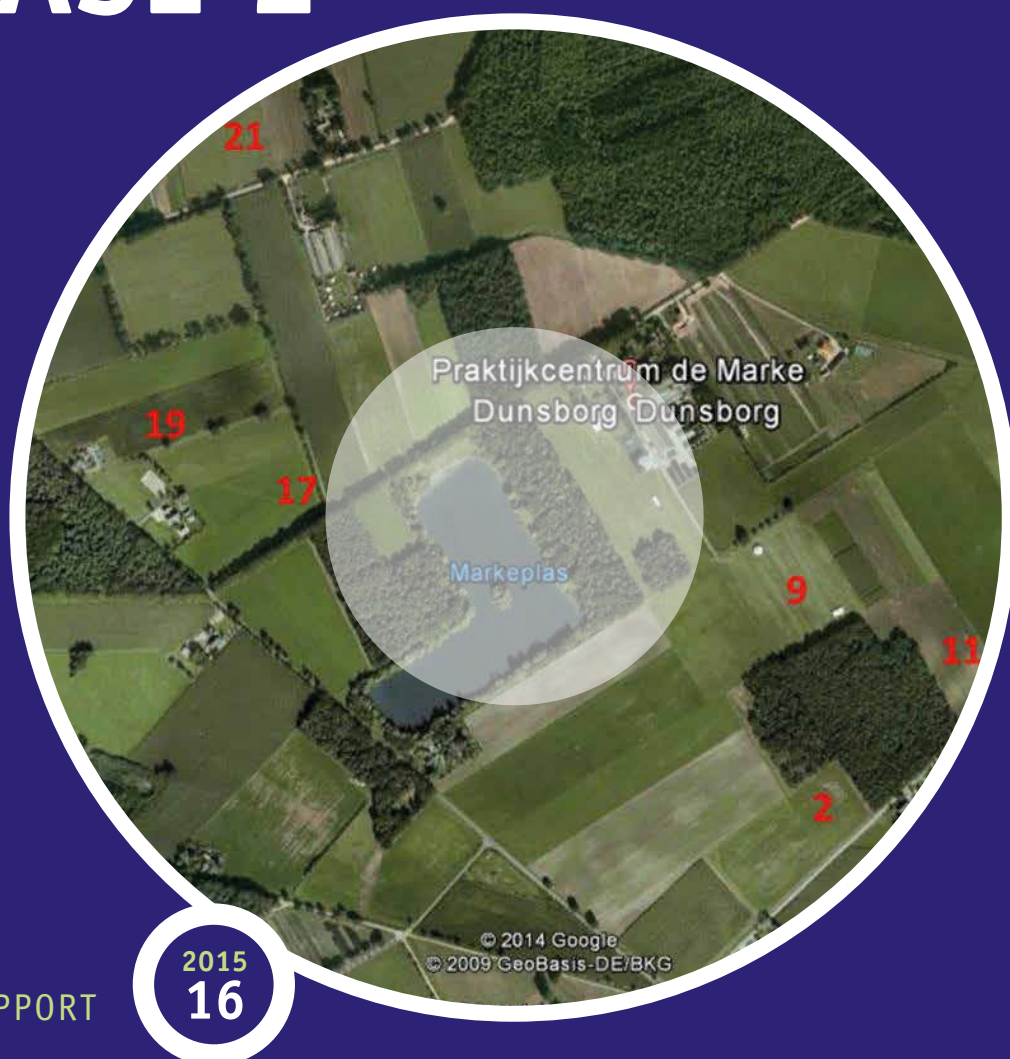


WATERWIJZER LANDBOUW, FASE 2



RAPPORT

2015
16

WATERWIJZER LANDBOUW, FASE 2

MODELLERING VAN HET BODEM-WATER-PLANTSYSTEEM MET
HET GEKOPPELDE INSTRUMENTARIUM SWAP-WOFOST

RAPPORT

2015

16

ISBN 978.90.5773.676.6



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS

Joop Kroes (Alterra – Wageningen UR)	Rob Hendriks (Alterra – Wageningen UR)
Ruud Bartholomeus (KWR Watercycle Research Institute)	Allard de Wit (Alterra – Wageningen UR)
Jos van Dam (Wageningen Universiteit)	Frank van der Bolt (Alterra – Wageningen UR)
Mirjam Hack-ten Broeke (Alterra – Wageningen UR)	Dennis Walvoort (Alterra – Wageningen UR)
Iwan Supit (Alterra – Wageningen UR)	Idse Hoving (Wageningen UR Livestock Research)
	Jan van Bakel (De Bakelse Stroom)

BEGELEIDING

Wim Werkman (Rijkswaterstaat),	Chris Griffioen (vz, Waterschap Groot Salland)
John Tobben (LTO)	Myrjam de Graaf (Waterschap Peel en Maasvallei)
Hans Mankor (Provincie Utrecht)	Joost Heijkers (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden)
Jan Strijker (Provincie Zuid-Holland)	Jan Huinink (Ministerie van EZ)
Jan Jaap Buyse (Vitens)	Michelle Talsma (STOWA)
Jeroen Castelijn (Brabant Water)	Rob Ruijtenberg (Bureau WeL namens STOWA)
Heiko Prak/ Saske Klerks(ACSG)	
Bas Worm (Zoetwatervoorziening Oost Nederland (ZON)/Waterschap Vechtstromen)	

ONDERZOEK MEDE MOGELIJK GEMAAKT DOOR

Rijkswaterstaat, provincie Utrecht, provincie Zuid-Holland, AdviesCommissie Schade Grondwater (ACSG), Zoetwatervoorziening Oost Nederland (ZON), Alterra/Ministerie van EZ en STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2015-16
ISBN 978.90.5773.676.6

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

Voor het bepalen van de effecten van de ingrepen in de waterhuishouding op landbouwopbrengsten zijn in Nederland al geruime tijd drie methodes in gebruik: de HELP-tabellen, de TCGB-tabellen en AGRICOM. In bijna elke berekening wordt gebruik gemaakt van een van deze methodes.

De landbouw, waterbeheerders en waterleidingbedrijven dringen al langere tijd aan op een herziening van deze methodes, onder meer omdat ze gebaseerd zijn op verouderde meteorologische gegevens en ze niet klimaatrobust zijn. Daarnaast geven de methoden alleen langjarige gemiddelde schades. Een ander belangrijk punt is dat in de huidige methoden zout niet wordt meegenomen. Met een droger klimaat gaat zout en het sturen met water op zout, een steeds belangrijker rol spelen in het waterbeheer.

Dit vormde de aanleiding voor het project Waterwijzer Landbouw. Hierin ontwikkelen een groot aantal partijen een uniform, breed gedragen en praktische methode voor het bepalen van klimaatbestendige relaties tussen waterhuishoudkundige condities en (veranderingen daarin) en gewasopbrengsten, dit ter vervanging van deze methoden. Op deze wijze krijgen waterbeheerders, maar ook agrariërs een veel nauwkeurigere inschatting van het effect van waterhuishoudkundige maatregelen op landbouwkundige opbrengsten, in termen van droogteschade, natschade en zoutschade.

De Waterwijzer Landbouw wordt in een aantal fasen gerealiseerd. In de eerste fase, die inmiddels is afgerond, zijn in het bestaande model SWAP conceptuele verbeteringen doorgevoerd. De resultaten van deze fase zijn vastgelegd in het STOWA-rapport 'Actualisatie schadefuncties landbouw: fase 1' (2013-22). Hierna zijn in een tussenstap, de uitkomsten van dit vernieuwde modelinstrumentarium getoetst op plausibiliteit: doet het instrument wat je er van verwacht? De resultaten van deze toets zijn vervat in het STOWA-rapport 'Actualisatie schadefuncties voor de landbouw. Tussenfase 2a: plausibiliteitstoets SWAP en enkele verkennende berekeningen' (2013-37).

De tweede fase bestond uit de bouw van een bruikbaar instrumentarium. Het betrof de koppeling van het hydrologische model SWAP met het gewasgroeimodel WOFOST tot een operationeel en getoetst simulatiemodel voor gras, mais en aardappelen (SWAP-WOFOST). Later volgen meer gewassen. Met het instrumentarium kunnen voor deze gewassen nu direct opbrengstreducties berekend worden als gevolg van vernatting, droogte en zout. Daarmee is een belangrijke vervolgstap gezet. Er is in deze fase ook gekeken naar de mogelijkheden om via remote-sensing informatie te verkrijgen om schadeberekeningen te verbeteren. Dit rapport vormt de weerslag van deze fase.

In de derde fase, die juni 2015 van start is gegaan, zal een volgende koppeling worden gerealiseerd – tussen SWAP-WOFOST met BBPR (BedrijfsBegrotingsProgramma Rundvee - om ook de indirecte schade en bedrijfsvoering mee te kunnen nemen bij de schadeberekeningen. Begin 2016 zullen hiervan de resultaten beschikbaar zijn.

In 2017 moet er voor de akkerbouw en veehouderij een klimaatbestendig en geactualiseerd instrument gereed zijn om te sturen op waterstromen en opbrengsten, rekening houdend met droogte, nat- en zoutschade. Dit instrument is onmisbaar bij het doorrekenen van o.a. de effecten van peilbesluiten en inrichtingsplannen.

Amersfoort, juni 2015

Directeur STOWA

Ir. J.J. Buntsma

SAMENVATTING

Het project Waterwijzer Landbouw beoogt een uniform en breed gedragen systeem voor het bepalen van klimaatbestendige relaties tussen waterhuishoudkundige condities en gewasopbrengsten, ter vervanging van (op termijn) de huidige beschikbare systemen (HELP-tabellen, TCGB-tabellen en Agricom).

Om dit doel te bereiken zijn binnen Waterwijzer Landbouw meerdere fasen afgesproken. Dit rapport beschrijft de werkzaamheden en resultaten van fase 2. In fase 1 is toegewerkt naar een operationeel instrument om directe droogteschade, natschade en zoutschade te berekenen. Dit is gebeurd voor gras en aardappel en de berekeningen resulteerden in een effect op de gewasverdamping. Fase 2, uitgevoerd in 2013 en 2014, heeft geresulteerd in een koppeling van het hydrologische model SWAP met het gewasgroeimodel WOFOST tot een operationeel en getoetst simulatiemodel, geparameteriseerd voor gras, aardappel en snijmaïs, om opbrengstreducties te kunnen berekenen in plaats van alleen gewasverdampingsreductie. Het huidige instrument is daarmee een belangrijke sprong vooruit en bouwt voort op de aanbevelingen uit fase 1 (Bartholomeus et al., 2013). Nu kan het effect van waterbeheer op gewasopbrengsten immers rechtstreeks worden berekend. De berekening van nat- en droogteschade kan worden gebaseerd op actueel weer en klimaatscenario's kunnen worden doorerekend.

Voor de koppeling van SWAP-WOFOST en de uit te voeren berekeningen is specifiek aandacht besteed aan de te gebruiken berekeningswijze voor verdamping. Hierbij is gekozen voor de Penman-Monteith-methode omdat deze het beste scoort op de criteria fysische onderbouwing, nauwkeurigheid, klimaatbestendigheid en beschikbaarheid van invoergegevens. Bij het realiseren van de modelkoppeling is extra aandacht besteed aan berekening van opkomst van het gewas, de relatie tussen zuurstofstress en gewasgroei en ook de berekeningswijze van worteling.

Voor de evaluatie van het modelinstrumentarium zijn gegevens verzameld van een 25-tal veldexperimenten verspreid over Nederland. Daarvan zijn 9 veldexperimenten voor gras, snijmaïs en aardappel geschikt bevonden voor de evaluatie, omdat daarbij zo min mogelijk andere stressfactoren dan droogte- of zuurstofstress aan de orde waren. Er is niet gekalibreerd, maar alleen geëvalueerd om de kans op een oneigenlijke parameterisering (equifinaliteit) te minimaliseren.

De combinatie SWAP-WOFOST heeft meerwaarde doordat de gewasgroei en transpiratie worden berekend in afhankelijkheid van weer- en bodemcondities. Ook is de combinatie SWAP-WOFOST conceptueel completer en biedt daardoor meer toekomstperspectief. De dynamische koppeling van hydrologie en gewasgroei kan ook nadelen hebben. De simulatie van gewasgroei als resultaat van een dynamische waterbalans moet wel tot een realistische gewasgroei en gewasopbrengst leiden. Als dit niet zo is dan wordt de verdamping verkeerd berekend en dus ontstaan er fouten in de waterbalans. Uit de evaluatie met de beschikbare cases bleek dat SWAP-WOFOST (zonder kalibratie) zowel ten aanzien van het systeemgedrag (de dynamiek) als de voorspelde (absolute) waarden voor de hydrologie géén verslechtering vormt ten opzichte van de SWAP-berekeningen met een opgelegde gewasgroei.

De mogelijke rol van remote sensing is bekeken en daarbij bleek dat de Groenmonitor aanvullende informatie kan leveren over management-activiteiten voor zowel grasland als bouwland; hiermee kunnen berekeningen met SWAP-WOFOST voor de Waterwijzer Landbouw worden verbeterd, zeker naarmate er beelden van meer jaren met toenemende temporele en ruimtelijke resolutie beschikbaar komen.

In de uiteindelijke metarelaties van de Waterwijzer Landbouw zal expliciet onderscheid gemaakt worden tussen de verschillende watergerelateerde oorzaken van opbrengstdepressies. Dat wil zeggen: in de volgende stap worden metarelaties opgeleverd die het effect van niet optimale bodemvochtcondities op de gewasopbrengst kwantificeren, en onderscheiden daarin expliciet de effecten van droogte-, nat- en zoutschade. Deze metarelaties zullen gebaseerd zijn op SWAP-WOFOST en zijn bruikbaar voor het vergelijken van effecten van hydrologische maatregelen op de opbrengstdepressie. Daarbovenop zal transparant en reproduceerbaar gekwantificeerd worden wat het effect kan zijn van bedrijfsvoering en indirecte schades.

DE STOWA IN HET KORT

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

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie. Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

WATERWIJZER LANDBOUW, FASE 2

MODELLERING VAN HET BODEM-WATER-PLANTSYSTEEM MET HET GEKOPPELDE INSTRUMENTARIUM SWAP-WOFOST

INHOUD

TEN GELEIDE

VOORWOORD

SAMENVATTING

STOWA IN HET KORT

1	INLEIDING	1
1.1	Probleemstelling	2
1.2	Achtergrond	2
1.3	Projectdoelstelling	2
1.4	Projectresultaat	2
1.5	Opbouw rapport	4
2	POTENTIËLE VERDAMPING	5
2.1	Introductie	5
2.2	Gewasfactor-methode	5
2.3	Penman-Monteith zonder gewasfactoren	7
2.4	SVAT modellen	9
2.5	Evaluatie	10
2.6	Minimale gewasweerstand	12
2.7	Conclusie	14
3	SYSTEEMBESCHRIJVING: MODELKOPPELING SWAP EN WOFOST EN DE DOORGEVOERDE AANPASSINGEN	15
3.1	Introductie SWAP en WOFOST	15
3.2	Aandachtspunten bij koppeling van SWAP en WOFOST	16
3.2.1	Transpiratie en gewasopbrengst	16
3.2.2	Zaaidatum en opkomst gewas	17
3.2.3	CO ₂ -effect op gewasgroei	17
3.2.4	Zuurstofstress en gewasgroei	18
3.2.5	Beworteling	23

4	EVALUATIE PRESTATIES SWAP-WOFOST	24
4.1	Werkwijze	25
4.2	Metingen	25
4.3	Resultaten	26
4.3.1	Evaluatie geschiktheid modelgedrag	27
4.3.2	Evaluatie per gewasgroep	29
4.3.3	Evaluatie gewasopbrengsten per case	30
4.3.4	Modelprestaties	34
5	CONCLUSIES	36
	LITERATUUR	38
	BIJLAGEN	
Bijlage 1	Resultaat kalibratie gewasweerstand	45
Bijlage 2	Discussienotitie parameterisatie, kalibratie, validatie van het modelsysteem SWAP-WOFOST	48
Bijlage 3	Groenmonitor, hydrologie en gewasgroei	59
Bijlage 4	Beschikbare cases	71
Bijlage 5	Berekende en gemeten opbrengsten voor 9 cases	72
Bijlage 6	Met SWAP-WOFOST berekende transpiratiereducties voor de cases	76
Bijlage 7	Extended Taylor diagrammen	78

1

INLEIDING

1.1 PROBLEEMSTELLING

Al vele jaren is aangedrongen op vervanging van de HELP-tabellen als methode voor het berekenen van opbrengstdepressie in de landbouw in relatie tot waterhuishouding. De tabellen zijn namelijk gebaseerd op verouderde gegevens, de huidige landbouwpraktijk is er niet in verwerkt, de tabellen zijn ook niet reproduceerbaar en bijvoorbeeld niet te gebruiken voor het doorrekenen van klimaatscenario's. Zodoende is onder auspiciën van STOWA een breed draagvlak gerealiseerd voor het ontwikkelen van een methodiek voor het bepalen van landbouwschade in afhankelijkheid van agrohydrologische omstandigheden, gebaseerd op het agrohydrologische model SWAP en het gewasgroeimodel WOFOST. Daarmee kunnen ook klimaatscenario's worden doorgerekend en ook klimaatbestendige schaderelaties kunnen worden verkregen.

1.2 ACHTERGROND

Zoals verwoord in het projectenoverzicht van de Deltaproof midterm review (STOWA, 2013): "Om veranderingen in waterbeheer te vertalen naar wijzigingen van landbouwopbrengsten zijn in Nederland drie methodes operationeel: de HELP-tabellen, de TCGB-tabellen en Agri-com. De landbouworganisaties, de waterschappen en de drinkwaterbedrijven hebben lange tijd aangedrongen op een herziening van deze methoden, omdat ze gewoonweg verouderd zijn. Zo is de bepaling van nat- en droogteschade gebaseerd op verouderde meteorologische data en gewasgegevens. Bovendien geven de methoden alleen inzicht in langjarig gemiddelde schades. Zoutschade is niet of beperkt in de modellen verwerkt. Bovenal zijn de bestaande modellen ongeschikt om de gevolgen van een steeds grilliger wordend klimaat in de berekeningen mee te nemen..."

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

Bovendien is nagegaan wat de meerwaarde zou zijn van de koppeling met een gewasgroeimodel en hoe indirecte schade-effecten kunnen worden meegenomen. Het is namelijk belang-

rijk om van berekening van het effect op gewasverdamping een stap te kunnen maken naar het effect op gewasopbrengst en tenslotte naar een actuele opbrengst in de landbouwpraktijk. Voor het landbouwbedrijfsleven spelen indirecte effecten zoals een verkort groeiseizoen door beperkte bewerkbaarheid of verminderde gewaskwaliteit of blijvend structuurbederf een grote rol en die effecten komen tot uiting in het bedrijfsinkomen. Het is dus noodzakelijk om deze aspecten mee te nemen in de methodiek.

Alvorens door te gaan met fase 2 van het project, is door de begeleidingsgroep besloten om eerst een plausibiliteitstoets van het opgeleverde SWAP uit te voeren (fase 2a), waarover gerapporteerd is door Hack-ten Broeke et al. (2013). Vervolgens zijn keuzes gemaakt voor de activiteiten die in fase 2 uitgevoerd moeten worden. Deze fase wordt hierna beschreven.

1.3 PROJECTDOELSTELLING

Het einddoel van het project Waterwijzer Landbouw is een uniform en breed gedragen systeem voor het bepalen van klimaatrobuuste relaties tussen waterhuishoudkundige condities en gewasopbrengsten, ter vervanging van (op termijn) de huidige beschikbare systemen (STOWA, 2013).

Om dit doel te bereiken zijn meerdere fasen afgesproken. In fase 1 is toegewerkt naar een operationeel instrument om directe droogteschade, natschade en zoutschade te berekenen. Dit is gebeurd voor gras en aardappel en de berekeningen resulteren in een effect op de gewasverdamping. Op basis van dit model SWAP met nieuwe modules 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.

Fase 2 moet resulteren in een instrument dat niet alleen verdampingsreductie, maar juist ook de gewasopbrengstreductie kan berekenen. In eerste instantie wordt dit uitgewerkt voor gras, aardappel en snijmaïs. Bij simulatiemodellen is het altijd van groot belang om de resultaten te toetsen aan de hand van nog niet eerder (bijvoorbeeld voor kalibratie) gebruikte meetgegevens. Met behulp van dit getoetste instrument zullen in de volgende fase metarelaties worden afgeleid voor alle bodemtypes en de genoemde gewassen. Tevens zal in fase 3 voor de melkveehouderij een module worden opgeleverd waarmee bedrijfsvoering kan worden doorgerekend om te komen tot berekende effecten op bedrijfseconomie.

In de fasen hierna is bovendien nog een parameterisatie voor andere gangbare gewassen nodig evenals een definitieve module voor het meeberekenen van indirecte schade bij al deze gewassen en gewasrotaties. Het instrumentarium moet ook getoetst worden aan proef- en praktijkgegevens. Uiteindelijk moet het project resulteren in een online tool of wellicht een tool die kan worden gedownload voor gebruikers (waterschappen, Rijkswaterstaat, drinkwaterbedrijven etc.). Er is daarnaast behoefte aan een aanvullende zoutschademodule. Voor delen van Nederland met zoute/brakke kwel is reduceren van zoutschade namelijk minstens zo belangrijk als het reduceren van droogte- en natschade. De afweging tussen droogte- en zoutschade kan met de huidige HELP-tabel niet worden gemaakt omdat zoutschade hierin niet is meegenomen.

Dit rapport beschrijft de resultaten van fase 2, uitgevoerd in 2013 en 2014, en heeft vooral betrekking op de in het projectplan geformuleerde doelstelling: “Realiseren koppeling SWAP met het gewasgroeimodel WOFOST tot een operationeel en getoetst simulatiemodel, geparameteriseerd voor gras, aardappel en snijmaïs, teneinde opbrengstreductie te kunnen berekenen in plaats van alleen gewasverdampingsreductie”.

1.4 PROJECTRESULTAAT

Het projectresultaat van fase 2 van Waterwijzer Landbouw bestaat uit drie onderdelen:

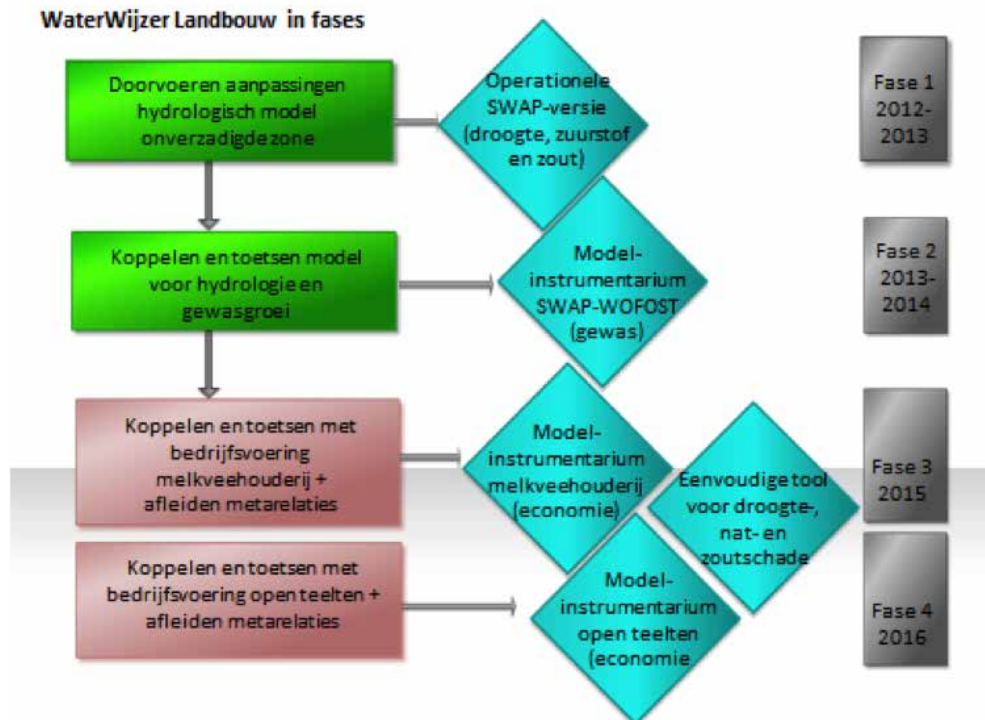
- a Website met informatie over het project (informatie over fase 1, fase 2a en fase 2). Deze website is een STOWA-website www.waterwijzer.nl;
- b Operationeel en getoetst simulatiemodel SWAP-WOFOST voor gras, aardappel en snijmaïs;
- c Rapport over fase 2 als onderdeel van de route naar de Waterwijzer Landbouw, waarin de in fase 2 uitgevoerde onderdelen zijn opgenomen. Dat betreft voornamelijk de beschrijving van het simulatiemodel SWAP-WOFOST en de evaluatie van de modelresultaten

Voor de volledigheid schetsen we ook de eindresultaten van het totale project, die op zijn vroegst in 2016 kunnen worden opgeleverd:

- Operationeel model SWAP-WOFOST, voor het berekenen van gewasopbrengsten in relatie tot droogte, zuurstoftekort en zout, geschikt voor gebruik door deskundigen (gereed eind 2014).
- Operationele modelkoppelingen met enerzijds BBPR en anderzijds MEBOT voor respectievelijk melkveehouderij en akkerbouw/vollegrondsgroententeelt, voor het berekenen van agrarische bedrijfseconomische resultaten en indirecte effecten van droogte, zuurstoftekort en zout. Ook deze koppelingen zijn in eerste instantie geschikt voor gebruik door deskundigen.
- Metarelaties, gemaakt met behulp van de beschikbare modelinstrumenten, gepresenteerd in de vorm van eenvoudige functies en goed afleesbare grafieken, waarbij grondwaterstandskarakteristieken en zoutconcentraties resulteren in opbrengstdepressiepercentages.
- Online tool gebaseerd op die metarelaties, beschikbaar voor allerlei toepassingen. Ook de metarelaties zelf zullen toegankelijk zijn via internet.

Figuur 1.1 brengt de fasen van het project in beeld. In de rechterkolom van de figuur geven de grijze blokjes de fasen aan met de (beoogde) jaartallen van uitvoering. Helemaal links staan de uit te voeren activiteiten op hoofdlijnen in rechthoeken. De groene rechthoeken zijn afgerond, de lila rechthoeken staan in de planning voor de komende jaren. De producten zijn weergegeven als blauwe ruiten. De producten ‘operationele SWAP-versie’ en ‘model-instrumentarium SWAP-WOFOST’ zijn beide gereed.

FIGUUR 1.1 FASERING IN HET PROJECT WATERWIJZER LANDBOUW



1.5 OPBOUW RAPPORT

Voor de modelkoppeling van SWAP en WOFOST moesten verschillende keuzes worden gemaakt. Dit betreft bijvoorbeeld parameterisatie en de wijze van omgaan met zuurstofmodellering, die zowel voor de natschade als voor gewasgroei belangrijk is en nooit eerder gekoppeld was. De belangrijkste keuzes en overwegingen worden in de volgende hoofdstukken beschreven. Er is relatief veel aandacht besteed aan het onderwerp verdamping en daarom hebben we daaraan een apart hoofdstuk gewijd, namelijk hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 vindt u allereerst de beschouwing uit fase 1 van het project over de voor- en nadelen van koppeling van SWAP met WOFOST (Bartholomeus et al., 2013) en ook een systeembeschrijving van SWAP-WOFOST met vooral aandacht voor alle nieuwe onderdelen. In hoofdstuk 4 gaan we in op de evaluatie van het nieuwe modelinstrumentarium. Het afsluitende hoofdstuk 5 bevat conclusies. Veel achtergrondinformatie, meer gedetailleerde berekeningen en aanvullingen zijn opgenomen in de bijlagen.

2

POTENTIËLE VERDAMPING

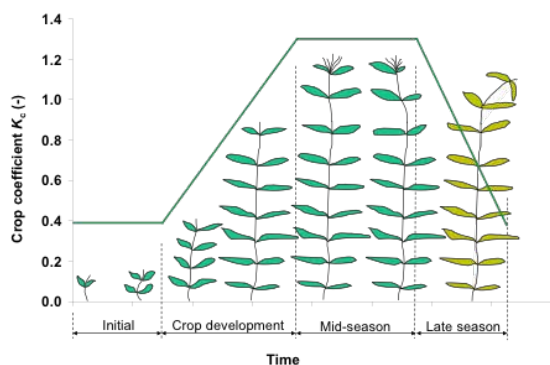
2.1 INTRODUCTIE

Met het project Waterwijzer Landbouw begeben we ons in het hart van de agrohydrologie: het nauwkeurig en inzichtelijk kwantificeren van gewasschade door natte, droge en zoute omstandigheden. Het is duidelijk dat het goed simuleren van de verdampingsflux daarbij essentieel is. We zullen ons allereerst beperken tot de potentiële verdamping.

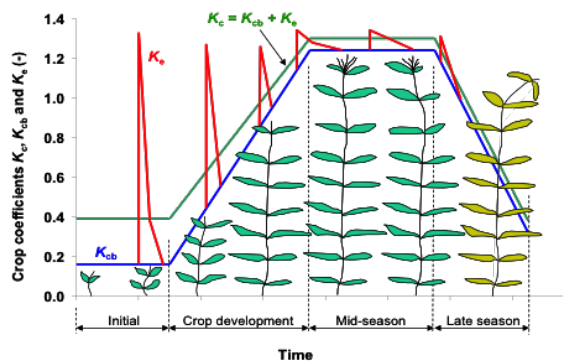
Er bestaan een groot aantal methoden om verdamping te berekenen. In Nederland wordt de potentiële verdamping vaak berekend met de formule van Makkink, in combinatie met gewasfactoren. Internationaal wordt de Penman-Monteith formule veel gebruikt, waarin meer meteorologische en plantfactoren expliciet voorkomen. De Penman-Monteith formule kan met en zonder gewasfactoren worden gebruikt. In de micrometeorologie en klimaatmodellering zijn diverse weerstandsconcepten ontwikkeld waarin rekening kan worden gehouden met ruimtelijke vegetatiepatronen en met beïnvloeding van de atmosferische grenslaag door de vegetatie. We zullen deze methoden kort bespreken, en vervolgens evalueren voor gebruik in Waterwijzer Landbouw.

2.2 GEWASFACTOR-METHODE

FIGUUR 2.1 ENKELVOUDIGE GEWASFACTOR GEDURENDE HET GROEISEIZOEN.



FIGUUR 2.2 DUBBELE GEWASFACTOREN MET PIEKEN VAN BODEMVERDAMPING NA NEERSLAG OF BEREGENING (ALLEN ET AL., 1998).



Enkelvoudige gewasfactor

In deze methode wordt de potentiële verdamping gerelateerd aan de potentiële verdamping van een referentiegewas via een gewasfactor (Figuur 2.1):

$$ET_{p0} = K_c ET_{ref} \quad (1)$$

waarin ET_{p0} (mm/d) gelijk is aan de potentiële verdamping van een willekeurig gewas, K_c (-) is de gewasfactor en ET_{ref} (mm/d) is de potentiële verdamping van een referentiegewas. Het

referentiegewas is vaak gras, maar ook luzerne kan worden gebruikt (Allen et al., 2011). De potentiële verdamping van het referentiegewas wordt gemeten of berekend. Het is belangrijk dat de meteorologische condities tijdens de metingen of in de berekening overeenkomen met de situatie waarvoor de verdamping wordt gesimuleerd. In Nederland berekent het KNMI de Makkink verdamping, die geldt voor een kort maar gesloten grasgewas. Internationaal wordt ET_{ref} vaak berekend met Penman-Monteith. Deze geldt voor een hypothetisch gras met een hoogte van 12 cm, reflectiecoëfficiënt van 0.23 (-) en een gewasweerstand van 70 s m^{-1} . In vergelijking met Makkink, is ET_{ref} berekend door Penman-Monteith circa 10 % groter (Allen et al., 1998; Droogers, 2009). Dit betekent dat gewasfactoren voor Makkink groter zijn dan gewasfactoren voor Penman-Monteith om tot dezelfde ET_{p0} te komen.

Meervoudige gewasfactoren

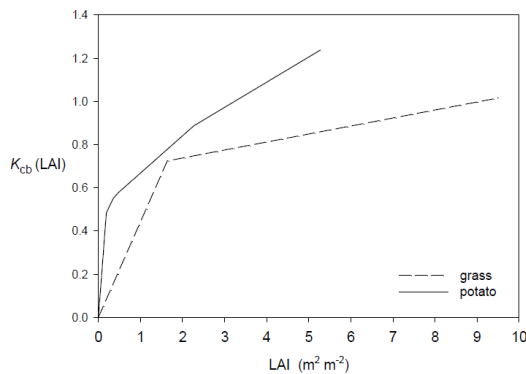
Een belangrijk nadeel van de enkelvoudige gewasfactor is dat geen onderscheid wordt gemaakt in transpiratie (gewasverdamping), evaporatie (bodemverdamping) en interceptieverdamping. Ieder van deze grootheden heeft zijn eigen dynamiek en fluxdichtheid. Om te komen aan de bodemverdamping, introduceerde Allen et al. (1998) de dubbele gewasfactor (Figuur 2.2):

$$ET_{p0} = (K_{cb} + K_e)ET_{ref} \quad (0)$$

Hierin is K_{cb} gedefinieerd als de verhouding van ET_{p0} tot ET_{ref} wanneer de bodemoppervlakte droog is met verwaarloosbare bodemverdamping, terwijl het gewas nog potentieel verdampt. De factor K_e geeft de bodemverdamping aan, en wordt berekend uit een gesimuleerde waterbalans van de bovengrond en de wortelzone.

FIGUUR 2.3

GEKALIBREERDE GEWASFACTOR K_{cb} ALS FUNCTIE VAN BLADOPPERVLAKTE-INDEX LAI VOOR GRAS EN AARDAPPEL (VAN WALSUM AND SUPIT, 2012)



Voor humide gebieden als Nederland moeten we ook rekening houden met interceptie. Daarom introduceerden Van Walsum en Supit (2012) de drievoudige gewasfactor:

$$ET_{p0} = [K_{cb}(1 - W_{frac}) + K_{iw} + K_e]ET_{ref} \quad (0)$$

waarin W_{frac} (-) gelijk is aan de dagfractie dat het gewas nat is en K_{iw} (-) is de interceptiecoëfficiënt. Er zijn helaas geen experimenten in Nederland bekend waarin transpiratie, evaporatie en interceptie tijdens het groeiseizoen afzonderlijk gemeten zijn. Daarom gebruikten Van Walsum en Supit (2012) enkelvoudige gewasfactoren, gepubliceerd door Feddes (1987), om K_{cb} als functie van bladoppervlakte-index af te leiden. Figuur 2.3 geeft hiervan een voorbeeld voor aardappel en gras. Voor de interceptiecoëfficiënt nemen Van Walsum and Supit (2012) aan: $K_{iw} = 1.2 K_{cb}$.

De gewasfactormethode vraagt als invoer de ET_{ref} en de gewasfactoren als functie van groeiseizoen of bladoppervlakte-index.

2.3 PENMAN-MONTEITH ZONDER GEWASFACTOREN

De Penman-Monteith vergelijking kan gebruikt worden om de verdamping van een hypothetisch referentiegewas te berekenen, maar biedt juist ook de mogelijkheid om de potentiële en actuele verdamping van een willekeurig gewas direct uit te rekenen. Daarom even wat achtergronden van deze vergelijking. Reeds in 1948 leidde Penman een algemene verdampingsformule af voor natte oppervlakken. In 1965 breidden Monteith en Rijtema de Penman formule uit naar verdamping via huidmondjes. Zij gingen uit van de energiebalans aan het aardoppervlak:

$$Q^* = H + LE + G \quad (0)$$

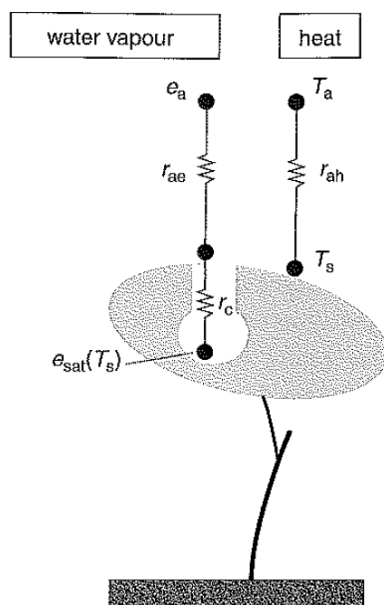
waarin Q^* gelijk is aan de netto straling ($W m^{-2}$), H is de voelbare warmtestroom ($W m^{-2}$), LE de latente warmtestroom ($W m^{-2}$) en G de bodemwarmtestroom ($W m^{-2}$). Monteith en Rijtema beschouwden het gewas als een groot blad met een variabele weerstand voor de huidmondjes (Figuur 4). Deze beschouwing leidde tot de bekende Penman-Monteith formule voor potentiële en actuele verdampingsflux LE ($W m^{-2}$) van een droog gewas:

$$LE = \frac{s(Q^* - G) + \rho c_p \frac{e_{sat}(T_a) - e_a}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (0)$$

waarin s gelijk is aan de helling van de verzadigde dampspanningscurve ($Pa K^{-1}$), Q^* is netto straling ($W m^{-2}$), G is de bodemwarmtestroom ($W m^{-2}$), ρ is luchtdichtheid ($kg m^{-3}$), c_p is de specifieke warmtecapaciteit van lucht bij constante druk ($J kg^{-1} K^{-1}$), e_{sat} is de verzadigingsdampspanning (Pa), e_a is de actuele dampspanning (Pa), r_a is aerodynamische weerstand ($s m^{-1}$), γ is de psychrometrische constante ($Pa K^{-1}$) en r_c is de gewasweerstand ($s m^{-1}$).

FIGUUR 2.4

MODELCONCEPT VAN PENMAN-MONTEITH, WAARIN DE VEGETATIE WORDT VOORGESTELD ALS ÉÉN GROOT BLAD MET HUIDMONDJES.



De netto straling kan worden afgeleid uit de stralingsbalans:

$$Q^* = (1 - r)K^\downarrow + \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4$$

waarin r gelijk is aan de reflectiecoëfficiënt (-), K^\downarrow is de globale straling (W m^{-2}), ε_a and ε_s zijn de emissiecoëfficiënten voor atmosfeer en oppervlakte, σ is de Stefan-Boltzmann constante ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), en T_a en T_s zijn temperaturen van lucht- en aardoppervlak (K).

De gewasweerstand is onder andere afhankelijk van de factoren zonnestraling, bladtemperatuur, luchtvochtigheid, concentratie CO_2 en bladpotentiaal. Voor een droog maar goed van water voorzien gewas, groeiend bij optimale condities voor licht, temperatuur en luchtvochtigheid en heersende CO_2 concentratie, kan een minimale gewasweerstand worden afgeleid.

De grote praktische waarde van de Penman-Monteith formule ligt in het feit dat ET_{ref} kan worden afgeleid met standaard meteorologische meetgegevens: globale straling, luchttemperatuur, windsnelheid en luchtvochtigheid. Vervolgens kan ET_{p0} voor een willekeurig gewas worden afgeleid als gewashoogte, reflectiecoëfficiënt en minimale gewasweerstand bekend zijn (Shuttleworth, 2006; Farahani et al., 2007).

Methode in SWAP

SWAP berekent drie potentiële fluxen om rekening te houden met de wisselende condities voor transpiratie, evaporatie en interceptie tijdens het groeiseizoen:

- ET_{w0} (mm d^{-1}), evaporatie flux van een nat, gesloten gewas;
- ET_{p0} (mm d^{-1}), transpiratie flux van een droog, gesloten gewas bij minimale gewasweerstand;
- E_{p0} (mm d^{-1}), evaporatie flux van een natte kale bodem.

Deze drie potentiële fluxen worden verkregen door specifieke waarden te gebruiken voor gewasweerstand, gewashoogte en reflectiecoëfficiënt. Voor een droog, gesloten gewas met optimale vochtvoorziening, is de gewasweerstand minimaal en varieert tussen 30 s m^{-1} voor akkerbouwgewassen tot 150 s m^{-1} voor bomen in een bos. Bij een nat gewas of natte bodem is de gewasweerstand gelijk aan nul. Typische reflectiecoëfficiënten zijn 0.15 (kale bodem) en 0.23 (droog en nat gewas).

Als het gewas nat is door neerslaginterceptie, wordt in SWAP aangenomen dat de energie die beschikbaar is voor evapotranspiratie geheel gebruikt wordt voor verdamping van interceptiewater, onafhankelijk van de bedekkingsgraad. Bij een kleine bedekkingsgraad kan deze aanname de verdampfingsflux van interceptiewater enigszins overschatten. Aangezien de hoeveelheid interceptie bij geringe bedekkingsgraad ook gering is, heeft dit een verwaarloosbare invloed op de totale evapotranspiratieflux. De fractie van de dag dat het gewas nat is, W_{frac} (-), volgt uit de verhouding van de dagelijkse hoeveelheid interceptie P_i en ET_{w0} :

$$W_{\text{frac}} = \frac{P_i}{ET_{\text{w0}}} \quad \text{met} \quad W_{\text{frac}} \leq 1.0 \quad (0)$$

Vervolgens wordt de potentiële bodemverdamping afgeleid, waarbij rekening wordt gehouden met lichtafname in het gewas en perioden bodemverdamping als het gewas nat is. Veel gewasmodellen, waaronder WOFOST, nemen aan dat de stralingsintensiteit afneemt

volgens een exponentiële functie met de bladoppervlakte-index. Daaruit volgt voor de potentiële bodemverdamping:

$$E_p = E_{p0} (1 - W_{frac}) e^{-\kappa_{gr} LAI} \quad (0)$$

waarin κ_{gr} (-) gelijk is aan de totale uitdoevingscoëfficiënt, en LAI is de bladoppervlakte-index (Leaf Area Index).

Vervolgens kan de belangrijkste verdampingsterm berekend worden: de potentiële plantverdamping T_p van het droge gewas dat geheel of gedeeltelijk de bodem bedekt. Hiervoor moet de uniforme, potentiële flux ET_{p0} worden gereduceerd voor de periode dat het gewas nat is en voor de bodemverdamping in de periode dat het gewas droog is. Daarom volgt T_p uit:

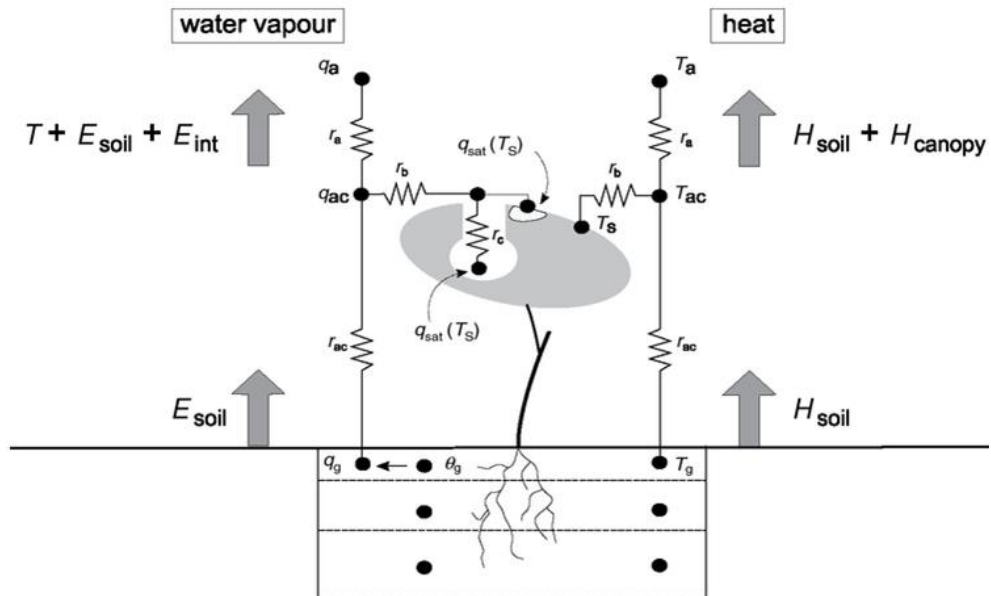
$$T_p = ET_{p0} (1.0 - W_{frac}) - E_p \quad (0)$$

Deze methodiek is sinds 1997 in SWAP opgenomen (Van Dam et al., 1997). Hoewel in Nederland vaak de SWAP optie voor Makkink met gewasfactoren wordt toegepast, wordt internationaal veelal bovenstaande SWAP methodiek voor Penman-Monteith met succes gebruikt.

De Penman-Monteith methode in SWAP heeft als invoer de dagelijkse meteorologische waarden (globale straling, luchttemperatuur, windsnelheid en luchtvochtigheid) en de gewasgegevens planthoogte, reflectiecoëfficiënt, minimale gewasweerstand en bladoppervlakte-index.

2.4 SVAT MODELLEN

FIGUUR 2.5 SVAT SCHEMA MET WEERSTANDEN VOOR WATER- EN WARMETRANSPORT (MOENE EN VAN DAM, 2014)



In Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer (SVAT) modellen worden de verschillende verdampingsfluxen berekend met specifieke weerstanden en de gradiënten van luchtvochtigheid en temperatuur. Zij berekenen direct de actuele verdamping. De potentiële verdamping wordt bereikt bij minimale gewasweerstand. Figuur 5 geeft een voorbeeld voor een uniforme vegetatie. In dit relatief eenvoudige voorbeeld spelen 4 weerstanden een rol. De effectieve luchttemperatuur en -vochtigheid (T_{ac} en q_{ac}) in het gewas zijn gekoppeld aan de lucht erboven met de

aerodynamische weerstand r_a , aan de vegetatie (door grenslaagweerstand r_b en gewasweerstand r_c) en aan de bodemtemperatuur en -vochtigheid (T_g en q_g) door de aerodynamische weerstand in het gewas r_{ac} . Het interceptiewater is direct gekoppeld (door r_b) aan de lucht tussen het gewas, omdat de huidmondjes geen rol spelen (Moene en Van Dam, 2014).

In een speciale versie van SWAP (SWAPS) wordt zo'n gedetailleerd SVAT schema toegepast (Ashby, 1999). Voor de gewasweerstand r_c wordt het model van Jarvis-Stewart gebruikt om de invloed van de factoren zonnestraling, bladtemperatuur, luchtvochtigheid, CO_2 concentratie en bladpotentiaal in rekening te brengen (Ashby et.al., 1996). Bovendien bestaat in SWAPS de mogelijkheid 2 lagen vegetatie te definiëren (onder- en bovenlaag) of een ruimtelijk heterogene vegetatie. In verband met de sterke dynamiek van de atmosfeer heeft SWAPS een korte tijdstap. SWAPS berekent de dagelijkse gang van de fluxen. De atmosferische condities moeten dan ook ieder half uur bekend zijn.

Op regionale schaal bestaat een wisselwerking tussen de evapotranspiratie aan het aardoppervlak en de condities van de atmosfeer: de verdamping wordt bepaald door atmosferische condities, terwijl de atmosferische condities op haar beurt beïnvloed worden door de verdamping (bijv. Jacobs en De Bruin (1992; 1997)). Daarom worden SVAT schema's vaak toegepast in combinatie met atmosfeermodellen zoals RAMS of HTESSEL. Tot nu toe wordt SWAPS met name gebruikt in weer- en klimaatonderzoek op regionale schaal (Ter Maat et al., 2010; Ter Maat, 2014).

2.5 EVALUATIE

Voor gebruik in Waterwijzer Landbouw moeten we de volgende eisen stellen aan de verdampingsmethode:

- Fysisch expliciet
- Nauwkeurig
- Invoer beschikbaar
- Klimaatbestendig

De fysische onderbouwing is bij de empirische gewasfactor zwak. Verschillende plantfactoren als hoogte, reflectiecoëfficiënt, gewasweerstand en bladoppervlakte-index zijn opgenomen in één factor. De gewasfactor moet per gewas gekalibreerd worden voor het specifieke klimaat. De factoren voor bodem- en interceptieverdamping missen een fysische onderbouwing. De Penman-Monteith methode zonder gewasfactoren is redelijk fysisch onderbouwd. Relevante en meetbare meteorologische en plantfactoren zijn expliciet gemaakt. De fysische onderbouwing is bij SVAT modellen het meest gedetailleerd. De SVAT modellen worden het beste in staat geacht de sterke dagelijkse dynamiek van de verdampingsfluxen te kunnen volgen.

Het meer expliciet maken van allerlei meteorologische en plantenfysiologische factoren hoeft echter niet tot een grotere nauwkeurigheid te leiden. Om de nauwkeurigheid van de concepten vast te stellen zijn metingen nodig. Bij metingen worden altijd de actuele fluxen gemeten. We kunnen de concepten voor potentiële verdamping dus alleen beoordelen bij experimenten met optimale vochtcondities in de bodem. Bovendien is het meten van verdamping verre van eenvoudig en behept met allerlei onnauwkeurigheden (Tabel 2.1). Lysimetermetingen zijn het meest nauwkeurig, maar vertonen nog altijd een fout van 5-15%. Daarnaast is het aantal gedocumenteerde lysimetermetingen in Nederland zeer beperkt. Voor de meeste andere meettechnieken varieert de fout tussen 10-30% (Tabel 2.1). Dit maakt het moeilijk om

verdampingsmodellen goed te toetsen op nauwkeurigheid. Uit een evaluatie van 20 verschillende verdampingsformules, toegepast op lysimetergegevens van 11 weerstations onder verschillende klimaatcondities, kwam Penman-Monteith als meest nauwkeurige verdampingsformule naar voren (Jensen et al., 1990). Van der Tol (2000) vergeleek de SWAP methodiek voor Penman-Monteith met de FAO dubbele gewasfactor methode en gebruikte lysimetergegevens uit Californië. Beide modellen berekenden de gemeten cumulatieve verdamping met een fout kleiner dan 10%. Dit geldt voor verdampingswaarden per dag. Ershadi et al. (2014) vergeleek verdampingsmodellen met half uur metingen van 20 FLUXNET torens, verdeeld over verschillende vegetatietypen wereldwijd. Het gaat hier om actuele verdamping. In hun analyse scoort Penman-Monteith met Jarvis-Stewart duidelijk minder. Dit wijten de auteurs aan onnauwkeurigheden van het Jarvis-Stewart model voor stomataire weerstand en onzekerheden in de oppervlakte- en aerodynamische weerstand.

TABEL 2.1

GEMIDDELDE FOUT, UITGEDRUKT IN STANDAARDDEVIATIE VAN DE WERKELIJKE GEMIDDELDE WAARDE, VOOR DIVERSE VERDAMPINGSMEETTECHNIKEN (NAAR ALLEN ET AL., 2011).

Methode	Gemiddelde fout (%)
Lysimeter	5-15
Bodemvochtbalans	10-30
Bowen ratio	10-20
Eddy correlatie	15-30
Remote sensing energiebalans	10-20
Remote sensing vegetatiekarakteristieken	15-40
Sapstroming	15-50
Scintillometers	10-35

Wat betreft invoergegevens, de meteorologische invoerwaarden voor de Makkink en Penman-Monteith vergelijking worden dagelijks gemeten door 24 KNMI stations verspreid over Nederland. Relaties voor K_{cb} als functie van bladoppervlakte-index zijn in de literatuur nauwelijks beschikbaar. Dit komt onder andere door het geringe aantal studies waarin transpiratie, evaporatie en interceptie afzonderlijk gemeten zijn (Kool et al., 2014). De relaties in Figuur 2.3 zijn gekalibreerd op Makkink factoren gepubliceerd in 1987 (Feddes, 1987), dus op secundaire gegevens waarvan de nauwkeurigheid niet meer te achterhalen is. Plantgegevens als hoogte, reflectiecoëfficiënt, en minimale gewasweerstand zijn van diverse gewassen in West-Europa bekend (Breuer et al., 2003). Shuttleworth (2006) stelde een methode voor waarbij de minimale gewasweerstand afgeleid kan worden uit enkelvoudige gewasfactoren. De bladoppervlakte-index wordt gesimuleerd door WOFOST. Daarmee zijn alle invoergegevens voor Penman-Monteith zonder gewasfactor goed beschikbaar. Het Jarvis-Stewart model heeft als invoer plant-specifieke relaties voor gewasweerstand als functie van zonnestraling, bladtemperatuur, luchtvochtigheid, concentratie CO_2 en bladpotentiaal. Deze relaties zijn nog niet nauwkeurig genoeg om zonder kalibratie toe te passen (Duineveld, 2008). Ook de invoer van weerstanden en meteorologische gegevens voor SVAT modellen die de dagelijkse gang van de fluxen simuleren voor een zich ontwikkelend gewas, is moeilijk beschikbaar.

Wat betreft klimaatbestendigheid, Bartholomeus et al. (2013) laten duidelijk zien dat de enkelvoudige gewasfactormethode niet klimaatbestendig is. Van Walsum et al. (2013) tonen aan dat de meervoudige gewasfactoren met Makkink bij gewijzigde klimaatgegevens dezelfde trend vertonen als de Penman-Monteith methode in SWAP voor niet-uniforme gewassen. De SVAT modellen zijn speciaal ontwikkeld om effecten van klimaatveranderingen te simuleren.

Bovenstaande evaluatie is samengevat in Tabel 2.2.

TABEL 2.2 EVALUATIE VAN DRIE METHODEN OM DE VERDAMPING TE BEREKENEN IN TERMEN VAN ZWAK, REDELIJK EN GOED.

Criterion	Gewasfactor	Penman-Monteith	SVAT
Fysische onderbouwing	Zwak	Redelijk	Goed
Nauwkeurigheid	Redelijk	Redelijk	Redelijk
Beschikbaarheid invoer	Goed	Goed	Zwak
Klimaatbestendigheid	Redelijk	Goed	Goed

2.6 MINIMALE GEWASWEERSTAND

De gewasweerstand r_c speelt een sleutelrol in de verdampingsflux en is afhankelijk van verschillende factoren: de zonnestraling intensiteit, vochtgehalte bodem, luchtvochtigheid, luchttemperatuur en kooldioxidegehalte. De actuele gewasweerstand wordt daarom in het algemeen uitgerekend door een minimale gewasweerstand te delen door reductiefuncties voor ieder van deze factoren:

$$r_c = \frac{r_{s,\min}}{LAI} f^{-1}(\text{radiation}) f^{-1}(\text{soil moisture}) f^{-1}(\text{air vapour deficit}) f^{-1}(\text{air temperature}) f^{-1}(\text{carbon dioxide})$$

waarin $r_{s,\min}$ de minimale huidmondjesweerstand voorstelt ($s\ m^{-1}$) die geldt voor één uniforme bladlaag over de hele bodem, wat overeenkomt met $LAI = 1$.

In figuur 2.6 worden typische reductiefuncties getoond voor de factoren zonnestraling, luchtvochtigheid en kooldioxide gehalte. De reductiefuncties hebben een grote invloed op de actuele waarde van de gewasweerstand. In de wetenschappelijke literatuur zijn reductiefuncties bekend voor momentane fluxen. Voor het gebruik van Penman-Monteith op dagbasis hebben we echter behoefte aan gemiddelde dagelijkse reductiefuncties. Deze functies zijn nog niet bekend voor het Nederlandse klimaat en de verschillende landbouwgewassen.

Omdat de dagelijkse reductiefuncties voor berekening van r_c niet bekend zijn, is de gewasweerstand r_c bij optimale bodemvochtcondities gekalibreerd met gesimuleerde dagelijkse verdamping gedurende een langjarige periode (1971-2008) voor de gewassen gras, snijmaïs en aardappel. De dagelijkse verdamping is gesimuleerd met SWAP, waarbij KNMI referentieverdamping in combinatie met Makkink gewasfactoren zijn gebruikt.

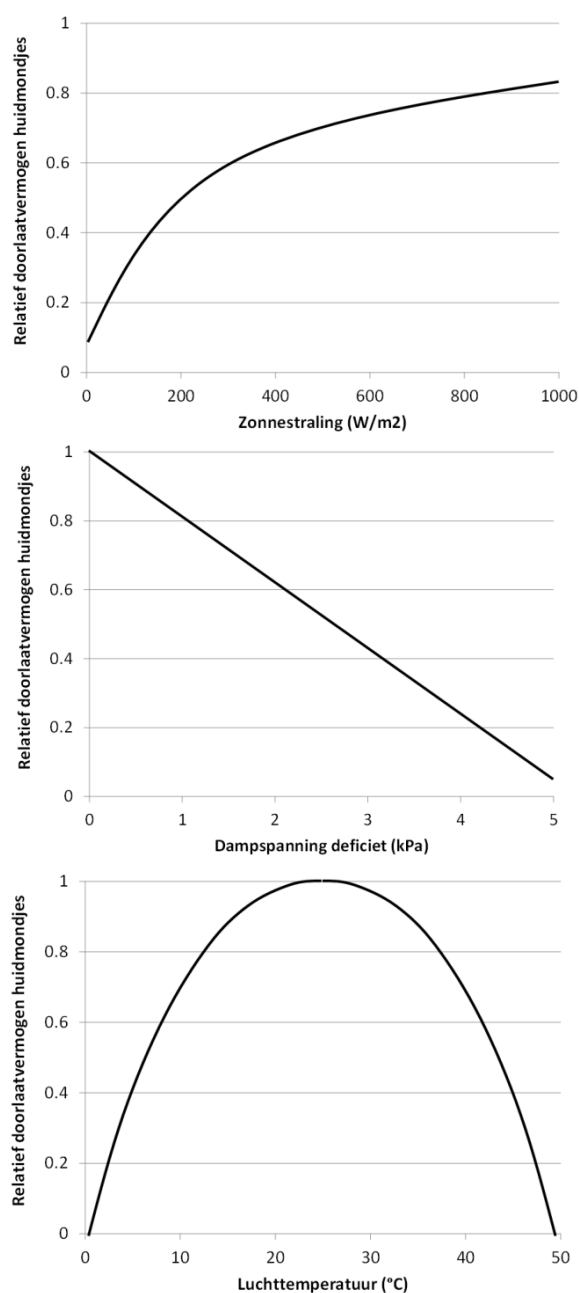
Het resultaat van de kalibratie wordt weergegeven in Bijlage 1 en Tabel 2.3. Bijlage 1 laat zien dat voor alle 3 gewassen (gras, aardappel en snijmaïs) de absolute waarde en de fluctuatie van de dagelijkse en jaarlijkse transpiratie goed gereproduceerd wordt met de gekalibreerde gewasweerstand. Er zijn wel verschillen voor de berekende potentiële bodemverdamping. Deze verschillen worden veroorzaakt door de verschillende concepten van Penman-Monteith en Makkink. Aangezien de actuele bodemverdamping vaak veel kleiner is dan de potentiële bodemverdamping, heeft dit weinig invloed op berekende gewasgroei. In Tabel 2.3 wordt de gekalibreerde weerstand vergeleken met een literatuuroverzicht van Breuer et al. (2003). Voor de gewassen gras en snijmaïs komt de gekalibreerde gewasweerstand goed overeen met de gemeten literatuurwaarde. Voor aardappel is de gekalibreerde gewasweerstand hoger dan de minimale waarde in Breuer et al. (2003). De reden is nog niet duidelijk, maar kan verband houden met meer optimale condities voor de gewasweerstand uit Breuer et al. (2003) in vergelijking met de gemiddelde dagelijkse condities in het Nederlandse klimaat.

TABEL 2.3 GEKALIBREERDE GEWASWEERSTAND BIJ OPTIMALE BODEMVOCHTCONDITIES VOOR DE PERIODE 1971 – 2008 EN DE MINIMALE GEWASWEERSTAND IN HET LITERATUURVERZICHT VAN BREUER ET AL. (2003).

Gewas	Gewasweerstand r_c ($s\ m^{-1}$)	
	Gekalibreerd bij optimale bodemvochtcondities	Minimale waarde in Breuer et al. (2003) bij LAI= 3
Gras	133.9	133
Mais	131.0	47 - 145
Aardappel	146.5	67

Bij de evaluatie van SWAP-WOFOST worden voor berekening van de Penman-Monteith verdamping de gewasweerstand gebruikt die in Tabel 3 staan vermeld. Als er meer informatie beschikbaar komt over dagelijkse gewasweerstand bij optimale bodemvochtcondities, kunnen de gewasweerstand in SWAP-WOFOST worden aangescherpt.

FIGUUR 2.6 VOORBEELDEN VAN REDUCTIEFUNCTIES VAN DE GEWASWEERSTAND VOOR ZONNESTRALING INTENSITEIT, LUCHTVOCHTIGHEID EN LUCHTTEMPERatuur.



2.7 CONCLUSIE

De hoofdconclusie is dat de Penman-Monteith methode, zoals die in SWAP is opgenomen, het beste scoort op de criteria fysieke onderbouwing, nauwkeurigheid, beschikbaarheid invoer en klimaatbestendigheid (Tabel 2). Deze methode kan volgens ons het beste gebruikt worden in Waterwijzer Landbouw voor het berekenen van schadefuncties in de landbouw.

De Penman-Monteith methode biedt goede mogelijkheden om toepasbare kennis uit SVAT schema's op te nemen, zoals het Jarvis-Stewart schema voor de gewasweerstand. Vooralsnog is er nog teveel onzekerheid over benodigde SVAT weerstanden en half-uurlijkse atmosferische informatie voor het actuele gewas, om deze schema's operationeel voor gewasschadeberekeningen in te zetten.

Voor dagelijkse weergegevens zijn de Penman-Monteith gewasweerstand van enkele gewassen bij optimale vochtcondities gekalibreerd met Makkink. Deze gewasweerstand kunnen worden gebruikt binnen het Waterwijzer Landbouwproject. Deze waarden worden in de berekeningen met SWAP-WOFOST zoals beschreven in de volgende hoofdstukken steeds gebruikt als inputparameters. De gevonden waarden zijn voor gras $r_c = 133.9 \text{ s m}^{-1}$, voor snijmaïs $r_c = 131.0 \text{ s m}^{-1}$, en voor aardappel $r_c = 146.5 \text{ s m}^{-1}$.

3

SYSTEEMBESCHRIJVING: MODELKOPPELING SWAP EN WOFOST EN DE DOORGEVOERDE AANPASSINGEN

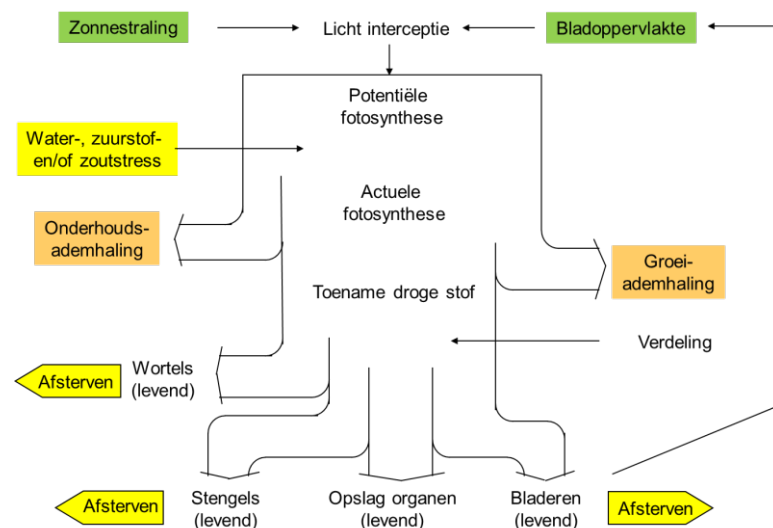
Dit hoofdstuk geeft geen volledige beschrijving van de modellen SWAP en WOFOST, maar vooral van de door ons doorgevoerde aanpassingen. De eerste paragraaf geeft een korte introductie en een terugblik op de overwegingen bij het kiezen voor de modelkoppeling. De tweede paragraaf gaat in op de specifiek voor de koppeling gerealiseerde aanvullingen in het instrumentarium.

3.1 INTRODUCTIE SWAP EN WOFOST

In het model WOFOST (WORLD FOOD STUDIES; Boogaard et al., 2011) wordt de potentiële gewasopbrengst berekend als functie van het kooldioxidegehalte, de zonnestraling, de temperatuur en gewaskenmerken. Vervolgens bepaalt de beschikbaarheid van water de watergelimiteerde productie. De basis voor de berekening is het bladoppervlak en de inkomende zonnestraling (Figuur 3.1). Daaruit wordt berekend hoeveel licht wordt onderschept en potentieel wordt omgezet door fotosynthese. De actuele fotosynthese is een functie van beschikbaarheid van vocht voor verdamping en eventuele reducties door zuurstoftekort of hoge zoutconcentraties. Een deel van de energie wordt gebruikt voor onderhoudsademhaling en groeiademhaling. Het resterende deel wordt omgezet in droge stof, dat afhankelijk van temperatuur en het ontwikkelingsstadium van het gewas wordt verdeeld over de verschillende onderdelen van het gewas: wortels, stengels, bladeren en opslagorganen.

FIGUUR 3.1

STROOMSCHEMA VAN GEWASGROEI-PROCESSEN IN WOFOST.



SWAP rekent met een zogenaamd statisch gewas met elk jaar eenzelfde aanname over gewasontwikkeling en dus vaste waarden voor de bladoppervlakte en de beworteling. De koppeling van SWAP met WOFOST betekent dat de dynamiek van gewasgroei kan worden meegenomen. Dit levert een realistischere 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 koppeling SWAP-WOFOST levert dus een directe berekening op van opbrengstdepressie (Bartholomeus et al., 2013).

Bij het doorrekenen van klimaatscenario's kan met WOFOST beter rekening worden gehouden met de invloed van extremen, zoals extreme neerslag, langdurige droogte, stijging van CO₂, veranderende temperaturen en ook verschillende fotosynthese-systemen van gewassen (C3 of C4).

De dynamische koppeling van hydrologie en gewasgroei kan ook nadelen hebben. De simulatie van gewasgroei als resultaat van een dynamische waterbalans moet wel tot een realistische gewasgroei en gewasopbrengst leiden. Als dit niet zo is dan wordt de verdamping verkeerd berekend en dus ontstaan er fouten in de waterbalans. Een dergelijke fout kan zich versterkt doorzetten in een verkeerde berekening van grondwateraan- en afvoer en ook weer de verdere ontwikkeling van het gewas. Zodoende is het belangrijk om bij de evaluatie na te gaan of dergelijke fouten zijn geïntroduceerd. In hoofdstuk 4 besteden we daar apart aandacht aan.

Vooralsnog schatten we de voordelen van koppeling met SWAP-WOFOST groter in dan de nadelen. In de volgende paragraaf staat uitgelegd welke aandachtspunten bij de koppeling vooral aandacht hebben gekregen.

3.2 AANDACHTSPUNTEN BIJ KOPPELING VAN SWAP EN WOFOST

Aandacht moet besteed worden aan de terugkoppelingen naar de bodemvochtcondities die gewasgroeimodellering met zich meebrengt. De belangrijkste koppeling tussen bodemvocht en gewasgroei wordt gevormd door verdamping. Vandaar dat hieraan een apart hoofdstuk (H2) besteed is.

De gerealiseerde koppeling tussen waterbalans (SWAP) en gewasgroei (WOFOST) is een dynamische koppeling die zo goed mogelijk is getoetst. SWAP en de koppeling met WOFOST worden in detail in Kroes et al. (2009) beschreven. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste verbeteringen en aandachtspunten bij de gerealiseerde koppeling kort beschreven.

3.2.1 TRANSPIRATIE EN GEWASOPBRENGST

De relatie tussen de reductie van transpiratie en gewasopbrengst is nader geanalyseerd. Realistische gewasopbrengsten zijn nodig omdat anders afwijkingen in de bodemwaterbalans kunnen ontstaan. Zulke afwijkingen waren bij eerdere methoden voor de bepaling van gewasopbrengstreductie ook aanwezig, maar waren niet expliciet zichtbaar gemaakt omdat er geen evaluatie aan gemeten gewasopbrengsten was uitgevoerd. Om te komen tot actuele opbrengsten kan het nodig zijn om management-factoren te hanteren (zie o.m. Kroes et al., 2011). Het gebruik van deze factoren proberen we echter nu te minimaliseren door zoveel mogelijk factoren expliciet te maken.

3.2.2 ZAAIDATUM EN OPKOMST GEWAS

De opkomst van een gewas is onder meer afhankelijk van de bodemvochtcondities. Om de invloed van deze vochtcondities op de gewasopbrengst goed te simuleren is het van belang de opkomstdatum niet als 'harde' datum in te voeren (zoals tot nu toe wel gebruikelijk was). In SWAP-WOFOST is nu een routine ingebouwd waarin voor de start van de gewaskalender de zaaidatum kan worden gebruikt in plaats van de opkomstdatum. Hierdoor kan voor kieming en opkomst rekening worden gehouden met temperatuur en vochtgehalte. De methode van Wijk et al. (1988) is geïmplementeerd analoog aan Van Walsum en Van der Bolt (2013). Kieming (in het Engels *germination*, hierna afgekort met *germ*) is afhankelijk van temperatuur:

$$\begin{array}{ll}
 \text{a } T_{av} < T_{min_{germ}} & : Tsum_{germ} = Tsum_{germ} \\
 \text{b } T_{min_{germ}} > T_{av} < T_{max_{germ}} & : Tsum_{germ} = Tsum_{germ} + \frac{Tsum_{eme,opt}}{Tsum_{eme,sub}} * (T_{av} - T_{min_{germ}}) \\
 \text{c } T_{av} > T_{max_{germ}} & : Tsum_{germ} = Tsum_{germ} + \frac{Tsum_{eme,opt}}{Tsum_{eme,sub}} * (T_{max_{germ}} - T_{min_{germ}})
 \end{array}$$

waarbij:

is de gemiddelde dagelijkse luchttemperatuur (°C) ($= 0.5 * (T_{min} + T_{max})$)

is de minimum temperatuur voor Tsum bepaling (°C*d)

is de maximum temperatuur voor Tsum bepaling (°C*d)

is de Tsum gedurende de kieming (°C*d)

is de Tsum voor gewasopkomst onder optimale bodemvocht en temperatuur (°C*d)

is de Tsum voor gewasopkomst onder suboptimale bodemvocht en temperatuur (°C*d)

Tsum voor gewasopkomst onder suboptimale bodemvocht en temperatuur wordt als volgt berekend:

$$\begin{array}{ll}
 \text{a } \text{Bij te droge omstandigheden: } Tsum_{eme,sub} = a * \log_{10}(-h_{rz}) + c \\
 \text{b } \text{Bij te natte omstandigheden: } Tsum_{eme,sub} = -a * \log_{10}(-h_{rz}) + b
 \end{array}$$

Waarbij: a, b, en c invoerparameters zijn, en de gemiddelde drukhoogte van de bovenste 10 cm van de bodem is.

Opkomst vindt plaats als $Tsum_{germ} > Tsum_{eme,opt}$

Gebruik van gesimuleerde bodemtemperatuur van de bovenste 10 cm is theoretisch beter, maar omdat de invoerparameters voor de relatie tussen bodemtemperatuur, bodemvocht en kieming vooralsnog niet bekend zijn, wordt gebruik gemaakt van de relatie op basis van luchttemperatuur, waarvoor de parameters a, b en c wel bekend zijn.

De hierboven beschreven relaties zijn geïmplementeerd in SWAP-WOFOST en worden momenteel uitgebreider getoetst. De parameterisering van de Tsum-waarden voor akkerbouw is identiek aan die van WOFOST waarvoor datasets beschikbaar zijn (www.wofost.wur.nl).

Voor grasland is een aparte temperatuursom (T-som=200) geïntroduceerd, welke het tijdstip bepaalt waarop de grasgroei in het voorjaar begint (Livestock Research, 2013).

3.2.3 CO₂-EFFECT OP GEWASGROEI

Het effect van CO₂ kan via de koppeling met WOFOST worden gemodelleerd. Veranderingen in de CO₂-concentraties in de atmosfeer werken direct door op de fotosynthese (Figuur 3.1). Door stijgende CO₂-concentraties kan een plant in dezelfde tijd meer CO₂ opnemen. Dit wordt

echter beperkt doordat de huidmondjes (deels) worden gesloten, wat effect heeft op de transpiratie die in principe afneemt. In het verleden (eind vorige eeuw) zijn veel kasexperimenten uitgevoerd met stijgende CO₂ concentraties die forse invloed bleken te hebben op de gewasgroei. Onder veldomstandigheden wordt een andere (vaak geringere) beïnvloeding gevonden doordat andere processen compenserend werken.

Directe effecten van toenemende CO₂-concentraties op de groei en transpiratie-reductie van C3-gewassen zoals gras en aardappel kunnen en zijn gemodelleerd. Kroes en Supit (2011) hebben dit voor grasland in Nederland gedaan en de parameterisatie samengevat (zie ook Wolf et al. (2010).

De impact van toekomstige CO₂-stijgingen op gewasopbrengst en transpiratie lijkt minder groot dan veelal werd aangenomen. Het is momenteel onderwerp van diverse studies waarbij vooralnog de interacties tussen het fotosynthese-proces (C3/C4) en de transpiratie nadere studie en evaluatie aan veldexperimenten vergt. Aansluiting bij internationale toetsen met veldexperimenten (zoals www.macsur.eu en www.agmip.org) verdient aanbeveling om tot beter onderbouwde toekomstvoorspellingen te komen.

Er vindt ook afstemming plaats met het AquaCrop-model dat door de FAO internationaal wordt ingezet (FAO, 2012) en dat ook rekening houdt met veranderende CO₂-concentraties in de atmosfeer.

3.2.4 ZUURSTOFSTRESS EN GEWASGROEI

Een ander aandachtspunt in de koppeling SWAP-WOFOST is de nieuwe zuurstofstressmodule in SWAP, die gekoppeld moet worden aan de zuurstofberekeningen in WOFOST. In WOFOST wordt de assimilatie berekend, waarbij zuurstof wordt geproduceerd (fotosynthese). Tegelijkertijd is zuurstofstress bepalend voor die assimilatie. Ook is dan de koppeling met dynamische wortelgroei een nieuw aspect, welke in de bestaande koppelingen van SWAP en WOFOST niet aan de orde was.

Algemeen

In fase 1 van dit project (Bartholomeus et al., 2013) is de zuurstofmodule van Bartholomeus et al. (2008) voor het berekenen van de effecten van de zuurstofvoorziening op de respiratie- en transpiratiereductie in SWAP ingebouwd voor het berekenen van de directe effecten van natschade. In de zuurstofmodule wordt transpiratiereductie door zuurstofstress berekend in afhankelijkheid van planteigenschappen en plantfysiologische processen, worteldiepte, gehalte luchtgevulde poriën, bodemtemperatuur, bodemfysische eigenschappen en microbiële activiteit (Figuur 3.2). Met de zuurstofroutine kan directe natschade (natschade door zuurstoftekort) gekwantificeerd worden.

De koppeling met het gewasgroeimodel WOFOST, waarin de plantfysiologische processen in meer detail beschouwd worden dan in SWAP, maakt het mogelijk om de zuurstofvraag van plantenwortels beter te beschrijven. De volgende variabelen zijn van belang:

- worteldiepte
- wortelbiomassa
- verhouding totale respiratie : onderhoudsrespiratie

Worteldiepte en -biomassa worden in WOFOST dynamisch berekend. De dagelijkse toename van de worteldiepte hangt af van de beschikbaarheid van organische bouwstenen en dus van

actuele assimilatie. Deze actuele assimilatie is afhankelijk van de vocht- en zuurstofcondities in de wortelzone (Figuur 3.1).

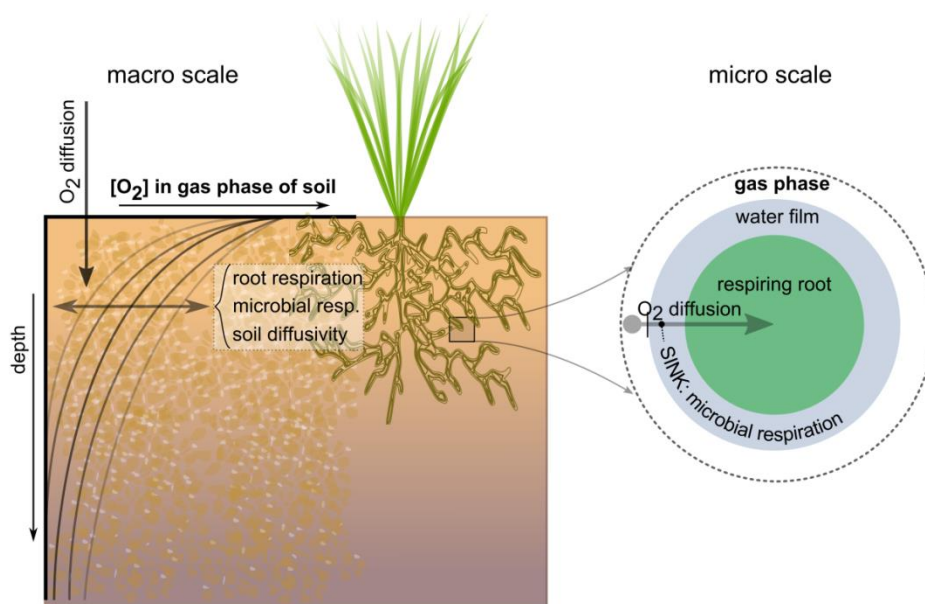
De op dagbasis berekende wortelbiomassa wordt gebruikt voor de berekening van de onderhoudsrespiratie van plantenwortels. In de zuurstofroutine wordt de totale wortelrespiratie verkregen door de onderhoudsrespiratie te vermenigvuldigen met een factor η ; de verhouding tussen totale respiratie en onderhoudsrespiratie (Bartholomeus et al., 2008). Vóór de integratie met WOFOST was η een statische variabele. In een nieuwe subroutine wordt η op dagbasis berekend uit de gewassenmerken zoals die bepaald worden in WOFOST.

Na de berekening van de zuurstofvraag van de plantenwortels (WOFOST) wordt uit de werkelijke bodemvochtcondities de zuurstofbeschikbaarheid in de wortelzone bepaald (SWAP). Als de zuurstofbeschikbaarheid in de wortelzone onvoldoende is om aan de zuurstofbehoefte van de wortels te voorzien, dan reduceert de potentiële fotosynthese tot de actuele (Figuur 3.1).

Zuurstofvraag plantenwortels en fractionering

In WOFOST wordt elke dag op basis van de heersende weerscondities en het ontwikkelingsstadium van het gewas de assimilatie onder optimale bodemvochtcondities berekend. Het verschil van deze assimilatie met de berekende onderhoudsrespiratie vormt de netto assimilatie van de hele plant, welke wordt omgerekend naar de toename in biomassa. Het verschil tussen assimilatie en toename van de biomassa is de groeirespiratie van de hele plant. Voor de berekening van zuurstofstress zijn we geïnteresseerd in de groeirespiratie van alleen de wortels. Deze wordt bepaald via de fractionering van bouwstoffen over de wortels, bladeren, stam en opslagorganen. Het aandeel dat naar de wortels gaat, bepaalt uiteindelijk de groei- en onderhoudsrespiratie van de wortels. Resultaat van de routine is η , een term die nodig is om de zuurstofvraag van de plantenwortels te bepalen.

FIGUUR 3.2 SCHEMATISERING VAN DE ZUURSTOFMODULE, GEBRUIKT OM DAGELIJKE RESPIRATIE- EN TRANSPIRATIEREDUCTIE TE BEPALEN. DE MODULE COMBINEERT FYSIOLOGISCHE PROCESSEN (WORTELRESPIRATIE EN MICROBIËLE RESPIRATIE) EN FYSISCHE PROCESSEN (DIFFUSIE OP ZOWEL MACRO- ALS MICROSCHAAL). DETAILS VOOR DE GEBRUIKTE VERGELIJKINGEN ZIJN GEGEVEN IN BARTHOLOMEUS ET AL. (2008).

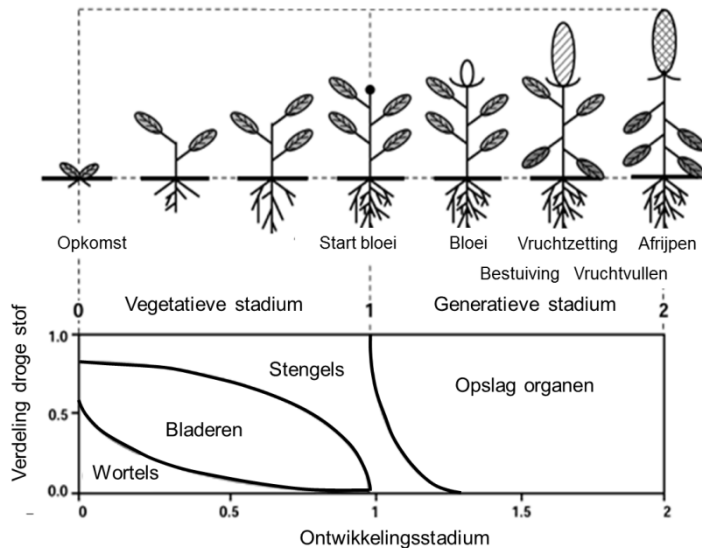


De fractionering van de bouwstoffen over de verschillende onderdelen van een plant, verandert gedurende de ontwikkeling van de plant. Figuur 3.3 geeft hiervan een typisch voorbeeld,

waarbij de wortels met name in het begin van de ontwikkeling veel bouwstenen ontvangen. De groeirespiratie van de wortels is aan het begin van het groeiseizoen daardoor ook het hoogst. Een voorbeeldberekening met SWAP-WOFOST is gegeven in Figuur 3.4, waarin te zien is dat de relatieve zuurstofvraag van de plantenwortels hoog is aan het begin van het groeiseizoen, en afneemt naarmate het groeiseizoen vordert.

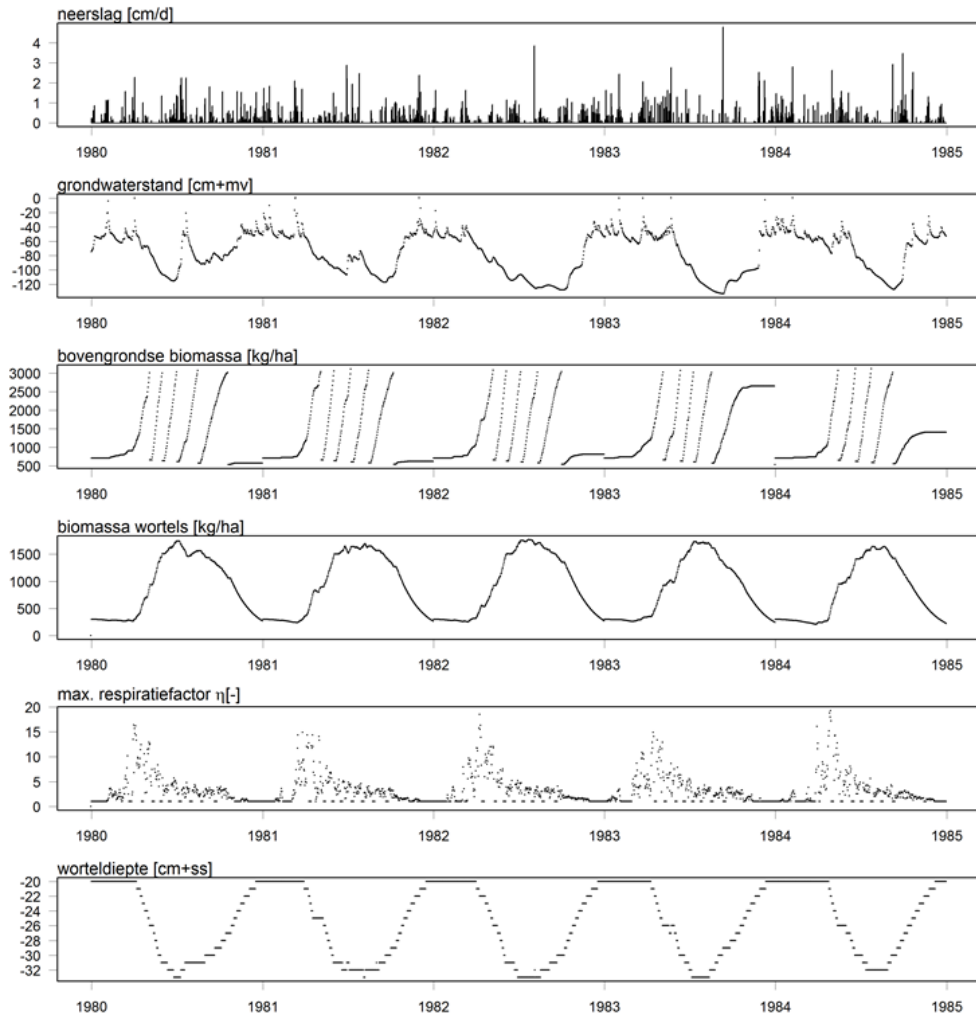
Opgemerkt dient te worden dat WOFOST gebruik maakt van de luchttemperatuur voor de temperatuurafhankelijkheid van de onderhoudsrespiratie van de plant; ook voor die van de wortels. Om WOFOST niet te laten afwijken van de standaardversie, is deze methode gehandhaafd in de koppeling met SWAP. In de berekening van zuurstofstress wordt echter ook de onderhoudsrespiratie berekend, volgens dezelfde vergelijking als die in WOFOST, maar met als verschil dat hier de bodemtemperatuur invoer is. Daardoor zal de berekende onderhoudsrespiratie in WOFOST wat afwijken van die in de zuurstofroutine. Van belang voor de koppeling tussen SWAP en WOFOST voor de zuurstofroutine is of dit consequenties heeft voor de berekende η . Uit twee voorbeeldberekeningen blijkt dat het gebruik van bodem- of luchttemperatuur voor de berekende η slechts kleine verschillen oplevert (Figuur 3.5) en daarmee nauwelijks van invloed zijn op de eindresultaten.

FIGUUR 3.3 VOORBEELD VAN DE FRACTIONERING VAN BOUWSTOFFEN OVER DE VERSCHILLENDE ONDERDELEN VAN DE PLANT ALS FUNCTIE VAN HET ONTWIKKELINGSSTADIUM.



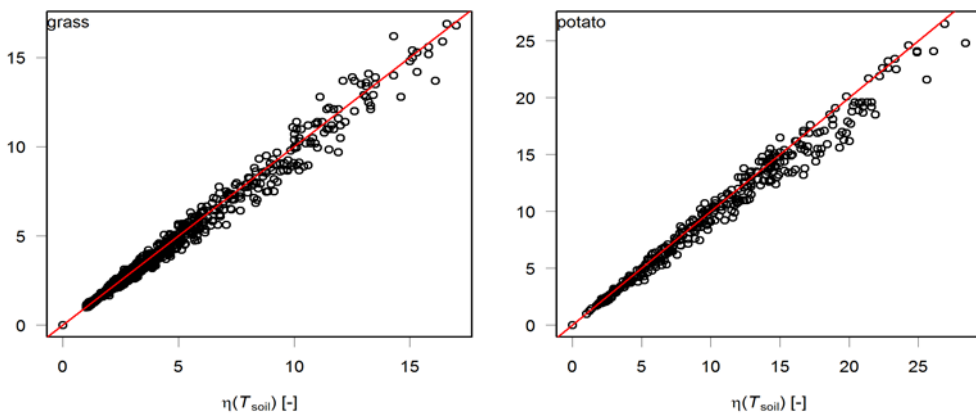
FIGUUR 3.4

VOORBEELDBEREKENING MET SWAP-WOFOST VOOR GEMAaid GRAS, WAARIN DE MAXIMALE RESPIRATIEFACTOR η (VIJFDE PANEEL), AFHANKELIJK IS VAN HET ONTWIKKELINGSSTADIUM VAN HET GEWAS. AAN HET BEGIN VAN HET GROEISEIZOEN WORDT GEÏNVESTEERD IN WORTELGROEI, WAT TE ZIEN IS IN DE TOENAME VAN DE BIOMASSA VAN DE WORTELS EN DE WORTEL DIEPTE. JUIST IN DEZE PERIODE IS OOK DE RELATIEVE ZUURSTOFVRAAG VAN DE WORTELS HOOG, WAT TOT UITING KOMT IN η .



FIGUUR 3.5

η BEREKEND ALS FUNCTIE VAN LUCHTTEMPERatuur (VERTICALE AS) EN ALS FUNCTIE VAN BODEMTEMPERatuur OP 17.5 CM-MV (HORIZONTALE AS), VOOR GRAS (LINKS) EN AARDAPPEL. RODE LIJNEN GEVEN DE 1:1 LIJN.



Parameterisatie

SWAP, zonder de koppeling met WOFOST, rekent met een statisch gewas. Gewasgroei wordt opgelegd en plantfysiologische processen worden niet expliciet berekend. Dat heeft tot gevolg dat voor de berekening van zuurstofstress diverse gewasparameters ingevoerd moeten worden (zie Tabel 3.1, kolom 'Stat'). Met de koppeling van SWAP met WOFOST wordt gewasgroei dynamisch berekend en worden gewasparameters die van belang zijn voor de zuurstofroutine berekend en dus niet meer apart ingevoerd (zie Tabel 3.1, kolom 'Dyn'). Het aantal invoerparameters reduceert daarmee van negen naar vier.

Voor de parameters die wel invoer zijn voor SWAP, maar niet voor SWAP-WOFOST geldt:

- Q10_root: is standaard invoer voor dynamische gewasgroei (WOFOST) en wordt gebruikt voor de zuurstofroutine.
- C_mroot: is standaard invoer voor WOFOST en wordt gebruikt voor de zuurstofroutine.
- SwRootRadius: ten opzichte van de SWAP-versie die in fase 1 van het project is ontwikkeld, is nu een 'switch' voor de invoer of berekening van root radius toegevoegd. Voorheen kon deze uitsluitend berekend worden. Hiervoor waren echter vier parameters nodig die niet van belang waren voor de verdere routine. Door het direct invoeren van de root radius vermindert het aantal benodigde parameters.
- F_senes: standaard invoer voor WOFOST en dezelfde waarde wordt gebruikt voor de zuurstofroutine.
- W_root_ss (WRTB): Uit W_root_ss wordt voor een statisch gewas w_root_z0 (Dry weight of roots at top of compartment kg/m³) afgeleid. Voor een dynamisch gewas wordt w_root_z0 nu afgeleid uit de in dynamische gewasgroei berekende variabelen wrt (root dry weight, kg/ha) en rd (rooting depth, cm) en de opgegeven verdeling van de worteldichtheid met de diepte (rdctb).
- Max_resp_factor (η): voor een statisch gewas wordt deze nu in de vorm van een tabel opgegeven. Voor een dynamisch gewas wordt deze berekend.

TABEL 3.1 OVERZICHT VAN INVOERPARAMETERS VOOR DE BEREKENING VAN ZUURSTOFSTRESS VOOR EEN STATISCH (STAT) EN DYNAMISCH (DYN) GEWAS. X GEEFT AAN OF DE PARAMETER INVOER IS VOOR STAT EN/OF DYN.

Naam in SWAP-invoer	Beschrijving in SWAP invoer	Stat	Dyn
Q10_root	Relative increase in root respiration at temperature increase of 10 °C [-]	X	
Q10_microbial	Relative increase in microbial respiration at temperature increase of 10 °C [-]	X	X
Specific_resp_humus	Specific respiration rate of humus at 25 °C [kg O ₂ /kg C/d]	X	X
C_mroot	Maintenance coefficient of root [kg O ₂ /kg/d]	X	
SRL	Specific root length [m root/kg root]	X	X
SwRootRadius	Switch voor berekening root radius		
If 1	Dry_mat_cont_roots		
	Dry matter content of roots [-]	X	X
If 1	Air_filled_root_por		
	Air filled root porosity [-]	X	X
If 1	Spec_weight_root_tissue		
	Specific weight of non-airfilled root tissue [kg root/m ³ root]	X	X
If 1	Var_a		
	Variance of root radius [-]	X	X
If 2	Root_radius02		
	Root radius in oxygen routine [m]	X	X
F_senes	Reduction factor for senescence, used for maintenance respiration [-]	X	
W_root_ss (WRTB)	Dry weight of roots at soil surface [kg/m ³] as function of DVS	X	
max_resp_factor (MRFTB)	Ratio root total respiration / maintenance respiration [-] as function of DVS	X	

De parameterwaarden voor gras, snijmaïs en aardappel zijn gegeven in Tabel 3.2, met daarin ook de verwijzingen naar de gebruikte literatuur.

TABEL 3.2 PARAMETERWAARDEN VOOR DE ZUURSTOFMODULE BINNEN SWAP-WOFOST VOOR GRAS, AARDAPPEL EN SNIJMAÏS. VOOR BETEKENIS VAN DE PARAMETERS, ZIE BARTHOLOMEUS ET AL. (2008).

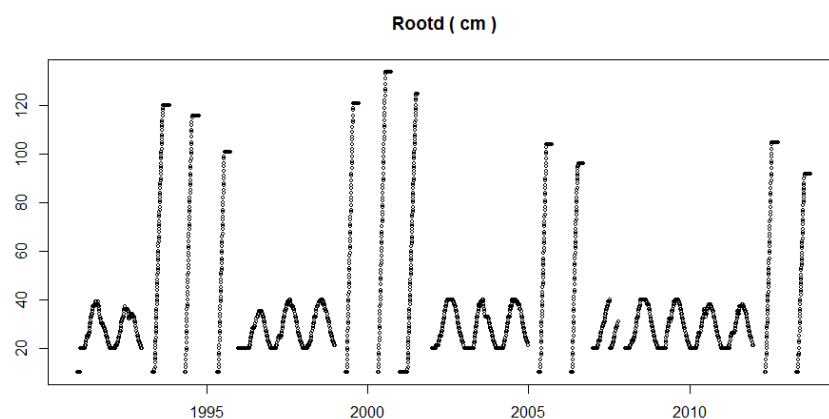
	Naam in SWAP-file	Gras	Aardappel	Snijmaïs
Relative increase in microbial respiration at temperature increase of 10 °C [-]	Q10_microbial	2.8 (Fierer et al., 2006)	Idem	Idem
Specific respiration rate of humus at 25 °C [kg O ₂ /kg C/d]	Specific_resp_humus	1.6e-3 (Fierer et al., 2005) – 'medium litter quality'	Idem	Idem
Specific root length [m root/kg root]	SRL	383571 (De Willigen en Van Noordwijk, 1987)	234000 (De Willigen en Van Noordwijk, 1987)	151375 (De Willigen en Van Noordwijk, 1987)
Root radius [m]	Root radius02	0.075e-3 (De Willigen en Van Noordwijk, 1987; Deru et al., 2010; Wopereis, 1994)	0.14e-3 (De Willigen en Van Noordwijk, 1987; Ehler et al., 2004; Iwama, 1998; Rawsthorne en Brodie, 1986; Vos en Groenwold, 1986)	0.15e-3 (De Willigen en Van Noordwijk, 1987; Qin et al., 2006)

3.2.5 BEWORTELING

De beworteling van het gewas groeit bij alle gewassen mee met de bovengrondse delen. Analoog aan WOFOST is de groeisnelheid van de wortels een invoergegeven. Niet optimale bodemvochtcondities beperken de gewasproductie en dus ook de wortelgroei. De maximale bewortelingsdiepte wordt beperkt door het gewas en de bodem, waarbij bijvoorbeeld slecht doorlatende bodemlagen de beworteling kunnen beperken.

Om de dynamiek tussen jaren beter tot uiting te laten komen wordt de bewortelingsdiepte, net als de bovengrondse delen, dynamische gemodelleerd. Wortelgroei wordt daarbij gemodelleerd als functie van de bovengrondse groei. Details voor grasland zijn te vinden in Kroes et al. (2009). Een voorbeeld van de dynamische groei is gegeven in figuur 3.6.

FIGUUR 3.6 DYNAMISCHE WORTELGROEI (ROOTD IN CM-MV) VAN SNIJMAÏS, AFGEWISSELD MET GRASLAND IN PERCEEL 11 OP DE MARKE.



Voor de parameterisering van de diepte van de beworteling is voor alle gewassen een exponentieel afnemend wortelprofiel aangenomen wat in overeenstemming is met andere onderzoeken (De Willigen et al., 2002).

4

EVALUATIE PRESTATIES SWAP-WOFOST

In Fase 2 van het project Waterwijzer Landbouw is een instrument ontwikkeld dat niet alleen de verdampingsreductie, maar ook de reductie in gewasopbrengst kan berekenen voor de gewassen grasland, snijmais en aardappel. Deze fase levert namelijk een operationeel SWAP-WOFOST rekeninstrument waarvan de modelprestaties zijn geëvalueerd aan de hand van beschikbare meetgegevens.

Bij de evaluatie van de modelprestaties van het rekeninstrument SWAP-WOFOST is de door de begeleidingscommissie akkoord bevonden notitie (bijlage 2) zo goed mogelijk opgevolgd:

- 1 Bij het parameteriseren van SWAP-WOFOST is gebruik gemaakt van parametersets die in het verleden zijn opgesteld op basis van experimenten en expertkennis. Deze datasets zijn niet opnieuw gekalibreerd aan de beschikbare metingen.
- 2 Voor de fenologische parameterisatie (met name oogst, maar mogelijk ook opkomst van het gewas) is verkend of aanvullend gebruik kan worden gemaakt van de geïnterpreteerde satellietgegevens van de Groenmonitor (bijlage 3). Wel moet daarbij worden gerealiseerd dat satellietgegevens ook modelresultaten zijn, en daarom niet als harde gegevens mogen worden meegenomen in de analyse. De mogelijke rol van remote sensing is beperkt in combinatie met beschikbare gewasexperimenten uit het verleden omdat voor deze meetperiodes meestal geen remote sensing beelden beschikbaar zijn.
- 3 De opbrengstderving is uitgedrukt als het verschil tussen exploiterebare en actuele opbrengst. De potentiële opbrengst wordt in de praktijk namelijk nooit bereikt door de afvlakking van de opbrengst als functie van de nutriëntengift bij hogere opbrengsten. Het is daarom economisch gezien niet rendabel om de potentiële opbrengst na te streven omdat de meeropbrengst gering is in relatie tot de extra kosten die moeten worden gemaakt om de bedrijfsvoering nog verder te optimaliseren. Van Ittersum (2013) definieert verschillende productieniveaus en noemt 80% (met een range van 75% tot 85%) van de theoretisch potentiële opbrengst de maximaal haalbare (exploiteerbare) opbrengst. De exploiterebare opbrengst is de potentiële opbrengst verminderd met onvermijdelijke verliezen. Om de opbrengstderving zo realistisch mogelijk te benaderen is de exploiterebare opbrengst als referentieniveau geselecteerd voor de Waterwijzer en is de berekende dagelijkse potentiële droge stofproductie met een factor 0.8 vermenigvuldigd.

Omdat het een gekoppeld instrumentarium betreft dat het bodem-water-plant-atmosfeer systeem beschrijft is het zaak niet alleen de gesimuleerde opbrengsten te evalueren aan metingen maar ook de andere systeemvariabelen omdat alleen daardoor duidelijk wordt of SWAP-WOFOST het systeem adequaat kan beschrijven. Vanwege de terugkoppelingen tussen de modellen is het noodzakelijk de actuele opbrengst voldoende nauwkeurig te kunnen schatten om de waterbalans correct te kunnen simuleren en vice versa. Om het instrument te kunnen evalueren bevat een experiment idealiter metingen van zowel neerslag, verdamping, bodemvochtgehalten, drukhoogten, grondwaterstanden, drainage, mestgiften, mestsamenstelling,

ontwikkelingsstadia en bladoppervlakte index, als biomassa/gewasopbrengst en waargenomen stress op meer momenten tijdens het groeiseizoen.

De evaluatie van de (zonder kalibratie) met SWAP-WOFOST gesimuleerde opbrengsten aan de hand van de metingen voor de cases is erop gericht om na te gaan of het instrumentarium in staat is het systeemgedrag te beschrijven met speciale aandacht voor water-gerelateerde stress. Gekozen is voor SWAP-WOFOST omdat deze werkwijze extra informatie levert, conceptueel completer en beter is, en meer perspectief naar de toekomst biedt. Voorwaarde is dat SWAP-WOFOST voor de hydrologische resultaten niet slechter mag presteren dan de beschikbare methode waarbij de gewasopbrengst evenredig wordt verondersteld aan de met SWAP berekende verdampingsreductie.

4.1 WERKWIJZE

Als eerste stap zijn de voor evaluatie beschikbare meetgegevens verzameld, vervolgens zijn die proeven geselecteerd die voornamelijk water-gerelateerde stress kennen (paragraaf 4.2). De voor deze cases beschikbare metingen zijn gebruikt om het systeemgedrag van SWAP-WOFOST te evalueren (paragraaf 4.3). Als eerste is de vergelijking gemaakt met de verdampingsreducties berekend met SWAP en is de consistentie van de gekoppelde modellen geëvalueerd. Daarna zijn de gewasopbrengsten voor gras, snijmaïs en aardappelen geëvalueerd voor alle metingen in alle cases, en tenslotte is ingezoomd op de specifieke cases.

4.2 METINGEN

Er is een testbank opgezet waarmee, voor zover (voldoende) metingen beschikbaar zijn, de modelperformance is geëvalueerd voor de volgende rekenresultaten:

- 1 Gewasopbrengst (kg/ha/jr droge stof);
- 2 Bladoppervlakte index (=LAI) (m^2 blad/ m^2 bodem);
- 3 Actuele verdamping (mm/d);
- 4 Grondwaterstand (m-maaiveld);
- 5 Volumetrisch bodemvochtgehalte (-);
- 6 Drukhoogte (cm);
- 7 Ontwatering/buisdrainage flux (mm/d).

Deze testbank bevat op dit moment metingen van hydrologie en gewasopbrengsten voor 25 veldproeven die in het verleden in Nederland zijn uitgevoerd (bijlage 4). Voor al deze datasets zijn eerder berekeningen met SWAP uitgevoerd waarbij er – in het verleden – waarschijnlijk handmatig is gekalibreerd. Voor gewasgroei zijn de parametersets gebruikt die in het verleden voor WOFOST zijn vastgesteld. Ook deze zijn aangepast aan de Nederlandse situatie op basis van de waarnemingen.

Omdat het project zich in deze fase richt op droog- en natschade zijn die veldproeven (cases) geselecteerd waarbij uitsluitend water-gerelateerde stress-omstandigheden optreden. Andere stressoren, zoals niet optimale nutriëntenvoorziening, zoutschade en ziektes en plagen, maken de evaluatie van de resultaten van SWAP-WOFOST als gevolg van waterstress minder eenvoudig of onmogelijk. Het doel van Waterwijzer Landbouw is in dit stadium om de effecten van een niet optimale waterhuishouding op de gewasopbrengst te beschrijven en niet de reductie als gevolg van andere stressfactoren. Beweiding kan (nog) niet worden gesimuleerd door SWAP-WOFOST, daardoor zijn ook de cases met beweiding niet geschikt voor evaluatie.

Van de 25 cases blijken op basis van deze criteria 9 cases geschikt voor evaluatie (tabel 4.1). Voor al deze cases geldt optimale stikstofvoorziening. De overige 16 cases kunnen worden gebruikt in latere fases van het project.

TABEL 4.1

CASES VOOR SWAP-WOFOST

Nr	Gewas	Lokatie	Periode	Bodem	Referentie
1	Grasland	Ruurlo16	1980-1984	Veldpodzolgrond	Kroes and Supit (2011)
2	Grasland	Ruurlo48	1980-1984	Veldpodzolgrond	Kroes and Supit (2011)
3	Grasland	Zegveld03	2003-2005	Koopveengrond	Hendriks et al. (2011)
4	Snijmaïs	Cranendonck16	1974-1982	Enkeerdgrond	Schröder (1985)
5	Snijmaïs	Dijkgraaf	2007-2008	Beekeerdgrond	Elbers et al. (2010)
6	Aardappel	Borgerswold03	1992-1994	Veldpodzolgrond	Dijkstra et al. (1996)
7	Aardappel	Borgerswold13	1992-1994	Dampodzolgrond	Dijkstra et al. (1996)
8	Aardappel	Rusthoeve	2011-2013	Poldervaaggrond	Schipper & vd Schans (2012)
9	Aardappel	Vredepeel26	2002-2002	Gooreerdgronden	Stolk en Kroes (2012)

Aanvullend zijn resultaten van de Groenmonitor (www.groenmonitor.nl) gebruikt om na te gaan of deze in de nabije toekomst ingezet kunnen worden om modellen te evalueren of van invoergegevens te voorzien (aanhangsel 3). De Groenmonitor is beschikbaar vanaf 2013 met een ruimtelijke resolutie van 25 m op dagen dat er géén bewolking aanwezig is. De resolutie kan worden verbeterd tot 5 m door andere satellietdata te gebruiken.

De Groenmonitor is in staat om de volgende relevante informatie te leveren:

- Overstromingen en wateroverlast (tijdstip en patroon)
- Grondbewerking (moment en toestand)
- Opkomstdatum van gewassen
- Toestand van gewassen (muizenplaag Friesland)
- Gewashoogtes van grasland (tot ca 20 cm)
- Momenten van snedes op grasland
- Oogsttijdstip van gewassen

De Groenmonitor levert extra informatie over management-activiteiten voor zowel grasland als bouwland. De Groenmonitor kan in combinatie met modelberekeningen worden gebruikt om bijv. de opkomst- en oogstdata te controleren en/of te kalibreren tijdens modelberekeningen. De resultaten van de Groenmonitor kunnen in de (nabije)toekomst (zodra er resultaten van meer jaren beschikbaar zijn) worden gebruikt om berekeningen met SWAP-WOFOST tbv de Waterwijzer Landbouw te evalueren en verbeteren.

4.3 RESULTATEN

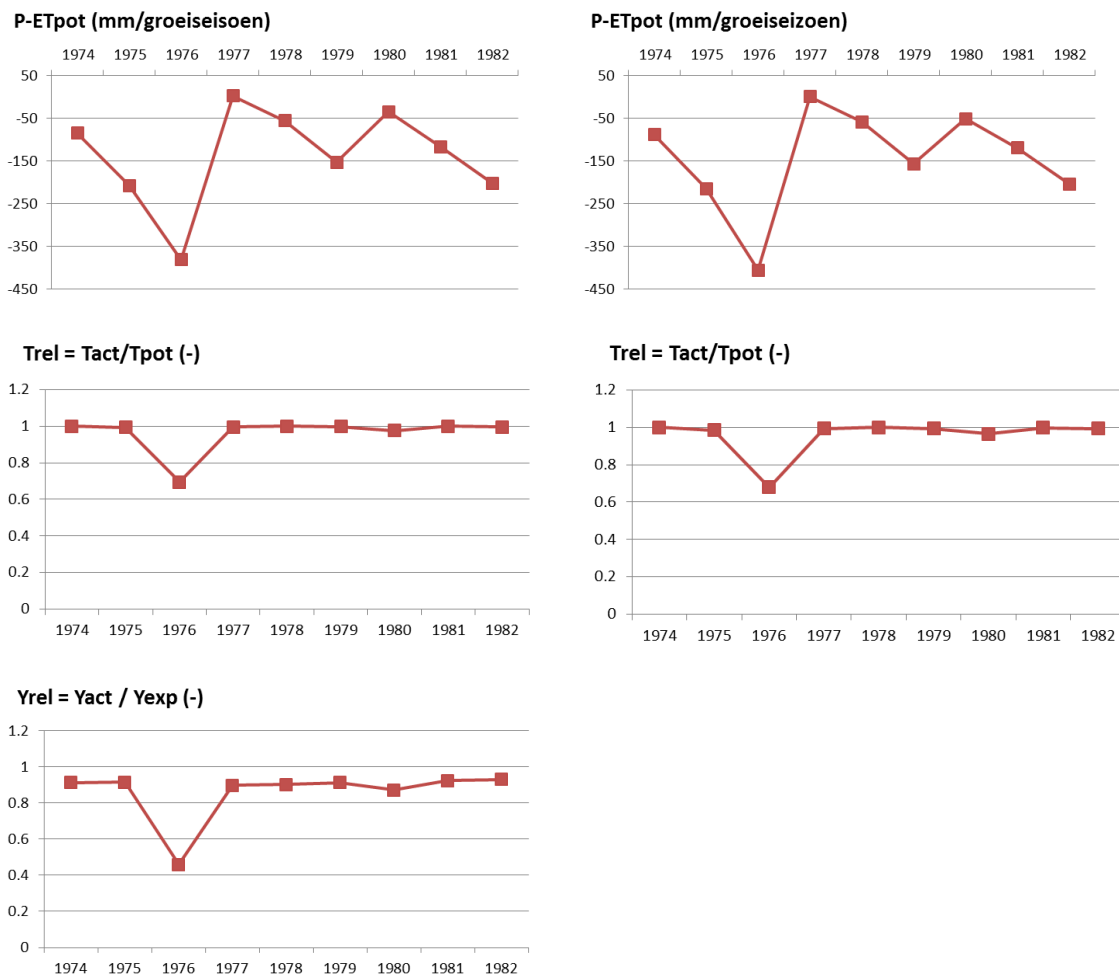
Allereerst hebben we voor de beoordeling van de resultaten een nulhypothese geformuleerd. Die nulhypothese luidt: SWAP-WOFOST vormt géén verbetering ten opzichte van de SWAP-berekeningen met een opgelegde gewasgroei. Hierop is eerst het modelgedrag geëvalueerd en daarna zijn voor de cases de simulatieresultaten vergeleken met de metingen. Daarbij worden zowel het systeemgedrag (de dynamiek) als de opbrengst (absolute waarde) beschouwd. Vervolgens zijn de gewasopbrengsten voor gras, snijmaïs en aardappel geëvalueerd voor alle metingen in alle cases, waarna per gewasgroep is ingezoomd op de specifieke cases. Tenslotte is voor alle waarnemingen gekwantificeerd of de nulhypothese kan worden verworpen.

4.3.1 EVALUATIE GESCHIKTHEID MODELGEDRAG

Het criterium hierbij is dat het gekoppeld instrument SWAP-WOFOST het niet slechter mag doen dan de beschikbare methode waarbij de gewasopbrengst evenredig wordt verondersteld aan de met SWAP berekende verdampingsreductie. Dit criterium is vertaald in de hypothese dat SWAP-WOFOST niet in staat is de opbrengstreducties als gevolg van water-gerelateerde stress net zo goed te simuleren als SWAP. Om deze hypothese te falsifiëren zijn de resultaten van berekeningen met alleen SWAP en met de gekoppelde modellen SWAP-WOFOST vergeleken. De resultaten van beide berekeningen staan in bijlage 7 en zijn voorzien van modelprestatie-maten.

Tevens zijn vergelijkingen gemaakt tussen neerslagoverschot en relatieve transpiratie en opbrengst. Figuur 4.1a laat de resultaten voor de snijmaïs-berekeningen in Cranendonck zien (de enige langere reeks waarnemingen).

FIGUUR 4.1A CASE CRANENDONCK16: RESULTATEN VAN BEREKENINGEN MET SWAP-WOFOST (LINKER KOLOM) EN SWAP (RECHTER KOLOM). BOVENSTE RIJ: NEERSLAGOVERSCHOT TIJDENS GROEISEIZOEN (MM/JAAR); MIDDELSTE RIJ: RELATIEVE TRANSPIRATIE (-); ONDERSTE RIJ: RELATIEVE OPBRENGST (-).



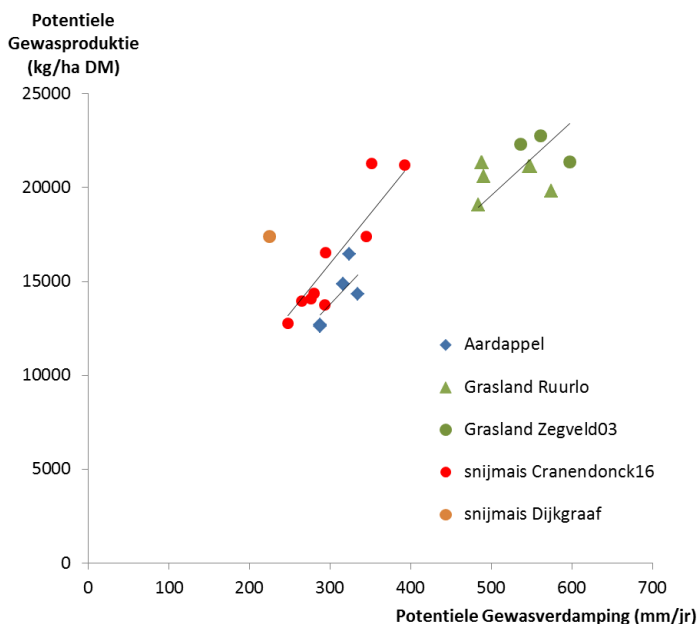
Uit figuur 4.1a blijkt dat voor de case Cranendock16, met metingen in het extreem droge jaar 1976, de dynamiek van de opbrengstderving goed overeenkomt met de dynamiek van de transpiratie-reductie: in 1976 en 1981 worden reducties gesimuleerd waar de andere jaren potentieel transpireren en groeien.

Te zien is ook dat de relatieve reductie in gewasopbrengst berekend met WOFOST groter is dan de relatieve reductie in de transpiratie: de met WOFOST gesimuleerde reductie van de gewasopbrengst is niet gelijk aan de berekende reductie in de actuele transpiratie. De à priori veronderstelde meerwaarde van het gebruik van een gewasgroeimodel wordt hiermee in potentie zichtbaar. Het gewasgroeimodel heeft echt meerwaarde wanneer het in staat is naast de dynamiek in gewasopbrengsten ook de absolute grootte van de gemeten gewasopbrengsten te benaderen.

Dat de berekende relatieve gewasopbrengst in de jaren met een voldoende vochtvoorziening niet gelijk aan 1 is kan er op wijzen dat de werkelijke exploitierbare opbrengst kleiner is dan berekend als $0.8 * E_{pot}$ (de gehanteerde factor van 0.8 is geen hard getal, maar varieert volgens de review van Van Ittersum et al. (2013) tussen de 0.75 en 0.85). Dat de relatieve gewasopbrengst niet gelijk aan 1 is heeft geen gevolgen voor het afleiden van metarelaties voor de reducties in de gewasproductie (omdat ook daarvoor een relatieve maat, namelijk het reductiepercentage, wordt gebruikt).

Om inzicht te krijgen in de verdere consistentie van de simulatieresultaten van de modelkoppeling SWAP-WOFOST zijn in figuur 4.1b de gesimuleerde potentiële gewasopbrengsten uitgezet als functie van de potentiële gewasverdamping. Deze moeten, wanneer er geen beperking in vocht- en nutriëntenvoorziening zijn en er geen plaagdruk is, sterk zijn gecorreleerd omdat beide in belangrijke mate worden bepaald door de straling in een groeiseizoen: de resultaten moeten vrijwel op een lijn liggen.

FIGUUR 4.1B POTENTIËLE GEWASVERDAMPING VERSUS POTENTIËLE GEWASPRODUCTIE



Uit figuur 4.1b blijkt dat elk van de 3 gewassen een eigen relatie tussen de berekende potentiële gewasverdamping en de berekende potentiële gewasproductie heeft:

- Er is een duidelijke relatie voor snijmais Cranendonck;
- Voor gras is de relatie zwakker, (de variatie is groter dan voor snijmais);
- Voor aardappel is lastig een beoordeling te geven vanwege het beperkte aantal simulatieresultaten (er is alleen gerekend voor jaren met meetwaarden).

De koppeling van de beide modellen vormt een stabiel systeem voor snijmais en waarschijn-

lijk ook voor aardappel, voor grasland kan die conclusie nog niet worden getrokken: de variatie is groot voor het (beperkte) aantal rekenresultaten.

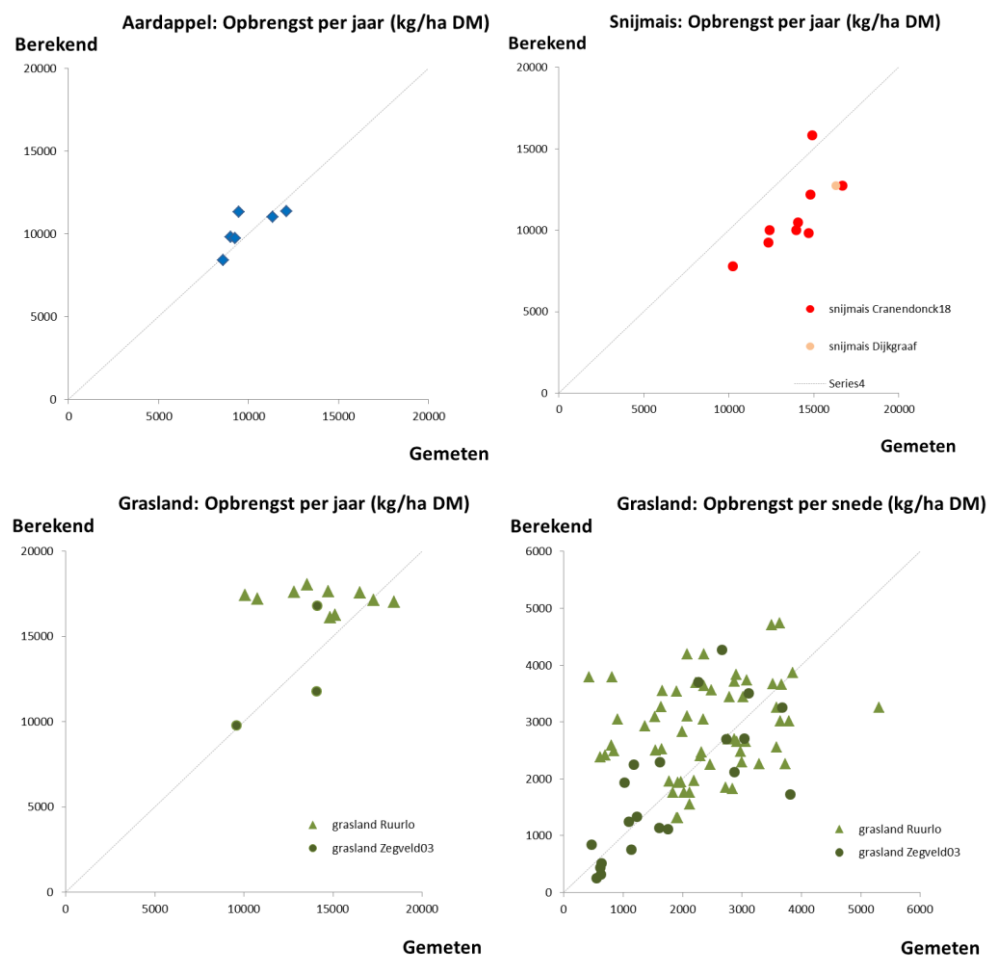
Het is opvallend dat het resultaat voor snijmaïs Dijkgraaf afwijkt van snijmaïs Cranendonck, mogelijk is de slecht bekende hydrologische onderrand bij Dijkgraaf hiervan de oorzaak. Verbetering valt buiten de scope van deze studie (zie 4.3.3.2).

De evaluatie van het modelgedrag kan voor alle gewassen worden verbeterd door bovenstaande analyse uit te voeren voor rekenresultaten van een langere periode (minimaal de 30-jarige klimaatreeks), door naast de jaartotalen ook kortere tijdsperioden te vergelijken, en door de vochttoestand en temperatuur als mogelijke oorzaken van afwijkingen in de analyse te betrekken.

4.3.2 EVALUATIE PER GEWASGROEP

De gesimuleerde actuele gewasopbrengsten zijn vergeleken met alle in de 9 cases waargenomen gewasopbrengsten (figuur 4.1c). Voor grasland zijn naast de jaartotalen ook de opbrengsten per snede vergeleken.

FIGUUR 4.1C GEMETEN EN BEREKENDE GEWASOPBRENGSTEN IN KG/HA DROGE STOF (DM): LINKSBOVEN AARDAPPEL (LINKSBOVEN), SNIJMAÏS (RECHTSBOVEN) GRASLAND JAAROPBRENGST (LINKSONDER) EN GRASLAND PER SNEDE, (RECHTSONDER). DE STIPPELLIJN GEEFT DE 1:1 LIJN.



De resultaten voor aardappel zijn goed. Voor snijmaïs lijkt de gemeten opbrengst structureel te worden onderschat door de modellen. Voor grasland vertonen de jaartotalen grotere verschillen voor de cases Ruurlo (de variatie tussen de waarnemingen is groter dan die van de modeluitkomsten), de case Zegveld wordt beter gesimuleerd dan Ruurlo. Het valt op dat de gesimuleerde opbrengsten van gras in Ruurlo relatief hoog zijn met weinig variatie; bijna altijd lijkt de exploiterebare opbrengst te worden gesimuleerd. Wanneer de sneden van gras op dezelfde manier worden vergeleken lijken de resultaten beter te zijn, hier is de variatie voor Ruurlo juist groot. Om mogelijke oorzaken aan te wijzen zijn de resultaten van de individuele cases geanalyseerd.

4.3.3 EVALUATIE GEWASOPBRENGSTEN PER CASE

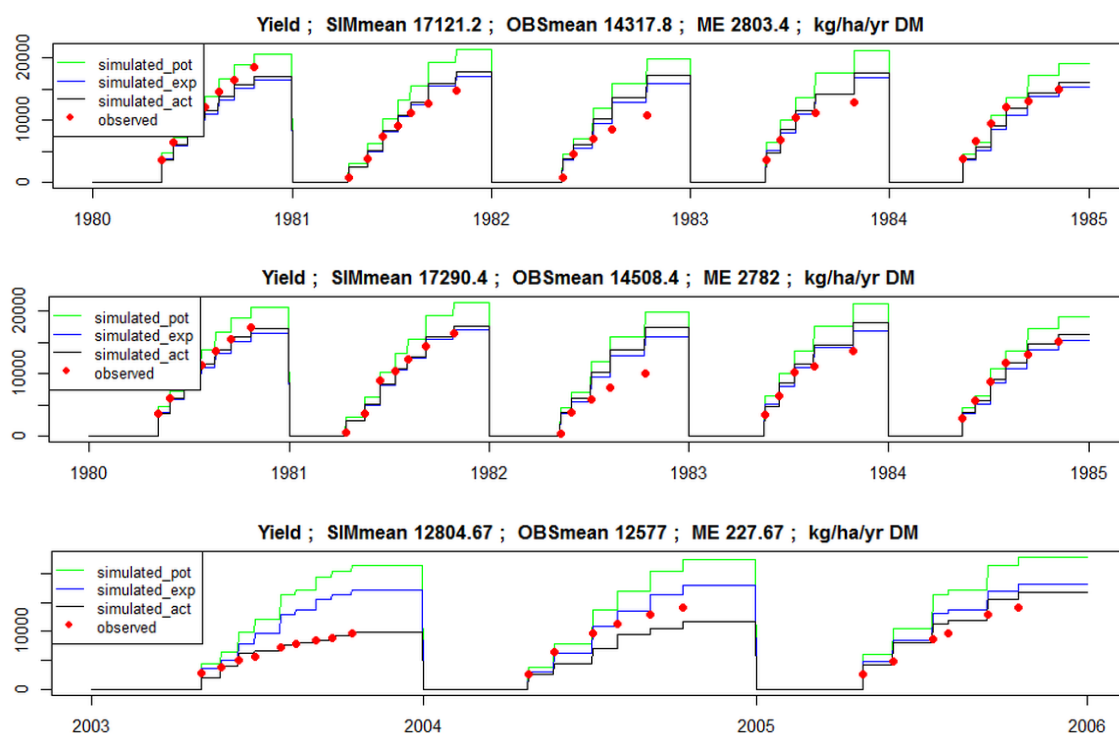
Bijlage 5 bevat de berekende en gemeten opbrengsten gegeven voor grasland, snijmaïs en aardappel. Voor grasland zijn zowel de opbrengst per snede als de jaarlijkse opbrengst beschouwd. In de figuren 4.2, 4.3 en 4.4 (resp. gras, snijmaïs en aardappel) zijn deze resultaten voor de 9 cases per jaar gepresenteerd waarbij:

- groene lijn: (theoretische) potentiële opbrengst (simulated_pot in kg droge stof per ha)
- blauwe lijn: exploiterebare opbrengst (simulated_exp, waarbij $\text{simulated_exp} = 0.8 * \text{simulated_pot}$)
- zwarte lijn: actuele opbrengst (simulated_act)
- rode punten: waarnemingen (observed).

4.3.3.1 GRASLAND

Voor niet beweide grasland (figuur 4.2) is de berekende totale jaarlijkse opbrengst (Yield) als som van snedes vergeleken met waarnemingen. Omdat het hier om jaartotalen gaat, is het aantal waarnemingen vaak gering. De prestatiestatistieken (bijlage 7) zijn daardoor minder betrouwbaar.

FIGUUR 4.2 MODELRESULTATEN EN METINGEN VAN GEWASOPBRENGSTEN VOOR GRASLAND: BOVEN RUURLO16 (A), MIDDEN RUURLO48 (B), EN ONDER ZEGVELD03 (C). GROEN: BEREKENDE POTENTIËLE OPBRENGST, BLAUW: DE BEREKENDE EXPLOITEERBARE OPBRENGST, ZWART: DE BEREKENDE ACTUELE OPBRENGST, ROOD: DE GEMETEN OPBRENGST.



Een visuele beoordeling van de opbrengsten (figuur 4.2) laat voor de grasland cases zien dat de gesimuleerde gewasopbrengsten voor grasland vaak groter zijn dan de metingen. Dat blijkt met name het geval voor de case Ruurlo. Wanneer de resultaten van Ruurlo per jaar worden bekeken blijkt dat de waarnemingen van Ruurlo48 in 1980, 1981 en 1984 vrij goed worden gesimuleerd. Voor Ruurlo16 (met hetzelfde management / dezelfde mestgiften) wordt de gemeten opbrengst in 1980 onderschat, in 1981 overschat en in 1984 vrijwel benaderd. Omdat de berekeningen voor Ruurlo16 en Ruurlo48 met dezelfde invoergegevens, schematisering en modelcode zijn uitgevoerd laat dit zien hoe moeilijk het is de waargenomen variatie te simuleren. Oorzaken hiervoor zijn het niet exact bekend zijn van de lokale situatie, het (deels) niet bekend zijn van de invoergegevens voor de modellen, tekortkomingen in de modelconcepten en mogelijk ook onnauwkeurigheden in de waarnemingen. Ook de resultaten voor Zegveld demonstreren hoe moeilijk het is de werkelijkheid te benaderen: met hetzelfde model en dezelfde bronnen van invoergegevens wordt de gemeten opbrengst het ene jaar goed gesimuleerd (2003), het andere jaar onderschat (2004) en het derde jaar overschat (2005).

Voor de jaren 1982 en 1983 van de cases Ruurlo bestaat een groter verschil tussen gemeten en berekend. Deze beide Ruurlo-cases zijn eerder gerapporteerd (Kroes et al., 2011) en de lage opbrengst in 1982 is eerder onderzocht (Zhiyi Zhou, 2013). De laatste heeft voorgesteld andere onderrandvoorwaarden en een andere droogtestress-parameterset te gebruiken (dat is in deze studie niet gebeurd). Omdat geen waterbalanstermen zijn gemeten kan geen uitspraak worden gedaan over de modelprestatie voor de waterhuishouding (bijlage 7). Omdat, met eenzelfde parameterisatie van de droogtestressfunctie, voor het droge jaar van 2003 voor Zegveld wel een duidelijke reductie in de gewasopbrengst wordt berekend (Figuur 4.2c), is er geen aanleiding om de parameterisatie van de droogtestressfunctie aan te passen.

Een waarschijnlijker oorzaak van het verschil tussen gemeten en berekend in 1982 is het koude begin van het groeiseizoen. Uit de waargenomen opbrengsten blijkt dat de sneden in beide Ruurlo cases in mei 1982 aanzienlijk minder opbrachten dan in andere jaren; de eerste gesimuleerde snede heeft in de praktijk niets opgebracht (fig. 4.2). Mogelijk komt de koude periode in het voorjaar van 1982 onvoldoende tot uitdrukking in de simulatieresultaten. Tegelijkertijd zien we in de metingen een afname van de opbrengst in aan het eind van de zomerperiode die niet volledig wordt gesimuleerd. De zomer van 1982 is in meteorologisch opzicht tamelijk droog geweest. De Rapportage Studiegroep Hupselsebeek (<http://publicaties.minienm.nl/download-bijlage/67071/475210-1.pdf>) zegt over 1982: "...Met name de droogteperiode van juli/aug, zorgde voor een flinke reductie van de actuele verdamping t.o.v. de potentiële verdamping. Daaraan voorafgaand was in april/mei al een periode van reductie opgetreden als gevolg van de trage start van de grasgroei in 1982. Oorzaak hiervan was een vorstperiode begin 1982 welke schade berokkende aan het wortelstelsel..."

1983 had een zeer nat voorjaar, met enkele dagen extreme neerslag. Met name in de maand mei viel veel regen, zonneschijn was er weinig en het was ook behoorlijk koel. De detailwatersystemen konden de neerslag niet altijd verwerken waardoor directe en indirecte schade in de landbouw is ontstaan (NB. indirecte schade wordt in deze fase van de Waterwijzer nog niet meegenomen). De zomer was vervolgens droog, op hogere zandgronden is dat niet gecompenseerd door de ondiepe grondwaterstanden aan het eind van het voorjaar, zodat de gewasopbrengst niet groot was. De gesimuleerde productie in het voorjaar is iets hoger dan gemeten, de cumulatieve hoeveelheden aan het eind van de zomer worden goed benaderd zodat de effecten van de droogte in de zomer zijn overschat .

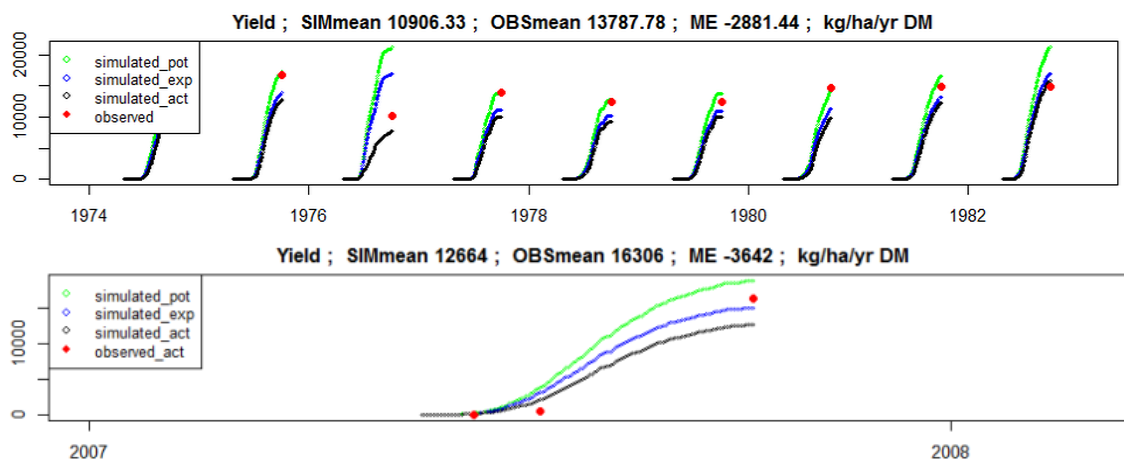
De (te geringe) transpiratiereductie voor de grasland Ruurlo cases wordt met name veroorzaakt door droogtestress (bijlage 6): de natschade bedraagt maximaal 1% waar de droogteschade maximaal 7% bedraagt in het jaar 2003. Voor Zegveld bedraagt de maximale jaarlijkse reductie door droogte 33% en door natschade 12%.

Het blijkt lastig voor grasland de variatie in veldomstandigheden exact met de modellen te simuleren. Met name het effect van koude/vorstperioden ontbreekt. De effecten van nat- en droogschade zijn in de rekenresultaten zichtbaar en worden zowel over- als onderschat. Het aantal beschikbare meetgegevens en uitgevoerde modelberekeningen is beperkt: om de evaluatie van Waterwijzer Landbouw te kunnen aanscherpen zijn meer meetgegevens nodig en zijn ook modelberekeningen voor langere perioden nodig.

4.3.3.2 SNIJMAÏS

Er zijn twee cases beschikbaar waar geen nutriëntenstress en stress door ziekten en plagen optreden: Cranendonck en Dijkgraaf. Voor Dijkgraaf zijn waarnemingen van de hydrologische toestand beschikbaar behorende bij slechts één waarneming van de totale jaaropbrengst. Voor snijmaïs is de gemeten en gesimuleerde totale jaarlijkse hoeveelheid bovengrondse droge stof die wordt geoogst vergeleken (figuur 4.3).

FIGUUR 4.3 MODELRESULTATEN EN METINGEN VAN GEWASOPBRENGSTEN VOOR SNIJMAÏS VOOR DE CASE CRANENDONCK 16 (BOVEN) EN DIJKGRAAF (ONDER). GROEN: BEREKENDE POTENTIELE OPBRENGST, BLAUW: DE BEREKENDE EXPLOITEERBARE OPBRENGST, ZWART: DE BEREKENDE ACTUELE OPBRENGST, ROOD: DE GEMETEN OPBRENGST.



Een visuele beoordeling van de opbrengsten laat voor de snijmaïs cases zien dat de gesimuleerde actuele opbrengsten voor snijmaïs meestal kleiner zijn dan de waarnemingen: SWAP-WOFOST onderschat de opbrengst. De voor Cranendonck gemeten fluctuaties tussen jaren worden door de SWAP-WOFOST resultaten gevolgd.

De berekende transpiratie-reductie bij snijmaïs wordt vrijwel volledig veroorzaakt door droogtestress (bijlage 6). De opbrengst in het extreem droge jaar 1976 wordt adequaat gesimuleerd. De gesimuleerde opbrengsten voor de jaren 1976, 1979 en 1982 komen redelijk overeen met de metingen. Vooral de kleine actuele opbrengst in 1976 is relevant omdat in dit extreem droge jaar grote droogteschade is opgetreden. Dat SWAP-WOFOST dit benadert geeft vertrouwen dat dit instrument in staat is reducties voor extreme situaties te simuleren.

Regelmatig blijken op Cranendonck (gesimuleerde) potentiële opbrengsten te zijn gemeten. Voor Cranendonck is dat zeer goed mogelijk omdat hier indertijd enorme mesthoeveelheden

zijn toegediend ('gedumpt') om te bepalen welke mestgiften snijmaïs kon verdragen zonder tot opbrengstverlies te leiden.

Het verschil tussen gemeten en berekende opbrengsten (figuur 4.6) kan mogelijk verkleind worden door gebruik van een betere parameterisering van de gewasparameters. Van de nu gebruikte dataset (Maize.w41; Van Heemst, 1988) is niet bekend hoe representatief deze is voor snijmaïs onder Nederlandse omstandigheden. Daarnaast zijn de grondwaterstanden voor Cranendonck niet goed gesimuleerd (bijlage 7). De berekende grondwaterstanden zijn gemiddeld ondieper dan de gemeten grondwaterstanden. Met name de grondwaterstanden in 1980, 1981 en 1982 worden niet goed beschreven door het model.

De actuele verdamping wordt voor Dijkgraaf redelijk goed voorspeld (bijlage 7). De dynamiek wordt goed beschreven ($r = 0.87$) en de uitvlakking van de variatie is beperkt. Het vochtgehalte in de bovengrond wordt ook redelijk voorspeld, al wordt de dynamiek iets minder goed ($r = 0.82$) gereproduceerd en is er ook wat meer uitvlakking (in de metingen zit meer variatie dan in de modelvoorspellingen). De systematische fout is zeer klein.

4.3.3.3 AARDAPPEL

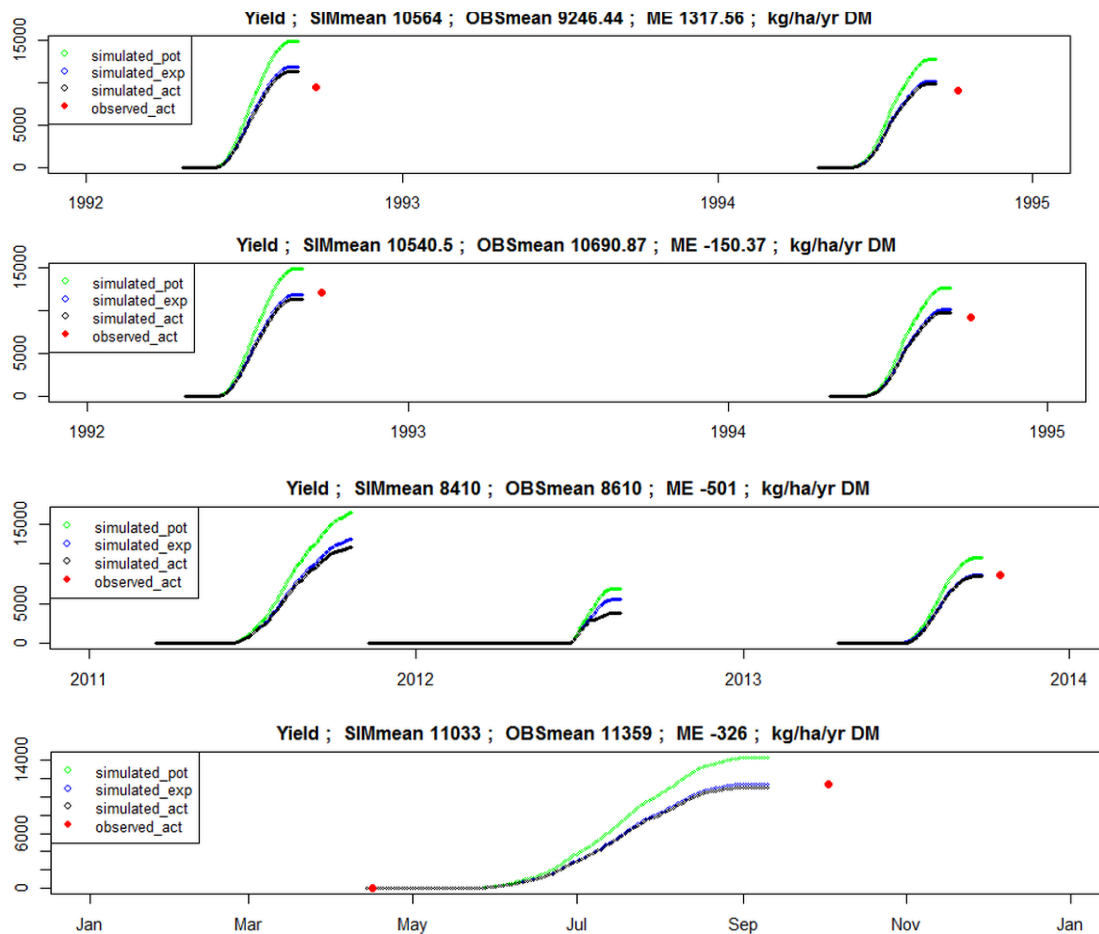
Voor aardappel is een vergelijking gemaakt tussen de gemeten en gesimuleerde totale jaarlijkse hoeveelheid aardappelknollen, uitgedrukt in kg droge stof. Figuur 4.4 laat de resultaten voor alle cases zien. Voor de cases Rusthoeve en Vredepeel is één waarneming beschikbaar, voor de beide cases Borgerswold werden alleen in 1992 en 1994 aardappelen geteeld (1993 suikerbiet).

Een visuele beoordeling van de opbrengsten laat voor de aardappel-cases zien dat de gesimuleerde opbrengsten voor aardappel goed overeen komen met de waarnemingen.

Voor Borgerswold en Vredepeel wordt geen transpiratie-reductie berekend. De transpiratie-reductie bij de Rusthoeve wordt vrijwel volledig veroorzaakt door natschade (bijlage 6).

Voor Borgerswold zijn geen hydrologische metingen beschikbaar waarmee de modelresultaten kunnen worden vergeleken. Voor Rusthoeve en Vredepeel zijn grondwaterstanden gemeten. Voor beide locaties komen de berekende grondwaterstanden goed overeen met metingen (bijlage 7). De dynamiek wordt goed beschreven (hoge correlatie tussen metingen en berekeningen), en er is weinig uitdemping (variatie in de modeluitkomsten wijkt niet veel af van de variatie in de meetreeks). Ook is de systematische fout beperkt.

FIGUUR 4.4 MODELRESULTATEN EN METINGEN VAN GEWASOPBRENGSTEN VOOR AARDAPPEL, VAN BOVEN NAAR BENEDEN: G) BORGERSWOLD3, H) BORGERSWOLD13, I) RUSTHOEVEB7, J) VREDEPEEL26. GROEN: BEREKENDE POTENTIELE OPBRENGST, BLAUW: DE BEREKENDE EXPLOITEERBARE OPBRENGST, ZWART: DE BEREKENDE ACTUELE OPBRENGST, ROOD: DE GEMETEN OPBRENGST.



4.3.4 MODELPRESTATIES

In bijlage 7 wordt de modelprestatie van SWAP-WOFOST vergeleken met die van SWAP. We willen daarbij de hypothese toetsen dat SWAP-WOFOST minder goed presteert dan SWAP. In het eerste deel van bijlage 7 worden de modelprestatie-maten en -figuren toegelicht. Het tweede deel geeft de modelprestaties voor individuele balanstermen voor alle cases. Dit deel kan worden gebruikt om te beoordelen of een specifieke balanstern goed wordt gemodelleerd, en of er verschillen zijn tussen SWAP en SWAP-WOFOST. Het derde deel geeft per case een integraal beeld over de modelprestatie voor alle balanstermen waarvoor meetgegevens beschikbaar zijn.

In het onderstaande worden de conclusies die op basis van bijlage 7 kunnen worden getrokken puntsgewijs samengevat.

4.3.4.1 MODELPRESTATIES VOOR INDIVIDUELE BALANSTERMEN

Metingen van de actuele evapotranspiratie (ETact) zijn alleen voor Dijkgraaf beschikbaar, en dan nog voor een zeer beperkte periode. De resultaten hebben daardoor geen algemene geldigheid. De resultaten van SWAP-WOFOST en SWAP zijn vergelijkbaar. De dynamiek wordt goed beschreven. Ook de variatie in de metingen wordt goed gereproduceerd.

Gemeten grondwaterstanden zijn beschikbaar voor vier cases. Cases die werken met een opgelegde grondwaterstand als onderrandvoorwaarde zijn buiten beschouwing gelaten. Modelle-

ring van de grondwaterstand gaat over het algemeen goed, behalve voor Cranendonk16. De dynamiek wordt hier niet goed gepakt. Bovendien wijken de berekeningen systematisch af van de metingen en wordt de variatie in de metingen flink overschat. De modelprestaties van SWAP-WOFOST en SWAP zijn vergelijkbaar (de groene en blauwe punten liggen dicht bij of zelfs op elkaar).

Drainagefluxmetingen zijn alleen beschikbaar voor RusthoeveB7. SWAP-WOFOST geeft vergelijkbare resultaten als SWAP.

Drukhoogtemetingen in de bovengrond zijn alleen beschikbaar voor Zegveld03. Lage drukhoogtemetingen zijn over het algemeen minder betrouwbaar, maar omdat dit neerwaartse pieken zijn hebben die wel een groot effect op de modelprestatieën. Daarom is tevens de pF-waarde uitgerekend. De modelprestaties van SWAP-WOFOST en SWAP zijn vergelijkbaar. Datzelfde geldt voor de vochtgehalten van de bovengrond.

4.3.4.2 INTEGRAAL BEELD VAN DE MODELPRESTATIE

Het derde deel van de bijlage geeft de modelprestatieën weer voor elke case afzonderlijk. Voor Ruurlo16 en Ruurlo48, Borgerswold03, en Borgerswold13 zijn onvoldoende meetgegevens beschikbaar om de modellen met elkaar te vergelijken. Voor Zegveld03 liggen de modelprestaties van SWAP-WOFOST en SWAP dicht bij elkaar. Alleen de drukhoogte wijkt af, om eerder genoemde redenen. Voor Cranendonk16 wordt de grondwaterstand niet goed gemodelleerd. Wel geven SWAP-WOFOST en SWAP vergelijkbare resultaten. Ook voor Dijkgraaf, RusthoeveB7, en Vredepeel26 geven de modellen vergelijkbare resultaten.

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat SWAP-WOFOST en SWAP over het algemeen vergelijkbare resultaten geven. De hypothese dat dat SWAP-WOFOST minder goed presteert dan SWAP kan op grond van de beschikbare meetgegevens worden verworpen.

Een integrale analyse van de balanst termen is niet mogelijk omdat meestal maar een beperkt aantal termen beschikbaar is.

Geconcludeerd wordt dat het gegeven de waargenomen variaties niet eenvoudig is de waargenomen gewasopbrengsten met simulatiemodellen te reproduceren maar dat het model-instrumentarium regelmatig aantoont het systeemgedrag en de absolute waarden van en de waterhuishouding en de gewasproductie te kunnen simuleren. Dat betekent dat reducties van gewasopbrengsten met SWAP-WOFOST systematisch kunnen worden verkend. Om de nauwkeurigheid van de berekende reducties te kunnen kwantificeren zijn aanvullende datasets nodig. Deze moeten zorgvuldig worden ontworpen en moeten zowel de waterhuishouding als de gewasgesteldheid regelmatig gedurende een langere periode monitoren. Om het gebruik van de bestaande cases te verbeteren kan de hydrologische modellering voor Cranendonck en Dijkgraaf worden verbeterd.

5

CONCLUSIES

INSTRUMENT:

- De gerealiseerde koppeling van SWAP en WOFOST binnen Waterwijzer Landbouw om gewasopbrengsten in te schatten is reproduceerbaar en verifieerbaar.
- Daarmee is SWAP-WOFOST een waardevol instrument voor het objectief bepalen van opbrengstschades en voor het sturen op waterhuishoudkundige maatregelen.
- De Penman-Monteith methode is voor Waterwijzer Landbouw geselecteerd als meest geschikte methode voor het berekenen van de dagelijkse potentiële verdamping.
- Voor de evaluatie van de Waterwijzer Landbouw zijn de resultaten van 25 cases (veldproeven) verzameld en in een database opgeslagen. 9 cases hebben een optimale nutriëntenvoorziening en zijn geschikt voor evaluatie van water gerelateerde stress. De overige 16 cases kunnen worden gebruikt in latere fasen van het project wanneer ook zout- en nutriëntenstress worden gemodelleerd.
- De Groenmonitor levert extra informatie over management-activiteiten voor zowel grasland als bouwland en kan zodra er resultaten van meer jaren beschikbaar zijn worden gebruikt om berekeningen met SWAP-WOFOST tbv de Waterwijzer Landbouw te evalueren en verbeteren.

RESULTATEN:

- De dynamiek van de, met SWAP-WOFOST berekende, opbrengstderving komt voor de case Cranendonck goed overeen met de dynamiek van de met SWAP berekende transpiratiereductie; voor 1976 (extreem droog) en 1981 worden reducties gesimuleerd waar de andere jaren potentieel transpireren en groeien.
- De met SWAP-WOFOST berekende relatieve reductie in gewasopbrengst is voor de case Cranendonck in 1976 groter dan de met SWAP berekende relatieve reductie in de transpiratie
- Het gekoppelde SWAP-WOFOST modelinstrument vormt een stabiel systeem voor snijmaïs en waarschijnlijk ook aardappel, voor grasland kan die conclusie nog niet worden getrokken.
- Vergeleken met de in de cases gemeten gewasopbrengsten zijn de resultaten voor aardappel goed, lijkt voor snijmaïs de gemeten opbrengst structureel te worden onderschat, en vertonen voor grasland de jaartotalen grotere verschillen voor de cases Ruurlo, de case Zegveld wordt beter gesimuleerd. Voor de cases Ruurlo wordt op jaarbasis een vrijwel constante opbrengst gesimuleerd. Wanneer de sneden van gras worden vergeleken lijken de resultaten beter te zijn, hier is de variatie voor Ruurlo juist groot.
- De berekeningen voor de cases Ruurlo16 en Ruurlo48 (met dezelfde invoergegevens, schematisering en modelcode) laten zien hoe moeilijk het is de waargenomen ruimtelijke variatie te simuleren.
- De resultaten voor Zegveld en Ruurlo demonstreren hoe moeilijk het is om de temporele variatie voor grasland te benaderen: met hetzelfde model wordt de gemeten opbrengst het ene jaar correct gesimuleerd, het andere jaar onderschat en het derde jaar overschat.

EVALUATIE:

- De combinatie SWAP-WOFOST heeft meerwaarde doordat de gewasgroei en transpiratie worden berekend in afhankelijkheid van weer- en bodemcondities. Ook is de combinatie SWAP-WOFOST conceptueel completer en biedt daardoor meer toekomstperspectief.
- SWAP-WOFOST is in staat de gewasopbrengsten van aardappel en snijmaïs realistisch te simuleren. Voor gras kan dat op basis van de beschikbare metingen niet worden aangetoond, in een volgende fase dient dit nader te worden onderbouwd.
- De beschikbare cases tonen aan dat SWAP-WOFOST (zonder kalibratie) zowel ten aanzien van het systeemgedrag (de dynamiek) als de voorspelde (absolute) waarden géén verslechtering vormt ten opzichte van de SWAP-berekeningen met een opgelegde gewasgroei.
- De waargenomen ruimtelijke variatie (beide cases Ruurlo) en temporele variatie (Zegveld en Ruurlo) in de gewasopbrengsten blijken niet eenvoudig met simulatiemodellen te reproduceren.
- Het niet exact bekend zijn van de lokale situatie, onnauwkeurigheden in de invoerparameters en/of randvoorwaarden, tekortkomingen in de modelconcepten (graslandmanagement, temperatuurcorrectie gewasgroei), beperkingen in de waarnemingen (onvoldoende en incomplete datasets) en de niet gesimuleerde invloeden in veldcondities maken het exact simuleren van praktijkwaarnemingen zowel theoretisch als in de praktijk onmogelijk.
- Ook management speelt een rol in de jaarlijkse fluctuaties van waargenomen gewasopbrengsten. Denk aan beregening, beweiding, maaien, gewaskeuze /zodesamenstelling, gevolgen van rotatie bij tijdelijk grasland etc. Daarom zullen in fase 3 de effecten van bedrijfsvoering en indirecte effecten worden gekwantificeerd.
- Om het gebruik van de bestaande cases te verbeteren kan de hydrologische modellering voor Cranendonck en Dijkgraaf worden verbeterd. De Ruurlo cases doen vermoeden dat de koude periode in het voorjaar van 1982 onvoldoende tot uitdrukking komt in de simulatieresultaten.
- Het aantal, voor evaluatie van water gerelateerde, datasets is klein en het aantal waarnemingen is ook nog eens klein. Om de nauwkeurigheid van de berekende reducties te kunnen kwantificeren zijn aanvullende data(sets) nodig.

LITERATUUR

Akkermans, W., te Roller, J. Boogaard, H., Wit, A. De, Wolf, J. & Hessel, R. (2008). CALPLAT : platform for calibrating CGMS; ASEMARS report 5.2.1.

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

Allen, R.G., L.S. Pereira, T.A. Howell, and M.E. Jensen, 2011. Evapotranspiration information reporting: 1. Factors governing accuracy. *Agricultural Water Management* 98, 899-920.

Ehlert, P.A.I., J. C. van Middelkoop, C. van der Salm & P.H.M. Dekker, 2008. Effecten van fosfaatoverschotten op gras- en bouwland op langere termijn. Stand van zaken 2007. Alterra rapport 1665.

Ashby, M., A.J. Dolman, P. Kabat, E.J. Moors, M.J. Ogink-Hendriks, 1996. SWAPS, version 1.0. Technical reference manual. DLO-Staring Centrum. Technical Document 42, Wageningen.

Ashby, M., 1999. Modelling the water and energy balances of Amazonian rainforest and pasture using Anglo-Brazilian Amazonian climate observation study data. *Agricultural and Forest Meteorology* 94, 79-101.

Bartholomeus, Ruud, Joop Kroes, Jan van Bakel, Mirjam Hack-ten Broeke, Dennis Walvoort en Flip Witte, 2013. Actualisatie schadefuncties landbouw; fase 1. Op weg naar een geactualiseerd en klimaatbestendig systeem van effect van waterbeheer op gewasopbrengst. Overzicht van doorgevoerde verbeteringen in fase 1 (september 2012 – april 2013). STOWA-rapport 2013-22.

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.

Bartholomeus, R., B. Voortman en J.P Witte, 2013. Metingen en proceskennis vereist voor nauwkeurige verdampingsberekening in grondwatermodellen. *Stromingen* 19, 37-52.

Bastiaanssen, W., & Roozkrans, H. (2003). Vlakdekkende actuele verdamping van Nederland operationeel beschikbaar. *Stromingen*, 1(4), 5–19.

Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P., & Allen, R. G. (2005). SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, (February), 85–93.

Bastiaanssen, W.G.M., Cheema, M.J.M., Immerzeel, W.W., Miltenburg, I.J., Pelgrum, H., 2012. Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. *Wat Resour Res*, 48(11): W11512.

Bertalanffy, L. von, 1968. General system theory: foundations, development, applications. New York, 289 p.

Beven, K.J. and Binley, A.M., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrological Processes*, 6, p.279–298

- Boheemen, P.J.M. van, 1981. Toename van de produktie van grasland bij verbetering van de watervoorziening. ICW-nota 1298. Wageningen.
- Boogaard, H. L., Wit, A. J. W. De, Roller, J. A. te, & Diepen, C. A. Van. (2011). User's guide for the WOFOST Control Center 1.8 and WOFOST 7.1.3 crop growth simulation model. Wageningen. Retrieved from <http://www.wofost.wur.nl>
- 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 Grondwaterbeheer, Utrecht.,
- Brus, D. J., Kempen, B. & Heuvelink, G. B. M. 2011. Sampling for validation of digital soil maps European Journal of Soil Science
- Breuer, L., K. Eckhardt, H.G. Frede, 2003. Plant parameters for models in temperate climates. Ecological modelling 169, 237-293.
- Costantini, E. A. C., F. Castelli, S.Raimondi, & P. Lorenzoni, 2002. Assessing Soil Moisture Regimes with Traditional and New Methods. Soil Science Society of America Journal 66:1889–1896
- Dam, J.C. van, J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk and C.A. van Diepen, 1997. Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Air-Plant environment. Report 71, Department Water Resources, Wageningen Agricultural University, Technical document 45, DLO Winand Staring Centre, Wageningen.
- De Willigen, P., Van Noordwijk, W., 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency, Agricultural University Wageningen, 282 pp.
- De Willigen, P., Schröder, J. J., & Rappoldt, C. A., 2002. *Opschaling van stikstofverliezen in de akkerbouw van percelen naar bedrijfsniveau*. Alterra-rapport 221. Wageningen.
- De Wit, C.T. (1958) Transpiration and crop yields; Agricultural Research Reports, 64.4. Pudoc, Wageningen, 88 pp.
- De Wit, A, Baruth, B., Boogaard, H., van Diepen, K., van Kraalingen, D., Micale, F., te Roller, J, Supit, I, van den Wijngaart, R. (2010). Using ERA-INTERIM for regional crop yield forecasting in Europe. Climate Research; Special 22 "Agriculture in a changing climate", 44(1), 41–53. doi:10.3354/cr00872
- De Wit, A. J. W., Van Diepen, C. A., & Kroes, J. G. (2005). Application of remote sensing data as input for the Wofost 7.1 and Swap 2.0 models. In Use and availability of meteorological information from different sources as input in agrometeorological models. COST718. Brussels. Retrieved from <http://agromet-cost.bo.ibimet.cnr.it>
- Deru, J., Eekeren, N.v., Boer, H.d., 2010. Beworteling van grasland- een literatuurstudie: Nutriëntenopname in relatie tot bewortelingsdiepte en-intensiteit; factoren en potentiële maatregelen die de beworteling beïnvloeden.
- Dijkstra, J.P., Y. Hofmeester, M.J.D. Hack-ten Broeke en F.G. Wijnands, 1996. Stikstofemissie naar het grondwater van geïntegreerde en gangbare bedrijfssystemen in de akkerbouw op de proefboerderijen Borgerswold en Vredepeel; Simulatie van de vocht- en nitraathuishouding op de proefboerderij Borgerswold voor de jaren 1990-1993. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 287.3
- Duineveld, M., 2008. Actual evapotranspiration of a pasture according to Penman-Monteith, Makkink and eddy covariance measurements. MSc thesis, Wageningen University.

- Droogers, P., & Bastiaanssen, W. (2000). Combining remote sensing and hydrological models to enhance spatial and temporal variability. In *Remote Sensing and Hydrology 2000* (Vol. 2000, pp. 574-579). Santa Fe, New Mexico, USA: IAHS.
- Droogers, P., 2009. Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer. STOWA rapport 2009-11, Utrecht.
- Efron, B. & Gong, G., 1983. A Leisurely Look at the Bootstrap, the Jackknife, and Cross-Validation *The American Statistician* 37: 36-48
- Ehlert, P., Pasterkamp, H., Brouwer, G., 2004. Fosfaatbehoefte van bloembollen: onderbouwing van de fosfaatbestedingsadviezen. Alterra.
- Ehlert, P.A.I., J. C. van Middelkoop, C. van der Salm & P.H.M. Dekker, 2008. Effecten van fosfaatoverschotten op gras- en bouwland op langere termijn. Stand van zaken 2007. Alterra rapport 1665
- Elbers, J. A., Moors, E. J., & Jacobs, C. M. J. (2010). Gemeten actuele verdamping voor twaalf locaties in Nederland. STOWA rapport nr 2010-36.
- Ershadi, A., M.F. McCabe, J.P. Evans, N.W. Chaney and E.F. Wood, 2014. Multi-site evaluation of terrestrial evaporation models using FLUXNET data. *Agricultural and Forest Meteorology* 187, 46-61.
- Farahani, H.J., T.A. Howell, W.J. Shuttleworth, and W.C. Bausch, 2007. Evapotranspiration: progress in measurement and modelling in agriculture. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50, 1627-1638.
- FAO. (2012). Crop yield response to water; paper 66. Rome.
- Feddes, R.A., 1987. Crop factors in relation to Makking reference crop evapotranspiration. In 'Evaporation and weather', TNO Committee on Hydrological Research, Proceedings and information no 39, p. 33-46.
- 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.
- Hack-ten Broeke, M.J.D. (2000). Nitrate leaching from dairy farming on sandy soils. Case studies for experimental farm De Marke. PhD thesis Wageningen.
- Hack-ten Broeke, M., Kroes, J., Hendriks, R., Bartholomeus, R., Bakel, J. van, & Hoving, I. (2013). *Actualisatie schadefuncties voor de landbouw, tussenfase 2A: plausibiliteitstoets SWAP en enkele verkennende berekeningen*. STOWA 2013-37 (pp. 1175-1176).
- Hendriks, R. F. A., Jacobs, C. M. J., Duyzer, J., Moors, E. J., Kroon, P. S., Veenendaal, E. M., & Kabat, P. (2011). Simulation of Daily Nitrous Oxide Emissions from Managed Peat Soils. *Vadose Zone Journal*, 10, 156-168. doi:10.2136/vzj2010.0029
- Hendriks, R.F.A. en J.J.H. van den Akker, 2012. Effecten van onderwaterdrains op de waterkwaliteit in veenweiden. Modelberekeningen met SWAP-ANIMO voor veenweide-eenheden naar veranderingen van de fosfor-, stikstof- en sulfaatbelasting van het oppervlaktewater. Wageningen, Alterra. Rapport 2354.

- Hoogewoud, J. C., G.F. Prinsen, J.C. Hunink, A.A. Veldhuizen, F.J.E. van der Bolt, en W.J. de Lange, 2013. Toetsingsrapportage NHI 3.0.
- Hoving, I.E., J. de Boer en J. Kanis, 2013. Schadeberekening inundatie op melkveebedrijven. Lelystad, Livestock Research van Wageningen UR. Rapport (in druk)
- Ines, A. V. M., Droogers, P., Makin, I. W., & Gupta, A. Das. (2001). Crop Growth and Soil Water Balance Water Modeling to Explore Water Management Options. Options. Bangkok.
- Iwama, K., 1998. Development of nodal and lateral roots in potato under field conditions. Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University= 北海道大學農學部紀要, 68(1): 33-44.
- Jacobs, C.M.J., and H.A.R. de Bruin, 1992. The sensitivity of regional transpiration to land-surface characteristics: significance of feedback. Journal of Climate 5, 683-698.
- Jacobs, C.M.J., and H.A.R. de Bruin, 1997. Predicting regional transpiration at elevated atmospheric CO₂: influence of the PBL – vegetation interaction. Journal of Applied Meteorology 36, 1663-1675
- Jensen, M.E., R.D. Burman and R.G. Allen, 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE manuals and reports on engineering practice 70, ASCE, New York. 332 pp.
- Jolliff, J. K., Kindle, J. C., Shulman, I., Penta, B., Friedrichs, M. A. M., Helber, R., Arnone, R. A., 2009. Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment. Journal of Marine Systems 76, 64–82.
- De Jong Van Lier, Q., Dam, J. C. Van, & Metselaar, K. (2009). Root Water Extraction under Combined Water and Osmotic Stress. Soil Sci. Soc. Am., 73(3), 862–875. doi:10.2136/sssaj2008.0157
- Kamble, B., & Irmak, A. (2008). Assimilating Remote Sensing-Based ET into SWAP Model for Improved Estimation of Hydrological Predictions. Paper 38. Civil Engineering Faculty Publications., 38. doi:10.1109/IGARSS.2008.4779530
- Kool, D., N. Agam, N. Lazarovitch, J.L. Heitman, T.J. Sauer and A. Ben-Gal, 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. Agricultural and Forest Meteorology 184, 56-70.
- Konikow, L. F. & Bredehoeft, J. D., 1992. Ground-water models cannot be validated. Advances in Water Resources 15, 75–83.
- Kroes, J. G., Dam, J. C. Van, Groenendijk, P., Hendriks, R. F. A., & Jacobs, C. M. J. (2009). SWAP version 3.2. Theory description and user manual. Update 02 : August 2009. Update (p. 284).
- Kroes, J. G. and I. Supit, 2011. Impact analysis of drought, water excess and salinity on grass production in The Netherlands using historical and future climate data. Agriculture, Ecosystems & Environment, 144(1), 370–381.
- Leistra, M. and J.J.T.I. Boesten, 2008. Movement of bromide-ion and carbofuran in the humic sandy soil of a potato field with ridges and furrows. Wageningen, Alterra. Rapport 1750.
- Leistra, M. and J.J.T.I. Boesten, 2010. Measurement and computation of movement of bromide ions and carbofuran in ridged humic-sandy soil. Archives of environmental contamination and toxicology, 59(1), 39–48.
- Livestock Research (2013). Handboek Melkveehouderij 2013. Handboek 26. Wageningen
- Maat, H.W. ter, et al., 2010. Simulating carbon exchange using a regional atmospheric model coupled to an advanced land-surface model. Biogeosciences 7, 2397-2417.

Middelkoop van J.C., C. van der Salm, D.J. den Boer, M. ter Horst, W.J. Chardon, R.F. Bakker, R.L.M. Schils, O.F. Schoumans, 2004. "Effecten van fosfaat- en stikstofoverschotten op grasland Veldonderzoek op vier locaties", 1997-2001 Praktijkrapport Rundvee 48, Praktijkonderzoek Veehouderij.

Moene, A.F., and J.C. van Dam, 2014. Transport in the Atmosphere-Vegetation-Soil Continuum. Cambridge University Press, New York.

Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3), 282-290.

Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., Belitz, K., 1994. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science* 263, 641-646.

Qin, R., Stamp, P., Richner, W., 2006. Impact of tillage on maize rooting in a Cambisol and Luvisol in Switzerland. *Soil and Tillage Research*, 85(1-2): 50-61.

Rawsthorne, D., Brodie, B., 1986. Relationship between root growth of potato, root diffusate production, and hatching of *Globodera rostochiensis*. *J Nematol*, 18(3): 379.

Roerink, G. ., Su, Z., & Menenti, M. (2000). S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2), 147-157. doi:10.1016/S1464-1909(99)00128-8

Salm, C. van der, A. van den Toorn, W.J. Chardon and G.F. Koopmans, 2012. Water and nutrient transport on a heavy clay soil in a fluvial plain in the Netherlands. *Journal of environmental quality*, 41(1), 229-41.

Schils, R. L. M., M. H. A. de Haan, J. G. A. Hemmer, A. van den Pol-van Dasselaar, J. A. de Boer, A. G. Evers, G. Holshof, J. C. van Middelkoop and R. L. G. Zom, 2007. DairyWise, A Whole-Farm Dairy Model. *Journal of Dairy Science* 90, 5334-5346.

Schipper, P. N. M., & Schans, M. L. van der. (2012). Eindrapportage praktijkproef Rusthoeve. Grontmij, 29-nov-2012.

Schröder, J.J., 1985. De invloed van grote giften runderdrijfmest op de groei, opbrengst en kwaliteit van snijmais en op de bodemvruchtbaarheid en waterverontreiniging; Maarheze (zandgrond) 1974-1982. Verslag nr. 31, PAGV, Lelystad

Schuermans, J.M., P.A. Troch, A.A. Veldhuizen, W.G.M. Bastiaanssen, M.F.P. Bierkens, 2003. Assimilation of remotely sensed latent heat flux in a distributed hydrological model. *Advances in Water Resources* 26: 151-159

Shuttleworth, W.J., 2006. Towards one-step estimation of crop water requirements. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 49, 925-935.

Singh, R., Kroes, J. G., Dam, J. C. Van, & Feddes, R. (2006). Distributed ecohydrological modeling to evaluate the performance of irrigation system in Sirsa district , India : I . Current water management and its productivity. *Journal of Hydrology*, 329, 692- 713. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.03.037

Singh, U. K., Ren, L., & Kang, S. (2010). Simulation of soil water in space and time using an agro-hydrological model and remote sensing techniques. *Agricultural Water Management*, 97(8), 1210-1220. doi:10.1016/j.agwat.2010.03.002

Stolk, P. C. and J.G. Kroes, 2012. Water en nutriënten gelimiteerde gewasopbrengst. Wageningen, Alterra. Rapport 2346.

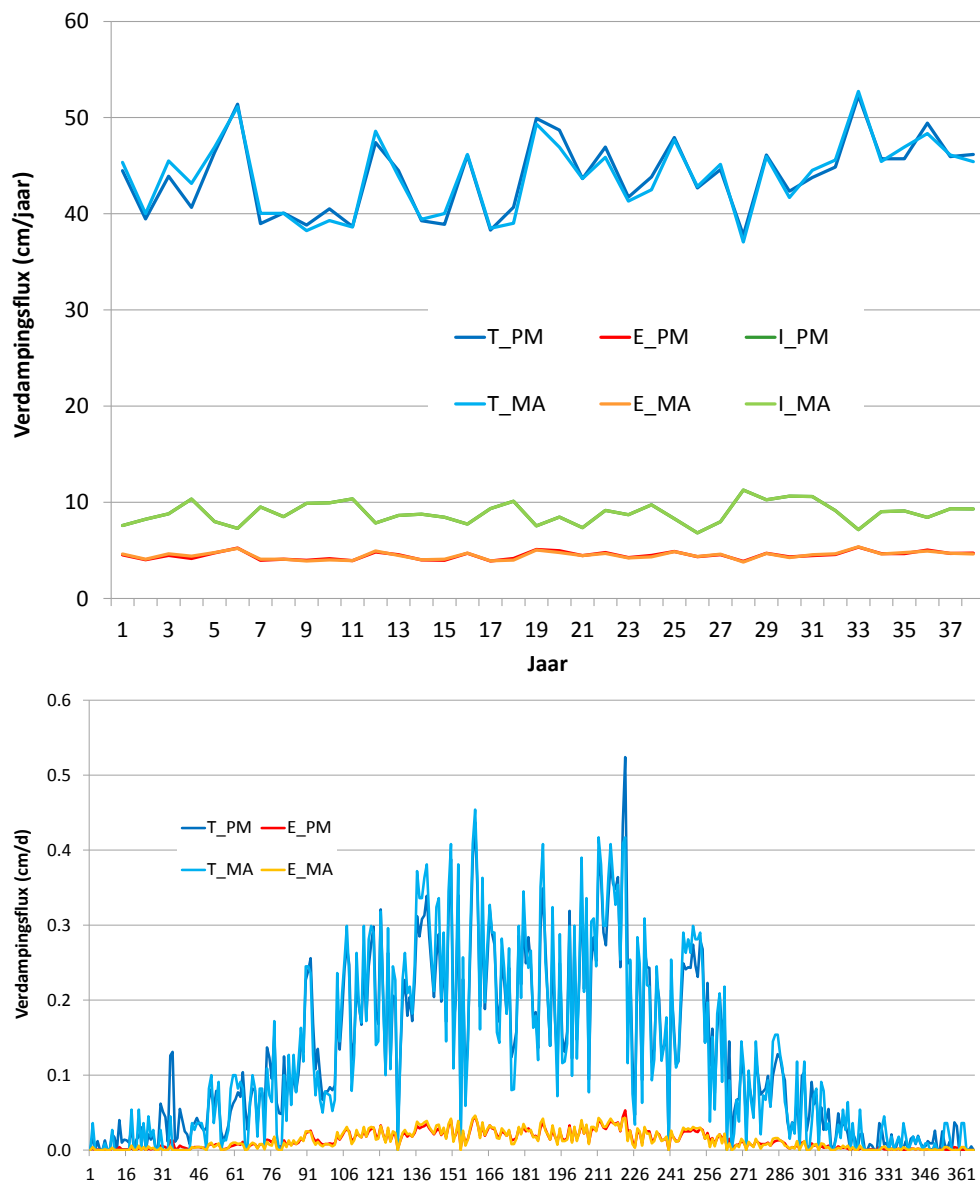
- STOWA, 2013. Deltaproof midterm review. Projectenoverzicht. Amersfoort, STOWA-Rapport-nummer 2013-05.
- Stuyt, L. C. P. M., 2013. Regelbare drainage als schakel in toekomstbestendig Waterbeheer. Wageningen, Alterra. Rapport 2370.
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes SEBS - The Surface Energy Balance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 85–100.
- Taylor, K. E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research* 106 (D7), 7183–7192.
- Tol, C. van der, 2000. Soil evaporation and plant transpiration as simulated with the FAO-56 method and the agrohydrological model SWAP. MSc thesis, Wageningen University.
- Van Bakel, P. J. T., Linderhof, V., Van T Klooster, C. E., Veldhuizen, A. A., Goense, D., Mulder, H. M., & Massop, H. T. L. (2009). Definitiestudie Agricom. Alterra rapport 1934. Wageningen.
- Van Bakel, J. van, & Eertwegh, G. van den. (2011). Nieuwe mogelijkheden voor herziening van de HELP-tabel. H2O, 8–9.
- Van Heemst, H.D.J. (1988). Plant data values required for simple crop growth simulation models: review and bibliography. Simulation Report CABO-TT nr. 17, Wageningen
- Van Ittersum, M.K. & Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research* 52: 197-208
- Van Ittersum, M.K., K G. Cassman, P. Grassini, J. Wolf, P. Tittonell, Z. Hochman, 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research* 143: 4–17
- Van Wart, J., Kersebaum, K. C., Peng, S., Milner, M., & Cassman, K. G. (2013). Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Research*, 143, 34–43. doi:10.1016/j.fcr.2012.11.018
- Vazifedoust, M., Van Dam, J., Feddes, R., & Feizi, M. (2008). Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agricultural Water Management*, 95(2), 89–102. doi:10.1016/j.agwat.2007.09.007
- Versteeg, R., Hakvoort, H., Bosch, S., & Kallen, M.-J. (2013). MeteoBase. Online Archief van neerslag- en verdampingsgegevens voor het waterbeheer. STOWA-Rapport 2013-02.
- Voorn, G.A.K. van & D.J.J. Walvoort, 2011. Evaluation of an evaluation list for model complexity. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-werkdocument 272
- Vos, J., Groenwold, J., 1986. Root growth of potato crops on a marine-clay soil. *Plant Soil*, 94(1): 17-33.
- Vos, J.A. de, Van Bakel, P.J.T., Hoving, I.E., Conijn, J.G., 2006. Waterpas-model: a predictive tool for water management, agriculture, and environment. *Agric. Water Manage.* 86, 187–195.

- Vos, J.A. de, P.J.T. van Bakel en I.E. Hoving, 2008. Waterpas nat- en droogteschadeberekeningen ten behoeve van landbouwkundige doelrealisatie. Wageningen, Alterra. Rapport 1653.
- Walsum, P.E.V. van, and I. Supit, 2012. Influence of ecohydrological feedbacks from simulated crop growth on integrated regional hydrologic simulations under climate scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 1577-1593.
- Walsum, P.E.V. van, en F.J.E. van der Bolt, 2013. Sensitivity of the Delta model to evapotranspiration. Exploring structural uncertainties due to evapotranspiration concepts. Alterra rapport 2481, Wageningen.
- Walsum, P.E.V. van, F.J.E. van der Bolt en A.A. Veldhuizen, 2013. Hoe klimaatrobuust is de gewasfactormethode van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium? *Stromingen* 19, 127-134.
- Walvoort, D.J.J., J. Roelsma, van Tol-Leenders, T.P., 2009. Validatie van modelsystemen voor het voorspellen van de oppervlaktewaterkwaliteit en -kwantiteit in het stroomgebied 'de Drentse Aa'. Wageningen, Alterra-Rapport 1951, Reeks Monitoring Stroomgebieden nr. 18-I.
- Waveren, R. H. van, Groot, S., Scholten, H., van Geer, F., Wösten, H., Koeze, R., Noort, J., 1999. Vloeiend modelleren in het waterbeheer: Handboek Good Modelling Practice. Tech. Rep. 99-05, STOWA/RWS-RIZA, Utrecht/Lelystad
- Werkgroep Normen voor de Voederverzorging, 1991. Normen voor de Voederverzorging. Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij en Paardenhouderij, Lelystad. Publicatie nr. 71.
- Wolf, J. and M. van Oijen, 2002. Modelling the dependence of European potato yields on changes in climate and CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology* 112, 217-231.
- Wolf, J., Mandryk, M., Kanellopoulos, A., Oort, P. van, Schaap, B., Reidsma, P., & Ittersum, M. van. (2010). *Methodologies for analyzing future farming systems and climate change impacts in Flevoland as applied within the AgriAdapt project*. Report no. 1. Wageningen. Retrieved from <http://www.klimaatlandbouw.wur.nl/NL/Projecten/Agri-ADAPT/>
- Wolf, J., Reidsma, P., Schaap, B., Mandryk, M., Kanellopoulos, A., Ewert, Oort, P. van, Angulo, C., Rumbaur, C., Lock, R., Enders, A., Adenauer, M., Heckeley, T., Rötter, R., Fronzek, S., Carter, T.R., Verhagen, A., Van Ittersum, M.K. (2012). Assessing the adaptive capacity of agriculture in the Netherlands to the impacts of climate change under different market and policy scenarios (AgriAdapt project). KvR report number KvR 059/12
- Wopereis, F.A., 1994. Invloed van bodemverdichting op de wortelontwikkeling van grasland op zandgrond. Rapport / DLO-Staring Centrum;260. DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- Wösten, Henk, Folkert de Vries, Tom Hoogland, Harry Massop, Ab Veldhuizen, Henk Vroon, Jan Wesseling, Joost Heijkers en Almer Bolman, 2013. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. Wageningen, Alterra. Rapport 2387.
- Wijk, A. L. M. van, Feddes, R. A., Wesseling, J. G., & Buitendijk, J. (1988). Effecten van grondsoort en ontwatering op de opbrengst van akkerbouwgewassen. Wageningen.
- Zhiyi Zhou. (2013). *Improving a grass yield model to assess impacts of climate change on grass yields around 2050 at plot level in the Dutch region Baakse Beek*. MSc thesis PPS-80436. Wageningen.

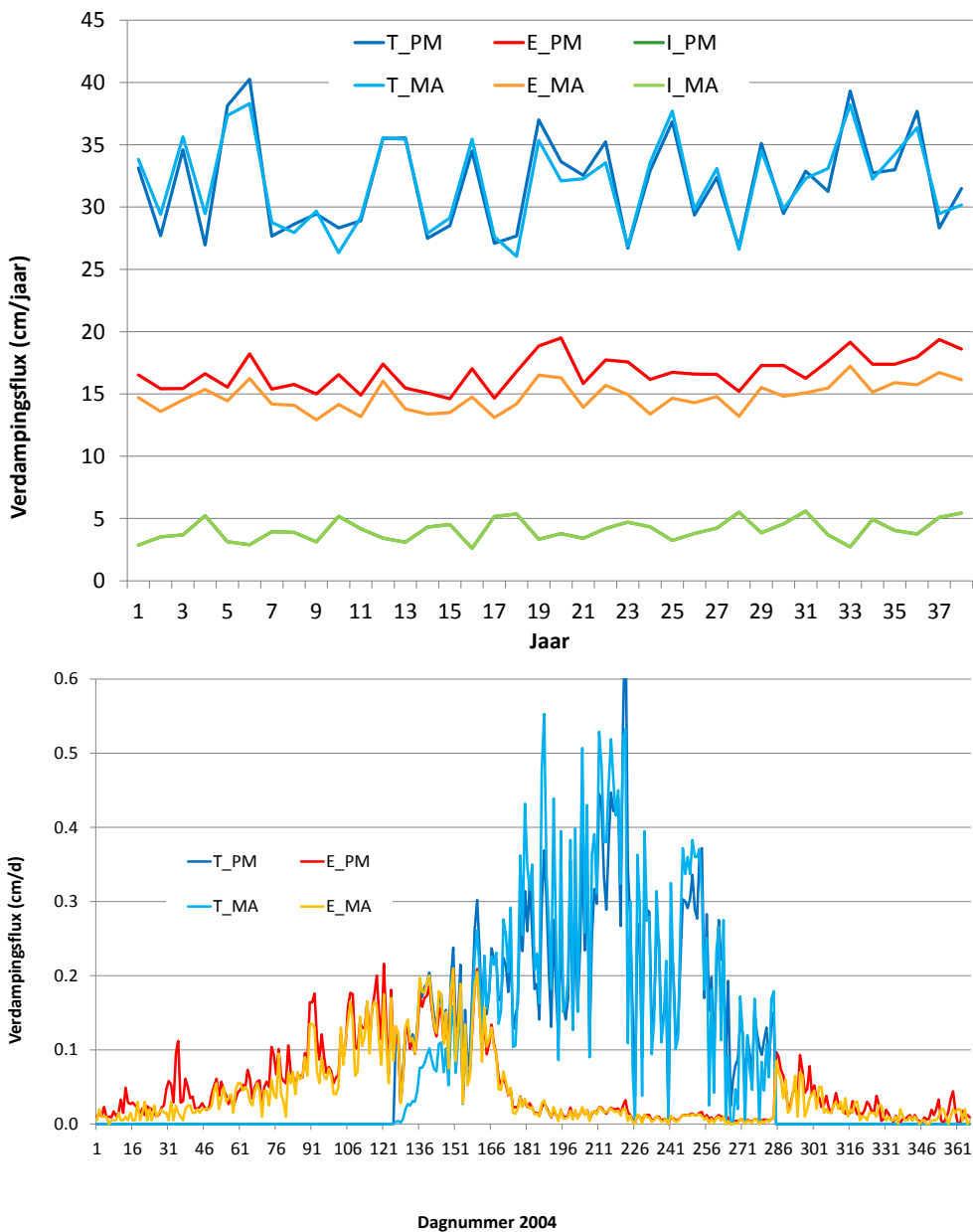
BIJLAGE 1

RESULTAAT KALIBRATIE GEWASWEERSTAND

FIGUUR 7 BEREKENDE VERDAMPINGSFLUXEN VOOR GRAS GEDURENDE 1971 - 2008 (BOVEN) EN JAAR 2004 (ONDER) MET PENMAN MONTEITH (PM; GEWASWEERSTAND = 133.9 S M^{-1}) EN MAKKINK (MA).
SYMBOLEN T = TRANSPIRATIE, E = EVAPORATIE, EN I = INTERCEPTIE.



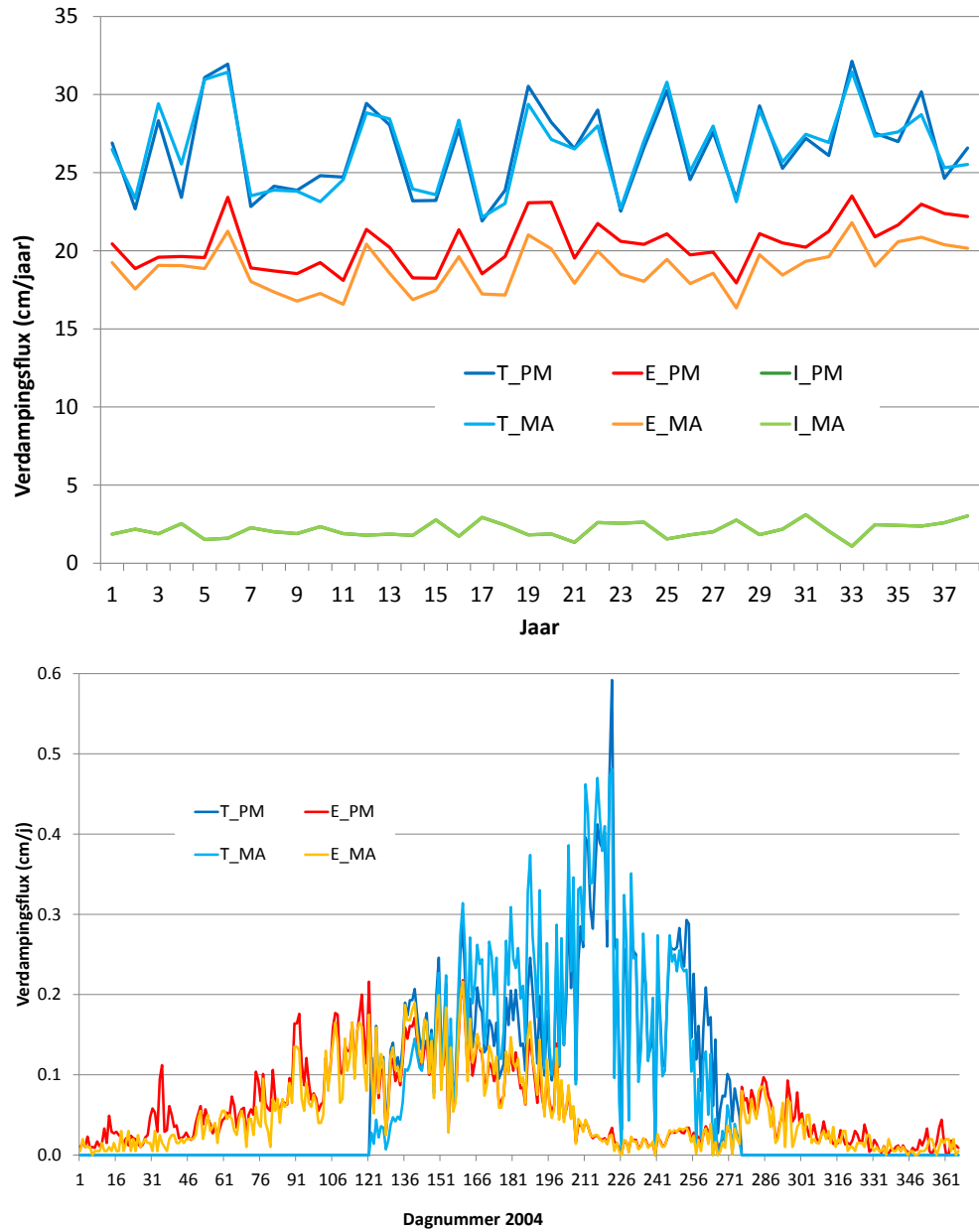
FIGUUR 8 BEREKENDE VERDAMPINGSFLUXEN VOOR SNIJMAÏS GEDURENDE 1971 - 2008 (BOVEN) EN JAAR 2004 (ONDER) MET PENMAN MONTEITH (PM; GEWASWEERSTAND = 131.0 S M⁻¹) EN MAKKINK (MA).
 SYMBOLEN T = TRANSPIRATIE, E = EVAPORATIE, EN I = INTERCEPTIE.



FIGUUR 9

BEREKENDE VERDAMPINGSFLUXEN VOOR AARDAPPELEN GEDURENDE 1971 - 2008 (BOVEN) EN JAAR 2004 (ONDER) MET PENMAN MONTEITH (PM); GEWASWEERSTAND = 146.5 S M^{-1} EN MAKKINK (MA).

SYMBOLEN T = TRANSPIRATIE, E = EVAPORATIE, EN I = INTERCEPTIE.



BIJLAGE 2

DISCUSSIONOTITIE PARAMETERISATIE, KALIBRATIE, VALIDATIE VAN HET MODELSYSTEEM SWAP-WOFOST

21-01-2014

Dennis Walvoort
Joop Kroes
Ruud Bartholomeus
Mirjam Hack-ten Broeke

INLEIDING

Deze discussienotitie is een tussenproduct van het project 'actualisatie schadefuncties landbouw'. Daarom wordt hier eerst kort ingegaan op dat totale project. Op dit moment (december 2013/januari 2014) zijn we bezig met fase 2 van het project.

Project Actualisatie Schadefuncties Landbouw

Het doel van het project 'actualisatie schadefuncties landbouw' is een uniform en breed gedragen systeem voor het bepalen van (klimaatbestendige) relaties tussen waterhuishoudkundige condities en gewasopbrengsten, ter vervanging van (op termijn) de huidige beschikbare systemen (STOWA, 2013).

Om dit doel te bereiken zijn meerdere fases afgesproken. In fase 1 is toegewerkt naar een operationeel instrument om directe droogteschade, natschade en zoutschade te berekenen. Dit is gebeurd voor gras en aardappel en de berekeningen resulteren in een effect op de gewasverdamping. Op basis van het model SWAP met nieuwe modules is een concept-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 complexe procesmodellen.

Fase 2 van het project moet resulteren in een instrument dat niet alleen verdampingsreductie, maar juist ook de gewasopbrengst-reductie kan berekenen. In eerste instantie wordt dit uitgewerkt voor gras, aardappel en snijmais. Bij simulatiemodellen is het altijd van groot belang om de resultaten te valideren aan de hand van nog niet eerder (bijvoorbeeld voor kalibratie) gebruikte meetgegevens. Met behulp van dit gevalideerde instrument zullen metarelaties worden afgeleid voor alle bodemtypes en de genoemde gewassen. Tevens zal voor de melkveehouderij een module worden opgeleverd waarmee bedrijfsvoering kan worden doorgekeurd om te komen tot berekende effecten op bedrijfseconomie. Ook is het een doel van deze tweede fase om de eerste kwantificering van indirecte effecten (voor grasland) aan het systeem te koppelen.

In de fasen hierna is nog een parameterisatie voor andere gangbare gewassen nodig evenals een definitieve module voor het mee-berekenen van indirecte schade bij al deze gewassen en gewasrotaties. Het instrumentarium moet ook uitgebreid getoetst worden aan proef- en praktijkgegevens. Uiteindelijk moet het project resulteren in een online tool of wellicht een tool die kan worden gedownload voor gebruikers (waterschappen, Rijkswaterstaat, drinkwaterbedrijven etc.). Er is daarnaast behoefte aan een aanvullende zoutschademodule. Voor delen van Nederland met zoute/brakke kwel is reduceren van zoutschade namelijk minstens zo belangrijk als het reduceren van droogte- en natschade. De afweging tussen droogte- en zoutschade kan met de huidige HELP-tabel niet worden gemaakt omdat zoutschade hierin niet is meegenomen. Koppeling met remote sensingbeelden voor toetsing en voor actualisering van berekening (zie bijvoorbeeld Groenmonitor <http://www.geodata.alterra.nl/nsdbrowser/>) en <http://www.meteobase.nl/>) is eveneens een regelmatig geuite wens.

Het eindresultaat van (de onderhavige) fase 2 van 'actualisatie schadefuncties landbouw' bestempelen wij als: van SWAP voor directe effecten (verdampingsreductie) naar een aanzet voor de Waterwijzer Landbouw. Deze Waterwijzer Landbouw zal uiteindelijk in de plaats komen van de HELP- en TCGB-tabellen (en Agricom). De Waterwijzer Landbouw is de overkoepelende naam voor een aantal modelinstrumenten en de berekeningen met die instrumenten, waarvan in fase 2 in ieder geval een operationeel SWAP-WOFOST zal worden gerealiseerd. Dit maakt het mogelijk om voor de melkveehouderij landbouwschade te berekenen als gevolg van droogte, zuurstofstress of zoutschade in de vorm van gewasopbrengstdepressie.

Waarom parameterisatie en toetsing?

In het projectplan 'Actualisatie schadefuncties landbouw, fase 2, Naar een Waterwijzer Landbouw' wordt dus voorgesteld om gewasschade te berekenen op basis van een koppeling tussen het agrohydrologische rekenmodel SWAP en het gewasgroeimodel WOFOST. Dit maakt het in principe mogelijk om rechtstreeks gewasopbrengstreducties te berekenen. In fase 1 van het project is alleen met SWAP gerekend en konden alleen gewasverdampingsreducties berekend worden (Bartholomeus et al., 2013). Als resultaat van fase 1 is ook een doorkijkje naar de volgende fasen opgeleverd met nadruk op nut en noodzaak van berekeningen van gewasopbrengst, bedrijfseconomie en indirecte schade-effecten.

Geavanceerde gewasgroeimodellen zoals WOFOST zijn in staat om gewasopbrengsten te simuleren. Uit een onderzoek op Europese schaal met WOFOST is gebleken dat actuele opbrengsten voor 9 van de 11 gewassen overeenkomen met de statistieken in Duitsland. In kleinere landen zoals Nederland is dit lastiger om vast te stellen vanwege weinig ruimtelijke verschillen (De Wit et al., 2010).

Bij de koppeling tussen een hydrologisch model en een gewasgroeimodel waarbij de waterbalans centraal staat is het van belang om een actuele opbrengst te kunnen simuleren. Bij een niet-realistische gewasgroei zal immers ook de transpiratie niet realistisch zijn waardoor de waterbalans uit balans raakt en de meerwaarde van dynamische gewasgroei teniet wordt gedaan. Het is daarom van groot belang om voorzichtig te parameteriseren en te toetsen op verschillende schaalniveaus teneinde inzicht en vertrouwen in de gekoppelde aanpak te krijgen en te behouden.

Het is belangrijk dat het modelsysteem SWAP-WOFOST resultaten oplevert die voldoende betrouwbaar zijn. In het projectplan is opgenomen dat we daarom extra aandacht zullen besteden aan parameterisatie, kalibratie en validatie en dat ook met de begeleidingsgroep te bespreken. Deze notitie is daarvoor bedoeld.

In november 2013 heeft een aantal interne en externe deskundigen (de expertgroep) op het

gebied van gewasgroeimodellering, (agro)hydrologie, en/of modelanalyse hierover met elkaar van gedachten gewisseld. Het ging daarbij met name over de parameterisatie, de kalibratie en de validatie van SWAP-WOFOST en het gebruik van remote sensing gegevens hierbij. Deze discussienotitie is grotendeels gebaseerd op de uitkomsten van deze bijeenkomst.

Hoe wordt gewasschade uitgedrukt?

Om de discussie efficiënt te laten verlopen, beginnen we met het geven van een aantal definities. Het modelsysteem SWAP-WOFOST zal worden gebruikt om opbrengstverschillen van gewassen te berekenen. Het opbrengstverschil kan op meerdere manieren worden gedefinieerd:

- 1 als het verschil tussen de potentiële en actuele gewastranspiratie
- 2 als het verschil tussen de potentiële en actuele gewasopbrengst
- 3 als het verschil tussen de exploiteerbare en actuele gewasopbrengst

Hierbij worden verschillen in opbrengst gebruikt als maat voor de opbrengstderving. Dit in tegenstelling tot het veel gebruikte begrip relatieve opbrengsten ofwel de ratio tussen actuele en potentiële gewasopbrengst. Deze relatieve opbrengst is beter te simuleren omdat de onnauwkeurigheden in de teller en de noemer tegen elkaar weg kunnen vallen. Voor waterbalansstudies is dat niet mogelijk omdat een onjuiste actuele gewasopbrengst zich rechtstreeks vertaalt in afwijkingen in de waterbalans.

In fase 1 van het project is het verschil tussen de actuele en potentiële gewastranspiratie gebruikt als benadering voor gewasopbrengstreductie (volgens De Wit, 1958). De relatie tussen gewastranspiratie en gewasopbrengst is echter niet altijd lineair. In plaats van met een lineair verband, zijn ook andere verbanden gebruikt. Zo zijn de metarelaties voor grasland in de HELP- en TCGB-tabellen gebaseerd op een niet-lineair verband tussen opbrengst en transpiratie. De methodiek staat summier vermeld in Bouwmans (1990) en hanteert rekenregels die zijn gebaseerd op historische beregeningsexperimenten (Van Boheemen, 1981). Deze stelde destijds vast dat “de verhoging van de grasproductie die optreedt bij een toename van de actuele evapotranspiratie, groter is naarmate de potentiële productie op een hoger niveau ligt”. Dit resulteerde in rekenregels voor TCGB en HELP die er voor zorgen dat bij hogere opbrengsten elke millimeter water efficiënter wordt benut dan bij lagere opbrengsten.

Omdat de relatie tussen gewastranspiratie en gewasopbrengst niet eenduidig is, heeft het de voorkeur om rechtstreeks de reductie in gewasopbrengst te berekenen. Dit kan door gebruik te maken van het verschil tussen de actuele en potentiële gewasopbrengst. Potentiële gewasopbrengst is de opbrengst van een gewas waarvan de groei niet door water en nutriënten is gelimiteerd en ziekten en plagen onder controle zijn (Van Ittersum & Rabbinge, 1997; Van Ittersum et al., 2013). Potentiële opbrengst is dus onafhankelijk van de bodemgesteldheid. Actuele gewasopbrengst is de gewasopbrengst van een gewas die op het veld wordt gerealiseerd.

Gewasopbrengst kan worden uitgedrukt als totale biomassa of als oogstbaar product. Volgens de expertgroep gaat het modelleren van de totale biomassa beter dan dat van het oogstbaar product. Lastiger wordt het wanneer ook de kwaliteit van het product moet worden gekwantificeerd. Denk bijvoorbeeld aan de voederwaarde van gras of het eiwitgehalte van tarwe. Het verdient daarom aanbeveling om zowel totale biomassa als oogstbaar product te berekenen, conform de aanbeveling van de FAO (FAO, 2012).

De potentiële opbrengst wordt in de praktijk zelden bereikt. Dat komt door de afvlakking van de opbrengst als functie van de nutriëntengift bij hogere opbrengsten. Het is daarom economisch gezien niet rendabel om de potentiële opbrengst na te streven omdat de meeropbrengst gering is in relatie tot de extra kosten die moeten worden gemaakt om de bedrijfsvoering nog verder te optimaliseren. Men maakt daarom veelal gebruik van de exploitierbare opbrengst (Van Ittersum et al., 2013).

De exploitierbare opbrengst is daarbij de potentiële opbrengst verminderd met onvermijdelijke verliezen. Deze onvermijdelijke verliezen worden veroorzaakt door regelgeving en suboptimaal management. Door regelgeving, zoals beperking in mest-uitrijdstip, nutriëntendosering en toepassing van gewasbeschermingsmiddelen, wordt geen optimale opbrengst gehaald. Daarnaast zal een boer een financiële afweging maken om een optimale ROI (ReturnOnInvestment) te behalen, ook dit resulteert in suboptimaal management en dus onvermijdbare verliezen. De onvermijdbare verliezen kunnen in principe worden berekend; dit blijkt echter lastig en voorsnog wordt voorgesteld om eenvoudige factoren te hanteren analoog aan Van Ittersum et al. (2013).

Het opbrengstverschil wordt nu gedefinieerd als het verschil tussen exploitierbare en actuele opbrengst. Onder exploitierbare opbrengst wordt de maximale opbrengst verstaan die onder gegeven klimatologische-en bodemkundige condities maximaal kan worden gehaald. Deze waarde kan, voor Nederlandse omstandigheden, worden berekend op basis van langjarige statistieken, aangevuld met modelberekeningen voor zover statistieken ontoereikend zijn. Voor het bepalen van de actuele opbrengst zal het nodig zijn om een managementfactor te introduceren, analoog aan Kroes and Supit (2011) waarmee de (voorsnog) onberekenbare verliezen worden gekwantificeerd. Kalibratie blijft daarmee een essentieel onderdeel van elke toepassing.

Conclusie: Voorgesteld wordt om het verschil tussen exploitierbare en actuele opbrengst als maat voor de opbrengstderving te gebruiken. We berekenen en presenteren minimaal drie opbrengsten: potentieel, exploitierbaar, actueel. Voorts berekenen we de totale biomassa en de hoeveelheid geoogst product.

PARAMETERISATIE VAN SWAP-WOFOST

Om gewasopbrengsten te kunnen berekenen moet SWAP-WOFOST worden gevoed met de juiste parameters en invoergegevens. Het modelsysteem heeft hiervoor enerzijds sturende (*forcing*) variabelen nodig, zoals meteorologische tijdreeksen, en anderzijds bodem- en gewasspecifieke parameters die tijdens een simulatie worden verondersteld constant te zijn. Belangrijk bij het parameteriseren van modellen is dat de nauwkeurigheid van de voorspellingen toereikend is (bijvoorbeeld, maximaal 25% verschil tussen berekende en gemeten opbrengst) en dat de beschikbare hoeveelheid gegevens voor het parameteriseren van het model in evenwicht is met de complexiteit van het model (Van Voorn & Walvoort, 2011).

Tijdreeksen van sturende variabelen zijn in Nederland meestal wel beschikbaar. Voor gewasparameters zoals temperatuursom in relatie tot stadia van gewasontwikkeling (fenologieparameters), *leaf life span*, *light use efficiency* en *partitioning* is dat echter minder vanzelfsprekend. Echter, diverse toepassingen van WOFOST hebben datasets opgeleverd met een bijbehorende parameterisatie (zie o.m. Wolf et al., 2010, Wolf et al., 2012). Het betreft procesparameters die groei en partitioning aansturen. De expertgroep raadt nagenoeg unaniem aan om voor parameterisatie gebruik te maken van de bekende parametersets en experimenten. Deze sets zijn

in het verleden met de nodige zorg en kennis samengesteld. Wel zullen de parameterwaarden worden gecontroleerd en in beperkte mate worden gekalibreerd (zie hoofdstuk 4).

Voor de fenologische parameterisatie (met name oogst en mogelijk opkomst) zal zo veel mogelijk gebruik gemaakt worden van satellietdata (bijvoorbeeld Groenmonitor <http://www.geodata.alterra.nl/nsdbrowser>).

KALIBRATIE VAN SWAP-WOFOST

Bij kalibratie worden modelparameters zodanig afgesteld dat een bepaald doel wordt bereikt. Dit doel wordt bij voorkeur geformaliseerd in de vorm van een zogenaamde doelfunctie (Eng.: *objective function*). Een doelfunctie voor SWAP-WOFOST kan zijn de minimalisatie van het absolute verschil tussen de gemeten en de berekende gewasopbrengst. Naast een doelfunctie zijn bij kalibratie dus ook waarnemingen nodig.

De doelfunctie heeft één of meerdere modelparameters als argument. Door deze modelparameters te wijzigen verandert de waarde van de doelfunctie. In het geval van bovenstaande doelfunctie moeten de modelparameters zodanig worden aangepast dat de doelfunctie wordt geminimaliseerd.

Niet elke parameter is geschikt om te kalibreren. In de eerste plaats moet een model gevoelig zijn voor een parameter. Het is namelijk niet zo zinvol om een parameter te kalibreren als het model daar niet of nauwelijks op reageert. De gevoeligheid van een model voor een parameter kan worden bepaald met behulp van een gevoeligheidsanalyse. Het model moet niet alleen gevoelig zijn voor een bepaalde parameter, de waarde van de betreffende parameter moet ook onvoldoende goed bekend zijn. Parameters die je nauwkeurig kunt meten moeten niet worden gekalibreerd. Anders loopt men het risico dat de parameter een onrealistische waarde krijgt doordat gecompenseerd wordt voor fouten elders in de parameterisatie of in de modelstructuur. In een dergelijk geval doet kalibratie eerder slecht dan goed.

Naast een doelfunctie, waarnemingen en parameters zijn randvoorwaarden (*constraints*) van belang bij kalibratie. Randvoorwaarden geven bijvoorbeeld aan binnen welke grenzen een parameter mag worden gevarieerd. Dit kunnen fysische grenzen zijn, maar ook grenzen gebaseerd op voorkennis. Bij het modelsysteem SWAP-WOFOST wordt aanbevolen om niet alleen randvoorwaarden op te leggen aan de parameters, maar ook aan balanst termen. Anders is het denkbaar dat het model de gewasopbrengst redelijk kan simuleren, maar dat dit wel gepaard gaat met onrealistische waterbalansen. Dit gaat ten koste van de toepasbaarheid van en het vertrouwen in het model.

Bij het modelsysteem SWAP-WOFOST streven we in dit project dus niet één (*single objective*), maar meerdere doelen (*multi-objective*) na. Een meervoudige doelfunctie kan worden gevormd als een gewogen combinatie van afzonderlijke doelfuncties. De modelleur moet dan gewichten toekennen aan elk van de afzonderlijke doelfuncties. Voor het kalibreren van modelsystemen als SWAP-WOFOST wordt bij voorkeur een semi-automatische methode toegepast. Methodes die resulteren in een enkele 'optimale' set parameters moeten worden gewantrouwd. Een modelleur die ooit handmatig een model heeft proberen te kalibreren zal beamen dat in de buurt van het optimum verschillende parametersets voorkomen die ruwweg dezelfde resultaten opleveren. Dit verschijnsel wordt aangeduid met het begrip equifinaliteit (Bertalanffy, 1968; Beven & Binley, 1992). Zoals gezegd moet een optimalisatiemethode die een 'optimale' parameterset geeft worden gewantrouwd. De kalibratie is immers altijd gebaseerd op een

geringe dataset en kan daardoor nooit exact zijn. Bij een parameter set hoort dus ook altijd informatie over de betrouwbaarheid daarvan. In de praktijk worden parameters daarom vaak voorzien van standaardfouten of betrouwbaarheidsintervallen. Deze geven echter maar een klein deel van de benodigde informatie. Wat we bij voorkeur willen is informatie over de samenhang tussen de parameters, zoals gegeven wordt door de multivariate kansverdeling (*joint distribution*) van de parameters.

SWAP en WOFOST zijn in het verleden als afzonderlijke modellen onder verschillende condities en voor verschillende gewassen gekalibreerd. Dat wil echter niet zeggen dat we deze parametersets ook direct mogen gebruiken voor de *modelkoppeling* SWAP-WOFOST. Een (beperkte) vorm van kalibratie zal daarom noodzakelijk zijn. De beschikbare parametersets kunnen daarvoor als uitgangspunt worden gebruikt.

SWAP-WOFOST kan gezien worden als een relatief complex model. Veel parameters voldoen aan bovengenoemde criteria om als kandidaat voor kalibratie te worden geselecteerd. Er zijn veel knoppen waaraan kan worden gedraaid. Hierdoor is het niet ondenkbaar dat de gewasopbrengst naar tevredenheid kan worden gesimuleerd, maar dat de waterbalanstermen dubieus zijn. Het is daarom van groot belang dat beide aspecten expliciet bij de kalibratie worden meegenomen. Het is ook belangrijk om vast te stellen welke data gebruikt worden voor welke fase (parameterisatie, kalibratie, validatie).

Mogelijke datasets van veldexperimenten voor gras zijn:

- recent veenweide-onderzoek Zegveld (onderwaterdrainage-onderzoek) (Hendriks et al., 2012)
- Ruurlo, Zegveld, Cranendonck (Kroes and Supit, 2011)
- DOVE projecten (Waardenburg: Van der Salm et al., 2012 , mogelijk ook Vlietpolder en nog een locatie op zandgrond) (Van der Salm, mond. med.)
- lange termijn P-proeven grasland (Zegveld, Waiboerhoeve, Cranendonck en Heino) (Middelkoop et al., 2004; Ehlert et al. 2008)
- De Marke, bedrijfssystemenonderzoek met hydrologie en gewasopbrengst voor gras en snijmaïs

Mogelijke gegevens van veldexperimenten voor aardappel:

- Ospel, combinatie met regelbare drainage (Stuyt, 2013)
- Vredepeel, combinatie met nutriënten (Stolk en Kroes, 2012)
- Borgerswold, combinatie met nutriënten (Dijkstra et al., 1996)
- Dundee (Wolf en Van Oijen, 2002)
- Roswinkel, combinatie met bromide en carbofuran (Leistra en Boesten, 2008; 2010)

Voor het toetsen van zoutschade betreft het mogelijk gegevens van:

- Rusthoeve, combinatie met klimaatadaptieve drainage
- aansluiting zoeken bij andere experimenten (zoals: www.ecoboeren.com en <http://www.ziltproefbedrijf.nl/>)

De experimentele gegevens die zijn genoemd kunnen voor zover mogelijk worden gebruikt voor kalibratie of toetsing op perceelschaal. Er zal nog gezocht worden naar bruikbare experimentele data voor snijmaïs (o.a. ook beschikbaar op proefbedrijf De Marke). Bruikbare datasets bevatten gegevens over gewasgroei én over hydrologie en bodem. Merk op dat niet elke dataset geschikt is voor het kalibreren van actuele opbrengsten. Een gewasproef onder opti-

male omstandigheden resulteert in een potentiële opbrengst en resultaten van een veldproef liggen doorgaans lager dan de potentiële opbrengst.

SWAP-WOFOST zal worden getoetst voor gras, aardappel en snijmaïs onder zoveel mogelijk verschillende bodemkundige, hydrologische en meteorologische omstandigheden. We willen hiervoor tevens aansluiting zoeken bij beschikbare remote sensingbeelden, bij resultaten van projecten die zijn uitgevoerd in relatie tot klimaatverandering (veelal gemeten verdamping, gewasopbrengst, CO₂-gehalte) en bij het internationaal netwerk van gewasonderzoekers (zoals www.agmip.org). Deze toetsmogelijkheden hebben betrekking op onderdelen van het rekeninstrumentarium. Hierbij zullen we aansluiting zoeken bij lopende activiteiten in relatie tot remote sensing zoals de Groenmonitor (<http://www.geodata.alterra.nl/nsdbrowser>), een ontsluiting van het Nationale Satelliet Dataportaal ter voorbereiding op de vrij toegankelijke Europese Sentinel satellietbeelden die in 2014 beschikbaar komen en SAT-WATER (<http://hydromedah.nl/satwater/>).

Wat bij het gebruik van satellietgegevens wel altijd moet worden gerealiseerd is dat deze gegevens niet hard zijn, maar ook behept zijn met fouten. Sterker nog, satellietgegevens zijn ook modelresultaten, met alle onzekerheden die daarmee gemoeid zijn. Satellietgegevens kunnen daardoor niet zonder meer worden gebruikt bij kalibratie of validatie. De betrouwbaarheid van satellietgegevens zal altijd moeten worden meegenomen. Bij kalibratie heeft dit tot gevolg dat equifinaliteit wordt versterkt en de identificeerbaarheid van de parameters wordt verkleind doordat de parameteronzekerheid zal toenemen. De parameters komen als het ware losser in het model te hangen. Bij validatie heeft het meenemen van de onzekerheid tot gevolg dat de validatiematen minder hard (maar wel realistischer) worden.

Een ander aandachtspunt is dat naast negatieve terugkoppelingen (*negative feedbacks*) die gewoonlijk bij agrohydrologische simulatieresultaten voorkomen ook positieve terugkoppelingen (*positive feedbacks*) mogelijk zijn. Voorbeelden van negatieve koppelingen zijn:

- te hoog gesimuleerde grondwaterstanden leiden tot grotere drainagefluxen. De verhoogde afvoer van water leidt vervolgens tot lagere grondwaterstanden;
- te hoog ingeschatte bodemverdamping leidt tot een drogere bovengrond en daarmee tot lagere bodemverdamping;
- te snelle reductie van de gewasverdamping bij uitdrogen van de wortelzone leidt tot minder snelle uitdroging en vice versa.
- Er vindt dan demping plaats. Bij positieve terugkoppelingen vindt echter versterking plaats:
- te grote ondiep onttrokken beregeningshoeveelheden leiden tot drogere omstandigheden en dus tot nog meer beregening
- te hoge light use efficiency leidt tot versterkte toename van de leaf area index (LAI) waardoor de assimilatie verder wordt versterkt etc.
- te hoog ingeschatte zuurstofstress in het voorjaar heeft tot gevolg dat het gewas te traag op gang komt en er geen water wordt opgenomen en de bodem nat blijft, wat weer leidt tot meer zuurstofstress

Kalibratiemethoden moeten hier rekening mee houden zodat het model niet tot vreemde en extreme resultaten komt.

De kalibratie wordt stapsgewijs uitgevoerd: 1) potentiële opbrengst, 2) exploiteerbare opbrengst, 3) de actuele opbrengst.

Concluderend merken we op dat bij kalibratie een beperkt aantal parameters moet worden geselecteerd. Het selecteren van twee, hooguit drie, parameters heeft als praktisch voordeel dat de waarde van de doelfunctie als functie van de parameterwaarden grafisch kan worden bestudeerd. Bovendien hoeven dan minder hoge eisen te worden gesteld aan de rekentijd. Daarnaast moet rekening worden gehouden met een aantal randvoorwaarden. Deze moeten niet alleen de af te zoeken parameter ruimte verkleinen, maar tevens de balanst termen reguleren. Bij het kalibreren kunnen we gebruikmaken van ervaringen die in het verleden met WOFOST zijn opgedaan (bijv. Akkermans et al., 2008)

MODELTOETSING VIA VALIDATIE

Bij validatie wordt onderzocht in welke mate de modelresultaten corresponderen met een set *onafhankelijke* metingen. Een meting is onafhankelijk als de meting niet eerder bij de ontwikkeling en kalibratie van het model is gebruikt. Hoewel de validiteit van een model strikt genomen niet kan worden aangetoond maar alleen ontkracht (zie discussies in Konikow & Bredehoef, 1992; Oreskes et al., 1994; samengevat in Walvoort et al. 2009, par 1.1, voetnoot 1) zullen we in deze discussienotitie de term validatie blijven hanteren omdat die in het waterbeheer gangbaar is (Van Waveren et al., 1999).

Evenals bij kalibratie is voor validatie een set metingen nodig. Idealiter dienen deze sets speciaal voor kalibratie of validatie te worden geselecteerd. Deze selectie kan op verschillende wijzen. Belangrijk voor zowel kalibratie als validatie is dat het hele modelbereik door de metingen wordt gedekt. Door gebruik te maken van zogenaamde ontwerp-gebaseerde (design-based) methoden bij het selecteren van validatiepunten kunnen objectieve validatiematen worden berekend inclusief de bijbehorende nauwkeurigheid (Brus et al., 2011).

Het probleem is dat er nauwelijks metingen zijn waarop SWAP-WOFOST kan worden gekalibreerd en gevalideerd, laat staan dat deze metingen speciaal voor deze doelen zijn geselecteerd. De beschikbare metingen zullen dus zo goed mogelijk over de doelen kalibratie en validatie moeten worden verdeeld. Nadeel is dat metingen die je voor validatie gaat gebruiken niet mogen worden gebruikt om het model te kalibreren, en omgekeerd. Er bestaan echter methodes waarmee dat via een truc wel kan, zonder de onafhankelijkheid tussen deze datasets geweld aan te doen. Bij *n*-voudige kruisvalidatie worden metingen afwisselend voor kalibratie en validatie gebruikt (Efron & Gong, 1983). Dergelijke technieken kunnen echter alleen worden gebruikt als de kalibratie niet te rekenintensief is. Immers, bij *n*-voudige kruisvalidatie moet *n* keer worden gekalibreerd.

Vervolgens is de vraag waarop je gaat valideren en welke validatiematen worden gebruikt? Voor SWAP-WOFOST ligt het voor de hand om op bladontwikkeling en totale biomassa te valideren. Andere gewaseigenschappen waarop gevalideerd kan worden zijn van fenologische aard (opkomst, oogst).

Gangbare validatiematen zijn onder meer de systematische fout (gemiddelde fout, of *bias*), de willekeurige fout (precisie, standaarddeviatie van de fout), de totale fout (wortel uit de gemiddelde gekwadrateerde fout), en de correlatiecoëfficiënt om overeenkomsten in ruimtelijke of temporele patronen te kwantificeren. Ook maten zoals de modefficiëntie (Nash & Sutcliffe, 1970) en de index of Agreement (Costantini et al, 2002) worden wel gebruikt.

Walvoort et al. (2009) benadrukken en demonstreren dat validatiematen niet alleen afzonderlijk, maar ook altijd in onderlinge samenhang moeten worden bestudeerd. Dit kan met speci-

ale grafische weergaves zoals het Taylor diagram (Taylor, 2001), het extended Taylor diagram (Walvoort et al., 2009, bijlage B), het target diagram (Jolliff et al., 2009), of een variant daarop, de zogenaamde zonneplot (Walvoort et al., 2009, bijlage C).

Concluderend kan worden gesteld dat vooraf een strikt onderscheid moet worden gemaakt tussen kalibratiegegevens enerzijds en validatiegegevens anderzijds. De validatiegegevens mogen niet voor modelkalibratie worden gebruikt. Om de validatieresultaten te kunnen beoordelen moeten meerdere validatiematen worden uitgerekend. Naast validatiematen die iets zeggen over de fout (gemiddelde fout, spreiding van de fout, totale fout) moeten ook validatiematen worden berekend waarmee overeenkomsten in het patroon tussen de metingen en de modelvoorspellingen kunnen worden gekwantificeerd. De validatiematen moeten niet alleen afzonderlijk worden bestudeerd, maar met name ook in relatie tot elkaar.

ROL VAN REMOTE SENSING

Remote sensing wordt steeds meer toegepast op verschillende ruimtelijke schalen. Toepassingen variëren van het interpreteren van sensoren van satellieten die rondjes om de aarde draaien of op vaste plekken hangen tot octocopters (of UAV's/drones) die metingen verrichten relatief dicht boven het maaiveld. Deze discussie beperkt zich tot satellieten die daarmee via sensoren waarnemingen verrichten op relatief grote afstand.

De vrije toegang tot beelden met hoge ruimtelijke resolutie is de afgelopen jaren sterk toegenomen. In maart 2012 is het Nationale Satelliet Dataportaal (<http://nso.datadoors.net/dd3/nso.html>) geopend ter voorbereiding op de komst van de vrij toegankelijke Europese Sentinel satellietbeelden in 2014. De ruwe satellietdata zijn afkomstig van drie satellieten: i) Formosat-satellietbeelden met een hoge ruimtelijke resolutie (2 of 8 meter), ii) DMC-satellietbeelden zullen ongeveer 4 keer per week geheel Nederland dekken met een resolutie van 22 meter, iii) Radarsat zal radarbeelden van 25 m resolutie leveren, die nooit last hebben van bewolking. Alterra vormt de DMC-satellietbeelden om tot NDVI-kaarten en stelt ze beschikbaar middels een webservice (zie de eerder genoemde Groenmonitor <http://www.geodata.alterra.nl/nsdbrowser>). Recent, op 4 december 2013, is tijdens een symposium in Wageningen over het "Gebruik van satellietbeelden in de landbouw" gebleken dat er zeker toepassingsmogelijkheden zijn, maar dat nog veel onderzoek nodig is om continue reeksen met voldoende ruimtelijke resolutie operationeel te krijgen. Toepassingsmogelijkheden zijn er onder meer bij het bepalen en schatten van: beregeningsadvies, overstromingsbeelden, droogtekaarten, verdampingspatronen, totale biomassa en gewas-fenologische toestanden.

Remote sensing vanuit satellieten kan daarmee ook een belangrijke rol spelen bij de parameterisatie, kalibratie, en validatie van SWAP-WOFOST. Remote sensing kan vooral de ruimtelijke dichtheid van gegevens verhogen zoals al meer dan 10 jaar geleden voorgesteld door Droogers et al. (2000), Ines et al. (2001) en recenter door Bastiaanssen et al. (2005). De temporele resolutie zal toenemen als er oplossingen zijn voor beelden tijdens bewolkte dagen. Aanvullingen met ander type waarnemingen en grondwaarnemingen vergroot de mogelijkheden, maar vereist transparante methodes. Een voor de hand liggende mogelijkheid is het berekenen van actuele verdampingsbeelden (wordt al gedaan in SAT-WATER <http://hydromedah.nl/satwater/>), zoals ook voorgesteld door Droogers (2009). Daarvoor zijn verschillende Nederlandse modellen en methoden beschikbaar zoals SEBAL (Bastiaanssen et al., 2005), ETlook (Bastiaanssen et al., 2012), SEBI (Roerink et al., 2000) en SEBS (Su, 2003).

De resultaten van de interpretatie van remote sensing beelden is nog altijd behept met

onzekerheid zoals Allen et al (2011) aangeven voor de typische fouten bij het bepalen van de actuele verdamping uit verschillende methodes, waaronder remote sensing. Bij het parameteriseren, kalibreren en valideren moet daar terdege rekening mee worden gehouden.

Data-assimilatie is een verzamelterm voor technieken waarmee verschillende informatiebronnen kunnen worden gecombineerd. Daarbij wordt rekening gehouden met de betrouwbaarheid van de afzonderlijke informatiebronnen (zoals de resultaten van een gewasgroeimodel, remote sensing beelden). De betrouwbaarheid van een informatiebron, in relatie tot de overige bronnen, wordt gebruikt om de relatieve bijdrage van de bron aan het eindresultaat te bepalen. De crux zit hem dus in het kwantificeren van deze onzekerheden, wat in de praktijk vaak lastig is.

Een voorbeeld van data-assimilatie is de studie uitgevoerd door Schuurmans et al. (2003) waarbij men de verdamping (latent heat flux), berekend op basis van remote sensing, assimileert met die van het SIMGRO model. Omdat geen informatie over de betrouwbaarheid van SIMGRO en de gebruikte remote sensing beelden bekend was, werd volstaan met het aftasten van de gevoeligheid van het eindresultaat voor verschillende waarden van deze onzekerheden. Ook deze auteurs benadrukken dat altijd goed naar de waterbalans moet worden gekeken. Andere voorbeelden van toepassingen van remote sensing zijn gegeven door Bastiaanssen et al. (2005) en De Wit et al. (2005). Enkele voorbeelden van gecombineerde SWAP-remote sensing toepassingen in het buitenland zijn gegeven door Singh et al. (2006), Kamble and Irmak (2008), Vazifedoust et al. (2009) en Singh, Ren, Kang (2010). Voor toepassingen van WOFOST wordt verwezen naar de referenties over "Satellite data assimilation" op de WOFOST site (www.wofost.wur.nl).

Het assimileren van remote sensing beelden in de agrohydrologie is geen sinecure. Niet alleen het kwantificeren van de onzekerheid van de afzonderlijke bronnen verdient de nodige aandacht, maar ook het bewaken van de balansen. Remote sensing beelden kunnen worden gebruikt bij het vaststellen van de fenologische toestand van het gewas. Door bijvoorbeeld de oogstdatum te baseren op remote sensingbeelden kan een gewasgroeimodel al sterk worden verbeterd. Op deze wijze kan worden voorkomen dat volgens het model nog een gewas vocht staat te verdampen, terwijl in werkelijkheid dat gewas al geoogst is. Dit zal ten goede komen aan de waterbalans.

Ook bij validatie kunnen remote sensing gegevens een rol spelen om te beoordelen of gemodelleerde patronen plausibel zijn (denk bijvoorbeeld aan de groenmonitor, <http://www.geodata.alterra.nl/nsdbrowser>).

Het gaat bij de inzet van remote sensing veelal om real time operationele toepassingen van remote sensing beelden. De inzet bij het afleiden van metarelaties zal vooralsnog beperkt zijn, evenals de inzet bij toekomstvoorspellingen. Satellieten kunnen niet in de toekomst kijken en ook maar tot zeer beperkte diepte in de bodem (enkele cm's). Het online archief van neerslag- en verdampingsgegevens voor het waterbeheer (Versteegh et al., 2013) is een voorbeeld van een combinatie van gegevens van grondstations met radarbeelden om te komen tot landsdekkende rasterbeelden voor neerslag en verdamping (<http://www.meteobase.nl/>). Satellietdata zijn dus bruikbaar voor ruimtelijke en temporele opschaling. Bij parameterisatie, kalibratie en validatie draagt iedere informatiebron bij aan de nauwkeurigheid, dus ook remote sensing. Wel moeten we rekening houden met de onzekerheid van remote sensing.

Met name bij relatieve vergelijkingen tussen jaren of bij verificatie van regionale verschillen, kan remote sensing een belangrijke rol spelen.

AANBEVELINGEN

Op basis van het bovenstaande kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan.

- 1 Voorgesteld wordt om opbrengstderving uit te drukken als het verschil tussen exploitierbare en actuele opbrengst. Het voldoende nauwkeurig inschatten van de actuele opbrengst is van belang om de waterbalans goed te krijgen.
- 2 Bij het parameteriseren van SWAP-WOFOST zal zo veel mogelijk gebruik worden gemaakt van parametersets die in het verleden zijn opgesteld op basis van experimenten en expertkennis. Voor de fenologische parameterisatie (met name oogst, maar mogelijk ook opkomst van het gewas) zal zo veel mogelijk gebruik worden gemaakt van satellietgegevens (bijvoorbeeld, via de Groenmonitor)
- 3 Parameters die onvoldoende goed bekend zijn én waar het modelsysteem SWAP-WOFOST gevoelig voor is komen in aanmerking voor kalibratie. Bij kalibratie dient altijd gebruik te worden gemaakt van een expliciete doelfunctie. Hieraan moeten randvoorwaarden worden opgelegd die het parameterbereik inperken (tot het fysisch-realistische bereik) en de waterbalans reguleren. Voorstel is om slechts een beperkt aantal parameters te kalibreren en daarbij gebruik te maken van studies die in het verleden zijn uitgevoerd. Voordeel van een beperkt aantal parameters is dat de waarde van de doelfunctie kan worden geplot als functie van de parameterwaarden. Dergelijke figuren verschaffen een schat aan informatie over de ligging van globale en lokale optima, de identificeerbaarheid van de parameters, de betrouwbaarheid waarmee de parameters kunnen worden geschat, en de onderlinge samenhang tussen de parameters. Daarbij is het van belang dat ook altijd de waterbalans wordt gecontroleerd.
- 4 Vooraf moet een onderscheid worden gemaakt tussen gegevens die voor kalibratie en gegevens die voor validatie zullen worden gebruikt. Gegevens die voor kalibratie worden gebruikt mogen niet voor validatie worden gebruikt. Anders wordt een veel te rooskleurig beeld verkregen van de nauwkeurigheid van het modelsysteem. Bij het valideren moet gebruik worden gemaakt van meerdere validatiematen, die niet alleen afzonderlijk, maar ook in relatie tot elkaar moeten worden bestudeerd. Hiervoor zijn grafische hulpmiddelen voorhanden.
- 5 Bij zowel kalibratie als validatie kan in principe gebruik worden gemaakt van satellietgegevens. Wel moet daarbij worden gerealiseerd dat satellietgegevens ook modelresultaten zijn, en daarom niet als harde gegevens mogen worden meegenomen in de analyse. Bij gebruik van historische gewasexperimenten voor kalibratie is de rol van remote sensing beperkt omdat voor deze meetperiodes mogelijk geen remote sensing beelden beschikbaar zijn.

LITERATUUR

Zie Literatuur in hoofdtekst.

BIJLAGE 3

GROENMONITOR, HYDROLOGIE EN GEWASGROEI

Joop Kroes, Gerbert Roerink, okt-2014

INLEIDING

Dit is een verslag van een analyse van het gebruik van de Groenmonitor bij hydrologische (model)berekeningen. De hydrologische datasets zijn gemaakt binnen het project Waterwijzer; de vergelijking met de Groenmonitor is tevens uitgevoerd in het kader van een Kennisbasisproject (KB-14-001-45, onderdeel van KBIV: Duurzame ontwikkeling van de groenblauwe ruimte).

De datasets voor het kalenderjaar 2013 zijn geanalyseerd omdat dit het eerste volledige jaar is met resultaten van de Groenmonitor. Voor dit jaar zijn aanvullende berekeningen uitgevoerd om een vergelijking tussen de verschillende methoden te kunnen maken en na te gaan waar ze elkaar kunnen aanvullen en versterken.

De gegevens van de groenmonitor zijn beschikbaar via de website www.groenmonitor.nl. De rekengegevens voor de datasets zijn een resultaat van berekeningen met Swap voor hydrologie (www.swap.alterra.nl) en Wofost voor gewasgroei (www.wofost.wur.nl).

BESCHIKBARE DATASETS*Grasland*

Voor grasland zijn gegevens van langjarige (1997-2013) veldexperimenten gebruikt van proefbedrijven in Cranendonck, Waiboerhoeve, Zegveld (Middelkoop et al., 2004; Middelkoop et al., 2007; Ehlert et al., 2008; Salm et al., 2012)

De inzet is afgestemd met Jantine van Middelkoop en Caroline van der Salm; zie bijlage A voor exacte locatie en omvang van proefvlakken.

Tevens zijn langjarige (1993-2013) veldexperimenten gebruikt van proefbedrijf De Marke (Hack-ten Broeke, 2000). Voor grasland zijn de percelen 9 en 21 (figuur 1) gebruikt waar in 2013 grasland stond.

FIGUUR 1

PERCELEN OP PROEFBOERDERIJ DE MARKE

*Snijmais*

Voor gegevens van een langjarige (1993-2013) veldexperimenten met in 2013 snijmais is gebruik gemaakt van perceel 11 (figuur 1) van De Marke (Hack-ten Broeke, 2000).

Aardappelen

Voor aardappelen is gebruik gemaakt van data van een 3-jarig veldexperiment op proefbedrijf De Rusthoeve (Schipper en vd Schans, 2012). Een experiment op klei in Zeeland met als doel om in het veld vast te stellen of regelbare drainage de uitspoeling van nutriënten naar het oppervlaktewater reduceert en tegelijk de landbouw helpt om in droge tijden het water beter vast te houden en in natte tijden het perceel nog even goed te kunnen ontwateren (Stuyt, 2013). Zie bijlage A voor exacte locatie en omvang van proeflokatie.

GEGEVENS GROENMONITOR 2013*Resolutie*

De grootte van de proefvlakken van een aantal veldexperimenten is 350 m² ofwel circa 20 m resolutie. Dit is op of over de grens van de ruimtelijke resolutie van de Groenmonitor die 25 m bedraagt. Een grotere nauwkeurigheid is zeker haalbaar maar daaraan zijn normaal gesproken relatief hoge kosten verboden. Echter, in het National Satelliet Dataportaal zijn ook Formosat en Spot beelden beschikbaar, deze hebben een resolutie van ongeveer 5 m en zouden geschikt kunnen zijn om de proefvlakken van 350 m² te kunnen onderscheiden.

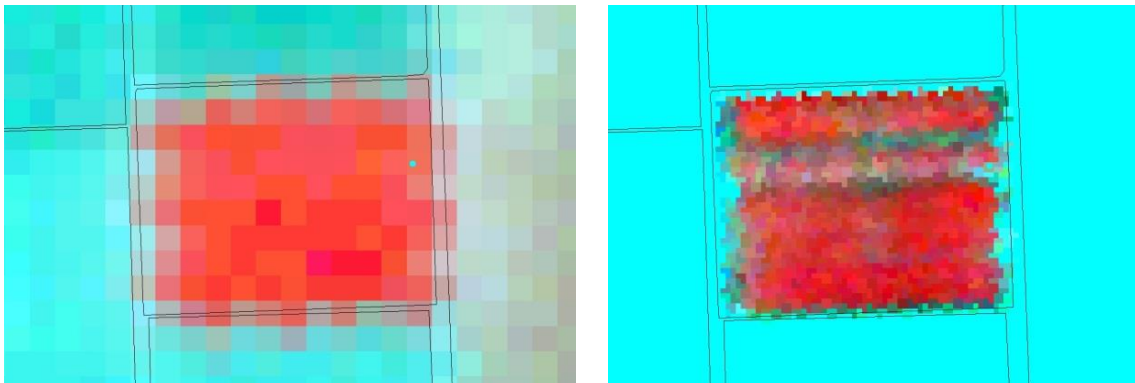
Het Spot-beeld van Cranendonck-grasland (Bijlage A, Fig A1) heeft een resolutie zoals gegeven in figuur 2. De proefvlakken zijn te onderscheiden. De praktische toepasbaarheid hangt af van het doel van de toepassing omdat er slechts enkele beelden per groeiseizoen beschikbaar.

FIGUUR 2 HOOG-RESOLUTIE (5M) BEELD VAN DE PROEFVLAKKEN OP PROEFBEDRIJF CRANENDONCK



Voor de Waiboerhoeve-grasland (Bijlage A, Fig A2) zijn beelden met 2 resoluties weergegeven in figuur 3 op vrijwel dezelfde datum. Op de 5m resolutie beelden zijn de proefvlakken te onderscheiden maar ook hier geldt dat de praktische toepassing vooralsnog beperkt is vanwege de beperkte temporele resolutie (enkele beelden per groeiseizoen).

FIGUUR 3 LAAG- EN HOOG-RESOLUTIE BEELDEN VAN DE PROEFVLAKKEN OP PROEFBEDRIJF WAIBOERHOEVE; LINKS 25M RESOLUTIE BEELD VAN 27 MRT 2013 EN RECHTS EEN 5 M RESOLUTIE BEELD VAN 26 MAART 2013.



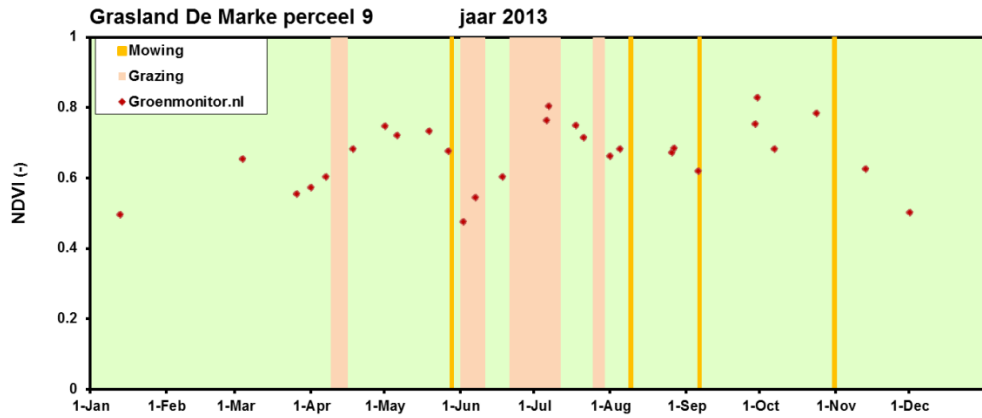
Grasland

De Marke perceel 9: De Groenmonitor laat een verloop van de NDVI zien waaruit een keer maaien blijkt tussen 26 mei en 2 juni, een periode waarin de NDVI daalt van 0.67 naar 0.47 (figuur 4). Uit de gegevens van het proefbedrijf blijkt dat er een snede van bijna 4 ton is geoogst op 28 mei, wat goed overeenkomt met de Groenmonitor-gegevens.

De beweidingsperiodes zijn niet of slecht te detecteren met de Groenmonitor.

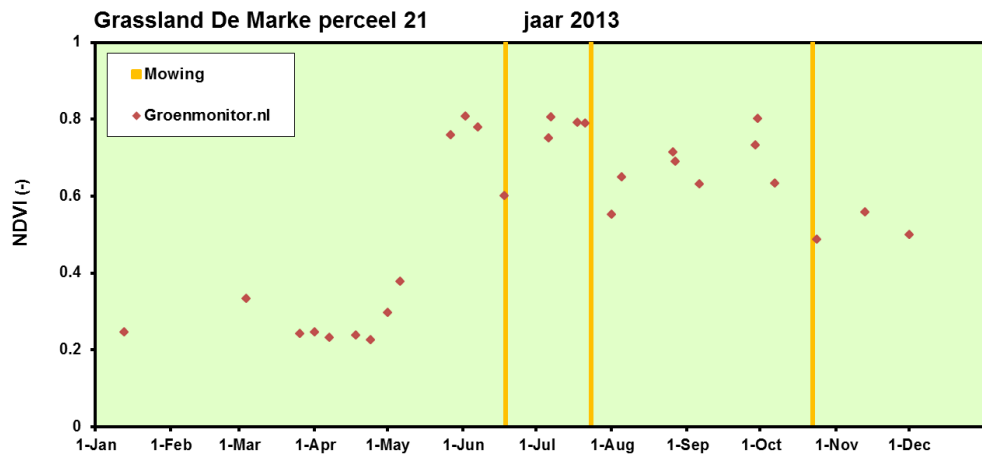
Extra complicatie bij dit perceel is de berekening en het aandeel klaver; beide zorgen voor afwijkingen in de grasgroei op perceelsschaal. Nadere analyse is nodig om de invloed van deze factoren op de detectie van de Groenmonitor te kwantificeren.

FIGUUR 4 GRASLAND OP PERCEEL 9 VAN PROEFBEDRIJF DE MARKE



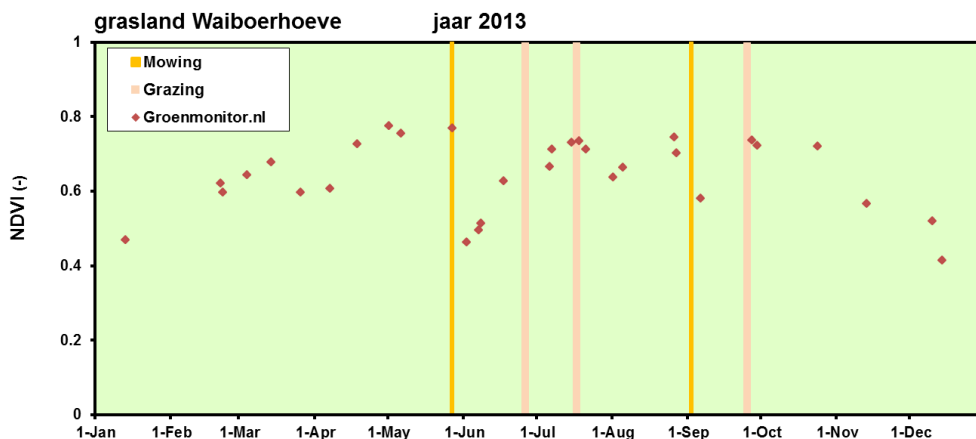
De Marke perceel 21: De Groenmonitor laat een verloop van de NDVI zien waaruit blijkt dat er opnieuw is ingezaaid en een 3-tal snedes (figuur 5). De gegevens van het proefbedrijf bevestigen het aantal snedes. Het exacte tijdstip van maaien lijkt voor 2 van de 3 snedes minder nauwkeurig.

FIGUUR 5 GRASLAND OP PERCEEL 21 VAN PROEFBEDRIJF DE MARKE



Op het proefbedrijf Waiboerhoeve is op de proefvlakken op dezelfde tijdstippen geoogst en beweid. Er zijn 2 snedes geoogst en er zijn 3 weideperiodes geweest (zie fig 6). De 2 snedes zijn met de Groenmonitor goed herkenbaar met een nauwkeurigheid van ca 5 dagen. De 2^e beweidsperiode lijkt herkenbaar, de beweidsperiodes zijn niet of slecht herkenbaar (figuur 6).

FIGUUR 6 WAIBOERHOEVE, GEMIDDELTE NDVI VAN PROEFBEDRIJF DE MARKE



Soortgelijke beelden leveren de proefvlakken van de grasland-percelen in Cranendonck en Zegveld op. De resolutie van 25 m is eigenlijk te grof voor de kleine proefvlakken van 350 m². Omdat het management (maaien en beweiden) voor de proefvlakken gelijk is, zijn de percelen (som van proefvlakken) wel bruikbaar om de vergelijken met de Groenmonitor.

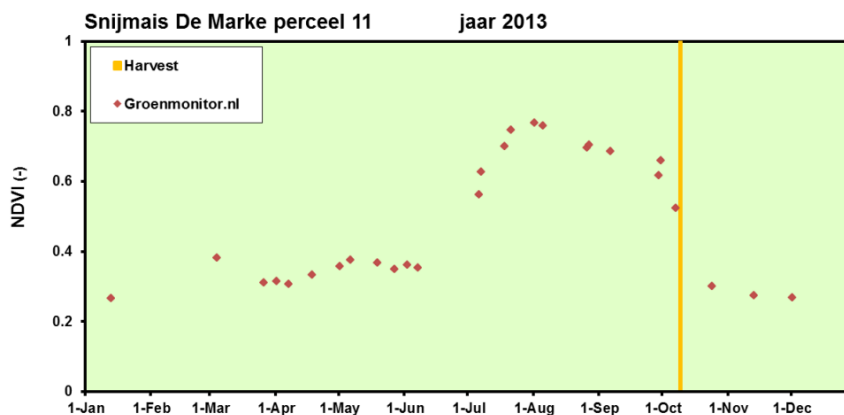
Snijmais

De Marke perceel 11: De Groenmonitor laat een verloop van de NDVI zien waaruit blijkt dat er een gewas zoals snijmais heeft gestaan (figuur 7). Verder uit Groenmonitor:

- opkomstdatum tussen 7 juni en 6 juli, een periode waarin de NDVI sterk toeneemt.
- oogsttijdstip ligt tussen 29 sept en 24 oktober.

Volgens opgave van het proefbedrijf is de oogst op 9 oktober geweest.

FIGUUR 7 SNIJMAIS OP PERCEEL 11 VAN PROEFBEDRIJF DE MARKE

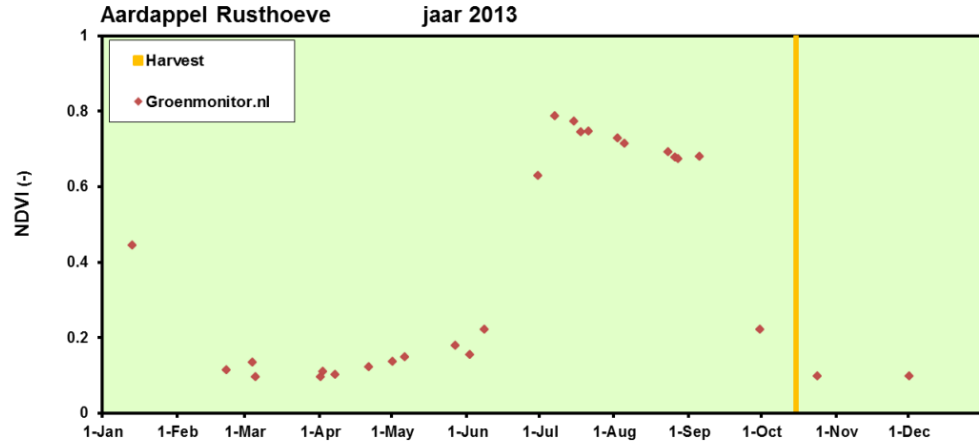


Aardappelen

Op het proefbedrijf De Rusthoeve lijkt uit de gegevens van de Groenmonitor dat er tussen 13-jan en 1-feb activiteiten zijn geweest, waarschijnlijk is er een wintergewas ondergeploegd (fi-

guur 8). Opkomstdatum van de aardappelen ligt tussen 8 juni en 7 juli, mede afhankelijk van de definitie van opkomstdatum. Oogst lijkt vlggs groenmonitor tussen 5 en 30 september. De daling kan ook veroorzaakt zijn door loofdding waarna de oogst plaatsvond medio oktober. Volgens opgave van het proefbedrijf was de oogst op 15 oktober.

FIGUUR 8 AARDAPPELEN IN BLOK 7 VAN PROEFBEDRIJF RUSTHOEVE



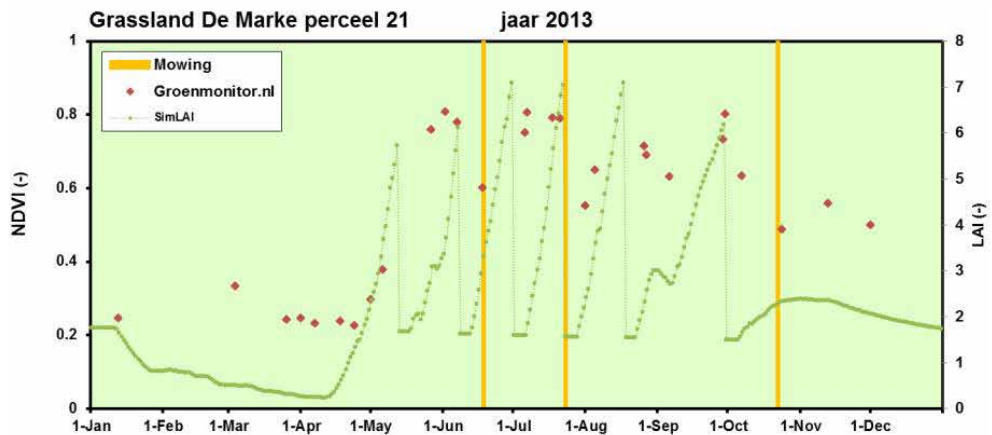
MODELBEREKENING SWAP-WOFOST

Grasland

De Marke perceel 21: Groenmonitor, observatie en simulatie worden vergeleken (figuur 9). Er is in eerste instantie gerekend met een vaste drempelwaarde voor oogsten en het rekenresultaat laat zien dat dit tot oogsttijdstippen leidt die niet overeenkomen met de werkelijkheid.

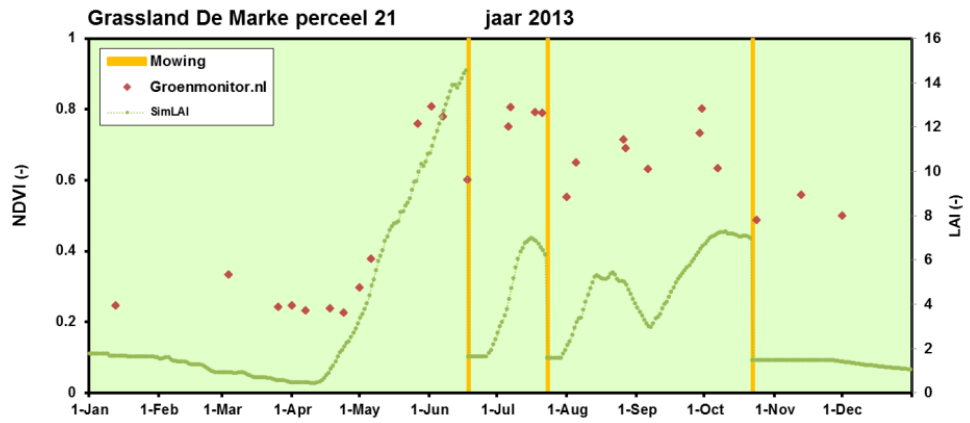
Additionele management-info blijkt nodig. Rekenen met de werkelijke oogst-tijdstippen geeft een duidelijke verbetering (figuur 10).

FIGUUR 9 GRASLAND OP PERCEEL 21 VAN PROEFBEDRIJF DE MARKE (SIMLAI IS DE MET SWAP-WOFOST BEREKENDE LAI)



FIGUUR 10

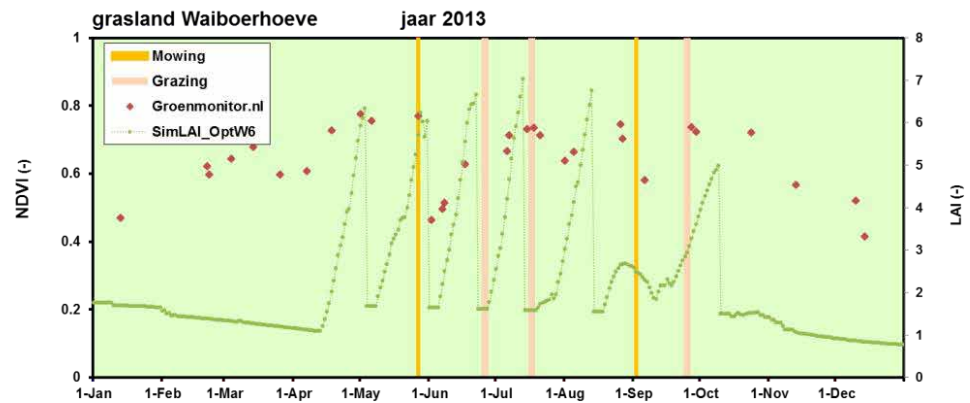
GRASLAND OP PERCEEL 21 VAN PROEFBEDRIJF DE MARKE (SIMLAI IS DE MET SWAP-WOFOST BEREKENDE LAI, MET OPGELEGDE OOGST-SNEDE TIJDSTIPPEN)



Proefbedrijf Waiboerhoeve: Groenmonitor en simulatie laten duidelijke verschillen zien tussen NDVI en LAI (figuur 11). Het veldexperiment hanteert een afwisseling van maaien en beweidingen die vooralsnog niet is meegenomen. (de berekening is alleen met maaien uitgevoerd).

FIGUUR 11

WAIBOERHOEVE, GEMIDDELDE NDVI VAN PROEFBEDRIJF WAIBOERHOEVE (SIMLAI_OPTW5 IS DE MET SWAP-WOFOST BEREKENDE LAI VOOR PROEFVLAK W5)

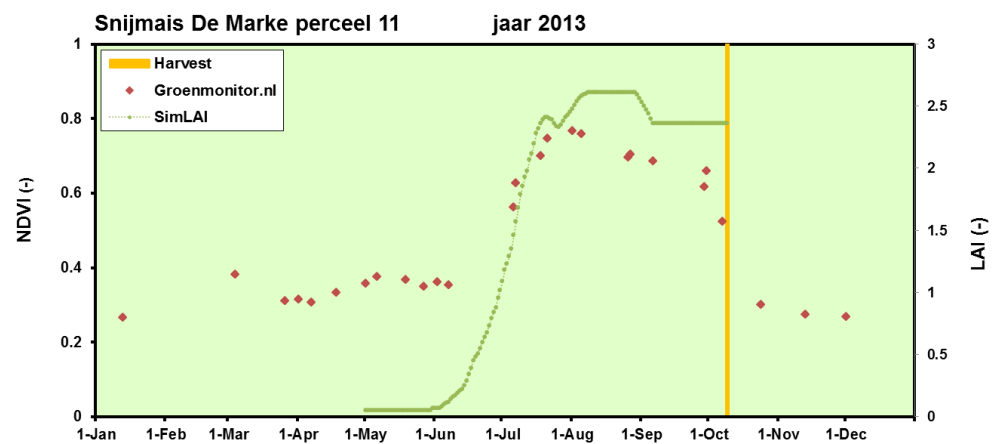


Snijmais

De Marke perceel 11: Groenmonitor en simulatie komen redelijk overeen (figuur 12). Er is gerekend met een zaaidatum van 1 mei 2013 (exacte zaaidatum ontbreekt vooralsnog)

FIGUUR 12

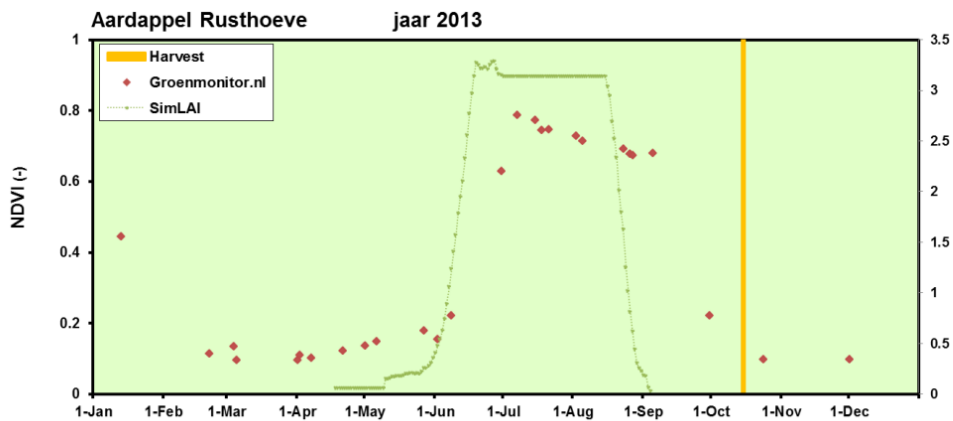
SNIJMAIS OP PERCEEL 11 VAN PROEFBEDRIJF DE MARKE (SIMLAI IS DE MET SWAP-WOFOST BEREKENDE LAI)



Aardappelen

Proefbedrijf De Rusthoeve: Groenmonitor en simulatiemodel (figuur 13). Opkomst gaat goed, oogst is te vroeg.

FIGUUR 13 AARDAPPELEN IN BLOK 7 VAN PROEFBEDRIJF RUSTHOEVE (SIMLAI IS DE MET SWAP-WOFOST BEREKENDE LAI)



CONCLUSIES GROENMONITOR (OKT 2014)

Voor grasland is de Groenmonitor een welkome aanvulling op informatie van management-activiteiten.

Voor andere gewassen (zoals snijmaïs en aardappelen) kan de Groenmonitor goed worden ingezet om opkomst en oogst datums te controleren en/of te calibreren tijdens modelberekeningen.

De Groenmonitor levert een NDVI welke kan worden omgezet in een LAI of een bovengrondse biomassa in kg droge stof. Een student heeft een vergelijking gemaakt tussen LAI via Groenmonitor en LAI via modelberekening (Brande, 2013). Daaruit bleek dat de LAI uit de Groenmonitor de rekenresultaten kan verbeteren via data-assimilatie. Hiervoor is echter nog wel aanvullend onderzoek nodig. De relatie tussen NDVI en LAI, cq kg droge stof is voor NL slecht bekend. Bovendien is het zo dat bij hogere LAI's (>3) het onderscheidend vermogen sterk afneemt. Dit is vooral voor NL waar optimale groeiomstandigheden en hoge LAI's veel voorkomen vooralsnog een beperking.

De Groenmonitor indicator is en wordt tevens ingezet om:

- gewashoogtes van grasland te bepalen tot ca 20 cm;
- de opbrengsten van suikerbieten te bepalen met de relatie tussen opbrengst en indicator
- overstromingsbeelden voor uiterwaarden (juni 2013) en wateroverlast in beeld te brengen

Uit deze toepassingsmogelijkheden en ook uit deze notitie blijkt dat, door samenwerking met andere datasets en experts van verschillende toepassingsvelden de inzet en mogelijkheden worden vergroot voor zowel model als groenmonitor.

Resultaten van Groenmonitor en simulatiemodel vullen elkaar goed aan.

REFERENCES

- Brande, M. Van den. (2013). Remote sensing beelden van NDVI en hydrologisch modelleren. BSc thesis Wageningen UR. Wageningen.
- Ehlert, P.A.I., J. C. van Middelkoop, C. van der Salm & P.H.M. Dekker, 2008. Effecten van fosfaatoverschotten op gras- en bouwland op langere termijn. Stand van zaken 2007. Alterra rapport 1665
- Hack-ten Broeke, M. J. (2000). Nitrate leaching from dairy farming on sandy soils. Case studies for experimental farm De Marke. PhD thesis Wageningen.
- Middelkoop van J.C., C. van der Salm, D.J. den Boer, M. ter Horst, W.J. Chardon, R.F. Bakker, R.L.M. Schils, O.F. Schoumans, 2004. "Effecten van fosfaat- en stikstofoverschotten op grasland Veldonderzoek op vier locaties", 1997-2001 Praktijkrapport Rundvee 48, Praktijkonderzoek Veehouderij.
- Middelkoop, J. C. van, Salm, C. van der, Ehlert, P. A. I., André, G., Oudendag, D., & Pleijter, M. (2007). Effecten van fosfaat- en stikstofoverschotten op grasland II. WUR-ASG Rapport 68.
- Salm, C. van der, A. van den Toorn, W.J. Chardon and G.F. Koopmans, 2012. Water and nutrient transport on a heavy clay soil in a fluvial plain in the Netherlands. *Journal of environmental quality*, 41(1), 229–41.
- Schipper, P. N. M., & Schans, M. L. van der. (2012). Eindrapportage praktijkproef Rusthoeve. Grontmij, 29-nov-2012.
- Stuyt, L. C. P. M., 2013. Regelbare drainage als schakel in toekomstbestendig Waterbeheer. Wageningen, Alterra. Rapport 2370.

Figuren met lokaties proefvlakken Cranendonck, Waiboerhoeve, Zegveld en proefblokken in Rusthoeve (Bijlage 3)

FIGUUR A1 PROEFVAKKEN VAN HET PERCEEL VOOR NP-NORM EXPERIMENTEN OP PROEFBEDRIJF CRANENDONCK

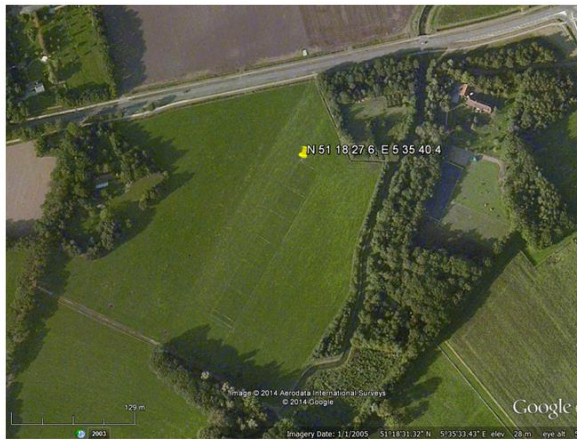
Cranendonck
 NP-norm experiment
 proefvlakken C4 en C5 (resp.
 optimaal en reductie NP)

Rechthoekige proefvlakken 350 m2
 Linkerbovenhoek in
 LATLONG en RD:

N 51 18 27,6, E 5 35 40,4

169459, 368732

Proefveld NP weiden
 Cranendonck



C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
----	----	----	----	----	----	----



FIGUUR A2 PROEFVAKKEN VAN HET PERCEEL VOOR NP-NORM EXPERIMENTEN OP PROEFBEDRIJF WAIBOERHOEVE

Lelystad - Waiboerhoeve
 NP-norm experiment
 proefvlakken W6 en W2 (resp.
 optimaal en reductie NP)

Rechthoekige proefvlakken 350 m2
 Linkerbovenhoek in
 LATLONG en RD:

N 52 31 46,8, E 5 35 11,8

168531, 504686

Proefveld NP weiden
 Waiboerhoeve

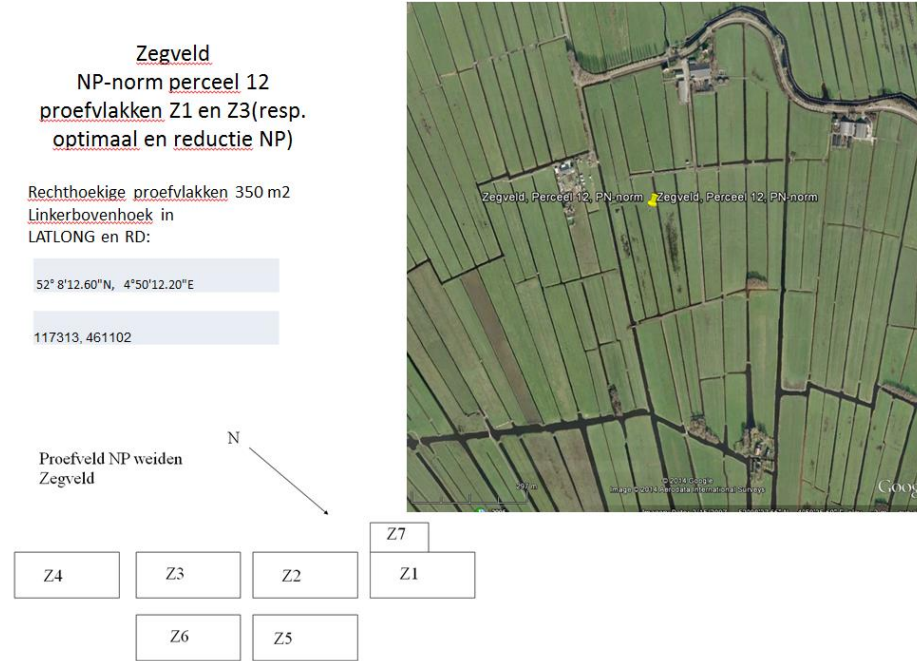


W1	W2	W3	W4	W5	W6
					W7



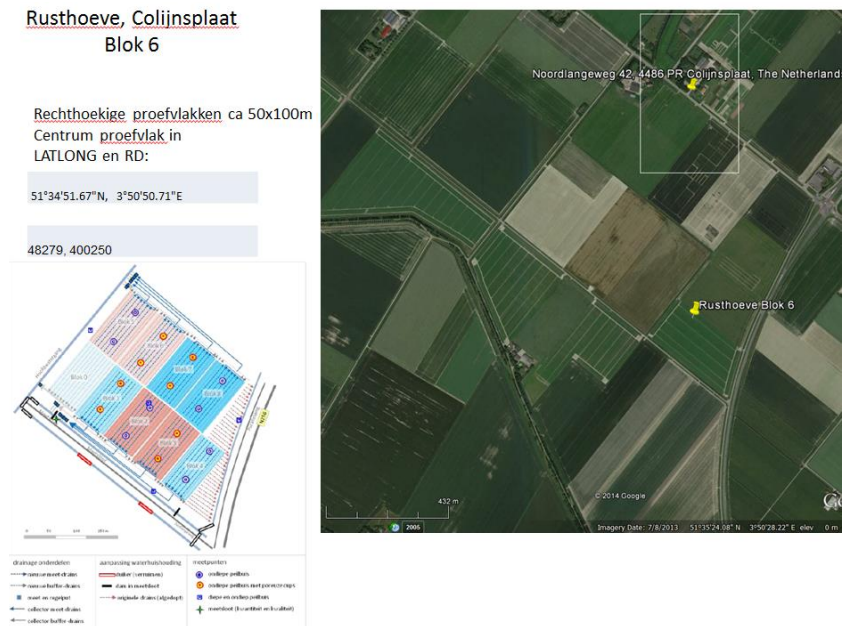
FIGUUR A3

PROEFVLAKKEN VAN HET PERCEEL VOOR NP-NORM EXPERIMENTEN OP PROEFBEDRIJF ZEGVELD



FIGUUR A4

PROEFVLAKKEN VAN HET PERCEEL VOOR NP-NORM EXPERIMENTEN OP PROEFBEDRIJF RUSTHOEVE



Tabel met coördinaten van Lokaties met proefvlakken en proefblokken (bijlage 3).

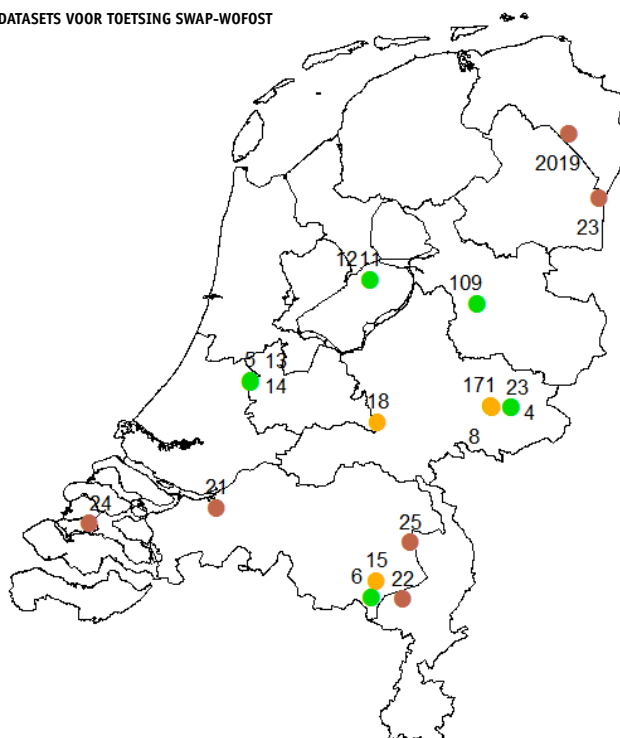
Case	Simulation Period	CropType	LAT LONG	X-coördinaat (m in RDN)	Y-coördinaat (m in RDN)
GrasslandM(DeMarke09)	1992-2013	grassland	52° 2'12.77"N, 6°21'5.57"E	221167	450278
GrasslandMG(Cranend)	1997-2013	grassland	N 51 18 27.6, E 5 35 40.4	169459	368732
GrasslandMG(Waiboer)	1997-2013	grassland	N 52 31 46.8, E 5 35 11.8	168531	504686
GrasslandMG(Zegveld)	1997-2013	grassland	52° 8'12.60"N, 4°50'12.20"E	117313	461102
Maized(DeMarke11)	1992-2013	forage maize	52° 2'11.00"N, 6°21'14.65"E	221341	450226
Maized(DeMarke21)	1992-2013	forage maize	52° 2'31.92"N, 6°20'23.89"E	220365	450860
PotatoD(RusthoeveB7)	2011-2013	potatoes	51°34'51.67"N, 3°50'50.71"E	48279	400250

BIJLAGE 4

BESCHIKBARE CASES

CaseNr	dirnam	Simulation Period	Water	Nutrienten	PestDisease	Zout	overig management
1	CropgrowthGrasslandM(DeMarke21)	1992-2013	Y	N	N	N	Y
2	CropgrowthGrasslandM(Ruurlo16)	1980-1984	N	N	N	N	N
3	CropgrowthGrasslandM(Ruurlo19)	1980-1984	Y	Y	N	N	N
4	CropgrowthGrasslandM(Ruurlo48)	1980-1984	N	N	N	N	N
5	CropgrowthGrasslandM(Zegveld03)	2003-2005	Y	N	N	N	N
6	CropgrowthGrasslandMG(CranendOptC4)	1997-2013	Y	N	N	N	Y
7	CropgrowthGrasslandMG(CranendRedC5)	1997-2013	Y	Y	N	N	Y
8	CropgrowthGrasslandMG(DeMarke09)	1992-2013	Y	N	N	N	Y
9	CropgrowthGrasslandMG(HeinoOptH4)	1997-2001	Y	N	N	N	Y
10	CropgrowthGrasslandMG(HeinoRedH2)	1997-2001	Y	Y	N	N	Y
11	CropgrowthGrasslandMG(WaiboerOptW6)	1997-2013	Y	N	N	N	Y
12	CropgrowthGrasslandMG(WaiboerRedW2)	1997-2013	Y	Y	N	N	Y
13	CropgrowthGrasslandMG(ZegveldOptZ1)	1997-2013	Y	N	N	N	Y
14	CropgrowthGrasslandMG(ZegveldRedZ3)	1997-2013	Y	Y	N	N	Y
15	CropgrowthMaizeD(Cranendonck16)	1974-1982	Y	N	N	N	N
16	CropgrowthMaizeD(DeMarke11)	1992-2013	Y	N	N	N	Y
17	CropgrowthMaizeD(DeMarke21)	1992-2013	Y	N	N	N	Y
18	CropgrowthMaizeD(Dijkgraaf)	2007-2008	N	N	N	N	N
19	CropgrowthPotatoD(Borgerswold03)	1992-1994	N	N	N	N	N
20	CropgrowthPotatoD(Borgerswold13)	1992-1994	N	N	N	N	N
21	CropgrowthPotatoD(Molenweg)	2006-2007	NA	NA	NA	N	NA
22	CropgrowthPotatoD(Ospel)	2010-2012	NA	NA	NA	N	NA
23	CropGrowthPotatoD(Roswinkel)	2000-2000	N	N	Y	N	N
24	CropGrowthPotatoD(RusthoeveB7)	2011-2013	NA	N	N	N	N
25	CropgrowthPotatoD(Vredepeel26)	2002-2002	Y	N	N	N	N

FIGUUR B4.1 BESCHIKBARE DATASETS VOOR TOETSING SWAP-WOFOST



BIJLAGE 5

BEREKENDE EN GEMETEN OPBRENGSTEN VOOR 9 CASES

In deze bijlage worden de berekende en gemeten opbrengsten gegeven voor grasland, snijmaïs en aardappelen. Voor grasland zijn zowel de opbrengst per snede als de jaarlijkse opbrengst gegeven. De volgende toelichting geldt voor de tabellen in deze bijlage:

variabele	eenheid	Omschrijving
Y_obs	kg/ha DM	Gemeten opbrengst
Y_simAct	kg/ha DM	Berekende actuele opbrengst Yact
Y_simAct - Y_obs	kg/ha DM	Absoluut verschil tussen gesimuleerde en waargenomen opbrengst
(Y_simAct - Y_obs)/Yobs	%	Procentueel verschil tussen gesimuleerde en waargenomen opbrengst

TABEL 5.1 GEMETEN EN BEREKENDE OPBRENGSTEN VOOR GRASLAND PER SNEDE

Case	Jaar	Snedes		Y_obs	Y_simAct	Y_simAct - Y_obs	(Y_simAct - Y_obs)/Yobs
		nr	datum				
GrasslandM (Ruurlo16)	1980	1	1980-05-06	3522	3666	144	4
		2	1980-05-28	2975	2476	-499	-17
		3	1980-06-24	1991	2823	832	42
		4	1980-07-24	3585	2559	-1026	-29
		5	1980-08-19	2463	2247	-216	-9
		6	1980-09-17	1969	1944	-25	-1
		7	1980-10-23	1926	1311	-615	-32
	1981	1	1981-04-14	699	2415	1716	245
		2	1981-05-19	3057	2652	-405	-13
		3	1981-06-16	3581	3259	-322	-9
		4	1981-07-14	1648	2519	871	53
		5	1981-08-05	2192	1967	-225	-10
		6	1981-09-08	1532	3088	1556	102
		7	1981-10-28	2024	1757	-267	-13
	1982	1	1982-05-11	815	3792	2977	365
		2	1982-06-01	3728	2261	-1467	-39
		3	1982-07-06	2361	4190	1829	77
		4	1982-08-10	1642	3263	1621	99
		5	1982-10-13	2219	3691	1472	66
	1983	1	1983-05-19	3637	4734	1097	30
		2	1983-06-15	3079	3732	653	21
3		1983-07-13	3651	3012	-639	-18	

Case	Jaar	Snedesnr	Snededatum	Y_obs kg/ha DM	Y_simAct kg/ha DM	Y_simAct - Y_obs kg/ha DM	(Y_simAct - Y_obs)/Y_obs %
		4	1983-08-17	800	2591	1791	224
		5	1983-10-28	1661	3550	1889	114
	1984	1	1984-05-15	3854	3869	15	0
		2	1984-06-07	2727	1847	-880	-32
		3	1984-07-05	2793	3440	647	23
		4	1984-08-02	2767	2697	-70	-3
		5	1984-09-11	849	2490	1641	193
		6	1984-11-07	1842	1764	-78	-4
GrasslandM (Ruurlo48)	1980	1	1980-05-06	3665	3661	-4	0
		2	1980-05-28	2318	2473	155	7
		3	1980-06-24	2349	3045	696	30
		4	1980-07-24	2993	2295	-698	-23
		5	1980-08-19	2300	2401	101	4
		6	1980-09-17	1771	1953	182	10
		7	1980-10-23	1896	1312	-584	-31
	1981	1	1981-04-14	614	2381	1767	288
		2	1981-05-19	2916	2656	-260	-9
		3	1981-06-16	5312	3259	-2053	-39
		4	1981-07-14	1544	2504	960	62
		5	1981-08-05	1925	1931	6	0
		6	1981-09-08	2079	3097	1018	49
		7	1981-10-28	2122	1764	-358	-17
	1982	1	1982-05-11	423	3794	3371	797
		2	1982-06-01	3288	2262	-1026	-31
		3	1982-07-06	2076	4189	2113	102
		4	1982-08-10	1905	3536	1631	86
		5	1982-10-13	2365	3636	1271	54
	1983	1	1983-05-19	3498	4703	1205	34
		2	1983-06-15	2877	3711	834	29
		3	1983-07-13	3789	3013	-776	-20
		4	1983-08-17	909	3049	2140	235
		5	1983-10-28	2489	3561	1072	43
	1984	1	1984-05-15	2900	3830	930	32
		2	1984-06-07	2844	1826	-1018	-36
		3	1984-07-05	3014	3440	426	14
		4	1984-08-02	2872	2698	-174	-6
		5	1984-09-11	1368	2925	1557	114
		6	1984-11-07	2121	1547	-574	-27
GrasslandM (Zegveld03)	2003	1	2003-05-02	2877	2121	-756	-26
		2	2003-05-23	1023	1932	909	89
		3	2003-06-12	1174	2247	1073	91
		4	2003-06-30	629	321	-308	-49
		5	2003-07-28	1603	1141	-462	-29

Case	Jaar	Snedes	Snedes	Y_obs	Y_simAct	Y_simAct - Y_obs	(Y_simAct - Y_obs)/Y_obs
		nr	datum	kg/ha DM	kg/ha DM	kg/ha DM	%
		6	2003-08-14	553	253	-300	-54
		7	2003-09-05	618	435	-183	-30
		8	2003-09-22	472	841	369	78
		9	2003-10-14	636	516	-120	-19
	2004	1	2004-04-26	2734	2699	-35	-1
		2	2004-05-24	3808	1724	-2084	-55
		3	2004-07-05	3041	2705	-336	-11
		4	2004-08-02	1619	2297	678	42
		5	2004-09-07	1757	1117	-640	-36
		6	2004-10-13	1096	1248		
	2005	1	2005-04-29	2666	4269	1603	60
		2	2005-06-01	2267	3702	1435	63
		3	2005-07-15	3679	3259	-420	-11
		4	2005-08-01	1133	750	-383	-34
		5	2005-09-13	3112	3501	389	13
		6	2005-10-17	1234	1330	96	8

TABEL 5.2 GEMETEN EN BEREKENDE JAARLIJKSE OPBRENGSTEN VOOR GRASLAND

Case	Jaar	Y_obs	Y_simAct	Y_simAct - Y_obs	(Y_simAct - Y_obs)/Y_obs
		kg/ha DM	kg/ha DM	kg/ha DM	%
Ruurlo16	1980	18431	17026	-1405	-8
Ruurlo16	1981	14733	17657	2924	20
Ruurlo16	1982	10765	17197	6432	60
Ruurlo16	1983	12828	17619	4791	37
Ruurlo16	1984	14832	16107	1275	9
Ruurlo48	1980	17292	17140	-152	-1
Ruurlo48	1981	16512	17592	1080	7
Ruurlo48	1982	10057	17417	7360	73
Ruurlo48	1983	13562	18037	4475	33
Ruurlo48	1984	15119	16266	1147	8
Zegveld03	2003	9585	9807	222	2
Zegveld03	2004	14055	11790	-2265	-16
Zegveld03	2005	14091	16817	2726	19

TABEL 5.3 GEMETEN EN BEREKENDE JAARLIJKSE OPBRENGSTEN VOOR SNIJMAÏS

Case	Jaar	Y_obs	Y_simAct	Y_simAct - Y_obs	(Y_simAct - Y_obs)/Y_obs
		kg/ha DM	kg/ha DM	kg/ha DM	%
MaizeD Cranendonck16	1974	14080	10495	-3585	-25
	1975	16670	12734	-3936	-24
	1976	10240	7792	-2448	-24
	1977	13970	10010	-3960	-28
	1978	12340	9239	-3101	-25
	1979	12380	10027	-2353	-19
	1980	14710	9829	-4881	-33
	1981	14800	12197	-2603	-18
	1982	14900	15834	934	6
MaizeD (Dijkgraaf)	2007	16306	12740	-3566	-22

TABEL 5.4 GEMETEN EN BEREKENDE JAARLIJKSE OPBRENGSTEN VOOR AARDAPPELEN

Case	Jaar	Y_obs	Y_simAct	Y_simAct - Y_obs	(Y_simAct - Y_obs)/Y_obs
		kg/ha DM	kg/ha DM	kg/ha DM	%
PotatoD (Borgerswold03)	1992	9482	11312	1830	19
	1994	9011	9816	805	9
PotatoD (Borgerswold13)	1992	12127	11349	-778	-6
	1994	9255	9732	477	5
PotatoD (RusthoeveB7)	2013	8610	8410	-200	-2
PotatoD (Vredepeel26)	2002	11359	11033	-326	-3

BIJLAGE 6

MET SWAP-WOFOST BEREKENDE TRANSPIRATIEREDUCTIES VOOR DE CASES

In deze bijlage worden de jaarlijkse transpiratie-reducties gegeven voor grasland, snijmaïs en aardappel. De volgende toelichting geldt voor de hierna gegeven tabellen:

- Tpot = potentiële transpiratie (mm/jaar)
- Tact = actuele transpiratie (mm/jaar)
- Tredtot = totale transpiratiereductie Tpot-Tact (mm/jaar)
- Tredwet = transpiratiereductie door natstress als fractie van Tredtot (mm/jaar)
- Treddry = transpiratiereductie door droogte als fractie van Tredtot (mm/jaar)
- Tredtotperc = totale transpiratiereductie als percentage van Tpot (%)
- Tredwetperc = transpiratiereductie door natstress als percentage van Tpot (%)
- Treddryperc = transpiratiereductie door droogte als percentage van Tpot (%)

Transpiratiereductie door zoutstress komt bij deze cases niet voor en is buiten beschouwing gelaten. Alleen bij de 2 grasland cases van Ruurlo en de snijmaïs op Dijkgraaf komt een geringe (1%) transpiratie-reductie door vorst voor. Deze reductie ontstaat als een bevroren bodem de waterflux remt en dus ook de transpiratie. Het komt onder Nederlandse omstandigheden weinig voor omdat de meeste gewassen in het zomerhalfjaar groeien. Gezien het relatief geringe belang is deze verder buiten beschouwing gebleven.

TABEL 6.1 REDUCTIE PERCENTAGES VOOR DE GRASLAND CASES

case	Jaar	Tpot	Tact	Tredtot	Tredwet	Treddry	Tredtotperc	Tredwetperc	Treddryperc
GrasslandM(Ruurlo16)	1980	490	481	10	1	4	2	0	1
	1981	488	484	5	2	0	1	0	0
	1982	575	552	23	0	19	4	0	3
	1983	547	506	41	1	36	8	0	7
	1984	484	465	19	2	14	4	0	3
GrasslandM(Ruurlo48)	1980	491	485	6	2	0	1	0	0
	1981	488	482	6	3	0	1	1	0
	1982	574	562	13	0	9	2	0	2
	1983	548	520	28	1	22	5	0	4
	1984	484	473	11	2	6	2	0	1
GrasslandM(Zegveld03)	2003	597	387	210	16	194	35	3	32
	2004	536	388	148	68	80	28	13	15
	2005	561	479	82	34	48	15	6	9

TABEL 6.2 REDUCTIE PERCENTAGES VOOR DE SNIJMAÏS CASES

case	Jaar	Tpot	Tact	Tredtot	Tredwet	Treddry	Tredtotperc	Tredwetperc	Treddryperc
MaizeD (Cranendonck16)	1974	280	280	0	0	0	0	0	0
	1975	345	343	2	2	0	1	1	0
	1976	393	273	120	0	120	31	0	31
	1977	264	263	1	1	0	0	0	0
	1978	248	248	0	0	0	0	0	0
	1979	293	292	1	1	0	0	0	0
	1980	276	269	6	6	0	2	2	0
	1981	294	294	0	0	0	0	0	0
	1982	352	351	1	1	0	0	0	0
MaizeD(Dijkgraaf)	2007	416	413	3	1	0	1	0	20

TABEL 6.3 REDUCTIE PERCENTAGES VOOR DE AARDAPPEL CASES

case	Jaar	Tpot	Tact	Tredtot	Tredwet	Treddry	Tredtotperc	Tredwetperc	Treddryperc
PotatoD(Borgerswold03)	1992	316	316	0	0	0	0	0	0
	1994	288	288	0	0	0	0	0	0
PotatoD(Borgerswold13)	1992	322	322	0	0	0	0	0	0
	1994	288	287	1	1	0	0	0	0
PotatoD(RusthoeveB7)	2013	324	302	21	21	0	6	7	0
PotatoD(Vredepeel26)	2002	334	334	0	0	0	0	0	0

BIJLAGE 7

EXTENDED-TAYLOR-DIAGRAMMEN

TESTGEVALLEN

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de beschikbare testgevallen. De letters in de kolom 'label' zal in dit document worden gebruikt om naar specifieke testgevallen te verwijzen.

id	case	label	soil_type	crop	location
1	GrasslandM(Ruurlo16)	a	sandy loam	GrasslandM	Ruurlo16
2	GrasslandM(Ruurlo48)	b	sandy loam	GrasslandM	Ruurlo48
3	GrasslandM(Zegveld03)	c	peat	GrasslandM	Zegveld03
4	MaizeD(Cranendonck16)	d		MaizeD	Cranendonck16
5	MaizeD(Dijkgraaf)	e	clay	MaizeD	Dijkgraaf
6	PotatoD(Borgerswold03)	f	sand	PotatoD	Borgerswold03
7	PotatoD(Borgerswold13)	g	sand	PotatoD	Borgerswold13
8	PotatoD(RusthoeveB7)	h	humic sandy	PotatoD	RusthoeveB7
9	PotatoD(Vredepeel26)	i		PotatoD	Vredepeel26

EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

In Alterra-rapporten 1951, 1952, 1953, en 1954 wordt benadrukt dat modelprestatie-maten altijd in onderlinge samenhang moeten worden bestudeerd. Het extended Taylor diagram is een grafisch hulpmiddel die dit moet faciliteren (zie onderstaande figuren).

Het extended Taylor diagram bestaat uit twee panelen. Het bovenste paneel bevat (een variant van) het Taylor diagram, het onderste paneel is een uitbreiding hierop. Alle assen zijn genormaliseerd om de testcases vergelijkbaar te maken.

Het bovenste paneel bevat een plot waarin modelresultaten zijn weergegeven als punten in een polair coördinatenstelsel.

Langs de horizontale as staat de ratio tussen de standaarddeviatie van de modelvoorspellingen en die van de waarnemingen. Dit is een maat voor de afvlakking (*smoothing*). De optimale waarde is 1 (variatie van de modelvoorspellingen is gelijk aan de variatie van de waarnemingen). Waarden kleiner dan 1 duiden op *smoothing*. Bij waarden groter dan 1 overschat het model de variatie in de waarnemingen.

Langs de gebogen as staat Pearsons correlatiecoëfficiënt. Deze geeft aan in hoeverre het model het temporele patroon in de waarnemingen kan reproduceren (1 = exact, 0 = geen overeenkomst in patroon, -1 = patroon is in tegenfase).

In de figuur zijn de volgende elementen weergegeven:

- zwarte stip (1, 1): het optimale model (hypothetische situatie)
- blauwe stippen: SWAP zonder WOFOST;
- groene stippen: SWAP met WOFOST (merk op dat blauwe en groene stippen (deels) kunnen overlappen);
- gestreepte witte cirkels: iso-lijnen die de precisie van het model weergeven (= toevallige of willekeurige fout)
- gestreepte rode curves: iso-lijnen die de model skill (0 = slecht, 1 = goed) weergeven. Dit is een poging om het Taylordiagram samen te vatten in een enkel getal.

Het nadeel van het traditionele Taylor diagram (bovenste paneel) is dat die niets zegt over de systematische fout. Deze figuur is daarom vooral bruikbaar in het geval de systematische fout bij benadering nul is (bijvoorbeeld a.g.v. kalibratie). Vandaar dat het traditionele Taylor diagram is uitgebreid met het onderste paneel. Deze geeft op de horizontale as de precisie van het model (willekeurige fout), en op de verticale as de systematische fout (bias, negatieve waarden duiden op overschatting, positieve waarden op onderschatting). De gestreepte witte ellipsen zijn iso-lijnen die de modelnauwkeurigheid weergeven (= totale fout). De gestreepte rode ellips komt overeen met een Nash-Sutcliffe modefficiëntie van 0. Voor testgevallen buiten deze ellips heeft het model geen meerwaarde t.o.v. het gemiddelde van de waarnemingen als voorspeller.

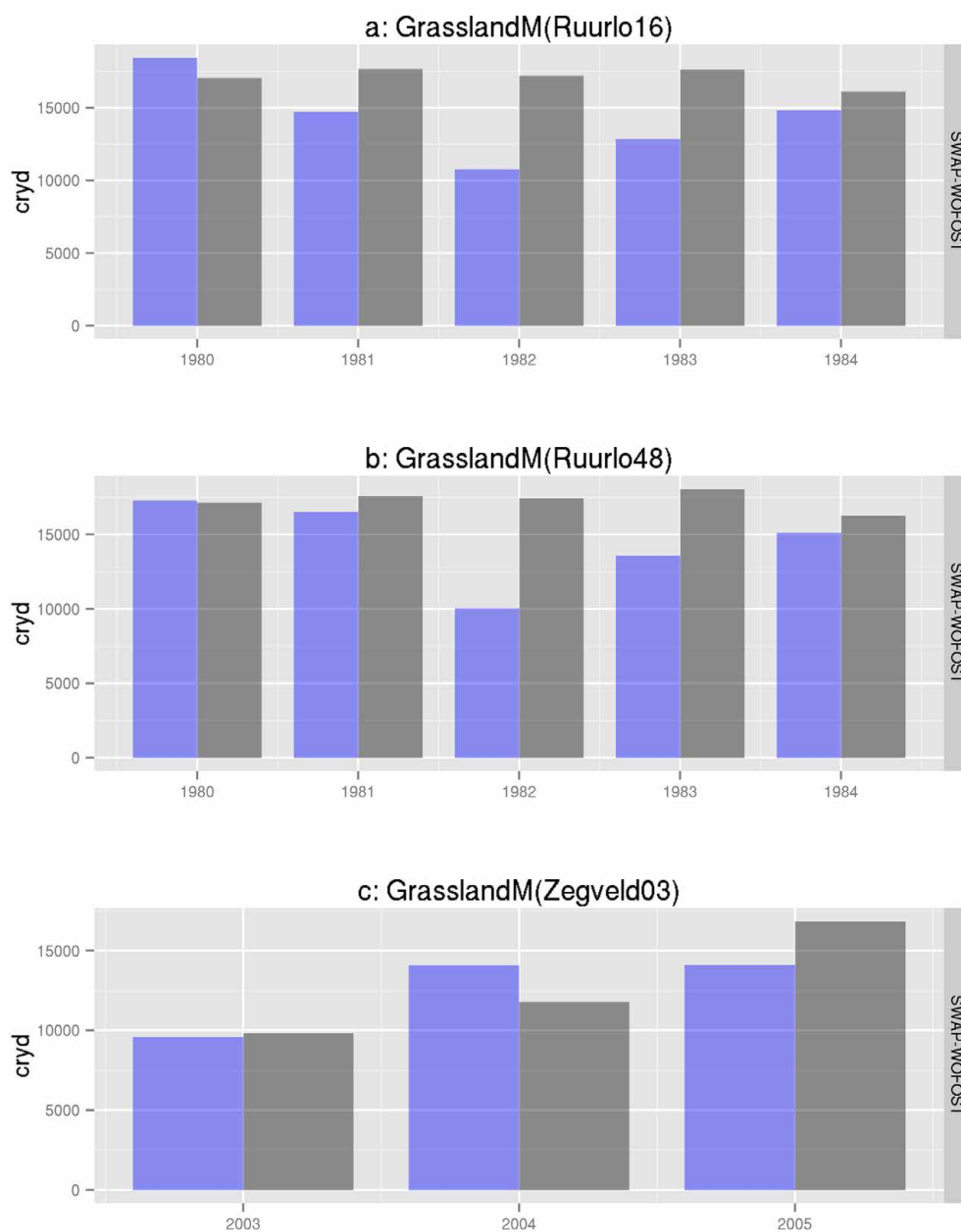
Zie Alterra-rapporten 1951, 1952, 1953, 1954 voor meer informatie over het extended Taylor diagram.

MODELPRESTATIES VAN INDIVIDUELE EIGENSCHAPPEN

EIGENSCHAP 'CRYD'

Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'cryd'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaargemiddelden zijn gegeven als bar plots, daggemiddelden en continue data als punten en lijnen.



MODELPRESTATIESTATISTIEKEN

Onderstaande tabel geeft een aantal modelprestatie-statistieken:

- ME: mean error (0 is optimaal);
- sigma_e: standaarddeviatie van de fout (0 is optimaal)
- MAE: mean absolute error (≥ 0 , 0 is optimaal, vergelijkbaar met RMSE, maar minder gevoelig voor extreme waarden);
- RMSE: root mean square error (≥ 0 , 0 is optimaal);
- ModEff: Nash-Sutcliffe model efficiency (≤ 1 , 1 is optimaal);
- rho: Pearsons lineaire correlatie ($[-1, 1]$, 1 is optimaal);
- n: aantal waarnemingen, grotere waarden geven betrouwbaarder statistieken.

model	label	case	observed_mean	ME	sigma_e	MAE	RMSE	ModEff	rho	n
SWAP-WOFOST	a	GrasslandM(Ruurlo16)	14317.80	-2803.40	2726.85	3365.40	3910.85	-1.38	-0.24	5
SWAP-WOFOST	b	GrasslandM(Ruurlo48)	14508.40	-2782.00	2756.91	2842.80	3916.64	-1.34	-0.23	5
SWAP-WOFOST	c	GrasslandM(Zegveld03)	12577.00	-227.67	2037.57	1737.67	2050.25	0.06	0.72	3

EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

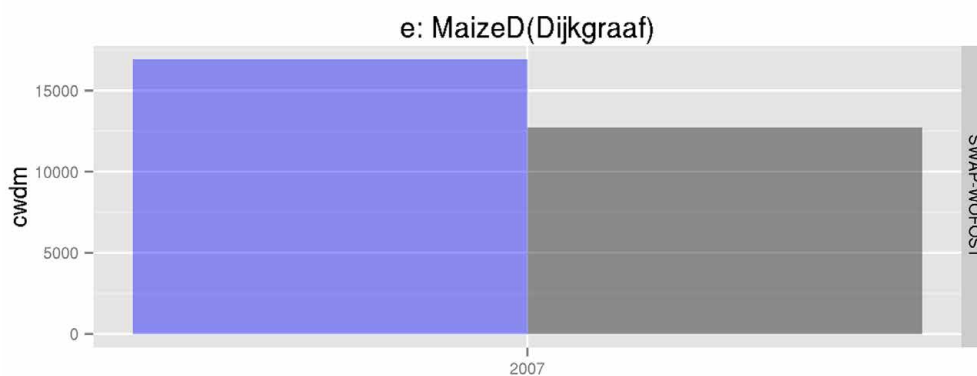
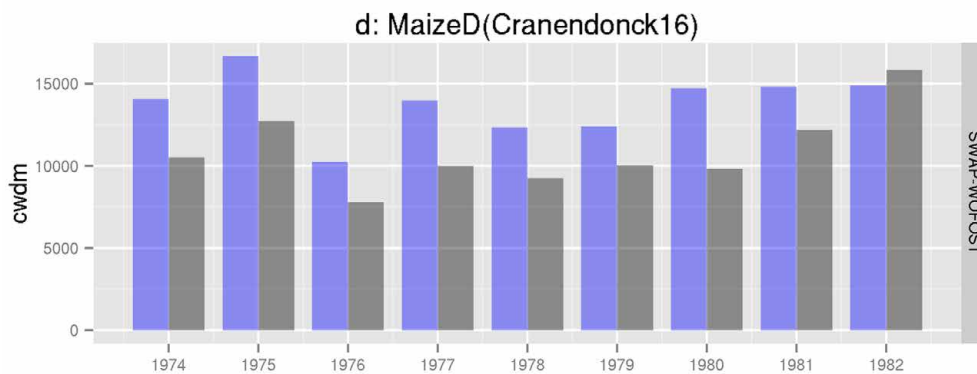
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram voor 'cryd'. Alleen testgevallen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven.

Onvoldoende gegevens om betrouwbare statistieken te plotten

EIGENSCHAP 'CWDM'

Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'cwdm'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaargemiddelden zijn gegeven als bar plots, daggemiddelden en continue data als punten en lijnen.



MODELPRESTATIESTATISTIEKEN

Onderstaande tabel geeft een aantal modelprestatie-statistieken:

- ME: mean error (0 is optimaal);
- sigma_e: standaarddeviatie van de fout (0 is optimaal)
- MAE: mean absolute error (≥ 0 , 0 is optimaal, vergelijkbaar met RMSE, maar minder gevoelig voor extreme waarden);
- RMSE: root mean square error (≥ 0 , 0 is optimaal);
- ModEff: Nash-Sutcliffe model efficiency (≤ 1 , 1 is optimaal);
- rho: Pearsons lineaire correlatie ($[-1, 1]$, 1 is optimaal);
- n: aantal waarnemingen, grotere waarden geven betrouwbaarder statistieken.

model	label	case	observed_mean	ME	sigma_e	MAE	RMSE	ModEff	rho	n
SWAP-WOFOST	d	MaizeD(Cranendonck16)	13787.78	2881.44	1560.59	3089.00	3276.92	-2.43	0.72	9
SWAP-WOFOST	e	MaizeD(Dijkgraaf)	16922.00	4182.00	0.00	4182.00	4182.00	-Inf		1

EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

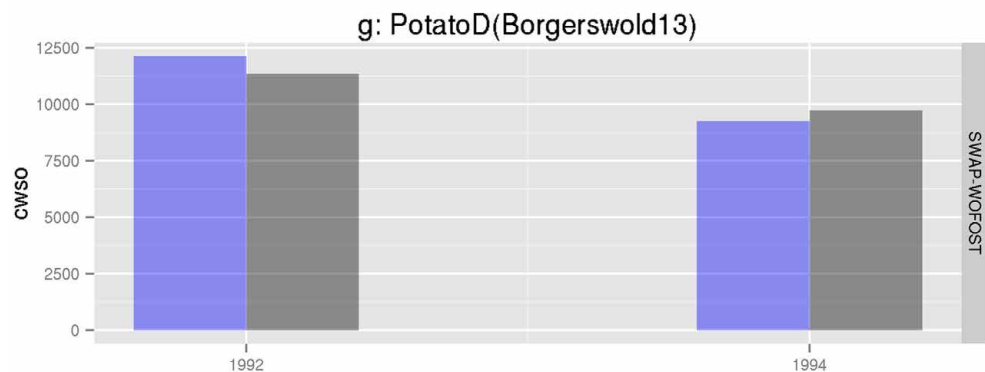
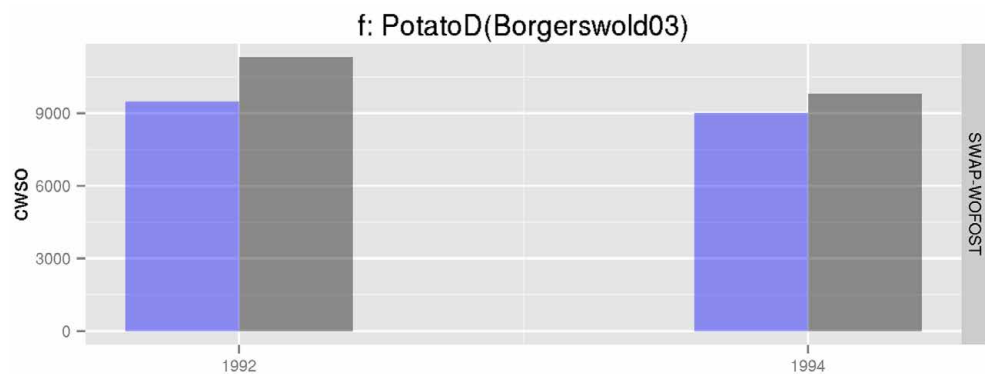
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram voor 'cwdm'. Alleen testgevallen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven.

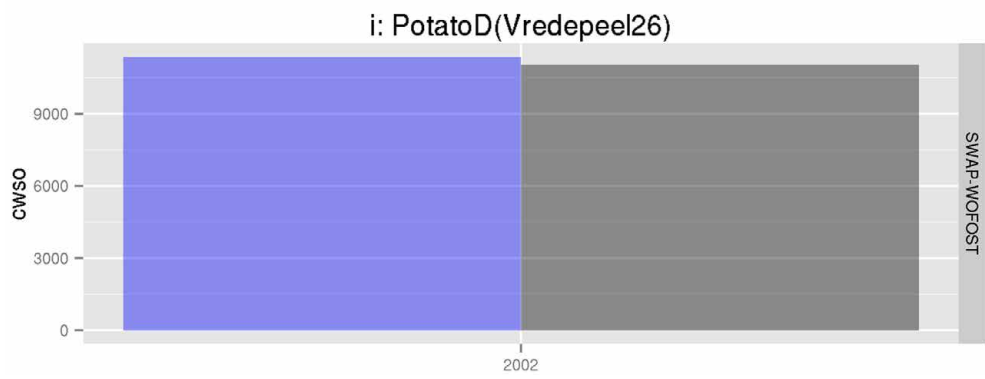
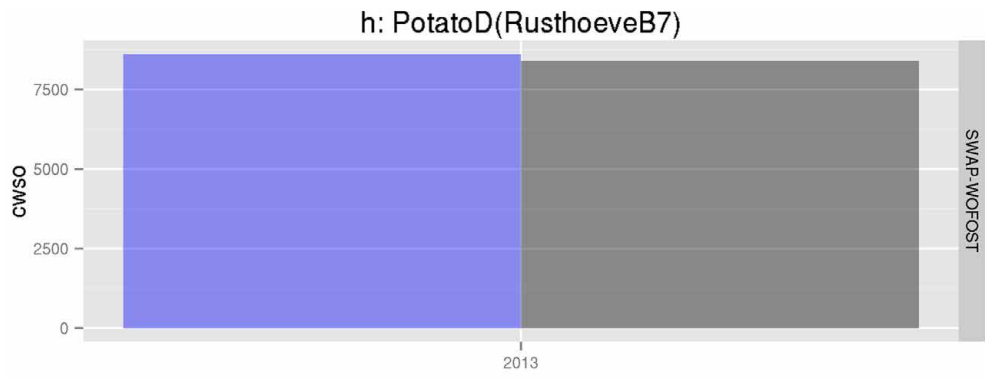
Onvoldoende gegevens om betrouwbare statistieken te plotten

EIGENSCHAP 'CWSO'

Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'cwsow'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaargemiddelden zijn gegeven als bar plots, daggemiddelden en continue data als punten en lijnen.





MODELPRESTATIESTATISTIEKEN

Onderstaande tabel geeft een aantal modelprestatie-statistieken:

- ME: mean error (0 is optimaal);
- sigma_e: standaarddeviatie van de fout (0 is optimaal)
- MAE: mean absolute error (≥ 0 , 0 is optimaal, vergelijkbaar met RMSE, maar minder gevoelig voor extreme waarden);
- RMSE: root mean square error (≥ 0 , 0 is optimaal);
- ModEff: Nash-Sutcliffe model efficiency (≤ 1 , 1 is optimaal);
- rho: Pearsons lineaire correlatie ($[-1, 1]$, 1 is optimaal);
- n: aantal waarnemingen, grotere waarden geven betrouwbaarder statistieken.

model	label	case	observed_mean	ME	sigma_e	MAE	RMSE	ModEff	rho	n
SWAP-WOFOST	f	PotatoD(Borgerswold03)	9246.44	-1317.56	512.44	1317.56	1413.70	-35.02	1.00	2
SWAP-WOFOST	g	PotatoD(Borgerswold13)	10690.87	150.37	627.63	627.63	645.39	0.80	1.00	2
SWAP-WOFOST	h	PotatoD(RusthoeveB7)	8610.00	200.00	0.00	200.00	200.00	-Inf		1
SWAP-WOFOST	i	PotatoD(Vredepeel26)	11359.00	326.00	0.00	326.00	326.00	-Inf		1

EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

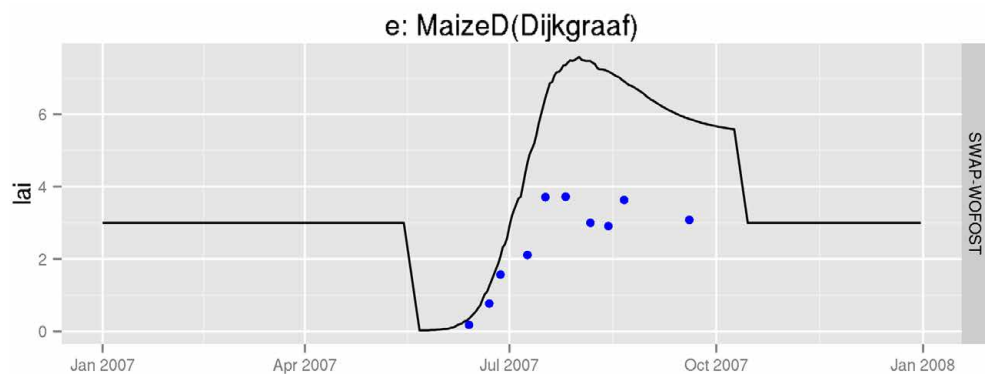
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram voor 'cwso'. Alleen testgevallen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven.

Onvoldoende gegevens om betrouwbare statistieken te plotten

EIGENSCHAP 'LAI'

Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'lai'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaargemiddelden zijn gegeven als bar plots, daggemiddelden en continue data als punten en lijnen.



MODELPRESTATIESTATISTIEKEN

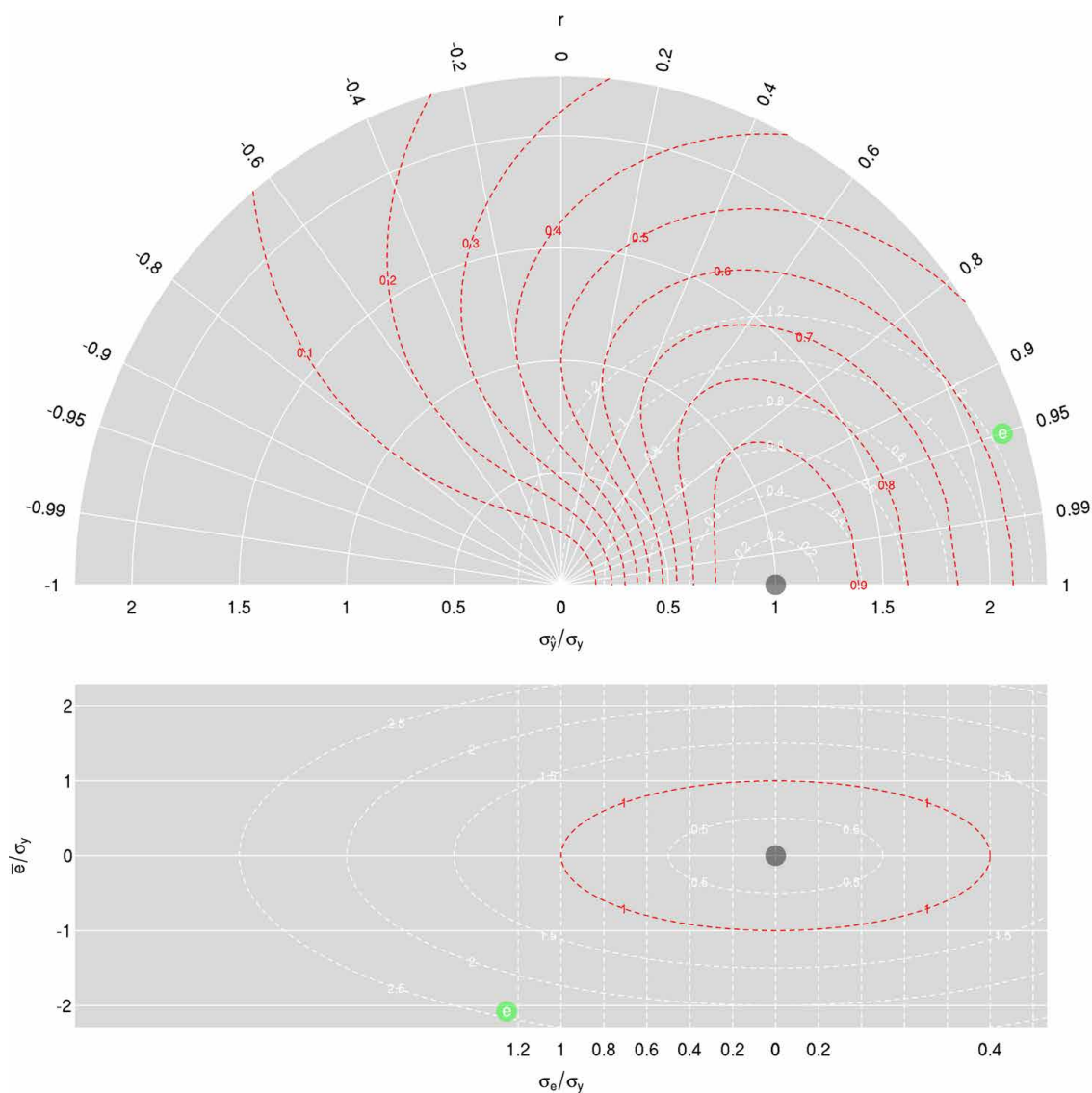
Onderstaande tabel geeft een aantal modelprestatie-statistieken:

- ME: mean error (0 is optimaal);
- sigma_e: standaarddeviatie van de fout (0 is optimaal)
- MAE: mean absolute error (≥ 0 , 0 is optimaal, vergelijkbaar met RMSE, maar minder gevoelig voor extreme waarden);
- RMSE: root mean square error (≥ 0 , 0 is optimaal);
- ModEff: Nash-Sutcliffe model efficiency (≤ 1 , 1 is optimaal);
- rho: Pearsons lineaire correlatie ($[-1, 1]$, 1 is optimaal);
- n: aantal waarnemingen, grotere waarden geven betrouwbaarder statistieken.

model	label	case	observed_mean	ME	sigma_e	MAE	RMSE	ModEff	rho	n
SWAP-WOFOST	e	MaizeD(Dijkgraaf)	2.47	-2.49	1.50	2.49	2.91	-4.89	0.95	10

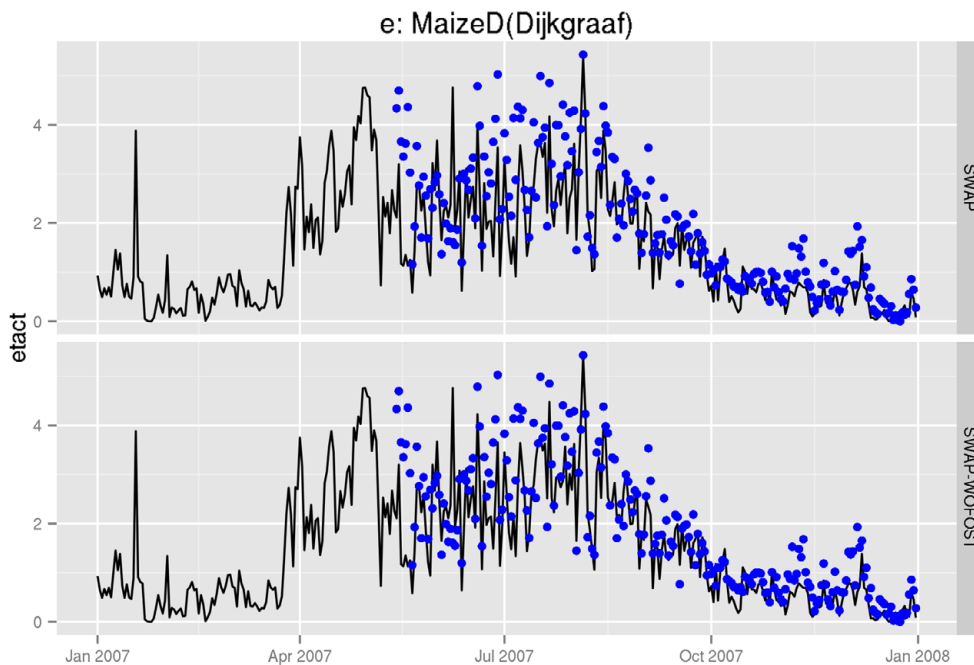
EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram voor 'lai'. Alleen testgevallen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven.



EIGENSCHAP 'ETACT'*Tijdreeksen*

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'etact'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaargemiddelden zijn gegeven als bar plots, daggemiddelden en continue data als punten en lijnen.



MODELPRESTATIESTATISTIEKEN

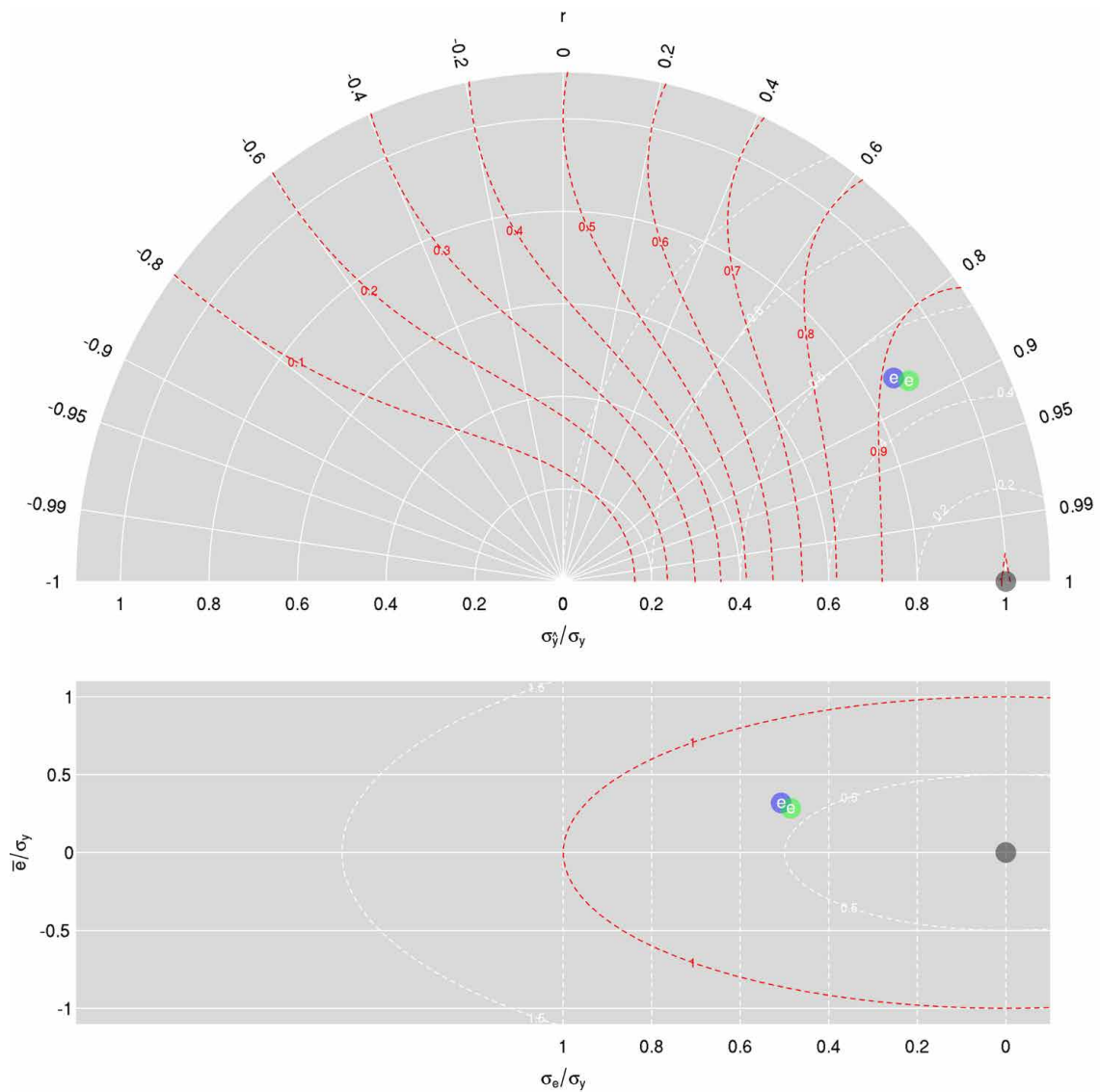
Onderstaande tabel geeft een aantal modelprestatie-statistieken:

- ME: mean error (0 is optimaal);
- sigma_e: standaarddeviatie van de fout (0 is optimaal)
- MAE: mean absolute error (≥ 0 , 0 is optimaal, vergelijkbaar met RMSE, maar minder gevoelig voor extreme waarden);
- RMSE: root mean square error (≥ 0 , 0 is optimaal);
- ModEff: Nash-Sutcliffe model efficiency (≤ 1 , 1 is optimaal);
- rho: Pearson's lineaire correlatie ($[-1, 1]$, 1 is optimaal);
- n: aantal waarnemingen, grotere waarden geven betrouwbaarder statistieken.

observed_mean	ME	sigma_e	MAE	RMSE	ModEff	rho	n
1.93	0.41	0.65	0.54	0.77	0.64	0.86	232
1.93	0.37	0.63	0.50	0.73	0.68	0.87	232

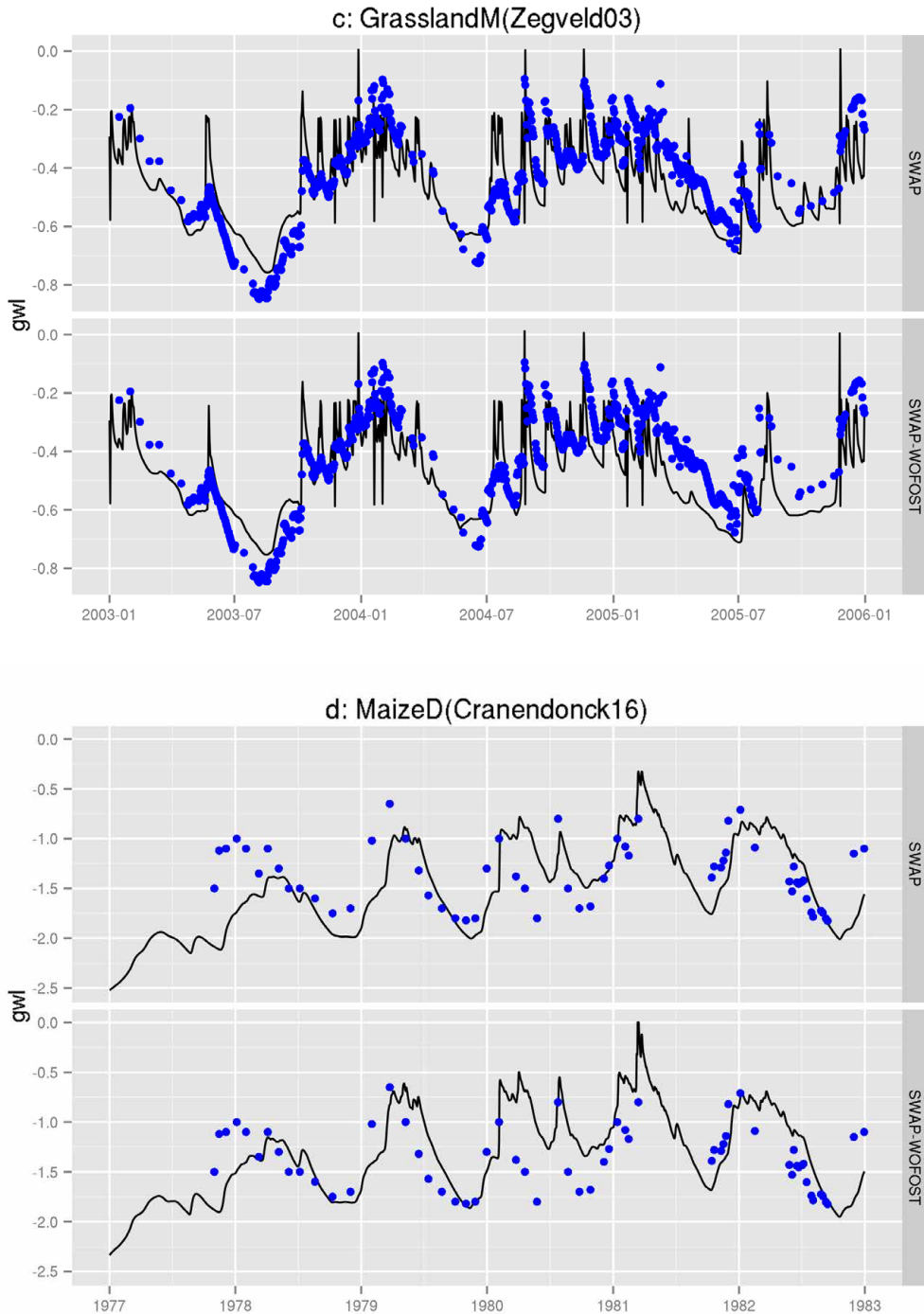
EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

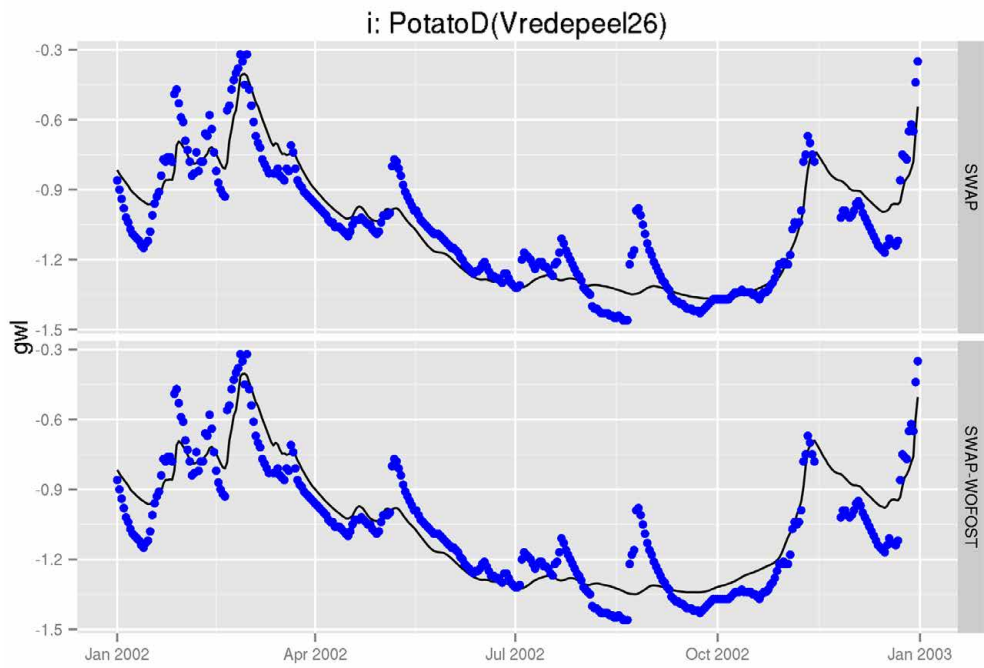
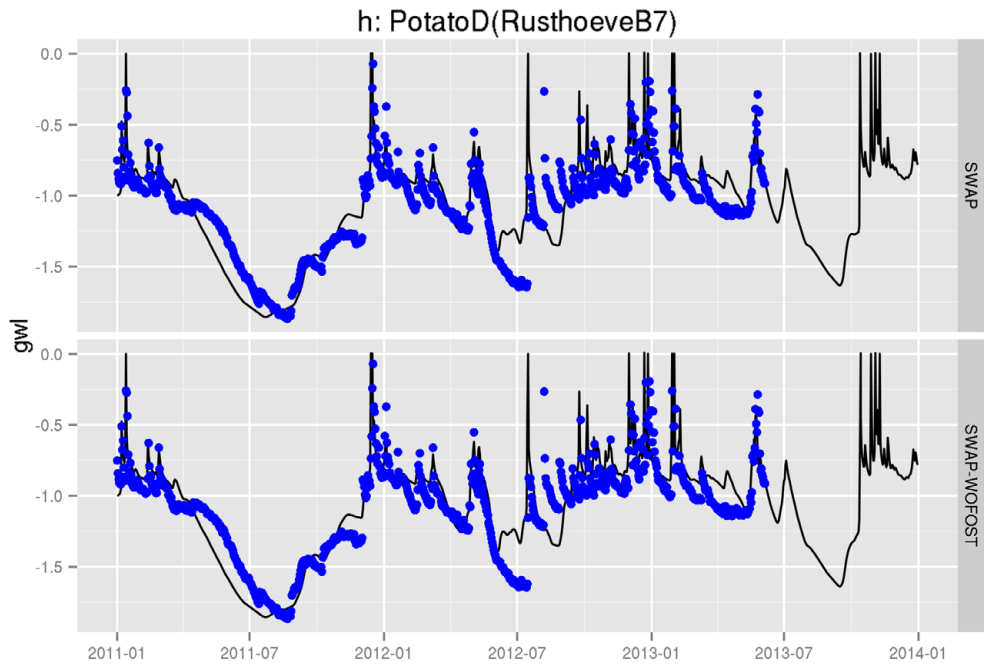
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram voor 'etact'. Alleen testgevallen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven.



EIGENSCHAP 'GWL'*Tijdreeksen*

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'gwl'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaargemiddelden zijn gegeven als bar plots, daggemiddelden en continue data als punten en lijnen.





MODELPRESTATIESTATISTIEKEN

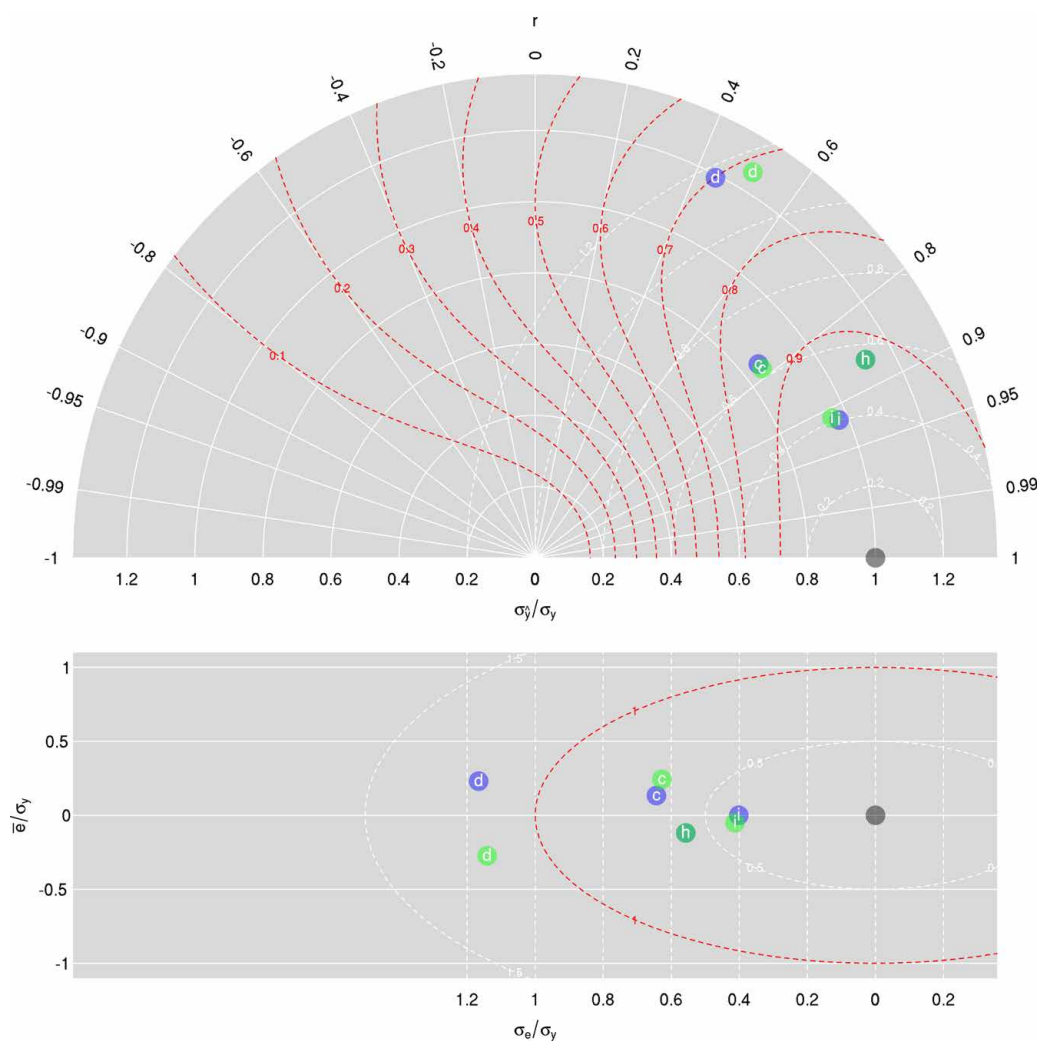
Onderstaande tabel geeft een aantal modelprestatie-statistieken:

- ME: mean error (0 is optimaal);
- σ_e : standaarddeviatie van de fout (0 is optimaal)
- MAE: mean absolute error (≥ 0 , 0 is optimaal, vergelijkbaar met RMSE, maar minder gevoelig voor extreme waarden);
- RMSE: root mean square error (≥ 0 , 0 is optimaal);
- ModEff: Nash-Sutcliffe model efficiency (≤ 1 , 1 is optimaal);
- rho: Pearsons lineaire correlatie ($[-1, 1]$, 1 is optimaal);
- n: aantal waarnemingen, grotere waarden geven betrouwbaarder statistieken.

model	label	case	observed_mean	ME	sigma_e	MAE	RMSE	ModEff	rho	n
SWAP	c	GrasslandM(Zegveld03)	-0.43	0.02	0.11	0.09	0.11	0.57	0.77	735
SWAP-WOFOST	c	GrasslandM(Zegveld03)	-0.43	0.04	0.11	0.09	0.12	0.55	0.78	735
SWAP	d	MaizeD(Cranendonck16)	-1.36	0.07	0.36	0.30	0.37	-0.41	0.44	61
SWAP-WOFOST	d	MaizeD(Cranendonck16)	-1.36	-0.08	0.35	0.30	0.36	-0.38	0.51	61
SWAP	h	PotatoD(RusthoeveB7)	-1.10	-0.04	0.18	0.14	0.18	0.68	0.87	887
SWAP-WOFOST	h	PotatoD(RusthoeveB7)	-1.10	-0.04	0.18	0.14	0.18	0.68	0.87	887
SWAP	i	PotatoD(Vredepeel26)	-1.07	0.00	0.10	0.08	0.10	0.84	0.92	353
SWAP-WOFOST	i	PotatoD(Vredepeel26)	-1.07	-0.01	0.11	0.09	0.11	0.83	0.91	353

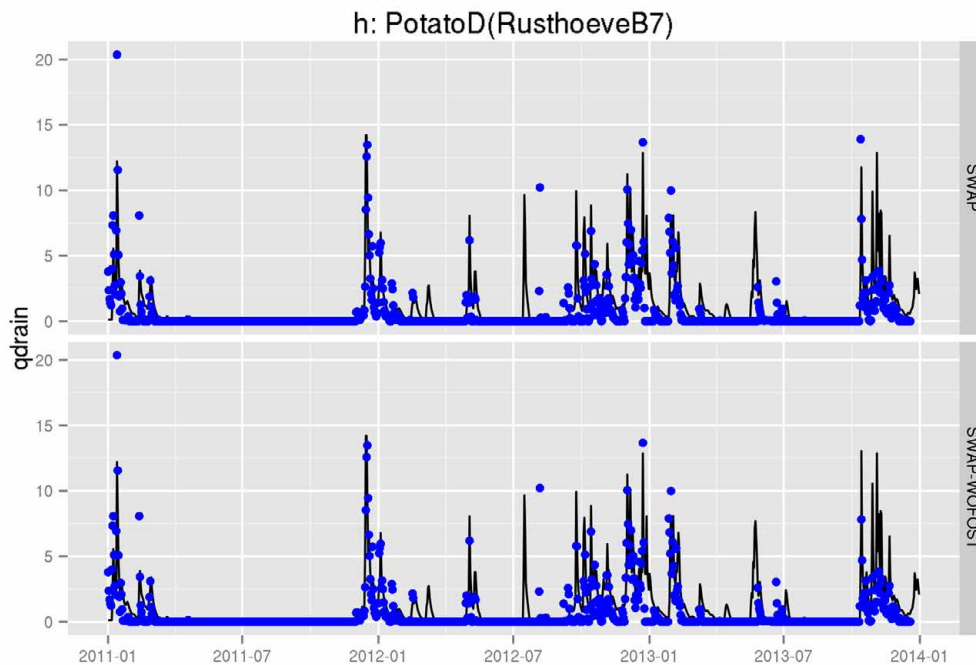
EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram voor 'gw1'. Alleen testgevallen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven.



EIGENSCHAP 'QDRAIN'*Tijdreeksen*

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'qdrain'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaargemiddelden zijn gegeven als bar plots, daggemiddelden en continue data als punten en lijnen.



MODELPRESTATIESTATISTIEKEN

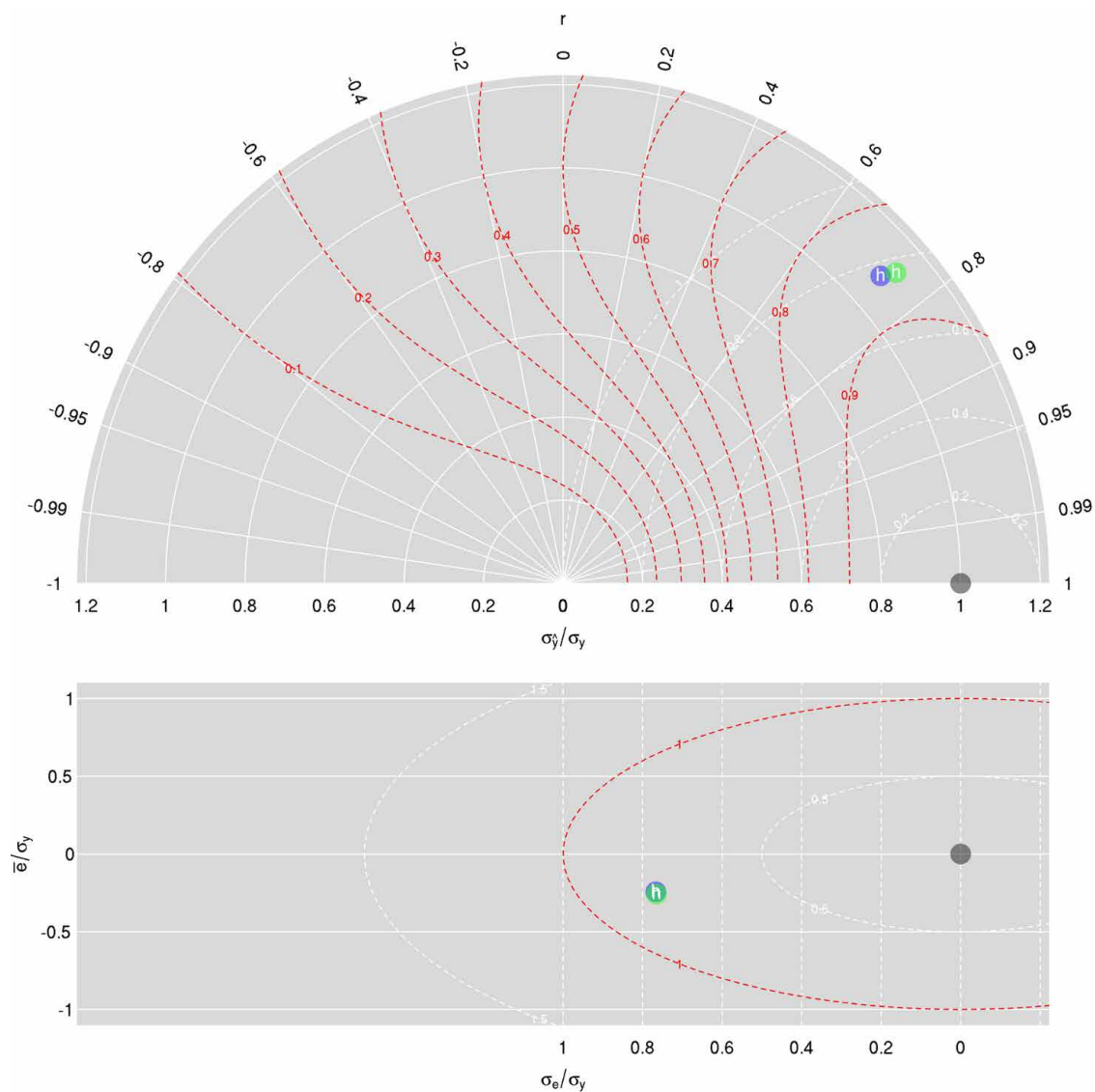
Onderstaande tabel geeft een aantal modelprestatie-statistieken:

- ME: mean error (0 is optimaal);
- sigma_e: standaarddeviatie van de fout (0 is optimaal)
- MAE: mean absolute error (≥ 0 , 0 is optimaal, vergelijkbaar met RMSE, maar minder gevoelig voor extreme waarden);
- RMSE: root mean square error (≥ 0 , 0 is optimaal);
- ModEff: Nash-Sutcliffe model efficiency (≤ 1 , 1 is optimaal);
- rho: Pearsons lineaire correlatie ($[-1, 1]$, 1 is optimaal);
- n: aantal waarnemingen, grotere waarden geven betrouwbaarder statistieken.

model	label	case	observed_mean	ME	sigma_e	MAE	RMSE	ModEff	rho	n
SWAP	h	PotatoD(RusthoeveB7)	0.62	-0.43	1.34	0.68	1.41	0.35	0.73	1084
SWAP-WOFOST	h	PotatoD(RusthoeveB7)	0.61	-0.44	1.31	0.68	1.39	0.35	0.75	1084

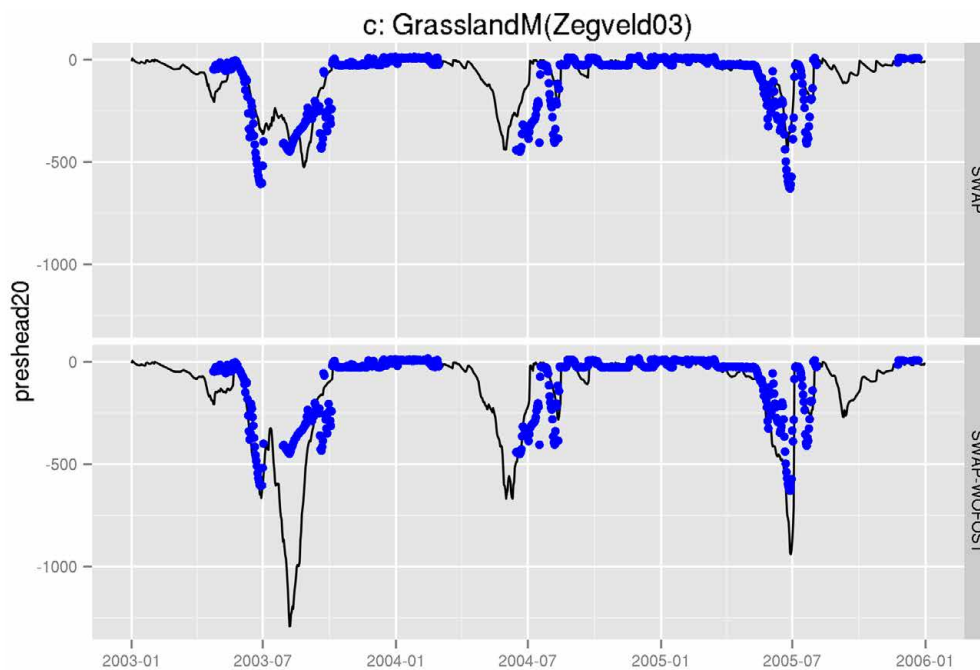
EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram voor 'qdrain'. Alleen testgevallen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven.



EIGENSCHAP 'PRESHEAD20'*Tijdreeksen*

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'preshead20'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaargemiddelden zijn gegeven als bar plots, daggemiddelden en continue data als punten en lijnen.



MODELPRESTATIESTATISTIEKEN

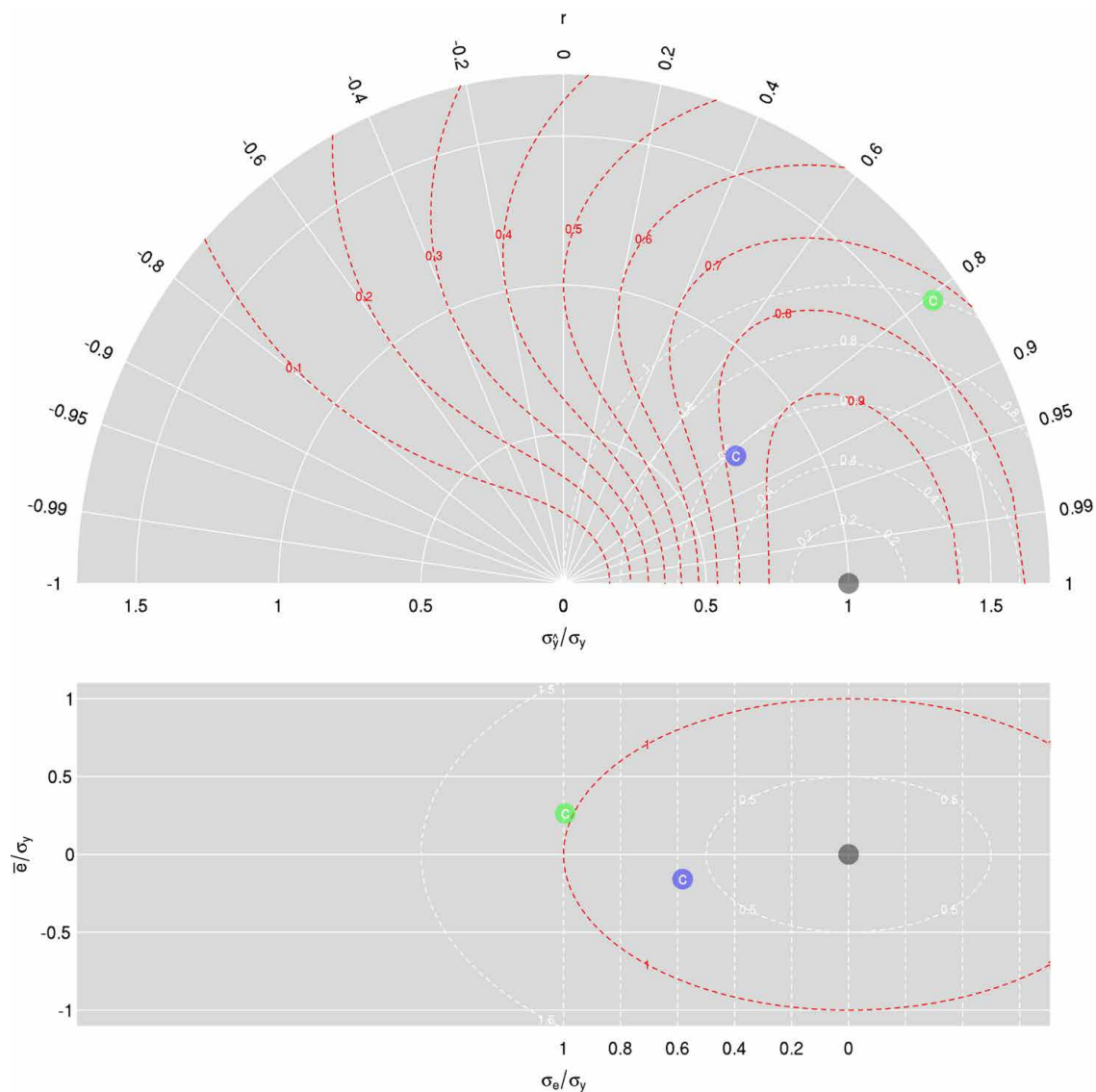
Onderstaande tabel geeft een aantal modelprestatie-statistieken:

- ME: mean error (0 is optimaal);
- sigma_e: standaarddeviatie van de fout (0 is optimaal)
- MAE: mean absolute error (≥ 0 , 0 is optimaal, vergelijkbaar met RMSE, maar minder gevoelig voor extreme waarden);
- RMSE: root mean square error (≥ 0 , 0 is optimaal);
- ModEff: Nash-Sutcliffe model efficiency (≤ 1 , 1 is optimaal);
- rho: Pearsons lineaire correlatie ($[-1, 1]$, 1 is optimaal);
- n: aantal waarnemingen, grotere waarden geven betrouwbaarder statistieken.

model	label	case	observed_mean	ME	sigma_e	MAE	RMSE	ModEff	rho	n
SWAP	c	GrasslandM(Zegveld03)	-100.82	-24.37	89.54	52.49	92.79	0.64	0.82	718
SWAP-WOFOST	c	GrasslandM(Zegveld03)	-100.82	40.36	152.88	75.27	158.12	-0.06	0.81	718

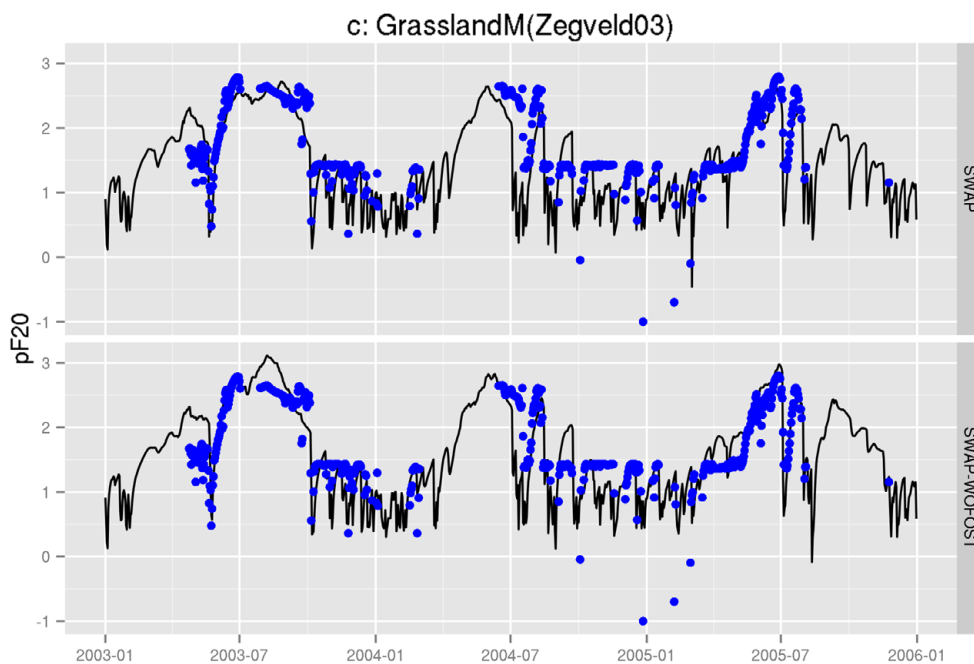
EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram voor 'preshead20'. Alleen testgevallen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven.



EIGENSCHAP 'PF20'*Tijdreeksen*

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'pF20'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaargemiddelden zijn gegeven als bar plots, daggemiddelden en continue data als punten en lijnen.



MODELPRESTATIESTATISTIEKEN

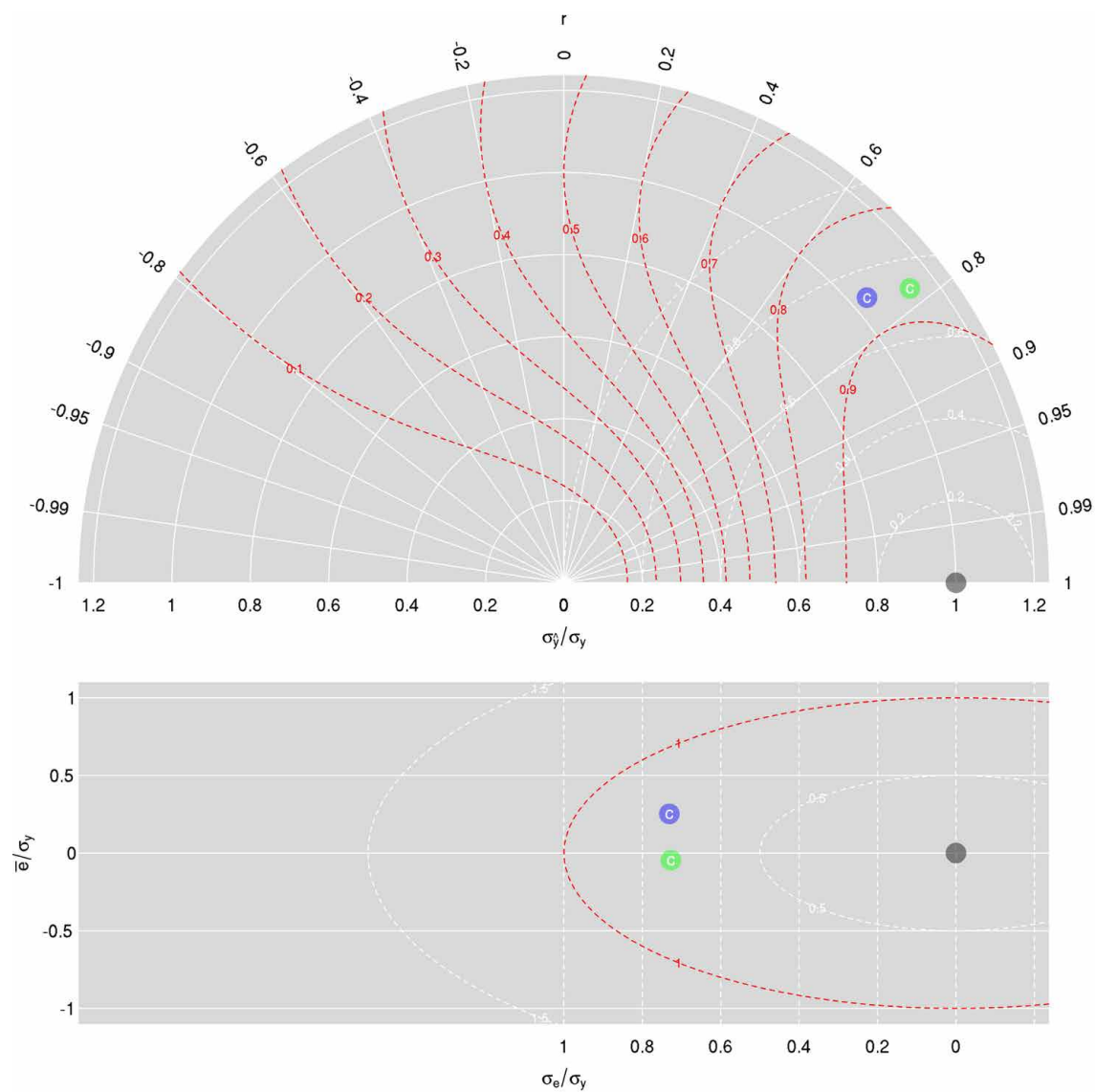
Onderstaande tabel geeft een aantal modelprestatie-statistieken:

- ME: mean error (0 is optimaal);
- sigma_e: standaarddeviatie van de fout (0 is optimaal)
- MAE: mean absolute error (≥ 0 , 0 is optimaal, vergelijkbaar met RMSE, maar minder gevoelig voor extreme waarden);
- RMSE: root mean square error (≥ 0 , 0 is optimaal);
- ModEff: Nash-Sutcliffe model efficiency (≤ 1 , 1 is optimaal);
- rho: Pearsons lineaire correlatie ($[-1, 1]$, 1 is optimaal);
- n: aantal waarnemingen, grotere waarden geven betrouwbaarder statistieken.

model	label	case	observed_mean	ME	sigma_e	MAE	RMSE	ModEff	rho	n
SWAP	c	GrasslandM(Zegveld03)	1.78	0.15	0.44	0.33	0.47	0.40	0.74	532
SWAP-WOFOST	c	GrasslandM(Zegveld03)	1.78	-0.03	0.44	0.33	0.44	0.47	0.78	532

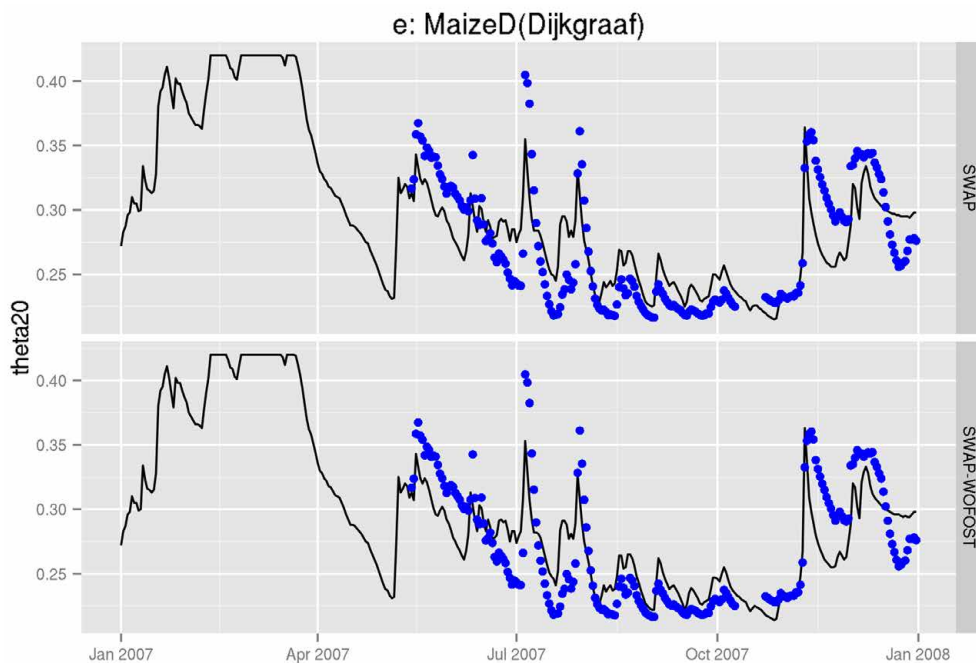
EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram voor 'pF20'. Alleen testgevallen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven.



EIGENSCHAP 'THETA20'*Tijdreeksen*

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'theta20'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaargemiddelden zijn gegeven als bar plots, daggemiddelden en continue data als punten en lijnen.



MODELPRESTATIESTATISTIEKEN

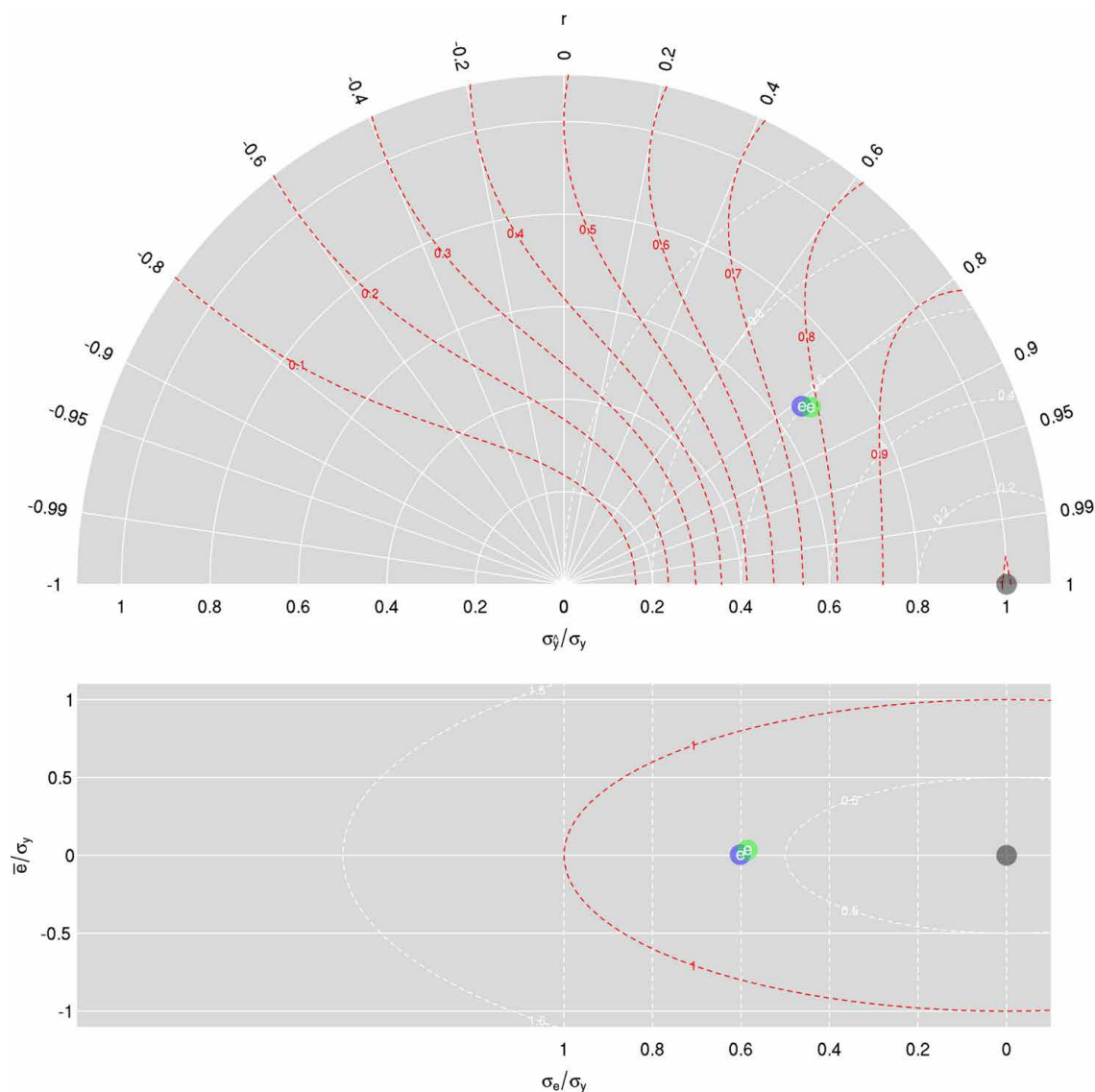
Onderstaande tabel geeft een aantal modelprestatie-statistieken:

- ME: mean error (0 is optimaal);
- sigma_e: standaarddeviatie van de fout (0 is optimaal)
- MAE: mean absolute error (≥ 0 , 0 is optimaal, vergelijkbaar met RMSE, maar minder gevoelig voor extreme waarden);
- RMSE: root mean square error (≥ 0 , 0 is optimaal);
- ModEff: Nash-Sutcliffe model efficiency (≤ 1 , 1 is optimaal);
- rho: Pearsons lineaire correlatie ($[-1, 1]$, 1 is optimaal);
- n: aantal waarnemingen, grotere waarden geven betrouwbaarder statistieken.

model	label	case	observed_mean	ME	sigma_e	MAE	RMSE	ModEff	rho	n
SWAP	e	MaizeD(Dijkgraaf)	0.27	0.00	0.03	0.02	0.03	0.64	0.81	219
SWAP-WOFOST	e	MaizeD(Dijkgraaf)	0.27	0.00	0.03	0.02	0.03	0.66	0.82	219

EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram voor 'theta20'. Alleen testgevallen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven.



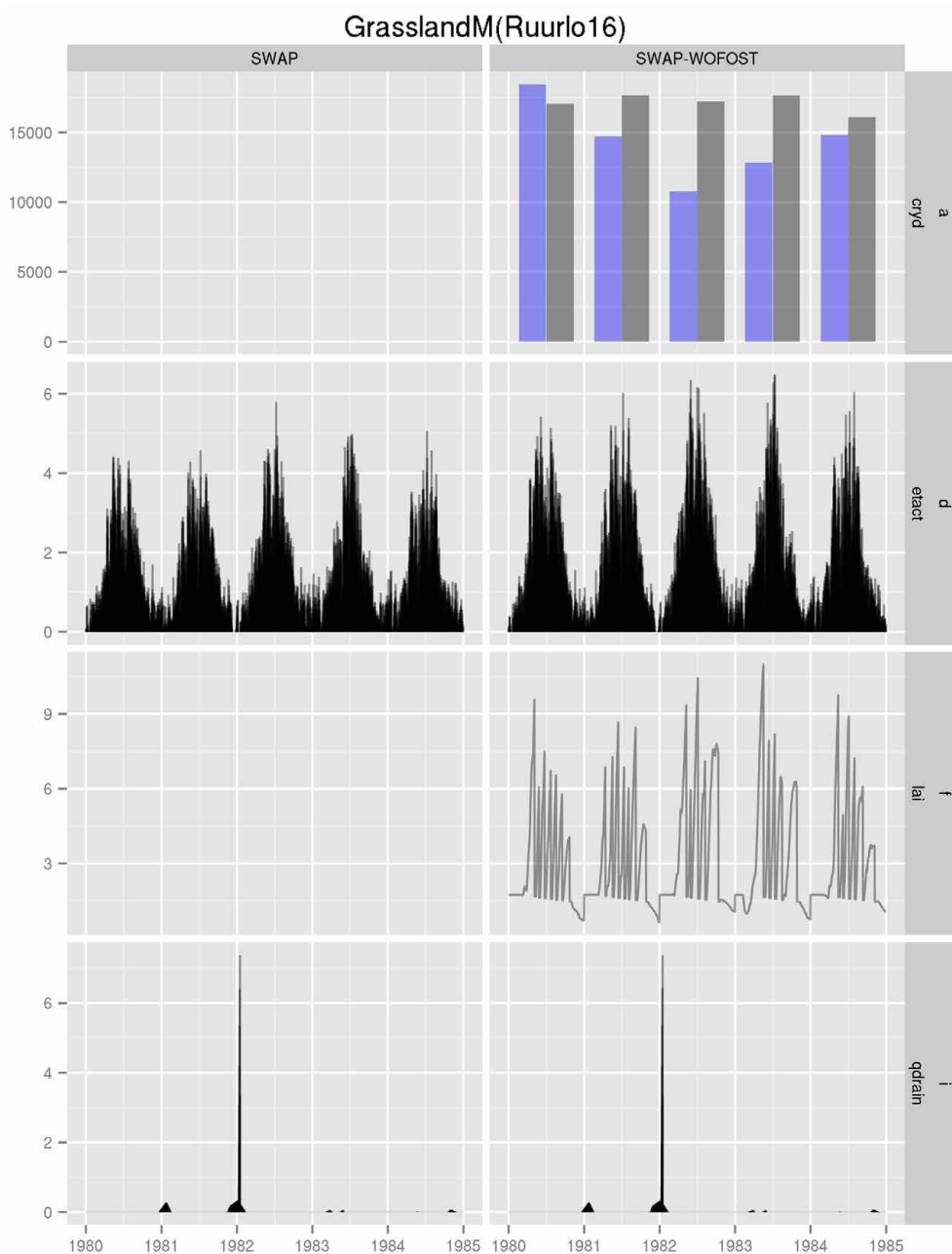
MODELPRESTATIES VAN INDIVIDUELE TESTGEVALLEN

In onderstaande hoofdstukken wordt per testgeval de gesimuleerde tijdreeksen met de waarnemingen vergeleken.

TESTGEVAL 'GRASSLANDM(RUURL016)'

Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'GrasslandM(Ruurlo16)'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaar- en daggemiddelden zijn gegeven als bar plots en continue gegevens als punten en lijnen.



EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

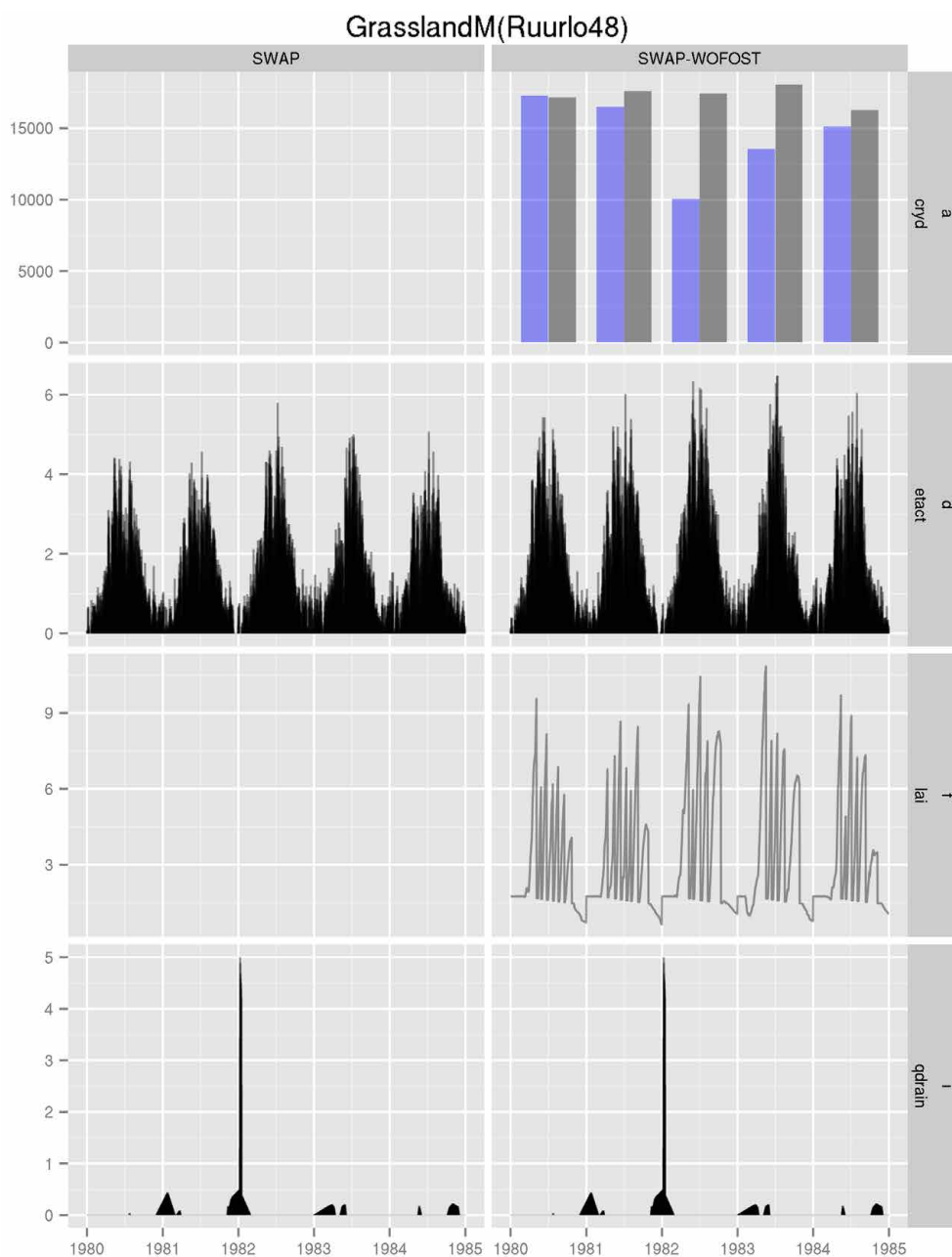
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram weer voor testgeval 'GrasslandM (Ruurlo16)'. Alleen toestandsvariabelen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven. De symbolen in het extended Taylor diagram corresponderen met de symbolen in het linker paneel van de tijdreeksen hierboven.

Onvoldoende gegevens om betrouwbare statistieken te plotten

TESTGEVAL 'GRASSLANDM(RUURLO48)'

Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'GrasslandM(Ruurlo48)'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaar- en daggemiddelden zijn gegeven als bar plots en continue gegevens als punten en lijnen.



EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

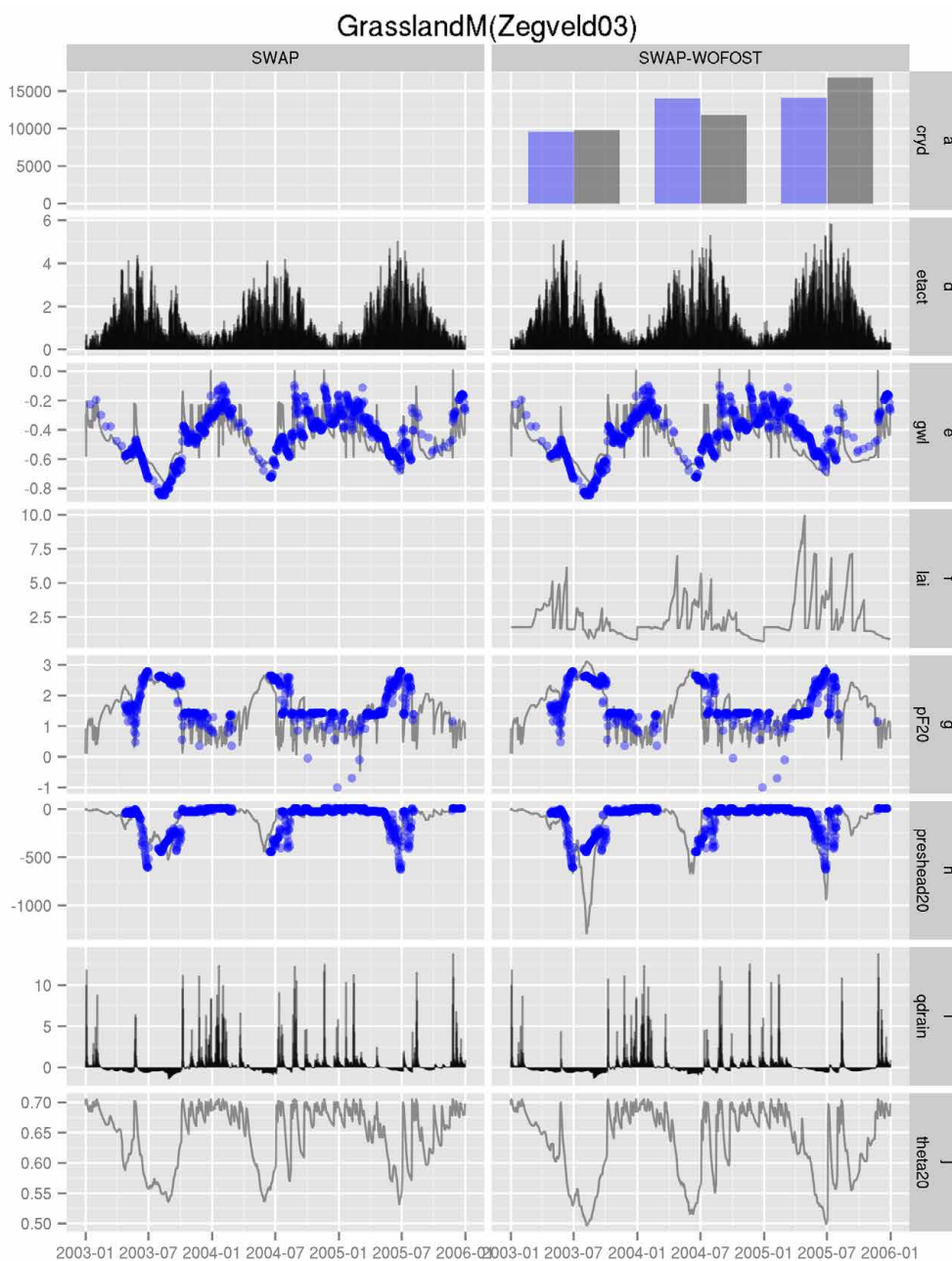
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram weer voor testgeval 'GrasslandM(Ruurlo48)'. Alleen toestandsvariabelen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven. De symbolen in het extended Taylor diagram corresponderen met de symbolen in het linker paneel van de tijdreeksen hierboven.

Onvoldoende gegevens om betrouwbare statistieken te plotten

TESTGEVAL 'GRASSLANDM(ZEGVELD03)'

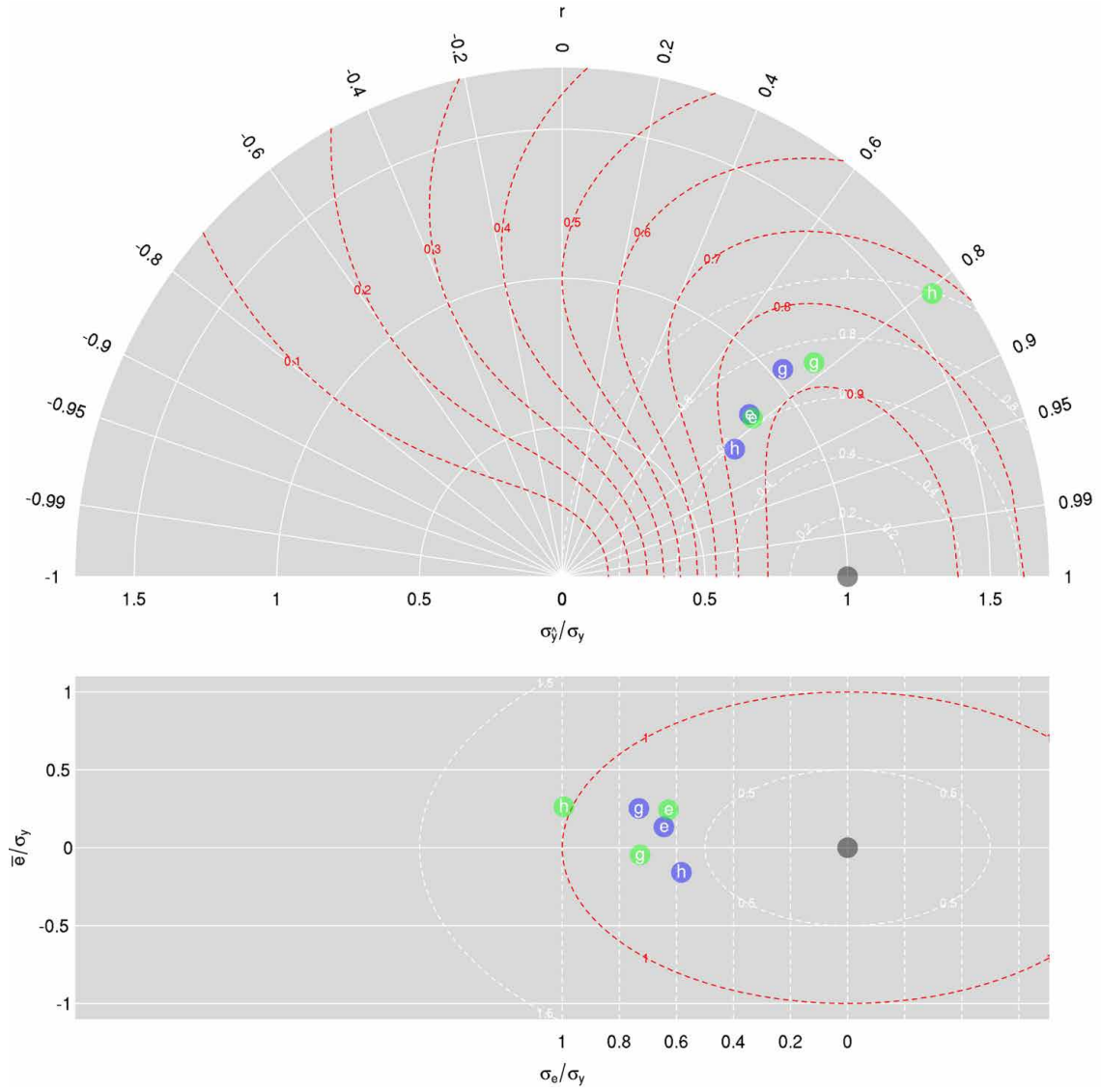
Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'GrasslandM(Zegveld03)'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaar- en daggemiddelden zijn gegeven als bar plots en continue gegevens als punten en lijnen.



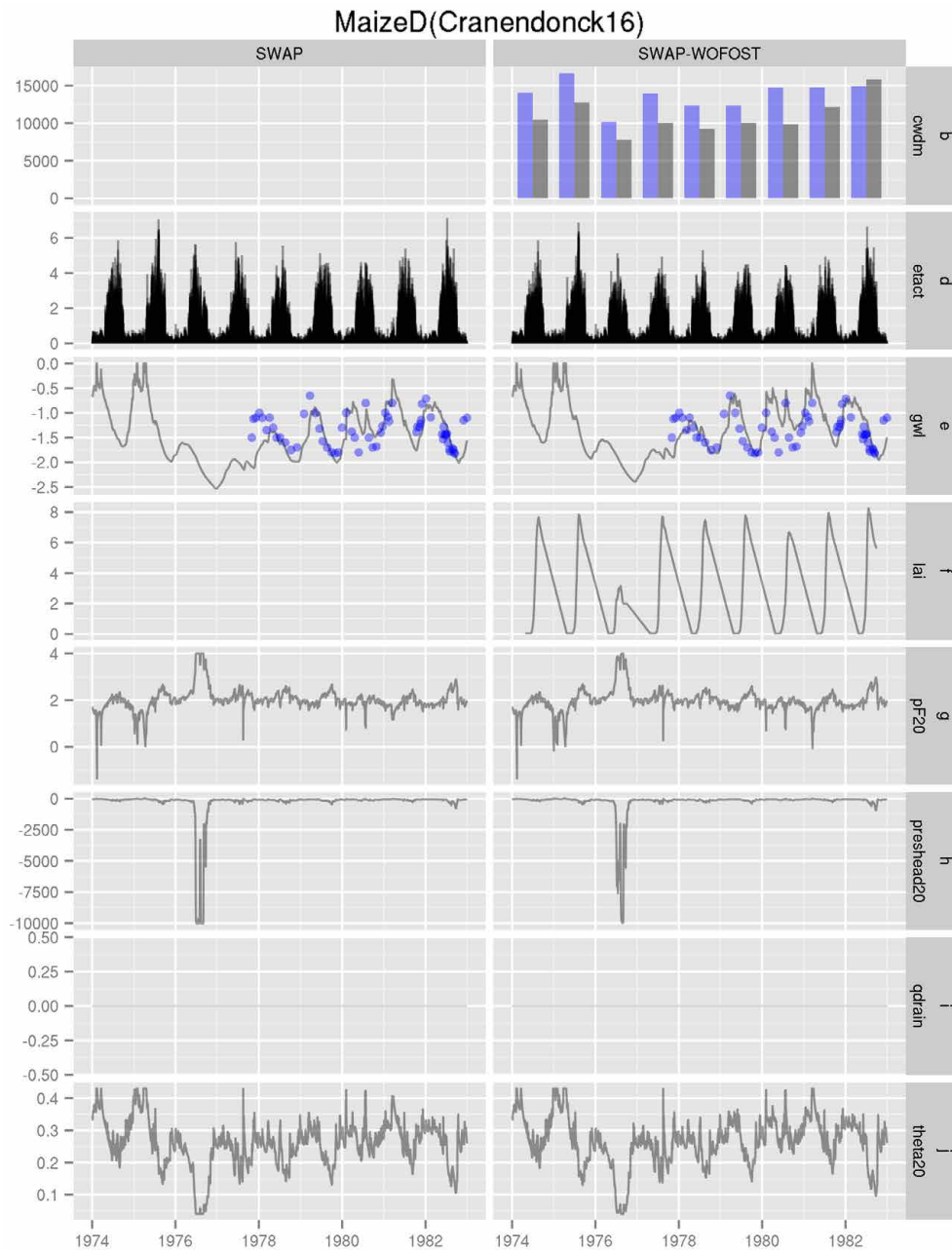
EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram weer voor testgeval 'GrasslandM (Zegveld03)'. Alleen toestandsvariabelen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven. De symbolen in het extended Taylor diagram corresponderen met de symbolen in het linker paneel van de tijdreeksen hierboven.



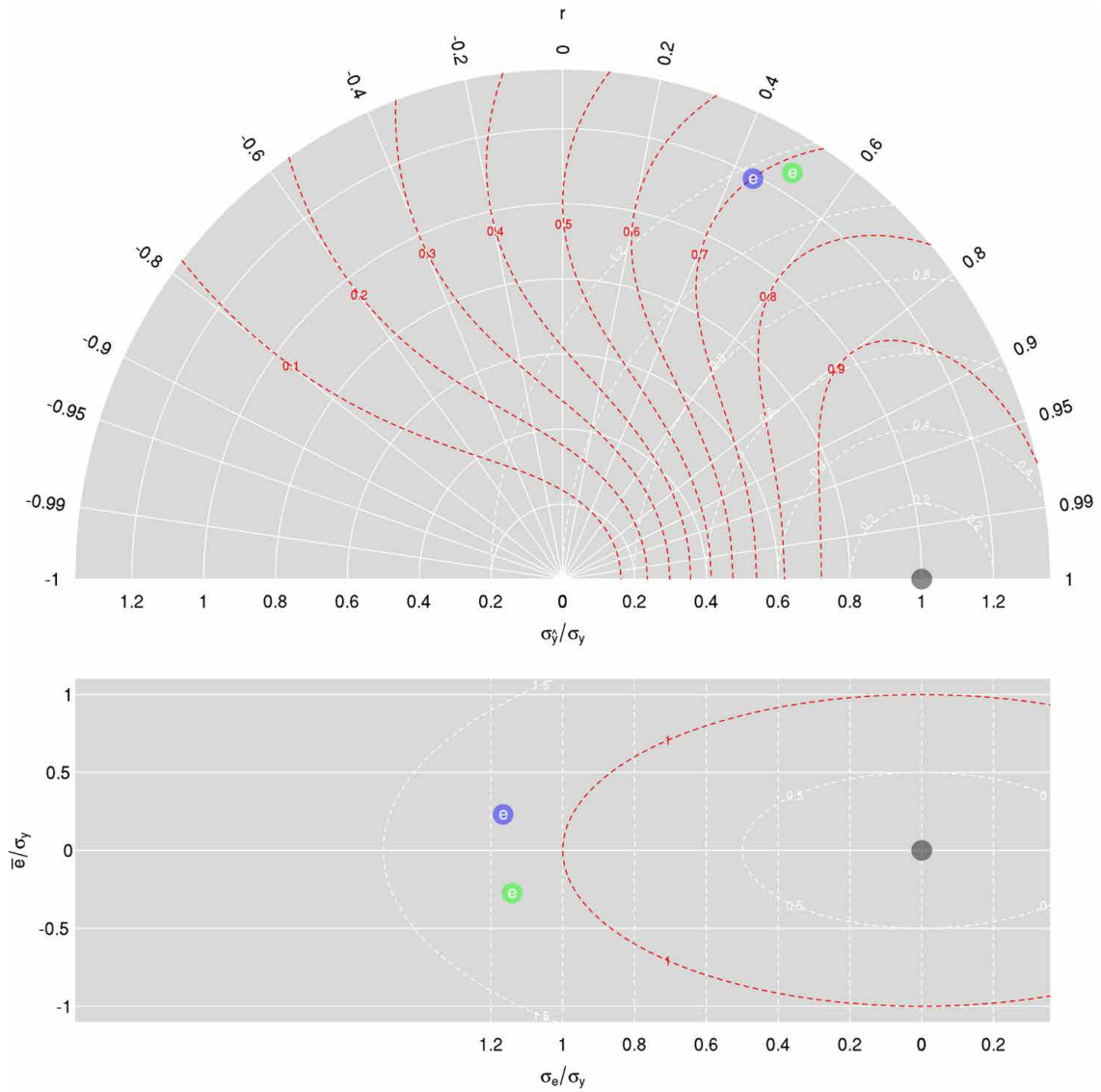
TESTGEVAL 'MAIZED(CRANENDONCK16)'*Tijdreeksen*

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'MaizeD(Cranendonck16)'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaar- en daggemiddelden zijn gegeven als bar plots en continue gegevens als punten en lijnen.



EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

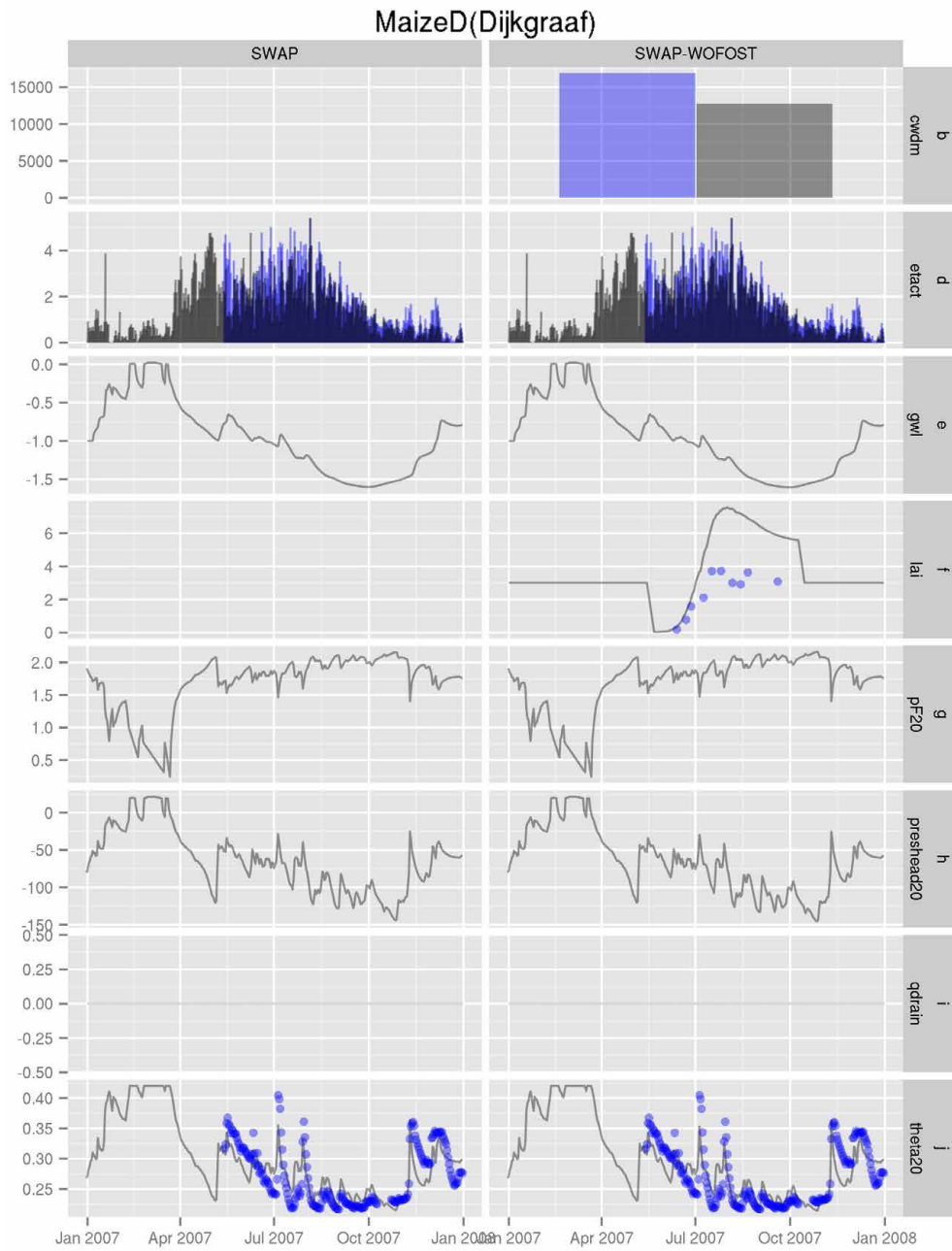
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram weer voor testgeval 'MaizeD (Cranendonck16)'. Alleen toestandsvariabelen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven. De symbolen in het extended Taylor diagram corresponderen met de symbolen in het linker paneel van de tijdreeksen hierboven.



TESTGEVAL 'MAIZED(DIJKGRAAF)'

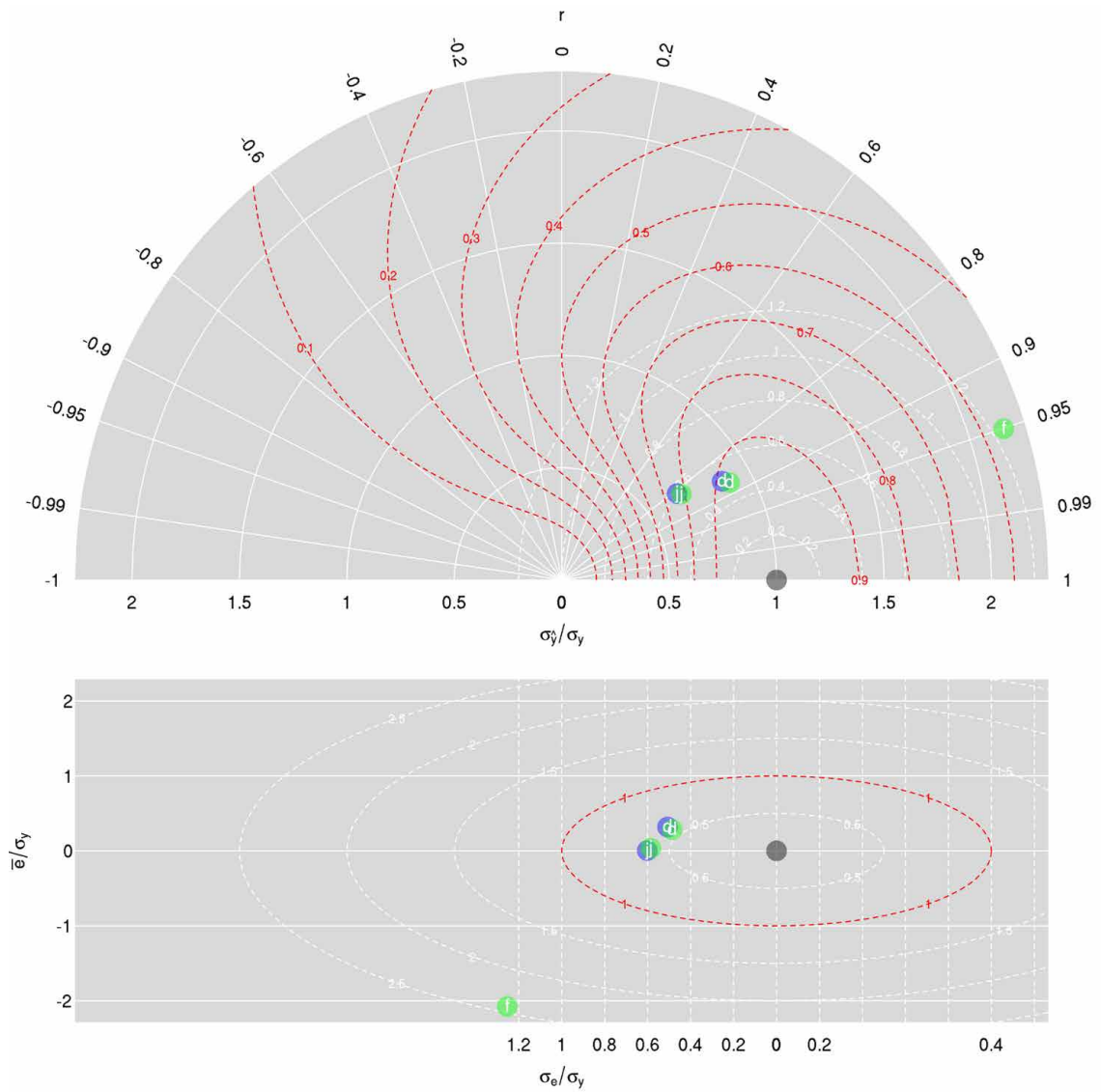
Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'MaizeD(Dijkgraaf)'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaar- en daggemiddelden zijn gegeven als bar plots en continue gegevens als punten en lijnen.



EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

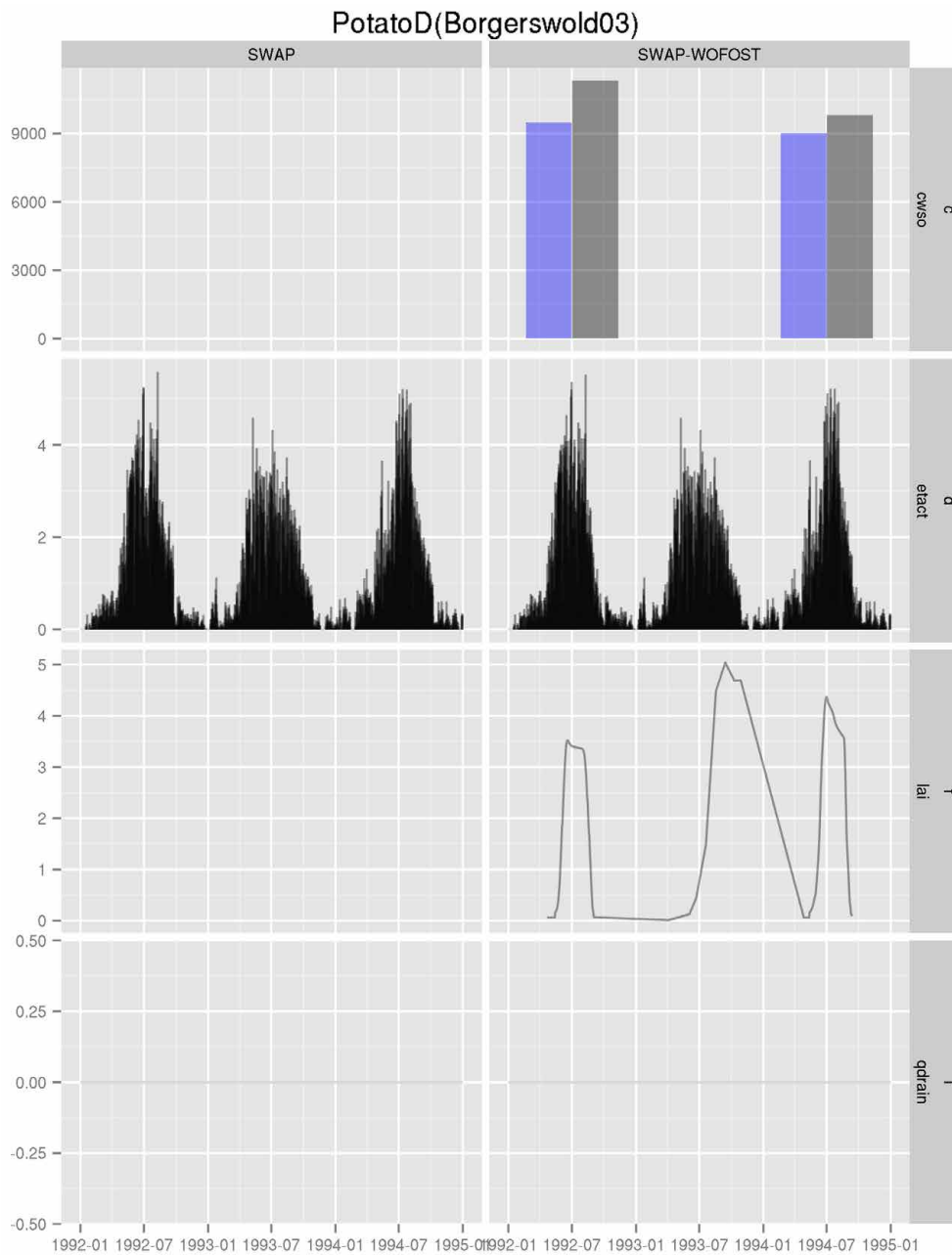
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram weer voor testgeval 'MaizeD(Dijkgraaf)'. Alleen toestandsvariabelen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven. De symbolen in het extended Taylor diagram corresponderen met de symbolen in het linker paneel van de tijdreeksen hierboven.



TESTGEVAL 'POTATOD(BORGERSWOLD03)'

Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'PotatoD(Borgerswold03)'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaar- en daggemiddelden zijn gegeven als bar plots en continue gegevens als punten en lijnen.



EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

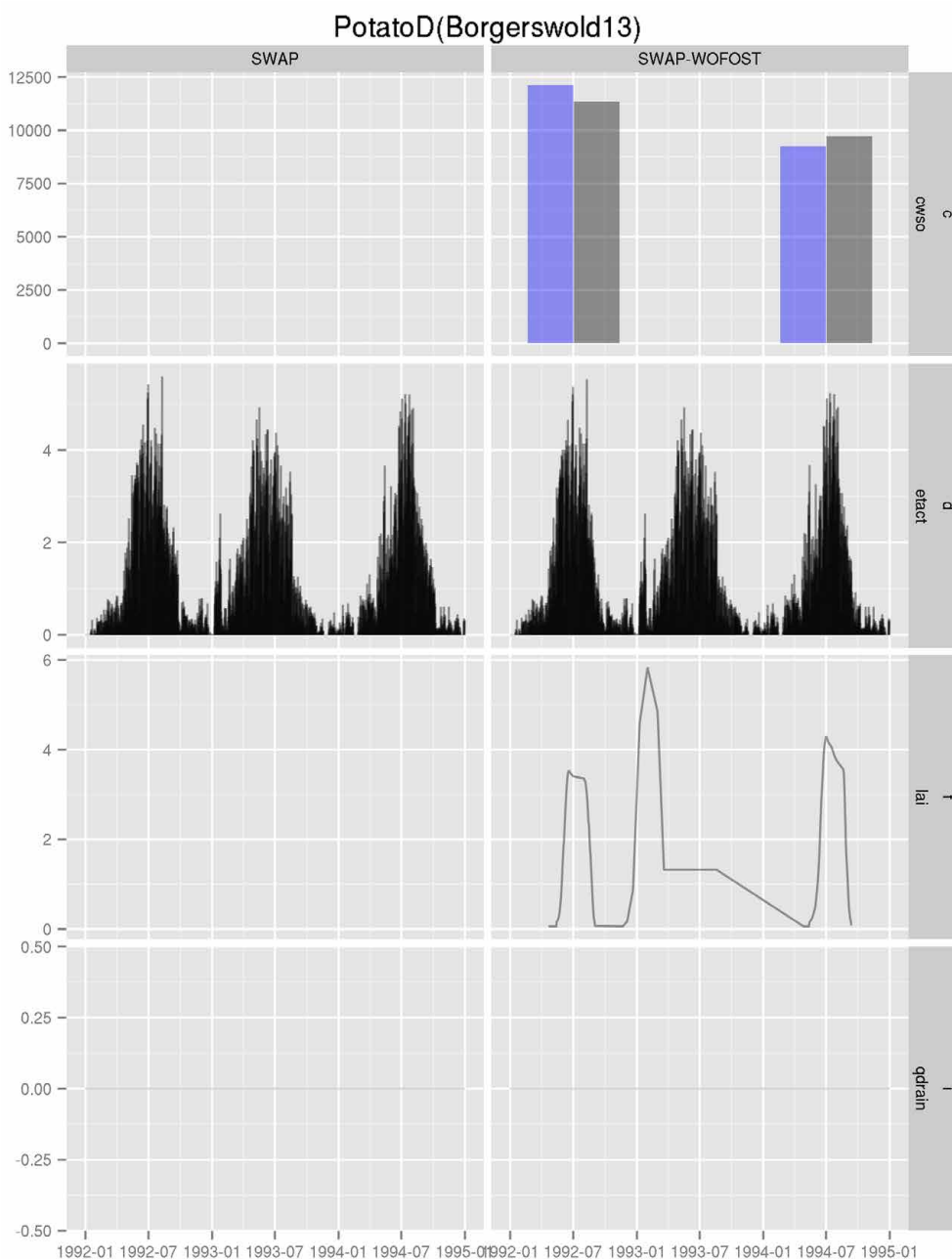
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram weer voor testgeval 'PotatoD (Borgerswold03)'. Alleen toestandsvariabelen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven. De symbolen in het extended Taylor diagram corresponderen met de symbolen in het linker paneel van de tijdreeksen hierboven.

Onvoldoende gegevens om betrouwbare statistieken te plotten

TESTGEVAL 'POTATOD(BORGERSWOLD13)'

Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'PotatoD(Borgerswold13)'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaar- en daggemiddelden zijn gegeven als bar plots en continue gegevens als punten en lijnen.



EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

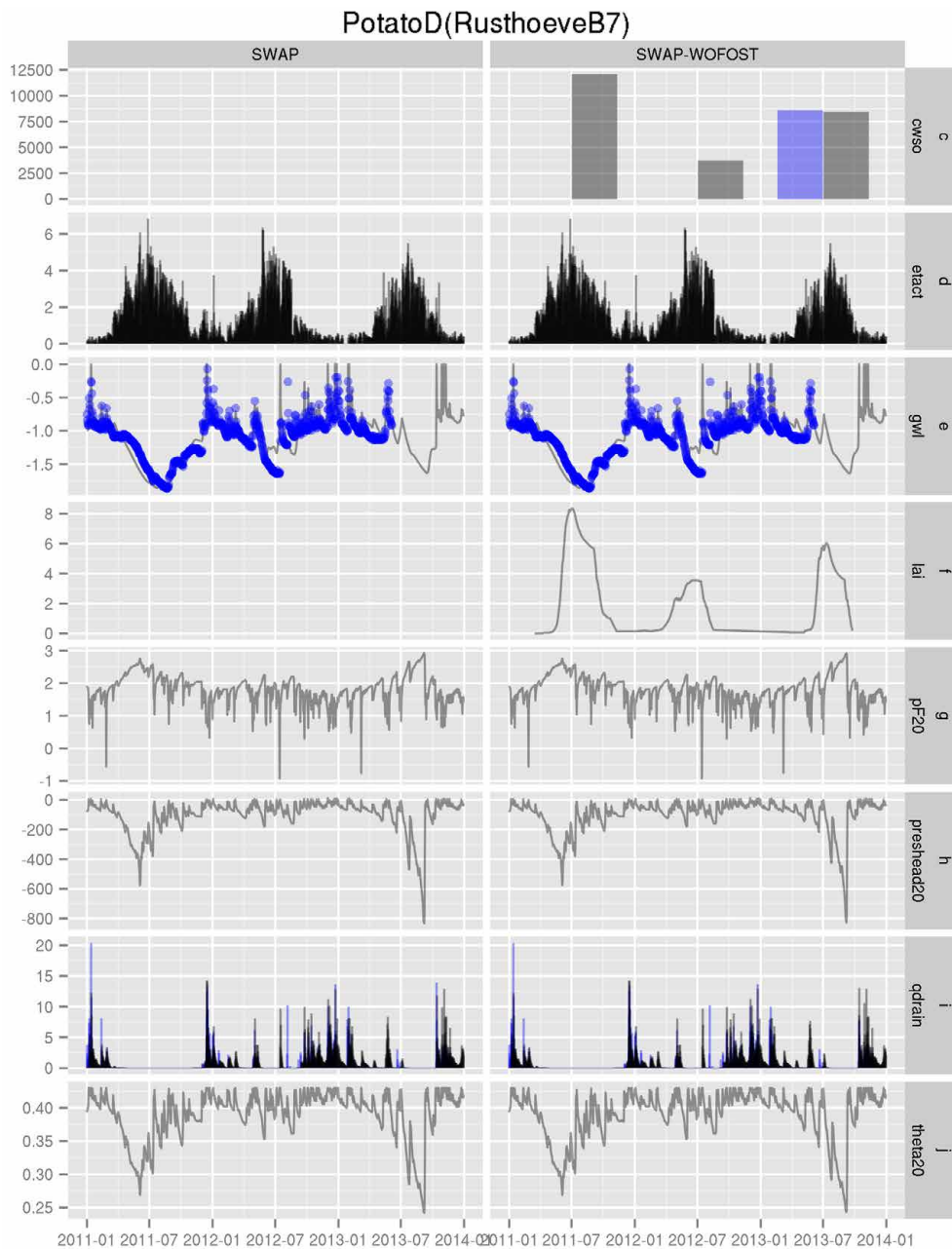
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram weer voor testgeval 'PotatoD (Borgerswold13)'. Alleen toestandsvariabelen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven. De symbolen in het extended Taylor diagram corresponderen met de symbolen in het linker paneel van de tijdreeksen hierboven.

Onvoldoende gegevens om betrouwbare statistieken te plotten

TESTGEVAL 'POTATOD(RUSTHOEVEB7)'

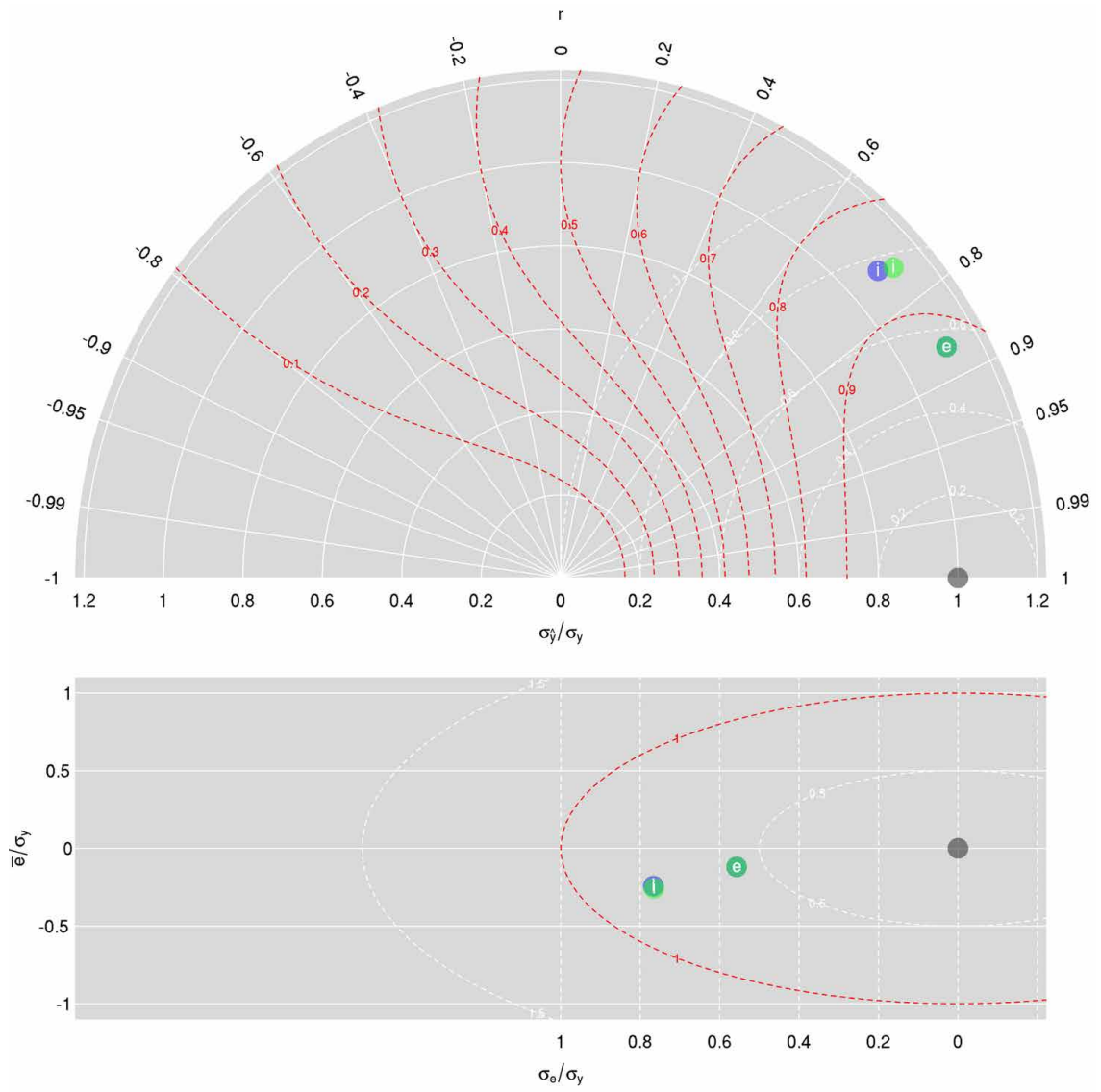
Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'PotatoD(RusthoeveB7)'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaar- en daggemiddelden zijn gegeven als bar plots en continue gegevens als punten en lijnen.



EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

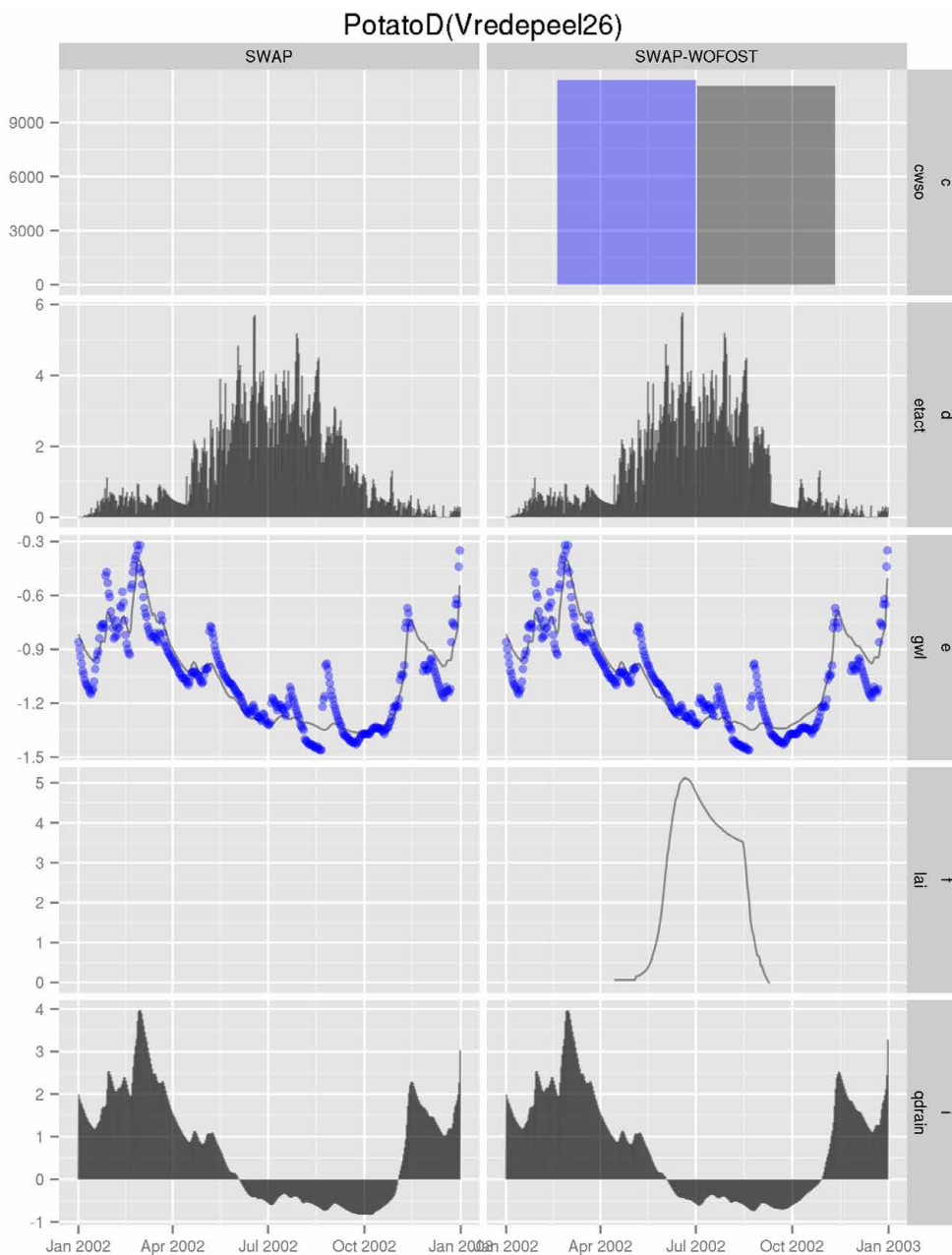
Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram weer voor testgeval 'PotatoD (RusthoeveB7)'. Alleen toestandsvariabelen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven. De symbolen in het extended Taylor diagram corresponderen met de symbolen in het linker paneel van de tijdreeksen hierboven.



TESTGEVAL 'POTATOD(VREDEPEEL26)'

Tijdreeksen

Onderstaande figuur geeft tijdreeksen voor 'PotatoD(Vredepeel26)'. Waarnemingen zijn gegeven in blauw, modelvoorspellingen in zwart. Jaar- en daggemiddelden zijn gegeven als bar plots en continue gegevens als punten en lijnen.



EXTENDED TAYLOR DIAGRAM

Onderstaande figuur geeft het extended Taylor diagram weer voor testgeval 'PotatoD (Vredepeel26)'. Alleen toestandsvariabelen met 10 of meer waarnemingen zijn weergegeven. De symbolen in het extended Taylor diagram corresponderen met de symbolen in het linker paneel van de tijdreeksen hierboven.

