



BTO 2017.061 | Oktober 2017

## BTO rapport

Modelmatig vaststellen  
van de relatie tussen  
gewasopbrengst en  
verdamping

Documentatie van de werkwijze



# BTO

## Modelmatig vaststellen van de relatie tussen gewasopbrengst en verdamping – Documentatie van de werkwijze

BTO 2017.061 | Oktober 2017

### Opdrachtnummer

BTO 400941

### Projectmanager

dr. Edu Dorland

### Opdrachtgever

Vitens - Speerpuntonderzoek

### Kwaliteitsborger

prof.dr.ir. Flip Witte en dr. Edu Dorland

### Auteurs

dr.ir. Ruud Bartholomeus, prof.dr.ir. Flip Witte

### Verzonden aan

Dit rapport is verzonden aan Vitens.

**Jaar van publicatie**  
2017

#### Meer informatie

dr.ir. Ruud P. Bartholomeus

T 030-6069530

E [ruud.bartholomeus@kwrwater.nl](mailto:ruud.bartholomeus@kwrwater.nl)

**Keywords: achtergrondverlaging, gewasgroei, verdamping**

Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

F +31 (0)30 60 61 165

E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)

I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)

The logo for KWR (Watercycle Research Institute) features the letters 'KWR' in a bold, blue, sans-serif font. The 'K' and 'R' have a stylized, rounded appearance.

Watercycle  
Research  
Institute

BTO | September 2017 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

# BTO Managementsamenvatting

## Vaststellen van de relatie tussen gewasopbrengst en verdamping

**Auteurs** dr.ir. Ruud Bartholomeus en prof.dr.ir. Flip Witte

Inzicht in de relatie tussen gewasopbrengst en verdampingscomponenten is belangrijk om het effect van de toegenomen gewasproductie op de grondwateraanvulling betrouwbaar te kunnen kwantificeren. In agro-hydrologische modellen speelt verdamping een aanzienlijke rol vanwege de relatie tussen gewasopbrengst en transpiratie. Samen met neerslag bepaalt verdamping de waterflux aan het oppervlak. Zo zijn grondwatermodellen afhankelijk van de grondwateraanvulling: neerslag min werkelijke totale verdamping, bij afwezigheid van oppervlakteafoer. Voor toetsing en aanpassing van modelconcepten in SWAP-WOFOST is experimenteel onderzoek nodig, zodat afzonderlijke verdampingscomponenten (transpiratie, bodemverdamping en verdamping van interceptiewater) nauwkeurig kunnen worden gemeten. Eerste stappen zijn daartoe gezet (zie foto).



*Meten van de verschillende verdampingstermen met lysimeters in een maisperceel te Hupsel (foto Bernard Voortman, KWR)*

### Belang: berekenen relatie gewasgroei en verdamping voor vaststelling grondwateraanvulling

Voor zowel hydrologische als agro-hydrologische berekeningen is kennis over de totale verdamping noodzakelijk. Helaas is verdamping een moeilijk te meten of te berekenen grootheid. Met name de relatie tussen gewasgroei en verdamping is van belang. Hiermee kan de invloed van toegenomen gewasproductie op de grondwateraanvulling worden vastgesteld.

### Aanpak: simulaties met procesmodellen

Met het modellenpaar SWAP-WOFOST zijn voor een periode van 60 jaar (1950-2010) de gewasopbrengst en de drie verdampingstermen transpiratie, interceptie- en bodemverdamping op

dagbasis procesmatig gesimuleerd. Het SWAP model (Soil-Water-Atmosphere-Plant) simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en de verzadigde zone. In het gekoppelde gewasgroeimodel WOFOST (World Food Studies) wordt de gewasgroei berekend uit fotosynthese, die een functie is van zonnestraling en water- en zoutstress. SWAP-WOFOST moet inzicht geven in de relaties tussen jaarlijkse gewasopbrengsten en verdampingstermen. De analyse diende te laten zien hoe gewasopbrengst kan worden vertaald naar verdamping, en dus naar de grondwateraanvulling.

**Resultaten: verbetering modelconcepten nodig**

De uitkomsten van de uitgevoerde SWAP-WOFOST simulaties bleken niet realistisch. Oorzaak wijst in de richting van een onjuiste simulatie van de invloed van bladhoeveelheid (Leaf Area Index) van het gewas op de verdeling van de totale verdamping over de verschillende verdampingstermen. De modellen moeten hierin worden verbeterd.

**Implementatie: experimentele onderbouwing modelconcepten**

De bevindingen uit deze studie worden intussen gebruikt om modelconcepten binnen SWAP-WOFOST te verbeteren. Ook laat deze studie zien

dat meer kennis nodig is over de relatie tussen gewasgroei en de werkelijke verdamping, inclusief de verdeling over transpiratie, interceptie en bodemverdamping. In opdracht van Vitens is in 2017 experimenteel onderzoek gestart naar nauwkeurige meting van deze posten, wat moet leiden tot toetsing en eventuele aanpassing van de modelconcepten.

**Rapport**

Dit onderzoek is beschreven in rapport *Modelmatig vaststellen van de relatie tussen gewasopbrengst en verdamping – Documentatie van de werkwijze* (BTO-2017.061).

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Methode</b>	<b>3</b>
2.1	Algemeen	3
2.2	Theorie SWAP-WOFOST	4
2.3	Automatische modelsimulaties in R	7
<b>3</b>	<b>Resultaten en discussie</b>	<b>9</b>
	<b>Referenties</b>	<b>11</b>

# 1 Inleiding

Verdamping speelt een aanzienlijke rol in hydrologische berekeningen omdat deze post, samen met de neerslag, de waterflux aan het oppervlak bepaalt. Grondwatermodellen, bijvoorbeeld, zijn afhankelijk van de grondwateraanvulling: neerslag ( $P$ ) min werkelijke totale verdamping ( $ET$ ), bij afwezigheid van oppervlakteafoer. De totale verdamping is gedefinieerd als de som van interceptieverdamping ( $E_i$ ), de gewasverdamping of transpiratie ( $T$ ) en de bodemverdamping ( $E_s$ ) (NHV, 2002). In zogenaamde agro-hydrologische modellen staat verdamping centraal, door de relatie tussen gewasopbrengst en transpiratie. Het is dus zowel voor hydrologische als voor agro-hydrologische berekeningen van belang om de totale verdamping goed te kennen. Helaas is verdamping een moeilijk te meten of te berekenen grootheid. Probleem hierbij is dat een relatief kleine fout in de posten "totale verdamping" of "neerslag" een grote fout kan veroorzaken in grondwateraanvulling of beschikbaar water voor plantengroei, zeker als de totale verdamping en neerslag van dezelfde orde grootte zijn (Sumner & Jacobs, 2005). Dat betekent dat nauwkeurige bepaling van verdamping belangrijk is voor zowel hydrologische als agro-hydrologische berekeningen. Dit is een belangrijke reden om i) de verschillende componenten van de verdamping goed te kunnen meten en ii) met hydrologische modellen de totale verdamping nauwkeurig te berekenen (Bartholomeus et al., 2015; Bartholomeus et al., 2012).

Om de verandering van de verdamping en grondwateraanvulling als gevolg van de toename van de gewasproductie vanaf de jaren 1950 tot 2010 in te schatten is in een voorgaand speerpuntonderzoek voor Brabant Water de grondwateraanvulling  $R$  berekend als functie van:

- de gewasopbrengst  $Y$ ,
- twee aan de literatuur ontleende parameterwaarden ( $C_{DS}$  en  $C_T$ , voor omzetting van  $Y$  naar respectievelijk droge-stofproductie en transpiratie,  $T$ ),
- en een vaste waarde voor de som van bodem- en interceptieverdamping, ( $E_s + E_i$ ) (Witte et al., 2015a; Witte et al., 2015b).

Bezwaren tegen deze methode zijn dat hij sterk op de empirische parameters  $C_{DS}$  en  $C_T$  berust en dat hij uitgaat van een vast cijfer voor ( $E_s + E_i$ ). Ook zijn de jaarcijfers van verdamping  $E$  achteraf via een kunstgreep geschaald naar 5-daagse waarden.

Om meer inzicht te verwerven in de gevolgen van de toegenomen gewasopbrengst voor de grondwateraanvulling en in de geldigheid van de aannames zoals gedaan voor de studie voor Brabant Water, is het doel van deze studie via een meer procesmatige analyse de volgende onderzoeksvragen te beantwoorden:

1. Hoe robuust is de omzetting van gewasopbrengsten naar verdampingscijfers?
2. Wat is de achtergrondverlaging, inclusief bandbreedte, in een door Vitens aangewezen zandgebied met overwegend landbouw?
3. Hoe hard zijn de resultaten van de studie voor Brabant Water?

## 2 Methode

### 2.1 Algemeen

We gebruiken het modellenpaar SWAP-WOFOST (Kroes et al., 2009) om op dagbasis voor 60 jaar (1950-2010) de gewasopbrengst  $Y$  en alle verdampingstermen te simuleren ( $T$ ,  $E_s$ ,  $E_l$ ).

Dat doen we voor combinaties van:

- 3 gewassen
- 4 bodemfysische eenheden
- 3 slootpeilen (droog, gemiddeld, nat; bijv. 150, 100 en 50 cm -m.v.)

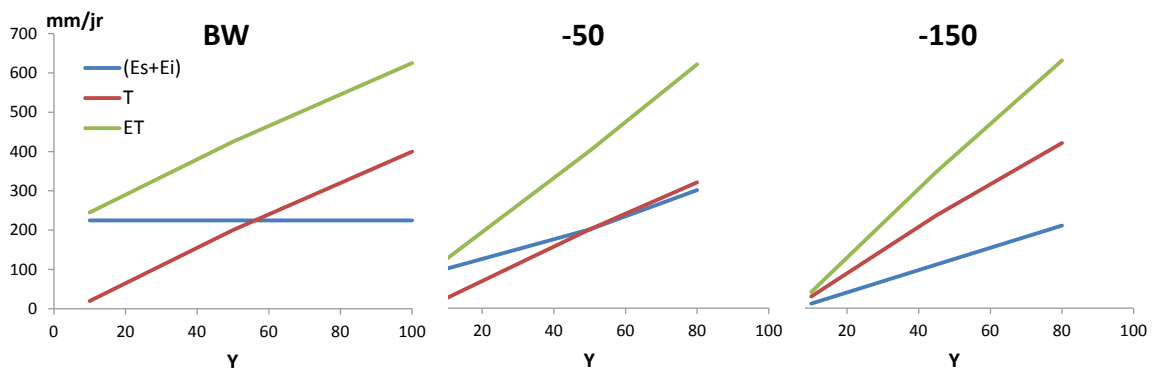
Bij elkaar gaat het om 36 unieke topsystemen. Slootafstand  $L$  en drainageweerstand  $DRARES$  houden we constant (bijvoorbeeld  $L = 250$  m,  $DRARES = 250$  d). De topsystemen rekenen we door met managementfactoren  $MF$  die in stapjes van bijv. 0.01 variëren van 0.10 tot 1.00.  $MF$  reduceert de dagelijkse bruto assimilatiegroeisnelheid van een gewas ten gevolge van een gebrek aan nutriënten en effecten zoals ziekten en plagen (zie paragraaf 2.2). Door  $MF$  te variëren, simuleren we een range aan gewasopbrengsten  $Y$ .

Uit de resultaten leiden we relaties af tussen jaarlijkse waarden voor  $Y$ ,  $T$  en  $ET$ , en we onderzoeken hoe gevoelig die relaties zijn voor de schematisering van het topsysteem. Oppervlakteafvoer (surface runoff) laten we niet toe, net als beregening, zodat  $R = P - ET$ .

In Figuur 1 staan voor een bepaald gewas enkele puur hypothetische en ten behoeve van de inzichtelijkheid overdreven uitkomsten, met op de x-as de gewasopbrengst op een denkbeeldige schaal van 0-100. In de linker figuur is de werkwijze van de studie voor Brabant Water weergegeven: de transpiratie  $T$  is evenredig aan  $Y$  en de som van de bodem- en interceptieverdamping ( $E_s + E_l$ ) zijn constant verondersteld; de som van beide posten is de totale verdamping  $ET$ . De middelste figuur schetst de hypothetische uitkomst van simulaties met SWAP-WOFOST bij een ontwatering van 50 cm ten opzichte van maaiveld; de rechter figuur die bij een ontwatering van 150 cm t.o.v. m.v. In beide gevallen stopt de opbrengst bij 80 wegens suboptimale omstandigheden. Bij het diep ontwaterde perceel (rechter figuur) bestaat ( $E_s + E_l$ ) hoofdzakelijk uit interceptieverdamping, in het natte perceel (middelste figuur) is de bodemverdamping ook aanzienlijk, vooral bij lage  $Y$ . In de drie getoonde grafieken in Figuur 1 zit de door ons te onderzoeken (en nu niet getoonde) variatie (in relatie tussen gewasopbrengst en verdamping) die te maken heeft met bodemgesteldheid en het weer.

De analyse dient op te leveren hoe we  $Y$  kunnen vertalen naar  $ET$ , en dus naar grondwateraanvulling  $R$ .





FIGUUR 1: HYPOTHETISCHE UITKOMSTEN VOOR DE RELATIE TUSSEN GEWASOPBRENGST Y EN VERDAMPINGSPOSTEN VOOR DRIE VERSCHILLENDE UITGANGSSITUATIES. BW = CONFORM BRABANT WATER STUDIE; -50 (NAT): SLOOTPEIL 50 CM ONDER GEMIDDELD MAAVELD; -150(DROOG); SLOOTPEIL 150 CM ONDER GEMIDDELD MAAVELD.

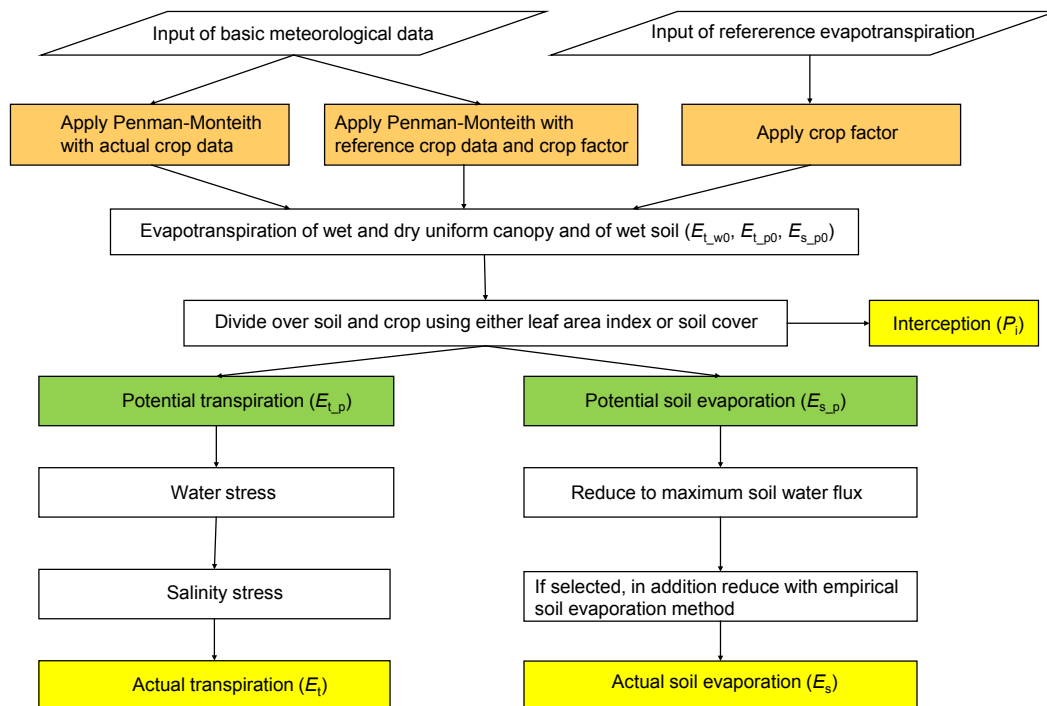
## 2.2 Theorie SWAP-WOFOST

De tekst in deze paragraaf is grotendeels ontleend aan Bartholomeus et al. (2015).

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

De reductie in actuele transpiratie als gevolg van beschikbaar vocht in de bodem wordt weergegeven door de zogenaamde wortelonttrekkingsfunctie. Zowel te droge als te natte omstandigheden leiden tot een niet optimale verdamping, omdat plantenwortels dan respectievelijk onvoldoende water en zuurstof kunnen opnemen. SWAP beschrijft elk van de factoren die deel uitmaken van de verdamping: evaporatie van de bodem, transpiratie en interceptieverdamping. Zowel de potentiële als actuele evaporatie en transpiratie worden berekend.

SWAP geeft naast de mogelijkheid om referentieverdamping als invoer te gebruiken ook de optie om intern de potentiële verdamping te berekenen gebaseerd op de vergelijking van Penman-Monteith. Deze interne berekening heeft ook weer twee opties. Als eerste kan SWAP de potentiële verdamping berekenen, uitgaande van het standaardreferentiegewas (aerodynamische weerstand =  $70 \text{ s m}^{-1}$ , gewashoogte = 12 cm, albedo = 0.23). De tweede mogelijkheid is om niet uit te gaan van het standaardreferentiegewas, maar van de werkelijke gewasgegevens (gewasweerstand, hoogte en albedo). Figuur 2 geeft deze drie invoeropties weer.



FIGUUR 2: METHODE TOEGEPAST IN SWAP OM DE WERKELIJKE TRANSPIRATIE EN BODEMVERDAMPING VAN GEDEELTELIJK BEDEKTE BODEMS TE BEREKENEN (UIT KROES ET AL. (2009)).

SWAP simuleert bodemverdamping, transpiratie en interceptieverdamping afzonderlijk. Daartoe berekent SWAP drie verschillende verdampingsgrootheden (Kroes et al., 2008; Van Dam et al., 2008):

1.  $E_{t,w0}$ : de verdampingsflux ( $\text{m.d}^{-1}$ ) van een nat gewas dat de bodem volledig bedekt;
2.  $E_{t,p0}$ : de potentiële verdampingsflux ( $\text{m.d}^{-1}$ ) van een droog gewas dat de bodem volledig bedekt;
3.  $E_{s,p0}$ : de potentiële verdampingsflux ( $\text{m.d}^{-1}$ ) van een kale natte bodem.

Bij gebruik van Penman-Monteith berekent SWAP deze grootheden door de waarden van gewasweerstand, hoogte en albedo te gebruiken die gelden voor respectievelijk een nat gewas, een droog gewas en een natte bodem.

De volgende stap is de 'partitionering' van de fluxen  $E_{t,w0}$ ,  $E_{t,p0}$  en  $E_{s,p0}$  voor het werkelijke, groeiende gewas over interceptie, potentiële transpiratie en potentiële bodemverdamping (Figuur 2). Gedurende de periode dat het gewas nat is, wordt verondersteld dat alle beschikbare stralingsenergie gebruikt wordt voor verdamping van interceptiewater en de andere verdampingstermen zijn uitgeschakeld. De effectieve tijdfractie  $W_{\text{frac}}$  (-) dat het gewas nat is volgt dan uit:

$$W_{\text{frac}} = \frac{P_i}{E_{t,w0}} \quad [1]$$

Hierin is  $P_i$  de hoeveelheid interceptiewater ( $\text{m.d}^{-1}$ ). In SWAP wordt de interceptie voor landbouwgewassen en grasland berekend volgens de benadering van Von Hoyningen-Hüne (1983), welke een functie is van de Leaf Area Index (LAI) volgens:

$$P_i = a \cdot LAI \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{b \cdot P}{a \cdot LAI}} \right) \quad [2]$$

waarin  $P_i$  de interceptie (de hoeveelheid water op het bladerdek) ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $LAI$  de Leaf Area Index (-),  $P$  de bruto neerslag ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $a$  een empirische coëfficiënt ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) en  $b$  de fractie bedekte bodem (-). Bij toenemende neerslaghoeveelheid raakt het bladoppervlak verzadigd. Deze verzadigingsgraad is gelijk aan  $a \cdot LAI$ .

Vervolgens wordt de potentiële bodemverdamping uitgerekend. Deze bevat een reductiefactor voor de mate waarin de bodem wordt beschaduwd door het vegetatiedek. Er wordt aangenomen dat de netto straling onder het dek afneemt met een exponentiële functie van de  $LAI$  en dat de bodemwarmteflux kan worden genegeerd (Belmans et al., 1983; Goudriaan, 1977). In combinatie met de reductie voor de activiteit van de interceptieverdamping geeft dit:

$$E_{s,p} = E_{s,p0} e^{-\kappa_{gr} LAI} (1 - W_{frac}) \quad [3]$$

waarin  $E_{s,p}$  de potentiële bodemverdamping is van gedeeltelijk bedekte gronden ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $LAI$  de Leaf Area Index van het vegetatiedek ( $\text{m}^2$  blad  $\text{m}^{-2}$  grond), en  $\kappa_{gr}$  de extinctiecoëfficiënt voor kortgolvlige straling (-). De reductie van potentiële naar werkelijke bodemverdamping wordt vervolgens gedaan met de methode van Black et al. (1969) of Boesten & Stroosnijder (1986).

De potentiële transpiratie volgt uit een reductie voor de periode dat het gewas nat is en voor de bodemverdamping:

$$E_{t,p} = E_{t,p0} (1 - W_{frac}) - E_{s,p} \quad [4]$$

waarin  $E_{t,p}$  de potentiële transpiratie ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) van een gewas dat gedeeltelijk de grond bedekt. Hierbij is aangenomen dat de straling die het bodemoppervlak bereikt niet beschikbaar is voor transpiratie, ook al wordt de bodemverdamping gereduceerd ten opzichte van de potentiële waarde. Deze rekenwijze voorkomt het berekenen van te grote transpiratiewaarden (Kroes et al., 2008; Van Dam et al., 2008).

Als de bodemvochtcondities niet optimaal zijn, bijvoorbeeld door vochttekort, neemt de potentiële transpiratie af tot de actuele transpiratie. Niet alleen een tekort aan water in de wortelzone leidt tot transpiratiereductie, maar ook een tekort aan zuurstof en een te hoog zoutgehalte van het bodemvocht kan tot vochttekort voor de plant leiden. Onder suboptimale vochtvoorziening in de wortelzone zal de potentiële transpiratie ( $T_p$ ) afnemen tot de actuele transpiratie ( $T_a$ ), wat gevolgen heeft voor de gewasopbrengst. In SWAP wordt gewasopbrengst berekend door de relatieve gewasopbrengst ( $Y_a/Y_p$ ) gelijk te stellen aan relatieve transpiratie ( $T_a/T_p$ ). Deze gelijkstelling berust op een groot aantal meetproeven, vooral gedaan met lysimeters (De Wit, 1958).

In het gewasgroeimodel WOFOST wordt de gewasgroei berekend uit fotosynthese, welke een functie is van zonnestraling en water- en zoutstress. WOFOST geeft, op dagbasis, de worteldiepte en  $LAI$  terug aan SWAP. De  $LAI$  wordt vervolgens in SWAP gebruikt om de verdeling van potentiële totale verdamping, over interceptieverdamping, transpiratie en evaporatie te bepalen (vergelijkingen [2], [3] en [4]).

Door  $MF (= f_{\text{nut}} * f_{\text{res}})$  te beperken, wordt de gewasgroei en hiermee de  $LAI$  geremd (Kroes & Supit, 2011):

$$A_{\text{gross}} = f_{\text{Trel}} f_{\text{CTET}} f_{\text{nut}} f_{\text{res}} A_{\text{p}}$$

[5]

met:

- $A_{\text{gross}}$ : dagelijkse bruto assimilatie groeisnelheid (kg/ha/d droge stof)  
 $f_{\text{Trel}}$ : reductiefactor voor transpiratie bepaald door te zoute, te droge of te natte omstandigheden (-)  
 $f_{\text{CTET}}$ : correctiefactor voor  $\text{CO}_2$ -concentratie in de atmosfeer (-)  
 $f_{\text{nut}}$ : invloed van nutriënten (-)  
 $f_{\text{res}}$ : invloed van overige, onbekende omgevingsfactoren (ziekten, plagen, management) (-)  
 $A_{\text{p}}$ : potentiële bruto assimilatie groeisnelheid (kg/ha/d droge stof)

In SWAP-WOFOST koppelt de opbrengst dus, door een vermindering van de assimilatie en de  $LAI$ , terug op de totale verdamping en de afzonderlijke verdampingsposten. In dit onderzoek is  $f_{\text{CTET}}$  constant gehouden.  $f_{\text{Trel}}$  wordt expliciet gesimuleerd.

### 2.3 Automatische modelsimulaties in R

De  $LAI$  werkt volgens vergelijkingen [2], [3] en [4] door op de verdampingsposten. Door  $MF (= f_{\text{nut}} * f_{\text{res}})$  te variëren, hebben we de relatie tussen gewasopbrengst en elk van de verdampingsposten onderzocht. Dit hebben we gedaan door in het programma 'R' (open source statistische software, (R Development Core Team, 2012)) software te bouwen waarmee SWAP-WOFOST een x-aantal keer wordt aangeroepen met:

- verschillende management factor  $MF$ , om zo een variatie aan gewasopbrengsten te genereren
- verschillende hydrologische randvoorwaarden (droog, 'medium', nat)
- verschillende bodemtypen (bodempysische eenheden nrs. 9, 11, 12, 13 (Wösten et al., 1988))
- verschillende gewassen (gras, maïs en aardappel)

Voor  $MF$  is een range (van 0.1-1.0) opgegeven waarbinnen de waarde kan variëren. Vervolgens wordt een automatische procedure gestart waarin SWAP-WOFOST binnen de opgegeven ranges een x-aantal keren wordt gedraaid. De SWAP-WOFOST-invoer wordt automatisch aangepast en vervolgens wordt het model gerund. Uit de uitvoer worden gewasopbrengst, transpiratie, evaporatie, interceptieverdamping en grondwateraanvulling bepaald. Dit wordt gedaan voor verschillende combinaties van bodemtype, hydrologische randvoorwaarde en gewas. Ten slotte worden voor elk gewas relaties verkregen door verdampingsposten te correleren aan gewasopbrengst (Figuur 3).

Meteorologische invoer van de SWAP-WOFOST (v.32.86) simulaties bestaat uit dagelijkse neerslag, globale straling, minimale en maximale temperatuur en luchtvochtigheid. Bodempysische eigenschappen worden beschreven volgens Van Genuchten (1980). Gewaseigenschappen worden beschreven in een apart gewasbestand en zijn gelijk aan de gewasbestanden zoals opgesteld voor Waterwijzer Landbouw (Bartholomeus et al., 2013; Kroes et al., 2015).

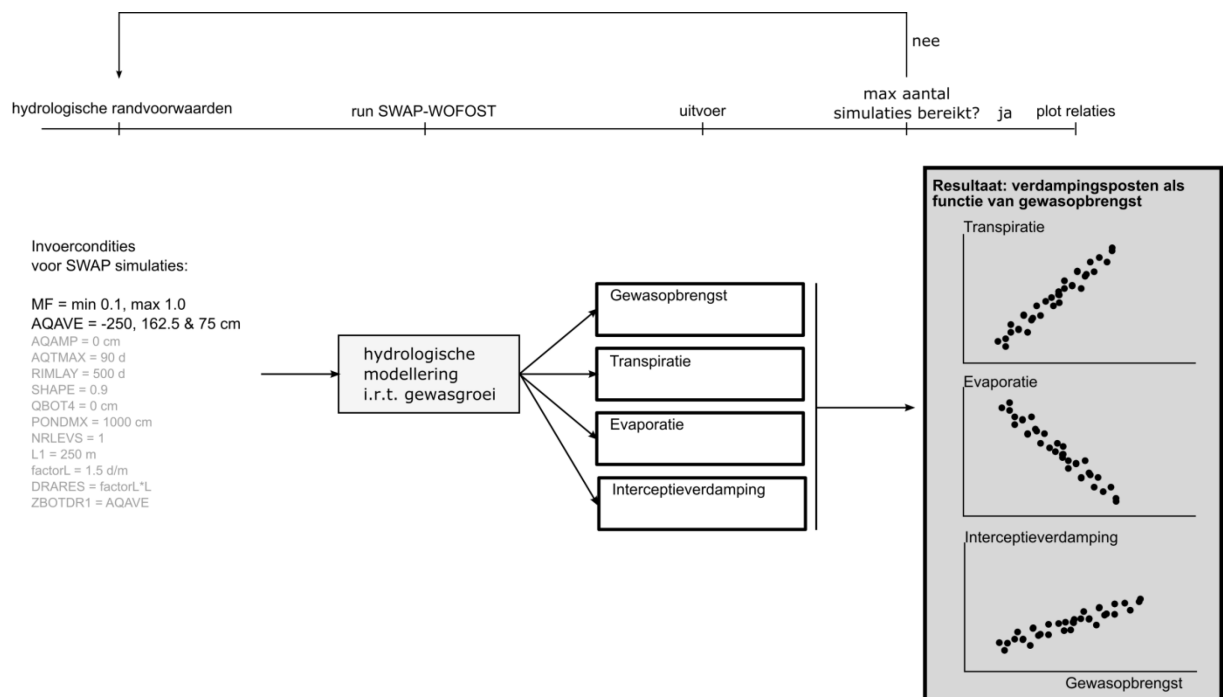
De hydrologische randvoorwaarden zijn zo gedefinieerd dat een relatief droge, een gemiddelde en een natte situatie worden doorgerekend:

- de onderrandvoorwaarde in SWAP is de 'bottom flux' berekend uit de stijghoogte in een diepe aquifer (gegeven door AQAVE, AQAMP, AQTMAX, SHAPE) en de verticale

weerstand van de aquitard (RIMLAY). QBOT4 beschrijft een extra laterale drainageflux. Voor deze analyse wordt alleen AQAVE gevarieerd.

- de maximale dikte van de 'ponding layer' voordat oppervlakkige afstroming start, is gegeven door PONDMX. Voor deze analyse wordt een zeer hoge waarde voor PONDMX ingesteld om oppervlakkige afstroming te voorkomen.
- drainage naar ontwateringsmiddelen wordt beschreven door:
  - het aantal drainageniveaus (NRLEVS). Voor deze analyse wordt gebruik gemaakt van één drainageniveau.
  - de afstand tussen sloten (L)
  - de drainageweerstand, welke afhankelijk is van L: drainageweerstand is  $\text{factorL} * L$  (Van der Gaast et al., 2006)
  - de bodemdpte van de ontwateringsmiddelen (ZBOTDR)

In elke SWAP-WOFOST run worden, naast bijvoorbeeld de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte, de gewasopbrengst en de transpiratie, evaporatie en interceptieverdamping berekend.



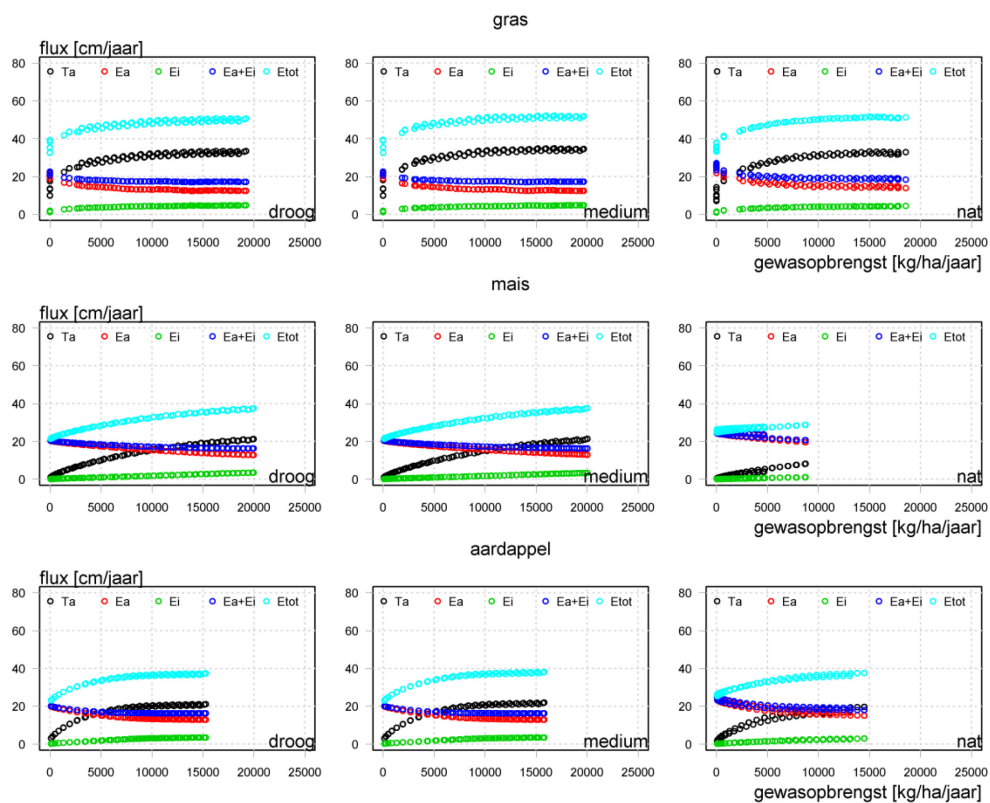
FIGUUR 3: STROOMSCHEMA AUTOMATISCHE BEREKENINGEN SWAP-WOFOST.

### 3 Resultaten en discussie

Zoals in het vorige hoofdstuk beschreven, hebben wij er software ontwikkeld waarmee SWAP-WOFOST wordt aangeroepen voor talloze combinaties van bodem, oppervlaktewaterstand, managementfactor en drainagewaterstand. Het was de bedoeling daarna de uitkomsten te gebruiken om relaties af te leiden tussen gewasopbrengst en de drie verschillende verdampingscomponenten: transpiratie, interceptie en bodemverdamping. De uitkomsten waren echter niet realistisch. Zo bleef de bodemverdamping bij een hoge bedekkingsgraad van het gewas erg hoog (Figuur 4), en zo was er geen lineair verband vast te stellen tussen langjarige gemiddelde gewasopbrengst en transpiratie (terwijl op grond van uitputtende metingen zoals beschreven in de literatuur zo'n verband er wel zou moeten zijn). Er zijn enkele aanpassingen gedaan aan de parametrisering van SWAP-WOFOST, maar dat mocht onvoldoende baten. Het lijkt erop dat de wijze waarop de *LAI* doorwerkt op de verdeling van de totale verdamping over de verschillende verdampingsposten (vergelijkingen [2], [3] en [4]) verbeterd dient te worden; ook bij hoge *LAI* blijft de bodemverdamping namelijk hoog. Het kan bijvoorbeeld zo zijn dat experimenteel vastgestelde parameterwaarden voor de reductie van de bodemverdamping (volgens methodes Black et al. (1969) of Boesten & Stroosnijder (1986)) afhankelijk moeten worden verondersteld van de gewasontwikkeling. Nu zijn deze parameterwaarden constanten en zijn ze dus niet afhankelijk van het ontwikkelingsstadium van het gewas. Ook geven de resultaten aanleiding om ons af te vragen of we de managementfactor *MF* niet te ver hebben laten dalen in onze analyse. Tot welk bereik de factor nog toelaatbaar is, is echter niet bekend; Kroes & Supit (2011) gebruikten voor grasland een waarde van 0.52.

Zowel qua haalbaarheid als doelstelling paste het niet binnen dit project om de modelconcepten van SWAP-WOFOST aan te passen. Wel hebben we onze bevindingen voorgelegd aan de ontwikkelaars van SWAP-WOFOST, die ze kunnen gebruiken voor modelverbeteringen. In overleg met de opdrachtgever hebben we de verdere uitvoering van ons projectplan daarom stopgezet.

De onbevredigende uitkomsten hebben tot het inzicht geleid dat meer kennis nodig is over de relatie tussen gewasgroei en de actuele verdamping, inclusief de partitionering over de drie verdampingsposten. Dit inzicht is gebruikt voor het formuleren van een nieuw speerpuntonderzoek waarin we de verdampingsposten en de gewasopbrengst van een agrarisch perceel meten met lysimeters in combinatie met airborne remote sensing technieken (projectnummer 401728). Hierbij wordt samengewerkt met collega's van de Wageningen Universiteit. Het onderzoek is bovendien ingebed in een groot INTERREG-project, SPECTORS genaamd, waarin onder andere KWR, WUR, en de provincies Gelderland, Overijssel en Noord-Brabant participeren, en waarin de ontwikkeling van sensoren centraal staat.



FIGUUR 4: VERDAMPINGSFLUXEN ALS FUNCTIE VAN GEWASOPBRENGST VOOR GRAS, MAIS EN AARDAPPELEN (RIJEN), VOOR DROGE TOT NATTE OMSTANDIGHEDEN (KOLOMMEN), ZOALS GESIMULEERD MET SWAP-WOFOST (V.32.86). Ta = ACTUELE TRANSPIRATIE, Ea = ACTUELE BODEMVERDAMPING, Ei = VERDAMPING VAN INTERCEPTIEWATER, Etot = TOTALE ACTUELE VERDAMPING.

# Referenties

- Bartholomeus, R.P., Heijkers, J., Droogers, P., Van Dam, J.C., Van Walsum, P., 2015. Werkelijke verdamping in hydrologische modellen. In: NHV-Werkgroep Verdamping (Ed.), Verdamping in de hydrologie. NHV.
- Bartholomeus, R.P., Kroes, J., Van Bakel, J., Hack-tenBroeke, M., Witte, J.P.M., 2013. Actualisatie schadefuncties landbouw; fase 1. Op weg naar een geactualiseerd en klimaatbestendig systeem van effect van waterbeheer op gewasopbrengst. STOWA 2013-22, Amersfoort.
- Bartholomeus, R.P., Witte, J.P.M., Van Bodegom, P.M., Van Dam, J.C., Aerts, R., 2012. Contrasting extremes in water-related stresses determine species survival, EGU General Assembly 2012. Geophysical Research Abstracts, Vienna, Austria, pp. Vol. 14, EGU2012-1845.
- Belmans, C., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J Hydrol*, 63(3-4): 271-286.
- Black, T.A., Gardner, W.R., Thurtell, G.W., 1969. The Prediction of Evaporation, Drainage, and Soil Water Storage for a Bare Soil. *Soil Sci Soc Am J*, 33(5): 655-660.
- Boesten, J.J.T.I., Stroosnijder, L., 1986. Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate. *Neth J Agric Sci*, 34: 75-90.
- De Wit, C.T., 1958. Transpiration and crop yields. Agricultural Research Reports, 64.4. Pudoc, Wageningen, 88 pp.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, 189 pp.
- Feddes, R.A., Raats, P.A.C., 2004. Parameterizing the soil-water-plant root system. In: Feddes, R.A., Rooij, G.H.d., Van Dam, J.C. (Eds.), *Unsaturated-zone Modeling: Progress, Challenges, Applications* Wageningen UR Frontis Series Wageningen, pp. 95-141.
- Goudriaan, J., 1977. Crop meteorology: a simulation study. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen.
- Kroes, J. et al., 2015. Waterwijzer Landbouw, fase 2; Modelling van het bodem-water-plantsysteem met het gekoppelde instrumentarium SWAP-WOFOST, STOWA, 2015(16).
- Kroes, J.G., Supit, I., 2011. Impact analysis of drought, water excess and salinity on grass production in The Netherlands using historical and future climate data. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1): 370-381.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Jacobs, C.M.J., 2008. SWAP version 3.4, Theory description and user manual. Alterra report 1649, Wageningen University and Research Centre, Wageningen.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Jacobs, C.M.J., 2009. SWAP version 3.2, Theory description and user manual. Alterra report 1649 (update 02), Wageningen University and Research Centre, Wageningen.
- NHV, 2002. Hydrologische woordenlijst. NHV-special, 5. Nederlandse Hydrologische Vereniging.
- R Development Core Team, 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Sumner, D.M., Jacobs, J.M., 2005. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *J Hydrol*, 308(1-4): 81-104.
- Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Kroes, J.G., 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 640-653.
- Van der Gaast, J.W.J., Massop, H.T.L., Vroon, H.R.J., Staritsky, I.G., 2006. Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken, Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. AlterraRapport 1339. 111 blz. 54 figuur; 27 tab.; 64 ref.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J*, 44: 892-898.



- Von Hoyningen-Hüne, J., 1983. Die Interception des Niederschlags in landwirtschaftlichen Beständen.
- Witte, J.P.M., Leunk, I., Cirkel, D.G., Aarts, H.F.M., Zaadnoordijk, W.J., 2015a. Achtergrondverlaging en grondwateraanvulling in Noord-Brabant. *Stromingen*, 24(2015): 53-65.
- Witte, J.P.M., Zaadnoordijk, W.J., Cirkel, D.G., Leunk, I., Aarts, H.F.M., 2015b. Grondwateraanvulling en achtergrondverlaging in de provincie Noord-Brabant. BTO 2015.015, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Wösten, J., De Vries, F., Denneboom, J., van Holst, A., 1988. Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, 1: 250 000, ten behoeve van de PAWN-studie. Generalization and soil-physical translation of the soil map of the Netherlands, 1(250,000).