

WATERWIJZER LANDBOUW: INSTRUMENTARIUM VOOR KWANTIFICEREN VAN EFFECTEN VAN WATERBEHEER EN KLIMAAT OP LANDBOUWPRODUCTIE



RAPPORT

2018

48

WATERWIJZER LANDBOUW:
INSTRUMENTARIUM VOOR KWANTIFICEREN VAN EFFECTEN VAN
WATERBEHEER EN KLIMAAT OP LANDBOUWPRODUCTIE

RAPPORT

2018

48

ISBN 978.90.5773.812.8



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

WERKGROEP WATERWIJZER LANDBOUW

Martin Mulder (WENR)	Gertjan Holshof (WLR)
Mirjam Hack-ten Broeke (WENR)	Joris Schaap (Badus Bodem & Water, namens WENR)
Ruud Bartholomeus (KWR)	Joanneke Spruijt (WPR)
Jos van Dam (WU)	Iwan Supit (WU)
Marius Heinen (WENR)	Allard de Wit (WENR)
Jan van Bakel (De Bakelse Stroom)	Rob Hendriks (WENR)
Dennis Walvoort (WENR)	Janjo de Haan (WPR)
Joop Kroes (WENR)	Marcel van der Voort (WPR)
Idse Hoving (WLR)	Paul van Walsum (WENR)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE WATERWIJZER LANDBOUW (2018)

Chris Griffioen (voorzitter, voorheen Waterschap Drents Overijsselse Delta)
Rob Ruijtenberg (Bureau WeL namens STOWA, secretaris)
Wim Werkman (Rijkswaterstaat)
Wubbo de Raad (LTO)
Hans Mankor (Provincie Utrecht)
Jan Jaap Buyse (Vitens)
Jeroen Castelijns (Brabant Water)
Saske Klerks (ACSG)
Han Grobbe (ACSG)
Bas Worm (Zoetwatervoorziening Oost Nederland (ZON)/Waterschap Vechtstromen)
Myrjam de Graaf (Waterschap Limburg)
Leo Oprel (Ministerie van LNV)
Esmée Vingerhoed (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
Neeltje Kielen (Deltaprogramma Zoetwater)

Waterwijzer Landbouw is mede mogelijk gemaakt door: STOWA, Rijkswaterstaat, provincie Utrecht, provincie Zuid-Holland, AdviesCommissie Schade Grondwater (ACSG), Vewin, Zoetwatervoorziening Oost Nederland (ZON), LTO, Brabant Water, Vitens, Wageningen Environmental Research, Ministerie van LNV, ministerie van I&W/Deltaprogramma Zoetwater, De Bakelse Stroom, KWR Watercycle Research Institute en Kennisprogramma Lumbricus¹

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2018-48
ISBN 978.90.5773.812.8

COPYRIGHT Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

DISCLAIMER Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

1 Lumbricus bestaat uit een consortium van partijen zijnde Waterschap Vechtstromen, Waterschap Aa en Maas, Waterschap Limburg, STOWA, Universiteit Twente, Radboud Universiteit, Wageningen University departement Omgevingswetenschappen, Wageningen Environmental Research, KWR Watercycle Research Institute, Deltares, KnowH2O, FutureWater, Louis Bolk Instituut.

TEN GELEIDE

WATERWIJZER LANDBOUW: ANTWOORDEN OP VRAGEN OVER DE EFFECTEN VAN (VERANDEREND) WATERBEHEER OP GEWASOPBRENGSTEN

Hoe richt je het regionale waterbeheer zo in, dat het de gebruiksfuncties in een gebied, zoals landbouw, natuur en wonen, optimaal bedient? En welke invloed hebben ingrepen in de waterhuishouding vervolgens op deze functies? Het zijn vragen waar waterbeheerders iedere dag mee bezig zijn. De Waterwijzer Landbouw helpt bij het beantwoorden van deze vragen voor de gewasopbrengsten in de landbouw.

Voor het bepalen van de effecten van ingrepen in de waterhuishouding op gewasopbrengsten zijn in Nederland al geruime tijd drie methoden beschikbaar: de HELP-tabellen, de TCGB-tabellen en AGRICOM. Bijna iedere effectberekening maakt op dit moment gebruik van één van deze methoden.

De landbouwsector, maar ook waterbeheerders en waterleidingbedrijven dringen al langere tijd aan op een herziening van deze methoden. Om te beginnen omdat ze gebaseerd zijn op verouderde meteorologische gegevens en omdat ze niet klimaatrobust zijn. Maar ook omdat zout(schade) niet wordt meegenomen. In droge perioden - die door klimaatverandering steeds vaker gaan voorkomen - gaan zout en het sturen met water op het zoutgehalte, juist een steeds belangrijkere rol spelen in het waterbeheer.

De Waterwijzer Landbouw geeft een reproduceerbare inschatting van het effect van wijzigingen in het waterbeheer en van de hydrologische effecten van klimaatverandering op landbouwkundige opbrengsten. Dat gebeurt in termen van droogte, nat- en zoutschade. Van de Waterwijzer Landbouw (WWL) bestaan twee varianten. De eerste is een vereenvoudigd instrument dat snelle inschattingen kan maken, de WWL-tabel. Daarnaast kunnen met de WWL complexe maatwerkberekeningen worden uitgevoerd.

Het instrument is getest binnen het kennisprogramma Lumbricus. De resultaten waren zeer bevredigend. De Waterwijzer Landbouw is op dit moment het beste wat voorhanden is. STOWA beveelt het gebruik ervan dan ook van harte aan.

In dit rapport vindt u de beschrijving van het gehele traject van Waterwijzer Landbouw inclusief de resultaten van de toetsing. De verschillende deelrapporten en een handleiding voor gebruik zijn te vinden op de website. Het instrument is vrij beschikbaar op www.waterwijzer.nl of via www.STOWA.nl.

Amersfoort, september 2018
Directeur STOWA
Joost Buntsma

MANAGEMENTSAMENVATTING

WATERWIJZER LANDBOUW: INSTRUMENTARIUM VOOR KWANTIFICEREN VAN EFFECTEN VAN WATERBEHEER EN KLIMAAT OP LANDBOUWPRODUCTIE

Waterwijzer Landbouw is een methode voor het bepalen van het effect op landbouwproductie door veranderingen in hydrologische omstandigheden. Deze veranderingen kunnen veroorzaakt worden door bijvoorbeeld waterbeheer, herinrichtingsprojecten, (drink)waterwinningen, maar ook door het klimaat. Bestaande beoordelingssystemen, zoals de HELP-methode, zijn gebaseerd op verouderde gegevens en houden geen rekening met de effecten van de gevolgen van klimaatverandering op landbouwopbrengsten. Waterwijzer Landbouw doet dat wel en kan gebruikt worden voor het vaststellen van landbouwopbrengstderiving (schade), maar ook voor het optimaliseren van de waterhuishouding op zowel lokale, regionale als nationale schaal onder veranderende (klimaat)omstandigheden. Hiermee kan de Waterwijzer bijdragen om tot een klimaatrobustere inrichting van gebieden te komen. Ondanks dat het hart van Waterwijzer Landbouw is gebaseerd op complexe processen in het bodem-water-plant-atmosfeer systeem, is het toch eenvoudig toepasbaar.

BELANG: VERTALEN AGROHYDROLOGISCHE CONDITIES NAAR LANDBOUWOPBRENGSTEN

Het doel is dat Waterwijzer Landbouw voor de waterbeheerders van Nederland hét instrumentarium is voor vraagstukken rond hydrologische condities en landbouwopbrengsten. Waterwijzer Landbouw geeft klimaatbestendige relaties tussen waterhuishoudkundige condities en gewasopbrengsten waarbij droogte-, zuurstof- en zoutstress worden onderscheiden. Het systeem is bedoeld ter vervanging van de huidige veelvuldig toegepaste systemen, zoals HELP- en TCGB-tabellen, AGRICOM en Waternood. Het is gekoppeld met een werkwijze voor het berekenen van het economisch effect voor de agrariër. Waterwijzer Landbouw is daarmee een instrument dat onder meer gebruikt kan worden voor het doorrekenen van de effecten van peilbesluiten en inrichtingsplannen en voor het bepalen van de invloed van grondwateronttrekkingen op gewasproductie. Ook kan het inzicht verschaffen in de effecten van klimaatverandering onder overigens gelijkblijvende omstandigheden ('Wat gebeurt er als ik niks doe?').

De landbouworganisaties, de waterschappen en de drinkwaterbedrijven hebben lange tijd aangedrongen op een herziening van de huidige gangbare systemen, omdat ze verouderd zijn en daarmee inmiddels mogelijk onjuiste uitkomsten geven. Zo is de bepaling van effecten van vernatting en verdroging gebaseerd op verouderde kennis, en historische meteorologische data en gewasgegevens. Bovendien geeft de HELP-methodiek alleen inzicht in langjarig gemiddelde effecten. Zoutschade is niet of beperkt in de modellen verwerkt. Bovenal zijn de bestaande systemen ongeschikt om de gevolgen van een steeds grilliger wordend klimaat in de berekeningen mee te nemen. Met Waterwijzer Landbouw is de meest recente stand van kennis geoperationaliseerd in een modelinstrumentarium en een praktisch toepasbare tool. Met deze tool kunnen veranderingen in het waterbeheer en eventueel in klimaat vertaald worden naar landbouwopbrengsten en opbrengstderivingen.

AANPAK: VAN WETENSCHAP NAAR PRAKTIJK

Om de gevolgen van klimatologische en/of waterhuishoudkundige veranderingen op het functioneren van planten te beoordelen moeten de essentiële processen die de wisselwer-

king tussen bodem, water, plant en atmosfeer beschrijven expliciet beschouwd worden. Deze proceskennis is geoperationaliseerd en getoetst aan praktijkgegevens. Voor de meest gangbare landbouwgewassen worden directe effecten in Waterwijzer Landbouw bepaald door simulaties met het hydrologische model voor de onverzadigde zone SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant), gekoppeld met het dynamisch gewasgroeimodel WOFOST (World Food Studies). Voor overige gewassen wordt de eenvoudige gewasmodule van SWAP gebruikt. De toestand in de bodem met betrekking tot droogte, zuurstofbeschikbaarheid en zoutgehalte bepaalt of er transpiratiereductie en derving in gewasopbrengst zal optreden. Dit noemen we de directe effecten.

Waterwijzer Landbouw houdt ook rekening met indirecte effecten, zoals uitgestelde zaai- of oogsttijdstippen als gevolg van verminderde draagkracht van de bodem bij te natte omstandigheden of vertraagde gewasopkomst in het geval van een koud voorjaar. Voor economische berekeningen is een koppeling gemaakt met het BedrijfsBegrotingsProgramma Rundvee (BBPR) (voor melkveehouderij) en de KWIN-database (voor Akkerbouw en Vollegrondsgroenten).

Om bij de toepassing van Waterwijzer Landbouw simulaties met het complexe model-instrumentarium SWAP-WOFOST te kunnen omzeilen zijn relaties tussen grondwaterkarakteristieken, bodemtypen en opbrengsten afgeleid op basis van een groot aantal gedetailleerde SWAP-WOFOST-simulaties. Zo zijn uitkomsten uit de gedetailleerde procesmodellen eenvoudig toepasbaar gemaakt via zogenaamde metarelaties. Deze zijn eenvoudig en snel toe te passen als nabewerking op de uitkomsten van een grondwatermodel, zowel op regionale als op landelijke schaal. Deze metarelaties zijn afgeleid voor de vijf KNMI hoofdstations (huidig klimaat: 1981-2010), het KNMI klimaatscenario W_H en de 72 bodemfysische eenheden (BOFEK2012) van Nederland. Met de procedures voor het afleiden van metarelaties is het ook mogelijk om voor een specifiek gebied, met een meer gedetailleerde bodembeschrijving, op maat gesneden metarelaties af te leiden.

RESULTATEN: WATERWIJZER LANDBOUW – PRAKTISCH TOEPASBARE TOOLS

Met de beschikbaar gestelde simulatiemodellen SWAP-WOFOST (www.waterwijzer.nl; <http://swap.wur.nl>) kan de gebruiker ook zelf specifieke situaties (zowel in ruimte als in tijd) doorrekenen of door laten rekenen. Bijvoorbeeld als men het effect van bepaalde extreme weersomstandigheden op de opbrengst van een specifiek gewas gedetailleerd wil analyseren. Om maatwerkberekeningen met SWAP-WOFOST te kunnen uitvoeren is echter wel specialistische kennis vereist. Bovendien wordt SWAP-WOFOST toegepast op perceelschaal en is het modelinstrumentarium minder geschikt voor ruimtelijke analyses. Echter, voor ruimtelijke analyses vergemakkelijken de afgeleide metarelaties de vertaling van hydrologische condities naar opbrengsten aanzienlijk. Grondwaterstanden worden via de metarelaties direct vertaald naar opbrengstderving. De metarelaties, samengebracht in de WWL-tabel, geven zowel langjarig gemiddelde opbrengstdervingen voor verschillende gewassen, als resultaten voor een specifiek jaar, bijvoorbeeld een droog of een nat jaar. Prototypen van Waterwijzer Landbouw zijn gebruikt voor enkele pilottoepassingen; de lessen die hierbij geleerd zijn, zijn meegenomen in de verdere ontwikkeling van het modelinstrumentarium.

IMPLEMENTATIE

Onder auspiciën van STOWA is een breed draagvlak gerealiseerd voor het ontwikkelen van Waterwijzer Landbouw en heeft een consortium van een groot aantal partijen eraan samengewerkt. Daarmee is een aanzienlijk draagvlak gecreëerd dat de implementatie van

Waterwijzer Landbouw moet bevorderen. Het is de bedoeling dat Waterwijzer Landbouw toegepast zal worden door bijvoorbeeld waterschappen, provincies, de Adviescommissie Schade Grondwater (ACSG), Rijkswaterstaat en adviesbureaus en (indirect) de ministeries LNV en I&W en het Deltaprogramma Zoetwater. Het modelinstrumentarium kan door verschillende gebruikers worden toegepast voor verschillende vraagstukken en met verschillende doelen, maar de relatie tussen hydrologische condities en landbouwproductie staat centraal. Waterwijzer Landbouw is zo opgesteld dat nieuwe inzichten, proceskennis en verbeterwensen kunnen worden ingebouwd. Zo kan dan ook steeds voorzien worden in een actueel en adequaat presterend modelinstrumentarium. Waterwijzer Landbouw is vrij beschikbaar via www.waterwijzer.nl.

Dit is het eindrapport van Waterwijzer Landbouw. Nadere informatie en eerdere publicaties/achtergronddocumenten over het project zijn te vinden aan het eind van de literatuurlijst en op de website www.waterwijzer.nl.

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede van alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

WATERWIJZER LANDBOUW: INSTRUMENTARIUM VOOR KWANTIFICEREN VAN EFFECTEN VAN WATERBEHEER EN KLIMAAT OP LANDBOUWPRODUCTIE

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	MANAGEMENTSAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Probleemstelling	1
1.2	Achtergrond	3
1.3	Fases in het project	3
1.4	Leeswijzer	4
2	WATERWIJZER LANDBOUW	5
2.1	Componenten en producten	5
2.2	Wat kan de gebruiker met Waterwijzer Landbouw?	7
2.3	Maatwerk en WWL-tabel	8
3	MODELINSTRUMENTARIUM	9
3.1	Simulatie van bodemhydrologie	9
3.2	Simulatie van gewasgroei	10
3.2.1	WOFOST	11
3.2.2	GRASS	12
3.2.3	FIXED	14
4	DIRECTE EN INDIRECTE EFFECTEN	16
4.1	Directe effecten: droogte-, zuurstof- en zoutstress	16
4.1.1	Droogtestress	17
4.1.2	Zuurstofstress	17
4.1.3	Zoutstress	19
4.2	Indirecte effecten	20
4.2.1	Open teelten	20
4.2.2	Ploegen	21
4.2.3	Zaaien	22
4.2.4	Kiemingsfase	23
4.2.5	Oogsten	24
4.2.6	Grasland	25

5	KWANTIFICEREN EN SPECIFICEREN VAN OPBRENGSTDerving	27
5.1	Definitie opbrengstderving	27
5.2	Specificeren van opbrengstderving	27
5.3	Vertaling van opbrengstderving naar economisch effect	29
6	VAN MODELINSTRUMENTARIUM NAAR WWL-TABEL	32
6.1	Definiëren van modelruns	32
6.1.1	Bodem	32
6.1.2	Meteorologische condities	33
6.1.3	Hydrologische condities	34
6.1.4	Irrigatie en zout	34
6.2	Analyse van systeemgedrag	34
6.3	Afleiden van metarelaties ten behoeve van de WWL-tabel	36
7	WATERWIJZER LANDBOUW TOEGEPAST	38
7.1	Toepassen van de operationele modellen: maatwerk	38
7.1.1	Toetsen aan waarnemingen	38
7.1.2	Onderzoeken van effect van extreme neerslag	40
7.1.3	Melkveehouderij en bedrijfseconomisch resultaat	41
7.1.4	Voorbeeld economische kosten maatwerktoeepassing akkerbouw	43
7.2	Toepassen van de WWL-tabel	44
7.2.1	Voorbeeld De Raam: onderscheid in droogte- en zuurstofstress en verschillen tussen jaren	44
7.2.2	Voorbeeld De Vecht: effect van hydrologische maatregelen en van klimaat	46
8	CONCLUSIES	50
8.1	Bruikbaarheid	50
8.2	Aanbevelingen	52
9	LITERATUUR	54
BIJLAGE A	Begrippenlijst	59
BIJLAGE B	Gewassenlijst	60
BIJLAGE C	Kalibratie verdamping	63
BIJLAGE D	Vaststellen invoerparameters voor zout	65
BIJLAGE E	Vaststellen relaties voor VEM en DVE	68
BIJLAGE F	Indirecte effecten	71

1

INLEIDING

Dit rapport is het eindrapport van het project Waterwijzer Landbouw en geeft een beschrijving van het gehele instrumentarium en de achtergrond ervan gebaseerd op verschillende (proces)modellen. Het doel is dat Waterwijzer Landbouw vanaf nu voor de waterbeheerders van Nederland het instrumentarium is voor vraagstukken rond hydrologische condities en landbouw. Waterwijzer Landbouw is geschikt voor het bepalen van klimaatbestendige relaties tussen waterhuishoudkundige condities en gewasopbrengsten. Daarbij worden directe effecten als gevolg van droogte-, zuurstof²- en zoutstress en indirecte effecten (zoals verkorting van het groeiseizoen) onderscheiden. Het systeem is bedoeld ter vervanging van de huidige beschikbare systemen, zoals HELP- en TCGB-tabellen, AGRICOM en Waternood en is gekoppeld met een werkwijze voor het berekenen van het economisch effect voor de agrariër. Waterwijzer Landbouw is daarmee een instrumentarium dat onder meer gebruikt kan worden voor het doorrekenen van peilbesluiten en inrichtingsplannen en voor het bepalen van de invloed van grondwateronttrekkingen op gewasproductie. Nadere informatie en eerdere publicaties over het project zijn te vinden op www.waterwijzer.nl.

1.1 PROBLEEMSTELLING

Al vele jaren is aangedrongen op vervanging van de HELP- en TCGB-tabellen als methode voor het berekenen van opbrengst en opbrengstderving (actuele opbrengst ten opzichte van potentiële opbrengst) in de landbouw in relatie tot waterhuishouding. De tabellen zijn namelijk gebaseerd op verouderde gegevens en de huidige landbouwpraktijk is er niet in verwerkt. De tabellen zijn ook niet reproduceerbaar en bijvoorbeeld niet te gebruiken voor het doorrekenen van klimaatscenario's. In het rapport van de eerste fase van de ontwikkeling van Waterwijzer Landbouw zijn in detail bestaande methoden om de droogte- en natschade in de landbouw in te schatten besproken (Bartholomeus et al. 2013). Het betreft de HELP-tabellen (Werkgroep HELP-tabel, 1987; van Bakel et al., 2005; 2007), HELP+Waternood (STOWA, 1999), TCGB-tabellen (Bouwman, 1990) en AGRICOM (van Bakel et al., 2009), waarin gebruik wordt gemaakt van de IKC-tabellen. De IKC-tabellen zijn vergelijkbaar met de HELP-tabellen, maar geven de langjarig gemiddelde opbrengstderving voor een breder scala aan vormen van akker- en tuinbouw (Brouwer & Huinink, 2002). Samengevat is de kritiek dat de berekening van de nat- en droogteschade in elk van deze methodes niet meer van deze tijd is. De productieomstandigheden in de landbouw zijn door technologische en teelttechnische ontwikkelingen veranderd, maar ook is de methode niet geschikt om met steeds extremere weersomstandigheden/klimaatveranderingen rekening te houden. Er is bovendien inmiddels kennis beschikbaar om structurele verbeteringen door te voeren en de vertaling van waterhuishouding naar opbrengstreductie klimaatrobust te maken. Alleen met een herziening van de methode kunnen we zorgen voor een robuuste bepaling van de doelrealisatie Landbouw in de Waternoodaanpak, een realistische vaststelling van de GGOR voor zowel het huidige klimaat als het klimaat van de (nabije) toekomst en betrouwbare effectvoorspellingen in het Nationaal Water Model (voorheen het Deltamodel).

2 In Waterwijzer Landbouw hanteren we zuurstofstress als maat voor te natte omstandigheden.

Zowel de HELP- als TCGB-tabellen zijn gebaseerd op de meteorologische condities van de periode 1951-1980. De Bosatlas van het Klimaat (2011) laat zien dat zowel de totale hoeveelheid neerslag en de referentieverdamping zijn toegenomen, net als het aantal dagen met extreme neerslag (vergelijking 1951-1980 en 1981-2010). Daaruit mag geconcludeerd worden dat de huidige schadetabellen zijn gebaseerd op verouderde meteorologische condities die niet representatief zijn voor het huidige en toekomstige klimaat.

De natschade in de HELP-tabel is vooral gebaseerd op expertise. Alle facetten van natschade, zoals tragere start van de gewasgroei in het voorjaar, verminderde bewerkbaarheid, berijdbaarheid en betreedbaarheid, alsook remming van de transpiratie en afsterven van planten door zuurstoftekort in de wortelzone, zitten er impliciet in verwerkt. Het voordeel is de eenvoud, maar een nadeel is dat de tabellen niet reproduceerbaar zijn doordat een formele onderbouwing ontbreekt. Een ander nadeel van dit soort relaties is dat ze niet bestendig zijn tegen externe veranderingen, zoals een verandering in de bedrijfsvoering. En niet onbelangrijk: de bepaling van natschade gebeurt alleen op basis van de grondwaterstand en het bodemtype, terwijl juist de combinatie met de temperatuur belangrijk is. Hierdoor is de huidige natschadebepaling ook niet klimaatbestendig. Immers, door gemiddeld hogere temperaturen wordt niet alleen het groeiseizoen langer, maar ook de behoefte van de plant aan zuurstof in de wortelzone. Uit de landbouw is bijvoorbeeld bekend dat juist de combinatie van hoge temperatuur en intensieve neerslag schadelijk is voor gewassen. Het is de combinatie van factoren die de mate van gewasschade bepaalt.

De zoutschade in de landbouw kan niet met de HELP-tabel worden bepaald en kan dus niet worden gebruikt om schade vanwege te hoge zoutconcentraties in het bodemvocht van de wortelzone vast te stellen. In gebieden in het westen en noorden van Nederland met zoute/brakke kwel of aanvoer van zilt oppervlaktewater is het voorkomen of reduceren van zoutschade in de landbouw één van de belangrijkste wateropgaven.

Door bovengeschetste tekortkomingen kunnen de met de HELP-tabel bepaalde landbouwkundige effecten leiden tot bijvoorbeeld een onjuiste bepaling van de doelrealisatie Landbouw in de Waternoodaanpak, maar bovenal kunnen de uitkomsten ter discussie worden gesteld, hetgeen de vaststelling van de GGOR ernstig kan verstoren.

Waterschappen geven aan dat de doorvertaling van gemiddelde grondwaterstanden naar landbouwschades beter moet. Hierbij moet aandacht worden besteed aan zowel de directe als indirecte effecten van te droge, te natte en te zoute bodems op de gewasopbrengst. Belangrijk is ook dat schadefuncties reproduceerbaar zijn, iets wat met de huidige tabellen niet het geval is.

De landbouwsector bekritiseert de bestaande methodes om landbouwschade te bepalen, omdat geen rekening wordt gehouden met de moderne bedrijfsvoering. Een vernieuwde methode zal volgens de sector daarmee rekening moeten houden.

We kunnen vaststellen dat de bestaande methodes:

- gebaseerd zijn op simulaties met inmiddels verouderde modellen waarbij vraagtekens gezet worden bij de juistheid waarmee transpiratiereductie is berekend;
- gebaseerd zijn op verouderde meteorologische gegevens;
- de bedrijfsvoering niet in beschouwing nemen;
- in hun huidige vorm niet toepasbaar zijn om droogte-, nat- en zoutschade in de landbouw te berekenen onder het klimaat van de (nabije) toekomst.

1.2 ACHTERGROND

Onder auspiciën van STOWA is een breed draagvlak gerealiseerd voor het ontwikkelen van een methodiek voor het bepalen van effect op landbouwproductie van hydrologische omstandigheden; deze methode is gebaseerd op het agrohydrologische model SWAP en het gewasgroei-model WOFOST. Daarmee kunnen ook klimaatscenario's worden doorgerekend, zodat ook klimaatrobuuste relaties kunnen worden verkregen. In het project Waterwijzer Landbouw heeft een consortium van een groot aantal partijen gewerkt aan een praktische methode om niet alleen effecten op gewasgroei, maar ook effecten op economische gevolgen in beeld te brengen.

In aanvulling op de wens om een klimaatbestendige methode te ontwikkelen die resultaten kan leveren voor droogte-, zuurstof- en zoutstress voor het huidige klimaat en het toekomstige klimaat zijn de volgende wensen geformuleerd:

- baseer de methodiek op bestaande kennis die
- niet alleen langjarig gemiddelde opbrengsten kan kwantificeren, maar ook de verschillen tussen jaren en
- daarnaast inzicht geeft op effecten van extreem weer,
- gebaseerd op huidige agrarische bedrijfsvoering en
- gebruiksvriendelijk is en
- zorg ervoor dat het systeem reproduceerbaar en uitbreidbaar wordt.

Het project Waterwijzer Landbouw is gestart in het najaar van 2012 en er is toegewerkt naar een release in september 2018.

1.3 FASES IN HET PROJECT

In de periode september 2012 – april 2013 is de eerste fase van het project uitgevoerd onder de titel 'actualisatie schadefuncties landbouw' met KWR als penvoerder. Hierover rapporteerden Bartholomeus et al. (2013). Het resultaat van deze eerste fase is een operationele SWAP-versie waarmee directe effecten van droogte, zuurstoftekort en zout in de wortelzone kunnen worden berekend in de vorm van reductie van gewasverdamping. Tevens is een eerste aanzet gegeven voor metarelaties, of eigenlijk grafieken waaruit per bodemtype de opbrengstderiving kan worden afgelezen als functie van een grondwaterkarakteristiek of zoutgehalte. Voor een aantal voorbeelden is het modelinstrumentarium gebruikt voor berekening van directe effecten, waarbij langjarige gemiddelden kunnen worden berekend alsmede verschillen tussen jaren en variatie in weer binnen een jaar in beeld kunnen worden gebracht. Ook zijn voorbeeldberekeningen uitgevoerd voor twee klimaatscenario's.

Al in deze fase is aandacht besteed aan de meerwaarde van de koppeling met een gewasgroei-model en hoe indirecte effecten kunnen worden meegenomen. Het is namelijk belangrijk om van berekening van het effect op gewasverdamping een stap te kunnen maken naar het effect op gewasopbrengst en ten slotte naar een actuele opbrengst in de landbouwpraktijk. Voor het landbouwbedrijfsleven spelen indirecte effecten zoals een verkort groeiseizoen door beperkte bewerkbaarheid een grote rol en die effecten komen tot uiting in het bedrijfsinkomen. Het is dus noodzakelijk om deze aspecten mee te nemen in de methodiek.

De begeleidingsgroep onder voorzitterschap van STOWA besloot om in 2013 eerst over te gaan tot een tussenfase, namelijk een plausibiliteitstoets van het opgeleverde SWAP (fase 2a), gerapporteerd in Hackten Broeke et al. (2013). In fase 2 is een koppeling gerealiseerd met het gewasgroei-model WOFOST. Fase 2 resulteerde zodoende in een modelinstrumentarium dat niet

alleen verdampingsreductie, maar juist ook de opbrengstderving kan berekenen. In eerste instantie is dit uitgewerkt voor gras, aardappel en maïs (Kroes et al., 2015).

In fase 3 van Waterwijzer Landbouw lag de focus op de melkveehouderij, dus met de nadruk op grasland en maïs. Hiervoor is een koppeling gerealiseerd van SWAP-WOFOST met BBPR (BedrijfsBegrotingsProgramma Rundvee; Schils et al., 2007) om indirecte effecten en bedrijfsvoering mee te kunnen nemen bij de berekeningen van de opbrengstderving. Ook deze koppeling SWAP-WOFOST-BBPR is getoetst aan de hand van een beperkt aantal bedrijfstypen. In het rapport over fase 3 is deze plausibiliteitstoets beschreven samen met enkele voorbeeldberekeningen (Knotters et al., 2017). Deze koppeling is toepasbaar voor maatwerk op bedrijfsniveau.

Voor de melkveehouderij is bovendien in fase 3 een complete set metarelaties afgeleid voor alle bodemtypen van de bodemfysische eenhedenkaart (BOFEK, Wösten et al., 2013), voor meerdere klimaatscenario's en voor de gewassen gras en maïs. Voor graslandgebruik zijn daarvoor op BBPR gebaseerde rekenregels toegevoegd aan SWAP-WOFOST. Tenslotte is in fase 3 extra aandacht besteed aan de effecten van onderwaterdrainage op de verandering van gewasproductie door droogte- en/of zuurstofstress voor de specifieke omstandigheden van de veenweiden in Utrecht en Zuid-Holland.

De in fase 3 ontwikkelde prototypen voor gras en snijmaïs zijn gebruikt voor enkele pilottoepassingen voor een gebied in Oost-Nederland (De Vecht) en Zuid-Nederland (De Raam) zoals beschreven door Heinen et al. (2017). De lessen die we hieruit hebben geleerd zijn opgepakt in het vervolgtraject.

In de laatste fases van Waterwijzer Landbouw is aandacht besteed aan akkerbouwteelten, vollegrondsgroenten, bloembollen en fruit- en boomteelt, en aan een verdere invulling van de aanpak van zoutstress en toetsing daarvan (Mulder et al., 2018). Ook het uitwerken van de metarelaties voor alle gewassen, de koppeling met economische berekeningen om te komen van gewasopbrengst in kg ha⁻¹ naar financiële opbrengst in € ha⁻¹ en tenslotte een tool voor de gebruikers is in deze fase tot stand gekomen.

In dit rapport gaan we in op het totale modelinstrumentarium Waterwijzer Landbouw waarbij vooral de nadruk is gelegd op de nieuwste ontwikkelingen, omdat over de voorgaande fasen al uitgebreid is gerapporteerd in de hiervoor genoemde referenties.

De totale kosten voor de ontwikkeling van Waterwijzer Landbouw bedroegen ca. 1.35 M€ (excl. BTW); daarnaast bedroeg de eigen R&D inbreng vanuit de onderzoeksinstellingen WENR, KWR en De Bakelse Stroom ca. 385 k€ (excl. BTW).

1.4 LEESWIJZER

In hoofdstuk 2 geven we in het kort weer wat Waterwijzer Landbouw is en wat de gebruiker er mee kan. Hoofdstuk 3 gaat in op de theorie van het modelinstrumentarium en in hoofdstuk 4 wordt uitgebreid ingegaan op hoe directe effecten (droogte-, zuurstof- en zoutstress) en indirecte effecten worden berekend. Hoofdstuk 5 gaat specifiek in op de berekening van opbrengstderving en in hoofdstuk 6 wordt toegelicht hoe de eenvoudig toepasbare WWL-tabel is opgesteld. Voorbeelden van toepassing van zowel het modelinstrumentarium voor maatwerk als de WWL-tabel zijn te vinden in hoofdstuk 7. Tenslotte zijn conclusies en aanbevelingen weergegeven in hoofdstuk 8.

2

WATERWIJZER LANDBOUW

In dit hoofdstuk vatten we samen wat Waterwijzer Landbouw is, uit welke componenten het modelinstrumentarium bestaat, wat de producten zijn en vervolgens wat de gebruiker ermee kan (voor een begrippenlijst zie Bijlage A).

Waterwijzer Landbouw is geschikt voor het bepalen van klimaatbestendige relaties tussen waterhuishoudkundige condities en gewasopbrengsten. Daarbij worden directe effecten als gevolg van droogte-, zuurstof- en zoutstress en indirecte effecten (zoals verkorting van het groeiseizoen) onderscheiden. De kern van Waterwijzer Landbouw wordt gevormd door de procesmodellen voor hydrologie en gewasgroei, respectievelijk SWAP en WOFOST. Bovendien is er een koppeling beschikbaar om gewasopbrengsten te vertalen naar bedrijfseconomisch effect (melkveehouderij) en naar financieel resultaat.

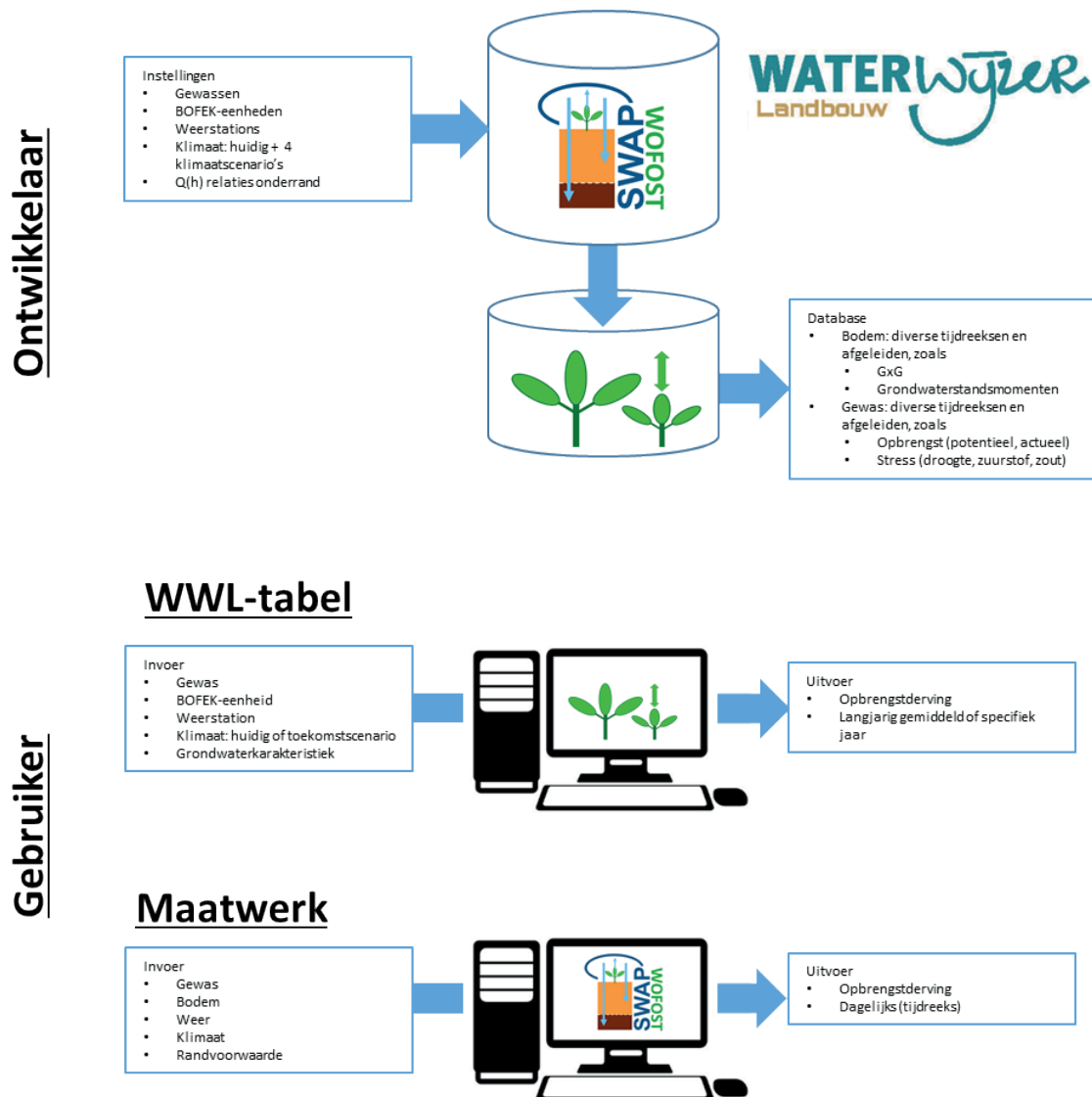
2.1 COMPONENTEN EN PRODUCTEN

Het model SWAP (Soil, Water, Atmosphere, Plant) simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en deels verzadigde zone van de bodem. Een belangrijke component in SWAP is de berekening van wateropname door het gewas, en hoe deze door gebrek aan water (droogte), gebrek aan zuurstof (te natte omstandigheden) of een te hoog zoutgehalte kan worden gereduceerd (Bartholomeus et al., 2013; Hack-ten Broeke et al., 2013; zie verder hoofdstuk 3). Gereduceerde gewasverdamping als gevolg van onvoldoende wateropname heeft gevolgen voor de gewasgroei. De berekende transpiratiereductie wordt daarom als invoer gebruikt voor het dynamische gewasgroeimodel WOFOST of voor de eenvoudige gewasgroeimodellering in SWAP (zie hoofdstuk 3). De gewasgroei wordt in het model hierop aangepast en resulteert in een berekening van de actuele gewasgroei. Het is echter niet zo dat de groeireductie lineair afhankelijk is van de transpiratiereductie, bijvoorbeeld omdat er compensatie in gewasproductie kan plaatsvinden na eerder opgelopen groeireductie.

Het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST bevat veel proceskennis en is getoetst aan veldexperimenten, zoals voor de verschillende fases van Waterwijzer Landbouw is beschreven door Hack-ten Broeke et al. (2013), Kroes et al. (2015), Kotters et al. (2017) en Mulder et al. (2018). Zowel SWAP als WOFOST zijn modelinstrumenten die ook internationaal veel gebruikt worden en ze zijn zodoende ook onder allerlei andere omstandigheden getoetst. Voor de onderzoekers die aan de modellen werken (ontwikkelaars in figuur 2-1) geldt dat zij specialisten zijn op hun vakgebied. De modellen zijn relatief complex, hebben veel invoergegevens nodig en er is zodoende specialistische kennis vereist om het modelinstrumentarium te draaien. SWAP-WOFOST is wel voor iedereen te downloaden via de website (www.waterwijzer.nl; <http://swap.wur.nl>) en daarmee bruikbaar voor wat we maatwerk noemen.

FIGUUR 2.1

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN WATERWIJZER LANDBOUW, BESTAANDE UIT EEN DEEL VOOR DE ONTWIKKELAAR WAARMEE DE DATABASE MET BASISUITKOMSTEN (TIJDREEKSEN BODEM- EN GEWASUITVOER) EN ENKELE AFGELEIDEN (BIJV. GXG EN GEWASSTRESS) WORDT BEREKEND, EN TWEE COMPONENTEN VOOR DE GEBRUIKER OM VOOR ZIJN OF HAAR SITUATIE OPBRENGSTDERIVING TE BEPALEN: DE WWL-TABEL EN MAATWERK MET HET MODELINSTRUMENTARIUM SWAP-WOFOST



Als alternatief voor gebruikers van Waterwijzer Landbouw zijn echter ook metarelaties afgeleid van het modelinstrumentarium waarin de relatie tussen waterhuishoudkundige condities (grondwaterkarakteristieken) en gewasgroei op jaarbasis zijn beschreven voor een aantal gewassen (zie Bijlage B). Met deze werkwijze heeft de gebruiker naast de mogelijkheid om de gewasgroei tot in detail te simuleren (Maatwerk) ook de mogelijkheid om de gewasgroei te bepalen op basis van metarelaties (WWL-tabel), zie Figuur 2.1 (gebruiker).

Het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST is ook gekoppeld met het BedrijfsBegrotings-Programma voor Rundveehouderij (BBPR; Schils et al., 2007). Dit bestaat uit modules voor voedsievoorziening, voor economie en milieu en een module voor het berekenen van het saldo en een bedrijfsbegroting. Aan de hand van de melkveestapel en de grasgroei (in het gekoppelde modelinstrumentarium berekend met SWAP-WOFOST) wordt het graslandgebruik gesimuleerd. Dit betreft de beslissing om te weiden of te maaien en in het geval van weiden

de beweidingsduur per perceel. Het graslandgebruik interacteert met de voeropname van melkvee en jongvee. Op basis van de voedervoorziening worden vervolgens de opbrengsten, kosten en belangrijke milieueffecten berekend en tenslotte saldo en bedrijfsbegroting.

De koppeling tussen de modellen SWAP en WOFOST levert een berekening op van potentiële en actuele productie als gevolg van het verschil tussen potentiële en actuele gewasverdamming én de dynamische gewasontwikkeling en terugkoppeling met hydrologie. De koppeling met BBPR maakt het mogelijk om de indirecte effecten te kwantificeren, omdat deze indirecte effecten direct gekoppeld zijn aan het graslandgebruik, zoals dat in BBPR wordt berekend.

In BBPR is de N-voorziening van het grasland erg belangrijk. Voor Waterwijzer Landbouw willen we effecten van hydrologie kunnen beschouwen zonder naar andere effecten te kijken. Voor het bepalen van bijvoorbeeld bedrijfseconomische gevolgen in relatie tot gangbare bedrijfsvoering kunnen we er echter niet omheen dat in Nederland geen sprake kan zijn van optimale N-giften. Daarom is er voor gekozen om in BBPR te rekenen met een relatief hoge (suboptimaal) maar wel realistische N-gift en deze te gebruiken om een reductiefactor voor de gewasopbrengst te bepalen.

Toepassing van BBPR vraagt om expertkennis op het gebied van melkveehouderij. BBPR is niet vrij toegankelijk, maar is wel benaderbaar via de website <https://www.wur.nl/nl/Onderzoek-Resultaten/Onderzoeksinstituten/livestock-research/Producten/Show/Bedrijfs-Begrotings-Programma-Rundvee-BBPR.htm>. De gekoppelde versie met SWAP-WOFOST kan in overleg met en door de collega's van Wageningen Livestock Research worden toegepast.

Voor de WWL-tabel zijn rekenregels voor maaien en weiden afgeleid van BBPR (zie sectie 3.2.2). Zodoende kunnen verschillen in graslandmanagement wel worden meegenomen in de metarelaties voor het kwantificeren van effecten van hydrologie op grasproductie. Voor zowel grasland als snijmaïs kan de productie worden omgezet naar financiële opbrengst op basis van voederwaarde voor het vee.

Voor akkerbouwgewassen, vollegrondsgroenten, bloembollen, boomteelt en fruitteelt kan in de WWL-tabel de gewasopbrengst in kg ha⁻¹ omgezet naar € ha⁻¹ op basis van prijzen uit de KWIN-database. De afkorting KWIN-AGV staat voor KWantitatieve INformatie voor de Akkerbouw en Vollegrondsgroenten.

2.2 WAT KAN DE GEBRUIKER MET WATERWIJZER LANDBOUW?

Het is de bedoeling dat Waterwijzer Landbouw zal worden toegepast door veel verschillende partijen zoals waterschappen, provincies, de Adviescommissie Schade Grondwater (ACSG), Rijkswaterstaat, adviesbureaus, ministeries en Deltaprogramma Zoetwater. De verschillende gebruikers kunnen dat doen voor verschillende vraagstukken en met verschillende doelen, maar de relatie tussen hydrologische condities en landbouwproductie staat centraal. Het kan gaan om het verkrijgen van inzicht in effecten van hydrologische maatregelen op regionale schaal of juist het afstemmen van inrichting in een gebied en bijbehorend beheer op verschillende belangen, zoals landbouw en natuur. In het laatste geval is het raadzaam ook de Waterwijzer Natuur toe te passen (Bartholomeus et al., 2018). Op nationaal of regionaal niveau zijn toepassingen te voorzien die inzicht geven in kosten en baten van hydrologische veranderingen als gevolg van klimaatverandering voor de Nederlandse landbouw, bijvoor-

beeld als nabewerking voor het NHI en regionale modellen. Deze inzichten zijn van belang voor de ministeries LNV en I&W en het Deltaprogramma Zoetwater.

2.3 MAATWERK EN WWL-TABEL

Zoals toegelicht in de vorige sectie bestaat Waterwijzer Landbouw uit de toepassing van operationele modellen voor maatwerk en/of de toepassing van de eenvoudig benaderbare en raadpleegbare WWL-tabel. Bij maatwerk denken we aan het doorrekenen van een specifieke situatie, bijvoorbeeld een korte periode met extreme neerslag of een bijzonder bodemtype met bijvoorbeeld een slecht doorlatende laag. Hoe gewasgroei reageert op hydrologische condities in dergelijke omstandigheden kan het beste met het maatwerk-modelinstrumentarium worden doorgerekend. De meeste toepassingen van Waterwijzer Landbouw zullen echter waarschijnlijk op regionale of nationale schaal zullen zijn, waarbij vooral de WWL-tabel zal worden toegepast.

Om toepassing op landelijke en regionale schaal mogelijk te maken is de WWL-tabel te gebruiken voor alle bodemtypen van de BODemFysische EenhedenKaart (BOFEK; Wösten et al., 2013), voor de vijf KNMI-hoofdstations waarvoor een volledige reeks van 30 jaar weersgegevens beschikbaar zijn, voor alle GHG-GLG³-combinaties per bodemfysische eenheid, voor het huidige weer (periode 1981-2010) en klimaatscenario W_H (KNMI, 2014) en voor de in Nederland qua areaal meest voorkomende gewassen: gras (gemaaid of beweid), snijmaïs, consumptie- en zetmeelaardappel, pootaardappel, wintertarwe, suikerbiet, zomergerst, zaaiui, prei, winterpeen, bloemkool, sperzieboon, spruitkool, sla, tulp, boomteelt en fruitbomen. Voor de gewassen die berekend worden is gerekend met verschillende zoutconcentraties in het beregeningswater om ook eventuele zoutstress te kunnen berekenen. Al deze combinaties zijn door de ontwikkelaar doorgerekend, en de uitkomsten van de SWAP-WOFOST berekeningen, m.n. tijdreeksen van allerlei bodem- en gewassenmerken, zijn opgeslagen in een database, inclusief enkele achteraf vastgestelde kenmerken, zoals GxG (zie bovenste deel Figuur 2.1).

Als invoer voor de WWL-tabel is alleen nodig: bodemtype, meteostation, GHG-GLG en gewas. Verder moet gekozen worden tussen huidig weer of klimaatscenario en al dan niet beregenen. Bij berekening is ook de zoutconcentratie in het beregeningswater nodig. Overigens is het ook mogelijk om andere grondwaterkarakteristieken als invoer te gebruiken dan GHG-GLG-combinaties, maar tot nu toe is GHG-GLG het meest gebruikelijk.

In hoofdstuk 7 geven we voorbeelden van toepassing van zowel het maatwerk van Waterwijzer Landbouw als de WWL-tabel.

Omdat het modelinstrumentarium bestaat uit procesmodellen en alle gebruikte software en databestanden zijn voorzien van versiebeheer zullen de resultaten steeds reproduceerbaar zijn als de juiste versies worden aangeroepen. Tegelijkertijd is het ook mogelijk om het modelinstrumentarium uit te breiden als er nieuwe kennis beschikbaar komt. Daarmee is voldaan aan de wens van reproduceerbaarheid en uitbreidbaarheid.

3 GHG = gemiddeld hoogste grondwaterstand; GLG = gemiddeld laagste grondwaterstand

3

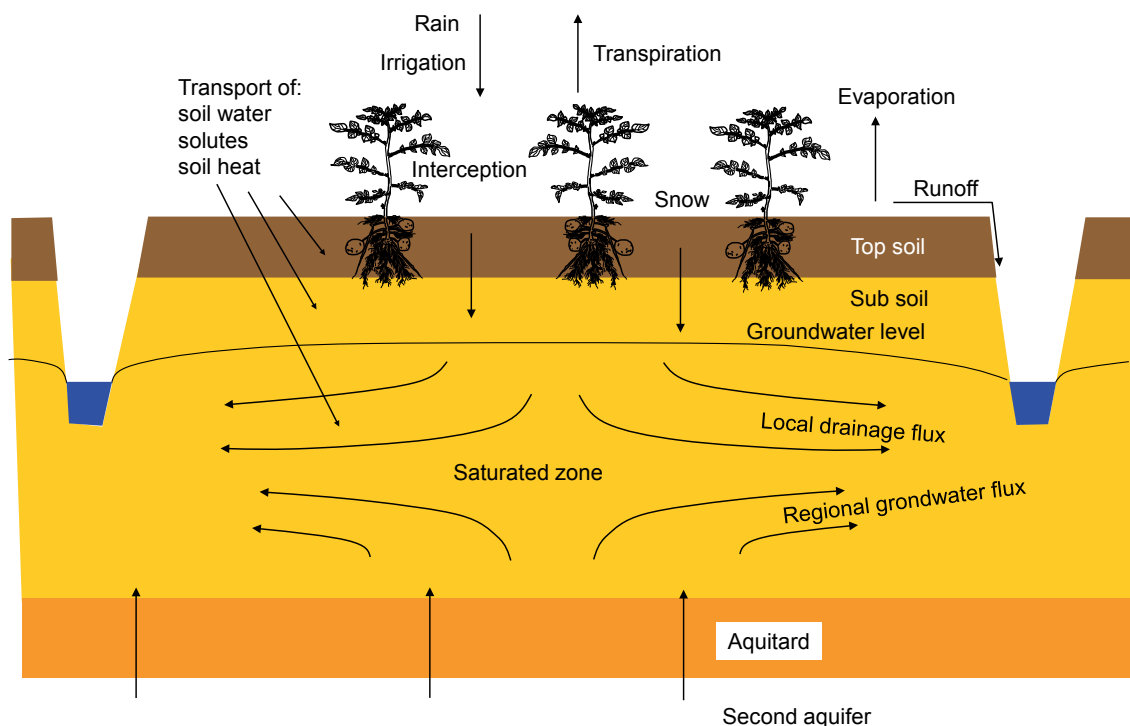
MODELINSTRUMENTARIUM

Een (klimaat)robuuste vertaling van waterhuishoudkundige condities naar gewasopbrengst moet gebaseerd zijn op de essentiële processen die de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer beschrijven (Bartholomeus et al., 2013). In Waterwijzer Landbouw is gekozen om die wisselwerking te beschrijven aan de hand van gekoppelde procesmodellen voor (bodem)hydrologie en gewasgroei, namelijk via de koppeling van SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant; Van Dam et al., 2008; Kroes et al., 2017) en WOFOST (World Food Studies; Boogaard et al., 2011).

3.1 SIMULATIE VAN BODEMHYDROLOGIE

Transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone wordt gesimuleerd met het model SWAP. SWAP beschouwt het domein van vlak boven het bladerdek van het gewas tot aan een vlak in het bovenste grondwater. De processen in dit domein zijn dominant verticaal gericht, vandaar dat SWAP primair een één-dimensionaal model is (puntmodel); afvoer naar drains, sloten en overige oppervlaktewateren kan in SWAP nagebootst worden, waardoor SWAP ook op perceelschaal kan worden toegepast (zie Figuur 3.1).

FIGUUR 3.1 COMPONENTEN VAN DE WATERBALANS GESIMULEERD MET SWAP



Waterbeweging in de bodem wordt beschreven door de Richards vergelijking. Hierbij moet van elke bodemlaag bekend zijn wat de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken zijn (bodemfysische eigenschappen). Hiervoor worden standaard de relaties volgens, respectievelijk, van Genuchten en Mualem beschouwd, inclusief een uitbreidingsoptie nabij verzaadiging. De verdampingsvraag van de atmosfeer wordt berekend volgens Penman-Monteith, waarbij deze via de bedekkingsgraad van het gewas en interceptie wordt verdeeld over een bijdrage door het gewas (transpiratie) en een bijdrage voor verdamping aan het bodemoppervlak. Actuele transpiratie wordt berekend door SWAP en is afhankelijk van droogte-, zuurstof- en zoutstress en wordt mede bepaald door de wortelverdeling. Actuele bodemverdamping wordt bepaald door de genoemde bodemfysische eigenschappen. Actuele infiltratie van regen (en eventueel beregening/irrigatie) wordt eveneens bepaald door de bodemfysische eigenschappen. Water dat niet tijdig kan infiltreren zal tijdelijk op het land staan (plasvorming) en bij overschrijding van een drempelwaarde worden aangemerkt als oppervlakkige afvoer. De situatie aan de onderzijde van de bodemkolom wordt bepaald door een opgelegde drukhoogte (h ; bijv. grondwaterstand), een opgelegde waterflux (q ; bijvoorbeeld kwel of wegzijging) of via een combinatie van die twee (de zogenaamde q - h relatie); die laatste mogelijkheid is toegepast voor de metarelaties in Waterwijzer Landbouw waarbij variatie in GHG-GLG kan worden gerealiseerd (zie ook Knotters et al., 2017). SWAP heeft ook de mogelijkheid om stoftransport te beschouwen via de klassieke convectie- en diffusie-dispersie transportvergelijking. In Waterwijzer Landbouw wordt deze optie gebruikt om de effecten van beregening met zout beregeningswater op de gewasopbrengst te simuleren.

3.2 SIMULATIE VAN GEWASGROEI

Een belangrijke component in SWAP is de beschouwing van wateropname door het gewas, en hoe deze door droogte, gebrek aan zuurstof (als gevolg van te natte condities) en zoutgehalte kan worden gereduceerd (Bartholomeus et al., 2013; Hack-ten Broeke et al., 2013). Gereduceerde transpiratie heeft gevolgen voor de gewasgroei. De berekende reductie wordt daarom als invoer gebruikt voor het gewasgroeimodel. Waterwijzer Landbouw maakt gebruik van verschillende gewasgroeimodellen, namelijk het dynamisch gewasgroeimodel WOFOST, het dynamisch grasgroeimodel GRASS (afgeleid van WOFOST) en een eenvoudig gewasgroeimodel (FIXED), zie Tabel 3.1. In Waterwijzer Landbouw hanteren we de meeste voorkomende gewassen per gewasgroep in Nederland (zie Bijlage B).

TABEL 3.1

TYPE GEWASGROEIMODEL PER GEWAS

Gewas	Model	Gewas	Model
<i>Veeteelt</i>		<i>Groenteteelt</i>	
Grasland	GRASS	Prei	FIXED
Snijmais	WOFOST	Sla	FIXED
		Bloemkool	FIXED
<i>Akkerbouw</i>		Spruitkool	FIXED
Aardappel	WOFOST	Sperziebonen	FIXED
Suikerbieten	WOFOST	Winterpeen	FIXED
Wintertarwe	WOFOST		
Zomergerst	WOFOST	<i>Boomteelt</i>	
Zaaiuien	FIXED	Appelbomen	FIXED
		Laanbomen	FIXED
<i>Bollen</i>			
Tulp	FIXED		
Lelie	FIXED		

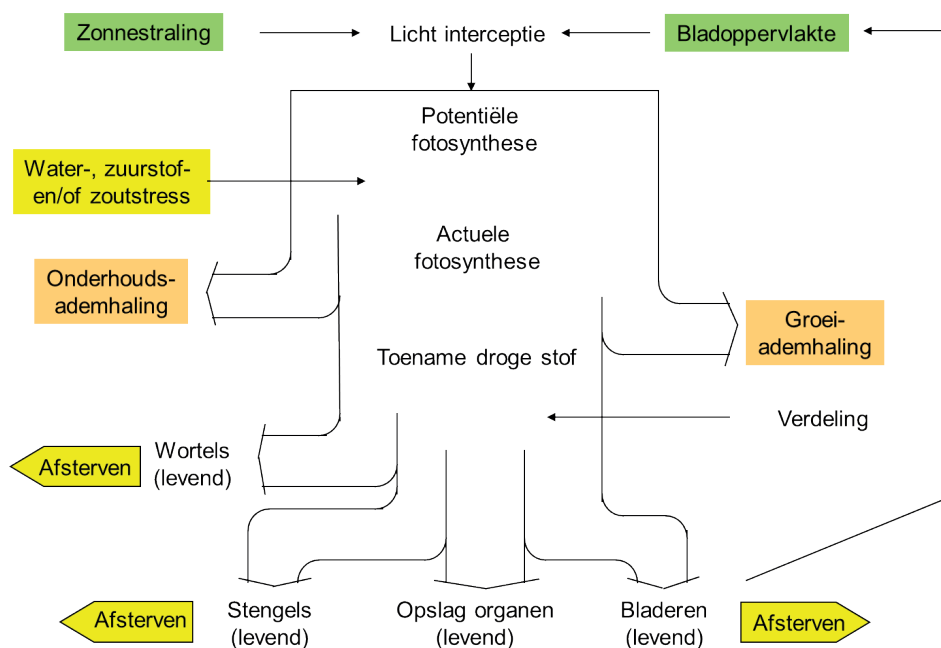
Bij dynamische gewasgroeimodellering wordt de potentiële groei (op dagbasis) aangepast als gevolg van de transpiratiereductie, hetgeen resulteert in een berekening van de actuele groei. Bij statische gewasgroeimodellering wordt er geen actuele gewasgroei gesimuleerd, maar wordt de gewasontwikkeling van tevoren opgelegd. Opgetreden transpiratiereductie zal daarmee geen invloed hebben op de watervraag van het gewas. De actuele gewasopbrengst bij statische gewasmodellering wordt bepaald in een nabewerking op basis van de transpiratiereductie.

Voor het uitvoeren van simulaties met de gewasgroeimodellen is het van belang om de potentiële en actuele transpiratie correct te berekenen. Daarvoor zijn een aantal belangrijke parameters voor de Penman-Monteith methode gekalibreerd, zie daarvoor Bijlage C.

3.2.1 WOFOST

In het model WOFOST (WOrld FOod Studies; Boogaard et al., 2011) wordt de potentiële gewasopbrengst berekend als functie van het CO₂-gehalte, de zonnestraling, temperatuur en gewaskenmerken. Vervolgens bepaalt de beschikbaarheid van water de water-gelimiteerde gewasproductie. De basis voor de berekening is het bladoppervlak en de inkomende zonnestraling (Figuur 3.2).

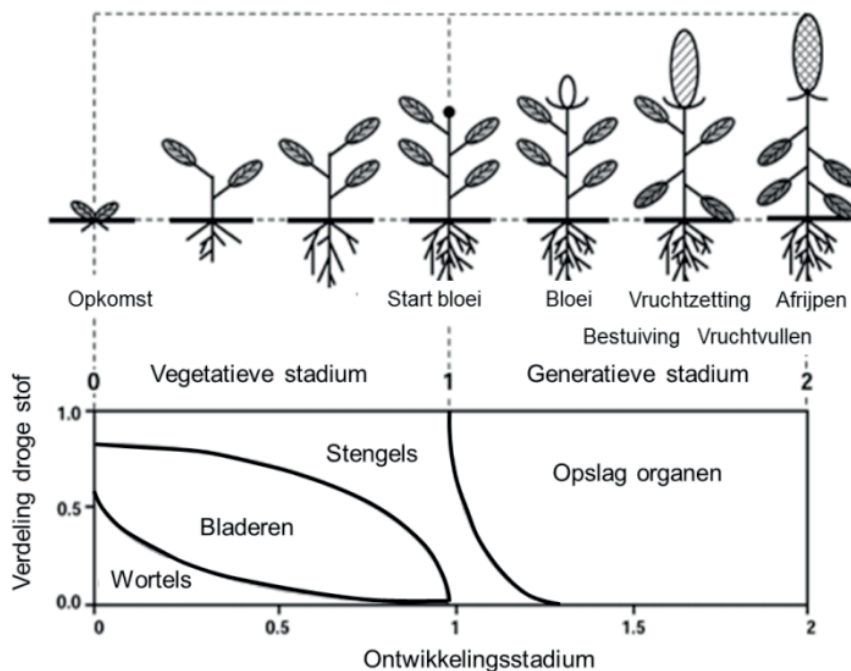
FIGUUR 3.2 STROOMSCHEMA VAN GEWASGROEI-PROCESSEN IN WOFOST



In WOFOST wordt berekend hoeveel licht en CO₂ wordt onderschept en potentieel wordt omgezet door fotosynthese. De actuele fotosynthese wordt vervolgens berekend door de potentiële fotosynthese te reduceren voor beperkte beschikbaarheid van vocht voor verdamping, zuurstoftekort of te hoge zoutconcentraties. Een deel van de energie wordt gebruikt voor onderhoudsademhaling en groeiademhaling. Het resterende deel wordt omgezet in droge stof, dat afhankelijk van temperatuur en het ontwikkelingsstadium van het gewas wordt verdeeld over de verschillende onderdelen van het gewas: wortels, stengels, bladeren en opslagorganen (Figuur 3.3).

FIGUUR 3.3

VOORBEELD FRACTIONERING VAN GROEI OVER VERSCHILLENDE ONDERDELEN VAN DE PLANT ALS FUNCTIE VAN HET ONTWIKKELINGSSTADIUM



Bij het doorrekenen van klimaatscenario's kan met WOFOST rekening worden gehouden met de invloed van extreme weersomstandigheden, zoals hoge neerslagintensiteiten, langdurige droogte, stijging van CO_2 en veranderende temperaturen. Daarbij kan ook rekening worden gehouden met verschillende fotosynthese-systemen van gewassen. Voor CO_2 -gehaltes geldt dat er een constante waarde wordt gehanteerd voor de betreffende klimaatperiode. Voor het huidige klimaat wordt het gehalte van 1995 gebruikt. Voor het klimaatscenario wordt hierop een stijging toegepast, gebaseerd op het betreffende scenario.

Met de koppeling van SWAP met WOFOST wordt de dynamiek van gewasgroei meegenomen. De gewasontwikkeling zal elk jaar anders zijn als gevolg van meteorologie en hydrologie. Daarmee creëren we voor de berekeningen een realistische dynamische bovenrandvoorwaarde voor de SWAP-berekeningen.

3.2.2 GRASS

Het dynamische gewasgroei-model GRASS is afgeleid van WOFOST en speciaal ontwikkeld voor de simulatie van grasland (Kroes & Supit, 2011). Afwijkingen ten opzichte van het WOFOST model liggen vooral in het bepalen van de start van het groeiseizoen en het management van het gewas; grasland wordt meerdere malen per jaar geoogst (zogenaamde grassneden). In Waterwijzer Landbouw simuleren we een permanent grasland. Voor het bepalen van de start van de groei maken we gebruik van een temperatuursom van $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ vanaf 1 januari; dit moment is gelijk gesteld aan de vuistregel dat het tijdstip voor bemesting om een optimale droge stofopbrengst van een weidesnede te realiseren rond temperatuursom van $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ligt (Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen, 2017). Voor het vaststellen van het oogstmoment zijn kennisregels uit het BBPR model ontleend, welke worden toegepast op perceel-sniveau. In de praktijk hangt het oogstmoment af van de bedrijfssituatie en speelt interactie tussen verschillende percelen binnen het bedrijf een belangrijke rol. Voor de perceelbenadering hebben we daarom een vijftal varianten voor graslandmanagement in acht genomen, van alleen maaien tot alleen beweiding (Figuur 3.4).

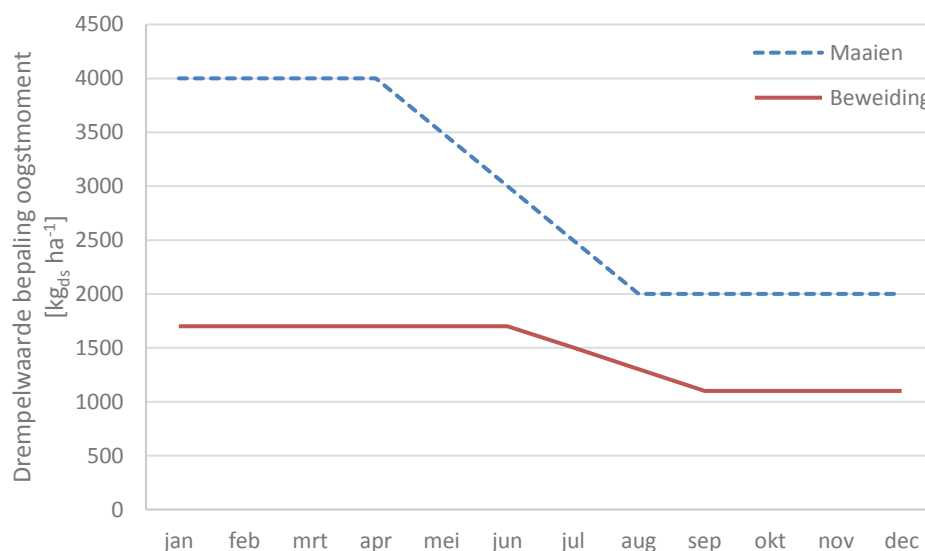
Elke tweede weidegang wordt gevolgd door bloten, waarbij de bovengrondse biomassa wordt teruggebracht tot een niveau van 850 kg ha⁻¹. Bij maaien ligt dit niveau iets lager, namelijk 700 kg ha⁻¹. Indien er minder bovengrondse biomassa aanwezig is na een weidegang, wordt er niet gebloot.

FIGUUR 3.4 GRASLANDMANAGEMENT IN 5 VERSCHILLENDE VARIANTEN MET SEQUENTIE MAAIEN (M), BEWEIDING (W) EN BEWEIDING MET BLOTEN (WB)

		Sequentie grassnede									
		1 ^{ste}	2 ^{de}	3 ^{de}	4 ^{de}	5 ^{de}	6 ^{de}	7 ^{de}	8 ^{ste}	9 ^{de}	10 ^{de}
Variant	1	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
	2	M	W	M	W	M	W	WB	W	WB	W
	3	M	W	M	W	WB	W	WB	W	WB	W
	4	M	W	WB	W	WB	W	WB	W	WB	W
	5	W	WB	W	WB	W	WB	W	WB	W	WB

Het oogstmoment op perceelsniveau wordt bepaald door de hoeveelheid bovengrondse biomassa of een maximale groeiduur. Wanneer er een bepaalde drempelwaarde wordt overschreden wordt overgegaan tot het oogsten van een grassnede. De drempelwaarde is hierbij afhankelijk gesteld van het tijdstip in het jaar en of er sprake is van maaien of beweiden (Figuur 3.5). Zowel bij maaien als bij weiden wordt gedurende het seizoen een afnemende drempelwaarde gehanteerd. Dit past goed bij de praktijk: later in het seizoen neemt de groei af (vooral door kortere dagen). Sturen op een constante opbrengst zou lange(re) groeiduren betekenen, hetgeen leidt tot achteruitgang van de voederwaarde.

FIGUUR 3.5 VARIËRENDE DREMPELWAARDE TEN BEHOEVE VAN BEPALING OOGSTMOMENT BIJ MAAIEN EN BEWEIDING [KG HA⁻¹] ALS FUNCTIE VAN DE TIJD IN HET SEIZOEN



Bij vertraagde groei kan het voorkomen dat de voederwaarde van de grassnede te sterk afneemt. Om dat te vermijden wordt een maximale groeiduur gehanteerd van 42 dagen voor maaien en 28 dagen voor beweiding. Doordat het oogstmoment afhangt van de gewasontwikkeling zal het aantal oogstmomenten in een jaar variëren.

Na een maaisnede is er sprake van een herstelperiode waarin de groei in het model wordt stopgezet. De herstelperiode is hierbij afhankelijk van de zwaarte van de maaisnede en kan variëren van minimaal 2 dagen tot maximaal 4 dagen.

In geval van een weidesnede gaan we, conform de praktijk, uit van een onbeperkte grasopname van 16 kg_{ds} per koe met een dichtheid van 21.25 koeien per hectare. Er wordt een rendement (zonder vertrapping) aangehouden van 80% als gevolg van delen van het grasland wat niet door het vee benut wordt (bossen en mestflatten). Bij het inscharen op een drempelwaarde van 1700 kg_{ds} ha⁻¹ worden circa 4 tot 5 weidedagen gerealiseerd. Bij het inscharen op een lagere drempelwaarde (later in het groeiseizoen) zal het aantal weidedagen afnemen tot circa 2 tot 3 dagen.

Omdat het oogstmoment wordt bepaald door het overschrijden van een drempelwaarde (Figuur 35) zal in geval van groeivertraging het oogstmoment bij de actuele gewasgroei ook vertraging oplopen ten opzichte van de potentiële gewasgroei. Als gevolg hiervan ontstaat er een zogenaamde faseverschuiving in de oogstmomenten waarbij het mogelijk is dat bij de actuele gewasgroei minder vaak wordt geoogst dan bij de potentiële gewasgroei. Voor het vaststellen van de opbrengstderving is het daarom noodzakelijk om dezelfde einddatum aan te houden. De einddatum is hierbij ingesteld op 31 oktober, op die dag vindt er hoe dan ook een maaisnede plaats. Gewasgroei na 31 oktober wordt buiten beschouwing gelaten bij het vaststellen van de gewasopbrengst.

3.2.3 FIXED

Niet voor alle gewassen waarmee in Waterwijzer Landbouw wordt gerekend zijn de gewasgroeiprocessen voldoende bekend en dan kan er niet worden gewerkt met het model WOFOST. In dat geval wordt teruggevallen op simulaties met een eenvoudig gewasgroeimodel met statische gewasontwikkeling. We noemen dat FIXED, want de ontwikkeling van gewashoogte en het bladoppervlak gedurende het groeiseizoen zijn van te voren opgelegd en variëren niet tussen verschillende jaren. Opgetreden transpiratiereductie zal daarmee geen invloed hebben op de watervraag van het gewas. In tegenstelling tot een dynamisch gewasgroeimodel is een statisch gewasgroeimodel dan ook niet in staat om de potentiële gewasopbrengst te berekenen maar wordt deze als een gegeven beschouwd. Op basis van de berekende transpiratiereductie wordt de actuele gewasopbrengst bepaald. Voor de vertaling van transpiratiereductie naar opbrengstderving maken we gebruik van een zogenaamde gewasresponsfactor, zie Vergelijking 3.1.

$$\left(1 - \frac{Y_{act}}{Y_{pot}}\right) = K_Y \left(1 - \frac{T_{act}}{T_{pot}}\right) \quad \text{Vergelijking 3.1}$$

Waarbij:

Y_{pot}	: Potentiële gewasopbrengst	[kg ha ⁻¹]
Y_{act}	: Actuele gewasopbrengst	[kg ha ⁻¹]
K_Y	: Gewasresponsfactor	[dimensieloos]
T_{pot}	: Potentiële transpiratie	[mm]
T_{act}	: Actuele transpiratie	[mm]

Deze vertaling is gebaseerd op een publicatie van FAO (Steduto et al., 2012), in plaats van evapotranspiratie maken we nu echter gebruik van transpiratie. Een gewasresponsfactor gelijk aan één geeft aan dat de relatieve transpiratiereductie gelijk is aan de relatieve opbrengstderving.

Een gewasresponsfactor met een waarde hoger dan één geeft aan dat het gewas gevoelig is voor transpiratiereductie. In dat geval zal de relatieve opbrengstderving groter zijn dan de relatieve transpiratiereductie. In Tabel 3.2 staan de gewasresponsfactoren en de potentiële gewasopbrengsten vermeld voor de benodigde gewassen.

TABEL 3.2 GEWASRESPONSFACTOREN EN POTENTIËLE GEWASOPBRENGSTEN VOOR GEWASSEN GESIMULEERD MET EEN EENVOUDIG GEWASGROEI-MODEL

Gewas	K_y	Y_{pot} [$kg_{ds} ha^{-1}$]
<i>Akkerbouw</i>		
Zaai-uien	1.10 ¹	8910 ⁷
<i>Bollen</i>		
Tulp	1.00 ^{n.d.}	10260 ⁷
Lelie	1.00 ^{n.d.}	5720 ⁷
<i>Groenteteelt</i>		
Prei	1.00 ^{n.d.}	5175 ⁷
Sla	1.00 ^{n.d.}	3825 ⁷
Bloemkool	0.95 ¹	4200 ⁷
Spruitkool	0.95 ¹	3645 ⁷
Winterpeen	1.00 ^{n.d.}	8750 ⁷
Sperziebonen	1.15 ¹	2552 ⁷
<i>Boomteelt</i>		
Appelbomen	0.85 ^{2,3,4,5}	33628 (vers) ⁸
Laanbomen	0.85 ⁶	10 (vers) ⁸

1: Steduto et al. (2012); 2: Doorenbos & Kassam (1979); 3: Naor et al. (in Steduto et al., 2012); 4: Marsal et al. (in Steduto et al., 2012); 5: Girona et al. (in Steduto et al., 2012); 6: Hop (2010); 7: KWIN Akkerbouw en Vollegrondsgroenten 2015 (via PPO); 8: AGRICOM 2.05 (Mulder & Veldhuizen, 2017); n.d.: geen data beschikbaar

4

DIRECTE EN INDIRECTE EFFECTEN

Bij het kwantificeren van de relatieve opbrengst of opbrengstderving maakt Waterwijzer Landbouw onderscheid in directe en indirecte effecten:

- Directe effecten zijn direct te relateren aan reductie in gewasverdamping. Daarbij wordt zo goed mogelijk onderscheid gemaakt in opbrengstderving als gevolg van beïnvloeding door te droge, te natte of te zoute omstandigheden.
- Indirecte effecten is de verzamelnaam voor alle andere vormen van schade aan gewassen veroorzaakt door de heersende hydrologische omstandigheden. Gedacht kan worden aan de gevolgen van beperkte draagkracht (bewerkbaarheid, berijdbaarheid, vertrapping), uitsel van zaaien, vertragende kieming en oogstschade.

4.1 DIRECTE EFFECTEN: DROOGTE-, ZUURSTOF- EN ZOUTSTRESS

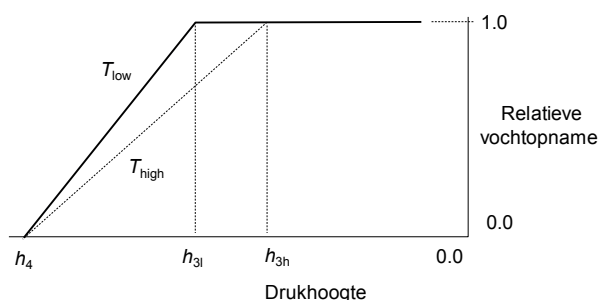
Planten hebben water nodig voor biochemische reacties en om hun celspanning in stand te houden, maar verreweg het meeste water dat opgenomen wordt door de plantenwortels verdwijnt via transpiratie door de huidmondjes naar de atmosfeer. Gelijktijdig vindt door dezelfde huidmondjes opname van CO_2 plaats. CO_2 is nodig voor fotosynthese en dus voor de productie van biomassa en groei van het gewas. Bij niet optimale bodemvochtcondities (te droog, te nat of te zout) sluiten planten de huidmondjes, waardoor de transpiratie wordt beperkt. Hierdoor wordt echter ook de opname van CO_2 belemmerd en is er sprake van minder fotosynthese, minder biomassa en minder groei. Op deze wijze hebben niet optimale bodemvochtcondities direct invloed op de opbrengst van landbouwgewassen.

Potentiële gewasopbrengsten kunnen berekend worden aan de hand van werkelijke meteorologische omstandigheden en gewaseigenschappen, maar ervan uitgaande dat relevante standplaatsfactoren, zoals vochtvoorziening en voedingsstoffen, optimaal zijn. Potentiële gewasopbrengsten kunnen stijgen door veranderingen in klimatologische omstandigheden (zoals temperatuur en CO_2 -concentratie), door gewasveredeling en door teelt-technische maatregelen.

Om de opname van water door plantenwortels te bepalen, berekent SWAP eerst de potentiële transpiratie, dus de transpiratie bij optimale bodemvochtcondities. De invoergegevens die hiervoor gebruikt worden zijn de weervariabelen zonnestraling, luchttemperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid, en de plantkenmerken gewashoogte, reflectiecoëfficiënt, bladoppervlakte-index en minimale huidmondjes-weerstand. De werkwijze is uitgebreid beschreven in Kroes et al. (2015). De potentiële transpiratie wordt verdeeld over de wortelzone, evenredig met de worteldichtheid, om de potentiële opname van water door de wortels vast te stellen. Vervolgens wordt aan de hand van de eerder berekende bodemvochtcondities op verschillende diepten in de wortelzone bepaald in welke mate schade door droge, natte of zoute omstandigheden optreedt. Daarmee wordt vervolgens de actuele transpiratie vastgesteld.

4.1.1 DROOGTESTRESS

FIGUUR 4.1 RELatieve VOCHTOPNAME ALS FUNCTIE VAN DRUKHOOGTE BODEMVOCHT IN HET DROGE TRAJECT VOLGENS FEDDES ET AL. (1978)

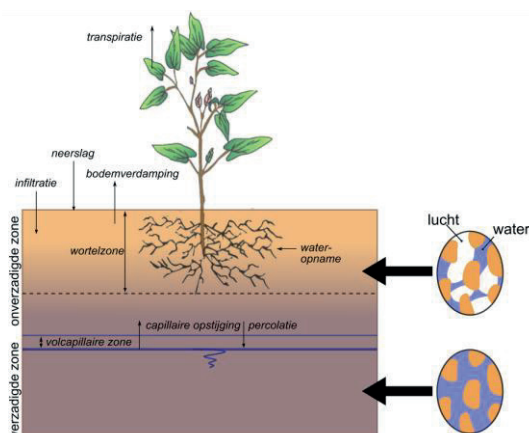


Bij optimale bodemvochtcondities zijn de plantenwortels in staat te voldoen aan de potentiële opname. Bij te droge omstandigheden wordt de waterflux naar de wortels kleiner dan de potentiële opname. Deze afname wordt uitgedrukt in een reductiecoëfficiënt die varieert van 0.0 (geen opname) tot 1.0 (potentiële opname). In Waterwijzer Landbouw gebruiken we de bekende functie van Feddes et al. (1978) voor relatieve vochttopname bij droge omstandigheden (Figuur 4.1). De drukhoogte h wordt gebruikt als maat voor droogtegraad. Bij drukhoogten groter dan h_3 is er geen droogtestress en is de relatieve vochttopname gelijk aan 1.0. Bij drukhoogten lager dan h_3 neemt de relatieve vochttopname af, tot zij gelijk aan nul is bij verwelkingspunt (h_4). De drempelwaarde voor droogtestress (h_3) hangt af van de potentiële transpiratie.

De drukhoogte kan sterk variëren met de diepte, bijvoorbeeld bij minder doorlatende bodems met ondiepe grondwaterstanden of bij beregning. In die omstandigheden zijn planten in staat verminderde vochttopname in de droge delen te compenseren met extra vochttopname in vochtiger delen. SWAP biedt de mogelijkheid om rekening te houden met deze compensatie (Jarvis, 2011).

4.1.2 ZUURSTOFSTRESS

FIGUUR 4.2 DE VERDELING VAN WATERGEVULDE EN LUCHTGEVULDE PORIËN ONDER INVLOED VAN BODEMVOCHTTRANSPORT EN GRONDWATERSTAND (NAAR BARTHOLOMEUS ET AL., 2010)



Zuurstofstress beïnvloedt de gewasopbrengst via de doorluchting (aëratie) van de bodem waardoor de zuurstofvoorziening naar plantenwortels plaatsvindt. Normaal gesproken verkrijgen plantenwortels voldoende zuurstof voor hun respiratie (ademhaling) direct uit de luchtgevulde poriën in de bodem. Echter, als de bodem te nat wordt, wordt lucht in de bodem-

poriën vervangen door water (Figuur 4.2). Hierdoor wordt de beschikbaarheid van zuurstof limiterend voor wortelrespiratie. Planten respireren om energie voor groei en onderhoud te verkrijgen. Een tekort aan zuurstof belemmert dus de energievoorziening voor het in stand houden van het metabolisme van de plant. Planten lijden dan aan zuurstofstress: ze stikken.

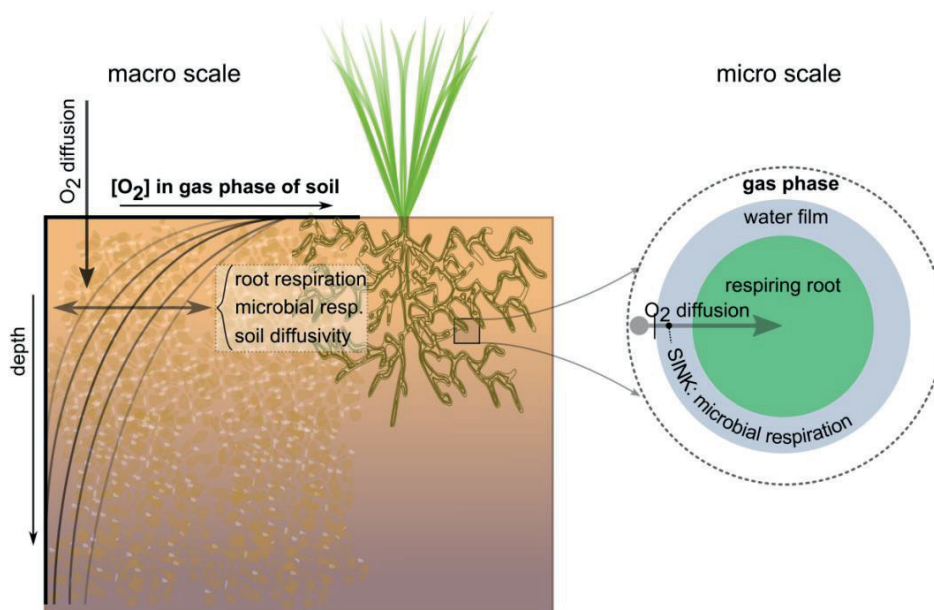
Wortelrespiratie wordt bepaald door het transport van zuurstof in de bodem en de vraag door de wortels. Het transport van zuurstof wordt in SWAP berekend met de zuurstofroutine van Bartholomeus et al. (2008). Aangezien het transport van gas in watergevulde poriën circa 1000 keer lager is dan die in luchtgevulde poriën, wordt de beschikbaarheid van zuurstof bepaald door het luchtgehalte op de verschillende bodemdiepten (zie Figuur 4.3). De beschikbare zuurstof wordt naast respiratie door wortels ook gebruikt voor respiratie door micro-organismen.

De koppeling met het gewasgroeimodel WOFOST maakt het mogelijk om de zuurstofvraag van plantenwortels in detail te beschrijven. De volgende variabelen zijn van belang:

- worteldiepte
- wortelbiomassa
- verhouding totale respiratie : onderhoudsrespiratie

FIGUUR 4.3

SCHEMATISERING VAN DE ZUURSTOFMODULE, GEBRUIKT OM DAGELIJKE RESPIRATIE- EN TRANSPIRATIEREDUCTIE TE BEPALEN. DE MODULE COMBINEERT FYSIOLOGISCHE PROCESSEN (WORTELRESPIRATIE EN MICROBIËLE RESPIRATIE) EN FYSISCHE PROCESSEN (DIFFUSIE OP ZOWEL MACRO- ALS MICROSCHAAL). DETAILS VOOR DE GEBRUIKTE VERGELIJKINGEN ZIJN GEGEVEN IN BARTHOLOMEUS ET AL. (2008)



Worteldiepte en -biomassa worden in SWAP-WOFOST dynamisch berekend. De dagelijkse toename van de worteldiepte hangt af van de beschikbaarheid van organische bouwstenen en dus van actuele assimilatie. Deze actuele assimilatie op haar beurt is afhankelijk van de vocht- en zuurstofcondities in de wortelzone.

De op dagelijkse basis berekende wortelbiomassa wordt gebruikt voor de berekening van de onderhoudsrespiratie van plantenwortels. De totale wortelrespiratie wordt verkregen uit de gewassenmerken zoals die bepaald worden in WOFOST. Als de zuurstofbeschikbaarheid in de wortelzone onvoldoende is om in de zuurstofbehoefte van de wortels te voorzien, dan reduceert de potentiële fotosynthese tot de actuele fotosynthese.

4.1.3 ZOUTSTRESS

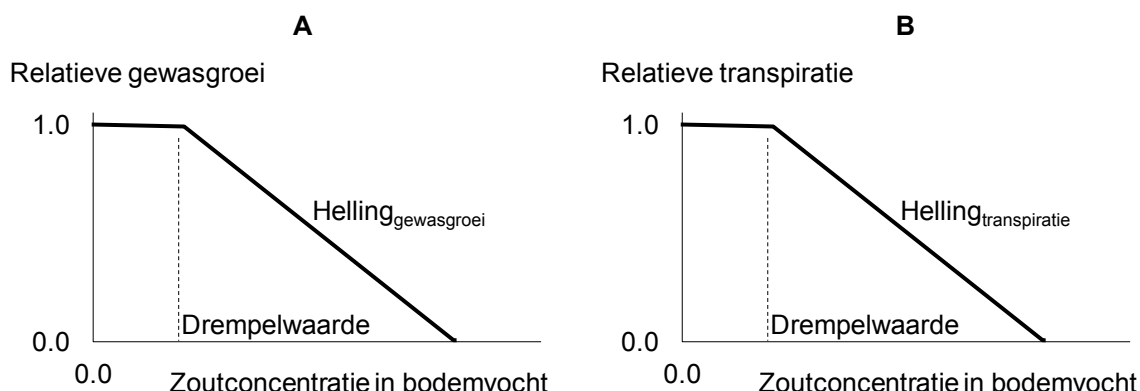
In het westen en noorden van Nederland kan schade optreden als gevolg van zoute kwel of beregening met een verhoogde zoutconcentratie. In Waterwijzer Landbouw beperken we ons vooralsnog tot schade door beregening met een verhoogde zoutconcentratie; zout uit de ondergrond (kwel) wordt dus niet beschouwd. Zout in de wortelzone kan op verschillende manieren schade veroorzaken:

- Reductie van de wateropname door wortels. Zouten die zijn opgelost in het water in de wortelzone verhogen de osmotische potentiaal waardoor de plant een hogere zuigspanning moet opwekken om water op te nemen en waardoor ze de huidmondjes eerder sluiten, met verdampings- en opbrengstderving tot gevolg;
- Toxische werking, doordat, vooral door de opname van natrium, de ionenbalans in de plant wordt verstoord. Daarnaast kan door verdringing van kalium door natrium bij opname vanuit de wortelzone de osmotische potentiaal in het blad worden verhoogd, met verbrandingsverschijnselen tot gevolg (bladranden);
- Verstoring van de opname van voedingsstoffen door concurrentie met niet-voedingsionen;
- Belemmering van de beworteling, waardoor de kwaliteit (bij bijv. winterwortel) en/of de kwantiteit (door verminderde wateropname door de wortels) van het oogstbaar product kan afnemen.

SWAP berekent de zoutconcentraties in de wortelzone met de convectie-dispersievergelijking. Als gevolg van het Nederlandse neerslagoverschot in de winter zullen de zoutconcentraties aan het begin van het groeiseizoen over het algemeen laag zijn. Alleen in droge zomers waarin grotere hoeveelheden zout beregeningswater worden gebruikt, lopen gewassen kans op zoutstress.

Voor simulatie van zoutstress maken we gebruik van de Maas & Hoffman (1977a,b) relaties, waarin de relatieve gewasgroei een lineaire functie is van de zoutconcentratie in de wortelzone met een drempelwaarde en een helling (Figuur 4.4). De Maas-Hoffman relaties worden in gebieden met een semi-aride klimaat veel gebruikt om het effect van irrigatie met zout water op gewasopbrengst te berekenen. In de Nederlandse en internationale literatuur zijn voor veel gewassen gegevens bekend van de drempelwaarde en helling (Stuyt et al., 2016; Van Bakel et al., 2009; Maas, 1990; Maas & Hoffman, 1977a,b). Voor toepassing in SWAP-WOFOST zijn aanpassingen nodig van deze gegevens. Dit komt omdat in Waterwijzer Landbouw de gewasgroei wordt berekend, waarbij de zoutstress een transpiratiereductie en daarmee een groeireductie veroorzaakt. Mulder et al. (2018) laten zien dat het verband tussen relatieve gewasgroei en relatieve verdamping in het algemeen niet 1:1 is, maar bij benadering wel lineair. Simulaties met verschillende zoutconcentraties stellen ons in staat de helling van relatieve gewasgroei om te zetten in een helling voor relatieve transpiratie (Figuur 4.4).

FIGUUR 4.4 INVLOED VAN ZOUTCONCENTRATIE IN BODEMVocht OP RELATIEVE GEWASGROEI VOLGENS MAAS & HOFFMAN (A) EN OP RELATIEVE TRANSPIRATIE (B)



Zoutstress volgens deze aanpak beperkt zich tot het directe effect van zoutgehalte in de wortelzone op transpiratie en gewasgroei. Veelal zal dit een osmotische effect zijn, maar afhankelijk van de experimentele omstandigheden kan hierbij ook sprake geweest zijn van (gedeeltelijke) toxische effecten in de wortelzone van enkele ionen op de gewasontwikkeling. In Waterwijzer Landbouw wordt geen rekening gehouden met:

- Expliciet maken van toxische effecten (is soms impliciet verweven in Maas-Hoffman parameters);
- Verschillen in zoutgevoeligheid tijdens verschillende groeistadia;
- Bladverbranding en verkleuring van oogstbare producten;
- Structuurschade op zavel- en kleigronden.

Een uitgebreide beschrijving over hoe de drempelwaarden en hellingen voor simulatie van zoutstress voor de diverse gewassen zijn afgeleid is te vinden in Bijlage D.

4.2 INDIRECTE EFFECTEN

Indirecte effecten zijn dus alle andere vormen van effecten op gewasopbrengst dan de effecten die gekoppeld zijn aan gewasverdamping. In Waterwijzer Landbouw houden we rekening met indirecte effecten die zijn gerelateerd aan hydrologische omstandigheden, zoals gevolg van beperkte draagkracht (bewerkbaarheid, berijdbaarheid, vertrapping), uitstel van zaaien, vertraagde kieming (onder invloed van bodemvocht en/of bodemtemperatuur) en oogstschade.

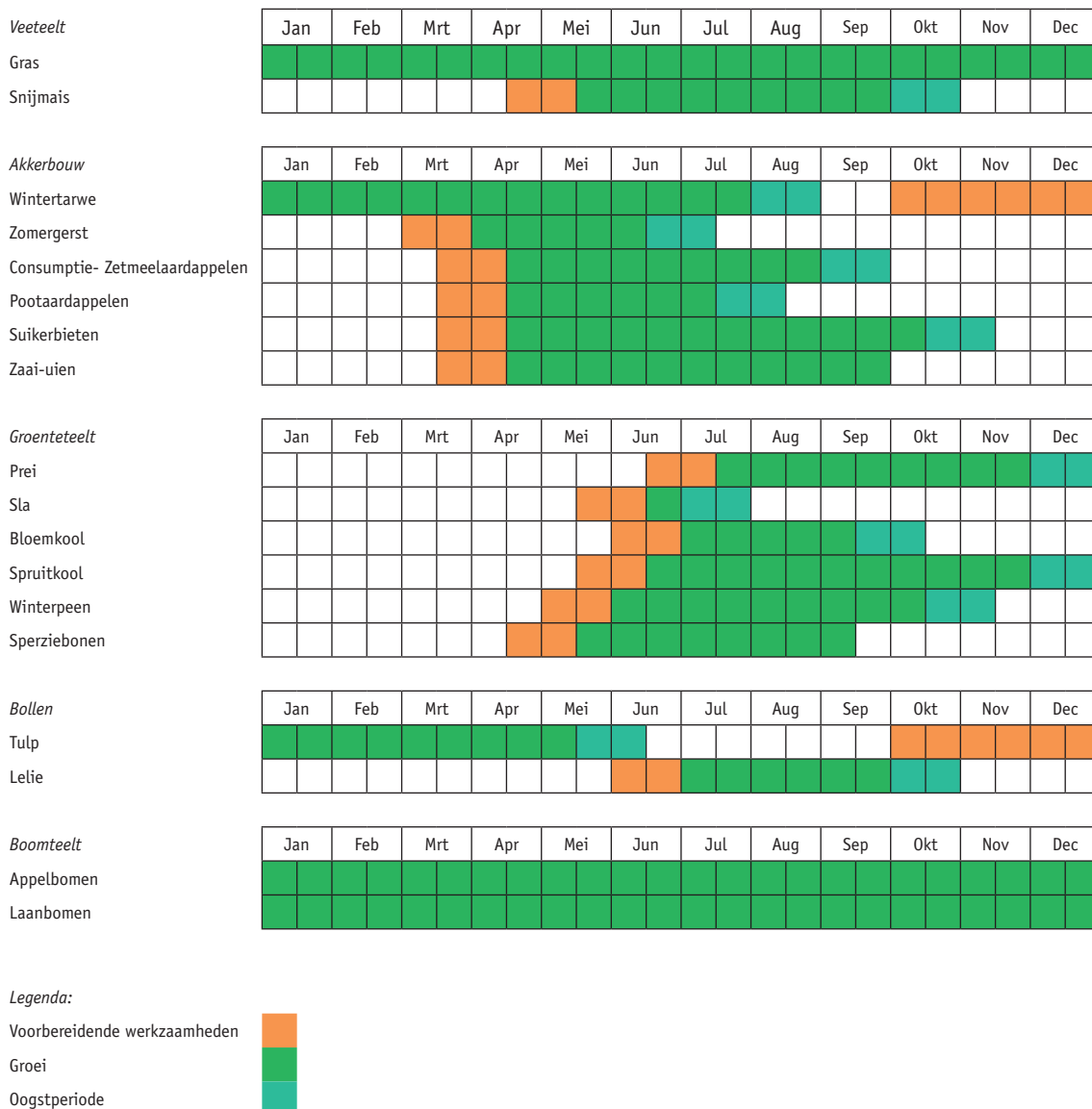
Overige mogelijke indirecte effecten zoals effecten op gewasontwikkeling en kwaliteit oogstproduct, bestrijding ziekten en plagen en effecten op bodemkwaliteit worden niet beschouwd (zie Bijlage F).

4.2.1 OPEN TEELTEN

Voor het berekenen van de potentiële gewasopbrengst of potentiële transpiratie is voor open teelten allereerst de bepaling van het groeiseizoen van belang. Waterwijzer Landbouw houdt een gewaskalender aan per gewas waarbinnen het groeiseizoen valt (Figuur 4.5). De gewaskalender is gebaseerd op het onderzoek “Grondwater als leidraad voor het oppervlaktewater” (Projectgroep Waternood, 1998). Daar waar nodig zijn er wijzigingen doorgevoerd op basis van praktijkervaringen van experts van PPO (mondelinge mededeling Klompe, 2018).

FIGUUR 4.5

GEWASKALENDER VOOR OPEN TEELTEN WAARBINNEN HET GROEISEIZOEN PLAATSVINDT. DE GEWASONTWIKKELING (GROEN) BEGINT NADAT DE VOORBEREIDENDE WERKZAAMHEDEN HEBBEN PLAATSGEVONDEN (PLOEGEN EN ZAAIEN) AANGEGEVEN MET ORANJE. VOOR WINTERTARWE EN TULP WORDT REKENING GEHOUDEN MET EEN EXTRA LANGE PERIODE VOORDAT DE GEWASONTWIKKELING DAADWERKELIJK GAAT PLAATSVINDEN ALS GEVOLG VAN VERNALISATIE (BEÏNVLOEDING VAN GROEI-PROCESSEN DOOR KOU)



Voor open teelten kan het begin van het groeiseizoen vertraging oplopen indien de voorbereidende werkzaamheden moeten worden uitgesteld. Waterwijzer Landbouw houdt hiermee rekening voor ploegen en zaaien (of planten). Indien de draagkracht niet toereikend is en/of de bodemtemperatuur te laag is, worden de voorbereidende werkzaamheden uitgesteld. Er wordt echter niet voor onbepaalde tijd gewacht, na een vertraging van maximaal 30 dagen worden de werkzaamheden hoe dan ook uitgevoerd zoals ook binnen de gangbare landbouwpraktijk gebruikelijk is.

4.2.2 PLOEGEN

De voorbereidende grondbewerking (ploegen) kan zowel in het voorjaar als najaar plaatsvinden. In Nederland wordt over het algemeen in het voorjaar op zandgrond geploegd en in het najaar op kleigronden. Voor het vaststellen van de start van het groeiseizoen is alleen het ploegen in het voorjaar van belang welke dus afhankelijk is van het bodemtype, zie Tabel 4.1.

TABEL 4.1

VOCHTSPANNINGSCRITERIUM BIJ OPEN TEELTEN OP EEN DIEPTE VAN 15 CM

Staring bouwsteen	Omschrijving	Ploegen	Categorie	
			Licht	Zwaar
B01	Leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand	Voorjaar	-50	-60
B02	Zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	Voorjaar	-50	-60
B03	Sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	Voorjaar	-50	-60
B04	Zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	Voorjaar	-50	-60
B05	Grof zand	Voorjaar	-50	-60
B06	Keileem	Voorjaar	-50	-60
B07	Zeer lichte zavel	Najaar	-60	-90
B08	Matig lichte zavel	Najaar	-60	-90
B09	Zware zavel	Najaar	-60	-90
B10	Lichte klei	Najaar	-70	-100
B11	Matig zware klei	Najaar	-70	-100
B12	Zeer zware klei	Najaar	-70	-100
B13	Zandige leem	Najaar	-70	-100
B14	Siltige leem	Najaar	-70	-100
B15	Venig zand	Voorjaar	-50	-60
B16	Zandig veen en veen	Voorjaar	-60	-80
B17	Venige klei	Voorjaar	-60	-80
B18	Kleiig veen	Voorjaar	-60	-80
O05	Grof zand	Voorjaar	-50	-60
O09	Matig lichte zavel	Najaar	-60	-90

Het moment waarop het uitvoeren van de voorbereidende grondbewerkingen in het voorjaar plaatsvindt is afhankelijk gesteld van een vochtspanningscriterium, deze criteria zijn afgeleid van Beuving (1982). In Waterwijzer Landbouw worden twee categorieën voor het vochtspanningscriterium onderscheiden: licht en zwaar. Dit is een gewichtscategorie die afhankelijk is van de grondbewerking en de zwaarte van de meest gangbare machine voor dat gewas. Het ploegen valt bijvoorbeeld altijd onder de zware categorie, voor het zaaien van graan is een lichter landbouwvoertuig nodig dat onder licht nattere omstandigheden het veld op kan. De vochtspanning wordt gemonitord op een diepte van 15 cm.

4.2.3 ZAAIEN

Nadat er is geploegd kan er worden overgegaan tot het zaaien of planten van het gewas. Voor het zaaien wordt gewacht totdat de bodemtemperatuur op een diepte van 6 cm een bodemtemperatuur heeft bereikt van minimaal 9 °C. Daarnaast speelt ook het vochtspanningscriterium een rol. Afhankelijk van het gewas wordt een zware of lichte categorie voor dit vochtspanningscriterium aangehouden, afhankelijk van de meest gangbare machine voor het betreffende gewas, zie Tabel 4.2.

TABEL 4.2

CATEGORIE VOCHTSPANNINGSCRITERIUM BIJ ZAAIEN

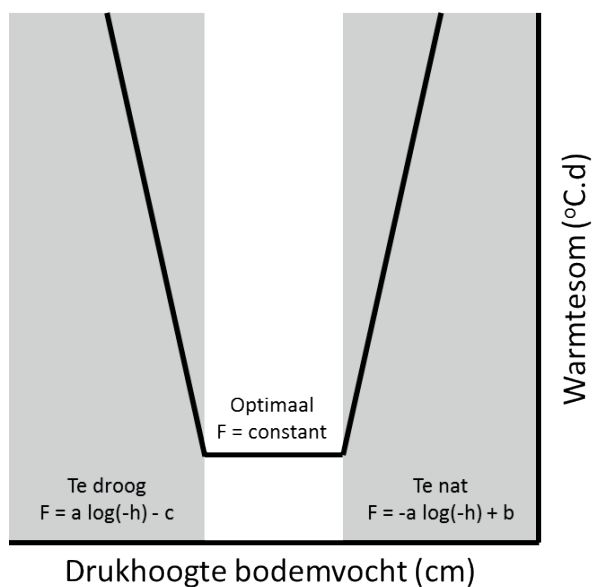
Gewas	Categorie	Gewas	Categorie
<i>Veeteelt</i>		<i>Groenteteelt</i>	
Snijmais	Zwaar	Prei	Zwaar
		Sla	Zwaar
<i>Akkerbouw</i>		Bloemkool	Zwaar
Wintertarwe	Licht	Spruitkool	Zwaar
Zomergerst	Licht	Winterpeen	Licht
Consumptie- Zetmeelaardappelen	Zwaar	Sperziebonen	Licht
Pootaardappelen	Zwaar		
Suikerbieten	Licht	<i>Boomteelt</i>	
Zaai-uien	Licht	Appelbomen	n.v.t.
		Laanbomen	n.v.t.
<i>Bollen</i>			
Tulp	Zwaar		
Lelie	Zwaar		

4.2.4 KIEMINGSFASE

Nadat het zaaien is afgerond begint de simulatie van de kiemingsfase. De kiemingsfase wordt berekend met de door Van Wijk et al. (1988) gegeven methode op basis van de warmtesom (van de luchttemperatuur) en de drukhoogte (Figuur 4.6).

FIGUUR 4.6

INVLOED VAN DRUKHOOGTE IN HET KIEMBED OP DE VEREISTE TEMPERATUURSOM VOOR KIEMING (FIGUUR BEWERKT NAAR VAN WIJK E.A., 1988)



Niet voor alle gewassen is de simulatie van de kiemingsfase van belang. Het gewas prei wordt bijvoorbeeld geplant in plaats van gezaaid; simulatie van een kiemingsfase is dan niet van toepassing (Tabel 4.3).

TABEL 4.3

SIMULATIE VAN KIEMINGSFASE PER GEWAS

Gewas	Kieming	Gewas	Kieming
<i>Veeteelt</i>		<i>Groenteteelt</i>	
Snijmais	Ja	Prei	n.v.t.
		Sla	n.v.t.
<i>Akkerbouw</i>		Bloemkool	n.v.t.
Wintertarwe	Ja	Spruitkool	n.v.t.
Zomergerst	Ja	Winterpeen	Ja
Consumptie-Zetmeelaardappelen	Ja	Sperziebonen	Ja
Pootaardappelen	Ja		
Suikerbieten	Ja	<i>Boomteelt</i>	
Zaai-uien	Ja	Appelbomen	n.v.t.
		Laanbomen	n.v.t.
<i>Bollen</i>			
Tulp	n.v.t.		
Lelie	n.v.t.		

Tijdens de kiemingsfase vindt er geen transpiratie plaats van het gewas. De kiemingsfase heeft daarom geen invloed op de directe effecten. Na kieming begint de daadwerkelijke gewasontwikkeling.

4.2.5 OOGSTEN

Een gewas kan pas geoogst worden nadat er sprake is van voldoende rijping, vanaf dat moment begint de zogenaamde oogstbare periode. Het einde van de oogstbare periode valt samen met het einde van de gewaskalender. De daadwerkelijke oogst wordt uitgesteld totdat voldaan wordt aan een vochtspanningscriterium welke afhankelijk is van het bodemtype in combinatie met het gewas, zie Tabel 4.1 en Tabel 4.4. Indien gedurende de gehele oogstbare periode niet voldaan wordt aan het vochtspanningscriterium wordt het oogsttijdstip bepaald op het moment van de minste onderschrijding van het criterium, oftewel het minst natte moment in de oogstbare periode.

TABEL 4.4

CATEGORIE VOCHTSPANNINGSCRITERIUM BIJ OOGSTEN

Gewas	Categorie	Gewas	Categorie
<i>Veeteelt</i>		<i>Groenteteelt</i>	
Snijmais	Zwaar	Prei	Licht
		Sla	Licht
<i>Akkerbouw</i>		Bloemkool	Licht
Wintertarwe	Zwaar	Spruitkool	Licht
Zomergerst	Zwaar	Winterpeen	Zwaar
Consumptie-Zetmeelaardappelen	Zwaar	Sperziebonen	Zwaar
Pootaardappelen	Zwaar		
Suikerbieten	Zwaar	<i>Boomteelt</i>	
Zaai-uien	Zwaar	Appelbomen	n.v.t.
		Laanbomen	n.v.t.
<i>Bollen</i>			
Tulp	Zwaar		
Lelie	Zwaar		

Door op deze manier rekening te houden met de mogelijkheid dat het groeiseizoen kan verschuiven introduceren we feitelijk een tweede berekende potentiële gewasopbrengst, namelijk een potentiële gewasopbrengst bij een optimaal groeiseizoen en een potentiële gewasopbrengst bij een verkort of verschoven groeiseizoen. Het verschil tussen deze twee potentiële gewasopbrengsten is in feite de optelsom van indirecte effecten voor open teelten (voor details zie hoofdstuk 5).

In Waterwijzer Landbouw beperken we ons voor de open teelten tot indirecte effecten gerelateerd aan te natte omstandigheden voor grondbewerking of oogsten of aan te koude omstandigheden, die leiden tot een verkort groeiseizoen (zie bijlage F).

4.2.6 GRASLAND

Bij simulatie van grasland zijn de voorbereidende werkzaamheden zoals bij open teelten niet aan de orde. De indirecte effecten bij grasland ontstaan als gevolg van overschrijding van een vochtspanningscriterium (Tabel 4.5) waardoor er onvoldoende draagkracht is voor maaïen of weiden. Indien het vochtspanningscriterium wordt overschreden dan neemt de oogst met een bepaald percentage af. De vochtspanning wordt hierbij gemonitord op een diepte van 15 cm voor maaïen en een diepte van 10 cm voor beweiding.

TABEL 4.5

VOCHTSPANNINGSCRITERIUM BIJ HET OOGSTEN VAN EEN GRASSNEDE (VAN BAKEL & HOVING, 2017)

Staring bouwsteen	Omschrijving	Categorie	
		Maaïen	Beweiden
B01	Leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand	-30	-40
B02	Zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	-40	-50
B03	Sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	-40	-50
B04	Zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	-40	-60
B05	Grof zand	-20	-30
B06	Keileem	-50	-70
B07	Zeer lichte zavel	-60	-80
B08	Matig lichte zavel	-60	-80
B09	Zware zavel	-60	-80
B10	Lichte klei	-60	-80
B11	Matig zware klei	-60	-80
B12	Zeer zware klei	-70	-90
B13	Zandige leem	-50	-70
B14	Siltige leem	-60	-80
B15	Venig zand	-60	-80
B16	Zandig veen en veen	-40	-70
B17	Venige klei	-50	-70
B18	Kleiig veen	-50	-70
O05	Grof zand	-20	-30
O09	Matig lichte zavel	-60	-80

Het percentage waarmee de hoeveelheid oogst afneemt wordt bepaald door de mate van overschrijding. Er wordt een maximale afname gehanteerd van 30 en 75% bij respectievelijk maaïen en beweiden bij een vochtspanning van -10cm. Deze rekenregels zijn afgeleid van de berekeningswijze in BBPR en zijn een resultante van problemen met draagkracht en vertrapingsverliezen.

Het is belangrijk om te vermelden dat we voor de WWL-tabel de indirecte effecten voor grasland op een eenvoudige, doch reproduceerbare manier benaderen. De werkwijze is nadrukkelijk een benadering van de complexe werkelijkheid op bedrijfsniveau in de melkveehouderij. Op melkveebedrijven is het bijvoorbeeld mogelijk dat bij onvoldoende draagkracht van een perceel er toch beweid kan worden op een ander perceel en op deze wijze zal er geen sprake zijn van een effect op productie. Deze compensatiemogelijkheid binnen een bedrijf kan wel worden bepaald als er gekozen wordt voor een maatwerktoeepassing met BBPR. Met BBPR kunnen ook alle interacties met de voedervoorziening en de veestapel worden beschouwd.

5

KWANTIFICEREN EN SPECIFICEREN VAN OPBRENGSTDerving

5.1 DEFINITIE OPBRENGSTDerving

In Waterwijzer Landbouw definiëren we de opbrengstderving als het relatieve verschil in gewasopbrengst tussen de potentiële en de actuele gewasgroei:

$$Y_{red} = \frac{Y_{pot} - Y_{act}}{Y_{pot}} \quad \text{Vergelijking 5.1}$$

Waarbij:

Y_{pot}	: Potentiële gewasopbrengst	$[\text{kg}_{ds} \text{ ha}^{-1}]$
Y_{act}	: Actuele gewasopbrengst	$[\text{kg}_{ds} \text{ ha}^{-1}]$
Y_{red}	: Opbrengstderving	$[-]$

De potentiële gewasopbrengst wordt bij dynamische gewasmodellering berekend als functie van het CO_2 -gehalte, de zonnestraling, temperatuur, gewassenmerken (zie sectie 3.2.1) en op basis van het vochtspanningscriterium en temperatuurcriterium aan het begin en einde van het groeiseizoen bij een diepe grondwaterstand (zie sectie 4.2). Bij het hanteren van een diepe grondwaterstand worden effecten van te natte omstandigheden geminimaliseerd; alleen als gevolg van hevige neerslag kan de potentiële gewasopbrengst worden beïnvloed. Bij het eenvoudige gewasgroeimodel is de potentiële gewasopbrengst een gegeven (zie Tabel 32).

Gereduceerde gewasverdamping als gevolg van onvoldoende wateropname heeft gevolgen voor de gewasgroei. De transpiratiereductie als gevolg van directe effecten wordt gebruikt om de actuele gewasopbrengst te berekenen (zie sectie 4.1). Daarnaast kan de actuele gewasopbrengst zijn beïnvloed als gevolg van het gehanteerde vochtspanningscriterium en temperatuurcriterium (zie sectie 4.2).

5.2 SPECIFICEREN VAN OPBRENGSTDerving

Het modelinstrumentarium is in staat om de reductie (Y_{red}) op te splitsen in een aandeel indirecte en directe effecten waarbij directe effecten verder worden gespecificeerd in aandelen droogte-, zuurstof- en zoutstress:

$$Y_{red} = \frac{Y_{ind}}{Y_{pot}} + \frac{Y_{dir}}{Y_{pot}} = \frac{Y_{ind}}{Y_{pot}} + \frac{Y_{dry}}{Y_{pot}} + \frac{Y_{wet}}{Y_{pot}} + \frac{Y_{salt}}{Y_{pot}} \quad \text{Vergelijking 5.2}$$

Waarbij:

Y_{ind}	: Opbrengstderving als gevolg van indirecte effecten	$[\text{kg}_{ds} \text{ ha}^{-1}]$
Y_{dir}	: Opbrengstderving als gevolg van directe effecten	$[\text{kg}_{ds} \text{ ha}^{-1}]$
Y_{dry}	: Opbrengstderving als gevolg van droogtestress	$[\text{kg}_{ds} \text{ ha}^{-1}]$
Y_{wet}	: Opbrengstderving als gevolg van zuurstofstress	$[\text{kg}_{ds} \text{ ha}^{-1}]$
Y_{salt}	: Opbrengstderving als gevolg van zoutstress	$[\text{kg}_{ds} \text{ ha}^{-1}]$

Het SWAP model is in staat om op de transpiratiereductie uit te rekenen in aandelen droogte (Δ), nat (Δ) en zout (Δ). Hierbij wordt verondersteld dat de relatieve verdeling in transpiratiereductie gelijk is aan de relatieve opbrengstderving.

Bij dynamische gewasmodellering geldt dat dit een benadering is van de werkelijkheid omdat er geen sprake is van een lineair verband tussen verdamping en gewasopbrengst. In het voorjaar zal bijvoorbeeld de hoeveelheid transpiratie per dag gemiddeld lager zijn dan in de zomer waardoor de transpiratiereductie in het voorjaar minder zwaar meetelt. De transpiratiereductie in het voorjaar (en daarmee de opgelopen achterstand in de groei-ontwikkeling) zal echter tot het einde van groeiseizoen doorwerken. Desalniettemin geeft het onderscheid een indicatie van oorzaak van de opbrengstderving.

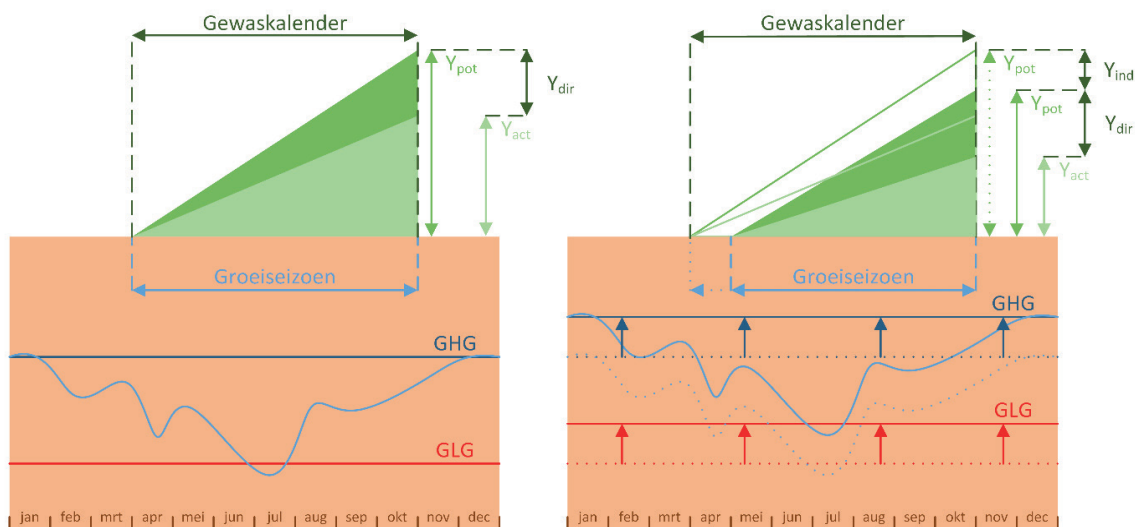
Het specificeren van directe effecten en indirecte effecten wordt hieronder geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld waarbij er sprake is van een vernattingsmaatregel. In Figuur 5.1 is links de gewasontwikkeling schematisch weergegeven voor een akkerbouwgewas voordat de hydrologische maatregel heeft plaatsgevonden (referentiesituatie) en rechts de situatie na de hydrologische maatregel. In het voorbeeld nemen we aan dat bij de referentiesituatie sprake is van een optimaal groeiseizoen, het vochtspanningscriterium en temperatuurcriterium hebben dus geen invloed op de lengte van het groeiseizoen. De opbrengstderving in de referentiesituatie wordt dus alleen beïnvloed door de directe effecten (Y_{dir}).

Als gevolg van de vernattingsmaatregel wordt in het voorbeeld aan het begin van het groeiseizoen niet voldaan aan het vochtspanningscriterium waardoor er sprake is van een verkort groeiseizoen. De potentiële gewasopbrengst die hoort bij een optimaal groeiseizoen is alleen afhankelijk van het bodemtype en zal dus als gevolg van de vernattingsmaatregel niet worden beïnvloed. Door het verkorten van het groeiseizoen introduceren we wel een zogenaamde tweede potentiële gewasopbrengst, namelijk een potentiële gewasopbrengst die hoort bij een uitgesteld (en dus suboptimaal) groeiseizoen. Het verschil tussen deze twee potentiële gewasopbrengsten duiden we aan als indirecte effecten (Y_{ind}).

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.

FIGUUR 5.1

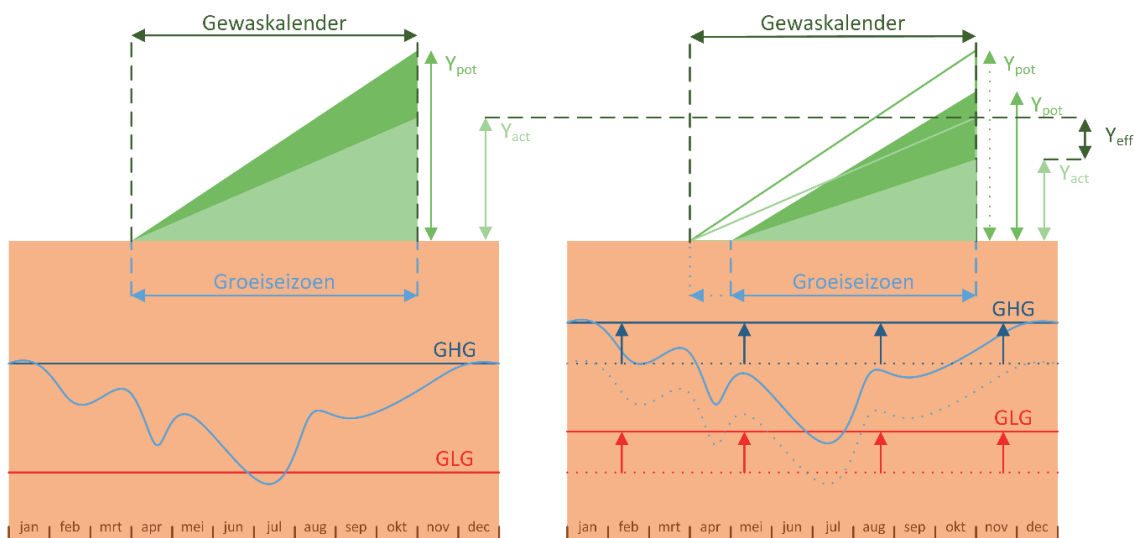
ILLUSTRATIE VAN BEREKENING VAN GEWASOPBRENGST MET SWAP-WOFOST VOOR EEN WILLEKEURIGE SITUATIE, WAARBIJ LINKS DE HUIDIGE SITUATIE WORDT WEERGEGEVEN EN RECHTS DE SITUATIE NA EEN VERNATTINGSMAATREGEL. HET DONKERGROENE VLAKE IN DE FIGUUR GEEFT DE POTENTIËLE GEWASOPBRENGST (Y_{pot}) AAN EN HET LICHTERE GROENE VLAKE DE ACTUELE GEWASOPBRENGST (Y_{act}). OPBRENGSTDERIVING ALS GEVOLG VAN DIRECTE EN INDIRECTE EFFECTEN WORDEN RESPECTIEVELIJK MET Y_{dir} EN Y_{ind} AANGEGEVEN



Om te bepalen wat voor effect de hydrologische maatregel heeft gehad op de opbrengstderiving kunnen we kijken naar het verschil in de berekende actuele gewasopbrengst, dit is weer gegeven met Y_{eff} in Figuur 5.2.

FIGUUR 5.2

ILLUSTRATIE VAN BEREKENING VAN GEWASOPBRENGST MET SWAP-WOFOST VOOR EEN WILLEKEURIGE SITUATIE VERGELIJKBAAR MET FIGUUR 5.1. DE VERANDERING IN GEWASOPBRENGST ALS GEVOLG VAN DE VERNATTINGSMAATREGEL IS AANGEGEVEN MET Y_{eff}



5.3 VERTALING VAN OPBRENGSTDERIVING NAAR ECONOMISCH EFFECT

Voor akkerbouw, groenteteelt, bollen en boomteelt wordt de opbrengstderiving tevens vertaald in een economisch effect door de opbrengstderiving in $\text{kg}_{ds} \text{ha}^{-1}$ te vermenigvuldigen met een gemiddelde kiloprijs (€ kg_{ds}^{-1}). In Tabel 51 zijn hiervoor de KWIN 2015 Akkerbouw en Vollegrondsgoenten gegevens opgenomen. De data moeten als een indicatie worden gezien en zijn onderhevig aan verandering. De tabel zal op de website van de WWL-tabel tool worden opgenomen.

TABEL 5.1

GEWASPRIJZEN PER EENHEID VERSGEWICHT (TENZIJ ANDERS VERMELD) EN PERCENTAGES DROGE STOF (BRON: KWIN AKKERBOUW EN VOLLEGRONDSGROENTEN, 2015 (VIA PLANT SCIENCES GROUP), TENZIJ ANDERS VERMELD)

Gewas	Prijs	Eenheid	% droge stof	Opmerking
<i>Veeteelt</i>				
Gras, VEM	0.167	€ kVEM ⁻¹		zie tekst voor bepaling VEM
Gras, DVE	0.671	€ kDVE ⁻¹		zie tekst voor bepaling DVE
Snijmais, VEM	0.167	€ kVEM ⁻¹		zie tekst voor bepaling VEM
Snijmais, DVE	0.671	€ kDVE ⁻¹		zie tekst voor bepaling DVE
<i>Akkerbouw</i>				
Wintertarwe	0.19	€ kg ⁻¹	85	klei; hoofdproduct
Zomergerst	0.19	€ kg ⁻¹	85	klei; hoofdproduct
Consumptieaardappel	0.16	€ kg ⁻¹	21.5	klei; IJsselmeer polders; %ds: 18-25%
Zetmeelaardappel	0.07	€ kg ⁻¹	24.5	%ds: 20-29%
Pootaardappel	0.30	€ kg ⁻¹	p.m.	klei; IJsselmeer polders
Suikerbieten	0.056	€ kg ⁻¹	24.5	klei; IJsselmeer polders; %ds: 24-25%
Zaai-uien	0.14	€ kg ⁻¹	16	klei; IJsselmeer polders; %ds: 13-19%
<i>Bollen</i>				
Tulp	27945	€ ha ⁻¹	38	0.092 €/stuk (AGRICOM; bollen) 303748 bollen/ha
Lelie	27945	€ ha ⁻¹	22	0.092 €/stuk (AGRICOM; bollen) 303748 bollen/ha
<i>Groenteteelt</i>				
Prei	0.37	€ kg ⁻¹	11.5	herfst laat; %ds: 10-13%
Sla	0.58	€ kg ⁻¹	4.5	ijssla zomer; %ds 4-5%
Bloemkool	0.85	€ kg ⁻¹	20	zomer; %ds. 15-25%
Spruitkool	0.40	€ kg ⁻¹	13.5	midden; %ds. 13-14%
Winterpeen	0.16	€ kg ⁻¹	10	%ds. 9-11%
Sperziebonen	0.16	€ kg ⁻¹	29	stamslabonen; %ds: 22-36%
<i>Boomteelt</i>				
Appelbomen	0.735	€ kg ⁻¹	p.m.	AGRICOM 2.05, 2017; fruit
Laanbomen	4570.00	€ kg ⁻¹	p.m.	AGRICOM 2.05, 2017; boomteelt

Opbrengsten van veeteeltgewassen kunnen niet direct vertaald worden naar een economisch effect, want hiervoor dient als tussenstap een vertaling te worden gemaakt van fysieke opbrengstderving naar derving in voedereenheden VEM (voedereenheid melk) en DVE (verteerbaar eiwit), zie ook Bijlage E. De derving in voedereenheden zijn vervolgens te vertalen naar een economisch effect.

Voor snijmais wordt een vaste voederwaarde-eenheid aangehouden van 980 VEM kg_{ds}⁻¹ en 53 DVE kg_{ds}⁻¹. Voor grasland zijn deze voederwaarden afhankelijk van het aantal groeidagen en moment van oogsten in het groeiseizoen. Hiervoor hanteren we de volgende formulering voor VEM en DVE (zie Bijlage E):

$$VEM = \alpha_1 + \alpha_2 \left(\frac{365.25 - SD}{SD} \right) \frac{\beta_1}{\beta_2} \left(\frac{GD}{\beta_2} \right)^{\beta_1 - 1} e^{-\left(\frac{GD}{\beta_2} \right)^{\beta_1}} \quad \text{Vergelijking 5.3}$$

Waarbij:

SD : Start van grassnede (dagnummer) [-]

GD : Aantal groeidagen van grassnede [d]

α , β : gekalibreerde coëfficiënten (zie Bijlage E)

$$DVE = \gamma_1 + \gamma_2 SD + \gamma_3 SD^2 + GD(\delta_1 + \delta_2 SD + \delta_3 SD^2 + \delta_4 SD^3) \quad \text{Vergelijking 5.4}$$

Waarbij:

SD : Start van grassnede [-]

GD : Aantal groeidagen van grassnede[d]

γ , δ : gekalibreerde coëfficiënten (zie Bijlage E)

Bij Vergelijking 5.3 en Vergelijking 5.4 wordt een minimaal aantal groeidagen aangehouden van 10 dagen.

Voor de vertaling van voedereenheden naar economisch effect wordt voor VEM een prijs aangehouden van 0.167 € kVEM⁻¹ en voor DVE is dat 0.671 € kDVE⁻¹.

6

VAN MODELINSTRUMENTARIUM NAAR WWL-TABEL

SWAP-WOFOST 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. Metarelaties of metamodellen, afgeleid van SWAP-WOFOST, vormen een interessant en eenvoudig toepasbaar alternatief. Met metarelaties is het mogelijk om resultaten van onderliggende simulatiemodellen na te bootsen.

Een metarelatie is doorgaans eenvoudiger dan het uitgangsmodel dat er aan ten grondslag ligt, omdat een metarelatie meestal maar een klein aspect van het uitgangsmodel modelleert. In het geval van SWAP-WOFOST 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 metarelatie buiten beschouwing gelaten.

De relatieve eenvoud van een metarelatie brengt ook andere voordelen met zich mee. Om voorspellingen te doen met het metarelatie 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 de metarelatie is de specificatie van de bodemopbouw vervangen door het bodemtype en de lijst aan gewaseigenschappen door de naam van het gewas. Een metarelatie zal ook veel sneller rekenen dan het uitgangsmodel. Dit maakt de metarelatie dan ook breder inzetbaar. Denk bijvoorbeeld aan situaties waarbij grote gebieden moeten worden doorgerekend.

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

6.1 DEFINIËREN VAN MODELRUNS

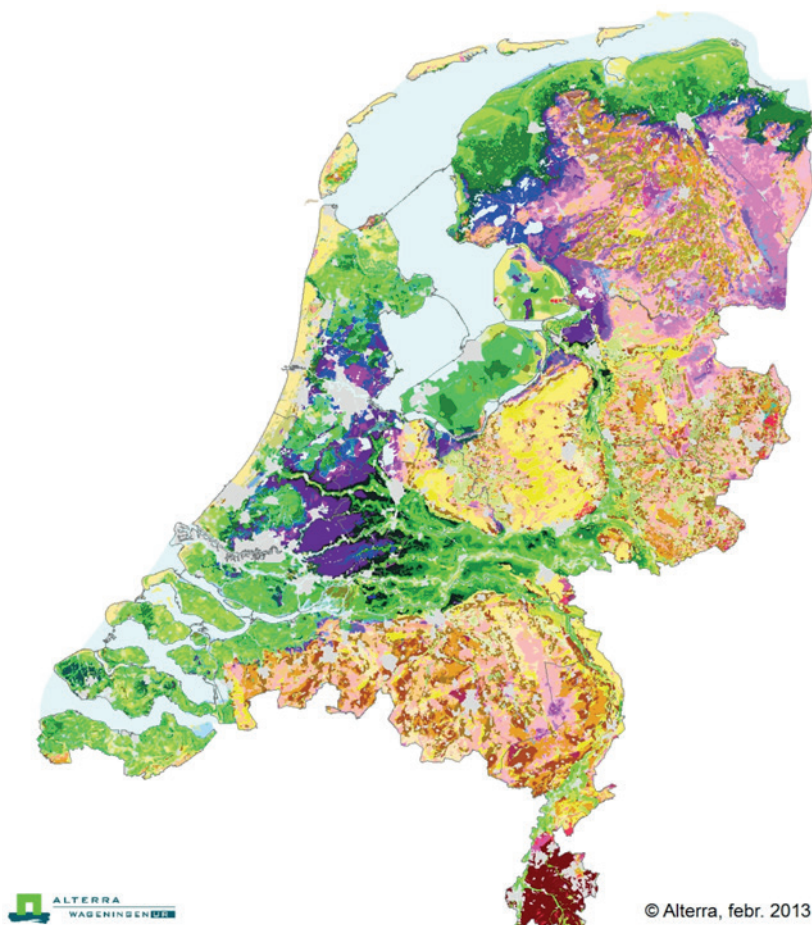
6.1.1 BODEM

De bodemfysische schematisering is overgenomen uit Wösten et al. (2013). Deze schematisering staat bekend als BOFEK 2012 en is weergegeven in Figuur 6.1. BOFEK 2012 bevat 72 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 5 m beneden maaiveld⁴. De bodemfysische relaties worden gemodelleerd met de Mualem-Van-Genuchten-parameters zoals gegeven in Wösten et al. (2013).

FIGUUR 6.1

BODEMFYSISCHE INDELING VAN NEDERLAND VOLGENS BOFEK-2012 (BRON: WÖSTEN ET AL., 2013)



6.1.2 METEOROLOGISCHE CONDITIES

De meteorologische gegevens voor de referentieperiode (1981-2010) zijn afkomstig van het KNMI. Het gaat hier om de globale straling, de minimum en maximum temperatuur, de minimum en maximum relatieve luchtvochtigheid, de windsnelheid, de neerslagsom, en de neerslagduur op dagbasis. Deze gegevens zijn verzameld voor vijf KNMI-hoofdstations; van noord naar zuid zijn dit: Eelde (station 280), De Kooy (station 235), De Bilt (station 260), Vlissingen (station 310) en Maastricht (station 380). We gebruiken alleen deze vijf hoofdstations omdat alleen voor deze vijf alle data voor 30 weerjaren uniform beschikbaar zijn.

Voor het verkrijgen van meteorologische gegevens voor het klimaatscenario W_H met tijdshorizont 2050 wordt gebruik gemaakt van het transformatieprogramma KNMI'14 versie 3.2 (Bakker, 2015). Niet alle huidige meteorologische gegevens zijn te transformeren naar een toekomstig tijdshorizont. Meteorologische gegevens die wel zijn getransformeerd zijn globale straling, de minimale temperatuur, de maximale temperatuur en de neerslagsom. De overige meteorologische gegevens (de minimum en maximum relatieve luchtvochtigheid, de windsnelheid en de neerslagduur) zijn overgenomen van de referentieperiode.

⁴ Uitgezonderd BOFEK eenheden met als onderste bouwstenen O6 en O14 waarbij de doorlatendheid bij verzadiging ($K_{sat,exm}$) vanaf 1.4 m is aangepast tot 10 cm d-1.

6.1.3 HYDROLOGISCHE CONDITIES

Als onderrand van SWAP-WOFOST is gebruik gemaakt van de zogenaamde $q_b(h)$ -relatie. Hierbij wordt aangenomen dat de verticale flux (q_b , cm d⁻¹) afhankelijk is van de grondwaterstand (h) en de coëfficiënten A, B en C volgens (Kroes et al., 2017):

$$q_b = Ae^{(Bh)} + C \quad \text{Vergelijking 6.1}$$

Deze coëfficiënten worden gevarieerd overeenkomstig het bereik in Oostindie & Hendriks (2005). Deze auteurs hebben voor een aantal zandgronden laten zien dat met dit bereik grondwaterstandsdynamieken kunnen worden nagebootst die het hele bereik aan Grondwatertrappen omvatten. A wordt gevarieerd van -10 tot 0 cm d⁻¹, B van -0.10 tot -0.01 cm⁻¹ en C (cm d⁻¹) wordt gerelateerd aan de drainagebasis (z_d) volgens:

$$C = -Ae^{(B|z_d|)} \quad \text{Vergelijking 6.2}$$

De drainagebasis wordt gevarieerd van 25 tot 250 cm beneden maaiveld. Volgens Oostindie & Hendriks (2005) kan met deze gekozen parameterisatie (in ieder geval voor zandgronden) het bereik aan Gt's (grondwatertrappen) worden ondervangen. Het betekent echter niet dat alle mogelijke combinaties van GLG en GHG voorkomen in het domein GLG-GHG. Voor die situaties zal het uiteindelijk toe te passen meta-model dus extrapolaties uitvoeren.

In totaal worden 100 willekeurige parametercombinaties (A, B en C) getrokken. Om te bewerkstelligen dat op efficiënte wijze uit de parameterruimte wordt getrokken wordt gebruik gemaakt van Latin Hypercube Sampling (McKay et al., 1979; Walvoort, 2006).

6.1.4 IRRIGATIE EN ZOUT

In Waterwijzer Landbouw gaan we ervan uit dat zout alleen via irrigatiewater wordt toegevoegd aan de bodem. Zoute kwel of zoute infiltratie vanuit drainagemiddelen is vooralsnog niet meegenomen.

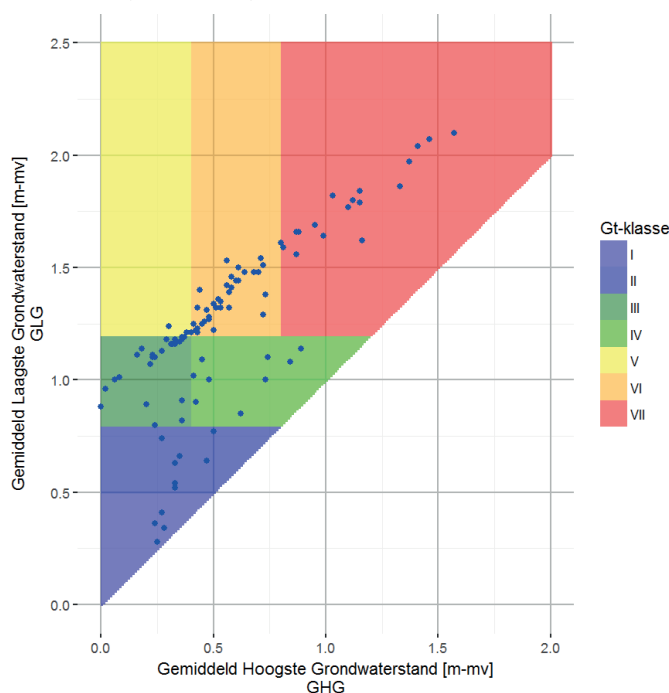
In Waterwijzer Landbouw is gekozen om beregening automatisch te laten plaatsvinden op het moment dat de grond (halverwege de wortelzone) een bepaalde drukhoogte onderschrijft. Per keer wordt een vaste hoeveelheid beregening toegepast met een vaste zoutconcentratie. Hierbij wordt geen rekening gehouden met waterbeschikbaarheid ten behoeve van beregening, eventueel gewenste overberegening of variatie in de zoutconcentratie van het beregeningswater. In Bijlage D is nader toegelicht hoe beregening met zout water is gemodelleerd.

6.2 ANALYSE VAN SYSTEEMGEDRAG

Per combinatie van gewas, bodem en meteo zijn telkens 100 simulaties uitgevoerd voor situaties zonder beregening en 700 simulaties uitgevoerd voor situaties met beregening. In totaal zijn er per klimaatscenario meer dan 2 miljoen berekeningen uitgevoerd van telkens 30 weerjaren. Voordat metarelaties van de modelresultaten worden afgeleid voeren we een analyse uit van het systeemgedrag van het Waterwijzer Landbouw modelinstrumentarium. Hiervoor maken we selecties van de modelresultaten. Onderstaand voorbeeld is uitgewerkt voor het gewas zetmeel- of consumptieaardappel voor zwak lemige zandgronden (BOFEK 304) voor het huidige klimaat met meteogegevens afkomstig van meteostation De Kooy.

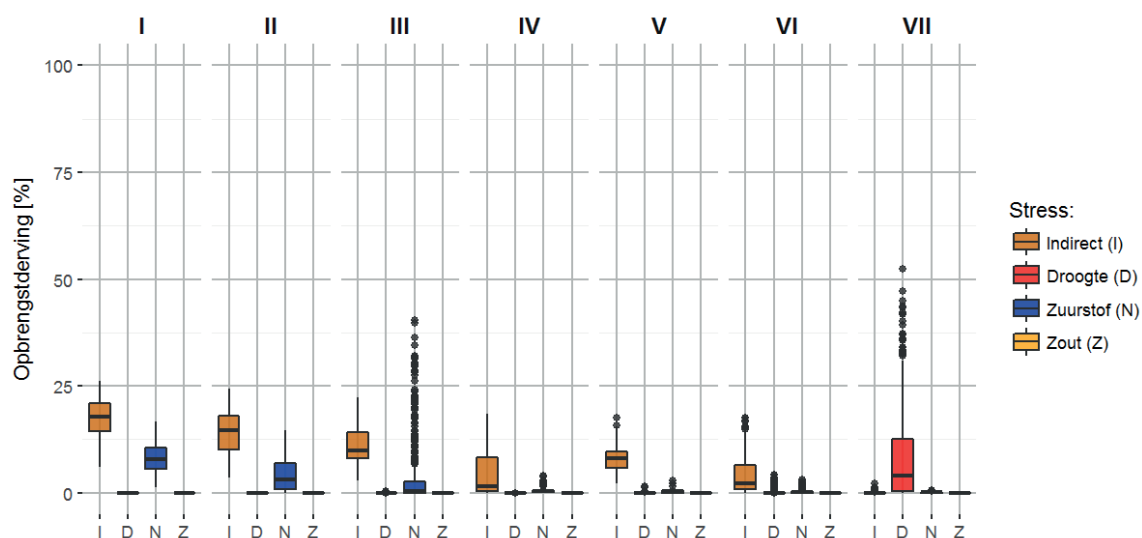
Voor het afleiden van metarelaties is een goede spreiding van de grondwaterstandskarakteristieken van belang om extrapolatie van de modelresultaten verantwoord mogelijk te maken (Figuur 6.2).

FIGUUR 6.2 100 REALISATIES (BLAUWE STIPPEN) VAN GHG EN GLG BEREKEND MET SWAP-WOFOST VOOR HET GEWAS ZETMEEL- EN CONSUMPTIEAARDAPPEL



Indien de gesimuleerde opbrengstderivingen worden uitgesplitst naar bijvoorbeeld Gt-klassen (Figuur 6.3) is een bepaald systeemgedrag te onderscheiden. In dit geval zien we bij relatief natte situaties (Grondwatertrappen I, II en III) veel indirecte effecten en schade als gevolg van zuurstofstress. Naarmate de hydrologische condities droger worden zien we de stress als gevolg van te natte omstandigheden reduceren en als gevolg van te droge omstandigheden ontstaan.

FIGUUR 6.3 SPECIFICATIE VAN OPBRENGSTDERIVING IN AANDEEL INDIRECTE EFFECTEN (I) EN DIRECTE EFFECTEN (MET DROOGTE- (D), ZUURSTOF- (N) EN ZOUTSTRESS (Z)) WEERGEGEVEN MET BOXPLOTS PER GRONDWATERTRAP VOOR HET GEWAS ZETMEEL- EN CONSUMPTIEAARDAPPEL VOOR ALLE WEERJAREN IN DE PERIODE 1981 - 2010



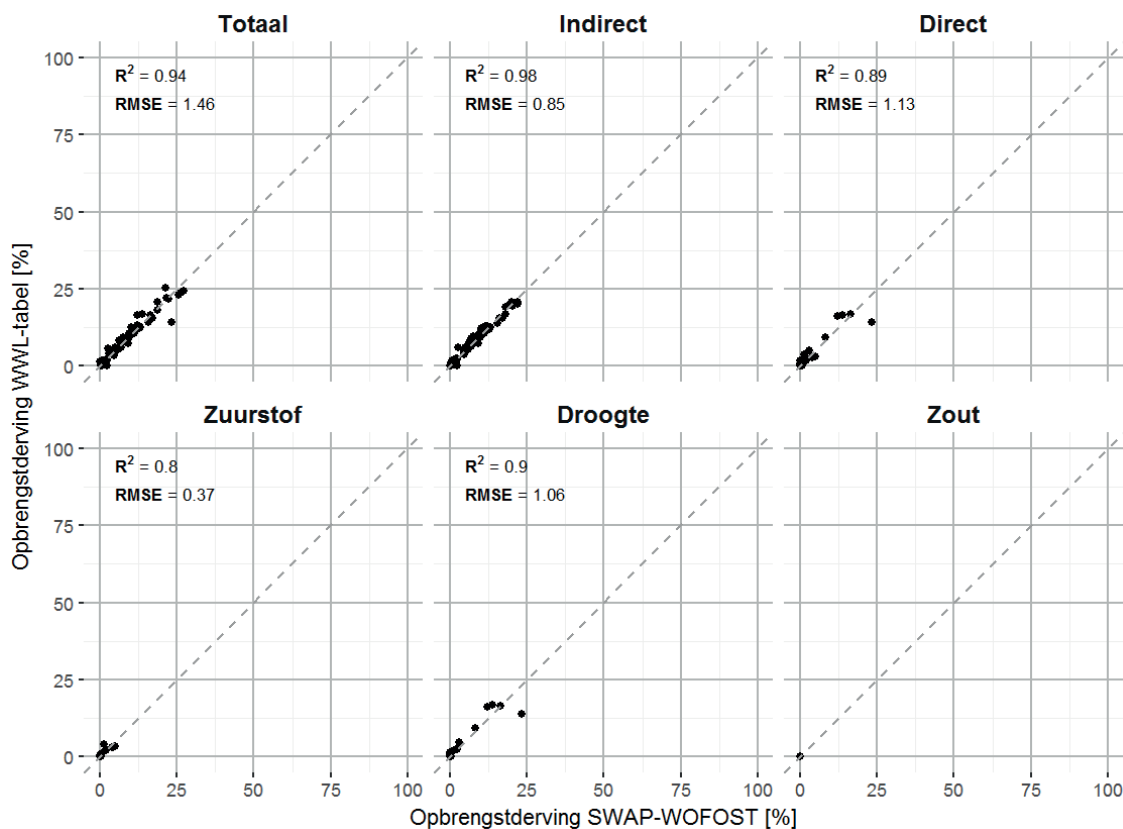
6.3 AFLEIDEN VAN METARELATIES TEN BEHOEVE VAN DE WWL-TABEL

Metarelaties zijn afgeleid door de opbrengstderving zoals berekend met SWAP-WOFOST te relateren aan het bodemtype, de gewasoort, het meteostation, het klimaatscenario, al dan niet irrigatie met een bepaalde zoutconcentratie in irrigatiewater en als grondwaterstandsstatistieken de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) en de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG).

Het metamodel dat is gebruikt is een 'random forest'-model (Breiman, 2001). Bij dit meta-model wordt als het ware een heel 'bos' (forest) aan beslisbomen (regression trees) afgeleid die samen de opbrengstderving voorspellen ('ensemble modelling'). Dit type model staat bekend om de goede voorspelkracht. Met random forest kunnen metarelaties worden afgeleid op basis van één of meerdere grondwaterstandskarakteristieken.

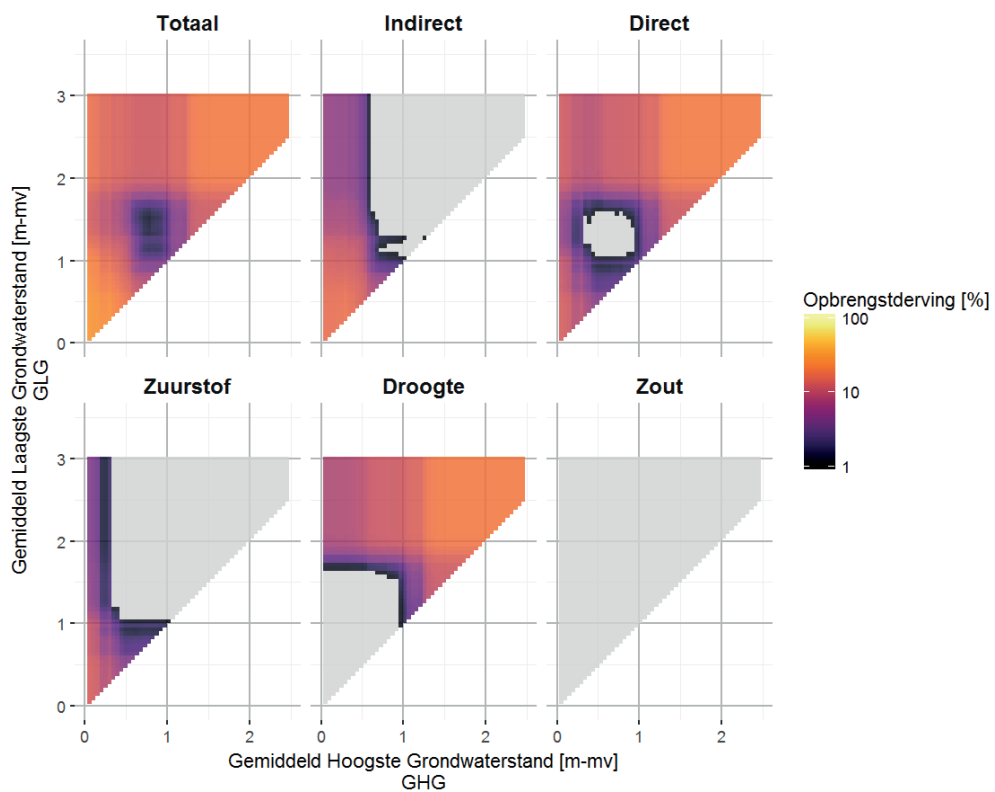
In eerste instantie worden alleen metarelaties opgeleverd voor de grondwaterkarakteristieken GHG en GLG, maar andere karakteristieken kunnen eenvoudig worden toegevoegd. Er zijn aparte modellen afgeleid voor de totale opbrengstderving, indirecte en directe effecten en modellen voor droogte-, zuurstof- en zoutstress, zie Figuur 65. In Figuur 6.4 is aangegeven dat de metarelaties goed de SWAP-WOFOST uitkomsten (totale opbrengstderving en diens componenten) reproduceren; het betreft een voorbeeld voor aardappelen op BOFEK-eenheid 304. De WWL-tabel kan nu toegepast worden voor elke willekeurige combinatie van GLG en GHG gegeven het gewastype, bodemeenheid en meteostation en klimaatscenario (Figuur 6.5).

FIGUUR 6.4 VERGELIJKING VAN OPBRENGSTDerving BEREKEND MET SWAP-WOFOST (HORIZONTALE AS) VERSUS DE WWL-TABEL (VERTICALE AS), VOOR HET GEWAS ZETMEEL- EN CONSUMPTIEAARDAPPEL, BOFEK 304, METEOGEGEVENS VAN DE KOOP VOOR HET JAAR 1981. DE STIPPELIJN IS DE 1:1 LIJN. HOE DICHTER DE PUNTEN BIJ DEZE LIJN LIGGEN, DES TE BETER KOMEN DE BEREKENINGEN MET SWAP-WOFOST EN DE METARELATIES OVEREEN



FIGUUR 6.5

WEERGAVE VAN 30-JAAR GEMIDDELDE OPBRENGSTDERIVING ALS FUNCTIE VAN DE GHG (HORIZONTALE AS) EN GLG (VERTICALE AS) VOOR HET GEWAS ZETMEEL- EN CONSUMPTIEAARDAPPEL, VOOR BOFEK 304, METEOGEGEVENS VAN DE DE KOOP ONDER HUIDIGE KLIMATOLOGISCHE OMSTANDIGHEDEN BEREKEND MET DE WWL-TABEL



7

WATERWIJZER LANDBOUW TOEGEPAST

7.1 TOEPASSEN VAN DE OPERATIONELE MODELLEN: MAATWERK

7.1.1 TOETSEN AAN WAARNEMINGEN

Met SWAP-WOFOST kunnen gedetailleerde simulaties van gewasopbrengsten worden uitgevoerd en daarmee kan worden gekeken naar effecten binnen een jaar en verschillen tussen jaren. In deze sectie geven we voorbeelden van dit soort simulaties. Hierbij maken we gebruik van eerdere resultaten, zoals onder meer toetsingsresultaten die al zijn gerapporteerd gedurende de ontwikkeling van Waterwijzer Landbouw. Hierbij is steeds gecontroleerd of de modelresultaten plausibel zijn ('plausibiliteitstoets'). Zo laten de figuren Figuur 7.1, Figuur 7.2 en Figuur 7.3 (overgenomen uit Kroes et al., 2015) voor respectievelijk gras, snijmaïs en aardappel resultaten van metingen op proefbedrijven en SWAP-WOFOST simulaties zien. In deze figuren is de groene lijn steeds de gesimuleerde potentiële opbrengst (simulated_pot in kg droge stof ha⁻¹), de zwarte lijn is de gesimuleerde actuele opbrengst (simulated_act) en de rode punten zijn de waarnemingen (observed).

Deze toetsingsresultaten zijn uitgebreid geanalyseerd in Kroes et al. (2015). We doen dat hier niet over, maar beperken ons tot de volgende inzichten:

Voor grasland (Figuur 7.1) blijkt het niet altijd mogelijk de variatie in veldomstandigheden exact met de modellen te simuleren. Met name het effect van koude/vorstperioden is lastig (jaar 1982 in Ruurlo). De effecten van nat- en droogschade zijn in de rekenresultaten zichtbaar en worden zowel over- als onderschat. Het aantal beschikbare meetgegevens en uitgevoerde modelberekeningen is beperkt.

Voor snijmaïs wordt de opbrengst in het extreem droge jaar 1976 adequaat gesimuleerd (Figuur 7.2). De gesimuleerde opbrengsten voor de jaren 1976, 1979 en 1982 komen redelijk overeen met de metingen. Vooral de kleine actuele opbrengst in 1976 is relevant omdat in dit extreem droge jaar veel droogtestress is opgetreden. Dat SWAP-WOFOST dit benadert geeft vertrouwen dat dit modelinstrumentarium in staat is reducties voor extreme situaties te simuleren.

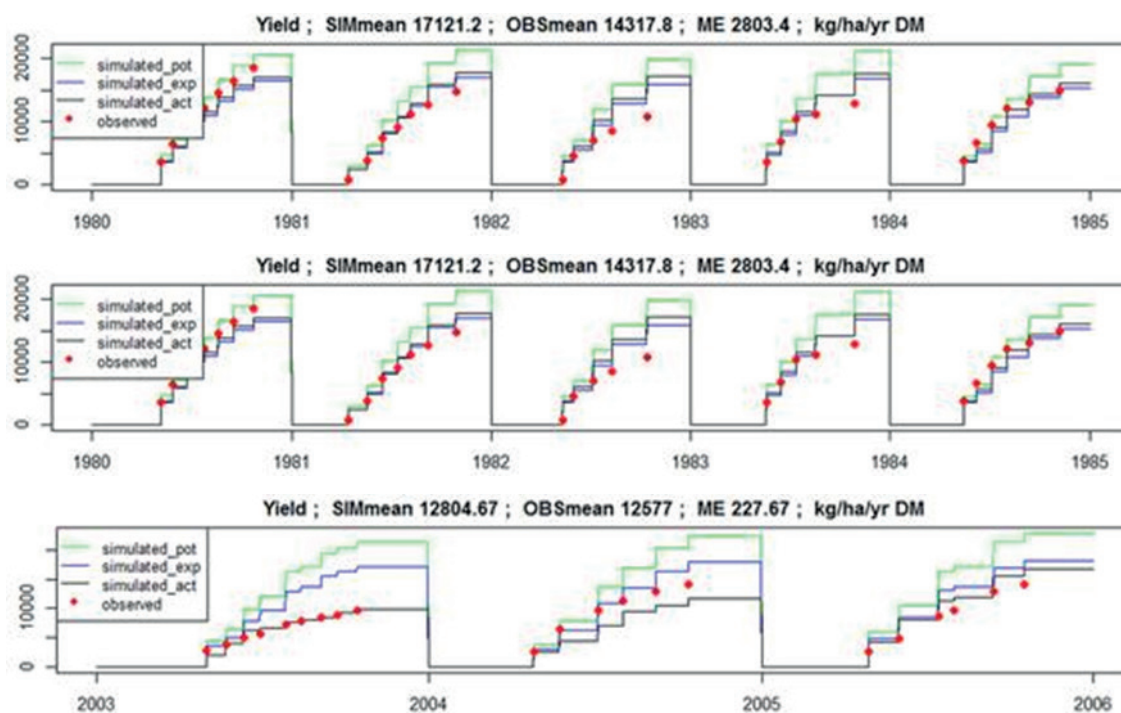
Voor aardappel is een vergelijking gemaakt tussen de gemeten en gesimuleerde totale jaarlijkse hoeveelheid aardappelknollen, uitgedrukt in kg droge stof (Figuur 7.3). Voor de cases Rusthoeve en Vredepeel is één waarneming beschikbaar, voor de beide cases Borgerswold werden alleen in 1992 en 1994 aardappelen geteeld (in 1993 suikerbiet). Een visuele beoordeling van de opbrengsten laat voor de aardappel-cases zien dat de gesimuleerde opbrengsten voor aardappel goed overeen komen met de waarnemingen.

Geconcludeerd wordt dat het, gegeven de waargenomen variaties, niet eenvoudig is de waargenomen gewasopbrengsten met simulatiemodellen te reproduceren. Wel laat het modelin-

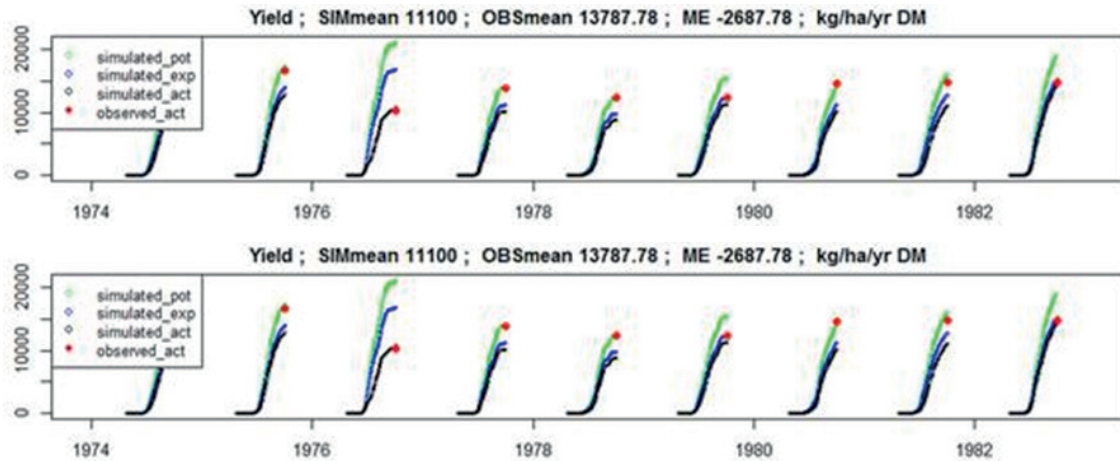
strumentarium het juiste systeemgedrag zien, zowel voor de hydrologie als gewasproductie. Dat betekent dat reducties van gewasopbrengsten met SWAP-WOFOST systematisch kunnen worden verkend.

De toetsing en de afwijkingen die worden waargenomen tussen de metingen en de simulaties, leren ons dat het van groot belang is om alle randvoorwaarden en invoerparameters voor het model goed te kennen. Daarnaast moet het beheer van de percelen bekend zijn, omdat ook deze van invloed kunnen zijn op de waargenomen gewasopbrengsten. Waterwijzer Landbouw berekent immers alleen hydrologische effecten en gaat er daarbij van uit dat alle andere omstandigheden zoals nutriëntenvoorziening en beheersing van ziekten en plagen op orde zijn. Uit de plausibiliteitstoetsen is gebleken dat een volledig overzicht van de randvoorwaarden en beheer vaak ontbreekt, hetgeen de interpretatie bemoeilijkt. Om de nauwkeurigheid van de berekende reducties te kunnen kwantificeren zijn aanvullende datasets nodig, welke zorgvuldig ontworpen moeten worden én moeten zowel de waterhuishouding als de gewasgesteld regelmatig gedurende een langere periode monitoren.

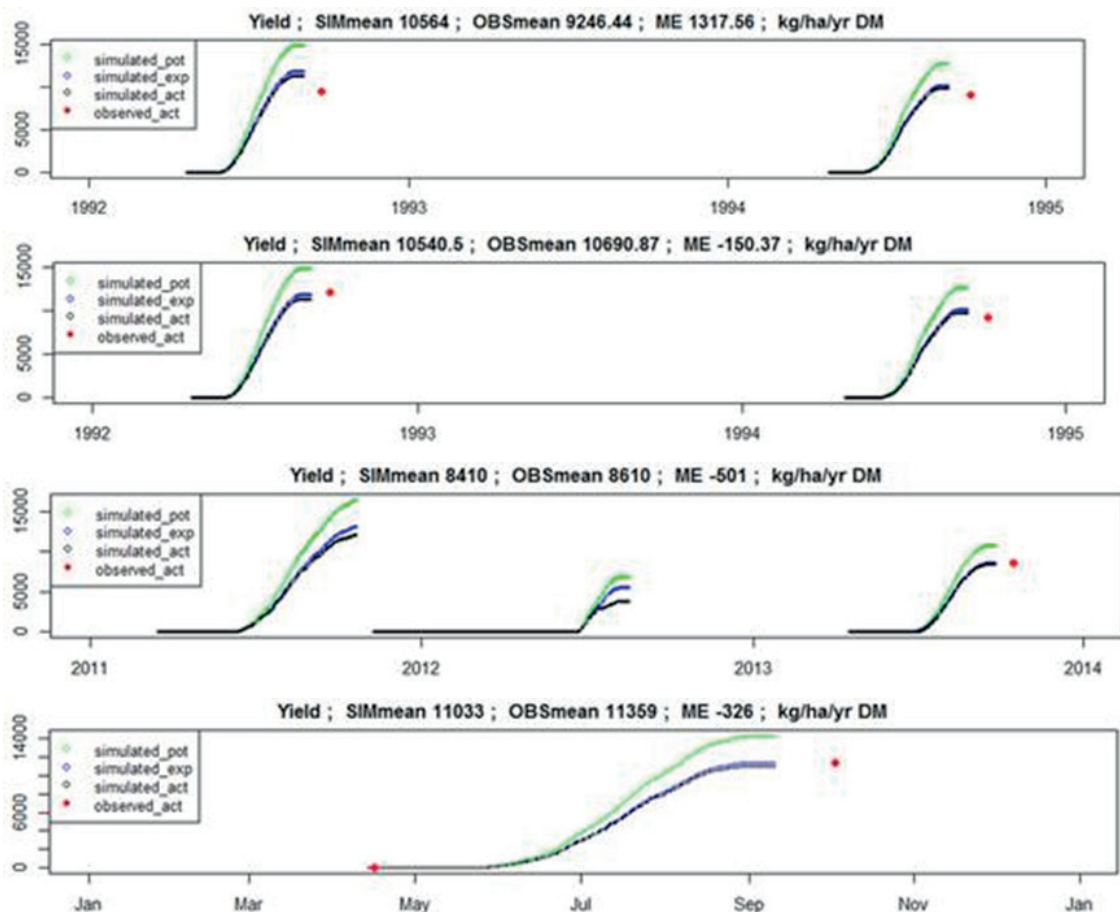
FIGUUR 7.1 MODELRESULTATEN EN METINGEN VAN GEWASOPBRENGSTEN VOOR GRASLAND: BOVEN RUURL016 (A), MIDDEN RUURL048 (B), EN ONDER ZEGVELD03 (C). GROEN: BEREKENDE POTENTIËLE OPBRENGST, BLAUW: DE BEREKENDE EXPLOITEERBARE OPBRENGST, ZWART: DE BEREKENDE ACTUELE OPBRENGST, ROOD: DE GEMETEN OPBRENGST



FIGUUR 7.2 MODELRESULTATEN EN METINGEN VAN GEWASOPBRENGSTEN VOOR SNIJMAÏS VOOR DE CASE CRANENDONCK 16 (BOVEN) EN DIJKGRAAF (ONDER). GROEN: BEREKENDE POTENTIËLE OPBRENGST, BLAUW: DE BEREKENDE EXPLOITEERBARE OPBRENGST, ZWART: DE BEREKENDE ACTUELE OPBRENGST, ROOD: DE GEMETEN OPBRENGST



FIGUUR 7.3 MODELRESULTATEN EN METINGEN VAN GEWASOPBRENGSTEN VOOR AARDAPPEL, VAN BOVEN NAAR BENEDEN: G) BORGERSWOLD3, H) BORGERSWOLD13, I) RUSTHÖVEB7, J) VREDEPEEL26. GROEN: BEREKENDE POTENTIËLE OPBRENGST, BLAUW: DE BEREKENDE EXPLOITEERBARE OPBRENGST, ZWART: DE BEREKENDE ACTUELE OPBRENGST, ROOD: DE GEMETEN OPBRENGST



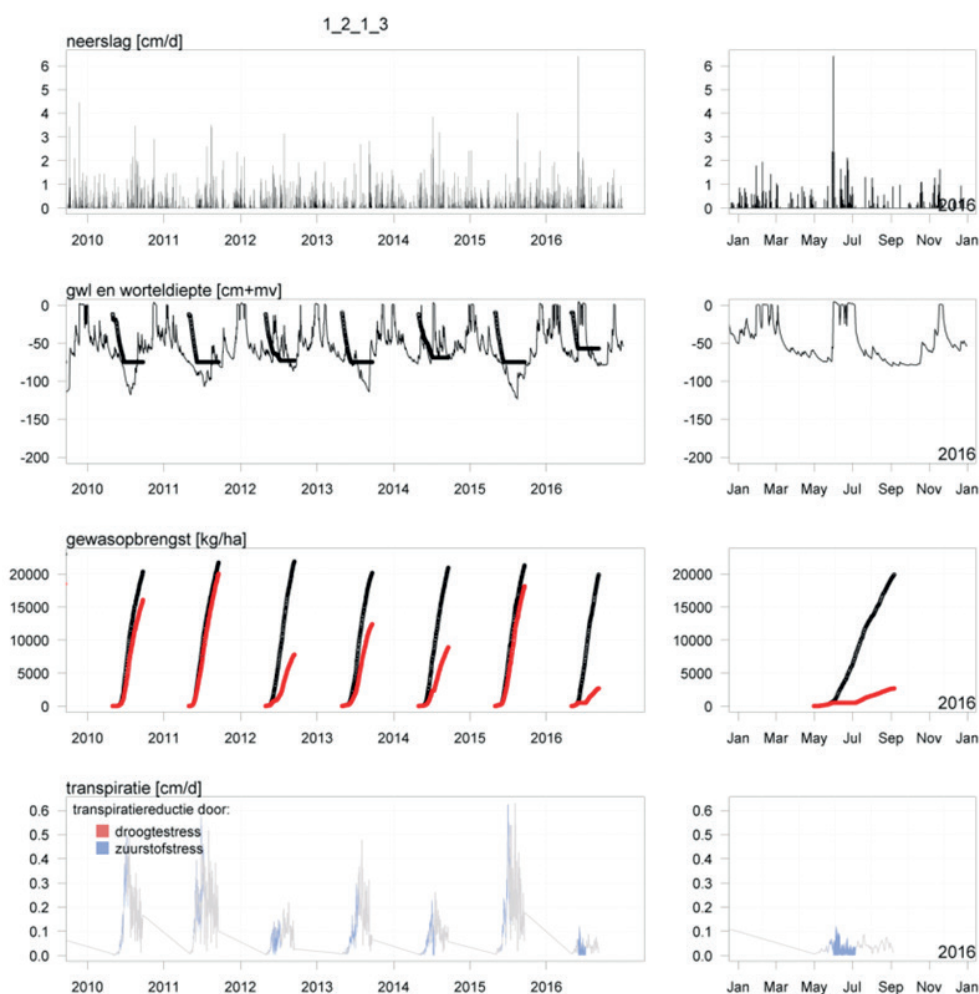
7.1.2 ONDERZOEKEN VAN EFFECT VAN EXTREME NEERSLAG

Een heel ander voorbeeld van een maatwerktoeepassing betreft een studie binnen het kennisprogramma Lumbricus uitgevoerd voor het waterschap Aa en Maas (Heinen et al., 2017) waarbij specifiek is gekeken naar de mogelijkheid van SWAP-WOFOST om het effect van de

extreme neerslag in juni 2016 te kunnen kwantificeren. Daartoe is voor een aantal jaren voor een veel voorkomend bodemtype met gemaaid grasland en een relatief ondiep grondwaterstandsregime (Grondwatertrap III) met het modelinstrumentarium de hydrologie en gewasgroei uitgerekend. Het is duidelijk te zien in Figuur 7.4 dat snijmaïs bij relatief natte omstandigheden wel vaker te maken heeft met verminderde opbrengst, maar dat we voor 2016 wel een heel extreem slechte oogst voorspellen. Een dergelijke maatwerkstudie kan dus inzicht geven in verschillen tussen jaren en van een korte periode met extreme neerslag.

FIGUUR 7.4

OVERZICHT RESULTATEN MAATWERKBEREKENINGEN VOOR PILOTGEBIED DE RAAM VOOR PERIODE 2010-2016: SNIJMAÏS, BOFEK2012 EENHEID 304, DIEP GRONDWATER. DE VIER RIJEN GRAFIEKEN TONEN RESPECTIEVELIJK NEERSLAG, GRONDWATERSTAND (DUNNE LIJN) + BEWORTELINGSDIEPTE (DIKKE LIJN), GEWASOPBRENGST (ZWART: POTENTIEEL; ROOD: ACTUEEL), EN GEWASTRANSPIRATIE (DROOGTESTRESS IN ROOD, ZUURSTOFSTRESS IN BLAUW). DE RECHTERKOLOM TOONT DE RESULTATEN VOOR 2016



7.1.3 MELKVEEHOUDERIJ EN BEDRIJFSECONOMISCH RESULTAAT

In de rapportage over fase 3 van Waterwijzer Landbouw (Knotters et al., 2017) is een voorbeeld uitgewerkt voor een maatwerktoeepassing van SWAP-WOFOST-BBPR. Voor een fictief melkveebedrijf op kleigrond is een berekening uitgevoerd als voorbeeld hoe de indirecte effecten zich kan verhouden tot de directe effecten. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen maaien en weiden. Bij maaien wordt het geoogste gras ingekuuld en op stal gevoerd en bij weiden nemen de melkkoeien in het zomerhalfjaar een substantieel deel van het rantsoen op door te grazen. Gras dat over is wordt gemaaid en ingekuuld en gebruikt als wintervoorraad. Om de directe en indirecte effecten vast te kunnen stellen is een bedrijfssituatie op basis van de potentiële productie, de actuele productie met alleen directe effecten en de actuele productie met zowel

directe als indirecte effecten berekend. Verschillen in grasproductie zorgen voor een verandering van kosten voor onder andere krachtvoer, ruwvoer, loonwerk, bemesting en brandstof. Uit de verschillen in productie worden schadepercentages berekend en uit de verschillen in kosten kan de economische schade worden bepaald.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor de weerjaren 2001-2010. In Figuur 7.5 en Figuur 7.6 staan respectievelijk de berekende opbrengsten voor maaien en weiden.

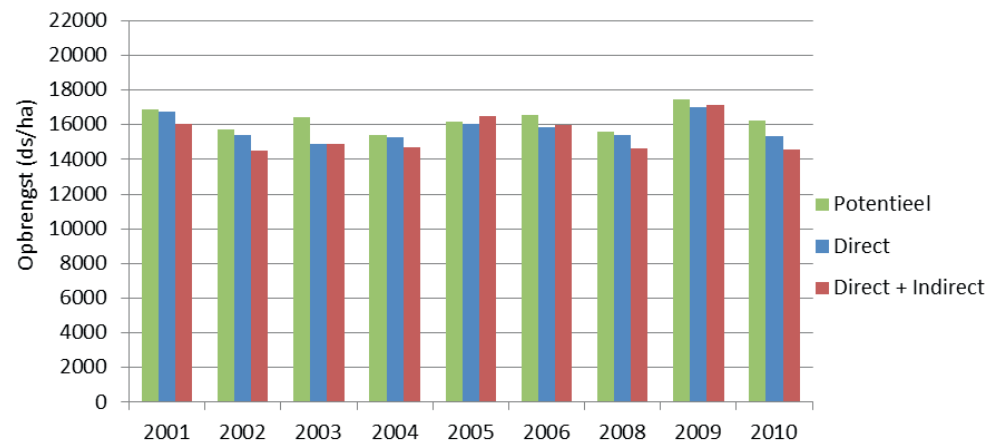
FIGUUR 7.5

VOORBEELDBEREKENING MELKVEEBEDRIJF OP KLEIGROND DAT VOOR DE VOEDERVOORZIENING UITSLUITEND MAAIT OP BASIS VAN DE POTENTIËLE GRASOPBRENGST (POTENTIEEL), DE ACTUELE OPBRENGST MET DIRECTE EFFECTEN (DIRECT) EN DE ACTUELE OPBRENGST MET DIRECTE EN INDIRECTE EFFECTEN (DIRECT + INDIRECT)



FIGUUR 7.6

VOORBEELDBEREKENING MELKVEEBEDRIJF OP KLEIGROND WAARBIJ DE MELKKOEIEN GEWEID WORDEN OP BASIS VAN DE POTENTIËLE GRASOPBRENGST (POTENTIEEL), DE ACTUELE OPBRENGST MET DIRECTE EFFECTEN (DIRECT) EN DE ACTUELE OPBRENGST MET DIRECTE EN INDIRECTE EFFECTEN (DIRECT + INDIRECT)



De resultaten laten zien dat de opbrengsten bij weiden beperkt lager zijn dan bij maaien. In de praktijk is dit ook het geval, maar zijn de verschillen groter doordat BBPR het graslandgebruik optimaler kan plannen dan dat een melkveehouder dat kan. Het jaar 2003 was relatief droog, wat in de berekeningen tot uiting komt in een relatief groot verschil tussen de potentiële opbrengst en de actuele opbrengst, vooral bij maaien. In 2005, 2006 en 2009 waren de actuele opbrengsten met zowel directe als indirecte effecten hoger dan die van de actuele opbrengsten met alleen directe effecten. Bij weiden was in 2005 de actuele opbrengst met zowel directe als indirecte effecten zelfs hoger dan de potentiële opbrengst. Dit wordt verklaard doordat bij uitstel van maaien door natte omstandigheden het gras doorgroeit en uiteindelijk een relatief hoge snedeopbrengst behaalt. De jaaropbrengst wordt hierdoor ook hoger. Uitstel van maaien ten opzichte van een gewenst maaieregime leidt weliswaar tot rela-

tief hoge opbrengsten maar dit gaat ten koste van de voederwaarde van gras waardoor de netto voederwaardeopbrengst lager is. Om een zelfde melkproductieniveau te kunnen halen moet dit verlies gecompenseerd worden door aankoop van krachtvoer en bijproducten. Dit heeft negatieve gevolgen voor het economisch bedrijfsresultaat.

Indirecte effecten wordt voor het voorbeeldbedrijf op kleigrond alleen veroorzaakt door te natte omstandigheden. De berekening van het bedrijfseconomisch resultaat laten zien dat vooral de kosten voor loonwerk voor voederwinning van grasland dalen bij minder snedes, maar dat de kosten voor mest uitrijden stijgen door een lager aantal weide-uren en meer opvang van mest in de stal. De kosten voor mestafvoer dalen door extra bijvoeding in de vorm van maïs als compensatie voor de lagere grasopbrengst. Meer maïs in het rantsoen verlaagt het eiwitgehalte in het rantsoen en laat het ureumgehalte in de melk dalen. Hierdoor hoeft volgens de mestwetgeving een bedrijf minder mest af te zetten. De brandstofkosten dalen doordat het maaipercantage stijgt en minder vaak grasresten na weiden weggemaaid hoeven te worden. Per saldo zijn dan de verschillen in kosten voor de betreffende voorbeeldberekening marginaal. Lagere grasopbrengsten door directe en indirecte effecten kunnen dus tot een beter economisch bedrijfsresultaat leiden. Let wel, de economische schade is sterk afhankelijk van de prijspeilen en de tarieven die gehanteerd worden.

7.1.4 VOORBEELD ECONOMISCHE KOSTEN MAATWERKTOEPASSING AKKERBOUW

Voor het vertalen van gewasopbrengsten naar € maken we voor de open teelten gebruik van de informatie uit de KWIN-database (KWIN Akkerbouw en Vollegrondsgroenten, 2015) Daarin is voor alle gewassen te vinden wat de gangbare opbrengst in kg en prijs in € is en voor de WWL-tabel maken we gebruik van alleen die prijzen voor het berekenen van het financieel effect van gewasopbrengst-verandering (zie Sectie 5.3).

Het is ook mogelijk een meer gedetailleerd inzicht in de kostenopbouw te krijgen. Per gewas is namelijk ook bekend wat de kosten zijn voor een teelt. Als voorbeeld noemen we hier snijmaïs en zetmeelaardappel.

Voor snijmaïs wordt rekening gehouden met kosten voor:

- Uitgangsmateriaal: normaal zaad + fungicide
- Bemesting: kalkammonsalpeter, tripelsuperfosfaat, kali 60 (chloorhoudend)
- Gewasbescherming: terbutylazin (330), mesotrione (70), nicosulfuron (40), fluroxypyr-meptyl (144), florasulam (1), S-metolachloor (960)
- Energie: diesel
- Loonwerk: maiszaaimachine incl. rijenbemesting en oogsten - hakselen maïs

Voor zetmeelaardappel is helemaal geen sprake van loonwerk, maar zijn veel meer gewasbeschermingsmiddelen nodig. Het overzicht ziet er zo uit:

- Uitgangsmateriaal: aankoop pootgoed
- Bemesting: kalkammonsalpeter, tripelsuperfosfaat, kali 60 (chloorhoudend)
- Gewasbescherming: metribuzin (70%), glufosinaat-ammonium (150), rimsulfuron (25%), oxamyl (10%), 2x mandipropamid (250), 5x mancozeb (70%) + benthiavalicarb-isopryl (1,75%), lambda-cyhalothrin (100), mancozeb (70%), benthiavalicarb-isopryl (1,75%), lambda-cyhalothrin (100), 2x mancozeb (70%) + benthiavalicarb-isopryl (1,75%), thioclopyrd (480), 6x cyazofamid (160), diquat dibromide (200)
- Energie: stroomverbruik bewaring, diesel

In beide gevallen zijn sommige kosten mede afhankelijk van hydrologische omstandigheden. Zo is bekend dat een slechte draagkracht bij natte omstandigheden zal leiden tot een hoger diesilverbruik. Onder natte omstandigheden zal bij aardappel vaker dan gemiddeld moeten worden gespoten tegen phytophthora. Dergelijke aspecten kunnen in Waterwijzer Landbouw alleen worden meegenomen in een maatwerktocpassing.

7.2 TOEPASSEN VAN DE WWL-TABEL

In het kader van het kennisprogramma Lumbricus is een eerste prototype van de WWL-tabel toegepast voor twee gebieden, namelijk De Vecht (Overijssel) en De Raam (Noord-Brabant). Hierover is gerapporteerd door Heinen et al. (2017). In Figuur 7.7 is de ligging van beide gebieden in Nederland gegeven. In de rapportage over de pilotstudies zijn de gebruikt gegevens van beide gebieden uitgebreid beschreven. Hier noemen we alleen de resultaten als voorbeeldtoepassing van de WWL-tabel.

FIGUUR 7.7 SITUERING VAN PILOTGEBIEDEN DE RAAM (GROEN) EN DE VECHT (PAARS) IN NEDERLAND

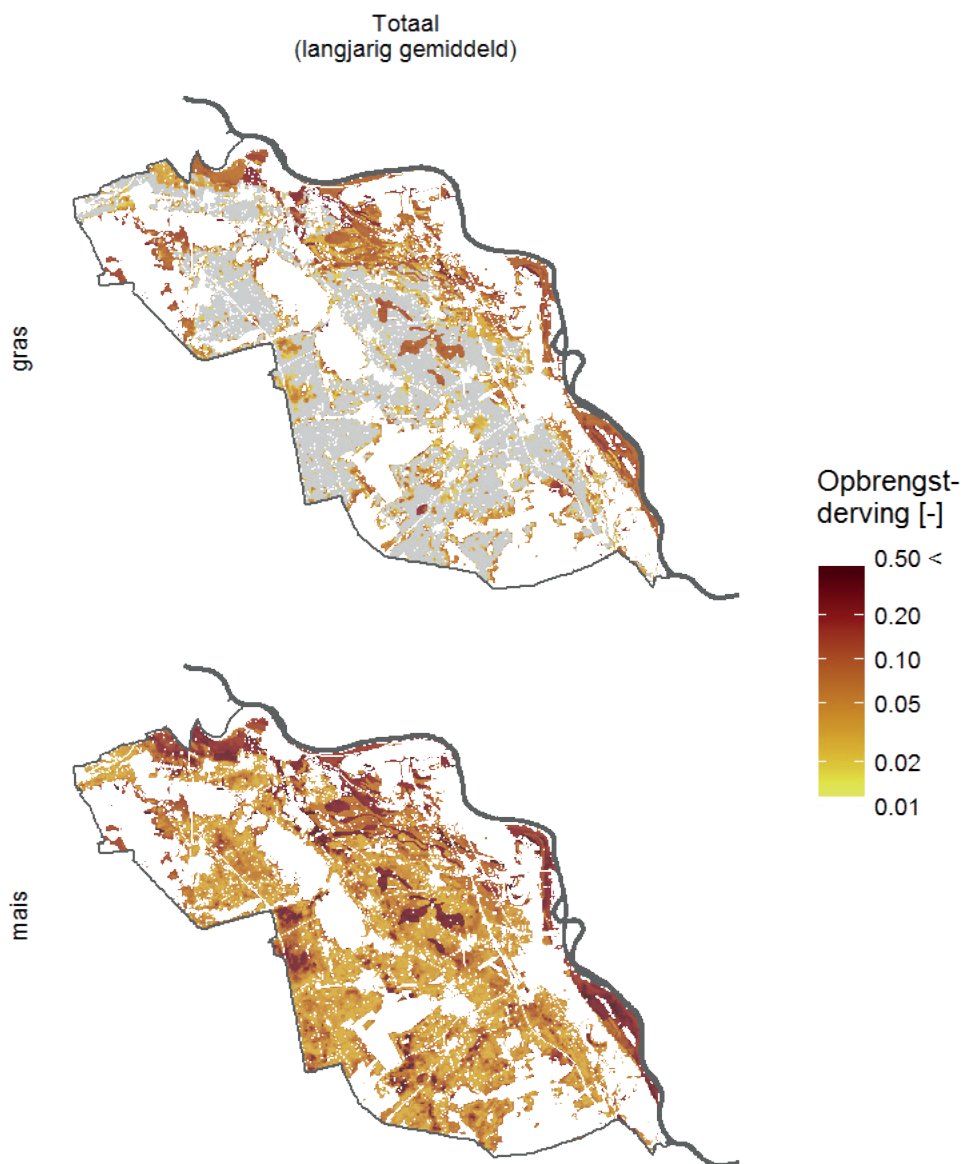


7.2.1 VOORBEELD DE RAAM: ONDSCHIED IN DROOGTE- EN ZUURSTOFSTRESS EN VERSCHILLEN TUSSEN JAREN

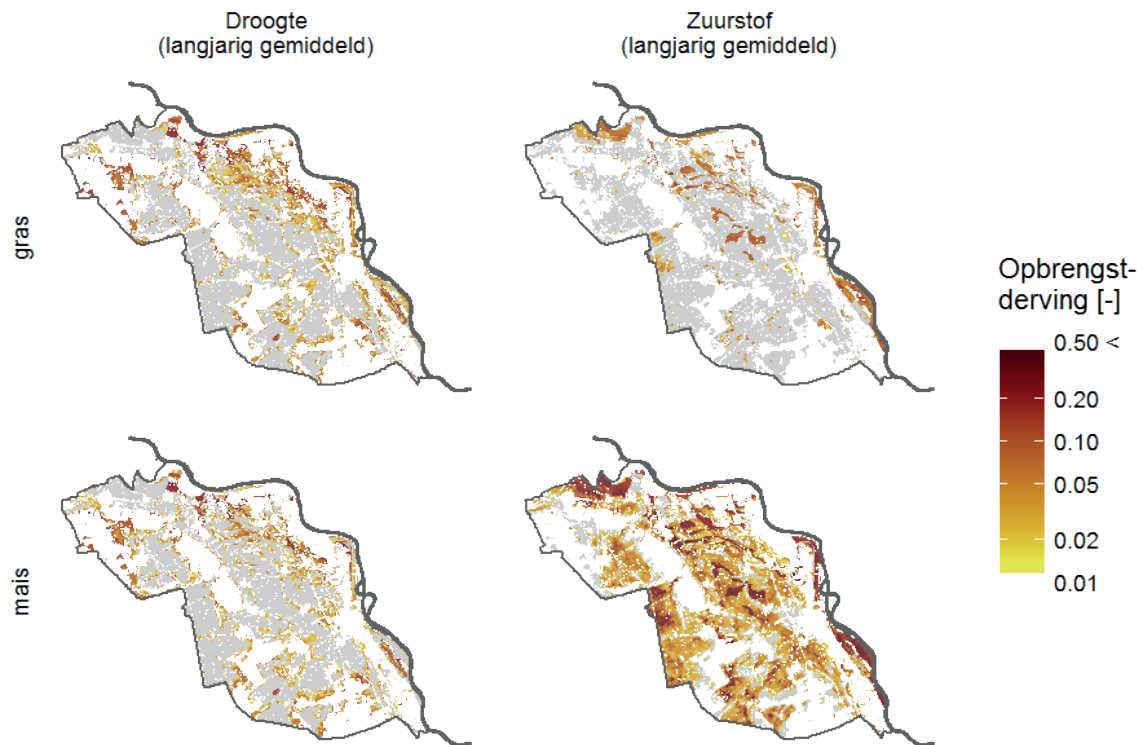
De 30-jarig gemiddelde directe effecten zoals berekend met dat prototype van de WWL-tabel voor gras en voor snijmais is gegeven in Figuur 7.8. Duidelijk is te zien dat voor maïs meer opbrengstderving wordt berekend dan voor gras. Uitsplitsing over droogte- en zuurstofstress (Figuur 7.9) laat duidelijk zien dat het prototype voor snijmais de totale opbrengstderving vooral door zuurstofstress wordt bepaald. De opbrengstderving van gras die werd voorspeld was daarentegen voor een groot deel te wijten aan droogtestress. Dit voorbeeld laat zien dat de WWL-tabel verschillende effecten apart kan onderscheiden, zoals in dit geval droogte- en zuurstofstress.

FIGUUR 7.8

LANGJARIG GEMIDDELTE OPBRENGSTDERVING VOOR GRAS (BOVEN) EN SNIJMAIS (ONDER) VOOR PILOTGEBIED DE RAAM ZOALS BEREKEND MET HET PROTOTYPE VAN DE WWL-TABEL. DE OPBRENGSTDERVING (ZIE LEGENDA; GRIJS BETEKENT GEEN OPBRENGSTDERVING) IS GEGEVEN ALS FRACTIE (LET OP: LOGARITMISCHE SCHAAL)

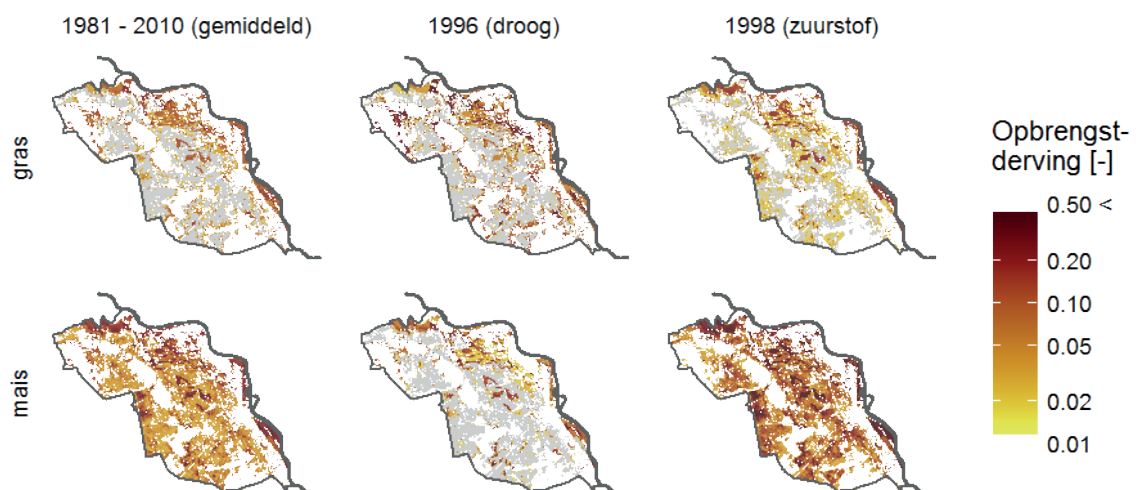


FIGUUR 7.9 LANGJARIG GEMIDDELDE OPBRENGSTDERIVING VOOR GRAS (BOVEN) EN SNIJMAÏS (ONDER) VOOR PILOTGEBIED DE RAAM ZOALS BEREKEND MET EEN PROTOTYPE VAN DE WWL-TABEL UITGESPLITST OVER DROOGTE- (LINKS) EN ZUURSTOFSTRESS (RECHTS) (LET OP: LOGARITMISCHE SCHAAL)



Naast de langjarig gemiddelde opbrengstderivingen gebaseerd op de berekeningen voor 30 jaren kan ook de opbrengstderiving voor specifieke jaren opgevraagd worden. Zo kan men bijvoorbeeld kijken wat de opbrengstderiving is voor een bekend nat of een bekend droog jaar. In Figuur 7.10 is ter illustratie de opbrengstderiving gegeven voor 1996 en 1998, respectievelijk het droogste en het natste kalenderjaar in genoemde periode 1981-2010.

FIGUUR 7.10 LANGJARIG GEMIDDELDE OPBRENGSTDERIVING (LINKER KOLOM), OPBRENGSTDERIVING IN 1996 (DROOG JAAR; MIDDELSTE KOLOM), EN OPBRENGSTDERIVING IN 1998 (NAT JAAR; RECHTER KOLOM) VOOR GRAS (BOVEN) EN SNIJMAÏS (ONDER) VOOR PILOTGEBIED DE RAAM ZOALS BEREKEND MET DE WWL-TABEL (LET OP: LOGARITMISCHE SCHAAL)

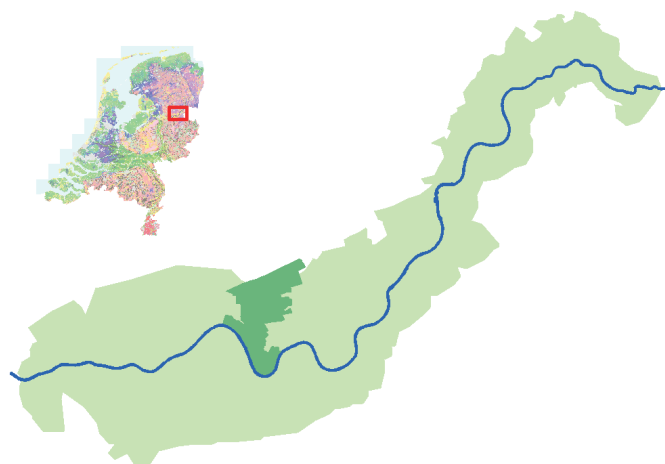


7.2.2 VOORBEELD DE VECHT: EFFECT VAN HYDROLOGISCHE MAATREGELEN EN VAN KLIMAAT

Waterschap Vechtstromen heeft met een grondwatermodel een inrichtingsmaatregel (inclusief peilaanpassing) doorgerekend. Dit heeft geleid tot een aanpassing in de GxG en deze

kan als invoer worden gebruikt voor de WWL-tabel om het effect van deze verandering te voorspellen. In Figuur 7.11 is het interessegebied voor de pilotstudie gegeven: gebied Stegeren.

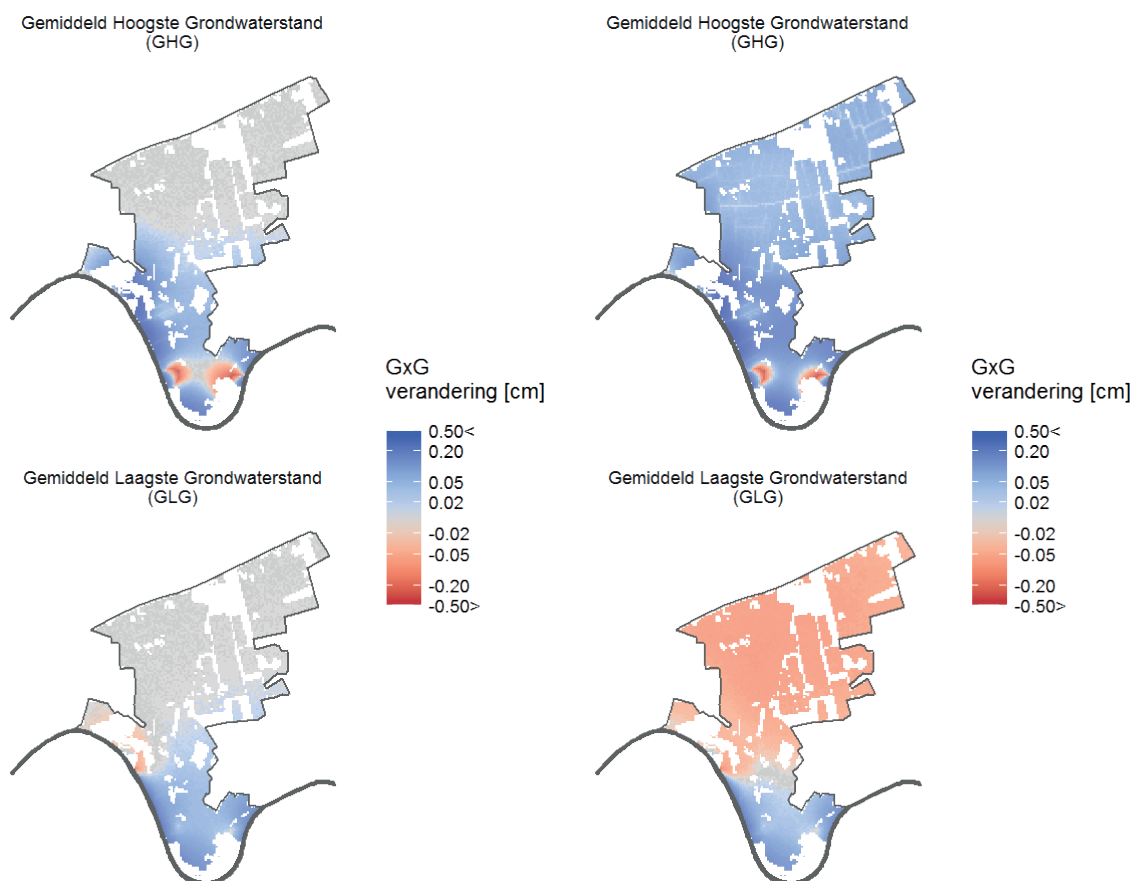
FIGUUR 7.11 STROOMGEBIED VAN DE VECHT MET INTERESSEGEBIED STEGEREN (DONKERGROEN)



Met de WWL-tabel kan ook gekeken worden naar het effect van klimaatverandering op de berekende opbrengstderving. Ook hiervoor is, naast veranderde klimaatgegevens, gewijzigde invoer met betrekking tot GxG aangeleverd door waterschap Vechtstromen.

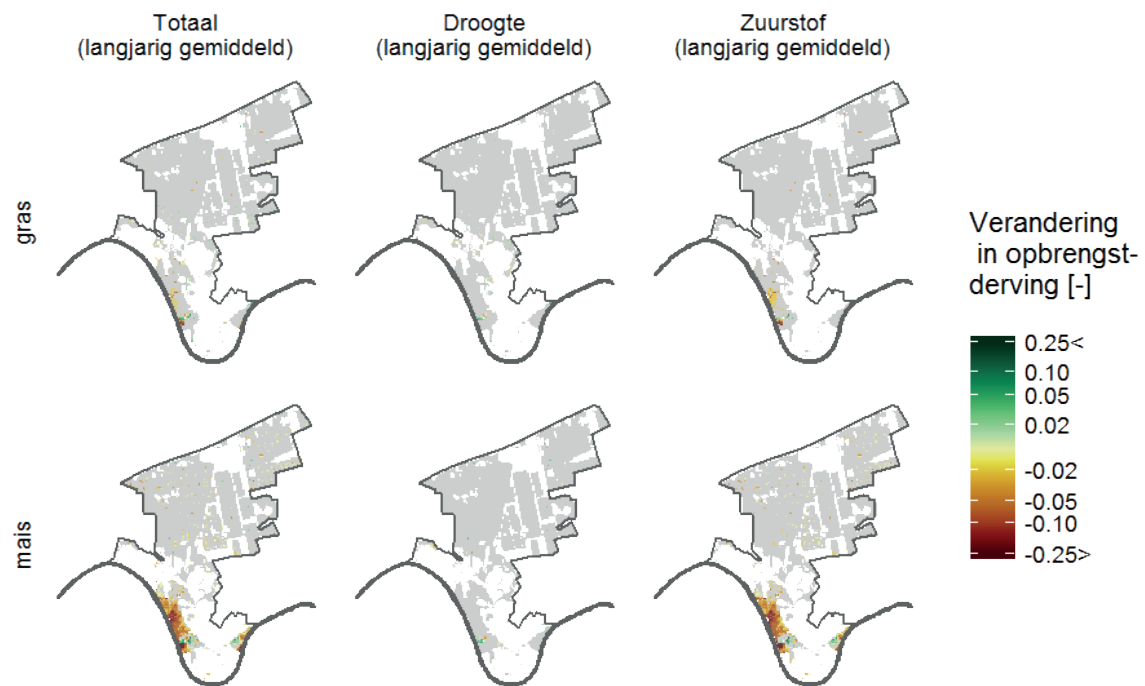
In Figuur 7.12 zijn de grondwaterstandsveranderingen als gevolg van de voorgestelde hydrologische maatregel en als gevolg van klimaatscenario W_H gegeven.

FIGUUR 7.12 GRONDWATERSTANDSVERANDERING ALS GEVOLG VAN EEN HYDROLOGISCHE MAATREGEL (LINKS) OF ALS GEVOLG VAN KLIMAATVERANDERING (RECHTS)

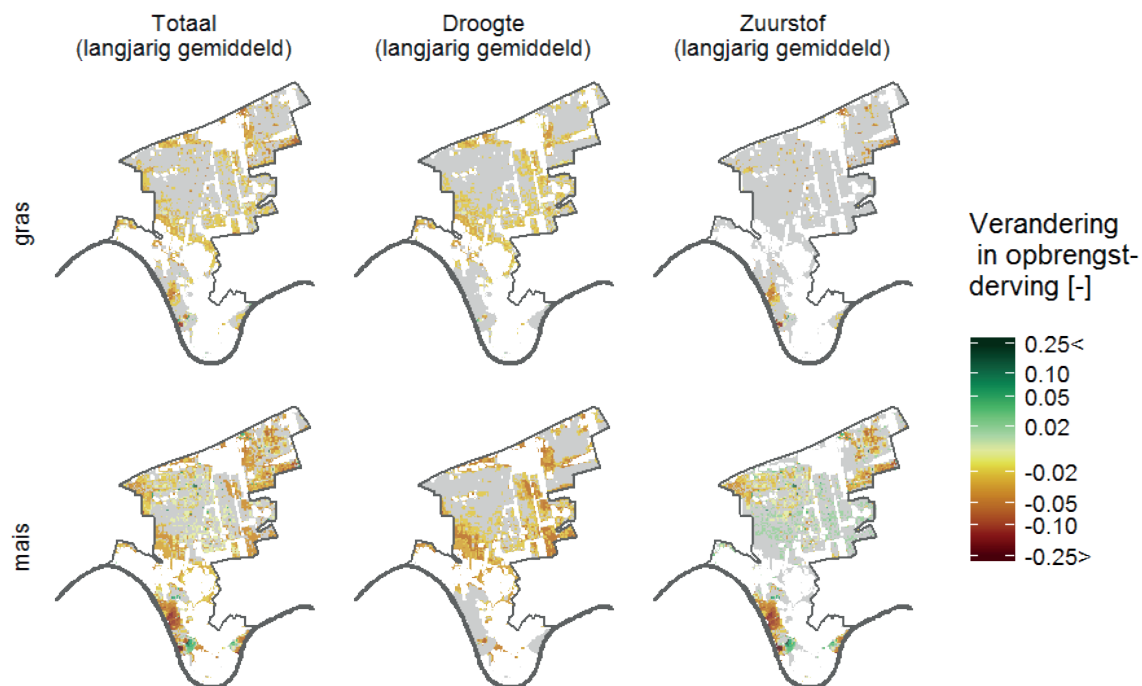


De veranderingen in opbrengstderving die met de WWL-tabel voor gras en mais zijn vastgesteld voor de situatie met veranderde grondwaterstanden als gevolg van een hydrologische maatregel zijn gegeven in Figuur 7.13. Het effect van de inrichtingsmaatregel blijkt zeer gering te zijn voor de opbrengstderving voor gras. Voor mais is er enig effect zichtbaar op zuurstofstress (en dus totale opbrengstderving) voor het gebied direct grenzend aan de Vecht: er wordt meer zuurstofstress berekend. Tenslotte geven we in Figuur 7.14 de resultaten voor klimaatscenario W_H . Voor gras en mais wordt in geval van klimaatverandering meer droogtestress berekend, terwijl voor mais op enkele plekken minder zuurstofstress wordt berekend.

FIGUUR 7.13 VERANDERINGEN IN OPBRENGSTDerving (TOTAAL: LINKS; DROOGTESTRESS: MIDDEN; ZUURSTOFSTRESS: RECHTS) VOOR GRAS (BOVENSTE RIJ) EN MAIS (ONDERSTE RIJ) IN DEELGEBIED STEGEREN ALS GEVOLG VAN EEN INRICHTINGSMaatregel TEN OPZICHT VAN DE HUIDIGE SITUATIE MET IN HET GROEN EEN VERBETERING EN IN HET ROOD EEN VERSLECHTERING ALS GEVOLG VAN DE MAATREGEL ZOALS BEREKEND MET WATERWIJZER LANDBOUW (WWL-TABEL)



FIGUUR 7.14 VERSCHILLEN IN OPBRENGSTDERIVING (LINKER KOLOM: TOTAAL; MIDDELSTE KOLOM: DROOGTESTRESS; RECHTER KOLOM: ZUURSTOFSTRESS) VOOR GRAS (BOVENSTE RIJ) EN MAIS (ONDERSTE RIJ) IN DEELGEBIED STEGEREN ALS GEVOLG VAN KLIMAATSCENARIO W_H TEN OPZICHTE VAN HET HUIDIGE KLIMAAT IN DEELGEBIED STEGEREN MET IN HET GROEN EEN VERBETERING EN IN HET ROOD EEN VERSLECHTERING ALS GEVOLG VAN HET KLIMAAT ZOALS BEREKEND MET WATERWIJZER LANDBOUW (WWL-TABEL)



8

CONCLUSIES

8.1 BRUIKBAARHEID

Eén van de voorwaarden voor de ontwikkeling van Waterwijzer Landbouw was dat het eenvoudig toepasbaar moet zijn. Hieraan is tegemoetgekomen door een systeem te ontwikkelen dat nauw aansluit bij haar voorlopers en die breed toegepast worden. In de nieuwe methode staat het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST centraal. In SWAP-WOFOST zijn belangrijke verbeteringen doorgevoerd om (klimaat)robuuste berekening van directe én indirecte effecten van droogte-, zuurstof- en zoutstress mogelijk te maken. Tevens is een koppeling gemaakt met economische effectmodules en in de eenvoudig toepasbare methode kan de gewasopbrengst in kg ha^{-1} makkelijk worden omgezet naar het financiële resultaat in € ha^{-1} .

Er is nu een gezamenlijk ontwikkelde methode voor de berekening van gewasopbrengsten in relatie tot droogte, natte omstandigheden en zoutconcentraties. Deze methode is inzetbaar voor de berekening van langjarig gemiddelde waarden, maar ook om verschillen tussen jaren te kwantificeren en verschillen in omstandigheden binnen een jaar in beeld te brengen. Eveneens is de methode beschikbaar voor het berekenen van de effecten van scenario's, zoals waterbeheerscenario's, klimaatscenario's, maar ook verziltingsscenario's.

Op basis van honderdduizenden runs met SWAP-WOFOST zijn metarelaties afgeleid, die ondergebracht zijn in de WWL-tabel. Deze metarelaties tussen grondwaterkarakteristieken en relatieve opbrengst of opbrengstdepressie zijn eenvoudig toepasbaar, zonder verdere tussenkomst van de modellen. Zulke metarelaties vergemakkelijken de vertaling van waterhuishoudkundige condities naar opbrengstdepressies op regionale en nationale schaal. Het afleiden van metarelaties bespaart dus rekenwerk voor de gebruiker, zodat deze zich kan toeleunen op de toepassing ervan. De toepassing van de WWL-tabel sluit nauw aan bij wat gebruikers gewend zijn bij toepassing van de HELP- en TCGB-tabellen, AGRICOM en Waternood. Dit verlaagt de drempel om met de methode aan de slag te gaan.

Waterwijzer Landbouw bestaat dus uit twee hoofdcomponenten waarmee opbrengstderving vastgesteld kan worden: 1) het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST waarmee maatwerkberekeningen kunnen worden uitgevoerd in combinatie met bedrijfseconomische methoden voor melkveehouderij en open teelten en 2) eenvoudig toepasbare metarelaties vastgesteld op basis van een groot aantal vooraf berekende situaties met behulp van het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST (de WWL-tabel).

Uit pilottoepassingen (Heinen et al., 2017) blijkt dat het met de WWL-tabel mogelijk is om op basis van bestaande informatie (LGN5, BOFEK2012) en door de waterschappen aangeleverde grondwaterstandsgegevens, namelijk GHG-GLG, opbrengstderving (totaal, en gesplitst over aandeel droogte- en aandeel zuurstofstress, en directe en indirecte effecten) voor gewassen te berekenen. Hierbij kunnen klimaatgemiddelde opbrengsten worden bepaald (30 jaar) alsook opbrengstdervingen voor twee specifieke kalenderjaren (droog, nat). Voor een

pilottoepassing in Stegeren zijn berekeningen met de WWL-tabel uitgevoerd voor de huidige situatie en zijn tevens twee scenario's beschouwd: het effect van een inrichtingsmaatregel op verandering in GHG-GLG en daarmee op de opbrengstderving, en het effect van een KNMI klimaatscenario (aangevuld met bijkomend effect op GHG-GLG) op de opbrengstderving.

De WWL-tabel is bedoeld om op ruimtelijke schaal de effecten van bijvoorbeeld een hydrologische ingreep op de landbouwopbrengsten in beeld te krijgen. Voor een meer gedetailleerd beeld voor een specifiek perceel, met bijbehorende perceel-specifieke bodemopbouw en waterhuishoudkundige situatie, kan het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST voor maatwerkberekeningen worden ingezet. Voor specifieke gebeurtenissen binnen een jaar kan de WWL-tabel sowieso niet worden toegepast. Voor een pilotstudie in de Raam zijn maatwerkberekeningen met het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST uitgevoerd. Het is dan mogelijk om in te zoomen op specifieke gebeurtenissen, zoals de natte periode begin juni 2016 die in de Raam op verschillende locaties tot opbrengstderving heeft geleid.

Met Waterwijzer Landbouw kunnen we meer dan met de oude methoden zoals de HELP-, TCGB- en IKC(AGRICOM)-tabellen. Met Waterwijzer Landbouw:

- 1 kunnen langjarige, gemiddelde opbrengstdervingen voor het recente klimaat (1981-2010) opgevraagd worden;
- 2 kunnen ook de opbrengstdervingen voor specifieke jaren opgevraagd worden;
- 3 kunnen de effecten van klimaatscenario's op de relatie tussen waterhuishouding en gewasopbrengst (doorgerekend worden (periode 2036-2065);
- 4 kunnen de effecten van planvorming (bijv. herinrichting, peilbeheer via hun effecten op benodigde invoer zoals grondwaterstanden) doorgerekend worden voor huidig of toekomstig klimaat. Hiermee kan dus inzicht verkregen worden wat een klimaatrobuuste inrichting van een gebied kan zijn;
- 5 kunnen verschillende grondwaterstandsdynamieken beschouwd worden (GHG-GLG, of andere karakteristieken zoals grondwaterstandsmomenten);
- 6 kunnen optimale grondwaterstanden (doelgaten) voor aanwezige gewassen en meest geschikte gewassen voor specifieke gebieden worden gedefinieerd (geschiktheidskaarten);
- 7 kunnen aanvullend maatwerkberekeningen uitgevoerd worden om bijvoorbeeld het effect van extreme neerslaggebeurtenissen op opbrengstderving op lokale schaal (perceel) nader te bestuderen.

Punten 1 tot en met 6 kunnen met de WWL-tabel bepaald worden, en punt 7 met het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST, indien gewenst aangevuld met economische berekeningen.

Op deze manier geldt dat gebruikers, zoals waterschappen, (veel) meer ruimte hebben dan met de huidige HELP-tabellen om de effecten van klimaat, inrichtingsmaatregelen of extreme situaties te beschouwen. Uiteraard geldt, zoals bij elke modeltoepassing, dat de kwaliteit van de uitkomsten vooral ook bepaald wordt door de kwaliteit van de aangeleverde informatie en invoerdata.

De Waterwijzer Landbouw is een reproduceerbaar en uitbreidbaar instrument. In een eerste gebruikersdag, 27 juni 2018, is door de aanwezigen geconcludeerd dat de WWL-tabel van Waterwijzer Landbouw een eenvoudig toepasbaar instrument is.

8.2 AANBEVELINGEN

Het zoeken naar datasets om het modelinstrumentarium in de verschillende ontwikkelingsfasen van Waterwijzer Landbouw te toetsen leverde steeds maar zeer beperkt bruikbare data op. Het verdient daarom aanbeveling om gerichte experimenten op te zetten onder verschillende gecontroleerde hydrologische omstandigheden waarbij metingen aan bodem en hydrologische condities en gewasgroei plaatsvinden met speciale aandacht voor droogte-, zuurstof- en zoutstress voor verschillende gewassen.

In de loop van het ontwikkelingstraject van Waterwijzer Landbouw zijn bovendien verschillende wensen naar voren gekomen. Dit betreft onder meer:

- Nutriënten: In Waterwijzer Landbouw houden we alleen rekening met hydrologische effecten in de zin van droogte-, zuurstof- en zoutstress. Hierbij houden we dus geen rekening met de beschikbaarheid van nutriënten terwijl dit in de landbouwpraktijk natuurlijk veel invloed heeft. Het kunnen meenemen van het effect van bijvoorbeeld N en P is zodoende wenselijk.
- Onzekerheid: Modellen zijn per definitie een schematisatie van de werkelijkheid. Daarnaast zijn invoergegevens en -parameters ook behept met onzekerheid. Wat dit allemaal betekent voor de betrouwbaarheid van de resultaten van Waterwijzer Landbouw weten we niet. Het is zeer wenselijk om dit te kunnen kwantificeren.
- Grondwaterstandskarakteristieken: In Waterwijzer Landbouw is in eerste instantie uitgegaan van het karakteriseren van de grondwaterstanden volgens het GxG concept (cf. bestaande systematieken). Er bestaat behoefte te onderzoeken of andere vormen van beschrijven van grondwaterkarakteristieken een beter alternatief kunnen zijn.
- Omgekeerde peilen: De gekozen onderrandvoorwaarde (q_h -relatie) kan alleen resulteren in grondwaterstandsregimes met een GHG in de winter en een GLG in de zomer. In met name polders in holoceen Nederland komt het steeds vaker voor dat er gestuurd wordt op een peilbeheer met juist omgekeerde peilen. Het is wenselijk om in Waterwijzer Landbouw rekening te kunnen houden met verschillende vormen van peilbeheer en drainage. In de pilot voor toepassing van Waterwijzer Landbouw in laag Nederland krijgt dit aandacht (najaar 2018).
- (Zoute) Kwel: Voor het metamodel gaan we voor zoutschade alleen uit van berekening met zout water. Het is echter wenselijk om ook het effect van zoute kwel te kunnen nagaan. In principe kan SWAP-WOFOST wel rekenen met zoute kwel, dus we zouden een modus moeten verzinnen hoe we hiermee om kunnen gaan voor het metamodel. Dit vraagt echter nog vooronderzoek.
- Macroporiën: De eerste pilottoepassingen betroffen steeds zandgronden (waterwinningen Vierlingsbeek en Boxtel, de Raam en de Vecht), maar voor kleigronden lijkt nu sprake van een overschatting van zuurstofstress. Mogelijk kan dit worden opgelost met een eenvoudige aanpassing van de doorlatendheid nabij verzadiging. Daarnaast zou moeten worden nagegaan of de optie van macroporiën in SWAP een betere oplossing hiervoor is, maar dat vraagt een gedegen vooranalyse.
- Gegevens proefvelden: gegevens van proefvelden voor toetsing van Waterwijzer Landbouw zijn maar beperkt beschikbaar. Onderhoud van bestaande en inrichten van nieuwe proefvelden is van belang.

Het is belangrijk om Waterwijzer Landbouw nog meer in de praktijk te toetsen en het is de bedoeling om het modelinstrumentarium te blijven verbeteren. Daartoe is beheer en onderhoud van Waterwijzer Landbouw als vervolg op het ontwikkelingstraject voorzien en voor het eerste jaar geregeld. Bijvoorbeeld als een aanpassing van de WWL-tabel nodig is als gevolg

van het uitbrengen van nieuwe klimaatscenario's, of als een belangrijke procesverbetering in SWAP-WOFOST is doorgevoerd, kan het wenselijk zijn om een nieuwe versie van Waterwijzer Landbouw uit te brengen. Daarmee voldoen we aan de wens om Waterwijzer Landbouw uitbreidbaar te maken. De huidige versie en alle data en software die erbij horen vallen onder versiebeheer zodat de resultaten van de Waterwijzer Landbouw van 2018 reproduceerbaar blijven.

9

LITERATUUR

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes & M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, 300 p.

Bakker, A., 2015. Time series transformation tool version 3.1: Description of the program to generate time series consistent with the KNMI'14 climate scenarios. TR 349. KNMI, De Bilt, Netherlands.

Bartholomeus, R., Hack-ten Broeke, M., Heinen, M., Mulder, M., Kros, H., Ruijtenberg, R., Runhaar, H. & Witte, F. 2018. Waterwijzers Landbouw en Natuur. Landschap 35-1, 15-23.

Bartholomeus, R., J. Kroes, J. van Bakel, M. Hack-ten Broeke, D. Walvoort & F. Witte. 2013. Actualisatie schadefuncties landbouw; Fase 1. Op weg naar een geactualiseerd en klimaatbestendig systeem van effect van waterbeheer op gewasopbrengst. Overzicht van doorgevoerde verbeteringen in fase 1 (september 2012 – april 2013). Rapport 2013-22, STOWA, Amersfoort.

Bartholomeus, R.P., Witte, J.P.M., Van Bodegom, P.M. & van Dam, J.C.. 2010. Nieuwe maat voor bodemvochtregime ook geschikt onder toekomstig klimaat. H2O, 3: 37-39.

Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam & R. Aerts. 2008. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model. J. Hydrol., 360, 147-165.

Beuving, J., 1982. Onderzoek naar bodem- en waterhuishoudkundige gegevens voor invoer en verificatie van een model voor berekening van de effecten van de waterhuishouding. ICW-nota 1378, Wageningen.

Boogaard, H.L., A.J.W. de Wit, J.A. te Roller & C.A. van Diepen. 2011. User's guide for the WOFOST Control Center 1.8 and WOFOST 7.1.3 crop growth simulation model. Wageningen. Beschikbaar via: www.wofost.wur.nl

Bosatlas van het Klimaat. 2011. Noordhoff Uitgevers BV.

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.

Breiman, L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45: 5-32.

Brouwer, F. & Huinink, J. T. M. 2002, Opbrengstdervingspercentages voor combinaties van bodemtypen en grondwatertrappen; Geactualiseerde help-tabellen en opbrengstdepressiekaarten, Alterra-rapport 429, Alterra, Wageningen.

Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen. 2017. Bemestingsadvies. Wageningen Livestock Research. Beschikbaar via: www.bemestingsadvies.nl of edepot.wur.nl/413891

- De Vos, A., B. Bruning, G. van Straten, R. Oosterbaan, J. Rozema & P. van Bodegom. 2016. Crop salt tolerance under controlled field conditions in The Netherlands, based on trials conducted at Salt Farm Texel. Salt Farm, Texel, the Netherlands.
- Doorenbos, J. & A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, Rome.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik & H. Zaradny. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen. 189 pp.
- Hack-ten Broeke, M., J. Kroes, R. Hendriks, R. Bartholomeus, J. van Bakel & I. Hoving. 2013. Actualisatie schadefuncties voor de landbouw, tussenfase 2a: plausibiliteitstoets SWAP en enkele verkennende berekeningen. Rapport 2013-37, STOWA, Amersfoort.
- Heinen, M., M. Mulder, D. Walvoort, R. Bartholomeus, S. Stofberg & M. Hack-ten Broeke. 2017. Praktijktoets waterwijzer landbouw in pilotgebieden de Raam en Vecht. Rapport 2017-44, STOWA, Amersfoort.
- Hop, M.E.C.M. 2010. Zouttolerantie van planten. Dendroflora 47: 43-73.
- Jarvis, N.J. 2011. Simple physics-based models of compensatory plant water uptake: concepts and eco-hydrological consequences. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 3431-3446.
- KNMI. 2014. KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, the Netherlands (www.climatescenarios.nl)
- Knotters., M. J. van Bakel, R. Bartholomeus, M. Hack-ten Broeke, R. Hendriks, G. Holshof, I. Hoving, J. Kroes, M. Mulder & D. Walvoort. 2017. Waterwijzer landbouw fase 3: naar een operationeel systeem voor gras en maïs. Rapport 2017-07, STOWA, Amersfoort.
- Kroes, J., R. Bartholomeus, J. van Dam, M. Hack-ten Broeke, I. Supit, R. Hendriks, A. de Wit, F. van der Bolt, D. Walvoort, I. Hoving & J. van Bakel. 2015. Waterwijzer Landbouw, fase 2. Modelleren van het bodem-water-plantsysteem met het gekoppelde instrumentarium SWAP-WOFOST. Rapport 2015-16, STOWA, Amersfoort.
- Kroes, J.G. & I. Supit. 2011. Impact analysis of drought, water excess and salinity on grass production in the Netherlands using historical and future climate data. Agriculture, Ecosystems & Environment, 144 (1), 370-381.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit & P.E.V. van Walsum. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands.
- Maas, E.V. 1990. Crop salt tolerance. In 'Agricultural salinity assessment and management', K.K. Tanji (Ed.), ASCE Manuals and Reports on Engineering practice, No 71, New York.
- Maas, E.V. & G.J. Hoffman. 1977a. Crop salt tolerance – current assessment. Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE 103(IR2): 115-134.
- Maas, E.V. & G.J. Hoffman. 1977b. Crop salt tolerance: evaluation of existing data. In: H.E. Dregne, Managing Saline Water for Irrigation. Proceedings of the International Conference on Managing Saline Water for Irrigation: Planning for the Future (16-20 August, 1977). Texas Tech University, Lubbock, Texas.
- McKay, M. D., R.J. Beckman & W.J. Conover. 1979. A Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. Technometrics 21: 239-245.

- Mulder, H.M., P.J.T. van Bakel, A. de Vos, G. van Straten, M. Heinen & J.G. Kroes. 2018. Zouttolerantie aardappelen. SWAP-WOFOST toepassing op zilt proefbedrijf Texel. Rapport 2018-01, STOWA, Amersfoort.
- Mulder, H.M. & A.A. Veldhuizen. 2017. AGRICOM 2.05. Theorie en gebruikershandleiding. Alterra-rapport 2576d.
- Oostindie, K. & R.F.A. Hendriks. 2005. Bepaling van de parameters van een grondwaterstand afhankelijke afvoerrelatie bij een gegeven grondwatertrap. De parameters van de Q(h) relatie. Wageningen, Alterra Wageningen UR, interne memo.
- Projectgroep Waternood. 1998. Grondwater als leidraad voor het oppervlaktewater. Een op het grondwater georiënteerde aanpak voor inrichting en beheer van oppervlaktewatersystemen. Utrecht, Dienst Landelijk Gebied, DLG-publicatie 1998/2; Den Haag, unie van Waterschappen.
- Schils, R.L.M., De Haan, M.H.A., Hemmer, J.G.A., Van den Pol-van Dasselaar, A., de Boer, J.A., Evers, A.G., Holshof, G., Van Middelkoop J.C. & Zom, R.L.G. 2007. DairyWise, A Whole-Farm Dairy Model. *Journal of Dairy Science* 90: 5334-5346.
- Steduto, P., Th.C. Hsiao, E. Fereres & D. Raes. 2012. Crop yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper* 66, FAO, Rome.
- STOWA. 1999. STOWA onderzoeksprogramma Waternood: STOWA.
- Stuyt, L.C.P.M., M. Blom-Zandstra & R.A.L. Kselik. 2016. Inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van bestaande gegevens. Rapport 2739, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Van Bakel, P.J.T. & I. Hoving. 2017. Kennis over indirecte nat- en droogteschade bij gras en maïs voor Waterwijzer Landbouw. STOWA-rapport 2017-W01, Amersfoort.
- Van Bakel, P. J. T., Huinink, J., Prak, H. & van der Bolt, F. 2005. HELP-2005, Uitbreiding en actualisering van de HELP-tabellen ten behoeve van het Waternood-instrumentarium: STOWA, STOWA 2005-16.
- Van Bakel, P.J.T., R.A.L. Kselik, C.W.J. Roest & A.A.M.F.R. Smit. 2009. Review of salt tolerant crops in the Netherlands. Alterra-rapport 1926, Alterra, Wageningen, the Netherlands.
- Van Bakel, P. J. T., Linderhof, V., Van 't Klooster, C. E., Veldhuizen, A. A., Goense, D., Mulder, H. M. & Massop, H. T. L. 2009. Definitiestudie AGRICOM: Alterra, Alterra-rapport 1934.
- Van Bakel, P. J. T., van der Waal, B. H. C., De Haan, M. H. A., Spruyt, J. & Evers, A. 2007. HELP-2006: uitbreiding en actualisering van de HELP-2005 tabellen te behoeve van het waternood-instrumentarium: STOWA, STOWA 2007-13.
- Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. & Kroes, J.G. 2008. Advances of Modeling Water Flow in Variably Saturated Soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 640-653.
- Van Walsum, P.E.V. & I. Supit. 2012. Influence of ecohydrological feedbacks from simulated growth on integrated regional hydrological simulations under climate scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 1577-1593.
- Van Wijk, A.L.M., R.A. Feddes, J.G. Wesseling & J. Buitendijk. 1988. Effecten van grondsoort en ontwatering op de opbrengst van akkerbouwgewassen. Wageningen, ICW, rapport 31.
- Walvoort, D. 2006. Sudoku Sampling. *Pedomatron* 20: 11-13.

Wösten, H., De Vries, F., Hoogland, T., Massop, H., Veldhuizen, A., Vroon, H., Wesseling, J., Heijckers, J. & Bolman, A. 2013. BOFEK2012, de nieuwe bodemfysische schematisatie van Nederland. Alterra, Wageningen. Rapport 2387

Dit is het eindrapport van Waterwijzer Landbouw. Eerder verschenen rapporten en achtergronddocumenten staan hieronder vermeld (ook te vinden op www.waterwijzer.nl).

FASE 1

Bartholomeus, R., J. Kroes, J. van Bakel, M. Hack-ten Broeke, D. Walvoort & F. Witte. 2013. Actualisatie Schadefuncties Landbouw; fase 1. Amersfoort, STOWA, rapport 2013-22.

FASE 2

Hack-ten Broeke, M., J. Kroes, R. Hendriks, R. Bartholomeus, J. van Bakel & I. Hoving. 2013. Actualisatie schadefuncties voor de landbouw, tussenfase 2A: plausibiliteitstoets SWAP en enkele verkennende berekeningen. Amersfoort, Stowa, rapport 2013-37.

Kroes, J., R. Bartholomeus, J. van Dam, M. Hack-ten Broeke, I. Supit, R. Hendriks, A. de Wit, F. van der Bolt, D. Walvoort, I. Hoving & J. van Bakel. 2015. Waterwijzer landbouw, fase 2. Modelleren van het bodem-water-plantsysteem met het gekoppelde instrumentarium SWAP-WOFOST. Amersfoort, Stowa, rapport 2015-16.

FASE 3

Knotters, M., J. van Bakel, R. Bartholomeus, M. Hack-ten Broeke, R. Hendriks, G. Holshof, I. Hoving, J. Kroes, M. Mulder & D. Walvoort. 2017. Waterwijzer landbouw fase 3: naar een operationeel systeem voor gras en maïs. Amersfoort, Stowa, rapport 2017-07.

FASE 4 EN 5 (EINDRAPPORT)

Werkgroep Waterwijzer Landbouw (redactie: M. Mulder, M. Hack-ten Broeke, R. Bartholomeus, et al.). 2018. Waterwijzer Landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie. Amersfoort, Stowa, rapport 2018-48.

OVERIGEN

Bartholomeus, R., Hack-ten Broeke, M., Heinen, M., Mulder, M., Kros, H., Ruijtenberg, R., Runhaar, H. & Witte, F. 2018. Waterwijzers Landbouw en Natuur. Landschap 35-1, 15-23.

Hack-ten Broeke, M., J. Kroes, R. Bartholomeus, J. van Dam & J. van Bakel. 2015. Beter systeem voor bepalen waterschade. H2O - Water Matters, oktober 2015: 43-46.

Hack-ten Broeke, M.J.D., J.G. Kroes, R.P. Bartholomeus, J.C. van Dam, A.J.W. de Wit, I. Supit, D.J.J. Walvoort, P.J.T. van Bakel & R. Ruijtenberg. 2016. Quantification of the impact of hydrology on agricultural production as a result of too dry, too wet or too saline conditions. Soil 2: 391-402. doi:10.5194/soil-2-391-2016.

Heinen, M., M. Mulder, D. Walvoort, R. Bartholomeus, S. Stoffberg & M. Hack-ten Broeke. 2017. Praktijktoets waterwijzer landbouw in pilotgebieden de Raam en Vecht. Amersfoort, Stowa, rapport 2017-44.

Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit & P.E.V. van Walsum. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen.

Mulder, M.H., P.J.T. van Bakel, A. de Vos, G. van Straten, M. Heinen & J.G. Kroes. 2018. Zouttolerantie aardappelen SWAP-WOFOST toepassing op zilt proefbedrijf Texel. Amersfoort, Stowa, rapport 2018-01.

Spruijt, J., M. van Dam & J. van Bakel. 2017. Kennis over indirecte nat- en droogteschade en zoutschade bij de belangrijkste open teelten in de vollegrond voor toepassing in Waterwijzer. Literatuuronderzoek en voorstellen voor operationalisering. *Werkdocument in voorbereiding*.

Van Bakel, J. & I. Hoving. 2017. Kennis over indirecte nat- en droogteschade bij gras en maïs voor waterwijzer landbouw. Amersfoort, Stowa, rapport 2017-W01.

Walvoort, D., J. Kroes, R. Bartholomeus & M. Hack-ten Broeke. 2014. Discussienotitie parameterisatie, kalibratie, validatie van het modelsysteem SWAP-WOFOST. Notitie Waterwijzer-Landbouw. Wageningen, Alterra Wageningen UR.

BIJLAGE A

BEGRIPPENLIJST

Begrip	Uitleg
Grondwaterstandskarakteristiek	Kengetallen van de grondwaterstandsdynamiek.
• GxG	Combinatie van GLG (gemiddeld laagste grondwaterstand) en GHG (gemiddeld hoogste grondwaterstand).
• Grondwaterstandsmomenten	Samenvatting grondwaterstandsdynamiek in statistische momenten: gemiddeld, spreiding, scheefheid.
Opbrengstderving	Reductie in gewasopbrengst, hier als gevolg van droogte- zuurstof- en/of zoutstress. Reductie is relatief ten opzichte van potentiële groei op gewichtsbasis (kg kg ⁻¹).
• Direct	Reductie in gewasopbrengst als gevolg van transpiratiereductie door te droge, te natte (zuurstoftekort) en/of te zoute omstandigheden.
- Droogtestress	Reductie in transpiratie als gevolg van watertekort in de wortelzone.
- Zuurstofstress	Reductie in transpiratie als gevolg van zuurstoftekort in de wortelzone.
- Zoutstress	Reductie in transpiratie door te zoute omstandigheden in de wortelzone.
• Indirect	Reductie in gewasopbrengst als gevolg van uitstel bodem- en gewasmanagementactiviteiten, zoals effecten op zaai- en oogsttijdstip.
Waterwijzer Landbouw	Modelinstrumentarium waarmee opbrengstderving kan worden gekwantificeerd, bestaande uit twee hoofdcomponenten: modelinstrumentarium waarmee maatwerkberekeningen kunnen worden gedaan en de WWL-tabel.
• WWL-tabel	Database met metarelaties op basis van een groot aantal voorberekende opbrengstdervingen: langjarig gemiddelde en specifieke jaren.
• Maatwerk(berekening)	Mogelijkheid om met SWAP-WOFOST een specifieke situatie door te rekenen.
Modelinstrumentarium	Modelinstrumentarium, bestaande uit een koppeling van modellen SWAP en WOFOST, waarmee opbrengstdervingen in relatie tot waterhuishouding kunnen worden gekwantificeerd.
• SWAP	SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone, inclusief wateropname door het gewas.
• WOFOST	WOFOST (World Food Studies) is een dynamisch gewasgroeimodel.
• GRASS	Dynamisch gewasgroeimodel voor gras afgeleid van WOFOST.
• FIXED	Eenvoudig gewasgroeimodel.
• BBPR	BedrijfsBegrotingsProgrammaRundvee.

BIJLAGE B

GEWASSENLIJST

Er worden 6 akkerbouwgewassen gesimuleerd met het Waterwijzer Landbouw modelinstrumentarium. Hierbij zijn consumptie- en zetmeelaardappelen samengevoegd tot één enkel gewas: aardappelen overig. In totaal is hiermee circa 90% van het totale areaal aan akkerbouw in Nederland gedekt, zie Tabel B.1.

TABEL B.1 AREAAL AKKERBOUWGEWASSEN [HA⁻¹] (CBS)

Gewas	Jaar			
	2000	2015	2016	2017
Aardappelen, consumptie	87439	71736	73321	76304
Aardappelen, poot	41801	41848	41405	42326
Aardappelen, zetmeel	50958	42927	43174	44041
Bruine bonen	1126	1574	822	1347
Cichorei	4756	3903	3884	3235
Corn Cob Mix	7219	4615	3930	3589
Haver	2404	1528	1484	1495
Hennep	792	2041	2262	2272
Koolzaad	854	2269	1696	1947
Korrelmais	20298	11188	9123	8690
Zomertarwe	16176	15001	11051	8414
Korrelmais	20298	11188	9123	8690
Lijnzaad	4379	2405	2415	2564
Rogge	5961	1628	1612	1496
Snijmais	205321	223855	206868	205249
Suikerbieten	110998	58433	70722	85352
Triticale	6646	1361	1047	1227
Vezelvlas	4379	2405	2415	2564
Wintertarwe	120510	127467	117014	108015
Zaai-uien	13988	23890	25078	26683
Zomergerst	43537	25165	24980	20905
Zomertarwe	16176	15001	11051	8414
Totaal [%]	90	91	92	93

Van het totale areaal groenteteelt in Nederland wordt iets meer dan 50% gedekt, zie Tabel B.2. Voor elke gewasgroep zijn de meest voorkomende gewassen geselecteerd. De volgende gewasgroepen zijn hierbij onderscheiden: Blad- en stengelgewassen, Knol- en wortelgroenten, Koolsoorten en peulvruchten. De sla varianten ijsbergsla en kropsla zijn samengevoegd tot één enkel gewas evenals bos- en waspeen en winterpeen.

TABEL B.2

AREAAL GROENTETEELT [HA⁻¹] (BRON: CBS)

Gewas	Jaar			
	2010	2015	2016	2017
<i>Blad- en stengelgewassen</i>				
Andijvie	775	515	511	365
Asperges	2253	2944	2994	3322
Knolvenkel	183	210	222	253
Prei	2950	2397	2328	2729
Selderij	136	204	163	199
Sla, ijsberg	2600	2382	2408	2378
Sla, krop en overig	800	1097	1066	1073
Spinazie	1821	2347	2240	2916
Witlof	3016	2952	2892	3222
<i>Knol- en wortelgroenten</i>				
Bos- en waspeen	2950	2666	2817	2885
Knolselderij	1311	1559	1705	1926
Rode bieten	405	656	741	952
Radijs	106	100	100	95
Schorseneren	1060	741	441	667
Winterpeen	5568	5804	6383	6469
<i>Koolsoorten</i>				
Bloemkool	2575	2365	2219	2501
Boerenkool	700	358	361	361
Broccoli	2100	1996	2071	2419
Chineze kool	350	290	290	206
Groene kool	136	47	47	62
Rodekool	644	512	575	674
Spitskool	500	418	513	570
Spruiten	3050	2676	2509	2618
Wittekool	1607	1636	1638	1678
<i>Peulvruchten</i>				
Doperwten	4023	3541	3324	3042
Sperziebonen	5276	3020	3052	3291
Tuinbonen	485	585	545	404
Totaal [%]	54	51	52	51

Er wordt één enkel gewas gesimuleerd voor de categorie bloembollen en –knollen, namelijk het gewas tulpen, zie Tabel B.3. Circa 50% van alle bloembollen en –knollen bestaat uit tulpen.

TABEL B.3 AREAAL BLOEMBOLLEN EN -KNOLLEN [HA⁻¹] (BRON: CBS)

Gewas	Jaar			
	2010	2015	2016	2017
Dahlia	460	350	330	330
Gladiolen	1120	930	930	980
Hyacinten	1380	1480	1460	1420
Irissen	330	280	270	230
Krokussen	440	420	380	350
Lelies	4680	5840	6070	6430
Narcissen	1800	1680	1590	1490
Tulpen	11400	12160	13200	13410
Zantedeschia	230	230	240	260
Totaal [%]	52	52	54	54

Voor de categorie boomteelt wordt in Waterwijzer Landbouw onderscheidt gemaakt tussen fruitteelt, met appelbomen als zogenaamd gidsgewas, en boomkwekerijen, met laan- en parkbomen als gidsgewas (zie respectievelijk Tabel B.4 en Tabel B.5).

Voor de categorie boomteelt

TABEL B.4 AREAAL FRUITTEELT [HA⁻¹] (BRON: CBS)

Gewas	Jaar			
	2000	2005	2010	2015
Appelbomen	12839	9737	8681	7600
Perenbomen	6019	6692	7995	9234
Steenvruchtbomen	902	937	1031	1113
Kleinfruit struiken	847	1201	1667	1761
Totaal [%]	62	52	45	39

TABEL B.5 AREAAL BOOMKWEKERIJEN [HA⁻¹] (BRON: CBS)

Gewas	Jaar			
	2005	2007	2008	2009
Bos- en haagplantsoen	2640	2904	2889	2760
Laan- en parkbomen	3735	4249	4445	4535
Rozenstruiken	509	577	547	543
Sierconiferen	2941	2698	3040	3151
Sierheesters en klimplanten	2179	3114	3245	3396
Vaste planten	1315	1248	1228	1298
Vruchtbomen	1257	1394	1326	1456
Totaal [%]	26	26	27	26

BIJLAGE C

KALIBRATIE VERDAMPING

De potentiële verdamping bestaat uit drie componenten: interceptie van neerslag, transpiratie van gewas en verdamping van de bodem. Aangezien in Waterwijzer Landbouw de simulatie van gewasgroei centraal staat, moeten de potentiële en actuele transpiratie correct worden berekend. In Nederland worden Makkink gewasfactoren veel gebruikt om potentiële verdamping te berekenen. De Penman-Monteith methode biedt echter betere mogelijkheden om de verdeling over de verdampingscomponenten met actuele gewaseigenschappen te simuleren. Daarom wordt in Waterwijzer Landbouw de potentiële verdamping berekend met de Penman-Monteith methode.

Allen et al. (1998) beschrijven een praktische methode om de Penman-Monteith methode toe te passen met dagelijkse weergegevens van zonnestraling, luchttemperatuur, windsnelheid en luchtvochtigheid. De verdelingsmethode over interceptie, transpiratie en bodemverdamping met actuele gewaskenmerken wordt in detail beschreven in de SWAP handleiding (Kroes et al., 2017). De belangrijke kalibratieparameters voor de Penman-Monteith direct methode zijn:

- actuele bodemverdamping: bodemweerstand r_{soil}
- potentiële transpiratie: minimale huidmondjesweerstand $r_{s,\text{min}}$

De bodemweerstand r_{soil} brengt in rekening dat de meteorologische variabelen boven het gewas worden gemeten, terwijl ze gebruikt worden voor de luchtcondities te midden van vegetatie. De windsnelheid is daar vaak veel lager, en de luchtvochtigheid hoger. Daarom moet r_{soil} worden gekalibreerd.

De minimale huidmondjesweerstand $r_{s,\text{min}}$ geldt voor een gewas dat goed van water is voorzien en is afhankelijk van de omgevingsfactoren globale straling, luchttemperatuur, luchtvochtigheid en CO_2 concentratie. In de wetenschappelijke literatuur zijn relaties bekend tussen $r_{s,\text{min}}$ en omgevingsfactoren voor momentane fluxen. Voor het gebruik van Penman-Monteith op dag basis hebben we echter behoefte aan relaties tussen $r_{s,\text{min}}$ en dagelijkse waarden voor globale straling, luchttemperatuur, luchtvochtigheid en CO_2 concentratie. Deze relaties zijn nog niet bekend voor het Nederlandse klimaat en de verschillende landbouwgewassen. Zo lang dat het geval is, moet $r_{s,\text{min}}$ gekalibreerd worden.

In Nederland worden Makkink gewasfactoren veel gebruikt om potentiële verdamping te berekenen. Om de overgang van Makkink naar Penman-Monteith soepel te laten verlopen, zijn bovenstaande kalibratieparameters van Penman-Monteith gekalibreerd op de Makkink gewasfactor methode. Hierbij is onder andere gebruik gemaakt van de meervoudige gewasfactormethode van Van Walsum & Supit (2012).

De kalibratie is uitgevoerd voor een weerperiode van 38 jaar: 1971-2008. Hoofddoel van de kalibratie is de totale langjarige verdamping met Penman-Monteith gelijk te maken aan die van Makkink. Een neven doel is de verschillende verdampingscomponenten op elkaar af te stemmen. Daarvoor zijn de volgende stappen gevolgd:

1. Kalibreer bodemweerstand r_{soil} tot de actuele bodemverdamping van Penman-Monteith en Makkink gelijk zijn.
2. Kalibreer huidmondjesweerstand $r_{\text{s,min}}$ tot de totale verdamping ($T_p + E_a + P_i$) van Penman-Monteith en Makkink gelijk zijn.

Bij kalibratie bleek dat bodemweerstand r_{soil} voor de meeste gewassen gelijkgesteld kan worden aan 150 s m^{-1} . De resultaten voor de overige gewassen staan weergegeven in Tabel C.1.

TABEL C.1

BODEM- EN GEWASWEERSTANDEN

Gewas	r_{soil} [s m ⁻¹]	$r_{\text{s,min}}$ [s m ⁻¹]
<i>Veeteelt</i>		
Grasland	600	94
Snijmais	150	167
<i>Akkerbouw</i>		
Wintertarwe	150	394
Zomergerst	150	165
Aardappelen	150	204
Suikerbieten	150	145
Zaaiuien	150	149
<i>Bollen</i>		
Tulp	150	171
Lelie	150	?
<i>Groenteteelt</i>		
Prei	150	368
Sla	150	189
Bloemkool	150	116
Spruitkool	150	181
Winterpeen	150	83
Sperziebonen	150	273
<i>Boomteelt</i>		
Appelbomen	150	173?
Laanbomen	150	173?

BIJLAGE D

VASTSTELLEN INVOERPARAMETERS VOOR ZOUT

In Waterwijzer Landbouw wordt ook zoutstress beschouwd. Dit wordt alleen gedaan voor gewassen die beregend worden waarbij opgelost zout in het beregeningswater voorkomt. Overige bronnen van aanvoer van zout in de wortelzone (zout in regenwater, zout in kwelwater) wordt niet beschouwd.

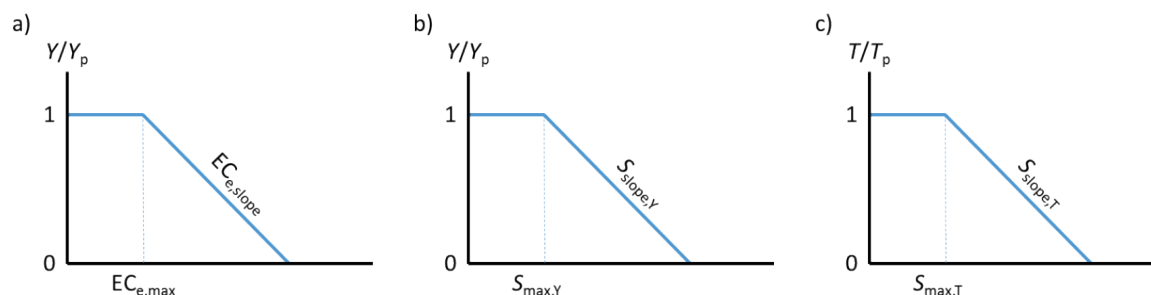
Zoutschade in Waterwijzer Landbouw zal worden beschouwd aan de hand van een zoutstress factor die bepaald wordt volgens het zogenaamde Maas-Hoffman concept (Bartholomeus et al., 2013). Het Maas-Hoffman (1977a,b) concept en bijbehorende parameters in de internationale literatuur beschrijven de geknikte relatie tussen de relatieve opbrengst (Y/Y_p ; kg kg^{-1} , met Y_p de potentiële productie in kg ha^{-1}) en de elektrische geleidbaarheid in een verzadigingsextract van de bodem (EC_e ; dS m^{-1}) (Figuur D.1a): beneden $EC_{e,\text{max}}$ is er geen sprake van opbrengstreductie, en daarboven neemt de opbrengst lineair af met EC_e : helling $EC_{e,\text{slope}}$ (m dS^{-1}). Omdat in Waterwijzer Landbouw in het model SWAP-WOFOST zoutschade wordt beschouwd als in eerste instantie een reductie in transpiratie (in SWAP), T/T_p (mm mm^{-1} ; met T_p de potentiële transpiratie in mm), en pas daarna in WOFOST wordt vertaald naar een eventuele opbrengstreductie (Y/Y_p), en omdat in SWAP niet met EC maar met totaal zoutgehalte S ($\text{mg cm}^{-3} = \text{g L}^{-1}$) of chloride concentratie C_{Cl} (mg cm^{-3}) wordt gerekend, kunnen we niet rechtstreeks volstaan met de veelvuldig in de literatuur beschikbare parameters $Y/Y_p(EC_e)$, via $EC_{e,\text{max}}$ en $EC_{e,\text{slope}}$.

Via de volgende stappen is de relatie $Y/Y_p(EC_e)$ (Figuur D.1a) vertaald naar de (tussenstap) relatie $Y/Y_p(S)$ (Figuur D.1b) en tenslotte naar de relatie $T/T_p(Cl)$ (Figuur D.1c) (details zijn na te lezen in Heinen en Mulder, 2018; achtergronddocument te raadplegen op de website van de WWL-tool).

1. Start knikpunt $S_{\text{max},Y}$ en helling $S_{\text{slope},Y}$ (Figuur D.1b) zijn berekend zoals beschreven in Kroes et al. (2017; hun Bijlage 9).
2. Voor alle beregende gewassen is vastgesteld wat de relatie is tussen T/T_p en Y/Y_p . Voor de dynamische WOFOST gewassen is dat gedaan zoals beschreven in het voorbeeld voor aardappelen in Mulder et al. (2018). Uit hun studie bleek dat dit goed door een lineair verband beschreven kan worden met een helling a ($a = \Delta Y/Y_p / \Delta T/T_p$). Voor de statische gewassen geldt vergelijking 3.1 uit de hoofdstuktekst, waarvoor geldt $a = K_Y$.
3. Het startpunt $S_{\text{max},T}$ wordt niet beïnvloed door deze helling a ($S_{\text{max},T}$, $S_{\text{max},Y}$), en de helling $S_{\text{slope},T}$ is gelijk aan $S_{\text{slope},Y}/a$.
4. Het startpunt en de helling worden vervolgens nog uitgedrukt in chloride (Cl) concentratie. Hoewel volgens van Bakel et al. (2009) en de Vos et al. (2016) de relatie tussen Cl en EC niet lineair is, blijkt deze in het voor ons interessante traject toch zeer goed door een lineair verband beschreven kan worden. Aldus kunnen het knikpunt en de helling eenvoudig omgerekend worden in termen van Cl.

In Tabel D.1 zijn de aldus verkregen waarden vermeld.

FIGUUR D.1 A) VOORSTELLING VAN DE OORSPRONKELIJKE MAAS-HOFFMAN (1977A,B) RELATIE TUSSEN RELATIEVE OPBRENGST Y/Y_p EN EC_e , B) DEZELFDE RELATIE MAAR NU ALS FUNCTIE VAN TOTAAL ZOUTGEHALTE S , EN C) DE VOOR SWAP BENODIGDE RELATIE TUSSEN RELATIEVE TRANSPIRATIE EN TOTAAL ZOUTGEHALTE. ZIE TEKST VOOR VERDERE UITLEG



TABEL D.1 LIJST MET EC_{max} , EC_{slope} , S_{max} , S_{slope} , $C_{cl,max}$ EN $C_{cl,slope}$ VOOR DE GEWASSEN DIE IN WATERWIJZER LANDBOUW WORDEN BESCHOUWD.

Gewas [#]	EC_{max} ($dS\ m^{-1}$)	EC_{slope} ($m\ dS^{-1}$)	S_{max} ($g\ L^{-1}$)	S_{slope} ($L\ g^{-1}$)	$C_{cl,max}$ ($g\ L^{-1}$)	$C_{cl,slope}$ ($L\ g^{-1}$)	a (-)	Bron [§]
Gras (D)	5.60	0.076	7.17	0.052	3.41	0.098	1.14	1
Snijmais (D)	1.80	0.074	2.30	0.037	0.82	0.070	1.55	1
Wintertarwe (D) ^{&}	6.00	0.071	7.68	0.045	3.68	0.085	1.22	1
Consumptieaardappelen (D)	1.70	0.120	2.18	0.084	0.75	0.159	1.11	1
Fabrieksaardappelen (D)	1.70	0.120	2.18	0.084	0.75	0.159	1.11	1
Pootaardappelen (D)	1.70	0.120	2.18	0.084	0.75	0.159	1.11	1
Suikerbieten (D)	7.00	0.059	8.96	0.027	4.36	0.052	1.68	1
Zomergerst (D) ^{&}	8.00	0.050	10.24	0.027	5.04	0.051	1.43	1
Zaaiuien (S)	1.20	0.160	1.54	0.114	0.41	0.213	1.1	1
Spruitkool (S)	1.80	0.097	2.30	0.076	0.82	0.142	0.95	1
Bloemkool (S)	1.80	0.097	2.30	0.076	0.82	0.142	0.95	1
Prei (S)	n.b.	n.b.	3.18	0.065	1.28	0.122	1.0	2*
Sla (S)	1.30	0.130	1.66	0.102	0.48	0.191	1.0	1
Winterpeen (S)	1.0	0.140	1.28	0.109	0.27	0.205	1.0	1
Sperzieboon (S)	1.0	0.190	1.28	0.129	0.27	0.242	1.15	1
Tulp (S)	n.b.	n.b.	1.63	0.173	0.45	0.325	1.0	2
Lelie (S)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0.45	0.325	1.0	gelijk gesteld aan tulp
Appelbomen	3.00	0.071	3.84	0.055	1.63	0.104	0.85	3**
Laanbomen	3.00	0.071	3.84	0.055	1.63	0.104	0.85	3***

[#]: D = dynamische gewasgroei (WOFOST); S = semi-dynamische gewasgroei

[§]: 1: Kroes et al. (2017; hun Appendix 9); 2: Stuyt et al. (2016); 3: Hop (2010)

[&]: voor zowel wintertarwe als zomergerst wordt geldt dat in Nederland ca 80% wordt gebruikt voor korrelproductie (Koen Klompe, WUR, pers. mededeling)

*: gemiddelde voor 2 gerapporteerde waarden; **: 'mediaan' voor appel, peer, pruim, kers; ***: 'mediaan' voor berk, beuk, eik, esdoorn, iep, plataan, populier

n.b.: niet bekend (geen data)

BEREGENING

Zoals aangegeven beschouwen we in Waterwijzer Landbouw zoutschade via zout geïntroduceerd in de wortelzone via beregeningswater. Dat betekent dat we beregening als component in SWAP moeten beschouwen. In Waterwijzer Landbouw is gekozen om beregening automatisch te laten plaatsvinden op het moment dat de grond (diepte: halverwege wortel-

zone) een bepaalde drukhoogte overschrijdt. Per keer wordt een vaste hoeveelheid berekening toegepast, waarbij geen rekening wordt gehouden of er eventueel overberekening moet plaatsvinden. Berekening ter preventie vorstschade bij fruitteelt wordt niet beschouwd in Waterwijzer Landbouw.

TECHNISCHE TOELICHTING VOOR AFLEIDEN METARELATIES

Er zal via een Latin-hypercube sampling methode een groot aantal simulaties worden uitgevoerd waarbij parameter waarde voor de onderrand en concentraties beregeningswater worden gevarieerd. Vervolgens zullen per bodemeenheid, klimaatscenario, weerstation, en gewas deze combinaties worden doorgerekend. Daarna zal via de ‘*random forest*’ methode metarelaties voor zoutschade worden afgeleid (zie ook Knotters et al., 2017).

STOFTRANSPORT SWAP

Stoffentransport in SWAP wordt beschreven met de klassieke convectie-dispersie/diffusie vergelijking met een sink term. In Waterwijzer Landbouw beschouwen het zout als een inerte stof, zodat we afbraak, mineralisatie, adsorptie/desorptie etc. buiten beschouwing laten.

Gewasopname van zout (chloride, Cl) zal buiten beschouwing gelaten worden. Het opnameproces is complex, en de plant kan ook Cl via de wortels uitscheiden. Over het algemeen zal de opnameconcentratie geringer zijn dan de concentratie van het bodemvocht. Omdat niet goed gekwantificeerd kan worden hoe het opnameproces precies verloopt stellen we deze op nul.

Zout kan alleen via berekening het bodemprofiel aan maaiveld binnenkomen. Zoute kwel aan de onderzijde wordt niet beschouwd. Drainafvoer kan plaatsvinden indien situaties met drainafvoer (bijv. (onderwater) drains in studie laag Nederland) worden beschouwd. Aanvoer van zout (Cl) via het regenwater wordt ook gering geacht en dus buiten beschouwing gelaten.

Bij aanvang van de simulaties stellen dat de zoutconcentratie in het bodemprofiel nihil is. De dispersielengte wordt gesteld op 5 cm. Moleculaire diffusie wordt klein geacht ten opzichte van dispersie en derhalve op nul gesteld.

BIJLAGE E

VASTSTELLEN RELATIES VOOR VEM EN DVE

Voor gras geldt dat de economische waarde van de opbrengst gebaseerd moet zijn op de voederkwaliteit van het gewas. De voederkwaliteit wordt uitgedrukt in de eenheden VEM en DVE. VEM staat voor voedereenheid melk (g kg⁻¹), en DVE staat voor darm verteerbaar eiwit (g kg⁻¹).

VEM

VEM is afhankelijk van het aantal groeidagen van een snede en is afhankelijk van de periode in het groeiseizoen. Hiervoor zijn gemiddelde waarden bekend zoals vermeld in Tabel E.1.

TABEL E.1 VEM WAARDE (G KG⁻¹) ALS FUNCTIE VAN HET AANTAL GROEIDAGEN EN START GROEIPERIODE (STARTDAG TEN OPZICHTE VAN 1 JANUARI)
(BRON: WAGENINGEN LIVESTOCK RESEARCH).

Aantal groeidagen	Startdag					
	121	152	182	213	244	274
5	1089	1086	1045	996	969	922
10	1080	1056	1019	988	937	908
15	1050	1016	980	958	919	900
20	1007	983	953	937	911	895
25	980	958	937	922	906	891
30	957	937	923	910	902	889
35	935	920	911	901	899	887
40	923	911	902	895	896	886
45	911	903	896	890	894	885
50	900	895	890	885	892	883

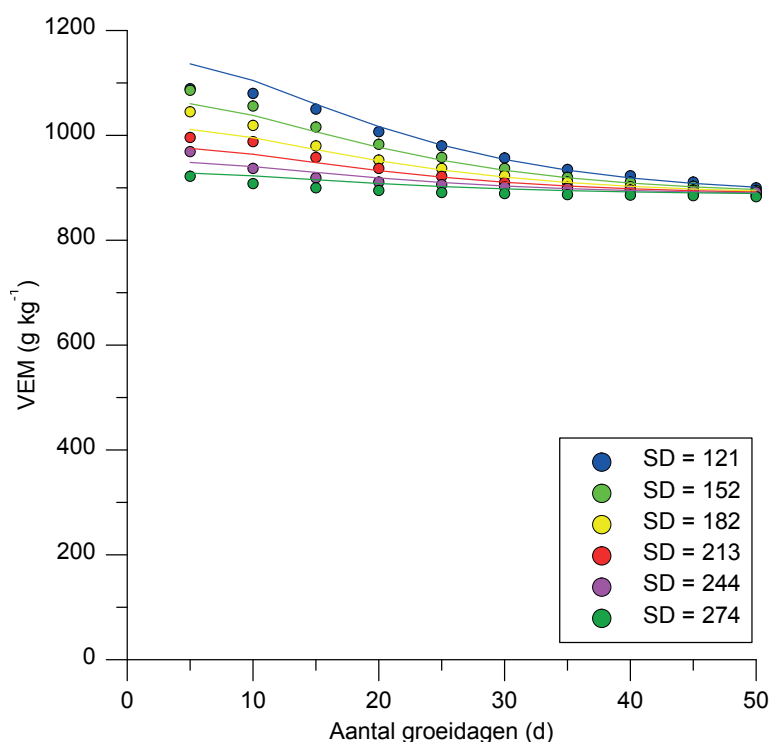
Na visuele inspectie van deze data is besloten deze samen te vatten in 1 formule, zodat in de nabewerking van Waterwijzer Landbouw de opbrengst direct kan worden omgerekend naar VEM. De relatie tussen VEM, aantal groeidagen (GD) en het startmoment van de groei (SD) blijkt vrij goed beschreven te kunnen worden door (Figuur E.1)

$$VEM = \alpha_1 + \alpha_2 \left(\frac{365.25 - SD}{SD} \right) \frac{\beta_1}{\beta_2} \left(\frac{GD}{\beta_2} \right)^{\beta_1 - 1} e^{-\left(\frac{GD}{\beta_2} \right)^{\beta_1}} \quad [B4.1]$$

Waarbij SD de startdag van de grassnede is (sinds 1 januari), en GD is het aantal groeidagen van grassnede (d). De regressiecoëfficiënten α_1 , α_2 , β_1 en β_2 zijn daarbij vastgesteld op: $\alpha_1 = 886.8528$, $\alpha_2 = 2910.2170$, $\beta_1 = 1.2180$ en $\beta_2 = 17.5522$.

FIGUUR E.1

VEM ALS FUNCTIE VAN HET AANTAL GROEIDAGEN EN HET STARTMOMENT VAN DE GROEI; SYMBOLEN ZIJN WAARDEN ZOALS AANGELEVERD DOOR WAGENINGEN LIVESTOCK RESEARCH (TABEL E.1) EN DE LIJNEN ZIJN DE REGRESSIES VOLGENS VERGELIJK [B3.1].



DVE

DVE is afhankelijk van het aantal groeidagen van een snede en is afhankelijk van de periode in het groeiseizoen. Hiervoor zijn gemiddelde waarden bekend zoals vermeld in Tabel E.2. Vanaf 10 groeidagen is er een afname in de tijd. Gedurende de eerste groeidagen is DVE lager: door de tragere N opname direct na opstart van een snede is het gehalte nog aan de relatief lage kant (bron: Gertjan Hulshof, Wageningen Livestock Research).

TABEL E.2

DVE WAARDE (G KG⁻¹) ALS FUNCTIE VAN HET AANTAL GROEIDAGEN EN START GROEIPERIODE (STARTDAG TEN OPZICHTE VAN 1 JANUARI) (BRON: WAGENINGEN LIVESTOCK RESEARCH).

Aantal groeidagen	Startdag					
	121	152	182	213	244	274
5	102	103	99	94	83	89
10	108	108	106	103	99	98
15	107	104	102	101	101	97
20	102	98	97	97	99	95
25	96	92	92	93	96	93
30	90	87	88	90	93	91
35	85	82	84	87	90	90
40	80	78	80	84	89	89
45	76	74	77	82	87	88
50	72	71	74	80	86	87

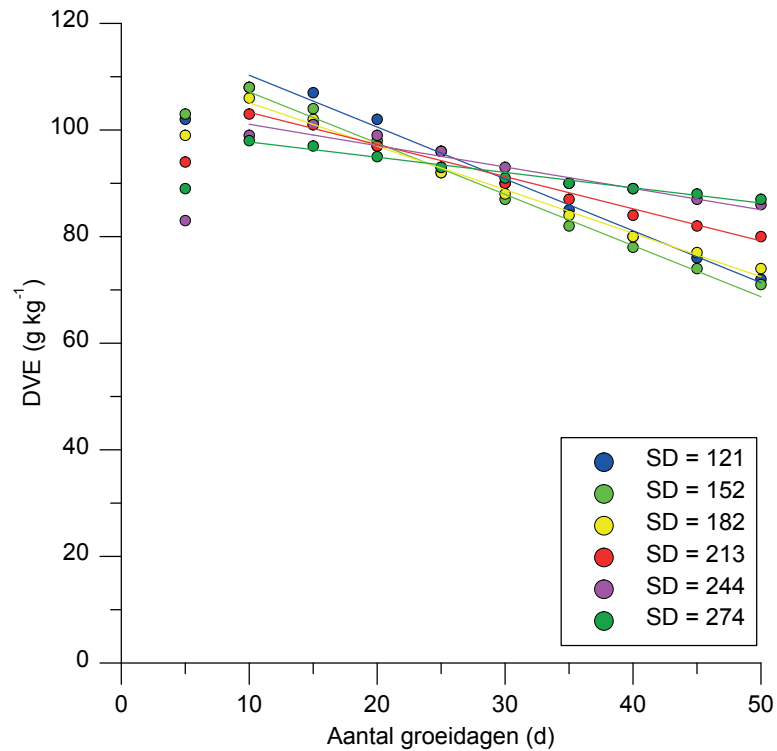
Na visuele inspectie van deze data is besloten deze samen te vatten in 1 formule, zodat in de nabewerking van Waterwijzer Landbouw de opbrengst direct kan worden omgerekend naar DVE. De relatie tussen DVE, aantal groeidagen (GD) en het startmoment van de groei (SD) blijkt vrij goed beschreven te kunnen worden door (Figuur E.2)

$$DVE = \gamma_1 + \gamma_2 SD + \gamma_3 SD^2 + GD(\delta_1 + \delta_2 SD + \delta_3 SD^2 + \delta_4 SD^3) \quad [B4.2]$$

Waarbij SD de startdag van de grassnede is (sinds 1 januari), en GD is het aantal groeidagen van grassnede (d). De regressiecoëfficiënten γ_1 , γ_2 , γ_3 , δ_1 , δ_2 , δ_3 en δ_4 zijn daarbij vastgesteld op: $\gamma_1 = 129.5179$, $\gamma_2 = -0.05724$, $\gamma_3 = -0.0001759$, $\delta_1 = 1.7362$, $\delta_2 = -0.04834$, $\delta_3 = 0.0002659$ en $\delta_4 = -4.2473 \cdot 10^{-7}$.

FIGUUR E.2

DVE ALS FUNCTIE VAN HET AANTAL GROEIDAGEN EN HET STARTMOMENT VAN DE GROEI; SYMBOLEN ZIJN WAARDEN ZOALS AANGELEVERD DOOR WAGENINGEN LIVESTOCK RESEARCH (TABEL E-2) EN DE LIJNEN ZIJN DE REGRESSIES VOLGENS VERGELIJK [E.2]



BIJLAGE F

INDIRECTE EFFECTEN

TABEL F.1 OVERZICHT PROCESSEN EN ASPECTEN AANGAANDE BEWERKBAARHEID, BERIJDBAARHEID, KIEMING, OPKOMST, GEWASONTWIKKELING, KWALITEIT OOGSTPRODUCT, BODEMKWALITEIT, ZIEKTEN, PLAGEN EN ONKRUIDEN WELKE WEL EN NIET IN WATERWIJZER LANDBOUW WORDEN BESCHOUWD (GEBASEERD OP SPRUIJT ET AL., 2017 (IN VOORBEREIDING) EN VAN BAKEL & HOVING, 2017)

Issue	WWL	Opmerking
<i>Bewerkbaarheid en berijdbaarheid</i>		
Ploegen, grondbewerking	Ja	
Zaaien, planten, poten	Ja	
Bemesting	Nee	Nutriënten zitten niet in WWL
Bespuiten, incl. loofvernietiging	Nee	Voorkomen van ziekten en plagen zit niet in WWL
Oogsttijdstip	Ja	Inclusief vertrappingsschade bij gras
Trekkraft bij bewerkingen	Nee	In veel situaties van gering belang
<i>Kieming, opkomst, gewasontwikkeling en kwaliteit oogstproduct</i>		
Vertraagde kieming	Ja	
Temperatuur	Ja	
Afsterving door wateroverlast	Nee	Nadelige effecten van zuurstofstress vertalen zich wel in verminderde gewasgroei, maar niet de afsterving van het gewas
Overige gewas kwaliteitskenmerken	Nee	Denk aan sortering, legering, suikergehalte, doorschieters, rot, botanische samenstelling
<i>Bodemkwaliteit</i>		
Verdichting, structuurschade, afbraak veen	Nee	Bodemfysische eigenschappen zijn constant
Verslemping	Nee	Idem
Stuifgevoeligheid	Nee	
Stikstofverlies	Nee	Nutriënten zitten niet in WWL
<i>Ziekten, plagen en onkruiden</i>		
Diverse gewasspecifieke aspecten	Nee	