

Discussienotitie parameterisatie, kalibratie, validatie van het modelsysteem SWAP-WOFOST

04-02-2014

Dennis Walvoort
Joop Kroes
Ruud Bartholomeus
Mirjam Hack-ten Broeke

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
2. Hoe wordt gewasschade uitgedrukt?	3
3. Parameterisatie van SWAP-WOFOST	4
4. Kalibratie van SWAP-WOFOST	4
5. Modeltoetsing via validatie.....	7
6. Rol van remote sensing.....	8
7. Aanbevelingen	9
8. Literatuur.....	10

1. 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 snijmaïs. 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 doorgerekend 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.

2. 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 berekeningsexperimenten (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 exploiteerbare opbrengst (Van Ittersum et al., 2013).

De exploiteerbare opbrengst is daarbij de potentiële opbrengst verminderd met onvermijdelijke verliezen. Deze onvermijdelijke verliezen worden veroorzaakt door regelgeving en suboptimaal management (en niet door waterhuishouding). 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 vooralsnog 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. De exploitierbare opbrengst kan, voor Nederlandse omstandigheden, worden berekend op basis van langjarige statistieken, aangevuld met modelberekeningen voor zover statistieken ontoereikend zijn. Hierbij kan het nodig zijn om regionale verschillen te hanteren in relatie tot regelgeving. Voor het bepalen van de actuele opbrengst zal het nodig zijn om een managementfactor te introduceren, analoog aan Kroes and Supit (2011) waarmee de (vooral nog) 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 geogst product.

3. 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 (fenologie-parameters), *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>).

4. 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 balanstermen. 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 maïs

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 optimale 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 simulaties 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) exploitierbare 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 balanstermen reguleren. Bij het kalibreren kunnen we gebruikmaken van ervaringen die in het verleden met WOFOST zijn opgedaan (bijv. Akkermans et al., 2008)

5. 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 & Bredehoeft, 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 speciale 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 zonneploot (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.

6. 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 gewasgroei-model 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.

7. Aanbevelingen

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

1. Voorgesteld wordt om opbrengstderving uit te drukken als het verschil tussen exploiterebare 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.

8. 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., Pereira, L. S., Howell, T. a., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899–920. doi:10.1016/j.agwat.2010.12.015

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.

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*

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

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>

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

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 11.

Efron, B. & Gong, G., 1983. A Leisurely Look at the Bootstrap, the Jackknife, and Cross-Validation *The American Statistician* 37: 36-48

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

FAO. (2012). *Crop yield response to water; paper 66*. Rome.

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.

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.

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.

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

Konikow, L. F. & Bredehoeft, J. D., 1992. Ground-water models cannot be validated. *Advances in Water Resources* 15, 75–83.

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.

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.

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.
- 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.
- Schuurmans, 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
- Singh, R., Kroes, J. G., Dam, J. C. Van, & Feddes, R. (2006). Distributed ecohydrological modelling 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-Rapportnummer 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.
- 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 neerslagen 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
- 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

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. AgriAdapt Project Report no. 1 Wageningen

Wolf, J., Reidsma, P., Schaap, B., Mandryk, M., Kanellopoulos, A., Ewert, Oort, P. van, Angulo, C., Rumbaur, C., Lock, R., Enders, A., Adenauer, M., Heckelei, 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