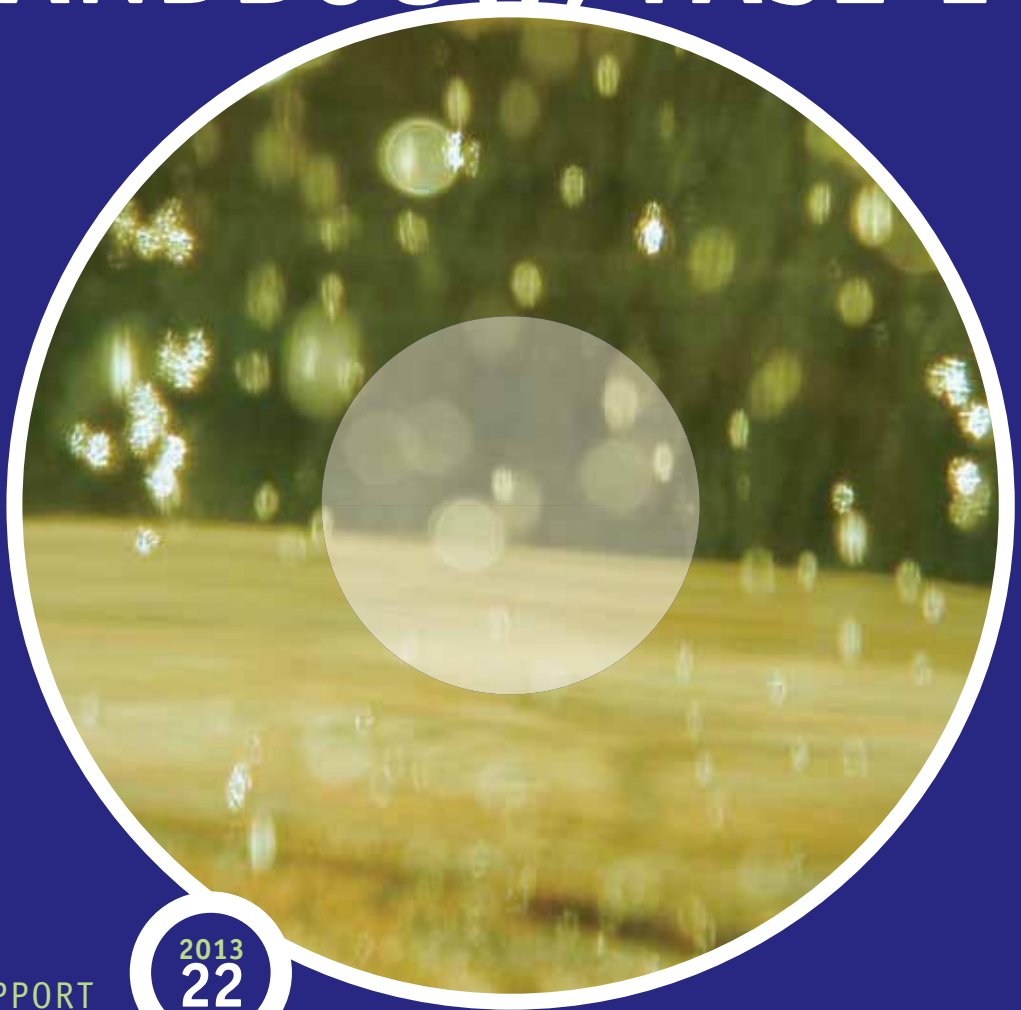
stowa

OP WEG NAAR EEN GEACTUALISEERD EN KLIMAATBESTENDIG SYSTEEM VAN EFFECT VAN WATERBEHEER OP GEWASOPBRENGST

# ACTUALISATIE SCHADEFUNCTIES LANDBOUW: FASE 1



RAPPORT 2013 22

stowa

# 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

ISBN 978.90.5773.603.2

stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 033 460 32 00 FAX 033 460 32 01
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

AUTEURS

dr. ir. Ruud Bartholomeus (KWR Watercycle Research Institute)
ir. Joop Kroes (Wageningen UR (Alterra)
dr. ir. Jan van Bakel (De Bakelse Stroom)
dr. ir. Mirjam Hack-tenBroeke (Wageningen UR (Alterra)
drs. Dennis Walvoort (Wageningen UR (Alterra)
prof. dr. ir. Flip Witte (KWR Watercycle Research Institute)

BEGELEIDING

Wim Werkman (Deltaprogramma Zoetwater),
John Tobben (LTO)
Hans Mankor (provincie Utrecht)
Jan Jaap Buyse (Vitens)
Marck Eck (Brabant Water)
Heiko Prak (ACSG)
Bas Worm (Zoetwatervoorziening Oost Nederland (ZON))
Chris Griffioen (vz, Waterschap Groot Salland)
Myrjam de Graaf (Waterschap Peel en Maasvallei)
Joost Heijkers (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden)
Jan Huinink (Ministerie van EZ)
Michelle Talsma (STOWA)
Rob Ruijtenberg (Bureau WeL namens STOWA)

ONDERZOEK MEDE MOGELIJK GEMAAKT DOOR

Deltaprogramma Zoetwater, LTO, provincie Utrecht, Vitens, Brabant Water, ACSG, Zoetwatervoorziening Oost Nederland (ZON), Alterra/Ministerie van EZ en STOWA

FOTO VOORKANT

www.alicethewriter.blogspot.nl

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2013-22
ISBN 978.90.5773.603.2

COPYRIGHT De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

DISCLAIMER Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

# TEN GELEIDE

Om veranderingen in het waterbeheer te vertalen naar wijzigingen in landbouwopbrengsten zijn in Nederland drie methodes operationeel: de HELP-tabellen, de TCGB-tabellen en AGRICOM. Door de landbouw, de waterbeheerders en de waterleidingbedrijven is lang aangedrongen op een herziening van deze methodes, omdat die verouderd zijn. Daarnaast is het wenselijk om tot één gezamenlijke methodiek te komen. Er is nu een belangrijke eerste stap gezet naar een breed gedragen methode voor het bepalen van (klimaat)robuuste relaties tussen waterhuishoudkundige condities en opbrengstdepressies. Deze nieuwe methode zal de huidige schadetabellen kunnen vervangen. Het is de bedoeling dat de nieuwe methode in een aantal fasen wordt gerealiseerd. De eerste fase is nu afgrond. Er is een nieuw systeem voor het bepalen van klimaatrobuuste relaties tussen waterhuishoudkundige condities en gewasopbrengst ontwikkeld. Dit rapport geeft een overzicht van de verbeteringen die zijn doorgevoerd. Het vernieuwende zit in de nieuwe kennisinzichten maar misschien nog wel het meest in het breed verkregen draagvlak en de samenwerking tussen kennisvragers en -aanbieders. Met dezelfde partijen wordt nu het vervolgtraject verkend, waarbij de eerste stap een plausibiliteittoets is die in de loop van 2013 beschikbaar komt.

Amersfoort, juni 2013
Directeur STOWA

Ir. J.J. Buntsma

# SAMENVATTING

Om veranderingen in het waterbeheer te vertalen naar wijzigingen van landbouwopbrengsten zijn in Nederland drie methodes operationeel: de HELP-tabellen, de TCGB-tabellen en AGRICOM. Door de landbouw, de waterbeheerders en de waterleidingbedrijven is lang aangedrongen op een herziening van deze methodes, omdat die verouderd zijn. Er is nu een belangrijke eerste stap gezet naar een breed gedragen methode voor het bepalen van (klimaat)robuuste relaties tussen waterhuishoudkundige condities en opbrengstdepressies. Deze nieuwe methode zal de huidige schadetabellen kunnen vervangen. Het is de bedoeling dat de nieuwe methode in een aantal fasen wordt gerealiseerd. Deze notitie beschrijft de verbeteringen die in de eerste fase zijn doorgevoerd, evenals de benodigde vervolgstappen.

*Belang: betrouwbaar en praktisch hulpmiddel voor waterbeheerders, drinkwaterbedrijven en rijk*
De nieuwe methode zal worden gebruikt door waterschappen, drinkwaterbedrijven, provincies, landbouw en het Rijk om te zorgen voor ondermeer een betrouwbare doelrealisatie Landbouw in de Waternoodsystematiek, een realistische vaststelling van de GGOR en betrouwbare effectvoorspellingen met het delta-instrumentarium. Met de bestaande methodes is dit niet mogelijk.

Zo is de bepaling van nat- en droogteschade in de bestaande tabellen gebaseerd op verouderde meteorologische gegevens en gewasgegevens en geven ze alleen langjarig gemiddelde schades. Vanuit de praktijk is juist interesse in de variatie van de schade in de tijd. Zoutschade is niet of beperkt in de methodes verwerkt. Bovenal zijn de bestaande tabellen ongeschikt voor toepassing in het steeds grilliger huidige klimaat én het klimaat van de nabije toekomst.

In de afgelopen jaren is kennis beschikbaar gekomen die de vertaling van waterhuishouding naar opbrengstdepressie structureel kan verbeteren en klimaatrobuust kan maken. Een nieuwe en klimaatrobuuste methode zal waterbeheerders, waterbedrijven en het Rijk ondersteunen in hun beleidsbeslissingen.

*Gefaseerde aanpak*
Voor het bepalen van de landbouwschade spelen vele factoren een rol, zoals droogteschade, natschade, inundatie, klimaat, bedrijfsvoering, ziekten en plagen. Niet alle factoren worden ineens beschouwd. In deze eerste fase is het ‘laaghangend fruit’ geoogst zodat op relatief korte termijn een verbeterde methode is ontstaan waarin een deel van de huidige stand van kennis en techniek operationeel is gemaakt. In een vervolgfase dient ander onderzoek te worden ingebracht om het systeem verder te verbeteren.

*Resultaten eerste fase: methode berekening directe schade door te droge, te natte en te zoute omstandigheden*
Om klimaatrobuuste relaties op te stellen tussen effecten van een verandering in de waterhuishoudkundige situatie en gewasopbrengst moeten de processen in de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer beschouwd worden. In deze fase van het verbeteringstraject hebben we ons gericht op het operationaliseren van directe effecten van droogteschade, natschade en zoutschade. Deze op processen gebaseerde aanpak is nodig om ook klimaatprojecties mogelijk te maken. Indirecte effecten zijn in deze fase nog niet geoperationaliseerd.
In de nieuwe methode staat het model SWAP centraal. SWAP wordt gezien als het standaard-

model voor het bepalen van de actuele verdamping als functie van meteorologische gegevens, gecombineerd met gewas- en bodemgegevens. In SWAP zijn belangrijke verbeteringen doorgevoerd om (klimaat)robuuste berekening van directe effecten van droogte-, nat- en zoutschade mogelijk te maken.

Daardoor is er nu een gezamenlijk ontwikkelde methode voor de berekening van directe schade voor landbouw in relatie tot droogte, natte omstandigheden (of eigenlijk zuurstofgebrek) 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.

De methode is al ingezet om conceptversies van zogenaamde metarelaties af te leiden. Deze metarelaties tussen grondwaterkarakteristieken en opbrengstdepressie zijn eenvoudig toepasbaar, zonder verdere tussenkomst van de modellen. Zulke metarelaties vergemakkelijken de vertaling van waterhuishoudkundige condities naar opbrengstdepressies. Het afleiden van metarelaties bespaart dus rekenwerk voor de gebruiker, zodat deze zich kan toeleggen op de toepassing ervan. In deze fase zijn de metarelaties geparametriseerd voor gras en voor aardappelen.

*Vervolg: doorvoeren verdere verbeteringen*

In deze fase van de actualisatie hebben we belangrijke verbeterwensen aangepakt. Wat er echter nog open staat is dat er rekening gehouden zou moeten worden met bedrijfsvoering, dat er een uitspraak nodig is over gewaskwaliteit of vervolgschade van structuurbederf, en dat er een transparante conversie nodig is van de reductie van gewasverdamping naar opbrengstderving in kilogrammen oogstbaar product en naar bedrijfsinkomen. Ook niet onbelangrijk: de in de eerste fase ontwikkelde SWAP-versie is vooralsnog alleen geparametriseerd voor gras en aardappel.

We hopen dat ook voor de benodigde vervolgfase opnieuw de krachten van verschillende instituten zullen worden gebundeld, zodat een breed gedragen methode ontstaat op basis van de best beschikbare kennis.

# DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen. Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 033 - 460 32 00.
Ons adres luidt: STOWA, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort.

E-mail: stowa@stowa.nl.
Website: www.stowa.nl

# ACTUALISATIE SCHADEFUNCTIES LANDBOUW; FASE 1

## INHOUD


| | | | |
|---|---|---|---|
| **1** | | INLEIDING | 1 |
| **2** | | BESTAANDE METHODEN EN TEKORTKOMINGEN | 3 |
| **3** | | (KLIMAAT)ROBUUSTE VERTALING VAN WATERHUISHOUDKUNDIGE CONDITIES NAAR OPBRENGSTDEPRESSIE | 7 |
| | **3.1** | Plantengroei en transpiratie | 7 |
| | **3.2** | Klimaatverandering | 8 |
| | **3.3** | Directe effecten | 9 |
| | **3.4** | Indirecte effecten | 12 |
| | **3.5** | Conclusies | 14 |
| **4** | | VERBETERINGEN AAN SWAP | 15 |
| | **4.1** | Beschrijving van SWAP (zonder doorgevoerde verbeteringen) | 15 |
| | **4.2** | Aanpassing berekening directe effecten | 17 |
| | **4.3** | Scheiden transpiratiereductie door droogte-, zuurstof- en zoutstress | 30 |
| | **4.4** | Plausibiliteittoets SWAP met doorgevoerde verbeteringen | 30 |
| | **4.5** | Voorbeeldberekeningen met SWAP | 31 |
| | **4.6** | Conclusies | 35 |
| **5** | | SYSTEEM EN METARELATIES | 36 |
| | **5.1** | Inleiding | 36 |
| | **5.2** | Opzet systeem | 36 |
| | **5.3** | Verklarende variabelen: grondwaterstandskarakteristiek | 37 |
| | **5.4** | Afgeleide concept-metarelaties | 39 |
| | **5.5** | Vertaling naar Euro's | 43 |
| | **5.6** | Conclusies | 44 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **6** | | VERVOLG / BENODIGDE VERBETERINGEN | 45 |
| | **6.1** | Gewasgroeimodellering met SWAP-WOFOST | 45 |
| | **6.2** | Bedrijfsvoering | 52 |
| | **6.3** | Indirecte effecten | 53 |
| | **6.4** | Meten en validateren | 59 |
| **7** | | CONCLUSIES | 60 |
| **8** | | REFERENTIES | 62 |

# 1 INLEIDING

Vanuit de landbouw en het waterbeheer is lang aangedrongen op een herziening van de HELP-tabellen (Werkgroep-HELP-tabel, 1987), omdat die verouderd zijn. Zo is de bepaling van nat- en droogteschade met de HELP-tabellen gebaseerd op verouderde meteorologische gegevens en gewasgegevens en geven ze alleen langjarig gemiddelde schades. Vanuit de praktijk is juist interesse in de variatie van de schade in de tijd. Bovenal zijn de HELP-tabellen ongeschikt voor toepassing in het steeds grilliger huidige klimaat én het klimaat van de nabije toekomst (Van Bakel en Van den Eertwegh, 2011). Er is daarom behoefte aan klimaatrobuuste bepaling van landbouwschade, zoals ook betoogd in het Kennisprogramma Deltaproof (STOWA, 2010) en in een eerder uitgevoerde inventarisatie naar de behoefte voor de vervanging van de HELP-tabellen (Hack-Ten Broeke et al., 2010).

Onder aanvoering van STOWA is een breed draagvlak gerealiseerd voor het ontwikkelen van een methode voor het bepalen van landbouwopbrengsten in afhankelijkheid van waterhuishoudkundige omstandigheden. Deltaprogramma Zoetwater, waterschappen, LTO, provincie Utrecht, de waterbedrijven Vitens en Brabant Water, AdviesCommissie Schade Grondwater (ACSG), Alterra/Ministerie van EZ (via het KennisBasisprogramma) en Zoetwatervoorziening Oost Nederland (ZON), hebben de krachten gebundeld. Hierdoor heeft het consortium KWR, Wageningen UR Alterra en De Bakelse Stroom een start kunnen maken om (klimaat)robuuste opbrengstfuncties te ontwikkelen, ter vervanging van de directe schades in de HELP tabellen. Het doel van het project is een breed gedragen, praktisch systeem voor het bepalen van klimaatrobuuste relaties tussen waterhuishoudkundige condities en gewasopbrengst. Deze notitie beschrijft de resultaten van de verbeteringen die in fase 1 van het verbeteringstraject zijn doorgevoerd. Het nieuwe systeem en de daaruit afgeleide klimaatrobuuste opbrengstfuncties zullen de in de tachtiger jaren van de vorige eeuw ontwikkelde HELP- en TCGB-tabellen vervangen en zorgen voor een breed gedragen werkwijze voor waterschappen, drinkwaterbedrijven, provincies, landbouw en nationale overheid.

Voor het bepalen van de landbouwschade spelen vele factoren een rol, zoals droogteschade, natschade, inundatie, klimaat, bedrijfsvoering, ziekten en plagen. Niet alle factoren worden in deze eerste fase van de actualisering beschouwd. Eerst wordt 'laaghangend fruit' geoogst zodat op relatief korte termijn een verbeterde methode kan ontstaan waarin een deel van de huidige stand van kennis en techniek operationeel is gemaakt. In een vervolgfase kan verder onderzoek worden ingebracht om het systeem te verbeteren of vervangen. Daarom is door de opdrachtgevers gekozen voor de volgende gefaseerde aanpak waarmee efficiënt en doelgericht de actualisatie wordt doorgevoerd:

1 Korte termijn (fase 1, 2012/2013): Systeem voor vooral directe effecten van droogteschade, natschade en zoutschade. Hierbij wordt gestreefd naar een bruikbare methode, gebaseerd op actuele gegevens en (klimaatrobuuste) modellen. Op basis van het model SWAP, met geactualiseerde modules voor de berekening van directe effecten van droogte-, nat- en zoutschade,

wordt een systeem ontwikkeld waarmee metarelaties tussen waterhuishoudkundige condities en gewasopbrengst kunnen worden afgeleid. Het principe voor het afleiden van metarelaties is al eerder uitgevoerd (Heuvelmans, 2010) en is daarmee niet uniek, maar in deze fase kan een belangrijke stap voorwaarts worden gemaakt door gebruik te maken van actuele kennis, onder andere over de invloed van het klimaat. Ook de HELP-tabellen zijn voorbeelden van metarelaties. In deze fase leiden we conceptversies van metarelaties af, welke toegepast en getest kunnen worden in bijvoorbeeld GGOR-trajecten en klimaatstudies (bijv. 'Landbouw op Peil', 'Klimaat en Landbouw', 'Deltaplan Hogere Zandgronden').
In deze geven we bovendien een doorkijk naar fase 2, voor de mogelijkheden en haalbaarheid om effecten van natte omstandigheden op bewerkbaarheids- en berijdbaarheidscriteria te actualiseren.

2 Middellange termijn (fase 2, 2013-2016): verdere verbeteringen in alle aspecten voor een up-to-date methode. Belangrijk daarbij is het gebruik van, en toetsing aan, praktijkgegevens (bijvoorbeeld via LEI/BIN). Aansluiten bij actuele ontwikkelingen in o.a. bedrijfsvoering, gewasgroeimodellen (WOFOST), hydrologische modellering, gebruik van remote sensing beelden, klimaatadaptieve drainage, online veldmetingen, beregeningsplanner, etc. Een stapsgewijze aanpak maakt het mogelijk steeds op ontwikkelingen in te spelen en erop aan te sluiten.
Deze notitie heeft betrekking op fase 1 van het project, waarin ook een doorkijk naar fase 2 wordt gegeven.

Hoofdstuk 2 bevat achtergrondinformatie over de HELP-tabellen, TCGB-tabellen en AGRICOM, en de beperkingen van de bestaande methoden. Hoofdstuk 3 geeft achtergrondinformatie die van belang is voor een (klimaat)robuuste vertaling van waterhuishoudkundige condities naar opbrengstdepressie. Vanuit deze kennis zijn verbeteringen in het model SWAP doorgevoerd voor het kwantificeren van directe effecten (hoofdstuk 4) en is een systeem ontwikkeld (hoofdstuk 5) waarmee op basis van gedetailleerde SWAP-simulaties metarelaties tussen grondwaterkarakteristieken en opbrengstdepressie kunnen worden afgeleid. Zulke metarelaties vergemakkelijken de vertaling van waterhuishoudkundige condities naar opbrengstdepressies, omdat geen SWAP-simulaties meer nodig zijn. In dit hoofdstuk worden concept-metarelaties gepresenteerd. Hoofdstuk 6 beschrijft welke stappen gezet moeten worden in fase 2 van het project, om het systeem verder uit te breiden en te vervolledigen. Hoofdstuk 7 geeft de belangrijkste conclusies over de doorgevoerde verbeteringen.

# 2

# BESTAANDE METHODEN EN TEKORTKOMINGEN

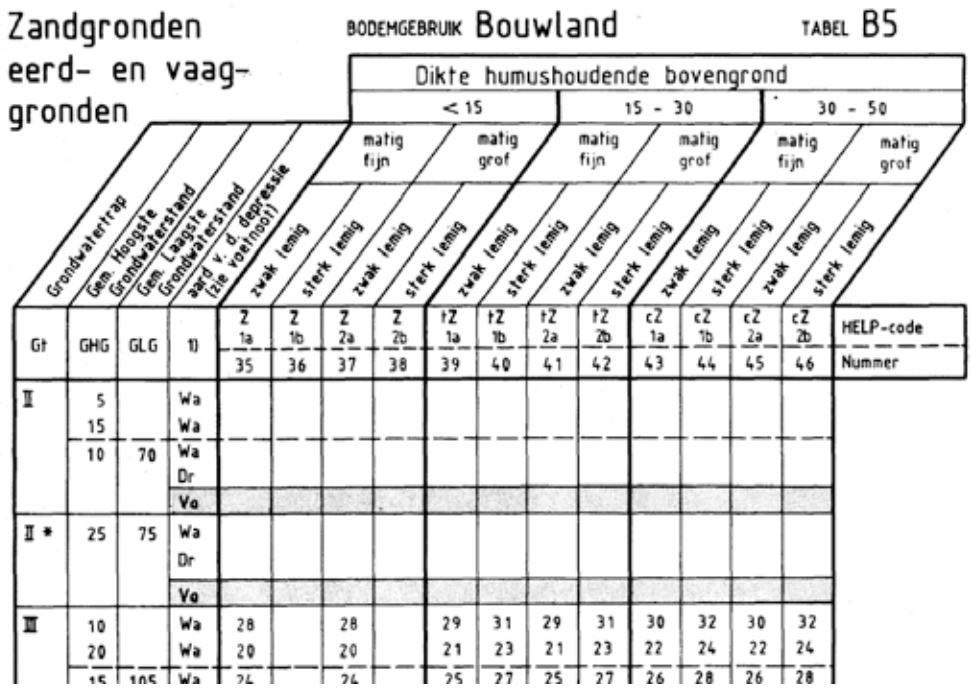
Landbouwopbrengsten zijn mede afhankelijk van de vochtomstandigheden in de wortelzone. Deze zijn niet altijd optimaal. Door droogte, wateroverlast, en te hoge zoutconcentraties worden opbrengsten verminderd. Peilbeheer, grondwaterwinningen en klimaatverandering hebben invloed op de grondwaterstand en daarmee op de vochtomstandigheden in de wortelzone. Om veranderingen in grondwaterstanden te vertalen naar opbrengstdepressies worden in Nederland drie methodes gebruikt: de HELP-tabellen, TCGB-tabellen, en AGRICOM (IKC-tabellen). Deze worden hieronder kort beschreven[1].

### HELP-TABELLEN

De HELP-tabellen zijn ontwikkeld om in landinrichtingsprojecten effecten van waterhuishoudkundige maatregelen op de opbrengst van landbouwgewassen vast te stellen. Zo worden de tabellen door waterschappen gebruikt bij het optimaliseren van het waterbeheer. De oorspronkelijke HELP-tabellen (Werkgroep-HELP-tabel, 1987), en diverse herzieningen daarvan (Van Bakel, 2002; Van Bakel et al., 2005; Van Bakel et al., 2007), geven veeljarig gemiddelde schades weer, als functie van Gt (grondwatertrap), bodemtype, Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) en Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) (Figuur 1: Uitsnede van een HELP-tabel voor de bepaling van droogteschade (Dr) en natschade (Wa) (Werkgroep-HELP-tabel, 1987). Getallen in de tabel geven de procentuele opbrengstdepressie (lege elementen = n.v.t.).1). De tabellen zijn toepasbaar op vlakken van de bodem/grondwatertrappenkaart. De droogteschade in de HELP-tabellen is gebaseerd op uitkomsten van berekeningen met het model LAMOS (LAndinrichtingsdienst Model voor Onverzadigde Stroming; (Reuling, 1983)), dat afgeleid is van het model Model for Unsaturated flow above a Shallow waterTable-MUST; (De Laat, 1980)). Vooral de natschade wordt door de tabellen slecht beschreven.

1 Tekst deels ontleend aan Bartholomeus et al. (2012); Bartholomeus (2010)).

**FIGUUR 1** **UITSNEDE VAN EEN HELP-TABEL VOOR DE BEPALING VAN DROOGTESCHADE (DR) EN NATSCHADE (WA) (WERKGROEP-HELP-TABEL, 1987). GETALLEN IN DE TABEL GEVEN DE PROCENTUELE OPBRENGSTDEPRESSIE (LEGE ELEMENTEN = N.V.T.).**



Zandgronden eerd- en vaag-gronden — BODEMGEBRUIK Bouwland — TABEL B5

| Gt | GHG | GLG | 1) | Dikte humushoudende bovengrond < 15, matig fijn, zwak lemig | Dikte humushoudende bovengrond < 15, matig fijn, sterk lemig | Dikte humushoudende bovengrond < 15, matig grof, zwak lemig | Dikte humushoudende bovengrond < 15, matig grof, sterk lemig | 15 - 30, matig fijn, zwak lemig | 15 - 30, matig fijn, sterk lemig | 15 - 30, matig grof, zwak lemig | 15 - 30, matig grof, sterk lemig | 30 - 50, matig fijn, zwak lemig | 30 - 50, matig fijn, sterk lemig | 30 - 50, matig grof, zwak lemig | 30 - 50, matig grof, sterk lemig |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Z 1a | Z 1b | Z 2a | Z 2b | tZ 1a | tZ 1b | tZ 2a | tZ 2b | cZ 1a | cZ 1b | cZ 2a | cZ 2b |
| | | | | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 |
| II | 5 | | Wa | | | | | | | | | | | | |
| | 15 | | Wa | | | | | | | | | | | | |
| | 10 | 70 | Wa | | | | | | | | | | | | |
| | | | Dr | | | | | | | | | | | | |
| | | | Vo | | | | | | | | | | | | |
| II * | 25 | 75 | Wa | | | | | | | | | | | | |
| | | | Dr | | | | | | | | | | | | |
| | | | Vo | | | | | | | | | | | | |
| III | 10 | | Wa | 28 | | 28 | | 29 | 31 | 29 | 31 | 30 | 32 | 30 | 32 |
| | 20 | | Wa | 20 | | 20 | | 21 | 23 | 21 | 23 | 22 | 24 | 22 | 24 |
| | 15 | 105 | Wa | 24 | | 24 | | 25 | 27 | 25 | 27 | 26 | 28 | 26 | 28 |

## HELP+WATERNOOD

Waternood (STOWA, 1999) is een computerprogramma dat door de waterschappen wordt gebruikt om de inrichting en het beheer van een gebied af te stemmen op verschillende belangen. Voor de effecten van een wijziging in het grondwaterregime op de landbouw worden de HELP-tabellen gebruikt. Veel toepassingsvarianten van de HELP-tabellen zijn ontwikkeld in het kader van Waternood.

## TCGB-TABELLEN

Grondwateronttrekkingen kunnen effect hebben op gewasopbrengsten in de landbouw door hun invloed op de vochtbeschikbaarheid van planten. Zo heeft een verlaging van de grondwaterstand invloed op het vochtgehalte in de wortelzone waardoor droogteschade kan optreden. De ACSG, AdviesCommissie Schade Grondwater, behandelt in opdracht van de provincies schadeverzoeken die veroorzaakt zijn door grondwateronttrekkingen en het stelt schadeadviezen op naar aanleiding van schadeclaims die landbouwers indienen.

Voor het berekenen van opbrengstdepressies als gevolg van permanente grondwaterwinningen gebruikt de ACSG de TCGB-tabellen (Bouwmans, 1990). De tabellen zijn lijken op de veel gebruikte HELP-tabellen (Werkgroep-HELP-tabel, 1987), maar geven een gedetailleerder inzicht in opbrengstderving en zijn alleen geldig voor grasland op zandgronden. In de TCGB-tabellen wordt droogteschade (als percentage opbrengstderving) berekend aan de hand van de grondwaterstanden, meteorologische droogtegraad (overschrijdingskans van de maximale vermindering van het cumulatief potentieel neerslagoverschot (neerslag - referentiegewasverdamping) in een aaneengesloten periode in het zomerhalfjaar) en het bodemtype. Voor de grondwaterstand gaat men uit van de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) en de GLG. Natschade wordt bepaald uit het grondwaterstandsverloop en een ‘wateroverlastfactor’, die de afwijkingen van het verloop in een bepaald jaar ten opzichte van het gemiddelde compenseert. De wateroverlastfactor is gebaseerd op uitsluitend gegevens van de neerslagsom in een gegeven jaar in relatie tot de dertig jarig gemiddelde neerslagsom (Bouwmans, 1990).

De TCGB-tabellen zijn gebaseerd op simulaties met het onverzadigde zone model MUST (De Laat, 1980). De simulaties zijn gebruikt om de tabellen in te vullen. MUST is een pseudostationair model; de waterbeweging in de bodem wordt benaderd als een aaneenschakeling van stationaire toestanden (Bouwmans 1990). Binnen de wortelzone wordt de stijghoogte overal gelijk verondersteld (geen verticale stroming binnen de wortelzone). Voor het opstellen van de tabellen zijn tijdstappen van 10 dagen gehanteerd.

### AGRICOM

Rijkswaterstaat gebruikt voor de landelijke verkenning zoetwatervoorziening het model AGRICOM. AGRICOM (Van Bakel et al., 2009b) is een agro-economisch model dat op basis van de resultaten van een hydrologisch model kosten en baten voor de landbouwsector berekent. Dit betreft de effecten van te droge, te natte of te zoute omstandigheden op de Nederlandse landbouw (Van Bakel et al., 2009b). AGRICOM is in gebruik voor landelijke analyses als nabewerking op het NHI. Gedetailleerde hydrologische berekeningen uit het NHI worden voor AGRICOM omgezet in langjarig gemiddelde grondwaterstanden (GxG-waarden). Uit de berekende GLG en GHG worden met zogenaamde IKC-tabellen (Huinink, 1993) opbrengstdepressies voor droogte bepaald, uitgedrukt in zowel geld als in biomassa. 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 en Huinink, 2002).

Met AGRICOM is het mogelijk om de opbrengstderving in individuele jaren te bepalen aan de hand van transpiratiereducties en dus niet met GxG-waarden en tabellen. De ontwikkeling van AGRICOM (gecoördineerd door Rijkswaterstaat) loopt parallel aan de actualisering van de TCGB- en HELP-tabellen.

### KRITIEK

De berekening van zowel de nat- en droogteschade is in elk van hiervoor beschreven methodes niet meer van deze tijd. 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 klimaatrobuust 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 delta-instrumentarium.

De HELP tabellen zijn een fraai voorbeeld van een metamodel: modelresultaten (van LAMOS) zijn verwerkt tot een ander model, in dit geval een tabel waarmee de droogteschade als functie van de GHG en de GLG kan worden bepaald. Echter, de wijze van berekening is gedateerd en de uitkomsten zijn niet toepasbaar onder veranderende klimatologische omstandigheden. Een niet-stationair en qua verticale schematisering gedetailleerder model als SWAP (Van Dam et al., 2008) geeft een realistischer beeld van de drukhoogte en vochtgehaltes in de wortelzone en daarmee ook in de berekende reducties van de gewasverdamping (transpiratiereductie) en hiermee opbrengstreductie.

Zowel de HELP- als TCGB-tabellen zijn gebaseerd op de meteorologische condities van de periode 1951-1980. De Bosatlas van het Klimaat laat zien dat zowel de totale hoeveelheid neerslag en de referentieverdamping zijn toegenomen, net als het aantal dagen met extreme neer-

slag (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. Denk daarbij aan zwaardere machines, maar ook aan adaptatiemogelijkheden zoals aandrijving op alle wielen en bredere en/of slappere banden. 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 vóórkomen 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 TCGB- en HELP-tabellen, omdat geen rekening wordt gehouden met de moderne bedrijfsvoering en huidige wet- en regelgeving. Een vernieuwde methode zal volgens de sector daarmee rekening moeten houden.

We kunnen vaststellen dat de HELP/TCGB-tabellen:

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

In dit project worden deze kritiekpunten weggenomen, door gebruik te maken van een actueel hydrologisch model, actuele meteorologische condities en kennis van de processen in de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer.

# 3

# (KLIMAAT)ROBUUSTE VERTALING VAN WATERHUISHOUDKUNDIGE CONDITIES NAAR OPBRENGSTDEPRESSIE

Dit hoofdstuk geeft achtergrondinformatie die van belang is voor een (klimaat)robuuste vertaling van waterhuishoudkundige condities naar opbrengstdepressie. Of het nu om landbouwgewassen gaat of om natuurlijke vegetaties, in beide gevallen wordt het functioneren van planten bepaald door de beschikbaarheid van water, zout, nutriënten, maar ook van zuurstof in de bodem. Planten proberen altijd voldoende water en zuurstof op te nemen uit de bodem voor een maximale gewasgroei. Als de beschikbaarheid van water en zuurstof in de wortelzone onvoldoende is om aan hun vraag te voldoen, zullen planten respectievelijk droogte- en zuurstofstress ondervinden. Ook als de zoutconcentratie in het bodemvocht te hoog is, zal de wateropname afnemen.

Om klimaatrobuuste relaties op te stellen tussen effecten van een verandering in de waterhuishoudkundige situatie en gewasopbrengst, zoals beoogd in dit project, moeten de processen in de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer beschouwd worden. Daarop gaan we hieronder nader in[2].

## 3.1 PLANTENGROEI EN TRANSPIRATIE

Planten hebben water nodig voor biochemische reacties en om hun celspanning in stand te houden, maar vrijwel al het water dat opgenomen wordt door de plantenwortels verdwijnt via transpiratie door de stomata (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. Bij niet optimale bodemvochtcondities (te droog, te nat of te zout) sluiten planten de stomata, waardoor het waterverlies door transpiratie afneemt. Hierdoor wordt echter ook de opname van $CO_2$ belemmerd, is er sprake van minder fotosynthese, minder groei en dus minder biomassa. Een tekort aan water heeft dus invloed op de opbrengst van landbouwgewassen.

Potentiële gewasopbrengsten kunnen berekend worden aan de hand van werkelijke meteorologische omstandigheden, maar ervan uitgaande dat standplaatsfactoren, zoals vochtvoorziening, optimaal zijn. Potentiële gewasopbrengsten kunnen stijgen door veranderingen in klimatologische omstandigheden (zoals temperatuur en $CO_2$-concentratie), maar ook door technologische ontwikkelingen.

Gewasschade door droogte kan worden bepaald door het te koppelen aan transpiratiereductie. Wanneer de bodemvochtcondities optimaal zijn voor planten om te groeien, kunnen ze optimaal transpireren en is er sprake van potentiële transpiratie. Zijn de bodemvochtcondities

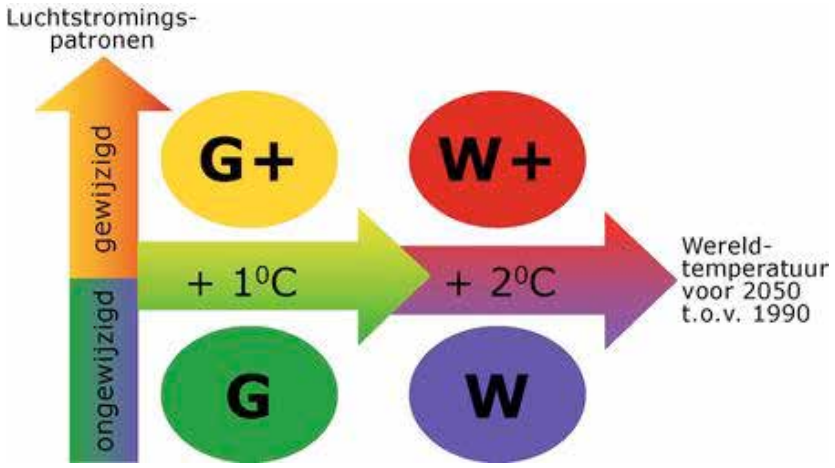
2 Tekst deels ontleend aan Bartholomeus et al. (2012); Bartholomeus (2010)).

niet optimaal, dan reduceert de potentiële tot de actuele transpiratie. Gewasopbrengstderving is gecorreleerd aan deze transpiratiereductie (De Wit, 1958).

## 3.2 KLIMAATVERANDERING

Droogte zal in de nabije toekomst steeds meer een probleem worden. De CO2-concentratie en de temperatuur in de atmosfeer stijgen en neerslagpatronen veranderen. De KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050 (Figuur 2) sluiten aan bij de verwachte wereldwijde temperatuurstijging van tussen +1°C (Gematigde scenario's G) en +2°C (Warme scenario's W). Naast de temperatuurstijging is voor Nederland ook de overheersende windrichting van belang. De temperatuurstijging kan leiden tot een veranderende windrichting. De toevoeging '+' in Figuur 2 geeft aan dat met name in de zomer de kans op wind uit het oosten toeneemt. Deze windrichting gaat gepaard met een grotere kans op droog en warm weer (Droogers, 2009; Van den Hurk et al., 2006). De W en W+ scenario's worden inmiddels als meest waarschijnlijk aangeduid (IPO, 2009).

FIGUUR 2 SCHEMATISERING VAN DE KNMI'06 KLIMAATSCENARIO'S (WWW.KNMI.NL)




TABEL 1 EFFECTEN VAN KLIMAATVERANDERING OP TEMPERATUUR, NEERSLAG EN EVAPOTRANSPIRATIE IN NEDERLAND VOOR DE VIER KNMI'06 SCENARIO'S (VAN DEN HURK ET AL., 2006)

| | Scenario | | | |
|---|---|---|---|---|
| Variabele | G | G+ | W | W+ |
| *zomer (juni-juli-augustus)* | | | | |
| gemiddelde temperatuur °C | +0.9 | +1.4 | +1.7 | +2.8 |
| gemiddelde neerslag % | +2.8 | -9.5 | +5.5 | -19.0 |
| aantal natte dagen % | -1.6 | -9.6 | -3.3 | -19.3 |
| neerslag op natte dag % | +4.6 | +0.1 | +9.1 | +0.3 |
| referentie verdamping % | +3.4 | +7.6 | +6.8 | +15.2 |
| *winter (december-januari-februari)* | | | | |
| gemiddelde temperatuur °C | +0.9 | +1.1 | +1.8 | +2.3 |
| gemiddelde neerslag % | +3.6 | +7.0 | +7.3 | +14.2 |
| aantal natte dagen % | +0.1 | +0.9 | +0.2 | +1.9 |
| neerslag op natte dag % | +3.6 | +6.0 | +7.1 | +12.1 |

De temperatuurstijging heeft invloed op de lengte van het groeiseizoen; met name in de W en W+ scenario's begint het groeiseizoen eerder (IPO, 2009). Temperatuur en $CO_2$-concentratie hebben invloed op de potentiële transpiratie van de planten. Een veranderend neerslagpatroon (meer intensieve neerslag en langdurig droge perioden), heeft invloed op de vochtvoorziening. Resultaten uit de Droogtestudie Nederland (Droogtestudie Nederland www.droogtestudie.nl) geven bijvoorbeeld aan dat het bodemvochttekort door klimaatverandering zal stijgen. Dit komt doordat de potentiële evapotranspiratie zal toenemen, terwijl wijziging van het neerslagpatroon (meer in de winter, minder in de zomer) ervoor zorgt dat de actuele evapotranspiratie zal afnemen.

Ondanks dat gemiddelde grondwaterstanden door klimaatverandering nauwelijks lijken te veranderen (Droogtestudie Nederland www.droogtestudie.nl), nemen vochttekorten aanzienlijk toe. Bovendien heeft klimaatverandering door de stijging van de $CO_2$-concentratie in de atmosfeer ook invloed op de groei van landbouwgewassen: hogere concentraties leiden tot een hogere biomassa (Droogers, 2009). Aan de andere kant kunnen planten door een verhoogde $CO_2$-concentratie makkelijker aan hun koolstofbehoefte voldoen, waardoor de stomata minder ver open hoeven staan en het vochtverlies door transpiratie vermindert (Kruijt et al., 2008).

Behalve droogteschade zal ook natschade in de toekomst mogelijk een steeds groter probleem worden door de toename van intensieve neerslag gedurende het groeiseizoen. Onderzoek toont aan dat buien mogelijk zelfs nog extremer worden dan het KNMI in 2006 heeft gedacht (Klein Tank en Lenderink, 2009). Vooral de combinatie van hoge temperatuur en intensieve neerslag is schadelijk voor gewassen. Juist de kans op deze combinatie van condities neemt toe door klimaatverandering.

De effecten van klimaatverandering op gewasschade in de landbouw zijn niet eenvoudig te duiden, omdat er tegelijkertijd verschillende complexe processen een rol spelen. Expertkennis is daarom ongeschikt en er zal gebruik gemaakt moeten worden van modellen die zoveel mogelijk gebaseerd zijn op de bepalende fysische en fysiologische processen. Voor klimaatprojecties is sowieso een ander instrument nodig dan de HELP-tabellen, TCGB-tabellen of AGRICOM.

Niet-optimale waterhuishoudkundige omstandigheden resulteren in directe en indirecte effecten op de verdamping en groei van landbouwgewassen. Directe effecten worden veroorzaakt door de remmende invloed van te natte, te droge of te zoute omstandigheden in de wortelzone op de wateropname door de wortels. Indirecte effecten worden veroorzaakt doordat te natte, te droge of te zoute omstandigheden een remmende invloed uitoefenen op de bewerkingsmogelijkheden, de bewortelingsmogelijkheden of de kwaliteit van het oogstbaar product.

## 3.3 DIRECTE EFFECTEN

### 3.3.1 DROOGTESCHADE

Zoals gemeld hebben planten water nodig voor biochemische reacties en om celspanning in stand te houden. Het grootste deel van het water dat opgenomen wordt door de plantenwortels verdwijnt echter via transpiratie door de stomata (huidmondjes) naar de atmosfeer. Dit waterverlies door transpiratie gaat gelijktijdig gepaard met de $CO_2$-opname van de plant, maar voorkomt ook weefselschade door oververhitting. $CO_2$ is nodig voor fotosynthese en dus

voor de productie van biomassa. Bij een tekort aan water sluiten planten de stomata, waardoor het waterverlies door transpiratie afneemt. Ook de gewasopbrengst neemt hierdoor af. Potentiële gewasopbrengsten kunnen worden berekend aan de hand van werkelijke meteorologische omstandigheden, maar ervan uitgaande dat standplaatsfactoren, zoals vochtvoorziening, optimaal zijn. Potentiële gewasopbrengsten kunnen stijgen door veranderingen in klimatologische omstandigheden (zoals temperatuur en $CO_2$-concentratie), maar ook door technologische ontwikkelingen. Gewasschade door droogte kan worden bepaald door het te koppelen aan transpiratiereductie. Wanneer er voldoende water beschikbaar is voor planten om te groeien, kunnen ze optimaal transpireren en is er sprake van potentiële transpiratie. Is er een tekort aan water, dan reduceert de potentiële tot de actuele transpiratie. Modellen voor de onverzadigde zone, zoals SWAP, zijn geschikt voor het bepalen van transpiratiereductie door vochttekort.

### 3.3.2 NATSCHADE

Natschade beïnvloedt de gewasopbrengst indirect via bijvoorbeeld de bewerkbaarheid van de bodem en direct via de doorluchting (aeratie) van de bodem waardoor de zuurstofvoorziening naar plantenwortels plaatvindt. 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 bodemporiën vervangen door water (Figuur 3). 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.

Natschade in de landbouw wordt mogelijk een steeds groter probleem door de toename van intensieve neerslag gedurende een steeds warmer groeiseizoen. Dit probleem is in studies naar de effecten van klimaatverandering op de landbouw vooralsnog niet onderkend, omdat men niet kijkt naar de cruciale processen die natschade veroorzaken. Onderzoek heeft echter aangetoond dat door meer intensieve neerslag en hoge temperaturen, zuurstofstress kan toenemen onder het toekomstige klimaat (Bartholomeus et al., 2008). Ook kan natschade een probleem vormen bij verdrogingsbestrijding, omdat te ondiepe grondwaterstanden tot aanzienlijke schades kunnen leiden.

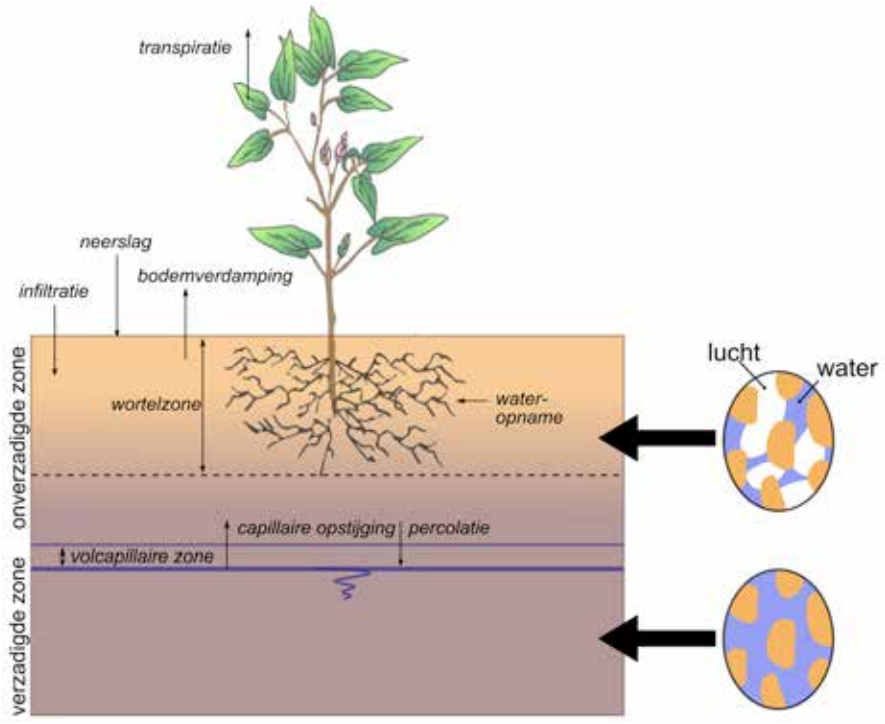
Natschade door zuurstofstress in de landbouw is lange tijd nauwelijks onderzocht. Zuurstofstress is daarom slecht verwerkt in zowel de HELP-tabellen als in modellen als (Meta)SWAP (Van Dam et al., 2008) en WOFOST (Van Diepen et al., 1989). Het effect van aeratie wordt in hydrologische modellen berekend met de reductiefunctie van Feddes (Feddes et al., 1978), welke transpiratiereductie geeft als functie van constante grenswaarden van bodemvochtcondities. Deze functie onderschat echter de transpiratiereductie door anaerobe condities en houdt geen rekening met de temperatuur (Bartholomeus et al., 2008). Juist de combinatie van hoge temperatuur, die de zuurstofvraag van planten verhoogt, en intensieve neerslag, die de beschikbaarheid van zuurstof verlaagt, is schadelijk voor planten en zal in de toekomst vaker voorkomen. Er is nu echter een model beschikbaar (Bartholomeus et al., 2008), dat transpiratiereductie door zuurstofstress als functie van vochtgehalte, temperatuur, bodemtype en planteigenschappen berekent. Dit model wordt in het volgende hoofdstuk gebruikt voor een robuuste berekening van natschade door zuurstofstress.

### 3.3.3 ZOUTSCHADE

De HELP-tabel houdt geen rekening met reductie van de transpiratie en hiermee gewasgroei als gevolg van zout in de wortelzone (Van Bakel en Van den Eertwegh, 2011). In het westen van Nederland kan bij open vollegrondsteelten schade optreden als gevolg van zoute kwel of beregening met grondwater en/of oppervlaktewater met een verhoogde zoutconcentratie. 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 opbrengstreductie 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. winterwortelen) en/of de kwantiteit (door verminderde wateropname door de wortels) van het oogstbaar product kan afnemen.

FIGUUR 3 **DE VERDELING VAN DE BODEM IN DE VERZADIGDE EN ONVERZADIGDE ZONE, MET DE HYDROLOGISCHE PROCESSEN DIE DE BODEMVOCHTCONDITIES IN DE WORTELZONE BEPALEN. PLANTEN ZIJN AFHANKELIJK VAN ZUURSTOF IN DE WORTELZONE. DE GRONDWATERSTAND HEEFT DAAR ALLEEN EEN INDIRECTE INVLOED OP (BARTHOLOMEUS ET AL., 2010).**



## 3.4 INDIRECTE EFFECTEN

### 3.4.1 DROOGTESCHADE

#### REDUCTIE VAN DE GEWASGROEI

Door reductie van de gewasverdamping als gevolg van niet optimale waterhuishoudkundige omstandigheden in de wortelzone (te droog of te zout) wordt ook de groei afgeremd. Dit betekent dat bij herstel van de optimale omstandigheden de gewasverdamping een tijd kan achterblijven bij het niveau dat zou zijn opgetreden als er geen reductie van de gewasverdamping had plaatsgevonden. Deze zogenoemde vervolgschade kan alleen mee worden genomen als er modelmatig een koppeling is tussen gewasverdamping en gewasgroei, zoals bij de koppeling tussen SWAP en WOFOST (Kroes en Supit, 2011).

Een andere methode om de indirecte schade in rekening te brengen is het werken met een *survival fraction* zoals in gedaan in het model AGRICOM (WL_Delft, 1995). De invulling ervan is echter zeer afhankelijk van expertkennis en dus slecht reproduceerbaar.

Bij reductie van de gewasverdamping loopt de temperatuur van het bladerdek op. Dit kan structurele, irreversibele schade aan het gewas tot gevolg hebben, met als uiterst gevolg het volledig afsterven van het gewas.

Beide bovengenoemde vormen van indirecte schade, vervolgschade en hitteschade, worden tot nu toe vrijwel nooit meegenomen bij schadeberekeningen.

#### DROOGTESCHADE DOOR SCHADE AAN OOGSTBAAR PRODUCT

Door het optreden van verdampingsreductie tijdens gevoelige perioden kan de kwaliteit van het oogstbaar product worden verminderd. Bekende voorbeelden zijn:

- Sortering aardappels bij doorgroei. Bij aardappelgewas kan na droogte in de periode van knolzetting nieuwe knolvorming optreden. Dit heeft ongewenste gevolgen voor de sortering en dus de prijs;
- Randen van bladgroente. Bladgroenten zoals sla zijn bijzonder kwetsbaar voor verdampingsreductie omdat de bladranden kunnen indrogen waardoor het product onverkoopbaar wordt;
- Schurft bij aardappelen. Het optreden van schurft wordt verergerd als na de knolzetting er droge omstandigheden in de wortelzone heersen.

Genoemde schades worden in de regel niet meegenomen bij schadeberekeningen, omdat de achterliggende processen moeilijk zijn te parametriseren.

#### AANSLAAN VAN GEZAAIDE OF GEPLANTE GEWASSEN

De kieming van zaad kan worden belemmerd door te droge omstandigheden. In het voorjaar van 2011 is dit veelvuldig opgetreden. Feddes en Van Wijk (1976) hebben getracht de kieming van zaad te koppelen aan de vochtspanning in de wortelzone. Vooralsnog wordt deze vorm van schade meestal niet meegenomen.

Het aanslaan van geplante gewassen is overduidelijk te koppelen aan de vochthuishouding van de wortelzone tijdens het planten. Het betreft echter veelal kapitaalintensieve teelten, zoals die van kool, prei en aardbeien, dat in voorkomende gevallen altijd zal worden beregend.

### 3.4.2 NATSCHADE

Indirecte natschade kent vele uitingsvormen:

- Natte grond is koude grond. Op nat grasland komt de gewasgroei later op gang en bouwland kan later worden ingezaaid. Dit heeft gevolgen voor de opbrengsten;
- Verminderde bewerkbaarheid, berijdbaarheid en betreedbaarheid. Deze zijn te koppelen aan de draagkracht. Hoe natter de wortelzone, hoe geringer de draagkracht, waardoor bewerkingen van het perceel worden belemmerd. Dit leidt tot verlating van zaaien of poten, het niet of niet op tijd kunnen spuiten of oogsten, en het niet kunnen beweiden of maaien.
- Denitrificatie. Bij zuurstofgebrek in de bodem wordt de afbraak van nitraat bevorderd. Gevolg kan zijn stikstofgebrek, waardoor extra stikstofbemesting nodig is;
- Structuurbederf door verslemping of doordat bijvoorbeeld met zware machines toch wordt geoogst onder natte omstandigheden. Lichte zavelgronden zijn gevoelig voor verslemping, die wordt verergerd door natte omstandigheden in de bouwvoor. In verslempte grond is de zuurstofvoorziening naar de plant belemmerd.
- Verminderde gewaskwaliteit, ziekten, schimmels en plagen

Onder langdurig natte omstandigheden kan de graszode van samenstelling veranderen waardoor vaker herinzaai nodig is. Ook kan de draagkracht structureel worden verminderd.

### 3.4.3 ZOUTSCHADE

Zout in beregeningswater kan bij beregenen 'over het gewas' op de plant of op de bodem terecht komen en de volgende schades veroorzaken:

- Bladverbranding, waardoor de fotosynthese en assimilatie wordt geremd;
- Verbranding en verkleuring van oogstbare producten, waardoor de kwaliteit minder wordt;
- Structuurschade op zavel- en kleigronden. Dit is een indirecte vorm van schade. Natriumhoudend water dat op of in de bodem komt kan de stabiliteit van kleimineralen aantasten waardoor structuurbederf van de bodem kan optreden. Dit kan leiden tot verslemping van de toplaag en daardoor extra zuurstofgebrek in de wortelzone.

Een goede maat voor het structuurbederf veroorzaakt door irrigatiewater is de Sodium Adsorption Ratio (SAR) die wordt berekend uit (Facts. Natural resources and Water. Queensland Government (internetpagina)):

$$SAR = \frac{\mathrm{Na}^{+}}{\sqrt{\frac{\mathrm{Ca}^{2+} + \mathrm{Mg}^{2+}}{2}}} \qquad (1)$$

waarin Na, Ca en Mg worden uitgedrukt in milli-equivalenten per liter irrigatiewater.

Een overzicht van enkele andere vormen van indirecte landbouwschades is gegeven in Huinink (2011).

## 3.5 CONCLUSIES

Een (klimaat)robuuste vertaling van waterhuishoudkundige condities naar gewasopbrengst moet gebaseerd zijn op processen in de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer, zoals in dit hoofdstuk betoogd. In fase 1 van het verbeteringstraject van de landbouwschadefuncties richten we ons op het operationaliseren van directe effecten van droogteschade, natschade en zoutschade. Deze op processen gebaseerde aanpak is nodig om ook klimaatprojecties mogelijk te maken. Indirecte effecten worden in fase 1 nog niet geoperationaliseerd.

# 4

# VERBETERINGEN AAN SWAP

Voor het opzetten van het systeem voor het afleiden van metarelaties tussen waterhuishoudkundige condities en opbrengstdepressie is gebruik gemaakt van het model SWAP. Vanuit de proceskennis die is beschreven in het voorgaande hoofdstuk zijn verbeteringen in SWAP doorgevoerd voor het kwantificeren van directe effecten van droogte-, nat- en zoutschade. In dit hoofdstuk beschrijven we de doorgevoerde verbeteringen in SWAP en presenteren we enkele voorbeeldberekeningen.

## 4.1 BESCHRIJVING VAN SWAP (ZONDER DOORGEVOERDE VERBETERINGEN)

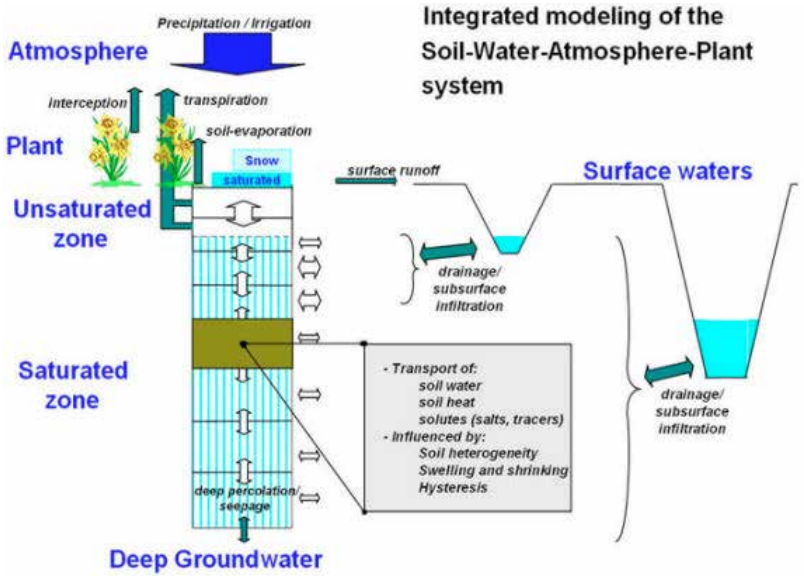
Het SWAP model (Soil-Water-Atmosphere-Plant, Figuur 4) simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en, zij het in beperkte mate, de verzadigde zone. SWAP is ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Alterra-Groene Ruimte. De eerste versie van het SWAP model werd, voor toepassingen op veldschaal, al in 1978 ontwikkeld (Feddes et al., 1978) en sindsdien is het model veelvuldig toegepast en zijn diverse verbeteringen aangebracht. SWAP wordt gezien als het standaardmodel voor het bepalen van de actuele verdamping als functie van meteorologische gegevens gecombineerd met gewas en bodemgegevens (Feddes en Raats, 2004).

De reductie in actuele transpiratie als gevolg van beschikbaar vocht in de bodem wordt weergegeven door de zogenaamde wortelonttrekkingsfunctie. Zowel te droge als te natte omstandigheden leiden tot een niet optimale verdamping omdat plantenwortels dan niet voldoende water kunnen opnemen. Voor het berekenen van reducties in de wateropname door te droge (watertekort) en te natte (zuurstoftekort) omstandigheden wordt de reductiefunctie van Feddes et al. (1978) gebruikt (Figuur 5). Recent is voor de berekening van de wateropname van wortels onder droogte een alternatieve benadering toegevoegd (De Jong van Lier et al., 2008; Metselaar en De Jong van Lier, 2007), waarin planten extra water opnemen uit relatief vochtige bodemlagen wanneer de wortelopname is gereduceerd in meer uitgedroogde bodemlagen. Daarnaast beschrijft SWAP de transpiratiereductie als gevolg van zoutstress. SWAP beschrijft elk van de factoren die deel uitmaken van de verdamping: evaporatie van de bodem, transpiratie en interceptieverdamping. Zowel de potentiële als actuele evaporatie en transpiratie worden berekend. Ook kan met SWAP de bodemtemperatuur op verschillende dieptes worden berekend. Deze temperatuur is afhankelijk van de luchttemperatuur, bodemeigenschappen en het vochtgehalte.

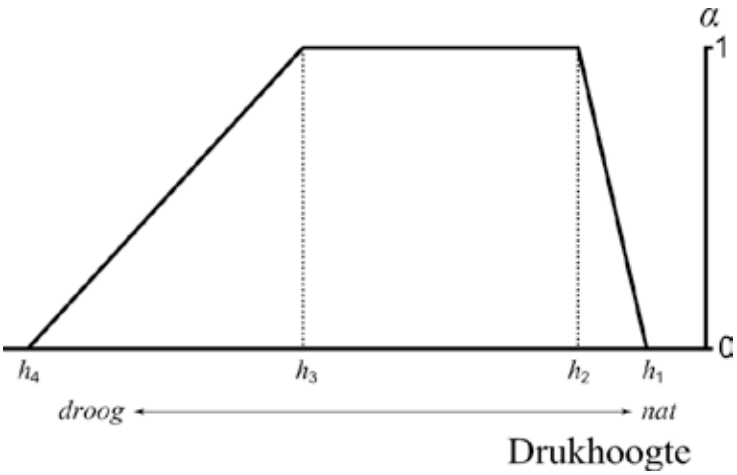
SWAP is ontwikkeld voor toepassing op veldschaal, maar wordt tevens ingezet voor het simuleren van de waterhuishouding op regionale schaal. Het ontbreken van regionale interacties tussen de SWAP-rekeneenheden stelt beperkingen aan het gebruik van SWAP in regionale toepassingen. MetaSWAP (Van Walsum en Groenendijk, 2008) is ontwikkeld voor gebruik in het NHI en voor gebruik binnen regionale modellering in het algemeen, en maakt gebruik van de rekenresultaten van SWAP om de vochtverdeling en de fluxen te berekenen. De

naam MetaSWAP is bewust gekozen om de relatie met SWAP als referentie-model in de naam zichtbaar te maken. Omdat MetaSWAP vereenvoudigd rekent met de resultaten van SWAP verdwijnt per definitie informatie, maar de verschillen in de doelvariabelen (bijv. grondwaterstanden, balanstermen, fluxen) blijken in de praktijk klein te zijn. Welk model in welke situatie het meest geschikt is hangt natuurlijk af van de vraag, de schaal van toepassing, de beschikbare data, de schematisering en de hydrologische werking van het watersysteem. Voor regionale hydrologische studies waar de ruimtelijke interactie een grote rol speelt ligt MetaSWAP in combinatie met een grondwatermodel, zoals geoperationaliseerd in SIMGRO, het meest voor de hand wegens de veel kortere rekentijden dan SWAP. Voor perceeltoepassingen waarvoor specifieke informatie over bodemprofiel en/of bodemfysica voorhanden zijn, heeft gebruik van SWAP de voorkeur.

FIGUUR 4 SCHEMATISCH OVERZICHT VAN HET BODEM-WATER-ATMOSFEER-PLANT SYSTEEM, SAMENGEBRACHT IN HET MODEL SWAP (WWW.SWAP.ALTERRA.NL).




FIGUUR 5 RELATIEVE WORTELOPNAME $\alpha$ (RELATIEF TEN OPZICHTE VAN POTENTIËLE OPNAME) ALS FUNCTIE VAN DE DRUKHOOGTE H VOLGENS FEDDES ET AL. (1978), ZOALS GEBRUIKT VOOR DE BEREKENING VAN DROOGTESCHADE IN SWAP. DE WATEROPNAME DOOR WORTELS NEEMT LINEAIR AF VAN H3 TOT H4 DOOR DROOGTESTRESS. TUSSEN H2 EN H3 IS DE WATEROPNAME OPTIMAAL ($\alpha$=1). VOLGENS DEZE FUNCTIE NEEMT DE WATEROPNAME AF DOOR ZUURSTOFSTRESS TUSSEN DE KRITISCHE GRENSWAARDEN H2 EN H1; IN PLAATS VAN DEZE 'NATTE' KANT VAN DE FUNCTIE IS HET NU MOGELIJK DE ZUURSTOFMODULE VAN BARTHOLOMEUS ET AL. (2008) TE GEBRUIKEN.



Als de bodemvochtcondities niet optimaal zijn, bijvoorbeeld door vochttekort, neemt de potentiële transpiratie af tot de actuele transpiratie (Figuur 5). Niet alleen een tekort aan water in de wortelzone leidt tot transpiratiereductie, maar ook een tekort aan zuurstof, en een te hoog zoutgehalte van het bodemvocht kan tot vochttekort in de plant leiden. Onder suboptimale vochtvoorziening in de wortelzone zal de potentiële transpiratie ($T_p$) afnemen tot de actuele transpiratie ($T_a$), wat gevolgen heeft voor de gewasopbrengst. Relatieve gewasopbrengst ($Y_a/Y_p$) wordt gelijk gesteld aan relatieve transpiratie ($T_a/T_p$) (De Wit, 1958):

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \frac{T_a}{T_p} \tag{2}$$

In het SWAP-model voor de onverzadigde zone wordt het effect van de wateropname van plantenwortels beschreven door het opnemen van de zogenaamde 'sink-term' in de Richards' vergelijking voor stroming van water in de onverzadigde zone. De actuele wateropname van planten wordt berekend door de maximale wateropname $S_{max}$ te vermenigvuldigen met stressfactoren voor droogte-, zuurstof- en zoutstress, respectievelijk $\alpha_{droogte}$, $\alpha_{zuurstof}$, $\alpha_{zout}$ (Kroes et al., 2009):

$$S(z) = \alpha_{droogte}\alpha_{zuurstof}\alpha_{zout}S_{max}(z) \tag{3}$$

$S_{max}$, de maximale wateropname door planten, wordt bepaald door de potentiële transpiratie te verdelen over verschillende diepten $z$ aan de hand van het verloop van de worteldichtheid met de diepte. $S_{max}$ geïntegreerd over de worteldiepte, is dus weer gelijk aan de potentiële transpiratie. Integratie van $S(z)$ over de wortelzone levert de actuele transpiratie.

In dit project is het model SWAP aangepast, zodat de directe effecten van zowel droogtestress, zuurstofstress en zoutstress (klimaat)robuust berekend kunnen worden. Bestaande kennis voor de berekening van zuurstofstress en zoutstress is binnen SWAP geoperationaliseerd.

## 4.2 AANPASSING BEREKENING DIRECTE EFFECTEN

### 4.2.1 DROOGTESCHADE

Voor de berekening van directe effecten van droogteschade ($\alpha_{droogte}$, vergelijking ) is de standaardmethode van SWAP gebruikt (Kroes et al., 2009), te weten de 'droge' kant van de Feddesfunctie (Figuur 5).

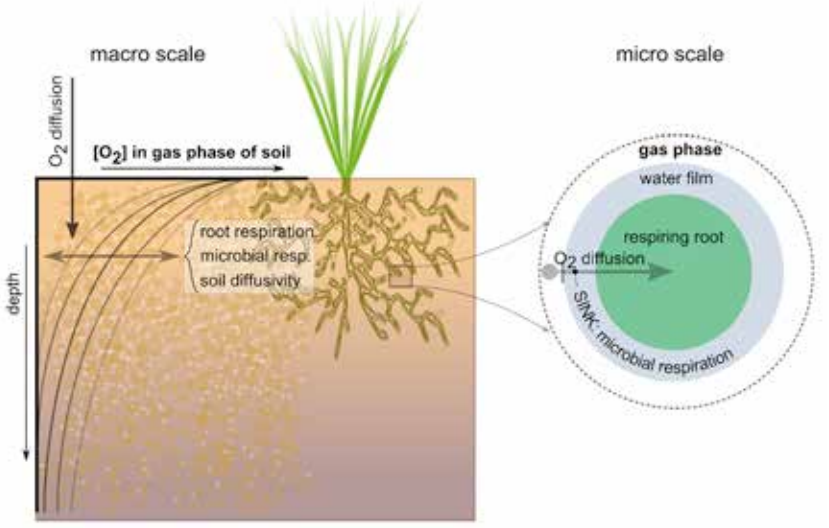
Een vergelijking met de TCGB-tabellen (simulaties met MUST) is in 2012 gedaan door Alterra in opdracht van de AdviesCommissie Schade Grondwater ACSG (grasland in pilot Vierlingsbeek). In dit onderzoek heeft Alterra voor het invloedsgebied van de inmiddels gesloten waterwinning Vierlingsbeek de droogteschade in de landbouw berekend met SWAP. De ACSG heeft voor dit gebied onlangs de schade berekend door gebruik te maken van de TCGB-tabellen die ca. 25 jaar geleden zijn vervaardigd met het toenmalige model MUST. Door Alterra is het gebied opnieuw doorgerekend, waarbij is geprobeerd randvoorwaarden en modelconcepten zo goed mogelijk af te stemmen op de toenmalige methodiek en model MUST. Een uitputtende en volledige vergelijking van SWAP met TCGB/MUST kon niet worden gemaakt omdat modellen, data en methodieken niet volledig gelijk te krijgen zijn binnen het beperkte tijdsbestek. Belangrijk is dat de uitkomsten de ACSG wel voldoende vertrouwen hebben gegeven om ver-

der te gaan met de voorgenomen overstap van TCGB-tabellen naar een benadering waarin het SWAP model een centrale rol zal spelen. Onzekerheden rondom de exacte uitkomsten vragen om een uitgebreidere analyse en rapportage, welke in de loop van het komend jaar 2013 wordt verwacht.

### 4.2.2 NATSCHADE

De module van Bartholomeus et al. (2008) voor het berekenen van de effecten van de zuurstofvoorziening op de respiratie- en transpiratiereductie is gebruikt voor het berekenen van de directe effecten van natschade. De module is ingebouwd in SWAP als optie om de 'natte kant' van de functie in Figuur 5 te vervangen. De module was op zichzelf operationeel, maar de aansluiting op SWAP is in orde gemaakt (o.a. aansluiten op gewasbestanden, bodemfysische eigenschappen, stabiliteit/robuustheid). Net zoals de directe effecten van droogteschade – transpiratiereductie door watertekort – kunnen nu de directe effecten van natschade – respiratie- en transpiratiereductie door zuurstoftekort – met SWAP bepaald worden.

FIGUUR 6 SCHEMATISERING VAN DE ZUURSTOFMODULE, GEBRUIKT OM DAGELIJKSE 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).




De zuurstofmodule wordt aangeroepen in de subroutine 'rootextraction.for' en is, evenals de functie in Figuur 5, onderdeel van de zogenaamde 'wateropname-variabele' $S(z)$ (vergelijking .

In de zuurstofmodule wordt transpiratiereductie door zuurstofstress berekend in afhankelijkheid van planteigenschappen en plantfysiologische processen, diepte, gehalte luchtgevulde poriën, bodemtemperatuur, bodemfysische eigenschappen en microbiële activiteit (Figuur 6). Met de zuurstofroutine kan directe natschade (natschade door zuurstoftekort) gekwantificeerd worden, hetgeen voorheen niet goed mogelijk was.

Enkele belangrijke verbeteringen worden hierna geïllustreerd.

#### ZUURSTOFTEKORT EN BODEMEIGENSCHAPPEN

De capaciteit van de bodemmatrix voor zuurstoftransport, de bodemtemperatuur en de diepte bepalen in belangrijke mate bij welke bodemvochtcondities zuurstoftekort optreedt. Zo is de structuur van een zandbodem ongunstig voor een goede zuurstofdiffusie, omdat er weinig

aaneengesloten poriën zijn. Een kleibodem daarentegen is daarvoor veel beter geschikt, vanwege de aaneengesloten luchtgevulde poriën (Håkansson en Lipiec, 2000; Horn et al., 1994; Pierce et al., 1983) (Tabel 2). Dergelijke verschillen kunnen goed gereproduceerd worden met de zuurstofroutine. Om dit te illustreren is met de module voor een zestal bodems uit de Staringreeks (Tabel 3) berekend hoe de transpiratie door zuurstoftekort afneemt met een afname van het gehalte luchtgevulde poriën (Figuur 7). De gegeven waarden uit Tabel 2 en Figuur 7 zijn weliswaar niet één op één te vergelijken, maar ze geven wel aan dat het van belang is de bodemstructuur in relatie tot zuurstoftransport te beschouwen, zoals wordt gedaan in de zuurstofmodule. Voor $\alpha_{zuurstof}$ zijn ook de diepte en bodemtemperatuur van belang. De gevoeligheid van $\alpha_{zuurstof}$ voor deze variabelen is geïllustreerd in Figuur 8. De bodemtemperatuur bepaalt onder meer de zuurstofvraag van plantenwortels. Het onderscheid in het 'hoge' en 'lage' zuurstofverbruik zoals gegeven in Tabel 2 wordt dan ook grotendeels gemaakt door verschillen in de bodemtemperatuur.

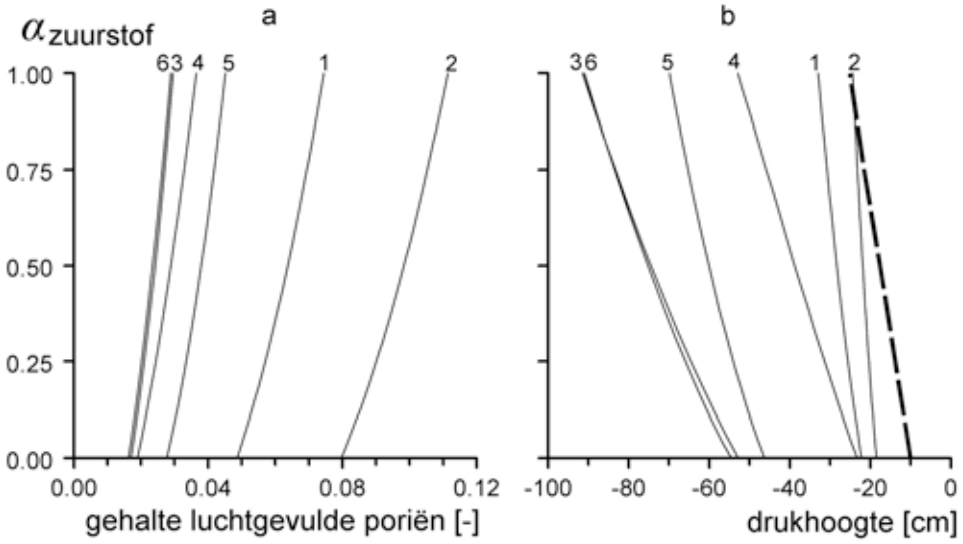
**TABEL 2** **GRENSWAARDEN VOOR HET GEHALTE LUCHTGEVULDE PORIËN BIJ EEN 'HOOG' EN BIJ EEN 'LAAG' ZUURSTOFVERBRUIK, VOOR VERSCHILLENDE BODEMTYPEN, VERKREGEN UIT METINGEN (BAKKER ET AL., 1987); N GEEFT HET AANTAL WAARNEMINGEN. UIT DEZE METINGEN BLIJKT DAT AERATIEPROBLEMEN BIJ EEN ZANDBODEM AL BIJ EEN HOGER GEHALTE LUCHTGEVULDE PORIËN OPTREDEN DAN BIJ EEN KLEIBODEM.**

| Bodemtype | Benodigd gehalte luchtgevulde poriën bij laag zuurstofverbruik | n | Benodigd gehalte luchtgevulde poriën bij hoog zuurstofverbruik | n |
|---|---|---|---|---|
| Zavel | 8 | 2 | 17 | 3 |
| Lichte zavel | 6 | 3 | 16 | 4 |
| Zware zavel | 3 | 3 | 16 | 6 |
| Zandige zavel | 7 | 5 | 18 | 6 |
| Gemiddeld zavel | 6 | | 16 | |
| Zandige leem | 4 | 1 | 14 | 1 |
| Klei | 7 | 2 | 14 | 2 |
| Lichte klei | 9 | 1 | 15 | 3 |
| Zware klei | 4 | 5 | 15 | 3 |
| Gemiddeld klei | 7 | | 14 | |
| Zand | 10 | 3 | 21 | 7 |
| Leemarm zand | 8 | 6 | 19 | 8 |
| Zwak lemig zand | 8 | 1 | 18 | 1 |
| Lemig zand | 9 | 1 | 19 | 1 |
| Kleiig zand | | | 16 | 1 |
| Gemiddeld zand | 9 | | 18 | |
| Loess | | 0 | 20 | 2 |

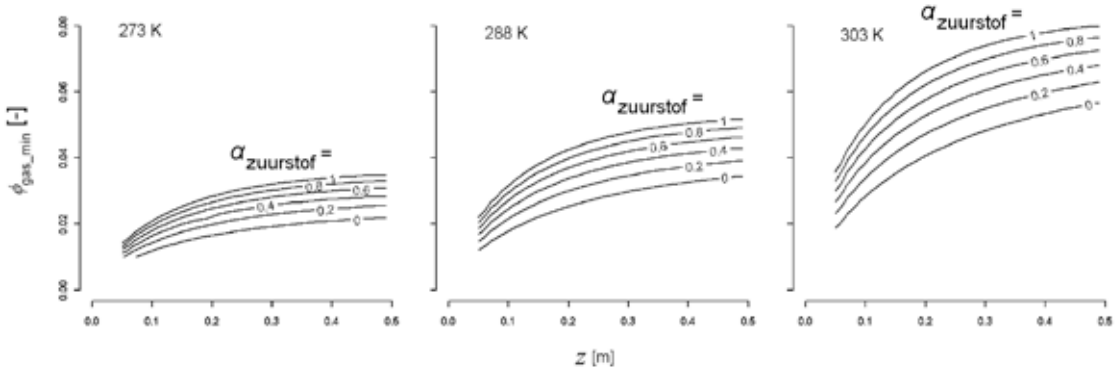
**TABEL 3** **BODEMTYPEN UIT DE STARINGREEKS (WÖSTEN ET AL., 2001) WAARVOOR GRENSWAARDEN VOOR ZUURSTOFTEKORT ZIJN BEPAALD (FIGUUR 7).**

| Nr. | Bodemtype |
|---|---|
| 1 | Zwak lemig, fijn zand (B2) |
| 2 | Grof zand (B5) |
| 3 | Lichte klei (B10) |
| 4 | Zeer zware klei (B12) |
| 5 | Zandige leem (B13) |
| 6 | Siltige leem (B14) |

FIGUUR 7 WATEROPNAME-VARIABELE $\alpha_{ZUURSTOF}$ ALS FUNCTIE VAN BODEMTYPE (TABEL 3) EN (A) GEHALTE LUCHTGEVULDE PORIËN EN (B) DRUKHOOGTE. DEZE FUNCTIES GELDEN VOOR EEN REFERENTIEGRASLAND, EEN BODEMTEMPERATUUR VAN 15°C, EEN ORGANISCH STOFGEHALTE VAN 7,5% EN EEN DIEPTE VAN 25 CM T.O.V. MAAIVELD. DE STIPPELLIJN IN (B) BESCHRIJFT DE NATTE KANT VAN DE FUNCTIE VAN FIGUUR 5. DE REDUCTIEFUNCTIES ZIJN ALLEEN GELDIG VOOR DE HIER GEKOZEN PARAMETERS; VOOR ELK BODEMTYPE GELDT DAT DE WAARDEN VOOR HET GEHALTE LUCHTGEVULDE PORIËN EN DUS OOK DE DRUKHOOGTE VERANDEREN MET BIJVOORBEELD BODEMTEMPERATUUR EN DIEPTE. UIT BARTHOLOMEUS ET AL. (2008).




FIGUUR 8 CONTOURPLOTS VAN DE WATEROPNAME-VARIABELE $\alpha_{ZUURSTOF}$ ALS FUNCTIE VAN DE DIEPTE (Z) EN HET GEHALTE LUCHTGEVULDE PORIËN ($\alpha_{GAS}$) VOOR DRIE BODEMTEMPATUREN: 0, 15 EN 30 °C. ORGANISCH STOFGEHALTE IS 7,5% EN ALLEEN DE RESULTATEN VOOR EEN ZANDIG LEEM (BODEMTYPE 5, TABEL 3) ZIJN GEPRESENTEERD, MAAR DE TREND GELDT VOOR ALLE BODEMTYPEN UIT DE TABEL. DE RANGE VAN $\alpha_{ZUURSTOF}$ KOMT OVEREEN MET DE Y-AS IN FIGUUR 7. UIT BARTHOLOMEUS ET AL. (2008).



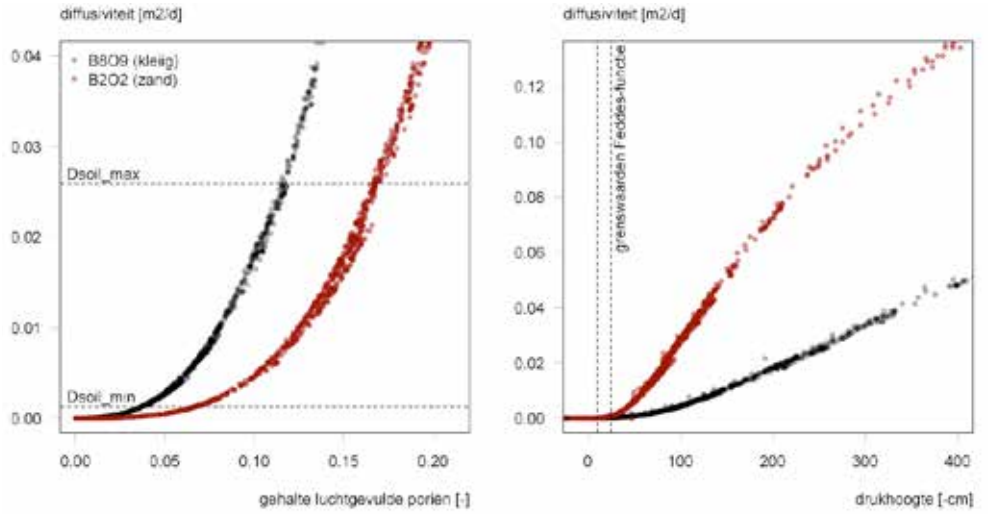

Het is van belang om directe natschade door zuurstoftekort te karakteriseren aan de juiste vochteigenschap, ofwel een maat voor de 'natheid' van de bodem. In de functie van Figuur 5 is transpiratiereductie door zuurstoftekort geschreven als functie van de drukhoogte in de wortelzone. Deze drukhoogte is echter ongeschikt om goed onderscheid te maken tussen verschillende bodemtypen met verschillende diffusie-eigenschappen. Dit is geïllustreerd in Figuur 9, waarbij de diffusiviteit, de capaciteit van de bodemmatrix om zuurstof door te laten, van een zandige en kleiige bodem als functie van gehalte luchtgevulde poriën en drukhoogte is uitgezet.

De grafieken van Figuur 9 – Figuur 12, zijn gebaseerd op SWAP-simulaties met de nieuwe zuurstofmodule, voor fictieve situaties (zand en klei, gras en aardappel), waarbij steeds gesimuleerde (bodem)condities (dagwaarden voor een periode van drie jaar) tegen elkaar zijn uitgezet. Dit zijn de zwarte en rode punten in de grafieken.

De verschillen tussen de bodemtypen voor de diffusiviteit waarbij zuurstoftekort optreedt (Figuur 9), komt overeen met gegevens uit de literatuur; bij een gegeven percentage lucht is een zandige bodem slechter doorlatend voor lucht dan een kleibodem, waardoor bij een zandbodem al bij een hoger gehalte luchtgevulde poriën zuurstoftekort optreedt. De nieuwe zuurstofroutine in SWAP maakt dus een correct onderscheid tussen bodemtypen voor de gevoeligheid voor zuurstoftekort mogelijk.

Als diffusiviteit tegen drukhoogte wordt uitgezet (rechter figuur), vallen twee zaken op: 1) de kritische drukhoogtes die algemeen gebruikt worden in de 'natte kant' van Figuur 5 komen voor beide bodems overeen met een diffusiviteit van ~0 m2/d, ofwel een waarde waarbij geen diffusie meer kan plaatsvinden; 2) bij eenzelfde drukhoogte is de diffusiviteit voor zand hoger dan voor klei. Een uniforme kritische drukhoogte als grenswaarde voor het vaststellen van zuurstoftekort (zoals gedaan in Figuur 5) is dus ongeschikt om onderscheid te maken tussen bodemtypen; het patroon is juist tegengesteld aan de literatuur.

**FIGUUR 9** **DIFFUSIVITEIT VAN TWEE VERSCHILLENDE BODEMTYPEN (ZAND EN KLEI) ALS FUNCTIE VAN HET GEHALTE LUCHTGEVULDE PORIËN (LINKS) EN DE DRUKHOOGTE (RECHTS), OP EEN DIEPTE VAN 30 CM – MV. IN DE LINKERFIGUUR ZIJN DE GRENSWAARDEN VOOR DE BENODIGDE DIFFUSIVITEIT BIJ EEN HOGE EN LAGE ZUURSTOFVRAAG GEGEVEN, VOLGENS BAKKER ET AL. (1987). DE RECHTERFIGUUR GEEFT DEZELFDE DIFFUSIVITEIT VAN DE BODEM, MAAR NU ALS FUNCTIE VAN DE DRUKHOOGTE, ZOALS OOK IN DE REDUCTIEFUNCTIE VAN FEDDES ET AL. (1978) GEBEURT. DOOR DSOIL_MIN EN DSOIL_MAX (LINKERFIGUUR) OVER TE BRENGEN NAAR DE RECHTERFIGUUR, IS DIRECT AF TE LEIDEN DAT DEZE GRENSWAARDEN VOOR ZUURSTOFDIFFUSIE AL BIJ AANZIENLIJK LAGERE DRUKHOOGTES WORDEN BEREIKT DAN VOLGENS DE GRENSWAARDEN DIE ALGEMEEN GEBRUIKT WORDEN IN DE FEDDES-FUNCTIE. DE PUNTEN IN DE GRAFIEKEN ZIJN MET SWAP GESIMULEERDE DAGWAARDEN VAN DE DIFFUSIVITEIT, GEHALTE LUCHTGEVULDE PORIËN EN DRUKHOOGTE, VOOR DE PERIODE 1976-1978 VOOR FICTIEVE SITUATIES MET GRAS.**



## PARAMETRISATIE ZUURSTOFMODULE VOOR GRAS EN AARDAPPEL EN TOETSING AAN LITERATUUR

Behalve van bodemfysische processen hangt zuurstofstress af van plantfysiologische processen en microbiële activiteit. Daarom moeten ook de gewaseigenschappen geparametriseerd worden om de zuurstofroutine te kunnen gebruiken. Tabel 4 geeft de parameterwaarden voor de berekening van zuurstoftekort voor gras en aardappel, zoals afgeleid uit literatuur (meetgegevens). Deze waarden zijn gebruikt voor het afleiden van metarelaties in deze studie (hoofdstuk 6).

**TABEL 4** **PARAMETERWAARDEN VOOR DE ZUURSTOFMODULE VOOR GRAS EN AARDAPPEL. VOOR BETEKENIS VAN DE PARAMETERS, ZIE BARTHOLOMEUS ET AL. (2008).**

| | Naam in SWAP-file | Landbouw gras | Aardappel |
|---|---|---|---|
| Shape factor for exponential decrease of root respiration rate with depth [-] | Shape_factor_rootr | 0.127 (Jackson et al., 1996) | 0.35 (Stalham en Allen, 2001) |
| Relative increase in root respiration at temperature increase of 10 °C [-] | Q10_root | 2.0 (Amthor, 2000) | Idem |
| Relative increase in microbial respiration at temperature increase of 10 °C [-] | Q10_microbial | 2.8 (Fierer et al., 2006) | Idem |
| Specific respiration rate of humus at 25 °C [kg $O_2$/kg C/d] | Specific_resp_humus | 1e-3 (Fierer et al., 2005) | Idem |
| Maintenance coefficient of root [kg $O_2$/kg/d] | C_mroot | 0.016 (Kroes et al., 2009) | 0.016 |
| Dry weight of roots at soil surface [kg/$m^3$] | W_root_ss | 0.785 (Jackson et al., 1996) | Max. 0.4088 (Stalham en Allen, 2001) |
| Specific root length [m root/ kg root] | SRL | 383571 (De Willigen en Van Noordwijk, 1987) | 65000 (Van Oijen et al., 1995) |
| Dry matter content of roots [-] | Dry_mat_cont_roots | 0.075 (De Willigen en Van Noordwijk, 1987) | Idem |
| Air filled root porosity [-] | Air_filled_root_por | 0.05 (De Willigen en Van Noordwijk, 1987) | Idem, zie ook tabel 6.1 in De Willigen en Van Noordwijk (1987); |
| Specific weight of non-airfilled root tissue [kg root/$m^3$ root] | Spec_weight_root_tissue | 1.0e3 'common value' (De Willigen en Van Noordwijk, 1987) | Idem |
| Variance of root radius [-] | Var_a | 4.175e-10 (De Willigen en Van Noordwijk, 1987) | Idem |
| Reduction factor for senescence, used for maintenance respiration [-] | F_senes | 1.0d0 | Idem |
| Ratio root total respiration / maintenance respiration [-] | Max_resp_factor | 5.d0 (Penning de Vries et al., 1979) | Idem |
| Rooting depth [m] | Rooting depth | 0.4 | 0.8 (Feddes et al., 1978; Stalham en Allen, 2001) |

Om te toetsen of deze parametrisatie relevante resultaten geeft voor natschade door zuurstofstress is een aantal modeltests uitgevoerd, welke zijn vergeleken met literatuurgegevens. Achtereenvolgens gaan we hieronder in op de in de zuurstofmodule gesimuleerde bodemrespiratie en $\alpha_{zuurstof}$ als functie van verschillende bodemluchtkarakteristieken.

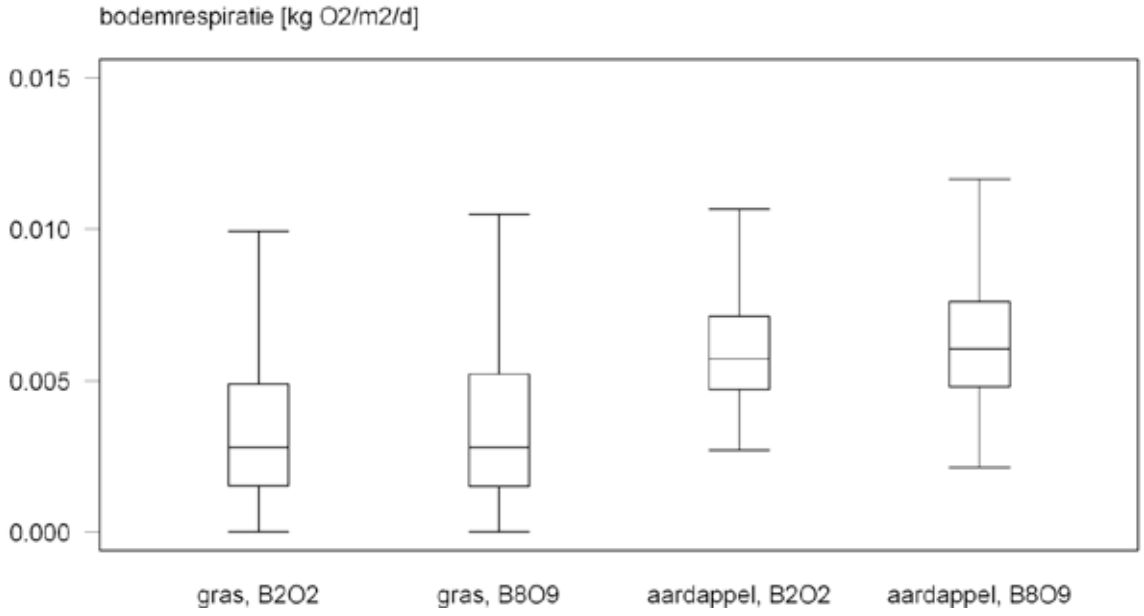
*Bodemrespiratie*
Het zuurstofverbruik door de plantenwortels bepaalt de zuurstofvraag van plantenwortels. Behalve wortelrespiratie vindt in de bodem ook microbiële respiratie plaats; de zuurstof die hiervoor nodig is, is niet beschikbaar voor de plantenwortels. Het is daarom van belang om zowel wortelrespiratie als microbiële respiratie goed te simuleren. Wortelrespiratie en microbiële respiratie worden nauwelijks afzonderlijk gemeten; in de literatuur is meestal de som van beide posten (de bodemrespiratie) gegeven. In deze sectie toetsen we of de parametrisatie zoals gegeven in Tabel 4 realistische waarden voor de gesimuleerde bodemrespiratie oplevert.

Voor landbouw is voor de coëfficiënt voor microbiële respiratie (Specific_resp_humus) de waarde 0.001 kg $O_2$/kg C/d gekozen, hetgeen ongeveer een factor vijf hoger is dan voor een natuurlijk grasland. Daarmee zitten we aan de voorzichtige kant als we de waarden vergelijken met Barajas-Aceves (2005), maar bij 'medium litter quality' volgens Fierer et al. (2005). De coëfficiënt bepaalt in belangrijke mate de microbiële respiratie in de bodem welke samen met de wortelrespiratie de bodemrespiratie bepaalt. We hebben getoetst of met deze parametrisering realistische waarden voor bodemrespiratie worden verkregen. Figuur 10 geeft met de zuurstofroutine gesimuleerde bodemrespiratie voor gras en aardappel en voor zand en klei. De ranges uit Figuur 10 kunnen we vergelijken met gepubliceerde waarden voor bodemrespiratie voor landbouwgronden:

- Lohila et al. (2003) geven bodemrespiratie voor veen en minerale bodems in Finland, en voor gras, graan en aardappelen. Orde van grootte voor bodemrespiratie is 0.0024-0.0204 kg $O_2/m^2/d$
- Raich en Tufekcioglu (2000) geven waarden van bodemrespiratie voor landbouwgronden. In Duitsland wordt voor grassen een waarde gegeven van 0.008 kg $O_2/m^2/d$ (gemiddelde over het jaar)
- Raich en Mora (2005) geven bodemrespiratie voor een Zea Mays in Ottawa, Canada. Beide ranges 0 – 0.0186 kg $O_2/m^2/d$
- Bakker et al. (1987) geven als laag zuurstofverbruik 0.008 kg $O_2/m^3/d$. Voor een laag van 30 cm geldt 0.008/(1/0.3) = 0.0024 kg $O_2/0.3m^3/d$. Uitgaande dat in deze laag van 30 cm alle respiratie plaatsvindt, geldt een verbruik van 0.0024 kg $O_2/m^2/d$. Een hoog verbruik is tien maal hoger, ofwel 0.024 kg $O_2/m^2/d$.

De waarden zoals bepaald met SWAP en de zuurstofroutine (Figuur 10) zitten in de goede ordegrootte. De waarden van het hoogste zuurstofverbruik worden echter niet gehaald.

**FIGUUR 10** **BOXPLOTS VAN GESIMULEERDE BODEMRESPIRATIE (= MICROBIËLE RESPIRATIE + WORTELRESPIRATIE) VOOR GRAS EN AARDAPPEL EN ZAND (B202) EN KLEI (B809). DE BOXPLOTS ZIJN GEBASEERD OP MET SWAP GESIMULEERDE DAGWAARDEN VOOR DE PERIODE 1976-1978.**




*$\alpha_{zuurstof}$ als functie van enkele bodemluchtkarakteristieken*

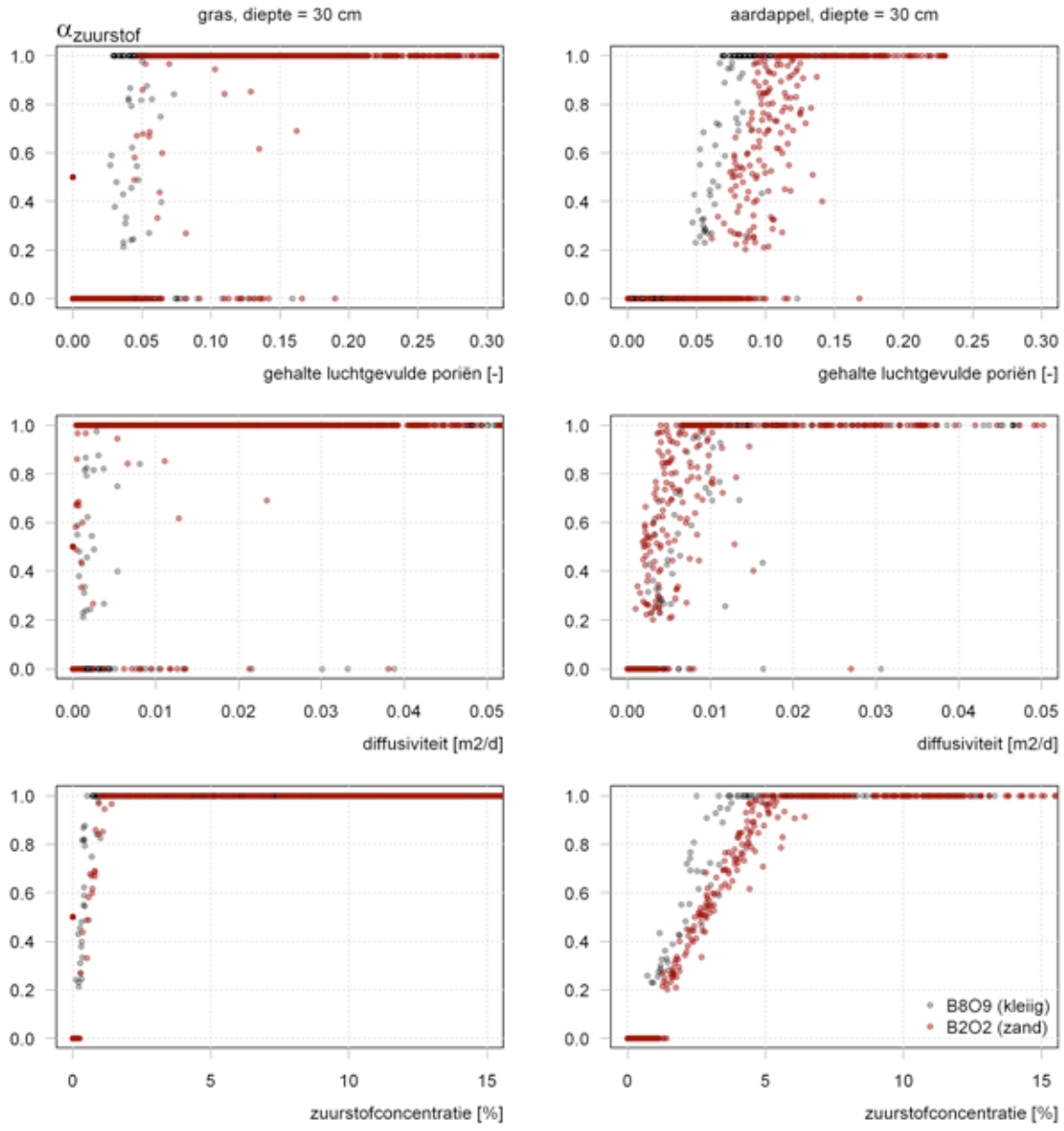
Figuur 11 geeft gesimuleerde $\alpha_{zuurstof}$ voor gras en aardappel, klei en zand, diepte van 30 cm als functie van drie bodemkarakteristieken voor zuurstofstress: gehalte luchtgevulde poriën, diffusiviteit en de volumeconcentratie zuurstof in de bodemlucht (atmosferische zuurstofconcentratie = 21%). Voor de diepte van 30 cm is gekozen om vergelijking met literatuurwaarden van Bakker et al. (1987) mogelijk te maken. Uit de figuren komt naar voren dat

1 bij aardappel eerder zuurstoftekort optreedt dan bij gras (zoals verwacht mag worden),
2 gesimuleerde zuurstofconcentratie in de bodemporiën de duidelijkste relatie met de relatieve respiratie geeft.

Dit heeft dan ook het meest directe verband met de zuurstofbeschikbaarheid voor de plantenwortels. Zowel gehalte luchtgevulde poriën en diffusiviteit zijn nog niet direct aan de zuurstofbeschikbaarheid gekoppeld, omdat bijvoorbeeld de diepte en het verbruik van zuurstof door microbiële activiteit nog niet in deze maten verwerkt is. Voor de zuurstofconcentratie echter, geldt dat de dikte van de waterfilm waardoor zuurstofdiffusie plaatsvindt, de grenswaarde waarbij een zuurstoftekort optreedt beïnvloedt.

Bakker et al. (1987) (pagina 11-12) geven als grenswaarden voor zuurstofconcentraties in de bodemlucht waarbij praktisch nooit, dan wel altijd aeratieproblemen zijn te verwachten op een diepte van 30 cm -mv, respectievelijk de waarden 11% en 1%. Uit Figuur 11 blijkt in de simulaties de ondergrens ook te liggen bij een zuurstofconcentratie van ongeveer 1%. De bovengrens van 11% wordt niet overschreden, wat aangeeft dat in de simulaties zuurstofstress niet overschat wordt. Bakker et al. (1987) hanteren een hogere waarde voor een hoog zuurstofverbruik dan onze simulatieresultaten.

FIGUUR 11 GESIMULEERDE WATEROPNAME-VARIABELE $\alpha_{ZUURSTOF}$ VOOR GRAS EN AARDAPPEL, KLEI EN ZAND, DIEPTE VAN 30 CM IN RELATIE TOT DRIE BODEMKARAKTERISTIEKEN ZOALS GESIMULEERD IN SWAP: GEHALTE LUCHTGEVULDE PORIËN (BOVEN), DIFFUSIVITEIT (MIDDEN) EN DE ZUURSTOFCONCENTRATIE IN DE BODEMLUCHT (ONDER). BAKKER ET AL. (1987) GEEFT ALS GRENSWAARDEN VOOR DIFFUSIVITEIT (MIDDEN) 0.001 $M^2$/D BIJ EEN LAAG ZUURSTOFVERBRUIK EN 0.026 $M^2$/D BIJ EEN HOOG ZUURSTOFVERBRUIK. OP EEN DIEPTE VAN 30 CM (ZOALS HIER GEPRESENTEERD) GELDT DAN EEN BENODIGD ZUURSTOFVERVAL VAN 20% (OFWEL EEN BENODIGDE ZUURSTOFCONCENTRATIE VAN 1%) BIJ EEN LAAG VERBRUIK EN EEN VERVAL VAN 10% (BENODIGDE ZUURSTOFCONCENTRATIE = 11%) BIJ EEN HOOG ZUURSTOFVERBRUIK. DE PUNTEN IN DE GRAFIEKEN ZIJN MET SWAP GESIMULEERDE DAGWAARDEN VOOR DE VARIABELEN OP DE ASSEN, VOOR DE PERIODE 1976-1978 VOOR FICTIEVE SITUATIES.



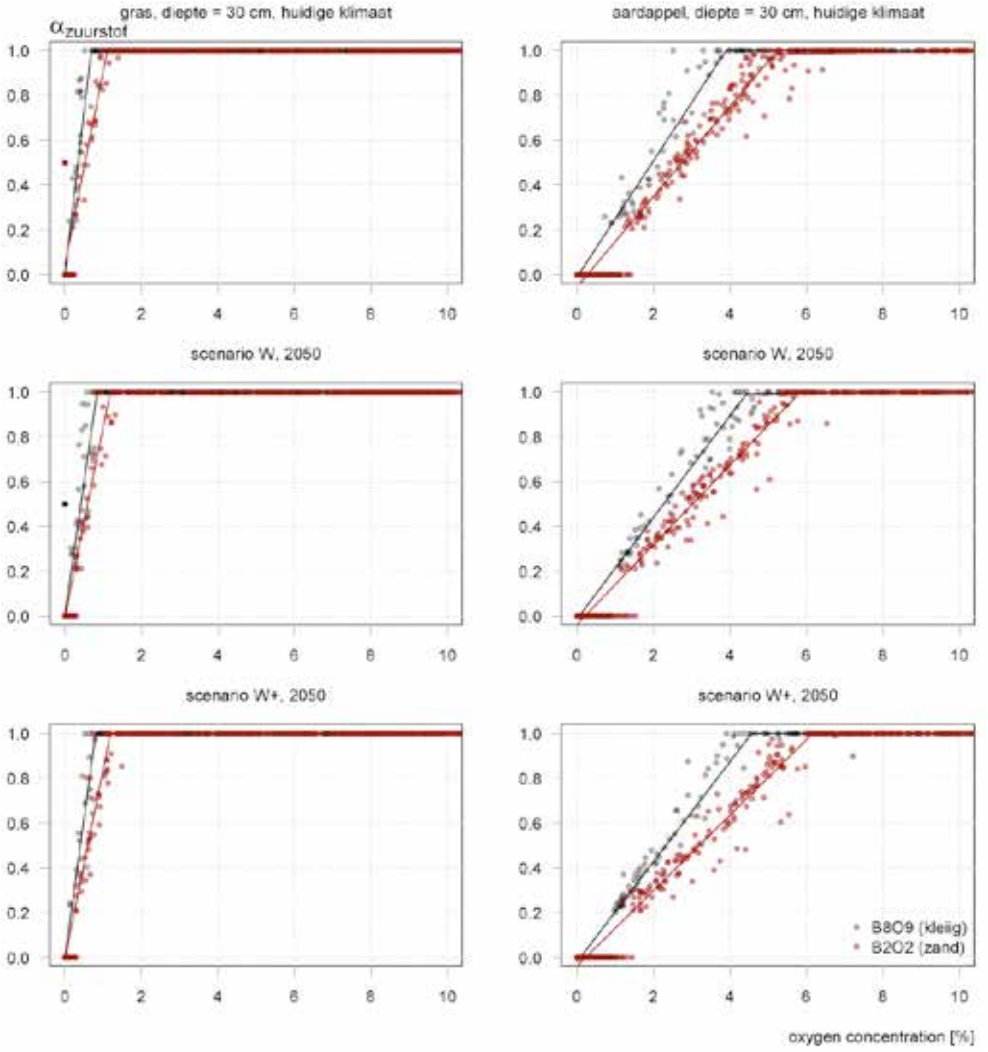

*$\alpha_{zuurstof}$ als functie van zuurstofconcentratie voor klimaatscenario's*

Figuur 12 geeft gesimuleerde wateropname-variabele $\alpha_{zuurstof}$ voor gras en aardappel, klei en zand, diepte van 30 cm als functie van de zuurstofconcentratie in de bodemlucht, voor het huidige klimaat en de klimaatscenario's W en W+. Door de hogere zuurstofvraag treedt zuurstoftekort in het toekomstige klimaat al bij een hogere zuurstofbeschikbaarheid op dan in het huidige klimaat. Dergelijke verschillen komen niet tot uitdrukking in de wateropnamefunctie van Feddes (Figuur 5), omdat deze temperatuur niet beschouwt.

De getoonde relaties gelden alleen voor deze specifiek doorgerekende situaties; de relaties zijn afhankelijk van zowel waterhuishoudkundige als meteorologische condities. Verschillen tussen de bodemtypen kunnen worden verklaard door de dikte van de waterfilm waardoor zuurstofdiffusie moet plaatsvinden: deze dikte is kleiner voor de klei- dan voor de zandbodem, waardoor de benodigde zuurstofconcentratie in de bodemlucht lager is.

Gesimuleerde zuurstofconcentraties in de bodemlucht waarbij zuurstoftekort optreedt zijn aannemelijk, wanneer deze vergeleken worden met de literatuur. Typische waarden waarbij de respiratie voor de helft gereduceerd is door zuurstoftekort, zijn zuurstofconcentraties in de bodemlucht van 1-5% (Glínski en Stępniewksi, 1985; Kowalik, 1985).

**FIGUUR 12** **GESIMULEERDE WATEROPNAME-VARIABELE $\alpha_{ZUURSTOF}$ VOOR GRAS EN AARDAPPEL, KLEI EN ZAND, DIEPTE VAN 30 CM IN RELATIE TOT DE ZUURSTOFCONCENTRATIE IN DE BODEMLUCHT, VOOR HET HUIDIGE KLIMAAT EN DE KLIMAATSCENARIO'S W EN W+. DE PUNTEN IN DE GRAFIEKEN ZIJN MET SWAP GESIMULEERDE DAGWAARDEN VOOR ZUURSTOFCONCENTRATIE EN $\alpha_{ZUURSTOF}$, VOOR DE PERIODE 1976-1978 VOOR FICTIEVE SITUATIES.**



Zuurstofbeschikbaarheid in de bodem is ook nauw gekoppeld aan de nutriëntenhuishouding van de bodem. Daarmee wordt in deze fase van het project niks gedaan, maar op termijn kan de zuurstofmodule in SWAP bijvoorbeeld gekoppeld kunnen worden aan Animo (Groenendijk et al., 2005).

### 4.2.3 ZOUTSCHADE

Bepaling van de zoutschade kan op drie, principieel verschillende, manieren plaatsvinden:

1 Toepassing van normen. Per gewas/teelt is op basis van onderzoek en praktijkervaringen een relatie afgeleid tussen chlorideconcentratie in het beregeningswater en zoutschade, meestal in de vorm van een geknikte relatie. Er zijn hiervoor diverse tabellen beschikbaar (Van Bakel en Stuyt (2011)).
2 Op basis van proeven afgeleide relatie tussen (gemiddelde) chlorideconcentratie van het vocht in de wortelzone en opbrengst. Daarbij zijn experimenteel vastgestelde relaties tussen zout in de wortelzone en opbrengstreductie gebruikt die door Maas en Hoffman (1977) en Maas (1990) zijn vastgesteld voor veelal semi-aride omstandigheden (Van Bakel et al., 2010).
3 Het in het water in de wortelzone opgelost zout zorgt voor een verhoging van de osmotische potentiaal. Die wordt opgeteld bij de onderdruk als gevolg van binding van water aan de bodemmatrix. De som van beide potentialen is meer negatief dan alleen de matrixpotentiaal en de reductie van de wateropname door de wortels, en bijgevolg de reductie van de transpiratie, is daardoor hoger.

Methode 1 is om meerdere redenen niet geschikt. De relaties zijn niet afhankelijk van de droogte in een bepaald jaar, het groeistadium of de wijze van beregening en ze zijn derhalve ook niet klimaatbestendig. Deze bezwaren zijn vergelijkbaar met de kritiek op de huidige HELP-tabellen. Om aan de bewaren tegemoet te komen is het simuleren van de zoutconcentratiedynamiek noodzakelijk.

Modellering en operationalisering van de zoutschadedynamiek is op verschillende manieren mogelijk. Uitgangspunt is dat op een of andere manier het verloop van de chlorideconcentratie in de wortelzone bekend is. Met SWAP is het mogelijk per compartiment een water- en chloridebalans bij te houden en daarmee ook het chlorideconcentratieverloop van de compartimenten in de wortelzone in de tijd te simuleren.

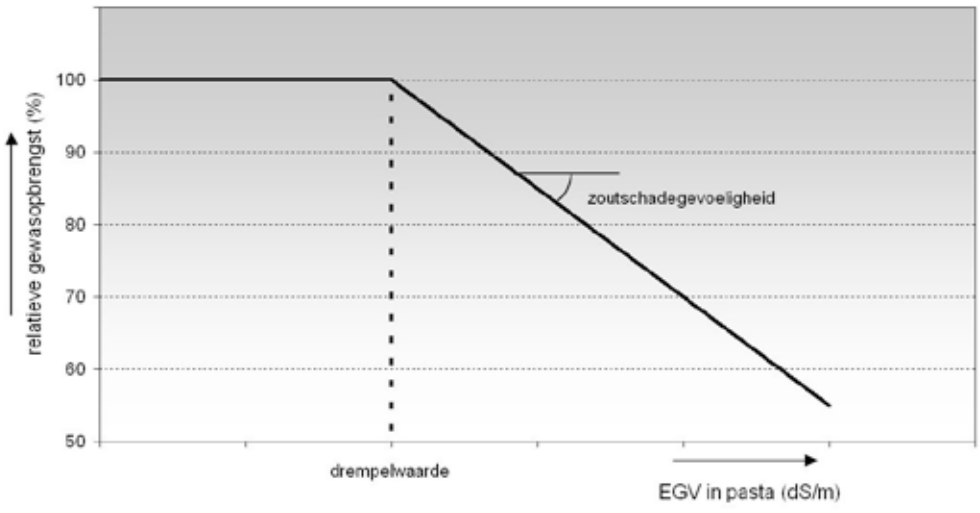
Met de simulatieresultaten van SWAP van het chlorideconcentratieverloop is het mogelijk de zoutschade volgens methode 3 te bepalen. In procesmatige zin is deze methode superieur. Echter de parametrisering is nog niet uitgekristalliseerd en bovendien wordt daarmee maar een deel van de zoutschade meegenomen. Juist bij zoutgevoelige gewassen is de toxische werking waarschijnlijk de belangrijkste oorzaak van zoutschade. Het indirecte (en zeker niet sluitende) bewijs hiervoor is dat de verhouding tussen zoutschade en droogteschade van zoutgevoelige gewassen veel groter is dan bij zouttolerante gewassen. Nader onderzoek moet aantonen of deze bewering hout snijdt en hoe deze methode na 2013 ingezet kan worden. Het is nog te vroeg om deze methode nu al toe te passen.

Er is gekozen voor methode 2, ondanks de bezwaren dat de methode niet is gebaseerd op in Nederland uitgevoerde proeven. Zie ook Van Bakel et al. (2010). Indien methode 3 operationeel wordt kan deze ingepast worden.

Het model SWAP is geschikt gemaakt om de zoutschade als gevolg van zout in de wortelzone te berekenen deze methode. Daartoe zijn de volgende stappen uitgevoerd:

1 Indeling van de zouttolerantie van landbouwgewassen, exclusief glastuinbouw en zeer zoutgevoelige open teelten zoals boomteelt in containers, overeenkomstig de FAO-klassen, in vier zouttolerantieklassen:
   - gevoelig;
   - matig gevoelig;
   - matig tolerant;
   - tolerant.
2 Toedeling van ieder landbouwgewas aan één van deze vier klassen.
3 Conceptualisering van de zouttolerantie in de vorm van een eenduidige geknikte relatie, met een zoutschadedrempel en een zoutschadegevoeligheid gekoppeld aan het Elektrisch Geleidingsvermogen (EGV) in de zogenoemde pasta (toevoegen van water aan een bodemmonster tot een papje ontstaat, waardoor metingen mogelijk zijn). Dit is conform Maas en Hoffman (1977); zie ook Figuur 13.
4 Omrekenen van de EGV naar een chlorideconcentratie. Zie Van Bakel et al. (2010).
5 Per klasse van zouttolerantie: specificatie van de twee parameters. Vooralsnog zijn de parameters niet afhankelijk gesteld van het groeistadium.
6 Omrekenen van de parameters afgeleid voor de pasta naar parameters geldig voor een chlorideconcentratie in de wortelzone die tijdens de proeven dominant is geweest. Hiervoor is een indikkingsfactor van 2 gebruikt, dat wil zeggen de drempelwaarde wordt twee maal zo hoog en de helling twee maal zo klein.
7 Aanpassen van SWAP zodat per compartiment in de wortelzone een reductie van de wateropname wordt gesimuleerd als de chlorideconcentratie in het compartiment de drempelwaarde overschrijdt.
8 De reductie van de verdamping volgt uit sommatie van de reducties van de compartimenten van de wortelzone.

**FIGUUR 13** **RELATIE TUSSEN EGV IN DE PASTA (ZIE PUNT 3) EN GEWASOPBRENGSTREDUCTIE. UIT VAN BAKEL EN STUYT (2011).**



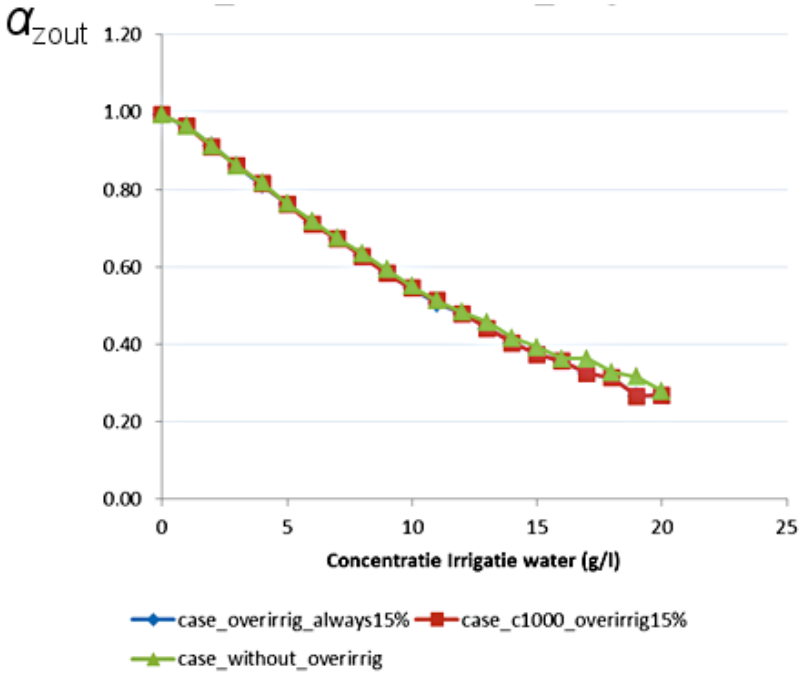

Op deze manier van schadeberekening wordt aangesloten op de berekening van de directe droogte- en natschade. Omdat het directe effect op de wortelopname wordt bepaald, is de methode ook klimaatrobuust. Door de reductie van de wateropname door de wortels te koppelen aan de actuele chlorideconcentratie in de wortelzone, in plaats van deze terug te rekenen

naar de concentratie in de pasta en dan de schadefuncties toe te passen (zoals beschreven in Van Bakel et al. (2010)), kunnen verschillende beregeningstactieken (zoals zuinig beregenen of juist overvloedig beregenen) worden doorgerekend.

*Beregening*

SWAP is zodanig aangepast dat bij het beregenen rekening kan worden gehouden met de chlorideconcentratie in de wortelzone. Het is namelijk voorstelbaar dat in de loop van een droge periode zout zich ophoopt in de wortelzone die met overberegenen kan worden uitgespoeld (leaching). Deze laatste vorm van beregening is ook getest maar leidde niet tot significant andere resultaten (Figuur 14).

FIGUUR 14 EFFECT VAN OPLOPEND CHLORIDEGEHALTE IN BEREGENINGSWATER OP DE REDUCTIE VAN DE GEWASVERDAMPING ($\alpha_{ZOUT}$), VOOR 3 BEREGENINGSTACTIEKEN. SWAP-SIMULATIES ZIJN UITGEVOERD MET ALS KENMERKEN: ZANDGROND, VRIJE DRAINAGE, GEEN INFILTRATIE VANUIT OPPERVLAKTEWATER, ZEER DROGE OMSTANDIGHEDEN GECREËERD OM DROOGTESTRESS TE KRIJGEN WAARBIJ IRRIGATIE NODIG IS. ALS GEWAS IS AARDAPPELEN GEKOZEN. STEEDS IS EEN JAAR DOORGEREKEND MET VERSCHILLENDE IRRIGATIEGIFTEN. DRIE CASES ZIJN DOORGEREKEND: I) ZONDER OVERIRRIGATIE, II) ALTIJD OVERIRRIGEREN, III) OVERIRRIGEREN ALS CONCENTRATIE OP 30 CM-MV BOVEN DE 1000 MG/L KOMT.




Voor gras en aardappelen zijn de parameters voor de modellering van zoutschade gegeven in Tabel 5.

TABEL 5 PARAMETERS VOOR DE RELATIE TUSSEN CHLORIDECONCENTRATIE IN DE WORTELZONE EN DE REDUCTIE VAN DE WATEROPNAME VAN WORTELS, VOOR AARDAPPELEN EN GRASLAND.

| Gewas | Classifictie Zoutschadegevoeligheid | Zoutschadedrempel (g/l) | Zoutschadegevoeligheid (%/g/l) |
|---|---|---|---|
| Aardappelen | Matig gevoelig | 1.2 | 10 |
| Gras | Tolerant | 4.8 | 5 |

## 4.3 SCHEIDEN TRANSPIRATIEREDUCTIE DOOR DROOGTE-, ZUURSTOF- EN ZOUTSTRESS

Om transpiratiereductie als gevolg van niet optimale bodemvochtcondities toe te kunnen schrijven aan droogte-, zuurstof- of zoutstress, is het van belang dat deze posten gescheiden worden. SWAP maakt dit expliciete onderscheidt en geeft de transpiratiereducties door droogtestress (Treddry), zuurstofstress (Tredwet) en zoutstress (Tredsol) in het *.str uitvoerbestand.

## 4.4 PLAUSIBILITEITTOETS SWAP MET DOORGEVOERDE VERBETERINGEN

De plausibiliteit van de aangebrachte veranderingen is getoetst door berekeningen uit te voeren met een set van 35 testcases. Deze berekeningen dienden twee doelen:

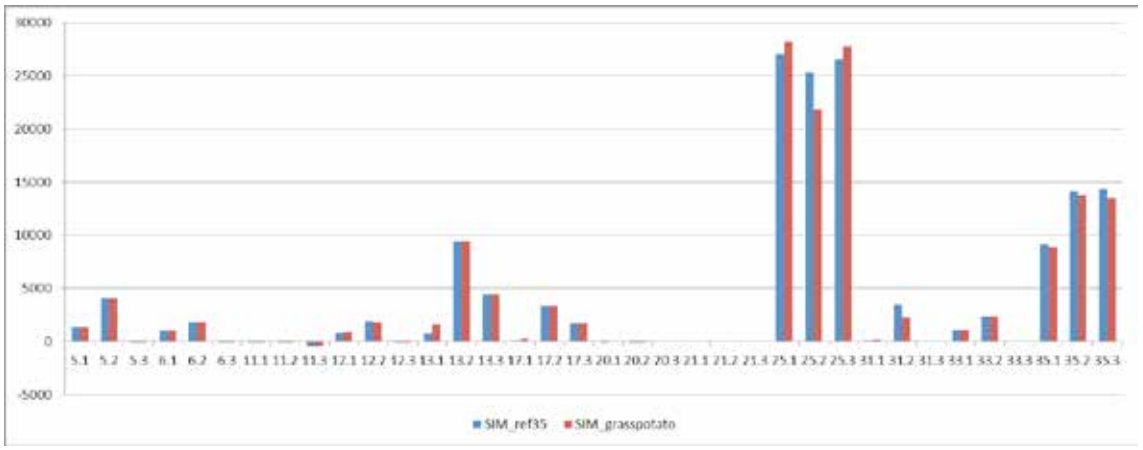
1 Controleren of de modelresultaten hetzelfde blijven ten opzichte van de vorige SWAP-versie, voor die gevallen waar de doorgevoerde veranderingen niet van invloed mogen zijn.
2 Het nagaan of het effect van natschade/ $O_2$-stress volgens Bartholomeus leidt tot resultaten die qua ordegrootte plausibel zijn.

Voor het eerste doel zijn berekening uitgevoerd met 35 standaard testcases. De uitkomsten vertoonden kleine verschillen tussen de meest recente modelversie (swap3.2.37k) en de uitkomsten van Swap3.2.36 (laatste versie op internet www.swap.alterra.nl). De verschillen zijn verklaarbaar en ontstaan door het oplossen van geringe bugs in sneeuwmodule en numerieke oplossingsmethodiek.

Voor het tweede doel werden uit de bestaande 35 testcases die cases geselecteerd waarin grasland en aardappelen voorkomen. Dat bleken er 11 met gras en 1 met aardappel te zijn. Deze testcases zijn doorgerekend met zuurstofstress volgens de functie van Feddes (Figuur 5) en volgens de nieuwe zuurstofmodule. Na parametrisering van het $O_2$-stress gedeelte van de gewasbestanden voor deze 12 cases is de rest van de gewasbestanden zo goed mogelijk afgestemd om de vergelijking zo betrouwbaar mogelijk te maken. Dit lukte niet altijd volledig omdat van de testcases soms gegevens ontbreken en schattingen moesten worden gemaakt (vb: wortelontwikkeling, bulk dichtheid, temperatuursmodellering nodig voor O2-stress en niet voor Feddes-stress). Vervolgens werden alle cases doorgerekend en resultaat volgens oude natschade (Feddes) vergeleken met resultaat nieuwe natschade ($O_2$-stress). Alle cases zijn foutloos volledig doorgerekend. Op basis van de absolute verschillen (Figuur 15) wordt hier geconcludeerd dat de verschillen tussen oude en nieuwe formulering voor natschade voor grasland plausibel zijn; voor aardappelen kon slechts één testcase vergeleken worden (nr 33). De uitkomsten maken aannemelijk dat de zuurstofmodule op een correcte manier in SWAP is ingebouwd en geparametriseerd. Het verdient echter aanbeveling om meer, op gewasgroei gerichte, testcases op te nemen in toekomstige plausibiliteittoetsen.

Op basis van deze voorbeeldberekeningen, en van die gepresenteerd in sectie 4.2, concluderen we dat het aangepaste SWAP model goed werkt en dat we hiermee verder kunnen werken.

**FIGUUR 15** **RESULTAAT SWAP3.2.37K: ABSOLUTE WAARDEN VAN RESULTAAT VAN 12 TESTCASES (GRASLAND EN AARDAPPELEN UIT EEN SET VAN 35 TESTCASES). VAN ELKE CASE ZIJN 3 PERFORMANCE INDICES (PI'S) BEPAALD, WAARVAN IN DE FIGUUR DE RESULTATEN ZIJN WEERGEGEVEN VOLGENS OUDE NATSCHADE (FEDDES, SIM_REF35) EN VOLGENS NIEUWE NATSCHADE (02-STRESS, SIM_GRASSPOTATO). VOOR EENHEDEN VAN PI'S ZIE APART TEST-RAPPORT (WWW.SWAP.ALTERRA.NL).**

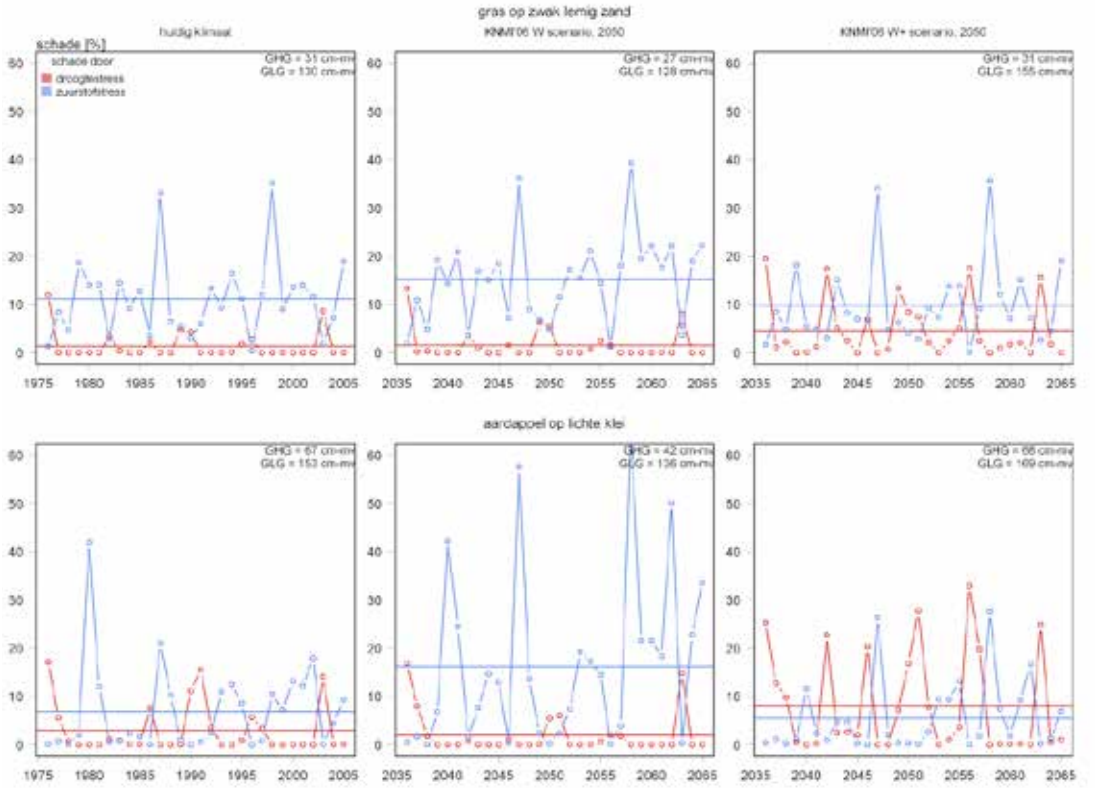



## 4.5 VOORBEELDBEREKENINGEN MET SWAP

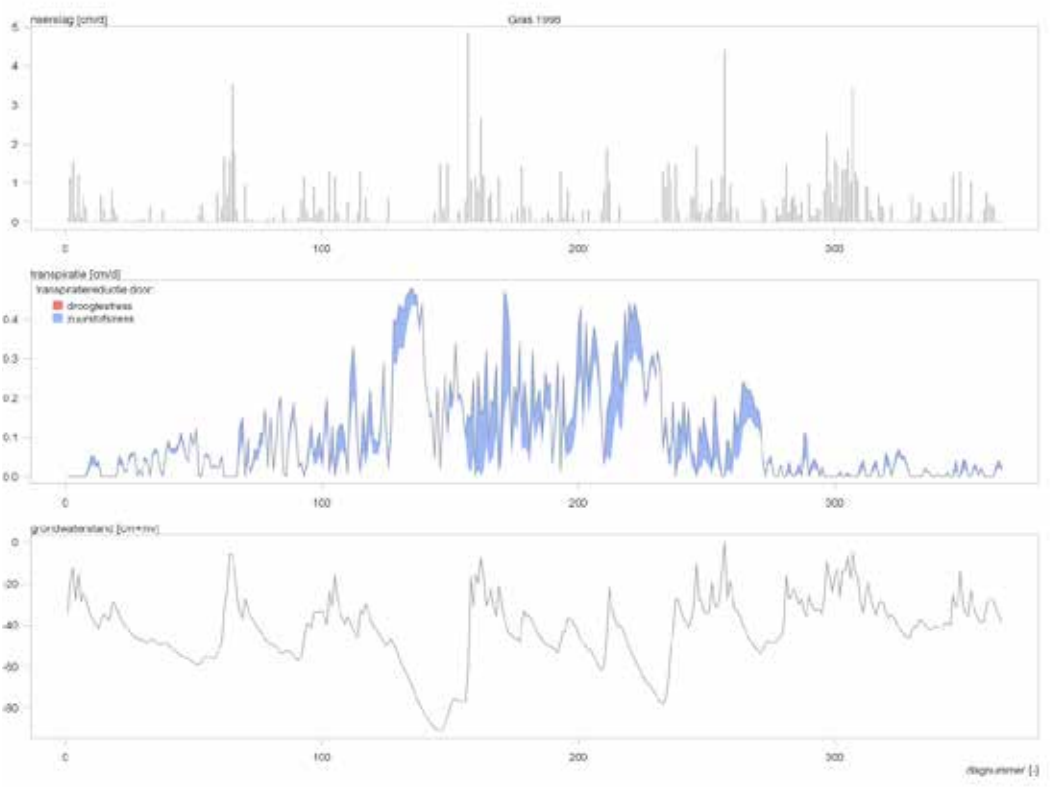
Voor twee cases, te weten 'case Ruurlo' (gras op zwak lemig zand) en 'case Rijnland' (aardappel op lichte klei) zijn enkele voorbeeldberekeningen uitgevoerd. Figuur 16 geeft met SWAP berekende jaarlijkse en klimaatgemiddelde droogtestress en zuurstofstress voor beide cases, voor het huidige klimaat en de klimaatscenario's W en W+ (2050). Uit het gewas, bodemtype en de met SWAP bepaalde GHG en GLG-waarden kan ook de schade volgens de HELP-tabellen worden bepaald. Volgens HELP is de droogteschade voor gras 7%, 6% en 11% en de natschade 5%, 7% en 4% voor respectievelijk het huidige klimaat, W en W+. Droogteschade voor aardappel volgens HELP is 6%, 5% en 8%; natschade is 6%, 11% en 6% (zelfde volgorde).Van belang hierbij is te realiseren dat de HELP-tabellen zowel directe als indirect schades, en alleen langjarig gemiddelde schades bevatten.

In tegenstelling tot de HELP-tabellen, kan met SWAP dus ook de variatie in schades tussen de jaren worden bepaald. Daarnaast is het interessant om binnen (extreme) jaren het verloop van potentiële en actuele transpiratie, en hiermee opbrengstdepressie, inzichtelijk te maken. Figuur 17 en Figuur 18 geven hiervan voorbeelden voor de 'case Ruurlo' en het natte jaar 1998 en droge jaar 2003. In 1998 blijft de grondwaterstand gedurende vrijwel het hele jaar in of tot vlak onder de wortelzone en treedt zuurstofstress op. In 2003 zakt de grondwaterstand diep weg, waardoor onvoldoende vocht in de wortelzone aanwezig is voor transpiratie; er treedt droogtestress op.

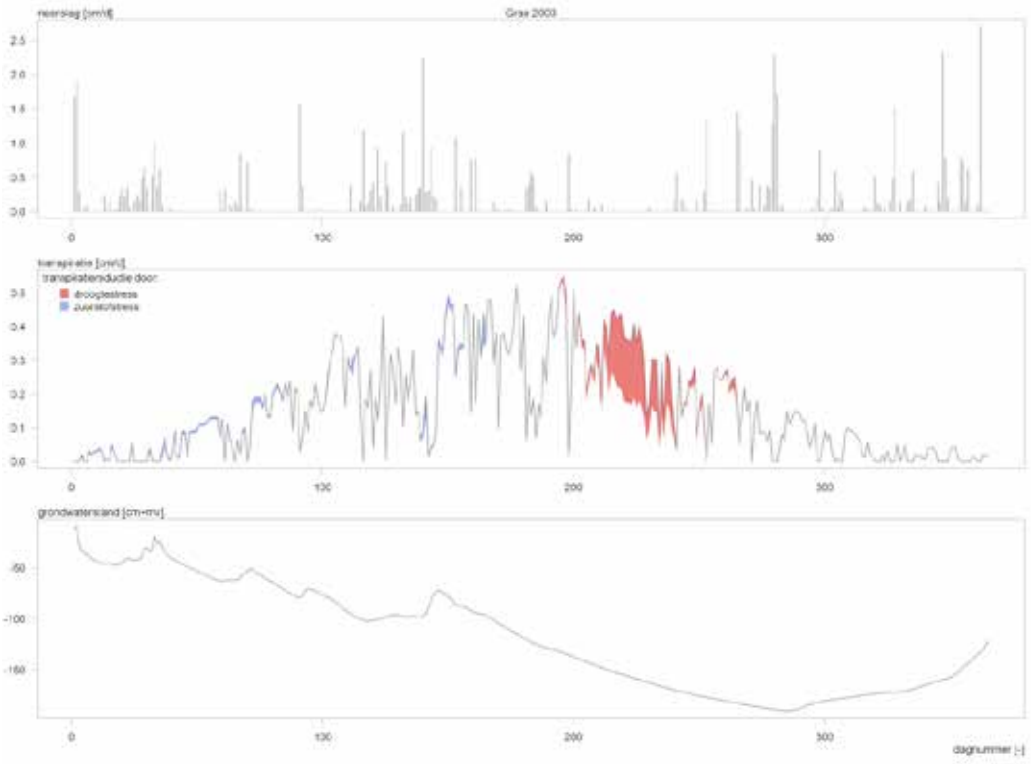
**FIGUUR 16** **MET SWAP BEREKENDE JAARLIJKSE EN KLIMAATGEMIDDELDE (HORIZONTALE LIJNEN) SCHADE DOOR DROOGTESTRESS EN ZUURSTOFSTRESS VOOR GRAS OP ZWAK LEMIG ZAND ('CASE RUURLO', BOVEN) EN AARDAPPEL OP LICHTE KLEI ('CASE RIJNLAND', ONDER), VOOR HET HUIDIGE KLIMAAT EN DE KLIMAATSCENARIO'S W EN W+ (2050).**




**FIGUUR 17** **DAGELIJKSE NEERSLAG (BOVEN), POTENTIËLE TRANSPIRATIE (MIDDEN, BOVENSTE LIJN), ACTUELE TRANSPIRATIE (MIDDEN, ONDERSTE LIJN) EN TRANSPIRATIEREDUCTIE VEROORZAAKT DOOR DROOGTESTRESS (ROOD) OF ZUURSTOFSTRESS (BLAUW)EN GRONDWATERSTANDSVERLOOP (ONDER), VOOR GRAS OP ZWAK LEMIG ZAND ('CASE RUURLO') EN HET NATTE JAAR 1998.**

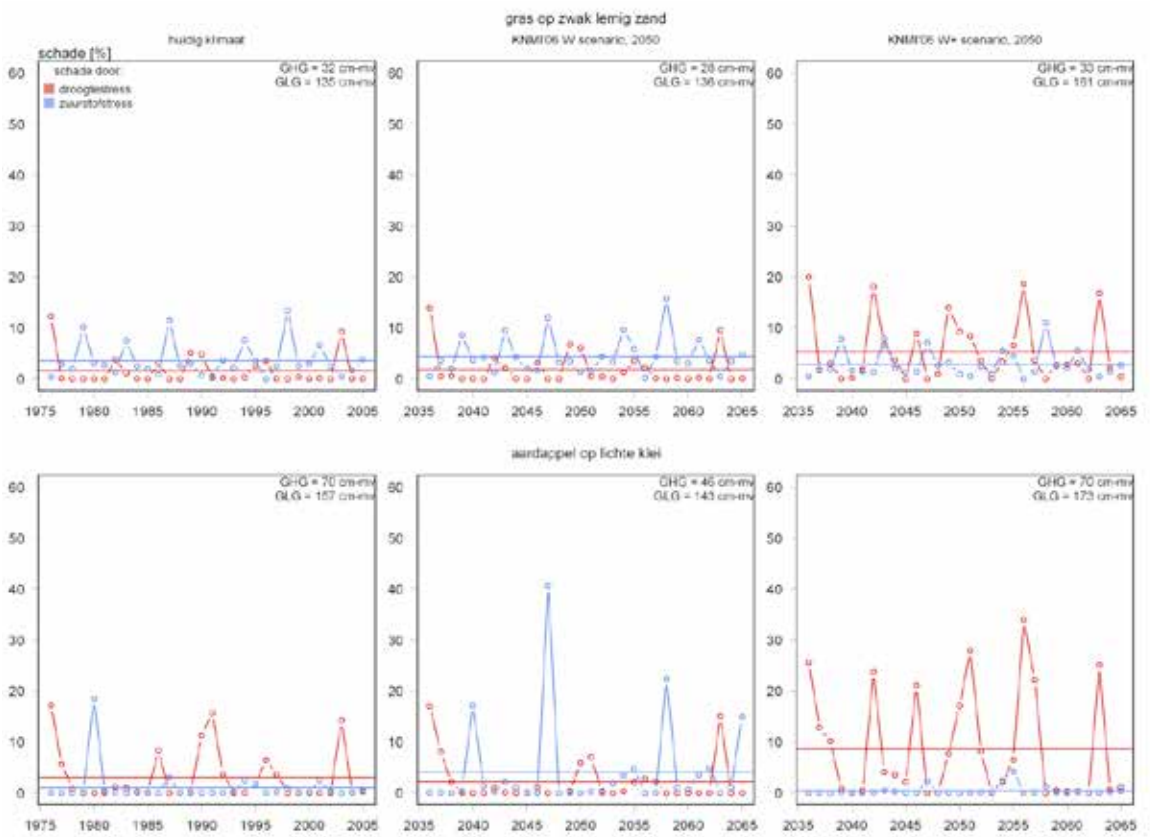


**FIGUUR 18** **IDEM FIGUUR 17 MAAR NU VOOR HET DROGE JAAR 2003.**

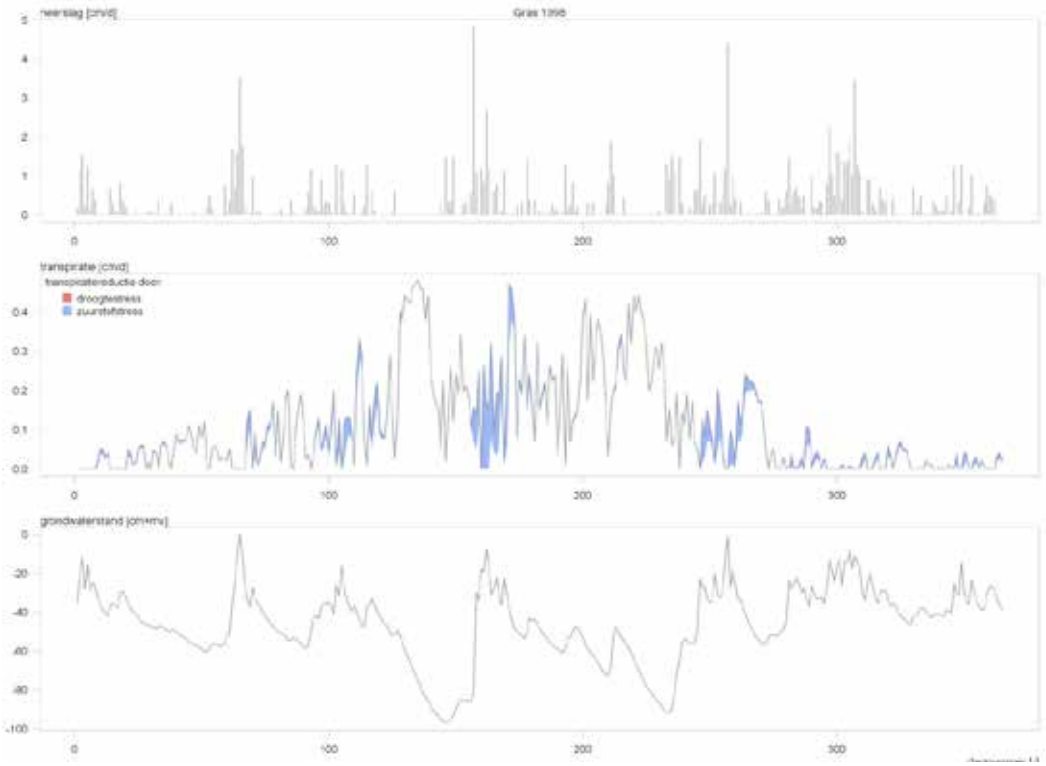



Dezelfde cases zijn ook doorgerekend zonder de nieuwe zuurstofmodule, maar met de Feddes-functie. Figuur 19 - Figuur 21 geven de gesimuleerde droogtestress en zuurstofstress, voor dezelfde cases als voor Figuur 16 - Figuur 18, met als verschil dat voor onderstaande figuren de reductiefunctie van Feddes (Figuur 5) is gebruikt voor de berekening van transpiratiereductie door zuurstofstress. Zoals verwacht mocht worden op basis van onder andere Figuur 7 en Figuur 9, is de natschade door zuurstofstress zoals berekend met de Feddes-functie lager dan die berekend met de nieuwe zuurstofmodule. Dit heeft ook gevolgen voor de gesimuleerde grondwaterstanden. Gegeven de analyse van kritische bodemvochtcondities (Figuur 7 - Figuur 11) en de theoretische bezwaren tegen het gebruik van drukhoogte als kritische maat voor zuurstofstress, mag geconcludeerd worden dat door het gebruik van de Feddes-functie voor de berekening van natschade door zuurstofstress, de zuurstofstress onderschat wordt. Zoals eerder in dit hoofdstuk beschreven maakt de methode tevens geen correct onderscheid tussen verschillende bodemtypen (bijvoorbeeld klei en zand) en is de methode ongeschikt voor klimaatprojecties, omdat de temperatuur niet wordt beschouwd.

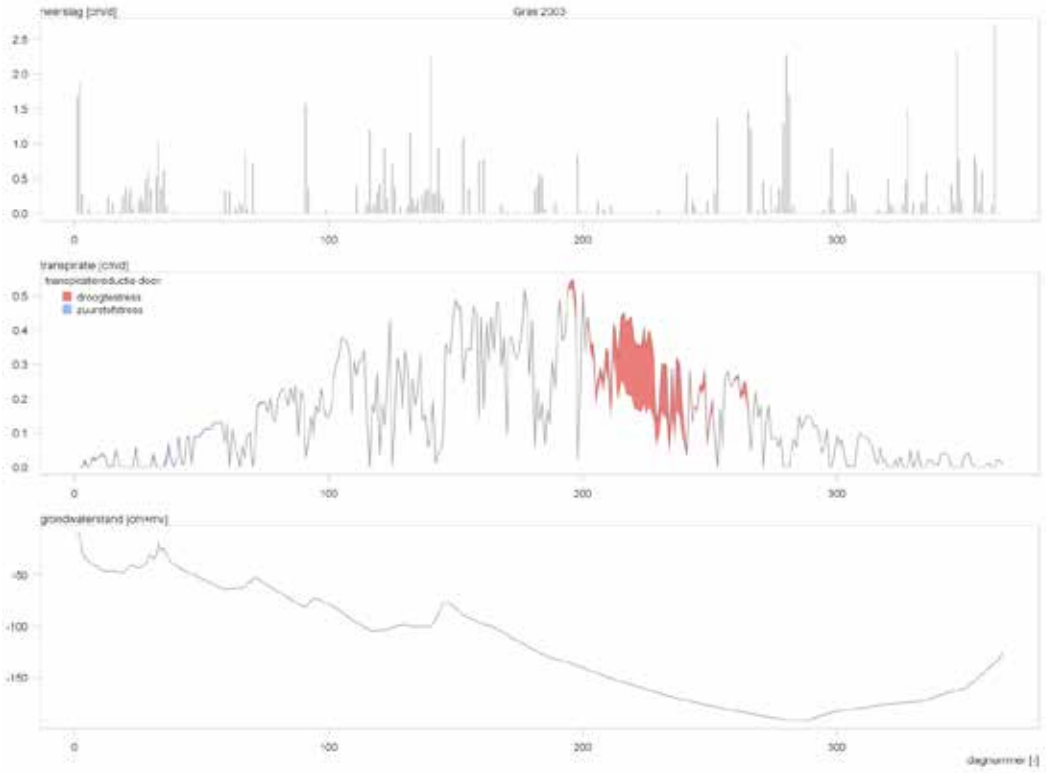
**FIGUUR 19** **IDEM FIGUUR 16, MAAR NU MET ZUURSTOFSTRESS VOLGENS DE FUNCTIE VAN FEDDES (FIGUUR 5), MET H1 = -15 CM EN H2 = -25 CM.**




**FIGUUR 20** **IDEM FIGUUR 17, MAAR NU MET ZUURSTOFSTRESS VOLGENS DE FUNCTIE VAN FEDDES (FIGUUR 5), MET H1 = -15 CM EN H2 = -25 CM.**



**FIGUUR 21** **IDEM FIGUUR 18, MAAR NU MET ZUURSTOFSTRESS VOLGENS DE FUNCTIE VAN FEDDES (FIGUUR 5), MET H1 = -15 CM EN H2 = -25 CM.**




## 4.6 CONCLUSIES

Een vergelijking van droogteschade zoals bepaald met SWAP en met de TCGB tabellen, geeft vertrouwen om verder te gaan met de benadering voor het berekenen van landbouwschade waarin SWAP een centrale rol speelt. Aan de berekening van droogteschade met SWAP zijn in dit project geen verbeteringen doorgevoerd. Wel zijn in SWAP zijn belangrijke verbeteringen doorgevoerd om (klimaat)robuuste berekening van directe effecten van nat- en zoutschade mogelijk te maken. Vooral aan de berekening van natschade door zuurstofstress en aan zoutschade is veel aandacht besteed. In dit hoofdstuk is op basis van voorbeeldberekeningen aangetoond dat de nieuwe module voor zuurstofstress fundamenteel beter is dan de voorheen gebruikte methode en dat gesimuleerde grenswaarden voor bodemcondities waarbij zuurstofstress optreedt plausibel zijn wanneer deze worden vergeleken met meetgegevens uit de literatuur. De methode maakt bijvoorbeeld correct onderscheid tussen de zuurstofvoorziening voor verschillende bodemtypen en beschouwt de invloed van de bodemtemperatuur op zuurstofstress. Zoutschade kan nu in SWAP worden berekend via experimenteel vastgestelde relaties tussen zout in de wortelzone en transpiratiereductie. SWAP is zodanig aangepast dat bij het beregenen rekening kan worden gehouden met de chlorideconcentratie in de wortelzone. Eveneens zijn parameterwaarden voor de berekening van droogte-, zuurstof- en zoutstress afgeleid voor grasland en aardappelen. Voorbeeldberekeningen laten zien dat het mogelijk is langjarig gemiddelde schades, variatie in schades tussen jaren en extreme gebeurtenissen te analyseren, voor zowel de huidige als toekomstige klimatologische condities. De plausibiliteittoets en diverse voorbeeldberekeningen geven voldoende vertrouwen in de nieuwe versie van SWAP, zodat dit model gebruikt kan worden voor het afleiden van metarelaties tussen grondwaterkarakteristieken en opbrengstreducties, zoals beschreven in het volgende hoofdstuk.

# 5

# SYSTEEM EN METARELATIES

## 5.1 INLEIDING

Om het model SWAP toe te kunnen passen is specialistische expertise vereist, hetgeen een 'breed gedragen' methode hindert. Op basis van gedetailleerde SWAP-simulaties kunnen echter metarelaties (Walvoort et al., 2004) tussen grondwaterkarakteristieken en opbrengstdepressie worden afgeleid, die eenvoudig, zonder verdere tussenkomst van de modellen, toepasbaar zijn. Zulke metarelaties vergemakkelijken de vertaling van waterhuishoudkundige condities naar opbrengstdepressies, omdat wanneer de metarelaties eenmaal zijn afgeleid, geen SWAP-simulaties meer nodig zijn. Grondwaterstanden, welke algemeen gemeten of gemodelleerd worden, kunnen via de metarelaties eenvoudig vertaald worden naar opbrengstdepressies. Het afleiden van metarelaties bespaart dus een hoop rekenwerk voor de gebruiker.

Het principe voor het afleiden van metarelaties is al eerder uitgevoerd (Heuvelmans, 2010) en ook de HELP-tabellen en TCGB-tabellen zijn voorbeelden van metarelaties. In dit hoofdstuk beschrijven we het door ons ontwikkelde systeem om metarelaties van gedetailleerde simulaties af te leiden en passen we het systeem toe om conceptversies van metarelaties te genereren voor grasland en aardappel, enkele bodemtypen, het huidige klimaat en twee klimaatscenario's.

## 5.2 OPZET SYSTEEM

Het systeem waarmee metarelaties tussen een grondwaterkarakteristiek en opbrengstreductie kunnen worden afgeleid is ontwikkeld in het programma 'R' (open source statistische software, (R Development Core Team, 2012)). Het model SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant, www.swap.alterra.nl, (Kroes et al., 2009; Van Dam et al., 2008)) is binnen het systeem gebruikt voor de simulaties van de hydrologische processen in de onverzadigde zone.

Binnen 'R' wordt SWAP een x-aantal keer aangeroepen met verschillende hydrologische randvoorwaarden, om zo een variatie aan grondwaterstandsverlopen te generen:

- Onderrand (kwantiteit): range aan stijghoogtes en weerstanden
- Zijrand (kwantiteit): range aan drainagefuncties
- Waterkwaliteit: range aan chlorideconcentraties

Voor elke parameter wordt een voor Nederland realistische range opgegeven waarbinnen de waarde kan variëren. Vervolgens wordt een automatische procedure gestart waarin SWAP talloze keren wordt gedraaid. Per run wordt middels Latin Hypercube Sampling (Iman en Conover, 1982) uit de multidimensionele ruimte van parameterwaarden een verzameling van parameterwaarden gekozen. Voor deze set wordt de SWAP-invoer aangepast en vervolgens gerund. Uit de uitvoer worden grondwater(stand)karakteristieken bepaald, evenals transpiratiereductie door droogte-, zuurstof- en zoutstress. Dit wordt gedaan voor vele combinaties van bodemtype, gewas en meteorologische condities (voor het huidige of toekomstige klimaat).

Ten slotte worden voor elk gewas, bodemtype (en dus ook elke gewenste variatie in bodemopbouw) en meteostation (of klimaatreeks) metarelaties verkregen door relatieve transpiratiereducties te correleren aan grondwater(stand)karakteristieken. Deze metarelaties zijn continue functies.

Metarelaties zullen verschillen tussen gewassen, bodemtypen en meteorologische condities. Wanneer metarelaties eenmaal zijn afgeleid, kunnen gemeten of gesimuleerde grondwaterstandsreeksen eenvoudig vertaald worden naar transpiratiereductie door droogte-, zuurstof- en zoutstress. Welke grondwaterstandskarakteristiek gebruikt moet worden als verklarende variabele wordt hierna bediscussieerd.

## 5.3 VERKLARENDE VARIABELEN: GRONDWATERSTANDSKARAKTERISTIEK

### 5.3.1 INLEIDING

Om de kennis van effecten van door waterbeheersmaatregelen veroorzaakte veranderingen in hydrologische omstandigheden op de nat-, droogte- en zoutschade in de landbouw te operationaliseren is een koppeling noodzakelijk aan een hydrologische variabele die meetbaar of berekenbaar is. Een voor de hand liggende agrohydrologische variabele is de grondwaterstand voor wat betreft de nat- en droogteschade, maar het kan ook de drainagesituatie zijn. Voor de zoutschade is een geschikte variabele het zoutgehalte in het beregeningswater.

Verder is het gebruikelijk om (een) karakteristiek(en) van de geschikte agrohydrologische variabele te nemen, bijv. de grondwaterstandskarakteristieken Gemiddeld Hoogste en Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GHG resp. GLG). In deze paragraaf worden mogelijk geschikte kandidaten voor agrohydrologische karakteristieken beschreven.

De beschreven karakteristieken hebben meestal betrekking op variabelen die zijn gemeten of berekend in één punt. De vraag is hoe representatief deze puntwaarneming is. Hier wordt kort aandacht aan besteed.

### 5.3.2 GRONDWATERSTANDSKARAKTERISTIEKEN

#### GHG EN GLG

De in de HELP-tabel gebruikte grondwaterstandskarakteristiek is de grondwatertrap en bij elke grondwatertrap typerende waarden voor de GHG en GLG. Voor definities zie Van der Gaast et al. (2006). In de semicontinue HELP-2006-tabellen (Van Bakel et al., 2007) zijn de GHG en GLG de ingangen, waarbij binnen het toepassingsdomein alle mogelijke combinaties van beide grootheden mogelijk zijn. Daardoor kunnen ook voor situaties met een sterk antropogeen grondwaterstandsverloop, zoals gedraineerde gronden of situaties met een hoger door wateraanvoer handhaafbaar zomerpeil, schades worden bepaald.

Het concept van de grondwatertrappenindeling op basis van GHG en GLG is impliciet gebaseerd op een min of meer natuurlijk grondwaterstandsverloop. Bij sterk gedraineerde gronden of veel hogere zomerpeilen dan winterpeilen in combinatie met aanvoer is de vraag of de relaties tussen GHG en GLG enerzijds en nat- en droogteschade anderzijds nog mogen worden toegepast. Bovendien is de schade in de afzonderlijke jaren niet aan GxG's te relateren. Er zijn daarom wellicht alternatieve grondwaterstandskarakteristieken nodig.

#### ALTERNATIEVE KARAKTERISTIEKEN

De volgende opsomming is niet volledig maar geeft wel een goede indruk van de mogelijke kandidaten:

- jaargemiddelde grondwaterstand;
- groeiseizoensgemiddelde grondwaterstand;
- regimecurve: de per datum in het jaar gemiddelde grondwaterstand van een reeks van minstens 8 jaar (Van der Gaast et al., 2006);
- overschrijdingsduurlijn: alle waargenomen grondwaterstanden oplopend of aflopend gesorteerd en de waarden uitgezet tegen de overschrijdingskans, in procenten of fracties;
- statistische momenten:
  - gemiddelde;
  - standaardafwijking;
  - scheefheid;
  - kurtosis;
- Som Overschrijdingswaarde (SOx-y) gedurende bepaalde periode (x). Waarbij y staat voor waarde van de grondwaterstand. Daarbij zijn de volgende opmerkingen te maken:
  - is vergelijkbaar met temperatuursom (de som van de gemiddelde dagelijkse temperatuur op dagen dat die boven nul ligt);
  - concept in de agrohydrologie voor zover bekend voor het eerst toegepast door Sieben (1974);
  - in principe is het een zeer adequaat karakteristiek want niveau en periode zijn te koppelen aan het mechanisme dat er toe doet;
  - Zie ook Van Bakel en Huygen (2001).
- Som van het Kwadraat van de Overschrijdingswaarde (SKOx-y). Toegepast in het kader van de NBW-studie (Van Bladeren et al., 2000), om daarmee de natschade te accelereren, maar het concept heeft weinig navolging gekregen.

Welke karakteristieken het geschiktst zijn kan nu niet worden aangegeven. Dit hangt af van de voorspellende waarde voor de onderscheiden schades. Ongeacht de keuze betekent dit dat het de voorkeur heeft dat de gebruiker een reeks grondwaterstanden moet aanleveren waarmee de karakteristiek kan worden afgeleid, voor zowel de huidige situatie als de situatie na uitvoering van een maatregel of bij klimaatverandering.

### 5.3.3 DROOGLEGGINGS- EN DRAINAGEKARAKTERISTIEKEN

In veenweidegebieden wordt de drooglegging (verschil tussen maaiveld en waterstand in de ontwateringsmiddelen) het meest bepalend geacht voor de agrohydrologische omstandigheden. Het is ook een relatief gemakkelijk te bepalen variabele. Geschikte karakteristieken zijn de drooglegging in de winter- en zomerperiode (winter- en zomerpeil) onder niet-extreme omstandigheden.

In kleigebieden wordt de agrohydrologische situatie vooral bepaald door de aanwezigheid van buisdrainage. Geschikte karakteristieken hiervoor zijn de draindiepte en drainage-intensiteit c.q. drainageweerstand (eventueel als functie van de grondwaterstand en drainafstand). In het onderzoek van Van Wijk et al. (1988) is van deze karakteristieken gebruik gemaakt.

Ook hier geldt: welke karakteristieken het meest geschikt zijn kan nu niet worden aangegeven. Dit hangt af van de voorspellende waarde voor de onderscheiden schades. Ongeacht de keuze betekent dit dat de gebruiker een reeks grondwaterstanden moet aanleveren waarmee

de karakteristiek kan worden afgeleid, voor zowel de huidige situatie als de situatie na uitvoering van een maatregel of bij klimaatverandering.

### 5.3.4 RUIMTELIJKE REPRESENTATIVITEIT

De ruimtelijke representativiteit van een puntwaarneming is een belangrijk aandachtspunt. De meest basale aanname , die in weel studies wordt gedaan, is de puntwaarneming geldig te laten zijn voor een zeker vlak (perceel, modelgrid). Op basis van kennis over de ruimtelijke samenhang (die in de tijd kan variëren) is een meer geavanceerde ruimtelijke interpolatie uit te voeren. Zie hiervoor o.a. Ritzema et al. (2012).

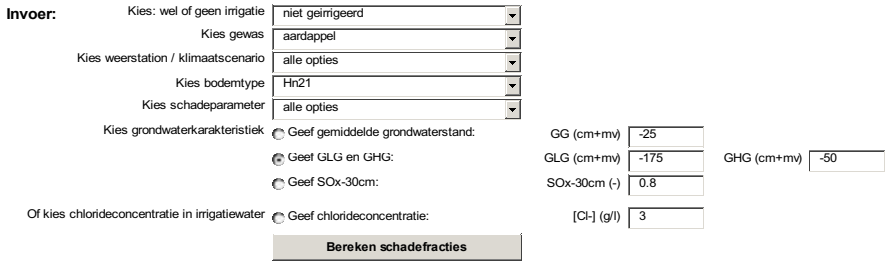
## 5.4 AFGELEIDE CONCEPT-METARELATIES

Conceptversies van metarelaties zijn in deze studie opgesteld voor simpele gewasbestanden (ofwel 'statisch' gewas) voor aardappel en gras en voor negen bodemtypen (zie Tabel 6). De procedure waarmee we de metarelaties hebben afgeleid is als volgt:

1 Run SWAP voor:
   - drie klimaatscenario's
     - de Bilt (laatste 30 jaar)
     - de Bilt W (30 jaar)
     - de Bilt W+ (30 jaar)
   - 9 bodems. Selectiecriteria:
     - verscheidenheid aan grondsoorten
       - zand
       - klei (rivierklei en marien)
       - veen
       - löss
     - grootste arealen (dominant voorkomend)
   - twee gewassen
     - aardappelen
     - gras
   - al dan niet irrigatie
   - verschillende waarden voor drainageweerstanden/infiltratieweerstanden
   - verschillende waarden voor drooglegginsgkarakteristieken (peil)
   - verschillende waarden voor kwel/infiltratie
   - verschillende chlorideconcentraties
2 Om het effect van (onjuiste) initiële condities (initieel zoutprofiel en initieel vochtprofiel) zo veel mogelijk te reduceren is telkens gerekend met een 'opwarmperiode' van 10 jaar. SWAP rekent dus telkens 40 jaar. De metamodellen zijn afgeleid op basis van de laatste 30 jaar van elke SWAP-run.
3 Als respons ($y$) is genomen:
   - langjariggemiddelde droogteschade (fractie)
   - langjariggemiddelde natschade (fractie)
   - langjariggemiddelde zoutschade (fractie)
   - maximale droogteschade in de gesimuleerde periode van 30 jaar (fractie)
   - maximale natschade in de gesimuleerde periode van 30 jaar (fractie)
   - maximale zoutschade in de gesimuleerde periode van 30 jaar (fractie)

De concept-metarelaties die met het systeem voor deze fase zijn afgeleid, zijn ontsloten via een formulier in Excel. Hiermee kunnen de metarelaties (continue functies) en schadefracties (opbrengstvermindering uitgedrukt in een fractie) eenvoudig worden opgevraagd (Figuur 22).

**FIGUUR 22** **SCHERMAFDRUK VAN HET EXCEL-PROGRAMMA WAARMEE CONCEPT-METARELATIES ZIJN ONTSLOTEN EN WAARIN VIA EEN FORMULIER SCHADEFRACTIES KUNNEN WORDEN OPGEVRAAGD.**




**Uitvoer concept-metarelaties:**

GHG= -50 cm+mv
GLG= -175 cm+mv

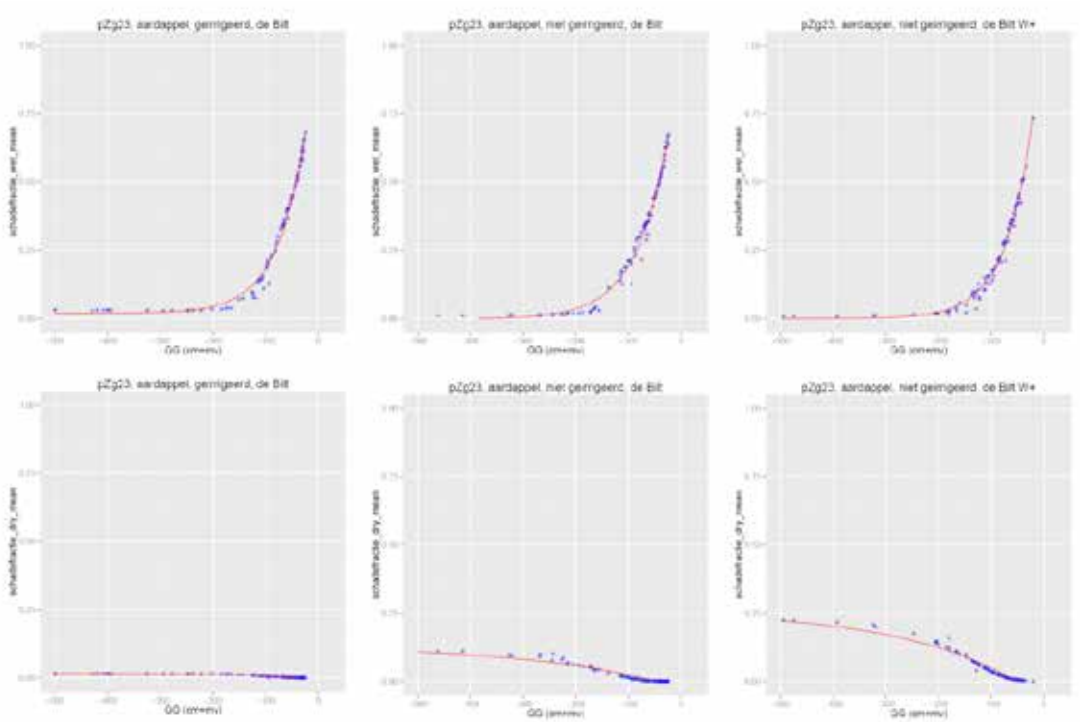
| irrigation | crop | METFIL | soil | variable | schadefractie | formula | b0 | b1 | b2 | AIC | dev | tussenstap |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt | Hn21 | schadefractie_wet_mean | **0.116** | ghg + glg | 2.91E+00 | -1.42E-02 | 3.23E-02 | NA | 2.03E+00 | -2.03E+00 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt | Hn21 | schadefractie_dry_mean | **0.058** | ghg + glg | -6.88E+00 | 2.41E-02 | -3.03E-02 | NA | 2.27E+00 | -2.78E+00 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt | Hn21 | schadefractie_wet_max | **0.524** | ghg + glg | 5.65E+00 | -9.24E-03 | 3.44E-02 | NA | 9.24E+00 | 9.54E-02 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt | Hn21 | schadefractie_dry_max | **0.318** | ghg + glg | -5.44E+00 | 2.84E-02 | -3.48E-02 | NA | 4.13E+00 | -7.64E-01 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt W | Hn21 | schadefractie_wet_mean | **0.188** | ghg + glg | 2.64E+00 | -1.71E-02 | 2.84E-02 | NA | 1.96E+00 | -1.46E+00 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt W | Hn21 | schadefractie_dry_mean | **0.046** | ghg + glg | -6.88E+00 | 2.33E-02 | -2.87E-02 | NA | 2.19E+00 | -3.03E+00 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt W | Hn21 | schadefractie_wet_max | **0.694** | ghg + glg | 4.69E+00 | -1.04E-02 | 2.51E-02 | NA | 8.18E+00 | 8.21E-01 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt W | Hn21 | schadefractie_dry_max | **0.269** | ghg + glg | -4.74E+00 | 2.31E-02 | -2.79E-02 | NA | 3.45E+00 | -1.00E+00 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt W+ | Hn21 | schadefractie_wet_mean | **0.159** | ghg + glg | 3.06E+00 | -1.70E-02 | 3.18E-02 | NA | 1.88E+00 | -1.66E+00 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt W+ | Hn21 | schadefractie_dry_mean | **0.065** | ghg + glg | -7.93E+00 | 3.30E-02 | -3.95E-02 | NA | 2.27E+00 | -2.67E+00 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt W+ | Hn21 | schadefractie_wet_max | **0.686** | ghg + glg | 5.39E+00 | -9.23E-03 | 2.90E-02 | NA | 1.02E+01 | 7.80E-01 |
| niet geirrigeerd | aardappel | de Bilt W+ | Hn21 | schadefractie_dry_max | **0.309** | ghg + glg | -4.08E+00 | 1.93E-02 | -2.42E-02 | NA | 1.70E+00 | -8.03E-01 |

Achter deze spreadsheet, die dus de concept-metarelaties toegankelijk maakt, zitten talloze SWAP-berekeningen. Onderstaande figuren geven voorbeelden van met het systeem gesimuleerde grondwaterkarakteristieken en schadefracties, evenals concept-metarelaties die op deze punten gefit zijn. Ter illustratie is als verklarende variabele ($x$) voor deze figuren de GG (cm+mv) en SOxy (-) genomen (deze variabelen zijn te schatten op basis van hydrologische tijdreeksen). De modellen die zijn gefit zijn eenvoudige exponentiële: $y = b_0 + b_1 \, x + b_2 \exp(b_3 \, x)$. Voor elk van de metarelaties is de 'goodness of fit' bepaald in de vorm van enkele statistieken (hier niet getoond), welke gebruikt kunnen worden om te bepalen welke verklarende grondwaterkarakteristiek het beste gebruikt kan worden.

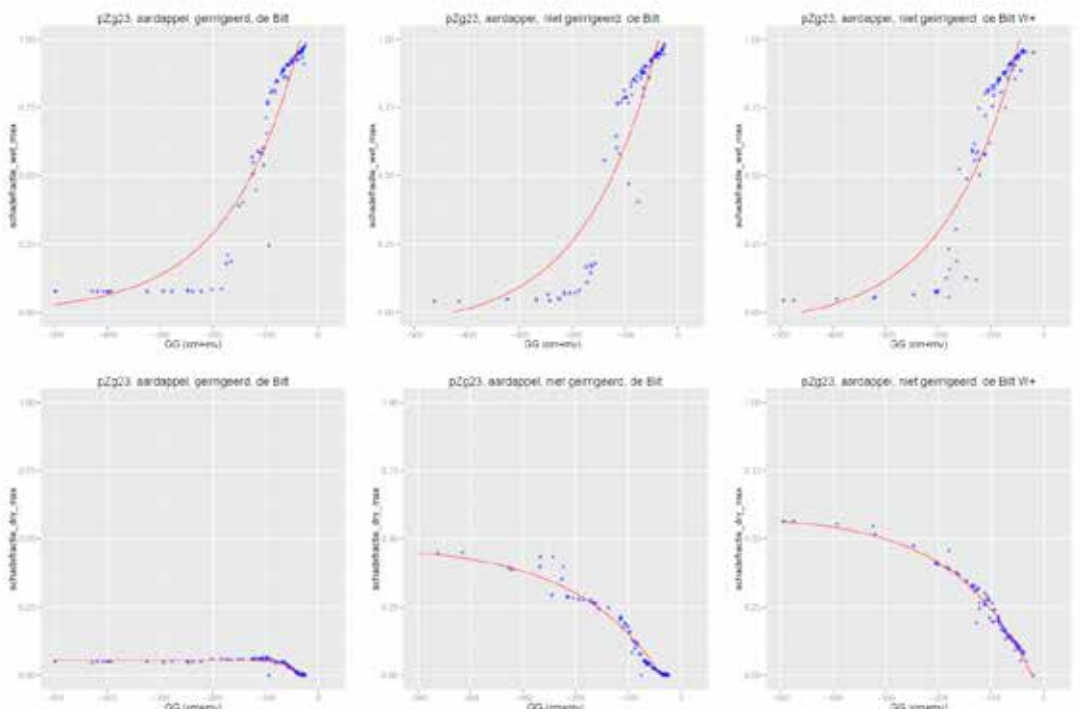
**TABEL 6** **GESELECTEERDE BODEMS (SPU = SOIL PHYSICAL UNIT/BODEMFYSISCHE EENHEID), WAARVOOR CONCEPT-METARELATIES ZIJN AFGELEID.**

| SPU | bodemcode | oppervlakte (ha) | bodemtype |
|---|---|---|---|
| 1 | hVc | 16300 | koopveengrond |
| 13 | iWp | 32000 | moerige podzolgrond (veenkoloniaaldek) |
| 17 | Hd21 | 34000 | haarpodzolgronden |
| 20 | Hn21 | 295000 | veldpodzolgronden |
| 29 | pZg23 | 69000 | beekeerdgronden |
| 48 | Mv41C | 25000 | drechtvaaggrond (zeekleigronden zonder minerale eerdlaag) |
| 64 | Mn35A | 105000 | poldervaaggrond (zeekleigronden) |
| 65 | Rn47C | 25000 | poldervaaggrond (rivierkleigronden) |
| 72 | BLd6 | 11000 | radebrikgronden |

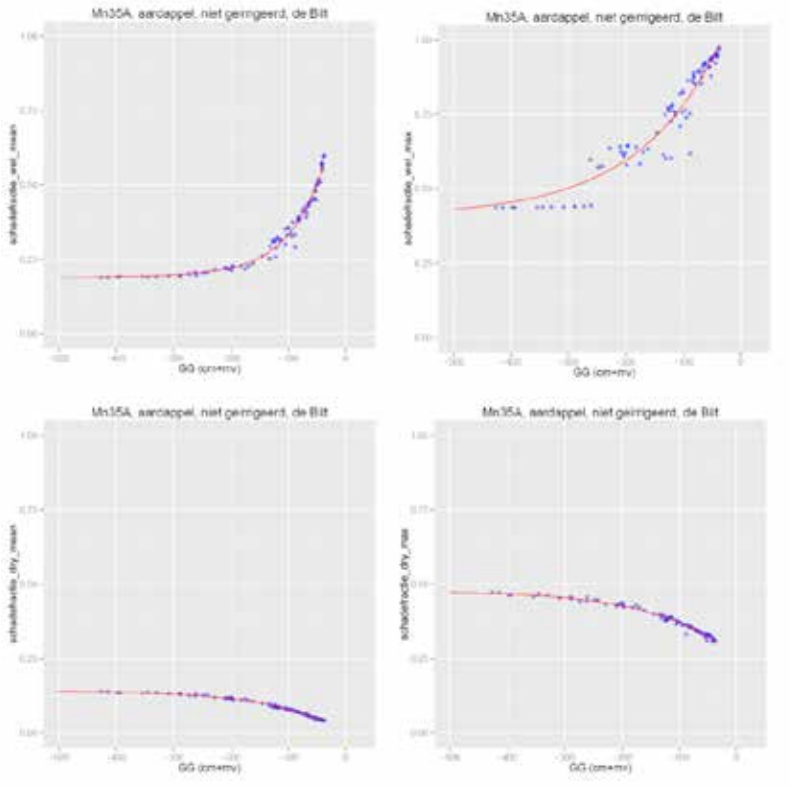
**FIGUUR 23** **VOORBEELDEN VAN METARELATIES VOOR AARDAPPEL OP BODEMTYPE PZG23. TER ILLUSTRATIE IS HIER GG ALS VERKLARENDE GRONDWATERKARAKTERISTIEK GEBRUIKT. LINKERKOLOM: HUIDIG KLIMAAT MET IRRIGATIE. MIDDEN: HUIDIG KLIMAAT ZONDER IRRIGATIE. RECHTER KOLOM: SCENARIO W+ ZONDER IRRIGATIE. RIJ 1: GEMIDDELDE NATSCHADE DOOR ZUURSTOFSTRESS; 2: DROOGTESTRESS.**



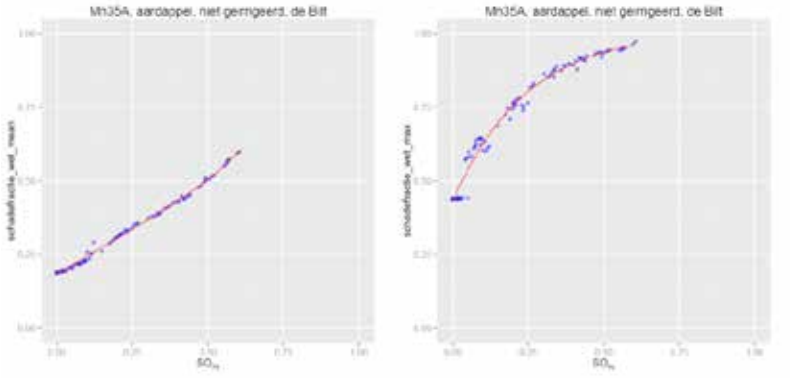

**FIGUUR 24** **IDEM FIGUUR 23, MAAR NU ZIJN IN PLAATS VAN GEMIDDELDE SCHADES DE MAXIMALE SCHADES (IN EEN PERIODE VAN 30 JAAR) GEGEVEN. RIJ 1: MAXIMALE NATSCHADE DOOR ZUURSTOFSTRESS; 2: DROOGTESTRESS.**



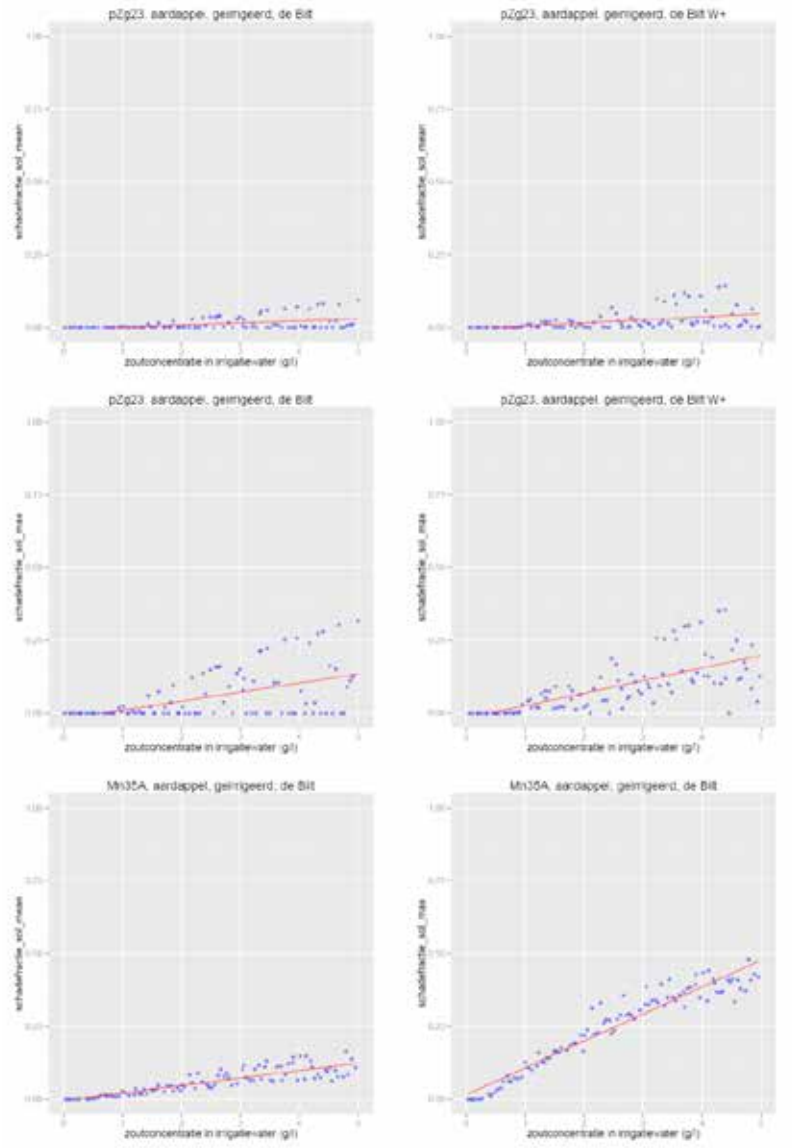
**FIGUUR 25** **IDEM FIGUUR 23 EN FIGUUR 24, MAAR NU VOOR BODEMTYPE MN35A EN UITSLUITEND ZONDER IRRIGATIE. LINKERKOLOM GEEFT GEMIDDELDE SCHADES, RECHTERKOLOM MAXIMALE SCHADES.**




**FIGUUR 26** **VOORBEELDEN VAN METARELATIES VOOR AARDAPPEL OP BODEMTYPE MN35A, MET SOXY ALS VERKLARENDE GRONDWATERKARAKTERISTIEK. LINKERKOLOM GEEFT GEMIDDELDE SCHADE, RECHTERKOLOM MAXIMALE SCHADE.**



**FIGUUR 27** **VOORBEELDEN VAN METARELATIES VOOR ZOUTSTRESS VOOR AARDAPPEL OP BODEMTYPE PZG23 EN MN35A. DE ZOUTCONCENTRATIE IN HET IRRIGATIEWATER IS ALS VERKLARENDE KARAKTERISTIEK GEBRUIKT. LINKERKOLOM: HUIDIG KLIMAAT MET IRRIGATIE. MIDDEN: HUIDIG KLIMAAT ZONDER IRRIGATIE. RECHTER KOLOM: SCENARIO W+ ZONDER IRRIGATIE. RIJ 1: BODEMTYPE PZG23, GEMIDDELDE ZOUTSCHADE VOOR HET HUIDIGE KLIMAAT (LINKS) EN SCENARIO W+ (RECHTS). RIJ 2: IDEM, MAAR NU VOOR MAXIMALE SCHADE. RIJ 3: BODEMTYPE MN35A MET LINKS GEMIDDELDE EN RECHTS MAXIMALE SCHADEFRACTIE VOOR HET HUIDIGE KLIMAAT.**




## 5.5 VERTALING NAAR EURO'S

Voorgesteld wordt voor alle gewassen, exclusief maïs en gras, de fysieke gewasopbrengst(reductie) om te zetten naar geldelijke opbrengsten c.q. geldelijke schades, door aan te sluiten op het schadeconcept van AGRICOM (Van Bakel et al., 2009b). AGRICOM staat voor AGRIcultural COst Module en is een nabewerking op de NHI-resultaten. De omzetting houdt het volgende in.

Het schadeconcept is gebaseerd op verlies van gewaswaarde, gedefinieerd als het verschil tussen de potentiële fysieke gewasopbrengst minus de werkelijke fysieke gewasopbrengst, vermenigvuldigd met de werkelijke prijs van het gewas, verminderd met de kosten die zijn te relateren aan de hoogte van de fysieke opbrengst (bijvoorbeeld veilingkosten). Er kan daarbij rekening worden gehouden met het feit dat de prijs lager of hoger is als de opbrengsten hoger danwel lager worden door maatregelen; de zogenoemde prijselasticiteit.

Voor de economische gegevens betreffende de gewassen zoals gedefinieerd in AGRICOM worden de meest recente gegevens over arealen, fysieke opbrengsten en prijzen worden jaarlijks geactualiseerd voor NHI (althans, dat is de bedoeling) en het ligt voor de hand hierop aan te sluiten.

Met AGRICOM kunnen ook de kosten van beregening (vast en variabel) worden bepaald. Deze worden jaarlijks voor NHI geactualiseerd (althans, dat is de bedoeling). Voorgesteld wordt hierop aan te sluiten.

De ACSG past een eigen methode toe om schadepercentages op geld te zetten (CDG, 2011). Sinds 2011 baseert zij de schadevergoeding bij grasland en voedergewassen op de kosten van aankoop van vervangend krachtvoer (A-brok); voor akkerbouw op de marktwaarde van het gederfde product; voor tuinbouw op de meerkosten voor extra beregening. Elk jaar worden de bedragen geactualiseerd. Zie www.grondwater-cdg.nl. De schadebedragen bij AGRICOM zijn gespecificeerd voor meer vormen van landgebruik waarbij de variabele productiekosten samenhangend met de fysieke opbrengst (zoals veilingkosten) afgetrokken van de bruto geldelijke opbrengsten. Bovendien kan rekening worden gehouden met prijselasticiteit. Voor grasland zijn de bedragen afgeleid van berekeningen met een bedrijfsmodel. De bedragen worden niet elk jaar herzien. Zie ook Van Bakel et al. (2009b). Een vergelijking tussen deze methode en AGRICOM kan worden gemaakt en wellicht kan kennis tussen beide methodes worden uitgewisseld.

## 5.6 CONCLUSIES

De afgeleide concept-metarelaties, waarvan in dit hoofdstuk enkele voorbeelden zijn getoond, laten zien dat het opgezette systeem werkt en dat er geautomatiseerd metarelaties afgeleid kunnen worden voor verschillende stressen (langjarig gemiddeldes en extremen), met verschillende grondwaterkarakteristieken als verklarende variabelen, situaties met en zonder irrigatie en voor klimaatscenario's. Het systeem maakt metarelaties reproduceerbaar en bovendien kan eenvoudig nieuwe kennis worden ingebracht. De metarelaties zijn ontsloten via een Excel-sheet, waarin gemiddelde en maximale schadefracties voor verschillende gewassen, bodemtypen en klimaatscenario's opvraagbaar zijn.

Het afleiden van de conceptrelaties voor directe schades heeft aanvullende inzichten verschaft in verbeteringen in de parametrisatiemethode. Deze inzichten zijn nodig geweest om in een volgende fase definitieve metarelaties af te kunnen leiden. Het betreft hier ondermeer de keuze van de drainagecriteria, waardoor een voldoende spreiding in de grondwaterstandsdynamiek wordt gegenereerd en een goede fit kan worden verkregen. Daarnaast is de hier gepresenteerde exponentiële regressie niet optimaal gebleken, en zal in de volgende fase gekozen moeten worden voor een ander type regressie.

Door de conceptrelaties in een pilot-studie toe te passen, kunnen aanvullende verbeterpunten gedefinieerd worden. Ook deze kunnen dan meegenomen worden voor het afleiden van de definitieve metarelaties.

# 6

# VERVOLG / BENODIGDE VERBETERINGEN

In de voorgaande hoofdstukken heeft u kunnen lezen wat er tot nu toe is bereikt in fase 1 van het project. Er is nu een gezamenlijk ontwikkelde methode voor de berekening van directe schade aan landbouwgewassen door droogte, te natte omstandigheden (zuurstofgebrek) en te hoge zoutconcentraties. Deze methode, uitgewerkt in een daartoe gemaakte SWAP-versie, 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. En de methode is eveneens beschikbaar voor het berekenen van de effecten van scenario's, bijvoorbeeld klimaatscenario's met behulp van een doorvertaling naar meteorologische gegevens, maar ook verziltingsscenario's onder aanname van verschillende zoutgehalten etc. Ten slotte is de methode ook al ingezet om zogenaamde metarelaties af te leiden.

We hebben nu dus een methode om schades te berekenen met huidige meteorologische condities en met die onder klimaatscenario's. Deze methode is vooralsnog alleen geparametriseerd voor gras en aardappel. Ook het doorrekenen van extreme situaties stond op de wensenlijst van verbeteringen, en dat kunnen we nu. Verbeterwensen voor de HELP- en TCGB-tabellen waar we niet aan zijn toegekomen, zijn dat er rekening gehouden zou moeten worden met bedrijfsvoering, dat er een uitspraak nodig is over gewaskwaliteit of vervolgschade van structuurbederf en dat er een transparante conversie nodig is van reductie van gewasverdamping naar opbrengstderving in kilogrammen oogstbaar product en naar bedrijfsinkomen.

In de volgende paragrafen kunt u nalezen hoe wij denken aan deze wensen tegemoet te kunnen komen.

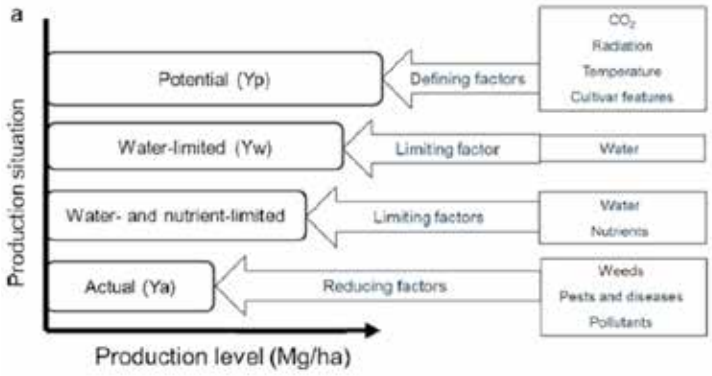
## 6.1 GEWASGROEIMODELLERING MET SWAP-WOFOST

### 6.1.1 WAT DOET WOFOST DAT SWAP NIET DOET?

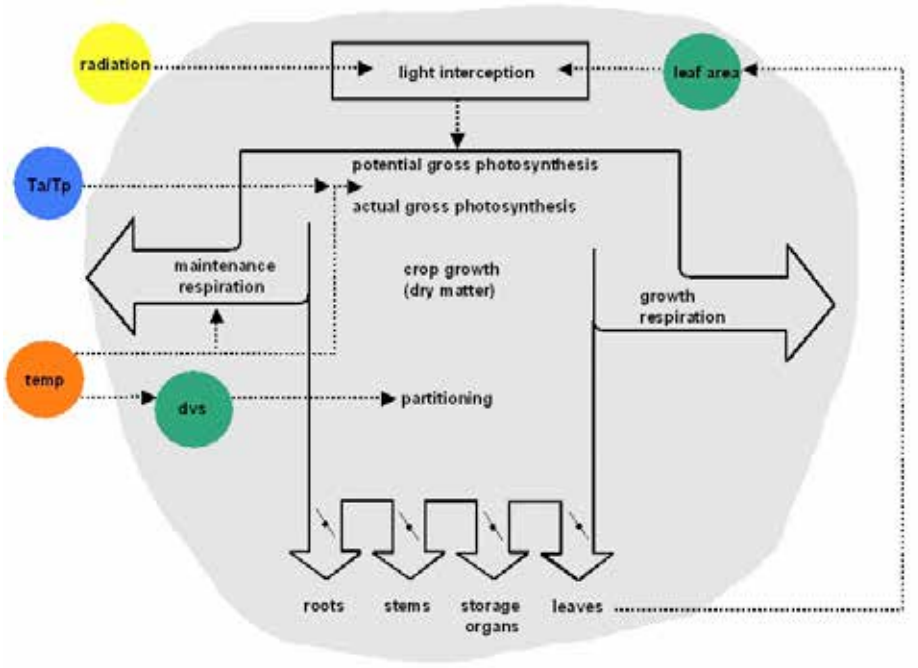
In het model WOFOST (WOrld FOod STudies) wordt de potentiële gewasopbrengst berekend als functie van het kooldioxide-gehalte in de lucht, van de zonnestraling, de temperatuur en van gewaskenmerken. In het schema van Figuur 28 staat een en ander weergegeven. Vervolgens bepaalt de beschikbaarheid van water de watergelimiteerde productie. Via de water- en nutriëntgelimiteerde productie wordt de actuele productie berekend als functie van reductiefactoren zoals onkruiden, ziekten en plagen.

Hoe de daadwerkelijke berekening van oogstbaar product binnen WOFOST gebeurt ziet u in Figuur 29. Op basis van het bladoppervlak en de inkomende straling wordt berekend hoeveel licht wordt onderschept en potentieel wordt omgezet door fotosynthese. De actuele fotosynthese is een functie van beschikbaarheid van vocht voor verdamping. 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.

FIGUUR 28 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE OPBRENGSTBEREKENINGEN IN HET MODEL WOFOST. UIT VAN ITTERSUM ET AL. (2012).




FIGUUR 29 OMZETTING VAN LICHTINTERCEPTIE NAAR DROGE STOFOPBRENGST IN HET MODEL WOFOST.



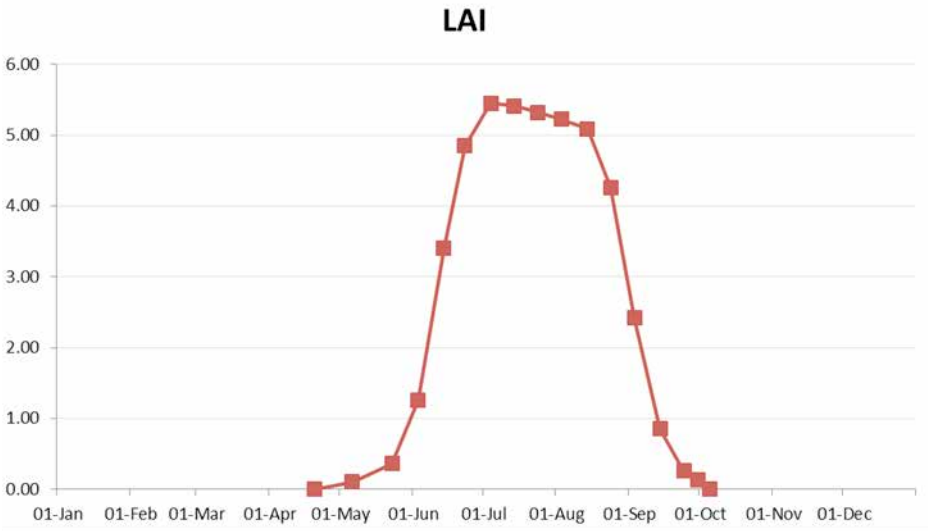

In de huidige SWAP-versie staat de berekening van waterstromen centraal. In de berekeningen is het gewas feitelijk een statische bovenrandvoorwaarde met voor elk jaar dezelfde aanname over gewasontwikkeling en de leaf area index (LAI). Deze LAI is een maat voor de hoeveelheid groen oppervlak van het gewas dat kan verdampen. Op basis van die LAI wordt dan ook de actuele verdamping berekend. Figuur 30 laat zien wat de LAI is voor aardappel in SWAP. De gewasontwikkeling is dus elk jaar hetzelfde. In een jaar met een nat voorjaar begint de LAI-ontwikkeling niet pas later. Droogtestress heeft geen invloed op de hoogte van de LAI en de piekwaarde is altijd 5.5 op 1 juli.

In Figuur 31 ziet u een voorbeeld van een realistische LAI-ontwikkeling voor gras in een situatie waarin twee keer wordt gemaaid en verder wordt beweid. De standaard LAI voor gras in SWAP is constant 3.0. De ontwikkeling uit Figuur 31 laat duidelijk zien dat dit weinig realistisch is. Aanname van een zaagtandcurve zoals in dit voorbeeld met hetzelfde patroon in elk jaar is evenmin realistisch.

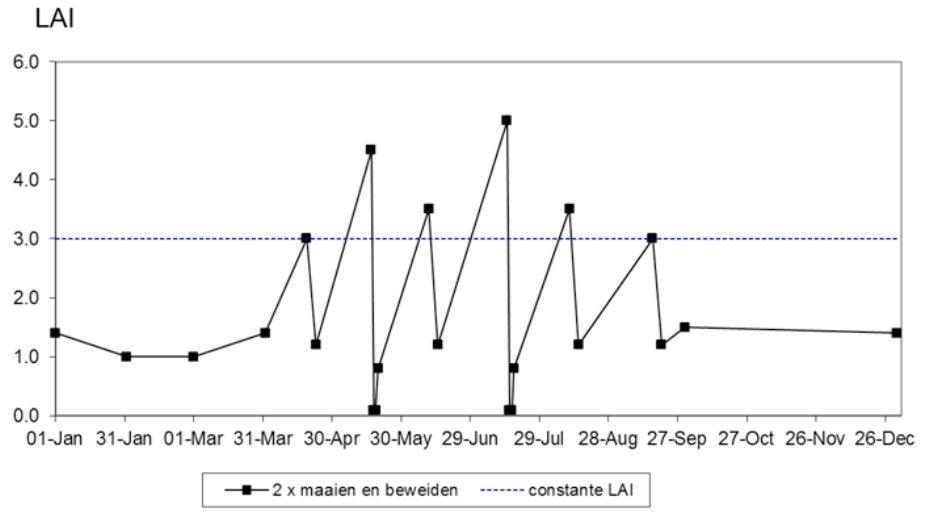
Door de koppeling met een gewasgroeimodel kan de dynamiek van gewasgroei worden meegenomen, dus dit levert een realistische gewasontwikkeling op die elk jaar anders is als gevolg

van meteorologie en hydrologie. Daarmee creëren we voor de berekeningen een realistische dynamische bovenrandvoorwaarde en eveneens een realistische dynamische ontwikkeling van de worteldiepte. De gewasgroei is bovendien een functie van $CO_2$-gehalte en is daarmee bruikbaar voor klimaatscenario-berekeningen. De koppeling SWAP-WOFOST levert dan ook een directe berekening op van opbrengstdepressie.

**FIGUUR 30** **LEAF AREA INDEX (LAI) ALS FUNCTIE VAN DE TIJD IN DE HUIDIGE METHODIEK VOOR AARDAPPEL. DEZE FUNCTIE IS ELK JAAR HETZELFDE.**




**FIGUUR 31** **LEAF AREA INDEX (LAI) IN EEN SITUATIE MET TWEE MAAISNEDES EN VIER WEIDESNEDES. DE STIPPELLIJN IS DE LAI IN SWAP VOOR GRASLAND (GEMIDDELD 3.0).**




SWAP veronderstelt ook dat het gewas zich meteen herstelt, zodra de vochtcondities weer goed zijn. Er is dus geen vervolgschade: een volledig vernield aardappelveld verdampt de dag na een periode van wateroverlast of droogte weer optimaal zodra de vochtcondities optimaal zijn. In WOFOST vertraagt de groei en ontstaat er schade en bijbehorende opbrengstderving. Ook de combinatie van droogte- en natschade kan beter gekwantificeerd worden als de gewasdynamiek en dus ook de dynamiek van de worteldiepte meegenomen wordt via de koppeling met WOFOST. Bovendien is het dan mogelijk om behalve expliciet natschade en droogteschade (en zoutschade) te presenteren (zoals in hoofdstuk 4 en 5 is gedaan), ook de meer complexe gecombineerde schade te laten zien. Een koppeling van SWAP en WOFOST is goed

mogelijk, zoals wordt beschreven in paragraaf 6.1.2. Het betekent wel dat we voor de verschillende gewassen niet alleen SWAP moeten parametriseren, maar ook WOFOST.

### 6.1.2 VERKENNING MEERWAARDE SWAP-WOFOST

De transpiratiereductie, zoals berekend door SWAP, kan dus vertaald worden naar gewasopbrengst-reductie met het gewasgroeimodel WOFOST. Dit kan worden uitgevoerd middels een dynamische koppeling met gegevensuitwisseling op dagbasis zoals is aangetoond door Kroes en Supit (2011) en Van Walsum en Supit (2012) voor respectievelijk SWAP en metaSWAP.

Een dergelijke koppeling van SWAP-WOFOST heeft voor- en nadelen. Enkele voordelen:

- De gewasgroei krijgt, via de hydrologie van SWAP, een fysische basis voor capillaire nalevering en beregening, gebaseerd op drukhoogte-criteria.
- Een dynamische interactie tussen hydrologie en gewas maakt realistischer resultaten mogelijk van ingrepen door boer en waterschap. Een boer kan bij inzaaien rekening houden met actuele weersomstandigheden en een waterbeheerder zal het effect van oppervlaktewater- en grondwaterstanden op aangrenzende percelen willen kwantificeren. Bij een statische interactie, zoals tot op heden gebruikelijk, varieert de fenologie van een gewas niet en wordt gerekend met langjarige gemiddelden;
- Voor het doorrekenen van klimaatrobuuste varianten kan beter rekening worden gehouden met de invloed van extremen, zoals erge natte neerslagperioden, langdurig droge periodes, extreme stijging van $CO_{2,}$ sterk veranderende temperaturen, effecten van verschillende fotosynthese-systemen (C3/C4) van gewassen;
- Het maakt een verbeterde afweging mogelijk van schades door te droge, versus te natte en te zoute omstandigheden en eventueel door te veel sneeuw en vorst.
- Bij regionale toepassing is een sterk verbeterde ruimtelijke interactie mogelijk tussen landgebruik en management, zoals het effect van veranderend waterbeheer in een regio op het landgebruik in een aangrenzend gebied.

Een dynamische koppeling heeft ook nadelen:

- De simulatie van gewasgroei als resultaat van een dynamische waterbalans vereist dat gewasgroei en gewasopbrengsten realistisch worden berekend. Onder de aanname dat er een lineair verband bestaat tussen gewasopbrengst en transpiratie, betekent een fout in de gewasgroei ook een fout in de transpiratie en dus in de waterbalans. Een fout in de verdamping kan zich vervolgens versterkt doorzetten in fouten in de grondwateraan- en afvoer. Dit kan resulteren in (te) hoge verdamping waardoor minder grondwaterafvoer ontstaat en een dalende grondwaterstand waardoor vervolgens gewasreductie optreedt die op zijn beurt weer kan resulteren in verdere afname van de verdamping. Te lage verdamping kan bij bepaalde randvoorwaarden ook resulteren in toenemende grondwaterafvoer en/of stijgende grondwaterstanden, waardoor eveneens gewasgroei geremd kan worden. In deze voorbeelden ontstaan ongewenste effecten op de waterbalans en de resulterende gewasgroei. Voorzichtigheid is dus geboden bij het invoeren van een dynamische koppeling tussen gewasgroei en de bodemvochthuishouding.
- Parameterwaarden voor de gewasgroei, gecombineerd met gedetailleerde hydraulische bodemgegevens, moeten met veldexperimenten worden onderbouwd. Dit is tijdrovend en er zijn weinig geschikte datasets beschikbaar.

De genoemde voordelen schatten wij echter groter in dan de nadelen. Bovendien is een koppeling noodzakelijk als we uiteindelijk op een juiste wijze de gevolgen van klimaatverandering willen kunnen bepalen. Voor deze studie zijn verkennende berekeningen uitgevoerd om de meerwaarden van een dynamische simulatie van de gewasgroei te illustreren. Deze verkenningen zijn uitgevoerd voor droogteschade bij grasland en aardappelen, telkens met en zonder dynamische gewasgroei. Daarbij hebben we gekeken naar de effecten op transpiratie en gewasopbrengst.

Daarvoor zijn 30 jaar meteorologische gegevens van De Bilt gebruikt. Uit de reeks 1981-2010 zijn, op basis van de jaarlijkse neerslaghoeveelheid, 3 jaren (1983, 1996, 1998) gekozen: een gemiddeld, een droog en een zeer nat jaar (Tabel 7).

**TABEL 7** **NEERSLAG EN RANKING VAN 3 KALENDERJAREN UIT DE REEKS 1981-2000**

| Jaar | Neerslag (mm/jr) | Rangorde 1981-2010 | Neerslag type |
|---|---|---|---|
| 1983 | 828 | 15 | Gemiddeld |
| 1996 | 576 | 1 | Droog |
| 1998 | 1240 | 30 | Zeer Nat |

In dit geval is gekozen voor rangschikking naar neerslag omdat de verdamping het resultaat is van onze berekening en verschilt tussen de statische en de dynamische berekeningswijze (c.q. standaard SWAP en SWAP gekoppeld aan WOFOST).

Om de invloed van grondwater op een eenvoudige wijze te minimaliseren is een drainagerelatie als onderrand ingevoerd die resulteerde in een Gt=VIII voor beide situaties.

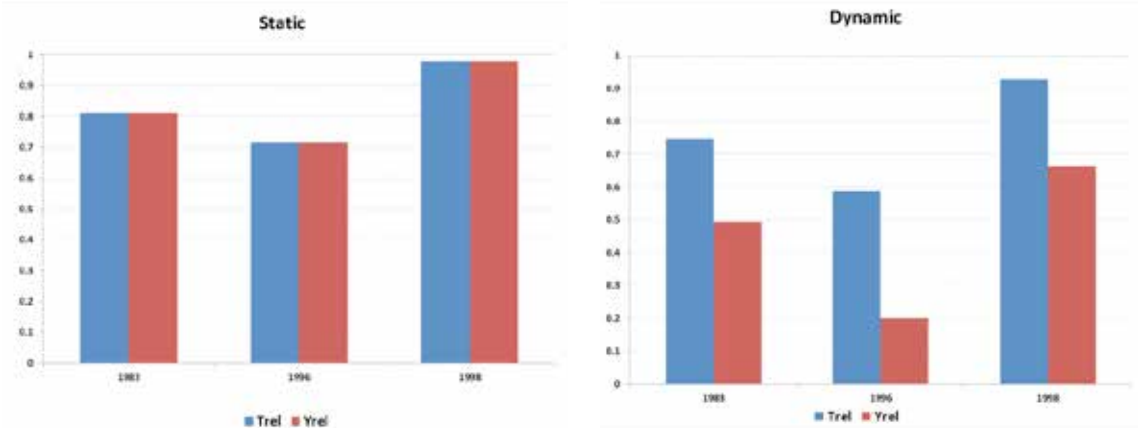
Relatieve transpiratie $T_{rel}$ is gebruikt als een maat voor de reductie van de gewasverdamping, dus de verhouding tussen de actuele en de potentiële transpiratie: $T_{rel} = T_{act}/T_{pot}$. Analoog hieraan is $Y_{rel}$ een maat voor de reductie van de gewasopbrengst, ofwel de verhouding tussen de actuele en de potentiële gewasopbrengst : $Y_{rel} = Y_{act}/T_{pot}$. In de statische benadering geldt dat $Y_{rel} = T_{rel}$, in de dynamische benadering hoeft deze betrekking niet op te gaan.

Het gaat hier om voorbeeldberekeningen waarbij situaties zijn doorgerekend om het nut van dynamische gewasgroei te illustreren. De berekeningen hebben dus geen algemene geldigheid; daarvoor zijn uitgebreidere analyses nodig.

### DROOGTE BIJ GRASLAND

Er is een graslandperceel uitgekozen dat in eerdere studies is gebruikt en is gelegen in de omgeving van Ruurlo (zie o.m.Kroes en Supit (2011)). Hierna worden de rekenresultaten van de drie geselecteerde jaren (1983, 1996, 1998) gegeven en besproken.

FIGUUR 32 RELATIEVE TRANSPIRATIE ($T_{REL}$) EN RELATIEVE GEWASOPBRENGST ($Y_{REL}$)BEREKEND MET STATISCHE (LINKS) EN DYNAMISCHE GEWASGROEI (RECHTS) VOOR GRAS.




TABEL 8 RELATIEVE TRANSPIRATIE ($T_{REL}$) EN RELATIEVE GEWASOPBRENGST ($Y_{REL}$) VOOR DE BEREKENING MET STATISCHE EN DYNAMISCHE GEWASGROEI

| jaar | Static | | | | Dynamic | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Trel (-) | Tpot (mm) | Tact (mm) | Yrel | Trel (-) | Tpot (mm) | Tact (mm) | Yrel |
| 1983 | 0.8 | 456 | 370 | 0.8 | 0.7 | 530 | 395 | 0.5 |
| 1996 | 0.7 | 452 | 323 | 0.7 | 0.6 | 489 | 287 | 0.2 |
| 1998 | 1.0 | 395 | 387 | 1.0 | 0.9 | 499 | 463 | 0.7 |

Uit de resultaten van de voorbeeldberekeningen voor grasland (Figuur 32 en Tabel 8) blijkt onder meer het volgende:

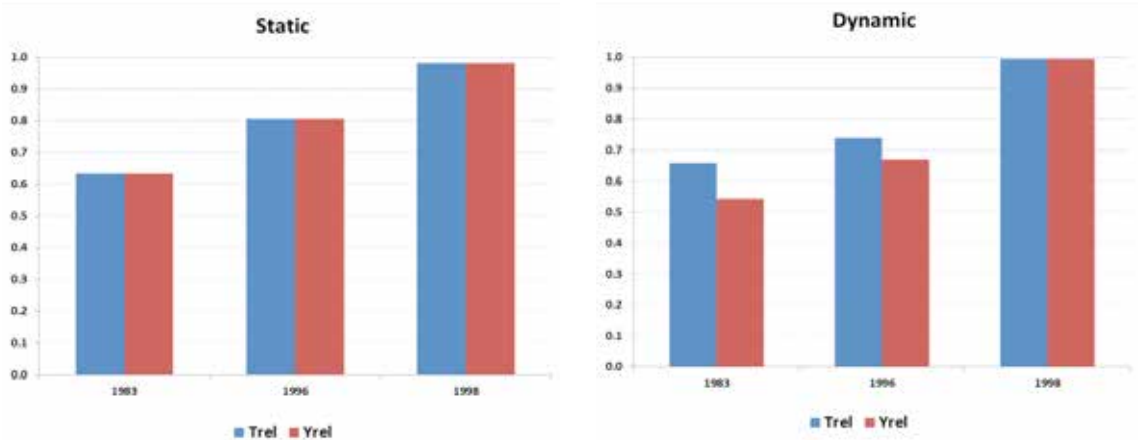
- In beide systemen (statische en dynamische gewasgroei) is de transpiratiereductie in het droge jaar het grootst. De transpiratiereductie is bij de dynamische berekening groter en toont meer spreiding dan bij de berekening met statische gewasgroei.
- Statische gewasgroei (Figuur 32 links) en dynamische gewasgroei laten een relatieve opbrengst zien van respectievelijk 0.7 en 0.2. Bij de dynamische gewasgroei ontstaat nu zelfs in het natte jaar 1998 een opbrengstderving van 30%. Bij dynamische gewasgroei (Figuur 32 rechts) valt vooral de opbrengstreductie op in het extreem droge jaar. Bij de dynamische gewasgroei is de potentiële verdamping (Tpot) hoger in alle drie de jaren. In beide gevallen (statisch en dynamisch) is de verdampingsberekening gebaseerd op Penman-Monteith. De verschillen worden vooral verklaard door verschillen in LAI. Bij de statische berekening heeft de LAI een constante waarden van 3.0, terwijl de dynamische berekening veelal resulteert in LAI's groter dan 3.0. Hierdoor nemen zowel potentiële als actuele transpiratie toe bij de dynamische berekening met SWAP-WOFOST doordat de partitionering van ET over bodem en gewas verschilt.

In de praktijk zal worden beregend waardoor deze opbrengstdervingen momenteel niet of weinig voorkomen.

## DROOGTE BIJ AARDAPPELEN

Voor een perceel met aardappelen worden de rekenresultaten van de drie geselecteerde jaren (1983, 1996, 1998) hierna gegeven en besproken.

FIGUUR 33 RELATIEVE TRANSPIRATIE ($T_{REL}$) EN RELATIEVE GEWASOPBRENST ($Y_{REL}$) BEREKEND MET DE STATISCHE (LINKS) EN DE DYNAMISCHE GEWASGROEI (RECHTS) VOOR AARDAPPELEN.




TABEL 9 RELATIEVE TRANSPIRATIE ($T_{REL}$) EN GEWASOPBRENGST ($Y_{REL}$) ZOALS BEREKEND MET DE STATISCHE EN DYNAMISCHE GEWASGROEI VOOR AARDAPPELEN ONDER DROGE OMSTANDIGHEDEN

| jaar | Static_Trel | Static_Yrel | Dynamic_Trel | Dynamic_Yrel |
|---|---|---|---|---|
| 1983 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.5 |
| 1996 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.7 |
| 1998 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

Deze voorbeeldberekeningen (Figuur 33 en Tabel 9) laten onder meer het volgende zien:

- In beide systemen (statische en dynamische gewasgroei) is de transpiratiereductie in het gemiddelde jaar het grootst.
- In de berekening met een statische gewasgroei (Figuur 33 links) is er geen verschil tussen opbrengstderving en transpiratiereductie, omdat deze worden verondersteld gelijk te zijn (modelaanname).
- Bij dynamische gewasgroei (Figuur 33 rechts) valt vooral de opbrengstreductie op in het gemiddelde jaar. Zonder en met dynamische gewasgroei is de opbrengstreductie respectievelijk 0.8 en 0.7. In het natte jaar 1998 is er nu geen opbrengstderving.

Het gemiddelde jaar 1983 blijkt niet gemiddeld voor aardappelen. Het jaar 1998 staat bekend als een zeer nat jaar. Toch levert dit voor aardappelen geen gewasschade op, wat komt doordat in de simulaties de aardappelen al van het land waren voor de extreme regenval. Bovendien is een situatie met een lage Gt doorgerekend om vooral effecten bij droogte zichtbaar te laten komen.

De neerslaghoeveelheid tijdens het groeiseizoen is in het droge jaar 1996 gunstiger dan in het gemiddelde jaar 1983 (Tabel 10). Bovendien is de neerslagverdeling in het droge jaar regelmatiger. Dit zorgt ervoor dat de relatieve opbrengstderving in het gemiddelde jaar het grootst is.

TABEL 10 RELATIEVE TRANSPIRATIE ($T_{REL}$) EN GEWASOPBRENGST ($Y_{REL}$) BEREKEND MET DYNAMISCHE GEWASGROEI VOOR AARDAPPELEN.

| Jaar | Neerslag N (mm / groeiseizoen) | Tpot (mm / groeiseizoen) | ETpot (mm / groeiseizoen) | N-ETpot (mm / groeiseizoen) | Opbrengst_pot. Ypot (kg/ha DM) | Opbrengst_actt. Yact (kg/ha DM) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1983 | 176 | 270 | 390 | -213 | 13464 | 7312 |
| 1996 | 262 | 204 | 362 | -101 | 14289 | 9576 |
| 1998 | 353 | 189 | 339 | 14 | 14721 | 14651 |

### SLOT

Met betrekking tot opbrengstreductiebepaling is er nog een kanttekening. De potentiële fysieke opbrengst is in de praktijk namelijk niet haalbaar en dus zijn de bepaalde schades ten opzichte van dat theoretische maximum niet erg realistisch. Daarom zal in beschouwing worden genomen of de potentiële fysieke opbrengst eerst kan worden omgezet in een in de praktijk maximaal haalbare fysieke opbrengst. Hoe die moet worden vastgesteld volgt mogelijk na fase 2.

Op voorhand is niet helder of er nog aanvullende wensen zijn voor de berekening van zoutschade. In de huidige methodiek is een variant opgenomen die rekent met zout in het beregeningswater dat vervolgens in de bodem terechtkomt. Andere vormen van aanvoer van zout of brak water zijn dus nu niet mogelijk. Het lijkt ons een goed idee om de komende tijd na te gaan of de zoutschadeberekening die nu is ingebouwd in de methode voldoende is voor de vragen op dit gebied. Zo niet, dan zullen er aanvullende opties moeten worden overwogen.

## 6.2 BEDRIJFSVOERING

Veel gehoord is de roep om het aspect bedrijfsvoering toe te voegen aan de HELP-methodiek (Hack-Ten Broeke et al., 2010). We richten ons daarbij in eerste instantie op de melkveehouderij en de akker- en tuinbouw. Voor de sectoren melkveehouderij en akkerbouw en vollegrondsgroente zijn breed gedragen tools beschikbaar, namelijk BBPR en MEBOT. Op basis hiervan zijn metarelaties af te leiden, die eenvoudig, zonder verdere tussenkomst van de modellen, toepasbaar zijn.

Er bestaat al een koppeling tussen SWAP en BBPR, genaamd Waterpas. Binnen Waterpas wordt voor een melkveebedrijf op perceelsniveau de waterhuishouding doorgerekend met het model SWAP, vervolgens wordt de grasgroei berekend met het model GRAMIN, waarbij vochttekort of N-tekort leidt tot vertraagde groei en te natte omstandigheden die beperking opleggen aan graslandgebruik vanwege beperkte draagkracht (met name beweiding). De graslandgebruiksplanner simuleert aan de hand van de bedrijfsvoering het graslandgebruik (per perceel beslissing weiden, maaien en beweidingsduur) en BBPR berekent vervolgens de bedrijfseconomie en ook een nutriëntenbalans. Het graslandgebruik interacteert met de voeropname en de melkproductie van melkvee. Zodoende hebben berekeningen op bedrijfsniveau voor de melkveehouderij een grote meerwaarde. Op gebiedsniveau is tot nu toe vooral gerekend voor veenweidegebieden.

Voor de bedrijfsvoering voor de akker- en tuinbouw (vollegronds) is er het bedrijfsmodel MEBOT. Dit model is qua opzet vergelijkbaar met het bedrijfsmodel BBPR voor de melkveehouderij. Met MEBOT kunnen bedrijfsscenario's (bijvoorbeeld op gebied van mineralen en gewasbescherming) worden doorgerekend. Het model is gekoppeld aan KWIN (Kwantitatieve Informatie) dat allerlei bedrijfseconomische kengetallen bevat (prijzen producten, standaard

opbrengstniveaus, spuitschema's, e.d.). Voor alle KWIN-gewassen is de volledige bedrijfsvoering beschikbaar. Het model produceert bedrijfseconomische (o.a. financieel resultaat en arbeidsfilm) en milieutechnische kengetallen (o.a. nutriëntenoverschotten, nitraatuitspoeling). Vooralsnog is MEBOT nog niet gekoppeld aan simulatiemodellen voor waterhuishouding en gewasgroei.

Door koppeling van de nieuw ontwikkelde methodiek met bedrijfsvoering is een realistische inschatting van het effect op bedrijfsinkomen mogelijk en daarmee een inschatting van de werkelijke schade voor het landbouwbedrijf gebaseerd op de op dat moment geldende bedrijfseconomische kengetallen.

## 6.3 INDIRECTE EFFECTEN

### 6.3.1 INLEIDING

Indirecte schade is de schade als gevolg van te natte, te droge of te zoute omstandigheden die **niet** via de effecten van niet-optimale omstandigheden in de wortelzone op gewasverdamping en daaraan gekoppelde gewasgroei ontstaat. Indirecte natschade is bijvoorbeeld het gevolg van het niet op tijd kunnen zaaien doordat het perceel door te natte omstandigheden niet kan worden bewerkt. Indirecte droogteschade kan bijvoorbeeld ontstaan doordat het gewas door fysiologische oorzaken voortijdig afsterft; indirecte zoutschade is bijvoorbeeld door beregenen met zout water veroorzaakte structuurbederf op kleigronden. Zie ook hoofdstuk 3.

De indirecte natschade is de belangrijkste vorm van indirecte schade. In de HELP-tabel is de natschade gebaseerd op praktijkkennis en veldproeven en bestaat deze vooral uit indirecte natschade. De kennis is in sterk geschematiseerde vorm vertaald naar een relatie tussen GHG en GLG enerzijds en natschade anderzijds. Nadien zijn inspanningen gepleegd deze relatie voor zowel bouwland als grasland beter te onderbouwen maar dat heeft niet geleid tot een bruikbare en klimaatbestendige methode om indirecte natschade te koppelen aan een waterhuishoudkundige karakteristiek.

In deze paragraaf wordt een schets gegeven van de mogelijkheden om de indirecte natschade voor zowel graslandbedrijven als andere bedrijven met open teelten te koppelen aan een waterhuishoudkundige karakteristiek. Deze schets is gebaseerd op kennis van de literatuur, enige verkennende berekeningen en op de bespreking van twee startnotities, waarbij de volgende deskundigen waren betrokken:

- Idse Hoving en Gertjan Holshof (WUR-ASG);
- Mirjam Hack, Joop Kroes en Jan van den Akker (WUR-Alterra);
- Wim van Dijk en John Verhoeven (WUR-PPO);
- Jan van Bakel (De Bakelse Stroom), tevens opsteller van de startnotities.

### 6.3.2 INDIRECTE NATSCHADE OP MELKVEEBEDRIJVEN

#### INLEIDING

Indirecte natschade op melkveebedrijven is het gevolg van het niet kunnen maaien of beweiden of niet kunnen uitvoeren van mestinjectie of grasverzorging als gevolg van te natte omstandigheden. Maar ook het vertrappen of stuk rijden van de zode door te beweiden of berijden onder te natte omstandigheden. De hamvraag is hoe deze schade is te koppelen aan te natte omstandigheden en hoe deze natte omstandigheden zijn te koppelen aan waterhuis-

houdkundige karakteristieken. Daarvoor wordt een methode voorgesteld die hierna wordt beschreven.

**UITGANGSPUNTEN**

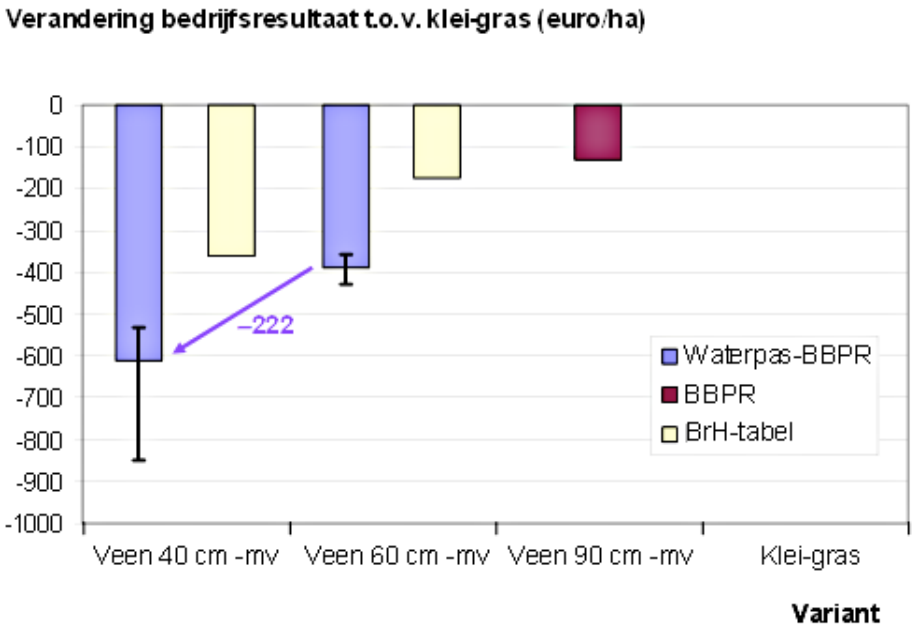
Het uitgangspunt voor melkveebedrijven is dus dat de indirecte natschade alleen kan worden berekend op bedrijfsniveau. De grasopbrengst per perceel is uiteindelijk immers niet sturend, maar het effect op de melkproductie en daarmee het bedrijfsresultaat is dat wel. De bedrijfsvoering op een melkveebedrijf hangt namelijk af van de mogelijkheden om een perceel te kunnen beweiden of niet. In dat laatste geval wordt in een later stadium veelal gemaaid. Bovendien is gegeven de veebezetting een lagere grasopbrengst gecompenseerd met aankoop van ruwvoer of krachtvoer. De mate van zelfvoorzienendheid van een bedrijf bepaalt in sterke mate hoeveel moet worden aangekocht, en dus wat de extra kosten zijn.

Om op bedrijfsniveau de effecten van waterbeheersmaatregelen te kunnen bepalen is het model Waterpas ontwikkeld. De eerste voorloper van Waterpas is beschreven in Peerboom (1990). Het model integreert de agrohydrologische kennis zoals geoperationaliseerd in diverse modellen en relaties voor de hydrologie (SWAP), de gewasgroei (groeicurves), het graslandgebruik (VVW) en de bedrijfsbegroting (BBPR). Een bedrijf wordt opgedeeld in een aantal percelen en per perceel worden, afhankelijk van het beweidingssysteem, op basis van criteria ten aanzien van gerealiseerde droge stofopbrengst, snedes gemaaid of beweid. Het niet kunnen berijden of beweiden van een perceel door te natte omstandigheden kan leiden tot verstoring van het geplande graslandgebruik en droogteschade kan leiden tot vertraging van de groei, met gevolgen voor het graslandgebruik, de voedervoorziening en bedrijfsinkomsten. Zie o.a. De Vos et al. (2004a) en De Vos et al. (2010).

In Waterpas wordt de indirecte natschade bepaald door koppeling van de berijdbaarheid of beweidbaarheid aan de draagkracht. Deze draagkracht is via een eenduidige relatie, die afhankelijk is van o.a. de grondsoort, gekoppeld aan de drukhoogte op een bepaalde diepte in de wortelzone. Hoe lager de drukhoogte hoe groter de draagkracht. Als de drukhoogte te laag is kan er niet op het perceel mest worden geïnjecteerd, noch worden gemaaid of beweid. Dit heeft invloed op de gewasgroei en op de groei en kwaliteit van het gras. Ook is het mogelijk dat koeien moeten worden opgestald en moeten worden bijgevoerd met de daarmee verbonden extra kosten. Dit vertaalt zich in een minder bedrijfsinkomen, vergeleken met de situatie dat de grondwatersituatie optimaal is.

In de literatuur zijn voorbeelden te vinden van toepassingen van Waterpas (of aangepaste versies) in het veenweidegebied. Zie o.a. De Vos et al. (2004b) en Van Bakel et al. (2009a). In De Vos et al. (2008) zijn ze samengevat. Figuur 34 is daaraan ontleend.

FIGUUR 34 VERGELIJKING TUSSEN BEDRIJFSRESULTATEN VOLGENS WATERPAS-BBPR EN DE HELP-TABEL VOOR MELKVEEHOUDERIJ OP GRAS LAND OP VEENGROND BIJ EEN PEIL VAN 40, 60 EN 90 CM – MV EN TEN OPZICHTE VAN EEN BEDRIJF OP KLEIGROND DAT ALS OPTIMAAL WORDT BESCHOUWD (GEEN NAT- EN DROOGTESCHADE). UIT DE VOS ET AL. (2008).




De meerwaarde ten opzichte van de HELP-tabel is vooral dat de berekende geldelijke schade per jaar kan worden berekend terwijl met de HELP-tabel alleen een veeljarig gemiddelde fysieke schade in procenten wordt verkregen. Door de omzetting van deze veeljarig gemiddelde schade naar geldelijke schade via een bedrag per procent daling van de fysieke opbrengst kan niet of onvoldoende rekening worden gehouden met de bedrijfssituatie.

De klimaatbestendigheid van Waterpas is daarmee echter niet aangetoond. Het is echter redelijk te veronderstellen dat de relatie tussen drukhoogte en draagkracht onafhankelijk is van het klimaat (maar wel afhankelijk van ontwikkeling in beweidingsystemen en veranderingen in het machinepark). Bij een ander klimaat worden andere drukhoogtes berekend en dus andere indirecte natschades.

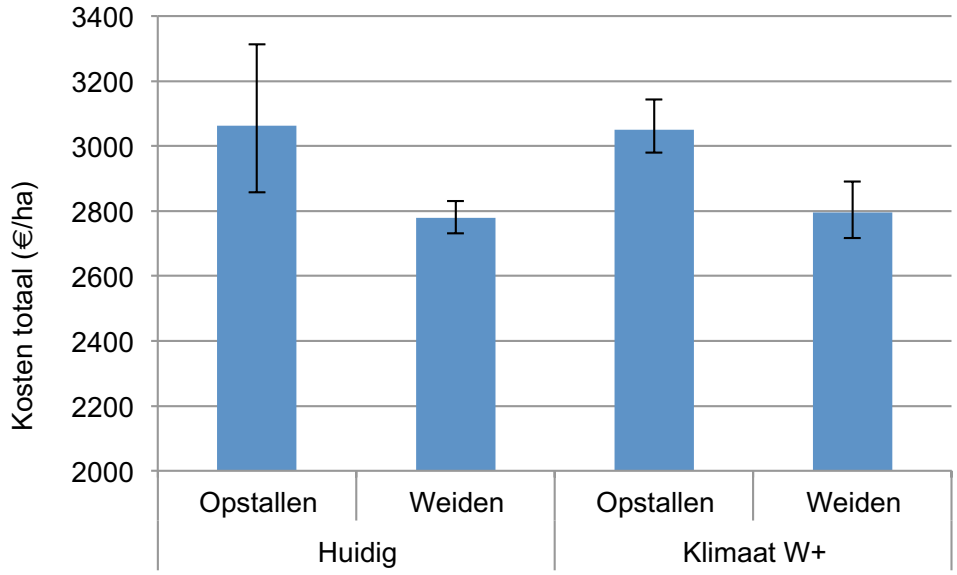
Om de toepassing van Waterpas te illustreren zijn voor een bedrijf, waarvoor in het kader van het project 'Landbouw op Peil' SWAP-berekeningen zijn uitgevoerd, de berekende dagwaarden van de drukhoogtes in de wortelzone van de jaren 2001-2010 gebruikt om met Waterpas de kosten per ha te berekenen voor huidig klimaat en W+.

De kenmerken van het bedrijf zijn:

| **Mestwetgeving** | | **2013** |
|---|---|---|
| Aantal koeien | (stuks) | 120 |
| Aantal pinken | (stuks) | 46,5 |
| Aantal kalveren | (stuks) | 48,9 |
| Melkquotum | (ton) | 1080 |
| Oppervlakte grasland | (ha) | 38 |
| Oppervlakte snijmaïs | (ha) | 16 |
| Melkproductie per koe | (kg/koe) | 9000 |
| Grondsoort | | pRn59/pZg21 |
| GHG | (cm-mv) | 20 |
| GLG | (cm-mv) | 120 |

Er is gerekend met twee beweidingssystemen: weiden en opstallen. Figuur 35 geeft inzicht in de kosten waarbij tevens de spreiding in kosten tussen de jaren is aangegeven.

FIGUUR 35 **TOTALE JAARLIJKSE KOSTEN (€/HA) VOOR LOONWERK, KUNSTMEST EN MESTAFZET, BEREKEND MET WATERPAS VOOR HET HUIDIGE KLIMAAT EN SCENARIO W+ VOOR EEN BEDRIJF WAARBIJ AL HET VEE IS OPGESTALD ('OPSTALLEN') EN EEN BEDRIJF WAARBIJ HET VEE DE WEI IN GAAT ('WEIDEN').**




De totale veeljarig gemiddelde kosten verschillen voor de twee klimaatreeksen nauwelijks, door de relatief goede vochtvoorziening op het betreffende bedrijf. Wel neemt voor opstallen de variatie tussen weerjaren in de toekomst af en neemt daarentegen voor weiden de variatie tussen weerjaren toe. De totale kosten voor opstallen zijn bij gelijke melkproductie beduidend hoger.

De resultaten maken duidelijk a) dat de bedrijfsvoering belangrijk is, b) dat met Waterpas de spreiding in schades tussen de jaren kan worden meegenomen en c) dat het mogelijk is om klimaatscenario's door te rekenen.

### TYPERING MELKVEEBEDRIJVEN

Het is niet mogelijk en ook niet noodzakelijk voor elk bedrijf afzonderlijk de indirecte natschade te berekenen. Er is dus een typering van bedrijfstypen nodig.

Voor het veenweidegebied zijn met Waterpas berekeningen uitgevoerd en daarbij zijn pogingen ondernomen bedrijfstypen te karakteriseren op basis van bedrijfsgrootte, melkquotum, beweidingssysteem en drooglegging. Zie De Vos et al. (2007).

Op basis van de daarbij verkregen inzichten, maar ook bij het maken van de Inundatiewijzer (http://webapplicaties.wur.nl/software/inundatiewijzer), is de overtuiging ontstaan dat met een beperkt aantal bedrijfstypen een goede steekproef voor een regio kan worden verkregen.

### HAALBAARHEID

Om de haalbaarheid van de bepaling van nat- en droogteschade op melkveebedrijven aan te geven wordt hier geschetst welke stappen gevolgd zouden kunnen worden. Allereerst kan de gewasgroei in Waterpas worden gekoppeld aan de gewasgroei zoals door SWAP-WOFOST wordt

berekend en het maaien of begrazen van de snedes uit Waterpas kan worden teruggekoppeld naar SWAP-WOFOST. De door SWAP gesimuleerde drukhoogtes op een bepaalde diepte in de wortelzone bepalen de berijdbaarheid of beweidbaarheid. De relatie tussen drukhoogte en wel of niet berijdbaarheid en beweidbaarheid kan vervolgens worden geactualiseerd inclusief de schade aan de zode door beweiding of berijding onder te natte omstandigheden. Ook de relatie tussen drukhoogte (of een andere variabele) en structurele verandering in stevigheid van de zode kan worden geactualiseerd.

De gekoppelde modules voor hydrologie, gewasgroei en graslandgebruik kunnen worden gebruikt voor het doorrekenen van een groot aantal combinaties van hydrologie, bodem en graslandgebruik. De rekenresultaten kunnen worden gebruikt voor het opstellen van metarelaties.

Nederland kan worden opgedeeld in een beperkt aantal landbouwregio's met per regio eigen klimaatreeksen en per regio kan op basis van landbouwstatistieken een beperkt aantal bedrijfstypen worden gedefinieerd. Op basis van statistieken over relevante bodemeigenschappen en agrohydrologische karakteristieken kunnen per bedrijfstype slim voorbeeldcombinaties worden 'getrokken' (gesampled). Per bedrijfstype per regio kan dan een relevante selectie van de metarelaties worden gebruikt om de effecten van verandering in waterhuishoudkundige karakteristieken op de bedrijfsinkomsten te berekenen voor verschillende scenario's. De achteruitgang van de grassamenstelling of (gedeeltelijk) afsterven van de zode door aanhoudend te lange natte of te droge omstandigheden worden op basis van expertise 'op geld gezet'. Ten slotte kunnen deze resultaten worden gebruikt voor het opstellen van de nieuwe HELP-tabellen.

De voorgestelde aanpak bevat elementen zoals voorgesteld door Huinink (2011) maar de opbrengstderving door een beperkte lengte van het draagkrachtseizoen wordt expliciet berekend met SWAP-WOFOST, in plaats van met opgelegde groeicurves.

Zoutschade op melkveebedrijven wordt vooralsnog verondersteld nauwelijks op te treden en wordt buiten beschouwing gelaten.

### 6.3.3 INDIRECTE NAT- EN ZOUTSCHADE AAN OPEN TEELTEN

#### INLEIDING

Open teelten zijn alle landbouwgewassen die worden geteeld in de open lucht, met uitzondering van grasland en maïs.

Indirecte natschade is gedefinieerd als de opbrengstvermindering als gevolg van:

- het niet op tijd kunnen zaaien of poten van gewassen, door lagere bodemtemperaturen als gevolg van natte bodemomstandigheden;
- het niet in staat zijn het zaaibed op tijd gereed te maken door te natte bodemomstandigheden;
- het niet berijdbaar zijn van het zaai- of pootbed door te natte bodemomstandigheden;
- een vertraagde opkomst en groei van het gewas als gevolg van lagere bodemtemperaturen door te natte bodemomstandigheden (hetgeen mogelijk met SWAP-WOFOST) kan worden meegenomen;
- het niet of onvoldoende kunnen spuiten of verplegen van het gewas tijdens de groei als gevolg van natte bodemomstandigheden;

- het (gedeeltelijk) verrotten van het oogstbaar product tijdens het groeiseizoen, als gevolg van te natte omstandigheden;
- het niet of te laat kunnen oogsten van het gewas als gevolg van te natte bodemomstandigheden;
- extra structuurbederf en daardoor meer directe natschade en vervolgschade, als gevolg van berijden of bewerken onder te natte bodemomstandigheden;
- extra verslemping als gevolg van natte bouwvoor.

De hamvraag is hoe deze relaties zijn te specificeren en hoe natte omstandigheden zijn te koppelen aan agrohydrologische karakteristieken. Daarvoor wordt hier een methode voorgesteld die hierna wordt beschreven.

**UITGANGSPUNTEN**

Het belangrijkste uitgangspunt is dat voor open teelten het niet noodzakelijk is de schade per gewas te koppelen aan de bedrijfskenmerken (maar uiteraard wel aan de stand van de techniek).

Uitgangspunt is ook dat de indirecte natschade kan worden berekend met een methode waarin de bewerkbaarheid, of berijdbaarheid of de extra structuurschade als gevolg van bewerken of berijden onder te natte omstandigheden, op een eenduidige, maar wel van de grondsoort afhankelijke, manier is gekoppeld aan de drukhoogte in de wortelzone. Deze aanpak is conform Van Wijk et al. (1988). De relaties kunnen worden ontleend aan bestaande kennis en worden geacht klimaatonafhankelijk te zijn. Een veranderd klimaat vertaalt zich in een verandering in de sturende variabelen, in dit geval de drukhoogte inde wortelzone. Het tijdsverloop van de drukhoogte in de wortelzone kan met SWAP worden berekend waarmee ook een geschikte, nog nader vast te stellen, waterhuishoudkundige karakteristiek wordt berekend. Daarnaast is het waarschijnlijk nodig het groot aantal gewassen of teelten terug te brengen tot een beperkt aantal, op basis van bouwplan en saldo, en (indien van toepassing) zouttolerantie.

**HAALBAARHEID**

Om de haalbaarheid van een herziene relatie tussen waterhuishoudkundige karakteristiek en indirecte natschade aan te geven schetsen we hier welke stappen gevolgd zouden kunnen worden. Allereerst kan de relatie tussen drukhoogte op een bepaalde diepte in de wortelzone en berijdbaarheid en bewerkbaarheid voor de verschillende vormen van berijding of bewerking worden geactualiseerd en zo mogelijk (en indien relevant) gekoppeld aan teeltkeuze en teeltwijze. De gevolgen van berijden of bewerken onder te natte omstandigheden kunnen op basis van bestaande kennis worden vertaald naar gevolgen voor de zuurstofuitwisseling en vochtleverend vermogen. De gevolgen van te hoge grondwaterstand op de verslemping van gronden kunnen worden vertaald naar gevolgen voor de zuurstofvoorziening. De kennis over verrotting van het oogstbaar product als gevolg van te natte omstandigheden (dus anders dan schade door verminderde wateropname door zuurstofstress) kan worden gekoppeld aan de drukhoogte en de temperatuur in de wortelzone. Per gewas of teelt kunnen de benodigde bewerkingen worden gespecificeerd gedurende het jaar.

Nederland kan worden opgedeeld in een beperkt aantal landbouwregio's met voor elke regio typerende open teelten en klimaatreeksen voor huidig en toekomstig klimaat, met onderscheid in beregenbaar en niet-beregenbaar. De gekoppelde verdamping en gewasgroei met en zonder vertragingen in het zaaien of opkomst en met en zonder optreden van ziektes als

gevolg van het niet kunnen uitvoeren van bespuitingen of grondontsmettingen, maar wel met directe droogte en zoutschade, kunnen per gewas voor een groot aantal combinaties van bodem en hydrologie worden doorgerekend, voor zowel het huidige als het toekomstige klimaat. De uitkomst kan worden vertaald naar kg-opbrengst oogstbaar product. Per gewas kan de benodigde bewerkingsperiode en het benodigd aantal dagen voor zaaiklaar maken worden gespecificeerd. Het niet tijdig kunnen bewerken of berijden kan leiden tot een verlating van de start van het groeiseizoen (is opkomst- of plantdatum).

Voor de oogstwerkzaamheden kan in de oogstperiode een bepaald aantal dagen worden gespecificeerd. Indien het aantal oogstbare dagen in die periode geringer is dan het benodigde aantal gaat een evenredig deel van de oogst verloren of, bij wel oogsten, treedt structuurschade op met gevolgen voor directe natschade en het vochtleverend vermogen voor de gewassen erna.

De indirecte fysieke natschade kan met behulp van de saldi uit AGRICOM worden omgezet naar geldelijke opbrengstvermindering. De effecten van te natte omstandigheden op de verrotting of kwaliteit van het oogstbaar product of de indirecte effecten van beregenen met niet-zoet water kunnen op basis van expertkennis ‘op geld worden gezet’. De totale schades kunnen worden gekoppeld aan de meest voorspellende waterhuishoudkundige karakteristiek waarvan een metarelatie kan worden afgeleid.

De kennis over draagkrachtgrenzen, verrotting van oogstbaar product en structuurschade kan worden ontleend aan bestaande (overzichts)literatuur. Zie o.a. Huinink (2011). Het gaat primair om operationalisering van deze kennis.

## 6.4 METEN EN VALIDATEREN

Het ontwikkelde systeem moet goed gevalideerd worden alvorens het kan worden toegepast. Dit is nodig om te weten hoe goed het de werkelijkheid benadert. Hiervoor is een onafhankelijke dataset nodig. We zoeken daarbij naar zoveel mogelijk verschillende gewassen, bodemtypen en hydrologische omstandigheden. We willen hiervoor aansluiting zoeken bij resultaten van projecten die zijn uitgevoerd in relatie tot klimaatverandering (veelal gemeten verdamping, gewasopbrengst, $CO_2$-gehalte) en bij het internationaal netwerk van gewasonderzoekers. Deze toetsmogelijkheden hebben betrekking op onderdelen van het rekeninstrumentarium. Daarnaast houden we de mogelijkheid open om de gegevens uit het BedrijfsInformatieNetwerk (BIN) van het LEI te gebruiken, evenals informatie uit remote sensingbeelden (zoals gebruikt voor de Groenmonitor en SAT-WATER). Deze gegevens zijn vooral inzetbaar als toets aan de Nederlandse praktijk.

# 7
# CONCLUSIES

Met de in deze notitie beschreven verbeteringen aan het SWAP model en het opgezette systeem voor het afleiden van metarelaties tussen grondwaterkarakteristieken en opbrengstdepressie is een belangrijke stap gezet naar een klimaatrobuuste bepaling van landbouwschade. Het systeem dient de verouderde HELP- en TCGB-tabellen, die ongeschikt zijn voor toepassing in zowel het huidige als toekomstige klimaat, te vervangen.

In deze eerste fase van de actualisatie is een bruikbare methode opgezet, gebaseerd op actuele gegevens en (klimaatrobuuste) modellen. Op basis van het model SWAP, met nieuwe modules voor de berekening van directe effecten van droogte-, nat- en zoutschade, is een systeem ontwikkeld waarmee metarelaties tussen waterhuishoudkundige condities en gewasopbrengst kunnen worden afgeleid, voor zowel de huidige meteorologische condities, als die van het klimaat van de (nabije) toekomst. Via deze metarelaties kunnen grondwaterstanden, welke algemeen gemeten of gemodelleerd worden, eenvoudig vertaald worden naar opbrengstdepressies, zonder verdere tussenkomst van modellen. Hiermee is een stevige, theoretische basis gelegd, waarop in de vervolgfase voortgebouwd kan worden.

Voor een doorkijk naar mogelijke toepassing van het systeem zijn in deze fase conceptversies van metarelaties voor directe schades gegenereerd voor grasland en aardappel, enkele bodemtypen, het huidige klimaat en twee klimaatscenario's. Het afleiden van de conceptrelaties heeft inzichten verschaft in verbeteringen die in de vervolgfase doorgevoerd moeten worden voor het afleiden van definitieve metarelaties. Door de conceptrelaties in een pilotstudie toe te passen, kunnen aanvullende verbeterpunten gedefinieerd worden. Benadrukt moet wel worden dat het hier concept-metarelaties betreft, waarin schadefracties onder- of overschat kunnen zijn, of de grondwaterstandskarakteristieken waarvoor ze gelden (bijvoorbeeld GLG-GHG combinaties) nog te beperkt zijn. Daarom mogen deze conceptrelaties nog niet in de praktijk toegepast worden.

Belangrijke punten van kritiek op de HELP- en TCGB-tabellen zijn niet meer van toepassing op de nieuwe methode:

*De HELP- en TCGB-tabellen zijn gebaseerd op simulaties met inmiddels verouderde modellen waarbij vraagtekens worden gezet bij de juistheid waarmee transpiratiereductie is berekend*
Het systeem waarmee relaties tussen de directe effecten van droogte-, nat- en zoutschade kunnen worden bepaald, is het model SWAP. SWAP wordt internationaal gezien als het standaardmodel voor agrohydrologische berekeningen en het bepalen van de actuele verdamping als functie van meteorologische gegevens gecombineerd met gewas en bodemgegevens (Feddes en Raats, 2004). SWAP beschouwt in detail processen in de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer.

Het SWAP model is actueel en wordt voortdurend aangepast aan nieuwe gegevens en inzichten. Veel actueel onderzoek in het vakgebied vindt toepassing in SWAP. Ook is het model vrij beschikbaar, vindt er versiebeheer plaats en zijn de resultaten (zoals de afgeleide metarelaties) reproduceerbaar. Dit is een groot voordeel boven de HELP- en TCGB-tabellen, die al jaren in een bevroren staat verkeren en waarvan de achtergrond niet goed te achterhalen is.

*De HELP- en TCGB-tabellen zijn gebaseerd op verouderde meteorologische gegevens*
Het ontwikkelde systeem kan gevoed worden met elke gewenste tijdreeks van meteorologische condities. Invoer is neerslag, referentieverdamping en temperatuur, allemaal op dagbasis. Deze gegevens zijn vrij beschikbaar via de website van het KNMI en ook kunnen deze getransformeerd worden voor klimaatscenario's. Voor de conceptversies van de metarelaties (hoofdstuk 5) zijn meteorologische gegevens van De Bilt gebruikt, voor de periode 1976-2005, evenals klimaatprojecties voor 2050 volgens de KNMI'06 scenario's W en W+.

*De HELP- en TCGB-tabellen zijn in hun huidige vorm niet toepasbaar om droogte-, nat- en zoutschade in de landbouw te berekenen onder het klimaat van de (nabije) toekomst*
In dit project zijn nieuwe routines voor de berekening van transpiratiereductie als gevolg van zuurstof- en zoutstress in het SWAP model verder geoperationaliseerd. Daardoor kunnen de directe effecten van niet optimale waterhuishoudkundige condities, te weten droogte-, zuurstof- en zoutstress nu (klimaat)robuust worden berekend.

Daarnaast is het systeem zo opgezet dat ook aan de volgende wensen is voldaan:
- Zowel langjarig gemiddelde schades als variatie in de tijd (onder meer extremen) kunnen worden beschouwd;
- Zoutschade is opgenomen, wat in de HELP- en TCGB-tabellen niet het geval was;
- Opbrengstdepressies kunnen worden bepaald via zowel gedetailleerde SWAP-simulaties als via de praktisch toepasbare metarelaties. Deze metarelaties kunnen worden ingebouwd in instrumenten als Waternood en AGRICOM;
- Het systeem is uitbreidbaar, zodat nieuwe kennis kan worden ingebracht.

Bovengenoemde verbeteringen zijn in deze eerste fase van de actualisatie gerealiseerd. Verdere verbeteringen in alle aspecten voor een up-to-date methode, zoals gewasgroeimodellering, toetsing, indirecte schades en bedrijfsvoering kunnen stapsgewijs worden ingebracht. Evident is dat zodra het definitieve systeem tot stand is gekomen, het kan worden ingezet voor allerhande studies, maar ook voor het afleiden van een complete set metarelaties. Te denken valt aan alle voorkomende bodemtypen uit de bodemfysische schematisering van Nederland (Wösten et al., 2013), alle gewenste grondwater- of drooglegginsgkarakteristieken en alle relevante gewassen.

Naast de behoefte aan de metarelaties denken we dat er ook behoefte is aan het instrumentarium zelf om maatwerkberekeningen mee uit te voeren. Hiertoe willen we aan het eind van fase 2 een online tool opleveren voor gebruikers bij waterschappen, drinkwaterbedrijven, Waterdienst, en onderzoeksinstellingen.

Alleen met een herziening van de landbouwschadefuncties, waarmee in deze eerste fase een belangrijke stap is gezet, kunnen betrouwbare analyses worden gedaan. Denk daarbij aan 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 delta-instrumentarium.

# 8

# REFERENTIES

Amthor, J.F., 2000. The McCree–de Wit–Penning de Vries–Thornley respiration paradigms: 30 Years Later. Ann Bot, 86: 1-20.

Bakker, J.W., Boone, F.R., Boekel, P., 1987. Diffusie van gassen in grond en zuurstofdiffusiecoefficienten in Nederlandse akkerbouwgronden, ICW, Wageningen.

Barajas-Aceves, M., 2005. Comparison of different microbial biomass and activity measurement methods in metal-contaminated soils. Bioresour Technol, 96(12): 1405-1414.

Bartholomeus, R., Van Bakel, J., Stroet, R., Schuurmans, H., Van den Eertwegh, G., 2012. Vertrouwelijk rapport. KWR 2012.021, KWR Nieuwegein.

Bartholomeus, R.P., 2010. Verkenning bepaling droogteschade. KWR rapport BTO 2010.039(s). KWR rapport BTO 2010.039(s), Nieuwegein.

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

Bouwmans, J.M.M., 1990. Achtergrond en toepassing van de TCGB-tabel; Een methode voor het bepalen van de opbrengstdepressie van grasland op zandgrond als gevolg van een grondwaterstandsverlaging, Technische Commissie Grondwater Beheer, Utrecht.

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

CDG, 2011. Berekening normbedrag grasland en voedergewassen vanaf 2011.

De Jong van Lier, Q., Van Dam, J.C., Metselaar, K., De Jong, R., Duijnisveld, W.H.M., 2008. Macroscopic Root Water Uptake Distribution Using a Matric Flux Potential Approach. Vadose Zone Journal, 7(3): 1065-1078.

De Laat, P.J.M., 1980. Model for unsaturated flow above a shallow water-table, applied to a regional sub-surface problem. Agricultural Research Repositories (Verslagen Landbouwkundig Onderzoek) 895.

De Vos, B., Van Bakel, J., Hoving, I., Conijn, S., 2004a. Van HELP naar waterpas? H2O, 37: 17-20.

De Vos, J.A., Hoving, I.E., Van Bakel, P.J.T., Smidt, R.A., 2007. Regionale opschaling van nat- en droogteschade in de landbouw in Utrechtse veenweidegebieden. Alterra-rapport 1505, Wageningen.

De Vos, J.A. et al., 2004b. Effecten van peilbeheer in de polders Zegveld en Oud-Kamerik op de nat- en droogteschade in de landbouw. Alterra-rapport 987, Wageningen.

De Vos, J.A., Van Bakel, P.J.T., Hoving, I.E., 2008. Waterpas nat- en droogteschadeberekeningen ten behoeve van landbouwkundige doelrealisatie; Plan van aanpak. Alterra-rapport 1653, Alterra, Wageningen.

De Vos, J.A., Van Bakel, P.J.T., Hoving, I.E., Smidt, R.A., 2010. Raising surface water levels in peat areas with dairy farming: Upscaling hydrological, agronomical and economic effects from farm-scale to local scale. Agric Water Manag, 97(11): 1887-1897.

De Willigen, P., Van Noordwijk, W., 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency, Agricultural University Wageningen, 282 pp.

De Wit, C.T., 1958. Transpiration and crop yields. Agricultural Research Reports, 64.4. Pudoc, Wageningen, 88 pp.

Droogers, P., 2009. Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer; Definitiestudie. STOWA 2009-11, STOWA, Utrecht.

Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, 189 pp.

Feddes, R.A., Raats, P.A.C., 2004. Parameterizing the soil–water–plant root system. In: Feddes, R.A., Rooij, G.H.d., Van Dam, J.C. (Eds.), Unsaturated-zone Modeling: Progress, Challenges, Applications Wageningen UR Frontis Series Wageningen, pp. 95-141.

Feddes, R.A., Van Wijk, A.L.M., 1976. An integrated model-approach to the effect of water management on crop yield. Agric Water Manag, 1(1): 3-20.

Fierer, N., Colman, B.P., Schimel, J.P., Jackson, R.B., 2006. Predicting the temperature dependence of microbial respiration in soil: A continental-scale analysis. Global Biogeochemical Cycles, 20.

Fierer, N., Craine, J.M., McLauchlan, K., Schimel, J.P., 2005. Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition. Ecology, 86(2): 320-326.

Glínski, J., Stępniewksi, W., 1985. Soil aeration and its role for plants. CRC Press, Boca Raton.

Groenendijk, P., Renaud, L.V., Roelsma, J., 2005. Prediction of Nitrogen and Phosphorus leaching to groundwater and surface waters; Process descriptions of the Animo4.0 model. Alterra report 983, Wageningen.

Hack-Ten Broeke, M. et al., 2010. Behoefte en haalbaarheid vervanging HELP-tabellen, Wageningen UR.

Håkansson, I., Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil and Tillage Research, 53(2): 71-85.

Heuvelmans, G., 2010. Development and credibility assessment of a metamodel relating water table depth to agricultural production. Agric Water Manag, 97(11): 1731-1741.

Horn, R., Taubner, H., Wuttke, M., Baumgartl, T., 1994. Soil physical properties related to soil structure. Soil Tillage Res, 30: 187-216.

Huinink, J.T.M., 1993. Bodemgeschiktheidstabellen voor landbouwkundige vormen van grondgebruik, IKC Akker- en Tuinbouw, Ede.

Huinink, J.T.M., 2011. Bodemgeschiktheidsbeoordeling voor landbouw, bosbouw en recreatie t.b.v een optimalisatie van grondwater- en oppervlaktewaterpeilbeheer. State of the art 2011, BodemConsult-Arnhem, Oosterbeek.

Iman, R.L., Conover, W.J., 1982. A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables. Communications in Statistics - Simulation and Computation, 11(3): 311-334.

IPO, 2009. Klimaateffectatlas: inspelen op klimaatverandering.

Jackson, R.B. et al., 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. Oecologia, 108: 389-411.

Klein Tank, A.M.G., Lenderink, G., 2009. Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's, KNMI, De Bilt.

Kowalik, P.J., 1985. Influence of land improvement on soil oxidation, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.

Kroes, J.G., Supit, I., 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., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Jacobs, C.M.J., 2009. SWAP version 3.2, Theory description and user manual. Alterra report 1649 (update 02), Wageningen University and Research Centre, Wageningen.

Kruijt, B., Witte, J.P.M., Jacobs, C.M.J., Kroon, T., 2008. Effects of rising atmospheric CO2 on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. J Hydrol, 349(3-4): 257-267.

Lohila, A., Aurela, M., Regina, K., Laurila, T., 2003. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type. Plant Soil, 251(2): 303-317.

Maas, E.V., 1990. Crop salt tolerance. In: Tanji, K. (Ed.), Agricultural Saliniaty Assessment and Management. ASCE Manuals and Reports on Egnineering Practice No 71. American Society of Civil Engineers.

Maas, E.V., Hoffman, G.J., 1977. Crop salt tolerance - current assessment. . J. Irrigation and Drainage Division ASCE 103 (IRI): 115-134. Proceeding Paper 12993.

Metselaar, K., De Jong van Lier, Q., 2007. The Shape of the Transpiration Reduction under Plant Water Stress. Vadose Zone J, 6: 124-139.

Peerboom, J.M.P.M., 1990. Waterhuishoudkundige schadefuncties op grasland. Staring Centrum rapport 43., Wageningen.

Penning de Vries, F.W.T., Witlage, J.M., Kremer, D., 1979. Rates of respiration and of increase in structural dry matter in young wheat, ryegrass and maize plants in relation to temperature, to water stress and to their sugar content. Ann Bot (Lond), 44: 595-609.

Pierce, F.J., Larson, W.E., Dowdy, R.H., Graham, W.A.P., 1983. Productivity of soils: Assessing long-term changes due to erosion. Journal of Soil and Water Conservation, 38: 39-44.

R Development Core Team, 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, www.R-project.org/.

Raich, J.W., Mora, G., 2005. Estimating Root Plus Rhizosphere Contributions to Soil Respiration in Annual Croplands. Soil Sci Soc Am J, 69(3): 634-639.

Raich, J.W., Tufekcioglu, A., 2000. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. Biogeochemistry, 48(1): 71-90.

Reuling, T., 1983. Gebruikershandleiding voor het model LAMOS, LAndinrichtingsdienst Model voor Onverzadigde Stroming. Rapport Landinrichtingsdienst, afd. Grondwaterbeheer.

Ritzema, H. et al., 2012. Meten en interpreteren van grondwaterstanden; Analyse van methodieken en nauwkeurigheid. Alterra-rapport 2345, Wageningen.

Sieben, W.H., 1974. Over de invloed van de ontwatering op de stikstoflevering en de opbrengst van jonge zavelgronden in de IJsselmeerpolders. Van Zee tot Land(51).

Stalham, M.A., Allen, E.J., 2001. Effect of variety, irrigation regime and planting date on depth, rate, duration and density of root growth in the potato (Solanum tuberosum) crop. The Journal of Agricultural Science, 137(03): 251-270.

STOWA, 1999. STOWA onderzoeksprogramma Waternood, STOWA, Utrecht.

STOWA, 2010. Kennisprogramma Deltaproof; Kennis voor zoet en veilig water voor nu én later, Amersfoort.

Van Bakel, J., Van den Eertwegh, G., 2011. Nieuwe mogelijkheden voor herziening van de HELP-tabel. H2O, 18.

Van Bakel, P.J.T., 2002. Help-tabellen landbouw; Aanpassingen en operationalisering van de doelrealisatie landbouw. STOWA 2002-40, STOWA, Utrecht.

Van Bakel, P.J.T., Hoving, I.E., Wesseling, J., Oostindie, K., Van den Akker, J.J.H., 2009a. Effecten van flexibel peilbeheer Vlietpolder op hydrologie en melkveehouderij. Alterra-rapport 1974. , Wageningen.

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 2005-16, STOWA, Utrecht.

Van Bakel, P.J.T., Huygen, J., 2001. Doelrealisatie Landbouw in De Leijen; Een aanzet tot invulling en operationalisering van de methode Waternood., Alterra, Wageningen.

Van Bakel, P.J.T., Kselik, R.A.L., Roest, C.W.J., Smit, A.A.M.F.R., 2010. Review of crop salt tolerance in the Netherlands. Alterra-rapport 1926, Wageningen.

Van Bakel, P.J.T. et al., 2009b. Definitiestudie AGRICOM. Alterra-rapport 1934, Alterra, Wageningen.

Van Bakel, P.J.T., Stuyt, L.C.P.M., 2011. Actualisering van de kennis van de zouttolerantie van landbouwgewassen. Op basis van literatuuronderzoek, expertkennis en praktische ervaringen. Alterra-rapport 2201, Wageningen.

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 2007-13, STOWA, Utrecht.

Van Bladeren, C., Van der Bolt, F.J.E., Van der Most, H., 2000. Normen voor waterbeheer: op welke gronden? Het waterschap, 85(2000): 185-191.

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 den Hurk, B. et al., 2006. KNMI Climate change scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI, De Bilt, 82 pp.

Van der Gaast, J.W.J., Massop, H.T.L., Vroon, H.R.J., Staritsky, I.G., 2006. Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken, Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. AlterraRapport 1339. 111 blz. 54 figuur; 27 tab.; 64 ref.

Van Diepen, C.A., Wolf, J., Van Keulen, H., Rappoldt, C., 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. Soil Use & Management, 5(1): 16-24.

Van Ittersum, M.K. et al., 2012. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. Field Crops Res.

Van Oijen, M., De Ruijter, F.J., Van Haren, R.J.F., 1995. Analyses of the effects of potato cyst nematodes (Globodera pallida) on growth, physiology and yield of potato cultivars in field plots at three levels of soil compaction. Ann Appl Biol, 127(3): 499-520.

Van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P., 2008. Quasi Steady-State Simulation of the Unsaturated Zone in Groundwater Modeling of Lowland Regions. Vadose Zone Journal, 7(2): 769-781.

Van Walsum, P.E.V., Supit, I., 2012. Influence of ecohydrologic feedbacks from simulated crop growth on integrated regional hydrologic simulations under climate scenarios. Hydrology and Earth System Sciences, 16(6): 1577-1593.

Van Wijk, A.L.M., Feddes, R.A., Wesseling, J.G., Buitendijk, J., 1988. Effecten van grondsoort en ontwatering op opbrengst van akkerbouwgewassen. ICW-rapport 31.

Walvoort, D.J.J., Van Bakel, J., Akkermans, L.M.W., Kroes, J.G., 2004. Metamodellen: doe meer met minder. H2O, 37(16): 20-22.

Werkgroep-HELP-tabel, 1987. De invloed van de waterhuishouding op de landbouwkundige productie. Mededeling 176, Landinrichtingsdienst, Utrecht.

WL_Delft, 1995. AGRICOM gebruikershandleiding. WL rapport T1605. Delft.

Wösten, H. et al., 2013. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. Alterra-rapport 2387, Alterra, Wageningen.

Wösten, J.H.M., Veerman, G.J., de Groot, W.J.M., Stolte, J., 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001 [Water retention and permeability characteristics of top and sub soils in the Netherlands: the Staring series. Renewed edition 2001]. Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 86 pp.