y_p - (Y_a + Y_{r,ind}) \quad \text{Vergelijking 2-8}$$

## 2.1.3 Vergelijking van potentiële gewasopbrengst bepaald met een statische en dynamische gewasgroeimodule

In de vorige paragrafen hebben we laten zien dat de bepaling van de potentiële gewasopbrengst met behulp van een statische en een dynamische gewasgroeimodule op een andere manier verloopt. Bij de statische gewasgroeimodule veronderstellen we een relatie met de potentiële transpiratie. Het concept gaat hierbij uit van een zogenaamde waterproductiviteit: elke millimeter transpiratie levert een bepaalde hoeveelheid kilogram of stuks per hectare op. Bij een dynamische gewasgroeimodule is de potentiële gewasopbrengst afhankelijk van de meteorologische condities en gewassenmerken. Hoe beide methoden zich onderling tot elkaar verhouden wordt hieronder toegelicht.

Met behulp van het WOFOST-model (standalone-versie) kunnen we de potentiële gewasontwikkeling simuleren inclusief de bijbehorende watervraag. We kunnen daarmee over een klimaatperiode de gemiddelde potentiële gewasopbrengst bepalen en ook de gemiddelde potentiële transpiratie. Op basis hiervan kunnen we een gemiddelde waterproductiviteit afleiden en daarmee een vergelijking maken met de potentiële gewasopbrengst van een statische gewasgroeimodule. Deze vergelijking is weergegeven in Figuur 2.3. Over het algemeen toont de voorspelde gewasopbrengst, bepaald met een gemiddelde waterproductiviteit (blauwe lijn), een goede overeenkomst met de gesimuleerde gewasopbrengst (zwarte punten). We zien echter ook duidelijke afwijkingen in bepaalde jaren. De met WOFOST gesimuleerde potentiële gewasopbrengst in extreem warme jaren, zoals 2018 en 2020, is veel lager dan je zou verwachten op basis van de waterproductiviteit. Een verklaring hiervoor is dat de assimilatiesnelheid (vorming van biomassa) minder snel toeneemt bij hogere zonnestraling. Verder neemt de onderhoudsrespiratie en bladafsterving (de motor voor fotosynthese) toe bij hogere luchttemperatuur. De assimilatiesnelheid stagneert wanneer de luchttemperatuur te hoog oploopt. Bij extreem hoge temperaturen kan de assimilatiesnelheid zelfs afnemen doordat het fotosyntheseproces wordt verstoord. Een statische gewasgroeimodule houdt hier geen rekening mee en veronderstelt een toename van de gewasgroei omdat de atmosferische watervraag blijft toenemen bij een hogere luchttemperatuur. In extreem warme jaren wordt daarmee de potentiële gewasopbrengst overschat wanneer wordt uitgegaan van een bepaalde waterproductiviteit. De mate waarin dit optreedt hangt af van het type gewas. Bij een van oorsprong tropisch gewas als maïs zal de assimilatiesnelheid pas bij een hogere temperatuur stagneren dan in vergelijking met bijvoorbeeld gras.



**Figuur 2.3** Scatterplot waarbij de met WOFOST gesimuleerde potentiële gewasopbrengst ( $\text{kg}_{\text{ds}} \text{ha}^{-1}$ ) is uitgezet tegenover de potentiële transpiratie ( $\text{mm jr}^{-1}$ ) voor grasland; met in het blauw de voorspelde gewasopbrengst gegeven een veeljarig gemiddelde waterproductiviteit; de oranje pijlen geven voor de extreem warme jaren 2018 en 2020 de afwijking aan van deze voorspelling.

In extreem natte jaren, zoals 1998, is de met WOFOST gesimuleerde potentiële gewasopbrengst hoger dan je zou verwachten op basis van de waterproductiviteit. Een verklaring hiervoor is dat de transpiratie reduceert zolang het gewas nat is terwijl de assimilatie doorgaat (zie paragraaf 2.1.1).

Het hanteren van een constante waterproductiviteit dient daarom met voorzichtigheid toegepast te worden. Op basis van een gemiddelde waterproductiviteit wordt bijvoorbeeld in 2018 en 2020 de potentiële gewasopbrengst met ongeveer  $2400 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ha}^{-1}$  overschat. Wanneer de waterproductiviteit wordt gebaseerd op een jaar waarin relatief veel opbrengst wordt gesimuleerd (in dit rekenvoorbeeld is de potentiële gewasopbrengst het hoogst in 2014) dan is er zelfs sprake van een overschatting van ongeveer  $3500 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ha}^{-1}$ . Een overschatting van de potentiële gewasopbrengst kan ook leiden tot een overschatting van de veronderstelde opbrengstderving wanneer een vergelijking wordt gemaakt met daadwerkelijk gemeten gewasopbrengsten. Op basis van een gemiddelde waterproductiviteit wordt in 2018 en 2020 dan ten onrechte iets meer dan 14% aan opbrengstderving toegekend. Wanneer de waterproductiviteit is gebaseerd op 2014 betreft dit een overschatting van 21%.

## 2.2 Onderverdeling van de directe effecten

In deze paragraaf besteden we extra aandacht aan de toewijzing van schade als gevolg van te droge of te natte omstandigheden gedurende het groeiseizoen. We laten aan de hand van twee voorbeelden zien dat de toewijzing van schade aan afzonderlijke stressoren gepaard gaat met onzekerheid. Het eerste voorbeeld heeft betrekking op de simulatie van wateropname en betreft een bepaald moment in het groeiseizoen. Het tweede voorbeeld gaat in op de doorwerking van een stressmoment gedurende het resterende groeiseizoen. Uit beide voorbeelden kan geconcludeerd worden dat het inbrengen van meer proceskennis in het modelinstrumentarium, om te komen tot een zo goed mogelijke inschatting van de totale opbrengstderving, paradoxaal genoeg leidt tot een grotere onzekerheid in de grootte van de verschillende stressoren.

## 2.2.1 Toewijzing aan stressfactoren bij empirische en mechanische wateropnameconcepten

Recent zijn in SWAP-WOFOST (Kroes e.a., 2017; Heinen e.a., 2024) twee mechanische concepten voor het simuleren van wateropname geïmplementeerd (Heinen en Mulder, 2023; 2024), een wateropname-concept volgens de Jong van Lier (2009) en een wateropname concept volgens de Willigen (1989; 2012) en Heinen (2001). Anooja e.a. (2024) laten in een uitgebreide numerieke en experimentele analyse zien dat wateropname door planten met mechanische concepten beter presteren ten opzichte van de 'klassieke' empirische beschrijving volgens Feddes e.a. (1978).

*Theorie toewijzing transpiratiereductie als gevolg van droogte- en zuurstofstress bij empirische en mechanische wateropnameconcepten*

Versie 3.0.0 van WWL en de oudere WWL-versies maken gebruik van het empirische wateropnameconcept van Feddes voor droogte en het zuurstofstressconcept volgens Bartholomeus e.a. (2008) voor natschade. Zowel droogte- als zuurstofstress worden daarin vertaald naar een reductie in wateropname, wat vervolgens leidt tot reductie in gewasgroei. Reductie in wateropname als gevolg van zoutstress wordt vooralsnog buiten beschouwing gelaten. Bij de toekomstige doorontwikkeling van WWL hopen we kennis met betrekking tot zoutstress ook te kunnen ontsluiten, zie Bijlage F. Bij de onderstaande beschrijving houden we daarom wel rekening met eventuele transpiratiereductie als gevolg van zoutstress.

Wanneer meerdere stressoren gelijktijdig actief zijn (gedurende één tijdstap in de modelsimulaties), gebruikt SWAP een verdeelsleutel om vast te stellen welk aandeel van de totale reductie in wateropname toegekend kan worden aan de afzonderlijke stressoren. Hierbij wordt aangenomen dat de potentiële wateronttrekking op een bepaalde diepte,  $S_p(z)$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ), evenredig is met de relatieve wortellengtedichtheid en de potentiële transpiratie  $T_p$  ( $\text{cm d}^{-1}$ ) volgens:

$$S_p(z) = \frac{L_{root}(z)}{\int_{-D_{root}}^0 L_{root}(z) dz} T_p \quad \textbf{Vergelijking 2-9}$$

Met  $L_{root}$  de wortellengtedichtheid ( $\text{cm cm}^{-3}$ ),  $D_{root}$  de dikte van de wortelzone (cm) en  $T_p$  ( $\text{cm d}^{-1}$ ) de potentiële transpiratie.

De gereduceerde wateronttrekking uit een bepaalde bodemlaag,  $S_a(z)$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ), wordt afgeleid door vermenigvuldiging met de stressfactoren:

$$S_a(z) = \alpha_d(z)\alpha_o(z)\alpha_s(z)S_p(z) \quad \textbf{Vergelijking 2-10}$$

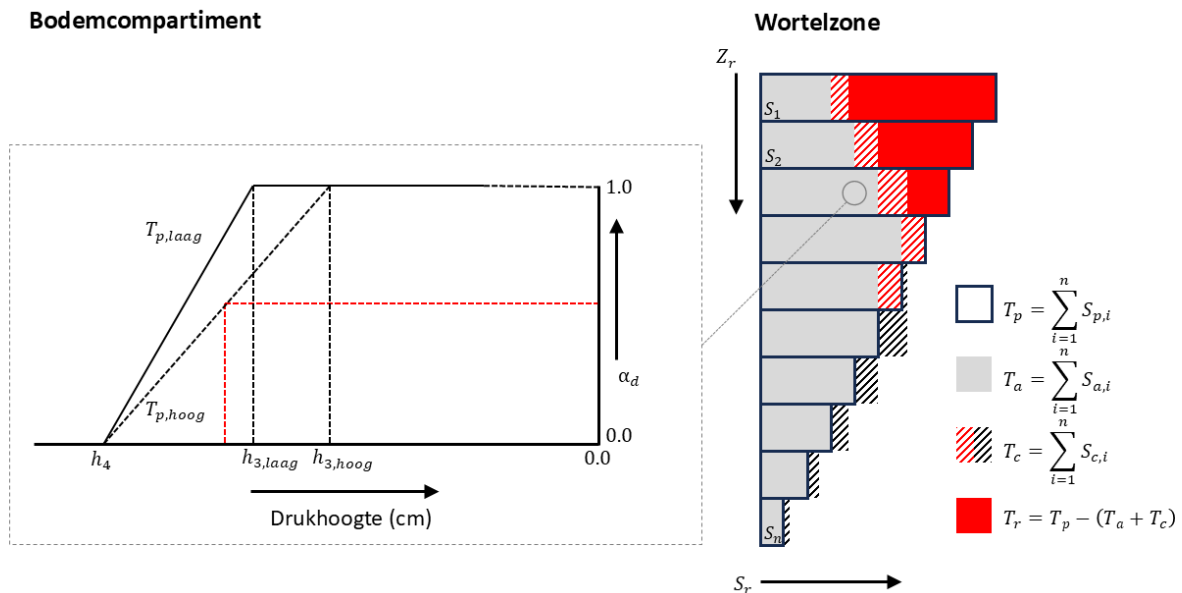
Met  $\alpha_d$  (-),  $\alpha_o$  (-) en  $\alpha_s$  (-) respectievelijk de stressoren voor droogte-, zuurstof- en zoutstress. Integratie van de daadwerkelijke wateronttrekking over de wortelzone levert de actuele transpiratie,  $T_a$  ( $\text{cm d}^{-1}$ ), op:

$$T_a = \int_{-D_{root}}^0 S_a(z) dz \quad \textbf{Vergelijking 2-11}$$

Optioneel kan rekening worden gehouden met compensatie van de gereduceerde wateropname door te veronderstellen dat meer water wordt opgenomen uit andere delen van de wortelzone waar sprake is van relatief gunstige condities. Jarvis (1989) implementeerde hiervoor een zogenaamde compensatiefactor ( $\omega_c$ ):

$$T_{a,c} = T_a \min\left(\frac{1}{\omega}, \frac{1}{\omega_c}\right) \quad \textbf{Vergelijking 2-12}$$

Met  $\omega$  (-) de ongecompenseerde stress index (gelijk aan  $T_a/T_p$ ), zie ook Figuur 2.4 voor grafische weergave.



**Figuur 2.4** Grafische weergave van empirische wateropnameconcept van Feddes e.a. (1978) in combinatie met compensatie volgens Jarvis (1989). De rode kleur in de wortelzone geeft de reductie weer van de potentiële wateropname. De actuele (ongecompenseerde) wateropname is weergegeven met de grijze kleur. De reductie in wateropname kan worden gecompenseerd door meer wateropname te veronderstellen in andere delen van de wortelzone waar sprake is van relatief gunstige condities (gearceerd).

Bij de empirische wateropname wordt dus de watervraag over de gehele wortelzone verdeeld op basis van de wortelverdeling. Bij de mechanische wateropnameconcepten is de wortelverdeling in combinatie met het potentiaalverschil in en buiten de wortel van belang. Hierdoor passen de mechanische wateropnameconcepten intrinsiek al een compensatie toe; daar waar het water het gemakkelijkst verkrijgbaar is, wordt het meeste onttrokken aan de bodem. Een gevolg is dat daarmee een andere werkwijze nodig is om bij mechanische wateropnameconcepten onderscheid te maken tussen de stressoren droogte-, zuurstof- en zoutstress.

De reductiefactoren voor zuurstof- en zoutstress worden in SWAP laag-voor-laag berekend (ongeacht het wateropnameconcept). Deze reductiefactoren worden vervolgens gebruikt om de opnamecapaciteit van de wortels voor water bij te stellen waarna de wateropname wordt berekend. De capaciteit voor wateropname kan op meerdere manieren worden gereduceerd. Hier beschouwen we de volgende twee aanpakken waaruit gekozen moet worden:

- 1) De wortellengtedichtheid  $L_{rv}$  wordt aangepast:  $L_{rv^*} < L_{rv}$  ;
- 2) De opnameflux wordt aangepast: dit is te bereiken door de doorlatendheid van de wortelwand  $K_{root}$  aan te passen:  $K_{root^*} < K_{root}$ .

De stress,  $\alpha_t$  (-) als gevolg van zuurstoftekort en zout<sup>1</sup> wordt berekend als het product van de twee stressoren:

$$\alpha_t(z) = \alpha_o(z)\alpha_s(z) \quad \text{Vergelijking 2-13}$$

De aanpassing van de wortellengtedichtheid wordt berekend als:

$$L_{rv,*}(z) = \alpha_t(z)L_{rv}(z) \quad \text{Vergelijking 2-14}$$

De aanpassing van de doorlatendheid van de wortelwand wordt berekend als:

$$K_{root,*}(z) = \alpha_t(z)K_{root}(z) \quad \text{Vergelijking 2-15}$$

Wateropname zal dan dus moeten plaatsvinden met een geringere hoeveelheid actieve wortels of met een lagere wortelwand-doorlatendheid. Hieruit blijkt dat er wel of niet aan de watervraag voldaan kan worden. Er zijn dan twee situaties mogelijk: a) zuurstof- en zoutstress worden volledig gecompenseerd (de

<sup>1</sup> De term totale stress kan misleidend zijn: het betreft hier de som van de aanvullende stressoren naast de eventuele (nog onbekende) droogtestress.

opnamecapaciteit van de wortels is ook bij deze stress voldoende groot), of b) er treedt wel een reductie in wateropname op.

De mechanische wateropname-module berekent  $T_a$  op basis van  $T_p$  en daarmee is de transpiratiereductie ( $T_r$ ) bekend:  $T_r = T_p - T_a$  (mm). Wanneer uit de mechanische wateropnamesimulatie blijkt dat het al dan niet door zuurstof- en zoutstress gereduceerde wortelsysteem de watervraag kan leveren ( $T_a = T_p$ ) dan is er geen sprake van reductie in wateropname en zijn dus de aandelen  $T_{r,d}$ ,  $T_{r,o}$  en  $T_{r,s}$  respectievelijk transpiratiereductie als gevolg van droogte-, zuurstof- en zoutstress, gelijk aan nul. Eventueel vooraf berekende zuurstof- en zoutstress, zoals weergegeven in de reductiefactoren, worden dan volledig gecompenseerd. Wanneer er sprake is van een reductie in wateropname, dan is het niet mogelijk om de bijdrage van afzonderlijke stressoren in de totale reductie in wateropname exact te bepalen. Wel is het mogelijk om hiervan een indicatie te krijgen. De toewijzing aan de afzonderlijke stressoren kan op verschillende manieren plaatsvinden.

Een rekenintensieve methode voor toewijzing aan afzonderlijke stressoren betreft een methode die twee keer de mechanistische wateropname simuleert: een simulatie met een volledige wortelactiviteit en een simulatie met een gereduceerde wortelactiviteit. Als bij een volledige wortelactiviteit sprake is van een reductie in wateropname, dan kunnen we deze reductie toewijzen aan droogtestress. We krijgen daarmee een indicatie van de minimale droogtestress ( $T_{r,d,min}$ ) die is opgetreden. De resterende stress kunnen we toekennen aan zuurstof- en/of zoutstress. We kunnen als alternatief ook kiezen voor een minder rekenintensieve methode, waarbij de mechanistische wateropname alleen wordt uitgevoerd met een gereduceerde wortelactiviteit. Wanneer er sprake is van een reductie in wateropname, dan wordt deze volledig toegekend aan zuurstof- en/of zoutstress.

De totale reductie in wateropname wordt dan verdeeld over aandelen droogte-, zuurstof- en eventueel zoutstress volgens een bepaalde redeneerlijn (zie Tabel 1). Wanneer er reductie in wateropname wordt gesimuleerd ( $T_r > 0$ ), dan is het volgende aangenomen:

- Indien er geen zuurstof- en zoutstress vooraf was vastgesteld dan is de gesimuleerde reductie volledig toe te schrijven aan droogtestress:  $T_{r,d} = T_r$  ( $T_{r,o} = 0$ ,  $T_{r,s} = 0$ ).
- Indien vooraf alleen zuurstofstress was vastgesteld, dan wordt de gesimuleerde wateropnamereductie gedeeltelijk of volledig aan zuurstofstress toegekend. Bij een gedeeltelijke toekenning hanteren we:  $T_{r,o} = T_r - T_{r,d,min}$  ( $T_{r,d} = T_{r,d,min}$ ;  $T_{r,s} = 0$ ); en bij een volledige toekenning:  $T_{r,o} = T_r$  ( $T_{r,d} = 0$ ,  $T_{r,s} = 0$ ).
- Indien vooraf alleen zoutstress was vastgesteld, dan wordt de gesimuleerde wateropnamereductie gedeeltelijk of volledig aan zoutstress toegekend, Bij een gedeeltelijke toekenning hanteren we:  $T_{r,s} = T_r - T_{r,d,min}$  ( $T_{r,d} = T_{r,d,min}$ ;  $T_{r,o} = 0$ ); en bij een volledige toekenning:  $T_{r,s} = T_r$  ( $T_{r,d} = 0$ ,  $T_{r,o} = 0$ ).
- Indien vooraf zowel zuurstof- als zoutstress was vastgesteld, dan wordt de gesimuleerde wateropnamereductie naar rato verdeeld over zuurstof- en zoutstress. Bij een gedeeltelijke toekenning wordt de droogtestress bepaald door:  $T_{r,d} = T_{r,d,min}$ ; en bij een volledige toekenning:  $T_{r,d} = 0$ .

Wanneer zowel zuurstof- als zoutstress vooraf is vastgesteld (en  $T_r > 0$ ) dan moet de gesimuleerde reductie worden verdeeld over een aandeel zuurstofstress ( $\rho_o$ ) en een aandeel zoutstress ( $\rho_s$ ), met  $\rho_o + \rho_s = 1$ . De verdelingsfunctie wordt gebaseerd op relatieve bijdrage van de reductiefactoren volgens:

$$\rho_o = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - \alpha_{o,i}) L_{rv,i} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n (1 - \alpha_{o,i}) L_{rv,i} \Delta z_i + \sum_{i=1}^n (1 - \alpha_{s,i}) L_{rv,i} \Delta z_i} \quad \text{Vergelijking 2-16}$$

En:

$$\rho_s = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - \alpha_{s,i}) L_{rv,i} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n (1 - \alpha_{o,i}) L_{rv,i} \Delta z_i + \sum_{i=1}^n (1 - \alpha_{s,i}) L_{rv,i} \Delta z_i} \quad \text{Vergelijking 2-17}$$

**Tabel 1** Verdeling van de totale reductie in wateropname ( $T_r$ ) over aandelen droogte-, zuurstof- en zoutstress (respectievelijk weergegeven met  $T_{r,d}$ ,  $T_{r,o}$  en  $T_{r,s}$ ) voor verschillende combinaties van voorkomen stress (waarbij het aandeel zuurstof- en zoutstress wordt aangegeven met  $\rho_o$  en  $\rho_s$ ).

$T_r$	$\rho_o$	$\rho_s$	$T_{r,d}^1$	$T_{r,o}^1$	$T_{r,s}^1$
$T_r = 0$	$0 \leq \rho_o \leq 1$	$0 \leq \rho_s \leq 1$	0	0	0
$T_r > 0$	$\rho_o = 0$	$\rho_s = 0$	$T_{r,d} = T_r$	0	0
$T_r > 0$	$\rho_o > 0$	$\rho_s = 0$	$T_{r,d} = T_{r,d,min}$	$T_{r,o} = T_r - T_{r,d,min}$	0
$T_r > 0$	$\rho_o = 0$	$\rho_s > 0$	$T_{r,d} = T_{r,d,min}$	0	$T_{r,s} = T_r - T_{r,d,min}$
$T_r > 0$	$\rho_o > 0$	$\rho_s > 0$	$T_{r,d} = T_{r,d,min}$	$T_{r,o} = \rho_o T_r - T_{r,d,min}$	$T_{r,s} = \rho_s T_r - T_{r,d,min}$

<sup>1</sup> Bij volledige toekenning aan zuurstof- en/of zoutstress is  $T_{r,d,min} = 0$ .

Deze aanpak wordt per tijdstap uitgevoerd, en vervolgens wordt de bijdrage op dag-basis (dat is meestal de frequentie van uitvoer) verkregen door per dag deze waarden te sommeren. Dus, aan het eind van de dag kan het mogelijk zijn dat alle drie de stressoren actief zijn geweest (i.e.  $T_{r,d} > 0$ ,  $T_{r,o} > 0$  en  $T_{r,s} > 0$ ) doordat op verschillende momenten van de dag verschillende stressoren actief kunnen zijn.

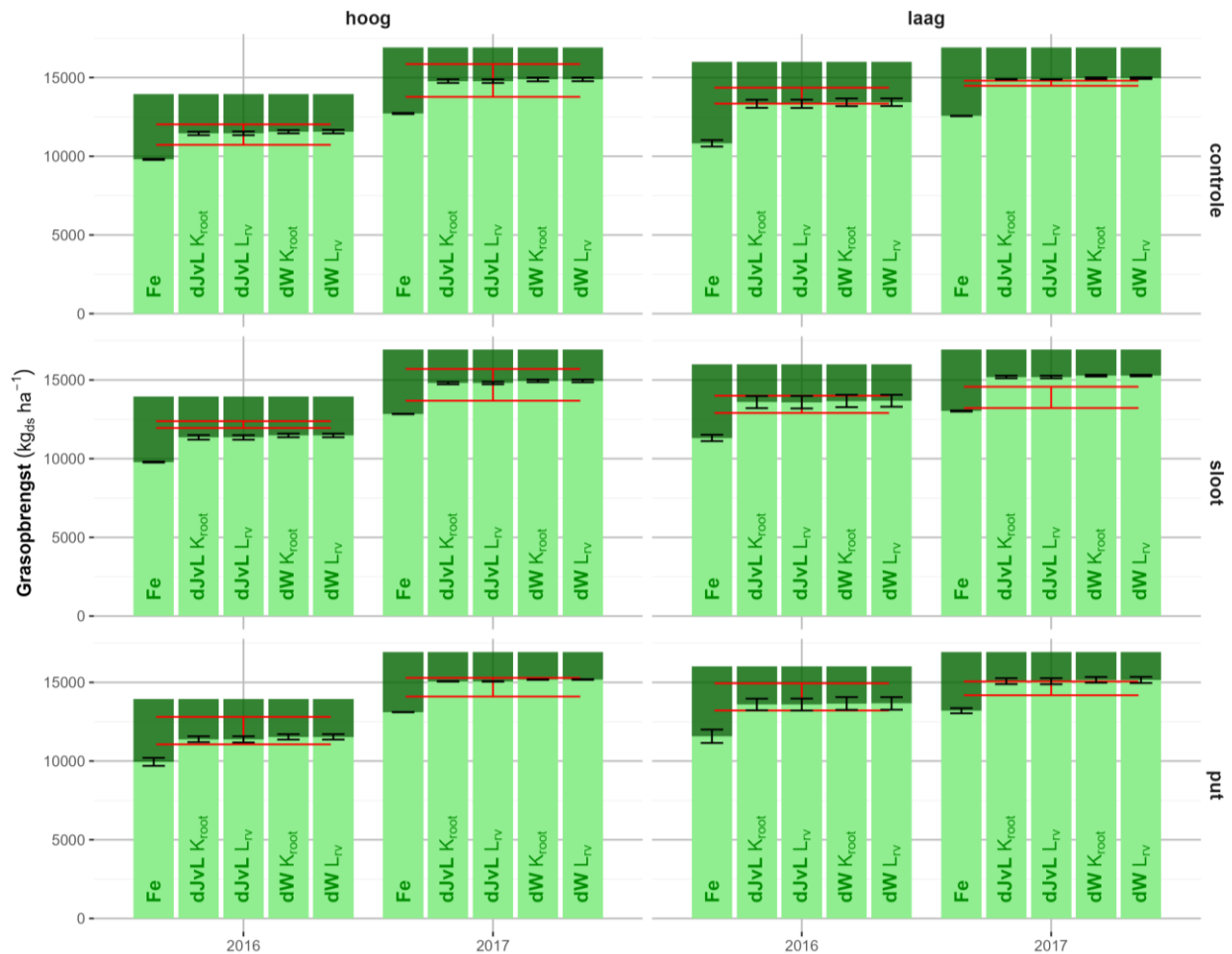
#### Rekenvoorbeeld toewijzing aan stressoren

Om te zien of het bovenstaande concept voor toewijzing van schade aan afzonderlijke stressoren goed werkt richten we ons op een veldproef op proefboerderij KTC Zegveld (veenweide). De veldproef is uitvoerig beschreven in paragraaf 4.1. Hier worden de volgende modelinstellingen gevarieerd:

- Empirische wateropname volgens Feddes (Fe) in combinatie met Jarvis compensatie (ALFACRIT = 0.7) of mechanistische wateropname volgens de Jong van Lier (dJvL) en de Willigen (dW) in combinatie met aanpassing van de wortelactiviteit volgens aanpassing van  $L_{rv}$  of  $K_{root}$ .
- Zuurstofstress volgens Feddes of Bartholomeus. Bij mechanistische wateropname kennen we de transpiratiereductie in geval van een gereduceerde wortelactiviteit gedeeltelijk of volledig toe aan zuurstofstress.

In Figuur 2.5 zijn de modelresultaten weergegeven waarbij een vergelijking is gemaakt tussen de verschillende wateropnameconcepten gecombineerd met de zuurstofmodule van Bartholomeus waarbij, in geval van mechanistische wateropname, de wortelactiviteit wordt aangepast via de  $L_{rv}$  of  $K_{root}$ . De figuur laat zien dat de gesimuleerde gewasopbrengst met mechanistische wateropname goed in staat om de geobserveerde gewasopbrengst te benaderen. De gesimuleerde gewasopbrengst voor wateropnameconcepten van de Jong van Lier en de Willigen waarbij de wortelactiviteit als gevolg van te natte condities is gereduceerd via de  $L_{rv}$  of  $K_{root}$  laten overeenkomstige resultaten zien.

In Tabel 2 zijn de modelprestaties van alle combinaties weergegeven, waarbij de RMSE en de overeenstemmingsindex (index of agreement afgekort IoA; Willmot, 1981) zijn gebruikt als modelprestatie-maten. Voor de overeenstemmingsindex geldt dat hoe dichter de waarde bij 1 ligt hoe beter het model presteert. Hieruit blijkt dat het niet veel uitmaakt voor welk mechanistisch wateropname-concept wordt gekozen en of de wortelactiviteit wordt gereduceerd via de  $L_{rv}$  of  $K_{root}$ .



**Figuur 2.5** Modelresultaten voor wateropnameconcepten volgens Feddes (Fe), de Jong van Lier (dJVL) en de Willigen (dW) waarbij de wortelactiviteit als gevolg van zuurstofstress berekend met de module van Bartholomeus wordt aangepast via de  $L_{rv}$  en  $K_{root}$ ; met in het rood de spreiding in gemeten gewasopbrengst en in het zwart de spreiding in de gesimuleerde gewasopbrengst. In het donkergroen is de potentiële gewasopbrengst weergegeven en in het lichtgroen de gemiddelde actuele grasopbrengst.

**Tabel 2** Modelprestaties voor gesimuleerde gewasopbrengst in 2016 en 2017 weergegeven voor alle combinaties van modelinstellingen met betrekking tot simulatie van wateropname; gerangschikt naar modelprestaties.

Wateropname	Reductie wortelactiviteit	Zuurstofstress	RMSE	IoA
De Willigen	$K_{root}$	Bartholomeus	639	0.940
De Willigen	$L_{rv}$	Bartholomeus	640	0.940
De Jong van Lier	$K_{root}$	Bartholomeus	646	0.939
De Jong van Lier	$L_{rv}$	Bartholomeus	648	0.939
De Willigen	$K_{root}$	Feddes	648	0.936
De Willigen	$L_{rv}$	Feddes	649	0.936
De Jong van Lier	$L_{rv}$	Feddes	693	0.931
De Jong van Lier	$K_{root}$	Feddes	694	0.931
Feddes		Bartholomeus	2100	0.631
Feddes		Feddes	2600	0.584

Of de wateropnamereductie nu gedeeltelijk ( $T_{r,o} = T_r - T_{r,d,min}$ ) of volledig ( $T_{r,o} = T_r$ ) wordt toegekend aan zuurstofstress heeft geen invloed op de bovenstaande resultaten. Pas wanneer we onderscheid willen maken tussen schade door droogte- en zuurstofstress speelt de methodiek van de toekenning een rol van betekenis. Voor dit rekenvoorbeeld blijkt dit bij mechanistische wateropnameconcepten onderling echter zeer beperkt, zie Tabel 3. De verschillen in toekenning aan droogte- of zuurstofstress blijven kleiner dan 1 mm. Een mogelijke verklaring voor de geringe verschillen is dat de wortelzone bij grasland relatief dun is. Bij gewassen die dieper wortelen is de kans groter dat zowel droogte- als zuurstofstress op hetzelfde moment actief is. Nader onderzoek zal dit moeten uitwijzen.

**Tabel 3** Simulatie van gemiddelde transpiratiereductie ( $\text{mm jr}^{-1}$ ) als gevolg van droogte- ( $T_{r,d}$ ) en zuurstofstress ( $T_{r,o}$ ) voor combinaties van modelconcepten voor de simulatie van wateropname en de methodiek voor gedeeltelijke ( $T_{r,o} = T_r - T_{r,d,min}$ ) of een volledige ( $T_{r,o} = T_r$ ) toekenning aan zuurstofstress.

Wateropname	Reductie wortelactiviteit	Toekenning	$T_{r,d}$ ( $\text{mm jr}^{-1}$ )	$T_{r,o}$ ( $\text{mm jr}^{-1}$ )
Feddes			24.2	18.3
De Willigen	$L_{rv}$ of $K_{root}$	$T_{r,o} = T_r - T_{r,d,min}$	0.23	12.7
De Willigen	$L_{rv}$ of $K_{root}$	$T_{r,o} = T_r$	0.14	12.8
De Jong van Lier	$L_{rv}$ of $K_{root}$	$T_{r,o} = T_r - T_{r,d,min}$	0.25	13.5
De Jong van Lier	$L_{rv}$ of $K_{root}$	$T_{r,o} = T_r$	0.16	13.6

## 2.2.2 Doorwerking van stress in het resterende groeiseizoen

De opbrengstderving voor de meest voorkomende akkerbouwgewassen en grasland wordt in WWL gesimuleerd met de dynamische gewasgroeimodule WOFOST. WOFOST is ontwikkeld door het Centre for World Food Studies in Wageningen en wordt al vele jaren toegepast als onderdeel van operationele systemen voor het voorspellen van de gewasopbrengst (de Wit e.a., 2019). Daarin verschilt het concept van WWL van de andere instrumenten (HELP, TCGB en AGRICOM) die gebruik maken van statische gewasgroei.

### Theorie doorwerking van stress in het resterende groeiseizoen bij statische en dynamische gewasgroei

Bij statische gewasgroei wordt de gewasontwikkeling van tevoren opgelegd en wordt de gewasontwikkeling niet beïnvloed door de meteorologische condities of ongunstige hydrologische omstandigheden. Met het opleggen van de gewasontwikkeling wordt ook de watervraag van het gewas opgelegd. Transpiratiereductie op een bepaald moment in het groeiseizoen heeft daarmee geen effect op de watervraag van het gewas in het vervolg van het groeiseizoen. Er wordt daarmee een direct verband verondersteld tussen de gesimuleerde transpiratiereductie en een reductie in de gewasopbrengst. Een voorbeeld van een dergelijke beschrijving is onderstaande vergelijking die is gebaseerd op een publicatie van FAO (Steduto e.a., 2012):

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_p}\right) = K_y \left(1 - \frac{T_a}{T_p}\right) \quad \text{Vergelijking 2-18}$$

Met  $Y_p$  en  $Y_a$  respectievelijk de potentiële en actuele gewasopbrengst ( $\text{kg}_{\text{ds}} \text{ha}^{-1}$ ),  $K_y$  een gewasresponsfactor (-) en  $T_p$  en  $T_a$  respectievelijk de potentiële en actuele transpiratie (mm). De potentiële gewasopbrengst ( $Y_p$ ) wordt hierin als bekend verondersteld. Om het aandeel van de verschillende stressoren in de totale opbrengstderving te bepalen, kan gekeken worden naar de verhouding van de transpiratiereductie van de verschillende stressoren. Voor de bepaling van droogtestress  $\rho_d$ (%) en zuurstofstress  $\rho_o$ (%) gaat dat als volgt:

$$\rho_d = 100 \frac{Y_p - Y_a}{Y_p} \left( \frac{\sum T_{r,d}}{\sum T_{r,d} + \sum T_{r,o}} \right) \quad \text{Vergelijking 2-19}$$

$$\rho_o = 100 \frac{Y_p - Y_a}{Y_p} \left( \frac{\sum T_{r,o}}{\sum T_{r,d} + \sum T_{r,o}} \right) \quad \text{Vergelijking 2-20}$$

Met  $T_{r,d}$  en  $T_{r,o}$  (mm) transpiratiereductie als gevolg van respectievelijk droogte- en zuurstofstress.

Bij dynamische gewasgroei mag de bovenstaande procedure t.b.v. de uitsplitsing in stressoren eigenlijk niet worden toegepast (hoewel dit wel werd gedaan tot en met WWL-versie 3.0.0). Om dit te onderbouwen moeten we de werking van dynamische gewasgroei toelichten. De basisprocessen in WOFOST zijn fenologische ontwikkeling, biomassagroei, verdeling van biomassagroei over plantenorganen en wortelgroei. De belangrijkste externe factoren voor de potentiële ontwikkeling van gewassen zijn dagelijkse meteorologische condities en de initiële gewascondities. De belangrijkste interne drijfveer is de bladoppervlakte index (LAI), die het resultaat is van de dynamiek van het bladoppervlak, bepaald op basis van fotosynthese, toewijzing van biomassa aan bladeren, bladleeftijd en ontwikkelingsstadium van het gewas. De LAI bepaalt op zijn beurt de dagelijkse capaciteit van fotosynthese en verdamping.

De absorptie van de stralingsenergie door het bladerdek is een functie van de binnenkomende straling en het bladoppervlak. De potentiële fotosynthese wordt berekend op basis van de geabsorbeerde straling, rekening houdend met de fotosynthetische bladkenmerken. Een deel van de geproduceerde koolhydraten ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) wordt gebruikt om energie te leveren voor het onderhoud van de levende biomassa (onderhoudsademhaling). De overige koolhydraten worden omgezet in massa. Bij deze conversie wordt een deel van de massa gebruikt voor groeiademhaling. De geproduceerde droge stof wordt verdeeld over

wortels, bladeren, stengels en opslagorganen met behulp van verdelingsfactoren als functie van de ontwikkelingsfase van het gewas. De massa toegekend aan de bladeren bepaalt de ontwikkeling van het bladoppervlak en daarmee het vermogen tot lichtonderschepping. Deze interactie tussen lichtonderschepping en groei van het bladoppervlak veroorzaakt een belangrijke positieve feedback in WOFOST. De droge massa van de verschillende plantenorganen wordt bepaald door hun groeisnelheid in de tijd te integreren. Het WOFOST-model gaat er verder van uit dat een deel van de levende biomassa afsterft als gevolg van veroudering tijdens de ontwikkeling van gewassen. Bladeren sterven naast veroudering en beschaduwning ook af door droogtestress.

Bij dynamische gewasgroei maakt WOFOST onderscheid tussen de potentiële en actuele gewasontwikkeling door de potentiële fotosynthese als gevolg van droogte-, zuurstof- of zoutstress te reduceren als functie van de relatieve transpiratie ( $T_s/T_p$ ), wat de actuele fotosynthese oplevert. In tegenstelling tot de statische gewasgroei zal transpiratiereductie daarmee invloed hebben op de gewasontwikkeling en daarmee op de watervraag van het gewas in het resterende deel van het groeiseizoen. De watervraag ( $T_p$ ) en de reductie daarvan ( $T_{r,d}$  en  $T_{r,o}$ ) zijn daarmee afhankelijk van de actuele gewasontwikkeling en krijgen daarmee een andere betekenis dan zoals ze gehanteerd worden in Vergelijking 2-19 en Vergelijking 2-20. Het maakt uit wanneer stress optreedt en hoe die doorwerkt in de gewasontwikkeling gedurende het resterende groeiseizoen. Zo kan natschade in het begin van het groeiseizoen een groter effect hebben op de gewasontwikkeling dan droogteschade in een later stadium. De vraag is dan hoe we deze na-ijlende schades toewijzen aan de verschillende stressoren.

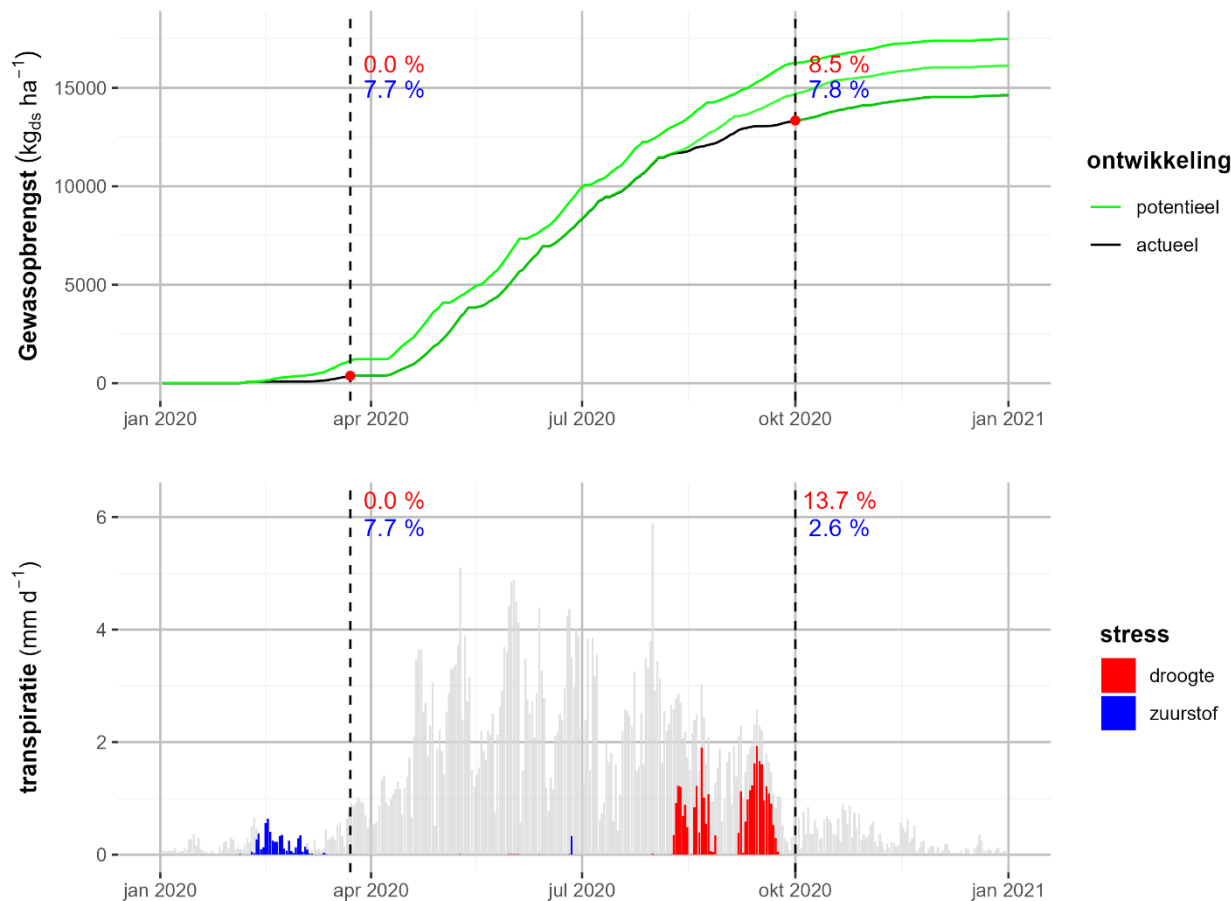
Wanneer we hiermee rekening willen houden bij het specificeren van verschillende stressoren kunnen we gebruik maken van additionele WOFOST-berekeningen. Het idee is dat na een periode met stress een nieuwe WOFOST-berekening wordt gestart waarbij de beïnvloede gewasontwikkeling vanaf dat moment potentieel verloopt en dus niet meer afhankelijk is van hydrologische omstandigheden. Aan het einde van het groeiseizoen kan daarmee bepaald worden in hoeverre een bepaalde stressperiode heeft doorgewerkt in het oogstbare product.

#### **STRESSOR: simulatie van potentiële gewasontwikkeling**

Voor de additionele WOFOST-berekeningen, gegeven een bepaalde gewasstatus, is een apart programma ontwikkeld genaamd STRESSOR. Op basis van een bestaande SWAP-WOFOST simulatie is bekend wanneer de gewasontwikkeling wordt beïnvloed door ongunstige bodemhydrologische omstandigheden. Wanneer sprake is van ongunstige omstandigheden wordt door het SWAP-WOFOST modelinstrumentarium de actuele gewasstatus weggeschreven. Op basis van deze gewasstatus kan het resterende groeiseizoen met STRESSOR worden gesimuleerd alsof de bodemhydrologische omstandigheden optimaal zijn. Het is daarmee niet nodig om ook de bodemhydrologische condities te simuleren waarmee de rekentijd van deze procedure zeer beperkt blijft.

#### *Rekenvoorbeeld doorwerking van stress in het resterende groeiseizoen*

Aan de hand van een rekenvoorbeeld laten we zien dat het veel uitmaakt hoe de toewijzing van schade aan verschillende stressoren gebeurt wanneer we al dan niet rekening houden met hydrologische terugkoppeling. Als voorbeeld kijken we naar een simulatie die is uitgevoerd in het stroomgebied van De Raam in een studie van Mulder e.a. (2021). Gedurende het jaar 2020 wisselen perioden van gunstige en ongunstige omstandigheden elkaar af. Aan het begin van het groeiseizoen treedt er zuurstofstress op als gevolg van zeer natte omstandigheden. Vanaf half maart tot half augustus zijn de omstandigheden gunstig voor gewasgroei waarna een droge periode volgt tot eind september, zie Figuur 2.6.



**Figuur 2.6** Gesimuleerde ontwikkeling van gewasopbrengst (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 schadepercentages weergegeven op 23 maart en 1 oktober waarbij voor het resterende groeiseizoen optimale gewasontwikkeling wordt verondersteld; De schadepercentages zijn weergegeven op basis van het dynamische gewasgroeimodel (boven) en op basis van transpiratiereductie (onder).

De potentiële gewasopbrengst in dit voorbeeld is iets minder dan  $17.500 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ ha}^{-1}$  en de actuele gewasopbrengst is ongeveer  $14.600 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ ha}^{-1}$  waarmee de totale opbrengstderving uitkomt op ongeveer 16.3%. Wanneer we iets willen zeggen over het aandeel van de verschillende stressoren in de totale opbrengstderving kunnen we als eerste kijken naar de cumulatieve transpiratiereductie als de gevolg van droogte- en zuurstofstress. Het aandeel in de totale transpiratiereductie als gevolg van droogtestress is aan het einde van het groeiseizoen ongeveer 5 keer zo groot als het aandeel van zuurstofstress (ongeveer 31 mm transpiratiereductie als gevolg van droogtestress en 6 mm transpiratiereductie als gevolg van zuurstofstress). Als we deze verhouding gebruiken voor de toewijzing van schade aan afzonderlijke stressoren komen we uit op 13.7% droogtestress en 2.6% zuurstofstress. Indien na de natte periode aan het begin van het groeiseizoen sprake was geweest van optimale gewasontwikkeling, dan komt de totale opbrengstderving aan het einde van het groeiseizoen uit op 7.7%. Volgens de toekenning van schade aan stressoren op basis van de gesimuleerde transpiratiereductie wordt de volledige schade in dit geval toegekend aan zuurstofstress. Als gevolg van de droge periode later in het groeiseizoen zien we dus dat het aandeel van zuurstofstress afneemt wanneer er later in het groeiseizoen droogtestress optreedt (van 7.7% naar 2.6%). Dit voorbeeld laat hiermee zien dat de toekenning van schade aan afzonderlijke stressoren op basis van transpiratiereductie slechts als indicatie dient en gepaard gaat met onzekerheid indien meerdere stressoren actief zijn gedurende het groeiseizoen.

Op basis van additionele WOFOST-berekeningen, gestart op 23 maart en 1 oktober (zie groene lijnen in Figuur 2.6), kunnen we simuleren hoe stress doorwerkt gedurende het resterende groeiseizoen en daarmee in het oogstbare product aan het einde van het groeiseizoen. Wanneer de gewasontwikkeling na 23 maart optimaal zou zijn geweest geven beide methoden in dit rekenvoorbeeld vergelijkbare resultaten. Wanneer één enkele stressor gedurende het groeiseizoen actief is mag je dat ook verwachten. Op basis van de additionele berekening gestart op 1 oktober zien we dat de gewasopbrengst aan het einde van het groeiseizoen verder is afgenomen met 8.6% wat voornamelijk wordt veroorzaakt door droogtestress. Verder zien we dat met de nieuwe methode de schade als gevolg van zuurstofstress niet afneemt in het resterende

groeiseizoen. Aan het einde van het groeiseizoen komen we uit op 8.5% droogtestress en 7.8% zuurstofstress.

Dit rekenvoorbeeld laat zien dat bij dynamische gewasgroei bij de toekenning van schade aan afzonderlijke stressoren rekening gehouden moet worden met het doorwerken van een momentane schade gedurende het resterende groeiseizoen. Hoewel deze methodiek beter past bij dynamische gewasgroeimodellen kan niet gegarandeerd worden dat het een exacte benadering betreft. In het bovenstaande voorbeeld richten we ons namelijk op stressoren die direct de gewasontwikkeling beïnvloeden. Ongunstige bodemhydrologische condities kunnen echter ook indirect de gewasontwikkeling beïnvloeden. Natte voorjaarsomstandigheden kunnen bijvoorbeeld leiden tot een oppervlakkig ontwikkeld wortelsysteem. Door adaptieve wortelontwikkeling wordt onder relatief natte condities de neerwaartse wortelgroei afgeremd (en onder anaerobe condities onder in de wortelzone zelfs gestopt). Wanneer later in het groeiseizoen de bodemhydrologische omstandigheden droger worden zal het gewas sneller droogtestress ondervinden dan wanneer de neerwaartse wortelgroei niet was afgeremd. Zo is het mogelijk dat relatief gunstige bodemhydrologische condities in het voorjaar de gewasontwikkeling later in het groeiseizoen nadelig beïnvloeden. Het is echter niet mogelijk om deze indirecte doorwerking in de gewasontwikkeling toe te kennen aan afzonderlijke stressoren.

Vanwege de onzekerheid van de bijdrage van verschillende stressoren aan de totale opbrengstderving is het aan te bevelen dat bij het vergelijken van verschillende hydrologische uitgangspunten (denk bijvoorbeeld aan het effect van vernattingsmaatregelen) de focus moet liggen op de verandering van de actuele gewasopbrengst en daarmee de verandering van de totale opbrengstderving. De specificatie van de totale opbrengstderving in verschillende stressoren betreft slechts een indicatie.

# 3 Doorontwikkeling Waterwijzer Landbouw

Door toepassing in vele pilots in de voorgaande jaren hebben we van verschillende gebruikers geleerd welke onduidelijkheden er zijn, welke vragen de toepassing oproept en wat er verbeterd moet worden. Ook zijn ervaringen uitgewisseld tijdens de jaarlijkse WWL gebruikersmiddagen. Na de eerste oplevering van WWL (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018) zijn verschillende wijzigingen doorgevoerd in de modelaansturing, -parametrisatie en de invoergegevens. Voor de modelaansturing zijn wijzigingen doorgevoerd in het beregeningscriterium en de wortelontwikkeling. In de invoergegevens zijn de bodemfysische eigenschappen aangepast door gebruik te maken van de nieuwe Staringreeks (Heinen e.a. 2020a) en daarvan afgeleide bodemfysische eenhedenkaart (BOFEK; Heinen e.a. 2021; 2022).

Ook met de oplevering van WWL-versie 3.0.0 in 2021 waren nog niet alle problemen opgelost. Een hardnekkig probleem was de simulatie van te veel droogtestress op sommige bodemeenheden met zware tot zeer zware klei in het bodemprofiel. Om dit probleem op te lossen is in de laatste jaren vooral aandacht uitgegaan naar verbeteringen in de simulatie van processen gerelateerd aan wateropname en wortelontwikkeling. Zo is onder andere de gevoeligheid van de simulatie van zuurstofstress onderzocht, maar dit heeft niet geleid tot aanpassing van de modelconcepten, -aansturing of -parametrisatie, zie Bijlage D. Wel zijn in het modelinstrumentarium procesbeschrijvingen toegevoegd met betrekking tot de wateropname door gewassen en adaptieve wortelontwikkeling. Daarnaast zijn ook wijzigingen doorgevoerd in de modelparametrisatie en invoergegevens. Ook is de methodiek voor het kwantificeren en specificeren van de gewasopbrengstderving herzien.

## 3.1 Doorgevoerde wijzigingen vanaf WWL-versie 3.0.0

Een overzicht van alle doorgevoerde wijzigingen sinds versie 3.0.0 is weergegeven in Tabel 4. Er is geprobeerd om een logische volgorde aan te houden en daarom zijn wijzigingen in het groeiseizoen en watervraag pas doorgevoerd nadat we wijzigingen in gewasvariëteiten en de bepaling van interceptieverdamping hebben doorgevoerd. Bij versie 3.1.0 en 3.2.0 maken we gebruik van het nieuwe SWAP-WOFOST modelinstrumentarium en is de kwantificering en specificering van gewasopbrengstderving herzien. Hieronder volgt per versie (3.1.0 tot en met 3.3.6) een beknopte beschrijving van de wijziging.

**Tabel 4**      *Overzicht van stapsgewijs doorgevoerde wijzigingen in WWL sinds versie 3.0.0.*

<b>Versie</b>	<b>Beschrijving</b>
3.0.0	Oplevering 2021
3.1.0	Update SWAP-WOFOST modelinstrumentarium (versie 4.3.0)
3.2.0	Kwantificering en specificering gewasopbrengstderving
3.3.0	Bepaling gemiddelde windsnelheid en meethoogte van temperatuur en luchtvochtigheid
3.3.1	Aanpassing waterdoorlatendheid nabij verzadiging
3.3.2	Simulatie van mechanistische wateropname
3.3.3	Simulatie van adaptieve wortelontwikkeling
3.3.4	Nieuwe gewasvariëteiten
3.3.5	Simulatie van interceptie
3.3.6	Aanpassing van het groeiseizoen en watervraag
4.0.0	Oplevering 2025; met alle bovengenoemde wijzigingen

### *Update SWAP-WOFOST modelinstrumentarium (versie 3.1.0)*

De doorontwikkeling van het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST vindt plaats in het kader van allerlei projecten. Zo is in het kader van het investeringsprogramma voor het NHI en het deelproject 'Schematisatie onverzadigde zone' de bepaling van de atmosferische watervraag middels de methodiek van Penman-Monteith opnieuw geïmplementeerd. Hoewel de bepaling van de afzonderlijke verdampingstermen (evaporatie, transpiratie van een droog en nat gewas, interceptie en verdamping van plassen) consistent is aan de beschrijving van Allen e.a. (1998), zijn er wel kleine wijzigingen doorgevoerd in de verdeling van de totale atmosferische watervraag over verschillende verdampingstermen. Zo stopt de transpiratie van een gewas niet meer volledig wanneer er ook verdamping vanaf een nat bladoppervlak optreedt (interceptie). Daarnaast heeft interceptieverdamping alleen nog betrekking op het gedeelte van de bodem wat bedekt is door het gewas. Bij het opnieuw implementeren van de Penman-Monteith-vergelijking is geconstateerd dat

de definitie van de daggemiddelde windsnelheid en de bepaling van de actuele vochtspanning niet helemaal correct werden gehanteerd (zie ook paragraaf 5.4).

Ook de implementatie van dynamische gewasgroei is herzien en getoetst aan referentieresultaten beschreven door de Wit e.a. (2019). Er bestonden verschillende routines voor de bepaling van de potentiële en actuele gewasontwikkeling van akkerbouwgewassen en grasland. De verschillende routines zijn samengevoegd tot één enkele procedure die aan een bepaalde gewasstatus (potentieel, dan wel actueel) een update geeft. Dit heeft voornamelijk geleid tot kleine wijzigingen in de simulatie voor grasland.

#### *Kwantificering en specificering van de gewasopbrengstderving (versie 3.2.0)*

Bij de nieuwe oplevering van WWL is de definitie van de potentiële gewasopbrengst gewijzigd waarbij er geen rekening meer wordt gehouden met indirecte effecten als gevolg van te natte meteorologische condities. De definitie van potentiële gewasopbrengst wordt daardoor beter uitlegbaar en maakt een vergelijking met andere modelconcepten zoals HELP, TCGB-tabel en AGRICOM eenduidiger.

Bij voorgaande opleveringen van WWL (tot en met versie 3.0.0) werd voor de bepaling van de potentiële gewasopbrengst een extra berekening uitgevoerd met een diepe grondwaterstand (5 m-mv). Ondanks het hanteren van een diepe grondwaterstand in de modelsimulaties, kon het nog steeds voorkomen dat als gevolg van te natte bodemhydrologische condities het groeiseizoen werd verkort (in geval van akkerbouw/groenteteelt) of dat er sprake was van vertrappings schade en/of berijdingsverliezen (in geval van grasland). Omdat een waterbeheerder niet kan sturen op deze schade is destijds besloten om de potentiële gewasopbrengst naar beneden bij te stellen waarmee de opgetreden schade niet tot uiting komt in de opbrengstderving (het verschil tussen de potentiële en actuele gewasopbrengst).

Bij de nieuwe oplevering van WWL hebben we gekozen om deze schade wel inzichtelijk te maken. De potentiële gewasopbrengst is dan niet meer afhankelijk van de neerslag of bodemfysische eigenschappen. Ten opzichte van voorgaande opleveringen van WWL is het mogelijk dat potentiële gewasopbrengst daarmee enigszins hoger uitvalt wat weer wordt gecompenseerd door een toename in de indirecte effecten. Het hanteren van een andere definitie voor de potentiële gewasopbrengst heeft dan ook nauwelijks invloed op de simulatie van de actuele gewasopbrengst en daarmee ook niet op een toename of afname van opbrengstderving als gevolg van een hydrologische maatregel.

Met de nieuwe werkwijze is het niet meer noodzakelijk om extra modelsimulaties (met SWAP-WOFOST) uit te voeren met een diepe grondwaterstand. Voor het bepalen van de potentiële gewasopbrengst behorende bij een optimaal groeiseizoen is wel een extra simulatie nodig met WOFOST (uitgevoerd met het programma STRESSOR). Maar omdat een WOFOST berekening vele malen sneller is dan een SWAP-WOFOST berekening zal de doorlooptijd van maatwerktoepassing met WWL niet veel toenemen als gevolg van deze wijziging.

#### *Bepaling gemiddelde windsnelheid en meethoogte van temperatuur en luchtvochtigheid (versie 3.3.0)*

Voor bepaling van de watervraag volgens de methode van Penman Monteith is informatie nodig over de windsnelheid. Bij voorgaande versies van WWL werd hiervoor de gemiddelde windsnelheid over 24 uur gebruikt. Omdat over het algemeen de windsnelheid overdag groter is en de transpiratie overdag plaatsvindt, dient de watervraag bepaald te worden op basis van de gemiddelde windsnelheid overdag. De Penman-Monteith-vergelijking gebruikt hiervoor de gemiddelde windsnelheid tussen 7 – 19 uur (Smith e.a. 1992). Door urengegevens te downloaden met betrekking tot de windsnelheid kan hier nu aan voldaan worden.

De methode van Penman-Monteith gebruikt bij de bepaling van de actuele vochtspanning standaard een meethoogte van 2.0 m voor metingen van de temperatuur en de luchtvochtigheid (Allen e.a. 1998). Als de daadwerkelijke meethoogte hiervan afwijkt dient hiervoor gecorrigeerd te worden. Deze correctie wordt nu doorgevoerd omdat het KNMI een standaard meethoogte aanhoudt van 1.5 m (zie [handboek waarnemingen](#)).

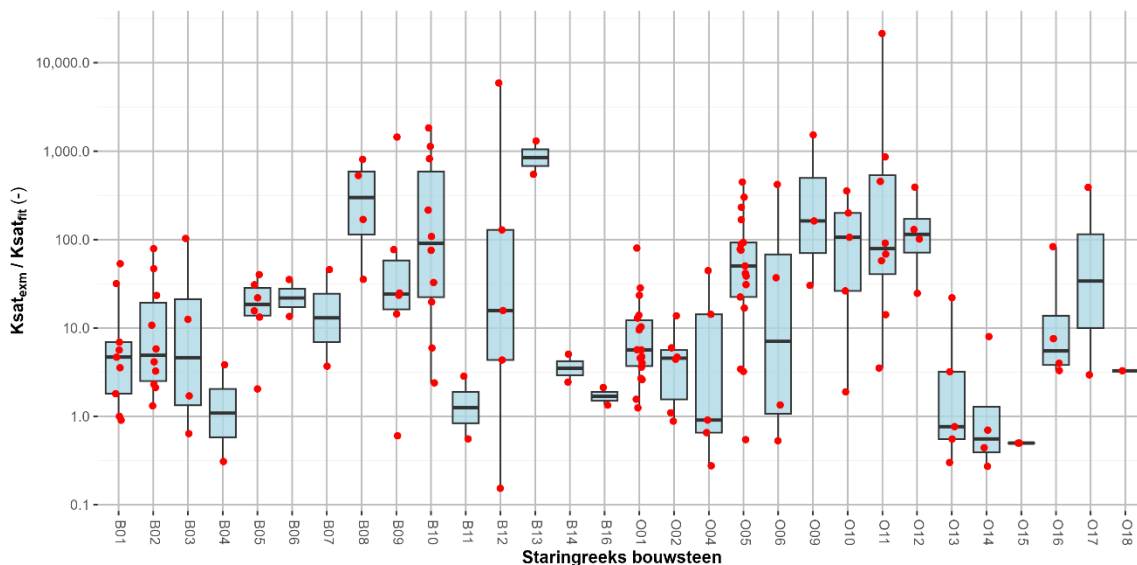
#### *Waterdoorlatendheid nabij verzadiging (versie 3.3.1)*

Het modelinstrumentarium maakt gebruik van de waterretentie- en waterdoorlatendheidskarakteristieken zoals beschreven door Mualem-Van Genuchten. Eén van de parameters die wordt gebruikt bij de beschrijving van waterdoorlatendheid ( $K$ ) als functie van de drukhoogte ( $h$ ) is de waterdoorlatendheid bij verzadiging ( $K_{sat}$ ). Deze parameter wordt meestal afgeleid uit experimenten met onverzadigde stroming ( $K_{sat,fit}$ ). De  $K_{sat,fit}$  kan echter sterk afwijken van de daadwerkelijk gemeten verzadigde doorlatendheid ( $K_{sat,exm}$ ). Voor een goede simulatie van oppervlakkige afstroming en drainage is het gewenst om een reële waarde voor  $K_{sat}$  te

gebruiken. Bij het toepassen van WWL is daarom gekozen om nabij verzadiging de Mualem – Van Genuchten functie iets aan te passen. In het bereik  $0 > h > -2$  cm, zal het modelinstrumentarium lineair interpoleren tussen  $K_{sat,exm}$  en de doorlatendheid bij  $h = -2$  cm op basis van  $K_{sat,fit}$ .

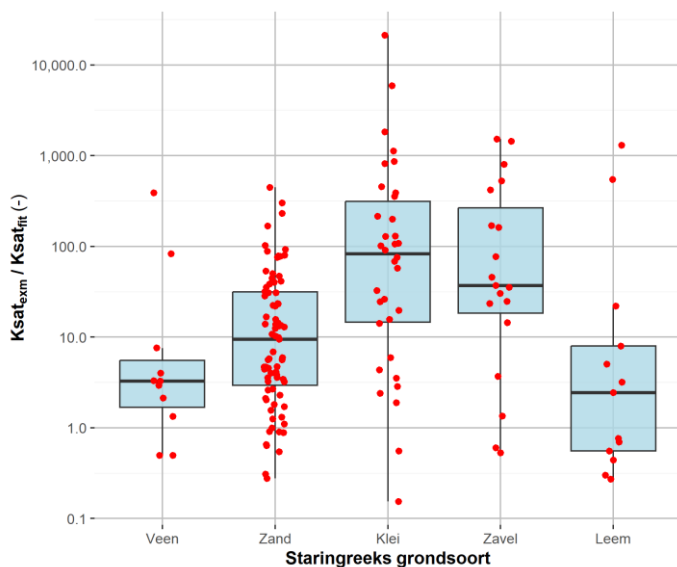
Bij voorgaande opleveringen van WWL is  $K_{sat,exm}$  bepaald door een bepaalde verhouding te veronderstellen met  $K_{sat,fit}$ . Voor de bouwstenen in de klasse zavel werd een verhouding van 1:5 ( $K_{sat,fit}:K_{sat,exm}$ ) aangehouden en voor de klasse klei, leem en veen een verhouding van 1:10. Bij de bouwstenen in klasse zand werd geen aanpassing doorgevoerd op de waterdoorlatendheid bij verzadiging. Een gedegen onderbouwing voor het hanteren van deze verhouding ontbreekt echter. Op basis van brongegevens van bodemfysische analyses, zoals beschreven in Bakker e.a. (2019), is het mogelijk om deze verhouding opnieuw af te leiden. Deze brongegevens zijn ook gebruikt bij het afleiden van de Staringreeks 2018 (Heinen e.a., 2020a).

In Figuur 3.1 is de spreiding in de verhouding tussen  $K_{sat,fit}$  en  $K_{sat,exm}$  weergegeven per bouwsteen. Niet alle bouwstenen bevatten evenveel metingen.



**Figuur 3.1** Verhouding tussen  $K_{sat,fit}$  en  $K_{sat,exm}$  per bouwsteen van de Staringreeks weergegeven als boxplot; met in het rood de gemeten verhouding van de bodemmonsters.

Omdat enkele bouwstenen geen enkele meting bevatten is ook nu, net als bij voorgaande opleveringen van WWL, gekozen voor een clustering naar grondsoort, zie Figuur 3.2. De mediane waarden voor de verhouding  $K_{sat,fit}:K_{sat,exm}$  per klasse is 1:9 voor zand, 1:35 voor zavel, 1:80 voor klei, 1:2 voor leem en 1:3 voor veen.



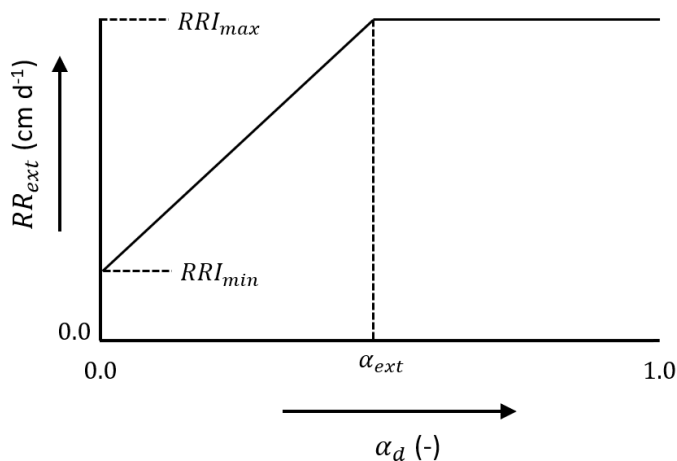
**Figuur 3.2** Verhouding tussen  $K_{sat,fit}$  en  $K_{sat,exm}$  geclusterd naar grondsoort van de Staringreeks weergegeven als boxplot; met in het rood de gemeten verhouding van de bodemmonsters.

#### Simulatie van mechanistische wateropname (versie 3.3.2)

Bij voorgaande opleveringen van WWL (tot en met versie 3.0.0) werd de wateropname gesimuleerd met het empirische concept van Feddes e.a. (1978). Bij de nieuwe oplevering van WWL maken we gebruik van het mechanistische wateropname concept volgens de Willigen (1989; 2012) en Heinen (2001). Voor simulatie van zuurstofstress hanteren we het concept van Bartholomeus e.a. (2008). Indien zuurstofstress optreedt zal de wortelactiviteit via aanpassing van de wortelengtedichtheid ( $L_{rv}$ ) worden gereduceerd. Wanneer bij een gereduceerde wortelactiviteit door zuurstofstress niet aan de watervraag voldaan kan worden zal de transpiratiereductie volledig worden toegekend aan zuurstofstress (zie ook paragraaf 2.2.1).

#### Simulatie van adaptieve wortelontwikkeling (versie 3.3.3)

Bij de modelmatige beschrijving van wortelontwikkeling wordt onderscheid gemaakt tussen de verticale (of neerwaartse) wortelgroei en de horizontale wortelgroei (grotere worteldichtheid). Bij WWL werd tot en met versie 3.0.0 gebruikt gemaakt van een vooraf opgegeven wortelontwikkeling. Gedurende de simulatie was de verticale wortelgroei semi-adaptief omdat de neerwaartse groei geremd werd door ofwel transpiratiereductie, ofwel te natte bodemhydrologische condities onderin de wortelzone. De relatieve wortelverdeling bleef ongewijzigd. Bij de nieuwe oplevering van WWL laten we de wortelontwikkeling sturen door ongunstige of gunstige bodemhydrologische condities. In de rapportage 'Microscopische wateropnamemodellen en dynamische wortelverdeling in SWAP' (Heinen e.a. 2023) is de implementatie van een adaptieve wortelverdeling uitgebreid beschreven. Additioneel hierop is nu ook de verticale wortelgroei afhankelijk gemaakt van de hoeveelheid droogtestress, zie Figuur 3.3. Naarmate de droogtestress toeneemt veronderstellen we een snellere neerwaartse wortelgroei. De hoeveelheid wortelbiomassa die tijdens een dag wordt gevormd (of verdwijnt als gevolg van sterfte) bepaalt het adaptief vermogen van de wortels en daarmee de neerwaartse groei. De verticale groei krijgt hierbij voorrang op de horizontale groei. Onder relatief natte bodemhydrologische condities resulteert dit in een oppervlakkig gevormd wortelsysteem. Bij relatief droge bodemhydrologische condities wordt een dieper wortelsysteem gevormd.



**Figuur 3.3** Neerwaartse wortelontwikkeling ( $RR_{ext}$ ) als functie van droogtestress ( $\alpha_d$ ).  $RRI_{min}$  en  $RRI_{max}$  zijn respectievelijk de minimale en maximale neerwaartse wortelontwikkeling.

#### Nieuwe gewasvariëteiten (versie 3.3.4)

Naast ontwikkelsporen van het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST en WWL kent ook het modelinstrumentarium WOFOST een eigen ontwikkelspoor. Zo is het nu mogelijk om het gewas zaaiui met WOFOST te simuleren. Voor simulatie van aardappel is het nu mogelijk is om voor verschillende aardappelvariëteiten berekeningen uit te voeren. Bij het afleiden van de nieuwe aardappelvariëteiten zijn ook nieuwe meetgegevens verzameld waaraan het SWAP-WOFOST modelinstrumentarium kan worden getoetst (zie paragraaf 4.1).

#### Simulatie van interceptie (versie 3.3.5)

Voor de bepaling van de hoeveelheid interceptie werd voorheen het concept van Hoyningen-Braden gehanteerd (von Hoyningen-Hüne, 1983; Braden, 1985). De hoeveelheid interceptie was daarbij afhankelijk van de dagelijkse neerslag, het bladoppervlak en de bodembedekking. Recentelijk is een andere methode voor simulatie van interceptie geïmplementeerd. Dit is het concept van Rutter e.a. (1971). Met het Rutter-concept wordt een balans bijgehouden van de berging in het interceptie-reservoir. Op deze manier kan de dynamiek van interceptie binnen een dag worden gesimuleerd en wordt daarmee meer rekening gehouden met verschil in neerslagintensiteit.

#### *Aanpassing van het groeiseizoen en watervraag (versie 3.3.6)*

De aanpassing van nieuwe gewasvariëteiten (versie 3.3.4) en verandering in regelgeving met betrekking tot vanggewasverplichting hebben ertoe geleid dat het gehanteerde groeiseizoen is herzien. Ook is het groeiseizoen van het gewas tulp herzien. Tulpen worden in het najaar gepland. Gedurende de wintermaanden volgt een vernalisatieperiode waarna de bollen omstreeks maart – april beginnen te groeien. De statische gewasgroeimodule, die wordt gehanteerd voor de simulatie van tulpen, houdt geen rekening met vernalisatie. Bij de nieuwe oplevering van WWL is daarom besloten om de vernalisatieperiode bij tulp buiten beschouwing te laten. Daarnaast zijn er wijzigingen doorgevoerd in de simulatie van interceptie (versie 3.3.5). Daaraan gekoppeld moet ook opnieuw de watervraag worden gekalibreerd. De randvoorwaarden van deze kalibratie zijn nu op basis van literatuur en expertise samengesteld (Dik en Mulder, 2024). De procedure voor het afleiden van de watervraag is volgens aanbeveling van Hurkmans (2023) herzien door stapsgewijs de interceptie, de bodemweerstand en dan pas de transpiratie te kalibreren, zie Bijlage A voor een toelichting op deze kalibratieprocedure.

## 3.2 Toepassing in pilotstudies

Met behulp van WWL-regionaal kunnen we inzicht krijgen in hoeverre de doorgevoerde wijzigingen vanaf versie 3.0.0 de modelresultaten beïnvloeden. We richten ons hierbij op pilotstudies voor twee gebieden: de gemeente Altena en het stroomgebied van De Raam. Het gebied van de gemeente Altena betreft een overgangsgebied tussen een estuarium- en rivierkleilandschap. Het gebied bestaat voornamelijk uit zavel- en kleigronden waarin periodiek hoge grondwaterstanden voorkomen (poldervaaggronden). Het landgebruik in het noordwesten en midden van het gebied wordt gedomineerd door akkerbouwgewassen. In het zuidoosten van het gebied is er vooral sprake van grasland gecombineerd met het verbouwen van snijmais. De grondwaterstand varieert sterk in het gebied, maar zakt in de zomer niet extreem ver uit. Bij toepassing van voorgaande WWL-versies zien we dat in dit gebied de gesimuleerde droogtestress wordt overschat. De pilotstudie van de gemeente Altena kan daarmee aantonen of de doorgevoerde wijzigingen tot een verbeterd modelgedrag leiden. Tegelijkertijd is het de vraag wat voor effect de doorgevoerde wijzigingen in andere gebieden hebben. Om daar meer inzicht in te krijgen richten we ons ook op het stroomgebied van De Raam. Dit gebied bestaat uit verschillende bodemtypen. Langs de Maas bevinden zich voornamelijk polder- en ooivaaggronden en verder bij de Maas vandaan bestaat het bodemtype met name uit veldpodzolgronden. Daar tussenin bevinden zich hoge enkeerdgronden en beekerdgronden. Het landgebruik bestaat met name uit grasland en snijmais.

Bij de toepassing van WWL-regionaal zijn berekeningen op perceelsniveau uitgevoerd. Op basis van de Basis Registratie Percelen is informatie verkregen over het landgebruik. We voeren alleen berekeningen uit voor percelen met grasland of akkerbouwgewassen en bepalen de opbrengstderving voor de periode 2012 – 2018. Per perceel is het dominante bodemtype bepaald. Informatie over het verloop van de grondwaterstand is ontleend aan regionale grondwatermodellen MORIA (gemeente Altena; aangeleverd door Waterschap Rivierenland) en GRAM (stroomgebied De Raam; Aangeleverd door Waterschap Aa en Maas). De grondwaterstanden zijn gemiddeld per perceel en met een ruimtelijke resolutie van 2 waarden per maand (14<sup>de</sup> en 28<sup>ste</sup> van de maand) opgelegd als onderrandvoorwaarde voor het model in de vorm van een drukhoogte aan de onderzijde van het bodemprofiel. In Bijlage B zijn de gegevens ten behoeve van de modelparametrisatie van WWL-regionaal weergegeven.

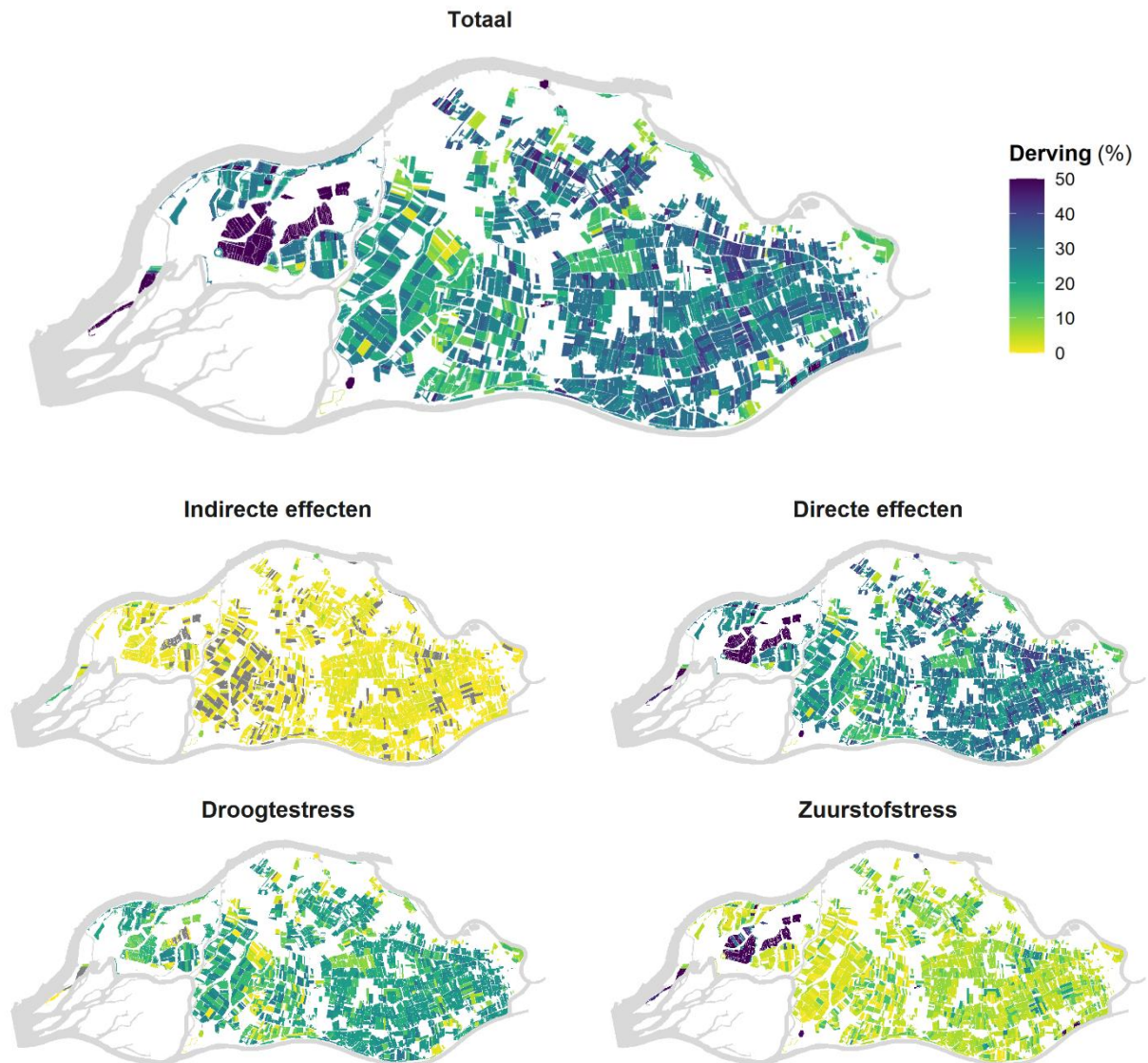
**Tabel 5** Gegevens ten behoeve van de model parametrisatie pilotstudies Gemeente Altena en Stroomgebied De Raam.

<b>Categorie</b>	<b>Bron</b>
Landgebruik	Basis Registratie Percelen (2023)
Bodemtype	Basis Registratie Ondergrond
Meteorologie	KNMI
- Altena	Herwijnen (356)
- De Raam	Volkel (375)
Grondwater	

- Altena MORIA (resolutie: 25m)
- De Raam GRAM (resolutie: 100m)

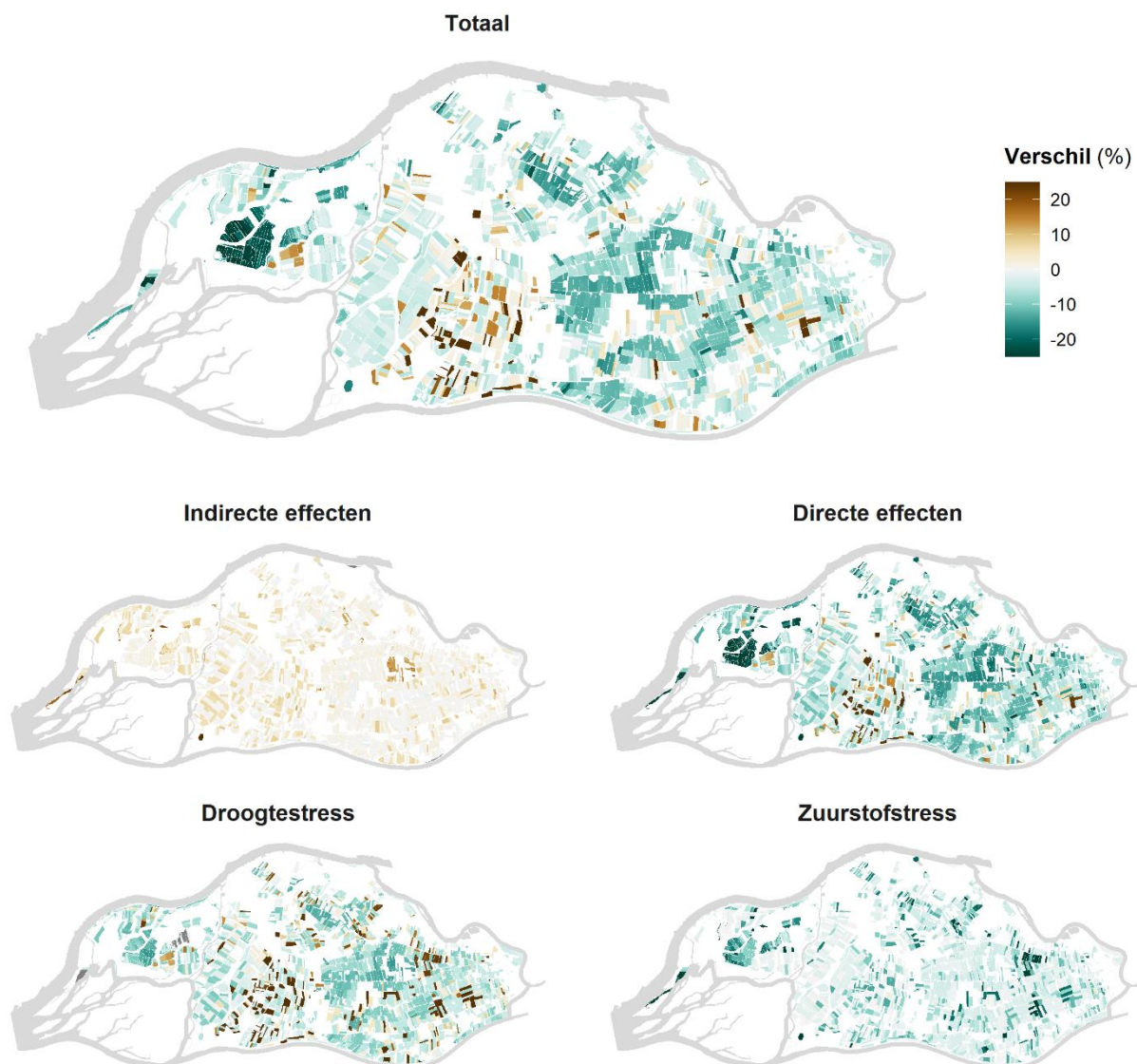
### Toepassing bij gemeente Altena

Bij toepassing van WWL-regionaal volgens aansturing van WWL-versie 3.0.0 komt de totale opbrengstderving voor de periode 2012 – 2018 uit op gemiddeld 29%. De opbrengstderving is hierbij met name het gevolg van directe effecten en daarmee ongunstige bodemhydrologische condities gedurende het groeiseizoen. Gemiddeld wordt voor het gebied van de gemeente Altena 19% droogtestress en 9% zuurstofstress gesimuleerd. Over het algemeen zien we in het oosten van het gebied meer droogtestress optreden dan in het midden van het gebied, zie Figuur 3.4.



**Figuur 3.4** Opbrengstderving (%) voor gemeente Altena over de periode 2012 – 2018 gesimuleerd met WWL-regionaal 3.0.0. Wanneer er geen stress is wordt dit met donkergrijs weergegeven.

Wanneer WWL-regionaal met alle wijzigingen wordt doorgerekend, dan zien we over het algemeen een afname van de opbrengstderving in het oosten van het gebied en een toename van de opbrengstderving in het midden van het gebied, zie Figuur 3.5. De totale opbrengstderving komt gemiddeld iets lager uit met 24%. Wanneer we kijken naar afzonderlijke stressoren dan valt op dat de indirecte effecten in het hele gebied toenemen (van 1 naar 3%) en de hoeveelheid zuurstofstress afneemt (van 9 naar 4%). Bij de gesimuleerde droogtestress zien we op veel percelen een lichte afname, maar anderzijds zijn er ook percelen die een sterke toename van stress vertonen. De sterke toename in gesimuleerde droogtestress treedt vooral op bij percelen waarop granen geteeld worden. Gemiddeld over het hele gebied neemt de droogtestress af van 19 naar 17%.

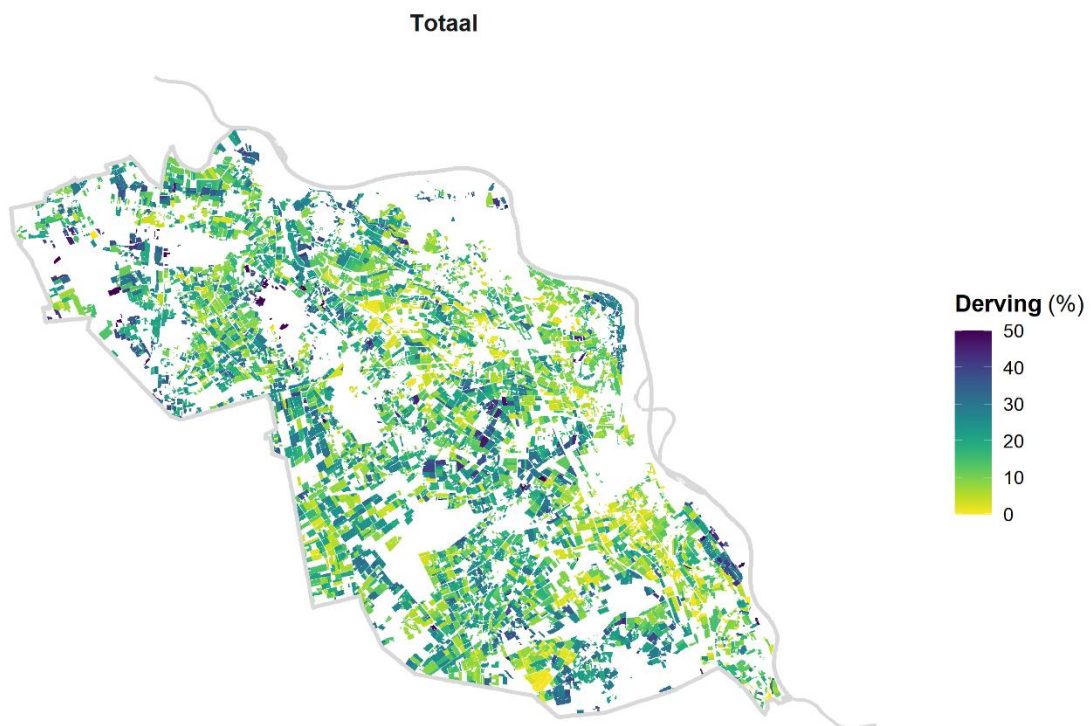


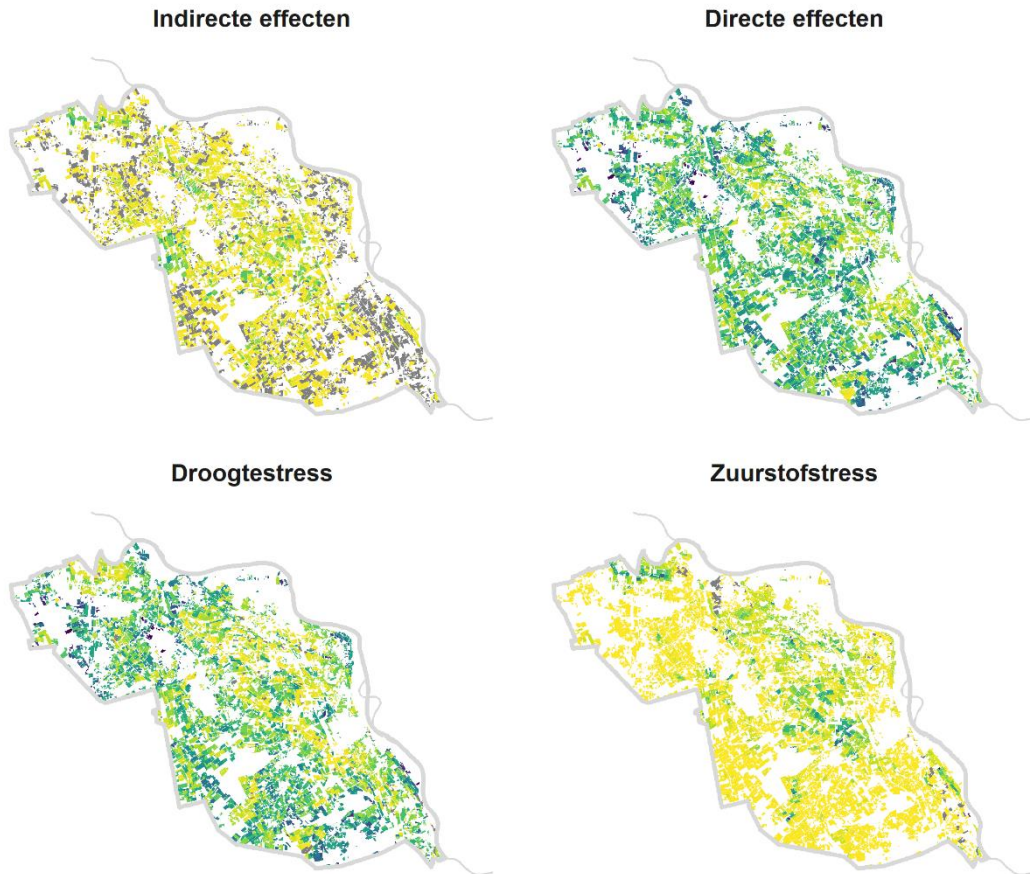
**Figuur 3.5** Verandering in gesimuleerde opbrengstderving (%) ten opzichte van WWL-regionaal versie 3.0.0 na doorvoering van alle wijzigingen voor gemeente Altena over de periode 2012 – 2018.

Toepassing stroomgebied De Raam

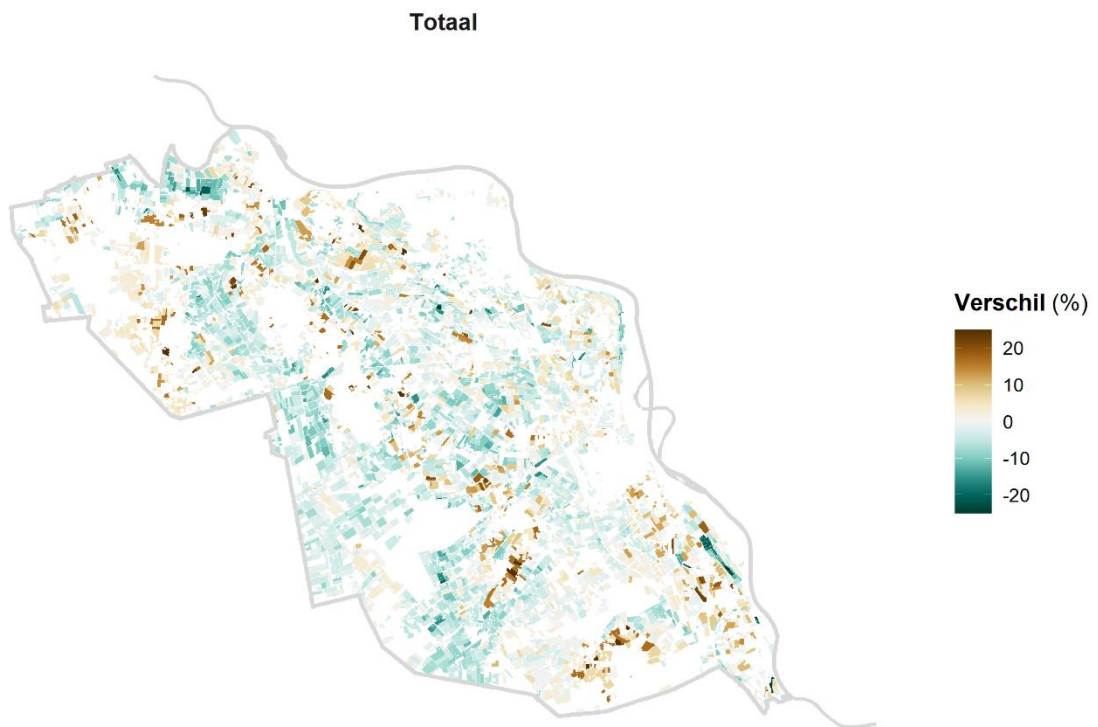
Een vergelijkbare exercitie voerden we uit voor het stroomgebied De Raam. Wanneer we WWL-regionaal toepassen volgens aansturing van WWL-versie 3.0.0 komt de totale opbrengstderving voor de periode 2012-2018 uit op gemiddeld 17%. Ook nu is de opbrengstderving voornamelijk het gevolg van directe effecten waarbij de droogtestress uitkomt op gemiddeld 13% en de zuurstofstress op 3%. Over het algemeen zien we in het zuidwesten van het stroomgebied meer droogtestress optreden dan in noordoosten, zie Figuur 3.6.

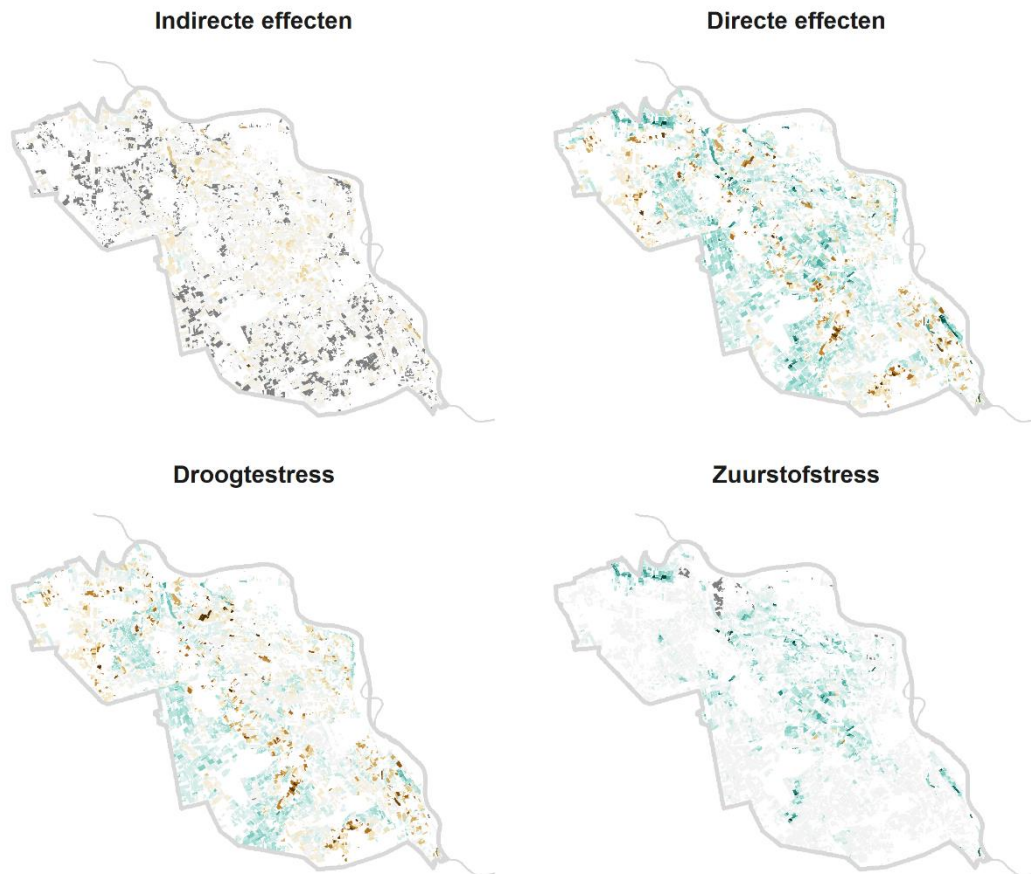
Bij het opnieuw toepassen van WWL-regionaal met alle doorgevoerde wijzigingen zien we een vergelijkbaar modelgedrag als bij gemeente Altena, zie Figuur 3.7. Over het algemeen neemt de gesimuleerde totale opbrengstderving een klein beetje af (van 17 naar 16%), zien we een lichte toename van de indirecte effecten (van 2 naar 3%) en een afname van de zuurstofstress (van 3 naar 1%). De hoeveelheid droogtestress blijft gemiddeld over het gehele stroomgebied hetzelfde. Wel zien we bij veel percelen een lichte afname van droogtestress en bij percelen waarop graan wordt geteeld een sterke toename van droogtestress. Hoewel er een vergelijkbaar modelgedrag is te zien als bij gemeente Altena werken de doorgevoerde wijzigingen minder sterk door in de modelresultaten.





**Figuur 3.6** Opbrengstderving (%) voor stroomgebied De Raam over de periode 2012-2018 gesimuleerd met WWL-regionaal 3.0.0. Wanneer er geen stress is wordt dit met donkergrijs weergegeven.

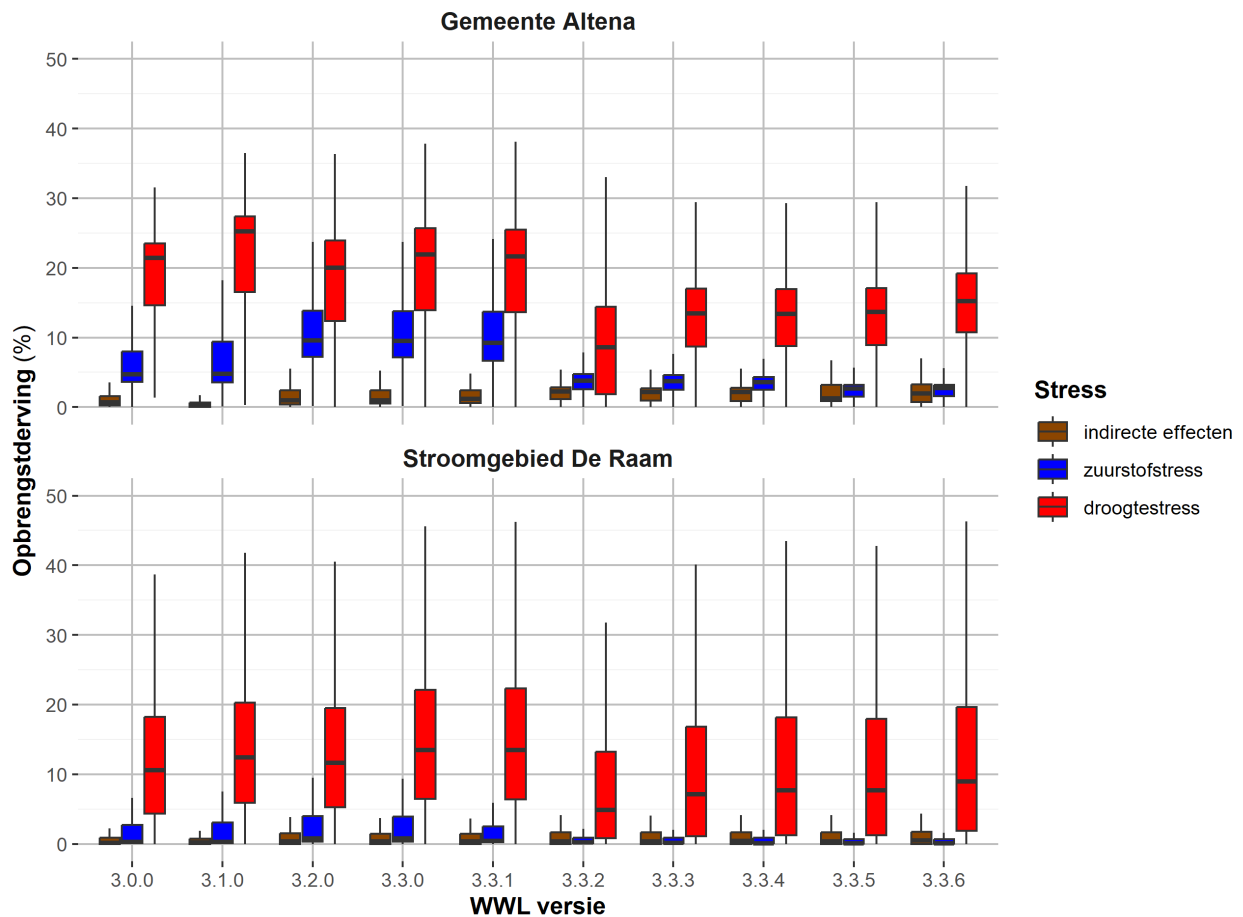




**Figuur 3.7** Verandering in gesimuleerde opbrengstderving (%) ten opzichte van WWL-regionaal versie 3.0.0 na doorvoering van alle wijzigingen voor stroomgebied De Raam over de periode 2012-2018. Wanneer er geen veranderingen optreden wordt dit met donkergrijs weergegeven.

#### *Effect stapsgewijs doorgevoerde wijzigingen*

Om meer inzicht te verschaffen in het effect van de doorgevoerde wijzigingen op de modelresultaten hebben we de wijzigingen stapsgewijs doorgevoerd bij het toepassen van WWL-regionaal. De resultaten weergegeven in Figuur 3.8 geven een overzicht hoe de opbrengstderving over het algemeen verandert in het gebied. Het versienummer komt hierbij overeen met versienummers vermeldt in Tabel 4. Hierbij valt op dat met name de overstap van een empirisch naar mechanistisch wateropnameconcept veel effect heeft op de gesimuleerde opbrengstderving.



**Figuur 3.8** Spreiding in gesimuleerde opbrengstderving (%) als gevolg van indirecte effecten, zuurstof- en droogtestress voor gemeente Altena en stroomgebied De Raam over de periode 2012-2018 bij stapsgewijs doorgevoerde wijzigingen. De spreiding in modelresultaten zijn weergegeven als boxplots.

De doorgevoerde wijzigingen werken op verschillende manieren door in de gesimuleerde opbrengstderving. Zo kan een wijziging bij het ene gewas een groter effect teweegbrengen dan bij een ander gewas. Hieronder hebben we de belangrijkste veranderingen weergegeven:

- Bij het doorvoeren van de nieuwe methode voor het kwantificeren en specificeren van de opbrengstderving (versie 3.2.0) zien we een toename van indirecte effecten. Dit gaat gepaard met een toename van de potentiële gewasopbrengst omdat de bepaling van potentiële gewasopbrengst niet meer afhankelijk is van de neerslag of bodemfysische eigenschappen.
- De verandering van empirische naar mechanistische wateropname (versie 3.3.2) zorgt voor een sterke afname van zowel zuurstofstress als droogtestress. In vergelijking tot het empirische concept wordt bij het mechanische concept meer water onttrokken uit de wortelzone daar waar het makkelijk beschikbaar is. Bij kleigronden zorgt dit voor een sterkere reductie in droogtestress dan bij zandgronden.
- Als gevolg van de implementatie van adaptieve wortelontwikkeling (versie 3.3.3) zien we een sterke toename van droogtestress bij diep wortelende gewassen (maïs, graan, aardappel en suikerbiet). Dit treedt met name op wanneer de hydrologische condities in het voorjaar relatief nat zijn. De neerwaartse wortelontwikkeling wordt onder deze condities geremd waardoor er een oppervlakkig wortelsysteem wordt gevormd. Een oppervlakkig wortelsysteem is gevoeliger voor meteorologisch droge perioden.
- Door het invoeren van nieuwe gewasvariëteiten (versie 3.3.4) zien we bij snijmais een toename van droogtestress. De afrijping van de nieuwe variëteit voor snijmais duurt langer en er is sprake van een grotere bodembedekking en daarmee watervraag. Bij doorvoering van nieuwe aardappelvariëteiten zien we een afname van droogtestress.
- Als gevolg van aanpassing van het groeiseizoen en watervraag (versie 3.3.6) zien we tenslotte bij zaaiui een lichte toename van droogtestress en bij granen een sterke toename van droogtestress als gevolg van het hanteren van een lagere gewasweerstand, zie Bijlage A.

## 3.3 Toekomstige doorontwikkelingen

WWL is sinds aanvang een instrument voor het bepalen van het effect van veranderingen in hydrologische condities op gewasopbrengsten. Hiermee is het mogelijk om de invloed van veranderingen in waterbeheer, herinrichtingsprojecten, (drink)waterwinningen en klimaat op de landbouwkundige gewasopbrengst inzichtelijk te maken. We houden hierbij rekening met bodemhydrologische omstandigheden. De gewasopbrengst is echter niet alleen afhankelijk van de hydrologische omstandigheden. Naast beschikbaarheid van (voldoende) water en zuurstof heeft het gewas ook nutriënten (voedingsstoffen) nodig, maar bij te hoge concentraties van stoffen (nutriënten, zout) in het bodemvocht kan weer schade ontstaan (zoutstress (osmotisch effect), toxiciteit). Hieronder wordt kort ingegaan op wat het betekent om in de toekomst rekening te houden met zoutstress en stikstofstress. Tevens wordt kort ingegaan wat het betekent om voor alternatieve gewassen te rekenen.

### 3.3.1 Zoutstress

Met SWAP is het mogelijk om stoftransport te simuleren, waarbij de gesimuleerde stofconcentratie als een proxy van het zoutgehalte (of elektrische geleidbaarheid, EC) kan worden opgevat. Bij de eerste oplevering van WWL werd enige vorm van zoutstress meegenomen in de WWL-tabel. Hierbij werd alleen rekening gehouden met de zoutconcentratie van irrigatiewater. Dat was te beperkt, omdat zouten ook via kwelwater en eventueel via infiltrerend sloot- of drainwater kunnen worden aangevoerd naar de wortelzone. Hierbij is het dan ook belangrijk rekening te houden met de initiële zoutverdeling in de bodem. Bij latere opleveringen van WWL is derhalve zout weer buiten beschouwing gelaten. In Bijlage F is een nadere beschouwing gegeven over wat het betekent om in de toekomst beter rekening te houden met zout. Samengevat betekent het toevoegen van zoutstress in de WWL-tabel:

- langjarige opstartsimulaties om een realistische initiële zoutverdeling te construeren;
- een groot aantal aanvullende scenario simulaties om effecten van concentratieniveaus van irrigatiewater, kwelwater en infiltrerend sloot- of drainwater te beschouwen;
- een heroverweging hoe de onderrandvoorwaarde in SWAP moet worden beschouwd omdat rekening gehouden moet worden met kwel (en wegzijging);
- een extra sleutel zal moeten worden toegevoegd voor het zoutgehalte (bijvoorbeeld de concentratie in het beregeningswater en/of van het kwelwater).

Natuurlijk kan ook WWL-maatwerk gebruikt worden om direct de veranderingen in opbrengst te berekenen. Om dit allemaal te kunnen realiseren is veel voorstudie noodzakelijk. In 2025 is het meerjarige onderzoeksprogramma *'Omgaan met zout in landbouw, natuur en waterbeheer'* (<https://edepot.wur.nl/685404>) gestart waarin naast analyse van zouttolerantie van gewassen ook aandacht wordt besteed aan de vraag hoe goed huidige modellen (lees: SWAP) presteren in het simuleren van zoutconcentratie in het bodemvocht. Resultaten uit dit onderzoeksprogramma kunnen dan in de toekomst meegenomen worden in een eventuele uitbreiding van WWL met zoutstress.

### 3.3.2 Stikstofstress

Naast water en zuurstof hebben gewassen ook voedingsstoffen (nutriënten) nodig. In de huidige werkwijze van WWL wordt verondersteld dat nutriënten nooit beperkend zijn. De nutriënten worden aan de bodem toegediend via organische mest en kunstmest. Omdat steeds zuiniger wordt omgegaan met toediening van deze meststoffen wordt de kans groter dat tekorten aan voeding tijdens het groeiseizoen ontstaan wat leidt tot groeireductie. Van alle nutriënten is stikstof (N) een belangrijke component en in tweede instantie fosfor (P). In Bijlage E wordt stilgestaan bij de aspecten die belangrijk zijn wanneer we stikstofstress willen meenemen in WWL. Het gaat daarbij om het kwantificeren van de stikstofvraag door het gewas, stikstofprocessen in de bodem (inclusie aanvoer via (organische) bemesting) en stikstofbeschikbaarheid voor gewasopname. In 2025 is een eerste versie van het gewasgroeimodel WOFOST opgeleverd waarmee de N-vraag kan worden gekwantificeerd. Dat model is alleen nog maar gevalideerd voor wintergraan. Er is meer onderzoek nodig om de N-vraag voor andere WOFOST-gewassen te valideren. De beschrijving van stikstofprocessen in de bodem is in Nederland vastgelegd in het nutriëntenmodel ANIMO. ANIMO wordt onder meer gebruikt bij de evaluatie van het mestbeleid, en ANIMO wordt ook gebruikt als onderdeel van het landelijk waterkwaliteitsmodel water (LWKM; van der Bolt et al., 2020). ANIMO beschrijft allerlei

---

deelprocessen van de N-cyclus (in combinatie met de koolstofcyclus) in de bodem<sup>2</sup>. Wanneer in WWL rekening gehouden gaat worden met N dan moet rekening gehouden worden met al deze processen en bijbehorende parametrisaties. Hiervoor worden in het LWKM landelijke schematisaties opgesteld. Het ligt dan ook erg voor de hand om in WWL hierop aan te sluiten. Daarom is het advies om een koppeling tussen SWAP-WOFOST en ANIMO tot stand te brengen waarbij uitwisseling van gegevens op dagbasis zal plaatsvinden. In 2025 is in een WENR investeringsproject een eerste prototype gemaakt van zo'n koppeling op dagbasis tussen SWAP en ANIMO. Dat zal in 2026 worden voortgezet door toevoeging van de nieuwe WOFOST versie waarin ook N wordt beschouwd. Net zoals bij zout geldt ook hier dat toevoegen van N in de WWL-tabel leidt tot een flinke toename in het aantal door te rekenen scenario's om de WWL-tabel te kunnen afleiden. Tevens zal een sleutel voor de WWL-tabel gevonden moeten worden waarmee in de tabel ook op stikstofbeschikbaarheid gezocht kan worden. Natuurlijk kan ook WWL-maatwerk gebruikt worden om direct de veranderingen in opbrengst te berekenen.

### 3.3.3 Alternatieve gewassen

Bij de huidige oplevering van WWL kunnen resultaten worden weergegeven voor 10 WOFOST-gewassen en 10 overige gewassen (via eenvoudige gewasgroeimodule in SWAP). WOFOST simuleert in detail de groei van gewassen en is slechts voor enkele gewassen gevalideerd en geparаметriseerd. Voor overige gewassen is in SWAP de mogelijkheid om een vaste jaarlijkse gewasontwikkeling op te leggen, waarbij reductie in gewasgroei rechtstreeks is gekoppeld aan reductie in transpiratie. Voor deze en nieuwe of alternatieve gewassen is het niet mogelijk om met het dynamische gewasgroeimodel WOFOST te rekenen omdat de invoergegevens daarvoor niet beschikbaar zijn. Om alternatieve gewassen toe te voegen aan WWL valt te overwegen om de optie eenvoudige gewasgroei te gebruiken. Ook dan betekent het dat hiervoor informatie beschikbaar moet zijn. Dat betreft:

- Gewaskalender: moment van zaaien/planten en het oogstmoment (variabelen: CROPSTART; CROPEND; TSUMEA; TSUMAM; TBASE).
- Ontkieming: in geval van zaaien een indicatie van de ontkiemingsperiode (variabelen: TSUMEMOPT; TBASEM; TEFFMX)
- Watervraag: watervraag volgens Penman-Monteith-direct (variabelen: LAI, CH, ALBEDO, RSC, KDIF, KDIR; LAI en CH als functie van gewasstatus DVS)
- Interceptieverdamping: bladreservoir (variabelen: SICCAPLAI)
- Wortelontwikkeling: eigenschappen van wortels (variabelen: RDC, SRL, ROOTRADIUS, WROOTTB; WROOTTB als functie van DVS)

Als WWL in de toekomst uitgebreid wordt met zout- en N-stress komen er ook nog nadere gegevens voor de gewasgroeimodule bij.

Voor project VV-WWL was het de bedoeling om het uitvoeren van berekeningen voor alternatieve gewassen zoals vezelgewassen en eiwitrijke gewassen mogelijk te maken. Bij aanvang van het project was de veronderstelling dat de bovenstaande data voor toepassing van eenvoudige gewasgroei grotendeels beschikbaar zou zijn. Dit bleek echter niet zo te zijn, zodat aan dat deel van de projectdoelstelling niet kon worden voldaan.

---

<sup>2</sup> Bemesting, inwerken gewasresten, mineralisatie, nitrificatie, sorptie, vervluchtiging, immobilisatie, denitrificatie, gewasopname, uitspoeling.

# 4 Toetsing Waterwijzer Landbouw

Modellen zijn altijd een beperkte representatie van de werkelijkheid. Om te weten hoe bruikbaar simulatiemodellen zijn is toetsing en validatie nodig. Vaak wordt er dan ook gevraagd -en terecht- naar de validatie van WWL. De onderliggende modellen SWAP en WOFOST zijn in het verleden met enige regelmaat getoetst, zowel beide modellen apart als de combinatie. Op de website van SWAP<sup>3</sup> en WOFOST<sup>4</sup> is hier meer informatie over te vinden. Voor validatie van WWL is het altijd de uitdaging dat hierbij data nodig zijn om zowel hydrologie als gewasgroei, bij voorkeur gelijktijdig, te kunnen toetsen. De gewasgroei mag daarbij alleen afhankelijk zijn van meteorologische omstandigheden, bodem en hydrologie en moet 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.

Toetsing en validatie van WWL is bij voorbaat lastig omdat de gewasopbrengstderving niet direct gemeten kan worden. Het referentieniveau waar de opbrengstderving aan wordt gerelateerd, de potentiële gewasopbrengst, betreft immers een gewasopbrengst die alleen in theorie gehaald kan worden. In de praktijk zal er altijd sprake zijn van suboptimale groeiomstandigheden. Toetsing en validatie van WWL heeft daarom betrekking op de actuele gewasopbrengst die kan worden berekend én gemeten. Wanneer het modelinstrumentarium de actuele gewasopbrengst goed weet te benaderen geeft dat vertrouwen in de gesimuleerde opbrengstderving.

Met aandacht voor deze uitdagingen richten we ons in dit hoofdstuk op de modelprestaties van WWL. In eerste instantie toetsen we de modeluitkomsten aan observaties verkregen uit gecontroleerde veldproeven. Het betreft hier deels een herhaling van toetsen die in het verleden ook hebben plaatsgevonden (Kroes e.a. 2015; Mulder e.a. 2023). Omdat we hier grotendeels dezelfde dataset voor gebruiken is het formeel niet juist om te spreken van validatie van WWL, want dit neigt naar kalibratie. In tweede instantie richten we ons daarom op een vergelijking met gegevens van het BedrijvenInformatieNet (BIN; ook wel bekend als Farm Accountancy Data Network) dat in beheer is bij Wageningen Social & Economic Research.

## 4.1 Toetsing gecontroleerde veldproeven

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 door andere stressoren (zoals niet-optimale nutriëntenvoorziening, zoutschade en ziektes en plagen) niet of zo min mogelijk aan de orde waren. Deze toetsing betreft deels een herhaling van een studie die is uitgevoerd met WWL-versie 3.0.0 (zie Tabel 6). De locaties van de veldproeven zijn weergegeven in Figuur 4.1.

---

<sup>3</sup> <https://www.swap.wur.nl>

<sup>4</sup> <https://www.wur.nl/en/research/products-services/wofost-world-food-studies>

**Tabel 6** Overzicht veldproeven die gebruikt zijn bij de toetsing van WWL (Mulder e.a., 2023)

Gewas	Periode	Bron
<i>Grasland</i>		
Ruurlo	1980 – 1984	Snijders e.a., 1987
Zegveld	2003 – 2005	Stolk e.a., 2011
<i>Snijmais</i>		
Cranendonck	1974 – 1982	Schröder, 1985
Dijkgraaf	2007	Elbers e.a., 2010
<i>Aardappel</i>		
Borgerswold	1992 – 1994	Dijkstra e.a., 1995
Vredepeel	2002	Van Groenigen e.a., 2005a; 2005b
Rusthoeve	2011 – 2013	Schipper e.a., 2015

In Bijlage C zijn de modelprestaties van WWL-versie 4.0.0 weergegeven voor deze veldproeven. Over het algemeen is ten opzichte van WWL-versie 3.0.0 een lichte verbetering te zien in de modelprestaties. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de dataset ook gebruikt is voor het vinden van de juiste instellingen ten behoeve van de parametrisatie van adaptieve wortelontwikkeling. Er is daarmee dus sprake van enige kalibratie.

Recent zijn er twee aanvullende datasets beschikbaar gekomen van veldproeven met observaties van zowel gewasopbrengsten als hydrologische condities. Het gaat hierbij om een veldproef met grasopbrengsten welke in 2016 en 2017 is uitgevoerd op proefboerderij KTC Zegveld. En een studie naar gewasopbrengsten van verschillende aardappelvariëteiten die in 2019 en 2020 is uitgevoerd bij Lelystad en Vredepeel. In 2020 en 2021 zijn verspreid over Nederland voor een groot aantal percelen gewasopbrengsten bepaald van aardappelen. Bij deze laatste dataset ontbreken echter gegevens over de hydrologische condities, maar toch proberen we deze set te gebruiken voor een toets van WWL.

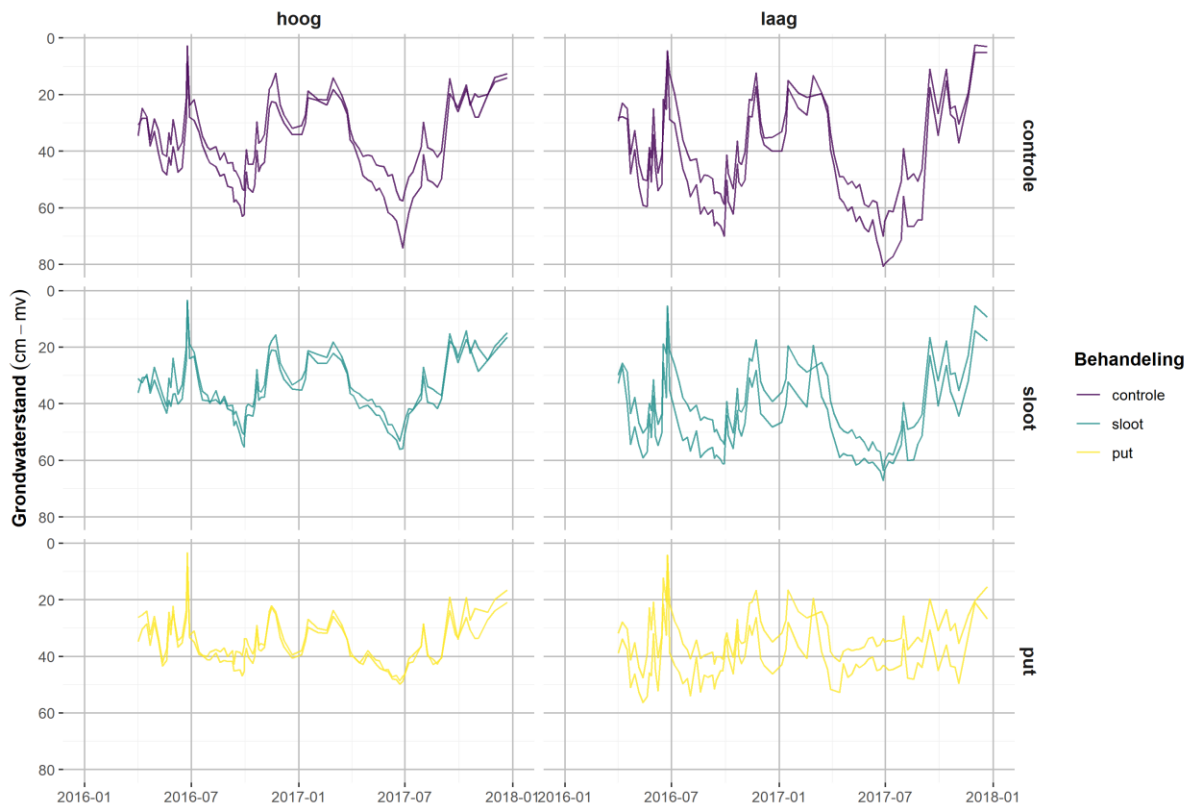


**Figuur 4.1** Ligging proefvelden met grasland (groen), snijmais (oranje) en aardappel (bruin).

## Zegveld (gras; 2016 – 2017)

Bij het veldexperiment op proefboerderij KTC Zegveld is het effect van onderwaterdrains en pomp-gestuurde onderwaterdrains op de grondwaterstand onderzocht (Hoving e.a. 2021). Het experiment is uitgevoerd in tweevoud bij een vast hoog slootpeilregime (twee percelen) en een vast laag slootpeilregime (twee percelen). Per perceel zijn er drie sub-behandelingen ingericht: zonder onderwaterdrains (controle), gangbare onderwaterdrains (sloot) en onderwaterdrains met pompaansturing (put). Voor de jaren 2016 en 2017 zijn er metingen beschikbaar van grondwaterstanden en gewasopbrengsten van de eerste vijf maaisneden.

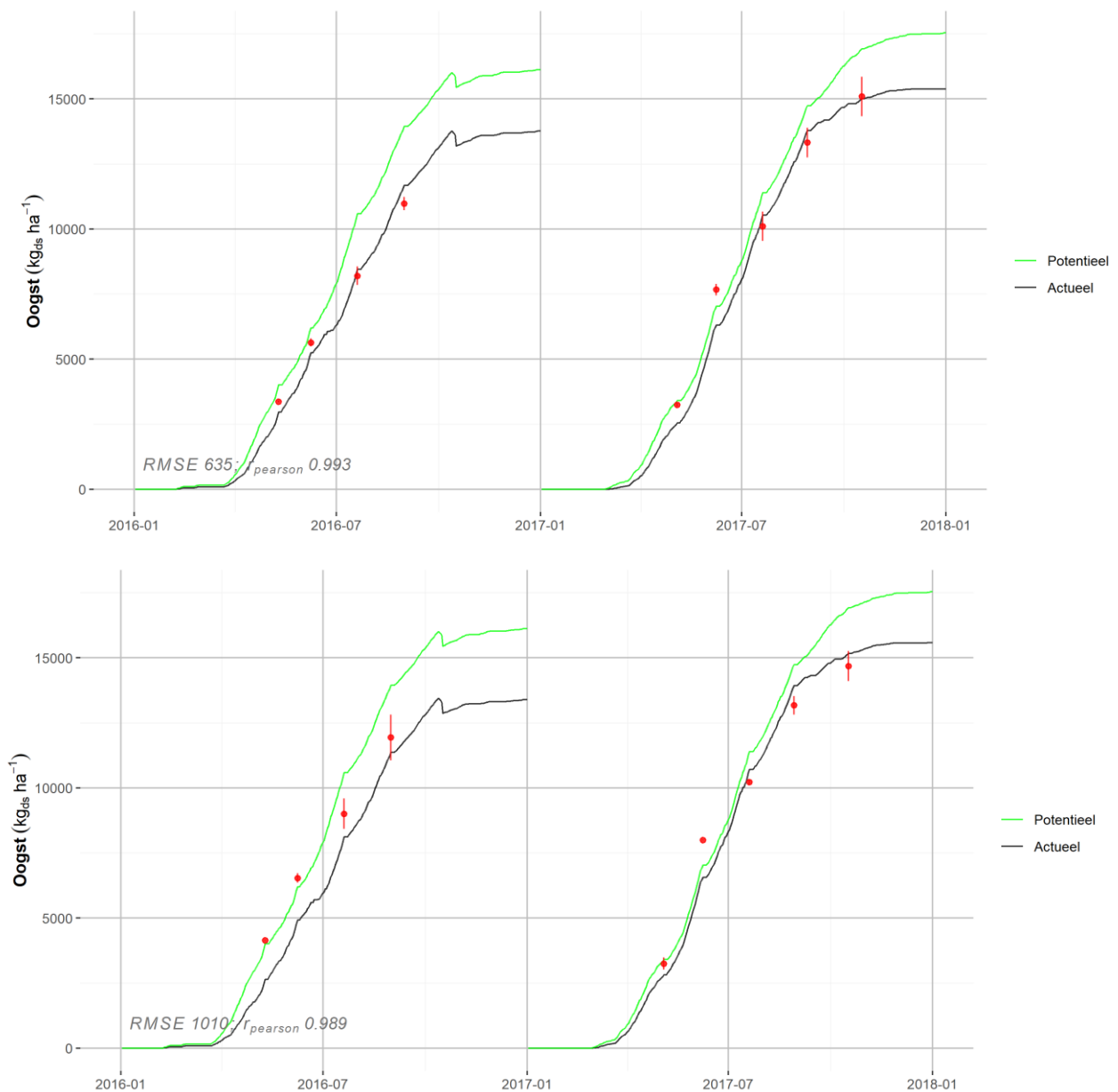
Voor de behandeling 'controle in combinatie met een laag peil' zakt de grondwaterstand in de zomer het sterkst uit, zie Figuur 4.2. Voor deze behandeling zakt de grondwaterstand in de zomer van 2017 verder uit dan in 2016. Voor behandeling 'put' zakt de grondwaterstand het minst ver uit in de zomer en zijn de verschillen tussen 2016 en 2017 het geringst. Het moment van maaien is per snede vrijwel gelijk voor alle combinaties van peilen en behandelingen. Op de percelen met hoog slootpeilregime is het laatste oogstmoment in 2016 niet gemeten omdat het beweiding betrof. Er is geen duidelijk verband tussen de gemeten gewasopbrengst en de gehanteerde behandelingen. Het minder ver uitzakken van de grondwaterstand in de zomer lijkt daarmee niet direct een nadelige invloed te hebben op de jaaropbrengst. Zowel bij een hoog als een laag slootpeilregime zijn de gewasopbrengsten voor 2016 en 2017 min of meer vergelijkbaar. Eventuele opbrengstderiving lijkt daarmee niet substantieel door te droge omstandigheden te zijn beïnvloed.



**Figuur 4.2** Gemeten grondwaterstandsverloop gedurende 2016 – 2017 voor 2 peilen (horizontaal) en 3 behandelingen (verticaal). Per combinatie van peil en behandeling zijn telkens twee grondwaterstanden gemeten (op twee verschillende percelen).

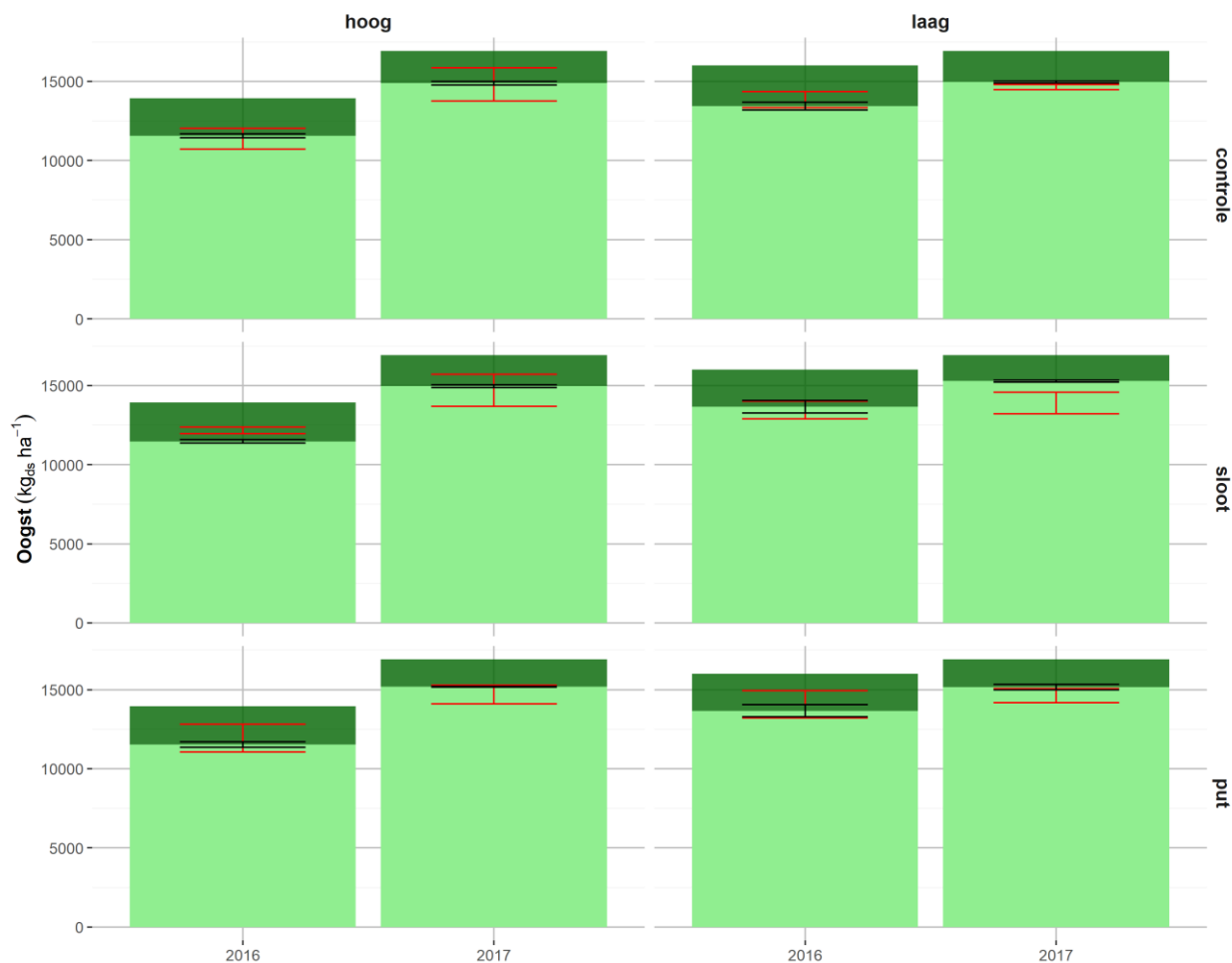
Voor elke combinatie van peilen en behandelingen kunnen we een vergelijking maken tussen de geobserveerde en gesimuleerde grasopbrengst. Bij de aansturing van de modelsimulaties leggen we de geobserveerde grondwaterstand op als onderrandvoorwaarde in de vorm van een drukhoogte. De meteorologische condities zijn afkomstig van het weerstation de Bilt en het bodemtype betreft een koopveengrond. Een voorbeeld voor een perceel met een hoog waterpeil zonder onderwaterdrains (behandeling controle) en onderwaterdrains met pompaansturing (behandeling put) is weergegeven in Figuur 4.3 waarin te zien is dat de gesimuleerde actuele grasopbrengst goede overeenkomsten laat zien met de observaties. De gesimuleerde gewasontwikkeling wordt hierbij beïnvloed door zuurstofstress. Vroeg in het jaar lijkt de gesimuleerde grasgroei iets te laat op gang te komen. Dit wordt met name gestuurd door het

moment waarop wordt verondersteld dat het gras gaat groeien waarvoor een temperatuursom wordt gehanteerd. In Mulder e.a. (2023) hebben we al laten zien dat de afwijking van de simulaties ten opzichte van de observaties het grootst is voor de eerste grassneden van het jaar. Het blijft een aanbeveling om dit nader te onderzoeken.



**Figuur 4.3** Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse biomassa, inclusief oogst voor grasland voor veldproef Zegveld (2016 – 2017) bij een hoog waterpeil zonder onderwaterdrains (boven; behandeling controle) en met onderwaterdrains met pompaansturing (onder; behandeling put); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

In Figuur 4.4 zijn alle modelresultaten gegroepeerd weergegeven voor combinaties van peilen en behandelingen. Over het algemeen is het modelinstrumentarium goed in staat om de jaarlijks gemeten grasopbrengst te simuleren. Dit komt ook tot uiting in de modelprestaties met een RMSE die uitkomt op 640 kg<sub>ds</sub> ha<sup>-1</sup> en een Pearson-correlatiecoëfficiënt die uitkomt op 0.9.



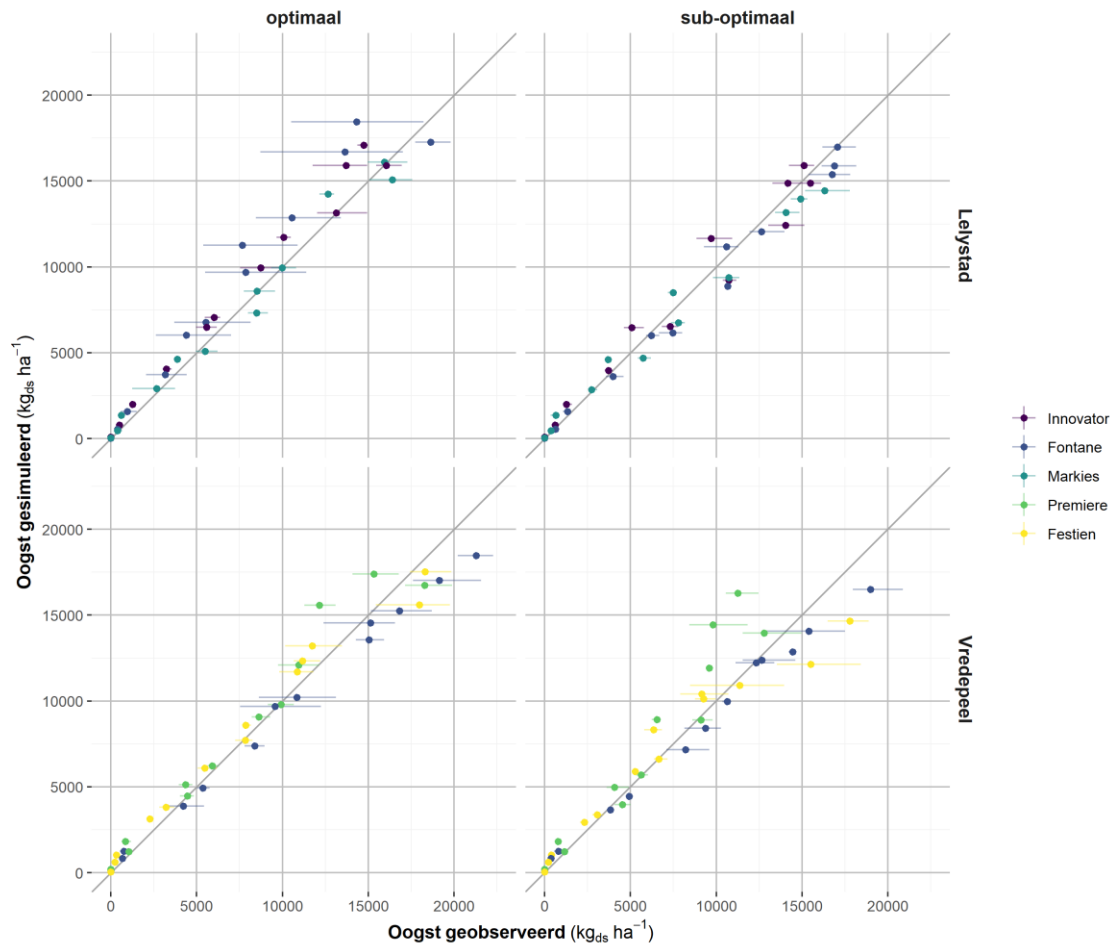
**Figuur 4.4** Gemeten en gesimuleerde jaarlijkse grasopbrengst voor veldproef Zegveld (2016 – 2017) voor twee peilen (hoog en laag, horizontaal) en 3 behandelingen (verticaal); met in het donkergroen en lichtgroen respectievelijk de gesimuleerde potentiële en actuele grasopbrengst; spreiding in de actuele gesimuleerde grasopbrengst is weergegeven in het zwart en in het rood is de spreiding in gemeten grasopbrengsten weergegeven.

#### Lelystad en Vredepeel (aardappel; 2019 – 2020)

In 2019 en 2020 is onderzoek uitgevoerd naar water-gelimiteerde gewasopbrengst van aardappelen (Ten Den e.a. 2024). Het onderzoek is uitgevoerd op twee locaties: Lelystad en Vredepeel. De gewasopbrengst is voor vijf verschillende aardappelvariëteiten onderzocht. De hoeveelheid irrigatie die is toegediend is afhankelijk gesteld van de bodemhydrologische condities waarbij gestuurd is op een pF van 2.4 (scenario optimaal) en een pF van 3.2 na ontkieming (scenario sub-optimaal). Voor Lelystad kwam de hoeveelheid irrigatie uit op ongeveer 110 – 160 mm voor het scenario optimaal en 40 mm voor het scenario sub-optimaal. Voor Vredepeel ligt de toegediende irrigatie een stuk hoger, ongeveer 300 – 330 mm voor scenario optimaal en 160 – 180 mm voor scenario sub-optimaal. Ook is onderzoek verricht naar het effect van verschillende stikstofgiften op de gewasopbrengst, maar we richten ons hier alleen op de veldobservaties met de hoogste stikstofgiften zodat we nagenoeg alleen de hydrologische effecten meenemen. Gedurende het groeiseizoen zijn op verschillende momenten gegevens verzameld met betrekking tot de gewasontwikkeling (biomassa van het blad, stengel en vrucht) en het grondwater.

De grondwaterstanden zijn zowel voor Lelystad als Vredepeel op vier verschillende locaties gemeten, maar de metingen zijn niet te herleiden naar de afzonderlijke velden. Omdat het SWAP model een puntmodel is, betekent dit dat de gesimuleerde grondwaterstand berekend wordt op basis van de randvoorwaarden voor de betreffende situatie. Gezien de relatief grote irrigatiehoeveelheden zal daardoor de gesimuleerde grondwaterstand in de zomer minder ver uitzakken dan in de veldsituatie, waar de grondwaterstand meebeweegt met de grondwaterstanden met de omgeving, dus buiten het perceel. In eerste instantie hebben we ons gericht op de simulatie van de grondwaterstanden waarbij geen irrigatie is verondersteld. Naast deze uitgangssituatie hebben we verschillende scenario's van irrigatie gesimuleerd.

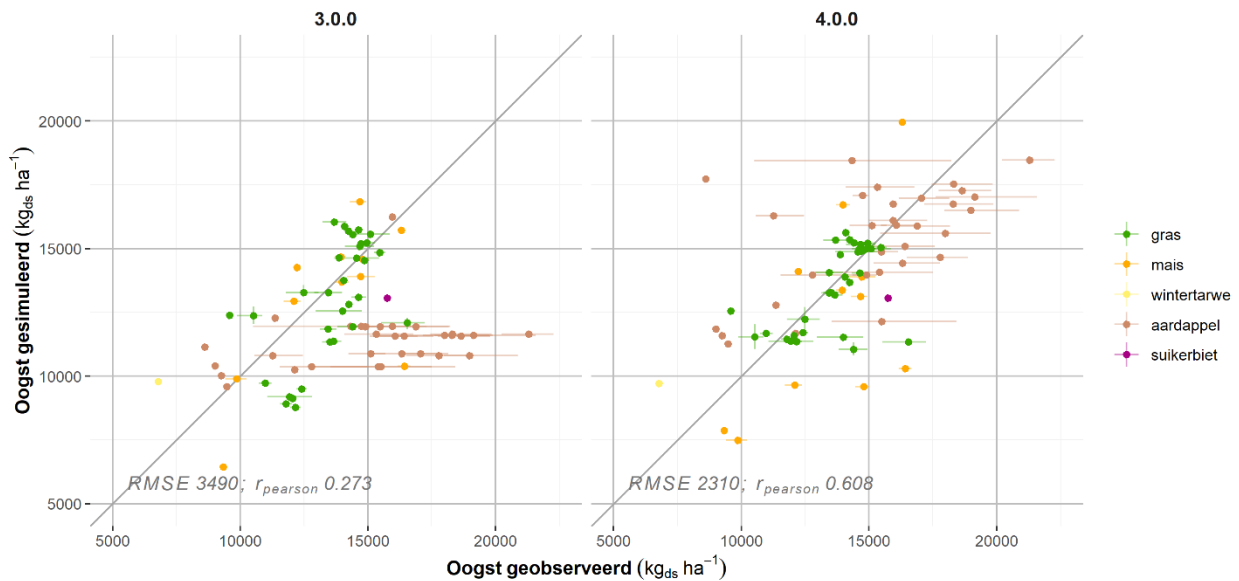
In Figuur 4.5 zijn de geobserveerde en gesimuleerde gewasopbrengsten van verschillende aardappelvariëteiten tegen elkaar uitgezet. Hierbij is te zien dat de gesimuleerde gewasopbrengsten goed overeenkomen met de geobserveerde gewasopbrengsten. Voor het scenario met sub-optimale irrigatie wordt voor Lelystad en Vredepeel respectievelijk 10 en 18% opbrengstderving gesimuleerd, hetgeen voornamelijk het gevolg is van droogtestress. Bij Lelystad is er sprake van een lichte mate van zuurstofstress (circa 1%). Voor het scenario met optimale irrigatie wordt een hogere gewasopbrengst gehaald, de totale opbrengstderving komt hierbij uit op respectievelijk 2 en 4% voor Lelystad en Vredepeel. De modelprestaties komen uit op een RMSE van  $1350 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ ha}^{-1}$  en een Pearson-correlatiecoëfficiënt van boven 0.9.



**Figuur 4.5** Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van verschillende aardappelvariëteiten voor veldproef Lelystad en Vredepeel (2019 – 2020) bij optimaal en sub-optimaal irrigeren.

#### Verandering in modelprestaties als gevolg van doorgevoerde wijzigingen

Hierboven hebben we voor de afzonderlijke proeven kunnen zien hoe de modelresultaten zich verhouden tot de metingen. In Figuur 4.6 zijn de gemeten en gesimuleerde gewasopbrengsten van alle veldproeven tegen elkaar uitgezet, waarbij de modelresultaten zijn verkregen met WWL-versie 3.0.0 en versie 4.0.0. De punten hebben betrekking op de mediane waarden. De horizontale lijn geeft de spreiding weer van de geobserveerde gewasopbrengst indien hier informatie over bekend is. De verticale lijn geeft de spreiding weer van de gesimuleerde gewasopbrengst die wordt veroorzaakt door spreiding in geobserveerde grondwaterstanden (randvoorwaarde in de modelsimulaties).

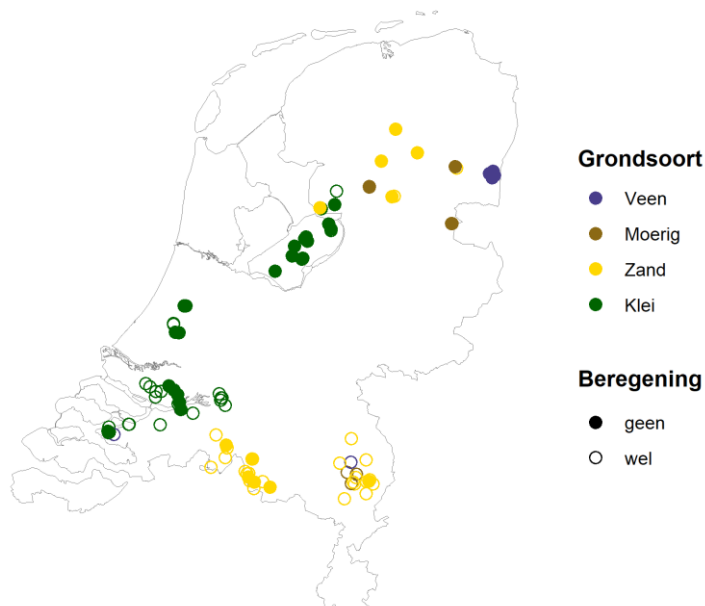


**Figuur 4.6** Gemeten en gesimuleerde gewasopbrengst (oogstbaar product; jaartotalen in kg<sub>ds</sub> ha<sup>-1</sup>); simulatie uitgevoerd met instellingen volgens WWL-versie 3.0.0 en 4.0.0.

Over het algemeen is er een verbetering zichtbaar in de modelprestaties ten opzichte van WWL-versie 3.0.0. Dit mag ook worden verwacht omdat er bij versie 4.0.0 sprake is van enige kalibratie ten behoeve van de parametrisatie van adaptieve wortelontwikkeling. Wat verder opvalt is dat vooral voor het gewas aardappel de gesimuleerde gewasopbrengsten beter overeenkomen met de observaties. Bij versie 4.0.0 wordt gebruik gemaakt van gegevens voor de nieuwe aardappelvariëteiten terwijl bij de vorige versie nog gebruik werd gemaakt van parameters voor oudere variëteiten. Wat verder opvalt is dat bij de grasopbrengsten de spreiding in modelresultaten ten opzichte van de 1:1-lijn afneemt. Bij snijmaisopbrengsten zien we echter een toename van deze spreiding.

#### *Regionale aardappelopbrengsten (aardappel; 2020 – 2021)*

Gedurende twee groeiseizoenen (2020 – 2021) is op 96 percelen de gewasontwikkeling van aardappelen gevolgd (Ravensbergen e.a., 2023). De percelen liggen verspreid over zes regio's in Nederland: Tholen/West-Brabant, Zuid-Holland, Flevoland, Noord-Brabant, Limburg en Drenthe. De eerste drie regio's hebben voornamelijk betrekking op kleigronden en de laatste drie regio's op zandgronden, zie Figuur 4.7. Per regio zijn 8 percelen geselecteerd voor de monitoring van de gewasontwikkeling. Van elk perceel is bekend wanneer en hoeveel beregening is toegepast. Ook is bekend of de gewasontwikkeling hinder heeft ondervonden van bepaalde ziekten. Naast informatie over de gewasopbrengst aan het einde van het groeiseizoen is in 2021 ook informatie verzameld van de hoeveelheid biomassa gedurende het groeiseizoen. De opbrengsten zijn telkens in viervoud gemeten.



**Figuur 4.7** Ligging percelen waar de aardappelopbrengst is gemonitord.

Helaas ontbreekt informatie met betrekking tot de bodemhydrologische condities. Deze informatie ontlene we aan landelijk beschikbare datasets. We maken hierbij gebruik van het Model Grondwaterspiegeldiepte (WDM; versie 4.0.0; Knotters e.a. 2022) en het Landelijk Hydrologisch Model (LHM; versie 4.3.3; De Lange e.a. 2014). Het WDM geeft informatie over de jaarlijkse fluctuatie van het grondwater, namelijk tussen welke dieptes de grondwaterspiegel gemiddeld genomen fluctueert. Het model geeft langjarige gemiddelden van de hoogste meest ondiepe grondwaterstand (GHG; Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand) en de laagste grondwaterstand (GLG; Gemiddeld Laagste Grondwaterstand). Het WDM is onderdeel van de Basisregistratie Ondergrond (BRO). Bij het toepassen van WWL is echter meer detail gewenst over het verloop van de grondwaterstanden. De karakteristieken geven bijvoorbeeld beperkte informatie over hoe ver het grondwater uitzakt in een extreem droge zomer. Informatie over hoe de grondwaterspiegel gedurende het jaar fluctueert ontlene we aan het LHM. Het verloop van de grondwaterspiegel schalen we vervolgens naar de grondwaterstandskarakteristieken van het WDM:

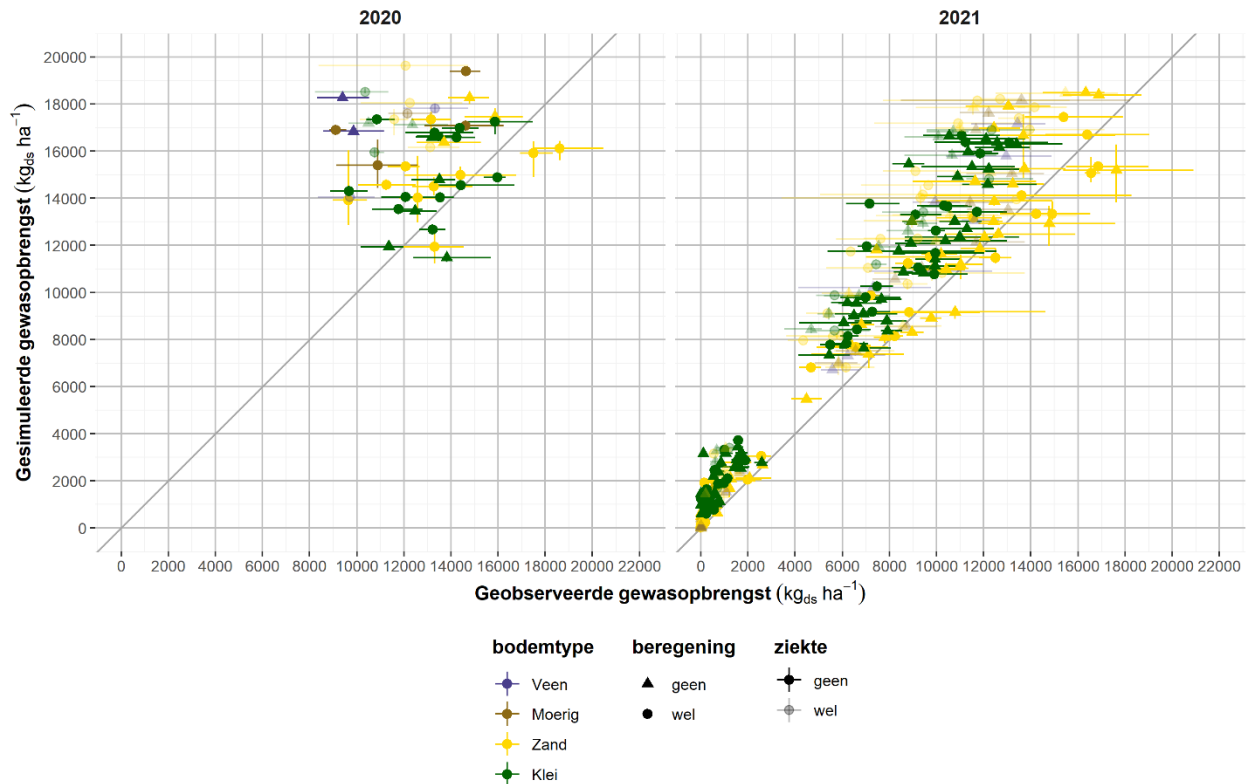
$$GWS_{perceel} = \overline{GxG}_{WDM} + (GWS_{LHM} - \overline{GxG}_{LHM}) \frac{dGxG_{WDM}}{dGxG_{LHM}} \quad \text{Vergelijking 4-1}$$

Waarbij:

- $\overline{GWS}$  : grondwaterspiegel (cm+mv)
- $\overline{GxG}$  : gemiddelde van de grondwaterspiegeldiepte GHG en GLG (cm+mv)
- $dGxG$  : dynamiek van de grondwaterspiegeldiepte (GHG - GLG) (cm)

Omdat het WDM een groot aantal realisaties heeft kunnen we hiermee verschillende verlopen van het grondwater creëren. Op deze manier hebben we het meest waarschijnlijke verloop van de grondwaterstand gecreëerd (gebaseerd op de mediane waarden van de grondwaterstandskarakteristieken) alsook een relatief natte en droge variant hiervan (gebaseerd op het 0.25 en 0.75 percentielwaarde). Bij de aansturing van het SWAP-WOFOST modelinstrumentarium leggen we het verloop van de grondwaterspiegeldiepte op in de vorm van een drukhoogte aan de onderzijde van het bodemprofiel.

In Figuur 4.8 is de gesimuleerde gewasopbrengst uitgezet tegen de geobserveerde gewasopbrengst. Over het algemeen volgt de gesimuleerde gewasopbrengst de observaties goed. Wel lijkt de gesimuleerde gewasopbrengst te worden overschat. Bij percelen waar ziekten zijn waargenomen mag deze overschatting worden verwacht omdat het modelinstrumentarium hier geen rekening mee houdt. In 2021 is aan de lagere waarden goed te zien dat de overschatting van de gewasopbrengst al vroeg in het groeiseizoen optreedt. Dit kan duiden op een te snel gesimuleerde ontkiemingsfase. De modelprestaties voor percelen, waar geen ziekte is waargenomen, komen uit op een RMSE van 2550 kg<sub>ds</sub> ha<sup>-1</sup> en een Pearson-correlatiecoëfficiënt van boven 0.9.



**Figuur 4.8** Gemeten en gesimuleerde gewasopbrengst van aardappel; simulatie uitgevoerd met instellingen volgens WWL-versie 4.0.0.

## 4.2 Vergelijking met gegevens van het BIN

Het BIN is een netwerk van ongeveer 1500 agrarische bedrijven verbonden aan Wageningen Social & Economic Research (WSER), waarvan jaarlijkse boekhoudgegevens worden verzameld (Poppe, 2004). De BIN-gegevens bestaan uit (gemeten en berekende) fysieke gewasopbrengsten, geteelde oppervlak, hoeveelheid berekening en bemestingsgift voor de periode 2010 – 2022. Op basis hiervan kunnen we kijken hoe de modelresultaten van WWL, verkregen met WWL-regionaal versie 4.0.0, zich verhouden tot de gerealiseerde gewasopbrengsten. Voor de vergelijking tussen de gesimuleerde en gerealiseerde gewasopbrengsten voeren we twee analyses uit. In eerste instantie analyseren we de samenhang tussen de beide gewasopbrengsten aan de hand van de Pearson-correlatiecoëfficiënt. In tweede instantie hanteren we een modelmatige aanpak en passen we een regressieanalyse toe met behulp van een Lineair Mixed Model. Met dit model schatten we de relatie tussen de gewasopbrengsten van WWL en die van het BIN. Voordat we de vergelijking kunnen uitvoeren, moeten we eerst de gegevens van BIN en WWL met elkaar koppelen.

### 4.2.1 Koppeling BIN en Waterwijzer Landbouw

Op basis van de locaties van de percelen maken we met behulp van WWL een voorspelling van de potentiële en actuele gewasopbrengst en geven we een indicatie van de oorzaak van de gewasopbrengstderiving. Voor de aansturing van het SWAP-WOFOST modelinstrumentarium ontlenen we informatie met betrekking tot de modelparametrisatie aan landelijk beschikbare datasets. Voor de hydrologische condities maken we gebruik van het WDM en het LHM. Voor elke locatie maken we twee inschattingen van de gewasopbrengst waarbij het verloop van de grondwaterspiegeldiepte is gebaseerd op het LHM al dan niet geschaald naar het WDM (met schaling van de grondwaterspiegeldiepte op basis van de mediane waarde; zie Vergelijking 4-1).

De vergelijking is uitgevoerd voor de gewassen gras, snijmais, wintertarwe, zomergerst, aardappel (consumptie, zetmeel en poot), suikerbiet en zaaiui. We selecteren alleen locaties waar geen berekening heeft plaatsgevonden en waarvoor alle benodigde informatie omtrent de gerealiseerde gewasopbrengst ten behoeve van de vergelijking beschikbaar is (naast de gewasopbrengst is ook informatie van de toegediende stikstof nodig). Voor de vergelijking zijn de observaties gegroepeerd naar combinaties van grondsoort (veen,

moerig, zand, klei en leem) en drie klassen voor hydrologische condities (grondwatertrapklasse I – III, IV – V en VI – VII). Groepen met te weinig observaties (minder dan 10 observaties in een jaar of gemiddeld minder dan 20 observaties per jaar) zijn bij de vergelijking buiten beschouwing gelaten. Daarnaast zijn observaties met onrealistisch lage of hoge gerealiseerde gewasopbrengsten uit de dataset verwijderd. De onrealistisch lage of hoge gewasopbrengsten hadden alleen betrekking op het gewas snijmais en de daaraan gerelateerde grasopbrengst, in paragraaf 4.2.2 lichten we dit verder toe. Het groeperen van data is enerzijds noodzakelijk om het algemene gedrag van de gewasopbrengst onder verschillende condities te analyseren. Daarbij is het belangrijk dat er voldoende observaties binnen elke groep aanwezig zijn. Anderzijds mag een groep niet te ruim worden gedefinieerd. Tabel 7 geeft een overzicht van het aantal observaties per combinatie van grondsoort en grondwatertrapklasse voor beide hydrologische randvoorwaarden. Zo op het eerste oog komt het aantal observaties voor de verschillende groepen redelijk met elkaar overeen. Een uitzondering zijn de observaties met grondsoort veen waarbij de grondwaterspiegeldiepte van het LHM wat verder uitzakt in verhouding tot het WDM. Een andere uitzondering zijn de observaties met grondsoort leem. Indien het WDM als onderrandvoorwaarde wordt gehanteerd blijven er geen observaties over ten behoeve van de vergelijking. Een verklaring hiervoor is dat het WDM alleen informatie bevat van grondwaterspiegeldiepten tot 2.5 m, terwijl leemgronden juist vaak voorkomen waar grondwaterspiegeldieptes groot zijn.

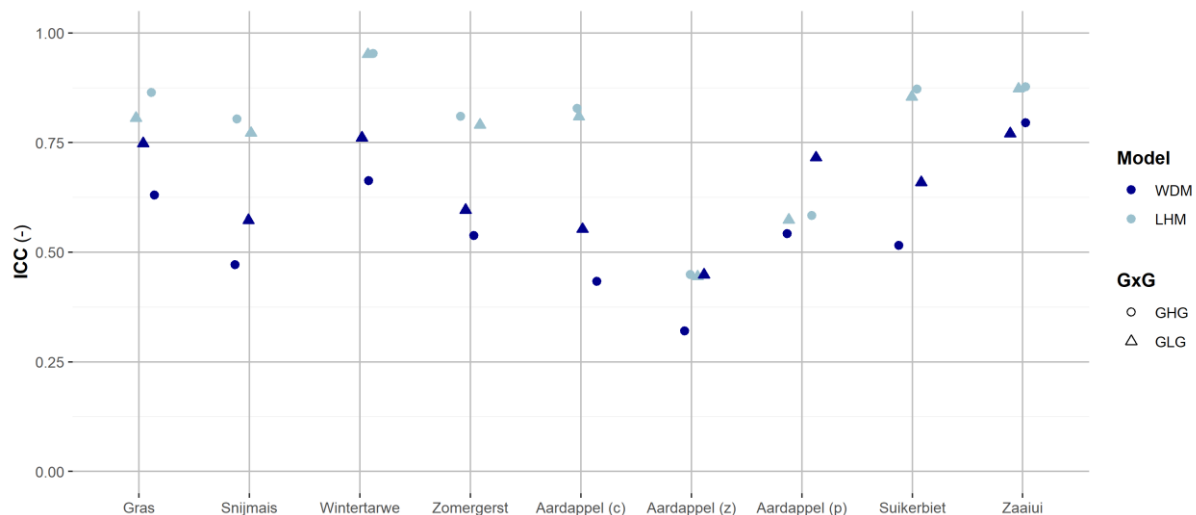
**Tabel 7** Overzicht aantal observaties per gewas voor verschillende combinaties aan grondsoort en grondwatertrapklasse, links betreft het aantal observaties waarbij LHM als onderrandvoorwaarde is gehanteerd en rechts betreft het aantal observaties waarbij WDM als onderrandvoorwaarde is gehanteerd.

Groep	Gewas																		
	Gras		Snijmais		Wintertarwe		Zomergerst		Aardappel Consumptie		Aardappel Zetmeel		Aardappel Poot		Suikerbiet		Zaaiui		
<i>Veen</i>																			
I - III	8147	8900	397	609															
IV - V	694	277	271																
VI - VII	706	101	149																
<i>Moerig</i>																			
I - III	694	524	301	368															
IV - V	256	280	378	388							312								
VI - VII	281	375	505	404			249				774	958				367	454		
<i>Zand</i>																			
I - III	988	693	1771	893															
IV - V	1494	1962	2233	2829							384		198			241			
VI - VII	3680	2874	10499	9004	514	502	1169	812	1118	855	2212	1848	797	548	1821	1411			
<i>Klei</i>																			
I - III	3935	3772	716	279	347														
IV - V	3015	3050	910	1079	1063	1010			470	324			845	1056	529	562			
VI - VII	4921	4541	2418	2178	5570	5512	633	579	1961	2132			4397	4258	2686	2598	1430	1610	
<i>Leem</i>																			
I - III																			
IV - V																			
VI - VII	541		1316		1002		306		566							861			

De gegevens van het BIN worden per bedrijf verzameld zodat per gewas informatie beschikbaar is over de gerealiseerde gewasopbrengst van het betreffende jaar. Een bedrijf beschikt echter vaak over meerdere percelen die onderling kunnen variëren in condities. Voor een zuivere vergelijking tussen de gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengsten moet de variatie tussen percelen binnen hetzelfde bedrijf (relatief) klein zijn. In eerste instantie proberen we een indicatie te krijgen van deze variatie. Dat doen we met behulp van Intraclass Correlation Coefficient (ICC; Donner en Koval, 1980) die als volgt wordt bepaald:

$$ICC = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_b^2 + \sigma_e^2} \quad \text{Vergelijking 4-2}$$

Waarbij  $\sigma_b^2$  de variatie tussen bedrijven aangeeft en  $\sigma_e^2$  de variatie tussen percelen binnen hetzelfde bedrijf aangeeft. Bij een ICC met een waarde van 1 is de volledige variatie te danken aan variaties tussen verschillende bedrijven, terwijl bij een waarde van 0 alle variatie te danken is aan variatie tussen percelen binnen hetzelfde bedrijf. In Figuur 4.9 is de ICC weergegeven voor de hydrologische randvoorwaarde die gebruikt is bij de aansturing van het SWAP-WOFOST modelinstrumentarium.



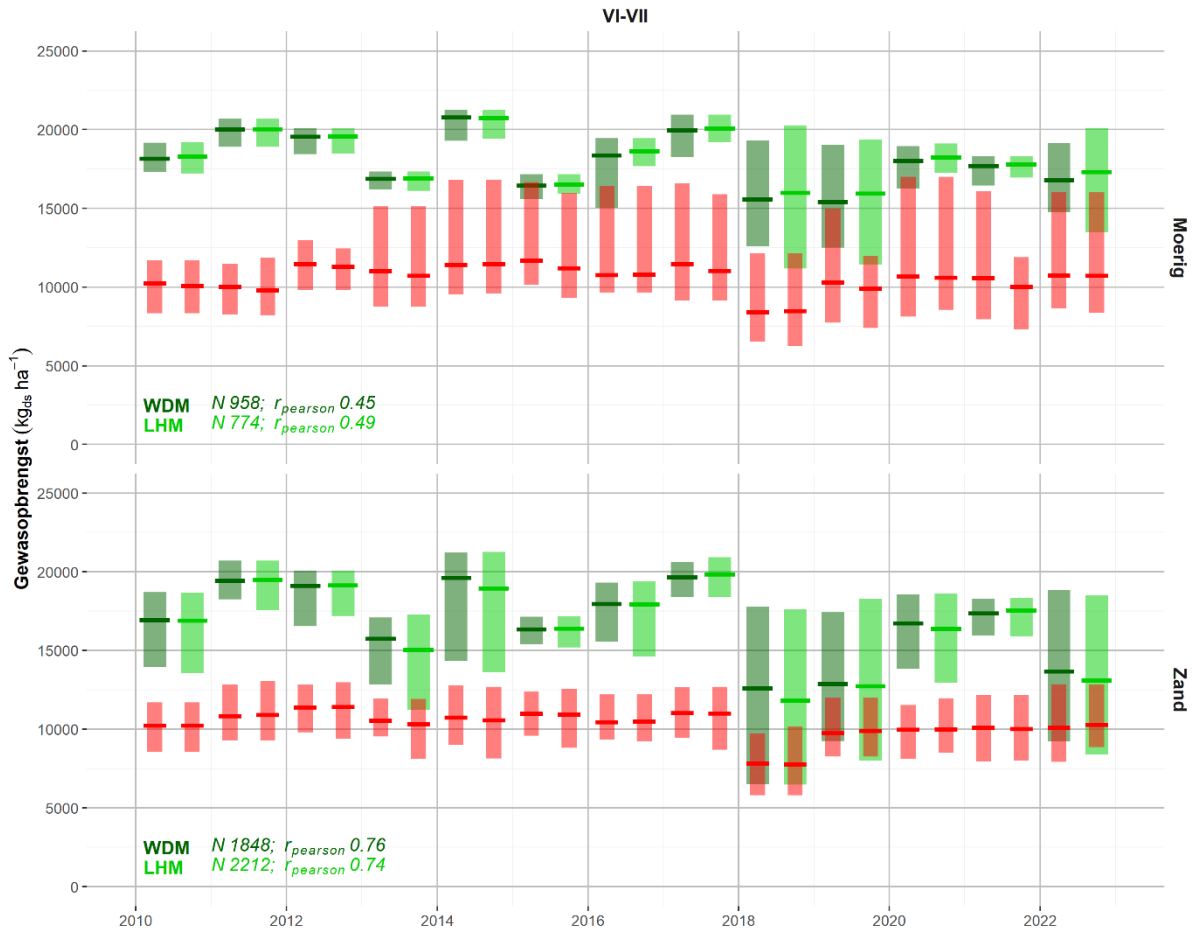
**Figuur 4.9** Intraclass Correlation Coefficient (ICC) per model en gewas.

Variatie in gerealiseerde gewasopbrengsten tussen percelen binnen een bedrijf kan onder andere samenhangen met verschillen in bodem- en hydrologische condities. De ICC-waarde, waarbij de grondwaterstand is gebaseerd op schaling met het WDM, varieert tussen circa 0.3 en 0.7. Daaruit kunnen we concluderen dat een aanzienlijk deel van de variatie in gerealiseerde gewasopbrengsten optreedt tussen percelen binnen hetzelfde bedrijf, wat dus kan samenhangen met verschillen in hydrologische condities. Dit zorgt voor extra variatie hetgeen de vergelijking tussen de gesimuleerde en gerealiseerde gewasopbrengsten lastiger maakt. Over het algemeen is de ICC-waarde waarbij de grondwaterstand rechtstreeks is gebaseerd op het LHM hoger dan de ICC-waarde gebaseerd op de mediane grondwaterstandskarakteristieken van het WDM. Een verklaring hiervoor is dat het LHM en WDM verschillen in resolutie, het LHM hanteert een resolutie van 250 m en het WDM een resolutie van 50 m.

#### 4.2.2 Samenhang tussen gewasopbrengsten

Een mogelijkheid om de samenhang tussen volgens het BIN gerealiseerde en met WWL gesimuleerde gewasopbrengsten te analyseren, is de Pearson-correlatie. Een positieve correlatiecoëfficiënt geeft aan dat een toename in de gerealiseerde jaarlijkse gewasopbrengst gepaard gaat met een toename in de gesimuleerde gewasopbrengst en andersom. Bij een negatieve correlatiecoëfficiënt is er sprake van een tegengesteld gedrag: een afname in de gerealiseerde gewasopbrengst gaat dan gepaard met een toename in de gesimuleerde gewasopbrengst (en andersom). De waarde van de correlatiecoëfficiënt is contextafhankelijk en kent geen universele ondergrens waarboven een verband wetenschappelijk betekenisvol zou zijn. De interpretatie hangt af van de variabiliteit in de gegevens, de (meet)onnauwkeurigheid en de aard van het proces dat wordt onderzocht. Voor deze analyse streven we naar een correlatie van ten minste 0.3.

Een voorbeeld van een tijdreeks voor zetmeelaardappel op moerige en zandgronden in combinatie met grondwatertrapklasse VI-VII is weergegeven in Figuur 4.10, waarbij het aantal observaties per grondsoort is weergegeven evenals de correlatiecoëfficiënt.



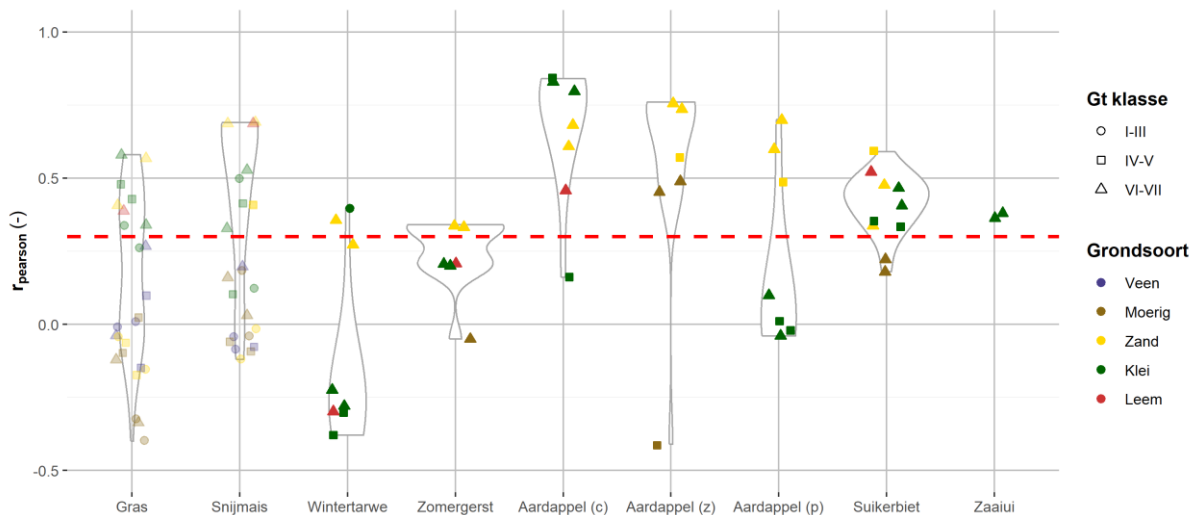
**Figuur 4.10** Vergelijking tussen gesimuleerde (LHM lichtgroen; WDM donkergroen) en gerealiseerde (rood) gewasopbrengst voor zetmeelaardappel voor de periode 2010 – 2022 voor twee grondsoorten: Moerig (boven) en Zand (onder); De donkere lijn door de balken geeft de mediane waarde weer, terwijl de lichtgekleurde zone de spreiding van 95% van de datapunten weergeeft.

De correlatiecoëfficiënt voor de weergegeven tijdreeks is in dit geval positief en ligt boven de streefwaarde van 0.3. Voor de zandgronden is  $r$  zelfs groter dan 0.7, hetgeen aangemerkt kan worden als een goede samenhang. Omdat de hydrologische randvoorwaarden bepaald met het LHM en WDM van elkaar verschillen, resulteert dit in een vergelijking die is gebaseerd op een andere set aan datapunten. Dit zien we terug in het aantal observaties en kleine verschillen in de correlatiecoëfficiënt. Wanneer het aantal observaties groot genoeg is, is het de verwachting dat de gesimuleerde gewasopbrengsten van beide modellen vergelijkbaar met elkaar zijn. Voor combinaties van grondsoort en grondwatertrapklasse met relatief weinig observaties wordt de berekende correlatie gevoeliger voor variatie die niet door het model wordt verklaard. In dat geval kunnen andere factoren, zoals bedrijfsspecifieke verschillen, relatief sterk doorwerken in de correlatiecoëfficiënt, waardoor de geschatte relatie tussen gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengsten minder robuust wordt.

Wat daarnaast vooral opvalt aan de weergegeven tijdreeksen voor zetmeelaardappel is dat de gesimuleerde gewasopbrengsten hoger zijn dan de gerealiseerde gewasopbrengsten. Dat is logisch omdat WWL alleen rekening houdt met bodemkundig-hydrologische condities en geen effecten van bedrijfsmanagement (o.a. bemesting), ziekten en plagen of te zoute omstandigheden in beschouwing neemt. De definitie van gewasopbrengst speelt dus een belangrijke rol. Bij de vergelijking richten we ons op gewassen die gesimuleerd worden met het dynamische gewasgroeimodel WOFOST. De gesimuleerde gewasopbrengst drukken we daarbij uit in kilogram droge stof per hectare. De gerealiseerde gewasopbrengsten, met betrekking tot akkerbouwgewassen, zijn de opbrengsten die zijn verkocht en worden uitgedrukt in versgewicht. De werkelijke hoeveelheid geoogste aardappels kan daardoor enigszins groter zijn dan de hoeveelheid geregistreerde opbrengst in BIN. Voor de vergelijking tussen de gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengst moeten we ook nog een conversie maken op basis van het drogestofgehalte van het gewas. De vergelijking wordt hierdoor minder zuiver omdat het drogestofgehalte niet alleen afhankelijk is van gewastype en gewasvariëteit, maar ook van het oogstmoment en de meteorologische condities. Het drogestofgehalte van aardappel varieert bijvoorbeeld ongeveer tussen de 20% en 25% tijdens het

oogstmoment, waarbij het drogestofgehalte vooral afhankelijk is van de aardappelvariëteit. Daarnaast kan een deel van de aardappelopbrengst verloren gaan vanwege een te slechte kwaliteit of een te kleine sortering. Bij de modelsimulaties houden we bijvoorbeeld geen rekening met suboptimale bedrijfsvoering gedurende het groeiseizoen (aanwending van meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen) die kunnen leiden tot opbrengstderving. Door het hanteren van verschillende definities voor de gewasopbrengst kunnen er verschillen ontstaan tussen de gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengst die kunnen resulteren in een systematische afwijking. De gerealiseerde gewasopbrengst komt na conversie van het drogestofgehalte uit op een gemiddelde van iets meer dan  $10.000 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ ha}^{-1}$ . Dat lijkt een onderschatting in vergelijking met de dataset van regionaal geobserveerde aardappelopbrengsten, weergegeven in Figuur 4.8.

Een overzicht van de samenhang tussen gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengsten voor alle gewassen is weergegeven in Figuur 4.11. Voor elke combinatie van grondsoort en grondwatertrapklasse is de correlatiecoëfficiënt weergegeven. Daarnaast is op de achtergrond met een 'vioolplot' de verdeling van de correlatiecoëfficiënt weergegeven, gewogen naar het aantal observaties (de plot wordt breder naarmate het aantal observaties toeneemt). Op basis van dit overzicht kunnen we concluderen dat voor de gewassen consumptieaardappel, zetmeelaardappel, suikerbieten en zaaiui sprake is van een samenhang tussen de gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengst. De correlatiecoëfficiënt ligt bij deze gewassen veelal boven de streefwaarde van 0.3. Dit geldt zeker voor combinaties van grondsoort en grondwatertrapklassen met relatief veel observaties. Hetzelfde geldt min of meer voor het gewas zomergerst, al is de samenhang tussen de gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengst hier iets minder goed.



**Figuur 4.11** Pearson-correlatiecoëfficiënt tussen gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengst; de grondsoort wordt met verschillende kleuren weergegeven en de grondwatertrapklasse met verschillende symbolen; op de achtergrond is in het grijs met een 'vioolplot' de verdeling van de correlatiecoëfficiënt weergegeven, gewogen naar het aantal observaties; de observaties voor gras en snijmais zijn deels gebaseerd op modelberekeningen en schattingen en daarom minder betrouwbaar.

Voor de gewassen gras, snijmais, wintertarwe en pootaardappel presteert WWL minder goed in vergelijking tot de BIN opbrengsten. Voor pootaardappel mag dit wellicht worden verwacht. In de praktijk is het bij pootaardappelen niet zozeer het doel om zoveel mogelijk biomassa te genereren, maar wordt gestreefd naar een zo groot mogelijke opbrengst in euro's door de juiste sortering te produceren. Bij WWL houden we hier geen rekening mee. Voor het gewas wintertarwe is het onduidelijk waarom er geen sprake is van een samenhang tussen de gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengst. Mogelijk dat de simulatie van de winterperiode (vernalisation) niet goed gaat, nader onderzoek moet dat uitwijzen.

De samenhang voor gras en snijmais laat veel variatie zien tussen de verschillende combinaties van grondsoort en grondwatertrapklassen. Een verklaring hiervoor is dat de vergelijking tussen de BIN en WWL voor gras en snijmais een vergelijking betreft tussen twee modellen. De 'gerealiseerde' grasopbrengst van een bedrijf wordt in de praktijk namelijk niet gemeten. Gras is voor een bedrijf een intern product; het wordt er geproduceerd en verbruikt. De (netto) grasopbrengst wordt daarom berekend door die als sluitpost van een voederbalans te beschouwen (Aarts e.a., 2008). De rekenmethode begint met het vaststellen van de energiebehoefte van de melkveestapel op basis van de gerealiseerde melkproductie en groei. In het BIN worden alle transacties en voorraadmutaties met voedermiddelen geregistreerd. Dit brengt eerst in beeld welk deel van de energiebehoefte door aangekocht voer wordt gedekt. Vervolgens bepalen metingen en

gehalten van de kuilvoorraden (voor zover beschikbaar) de energieopname uit zelfgeproduceerde snijmais en andere voedergewassen (anders dan grasland). De snijmaisopbrengst wordt dan bepaald door de conserveringsverliezen op te tellen bij de aangelegde hoeveelheid snijmais. Als er geen betrouwbare kuilmetingen beschikbaar zijn, wordt voor de zelfgeproduceerde snijmais en andere voedergewassen teruggevallen op een schatting van de verse opbrengsten van de ondernemer en/of zijn adviseur. Vervolgens wordt ervan uitgegaan dat in de overgebleven energiebehoefte is voorzien door zelfgeproduceerd gras. Via het in het BIN geregistreerde aantal beweidingdagen wordt een verdeling afgeleid tussen energieopname uit vers gras en uit geconserveerd gras. Deze procedure brengt in beeld hoeveel Voeder Eenheid Melk (VEM) door de veestapel is opgenomen uit zelfgeproduceerd voer. De gerealiseerde grasopbrengst is daarmee dus een sluitpost. Dat houdt in dat een fout bij de schatting van de maïsopbrengst sterker doorwerkt in de grasopbrengst naarmate het bedrijf meer maïs teelt. Daarnaast speelt mee dat de variatie in drogestofgehalte bij grasland zeer groot is. Er worden waarden waargenomen tussen circa 10% en 35% afhankelijk van de groeiomstandigheden (Jagtenberg, 1962). Bij de gesimuleerde grasopbrengsten wordt geen rekening gehouden met conserverings- en vervoeringsverliezen die op kunnen lopen tot bijna 15% afhankelijk van de bedrijfsvoering (Buijs e.a., 2024).

Over het algemeen lijkt niet direct een duidelijk verband zichtbaar tussen modelprestaties en de Gt-klasse (zie Figuur 4.11 **Error! Reference source not found.**). Wel lijkt WWL op zand- en kleigrond iets beter te presteren dan op de overige grondsoorten. Dit zien we terug wanneer we de mediane correlatiecoëfficiënt per grondsoort beschouwen gewogen naar aantal observaties (Tabel 8). Wanneer we kijken naar de mediane correlatiecoëfficiënt over alle grondsoorten, dan zien we dat de streefwaarde van 0.3 wordt gehaald door snijmais, aardappel (consumptie en zetmeel), suikerbiet en zaaiui. Voor gras en zomergerst wordt de streefwaarde net niet gehaald.

**Tabel 8** Mediane waarde van de correlatiecoëfficiënt tussen gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengst gewogen naar aantal observaties uitgesplitst naar gewas en bodemtype.

Gewas	Grondsoort					
	Alle grondsoorten	Veen	Moerig	Zand	Klei	Leem
Gras	0.26	0.00	-0.30	0.19	0.38	0.39
Snijmais	0.69	-0.06	0.01	0.69	0.40	0.69
Wintertarwe	-0.26			0.31	-0.26	-0.30
Zomergerst	0.25		-0.05	0.33	0.20	0.21
Aardappel (c)	0.78			0.65	0.81	0.46
Aardappel (z)	0.70		0.46	0.75		
Aardappel (p)	0.02			0.63	0.00	
Suikerbiet	0.43		0.20	0.43	0.43	0.52
Zaaiui	0.37				0.37	

#### 4.2.3 Regressieanalyse met behulp van een Linear Mixed Model

In de vorige paragrafen werden verschillen in definities en aannames tussen de gesimuleerde opbrengsten van WWL en de gerealiseerde opbrengsten van BIN benoemd. Voor een aantal van deze verschillen kan worden "gecorrigeerd" met econometrische methoden. Met behulp van een zogenoemd Linear Mixed Model wordt een relatie geschat tussen de door de WWL gesimuleerde opbrengsten en de daadwerkelijk gerealiseerde opbrengsten uit het BIN. Deze methode is gekozen omdat de gegevens een duidelijke groepsstructuur hebben. Percelen zijn gegroepeerd naar grondsoort en grondwatertrapklassen, omdat we niet willen veronderstellen dat de relatie tussen de gesimuleerde en gerealiseerde gewasopbrengsten voor al deze groepen identiek is.

Door de gesimuleerde gewasopbrengst te gebruiken als verklarende variabele voor de gerealiseerde opbrengst in het BIN wordt de samenhang geschat tussen simulatie en praktijk. De coëfficiënt van de gesimuleerde gewasopbrengst geeft de gemiddelde (lineaire) samenhang weer tussen de gesimuleerde en de gerealiseerde gewasopbrengst.

Bedrijven komen in meerdere jaren voor in de database, waardoor waarnemingen binnen hetzelfde bedrijf niet volledig onafhankelijk hoeven te zijn. Toch is ervoor gekozen om het bedrijf niet als extra groepsniveau in het model op te nemen. De reden is dat de analyse primair bedoeld is als validatie: de coëfficiënt bij de gesimuleerde gewasopbrengst moet weergeven in hoeverre deze samenhangt met de gerealiseerde opbrengst in het BIN, gebruikmakend van variatie tussen verschillende grondsoorten en grondwatertrappenklassen. De uitgebreide beschrijving van de gebruikte methodiek en de resultaten is te vinden in Kisters et al. (in prep.).

Er is bij deze analyse uiteindelijk uitgegaan van twee regressiemodellen. De kern van het eerste regressiemodel is eenvoudig. De gerealiseerde opbrengst uit het BIN wordt verklaard door de door WWL gesimuleerde actuele opbrengst (in vereenvoudigde vorm als volgt weer te geven):

$$Y_{BIN} = \beta_0 + \beta_1 Y_{WWL} + \varepsilon$$

### **Vergelijking 4-3**

Hierbij staat  $Y_{BIN}$  en  $Y_{WWL}$  voor respectievelijk de gerealiseerde en de met WWL gesimuleerde gewasopbrengst ( $\text{kg}_{\text{ds}} \text{ha}^{-1}$ ). De parameter  $\beta_0$  geeft voor een eenvoudig regressiemodel, geschat met het Linear Mixed Model, inzicht in de systematische afwijking tussen de gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengst. De parameter  $\beta_1$  geeft aan hoe sterk beide met elkaar samenhangen. De geschatte  $\beta_1$  weerspiegelt de relatie binnen groepen, niet alleen tussen groepen. Indien het model perfect zou voorspellen, zou  $\beta_0$  gelijk zijn aan 0 en  $\beta_1$  gelijk zijn aan 1. Dat zou betekenen dat een stijging van  $1 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ha}^{-1}$  in de gesimuleerde gewasopbrengst exact overeenkomt met een stijging van  $1 \text{ kg}_{\text{ds}} \text{ha}^{-1}$  in de gerealiseerde gewasopbrengst. De foutterm  $\varepsilon$  vangt alle overige niet-gemodelleerde invloeden op. Hier gaat het om invloeden die niet door WWL gesimuleerd worden, maar wel de daadwerkelijke opbrengst beïnvloeden. Daarnaast speelt mee dat de modelaansturing op basis van landelijke schematisatie (denk aan meteorologische condities, bodemfysische eigenschappen, gewassenmerken en de grondwaterspiegeldiepte) gepaard gaat met onzekerheid.

Het tweede regressiemodel is vergelijkbaar met het eerste regressiemodel, maar dan uitgebreid met controlevariabelen. Naast de gesimuleerde opbrengst worden ook het perceeloppervlak en de stikstofgift per hectare opgenomen. Het idee hierachter is dat daadwerkelijke opbrengsten immers niet alleen door bodemhydrologische condities worden bepaald (die door WWL gesimuleerd worden). Bedrijfsmanagement (lees: bemesting) en schaalgrootte kunnen invloed hebben op de gerealiseerde gewasopbrengst. Door deze variabelen toe te voegen, wordt nagegaan of het verband tussen WWL en BIN stand houdt wanneer voor deze factoren wordt gecorrigeerd.

Het eerste model kijkt alleen naar de directe samenhang tussen de gesimuleerde en gerealiseerde gewasopbrengst. De vraag is simpel: als WWL voor een perceel een hogere gewasopbrengst simuleert, zien we dan in de praktijk gemiddeld ook een hogere gewasopbrengst? Het model beschrijft dus een algemene correlatie tussen beide grootheden over alle percelen en jaren heen. Alle andere factoren die de gerealiseerde gewasopbrengst beïnvloeden, zoals management, bemesting, schaal of jaaromstandigheden, zitten impliciet in de foutterm. Intuïtief vergelijkt dit model alle waarnemingen rechtstreeks met elkaar. Hierdoor kan de relatie tussen simulatie en realisatie over- of onderschat worden.

Het tweede model voegt extra variabelen toe, zoals perceeloppervlak en stikstofgift. De vraag wordt dan: als we percelen vergelijken die vergelijkbaar zijn qua bedrijfskenmerken en omstandigheden, voorspelt een hogere gesimuleerde opbrengst dan nog steeds een hogere gerealiseerde opbrengst? Met andere woorden, het model kijkt naar de samenhang tussen simulatie en realisatie nadat een deel van de systematische verschillen tussen bedrijven statistisch is meegenomen. Deze effecten zitten namelijk niet in de gesimuleerde opbrengsten, maar wel in de gerealiseerde opbrengsten. Het eerste model laat dus zien of er in het algemeen een samenhang is tussen simulatie en praktijk, terwijl het uitgebreidere model laat zien of die samenhang overeind blijft wanneer variatie door management of schaal (wat niet gemodelleerd wordt) gedeeltelijk wordt gecorrigeerd.

De resultaten van het eerste en tweede regressiemodel zijn weergegeven in Tabel 9. De kolommen LHM en WDM verwijzen naar twee hydrologische randvoorwaarden die zijn gehanteerd bij de gesimuleerde gewasopbrengsten. Per gewas wordt aangegeven of de coëfficiënt van de gesimuleerde opbrengst positief of negatief is en of deze statistisch significant is. Een positief en significant effect betekent dat hogere gesimuleerde opbrengsten samenhangen met hogere gerealiseerde opbrengsten, wat een minimale voorwaarde is voor modelvalidatie. De gerapporteerde significanties zijn gebaseerd op tweezijdige toetsen. Een negatief of niet-significant resultaat wijst erop dat het model de praktijk minder goed volgt.

**Tabel 9** Teken en significantie van de gesimuleerde gewasopbrengst in de twee regressiemodellen. De mate van significantie wordt aangegeven met het aantal sterren.

Gewas	Model 1				Model 2			
	LHM		WDM		LHM		WDM	
	$\beta_1$	Significant	$\beta_1$	Significant	$\beta_1$	Significant	$\beta_1$	Significant
Gras	0.03		-0.03		0.05		0.01	
Snijmais	0.12	***	0.12	***	0.13	***	0.13	
Wintertarwe	-0.06		-0.06		-0.05	**	-0.06	
Zomergerst	0.18	***	0.14	***	0.19	***	0.13	***
Aardappel (c)	0.11		0.11	***	0.11		0.11	***
Aardappel (z)	0.18	***	0.19	***	0.18	***	0.19	***
Aardappel (p)	0.05		-0.02		0.04	***	0.00	
Suikerbiet	0.23		0.16		0.23		0.16	
Zaaiui								

\*  $p < 0.1$ ; \*\*  $p < 0.05$ ; \*\*\*  $p < 0.01$

Voor zaaiui kon de analyse met Linear Mixed Model niet worden uitgevoerd omdat er één enkele groep overblijft na groepering van de observaties. Voor snijmais, zomergerst en zetmeelaardappelen is de coëfficiënt in beide modellen en in beide varianten positief en statistisch significant. Dat betekent dat het model voor deze gewassen consistent een positief verband laat zien tussen gesimuleerde en gerealiseerde gewasopbrengsten. Ook voor sommige specificaties van pootaardappelen is sprake van een significant positief verband. Bij consumptieaardappelen zijn de coëfficiënten positief. In de LHM-variant zijn deze echter niet significant in beide modellen, terwijl ze in de WDM-variant in zowel Model 1 als Model 2 wel significant zijn. Dat betekent dat het gevonden verband tussen gesimuleerde en gerealiseerde opbrengst voor dit gewas afhankelijk is van de gekozen modelvariant en daarmee niet in alle specificaties robuust is. Voor suikerbieten zijn de coëfficiënten eveneens positief, maar in geen van de modellen statistisch significant. Dit wijst erop dat er voor dit gewas geen statistisch onderbouwd verband wordt gevonden tussen simulatie en praktijk. Voor gras zijn de coëfficiënten klein en niet significant. Maar zoals in paragraaf 4.2.2 is aangegeven, betreft dit een vergelijking tussen twee modeluitkomsten in plaats van een vergelijking met daadwerkelijk gerealiseerde grasopbrengsten. Ook bij deze analyse zien we dat WWL voor het gewas wintertarwe minder goed presteert.

Het verschil tussen Model 1 en Model 2 laat zien of het verband verandert wanneer rekening wordt gehouden met extra factoren, waarvan verwacht wordt dat ze wel de BIN-realisatie beïnvloeden, maar niet de WWL-simulatie (waardoor ze de relatie kunnen over- of onderschatten). Voor de meeste gewassen blijven richting en grootte van de coëfficiënt vergelijkbaar. Wel valt op dat de coëfficiënten relatief laag zijn.

Bij het eenvoudige regressiemodel (Model 1) gaat dit gepaard met een relatief grote systematische afwijking ( $\beta_0$ ) die we ook bijvoorbeeld terugzien in Figuur 4.10. De lage waarden van de regressiecoëfficiënten wijzen erop dat variatie in de door WWL gesimuleerde gewasopbrengsten beperkt samenhangt met variatie in de gerealiseerde gewasopbrengsten. Een mogelijke verklaring is dat de gerealiseerde gewasopbrengsten en de gesimuleerde gewasopbrengsten op basis van verschillende definities worden bepaald. Dit kan leiden tot een systematische afwijking in het niveau van de opbrengsten ( $\beta_0$ ), maar verklaart niet volledig waarom de variatie in de gesimuleerde gewasopbrengsten slechts beperkt samenhangt met de variatie in de gerealiseerde gewasopbrengsten.

Tenslotte kan de gekozen groepering van observaties naar combinaties van grondsoort en grondwatertrapklasse heterogeniteit tussen percelen binnen dezelfde groep maskeren, wat de interpretatie van de relatie tussen simulatie en realisatie kan bemoeilijken. In hoeverre deze factoren de gevonden regressieresultaten beïnvloeden, is op basis van de huidige analyse echter niet eenduidig vast te stellen.

Samengevat wijzen de relatief lage waarden van de regressiecoëfficiënten erop dat variatie in de door WWL gesimuleerde gewasopbrengsten soms in beperkte mate samenhangt met variatie in de gerealiseerde gewasopbrengsten uit het BIN. Hiervoor zijn meerdere verklaringen mogelijk. Ten eerste worden gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengsten op basis van verschillende definities bepaald. De gesimuleerde gewasopbrengsten worden uitgedrukt in kilogram droge stof per hectare, terwijl de BIN-gegevens betrekking hebben op verkochte gewasopbrengsten in versgewicht. De noodzakelijke conversie naar droge stof en het feit dat een deel van de oogst kan uitvallen door kwaliteitsverlies of sortering (wat niet wordt gemodelleerd) kunnen leiden tot een systematisch verschil in het niveau van de gewasopbrengsten. Daarnaast worden in de WWL-modelsimulaties verschillende factoren die de feitelijke opbrengst beïnvloeden niet expliciet meegenomen, zoals verschillen in bedrijfsmanagement (o.a. bemesting), ziekten en plagen, zoutstress of andere perceel specifieke omstandigheden. Het is soms maar beperkt mogelijk om hiervoor te controleren. Ook onzekerheden in de modelaansturing, bijvoorbeeld door het gebruik van databronnen met een eigen onzekerheid, kunnen leiden tot verschillen in simulatie en praktijk. Verder kan variatie tussen percelen binnen hetzelfde bedrijf een rol spelen, bijvoorbeeld door verschillen in perceel condities zoals bodem- en hydrologische omstandigheden. Tot slot kan de gekozen

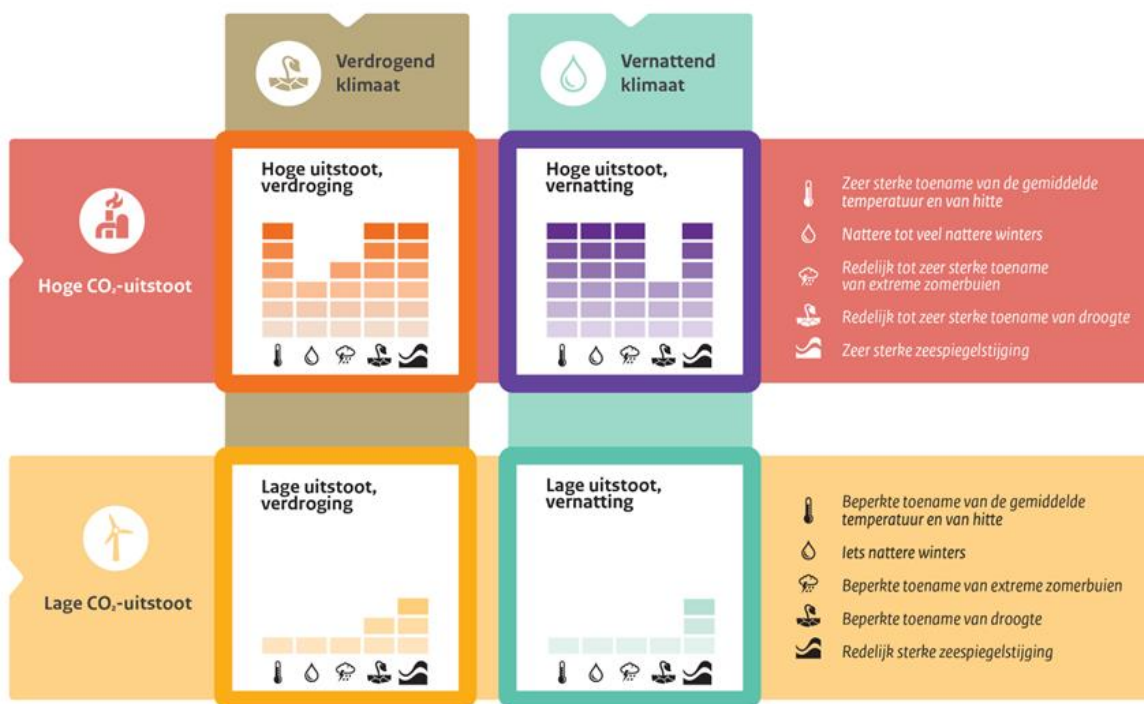
groepering van observaties naar combinaties van grondsoort en grondwatertrapklasse heterogeniteit tussen percelen binnen dezelfde groep maskeren, waardoor de interpretatie van de relatie tussen simulatie en realisatie complexer wordt. In hoeverre deze factoren afzonderlijk bijdragen aan de gevonden regressieresultaten, kan op basis van de huidige analyse niet eenduidig worden vastgesteld.

# 5 Effect van klimaatverandering

Dit hoofdstuk bevat een beknopte analyse van het effect van klimaatverandering. Eerst analyseren we de verandering in wateraanbod (neerslag), vervolgens gaan we in op de verandering van de potentiële gewasopbrengst en daarna beschrijven we de verandering in de watervraag van het gewas (behorende bij een optimale gewasontwikkeling). De watervraag van het gewas is mede afhankelijk van de gewasstatus en daarmee van de gewasontwikkeling in de tijd. De gewasontwikkeling zelf is ook weer afhankelijk van de meteorologische condities, namelijk van de straling, luchttemperatuur en CO<sub>2</sub>-concentratie. De getoonde resultaten hebben betrekking op grasland. De meteorologische gegevens zijn afkomstig van het weerstation De Bilt. Bij het bepalen van de gewasopbrengst en watervraag gaan we uit van optimale bodemhydrologische condities, dus geen watertekorten of wateroverlast. Voordat we overgaan op de resultaten volgt als eerste een korte inleiding over de toegepaste klimaatscenario's, beschikbaar gesteld door het KNMI.

## 5.1 Scenario's klimaatverandering

Het KNMI doet voorspellingen hoe de meteorologische condities veranderen in de toekomst. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in lage (L) en hoge (H) uitstoot van broeikasgassen en onderscheid gemaakt in een vernattend (n) of verdrogend (d) klimaat (zie Figuur 5.1).

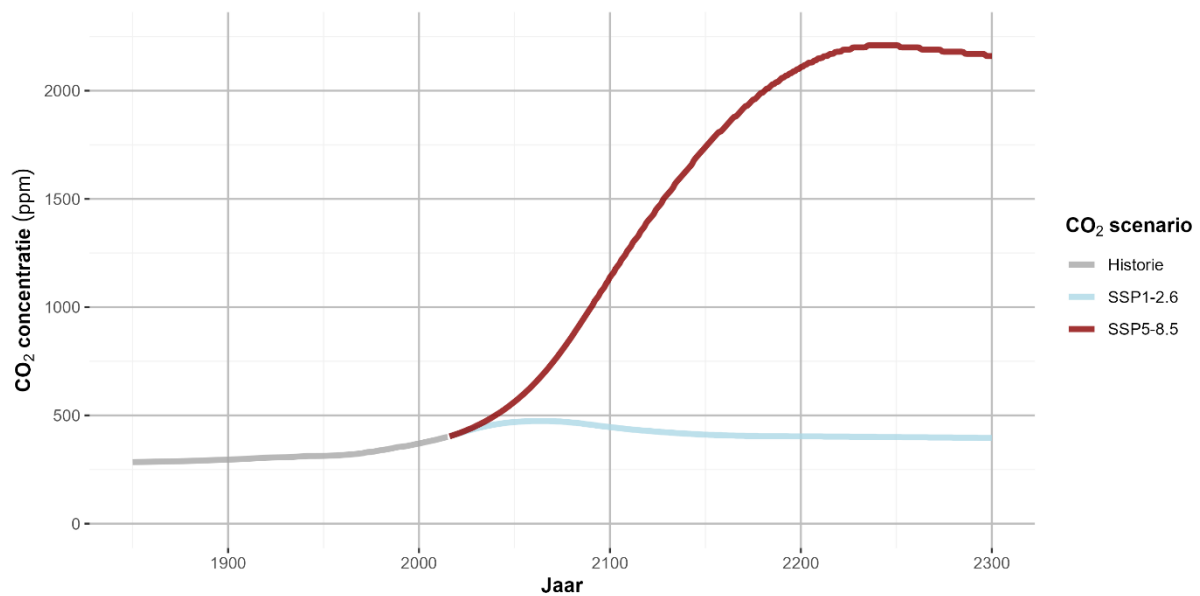


**Figuur 5.1** Vier scenario's voor klimaatverandering in Nederland rond 2100 (KNMI, 2023).

De lage en hoge uitstootscenario's van broeikasgassen zijn gebaseerd op combinaties van sociaal-economische ontwikkelingen en klimaatbeleid (Shared Socio-economic Pathways, SSP's; IPCC, 2021). Het lage uitstootscenario, conform het Klimaatakkoord van Parijs, is gebaseerd op SSP1-2.6 en leidt tot circa 1,7 °C mondiale opwarming rond zowel 2050 als 2100. Voor het hoge uitstootscenario is het SSP-scenario genomen met de hoogste uitstoot (SSP5-8.5) waarbij de mondiale opwarming 2,4 en 4,9 °C is rond respectievelijk 2050 en 2100 (KNMI, 2023). De verandering in CO<sub>2</sub>-concentratie volgens scenario's SSP1-2.6 en SSP5-5.8 zijn weergegeven in Figuur 5.2.

Bij de toekomstvoorspellingen van het KNMI worden historische meteorologische condities (1991 – 2020) naar de toekomst geprojecteerd. Het KNMI heeft voor zichtjaren 2050, 2100 en 2150 projecties beschikbaar

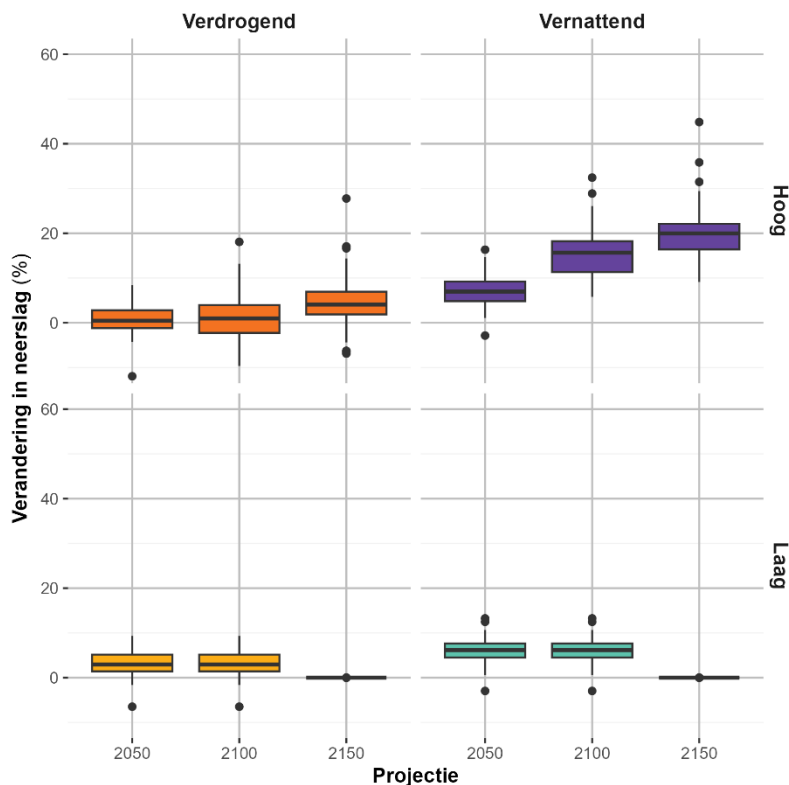
gesteld. Bij het lage uitstootscenario wordt ervan uitgegaan dat de opwarming min of meer stabiliseert na 2050. De meteorologische condities voor projecties 2050 en 2100 zijn daarom niet aan verandering onderhevig.



**Figuur 5.2** Verandering in CO<sub>2</sub>-concentratie volgens scenario SSP1-2.6 (lage uitstoot) en SSP5-8.5 (hoge uitstoot).

## 5.2 Effect op neerslaghoeveelheden

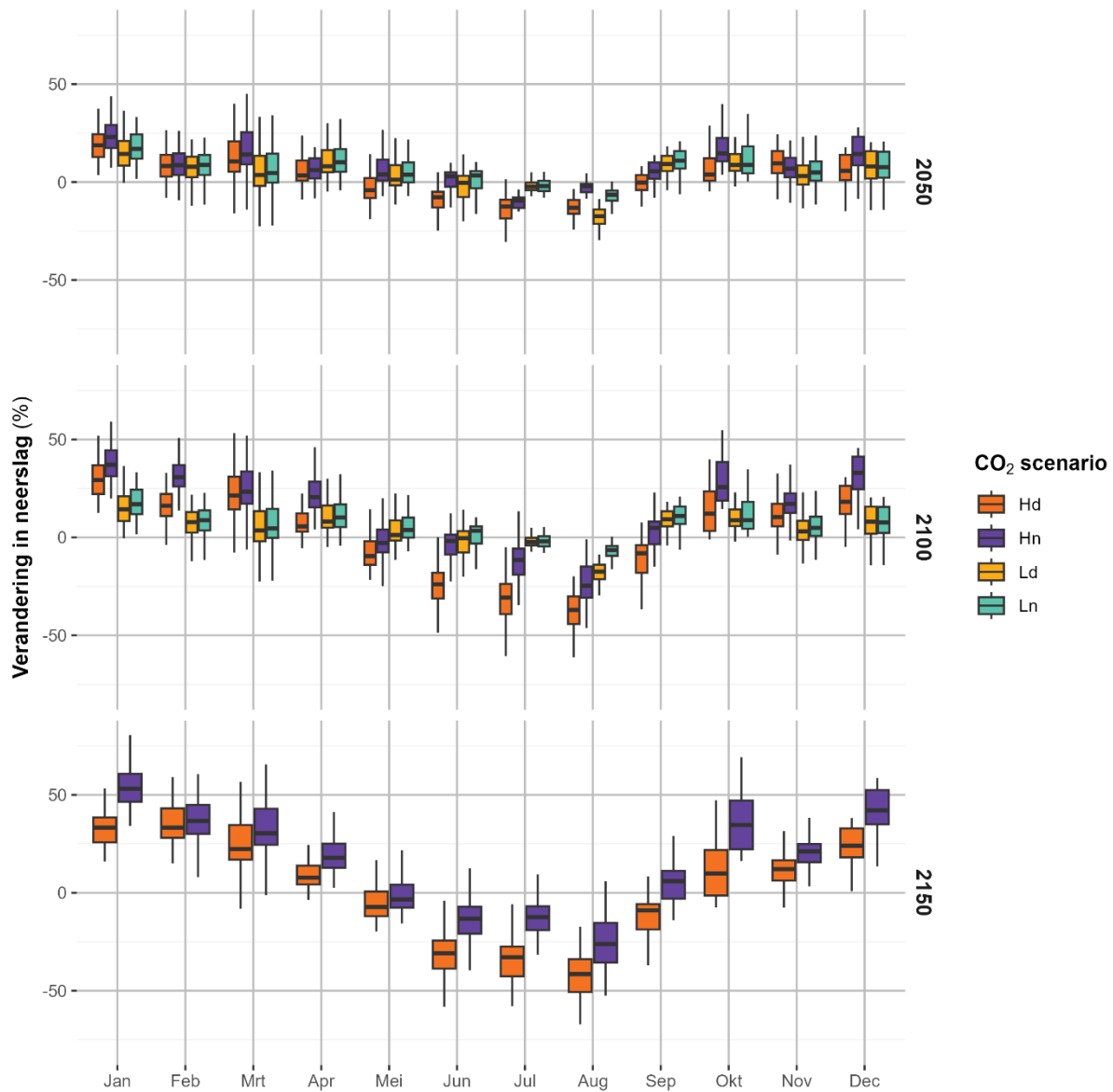
Voor het lage en hoge uitstootscenario zijn telkens twee varianten beschikbaar gesteld: één met veel verdroging in de zomer (Ld en Hd), en één met een sterke neerslagtoename in de winter (Ln en Hn). In de droge scenario's blijkt eveneens sprake van een afname van de jaarneerslag. In Figuur 5.3 is de verandering van jaarlijkse neerslag gedurende het groeiseizoen van gras (maart/april tot november) ten opzichte van het huidige klimaat weergegeven.



**Figuur 5.3** Spreiding weergegeven als boxplot met verandering in neerslag per jaar (%) gedurende het groeiseizoen van gras als gevolg van klimaatverandering (projectie van jaren 1991-2020 voor weerstation De Bilt).

Over het algemeen is een toename van de neerslag en daarmee wateraanbod te zien in de verschillende klimaatscenario's. Voor projectie 2050 is de gemiddelde toename circa 1 tot 3% voor scenario Ld en Hd en voor scenario's Ln en Hn is dit respectievelijk 6 en 7%. Bij de hoge uitstootscenario's neemt de neerslag verder toe voor projecties 2100 en 2150. Voor projectie 2100 is de gemiddelde toename voor Hd en Hn respectievelijk 2 en 16% en voor projectie 2150 respectievelijk 5 en 20%.

Hoewel gemiddeld de jaarlijkse neerslag toeneemt, komen in de droge scenario's ook jaren voor met een afname van de jaarlijkse neerslag. Opgemerkt wordt dat de spreiding van de neerslag gedurende het jaar een grote rol speelt en de hierboven gepresenteerde verandering in neerslag betrekking heeft op een relatief lang groeiseizoen (maart/april tot november). De maandelijkse verandering van de hoeveelheid neerslag is weergegeven in Figuur 5.4 waarbij opvalt dat met name de zomermaanden juli en augustus droger worden ten opzichte van de historische periode. Daarnaast moet ook opgemerkt worden dat bij hoge neerslagintensiteiten een groot deel van de neerslag versneld tot afvoer zal komen en daarmee niet beschikbaar zal zijn als wateraanbod voor het gewas.

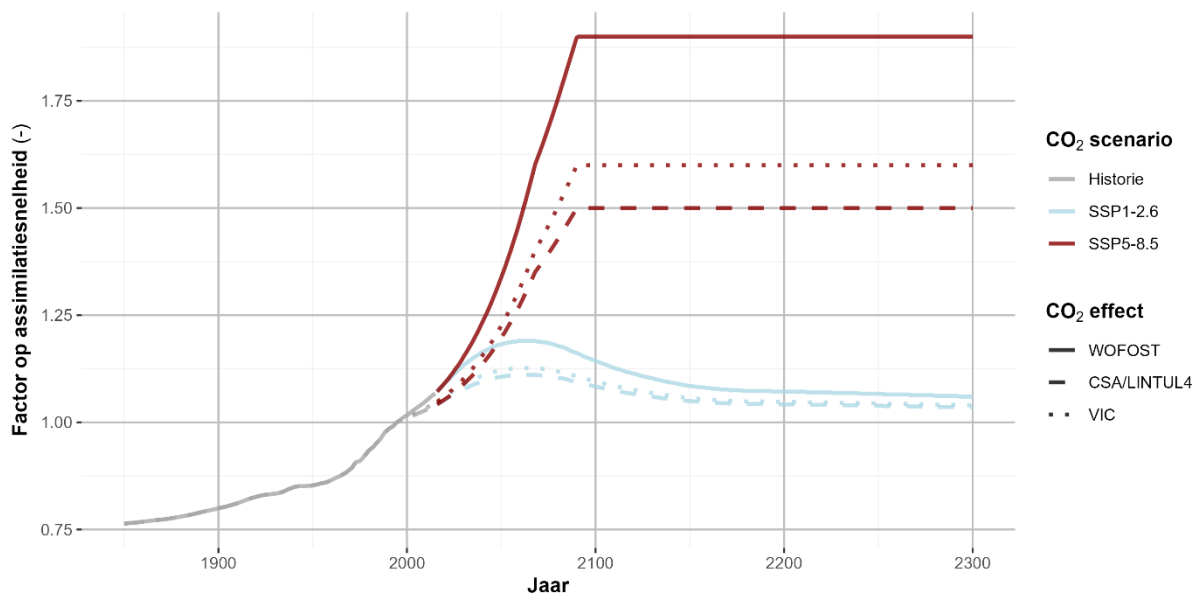


**Figuur 5.4** Spreiding weergegeven als boxplot met verandering van de maandelijkse neerslag voor verschillende projecties (%) als gevolg van klimaatverandering (projectie van jaren 1991-2020 voor weerstation De Bilt; uitschieters zijn niet weergegeven).

### 5.3 Effect op de potentiële gewasopbrengst

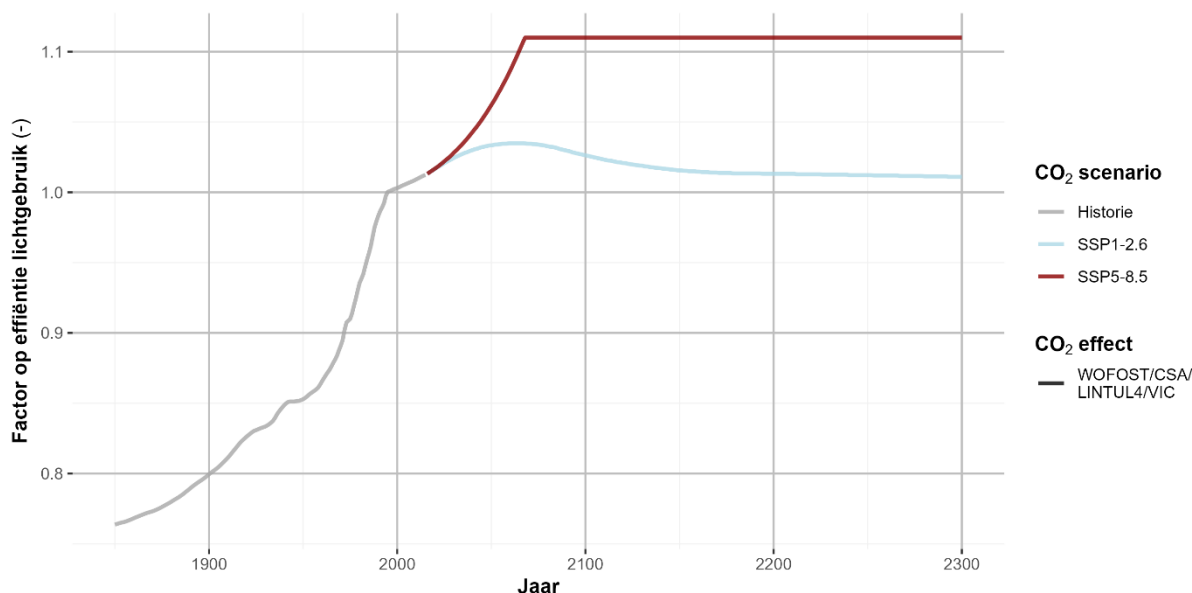
De verandering van meteorologische condities kan zowel een negatief als positief effect hebben op de potentiële gewasopbrengst. Een verhoging van de temperatuur zal ervoor zorgen dat de gewasontwikkeling sneller verloopt, maar of dit ook leidt tot een verhoging van de potentiële gewasopbrengst is afhankelijk van het type gewas. Voor gewassen die afrijpen, denk bijvoorbeeld aan snijmais dat aan het einde van het groeiseizoen afsterft, blijft er minder tijd over voor de vorming van biomassa. Bij suikerbiet kan een temperatuursverhoging voor meer gewasopbrengst zorgen doordat gedurende een langere periode biomassa wordt opgeslagen in de biet. Een te hoge temperatuursverhoging leidt echter weer tot verstoring van het fotosyntheseproces waardoor de gewasopbrengst weer lager uit zal vallen. Als gevolg van temperatuursverhoging is mogelijk het groeiseizoen langer: de start van het groeiseizoen kan in geval van akkerbouw mogelijk worden vervroegd en grasgroei zal eerder beginnen in het voorjaar.

Een verhoging van de CO<sub>2</sub>-concentratie zal bij C3-gewassen (zoals grasland, wintertarwe, zomergerst, aardappel en suikerbiet) leiden tot een verhoging van de assimilatiesnelheid en een verhoging van de efficiëntie van het lichtgebruik. Bij C4-gewassen (zoals maïs) heeft een verhoging van de CO<sub>2</sub>-concentratie geen effect. In welke mate de verhoging van de CO<sub>2</sub>-concentratie doorwerkt op de assimilatiesnelheid bestaat enige onzekerheid. Recente studies (CSA, LINTUL4 en VIC-WOFOST) tonen aan dat de standaardwaarden gehanteerd door het gewasgroeimodel WOFOST mogelijk te hoog zijn ingeschat (Wolf et al., 2010), zie Figuur 5.5.



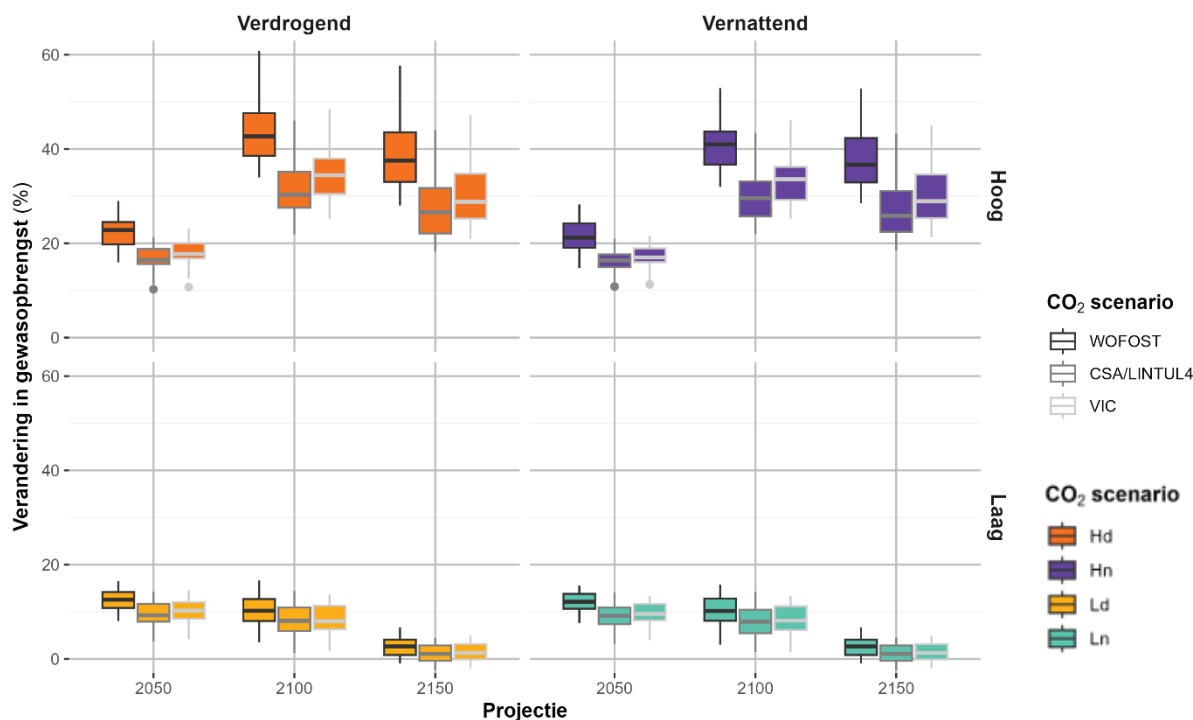
**Figuur 5.5** Effect van verandering CO<sub>2</sub>-concentratie op assimilatiesnelheid van C3-gewassen op basis van verschillende studies.

Efficiëntie van lichtgebruik neemt bij C3-gewassen toe tot 11% bij een CO<sub>2</sub>-concentratie van 720 ppm, zie Figuur 5.6.



**Figuur 5.6** Effect van verandering CO<sub>2</sub>-concentratie op efficiëntie lichtgebruik van C3-gewassen op basis van verschillende studies.

Op basis van verandering in de hoeveelheid straling, temperatuur en CO<sub>2</sub>-concentratie kan een nieuwe inschatting worden gemaakt van de potentiële gewasopbrengst. In Figuur 5.7 is de verandering van de potentiële gewasopbrengst voor grasland weergegeven voor de verschillende klimaatscenario's ten opzichte van de historische condities.

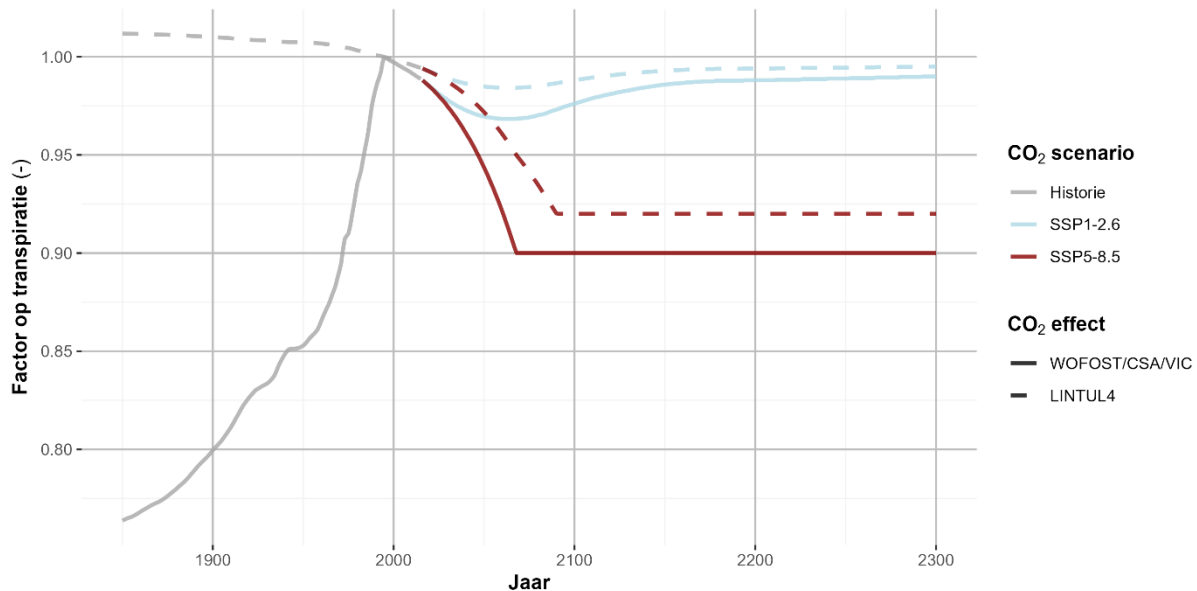


**Figuur 5.7** Spreiding weergegeven als boxplot met verandering van potentiële grasopbrengst per jaar als gevolg van klimaatverandering voor verschillende CO<sub>2</sub>-scenario's.

Bij alle klimaatscenario's zien we voor grasland een toename van de gemiddelde potentiële gewasopbrengst. De toename van de gemiddelde potentiële gewasopbrengst over de periode 1991 – 2020 is het hoogst bij de hoge uitstootscenario's en kan oplopen tot een toename van 32 - 43% bij projectie 2100 en 27 – 39% bij projectie 2150. De afname van de potentiële gewasopbrengst in projectie 2150 wordt veroorzaakt door te hoge temperaturen. Bij grasgroei stagneert de assimilatiesnelheid bij circa 15 °C en is er een afname van de assimilatiesnelheid vanaf ongeveer 25 °C door verstoring van het fotosyntheseproces. Bij de lage uitstootscenario's is er sprake van een gemiddelde toename van 8 – 12%.

## 5.4 Effect op de watervraag van het gewas

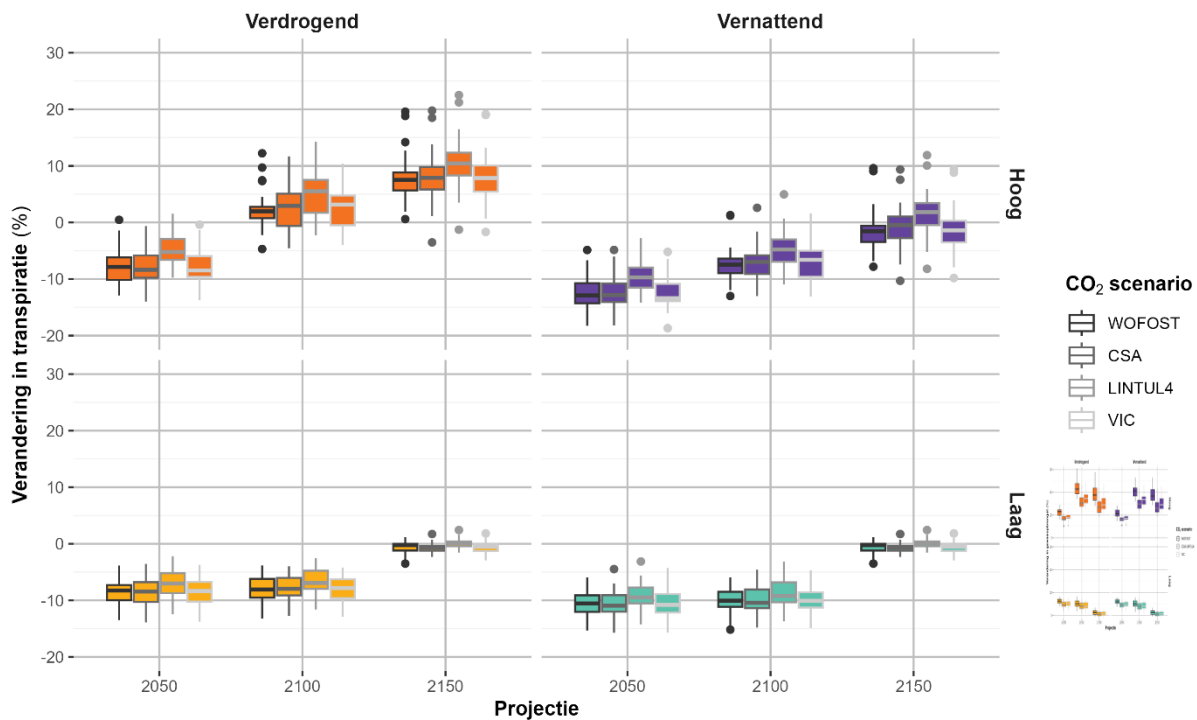
Verhoging van de CO<sub>2</sub>-concentratie heeft een gunstig effect op de watervraag van planten. Planten nemen CO<sub>2</sub> op via de huidmondjes voor fotosynthese. Bij verhoogde CO<sub>2</sub>-concentraties hoeven de huidmondjes minder wijd open te staan om voldoende CO<sub>2</sub> binnen te krijgen. Doordat de huidmondjes minder ver open staan zal er ook minder transpiratie optreden. In Figuur 5.8 is het effect van een verhoogde CO<sub>2</sub>-concentratie te zien op de potentiële transpiratie van C3-gewassen volgens verschillende studies. Bij C4-gewassen is de reductie nog sterker tot maximum reductie van 0.74 bij een CO<sub>2</sub>-concentratie van 720 ppm (niet weergegeven).



**Figuur 5.8** Effect van verandering CO<sub>2</sub>-concentratie op de potentiële transpiratie van C3-gewassen op basis van verschillende studies.

Daarmee lijkt een verhoogde CO<sub>2</sub>-concentratie een positief effect te hebben op de totale watervraag van het gewas. Maar over de vraag of de huidmondjes in werkelijkheid ook zo eenduidig reageren op verhoogde CO<sub>2</sub>-concentraties bestaat nog wel enige onzekerheid. Het open en dichtgaan van de huidmondjes heeft naast regulering van gasuitwisseling en waterregulatie (sluiten van de huidmondjes in geval van watertekort) ook een thermo regulerende functie (afkoeling van het blad door transpiratie). Het is daarmee de vraag of de huidmondjes daadwerkelijk minder breed openstaan wanneer een verhoogde CO<sub>2</sub>-concentratie gepaard gaat met een verhoogde luchttemperatuur.

Verhoging van de luchttemperatuur zal samen met een verhoging van de straling leiden tot een verhoging van de atmosferische watervraag en ook tot verandering in gewasontwikkeling waardoor de totale watervraag van het gewas toch kan stijgen, zie Figuur 5.9 waarin de verandering van watervraag voor grasland is weergegeven.



**Figuur 5.9** Spreiding weergegeven als boxplot met verandering van de watervraag van grasland per jaar (%) als gevolg van klimaatverandering voor verschillende CO<sub>2</sub>-scenario's.

Voor het lage uitstootscenario neemt de gemiddelde watervraag van het gewas af met 7 tot 11% (2050 en 2100). Ook bij het hoge uitstootscenario neemt de gemiddelde watervraag voor projectie 2050 af met 5 tot 8% voor scenario Hd en 9 tot 12 % voor scenario Hn. Voor projectie 2100 zien we de watervraag stijgen ten opzichte van projectie 2050 waarbij de watervraag voor scenario Hd hoger is dan de watervraag bepaald op basis van historische condities. Deze trend zet zich voort bij projectie 2150 waarbij de watervraag voor scenario Hd met 8 tot 11% toeneemt ten opzichte van de historische condities.

De bovenstaande resultaten voor gewasopbrengst en watervraag zijn weergegeven voor grasland. In Tabel 10 is het effect van klimaatverandering op de gewasopbrengst en watervraag van veel voorkomende gewassen in Nederland weergegeven waarbij het CO<sub>2</sub>-effect volgens WOFOST is aangehouden. Over het algemeen neemt de potentiële gewasopbrengst toe, wat veelal gepaard gaat met een afname in de watervraag. Het is echter de vraag of deze positieve trend terecht is. Om daar meer inzicht in te geven gaan we nader in op twee aspecten die een rol spelen bij de bepaling van de watervraag en die voor de toekomstscenario's anders verlopen dan voor de historische periode. Eerst gaan we in op de bepaling van de actuele vochtspanning en daarna op de bepaling van de windsnelheid.

**Tabel 10** Gemiddelde verandering (% t.o.v. referentie) in neerslaghoeveelheid (referentie in mm jr<sup>-1</sup>), gewasopbrengst (referentie in kg<sub>ds</sub> ha<sup>-1</sup>) en watervraag (referentie in mm jr<sup>-1</sup>) voor veel voorkomende gewassen als gevolg van klimaatverandering met CO<sub>2</sub>-effect volgens WOFOST; met in het groen een positief gewaardeerd effect, in het grijs geen effect en in het rood een negatief effect.

Gewas	Referentie	2050				2100				2150	
		Ln	Ld	Hn	Hd	Ln	Ld	Hn	Hd	Hn	Hd
<u>Neerslaghoeveelheid</u>											
Gras	585	6	3	7	1	6	3	16	2	20	5
Snijmais	479	3	1	3	-4	3	1	1	-13	2	-15
Wintertarwe	782	5	3	7	2	5	3	13	2	17	3
Zomergerst	314	3	1	2	-3	3	1	4	-9	3	-10
Aardappel (c)	443	2	-1	1	-5	2	-1	-2	-15	-3	-17
Aardappel (z)	443	2	-1	1	-5	2	-1	-2	-15	-3	-17
Aardappel (p)	321	1	-1	0	-6	1	-1	-1	-15	-3	-17
Suikerbiet	570	3	1	3	-2	3	1	4	-9	5	-10
Zaaiui	443	2	-1	1	-5	2	-1	-2	-15	-3	-17
<u>Gewasopbrengst</u>											
Gras <sup>1</sup>	17463	12	12	22	23	10	10	41	43	38	39
Snijmais <sup>2</sup>	25208	11	12	11	13	11	12	-4	-3	-13	-12
Wintertarwe <sup>1</sup>	9767	3	3	5	5	1	1	6	7	-2	-3
Zomergerst <sup>1</sup>	8033	7	7	13	13	5	5	20	23	14	14
Aardappel (c) <sup>1</sup>	20545	8	7	15	13	5	5	19	17	7	5
Aardappel (z) <sup>1</sup>	19315	9	9	18	17	7	7	26	22	9	6
Aardappel (p) <sup>1</sup>	16670	12	13	22	22	10	10	40	40	30	28
Suikerbiet <sup>1</sup>	17695	11	12	19	21	9	10	30	34	18	20
Zaaiui <sup>1</sup>	8300	26	26	45	43	20	20	59	61	35	33
<u>Watervraag</u>											
Gras <sup>1</sup>	337	-11	-9	-13	-8	-10	-8	-8	2	-2	8
Snijmais <sup>2</sup>	355	-16	-14	-23	-17	-15	-12	-31	-22	-32	-24
Wintertarwe <sup>1</sup>	193	-5	-3	-7	-3	-5	-4	-12	-6	-14	-10
Zomergerst <sup>1</sup>	192	-12	-10	-15	-11	-12	-10	-23	-17	-25	-21
Aardappel (c) <sup>1</sup>	276	-7	-5	-8	-2	-7	-5	-5	5	-5	2
Aardappel (z) <sup>1</sup>	291	-8	-5	-8	-2	-7	-5	-2	8	-2	6
Aardappel (p) <sup>1</sup>	235	-5	-2	-4	2	-4	-2	3	14	6	15
Suikerbiet <sup>1</sup>	294	-7	-4	-7	0	-7	-4	1	15	3	14
Zaaiui <sup>1</sup>	145	7	10	15	19	4	6	11	23	-1	5

<sup>1</sup> C3 gewastype

<sup>2</sup> C4 gewastype

Voor de bepaling van de actuele vochtspanning zijn observaties nodig van de minimale en maximale temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid. Voor de conversie van de relatieve luchtvochtigheid (%) naar actuele vochtspanning (kPa), welke nodig is bij de bepaling van de evapotranspiratie volgens Penman Monteith, is gebruik gemaakt van de minimale en maximale temperatuur in combinatie met de minimale en maximale luchtvochtigheid (Allen e.a. 1998; zie Vergelijking 5-2) in plaats van het gebruik van de gemiddelde luchtvochtigheid (zie Vergelijking 5-3). Voor de historische periode zijn observaties van de luchttemperatuur (minimale en maximale waarde) en de relatieve luchtvochtigheid (gemiddelde, minimale en maximale waarde) per etmaal bekend en kan de actuele vochtspanning bepaald worden met Vergelijking 5-2 ( $e_{a,i}$ ). Voor de toekomstscenario's is naast een inschatting van de minimale en maximale temperatuur alleen

een inschatting van de gemiddelde luchtvochtigheid per etmaal bekend en kan de actuele vochtspanning dus alleen bepaald worden met Vergelijking 5-3 ( $e_{a,2}$ ).

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \quad \text{Vergelijking 5-1}$$

$$e_{a,1} = \frac{e^{\circ}(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e^{\circ}(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}}{2} \quad \text{Vergelijking 5-2}$$

$$e_{a,2} = \frac{RH_{mean}}{100} \left[ \frac{e^{\circ}(T_{min}) + e^{\circ}(T_{max})}{2} \right] \quad \text{Vergelijking 5-3}$$

Waarbij:

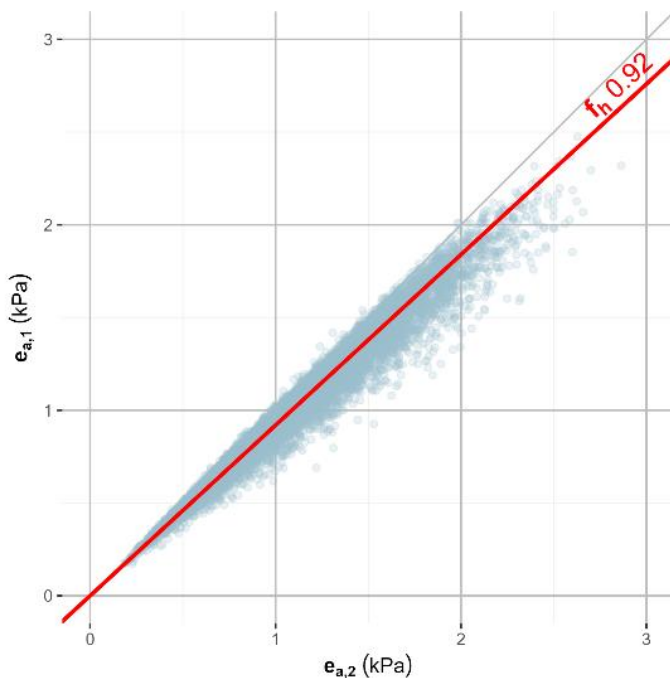
$e^{\circ}(T)$  : verzadigde vochtspanning bij bepaalde luchttemperatuur (kPa)

$e_a$  : actuele vochtspanning (kPa)

$T$  : luchttemperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ )

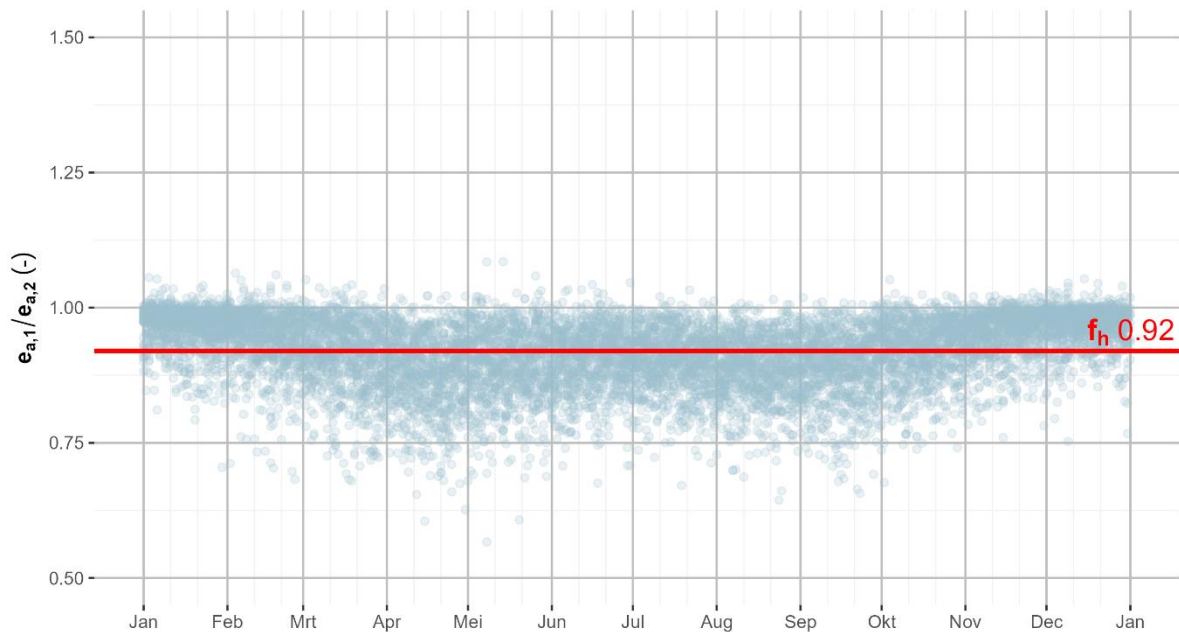
$RH$  : relatieve vochtigheid (%)

De vraag is dan wat de invloed is van het hanteren van een andere conversiemethode op de afname van de watervraag bij de toekomstscenario's. Om daar meer inzicht in te krijgen zijn beide conversies toegepast op de historische periode. Daaruit blijkt dat de actuele vochtspanning bepaald met Vergelijking 5-2 ( $e_{a,1}$ ) gemiddeld 8% lager uitkomt dan wanneer deze bepaald wordt met Vergelijking 5-3 ( $e_{a,2}$ ), zie Figuur 5.10.



**Figuur 5.10** Vergelijking tussen actuele vochtspanning bepaald met  $e_{a,1}$  en  $e_{a,2}$ ; op basis van weergegevens afkomstig van weerstation De Bilt voor de periode 1991-2020.

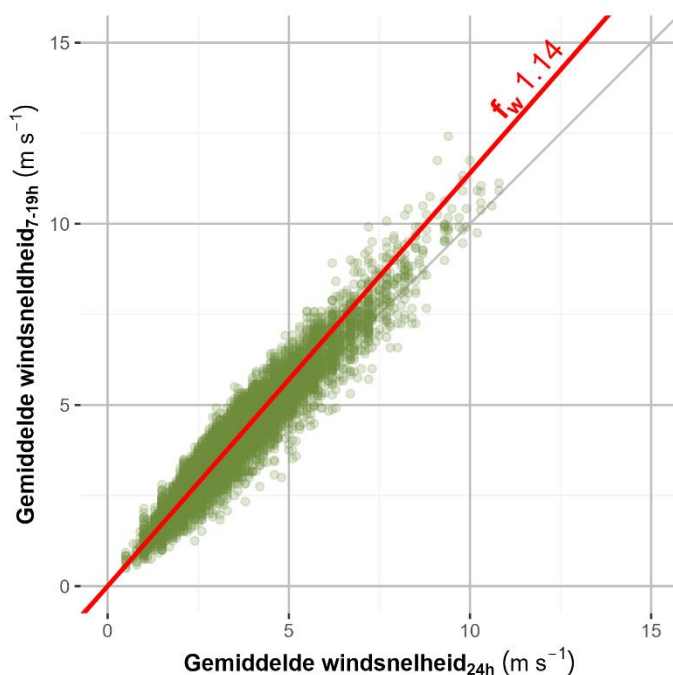
Omdat een hogere actuele vochtspanning gepaard gaat met een lagere watervraag (het verschil tussen de actuele vochtspanning en de verzadigde vochtspanning is dan kleiner), zal dit leiden tot onderschatting van de watervraag bij de toekomstscenario's. In de zomermaanden zal deze onderschatting van de watervraag over het algemeen groter zijn dan in de wintermaanden, zie Figuur 5.11.



**Figuur 5.11** Seizoeneffect van de actuele vochtspanning factor  $f_h$  ( $e_{a,1} / e_{a,2}$ ) weergegeven voor de periode 1991-2020 met weergegevens afkomstig van weerstation De Bilt.

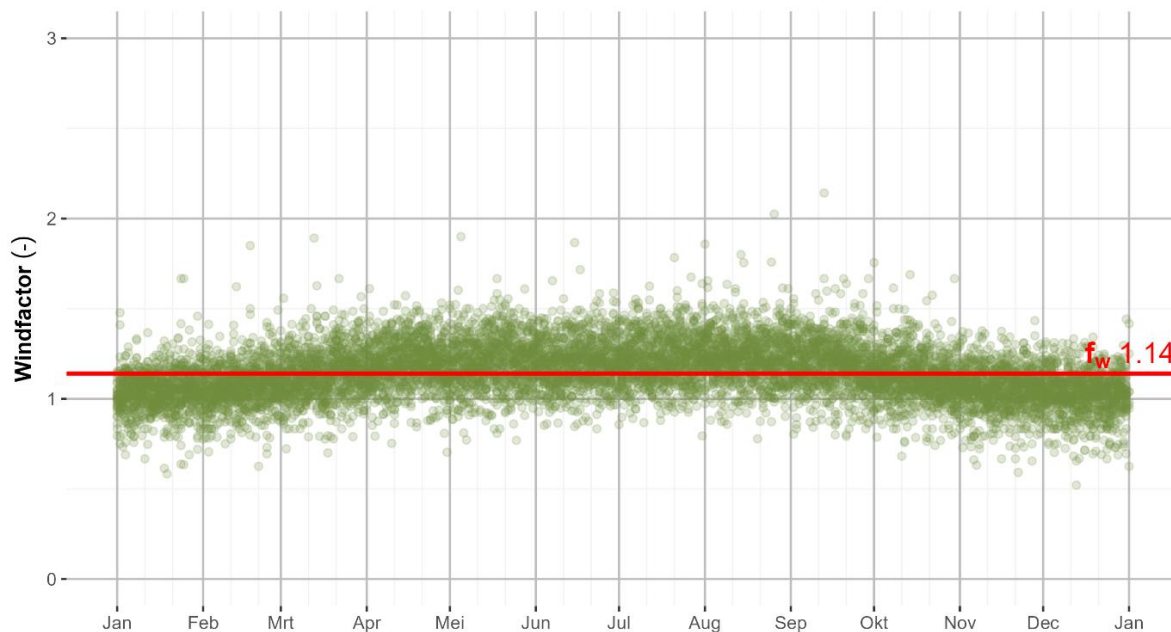
Voor bepaling van de watervraag is ook informatie nodig over de windsnelheid. Omdat over het algemeen de windsnelheid overdag groter is en de transpiratie overdag plaatsvindt, dient de watervraag bepaald te worden op basis van de gemiddelde windsnelheid overdag. Penman Monteith gebruikt hiervoor de gemiddelde windsnelheid tussen 7 – 19 uur (Smith e.a. 1992).

Voor de historische periode beschikken we over uurwaarden van de windsnelheid en daarmee is het dus mogelijk om de gemiddelde windsnelheid overdag te bepalen. Voor de toekomstscenario's beschikken we alleen over dagwaarden welke we kunnen corrigeren met een windfactor ( $w_{7-19h} / w_{24h}$ ). Smith (1992) hanteert hiervoor een windfactor met een waarde van 1.33, maar onder Nederlandse omstandigheden lijkt vanwege het zeeklimaat deze waarde te hoog. In Figuur 5.12 is de 24-uur gemiddelde windsnelheid uitgezet tegenover de gemiddelde windsnelheid overdag.



**Figuur 5.12** Vergelijking tussen 24-uur gemiddelde windsnelheid en de daggemiddelde windsnelheid; op basis van weergegevens afkomstig van weerstation De Bilt voor de periode 1991-2020.

Voor weerstation De Bilt komt de windfactor uit op een waarde van 1.14. Ook voor de windfactor is er een seizoeneffect zichtbaar, zie Figuur 5.13. Daarmee zal de watervraag gedurende de zomermaanden een klein beetje worden onderschat.



**Figuur 5.13** Seizoeneffect van windfactor  $f_w$  ( $w_{7-19u} / w_{24u}$ ) weergegeven voor de periode 1991-2020 met weergegevens afkomstig van weerstation De Bilt.

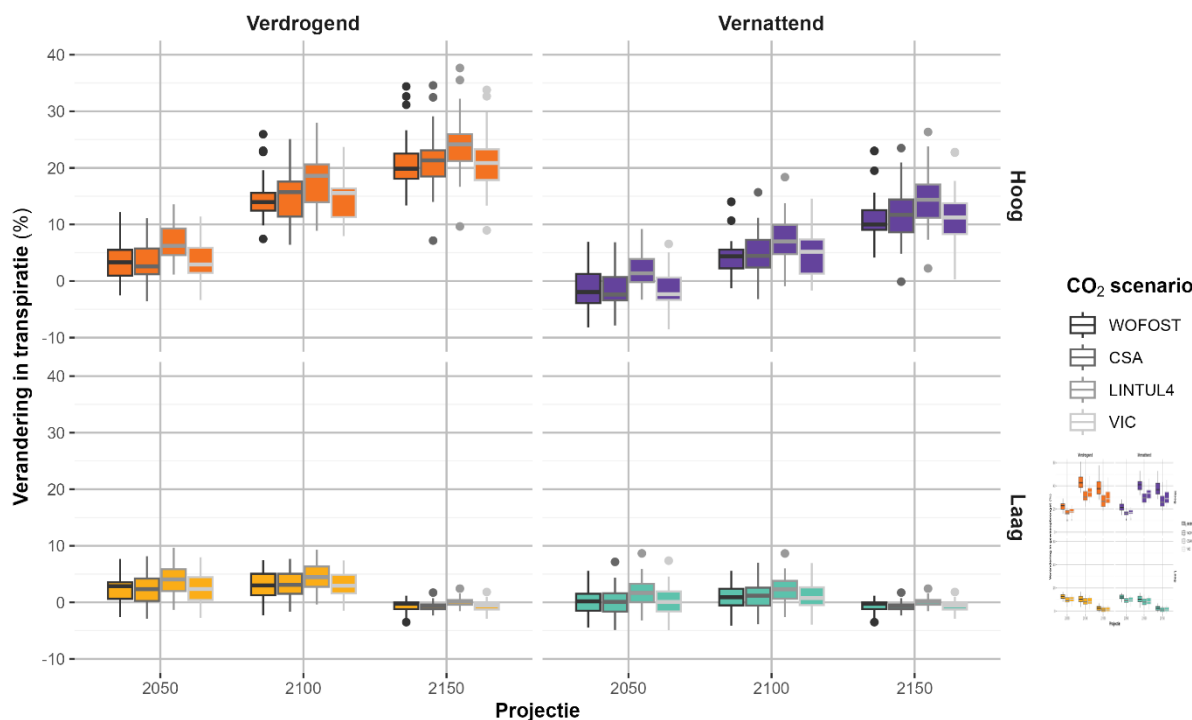
We kunnen op basis van de bovenstaande bevindingen opnieuw de watervraag voor de toekomstscenario's berekenen met de correcties op de actuele vochtspanning ( $f_h = 0.92$ ) en de windsnelheid ( $f_w = 1.14$ ). In Tabel 11 zijn voor veel voorkomende gewassen in Nederland de resultaten weergegeven waarbij het CO<sub>2</sub>-effect volgens WOFOST is aangehouden. Hierin is te zien dat met name de correctie voor de bepaling van de actuele vochtspanning sterk doorwerkt in de watervraag van het gewas. Wanneer zowel een correctie wordt doorgevoerd op de actuele vochtspanning en de windsnelheid zien we veelal een toename in de gemiddelde watervraag ten opzichte van de historische periode. In plaats van een afname van de gemiddelde watervraag van 8% voor gras bij klimaatscenario 2050Hd is er nu een toename te zien van 3%. Bij klimaatscenario 2150Hd neemt de gemiddelde watervraag voor gras ten opzichte van de historische periode toe van 8 naar 21%. Wanneer we ook naar afzonderlijke weerjaren kijken zien we in dit laatste geval uitschieters tot boven de 30%, zie Figuur 5.14.

**Tabel 11** Gemiddelde verandering (% t.o.v. referentie) in watervraag (referentie in mm jr<sup>-1</sup>) voor veel voorkomende gewassen als gevolg van klimaatverandering met CO<sub>2</sub>-effect volgens WOFOST waarbij correcties zijn doorgevoerd voor de actuele vochtspanning en de windsnelheid; met in het groen een positief gewaardeerd effect, in het grijs geen effect en in het rood een negatief effect.

Gewas	Ref.	2050				2100				2150	
		Ln	Ld	Hn	Hd	Ln	Ld	Hn	Hd	Hn	Hd
<i>Watervraag zonder correcties</i>											
Gras <sup>1</sup>	337	-11	-9	-13	-8	-10	-8	-8	2	-2	8
Snijmais <sup>2</sup>	355	-16	-14	-23	-17	-15	-12	-31	-22	-32	-24
Wintertarwe <sup>1</sup>	193	-5	-3	-7	-3	-5	-4	-12	-6	-14	-10
Zomergerst <sup>1</sup>	192	-12	-10	-15	-11	-12	-10	-23	-17	-25	-21
Aardappel (c) <sup>1</sup>	276	-7	-5	-8	-2	-7	-5	-5	5	-5	2
Aardappel (z) <sup>1</sup>	291	-8	-5	-8	-2	-7	-5	-2	8	-2	6
Aardappel (p) <sup>1</sup>	235	-5	-2	-4	2	-4	-2	3	14	6	15
Suikerbiet <sup>1</sup>	294	-7	-4	-7	0	-7	-4	1	15	3	14
Zaaiui <sup>1</sup>	145	7	10	15	19	4	6	11	23	-1	5
<i>Watervraag met correctie voor actuele vochtspanning</i>											
Gras <sup>1</sup>	337	-3	-1	-5	-1	-3	-1	0	10	7	16
Snijmais <sup>2</sup>	355	-2	0	-11	-5	-1	2	-22	-13	-24	-16
Wintertarwe <sup>1</sup>	193	4	5	2	6	3	5	-3	4	-5	0
Zomergerst <sup>1</sup>	192	-4	-2	-7	-3	-4	-2	-15	-9	-18	-14
Aardappel (c) <sup>1</sup>	276	1	4	1	6	1	4	4	13	3	10
Aardappel (z) <sup>1</sup>	291	2	4	1	7	2	4	7	18	7	15
Aardappel (p) <sup>1</sup>	235	4	6	4	10	4	7	12	23	15	24
Suikerbiet <sup>1</sup>	294	2	5	3	9	2	5	10	24	11	22
Zaaiui <sup>1</sup>	145	15	17	23	28	11	13	19	32	6	12
<i>Watervraag met correctie voor windsnelheid</i>											
Gras <sup>1</sup>	337	-8	-6	-10	-5	-8	-6	-5	5	1	11
Snijmais <sup>2</sup>	355	-15	-12	-22	-15	-13	-11	-30	-20	-31	-23
Wintertarwe <sup>1</sup>	193	-6	-4	-8	-4	-6	-4	-12	-6	-14	-10
Zomergerst <sup>1</sup>	192	-11	-9	-14	-9	-11	-9	-21	-15	-24	-20
Aardappel (c) <sup>1</sup>	276	-7	-5	-8	-2	-7	-5	-5	5	-5	3
Aardappel (z) <sup>1</sup>	291	-8	-5	-8	-2	-7	-5	-2	9	-2	7
Aardappel (p) <sup>1</sup>	235	-5	-2	-4	2	-4	-2	3	15	6	16
Suikerbiet <sup>1</sup>	294	-5	-2	-5	2	-5	-3	3	17	5	17
Zaaiui <sup>1</sup>	145	9	11	16	21	5	7	13	26	1	7
<i>Watervraag met correctie voor actuele vochtspanning en windsnelheid</i>											
Gras <sup>1</sup>	337	0	2	-2	3	1	3	4	14	11	21
Snijmais <sup>2</sup>	355	0	3	-8	-2	2	5	-20	-11	-22	-14
Wintertarwe <sup>1</sup>	193	4	6	2	6	4	5	-2	5	-4	1
Zomergerst <sup>1</sup>	192	-2	0	-5	0	-2	0	-13	-7	-16	-12
Aardappel (c) <sup>1</sup>	276	2	5	1	7	2	5	5	14	4	11
Aardappel (z) <sup>1</sup>	291	2	5	2	8	3	5	8	19	8	16
Aardappel (p) <sup>1</sup>	235	5	7	5	12	5	7	13	25	16	26
Suikerbiet <sup>1</sup>	294	5	8	5	12	5	8	13	27	15	26
Zaaiui <sup>1</sup>	145	18	20	26	31	14	16	22	35	9	15

<sup>1</sup> C3 gewastype

<sup>2</sup> C4 gewastype



**Figuur 5.14** Spreiding weergegeven als boxplot met verandering in watervraag van grasland per jaar (% verandering van de transpiratie) als gevolg van klimaatverandering voor verschillende CO<sub>2</sub>-scenario's; bij de bepaling van de watervraag zijn correcties doorgevoerd op de actuele vochtspanning ( $f_h = 0.92$ ) en de windsnelheid ( $f_w = 1.14$ ).

Om een indicatie te krijgen of het hanteren van correctiefactoren op de toekomstscenario's een redelijke inschatting van de watervraag oplevert, is de verandering van de watervraag geanalyseerd voor de historische periode wanneer de actuele vochtspanning volgens  $e_{a,1}$  en  $e_{a,2}$  wordt bepaald in combinatie met een 7-19 uur gemiddelde of een 24-uur gemiddelde windsnelheid en wanneer correctiefactoren worden toegepast, zie Tabel 12.

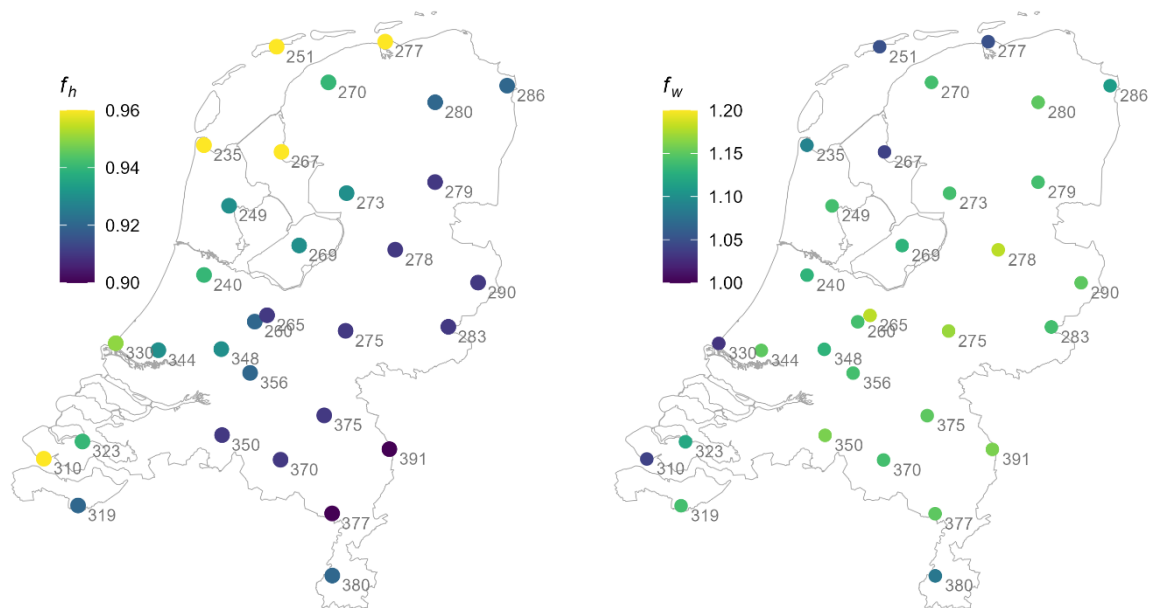
**Tabel 12** Gemiddelde verandering (% t.o.v. referentie) in watervraag voor de periode 1991-2020 (referentie in  $\text{mm jr}^{-1}$ ) voor veel voorkomende gewassen waarbij de actuele vochtspanning en de windsnelheid volgens verschillende methoden zijn bepaald; met in het groen een positief gewaardeerd effect, in het grijs geen effect en in het rood een negatief effect.

Gewas	Actuele vochtspanning Windsnelheid $f_h$ $f_w$ $\text{mm jr}^{-1}$	$e_{a,1}$	$e_{a,2}$	$e_{a,1}$	$e_{a,2}$	0.92 1.14
		7-19u	7-19u	24u	24u	
			%	%	%	
Gras <sup>1</sup>		337	-10	-5	-14	-3
Snijmais <sup>2</sup>		355	-19	-4	-21	-4
Wintertarwe <sup>1</sup>		193	-11	0	-10	-2
Zomergerst <sup>1</sup>		192	-11	-3	-13	-3
Aardappel (c) <sup>1</sup>		276	-12	-1	-12	-3
Aardappel (z) <sup>1</sup>		291	-13	-1	-13	-3
Aardappel (p) <sup>1</sup>		235	-11	-1	-11	-2
Suikerbiet <sup>1</sup>		294	-13	-4	-15	-3
Zaaiui <sup>1</sup>		145	-10	-4	-12	-3

<sup>1</sup> C3 gewastype

<sup>2</sup> C4 gewastype

Hieruit kunnen we concluderen dat het hanteren van correctiefactoren op de toekomstscenario's een redelijke goede inschatting geeft van de watervraag. Er is sprake van een kleine onderschatting van circa 3%, hetgeen waarschijnlijk wordt veroorzaakt door het seizoeneffect in beide correctiefactoren. Omdat de afwijking in de gesimuleerde watervraag beperkt blijft is het hanteren van een gemiddelde correctiefactor voor  $f_h$  en  $f_w$  goed te onderbouwen. Tot nu toe is de analyse met betrekking tot de correctiefactoren enkel gericht op het weerstation De Bilt. Tot slot is daarom nog gekeken naar de ruimtelijke variatie van correctiefactoren  $f_h$  en  $f_w$  door de deze af te leiden per weerstation.



**Figuur 5.15** Ruimtelijke variatie in correctiefactoren voor bepaling van de actuele vochtspanning ( $f_h$ ) en windsnelheid ( $f_w$ ).

In Figuur 5.15 is duidelijk te zien dat de correctiefactoren ruimtelijk variëren. Naarmate de afstand tot de kust groter wordt neemt de correctiefactor  $f_h$  globaal af en de correctiefactor  $f_w$  globaal toe. De correctiefactoren zijn in Tabel 13 per weerstation weergegeven.

**Tabel 13** Correctiefactoren per weerstation voor bepaling van de actuele vochtspanning ( $f_h$ ) en windsnelheid ( $f_w$ ) voor toekomstscenario's.

Weerstation	$f_h$	$f_w$
235 – De Kooy	0.96	1.09
240 – Schiphol	0.94	1.13
249 – Berkhout	0.93	1.14
251 – Hoorn (Terschelling)	0.96	1.05
260 – De Bilt	0.92	1.14
265 – Soesterberg	0.91	1.18
267 – Stavoren	0.96	1.04
269 – Lelystad	0.93	1.13
270 – Leeuwarden	0.94	1.14
273 – Marknesse	0.93	1.14
275 – Deelen	0.91	1.17
277 – Lauwersoog	0.96	1.05
278 – Heino	0.91	1.18
279 – Hoogeveen	0.91	1.14
280 – Eelde	0.92	1.15
283 – Hupsel	0.91	1.14
286 – Nieuw Beerta	0.92	1.11
290 – Twente	0.91	1.15
310 – Vlissingen	0.96	1.04
319 – Westdorpe	0.92	1.14
323 – Wilhelminadorp	0.94	1.12
330 – Hoek van Holland	0.95	1.03
344 – Rotterdam	0.93	1.15
348 – Cabauw	0.93	1.13
350 – Gilze-Rijen	0.91	1.16
356 – Herwijnen	0.92	1.14
370 – Eindhoven	0.91	1.14
375 – Volkel	0.91	1.15
377 – Ell	0.90	1.15
380 – Maastricht	0.92	1.08
391 – Arcen	0.90	1.16

---

## 6 Van modelinstrumentarium naar WWL-tabel

Het SWAP-WOFOST modelinstrumentarium bevat veel proceskennis en is getoetst aan veldexperimenten. De keerzijde is dat dit model relatief complex is, veel gegevens nodig heeft, rekenintensief is, en specialistische kennis vereist om te draaien. Een metamodel afgeleid van SWAP-WOFOST, vormt daarom een interessant en eenvoudig toepasbaar alternatief. Met een metamodel is het mogelijk om resultaten van onderliggende simulatiemodellen na te bootsen. Om die reden is in het verleden de WWL-tabel ontwikkeld. Op de website van WWL is dit metamodel te vinden. Voor de nieuwe release van WWL-tabel die het resultaat is van project VV-WWL gaan we uit van dezelfde aanpak voor de resultaten die WWL-tabel oplevert en welke invoergegevens daarvoor nodig zijn.

Een metamodel is in principe eenvoudiger dan het uitgangsmodel dat eraan ten grondslag ligt, omdat een metamodel meestal maar een klein aspect van het uitgangsmodel modelleert. In het geval van SWAP-WOFOST en WWL-tabel is dat bijvoorbeeld de langjarig gemiddelde opbrengstderving of de opbrengstderving in een bepaald jaar. Alle andere modelresultaten van SWAP-WOFOST zoals de dagelijkse variatie in het bodemvochtgehalte, of de ontwikkeling van de wortelmassa, worden door het metamodel buiten beschouwing gelaten.

De relatieve eenvoud van een metamodel brengt ook andere voordelen met zich mee. Om voorspellingen te doen met het metamodel zijn veel minder invoergegevens nodig dan voor het uitgangsmodel. Voor het uitgangsmodel moet bijvoorbeeld de laagsgewijze opbouw van de bodem bekend zijn en een gedetailleerde beschrijving van een groot aantal gewaseigenschappen. Bij het metamodel is de specificatie van de bodemopbouw vervangen door het bodemtype en de lijst aan gewaseigenschappen door de naam van het gewas. Een metamodel zal ook veel sneller rekenen dan het uitgangsmodel. Dit maakt het metamodel dan ook breder inzetbaar. Denk bijvoorbeeld aan situaties waarbij grote gebieden moeten worden doorgerekend.

Om het metamodel te kunnen afleiden is een groot aantal berekeningen uitgevoerd met het WWL modelinstrumentarium (SWAP-WOFOST). Deze rekenruns zijn kenmerkend voor een verscheidenheid aan klimatologische, bodemkundige, hydrologische en agronomische omstandigheden in Nederland. De definities representeren niet alleen het huidige klimaat, maar houden ook rekening met klimaatverandering.

Naast de doorgevoerde wijzigingen in modelconcepten en -parametrisatie (beschreven in paragraaf 3.1), zijn er ook wijzigingen doorgevoerd bij het afleiden van het metamodel. De oude procedure leidde tot een overschatting van de zuurstofstress bij relatief natte voorjaarsgrondwaterstanden. Daarnaast is bij het ['Advies toepassing Waterwijzer Landbouw'](#) door de Wetenschappelijke Adviescommissie NWM/NHI (Peerboom e.a., 2022) de wens geuit om meer inzicht te geven in de onzekerheid van de modelresultaten.

### 6.1 Definiëren van modelruns

#### *Meteorologische condities*

De meteorologische gegevens voor de referentieperiode (1991-2020) zijn afkomstig van het KNMI. Het gaat hier om de globale straling, de minimum en maximum temperatuur, de minimum en maximum relatieve luchtvochtigheid, de gemiddelde windsnelheid overdag (7-19 uur), de neerslagsom en de neerslagduur op dagbasis. Deze gegevens zijn verzameld voor zes KNMI-weerstations; van noord naar zuid zijn dit: Eelde (station 280), De Kooy (station 235), Twenthe (station 290), De Bilt (station 260), Vlissingen (station 310) en Maastricht (station 380).

Ook de meteorologische gegevens voor de toekomstige periode (projectie 2100; hoge uitstootscenario) zijn afkomstig van het KNMI. Dagelijkse gegevens over de minimum en maximum relatieve luchtvochtigheid en de gemiddelde windsnelheid overdag ontbreken echter. In plaats daarvan zijn gegevens beschikbaar over de dagelijks gemiddelde relatieve luchtvochtigheid en de 24-uur gemiddelde windsnelheid. Bij het bepalen van de watervraag dient hiermee rekening gehouden te worden door correctiefactoren te hanteren bij het bepalen van de actuele vochtspanning en de daggemiddelde windsnelheid, zie paragraaf 5.4.

#### *Gewas*

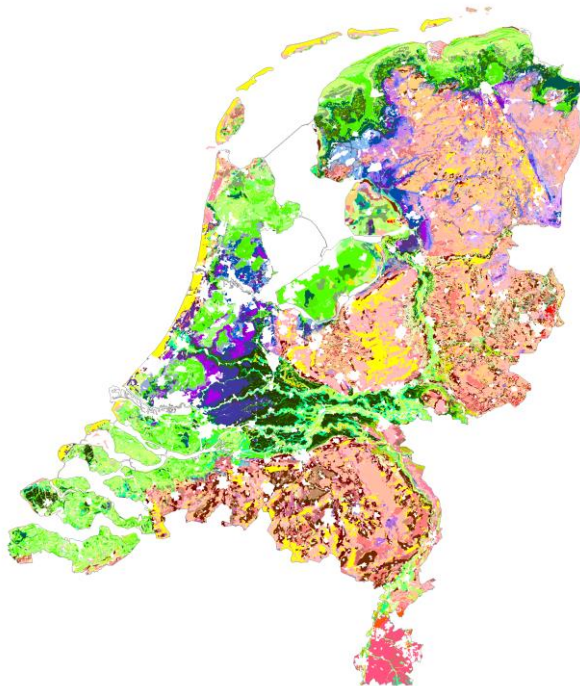
Bij de aansturing van de modelberekeningen ten behoeve van het metamodel hanteren we verschillende gewassen, namelijk: gras, snijmais, wintertarwe, zomergerst, aardappel, suikerbiet, zaaiui, tulp, appelboom en laanboom. Bij simulatie van gras maken we onderscheid tussen intensief (alleen maaien) en extensief (alleen beweiding) beheer van het grasland en bij simulatie van aardappel maken we onderscheid tussen consumptie- zetmeel- en pootaardappel.

### *Berekening*

De simulaties zijn uitgevoerd met en zonder berekening. Indien berekening wordt toegestaan, dan bepaalt het modelinstrumentarium zelf hoe vaak er wordt berekend. Een transpiratiereductie als gevolg van droogtestress tot 15% (per dag) staan we toe voordat een beregeningsgift van 20 mm wordt toegekend. Na de beregeningsgift wordt gedurende 7 dagen geen nieuwe beregeningsgift gegeven in de modelberekeningen.

### *Bodem*

De bodemfysische schematisering is overgenomen uit Heinen et al. (2021; 2022). Deze schematisering staat bekend als BOFEK 2020 en is weergegeven in Figuur 6.1. BOFEK 2020 bevat 79 bodemprofielen die de bodemfysische opbouw van de bovenste 1,2 m van de bodem weergeven voor heel Nederland. Voor berekeningen met SWAP-WOFOST is het noodzakelijk dat het profiel wordt verlengd om ook diepere grondwaterstanden te kunnen berekenen. We hebben hiertoe de onderste bodemlaag verlengd tot 6 m-mv. De bodemfysische relaties met de Mualem-Van-Genuchten-parameters zijn gegeven in Heinen et al. (2020a).



**Figuur 6.1** Bodemfysische indeling van Nederland volgens BOFEK 2020 (bron: Heinen e.a. 2021; 2022)

### *Hydrologische condities*

Variatie in hydrologische condities worden verkregen door verschillende instellingen te hanteren voor de drainagesystemen. We maken hierbij gebruik van een drietal drainagesystemen. Het eerste systeem representeert een diep liggend en traag reagerend systeem (bijvoorbeeld voor hogere percelen in Oost-Nederland, die ook beïnvloed worden door diep liggende beeksystemen). Het tweede systeem betreft de meer lokale slootdrainage, dit kan ook een buisdrainage omvatten. Het derde systeem betreft greppeldrainage.

We veronderstellen een vast waterpeil in de eerste twee drainagesystemen die variëren van zeer nat (0.1 m-mv) tot zeer droog (4.0 m-mv voor het eerste systeem en 1.0 m-mv voor het tweede systeem). Voor het eerste systeem wordt een drainageweerstand van 100, 500, 2.000 of 100.000 dagen aangehouden gecombineerd met een hoge infiltratieweerstand (100.000 dagen). Voor het tweede systeem wordt een drainageweerstand van 25, 90, 400 of 1.000 dagen aangehouden gecombineerd met een infiltratieweerstand van 25, 50, 200, 500, 1.000, 2.000 of 100.000 dagen.

---

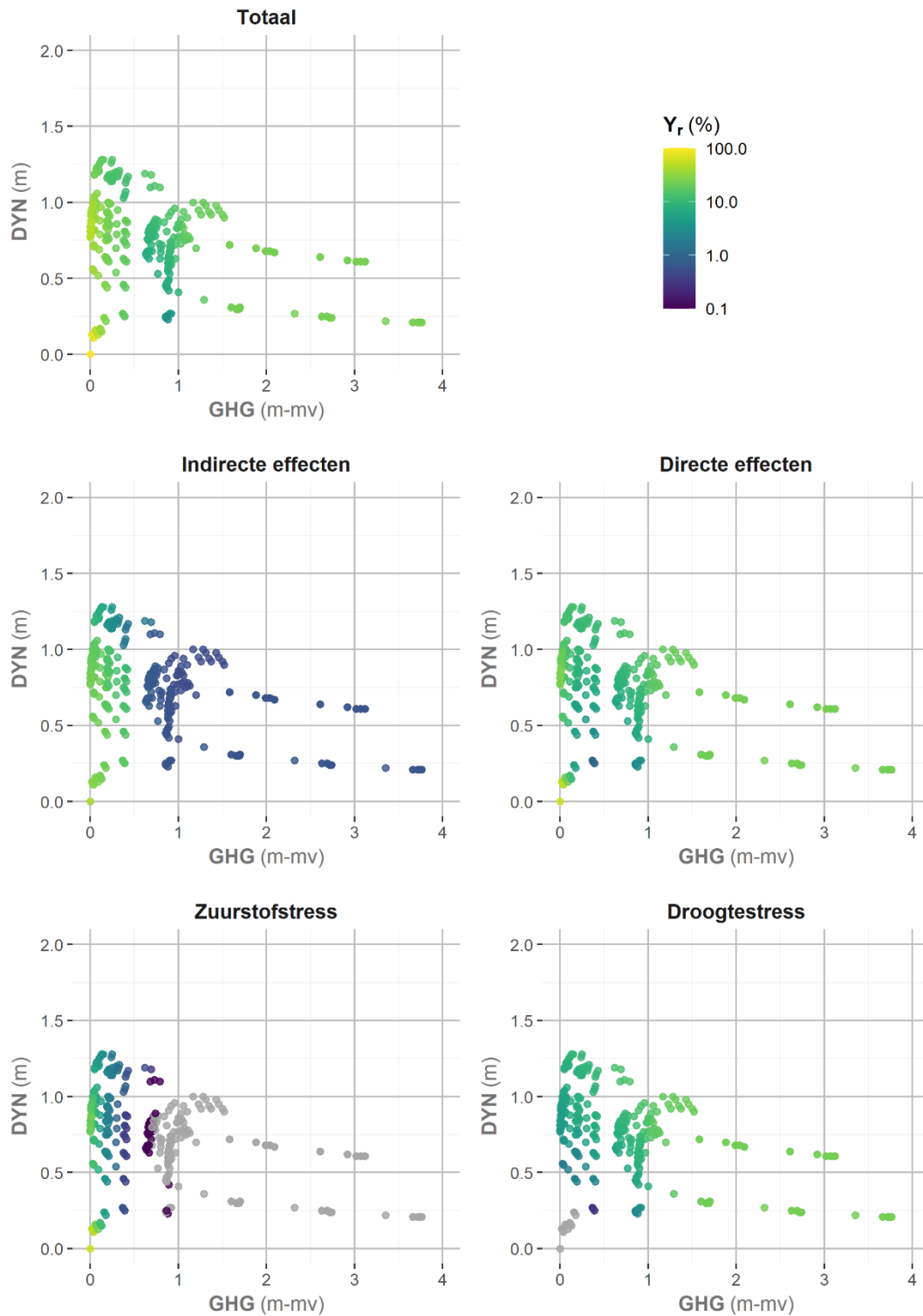
Op voorhand selecteren we alleen logische combinaties van waterpeilen, drainage- en infiltratieweerstanden. Dit heeft geleid tot 396 sets van instellingen die in de modelsimulaties resulteren in extreem natte tot zeer droge hydrologische condities.

## 6.2 Afleiden metamodel ten behoeve van de WWL-tabel

Voor alle combinaties van meteorologie (6 weerstations; 2 klimaatperiodes), gewas (13 gewassen), berekening (wel of niet toestaan), bodem (79 bodemprofielen) en hydrologie (396 sets met instellingen van drainagesystemen) zijn berekeningen uitgevoerd met het SWAP-WOFOST modelinstrumentarium voor de periode 1991-2020. Ten behoeve van het afleiden van het metamodel zijn daarmee in totaal bijna 10 miljoen modelberekeningen uitgevoerd. Van elke modelberekening bepalen we de grondwaterstandskarakteristieken (GHG en GLG) en per groeiseizoen de landbouwkundige gewasopbrengst en opbrengstderving (uitgesplitst naar afzonderlijke stressoren) en de hoeveelheid berekening.

Voor elke combinatie van meteorologie, gewas, bodem en met of zonder berekening zijn dus 396 modelresultaten beschikbaar. In Figuur 6.2 is de gewasopbrengstderving weergegeven voor de periode 1991-2020 voor snijmais zonder berekening op een zwak lemige zandgrond met meteorologische gegevens van het weerstation De Bilt (huidige klimaatperiode). De totale gewasopbrengstderving is uitgesplitst naar opbrengstderving als gevolg van indirecte en directe effecten en de directe effecten zijn verder uitgesplitst naar droogte- en zuurstofstress. Aan deze dataset is een hulppunt toegevoegd waarbij de grondwaterstand het hele jaar tot aan het maaiveld staat en je op voorhand weet dat er sprake is van 100% opbrengstderving.

In Figuur 6.2 is te zien dat er een goede spreiding is gegenereerd in de gesimuleerde grondwaterstandskarakteristieken GHG en de dynamiek (GLG minus GHG). Onder relatief natte bodemhydrologische condities treedt met name opbrengstderving op als gevolg van indirecte effecten en zuurstofstress en is er nauwelijks sprake van droogtestress. Naarmate de condities droger worden zien we een afname van de indirecte effecten en zuurstofstress en een toename van de droogtestress.



**Figuur 6.2** Gesimuleerde opbrengstderving ( $Y_r$ ) als gevolg van te natte of te droge bodemhydrologische condities (incl. uitsplitsing naar afzonderlijke stressoren) uitgezet tegen de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en dynamiek van de grondwaterstand (DYN); modelresultaten zijn weergegeven voor de periode 1991-2020 voor snijma's zonder berekening op een zwak lemige zandgrond met meteorologische gegevens van het weerstation De Bilt.

Dit modelgedrag proberen we zo goed mogelijk te vangen in het metamodel. De procedure voor het afleiden van het metamodel bestaat daarbij uit drie stappen:

1. Fitten van modellen;
2. Voorspelling metamodel met een enkelvoudige lineaire regressieanalyse;
3. Bepaling van onzekerheid.

## Fitten van modellen

In eerste instantie fitten we modellen voor de voorspelling van indirecte effecten, droogte- en zuurstofstress als functie van de grondwaterstandskarakteristieken. De voorspelling van de directe effecten volgt uit de som van droogte- en zuurstofstress en de voorspelling van de totale opbrengstderving volgt uit de som van indirecte en directe effecten. Indien berekening wordt toegestaan wordt ook een model gefit voor de voorspelling van de hoeveelheid berekening als functie van de grondwaterstandskarakteristieken. We gebruiken hiervoor twee basismodellen waarbij de uitkomst van het model toeneemt ( $M_+$ ) of afneemt ( $M_-$ ) naarmate de hydrologische condities droger worden:

$$M_+(GHG, DYN) = p_1 - p_2 e^{-p_3(GHG+p_4DYN)} \quad \text{Vergelijking 6-1}$$

$$M_-(GHG, DYN) = (p_5 - p_8) \frac{p_9 + 1}{p_9 + e^{p_6(GHG+p_7DYN)}} + p_8 \quad \text{Vergelijking 6-2}$$

De parameters  $p_{1-9}$  zijn vormparameters en krijgen middels een optimalisatieprogramma een waarde toegekend.  $M_+$  wordt gebruikt om op basis van de grondwaterstandskarakteristieken de droogtestress en de hoeveelheid berekening te voorspellen. Als voor  $M_+$  een waarde kleiner dan 0 wordt berekend, dan wordt de waarde 0 toegekend. De parameter  $p_1$  is de maximale droogteschade of beregeningshoeveelheid (bij grote waarden van  $GHG$  en/of  $DYN$ ).  $M_-$  wordt gebruikt voor de voorspelling van indirecte effecten en zuurstofstress. De parameter  $p_8$  staat voor de minimale grootte van de indirecte effecten of zuurstofstress en parameter  $p_5$  staat voor de maximale grootte die optreedt als  $GHG = DYN = 0$ . In beide formules geven de parameters  $p_4$  en  $p_7$  het relatieve belang van de  $GHG$  dan wel de  $GLG$  aan: als de waarde gelijk aan 1 is dan bepaalt de  $GLG$  de uitkomst en bij de waarde 0 de  $GHG$ .

Voor de voorspelling van indirecte effecten bij grasland werken we met een aangepast  $M_-$  model. Bij grasland treden indirecte effecten op tijdens oogstmomenten. Onder extreem natte omstandigheden is er geen grasgroei en daarmee ook geen oogstmoment. Onder deze omstandigheden treden er dus ook geen indirecte effecten op. De indirecte effecten bij grasland zullen dus eerst toenemen naarmate de hydrologische condities droger worden en vervolgens weer afnemen. Dit modelgedrag kunnen we beschrijven met het model  $M_{\pm}$ :

$$M_{\pm}(GHG, DYN) = (p_5 - p_8) \frac{p_9 + 1}{p_9 + e^{p_6(GHG+p_7DYN)}} + p_8 - p_5 \frac{1}{e^{p_6(GHG+p_7DYN)}} \quad \text{Vergelijking 6-3}$$

De parameter  $p_8$  geeft de schade weer bij grote waarden van  $GHG$  en/of  $DYN$ .

## Voorspelling metamodel

Voor elke SWAP-WOFOST modelberekening kunnen we op basis van de gefitte modellen een voorlopige voorspelling doen van de opbrengstderving  $M_{r,x}^*$  gegeven de gesimuleerde grondwaterstand. Hierbij geven we met het asterisk-symbool aan dat het gaat om een voorlopige voorspelling middels de gefitte modellen, subscript  $r,x$  staat voor de totale opbrengstderving of opbrengstderving als gevolg van een bepaalde stressor.

Middels een enkelvoudige lineaire regressieanalyse, gebaseerd op Oude Voshaar (1994), kunnen we de samenhang van de voorlopige voorspelling van de opbrengstderving ( $M_{r,x}^*$ ) en de met SWAP-WOFOST gesimuleerde opbrengstderving ( $Y_{r,x}$ ) nader onderzoeken. Deze samenhang beschrijven we met het model:

$$M_{r,x} = \beta_0 + \beta_1 M_{r,x}^* \quad \text{Vergelijking 6-4}$$

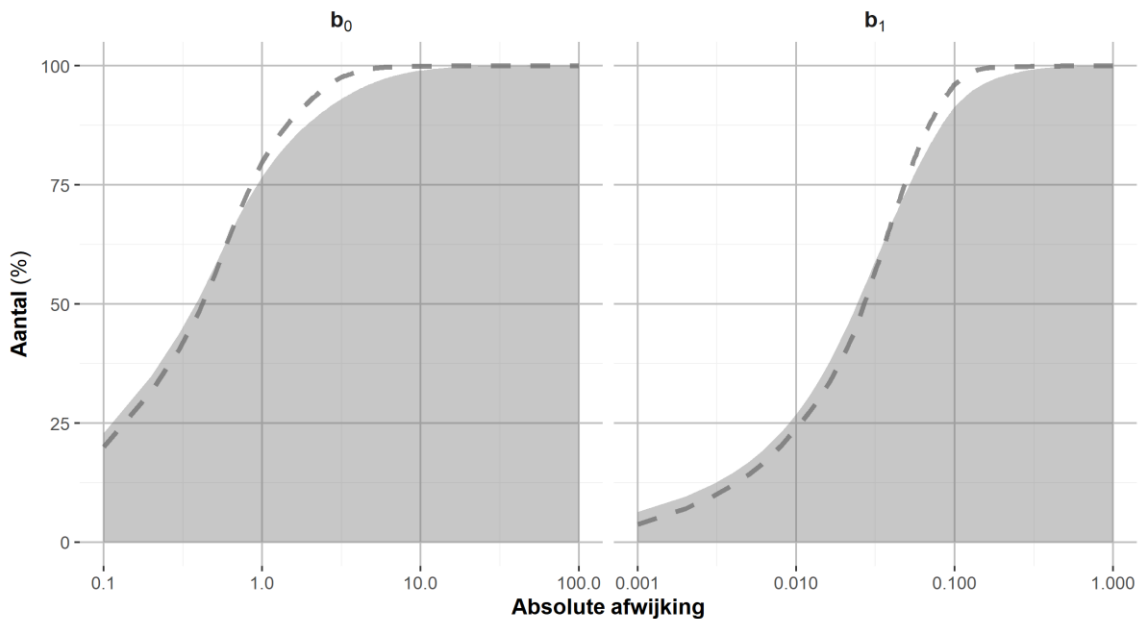
De definitieve voorspelling van het metamodel wordt hierbij weergegeven met  $M_{r,x}$  en betreft dus een correctie van de voorlopige voorspelling middels regressiecoëfficiënten  $\beta_0$  en  $\beta_1$ . Op basis van de gesimuleerde opbrengstderving ( $Y_{r,x}$ ) maken we een schatting van deze regressiecoëfficiënten. De schatters voor  $\beta_0$  en  $\beta_1$  noteren we hierbij als  $b_0$  en  $b_1$  en worden als volgt bepaald:

$$b_1 = \frac{\sum_i (Y_{r,x,i} - \overline{Y_{r,x}})(M_{r,x,i}^* - \overline{M_{r,x}^*})}{\sum_i (Y_{r,x,i} - \overline{Y_{r,x}})^2} \quad \text{Vergelijking 6-5}$$

$$b_0 = \overline{M_{r,x}^*} - b_1 \overline{Y_{r,x}} \quad \text{Vergelijking 6-6}$$

Voor iedere combinatie van meteorologie (6 weerstations; 2 klimaatperioden), gewas (13 gewassen), berekening (wel of niet toestaan), bodem (79 bodemprofielen) is met de bovenstaande werkwijze een metamodel afgeleid om de opbrengstderving te voorspellen voor een bepaald jaar of een langjarige periode (1991-2020). Wanneer de voorspelling op basis van de gefitte modellen ( $M_{r,x}^*$ ) goed gaat, zal de schatting

voor regressiecoëfficiënt  $b_0$  ongeveer gelijk zijn aan 0 en de schatting voor regressiecoëfficiënt  $b_1$  niet veel afwijken van 1. Deze waarden worden de optimale waarden voor de parameters genoemd. In Figuur 6.3 is voor de voorspelling van de totale opbrengstderving het aantal metamodellen (%) uitgezet tegen de absolute afwijking ten opzichte van de optimale waarde voor de geschatte regressiecoëfficiënten.

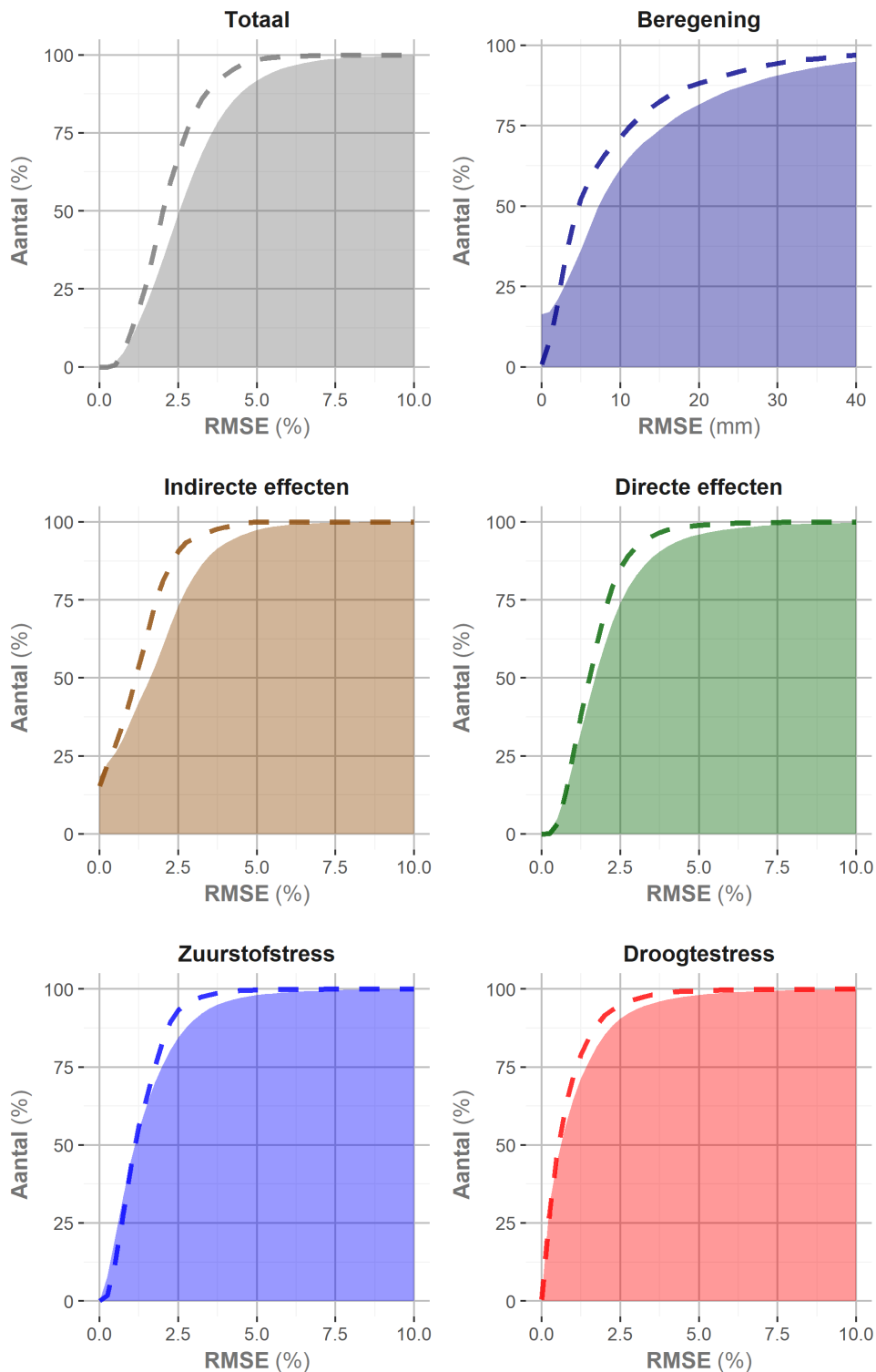


**Figuur 6.3** Percentage van alle metamodellen (%) voor de voorspelling van de totale opbrengstderving uitgezet tegen de absolute afwijking ten opzichte van de optimale waarde voor de geschatte regressiecoëfficiënten  $b_0$  en  $b_1$ ; het grijze vlak heeft betrekking op metamodellen voor afzonderlijke jaren en de gestreepte lijn heeft betrekking op metamodellen voor de langjarig gemiddelde periode.

Voor de voorspelling van de totale opbrengstderving over een langjarig gemiddelde periode heeft 95% van alle afgeleide metamodellen een waarde voor  $b_0$  die kleiner is dan  $\pm 2.5\%$  en waarde voor  $b_1$  van  $1.0 \pm 0.1$ . Wanneer we kijken naar de voorspelling van de totale opbrengstderving voor afzonderlijke weerjaren dan is de afwijking iets groter. Daarmee kunnen we concluderen dat over het algemeen de regressiecoëfficiënten niet sterk afwijken van de optimale waarde.

Door de voorlopige voorspelling van het metamodel te corrigeren zorgen we ervoor dat de samenhang tussen voorspelling van de gewasopbrengstderving en de met SWAP-WOFOST gesimuleerde opbrengstderving iets beter wordt. Dit heeft echter ook een nadeel. Bij de gecorrigeerde voorspelling hoeft namelijk de som van de afzonderlijke stressoren niet meer gelijk te zijn aan de voorspelling van de totale opbrengstderving.

Om een indruk te krijgen hoe goed het metamodel in staat is de gesimuleerde opbrengstderving te benaderen, analyseren we de afwijking van de opbrengstderving voorspeld met het metamodel ( $M_{r,x}$ ) met de gesimuleerde opbrengstderving ( $Y_{r,x}$ ). Hierbij drukken wij de afwijking uit in RMSE (root mean squared error). De verdeling van de RMSE is weergegeven in Figuur 6.4. Voor de voorspelling van de totale opbrengstderving over een langjarige gemiddelde periode heeft 95% van alle afgeleide metamodellen een RMSE kleiner dan 4.2%. De afwijking neemt iets toe bij de voorspelling in afzonderlijke weerjaren met een RMSE kleiner dan 5.6% voor 95% van alle metamodellen. De modelprestaties voor de voorspelling van de beregeningsgiften vertonen een grotere afwijking. Maar dat mag ook worden verwacht doordat we hierbij een discrete waarde van de beregeningshoeveelheid (zoals SWAP berekent als het aantal beregeningsgiften van 20 mm) vergelijken met een continue waarde (voorspelling van de beregeningshoeveelheid) én doordat het bereik in gesimuleerde waarden aanzienlijk groter is (voor berekening 0 tot circa 200 mm en voor opbrengstdrepressies 0% tot circa 40%).



**Figuur 6.4** Verdeling van modelprestaties van het metamodel; het gekleurde vlak geeft de verdeling weer van afzonderlijke weerjaren en de lijn geeft de verdeling weer van het langjarig gemiddelde.

#### Bepaling van onzekerheid

De regressielijn  $\widehat{M}_{r,x} = b_0 + b_1 M_{r,x}^*$  kan vervolgens gebruikt worden voor het maken van een definitieve voorspelling waarbij ook de onnauwkeurigheid (se) van de voorspelling inzichtelijk wordt gemaakt. Hiervoor moeten we ook een inschatting maken van de residuele afwijking (de variantie in opbrengstderiving die niet door het model kan worden verklaard). De schatter voor de restvariantie noteren we als  $s^2$  en bepalen we als volgt:

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \sum_i (Y_{r,x,i} - (b_0 + b_1 M_{r,x,i}^*))^2$$

**Vergelijking 6-7**

De onnauwkeurigheid van de voorspelling kan als volgt worden bepaald:

$$se = \sqrt{s^2 \left( 1 + \frac{1}{n} + \frac{(M_{r,x,0}^* - \bar{M}_{r,x}^*)^2}{\sum (M_{r,x,i}^* - \bar{M}_{r,x}^*)^2} \right)}$$

**Vergelijking 6-8**

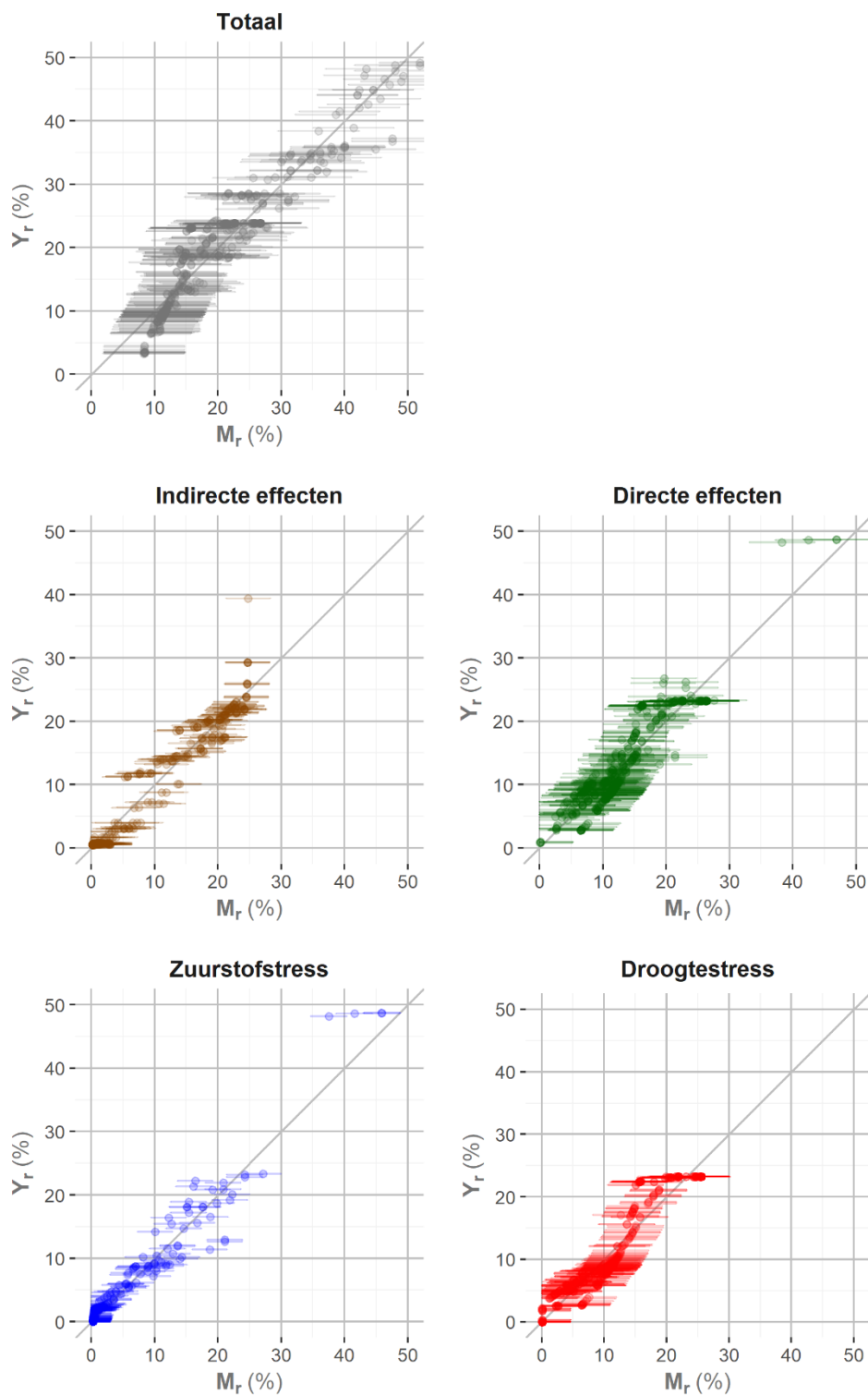
In de bovenstaande vergelijking betreft  $M_{r,x,0}^*$  de voorlopige voorspelling van een nieuw object (een nieuwe voorspelling gegeven bepaalde grondwaterstandskarakteristieken). Een 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de voorspelling wordt tenslotte gegeven door:  $b_0 + b_1 M_{r,x,0}^* \pm t_{n-2} se$ . In Figuur 6.5 is ter illustratie de voorspelde gewasopbrengstderving inclusief onzekerheid van de voorspelling weergegeven voor de periode 1991-2020 voor snijmais zonder berekening op een zwak lemige zandgrond met meteorologische gegevens van het weerstation De Bilt (huidige klimaatperiode). De voorspelde gewasopbrengstderving ( $M_{r,x}$ ) komt hierbij goed overeen met de gesimuleerde opbrengstderving ( $Y_{r,x}$ ) maar kent tegelijkertijd ook een bepaalde onzekerheid. Voor deze situatie is de onzekerheid bij de voorspelling van droogte- en zuurstofstress respectievelijk  $\pm 6.3$  en  $\pm 2.8\%$  uitgaande van een 95% betrouwbaarheidsinterval. De onzekerheid bij de voorspelling van directe effecten is  $\pm 7.0$  en bij de indirecte effecten  $\pm 2.8\%$ . Voor de voorspelling van de totale opbrengstderving komt de onzekerheid op  $\pm 8.0\%$  uit.

Met deze werkwijze geven we inzicht in de onzekerheid van de voorspelling van het metamodel. De onzekerheid kan verschillende oorzaken hebben:

- spreiding in SWAP-WOFOST modelresultaten bij dezelfde randvoorwaarden en vergelijkbare grondwaterkarakteristieken;
- het kwantificeren van de bijdrage van afzonderlijke stressoren aan de totale opbrengstderving gaat gepaard met onzekerheid;
- de vorm van de functie van het metamodel voor het representeren van de verschillende schadetermen is niet flexibel genoeg;
- de methode voor het bepalen van de parameters van de schadefunctie is niet optimaal.

Het zegt daarmee iets over hoe goed het metamodel in staat is om de modelresultaten van het SWAP-WOFOST modelinstrumentarium te benaderen. Voor de ploteigenschappen waar de voorspelde kracht van het metamodel te wensen overlaat, leidt dit automatisch tot een grotere onzekerheid. Indien de mate van onzekerheid te groot is, moet worden overwogen om WWL-regionaal toe te passen.

Naast de onzekerheid in voorspelkracht van het metamodel is het belangrijk om te realiseren dat er ook sprake is van onzekerheid in de gehanteerde modelinvoer, -parametrisatie en -concepten. In een aanvullende studie uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat is hier voor een beperkt aantal aspecten aandacht aan besteed, zie voor meer informatie Mulder en Stuurup (2025). Gegeven de complexiteit van het modelinstrumentarium is het op voorhand duidelijk dat niet alle onzekerheid kan worden gekwantificeerd.



**Figuur 6.5** Voorspelde gewasopbrengstderving ( $M_r$ ) uitgezet tegen de gesimuleerde gewasopbrengstderving ( $Y_r$ ); resultaten zijn weergegeven voor de periode 1991-2020 voor snijmais zonder berekening op een zwak lemige zandgrond met meteorologische gegevens van het weerstation De Bilt.

### 6.3 Bevindingen bij toepassing WWL-tabel

Binnen het project Verbeteren en Valideren van Waterwijzer Landbouw hebben verschillende leden van het consortium de nieuwste WWL-versie 4.0.0 getest in een voorbeeldgebied. Er werd getest op gebruikersvriendelijkheid, maar ook werd nagegaan of de resultaten van de nieuwste versie beter bruikbaar zijn dan WWL-versie 3.0.0 met de focus op de bekende fouten in die oude versie, zoals droogteschade bij sommige kleigronden onder natte omstandigheden. De samenvatting van de bevindingen van deze praktijktoets door het consortium zijn opgenomen in deze paragraaf.

Er zijn op voorhand al enkele kanttekeningen te maken. Door het toepassen van de WWL-tabel in verschillende gebieden zal niet per se een eenduidige verandering in modelresultaten waar te nemen zijn. Een verlaging van de grondwaterstand kan bijvoorbeeld bij een relatief natte uitgangssituatie een positief effect hebben op de landbouwkundige gewasopbrengst, terwijl bij een relatief droge uitgangssituatie een negatief effect verwacht mag worden.

Bij het vergelijken van de modelresultaten van beide WWL-tabelversies speelt ook mee dat het metamodel op een andere manier is afgeleid. Veranderingen in modelresultaten hebben daarmee niet alleen betrekking op de doorgevoerde wijzigingen in de modelconcepten en -parametrisatie (zie paragraaf 3.2), maar ook op de herziene methode voor het afleiden van het metamodel. Er is in deze studie alleen gekeken naar het effect op de langjarig gemiddelde opbrengstderving.

### *Bevindingen ACSG*

De Adviescommissie Schade Grondwater (ACSG) heeft de modelprestaties vergeleken voor een (dek)zandgebied in de Achterhoek dat beïnvloed wordt een grondwateronttrekking van 4 – 5 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Hierdoor richt deze studie zich op het droge domein van WWL, met gemiddeld laagste grondwaterstanden (GLG) van 1.4 m-mv of meer, en gemiddeld hoogste grondwaterstanden (GHG) tussen 0.2 – 2.0 m-mv of nog droger. Omdat hier hoofdzakelijk (melk)veehouderijen voorkomen, zijn de resultaten berekend met gras (maaien). Hoewel de ACSG vooral de verandering van de opbrengstderving als gevolg van winningen beschouwt, vergelijken we hier de resultaten tussen WWL-versie 3.0.0 en WWL-versie 4.0.0 van alleen de situatie met winning. Vanwege het droge karakter van het gebied richt deze studie zich op droogtestress.

### *Resultaten*

In dit gebied neemt de opbrengstderving als gevolg van droogtestress toe in de delen waar de droogtestress al relatief hoog was (15-35%). De lage opbrengstdervingen nemen verder af. Gekeken naar de verschillen tussen bodems (BOFEK), dan valt op dat de (beperkte) droogtestress op de sterk lemige zandgronden verder afneemt. Op de zwak lemige zand- en enkeerdgronden nemen de hogere droogteschades verder toe. De toename van droogteschade komt voor bij het drogere deel in WWL: vanaf een GLG van 2.4 m-mv of dieper (droger).

### *Toelichting WENR*

Bij relatief droge bodemhydrologische condities zien we een lichte toename van droogtestress ten opzichte van WWL-versie 3.0.0. Bij WWL-versie 3.0.0 werd de grondwaterstandskarakteristiek afgekapt op maximaal 3 m-mv. Omdat we bij het afleiden van het nieuwe metamodel beschikken over meer variatie in bodemhydrologische condities (betere dekking van simulaties in het GxG-domein), kappen we de grondwaterstandskarakteristieken nu af op een maximum van 4 m-mv. Als gevolg van deze aanpassing mag een lichte stijging van de berekende droogteschade worden verwacht.

### *Bevindingen Arcadis*

De studie van Arcadis richt zich met name op de gesimuleerde opbrengstderving onder relatief natte bodemhydrologische condities in een laagveengebied met landgebruik gras. De GLG voor de referentiesituatie varieert tussen 0.4 – 1.4 m-mv. De GHG varieert tussen ruim boven het maaiveld en 0.8 m-mv. Voor een hypothetisch vernattingsscenario stijgt de GHG met circa 0.5 m en de GLG met circa 1.0 m.

### *Resultaten*

Voor de referentiesituatie neemt de berekende opbrengstderving fors af ten opzichte van WWL-versie 3.0.0. Opbrengstderving als gevolg van te natte bodemhydrologische condities neemt een orde grootte 30% af (van 50 naar 20%). Onder extreem natte condities wordt zowel bij beide WWL-versies een hoge natschade berekend, maar bij iets drogere bodemhydrologische condities (GLG 0.2 m-mv; GHG 0.05 m-mv) zijn de verschillen groot. WWL-versie 4.0.0 berekent dan 10% opbrengstderving ten opzichte van 80% van WWL-versie 3.0.0. De droogteschade neemt bij WWL-versie 4.0.0 af van 10 naar 0%.

De berekende effecten als gevolg van het vernattingsscenario liggen dicht bij elkaar (orde van grootte van toename opbrengstderving). Wel verandert het patroon waar een toename aan opbrengstderving wordt

---

berekend. WWL-versie 3.0.0 laat grotendeels het patroon zien van de effectkaart van de GHG, terwijl WWL-versie 4.0.0 het patroon laat zien van de effectkaart van de GLG (verdere verspreiding effecten). De bepalende grondwaterstand voor natschade lijkt hier dus veranderd tussen de twee beide WWL-versies.

#### *Toelichting WENR*

De forse afname van opbrengstderving als gevolg van te natte bodemhydrologische condities is waarschijnlijk het gevolg van de herziene methode voor het afleiden van het metamodel. Bij WWL-versie 3.0.0 wordt de zuurstofstress bij zeer natte voorjaarsgrondwaterstanden sterk overschat als gevolg van extrapolatie van de modelresultaten. Bij WWL-versie 4.0.0 beschikken we bij het afleiden van het metamodel over veel meer modelsimulaties die sterker variëren in bodemhydrologische condities. Daarmee wordt de extrapolatie van modelresultaten grotendeels voorkomen. Dit verklaart tevens dat het patroon van de berekende opbrengstderving verandert.

De forse afname van droogtestress kan mogelijk verklaard worden door het hanteren van een andere toewijzingsmethodiek aan stressfactoren. In deze studie zal, gezien de relatief natte bodemhydrologische condities, droogtestress vaak gepaard gaan met zuurstofstress vroeg in het groeiseizoen. In paragraaf 2.2.2 laten we zien dat stress vroeg in het groeiseizoen sterk kan doorwerken in het oogstbare product aan het einde van het groeiseizoen. Bij WWL-versie 4.0.0 zal daardoor relatief meer opbrengstderving worden toegekend aan zuurstofstress.

#### *Bevindingen Haskoning*

Haskoning heeft voor een gebied in Midden-Limburg de WWL-tabel toegepast. Dit gebied wordt gekenmerkt door veel variatie in grondwaterstanden en bodemtypen. Ondiepe grondwaterstanden komen met name voor in de beekdalen en het Maasdal en diepe grondwaterstanden komen voor op de flanken. Rondom de Maas komt lichte klei voor, maar in het gebied komen hoofdzakelijk zandpakketten voor met lokaal veen, leem en moerige afzettingen. Het landgebruik is overgenomen van het grondwatermodel. Bij het toepassen van de WWL-tabel wordt het effect van beregening buiten beschouwing gelaten, hoewel er wel sprake is van beregening in het grondwatermodel.

#### *Resultaten*

Verschillen in berekende opbrengstderving als gevolg van te droge bodemhydrologische condities tussen beide WWL-versies zijn onder andere afhankelijk van het bodemtype en het gewas. Een sterk lemige eerdgrond (BOFEK2020-eenheid 3005) in combinatie met suikerbiet leidt tot een gemiddelde verhoging van 10 – 20% in droogteschade bij WWL-versie 4.0.0. Een zwak lemige zandgrond (BOFEK2020-eenheid 3015) in combinatie met consumptieaardappel leidt tot een gemiddelde verhoging van 5 – 10% in droogteschade ten opzichte van WWL-versie 3.0.0. Bij zandgronden neemt de maximale droogtestress gemiddeld met 15% toe. Sterk tot zwak lemige zandgronden (BOFEK2020-eenheden 3012, 3004 en 3019) in combinatie met zaaiui leidt tot een gemiddelde verlaging van 5 – 30% in droogteschade).

Onafhankelijk van het gewas wordt er een afname van meer dan 10% in zuurstofstress berekend bij kleigronden op homogene ondergrond (BOFEK2020-eenheid 4019 en 4020). Ook bij het gewas tulp wordt een afname van 1 – 5% van de zuurstofstress berekend. In het onderzoek staan dit gewas overal op een zandondergrond. Bij zandgronden en gronden met een zanddek zie je een gemiddelde afname van de maximale zuurstofstress van 20%.

Het verschil tussen de WWL-versies is groter in de berekende droogtestress. Bij bijna alle percelen verandert de berekende droogteschade (vaak 1-5% meer of minder opbrengstderving), terwijl voor de zuurstofstress dezelfde derving berekend wordt met uitzondering van kleigronden en het gewas tulp.

#### *Toelichting WENR*

Zoals bij ACSG hierboven is toegelicht, beschikken we bij het afleiden van het metamodel van WWL-versie 4.0.0 over meer variatie in bodemhydrologische condities. Bij het toepassen van de WWL-tabel hebben we daardoor iets meer bereik in het droge domein (we kappen de grondwaterstandskarakteristieken nu af op 4 m-mv in plaats van 3 m-mv).

De sterke toename in berekende droogteschade bij suikerbiet en consumptieaardappel is ook geconstateerd in paragraaf 3.2. Wanneer de hydrologische condities in het voorjaar relatief nat zijn, wordt de neerwaartse wortelontwikkeling geremd waardoor een oppervlakkig wortelsysteem ontstaat. Vooral bij diep wortelende gewassen leidt dit tot een sterke toename van droogtestress later in het groeiseizoen.

Bij de nieuwe oplevering van WWL wordt het gewas zaaiui met WOFOST gesimuleerd. De overstap van een statische naar een dynamische gewasgroeimodule kan de modelresultaten sterk beïnvloeden. De opbrengstderving wordt nu op een andere manier bepaald, zie paragraaf 2.1.

De afname van zuurstofstress is waarschijnlijk het gevolg van de wijziging in de simulatie van wateropname. Mechanistische wateropname, waar WWL-versie 4.0.0 gebruik van maakt, is efficiënter in het opnemen van water in vergelijking tot de empirische wateropname. De geconstateerde afname van zuurstofstress bij tulp kan daarnaast verklaard worden doordat de nieuwe oplevering van WWL de vernalisatieperiode bij tulp buiten beschouwing laat.

### Bevindingen TAUW

Met de WWL-tabel zijn analyses uitgevoerd voor de provincie Overijssel. Het grondwatermodel MIPWA is gebruikt voor het verkrijgen van grondwaterstandskarakteristieken voor de periode 2012-2020. Het landgebruik is gebaseerd op de Basisregistratie Percelen (BRP) en de meteorologische condities zijn van het weerstation Eelde. In het gehele gebied wordt uitgegaan van berekening.

#### *Resultaten*

De opbrengstderving bij WWL-versie 4.0.0 is over het algemeen kleiner dan bij WWL-versie 3.0.0. Het grootste verschil in gemiddelde opbrengstderving tussen beide Waterwijzerversies treedt op bij grondsoort veen, terwijl het verschil bij zandbodems het kleinst is. Bij WWL-versie 3.0.0 is de opbrengstderving vooral toe te schrijven aan directe effecten zoals zuurstofstress en droogtestress. Daarentegen wordt bij WWL-versie 4.0.0 de opbrengstderving voornamelijk veroorzaakt door indirecte effecten en zijn de directe schadeposten kleiner.

#### *Toelichting WENR*

Bij de studie van TAUW wordt overal berekening toegepast. Een afname van opbrengstderving als gevolg van droogte- en zuurstofstress is dan met name te verklaren door de efficiëntere wateropname bij WWL-versie 4.0.0.

De geconstateerde toename van indirecte effecten ten opzichte van WWL-versie 3.0.0 is het gevolg van de nieuwe methode voor het kwantificeren en specificeren van de opbrengstderving (zie ook paragraaf 3.1 voor meer toelichting).

### Bevindingen Sweco

Sweco heeft voor het beheersgebied van Waterschap Rijn en IJssel analyses uitgevoerd. Bij de analyse worden verschillende landgebruiksvormen in beschouwing genomen, waarbij het LGN-2024 als basis is gebruikt. De grondwaterstandskarakteristieken zijn afkomstig van het AMIGO grondwatermodel. Analyses zijn uitgevoerd met beide WWL-versies en richten zich op de toename van droogtestress die ontstaat door een verlaging van de GLG van 0.4 m en de toename van zuurstofstress die ontstaat door een verhoging van de GHG met 0.4 m.

#### *Resultaten*

De verandering in droogteschade (als gevolg van een verlaging van de GLG met 0.4 m) berekend met beide WWL-versies kunnen lokaal wezenlijk verschillen (meer dan 5%). Over het algemeen is de verandering in droogteschade bij WWL-versie 4.0.0 groter. De verschillen zijn over het algemeen afhankelijk van het bodemtype, het gewas en de GLG. Het effect van een verlaging van de GLG met 0.4 m op de berekende natschade is beperkt. Een verhoging van de GHG met 0.4 m werkt sterk door in de berekende natschade bij zeer natte bodemhydrologische condities. WWL-versie 4.0.0 berekent in deze gevallen minder natschade.

#### *Toelichting WENR*

De studie van Sweco laat zien dat de verschillen tussen beide WWL-versies niet eenduidig zijn. Hoewel over het algemeen meer droogteschade wordt geconstateerd met WWL-versie 4.0.0, zijn er ook bodemprofielen te zien waarbij de verandering in droogtestress minder groot wordt. Een afname van droogtestress kan worden verklaard door de efficiëntere wateropname ten opzichte van WWL-versie 3.0.0. Bodemfysische eigenschappen zijn hierbij mede bepalend in welke mate de wateropname toeneemt ten opzichte van WWL-

---

versie 3.0.0. Een lichte stijging van opbrengstderving als gevolg van droogtestress is te verwachten omdat het bereik in het droge domein van bodemhydrologische condities is vergroot.

Dat een verlaging van de GLG een beperkte invloed heeft op de gesimuleerde zuurstofstress mag worden verwacht. Zuurstofstress zal over het algemeen meer afhangen van de gemiddelde hoogste grondwaterstand.

Zoals toegelicht is bij de studie van Arcadis, wordt bij toepassing van WWL-versie 4.0.0 extrapolatie van modelresultaten grotendeels voorkomen. Dit uit zich in een sterke afname van opbrengstderving als gevolg van te natte bodemhydrologische condities.

Enkele algemene conclusies bij de bevindingen:

- *Verandering droogtestress onder relatief natte en droge bodemhydrologische condities.*  
Over het algemeen zien we bij het toepassen van WWL-versie 4.0.0 een afname van droogtestress onder relatief natte bodemhydrologische condities. Mede omdat uit praktijktoepassingen is gebleken dat de resultaten van WWL-versie 3.0.0 bij die omstandigheden in te grote droogtestress resulteerde, zijn de verbeteringen doorgevoerd zoals beschreven in hoofdstuk 3. De effecten van deze verbetering zien we vooral terug bij de studie van TAUW waar overal in het gebied berekening wordt verondersteld, en die van ACSG. Een afname van droogtestress onder deze condities kan verklaard worden door de efficiëntere wateropname en is dus ook beoogd met de verbetering van het gewasopnameconcept en beworteling. Bij relatief droge condities zien we juist een toename van droogtestress ten opzichte van WWL-versie 3.0.0. Bij WWL-versie 3.0.0 werd de grondwaterstandskarakteristiek afgekapt op maximaal 3 m-mv. Omdat we bij het afleiden van het nieuwe metamodel beschikken over meer variatie in bodemhydrologische condities (betere dekking van simulaties in het GxG-domein), kappen we de grondwaterstandskarakteristieken nu af op een maximum van 4 m-mv. Het toepassingsbereik onder zeer droge omstandigheden wordt daarmee vergroot.
- *Afname van zuurstofstress onder relatief natte bodemhydrologische condities.*  
Bij WWL-versie 3.0.0 werd als gevolg van extrapolatie bij het afleiden van het metamodel de zuurstofstress overschat onder relatief natte bodemhydrologische condities. Dit probleem is bij WWL-versie 4.0.0 verholpen door meer modelsimulaties te realiseren met zeer natte bodemhydrologische condities. Door een betere dekking in het GxG-domein is het minder noodzakelijk om modelresultaten te extrapoleren. De overschatting van zuurstofstress treedt doordoor bij WWL-versie 4.0.0 niet meer op.
- *Toename van indirecte effecten.*  
De geconstateerde toename van indirecte effecten ten opzichte van WWL-versie 3.0.0 is het gevolg van de nieuwe methode voor het kwantificeren en specificeren van de opbrengstderving. De toename van indirecte effecten gaat gepaard met een toename van de potentiële gewasopbrengst (zie ook paragraaf 3.1 voor meer toelichting). Het hanteren van een andere definitie voor de potentiële gewasopbrengst heeft nauwelijks invloed op de simulatie van de actuele gewasopbrengst en daarmee ook niet op een toename of afname van opbrengstderving als gevolg van een hydrologische maatregel.

In het algemeen werd de gebruiksvriendelijkheid van de verbeterde WWL-tabel versie 4.0.0 positief beoordeeld of minimaal vergelijkbaar met de vorige versie. De veranderingen in de modelresultaten als gevolg van doorgevoerde wijzigingen en herziene methode voor het afleiden van het metamodel werden ook positief beoordeeld. Geconstateerde problemen met betrekking tot overschatting van zuurstofstress als gevolg van extrapolatie zijn met de nieuwe oplevering van WWL verholpen. Daarnaast wordt de toename van droogteschade onder relatief droge bodemhydrologische condities als aannemelijk beschouwd. Wel is het jammer dat er nog steeds niet gerekend kan worden voor alternatieve gewassen omdat de parametrisatie daarvoor ontbreekt. Tot slot zijn door verschillende leden van het consortium suggesties aangedragen ter verbetering van de handleiding van de WWL-tabel. Bij de definitieve oplevering van de WWL-tabel zal hiermee rekening worden gehouden.

# 7 Conclusies en aanbevelingen

Waterwijzer Landbouw (WWL) is het veel toegepaste instrumentarium voor het bepalen van effecten van ingrepen in hydrologie en veranderingen in klimaat op landbouwkundige opbrengst. In 2018 is de eerste versie van WWL uitgebracht en sindsdien zijn verschillende verbeteringen doorgevoerd. Ook na de oplevering van WWL-versie 3.0.0 in 2021 bleven er enkele hardnekkige problemen bestaan. Dit was de aanleiding om het TKI-project Verbetering en Validatie van Waterwijzer Landbouw (VV-WWL; 2024-2025).

Bij de aanpassingen aan WWL is ook in deze studie steeds centraal blijven staan dat WWL gebaseerd is op kennis van de processen (voor o.a. wateropname, zuurstofopname, wortelontwikkeling, vochtverdeling) in de wisselwerking tussen bodem-water-plant en atmosfeer. Hierbij wordt steeds de afweging gemaakt of het toevoegen van meer detail in de berekeningen bijdraagt aan verbeterde simulaties en uitkomsten, of dat meer detail juist zorgt voor meer onzekerheid, bijvoorbeeld doordat parameterwaarden niet bekend zijn. Uitgangspunt is dat de berekeningswijze transparant en reproduceerbaar is.

Inzichten in (het effect van) aanpassingen in verschillende concepten binnen WWL, zoals onderzocht binnen dit project, worden hier kort samengevat en voorzien van conclusies en eventueel aanbevelingen. Het betreft achtereenvolgens aanpassingen in de berekeningswijze van de processen, toetsing, inzicht in effecten van klimaatverandering en de opzet van het metamodel binnen WWL.

## *Doorgevoerde wijzigingen Waterwijzer Landbouw*

Met WWL-versie 3.0.0 werden op gronden met zware tot zeer zware klei in het bodemprofiel onrealistisch hoge droogteschades berekend bij relatief natte bodemhydrologische condities. Op basis van uitvoerige analyses in de afgelopen jaren is duidelijk geworden dat dit modelgedrag werd veroorzaakt door een combinatie van factoren. Zo kan als gevolg van relatief natte bodemhydrologische condities een oppervlakkig (gemodelleerd) wortelsysteem ontstaan. Wanneer zich later in het groeiseizoen een droge meteorologische periode aandient, is voor het oppervlakkige wortelstelsel minder bodemvocht beschikbaar. Dit komt vervolgens tot uiting in de vorm van droogtestress. Om dit proces mee te nemen in de simulaties is een aanpassing gedaan in de ontwikkeling van het wortelprofiel, afhankelijk van water- en zuurstofbeschikbaarheid.

Deze studie laat zien dat door mechanistische wateropname te combineren met adaptieve wortelontwikkeling realistischere modelresultaten worden verkregen zowel voor een typische kleiregio (gemeente Altena) als een zandregio (stroomgebied De Raam). Tegelijkertijd laat deze studie zien dat het specifiek toewijzen van stressfactoren aan te droge of te natte condities gepaard gaat met onzekerheid. De specificatie van de totale opbrengstderiving in verschillende stressoren betreft daarom slechts een indicatie. Het wordt aanbevolen om bij het vergelijken van verschillende hydrologische uitgangspunten de focus te leggen op de verandering van de actuele gewasopbrengst en daarmee de verandering van de totale opbrengstderiving.

Het mechanistische wateropnameconcept sluit goed aan op het zuurstofconcept volgens Bartholomeus (2008), dat macrodiffusie van zuurstof (vanuit het oppervlak door de bodem) en microdiffusie (vanuit de bodemporiën naar de wortel) combineert. Uit de gevoeligheidsanalyses (Bijlage D) blijkt dat het model niet gevoelig is voor de onderzochte aanpassingen in de parameters en in de berekening van de macrodiffusie bij de huidige modelkeuzes. Dit onderzoek laat daarmee zien dat de keuzes die gemaakt zijn in de parametrisatie van de zuurstofroutine robuust zijn. De parameters zijn gebaseerd op waarden in de wetenschappelijke literatuur en variaties in de parameters hebben maar weinig effect op de berekende zuurstofstress.

Naast de bovengenoemde aanpassingen zijn ook wijzigingen doorgevoerd met betrekking tot de atmosferische watervraag en de simulatie van verdamping en gewasontwikkeling. Het gewas zaaiui wordt nu met het dynamische gewasgroeimodel WOFOST gesimuleerd en de modelparametrisatie van aardappel heeft een update gekregen zodat we nu onderscheid kunnen maken in verschillende aardappelvariëteiten. Het is helaas niet direct mogelijk om voor alternatieve gewassen WWL toe te passen omdat de parametrisatie daarvoor ontbreekt.

---

Voor het rekening houden met de beschikbaarheid van stikstof en effecten van verzilting in WWL zijn beschouwende verkenningen uitgevoerd. Dit komt voort uit de wens om de landbouwpraktijk beter te kunnen simuleren met meer dan alleen hydrologische effecten (waterkwantiteit). Verkend is hoe de beschikbare kennis zo te ontsluiten en te implementeren is, dat het WWL-modelinstrumentarium toegankelijk blijft voor de gebruiker van WWL.

Binnen WWL zijn dus verschillende concepten nader geanalyseerd en zijn conceptuele aanpassingen doorgevoerd die moeten leiden tot een betere resultaten van WWL.

### *Validatie Waterwijzer Landbouw*

Modellen zijn altijd een beperkte representatie van de werkelijkheid. Om te weten hoe bruikbaar simulatiemodellen zijn is toetsing en validatie nodig. Tegelijkertijd is toetsing en validatie van WWL lastig, want gewasopbrengstderving wordt niet direct gemeten. Deze studie richt zich daarom vooral op de simulatie van de actuele gewasopbrengst. Wanneer het modelinstrumentarium de actuele gewasopbrengst goed weet te benaderen geeft dat vertrouwen in de gesimuleerde opbrengstderving, zowel bij de ontwikkelaars als bij de gebruikers.

Toetsing van modeluitkomsten aan observaties verkregen uit gecontroleerde veldproeven laten duidelijke overeenkomsten zien. Ten opzichte van WWL-versie 3.0.0 zien we een verbetering in de modelprestaties, maar omdat deze dataset ook is gebruikt voor de modelparametrisatie van de adaptieve wortelontwikkeling mag dat ook worden verwacht.

Voor een onafhankelijke validatie is een vergelijking gemaakt met gegevens van het BedrijvenInformatieNet (BIN). De gegevens van het BIN worden per bedrijf verzameld zodat per gewas informatie beschikbaar is over de gerealiseerde gewasopbrengst van het betreffende jaar. Een bedrijf beschikt echter vaak over meerdere percelen die onderling kunnen variëren in bodem en hydrologische condities. Dat zorgt ervoor dat de vergelijking tussen de gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengsten niet helemaal zuiver verloopt en een 1:1-vergelijking niet mogelijk is.

Daarnaast worden verschillende definities gehanteerd voor de gewasopbrengst. WWL drukt de gesimuleerde gewasopbrengst uit in kilogram droge stof per hectare, terwijl de gerealiseerde gewasopbrengsten met betrekking tot akkerbouwgewassen in versgewicht worden uitgedrukt en gewasopbrengsten betreffen die daadwerkelijk zijn verkocht. Bij de vergelijking met BIN-gegevens richten we ons daarom vooral op de samenhang tussen gerealiseerde en gesimuleerde gewasopbrengsten. Voor de meeste akkerbouwgewassen is deze samenhang (een positieve correlatie) terug te zien in de modelprestaties, maar voor wintertarwe en pootaardappel niet. De samenhang bij de gewasopbrengst van gras en mais laat veel spreiding zien voor verschillende combinaties van grondsoort en grondwatertrapklassen. De gerealiseerde gewasopbrengsten van gras en snijmais zijn echter gebaseerd op schattingen en niet op waarnemingen. De gerealiseerde grasopbrengst is hierbij een sluitpost, waarbij een fout in de schatting van de snijmaisopbrengst doorwerkt in de berekende grasopbrengst (wanneer een bedrijf ook snijmais teelt).

Geconcludeerd wordt dat de validatie op basis van BIN-gegevens door de aard van de gegevens moeilijk uitvoerbaar is, maar wel een positieve relatie met de SWAP-WOFOST-resultaten toont.

### *Effect van klimaatverandering*

Als gevolg van klimaatverandering zal het wateraanbod (neerslag) veranderen, vervolgens beïnvloedt dit de potentiële gewasopbrengst en daarmee de waterbeschikbaarheid in relatie tot de watervraag van het gewas (behorende bij een optimale gewasontwikkeling).

Door klimaatverandering zien we een toename van neerslag in de wintermaanden en een afname van neerslag in de zomermaanden. Een hogere CO<sub>2</sub>-concentratie verhoogt de potentiële gewasopbrengst van C3-gewassen, terwijl dit bij C4-gewassen geen effect heeft. Daarnaast zal ook de watervraag van het gewas worden beïnvloed door klimaatverandering. Voor een juiste vergelijking met de huidige klimatologische condities moet worden uitgegaan van dezelfde uitgangspunten (conversiemethoden) voor de bepaling van de watervraag. Deze studie laat zien dat het aan te bevelen is om correctiefactoren toe te passen voor de bepaling van de actuele vochtspanning en de windsnelheid. Na het doorvoeren van de correctiefactoren zien we een toename van de watervraag voor de meeste gewassen die sterker wordt naarmate er meer broeikasgassen worden uitgestoten. Deze inzichten worden meegenomen in de verdere ontwikkeling van klimaatprojecties binnen WWL.

## *Metamodel Waterwijzer Landbouw*

Voor het afleiden van het nieuwe metamodel is het aantal uitgevoerde modelsimulaties flink toegenomen. Dit heeft geresulteerd in een verbeterde dekking van modelsimulaties in het GxG-domein en heeft ervoor gezorgd dat de problemen met betrekking tot overschatting van zuurstofstress (als gevolg van extrapolatie) zijn verholpen.

Met de vernieuwde methodiek maken we ook inzichtelijk in hoeverre het metamodel in staat is de gesimuleerde opbrengstderving te benaderen en geven daarmee inzicht in de onzekerheid van de voorspelling. Naast de voorspelling van gewasopbrengstderving inclusief de onzekerheid van de voorspelling, maakt het nieuwe metamodel ook een voorspelling van de irrigatiegiften.

Door een aantal gebruikers is de nieuwste versie van de WWL-tabel getoetst op gebruikersvriendelijkheid, maar ook op verbetering van de resultaten ten opzichte van WWL-versie 3.0.0. De WWL-tabel is daarbij toegepast in verschillende gebieden in Nederland. De bevindingen zijn over het algemeen positief vanwege de modelverbeteringen en het grotere toepassingsbereik onder zeer droge bodemhydrologische omstandigheden.

Geconcludeerd wordt dat met het nieuwe metamodel van WWL eerdere tekortkomingen zijn verholpen. De eerste ervaringen met het toepassen ervan zijn positief. Verdere uitrol en gebruik van WWL moet inzicht geven in het algemene draagvlak van WWL bij verschillende belanghebbenden.

### *In hoeverre is aan de projectdoelstellingen voldaan?*

Hieronder volgt een samenvatting van de behaalde resultaten per projectdoelstelling uit hoofdstuk 2.

Doelstelling a. Verbeteren WWL-instrumentarium (bestaande uit de producten WWL-tabel, WWL-regionaal en WWL-maatwerk) door middel van het toepassen van microscopische wateropname en adaptieve wortelontwikkeling in SWAP en dit verbeterde instrumentarium toetsen aan de hand van pilotstudies in gebieden met verschillende bodemtypen.

De in Hoofdstuk 3 beschreven wijzigingen hebben geleid tot logischere modelresultaten en een betere toepasbaarheid zoals gebleken uit de toepassing voor pilotgebieden en ook uit de uitgevoerde validatie (Hoofdstuk 4) en praktijkvoorbeelden (Hoofdstuk 6).

Doelstelling b. Aanvullen en verbeteren van gewasparameters om voor huidige en eventuele nieuwe gewassen de berekeningen met WOFOST te kunnen verbeteren.

Voor een aantal gewassen zijn nieuwe gewasparameters beschikbaar om WWL te moderniseren. Dit betreft zaaiui en variëteiten van aardappel. Het is helaas niet mogelijk gebleken om WWL geschikt te maken voor nieuwe gewassen omdat daarvoor geen modelparametrisatie kan worden gerealiseerd.

Doelstelling c. Verkennen in hoeverre het mogelijk is om in WWL ook rekening te houden met stikstofbeschikbaarheid en rekening te houden met zoutstress als gevolg van toenemende verzilting.

Uit de verkenningen zoals beschreven in Hoofdstuk 3 zijn aanbevelingen geformuleerd hoe in de toekomst zowel stikstofbeschikbaarheid als zoutstress aan het modelinstrumentarium kan worden toegevoegd.

Doelstelling d. Inzicht geven in effecten van de doorgevoerde verbeteringen (doelstelling a en b) door validatie van het instrumentarium aan oude en nieuwe datasets.

in Hoofdstuk 4 is de validatie op basis van oude en nieuwe datasets beschreven. De nieuwe WWL-resultaten zijn beter dan die van de oude WWL-versie. Uit de toepassing voor pilotgebieden, zoals beschreven in Hoofdstuk 3, en uit de praktijkvoorbeelden die zijn beschreven in Hoofdstuk 6 komt ook het beeld naar voren van een positieve beoordeling van de nieuwe WWL-versie qua toepassingsbereik en bruikbaarheid van de resultaten.

Doelstelling e. Uitbrengen van een nieuwe release van de WWL-tabel, waarbij ook aandacht wordt gegeven aan de KNMI-klimaatscenario's 2023.

De nieuwe release komt gelijktijdig met het uitbrengen van dit rapport beschikbaar op de WWL-website (<https://waterwijzerlandbouw.wur.nl/>).

---

Doelstelling f. Inzicht geven in effect van onzekerheid van het model en gevoeligheid voor onzekerheid in de invoerdata om zo te kwantificeren wat de betrouwbaarheid is van het instrumentarium.

Omdat de WWL-tabel op een andere manier is afgeleid dan de vorige versie (zie Hoofdstuk 6), is het mogelijk geworden om ook informatie over onzekerheid in de resultaten op te nemen. Deze onzekerheid heeft voornamelijk betrekking op de mate waarin het metamodel de modelresultaten van SWAP-WOFOST kan reproduceren. Daarnaast is het belangrijk te beseffen dat er ook onzekerheid bestaat in de gehanteerde modelinvoer, parametrisatie en concepten. Afhankelijk van de beschikbare informatie gaat dit gepaard met grotere of kleinere mate van onzekerheid. Dat laatste is echter niet meegenomen in de gekwantificeerde onzekerheid.

Doelstelling g. Uitvoeren van een praktijktoets door gebruikers van het verbeterde WWL-instrumentarium.

Door een aantal gebruikers in het consortium is de nieuwste versie van de WWL-tabel getoetst op gebruikersvriendelijkheid, maar ook op verbetering van de resultaten ten opzichte van WWL-versie 3.0.0. De WWL-tabel is daarbij toegepast in verschillende gebieden in Nederland. De bevindingen zijn over het algemeen positief vanwege de modelverbeteringen en het grotere toepassingsbereik onder zeer droge bodemhydrologische omstandigheden.

Doelstelling h. Delen van de opgedane kennis en resultaten met belanghebbenden en netwerkpartners.

Om te beginnen zijn de resultaten gedeeld via dit rapport, via de toetsing door consortiumpartners en via de website. In de nabije toekomst zullen de resultaten worden gedeeld via de jaarlijkse gebruikersmiddag van de waterwijzers en via WWL-webinars. Het is de bedoeling om in overleg met LTO specifieke webinars te organiseren voor de bodemadviseurs van Regionale Bodemteams.

In algemene zin is het overkoepelende doel ook om door verbetering en validatie een situatie te creëren waarbij de gebruikers van WWL met meer vertrouwen het instrumentarium kunnen toepassen. Naast inhoudelijke validatie is daarom juist een praktijktoets door verschillende gebruikers in het consortium uitgevoerd. De bevindingen zijn positief en de toekomst zal uitwijzen hoe groot het vertrouwen in het instrumentarium is.

# Literatuur

- Aarts, H.F.M., Daatselaar, C.H.G. en Holshof, G. (2008). Bemesting, meststofbenutting en opbrengst van productiegrasland en snijmaïs op melkveebedrijven. Wageningen, Plant Research International, Rapport 208.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, R., Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 56. 26-40.
- Anooja, T., Yadav, B.K., Simunek, J. (2024). Water uptake by plants under nonuniform soil moisture conditions: A comprehensive numerical and experimental analysis. *Agricultural Water Management* (292), article 108668. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108668>.
- Bakema, G., Bloem, J., Heinen, M., Knotters M., van Rooijen, N. (2022). De invloed van klimaatverandering op de bodemtemperatuur. Inventarisatie van de ontwikkeling van de bodemtemperatuur en de invloed op de biotische en abiotische processen in natuurgebieden. Rapport 3154, Wageningen Environmental Research, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/566436>.
- Bakker, G., Heinen, M., Gooren, H. P. A., de Groot, W. J. M., Assinck, F. B. T., & Hummelink, E. W. J. (2019). Hydrofysische gegevens van de bodem in de Basisregistratie Ondergrond (BRO) en het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS): Update 2018 (No. 149). WOT Natuur & Milieu.
- Bartholomeus, R.P., Witte, J.P.M., van Bodegom, P.M., van Dam, J.C., Aerts, R. (2008). Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology* 360: 147-165.
- Berghuijs, H.N.C., Vasco Silva, J., Reidsma, P., de Wit, A.J.W. (2024). Expanding the WOFOST crop model to explore options for sustainable nitrogen management: A study for winter wheat in the Netherlands. *European Journal of Agronomy* 154, 127099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127099>.
- Boogaard, H.L., de Wit, A.J.W., te Roller, J.A., van Diepen, C.A. (2011). User's guide for the WOFOST Control Center 1.8 and WOFOST 7.1.3 crop growth simulation model. Wageningen.
- Bouwmans, J.M.M. (1990). Achtergrond en toepassing van de TCGB-tabel. Een methode voor het bepalen van de opbrengstdepressie van grasland op zandgrond als gevolg van een grondwaterstandsverlaging. Technische Commissie Grondwater Beheer, Utrecht.
- Braden, H. (1985). Ein Energiehaushalts- Und Verdunstungsmodell for Wasser Und Stoffhaushaltsuntersuchungen Landwirtschaftlich Genutzer Einzugsgebiete. *Journal Article. Mittlungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft* 42: 294-99.
- Buijs, S., Blokland, P.W., Vrijhoef, A., Brussée, T.J., van Duijnen, R., Doornewaard, G.J., Daatselaar, C.H.G. (2024). Landbouwpraktijk en waterkwaliteit op landbouwbedrijven aangemeld voor derogatie in 2022. Wageningen University & Research. RIVM-rapport 2024-0064. DOI: <https://doi.org/10.21945/RIVM-2024-0064>.
- Campbell, G.S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science* 117(6): 311-314.
- Dalton F.N., Raats P.A.C., Gardner W.R. (1975). Simultaneous uptake of water and solutes by plant roots, *Agronomy Journal*, 67, 334-339.
- de Jong Van Lier, Q, van Dam, J.C., Metselaar, K. (2009). Root Water Extraction under Combined Water and Osmotic Stress. *Soil Science Society of America Journal* 73: 862-875. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0157>.
- de Lange, W.J., Prinsen, G.F., Hoogewoud, J.C., Veldhuizen, A.A., Verkaik, J., Oude Essink, .H.P., van Walsum, P.E.V., Delsman, J.R., Hunink, J.C., Massop, H.T.L., Kroon, T. (2014). An operational, multi-scale, multi-model system for consensus-based, integrated water management and policy analysis: The

- 
- Netherlands Hydrological Instrument. Environ. Modelling Software, 59 (2014), pp. 98-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.009>.
- de Willigen, P., van Noordwijk. (1989). Roots, plant production and nutrient use efficiency. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen, the Netherlands. <https://edepot.wur.nl/202228>.
- de Willigen, P., Janssen, B.H., Heesmans, H.I.M., Conijn, J.G., Velthof, G.J., Chardon W.J. (2008). Decomposition and accumulation of organic matter in soil. Comparison of some models. Alterra-report 1726, Wageningen, the Netherlands. <https://edepot.wur.nl/15401>.
- de Willigen, P., van Dam, J.C., Javaux, M., Heinen, M. (2012). Root water uptake as simulated by three soil water flow models. Vadose Zone J. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0018>.
- de Wit, A.J.W., Boogaard, H.L., Fumagalli, D., Janssen, S., Knapen, R., van Kraalingen, D., Supit, I., van der Wijngaart, R., van Diepen, K. (2019). 25 Years of the WOFOST Cropping Systems Model. Agricultural Systems 168 (januari): 154-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.018>.
- Dijkstra, J.P., Hack-ten Broeke, M.J.D., Wijnands, F.G., Kroonen-Backbier, B.M.A. (1995). Stikstofemissie naar het grondwater van geïntegreerde en gangbare bedrijfssystemen in de akkerbouw op proefboerderijen Borgerswold en Vredepeel; Simulatie van de vocht- en nitraathuishuiding op de proefboerderij Vredepeel voor de jaren 1990-1993. Rapport 287.2. DLO-Staring Centrum. <https://edepot.wur.nl/302997>.
- Dik, P.E., Mulder, H.M. (2024). Bepalen Penman-Monteith gewasweerstanden; Gestandaardiseerde conversie van Makkink-gewasfactoren naar Penman-Monteith gewasweerstanden, documentatie R-script en toepassing voor het NHI. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3340. DOI: <https://doi.org/10.18174/654383>.
- Elbers, J.A., Moors, E.J., Jacobs, C.M.J. (2010). Gemeten actuele verdamping voor twaalf locaties in Nederland. STOWA rapport 2010-36. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/163481>.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen. 189 pp.
- Feddes, R.A. (1987). Crop Factors in Relation to Making Reference Crop Evapotranspiration. Book Section. Evaporation and Weather. Proceedings and Information (39), 33-46. TNO Committee on Hydrological Research, Utrecht, The Netherlands.
- Fierer, N., Craine, J.M., McLauchlan K., Schimel J.P. (2005). Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition. Ecology 86(2): 320-326.
- Gash, J.H.C., Lloyd, C.R., Lachaud, G. (1995). Estimating Sparse Forest Rainfall Interception with an Analytical Model. Journal Article. *Journal of Hydrology* 170 (1-4): 79-86. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02697-N](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02697-N).
- Groenenberg, J.E., van der Salm, C., Westein, E., Groenendijk, P. (2000). Gevoeligheidsanalyse en beperkte onzekerheidsanalyse van het model ANIMO. Alterra-rapport 200, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/81207>.
- Groenendijk, P., Renaud, L.V., Roelsma, J. (2005). Prediction of nitrogen and phosphorus leaching to groundwater and surface waters : process descriptions of the animo4.0 model. Alterra-rapport 983, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/35121>.
- Groenendijk, P., Boogaard, H., Heinen, M., Kroes, J., Supit, I., de Wit, A. (2016). Simulation of nitrogen-limited crop growth with SWAP / WOFOST. Report 2721. Wageningen Environmental Research, Wageningen, The Netherlands. <https://edepot.wur.nl/400458>.
- Hack-ten Broeke, M., Bakker, G., Verdonschot, R., America, I., Delsman, J., Oude Essink, G., Bartholomeus, R., Geurts, J., Raat, K., van Geest, G. (2025). Programmaplan; Omgaan met zout in landbouw, natuur en waterbeheer.
- Heinen, M., de Willigen, P. (1998). FUSSIM2 A two-dimensional simulation model for water flow, solute transport and root uptake of water and nutrients in partly unsaturated porous media, Quantitative Approaches in Systems Analysis No. 20, DLO Research Institute for Agrobiological and Soil Fertility and the C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology, Wageningen, The Netherlands, 140 p. <https://edepot.wur.nl/4408>.

- Heinen, M. (2001). FUSSIM2: brief description of the simulation model and application to fertigation scenarios. *Agronomie* 21: 285-296. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro:2001124>.
- Heinen, M. (2005). Beschrijving module OSmanSoil. Een eenvoudig bodemmodel voor de beschrijving van waterbeweging, convectief stikstoftransport, water- en stikstofopname, denitrificatie, nitrificatie en mineralisatie. Alterra-rapport 1261, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/94927>.
- Heinen M., de Willigen, P. (2005). Vergelijking van de organische stofmodellen MOTOR en MINIP. Alterra-rapport 1260, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/17572>.
- Heinen M. (2006). Simplified denitrification models: overview and properties. *Geoderma*, 133(3-4): 444-463. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.06.010>.
- Heinen, M., Bakker, G., Wösten, J.H.M. (2020a). Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks – Update 2018. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2978.
- Heinen, M., Assinck, F., Groenendijk P., Schoumans, O. (2020b). Soil Dynamic Models: Predicting the Behavior of Fertilizers in the Soil. In: E. Meers, G. Velthof, E. Michels and R. Rietra (eds.), *Biorefinery of Inorganics: Recovering Mineral Nutrients from Biomass and Organic Waste*, First Edition. Chapter 8.2, 405-435. John Wiley & Sons Ltd.
- Heinen, M., Brouwer, F., Teuling, C., Walvoort, D.J.J. (2021). BOFEK2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland: update bodemfysische eenhedenkaart. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3056. DOI: <https://doi.org/10.18174/541544>.
- Heinen, M., Mulder, H.M., Bakker, G., Wösten, J.H.M., Brouwer, F., Teuling, K., Walvoort, D.J.J. (2022). The Dutch soil physical units map: BOFEK. *Geoderma* (427), 116123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116123>.
- Heinen M., Mulder., M. (2023). Microscopische wateropnamemodellen en dynamische wortelverdeling in SWAP. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3145. <https://edepot.wur.nl/583541>.
- Heinen, M., Mulder, M., van Dam, J., Bartholomeus, R., de Jong van Lier, Q., de Wit, J., de Wit, A., Hack-ten Broeke, M. (2024). SWAP 50 years: Advances in modelling soil-water-atmosphere-plant interactions. *Agricultural Water Management* (298) 108883, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108883>.
- Heinen, M., Mulder, H.M. (2024). Simulatie van wateropname in SWAP-WOFOST: van een empirische naar een mechanische beschrijving. *Stromingen: vakblad voor hydrologen* 30 (1), 5-16. <https://edepot.wur.nl/661074>.
- Hoeven, P.C.T., Warmerdam, P.M.M., Kole, J.A. (2005) Description of the Castricum lysimeters 1941-2000, The Netherlands, comparison of rain gauges and throughfall. Proceedings of international conference on forest impact on hydrological processes and soil erosion, Yundola, Bulgaria. Publishing House of the University of Forestry, Sofia. P. 154-159.
- Hoving, I.E., van Riel, J.W., Massop, H.T.L., Hendriks, R.F.A., van den Akker, J.J.H., van Houwelingen, K. (2021). Precisiewatermanagement op veenweidegrond met pompgestuurde onderwaterdrains: rapportage onderzoeksperiode 2016-2020. Wageningen, Wageningen Livestock Research rapport 1293. <https://edepot.wur.nl/540343>.
- Hurkmans, R. (2023). Kalibratie gewasweerstand Penman-Monteith; Niet-landbouwoppervlakken. HKV-rapport.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Jagtenberg, W.D. (1962). Het droge-stofgehalte van weidegras. *Landbouwvoorlichting*, 19(11), 626-636. <https://edepot.wur.nl/382255>.
- Janssen, B.H. (1984). A simple method for calculating decomposition and accumulation of 'young' soil organic matter. *Plant and Soil* 76: 297-304. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-6101-2\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-009-6101-2_26).
- Janssen, B.H. (1986a). Een één-parametermodel voor de berekening van de decompositie van organisch materiaal. *Vakblad voor Biologen* 66(20): 433-436.

- 
- Janssen, B.H. (1986b). Nitrogen mineralization in relation to C:N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and Soil* 181: 39-45. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5450-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5450-5_13).
- KNMI (2023). KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland. KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03.
- Knotters, M., Walvoort, D., Gerritsen, P. (2022). Mapping water table depths in wetlands and polder areas by probability sampling. *J. Geoderma*, 422, 115928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115928>.
- Kroes, J.G., Bartholomeus, R.P., van Dam, J.C., Hack-ten Broeke, M.J.D., Supit, I., Hendriks, R.F.A., de Wit, A.J.W. (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., van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I., van Walsum, P.E.V. (2017). SWAP version 4. Theory description and user manual. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 2780. <https://edepot.wur.nl/416321>.
- Maas, E.V., Hoffman, G.J. (1977). Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. and Drainage Div., ASCE* 103, 115-134.
- Massop, H.Th.L., van Bakel, P.J.T., Kroon, T., Kroes, J.G., Tiktak A., Werkman, W. (2005). Op zoek naar de 'ware' neerslag en verdamping; Toetsing van de met het STONE 2.1-instrumentarium berekende verdamping aan literatuurgegevens en aan regionale waterbalansen, en de gevoeligheid van het neerslagoverschot op de uitspoeling van nutriënten. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1158. Reeks Milieu en Landelijk gebied 28.
- Moldrup, P., Olesen, T., Schjønning, P., Yamaguchi T., Rolston D.E. (2000). Predicting the Gas Diffusion Coefficient in Undisturbed Soil from Soil Water Characteristics. *Soil Science Society of America Journal* 64(1): 94-100.
- Mulder, H.M., Veldhuizen, A.A. (2014). AGRICOM 2.01: Theorie en gebruikershandleiding. Alterra, Alterra-rapport 2576. <https://edepot.wur.nl/328377>.
- Mulder, H.M., van Huijgevoort, M., Bartholomeus, R., Hack-ten Broeke, M.J.D. (2019). Pilottoepassingen van Waterwijzer Landbouw in Laag Nederland. STOWA, Amersfoort, STOWA rapport 2019-31.
- Mulder, H.M., Dik, P., Heinen, M., Bartholomeus, R., van Dam, J.C., Hack-ten Broeke, M.J.D. (2021). Opties binnen Waterwijzer Landbouw in 2020; van WWL-tabel versie 2.0.0 tot maatwerk met WWL-regionaal. STOWA, Amersfoort, STOWA rapport 2021-03.
- Mulder, H.M., Meijninger, W.M.L., Hack-ten Broeke, M.J.D. (2021). 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., Hack-ten Broeke, M.J.D., Meijninger, W.M.L. (2023). Validatie waterwijzer landbouw. Wageningen, Wageningen Environmental Research rapport 3248; STOWA rapport 2023-10. <https://edepot.wur.nl/591168>.
- Mulder, H.M., Stuurup, J. (2025). Gemodelleerde onzekerheid van landbouwkundige gewasopbrengst en opbrengstderving. Wageningen Environmental Research. DOI: <https://doi.org/10.18174/697931>.
- Nijp, J., Bartholomeus, R., de Wit, J., Clevers, S., Dorland, E., Reinds, G.J., Kros, H., Fujita, Y., Hoefsloot, P., Witte, J.Ph.M. (2022). Waterwijzer natuur - fase 3: klimaatrobuuste modellering van effecten van zuur- en stikstofdepositie op natuur. Rapport 2022-08, STOWA, Amersfoort.
- Oude Voshaar, J.H. (1994). Statistiek voor onderzoekers; met voorbeelden uit landbouw- en milieuwetenschappen. Wageningen Pers. Wageningen. <https://edepot.wur.nl/264166>.
- Peerboom, J., van den Hurk, B., van Waveren, H. (2022). WWL: 'fit for purpose' of niet? Wetenschappelijke Adviescommissie NHI/NWM beoordeelt Waterwijzer Landbouw. *Stromingen: vakblad voor hydrologen* 28 (1), 19-23.
- Poppe, K.J. (2004). Het Bedrijven-Informatienet van A tot Z. Lei.

- Rappoldt, C., Heinen, M., Groenendijk, P. (2008). Coupling Animo with Fussim. Technical documentation of the coupled model running in the Fortran Simulation Environment version 4.4. EcoCurves rapport 9, EcoCurves, Haren. <https://edepot.wur.nl/133820>.
- Ravensbergen, A.P.P., van Ittersum, M.K., Kempenaar, C., Ramsebner, N., de Wit, D., Reidsma, P. (2023). Coupling field monitoring with crop growth modelling provides detailed insights on yield gaps at field level: A case study on ware potato production in the Netherlands. *Field Crops Research* (308), 109295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109295>.
- Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C., and Morton, A.J. (1971). A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican Pine, *Agr. Meteorol.*, 9, 367–384.
- Schipper, P.N.M., Heinen, M., Janssen, P., Stuyt, L., Dik, P. (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>.
- Smith, M., Allen, R., Monteith, J.L., Perrier, A., Santos Pereira, L., Segeren, A. (1992). Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Land and Water Development Division, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Snijders, P.J.M., Woldring, J.J., Geurink, J.H., van der Meer, H.G. (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., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D. (2012). Crop yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper 66. Food; agriculture organisation of the United Nations.
- Stolk, P.C., Hendriks, R.F.A., Jacobs, C.M.J., Duyzer, J., Moors, E.J., van Groenigen, J.W., Kroon, P.S., Schrier-Uijl, A.P., Veenendaal, E.M., Kabat, P. (2011). Simulation of Daily Nitrous Oxide Emissions from Managed Peat Soils. *Vadose Zone Journal* 10 (1): 156–68. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0029>.
- Stolk, P.C., Kroes, J.G. (2012). Water en nutriënten gelimiteerde gewasopbrengst : koppeling van de modellen SWAP-ANIMAO-WOFOST. Alterra-rapport 2346. Alterra, Wageningen-UR. <https://edepot.wur.nl/221614>.
- Stuyt, L.C.P.M., Blom-Zandstra, M. Kselik, R.A.L. (2016). Inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van bestaande gegevens. Wageningen Environmental Research, Rapport 2739.
- ten Den, T., Ravensbergen, A.P.P., van de Wiel, I., de Wit, A., van Evert, F.K., van Ittersum, M.K., Reidsma, P. (2024). Simulating water-limited potato yields across the Netherlands with (SWAP-) WOFOST: Experimentation, model improvement and evaluation. *Agricultural Water Management* (302), 109011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109011>.
- van Bakel, P.J.T., Huinink, J., Prak, H., van der Bolt, F.J.E. (2005). HELP-2005, uitbreiding en actualisering van de HELP-tabellen ten behoeve van het Waterlood-instrumentarium. STOWA rapport 2005-16. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). <https://edepot.wur.nl/27040>.
- van Bakel, P.J.T., Blom-Zandstra M., Stuyt, L.C.P.M. (2018). Zouttolerantie van gewassen afhankelijke van het groeistadium? Resultaten van een literatuuronderzoek. Wageningen Environmental Research, Rapport 2897.
- van der Bolt, F.J.E., Kroon, T., Groenendijk, P., Renaud, L.V., van den Roovaart, J., Janssen, G.M.C.M., Loos, S., Cleij, P., van der Linden, A., Marsman, A. 2020. Het landelijke waterkwaliteitsmodel. Uitbreiding van

---

het nationaal water model met waterkwaliteit ten behoeve van berekeningen voor nutriënten. Rapport 3005, Wageningen Environmental Research, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/524769>

- van Genuchten, M.Th., Hoffman, G.J. (1984). Analysis of crop salt tolerance data. In: I. Shainberg and J. Shalhevet, *Soil Salinity under Irrigation, Processes and Management*, pp. 258-271. *Ecological Studies* 51, Springer-Verlag, Berlin.
- van Genuchten, M.Th. (1987). A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. USDA, ARS, US Salinity Laboratory, Riverside, CA.
- van Groenigen, J.W., Georgius, P.J., van Kessel, C., Hummelink, E.W.J., Velthof, G.L., Zwart, K.B. (2005a). Subsoil 15N-N<sub>2</sub>O 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., Zwart, K.B., Harris, D., van Kessel, C. (2005b). Vertical Gradients of  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in Soil Atmospheric N<sub>2</sub>O—temporal Dynamics in a Sandy Soil. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 19 (10): 1289–95. DOI: <https://doi.org/10.1002/rcm.1929>.
- van Straten, G., de Vos, A.C., Rozema, J., Bruning, B., van Bodegom, P.M. (2019). An improved methodology to evaluate crop salt tolerance from field trials. *Agricultural Water Management* 375-387.
- von Hoyningen-Hüne, J. (1983). Die Interception Des Niederschlags in Landwirtschaftlichen Beständen. *Journal Article. Schriftenreihe Des DVWK* 57: 1–53.
- Werkgroep HELP-tabel (1987). De invloed van de waterhuishouding op de landbouwkundige productie. Utrecht, Mededelingen Landinrichtingsdienst 176.
- 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>.
- Willmot, C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography* (2), 184-194, <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>.
- Wolf, J., Mandryk, M., Kanellopoulos, A., van Oort, P., Schaap, B., Reidsma, P., & Van Ittersum, M. (2010). Methodologies for analyzing future farming systems in Flevoland as applied within the AgriAdapt project. Technical report, Wageningen University & Research. Personal communication.

# Bijlage A Bepaling van de verdamping

Om een juiste wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer te simuleren is een goede inschatting van de verdamping van essentieel belang. In de periode 2017-2024 is een procedure ontwikkeld om instellingen met betrekking tot de simulatie van verdamping automatisch te kalibreren (Dik en Mulder, 2024).

Bij de doorontwikkeling van WWL zijn enkele wijzigingen doorgevoerd in de beschrijving van gewasontwikkeling. Denk hierbij aan de nieuwe opzet van grasgroei, het gebruik van andere gewasvariëteiten, aanpassing van de gewashoogte en het gehanteerde groeiseizoen. Deze wijzigingen zorgen ervoor dat de potentiële gewasontwikkeling en daarmee ook de potentiële watervraag anders gaat verlopen. Na doorvoering van deze wijzigingen moeten de gewasweerstand opnieuw gekalibreerd worden.

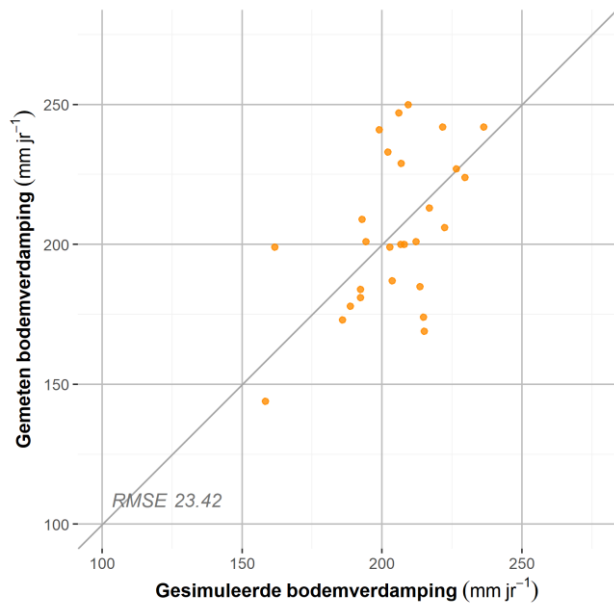
De verdamping bestaat uit drie componenten: interceptie van neerslag, transpiratie van gewas en verdamping van de bodem. De kalibratieprocedure uit 2024 richt zich met name op de kalibratie van gewasweerstand (RSC) en daarmee op de transpiratie van het gewas. In de procedure worden instellingen met betrekking tot interceptie van neerslag en verdamping van de bodem buiten beschouwing gelaten. Op basis van aanbevelingen uit Hurkmans (2023) is de procedure uitgebreid door ook de instellingen voor simulatie van interceptie en bodemverdamping te kalibreren. De aangepaste kalibratieprocedure bestaat daarmee nu uit drie achtereenvolgens te doorlopen stappen:

- Kalibratie van de bodemweerstand (RSOIL)
- Kalibratie van interceptiecapaciteit (SICCALLAI)
- Kalibratie van de gewasweerstand (RSC)

## *Kalibratie van de bodemweerstand*

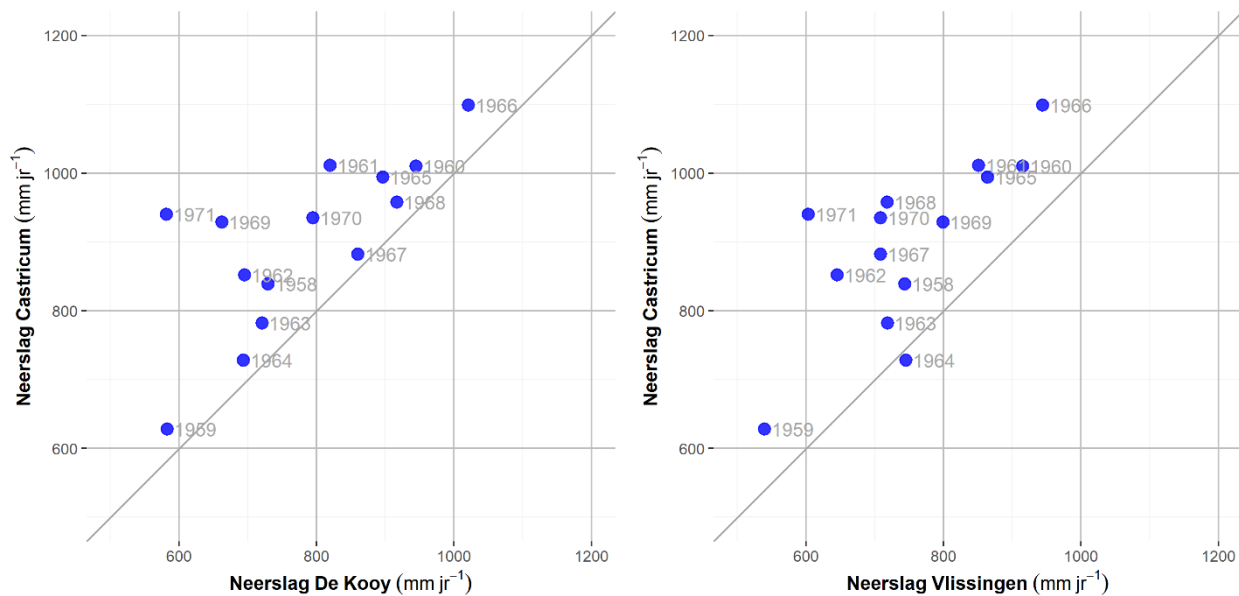
Voor de bodemweerstand (RSOIL) werd voorheen in de procedure een vaste waarde voor de bodemweerstand aangehouden. In 2017 was dit een waarde van  $600 \text{ s m}^{-1}$  en  $150 \text{ s m}^{-1}$  voor respectievelijk grasland en akkerbouw. In 2024 zijn deze waarden gehalveerd omdat we zijn overgestapt op simulaties met een neerslagduur i.p.v. neerslag verspreidt over 24-uur. Bij het hanteren van een neerslagduur blijft de bodem minder lang nat (ten opzichte van neerslag verspreidt over 24 uur) en zal de actuele bodemverdamping eerder gereduceerd worden doordat de bodem uitdroogt. Het hanteren van een lagere bodemweerstand bij gebruik van gedetailleerde neerslag is noodzakelijk om tot een vergelijkbare bodemverdamping uit te komen (Dik en Mulder, 2024). Bij de beschrijving van de kalibratieprocedure is geen onderbouwing gegeven voor het hanteren van een gewasafhankelijke bodemweerstand. Het is tevens ook niet wenselijk om de bodemweerstand gewasafhankelijk te maken, denk bijvoorbeeld aan een gewasrotatie waarin grasland en snijmais elkaar afwisselen. Om te komen tot een nieuwe inschatting van de bodemweerstand is gebruik gemaakt van een lysimeter experiment gericht op de verdamping van een kale bodem (en daarmee geen interactie met gewasgroei en de nog te bepalen gewasweerstand). Dit experiment heeft plaatsgevonden bij Castricum gedurende de periode 1942 – 1971 (Massop e.a. 2005).

In eerste instantie richten we ons op de kalibratie van de bodemweerstand op basis van de dagelijkse neerslag waarbij de meteorologische condities voor de periode 1942 – 1968 afkomstig zijn van Castricum (de periode 1969 – 1971 is buiten beschouwing gelaten omdat er onduidelijkheden zijn over de gerapporteerde neerslaghoeveelheden). Bij de aansturing van het model gaan we uit van een vaste grondwaterstand op 2.5 m-mv. De optimale modelprestatie wordt dan behaald bij een bodemweerstand van  $965 \text{ s m}^{-1}$ , zie Figuur A.1.



**Figuur A.1** Gemeten en gesimuleerde bodemverdamping voor Castricum (1942 – 1968; dagelijkse neerslag) bij een gekalibreerde bodemweerstand van  $965 \text{ s m}^{-1}$ .

In vergelijking tot eerder gehanteerde bodemweerstand is de gekalibreerde weerstand opvallend hoog. Een verklaring hiervoor is mogelijk een overschatting van de hoeveelheid neerslag die is gemeten bij Castricum. Het lysimeter experiment betrof verschillende opstellingen voor het meten van neerslag voor onderlinge vergelijking (Hoeven e.a., 2005). Gedurende de periode 1958 – 1968 is bij Castricum een gemiddelde hoeveelheid neerslag gemeten van  $890 \text{ mm jr}^{-1}$ . In vergelijking met de weerstations De Kooy ( $810 \text{ mm jr}^{-1}$ ) en Vlissingen ( $760 \text{ mm jr}^{-1}$ ) is bij Castricum daarmee circa 10 – 15% meer neerslag gemeten, zie Figuur A.2. Wanneer we de hoeveelheid neerslag met 10 of 15% reduceren en we opnieuw de weerstand kalibreren komt deze uit op respectievelijk  $910 \text{ s m}^{-1}$  en  $890 \text{ s m}^{-1}$ .



**Figuur A.2** Vergelijking jaarlijkse neerslag Castricum met De Kooy (links) en Vlissingen (rechts) voor de periode 1958 – 1971.

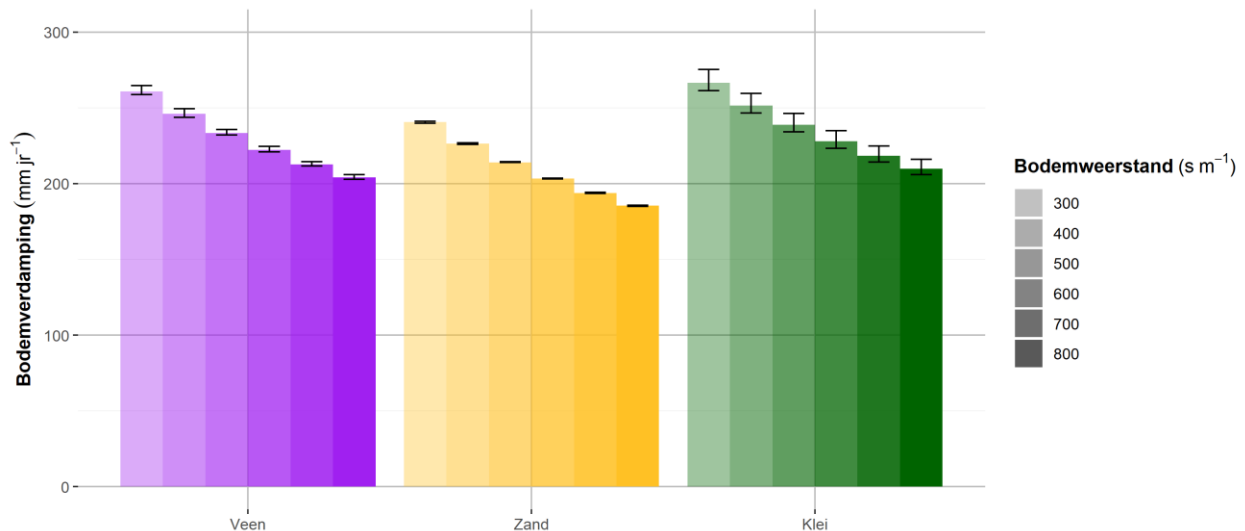
Daarmee blijft de gekalibreerde bodemweerstand aan de hoge kant. Zoals aangegeven dient de bodemweerstand ook gecorrigeerd te worden voor de neerslagduur. Om een indicatie te krijgen wat voor effect het hanteren van een neerslagduur heeft op de gekalibreerde weerstand voeren we de kalibratie opnieuw uit met behulp van meteorologische condities afkomstig van weerstations De Kooy en Vlissingen. Voor de periode 1958 – 1968 beschikken we voor deze weerstations over informatie van neerslaghoeveelheid

als ook de neerslagduur. Wanneer de kalibratie wordt uitgevoerd met een dagelijkse neerslag inclusief neerslagduur komt de weerstand circa 20% lager uit, zie Tabel 14.

**Tabel 14** Gekalibreerde bodemweerstand ( $RSOIL$ ;  $s\ m^{-1}$ ) bij dagelijkse neerslag en dagelijkse neerslag incl. neerslagduur voor de periode 1958 – 1971.

Aansturing neerslag	De Kooy (235)	Vlissingen (310)
Dagelijkse neerslag (SWRAIN=0)	390	515
Dagelijkse neerslag incl. neerslagduur (SWRAIN=2)	320	425
Factor	0.82	0.83

Het valt op dat wanneer meteorologische condities afkomstig van De Kooy of Vlissingen worden gebruikt bij de kalibratie, de optimale bodemweerstand lager uitvalt. Om inzicht te krijgen in de gevoeligheid van de bodemweerstand is een analyse uitgevoerd voor de periode 1991 – 2020 waarbij we gebruik maken van meteorologische condities van weerstation De Bilt. We bepalen de jaarlijkse gesimuleerde bodemverdamping bij kale grond voor de meest voorkomende veen-, zand- en kleigrond (respectievelijk BOFEK2020-eenheden 1018, 3015 en 4018) onder relatief natte tot droge bodemhydrologische condities (vaste grondwaterstand op 0.5, 1.5 en 2.5 m-mv) en een bodemweerstand variërend van 300 tot 800  $s\ m^{-1}$ . De resultaten van deze gevoeligheidsanalyse zijn weergegeven in Figuur A.3.



**Figuur A.3** Gesimuleerde bodemverdamping ( $mm\ jr^{-1}$ ) bij kale grond voor de periode 1991 – 2020 met meteorologische condities afkomstig van De Bilt voor de meest voorkomende veen-, zand- en kleigrond onder relatief natte tot droge bodemhydrologische condities (spreiding).

Massop e.a. (2005) komen op basis van literatuuronderzoek uit op een gemiddelde bodemverdamping van 200 – 300  $mm\ jr^{-1}$  voor kale grond. Bij het hanteren van een bodemweerstand van 700 – 800  $s\ m^{-1}$  komt de bodemverdamping op zandgronden lager uit dan 200  $mm\ jr^{-1}$  en daarmee lijkt deze weerstand te hoog. Vasthouden aan de tot nu toe gebruikte bodemweerstand van 600  $s\ m^{-1}$  resulteert in een jaarlijkse bodemverdamping van circa 200 – 235  $mm\ jr^{-1}$  (voor respectievelijk zand en klei). Omdat dit beter aansluit bij de bevindingen van Massop wordt daarom de bodemweerstand van 600  $s\ m^{-1}$  aangehouden.

#### Kalibratie interceptiecapaciteit

Voor simulatie van interceptieverdamping hanteren we het concept wat gebaseerd is op Rutter e.a. (1971). Met het Rutter-concept wordt een balans bijgehouden van de berging in het interceptiereservoir waarbij de omvang van het interceptiereservoir afhankelijk is van het bladoppervlak. Wanneer er sprake is van neerslag zal het reservoir zich vullen en kan er verdamping vanuit het reservoir plaatsvinden (interceptieverdamping). Wanneer het reservoir overloopt is er sprake van doorval van neerslag, hetgeen in de bodem kan infiltreren of wordt afgevoerd door oppervlakkige afstroming. Wanneer de neerslag stopt kan nog steeds interceptieverdamping plaatsvinden zolang het reservoir is gevuld. Op deze manier kan de dynamiek van

interceptie binnen een dag worden gesimuleerd. Dat is niet het geval voor andere concepten waarbij de hoeveelheid interceptie afhankelijk is van de dagelijkse neerslag en het bladoppervlak, zoals het concept van Hoyningen-Braden (Hoyningen-Hüne, 1983; Braden, 1985).

Om de resultaten van het Rutter-concept aan te laten sluiten op de huidige werkwijze, waarbij in SWAP de interceptieverdamping met het Hoyningen-Braden concept wordt gesimuleerd, zijn de resultaten van de laatste gebruikt als referentie voor het kalibreren van de interceptiecapaciteit (SICCAPLAI; cm LAI<sup>-1</sup>) voor het Rutter-model. Bij de aansturing van het Hoyningen-Braden concept maken we gebruik van een dagelijkse neerslag met een zekere neerslagduur in combinatie met een interceptiecoëfficiënt van 0.05 cm. De jaarlijkse interceptieverdamping wordt bepaald over de periode 1990 – 2020 waarbij de meteorologische condities afkomstig zijn van weerstations De Kooy (235), De Bilt (260), Eelde (280), Twenthe (290), Vlissingen (310) en Maastricht (380).

De interceptiecapaciteit wordt bepaald door de gekalibreerde interceptiecapaciteit per weerstation te middelen. In Tabel 15 is de gemiddelde interceptiecapaciteit weergegeven, evenals de spreiding. Bij gras hanteren we verschillende vormen van management, van alleen maaien (intensief) tot en met alleen beweiding (extensief). Bij snijmais en bij aardappel hanteren we verschillende gewasvariëteiten. In Tabel 15 is ter vergelijking ook de (als referentie gebruikte) interceptiecapaciteit gepubliceerd door Dik en Mulder (2024) weergegeven. Over het algemeen komt de gekalibreerde interceptiecapaciteit goed overeen met eerder gepubliceerde waarden met uitzondering voor snijmais en boomteelt. Bij snijmais wordt de lagere capaciteit verklaart door het gebruik van andere gewasvariëteit (met hogere gewashoogte). Bij boomteelt (appel- en laanboom) wordt door gebruik van Hoyningen-Braden als referentie een lagere interceptiecapaciteit berekend dan in Dik en Mulder (2024) waar het voor bosvegetatie bedoelde concept van Gash (1995) is gehanteerd.

**Tabel 15** *Interceptiecapaciteit (SICCAPLAI; cm LAI<sup>-1</sup>); de weergegeven spreiding wordt veroorzaakt door variatie in meteorologische condities.*

Gewas	Dik en Mulder (2024)	Waterwijzer Landbouw
Gras <sup>1</sup>	0.0281	0.0284 (0.0249 – 0.0299)
Snijmais <sup>2</sup>	0.0196	0.0035 (0.0026 – 0.0129)
Wintertarwe		0.0211 (0.0189 – 0.0231)
Zomergerst	0.0223	0.0209 (0.0187 – 0.0227)
Aardappel <sup>2</sup>	0.0230	0.0189 (0.0139 – 0.0230)
Suikerbiet	0.0248	0.0241 (0.0209 – 0.0265)
Zaaiui	0.0234	0.0229 (0.0207 – 0.0244)
Prei	0.0240	0.0207 (0.0174 – 0.0234)
Sla	0.0260	0.0249 (0.0231 – 0.0267)
Bloemkool	0.0257	0.0235 (0.0213 – 0.0253)
Spruitkool	0.0256	0.0226 (0.0189 – 0.0255)
Winterpeen	0.0244	0.0238 (0.0206 – 0.0267)
Sperzieboon	0.0239	0.0216 (0.0192 – 0.0237)
Tulp	0.0229	0.0233 (0.0211 – 0.0249)
Lelie	0.0267	0.0215 (0.0187 – 0.0237)
Appelboom	0.0160	0.0069 (0.0026 – 0.0103)
Laanboom	0.0377	0.0026 (0.0026 – 0.0026)

<sup>1</sup> Variatie in graslandmanagement.

<sup>2</sup> Verschillende gewasvariëteiten.

### Kalibratie gewasweerstand

Voor kalibratie van de gewasweerstand hanteren we de procedure zoals beschreven door Dik en Mulder (2024). Als referentie voor de kalibratie worden hierbij de gewasfactoren van Feddes gebruikt die zijn afgeleid voor de periode 1965 – 1985 (Feddes, 1987). De gepubliceerde gewasfactoren zijn afgestemd op het klimaat. Omdat een klimaatperiode 30 jaar betreft voeren we de kalibratie uit voor de een periode die min of meer overeenkomt met de periode waarin de gewasfactoren zijn vastgesteld, namelijk 1961- 1990.

Het gebruik van een referentieverdamping in combinatie met gewasfactoren levert één verdampingsterm op die een combinatie van bodemverdamping, interceptieverdamping en transpiratie betreft. De kalibratie van de gewasweerstand (en daarmee de transpiratie) kan dus pas plaatsvinden nadat de bodemweerstand en interceptiecapaciteit bekend zijn.

Bij de kalibratie van de gewasweerstand proberen we ervoor te zorgen dat de jaarlijkse gewasverdamping zo goed mogelijk overeenkomt met de jaarlijkse verdamping op basis van gewasfactoren. In Tabel 16 is de gekalibreerde gewasweerstand weergegeven. Bij gras hanteren we verschillende vormen van management met alleen maaien (intensief) of beweiding (extensief). Verder maken we bij grasland onderscheid tussen

relatief kort en lang gras, respectievelijk 12 en 20 cm. Ter vergelijking is ook de gewasweerstand weergegeven zoals gepubliceerd door Dik en Mulder (2024) en de gewasweerstand die bij de vorige oplevering van WWL (versie 3.0.0) is gehanteerd.

Voor gewassen die worden gesimuleerd met een dynamische gewasgroeimodule (gras, snijmais, wintertarwe, zomergerst, aardappel, suikerbiet en zaaiui) komt de gekalibreerde gewasweerstand iets lager uit dan voorheen. Een verklaring hiervoor is het hanteren van een hogere bodemweerstand dan voorheen. De verdamping buiten het groeiseizoen neemt daardoor af en dit moet worden gecompenseerd door een hogere verdamping (en daarmee transpiratie) in het groeiseizoen om te komen tot een vergelijkbare jaarlijkse verdamping. Bij snijmais is de weerstand hoger door het hanteren van een andere gewasvariëteit (met een hogere gewashoogte dan voorheen). Voor gewassen die worden gesimuleerd met een statische gewasgroeimodule zien we gewasweerstand die zowel hoger als lager uitkomen in vergelijking tot gewasweerstand die eerder zijn gehanteerd. Met name het hanteren van andere gewashoogten is hier een verklaring voor: voorheen werd voor groenteteelt een maximale gewashoogte aangehouden van 40 cm.

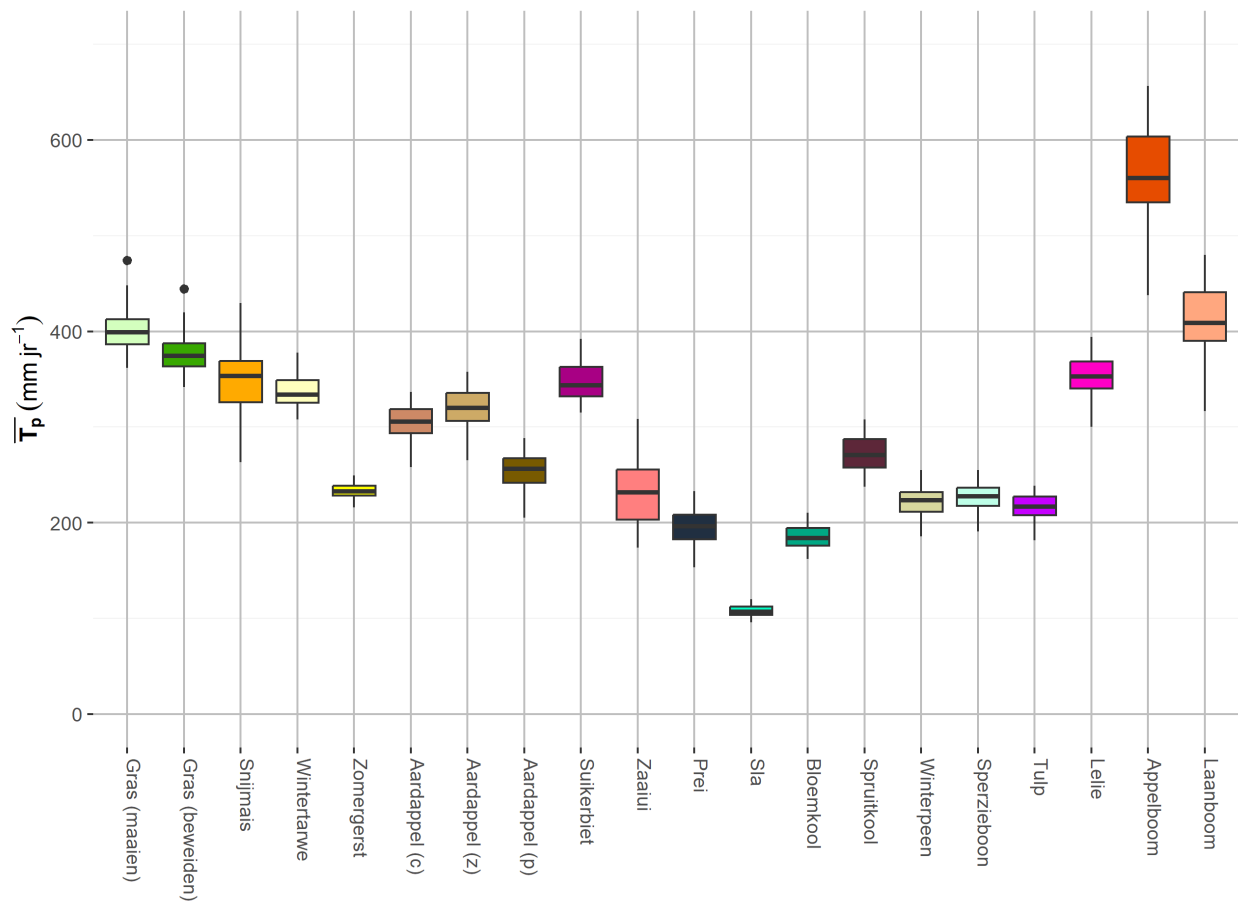
**Tabel 16** Gekalibreerde gewasweerstand ( $s\ m^{-1}$ ).

Gewas	Waterwijzer Landbouw		
	Dik en Mulder (2024)	3.0.0	4.0.0
Gras <sup>1</sup>	108	94	79 (51 - 110)
Snijmais	158	167	196
Wintertarwe <sup>2</sup>		357	125
Zomergerst	171	165	125
Aardappel	210	207	206
Suikerbiet	146	145	125
Zaaiui	71	149	54
Prei	396	368	560
Sla	158	189	102
Bloemkool	106	116	102
Spruitkool	191	181	157
Winterpeen	128	83	264
Sperzieboon	277	273	221
Tulp	68	171	140
Lelie	19	59	166
Appelboom	173	144	201
Laanboom	221	188	209

<sup>1</sup> Variatie in graslandmanagement gehanteerd evenals variatie in gewashoogte.

<sup>2</sup> Gewasweerstand gebaseerd op zomergerst.

Met behulp van de gekalibreerde gewasweerstand kan vervolgens de langjarig gemiddelde potentiële transpiratie ( $T_p$ ) worden bepaald. In geval van statische gewasgroeimodule is deze informatie nodig voor de bepaling van de potentiële gewasopbrengst voor een specifiek jaar (zie paragraaf 2.1.1). We bepalen de langjarig gemiddelde transpiratie over de periode 1991 – 2020 waarbij de meteorologische condities afkomstig zijn van verschillende weerstations. De selectie van weerstations is hierbij gebaseerd op het Landelijk Hydrologisch Model (LHM versie 4.3.3; de Lange e.a. 2014). De resultaten zijn weergegeven in Figuur A.4 en Tabel 17.



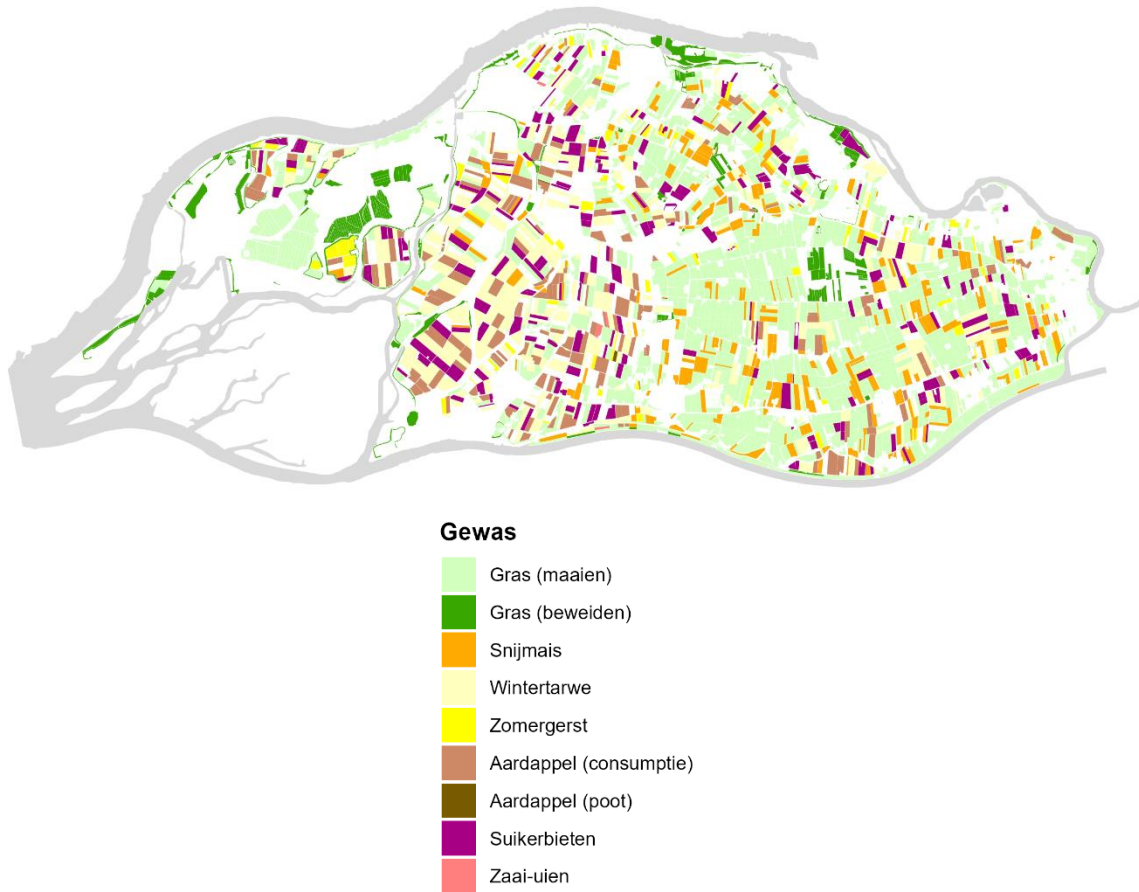
**Figuur A.4** Gesimuleerde langjarig gemiddelde potentiële transpiratie ( $\text{mm jr}^{-1}$ ); weergegeven spreiding is het gevolg van meteorologische condities afkomstig van verschillende weerstations.

**Tabel 17** Langjarig gemiddelde potentiële transpiratie ( $\bar{T}_p$ ) bepaald over de periode 1991-2020.

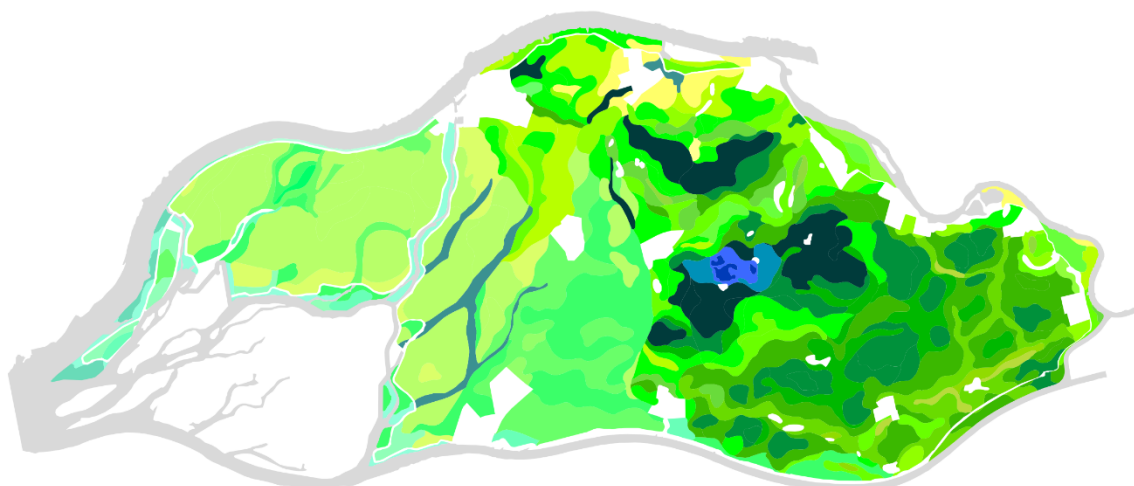
Gewas	$\bar{T}_p$ ( $\text{mm jr}^{-1}$ )
Gras (maaien)	401.0
Gras (beweiden)	377.1
Snijmais	351.0
Winterarwe	337.1
Zomergerst	233.5
Aardappel (c)	304.0
Aardappel (z)	319.3
Aardappel (p)	255.0
Suikerbiet	347.9
Zaaui	231.9
Prei	195.4
Sla	107.8
Bloemkool	185.9
Spruitkool	272.1
Winterpeen	222.7
Sperzieboon	226.7
Tulp	216.7
Lelie	353.2
Appelboom	563.4
Laanboom	410.8

# Bijlage B Pilotstudies

## Gemeente Altena



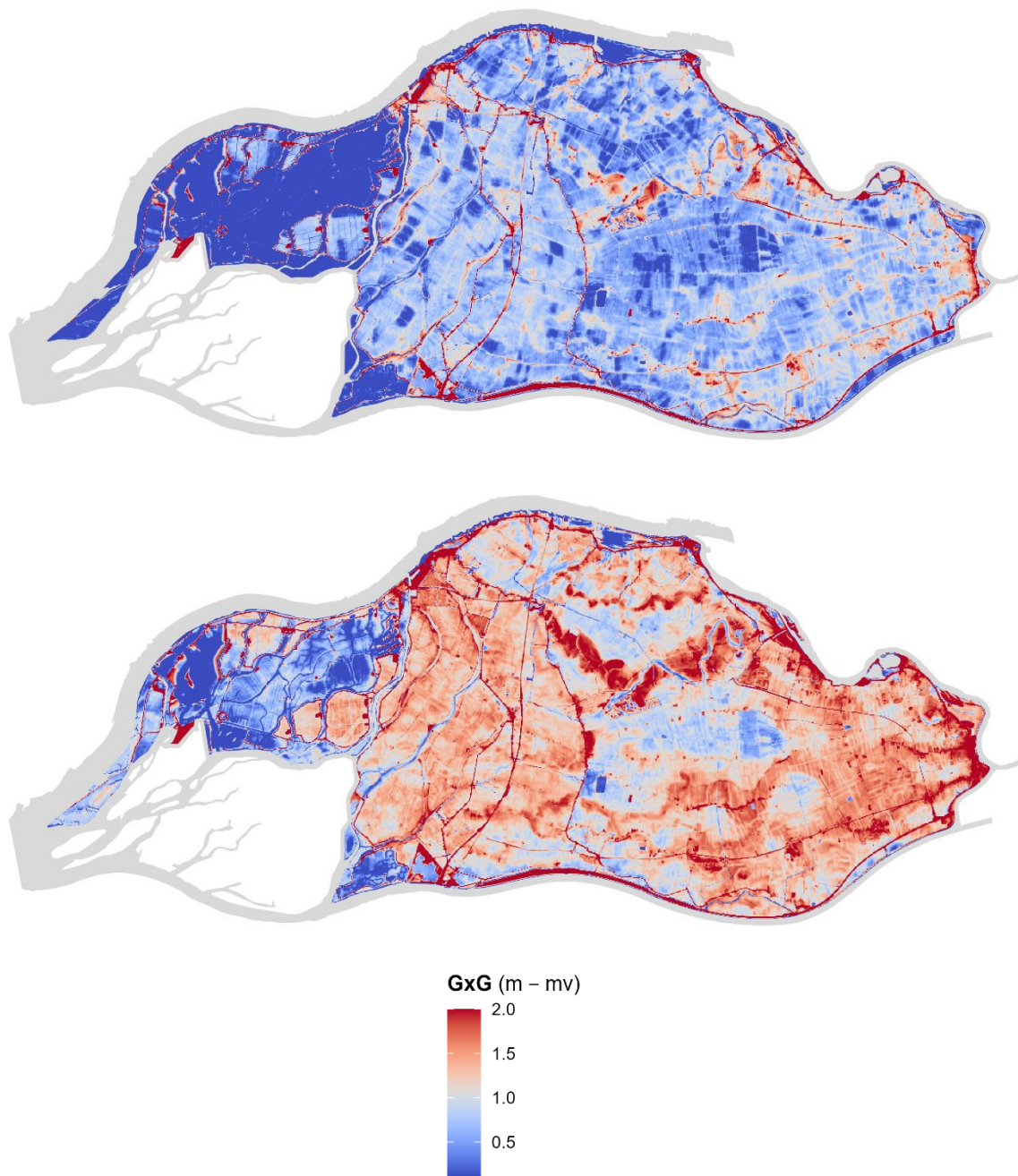
**Figuur B.1** Landgebruik gemeente Altena.



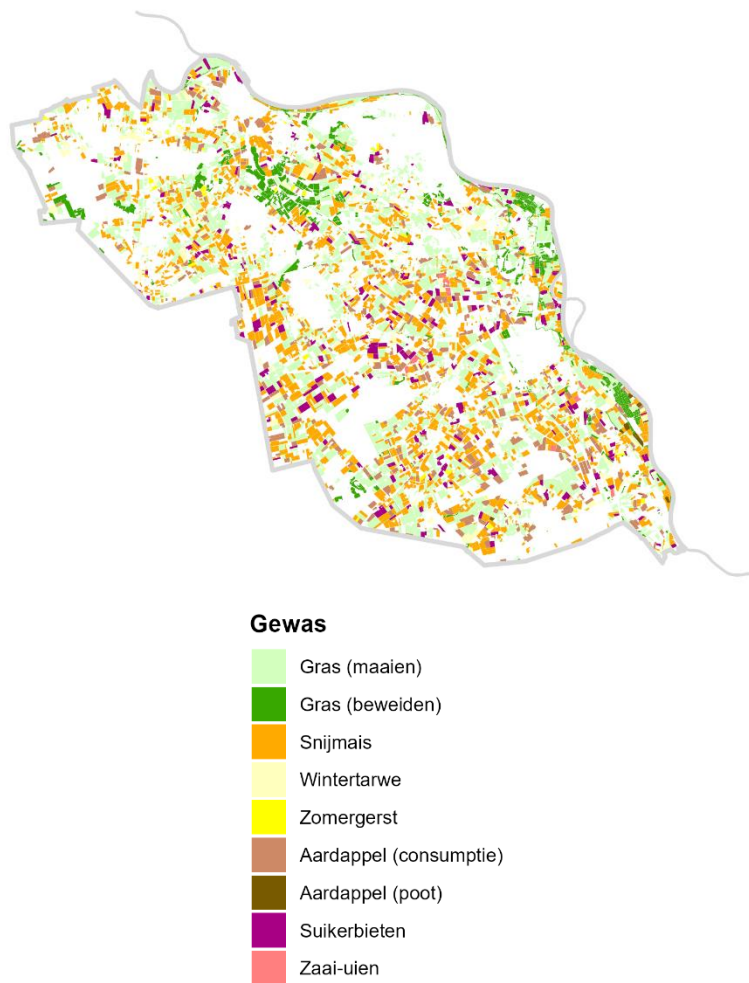
### Bodem

 kVb: Waardveengronden op veen	 Rv01C: Kalkloze drechtvaaggronden
 kVk: Waardveengronden op zavel of klei	 Rn52A: Kalkhoudende poldervaaggronden; zavel
 Wo: Moerige eerdgronden; op zavel of klei	 Rn66A: Kalkhoudende poldervaaggronden; zavel/lichte klei
 Zn50A: Kalkhoudende vlakvaaggronden; matig fijn zand	 Rn46A: Kalkhoudende poldervaaggronden; zware klei
 Zn30A: Kalkhoudende vlakvaaggronden; grof zand	 Rn15A: Kalkhoudende poldervaaggronden; lichte zavel
 MOb72: Gorsvaaggronden; zware zavel/klei; zand < 80 cm	 Rn95A: Kalkhoudende poldervaaggronden; zware zavel/lichte klei
 MOb75: Gorsvaaggronden; zware zavel/klei; zand > 80 cm	 Rn62C: Kalkloze poldervaaggronden; zavel/lichte klei
 pMo80: Tochteerdgronden; klei	 Rn95C: Kalkloze poldervaaggronden; zware zavel/lichte klei
 pMn85A: Kalkrijke leek-/woudeerdgronden; klei	 Rn67C: Kalkloze poldervaaggronden; zavel/lichte klei
 Mv61C: Kalkarme drechtvaaggronden; zavel/lichte klei	 Rn94C: Kalkloze poldervaaggronden; zware zavel/lichte klei
 Mo20A: Kalkrijke nesvaaggronden; zware zavel	 Rn47C: Kalkloze poldervaaggronden; zware klei
 Mo80A: Kalkrijke nesvaaggronden; klei	 Rn44C: Kalkloze poldervaaggronden; zware klei
 Mn22A: Kalkrijke poldervaaggronden; zware zavel	 Rn15C: Kalkloze poldervaaggronden; lichte zavel
 Mn82A: Kalkrijke poldervaaggronden; klei	 Rd10A: Kalkhoudende ooivaaggronden; lichte zavel
 Mn15A: Kalkrijke poldervaaggronden; lichte zavel	 Rd90A: Kalkhoudende ooivaaggronden; zware zavel/lichte klei
 Mn25A: Kalkrijke poldervaaggronden; zware zavel	 Rd10C: Kalkloze ooivaaggronden; lichte zavel
 Mn35A: Kalkrijke poldervaaggronden; lichte klei	 Rd90C: Kalkloze ooivaaggronden; zware zavel/lichte klei
 Mn45A: Kalkrijke poldervaaggronden; zware klei	

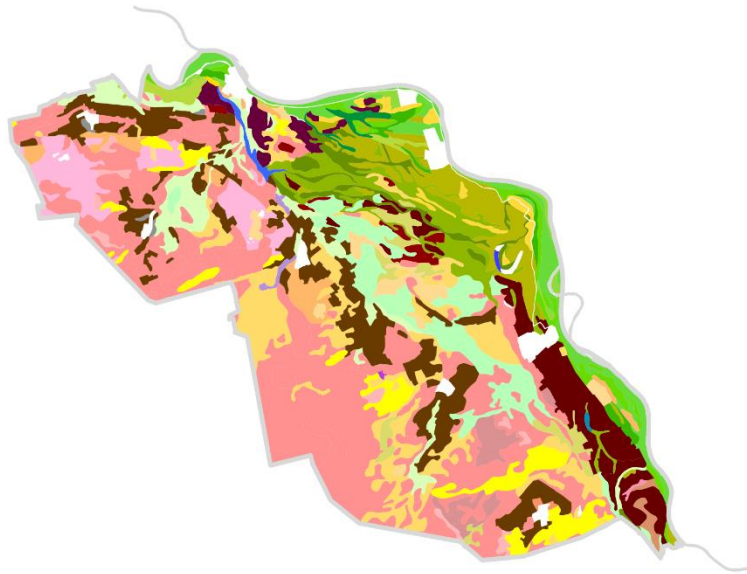
**Figuur B.2** Bodemtype gemeente Altena.



**Figuur B.3** Grondwaterstandskarakteristieken gemeente Altena voor de periode 2011-2018; met boven de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en onder de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG).



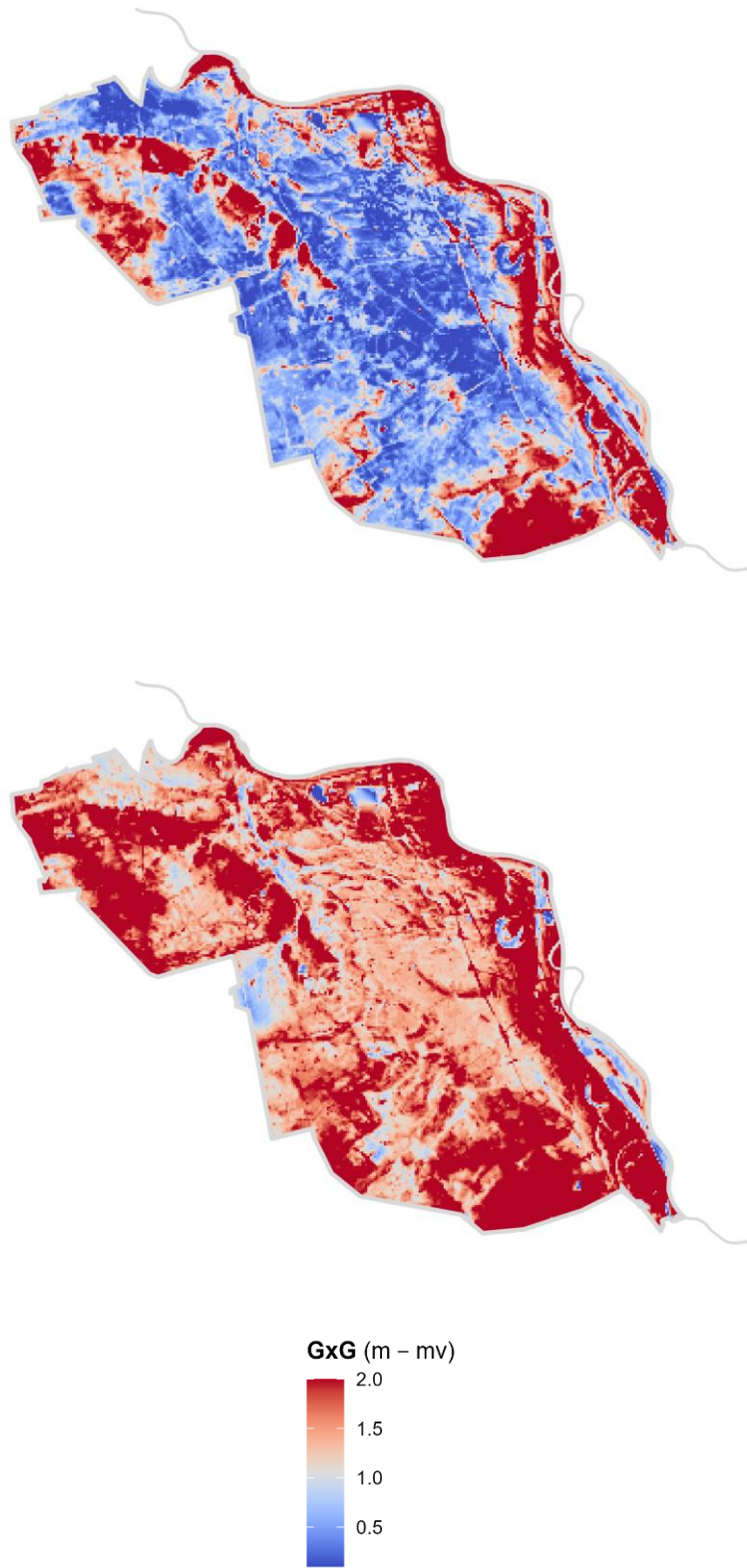
**Figuur B.4** Landgebruik stroomgebied De Raam.



### Bodem

<span style="color: blue;">■</span> kVz: Waardveengronden op zand	<span style="color: lightgreen;">■</span> pZg21: Beekeerdgronden; leemarm/zwak lemig fijn zand
<span style="color: blue;">■</span> Vz: Vlierveengronden op zand	<span style="color: lightgreen;">■</span> pZg23: Beekeerdgronden; lemig fijn zand
<span style="color: teal;">■</span> Wo: Moerige eerdgronden; op zavel of klei	<span style="color: yellow;">■</span> pZn21: Gooreerdgronden; leemarm/zwak lemig fijn zand
<span style="color: purple;">■</span> zWz: Moerige eerdgronden; op zand	<span style="color: yellow;">■</span> pZn23: Gooreerdgronden; lemig fijn zand
<span style="color: purple;">■</span> vWz: Moerige eerdgronden; op zand	<span style="color: yellow;">■</span> pZn30: Gooreerdgronden; grof zand
<span style="color: orange;">■</span> Y21: Holtpodzolgronden; leemarm/zwak lemig fijn zand	<span style="color: yellow;">■</span> Zn21: Vlakvaaggronden; leemarm/zwak lemig fijn zand
<span style="color: orange;">■</span> Y23: Holtpodzolgronden; lemig fijn zand	<span style="color: yellow;">■</span> Zn30: Vlakvaaggronden; grof zand
<span style="color: orange;">■</span> Y30: Holtpodzolgronden; grof zand	<span style="color: yellow;">■</span> Zn23: Vlakvaaggronden; lemig fijn zand
<span style="color: orange;">■</span> cY30: Looppodzolgronden; grof zand	<span style="color: yellow;">■</span> Zd21: Duinvaaggronden; leemarm/zwak lemig fijn zand
<span style="color: pink;">■</span> Hn21: Veldpodzolgronden; leemarm/zwak lemig fijn zand	<span style="color: yellow;">■</span> Zb21: Vorstvaaggronden; leemarm/zwak lemig fijn zand
<span style="color: pink;">■</span> Hn23: Veldpodzolgronden; lemig fijn zand	<span style="color: yellow;">■</span> Zb30: Vorstvaaggronden; grof zand
<span style="color: pink;">■</span> Hn30: Veldpodzolgronden; grof zand	<span style="color: lightgreen;">■</span> Rn62C: Kalkloze poldervaaggronden; zavel/lichte klei
<span style="color: pink;">■</span> cHn21: Laarpodzolgronden; leemarm/zwak lemig fijn zand	<span style="color: lightgreen;">■</span> Rn95C: Kalkloze poldervaaggronden; zware zavel/lichte klei
<span style="color: pink;">■</span> cHn23: Laarpodzolgronden; lemig fijn zand	<span style="color: lightgreen;">■</span> Rn67C: Kalkloze poldervaaggronden; zavel/lichte klei
<span style="color: pink;">■</span> Hd21: Haarpodzolgronden; leemarm/zwak lemig fijn zand	<span style="color: lightgreen;">■</span> Rn94C: Kalkloze poldervaaggronden; zware zavel/lichte klei
<span style="color: pink;">■</span> Hd30: Haarpodzolgronden; grof zand	<span style="color: lightgreen;">■</span> Rn44C: Kalkloze poldervaaggronden; zware klei
<span style="color: grey;">■</span> EZg21: Lage enkeerdgronden; leemarm/zwak lemig fijn zand	<span style="color: lightgreen;">■</span> Rd10C: Kalkloze ooivaaggronden; lichte zavel
<span style="color: darkred;">■</span> bEZ21: Hoge bruine enkeerdgronden; leemarm/zwak lemig fijn zand	<span style="color: lightgreen;">■</span> Rd90C: Kalkloze ooivaaggronden; zware zavel/lichte klei
<span style="color: darkred;">■</span> bEZ23: Hoge bruine enkeerdgronden; lemig fijn zand	<span style="color: yellowgreen;">■</span> KRn1: Poldervaaggronden; lichte zavel
<span style="color: darkred;">■</span> bEZ30: Hoge bruine enkeerdgronden; grof zand	<span style="color: yellowgreen;">■</span> KRn2: Poldervaaggronden; zware zavel
<span style="color: darkred;">■</span> zEZ21: Hoge zwarte enkeerdgronden; leemarm/zwak lemig fijn zand	<span style="color: yellowgreen;">■</span> KRd1: Ooivaaggronden; lichte zavel

**Figuur B.5** Bodemtype stroomgebied De Raam.



**Figuur B.6** Grondwaterstandskarakteristieken stroomgebied De Raam voor de periode 2011-2024; met boven de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en onder de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG).

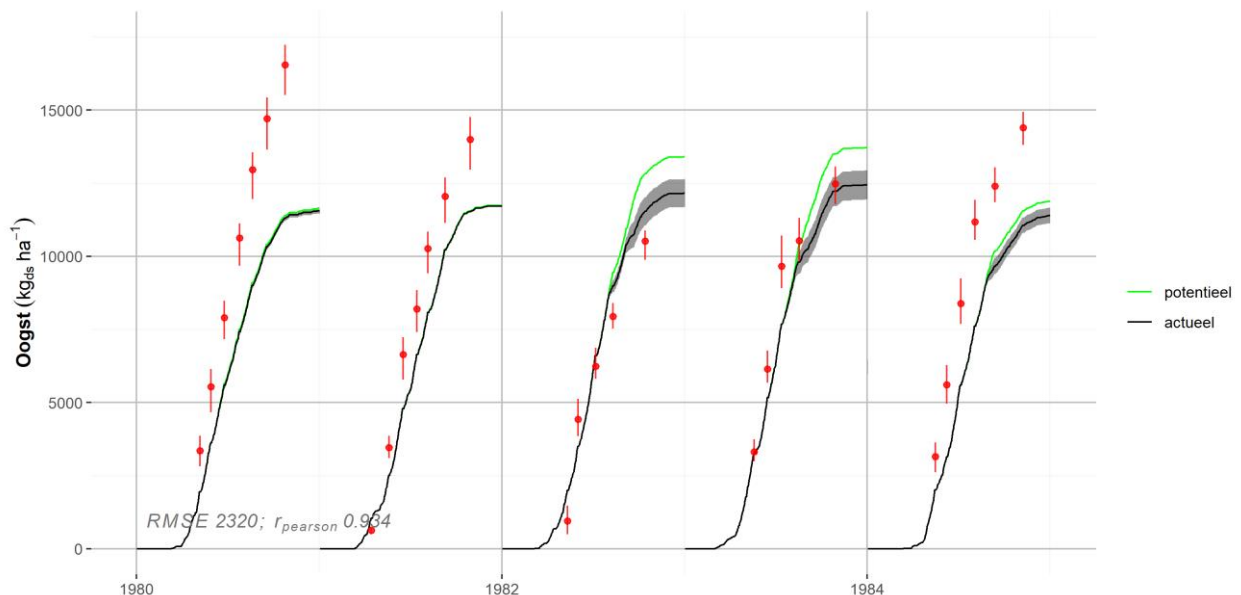
# Bijlage C Modelprestaties gecontroleerde veldproeven

In de figuren zijn de modelprestatie-maten RMSE en Pearson-correlatiecoëfficiënt ( $r_{\text{pearson}}$ ) telkens weergegeven, waarbij RMSE dezelfde eenheid heeft als de y-as van de betreffende figuur. De modelprestatie-maten worden bepaald over alle beschikbare observaties en niet alleen de gewasopbrengst aan het einde van het groeiseizoen. De beschikbaarheid van tussentijdse observaties beïnvloedt de waarde van de RMSE en  $r_{\text{pearson}}$ .

## Ruurlo (grasland; 1980 – 1984)

In Ruurlo werd in de periode 1980 tot en met 1984 onderzoek gedaan naar de stikstofwerking van geïnjecteerde runderdrijfmest op grasland (Snijders e.a., 1987). De veldproef is uitgevoerd op verschillende velden waarbij de behandeling is uitgevoerd met drie herhalingen. Voor toetsing van de modelresultaten zijn velden geselecteerd met relatief hoge mestgiften, zodat van een nutriëntentekort waarschijnlijk geen sprake is geweest. De resultaten van de veldproef zijn bij de rapportage gegroepeerd. Afzonderlijke observaties van zowel de grasopbrengsten als grondwaterstanden zijn daardoor niet meer te herleiden naar de afzonderlijke velden. De gemeten en gesimuleerde grasopbrengsten weergegeven Figuur C.1 laten daardoor een spreiding zien.

Het valt op dat de gemeten grasopbrengst over het algemeen hoger ligt dan de gesimuleerde grasopbrengst. De gemeten grasopbrengsten in de jaren 1982 en 1983 zijn lager in vergelijking tot de overige jaren. Het modelinstrumentarium laat voor deze jaren ook zien dat de gewasontwikkeling wordt beïnvloed door te droge condities. Voor 1982 wordt hierover ook een melding gemaakt in de rapportage van Snijders e.a. (1987): "...in Ruurlo werd in 1982 vanwege droogte de bemesting van de vierde snede gehalveerd."

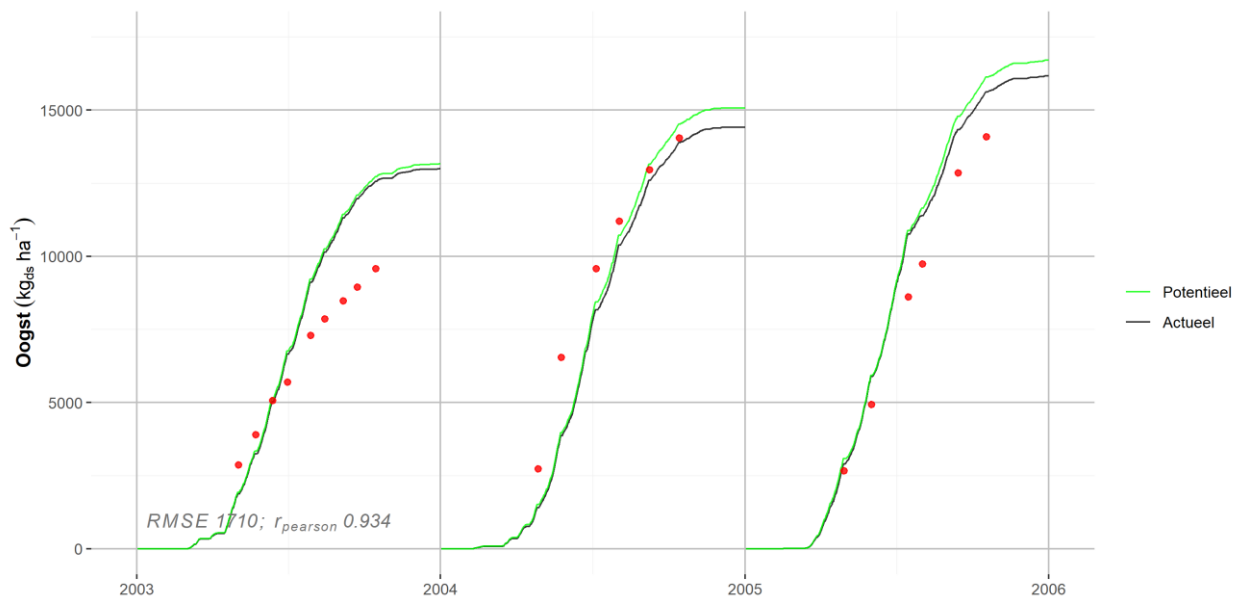


**Figuur C.1** Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen, inclusief oogst voor grasland voor veldproef Ruurlo; met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

## Zegveld (grasland; 2003 – 2005)

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 C.2. In 2003 wordt meer gewasopbrengst gesimuleerd dan gemeten, wat kan duiden op een onderschatting van de gesimuleerde 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. 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.

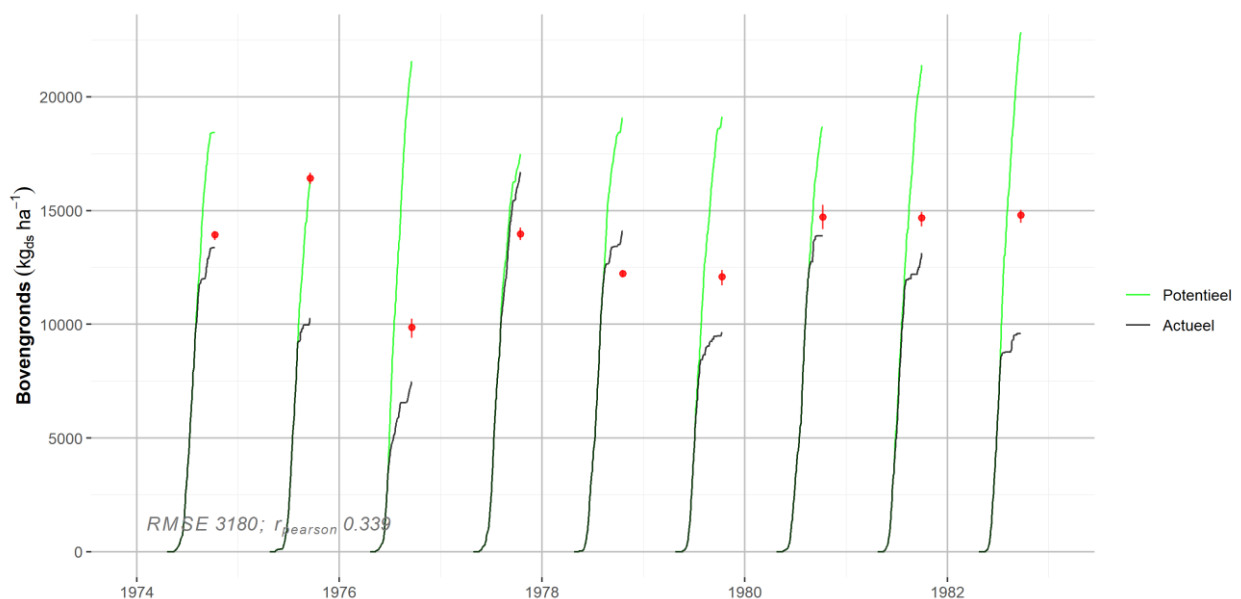


**Figuur C.2** Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van bovengrondse delen, inclusief oogst voor grasland voor veldproef Zegveld (2003 – 2005); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

In 2004 en 2005 benaderen de modelsimulaties de gemeten grasopbrengst redelijk. De gesimuleerde opbrengstderiving in deze jaren is voornamelijk het gevolg van te natte bodemhydrologische condities.

#### Cranendonck (snijmais; 1972 – 1982)

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 C.3, waarbij de spreiding in meetwaarden per jaar wordt veroorzaakt door verschillende toedieningshoeveelheden van runderdrijfmest (variërend van 200-300 ton ha<sup>-1</sup>).

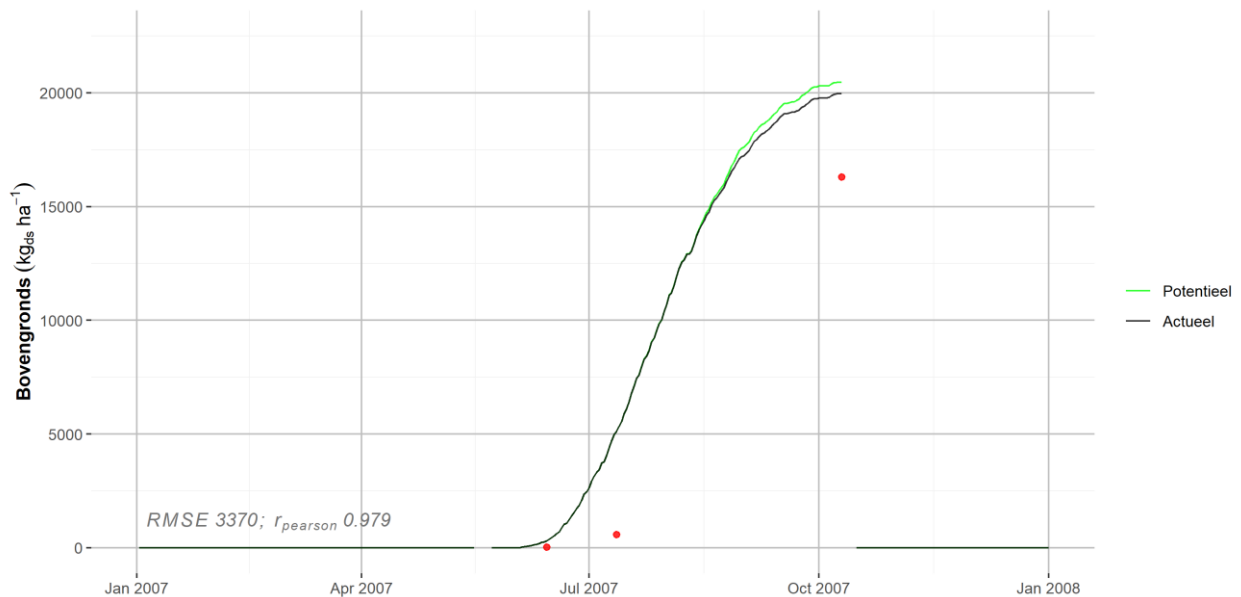


**Figuur C.3** Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van snijmais voor veldproef Cranendonck (veld 16); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

De gesimuleerde opbrengstderving als gevolg van droogtestress treedt bijna in alle jaren op. De variatie van de meetwaarden door de jaren heen wordt enigszins gevolgd door de modelsimulatie wat terug te zien is in een positieve  $R^2$  voor de modelprestatie.

#### Dijkgraaf (snijmais; 2007)

Het onderzoek bij Dijkgraaf was vooral gericht op het meten van de actuele verdamping (Elbers e.a., 2010). Het onderzoek had betrekking op het jaar 2007, waarbij ook de gewasopbrengst van snijmais is gemeten. Als we naar de modelresultaten kijken die zijn weergegeven in Figuur C.4, 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.

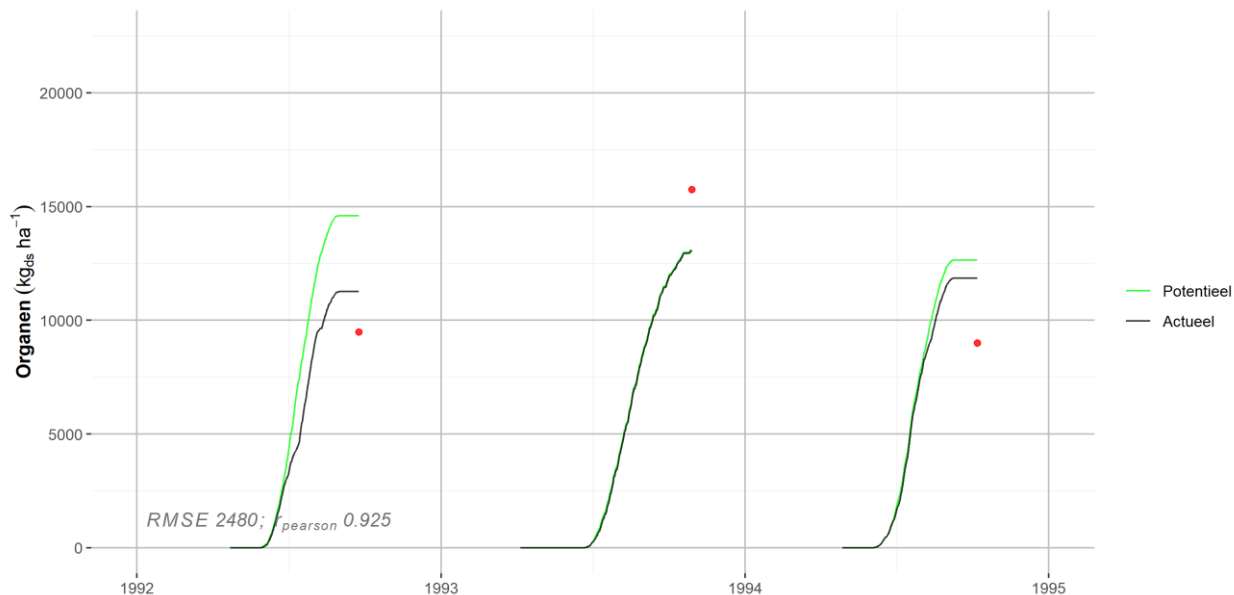


**Figuur C.4** Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van snijmais voor veldproef Dijkgraaf; met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.

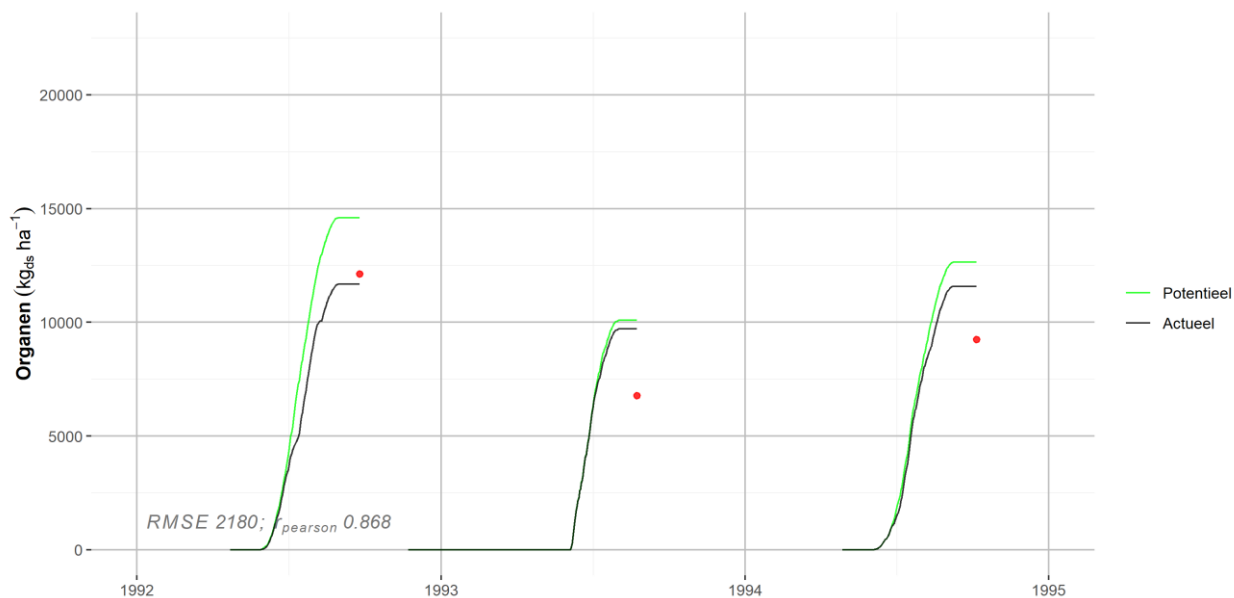
Naast de metingen van de bovengrondse biomassa zijn er ook metingen beschikbaar van de afzonderlijke gewasdelen (vrucht/kolf, bladeren, stengels en wortels; niet weergegeven). De simulatie van de hoeveelheid bladeren wordt overschat door het modelinstrumentarium. Als gevolg daarvan gaat er later in het 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 maïskolf wordt onderschat.

#### Borgerswold (aardappel e.a.; 1992 - 1994)

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 suikerbiet en wintertarwe geteeld op veld 3 en 13 (zie Figuur C.5 en Figuur C.6). 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 er opbrengstderving gesimuleerd als gevolg van te droge condities. In 1993 zien we bij suikerbiet en wintertarwe relatief weinig droogtestress optreden hetgeen verklaard kan worden doordat deze gewassen dieper wortelen.

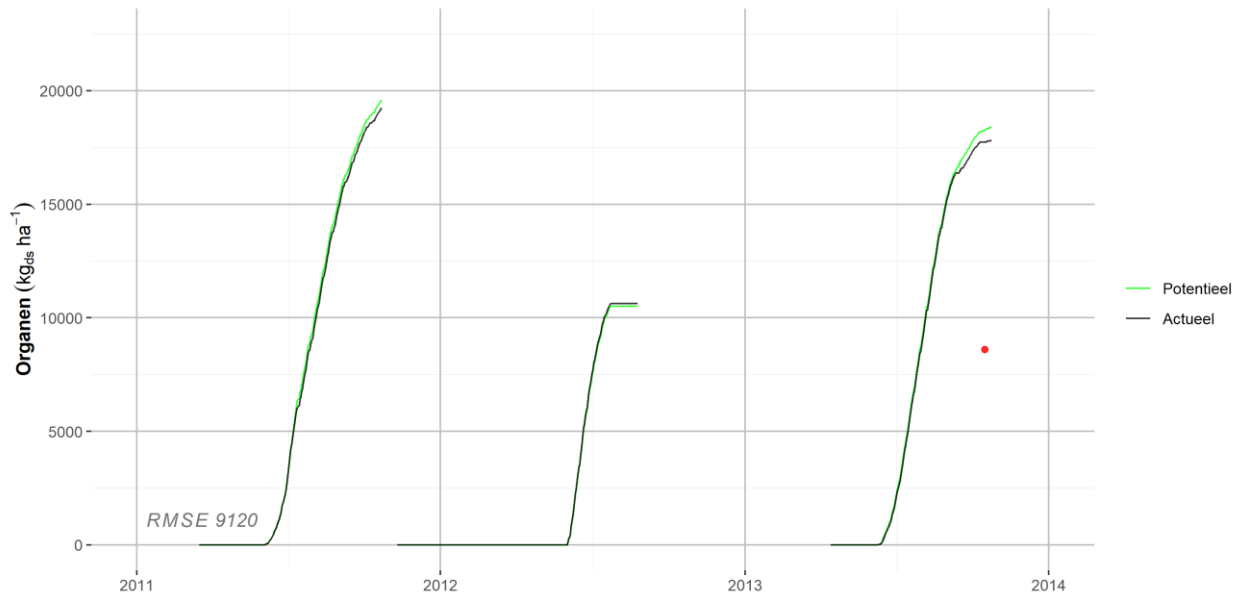


**Figuur C.5** Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van aardappel en suikerbiet in 1993 voor veldproef Borgerswold (veld 3); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde.



**Figuur C.6** Gemeten en gesimuleerde gewasontwikkeling van aardappel en wintertarwe in 1993 voor veldproef Borgerswold (veld 13); met in het groen de potentiële gewasontwikkeling, in het zwart de actuele gewasontwikkeling en in het rood de gemeten waarde. Rusthoeve (aardappel; 2011 – 2013)

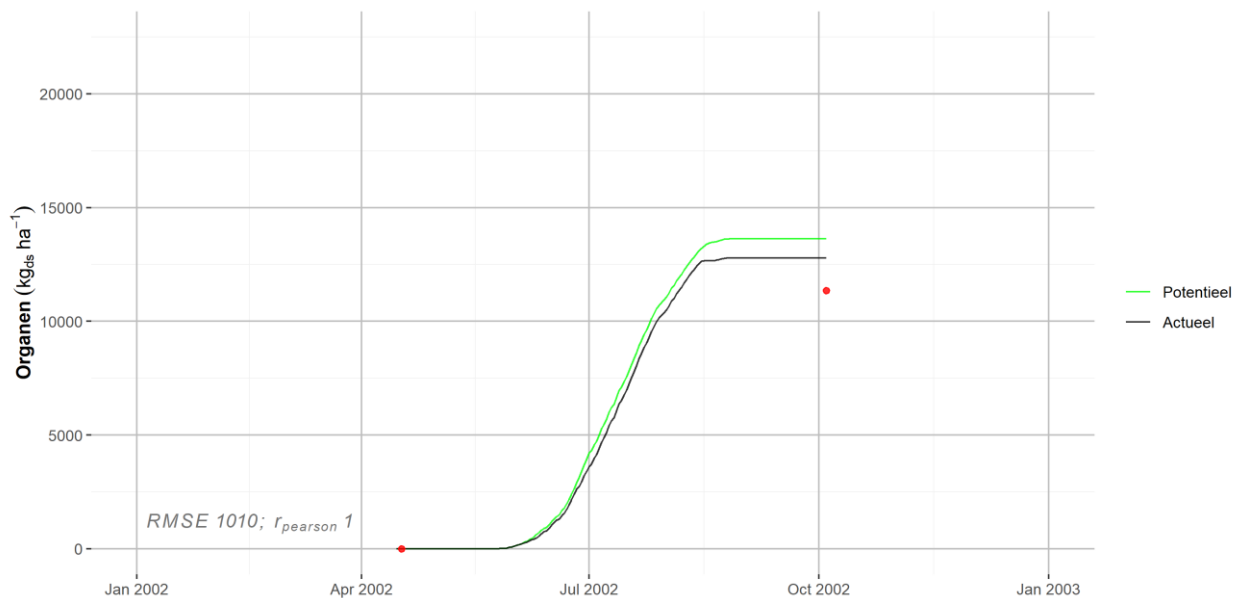
In 2011 tot en met 2013 is een praktijkproef uitgevoerd met regelbare drainage (Schipper e.a., 2015). In Figuur C.7 zijn de resultaten weergegeven, alleen voor 2013 zijn gewasopbrengsten gemeten. Ten opzichte van de gemeten waarde komen de resultaten van de simulaties te hoog uit. Mogelijk dat er te 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 C.7** 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.

Vredepeel (aardappel; 2002)

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 voor het model SWAP zijn overgenomen van Stolk e.a. (2012). De simulatie van het oogstbaar product komt iets te hoog uit (zie Figuur C.8).



**Figuur C.8** 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.

# Bijlage D Gevoeligheid simulatie zuurstofstress

Door Marjolein van Huijgevoort en Ruud Bartholomeus

Zuurstofstress kan op verschillende manieren doorwerkingen in de gesimuleerde gewasopbrengst. Zo wordt bij te natte bodemhydrologische condities niet alleen de vorming van biomassa geremd, maar kan ook de neerwaartse wortelontwikkeling (tijdelijk) geremd worden. Onder relatief natte bodemhydrologische condities kan hierdoor een oppervlakkig wortelsysteem ontstaan, welke later in het groeiseizoen gevoeliger is voor meteorologisch droge perioden. Op deze manier kunnen relatief natte bodemhydrologische condities in het voorjaar later in het groeiseizoen leiden tot droogtestress. Dit modelgedrag zien we voornamelijk terug bij bodemeenheden met zware tot zeer zware klei in het profiel. Dit heeft geleid tot onderzoek naar gevoeligheden met betrekking tot simulatie van zuurstofstress. De hypothese is dat in een gestoorde bodem, zoals macroporiën en scheurvorming, zuurstof tot grotere diepte in de bodem beschikbaar is dan met de huidige modelconcepten berekend wordt.

Er zijn binnen SWAP verschillende parameters die de hoeveelheid zuurstof in de bodem bepalen. Voor het bepalen van de zuurstofstress wordt gebruik gemaakt van de module ontwikkeld door Bartholomeus e.a. (2018). In eerste instantie hebben we de gevoeligheden voor de berekende droogte- en zuurstofstress bij aanpassingen in de parametrisatie van de zuurstofroutine bekeken. In tweede instantie hebben we gekeken naar een eenvoudig concept om de zuurstofdiffusie in de bodem aan te passen om rekening te houden met macroporiën en scheurvorming. Deze analyses dragen stapsgewijs bij aan het systematisch beter begrijpen van de gevoeligheden, missende processen en (pragmatische) methoden voor het eventueel aanpassen van de berekening van zuurstofstress in WWL.

## Gevoeligheid voor invoerparameters huidige module

We hebben eerst bekeken wat de gevoeligheid is van bepaalde parameters die het zuurstofgehalte in de bodem bepalen. De volgende parameters zijn meegenomen:

- Parameter die wortelgroei stopt bij een bepaalde mate van zuurstofstress (AERATECRIT).
- Parameters die het microbiële zuurstofgebruik bepalen. De relatieve toename in microbiële respiratie, als gevolg van een toename van de temperatuur van 10°C (Q10\_MICROBIAL). Microbiële respiratie is het zuurstofgebruik van microben in de bodem, wat de zuurstofbeschikbaarheid voor de plantenwortels beïnvloedt. Respiratie van humus (SPECIFIC\_RESP\_HUMUS).
- Parameters die van invloed zijn op de diffusiviteit (H100 en H500) van de bodem. De diffusiviteit bepaalt hoe makkelijk zuurstof zich vanuit het oppervlak tussen de bodemporiën in de bodem kan verspreiden. De diffusie in de bodem wordt hierbij bepaald door bodemvocht karakteristieken (Moldrup e.a., 2000):

$$D_{soil} = D_0(2\phi_{gas,100}^3 + 0.04\phi_{gas,100})\left(\frac{\phi_{gas}}{\phi_{gas,100}}\right)^{2+3/b} \quad \text{Vergelijking D-1}$$

Waarbij  $D_0$  de diffusiecoëfficiënt voor zuurstof in lucht is ( $m^2/d$ ),  $\phi_{gas,100}$  de met gas gevulde porositeit voor bodemvocht drukhoogte  $h=-100cm$  (-) is,  $\phi_{gas}$  de met gas gevulde porositeit is en  $b$  de Campbell waterretentie parameter (Campbell, 1974). De  $b$ -waarde wordt als volgt bepaald (Moldrup e.a., 2000):

$$b = \frac{\log[500] - \log[100]}{\log[\theta_{h=-100cm}] - \log[\theta_{h=-500cm}]} \quad \text{Vergelijking D-2}$$

De gevoeligheid voor de keuze van -100 en -500 cm in deze bepaling van  $b$  is onderzocht en hiermee het effect op de beschikbaarheid van zuurstof voor plantenwortels.

De parameters AERATECRIT, Q10\_MICROBIAL, SPECIFIC\_RESP\_HUMUS en H100 en H500 zijn gevarieerd voor verschillende gewassen, bodems en hydrologische condities. In Tabel 18 worden de standaardwaarden en ranges voor de parameters gegeven. De gevoeligheidsanalyses zijn gebaseerd op inschattingen van de parameters op basis van de literatuur.

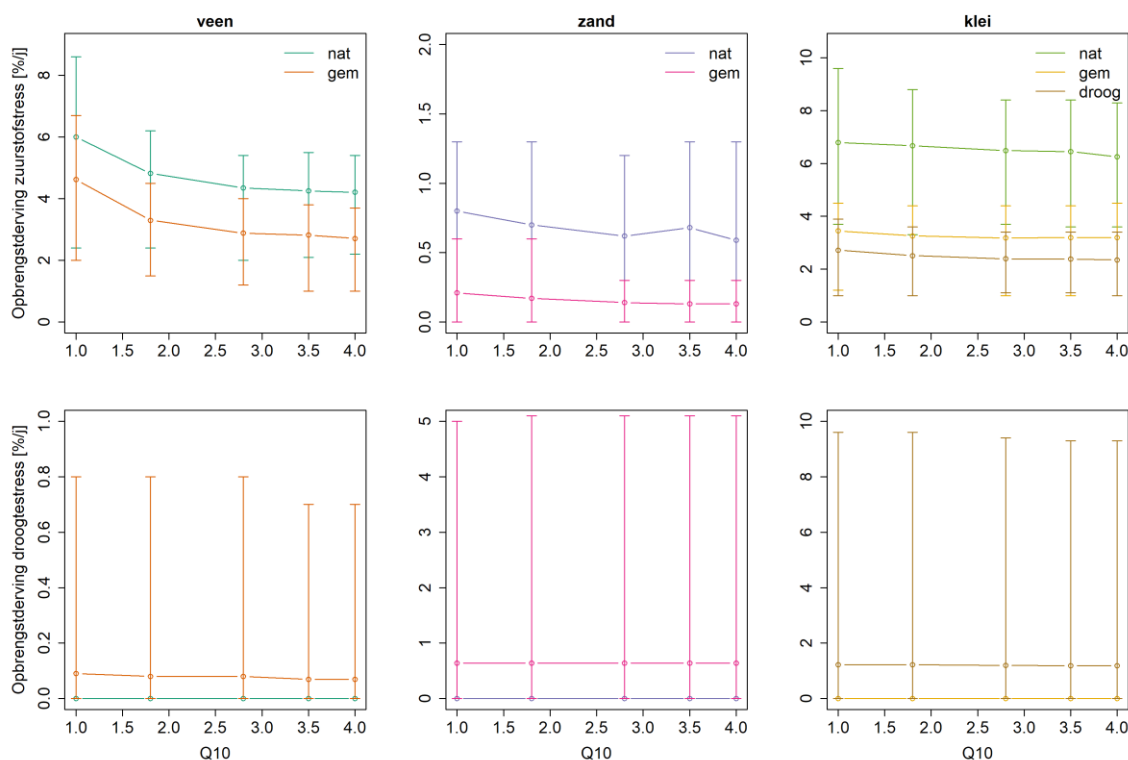
**Tabel 18** Standaard parameterinstellingen en gehanteerde spreiding.

Parameter	Beschrijving	Standaard Spreiding	
AERATECRIT	Drempelwaarde om wortelgroei te stoppen bij zuurstofstress	0.5	0.0 – 1.0
Q10_MICROBIAL	Relatieve toename in microbiële respiratie bij een temperatuursverhoging van 10°C	2.8	1.0 – 4.0
SPECIFIC_RESP_HUMUS	Respiratie humus bij 25°C	0.0016	0.00001 – 0.1
H100	Drukhoogte voor bepalen $b$	-100	-200.0 – -50.0
H500	Drukhoogte voor bepalen $b$	-500	-1000.0 – -200.0

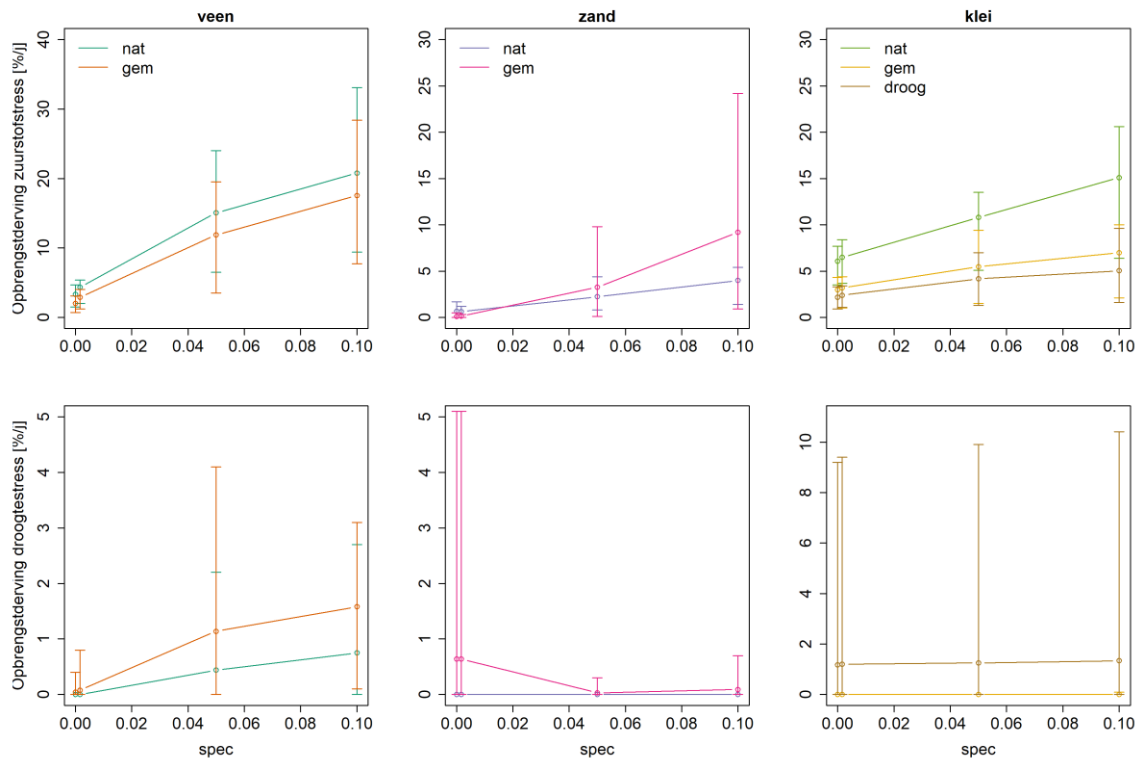
Voor de periode 2015 – 2024 zijn modelsimulaties uitgevoerd met gras en snijmais. De hydrologische condities variëren van nat (grondwaterstand ongeveer 0.4 tot 0.6 m-mv), gemiddeld (1.0 tot 1.5 m-mv) tot droog (1.5 tot 2.0 m-mv). Voor de bodemeigenschappen hanteren we een veen (BOFEK-eenheid 1018), zand (BOFEK-eenheid 3015) en klei (BOFEK-eenheid 4018 voor gras en BOFEK-eenheid 4007 voor snijmais).

Op basis van de jaarlijks gesimuleerde opbrengstderving als gevolg van droogte- en zuurstofstress kan geconcludeerd worden dat de opbrengstderving vrijwel ongevoelig is voor de veranderingen in de meeste parameters die hierboven genoemd zijn. Figuur D.1 geeft de jaarlijkse, minimum en maximum opbrengstderving weer voor de verschillende waarden voor de parameter Q10\_MICROBIAL. De grootste verandering is te zien voor de veenbodem met natte condities waar de gemiddelde jaarlijkse opbrengstderving varieert tussen 6 en 4.2%. Voor veranderingen in de parameters AERATECRIT, H100 en H500 zijn de verschillen zelfs nog kleiner.

Alleen bij aanpassingen in de respiratie van humus zijn grotere verschillen zichtbaar (Figuur D.2). Hier varieert de opbrengstderving tussen de 3.3% en 20.8%. De grotere verschillen voor deze parameter kunnen verklaard worden door de veel grotere range die is aangenomen voor deze parameter (0.00001-0.1) ten opzichte van de andere parameters, om meer inzicht te krijgen in het effect van extreem hoog microbiële zuurstofgebruik. De standaardwaarde van 0.0016 is gebaseerd op informatie uit literatuur (Fierer e.a., 2005); een toename naar 0.1 lijkt daarom niet realistisch.



**Figuur D.1** Gemiddelde, minimum en maximum jaarlijkse opbrengstderving voor gras door zuurstofstress (boven) en door droogtestress (onder) voor de verschillende types bodem en hydrologische condities voor verschillende waarden van de parameter Q10\_MICROBIAL.



**Figuur D.2** Gemiddelde, minimum en maximum jaarlijkse opbrengstderving voor gras door zuurstofstress (boven) en door droogtestress (onder) voor de verschillende types bodem en hydrologische condities voor verschillende waarden van de parameter SPECIFIC\_RESP\_HUMUS.

### Aanpassing gehalte luchtgevulde poriën

De diffusie van de zuurstof in de bodem kan aangepast worden om rekening te houden met verschijnselen als scheuren en macroporiën. De diffusie van zuurstof in de bodem is met name afhankelijk van bodemkarakteristieken. Een eerste stap is het verkennen van de gevoeligheid van de zuurstofstress voor de macro-diffusie. Hierdoor kan snel inzicht verkregen worden in het effect van zuurstof die verder doordringt in de bodem. Dit kan door aanpassingen aan de berekening van de diffusie.

Macrodiffusie wordt beschreven via de diffusiecoëfficiënt  $D_{soil}$  volgens Vergelijking D-1. Hierin veronderstellen we dat  $D_0$ ,  $b$  en  $f_{gas,100}$  constanten zijn. Daarmee is  $D_{soil}$  dus primair afhankelijk van het luchtgevulde poriënvolume  $f_{gas}$ , welke is gegeven als het verschil in porositeit (volumetrisch watergehalte bij verzadiging) minus het actuele volumetrische watergehalte:

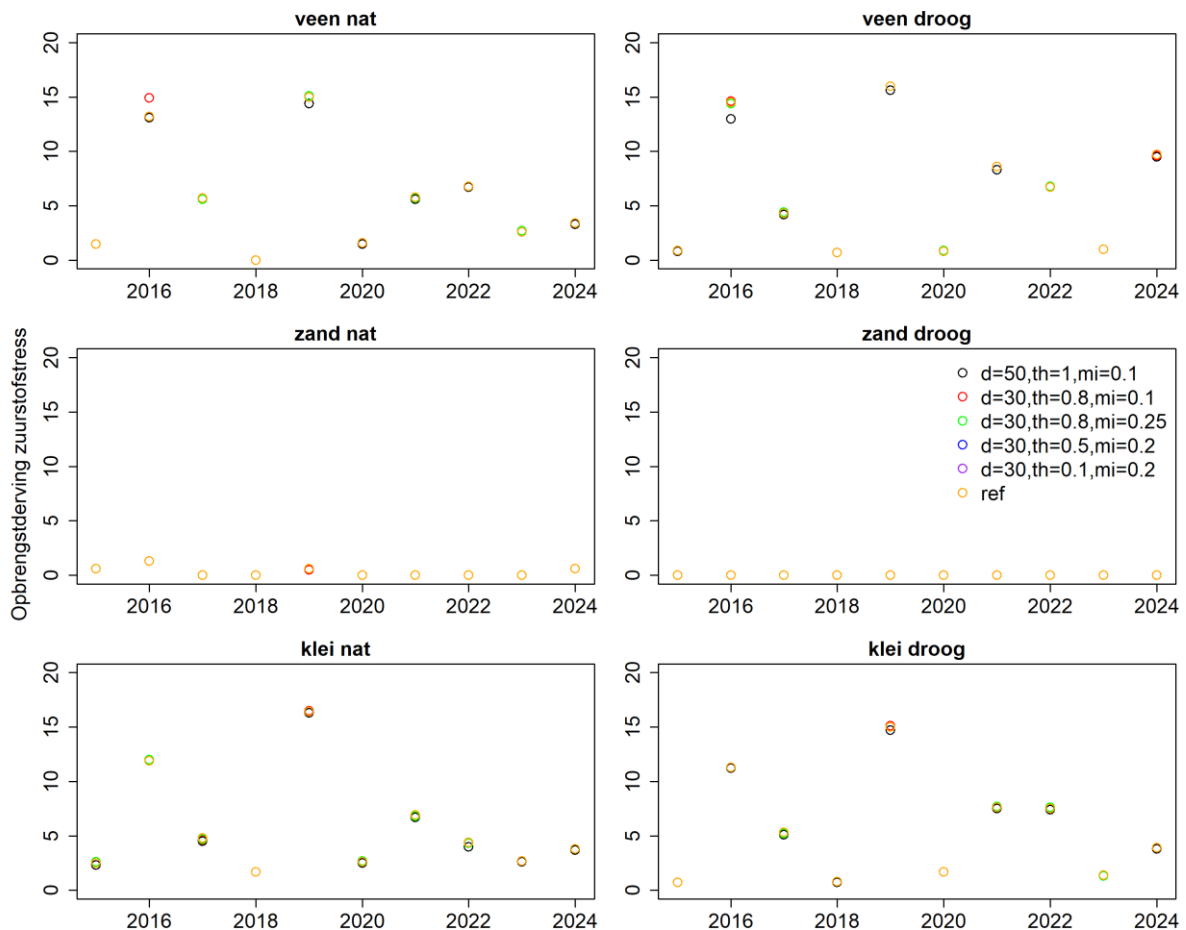
$$\phi_{gas} = \theta_{sat} - \theta \quad \text{Vergelijking D-3}$$

Wanneer scheuren of macroporiën ontstaan of aanwezig zijn dan zal zuurstof makkelijker ook op grotere diepte de bodem in kunnen diffunderen. Dat is in werkelijkheid een 3D probleem. Om dit op een eenvoudige manier na te bootsen in het 1D model SWAP kan de waarde van  $f_{gas}$  (tijdelijk) worden verhoogd. Een eenvoudig en pragmatisch concept hiervoor is:

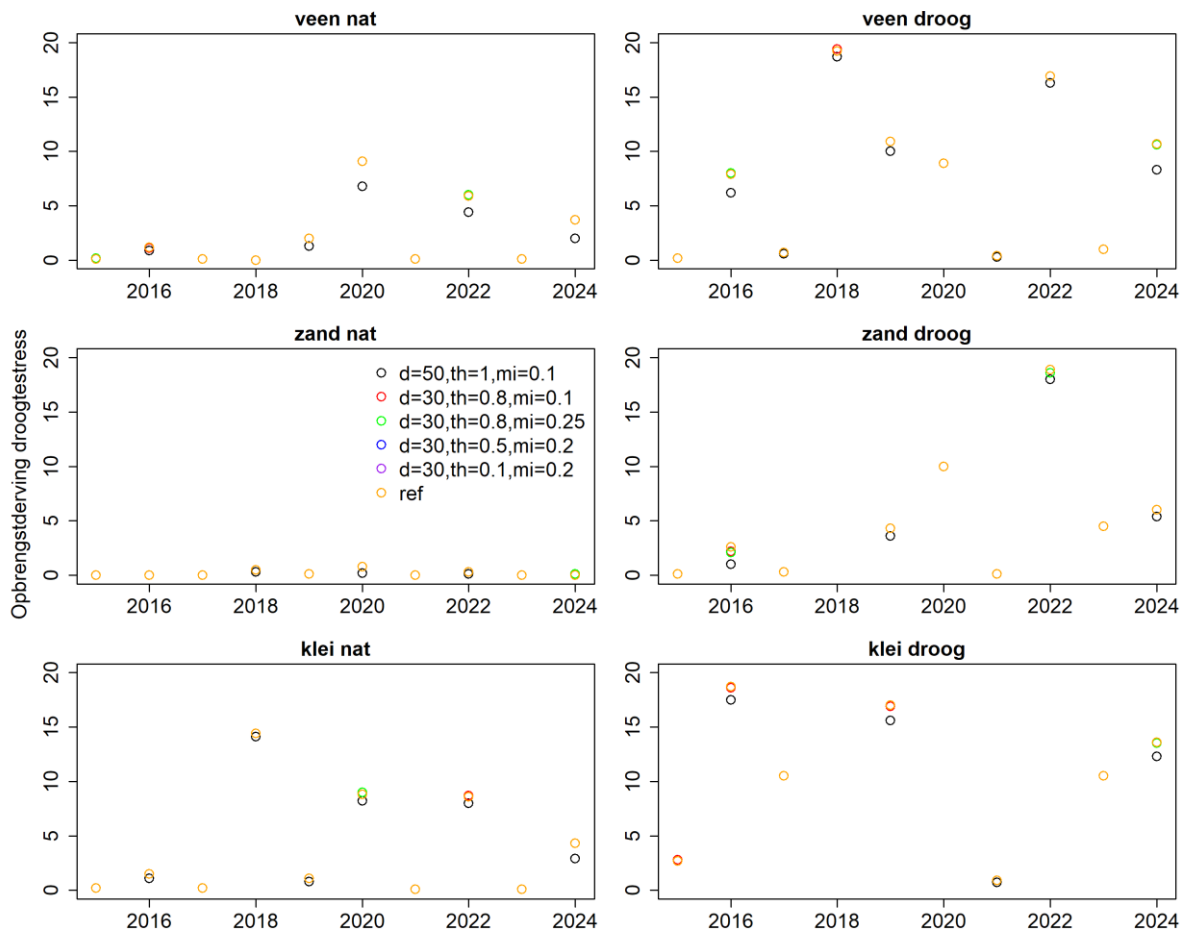
$$\phi_{gas} = \begin{cases} (\theta_{sat} - \theta) & \theta \geq \theta_{crit} \\ ((\theta_{sat} - \theta) + F[\theta]\phi^*) & \theta < \theta_{crit} \end{cases} \quad \text{Vergelijking D-4}$$

Onder natte omstandigheden wanneer  $q$  groter is dan een of andere kritieke  $q_{crit}$  waarde, zullen er geen macroporiën of scheuren aanwezig zijn. Onder droge omstandigheden wordt het luchtgevulde poriënvolume verhoogd met een waarde  $f^*$ , waarbij het mogelijk is om deze verhoging een functie te laten zijn van het volumetrisch vochtgehalte  $F[q]$ , welke varieert in het traject  $[0...1]$ . De waarde van  $f^*$  zal moeten worden ingeschat op basis van de vorm en mate van voorkomen van macroporiën of scheuren. Wanneer deze weinig voorkomen en niet diep/groot zijn dan is  $f^*$  relatief klein, en wanneer deze op grote schaal voorkomen en een groot volume beslaan, dan zal  $f^*$  groter zijn. Onderzocht wordt wat het effect is van de factor  $F$  op de berekening van zuurstofstress en de doorwerking op wortelontwikkeling en droogtestress. In deze stap hebben de aanpassingen alleen direct effect op de berekende zuurstofstress, en indirect op droogtestress.

Voor het testen van aanpassingen aan de berekening van de macrodiffusie zijn drie parameters toegevoegd aan SWAP: MAX\_DEPTH, THETA\_CRIT, MAX\_INCREASE. MAX\_DEPTH geeft aan tot welke diepte de extra zuurstofdiffusie plaatsvindt, er zijn waarden getest van 30 en 50 cm. THETA\_CRIT geeft de fractie van OSAT als drempelwaarde wanneer extra zuurstofdiffusie optreedt, hiervoor zijn waarden getest van 0.8, 0.5 en 0.1. MAX\_INCREASE geeft de maximale absolute toename van het gehalte luchtgevulde poriën, met waarden van 0.1, 0.2 en 0.25. In Figuur D.3 en Figuur D.4 zijn de verschillen in jaarlijkse opbrengstderving als gevolg van zuurstof- en droogtestress weergegeven voor de verschillende parametrisaties van de macrodiffusie. Zowel voor de droogtestress als voor de zuurstofstress zijn er weinig verschillen zichtbaar tussen de verschillende parametrisaties. SWAP is dus vrijwel niet gevoelig voor de aanpassingen aan de berekening van de macrodiffusie.



**Figuur D.3** Jaarlijkse opbrengstderving als gevolg van zuurstofstress (%) voor verschillende parametrisaties van de macrodiffusie, waarbij  $d$  de MAX\_DEPTH is,  $th$  is THETA\_CRIT en  $mi$  is MAX\_INCREASE.



**Figuur D.4** Jaarlijkse opbrengstderiving als gevolg van droogtestress (%) voor verschillende parametrisaties van de macrodiffusie, waarbij  $d$  de  $MAX\_DEPTH$  is,  $th$  is  $THETA\_CRIT$  en  $mi$  is  $MAX\_INCREASE$ .

### Conclusie

In de ontwikkeling van SWAP en, in het bijzonder, in de berekening van de effecten van te droge en te natte condities op de gewasgroei, zijn in de afgelopen jaren belangrijke conceptuele aanpassingen gedaan. Zo zijn concepten ingebouwd die de empirische wateropname volgens Feddes op een meer procesmatige manier beschrijven. Dit geldt voor zowel de 'droge' als de 'natte' kant van de Feddes functie. Reductie van wateropname als gevolg van te droge omstandigheden wordt nu beschreven met behulp van het mechanistische wateropname concept, en reductie door te natte omstandigheden met het zuurstofconcept volgens Bartholomeus e.a. (2008), dat macrodiffusie van zuurstof (vanuit het oppervlak door de bodem) en microdiffusie (vanuit de bodemporiën naar de wortel) combineert. Beide concepten sluiten daarmee goed op elkaar aan.

Uit de gevoeligheidsanalyses blijkt dat het model niet gevoelig is voor de onderzochte aanpassingen in de parameters en in de berekening van de macrodiffusie bij de huidige modelkeuzes. In de modelruns in dit onderzoek is het concept van mechanistische wateropname gebruikt. Door de mechanistische wateropname kan er veel compensatie plaatsvinden van droogte- en zuurstofstress, wat de beperkte gevoeligheden deels kan verklaren. Bij het gebruik van andere modelconcepten kan de gevoeligheid voor de geteste veranderingen anders zijn.

Dit onderzoek, ook al is het beperkt in omvang, laat zien dat de keuzes die gemaakt zijn in de parametrisatie van de zuurstofroutine robuust zijn. De parameters zijn gebaseerd op waarden in de wetenschappelijke literatuur en variaties in de parameters hebben maar weinig effect op de berekende zuurstofstress.

# Bijlage E Simulatie van stikstoflimitatie

*Door Marius Heinen*

Bij de ontwikkeling en gebruik van WWL is tot nu toe alleen aandacht besteed aan de effecten van droogte- en zuurstofstress op gewasontwikkeling (en in een allereerste versie ook zoutstress). Hierbij werd expliciet verondersteld dat overige beperkende factoren afwezig zijn. Hierbij gaat het dan om beperkingen als gevolg tekorten aan nutriënten (voedingsstoffen) voor het gewas of de aanwezigheid van ziekten en plagen in het gewas. De nutriënten worden aan de bodem toegediend via organische mest en kunstmest. Omdat steeds zuiniger wordt omgegaan met toediening van deze meststoffen wordt de kans groter dat tekorten aan voeding tijdens het groeiseizoen ontstaan wat leidt tot groeireductie. De wens is geuit om WWL uit te breiden met de mogelijkheid om ook stikstofstress te beschouwen. Formeel zouden alle voedingselementen (macronutriënten en micronutriënten)<sup>5</sup> moeten worden beschouwd. Dat vraagt veel van de modellen, en dat vraagt om een compleet chemisch evenwichtenmodel<sup>6</sup> om alle interacties tussen nutriënten met de bodem en onderling te beschouwen. Dat gaat voorlopig te ver voor WWL en we beperken ons in eerste instantie tot stikstof (N), omdat N het belangrijkste macronutriënt is.

Hieronder wordt kort beschreven hoe stikstof in WOFOST wordt beschouwd, hoe het bestaande nutriëntenmodel ANIMO op dit moment met SWAP(-WOFOST) gedraaid kan worden en wat er nodig zou zijn om de SWAP-module 'stoftransport' uit te breiden met een groot aantal stikstof deelprocessen. Tenslotte wordt een voorstel gedaan hoe WWL kan worden uitgebreid met stikstof.

## Stikstofvraag (WOFOST)

Sinds kort is WOFOST uitgebreid met berekening van stikstofvraag en -beschikbaarheid (Berghuijs e.a., 2024). Hierbij is het mogelijk om de dagelijkse behoefte aan N te simuleren. Deze WOFOST versie is beschikbaar als versie 8.1. Wanneer blijkt dat N niet voldoende kan worden opgenomen door het gewas, dan kan dit leiden tot groeireductie van het gewas. Berghuijs e.a. (2024) hebben dit getoetst en gevalideerd voor wintergraan. Hierbij is gebruik gemaakt van een modelkoppeling in het kader van het project Digital Future Farm (DFF). Hierin waren de volgende modellen gekoppeld: WOFOST, SWAP, SNOMIN. Het model SNOMIN beschrijft diverse stikstof (omzettings)processen en maakt gebruik van de waterbalans van SWAP. Deze koppeling werkt technisch maar is lastig te onderhouden omdat de modellen elk in een andere taal zijn geprogrammeerd: de koppelaar en SNOMIN in C#, WOFOST in Python en SWAP in Fortran. Deze aanpak wordt hier niet verder in detail beschreven. Onderdelen van SNOMIN komen later aan bod. In SNOMIN is stoftransport vereenvoudigd tot puur convectief transport (dus geen convectie-dispersie zoals in de stoftransportmodule van SWAP), en de stikstofopname geschiedt op basis van aanwezigheid in de wortelzone en niet zozeer op basis van de mogelijkheid dat wortels inderdaad de aanwezige N kunnen opnemen, zoals nu in SWAP wel wordt beschouwd voor water en zuurstof.

## Stikstofbeschikbaarheid

Voor de simulatie van stikstofbeschikbaarheid zijn er drie opties beschikbaar:

- **SWAP-ANIMO**  
Specifiek voor de evaluatie meststoffenwet in Nederland (LWKM: Landelijk WaterKwaliteitsModel) wordt gebruik gemaakt van de modelcombinatie SWAP-ANIMO. Het model ANIMO (Groenendijk e.a., 2005) beschrijft de dynamiek van stikstof (N)<sup>7</sup> maar ook van fosfor (P). Als input maakt het onder meer gebruik van de waterbalans-berekeningen van een vooraf uitgevoerde run met SWAP. Dat betekent dat er in deze werkwijze dus geen terugkoppeling mogelijk is vanuit ANIMO richting SWAP-WOFOST. Ofwel, indien tekorten aan stikstof optreden, dan heeft SWAP hier geen rekening mee

---

<sup>5</sup> Macronutriënten: stikstof (N), fosfor (P), kalium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), zwavel (S); micronutriënten: ijzer (Fe), borium (B), chloride (Cl), mangaan (Mn), zink (Zn), koper (Cu), molybdeen (Mo), nikkel (Ni)

<sup>6</sup> Een voorbeeld is het EPIDIM model van Groenendijk (1987).

<sup>7</sup> Mede op basis van de koolstofbalans (C).

kunnen houden. Dat zou verbeterd kunnen worden door een dagelijkse koppeling mogelijk te maken tussen SWAP en ANIMO. Het ligt wellicht voor de hand dat we in het kader van WWL en het gebruik maken van bestaande modellen de mogelijkheid gaan creëren om die koppeling tot stand te brengen. In het verleden is een succesvolle koppeling op dagbasis gerealiseerd tussen ANIMO en een ander waterbalansmodel (i.c. FUSSIM) (Rappoldt e.a., 2008).

- *SWAP N-module*

Hierboven werd vermeld dat er geen terugkoppeling bestaat tussen ANIMO en SWAP, waardoor bij een stikstoftekort het SWAP-WOFOST model geen rekening heeft kunnen houden met een groeireductie als gevolg hiervan. Daarom is in SWAP-WOFOST een N-module opgenomen waarin op relatief eenvoudige wijze rekening gehouden kan worden met de stikstofbeschikbaarheid voor opname en aanpassing van de groei indien er een N-tekort wordt gesimuleerd (Groenendijk e.a., 2016). De stikstofbalans wordt alleen voor 1 laag (typisch de wortelzone; gebruikmakend van een koolstof afbraakmodule gebaseerd op RothC) bijgehouden en is daarmee veel minder gedetailleerd dan de N-balans die in ANIMO wordt gesimuleerd. Dat betekent ook dat de N-toestand die in de N-module in SWAP wordt gesimuleerd slechts een grove benadering is, en vooral gezien moet worden als een pre-processing optie voor de latere werkelijke ANIMO simulatie. Daarbij is het ook lastig om goede schattingen voor enkele invoerparameters te verkrijgen, en is het lastig om gewasopvolging (met ieder eigen diktes van de wortelzone) te beschouwen.

- *SWAP stoftransportmodule uitbreiden*

Naast de hierboven genoemde N-module kent SWAP ook een stoftransportmodule. In deze module wordt het transport beschreven van een stof in de bodem. De stof kan zowel in oplossing zijn als geadsorbeerd aan de vaste fase (kleideeltjes, organische stof). De stoftransportmodule beschrijft de stofbalans op basis van de klassieke convectie-dispersie vergelijking, aangevuld met enkele bron- en puttermen. In de huidige vorm is het mogelijk om een eerst-orde afbraak van de stof te beschouwen en wortelopname (proportioneel met wateropname). Het is relatief eenvoudig om deze bron- en puttermen te vervangen door specifieke processen voor N; of beter: specifiek productie- en afbraaktermen voor N toe te voegen aan de huidige stofbalansvergelijking. Bij het opzetten van SNOMIN (stikstofmodel in DFF) is vooraf nagegaan welke procesbeschrijvingen er in het verleden zijn toegepast, zoals onder andere in ANIMO (Groenendijk e.a., 2005), FUSSIM (Heinen en de Willigen, 1998, 2001) en OSMANSOIL (Heinen, 2005).

Wanneer de stoftransportmodule van SWAP wordt uitgebreid met de genoemde processen dan kan het idee ontstaan dat hiermee het model ANIMO overbodig wordt. Dat is geenszins het geval. In ANIMO wordt ook rekening gehouden met fosfor (P), en worden soms andere procesbeschrijvingen en reductiefactoren gehanteerd. Ook de oplossing van de stofbalansvergelijking verloopt anders.

### Stikstofprocessen in de bodem

Stikstof in de bodem is onderhevig aan transport in de bodem via convectie (opgelost in het bodemvocht) en dispersie-diffusie (als gevolg van concentratiegradiënten), en in de loop der tijd wordt stikstof gevormd, afgebroken of door wortels opgenomen (zie bijv. Heinen e.a., 2020b). Stikstof in de bodem komt voor in twee vormen: als nitraat ( $\text{NO}_3$ ) en als ammonium ( $\text{NH}_4$ ). In Tabel 19 zijn de belangrijkste bron- en puttermen, of productie en afbraakprocessen, benoemd. Diverse processen zijn afhankelijk van omgevingsfactoren in de bodem, zoals bodemvochtgehalte, bodemtemperatuur en pH. In Heinen e.a. (2020b) en Groenendijk e.a. (2005) worden deze processen beschreven en uitgedrukt in wiskundige formuleringen.

**Tabel 19** Beschrijving van productie en afbraakprocessen voor stikstof (N), waarbij soms onderscheid gemaakt wordt tussen nitraat ( $\text{NO}_3$ ) en ammonium ( $\text{NH}_4$ ).

<b>Productie (bronterm)</b>	<b>Afbraak (putterm)</b>
Toediening:	Vervluchtiging
- Bemesting: anorganisch of organisch	
- Atmosferische depositie	
- Inwerken gewasresten	
Mineralisatie van organische stof	Immobilisatie
Nitrificatie: vorming van $\text{NO}_3$ uit $\text{NH}_4$	Nitrificatie: $\text{NH}_4$ omzetten in $\text{NO}_3$
Desorptie ( $\text{NH}_4$ )	Adsorptie ( $\text{NH}_4$ )
	Denitrificatie: afbraak $\text{NO}_3$ (o.a. vorming $\text{N}_2\text{O}$ )
	Gewasopname
	Uitspoeling

Een van de belangrijke deelprocessen betreft de mineralisatie (afbraak) van organische stof. Hierbij komt onder meer organische stikstof beschikbaar als minerale stikstof ( $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ). In de wetenschappelijke literatuur zijn een groot aantal mineralisatiemodellen beschreven. Dit proces is relatief moeilijk te beschrijven en dat is de reden zijn dat er zoveel alternatieve modellen zijn gepubliceerd. De Willigen e.a. (2008) beschreven zeven organische stof modellen, inclusief de bijbehorende (sterk variërende) reductiefactoren als gevolg van de eerder genoemde omgevingsfactoren. Zij geven aan dat de verschillende modellen verschillende achtergronden hebben en sommige zijn vooral bedoeld voor studies naar lange-termijn effecten, terwijl anderen meer de intentie hebben om enkele groeiseizoenen door te rekenen. Het is dus niet mogelijk om 1 specifiek model aan te duiden welke overal toepasbaar is. Soms is het ook mogelijk om te laten zien dat eenvoudige en iets meer ingewikkelde modellen toch redelijk in elkaar zijn om te zetten. Zo zijn bijvoorbeeld het eenvoudige MINIP model van Janssen (1984, 1986a,b) en een multi-pool model aan elkaar te relateren zoals beschreven in Heinen en de Willigen (2005) of Groenendijk e.a. (2005). Tabel 20 geeft aan welke procesbeschrijvingen in de stoftransportmodule van SWAP kunnen worden toegevoegd om de productie- en afbraakprocessen (zie Tabel 19) voor N te beschouwen.

Veel van de N-processen zijn afhankelijk van abiotische omstandigheden in de bodem, zoals afhankelijkheid van het vochtgehalte (of alternatief het zuurstofgehalte), de bodemtemperatuur of de pH. Daarvoor worden vaak reductiefactoren gehanteerd die de processnelheden beïnvloeden. Ook hiervoor geldt dat er in de wetenschappelijke literatuur heel veel verschillende reductiefuncties of parameterisaties daarvan bestaan (zie bijv. Heinen, 2006; Bakema e.a., 2022).

De simulatie van N-opname (Tabel 20) vereist wel dat bekend is hoeveel N het gewas moet opnemen. Dat betekent dat de WOFOST-versie die nu in SWAP is ingebed een update moet krijgen zodat het gelijkgesteld wordt met WOFOST versie 8.1. Tevens dient dan ook de gerealiseerde opname (of opnamereductie) weer tergegeven te worden aan WOFOST zodat de groei kan reageren op een eventueel N-tekort.

Diverse N-processen zijn afhankelijk van de omgevingsfactoren: watergehalte in de bodem, bodemtemperatuur en pH. Meestal gebeurt dit door reductiefactoren op de procesbeschrijvingen toe te passen. Ook deze functies moeten dan in de stoftransportmodule van SWAP worden opgenomen. In bovenstaande bronnen zijn deze ook beschouwd en kunnen dus worden overgenomen.

**Tabel 20** *Indicatie van modelconcepten die voor de productie- en afbraakprocessen van N geïmplementeerd kunnen worden in de stoftransportmodule van SWAP.*

Proces	Modelconcept
Toediening	Invoer van hoeveelheden en tijdstippen
Vervluchting	Vaak een vaste fractie van sommige toegediende organische meststoffen welke als invoer wordt opgegeven
Mineralisatie, immobilisatie	MINIP Bij hoge C:N verhouding van het organische materiaal kan N-immobilisatie plaatsvinden in MINIP; deze N kan later weer vrijkomen
Nitrificatie	ANIMO
Denitrificatie	Eerste orde afbraak of reductie potentiële denitrificatie (zie FUSSIM, ANIMO, OSMANSOIL; zie bijv. Heinen, 2006)
Adsorptie, desorptie	Adsorptie-desorptie van $\text{NH}_4$ kan als een lineair proces beschouwd worden (ANIMO); alternatieve procesbeschrijvingen zijn: Langmuir of Freundlich.
Opname	FUSSIM (in analogie met de proces-gebaseerde opnamemodellen voor wateropname en zuurstofopname in SWAP)

### Stikstof in Waterwijzer Natuur

In Waterwijzer Natuur (WWN) wordt al rekening gehouden met stikstof. Jelmer Nijp (KWR) gaf hierbij het volgende aan. Bij WWN is gekozen om onderdelen (zoals mineralisatie) van het model CENTURY<sup>8</sup> (<https://www.soilcarbonsolutionscenter.com/century>) te gebruiken (opnieuw gecodeerd). Er is gekozen om alleen de N-processen in de wortelzone te beschouwen, en de wortelzone als 1 box te zien. Er is dus geen differentiatie van N-gehalten in de diepte of onder de wortelzone mogelijk. Deze aanpak is dus in essentie hetzelfde als de huidige N-module in SWAP. Jelmer Nijp geeft ook aan dat voor veel processen in natuurgebieden het ook belangrijk is om verticale heterogeniteit in N-gerelateerde parameters/processen

<sup>8</sup> Het model CENTURY was oorspronkelijk opgezet met tijdstapbasis van 1 maand. CENTURY wordt niet meer onderhouden, en is vervangen door DAYCENT (<https://www.soilcarbonsolutionscenter.com/daycent>) dat op dagbasis simuleert.

---

mee te nemen (o.a. ook N die via kwel het profiel inkomt), hetgeen in de huidige versie van WWN niet mogelijk is.

### Onzekerheid en nauwkeurigheid

Modellen zijn per definitie benaderingen van de werkelijkheid. In de basis geldt wel dat de massabalansvergelijkingen, die de basis vormen voor de beschrijving van waterbeweging en stoftransport, op zichzelf robuust en zeker zijn. In die balansvergelijkingen komen ook bron- en puttermen voor die op zichzelf weer door andere modelconcepten worden beschreven, en er zijn soms beschrijvende relaties nodig om de balansvergelijking te kunnen oplossen. De modelconcepten die de bron- en puttermen beschrijven (voor N zie Tabel 19) zijn vaak onzeker. Wanneer slechts enkelen hiervan worden beschouwd dan zal de einduitkomst van de oplossing van de N-balans vergelijking op zichzelf robuust zijn, maar het resultaat nog steeds onzeker. Zekerheid en hoge nauwkeurigheid is dus nooit te garanderen. Het verdient wel de aanbeveling zo goed mogelijk alle (deel)processen in beschouwing te nemen, en niet slechts een deel.

Voor het model ANIMO is in het verleden een gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse gerapporteerd door Groenenberg e.a. (2000). Hoewel dit een oudere versie van ANIMO betrof dan de versie die nu wordt gehanteerd in LWKM, geven we hier toch kort de samenvatting van Groenenberg e.a. (2000). De gevoeligheidsanalyse werd uitgevoerd voor vijf combinaties van bodem, gewas, hydrologie en mestgift. Vrijwel alle invoerparameters zijn meegenomen in een Monte-Carlo analyse. De onzekerheidsanalyse was beperkt tot één combinatie en tot de bodemkundige en bemestingsparameters. De meest gevoelige uitgangen van het model zijn afvoer naar het oppervlaktewater en de concentratie van NO<sub>3</sub> op GLG-niveau. Uitspoeling van P was het minst gevoelig. De onzekerheid in de uitspoeling van N en P wordt voornamelijk bepaald door onzekerheden in de mestgift.

Bij WWN is laten zien hoe de modelconcepten voor mineralisatie uit de modellen CENTURY en VSD zich verhouden tot metingen (Nijp e.a., 2022). Beide modellen hebben moeite om de gemeten mineralisatie te reproduceren. Toch schrijven ze verder: *"... Dit wijst op complexe processen die de N-mineralisatie beïnvloeden, en op de moeilijkheden om de N-mineralisatie te valideren met veldgegevens wegens mogelijke meetfouten. Rekening houdend met deze grote onzekerheid, kunnen beide modellen de N-mineralisatie redelijk voorspellen, zowel in absolute termen als wat de verschillen tussen de locaties betreft."*

### Advies

Uit bovenstaande beschrijvingen wordt duidelijk dat bij toevoeging van stikstof aan WWL rekening gehouden moet worden met een groot aantal deelprocessen (en bijbehorende parametrisaties). In theorie zijn deelprocesbeschrijvingen uit de literatuur in de bestaande SWAP-module 'stoftransport' toe te voegen. Dat zijn dan voor een groot deel beschrijvingen die equivalent zijn aan de procesbeschrijvingen in het bestaande model ANIMO. In Nederland is ANIMO op dit moment en in de toekomst het nutriëntenmodel voor onder meer evaluatie mestbeleid (Piet Groenendijk (WENR), persoonlijke mededeling). Hiervoor worden in het LWKM landelijke schematisaties opgesteld. Het ligt dan ook erg voor de hand om in WWL hierop aan te sluiten. Daarom is het advies om een koppeling tussen SWAP-WOFOST en ANIMO tot stand te brengen waarbij uitwisseling van gegevens op dagbasis zal plaatsvinden.

# Bijlage F Simulatie van zoutstress

*Door Pim Dik*

Het Programmaplan 'Omgaan met zout in landbouw, natuur en waterbeheer' is opgesteld in opdracht van het ministerie van I&W, het ministerie van LNV en STOWA. Het programmaplan is gericht op het beantwoorden van fundamentele kennisvragen over verzilting van de wortelzone in samenhang met het grond- en oppervlaktewater, de zouttolerantie van gewassen en die van natuurlijke vegetatie in de Nederlandse context en hoe dit gemodelleerd en gemonitord moet worden. Het programma is onderverdeeld in de werkpakketten (Hack-ten Broeke e.a., 2025):

- Zoutgehalte in het bodemvocht en wortelzone;
- Zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie;
- Bruikbaarheid van resultaten;
- Effecten van zout op bodem, (bodem)biodiversiteit en aquatische natuur.

Belangrijk uitgangspunt in de voorgestelde aanpak, is dat kennis van de fysische en plantfysiologische processen in de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer de basis vormen voor afgeleide, meer praktisch toepasbare werkwijzen. Dit geldt ook voor de WWL, waar kennis van droogte- en zuurstofstress in detail in SWAP is gemodelleerd en vervolgens via het metamodel wordt vertaald naar eenvoudig toepasbare tabellen/functions. Er is een wens om functionaliteit uit te breiden met zout en het effect daarvan op de gewasgroei.

Natuurlijk kan de belasting met zout van boven komen door neerslag, irrigatie en atmosferische depositie en ook toevoer via kwelwater of infiltratie vanuit het oppervlaktewater en drains. Deze verschillende bronnen hebben op hun eigen manier invloed op de groei van het gewas. Hoe kunnen we binnen de WWL met deze verschillende bronnen rekening houden? Met welke aspecten van de zoutbelasting kunnen we in de WWL überhaupt rekening houden? Is er nog onderscheid te maken in het effect van zoutstress op gewasontwikkeling gedurende de verschillende groeistadia van het gewas? Hieronder verkennen we de mogelijkheden om zoutschade in de Waterwijzer op te nemen.

## Zoutgerelateerde processen en parametrisatie

### *Zoutbelasting*

Als eerste moet er zout zijn, want als dat er niet is, zal er ook geen schade zijn. Dus in Hoog-Nederland is het, buiten het gebruik van strooizout, niet een punt van aandacht. De volgende zoutbronnen kunnen worden onderscheiden:

- Atmosferische depositie: Atmosferische, of ook wel droge, depositie heeft invloed op de zoutbalans. De grootte van deze depositie is afhankelijk van de locatie (waaronder afstand tot de zee). De bijdrage zal echter in het grootste deel van Nederland beperkt zijn.
- Neerslag: Zoutconcentraties in neerslag zijn doorgaans laag, maar ze kunnen variëren afhankelijk van verschillende factoren zoals locatie, atmosferische omstandigheden en nabijheid van zeeën of industrie:
  - Algemene zoutconcentraties: Neerslag heeft meestal een zoutconcentratie van minder dan  $0.1 \text{ g l}^{-1}$  ( $100 \text{ mg l}^{-1}$ ). Dit is relatief laag en heeft meestal geen significante impact op de bodem of gewassen.
  - Kustgebieden: In kustgebieden kan de zoutconcentratie in neerslag hoger zijn, vooral tijdens stormen of wanneer er veel zeewater in de lucht wordt geblazen. Hier kunnen concentraties oplopen tot  $0.5 \text{ g l}^{-1}$  of zelfs hoger, afhankelijk van de omstandigheden.
  - Industriële gebieden: In de nabijheid van industriële activiteiten kan de zoutconcentratie in neerslag ook toenemen door emissies.

- Seizoensgebonden variaties: zoutconcentraties in neerslag kunnen variëren afhankelijk van het seizoen. In sommige gebieden kan de neerslag in de zomer hogere zoutconcentraties vertonen door verdamping en andere atmosferische processen.
- Irrigatie of beregening: Zoutconcentraties in beregeningswater: Voor de meeste gewassen is een zoutconcentratie van minder dan 300 mg Cl l<sup>-1</sup> ideaal. Een aantal kapitaalintensieve gewassen waaronder tuinbouw onder glas, boom en sierteelt is gevoelig bij zoutconcentraties van minder dan 300 mg Cl l<sup>-1</sup> (Stuyt e.a., 2016).
- Oppervlaktewater: Oppervlaktewater kan een bron voor beregeningswater zijn, daarnaast heeft het oppervlaktewater interactie met het grondwater, waarbij zowel drainage als infiltratie vanuit oppervlaktewater op kan treden. Het af te voeren water wordt onttrokken aan verschillende bodemlagen (de switch SWDIVD dient geactiveerd te worden en bepaalt samen met de drainafstand L en de diepte van het ontwateringsmiddel, ZBOTDR, waar hoeveel water aan de bodem lagen onttrokken wordt). In de zomer vindt mogelijk aanvoer van water door infiltratie vanuit de watergang plaats, maar ook via bv. peilgestuurde drainage. De concentratie in het oppervlaktewater is dan mede bepalend voor de zoutbelasting van het grondwater.
- Kwel: In West-Nederland met de diepe polders vinden relatief grote opwaartse brakke/zoute kwelstromen plaats door de diepe ontwatering ten opzichte van het omliggende oppervlaktewateren en zeeniveau. Deze kwelstromen bevatten vaak (veel) zout, doordat de zeeklei in een zout milieu is afgezet. Naast klimaatverandering zal in de toekomst een stijging van de zeespiegel zich doorzetten. Dit heeft invloed op de kweldruk voor delen van Laag-Nederland.

#### *Zouttransport in de bodem*

SWAP kan het transport van zouten in de bodem modelleren. Onderscheiden worden de volgende processen:

- Convectief transport: Bij convectief transport van zout verplaatst het zout zich met dezelfde snelheid als het bodemwater.
- Diffusie en dispersie: Netto transport door diffusie is afhankelijk van gradiënten in zoutconcentratie en de diffusiesnelheid. De grootte van de dispersie is afhankelijk van bodemtype, stroomsnelheid van water en gradiënten in de zoutconcentratie. Diffusie en dispersie zorgen samen voor het ontstaan van een mengzone in een zoetwaterlens.
- Adsorptie: Door adsorptie met de bodemdeeltjes kan het transport van stoffen beïnvloed (vertraagd) worden. Voor natriumchloride wordt aangenomen dat dit zich als een conservatieve stof door de bodem verplaatst, dus geen adsorptie of chemische omzettingen.

#### *Zoutgevoeligheid gewassen*

De zoutgevoeligheid van gewassen wordt bepaald door de invloed van het zout op 1) de osmotische potentiaal en 2) de toxiciteit van het zout voor het gewas. De osmotische potentiaal is afhankelijk van de zoutconcentratie. Deze kan ingebouwd worden in SWAP. De toxiciteit kan meegenomen worden door een concept als Maas-Hofman. Mogelijk kan expliciet de osmotische potentiaal meegenomen worden in combinatie met een schadeterm voor toxiciteit (een Maas-Hofman-achtige benadering).

#### *Effect zout op bodemfysica*

Betreft het effect van zout op bodemfysische eigenschappen zijn voor zand geen nadelige effecten van zout te verwachten op de bodem zelf. Voor kleibodems is bekend dat een hoge concentratie aan monovalente ionen (zoals Na<sup>+</sup>) ten opzichte van divalente ionen (zoals Ca<sup>2+</sup> en Mg<sup>2+</sup>) kan resulteren in het uiteenvallen van bodemaggregaten. Dit kan leiden tot het dichtslibben van macro- en microporiën, waardoor de doorlatendheid van de bodem sterk wordt verminderd. Dit proces wordt vaak als onomkeerbaar beschouwd. Voor veenbodems kan verzilting juist leiden tot een toename in doorlatendheid als gevolg van een toename in porositeit. SWAP kan met deze bodemfysische veranderingen geen rekening gehouden worden.

#### *Macroporiën*

Macroporiën zorgen voor preferente stroombanen. Het zorgt er voor dat zoet water ver in de bodem kan indringen terwijl zout relatief ondiep in de bodem achterblijft. Momenteel is het rekenen met de combinatie macroporiën en zout niet mogelijk. De vraag is of we met macroporiën rekening moeten houden. Dat het invloed heeft staat buiten kijf. Een standaard parametrisatie is echter niet beschikbaar.

### *Neerslaglens en ontwatering*

Als de ondergrond zout is en er kwel is dan kan de in de winter opgebouwde zoete neerslaglens in de zomer verdwijnen. In dat geval kan zout de wortelzone binnendringen door capillaire opstijging waardoor wortels hinder gaan ondervinden. Bij kwel kan een dieper liggende drainage bij eenzelfde afvoerniveau de dikte van de neerslaglens vergroten en daarmee de gevoeligheid voor zoutschade verkleinen, terwijl de grondwaterstandsdynamiek niet of niet substantieel verandert.

SWAP rekent niet expliciet de dikte van de neerslaglens uit maar het verloop van de concentraties in de diepte. Het model simuleert de interacties tussen neerslag, bodemvocht en de beweging van water door de bodemlagen. Het rekent hierbij met convectie, diffusie en dispersie (geen dichtheidsstroming). Het SWAP-model reageert dynamisch op veranderingen in neerslagpatronen, wat betekent dat het kan bijhouden hoe de dikte van de neerslaglens varieert met de tijd, afhankelijk van de hoeveelheid neerslag en andere factoren zoals verdamping en drainage. Opgemerkt wordt dat SWAP een eendimensionaal model is, waardoor de tweedimensionale karakter van het ontstaan van neerslaglens niet optimaal wordt gesimuleerd. De dynamiek in de neerslaglens wordt wel redelijk benaderd, zoals reeds is onderzocht. In het geval van lagere kwelhoeveelheden (in vergelijking met het neerslagoverschot) wordt de neerslag te dun berekend.

### *Dichtheidsstroming*

SWAP is een eendimensionaal model, waardoor het effect van dichtheidsstroming niet meegenomen kan worden.

### *Praktische aspecten van simuleren met zout in SWAP*

#### *Proxy voor zout*

In SWAP is een stoftransportmodule opgenomen die de zoutbalans voor één stof (ion) simuleert. Wanneer we over zout praten dan gaat dat in werkelijkheid om de toestand van meerdere ionen. Daarom stellen we voor om bij het simuleren één stof als proxy (of tracer) voor 'zout' te gebruiken. De veranderingen in de concentratie van deze tracer kunnen we dan als proxy zien voor de veranderingen van het totale zoutgehalte.

#### *Laagdikten en dispersief transport*

Voor het doorrekenen van zout moet van een fijne laagindeling uitgegaan worden en ook moet met kleine tijdstappen gerekend worden. In SWAP wordt voor numerieke dispersie gecompenseerd/gecorrigeerd. Tevens zal de stoftransportmodule zelf mogelijk besluiten voor het rekenen met kleinere deeltijdstappen.

#### *Initiële toestand en inloopberekeningen*

Een goede initiële toestand is een belangrijke randvoorwaarde. Afhankelijk van de opzet van de simulatie (hoeveelheid drainagemiddelen) is een initialisatie van de zoutwaterlens redelijk goed te maken zonder al te lange inlooperperiode. Hierbij is de keuze voor de verschillende zoutbelastingen van belang (kwelflux, kwelconcentratie, concentratie oppervlaktewater etc.).

#### *Zoutgevoeligheid van het gewas*

Voor de modellering van de zoutgevoeligheid kiezen we in eerste instantie voor het 'broken-line' Maas Hoffman-concept (Maas en Hoffman, 1977). Als tweede optie is het wellicht mogelijk om het S-vormige Van Genuchten-Hoffman model (van Genuchten en Hoffman, 1984; van Genuchten, 1987) te gebruiken. Van Genuchten en Hoffman (1984) en van Straten e.a. (2019) hebben beide concepten met elkaar vergeleken en toegepast. Dit zal nader worden verkend. De beschikbaarheid van parametrisaties wordt hierbij meegewogen. De studies van van Bakel e.a. (2018) zijn hierbij belangrijke bronnen. Een derde aanpak zou kunnen zijn om de invloed van de osmotische potentiaal rechtstreeks mee te nemen in de simulatie van wateropname, zoals voorgesteld door Dalton e.a. (1975) en toegepast in FUSSIM2 (Heinen, 2001). Additioneel zal de toxische component apart geparametriseerd moeten worden bijvoorbeeld met een Maas-Hofman-achtig concept. De invloed van zout op de osmotische potentiaal is nog niet opgenomen in SWAP.

Tevens moet dan bedacht worden hoe het effect van zout (achteraf) onderscheiden kan worden van andere vormen van schade.

---

## *Karakterisering dynamiek neerslaglens*

Een neerslaglens ontstaat als er sprake is van kwel. In de winter voedt zoet neerslagwater de bodem en het grondwater, doordat er een neerslagoverschot is. In de zomer neemt de dikte van de zoetwaterlens af door verdamping. De dynamiek van deze lens is afhankelijk van een groot aantal randvoorwaarden, zoals bodemtype, kenmerken ontwateringsmiddelen (diepte, afstand, weerstanden) en kwelintensiteiten. Hoe is deze dynamiek op een eenvoudige en inzichtelijke manier te karakteriseren? Het is vergelijkbaar met de dynamiek in grondwaterstanden. Als karakteristiek voor de grondwaterstand zijn de GHG en GLG gekozen. Voor de dynamiek in de neerslaglens kan een vergelijkbare maat worden gekozen, bijvoorbeeld de gemiddeld zoetwaterlensdikte in winter en zomer (GWZ en GZZ). De dikte van de zoetwaterlens is dan de afstand van de grondwaterspiegel tot aan een zeker concentratieniveau<sup>9</sup>. De GxZ kan op verschillende manieren uitgerekend worden. Een eerste mogelijkheid is vergelijkbaar met de GxG met de 3 hoogste en laagste waarden op basis van 24 waarnemingen per hydrologisch jaar en dat over een periode van tenminste 8 hydrologische jaren. Maar er zijn vast andere methoden te bedenken die praktisch aansluiten bij metingen in het veld.

## *Uitbreiding Waterwijzer Landbouw*

WWL houdt op dit moment (versie 4.0.0) geen rekening gehouden met zout. Zoals in de inleiding van deze bijlage is beschreven, zal het Programmaplan 'Omgaan met zout in landbouw, natuur en waterbeheer' hier wel aandacht aan geven. Omdat dit een nieuw aspect is zal van een zekere fasering van het werk uit moeten worden gegaan. Er wordt daarom gekozen voor eerst een verkenning om vervolgens meer grootschalig en gestandaardiseerd antwoorden te kunnen geven.

Binnen WWL is maatwerk met WWL-regionaal flexibeler in te zetten dan WWL-tabel, daarom wordt daar mee gestart. Het kan dan eerst specifiek toegepast worden op de praktijkproeven, waarbij een gewas met verschillende zoutconcentraties gedurende verschillende fasen in de groei wordt belast. Duidelijk wordt dan welke randvoorwaarden een rol spelen en ook of alle processen voldoende met SWAP geparametriseerd en gesimuleerd kunnen worden (bijvoorbeeld of SWAP kan rekenen met verschillende gevoeligheden tijdens verschillende ontwikkelingsstadia van het gewas).

Nadat kennis is opgedaan met maatwerk kan besloten worden de WWL-tabel met zout uit te breiden via een enkelvoudige zoutbelasting, hetzij via irrigatie hetzij via kwel. Dit is gedaan om het zo eenvoudig mogelijk te houden. Wellicht dat later van meerdere typen of routes van zoutbelasting tegelijk beschouwd kunnen worden maar ook hier geldt dat we moeten werken van eenvoud naar complex; juist omdat het in de basis zo complex is. De aansturing van de WWL-tabel met zout wordt ook complexer. Bij zoutbelasting via irrigatiewater dient informatie met betrekking tot de zoutconcentratie bekend te zijn. En bij zoutbelasting via kwel dient informatie over bijvoorbeeld de GWZ, GZZ en de zoutconcentratie van het kwelwater bekend te zijn. Bij het kiezen voor deze parameters moet nagedacht worden over hoe functioneel de tabel dan is voor gebruikers aangezien in deze informatie lastig is te voorzien. Maar zonder deze informatie is de kennis niet te ontsluiten.

## *WWL-tabel met zout irrigatiewater*

Bij zout irrigatiewater gaat het om een zoutbelasting van 'bovenaf'. Het gaat hier dan om een beregend gewas. Dus dan bepaalt de droogteschade het moment van beregenen. In een nat jaar zal er niet beregend worden en zal er dan ook geen zoutschade zijn.

De volgende onderdelen zijn van belang voor de uitbreiding van de WWL-tabel met zout, waarbij met SWAP een groot aantal simulaties uitgevoerd moet worden:

- SWAP-simulaties algemeen:
  - Keuze concepten: geen macroporiën, geen atmosferische depositie
  - Verzamelen van de extra basisgegevens voor de zoutberekening:
    - Zoutbelasting (irrigatie)

---

<sup>9</sup> Gedacht kan worden aan de volgende twee opties: (1) 50% van de concentratie van het kwelwater, (2) een grensvlak met een vaste concentratie x. Voor twee verschillende kwelconcentraties zal (2) verschillen, terwijl (1) onafhankelijk is van de kwelconcentratie zolang er geen interactie optreedt met het gewas (reductie in verdamping).

- Gevoeligheid gewassen: keuze modelconcept voor simulatie van zoutstress (Maas-Hofman of alternatief) en keuze modelparametrisatie op basis van literatuurstudie en beoordeling geschiktheid parameters voor Nederlandse situatie.
    - Diffusie- en dispersieparameters
  - Schematisatie lagen en tijdstapgrootte bij simulaties  
Onderzoeken van numerieke dispersie en de correctie daarop: onderzoeken met welke minimale laagdikte gerekend kan worden.
- Irrigatie met zout water:
  - Verschillende zoutconcentraties: We zetten simulaties in voor verschillende zoutconcentraties in irrigatiewater. Dit laat zien hoe verschillende niveaus van zout de gewasgroei en bodemgezondheid beïnvloeden. We gaan uit van drie gehalten aan zout (0 mg Cl l<sup>-1</sup>, middelhoog mg Cl l<sup>-1</sup>, hoog mg Cl l<sup>-1</sup>). Deze gehalten verschillen per gewas doordat de zoutgevoeligheid per gewas verschilt. De keuze van deze niveaus wordt bepaald door het uitvoeren van een aantal verkennende simulaties.
  - Inschatting extra berekeningen: een verdrievoudiging van het aantal berekeningen.
  - Verkennende berekeningen: Voor het verkrijgen van een goede initiële situatie wordt een aantal verkennende berekeningen uitgevoerd om de duur van de inlooperperiode te bepalen.  
  
Voor het middelhoge zoutgehalte is het doel dat ook dan zoutschade ontstaat, omdat anders het afleiden van een metamodel niet goed kan.
  - Metamodel: In de WWL-tabel zonder zout is de basis van het metamodel een analytische functie met twee afhankelijken, namelijk de GHG en de GLG. De droogteschade, de natschade en de indirecte schade zijn bepaald met SWAP.  
  
Door zout in het irrigatiewater komt er een vierde schadeterm bij, namelijk zoutschade. Aan de sleutels voor de tabel wordt de zoutconcentratie in het beregeningswater  $C_{ir}$  toegevoegd. Wellicht dat Vergelijking 6-1 de invloed van de zoutconcentratie in het irrigatiewater voldoende beschrijft. Nader onderzoek moet dat uitwijzen.

#### *WWL-tabel met zoute kwel*

De volgende onderdelen zijn van belang voor de uitbreiding van de WWL-tabel met zout, waarbij met SWAP een groot aantal simulaties uitgevoerd moet worden:

- SWAP-simulaties algemeen: WWL (versie 4.0.0) rekent met een dichte onderrand, dus zonder expliciete kwel. Maar wel kan er oppervlaktewater vanuit waterlopen infiltreren als de grondwaterstand onder het oppervlaktewaterpeil daalt. We moeten dan wel met een kwelflux met een zekere concentratie gaan rekenen en vervolgens alleen die situaties selecteren, waarbij zout tot in de wortelzone komt of tot boven de laagste grondwaterstand. Op basis hiervan kunnen vervolgens de realisaties voor de gevoeligheid voor zout worden bepaald.
- Zoute kwel:
  - Verschillende zoutconcentraties en kwelintensiteiten: Dit laat zien hoe verschillende niveaus van kwel en zoutconcentraties de gewasgroei en bodemgezondheid beïnvloeden. We gaan uit van drie gehalten aan zout (0 mg Cl l<sup>-1</sup>, middelhoog mg Cl l<sup>-1</sup>, hoog mg Cl l<sup>-1</sup>) en drie kwelintensiteiten. De keuze van deze niveau's wordt bepaald door het uitvoeren van een aantal verkennende simulaties.
  - Inschatting extra berekeningen: is vooralsnog onbekend maar naar verwachting aanzienlijk minder dan een vertienvoudiging van het aantal berekeningen.
  - Verkennende berekeningen: Voor het verkrijgen van een goede initiële situatie wordt een aantal verkennende berekeningen uitgevoerd om de duur van de inlooperperiode te bepalen. De GHZ en GLZ zullen worden bepaald. Hiervoor zal een concentratie moeten worden gekozen waaronder het grondwater als zoet wordt beschouwd. In een aantal simulaties bereikt het zout de wortelzone niet. Deze simulaties kunnen in de definitieve run buiten beschouwing gelaten worden.

- 
- Voor het middelhoge zoutgehalte is het doel dat ook dan zoutschade ontstaat, omdat anders het afleiden van een metamodel niet goed kan.
  - Metamodel: voor de WWL-tabel zonder zout is de basis van het metamodel een analytische functie met twee afhankelijkken, namelijk de GHG en de GLG. De droogteschade, de natschade en de indirecte schade zijn bepaald met SWAP. In geval van zoute kwel kunnen de GHZ en GLZ worden toegevoegd. Beoordeeld zal dan moeten worden of de concentratie in het kwelwater nog extra verklaarde variantie tot gevolg heeft.

---

Wageningen Environmental Research

Postbus 47

6700 AA Wageningen

T 0317 48 07 00

[wur.nl/environmental-research](http://wur.nl/environmental-research)

Wageningen Environmental Research

Rapport 1234

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, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.