



Bepalen Penman-Monteith gewasweerstand

Gestandaardiseerde conversie van Makkink-gewasfactoren naar Penman-Monteith
gewasweerstand, documentatie R-script en toepassing voor het NHI

Pim Dik, Martin Mulder



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Bepalen Penman-Monteith gewasweerstand

Gestandaardiseerde conversie van Makkink-gewasfactoren naar Penman-Monteith
gewasweerstand, documentatie R-script en toepassing voor het NHI

Pim Dik, Martin Mulder

Deze documentatie is samen met bijbehorend R-pakket geschreven voor project 'Onverzadigde zone' van
tender-net project TN332825 in opdracht van NHI + STOWA.

Wageningen Environmental Research
Wageningen, april 2024

Gereviewd door:
Frank van der Bolt, Senior onderzoeker waterbeheer (WENR)

Akkoord voor publicatie:
Mirjam Hack, teamleider van team Bodem, Water en Landgebruik

Rapport 3340
ISSN 1566-7197

Dik, P.E., H.M. Mulder, 2024. *Bepalen Penman-Monteith gewasweerstanden; Gestandaardiseerde conversie van Makkink-gewasfactoren naar Penman-Monteith gewasweerstanden, documentatie R-script en toepassing voor het NHI*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3340. 48 blz.; 9 fig.; 23 tab.; 11 ref.

Het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) bevat data, modelcodes en tools voor het modelleren van het watersysteem in Nederland. De stroming van water in de onverzadigde zone kan worden gemodelleerd met (Meta)SWAP. Het gedrag van het grondwater in de onverzadigde zone hangt af van de verdamping door gewassen en vice versa. In de huidige modellen SWAP en MetaSWAP (vanaf circa 2010) wordt daarom de gewasgroei gesimuleerd met WOFOST.

Met de huidige, meer fysische manier van modelleren van de gewasgroei en verdamping worden interceptieverdamping, transpiratie en bodemverdamping separaat gesimuleerd, waarbij extra parameters nodig zijn die bepaald moeten worden. Dit rapport beschrijft hoe dit is geautomatiseerd. Tevens zijn verschillende analyses uitgevoerd om de resultaten te controleren en te vergelijken met eerdere modelresultaten.

Trefwoorden: SWAP, MetaSWAP, WOFOST, gewasweerstand, interceptie

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/654383> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2024 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem.

In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Inhoud

Verantwoording	5
1 Aanpak	7
1.1 Algemeen	7
1.2 Hoofdpijnen	7
1.3 Uitgangspunten	8
1.4 Stappen	10
2 Invoergegevens verzamelen	11
2.1 Gewasfactoren van Feddes	11
2.2 Makkink-referentieverdamping	11
3 Voorbereiden kalibratie	12
3.1 Berekenen verdamping Feddes	12
3.2 Berekenen verdamping Penman-Monteith	12
3.3 Doelfunctie	13
4 Kalibratie gewasweerstand 2018	14
4.1 Kalibratie	14
4.2 Vergelijking tussen handmatig en geautomatiseerd bepaalde gewasweerstand	14
4.3 Check simulatie SWAP-WOFOST	15
4.4 Gevoeligheid voor andere kalibratieperiode	16
5 Kalibratie gewasweerstand 2023	18
5.1 Uitgangspunten	18
5.2 Check resultaten basissimulatie SWAP	18
5.3 Effect van de doelfunctie	20
5.4 Gevoeligheid van bodemverdamping voor bodemtype	21
5.5 Gevoeligheid voor klimaat en gewasverbetering	22
5.6 Gewasweerstand bij nieuwe uitgangspunten	23
5.7 Gewasweerstand in combinatie met het Rutter- interceptieconcept	23
5.7.1 Rutter-interceptie in SWAP	24
5.7.2 Rutter-interceptie in MetaSWAP	24
5.7.3 Methodiek	26
5.7.4 Gewasweerstand bij dagelijkse meteogegevens (met neerslagduur)	28
5.7.5 Gewasweerstand bij uurlijkse meteogegevens	31
6 Conclusies en discussie	35
Literatuur	36
Bijlage 1 Kalibratie verdamping Waterwijzer Landbouw	37
Bijlage 2 Aanvullende gewassen	38
Bijlage 3 Rekentool en basisdata	40

Verantwoording

Rapport: 3340

Projectnummer: TN332825

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Senior onderzoeker waterbeheer

naam: Frank van der Bolt

datum: februari 2024

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack

datum: maart 2024

1 Aanpak

1.1 Algemeen

Het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) bevat modellen en datasets voor het modelleren van grondwater in Nederland. Het grondwater in de onverzadigde zone kan worden gemodelleerd met (meta)SWAP. Het gedrag van het grondwater in de onverzadigde zone hangt af van de verdamping door gewassen. De verdamping varieert in het groeiseizoen en verschilt per gewas. De actuele verdamping van gewassen wordt bepaald door factoren die de potentiële verdamping reduceren, bijvoorbeeld droogte, te natte omstandigheden of te zout bodemwater.

De potentiële verdamping bestaat uit drie componenten: interceptie van neerslag, transpiratie van gewas en verdamping van de bodem. In de jaren na 1970 werd alleen een totale verdamping berekend. In de huidige modellen SWAP en MetaSWAP (vanaf circa 2010) staat de simulatie van gewasgroei centraal, waarbij een uitsplitsing in interceptie, transpiratie en bodemverdamping wordt gemaakt.¹ De transpiratie van een gewas is bepalend voor de opbrengst.

Door de huidige, meer fysische manier van modelleren van de gewasgroei en verdamping, worden interceptie, transpiratie en bodemverdamping separaat gesimuleerd, waarbij voor dit concept extra parameters nodig zijn. Deze parameterwaarden dienen bepaald te worden. In 2017 is een notitie verschenen waarbij de methodiek voor het bepalen van deze waarden is beschreven (Van Dam en Van Walsum, 2017).² Daarna zijn de gewasweerstandens verschillende keren bepaald. Voor de theorie en de methodiek wordt naar deze notitie verwezen, die als bijlage is toegevoegd. Gevraagd is deze methodiek te standaardiseren. Dit rapport beschrijft hoe dit is geautomatiseerd en tevens zijn verschillende analyses uitgevoerd.

1.2 Hoofdlijnen

In de jaren vanaf 1970 heeft Feddes een methodiek ontwikkeld om de potentiële verdamping van gewassen te bepalen op basis van gewasfactoren. Deze zijn in die tijd bepaald voor een beperkt aantal gewassen. De gewasfactoren zijn bepaald voor decaden (decade 1: dag 1-10, decade 2: dag 11-20, decade 3: dag 21 tot einde maand, dus totaal 36 decaden per jaar). In Nederland zijn vervolgens Makkink-gewasfactoren veel gebruikt om potentiële verdamping te berekenen op basis van de Makkink-referentieverdamping voor gras (Kroes et al., 2017, paragraaf 3.3.2). De gewasfactoren worden vermenigvuldigd met de referentiegewasverdamping, wat de potentiële verdamping van het gewas oplevert. Dit wordt de gewasfactorenmethodiek genoemd. Deze verdampingshoeveelheden dienen als basisgegevens bij de overstap naar de nieuwe methodiek.

In 2017 is overgestapt op de Penman-Monteith-benadering met het gewasgroeimodel WOFOST (De Wit et al., 2020). WOFOST maakt deel uit van SWAP. Dit noemen we hier de gewasweerstandsmethodiek. Belangrijke randvoorwaarde is natuurlijk dat de berekening van de totale verdamping volgens de gewasfactorenmethodiek overeenkomt met de resultaten volgens de gewasweerstandsmethodiek. Daarom is een kalibratie uitgevoerd op basis van de potentiële verdamping van de gewasfactorenmethodiek. Hiervoor dienen de volgende parameters per gewas gekalibreerd te worden:

- potentiële transpiratie: gewasweerstand (of huidmondjesweerstand) $r_{s,min}$;
- actuele bodemverdamping: bodemweerstand r_{soil} ;

¹ Een extra verdampingsterm betreft de verdamping uit plassen. In de methodiek voor het bepalen van de gewasweerstandens wordt voorkomen dat plasvorming optreedt om een zuivere vergelijking tussen de verdamping bij Makkink-gewasfactoren met die volgens WOFOST (i.c.m. Penman-Monteith) mogelijk te maken.

² Deze methodiek is in de jaren daarna toegepast voor verschillende gewassen, waarbij voor de bodemweerstand en interceptie (bergingscoëfficiënt) vaste waarden zijn gebruikt, zie paragraaf 4.1.

- interceptie: afhankelijk van het gekozen interceptieconcept: voor Gash een set tijdsafhankelijke parameters, voor Hoyningen-Braden de bergingscoëfficiënt a , voor het Rutterconcept de interceptiecapaciteit per bladindex.

Als de grootte van deze parameters eenmaal bepaald zijn, kunnen ze in simulaties gebruikt worden.

De met SWAP-WOFOST bepaalde jaarlijkse verdamping wordt vergeleken met de potentiële verdamping volgens de gewasfactorenmethodiek.

1.3 Uitgangspunten

Uitgaan van standaard WOFOST-files, maar deze eventueel aanpassen om een volledige gewasontwikkeling te simuleren

Gewasfactoren zijn beschikbaar voor het groeiseizoen van de verschillende gewassen. Ze zijn veelal gedefinieerd van decade 10 t/m 27.

Een aantal aspecten is bij de WOFOST-gewasontwikkeling van belang:

- De fenologische gewasontwikkeling (development stage: DVS) is voornamelijk temperatuur-gestuurd. Binnen SWAP-WOFOST is de ontwikkeling van het gewas mede afhankelijk van de temperatuursom. Als binnen WOFOST gekozen wordt voor het zaaien van het gewas dan simuleert WOFOST voor verschillende jaren een ander groeiseizoen, uitgaande van een temperatuurafhankelijke ontkieming. De gewasfactorenmethodiek geeft de gewasontwikkeling voor een gemiddeld groeiseizoen (met de daarbij behorende gewasfactoren).
- Veel gewaseigenschappen m.b.t. verdamping (zoals gewashoogte en leaf area index: LAI) zijn direct dan wel indirect gelinkt aan de DVS.
- Als gevolg van klimaatverandering zien we een verhoging in temperatuur, met in de praktijk mogelijk ook een verlenging van het groeiseizoen. Een hogere temperatuur leidt dan tot een snellere ontwikkeling van het gewas.

Voor de huidige (2023) gewas-parametrisatie voor WOFOST zijn de temperatuursommen (lees: gewasontwikkeling) gekalibreerd op de klimaatperiode 1981-2010. Door deze gewasfiles te hanteren voor een eerdere klimaatperiode (met lagere temperaturen), kan het gevolg zijn dat het gewas niet volledig tot ontwikkeling komt. Dit beïnvloedt de potentiële verdamping. Voor de kalibratie van de gewasweerstand op een andere klimaatperiode moet het WOFOST-gewas wel tot volledige ontwikkeling komen. Dit houdt in dat de temperatuursom dus afgestemd moet worden op de klimaatperiode.

Om de gewasontwikkeling volgens WOFOST synchroon te laten lopen met die volgens de gewasfactorenmethodiek is het nodig de standaard parametrisatie van WOFOST aan te passen.

Checken basisrun op nat- en droogtestress, run-off en ponding

SWAP-WOFOST berekent een potentiële transpiratie die hoort bij de actuele gewasontwikkeling en die beïnvloed kan worden door nat- en droogtestress. Om de potentiële transpiratie te bepalen, is de voorwaarde dat in de simulaties geen transpiratiereductie optreedt. Een controle op het optreden van nat- en droogtestress is daardoor gewenst. Hetzelfde geldt voor het optreden van oppervlakkige afstroming en plasmvorming.

In geval van plasmvorming gaat SWAP ervanuit dat geen transpiratie plaatsvindt, maar alleen verdamping vanuit het water op maaiveld. Voor het afleiden van de parameterwaarden speelt dit echter geen rol, doordat bij de kalibratie voorkomen wordt dat plasmvorming optreedt.

Voor de kalibratieperiode 1961-1990 uitgaan van de gewasverdamping volgens de gewasfactorenmethode

De gewasfactoren van Feddes zijn voor de periode 1965-1985 afgeleid op basis van de gewasfactoren gepubliceerd door de Werkgroep Grevelingen zout/zoet (1982). De herkomst van deze gewasfactoren is niet vastgelegd, waarschijnlijk zijn dit bewerkingen van eerste versies van de FAO-gewasfactoren (Doorenbos en Pruitt, 1977). De gewasfactoren zijn afgestemd op het klimaat (of weer) van die periode en ook op de variëteiten van die periode. Een klimaatperiode is per definitie dertig jaar lang. Om dicht bij de periode van Feddes te blijven maar wel een klimaatperiode door te rekenen, is de periode 1961-1990 gekozen.

Gewasveredeling gericht op het vergroten van de productie leidt tot een hogere potentiële verdamping.

Klimaatverandering leidt in Nederland tot meer inkomende straling, hogere temperaturen, hogere CO₂-concentraties en een langer groeiseizoen, met mogelijk een verschuiving van de teeltperiode, de teelt van meer gewassen in het groeiseizoen en een andere potentiële verdamping.

In dit voorstel gaat het om het automatiseren van de conversie van de Feddes-gewasfactoren. Het aspect van gewasverbetering/bemesting en effecten van klimaatverandering zijn daarom buiten beschouwing gelaten.

Doelfunctie

Het doel van de kalibratie is het afleiden van gewasweerstand, zodanig dat de verdamping voor de verschillende jaren uit een reeks (bij voorkeur een klimaatperiode) zo goed mogelijk wordt benaderd en dat de gemiddelde verdamping over deze reeks jaren gesimuleerd met de gewasfactorenmethodiek en de gewasweerstandmethodiek aan elkaar gelijk zijn. Als doelfunctie kan gebruik worden gemaakt van bijvoorbeeld het gemiddelde van de verschillen of van het gemiddelde van de gekwadrateerde verschillen:

- Mean absolute error (ME) $\sum ET_{pot,Feddes} = \sum ET_{pot,PM}$ of
- Root mean square error (RMSE) op jaarbasis: $\frac{1}{n} \sum (ET_{pot,Feddes} - ET_{pot,PM})^2$

Voor completering van de verdampingsreeks volgens Feddes wordt buiten de periode met de Feddes-gewasfactoren gebruikgemaakt van de bodemverdamping van SWAP. Dit komt overeen met het vergelijken van alleen de verdamping gedurende een groeiseizoen.

Simulatieperiode

De Feddes-gewasfactoren zijn afgeleid voor de periode 1965-1985 en voor het klimaat in die periode. Het klimaat is de afgelopen decennia veranderd, met hogere neerslagen en gemiddeld hogere temperaturen en een langer groeiseizoen. De vraag is wat de gevoeligheid is van de simulatie/klimaatperiode voor de bepaalde gewasweerstand. En wat het effect daarvan is op de potentiële evapotranspiratie.

Aanpassen van groeiseizoen voor WOFOST en simpele gewasgroeimodule

Het groeiseizoen in SWAP-WOFOST zal als gevolg van de variatie in weer meestal niet samenvallen met het voor alle jaren identieke, opgelegde Feddes-groeiseizoen. Het groeiseizoen voor WOFOST (of de simpele gewasgroeimodule) is gelijk getrokken met dat van Feddes om de verdampingstermen met elkaar te vergelijken. Niet geanalyseerd is welk effect deze keuze heeft om de verschillen in groeiseizoen tussen jaren niet volledig mee te nemen op de berekende verdamping.

Vergelijking van de verdampingstermen van de gewasfactorenmethodiek met die van de gewasweerstandmethodiek

De verdamping van het gewas bij de gewasfactorenmethodiek bevat één verdampingsterm; dat is de gecombineerde term voor bodemverdamping, transpiratie en interceptieverdamping (Tabel 1). Bij Penman-Monteith worden deze termen apart berekend. De som van de verdampingstermen bij de gewasfactorenmethodiek dient gelijk te zijn aan die bij de gewasweerstandmethodiek. Buiten de periode waarvoor gewasfactoren zijn gedefinieerd, is bij de bepaling van de potentiële jaarlijkse gewasverdamping gebruikgemaakt van de actuele bodemverdamping zoals deze door SWAP is berekend. Hiervoor is gekozen, omdat de bovenste laag van de bodem snel uitdroogt, waardoor de actuele bodemverdamping sterk verschilt van de potentiële bodemverdamping. De invloed van het bodemtype heeft door de capillaire werking naar verwachting invloed op de bodemverdamping. Dit is in paragraaf 5.4 onderzocht.

Tabel 1 Verdampingstermen gewasfactorenmethodiek en gewasweerstandmethodiek.

Verdampingstermen gewasfactorenmethodiek	Verdampingstermen gewasweerstandmethodiek
Bodemverdamping Eact (buiten periode met gewasfactoren)	Bodemverdamping Eact
Evapotranspiratie ETpot (tijdens periode gewasfactoren)	Transpiratie Tpot
	Interceptieverdamping Eic

1.4 Stappen

In de procedure voor de kalibratie van de Penman-Monteith-gewasweerstand zijn de volgende stappen te onderscheiden:

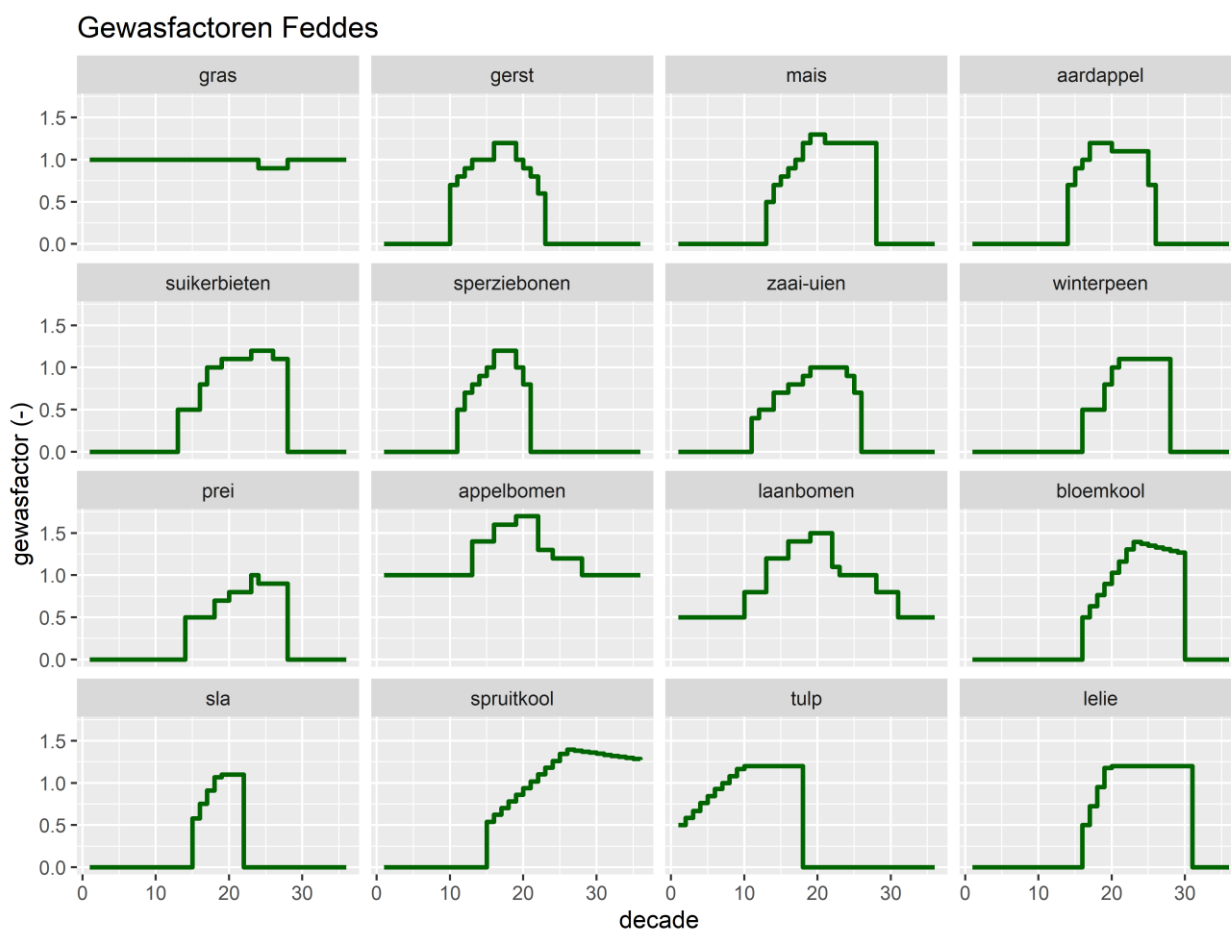
1. Invoergegevens verzamelen:
 - a. Gewasfactoren van Feddes
 - b. Makkink-referentieverdamping
 - c. SWAP-parametrisaties voor simulatie potentiële gewasverdamping
 - d. Factor voor aanpassing van de potentiële gewasverdamping bepalen
2. Voorbereiden kalibratie:
 - a. Berekenen verdamping Feddes
 - b. Berekenen verdamping Penman-Monteith
 - c. Check van de basissimulatie op plausibiliteit (DVS, LAI, Height, Rootdepth, verdampingsreductie en run-off)
3. Kalibratie gewasweerstand Penman-Monteith:
 - a. R-procedure opstellen
 - b. Kalibratie uitvoeren
 - c. Beschrijven
4. Vergelijking met huidig gebruikte gewasweerstand:
 - a. Presenteren van de gemiddelde verdampingstermen

2 Invoergegevens verzamelen

2.1 Gewasfactoren van Feddes

De Feddes-gewasfactoren zijn verzameld en zijn in Figuur 1 weergegeven. Hieruit blijkt dat voor de gewassen het groeiseizoen sterk varieert. Voor gras en bomen bestrijkt die het gehele jaar. Gerst begint vroeg en is ook snel weer van het land af. Ook sla heeft een kort groeiseizoen; wellicht dat voor dit gewas meerdere teelten achter elkaar worden gezet. Spruiten staan lang op het land.

File: "[Basisdata/Feddes/Feddes_gewasfactoren.xlsx](#)".³



Figuur 1 Gewasfactoren (een gewasfactor van 0 betekent dat de bodem kaal is en er bodemverdamping optreedt).

2.2 Makkink-referentieverdamping

Voor het station De Bilt (nummer weerstation 260) zijn de meteorologische gegevens gedownload voor de jaren 1960 tot en met 2021.

File: "[Basisdata/Feddes/260.met](#)"

³ Feddes heeft in 1987 gewasfactoren gepubliceerd. Deze zijn gegeven voor de periode april t/m september. Voor gras geldt buiten deze periode een waarde van 1 (aanname).

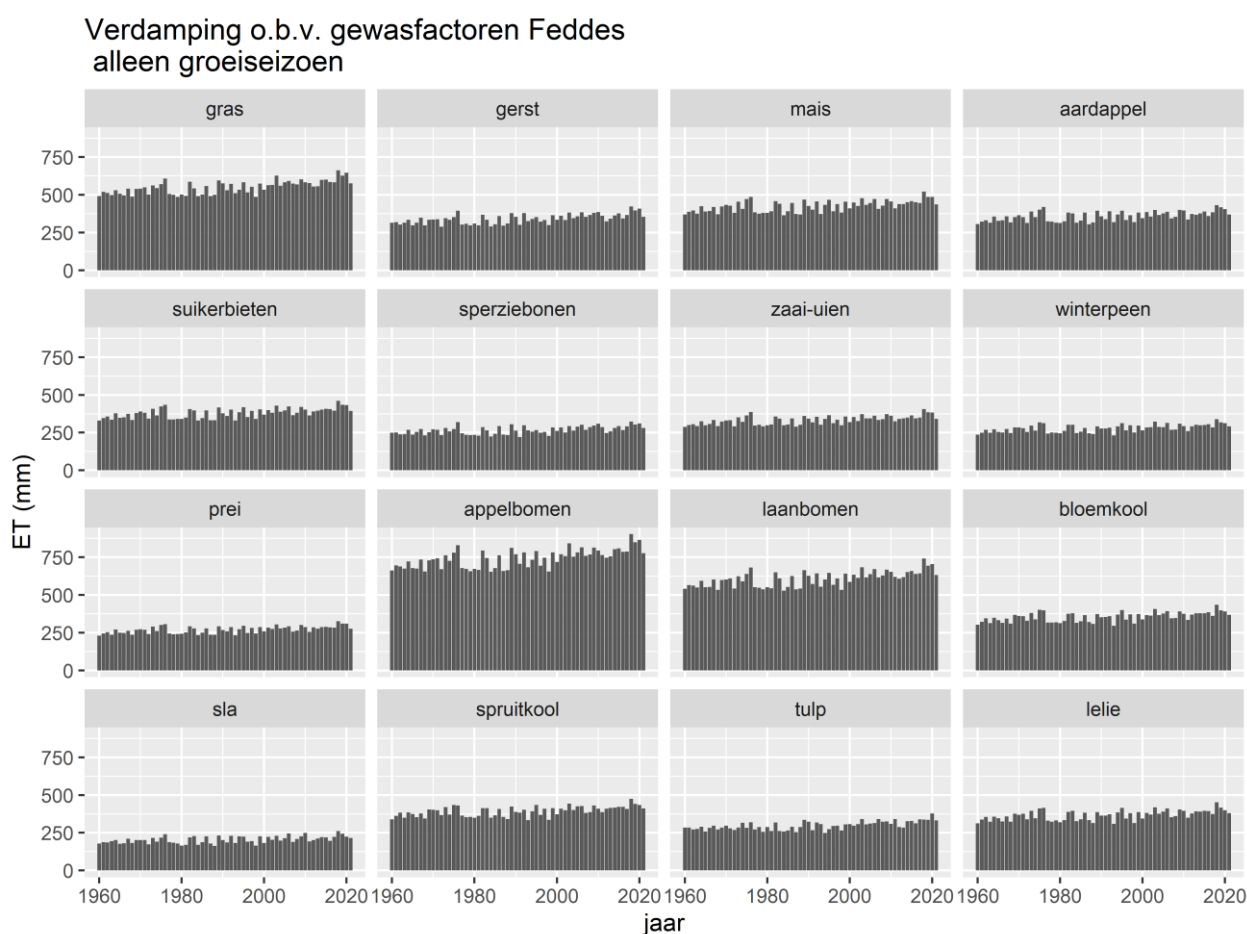
3 Voorbereiden kalibratie

3.1 Berekenen verdamping Feddes

De referentiegewasverdamping is vermenigvuldigd met de gewasfactoren en deze zijn per jaar gesommeerd. In Figuur 2 is de jaarverdamping weergegeven. Hieruit blijkt dat de verdamping de laatste zestig jaar is toegenomen. Opgemerkt wordt dat de gesommeerde waarden gelden over het groeiseizoen van dat gewas. Voor gras betreft dit het hele jaar.

De gegevens zijn weggeschreven naar de file "[Basisdata/Feddes/gewas_Makkink_pot.csv](#)". Het eerste deel van de kolommen betreft de gewasfactoren en het tweede deel betreft de potentiële verdamping.

De gegevens zijn verwerkt met een R-script "[tool/R/Get_ETpot_Feddes.R](#)".



Figuur 2 Gewasverdamping op basis van de gewasfactoren en de referentiegewasverdamping (voor de groeiseizoenen van de gewassen).

3.2 Berekenen verdamping Penman-Monteith

Bij de gewasweerstandsmethodiek is de verdamping berekend met SWAP-WOFOST. Hiervoor is de parametrisatie uit 2017 gebruikt. Dit betreft een basisfile voor de ondergrond met bijbehorende randvoorwaarden en een aantal files voor de parametrisatie van de gewassen. Deze basissimulatie is gecheckt op plausibiliteit (DVS, LAI, Height, verdamping en verdampingsreductie). Plausibiliteit is hierbij

gedefinieerd als rekenresultaten zonder uitschieters met jaartotalen binnen een range met een maximum- en minimumwaarde. Deze waarden zijn in Tabel 2 weergegeven.

Tabel 2 Range van te verwachten parameterwaarden in de SWAP-WOFOST-simulatie voor alle gewastypen.

Parameter	Minimale waarde	Maximale waarde
DVS (-) einde groeiseizoen	1.5	3
LAI (-) einde groeiseizoen	3	6
Height (cm)	30	200 (bomen hoger)
Evapotranspiratie (mm/j)	400	700
Verdampingsreductie (mm/j)	0	1
Run-off (mm/j)	0	1
Ponding (mm)	0	1

3.3 Doelfunctie

De kalibratie van de gewasweerstand kan op verschillende manieren uitgevoerd worden. Hierbij wordt gebruikgemaakt van een doelfunctie, die geminimaliseerd wordt bij de kalibratie. In 2017/2018 is als doelfunctie de absolute waarde van het verschil gebruikt:

$$f = |\sum ET_{pot,Feddes} - \sum ET_{pot,PM}|$$

Een alternatief is het minimaliseren van de RMSE van de verdampingsgegevens op jaarbasis (dit kan bij een scheve verdeling van de jaarverdamping tot enigszins andere resultaten leiden):

$$g = \frac{1}{n} \sum (ET_{pot,Feddes} - ET_{pot,PM})^2$$

De functie o.b.v. de RMSE is vaak robuuster. In deze studie zijn beide doelfuncties toegepast, zie paragraaf 0.

4 Kalibratie gewasweerstanden 2018

4.1 Kalibratie

Als eerste is een kalibratie uitgevoerd met de gegevens (Feddes en SWAP-parametrisatie) en de SWAP-executable, die Paul van Walsum in 2017/18 heeft gebruikt (versie 4.0.10d). Op deze manier is gecheckt of de handmatige kalibratie uit 2017/18 vergelijkbare resultaten oplevert als de geautomatiseerde kalibratie.

De volgende waarden zijn gebruikt in 2017/18:

- Voor gras en de andere akkerbouwgewassen: de tijdsperiode 1979-2008. Eint, Tpot en Eact zijn in alle gevallen gebruikt.
- Voor de bodemweerstand zijn standaardwaarden gebruikt; voor gras 600 s/m en voor akkerbouwgewassen 150 s/m (mais).
- De interceptieverdamping wordt door het SWAP-model berekend in geval van Penman-Monteith. De hiervoor bepalende parameters zijn niet aangepast.
- Managementfactor: dat is de factor die aangeeft welke productie in de praktijk maximaal te behalen is. In 2023 zijn andere managementfactoren gehanteerd dan in 2018 (Tabel 3).

Tabel 3 De in 2018 en 2023 gebruikte managementfactoren.

Gewas	Managementfactor 2018	Managementfactor 2023
Grasmaaien	0.9	0.9
Aardappel	0.9	0.8
Snijmais	1.0	0.9
Suikerbieten	1.0	1.0
Zomergerst	1.0	1.0

- Het weerstation De Bilt is het basisstation.

4.2 Vergelijking tussen handmatig en geautomatiseerd bepaalde gewasweerstanden

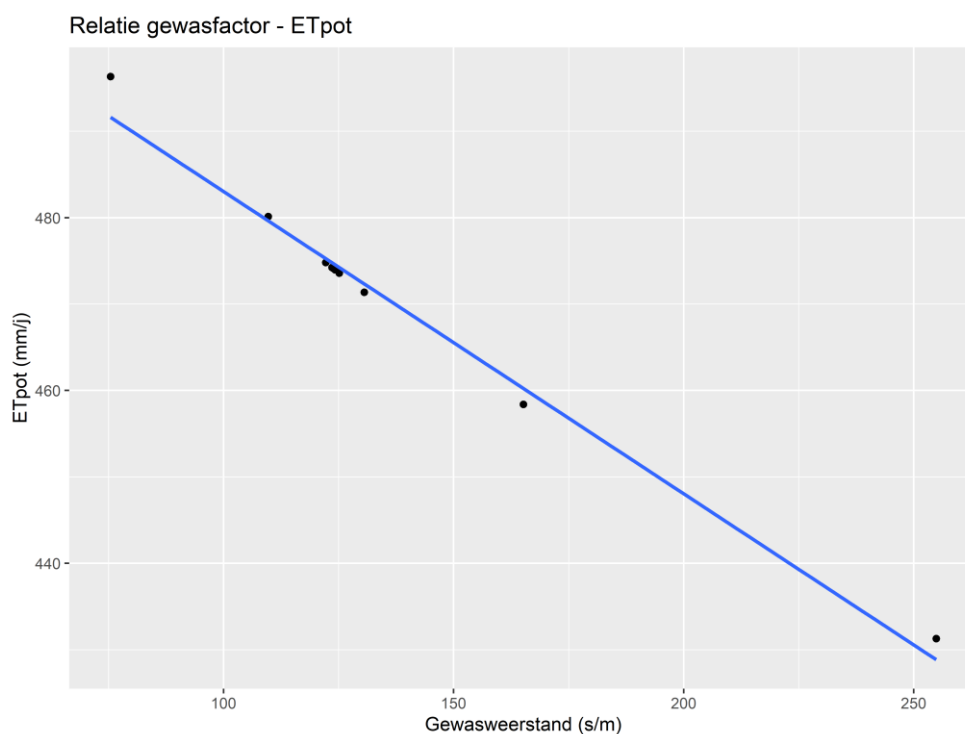
In Tabel 4 zijn de bepaalde gewasweerstanden en potentiële jaarverdamping weergegeven, zowel voor de handmatige kalibratie als de geautomatiseerde. Hieruit blijkt dat er beperkte verschillen zijn in de potentiële verdamping. Ook de verschillen in de gekalibreerde gewasweerstanden zijn beperkt. In Tabel 5 zijn de deeltermen van de verdamping gegeven. In Figuur 3 is de gevoeligheid van de potentiële verdamping voor de bepaalde gewasweerstand gegeven. De punten geven het kalibratieproces weer; voor suikerbieten wordt naar een ETpot gezocht gelijk aan 474 mm/j. De kalibratie begint met een waarde voor de gewasweerstand van ruim 250 s/m en bepaalt daarvoor de totale verdamping, die blijkt lager dan de doelwaarde van 474 mm/j. Vervolgens wordt een waarde van circa 50 s/m gebruikt, wat resulteert in een te hoge evapotranspiratie. Uiteindelijk komt de kalibratie uit op een waarde van 124 s/m.

Tabel 4 Resultaten van de kalibratie van de gewasweerstand en gesimuleerde potentiële verdamping.

Gewas	Results 2023	Results 2018	Vershil	Results 2023	Results 2018	Vershil
	rs,min (s/m)	rs,min (s/m)	rs,min (s/m)	ETpotave (mm/j)	ETpotave (mm/j)	ETpotave (mm/j)
Gras	96	95	1	545	546	-1
Zomergerst	114	116	-2	450	449	1
Snijmais	170	173	-3	519	517	2
Aardappel	204	203	1	482	482	0
Suikerbieten	124	124	0	474	474	0

Tabel 5 Resultaten van de kalibratie van de gewasweerstand (2023): uitsplitsing in de verschillende verdampingstermen.

Gewas	Tpot (mm/j)	Interc (mm/j)	Eact (mm/j)
Gras	318	79	147
Zomergerst	183	30	238
Snijmais	275	52	192
Aardappel	262	47	172
Suikerbieten	221	42	212



Figuur 3 Gevoeligheid van de potentiële verdamping (ETpot) voor de gewasweerstand van suikerbieten.

4.3 Check simulatie SWAP-WOFOST

In paragraaf 1.3 en 3.2 is beschreven dat de SWAP-WOFOST-simulaties gecheckt moeten worden op plausibiliteit. Uit de simulatieresultaten blijkt dat geen droogteschade is berekend, maar wel natschade en dat dit sterk doorwerkt in de berekende gewasweerstand. Door de natschade te reduceren, kan deze doorwerking opgeheven worden. De reductie in berekende natschade is bereikt door uit te gaan van de Feddes-methode voor het berekenen van de natschade (Kroes et al., 2017, paragraaf 3.5.2) in plaats van

het berekenen van de natschade conform Bartholomeus (2008). Deze methodiek leidt tot minder opbrengstreductie als gevolg van natte omstandigheden. Hierdoor neemt de natschade voor alle gewassen af tot maximaal 0,1 mm per jaar.⁴

Het effect op de berekende gewasweerstand is weergegeven in Tabel 6. De berekende gewasweerstand is in de kalibratie zonder natschade gelijk of hoger dan bij de kalibratie met natschade. Dat deze hoger is, is niet verwonderlijk, omdat het gewas in de berekening zonder natschade een hogere gewasweerstand moet hebben om de gewasverdamping volgens de gewasfactorenmethode te halen.

Tabel 6 Bepaalde gewasweerstand in de kalibratie met enige natschade en de kalibratie zonder natschade.

Gewas	Origineel	Met natschade	Zonder natschade	verschil	Met natschade	Zonder natschade	verschil
	Natschade (mm/j)	rsc (s/m)	rsc (s/m)	rsc (s/m)	ETpot_swap (mm/j)	ETpot_swap (mm/j)	ETpot_swap (mm/j)
Gras	1	96	97	1	545	545	0
Zomergerst	23	114	145	32	450	450	0
Snijmais	11	170	187	18	519	520	0
Aardappel	1	204	204	0	482	482	0
Suikerbieten	25	124	143	20	474	474	0

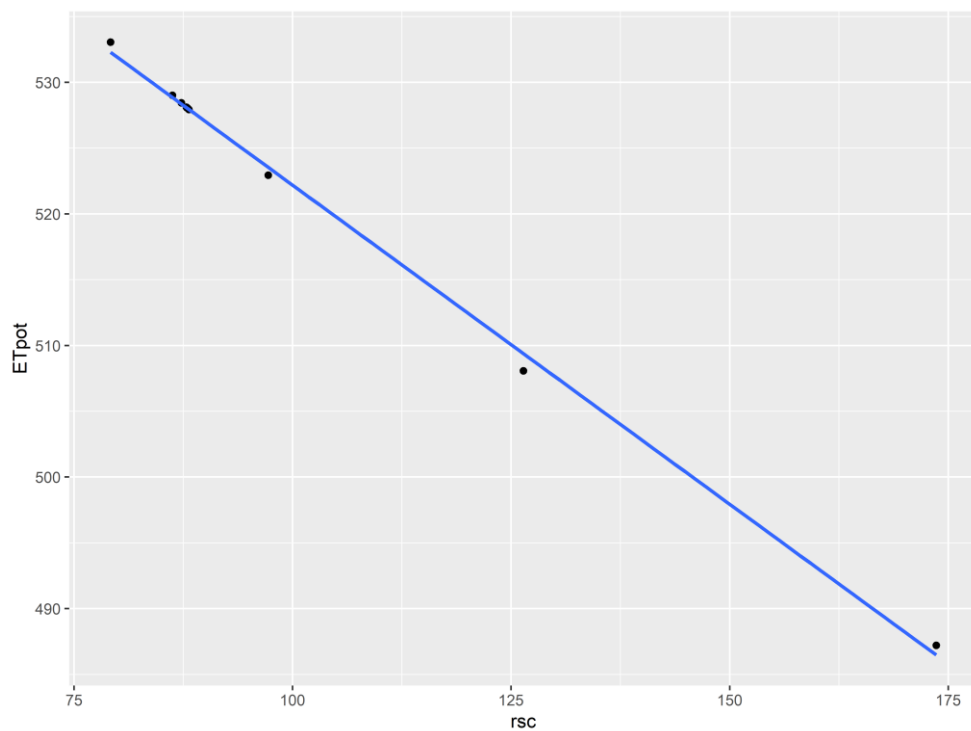
4.4 Gevoeligheid voor andere kalibratieperiode

De periode 1979-2008 is in de eerste kalibratie gebruikt. Nu zijn de Feddes-gewasverdampingscijfers geldig voor de toenmalige klimaatperiode, 1961-1990. Om de gevoeligheid voor de klimaatperiode te bepalen, is ook deze periode doorgerekend (Tabel 7). Als eerste valt op dat de gemiddelde verdamping in deze periode enigszins lager is, namelijk circa 9 tot 17 mm/j minder dan in de periode 1979-2008. Het werkt ook enigszins door in de gewasweerstand van de gewassen gras, mais en biet. Toch zijn deze verschillen relatief beperkt: voor gras bijvoorbeeld leidt een gewasweerstand van 97 s/m voor de periode 1961-1990 tot een met SWAP berekende potentiële verdamping (ETpot_swap) van ca. 523 mm/j (Figuur 4). Dat is slechts een beperkt verschil in vergelijking met de verdamping bij een gewasweerstand van 88 s/m. In Figuur 2 is te zien dat de verdamping over de jaren is toegenomen. Geconcludeerd wordt dat de gewasweerstand redelijk robuust lijken, oftewel niet erg sterk afhankelijk zijn van de gekozen kalibratieperiode.

Tabel 7 Bepaalde gewasweerstand voor periode 1979-2008 en periode 1961-1990.

Gewas	1979-2008	1961-1990	verschil	1979-2008	1961-1990	verschil
	rsc (s/m)	rsc (s/m)	rsc (s/m)	ETpot_swap (mm/j)	ETpot_swap (mm/j)	ETpot_swap (mm/j)
Gras	97	88	-9	545	528	-17
Zomergerst	145	166	21	450	441	-9
Snijmais	187	167	-20	520	506	-13
Aardappel	204	211	6	482	471	-11
Suikerbieten	143	142	-2	474	462	-12

⁴ In de gebruikte SWAP-versie kon geen gebruikgemaakt worden van de optie om geen natschade te berekenen.



Figuur 4 *Gevoeligheid van de potentiële verdamping (ETpot) voor de gewasweerstand van gras.*

5 Kalibratie gewasweerstand 2023

De kalibratie van de gewasweerstand is in eerste instantie uitgevoerd op basis van SWAP-versie 4.2.20 en de nieuwe gewasfiles.

5.1 Uitgangspunten

De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd voor de kalibratie:

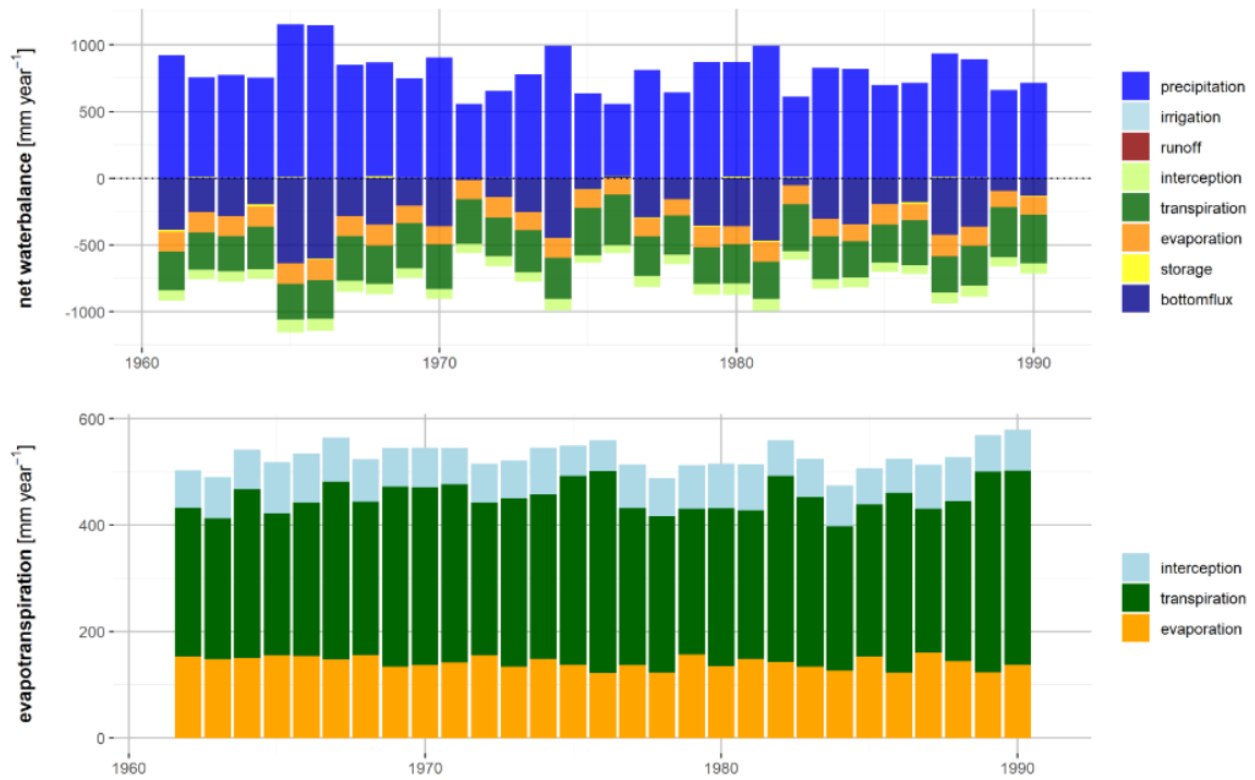
- Kalibratieperiode: 1961-1990.
- Bodemweerstand: Voor de bodemweerstand (RSOIL) zijn standaardwaarden gebruikt; voor gras 600 s/m en voor akkerbouwgewassen 150 s/m (mais).
- Interceptieverdamping: deze wordt door het SWAP-model berekend in geval van Penman-Monteith. Hiervoor zijn voor de parameters standaardwaarden gebruikt.
- Schade: voor droogteschade is gebruikgemaakt van de Feddes-methodiek en zijn de parameters zo aangepast dat er geen of zo weinig mogelijk droogteschade optreedt (zie ook paragraaf 1.3 en 3.2). $\text{ALPHACRIT} = 0.5$, $\text{HLIM3} = -8000$, $\text{HLIM4} = -16000$. Natschadeberekening is uitgeschakeld: $\text{SWOXYGEN} = 0$.
- Managementfactor: dat is de factor die aangeeft welke productie in de praktijk maximaal te behalen is (zie Tabel 3).
- Groeiseizoen: het groeiseizoen is bepaald door de Feddes-gewasfactoren.
- Wortelverdeling: belangrijk is dat het gewas voldoende water kan opnemen en dat er geen reductie door droogtestress optreedt. Of de gekozen wortelverdeling in de praktijk voorkomt, is niet van belang. Er is uitgegaan van een blokverdeling bij gras en lineair afnemend bij andere gewassen.
- Weerstation De Bilt is het basisstation. Dagneerslagen zijn gebruikt zonder regenduur ($\text{SWRAIN} = 0$) om zo de neerslag de tijd te gunnen in de bodem te dringen en plasvorming te voorkomen. Opgemerkt wordt dat bij het afleiden van gewasweerstand bij het gebruik van uurlijkse meteogegevens (neerslag en verdamping) wel hoge neerslagintensiteiten kunnen voorkomen. Dan zal gecontroleerd en beoordeeld moeten worden of en welk effect de gewasweerstand worden beïnvloed.
- Infiltratie: Er is uitgegaan van een bodem met een B02-bovengrond (zie voor de codering B02 Heinen et al., 2020). In principe mag de bodem geen invloed hebben. De eis is dat er geen nat- en droogschade optreedt. Daarom is een B02-bovengrond gekozen, deze is goed doorlatend en heeft bij een niet te diepe grondwaterstand voldoende vochtleverend vermogen.
- Gewassen: De WOFOST-gewassen zijn gebruikt. Maar niet van alle gewassen zijn WOFOST-parametrisaties bekend. In Bijlage 2 zijn de resultaten gegeven voor een aantal aanvullende (niet-WOFOST-)gewassen.

5.2 Check resultaten basissimulatie SWAP

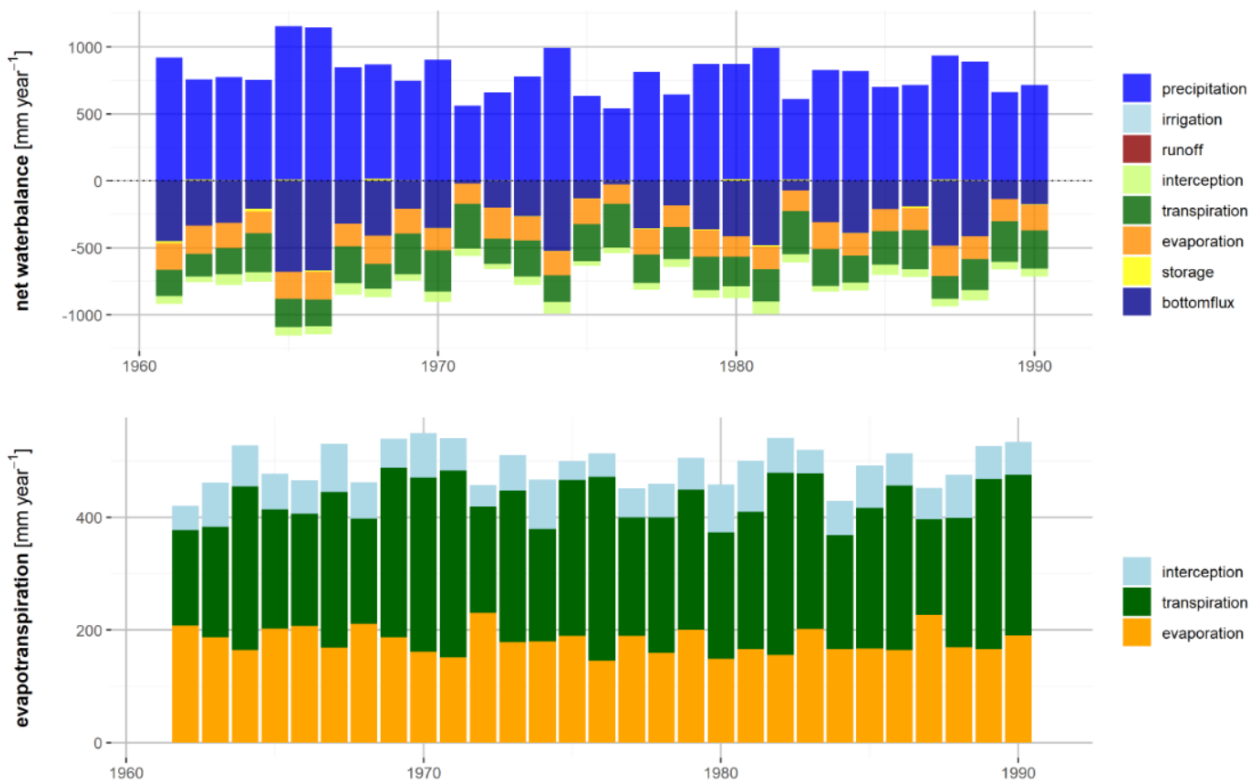
Bij de kalibratie moet aan verschillende randvoorwaarden worden voldaan:

- Geen zuurstof- en droogtestress;
- Het bereiken van een volwassen gewas (DVS van 2 of bijna 2);
- Een volgroeide bladmassa (LAI van ten minste 3);
- Plausibele ETpot (en ook Interceptie, Eact en Tpot).

Alvorens de kalibratie wordt uitgevoerd, zijn de bovenstaande randvoorwaarden gecheckt (Tabel 8). In Figuur 5 en Figuur 6 zijn voorbeelden opgenomen van berekende waterbalanstermen.



Figuur 5 Waterbalanstermen SWAP voor gras (kalibratie o.b.v. SWAP-versie 4.2.20).



Figuur 6 Waterbalanstermen SWAP voor mais (kalibratie o.b.v. SWAP-versie 4.2.20).

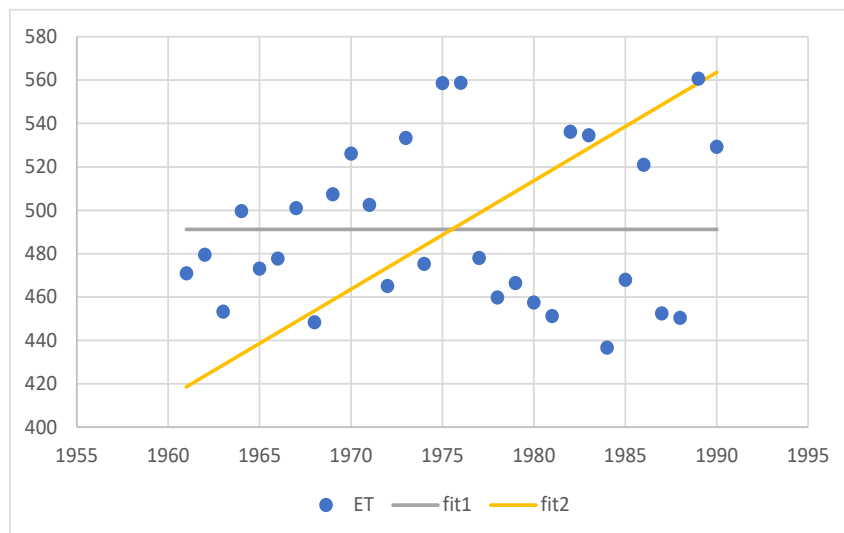
Tabel 8 Controles SWAP-runs.

Gewas	DVSmax (-)	LAI _{max} (-)	HEIGHT _{max} (cm)	POND _{max} (cm)	RUNOFF (cm/j)	TREDWET (cm/j)	TREDDRY (cm/j)
grasmaaien	nvt	4.7	12	0	0	0	0
zomergerst	2.3	5.7	80	0	0	0	0
snijmais	1.8	4.1	180	0	0	0	0
aardappel_overig	2.0	5.7	50	0	0	0	0
suikerbieten	1.8	5.3	48	0	0	0	0

5.3 Effect van de doelfunctie

Effect doelfunctie bij lineaire regressie

In bepaalde gevallen leidt de gemiddelde afwijking niet tot de gewenste parameteroptimalisatie, doordat soms meerdere oplossingen mogelijk zijn, zie onderstaand voorbeeldfiguur en tabel, waarbij een lineaire regressie wordt uitgevoerd. Een alternatief is de RMSE (Root Mean Square Error).



Figuur Voorbeeld effect doelfunctie.

Uit de tabel volgt dat voor de beide fits de ME gelijk scoort, terwijl de RMSE een duidelijke lagere afwijking geeft voor fit 1. Natuurlijk moet de doelfunctie afgestemd zijn op het doel van de kalibratie. In dit geval is het doel de afwijking in ET_{pot} per jaar te minimaliseren. Hier past de RMSE op basis van de ET_{pot} per jaar goed bij. Bovendien geeft de RMSE-waarde dan een indruk van de afwijkingen per jaar.

Tabel Waarden doelfuncties ME en RMSE bij verschillende fits.

	ME (mm)	RMSE (mm)
fit1	0.00	36.6
fit2	0.00	52.8

Bij de kalibratie wordt een doelfunctie gebruikt. De doelfunctie is een maat voor de afwijking tussen gemeten en gesimuleerde waarden. In deze kalibratie zijn de 'gemeten' waarden de gewasverdampingsgegevens volgens Feddes. In 2017/2018 is de Mean Error gebruikt als doelfunctie. Het effect van de twee doelfuncties is in Tabel 9 weergegeven (voor een parametrisatie van de gewassen). De verschillen zijn beperkt voor zowel

de gewasweerstand als de ETpot. Aanbevolen wordt gebruik te maken van de RMSE als doelfunctie, omdat deze goed past bij het doel van de kalibratie en ook robuuster is. In Tabel 10 zijn de bepaalde ME en RMSE weergegeven. De bepaalde RMSE bedraagt ongeveer 17 tot 27 cm, wat een maat is voor de jaarlijkse verschillen in de potentiële evapotranspiratie berekend met Feddes en Penman-Monteith.

Tabel 9 Effect van doelfunctie ME en RMSE (SWAP 2023).

Gewas	Doelfunctie ME	Doelfunctie RMSE	verschil	Doelfunctie ME	Doelfunctie RMSE	verschil
	rsc (s/m)	rsc (s/m)	rsc (s/m)	ETpot_swap (mm/j)	ETpot_swap (mm/j)	ETpot_swap (mm/j)
grasmaaien	80	78	-2	528	529	1
zomergerst	167	167	0	445	445	0
snijmais	143	147	+4	506	503	-3
aardappel overig	208	207	-1	471	472	1
suikerbieten	143	141	-2	462	463	1

Tabel 10 Bepaalde grootte van de doelfunctie ME en RMSE (SWAP 2023).

Gewas	ME (mm/j)	RMSE (mm/j)
grasmaaien	0	21.9
zomergerst	0	25.3
snijmais	0	30.4
aardappel_overig	0	11.5
suikerbieten	0	16.7

5.4 Gevoeligheid van bodemverdamping voor bodemtype

Voor de bodemverdamping is de uitdroging van de bovenste bodemlaag een belangrijk aspect. Bodemverdamping treedt op tijdens perioden waarin de gewasbedekking beperkt is, maar er wel een aanzienlijke verdamping kan optreden. Voor akkerbouwgewassen is dat waarschijnlijk de periode voorafgaand aan en tijdens de gewasgroei in het vroege voorjaar. Door de bodemverdamping droogt de bovenste bodemlaag uit, waardoor verdere bodemverdamping beperkt wordt. Aanvulling van grondwater vanuit diepere lagen kan dan optreden door capillaire nalevering. Deze is echter wel afhankelijk van de bodemfysische karakteristieken. Daarom is ook met een ander bodemtype gerekend om de gevoeligheid op de bodemverdamping te bepalen.

De basisruns zijn uitgevoerd met de bodemopbouw, zoals weergegeven in Tabel 11 (voor de bouwstenen zie Heinen et al., 2020).

Tabel 11 Discretisatie en parametrisatie bodem.

Bouwsteen	Dikte (cm)	Onderzijde
B02	25	25
O02	15	40
O02	20	60
O01	540	600

Aanvullend is voor de bovenste bodemlaag met een aantal andere bouwstenen gerekend, namelijk B04 (zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand) en B12 (zeer zware klei) i.p.v. B02 (zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand). De verzadigde doorlaatfactor KSATEXM is op minimaal 20 cm/d gesteld: dat betekent een aanpassing voor B12.

Uit Tabel 12 blijkt inderdaad dat voor deze verschillende bodemtypen de variatie in bodemverdamping circa 4 mm/j is. Voor het gewas mais is dezelfde exercitie uitgevoerd en blijken de verschillen in bodemverdamping nog minder groot te zijn (gemiddeld over jaren).

Tabel 12 Effect van bodemtype op gemiddelde jaarlijkse bodemverdamping Eact voor het grondgebruik gras en mais.

Bouwsteen	Kritieke Z-afstand (cm)	Eact gras (mm/j)	Eact mais (mm/j)
B2- zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	70	142	181
B4 - zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	182	146	182
B12 - zeer zware klei	13	144	182

5.5 Gevoeligheid voor klimaat en gewasverbetering

De opbrengsten in de landbouw zijn momenteel aanzienlijk hoger dan in de periode 1961-1990. Naast de gewasveredeling heeft dat met het veranderende klimaat te maken. Als eerste is het effect van een andere klimaatperiode op de gewasweerstand bepaald. De klimaatperiodes 1991-2020 en 1961-1990 zijn hiervoor gebruikt. Uit Tabel 13 blijkt een toename van de potentiële evapotranspiratie. Het effect op de gewasweerstand is wisselend: soms hoger en soms lager. Door veredeling kan een gewas een hogere opbrengst bereiken. In hoeverre dit gepaard gaat met een evenredig hogere transpiratie, is niet bekend.

Tabel 13 Bepaalde gewasweerstand en ETpot voor periodes 1961-1990 en 1991-2020.

Gewas	1961-1990	1991-2020	verschil	1961-1990	1991-2020	verschil
	rsc (s/m)	rsc (s/m)	rsc (s/m)	ETpot_swap (mm/j)	ETpot_swap (mm/j)	ETpot_swap (mm/j)
grasmaaien	78	85	7	529	573	44
zomergerst	167	114	-53	445	484	39
snijmais	147	168	19	503	538	35
aardappel_overig	207	192	-15	472	500	28
suikerbieten	141	139	-2	463	493	30

Stel dat door gewasveredeling de potentiële transpiratie met 5% is toegenomen, gaande van 1961-1990 naar 1991-2020, dus boven op de toename van de verdamping door klimaatverandering (dus fET = 1.05). In Tabel 14 zijn de resultaten opgenomen van de bepaalde gewasweerstand en de berekende potentiële evapotranspiratie. Het leidt tot (aanzienlijk) lagere gewasweerstand en natuurlijk ook een hogere ETpot.

Tabel 14 Bepaalde gewasweerstanden en ETpot voor verschillende fET (1991-2020, SWAP 2023).

Gewas	fET = 1.00	fET = 1.05	verschil	fET = 1.00	fET = 1.05	verschil
	rsc (s/m)	rsc (s/m)	rsc (s/m)	ETpot_swap (mm/j)_swap	ETpot_swap (mm/j)	ETpot_swap (mm/j)_swap
grasmaaien	85	44	-41	573	602	29
zomergerst	114	78	-36	484	502	18
snijmais	168	139	-29	538	560	22
aardappel_overig	192	158	-34	500	518	18
suikerbieten	139	97	-42	493	513	20

5.6 Gewasweerstanden bij nieuwe uitgangspunten

In de voorgaande paragrafen zijn verschillende uitgangspunten voor de berekening van de gewasweerstanden onderzocht. In deze paragraaf zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. doelfunctie: RMSE,
2. gewas-parametrisatie: nieuwste versie,
3. nieuwere SWAP-versie 4.2.20 en
4. klimaatperiode: 1961-1990. In Tabel 15 zijn de bepaalde gewasweerstanden gepresenteerd. De verdeling van de ETpot over de verschillende verdampingstermen verschilt sterk per gewas. De transpiratie (TPOT) varieert tussen 187 en 310 mm/j (alleen akkerbouwgewassen). Voor akkerbouwgewassen is de kale grondverdamping qua ordegrrootte vergelijkbaar met de transpiratie.

Tabel 15 Gewasweerstand en verdeling verdampingstermen voor verschillende gewassen (resultaat 2023, 1961-1990, RMSE).

Gewas	rsc s/m	ETpot_swap mm/j	TPOTmean mm/j	INTERCmean mm/j	EACTmean mm/j
grasmaaien	78	529	310	76	142
zomergerst	167	445	187	35	222
snijmais	147	503	260	46	197
aardappel	207	472	258	49	165
suikerbieten	141	463	216	48	199

5.7 Gewasweerstanden in combinatie met het Rutter-interceptieconcept

Het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) bevat modellen en datasets voor het modelleren van grondwater (-beweging en -standen) in Nederland. Het gedrag van het grondwater in de onverzadigde zone kan met MetaSWAP of SWAP worden gesimuleerd. Simuleren van gewasgroei is in beide modellen een belangrijk onderdeel. Daarbij worden interceptieverdamping, transpiratie en bodemverdamping gesimuleerd. Voor het NHI wordt gebruikgemaakt van WOFOST. In dit concept is de gewasweerstand een belangrijke parameter, die bepaald moet worden. De gewasweerstand bepaalt de gewasverdamping en de ontwikkeling van een gewas. Maar ook de parameterwaarden voor de bodemverdamping en de interceptieverdamping dienen bepaald te worden.

Recentelijk zijn verbeteringen in de modelcode van SWAP doorgevoerd. Dit betreft het toevoegen van het Rutter-concept voor de simulatie van interceptie en verbeteringen in de berekening van de Penman-Monteith verdamping (zie FAO-beschrijving [Chapter 4 - Determination of ETo \(fao.org\)](#)).

Het model SWAP kan gevoed worden met daggegevens of uurgegevens van de meteorologie. Dit heeft invloed op de gewasweerstand, maar ook op de gesimuleerde interceptie- en bodemverdamping. Deze dienen dus afhankelijk van de keuze voor dag- dan wel uurgegevens te worden bepaald.

5.7.1 Rutter-interceptie in SWAP

In SWAP waren er tot voor kort twee concepten voor interceptie beschikbaar, namelijk Hoyningen-Braden en Gash. Recentelijk is ook het Rutter-concept in SWAP geïmplementeerd. In Tabel 17 zijn de kenmerken van de verschillende concepten weergegeven. Belangrijk is de koppeling met de verschillende gewasgroeimodellen en dan met name hoe de interceptie afhangt van de gewasontwikkeling. Voor alle gewasgroeiconcepten geldt dat de ontwikkeling van de LAI (Leaf Area Index) in de tijd wordt bijgehouden. De LAI heeft een directe relatie met de maximale interceptiecapaciteit en ook met de bodembedekkingsgraad (soil cover) van het gewas. Het Rutter-concept is het enige concept dat op tijdstapbasis de dynamiek in interceptie binnen een dag kan doorrekenen. Het is ook het enige concept dat een balans bijhoudt van de berging in het interceptie-reservoir.

Bij het Rutter-concept zijn de volgende aspecten van belang:

- Berging in het bakje
- Verdamping uit het bakje
- Overloop uit het bakje

Voor gebruik van het Rutter-concept is het van belang dat gebruikgemaakt wordt van neerslaggegevens die de intensiteit van de buien goed beschrijven. Dat kunnen bijvoorbeeld uurlijkse waarden zijn of dagelijkse waarden met bijvoorbeeld een duur van de bui (zodat de bui-intensiteit bepaald kan worden).

De interceptie van de neerslag voor een bepaalde tijdstap kan bestaan uit 1) verdamping van neerslag vanaf het vegetatieoppervlak en 2) berging van neerslag op het vegetatieoppervlak. Geïntercepteerde neerslag kan op een later tijdstip verdampen uit het interceptiereservoir dan het moment dat het gevallen is.

Voor het Rutter-verdampingsconcept zijn er verschillende aannames gedaan:

- De neerslag vallend op de interceptiebergingscapaciteit is direct afhankelijk van de bodembedkking van het gewas (de 'soil cover').
- Ook de verdamping uit interceptiebergingscapaciteit is direct afhankelijk van de bodembedkking van het gewas (de 'soil cover'). De verdamping uit de interceptiebergingscapaciteit is gelijk aan die van een nat gewas.
- Gedurende de tijd dat de interceptiebergingscapaciteit gevuld is, vindt er geen transpiratie van het gewas plaats (interceptieverdamping heeft prioriteit boven transpiratie).
- Als de vegetatie bladoppervlak verliest, wordt de interceptiecapaciteit kleiner. Tijdelijk kan het dan zo zijn dat dan de interceptiehoeveelheid van de vorige tijdstap groter is dan de bergingscapaciteit voor het nieuwe tijdstip. Aangenomen is dat dit meerdere water verdampt.
- Op het niet door vegetatie bedekte deel van de bodem vindt bodemverdamping plaats. Aangenomen is dat dit doorgaat als het gewas/de vegetatie vochtig is.
- De bodembedekkingsgraad wordt bepaald op basis van de LAI (de 'leaf area index').

5.7.2 Rutter-interceptie in MetaSWAP

Binnen MetaSWAP wordt eveneens een Rutterbenadering gebruikt, waarbij de interceptiebergingscapaciteit afhankelijk is van de LAI, zoals beschreven in het MetaSWAP testrapport 063 (2021). In Tabel 16 is de conversiefactor van LAI naar interceptiebergingscapaciteit weergegeven voor verschillende landgebruiksvormen. Deze factoren zijn voor MetaSWAP bepaald op basis van de berekende dagwaarden van de interceptie conform het Braden van Hoyningen-concept. Belangrijk is dat bij het afleiden van deze conversiefactoren gebruik is gemaakt van uurlijkse verdamping- en neerslaggegevens.

Tabel 16 Bergingscapaciteit per bladoppervlak, zoals bepaald voor MetaSWAP (MetaSWAP, Test report 63, 2021).

Landgebruik	Bergingscapaciteit per bladoppervlak (mm/LAI)
Gras	0.295
Mais	0.197
Aardappelen	0.198
Bieten	0.241
Granen	0.195
Overige landbouwgewassen	0.198
Boomteelt	0.613
Boomgaard	0.866
Bollen	0.552
Loofbos	0.866
Naaldbos	0.249
Moeras	0.466
Duinvegetatie	0.528
Natuurlijk gras	0.295
Stedelijk grasland	0.295
Donker naaldbos	0.451
Heidevegetatie	0.528

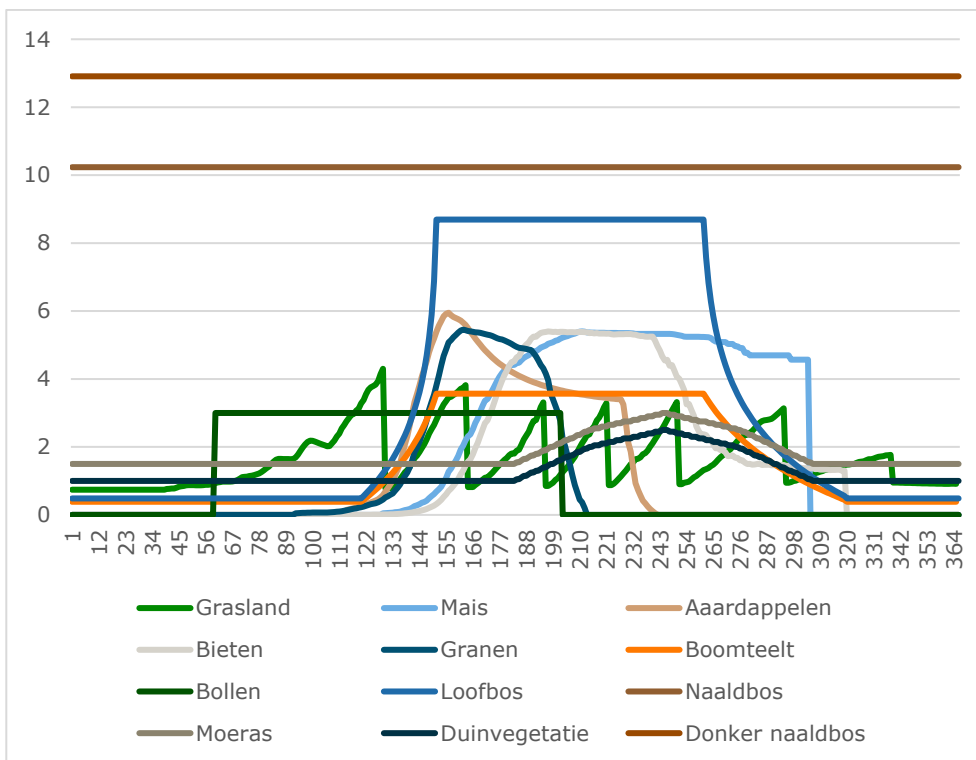
Naast de interceptiecapaciteit bepaalt de verdeling van de neerslag en de potentiële verdampingsflux de daadwerkelijke interceptieverdamping. De potentiële verdamping is onafhankelijk van de vullingsgraad⁵ en gelijk aan de verdamping voor een nat oppervlak.

Bij deze factoren hoort ook een verloop van de LAI, in Figuur 7 is deze weergegeven (bron: MetaSWAP). Duidelijk is bijvoorbeeld de ontwikkeling van loofbos, terwijl naaldbos gedurende het jaar een constante LAI heeft.

Tabel 17 Interceptieconcepten in SWAP en kenmerken.

Interceptie concept	Hoyningen-Bradem	Gash	Rutter
SWAP-switch	Swinter = 1	Swinter = 2	Swinter = 3
Fysica	P en berging, soil cover	P, E en soil cover	P, E, berging en soil cover
Tijdschaal	Dagelijks	Dagelijks	Tijdstappen
Afhankelijken	a, b (soil cover), LAI en P	$P_{\text{mean}}(t)$, $E_{c,\text{mean}}(t)$, S_c , p (throughfall), p_t (stem flow), P_i	SICCPLAI, SICACT
Kenmerk concept	Geen geheugen (iedere dag start met schone lei) Verdampingsvraag zit niet in concept	Geen geheugen (iedere dag start met schone lei)	Geheugen: einde vorige dag is begin nieuwe dag
Geschikt voor	Gewassen en gras	Bossen en bomen	Universeel
Nota Bene	Verdamping is geen parameter in het concept.		Gebruik dagelijkse uniform verdeelde neerslag kan tot te grote interceptie leiden en te weinig transpiratie. De parametrisatie van het Rutter-concept dient gevoed te worden met over de dag verdeelde neerslag.

⁵ Bedacht moet worden dat in het Rutterconcept de verdampingsflux gereduceerd kan worden op basis van de vullingsgraad van de interceptieberging. Voor het gebruik binnen het NHI heeft deze voor alle landgebruiksvormen een waarde van 1.



Figuur 7 LAI-verlopen van NHI-vegetaties.

5.7.3 Methodiek

In paragraaf 1.4 zijn de stappen beschreven. Aandacht verdient stap 1c; binnen het NHI maakt MetaSWAP voor de berekening van de interceptieverdamping gebruik van het Rutter-concept. Daarom, en omdat dit de enige methode is die de balans bijhoudt, is ook bij de kalibratie van de gewasweerstand gebruikgemaakt van deze benadering. Daarnaast is het van belang dat de bodemverdamping realistische waarden simuleert. Wat realistisch is, is een punt van aandacht; aangenomen wordt dat eerdere berekeningen van de bodemverdamping realistische waarden opleverden.

Samenvattend: de basistool zoals toegepast in hoofdstuk 5 wordt gebruikt voor het bepalen van de gewasweerstand. Buiten deze automatische kalibratie om worden vooraf de bodemverdamping en interceptieverdamping geparametriseerd, zodat de verdampingshoeveelheden overeenkomen met resultaten van berekeningen van eerdere SWAP-versies. Daarna vindt de kalibratie van de gewasweerstand plaats.

In paragraaf 5.1 is een aantal uitgangspunten beschreven voor het afleiden van de gewasweerstand. Hierbij sluiten we aan met enkele afwijkingen (**in vet weergegeven**):

- Kalibratieperiode: 1961-1990.
- Meteogegevens:
 - Dagelijkse gegevens neerslag en verdamping: voor de neerslag dienen gedetailleerde gegevens toegepast te worden, omdat gebruik wordt gemaakt van het Rutter-concept. **Dat betekent dat de intensiteit van de buien bij de simulatie meegenomen moet worden. Dit kan binnen SWAP door dagelijkse neerslagen te combineren met een neerslagduur dan wel met een opgegeven neerslagintensiteit. In dat geval wordt de neerslag geconcentreerd op de eerste uren van de dag. Dagneerslagen zijn gebruikt met een regenduur (SWRAIN = 2).** De gemiddelde windsnelheid is bepaald op basis van de windsnelheden tussen 7-19 uur.
 - Uurlijkse gegevens neerslag en verdamping: **vanzelfsprekend is dan de verdeling over de dag bekend.**
- Bodemweerstand: **de bodemweerstand (RSOIL) is afhankelijk van het detail van de meteogegevens en zal dus ook bepaald moeten worden.**
- Interceptieverdamping: **uitgaan van het Rutter-concept, waarbij LAI-afhankelijke bergingsfactoren worden bepaald.**

- Schade: **het optreden van gewasschade in de rekenresultaten is voorkomen.** Voor droogteschade is gebruikgemaakt van de Feddes-methode en zijn de parameters zo aangepast dat er geen of zo weinig mogelijk droogteschade wordt gesimuleerd:
ALPHACRIT = 0.5, HLIM3 = -8000, HLIM4 = -16000.
Natschade berekening is uitgeschakeld: SWOXYGEN = 0.
- Managementfactor: dat is de factor die aangeeft welke productie in de praktijk maximaal te behalen is (Tabel 3 managementfactor 2023).
- Groeiseizoen: het groeiseizoen is bepaald door de Feddes-gewasfactoren.
- Wortelverdeling: belangrijk is dat het gewas voldoende water kan opnemen en dat er geen reductie door droogtestress optreedt. Of de gekozen wortelverdeling in de praktijk voorkomt, is niet van belang. Er is uitgegaan van een blokverdeling bij gras en een lineair afnemende wortelverdeling bij andere gewassen.
- Infiltratie: er is uitgegaan van een bodem met een B02-bovengrond (zie voor de codering B02 Heinen et al., 2020).
- Gewassen: voor verschillende gewassen zijn WOFOST-gewas-parametrisaties beschikbaar (gras, aardappel, snijmais, suikerbieten, zomergerst). Maar niet van alle gewassen zijn WOFOST-parametrisaties bekend. Ook een aantal aanvullende (niet-WOFOST-)gewassen zijn gebruikt.
- Grootte interceptie- en bodemverdamping: voor de parametrisatie van de interceptie- en bodemverdamping is uitgegaan van de verdamping die zijn bepaald voor de periode 1961-1990, met WOFOST-gewas-parametrisaties en SWAP-versie 4.2.20 (Tabel 18). De weergegeven verdampingstermen zijn de doelwaarden bij de kalibratie als gebruik wordt gemaakt van het Rutter-concept.
- **SWAP-versie 4.2.94 met de opties Rutter-concept en uurlijkse meteo-gegevens voor Penman-Monteith is gebruikt.** In eerdere versies had interceptieverdamping prioriteit op bodemverdamping. Dit leidde ertoe dat ook bij een beperkte bodembedekking (*soil cover*) en een nat gewas als eerste interceptieverdamping van het gewas plaatsvond en daarna pas bodemverdamping. **In de nieuwe versie 4.2.94 kan de bodem voor het niet met vegetatie bedekte deel verdampen, onafhankelijk van interceptieverdamping. En ook de maximale interceptieverdamping is nu afhankelijk van de fractie bodembedekking.** Voorheen werd deze niet gereduceerd voor de bodembedekking.

Tabel 18 Gekalibreerde gewasweerstand en de resulterende verdeling in verdampingstermen voor verschillende gewassen, periode 1961-1990 o.b.v. RMSE (zie Tabel 15 en Bijlage 2 Tabel 2).

Gewas	rsc s/m	ETpot_swap mm/j	TPOT mm/j	INTERC mm/j	EACT mm/j
gras	78	529	310	76	142
gerst	167	445	187	35	222
mais	147	503	260	46	197
aardappel	207	472	258	49	165
suikerbieten	141	463	216	48	199
sperziebonen	283	414	167	38	209
zaai-uien	68	413	160	22	231
winterpeen	132	405	147	24	234
prei	450	371	129	36	205
appelbomen	162	713	514	121	77
laanbomen	220	584	326	121	137
bloemkool	90	466	215	44	206
sla	160	382	127	24	232
spruitkool	193	473	214	67	192
tulp	40	431	176	31	224
lelie	10	467	210	44	213

5.7.4 Gewasweerstand bij dagelijkse meteogegevens (met neerslagduur)

Interceptieberging en bodemverdamping

Als eerste zijn voor het Rutter-concept en de bodemverdamping de parameters bepaald. Voor de interceptie betreft het de parameter SICCAPLAI die de bergingsgrootte per LAI-eenheid vastlegt. Voor de bodemverdamping betreft het de bodemweerstand Rsoil. De bodemverdamping wordt beïnvloed door de verdeling van de neerslag over de dag. Als deze berekend wordt op basis van realistische neerslagduren in plaats van gemiddelde dagelijkse neerslagen, dan zal de bodemverdamping afnemen, doordat de bodem minder lang nat zal blijven. Om dit te compenseren, dient de bodemweerstand te worden verkleind om op vergelijkbare resultaten als van berekeningen op dagelijkse basis uit te komen.

In Tabel 19 staan de voor de gewassen bepaalde parameters SICCAPLAI en Rsoil, de berekende interceptie- en bodemverdamping en de verschillen met de berekeningen op dagbasis. Uit deze tabel blijkt dat de interceptieverdamping exact benaderd wordt en dat de bodemverdamping met een verschil tot circa 13 mm/j wordt gesimuleerd, dat is een verschil van circa 5%. Gezien de onzekerheden in de grootte van de bodemverdamping wordt dit als voldoende nauwkeurig beschouwd. Voor de bodemweerstand Rsoil is voor gras een waarde van 300 s/m gehanteerd en voor akkerbouwgewassen een waarde van 75 s/m. Dit is de helft van de waarde die bij daggemiddelde neerslagen wordt gebruikt.

Tabel 19 Bepaalde capaciteit interceptieberging per LAI bij gebruik van dagelijkse meteo, de bepaalde bodemweerstand en het verschil van INTERC en EACT met de referentieberekening (Tabel 18).

crop	SICCAPLAI (cm/LAI)	Rsoil (s/m)	Interc_yr (mm/j)	Eact_yr (mm/j)	dINTERC (mm/j)	dEACT (mm/j)
gras	0.0281	300	76	144	0	2
gerst	0.0223	75	35	211	0	-11
mais	0.0196	75	46	189	0	-8
aardappel	0.0230	75	49	161	0	-4
suikerbieten	0.0248	75	48	190	0	-9
sperziebonen	0.0239	75	38	200	0	-9
zaai-uien	0.0234	75	22	219	0	-12
winterpeen	0.0244	75	24	221	0	-13
prei	0.0240	75	36	197	0	-8
appelbomen	0.0160	75	121	75	0	-2
laanbomen	0.0377	75	121	129	0	-8
bloemkool	0.0257	75	44	197	0	-9
sla	0.0260	75	24	219	0	-13
spruitkool	0.0256	75	67	181	0	-11
tulp	0.0229	75	31	211	0	-13
lelie	0.0267	75	44	201	0	-12

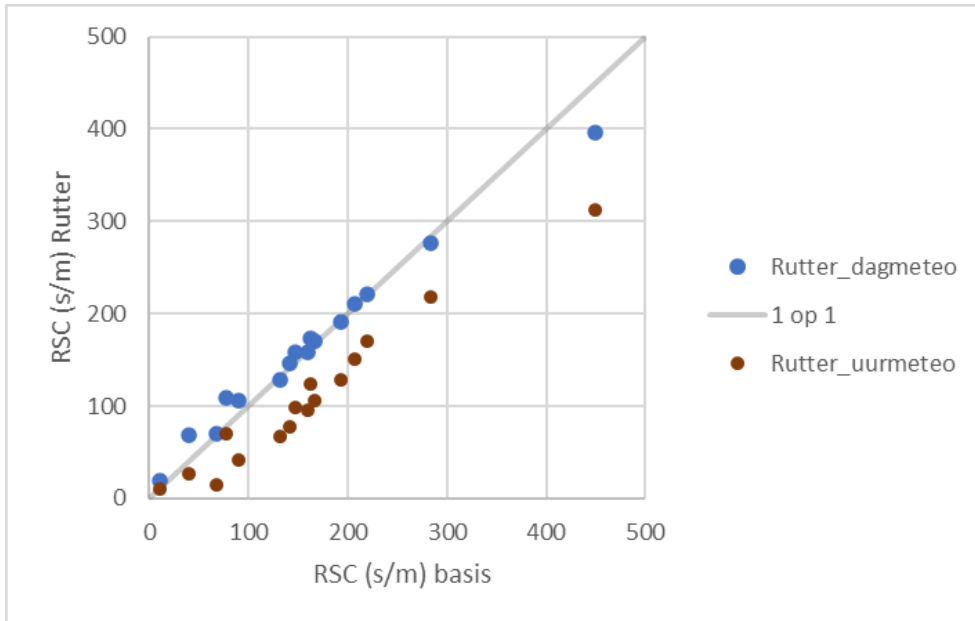
Gewasweerstand

Bij de kalibratie van de gewasweerstand zijn de interceptiecapaciteit (per LAI) en de bodemweerstand zoals weergegeven in Tabel 19 gebruikt.

In Tabel 20 zijn de resultaten van de kalibratie van de gewasweerstand (RSC) gegeven plus de berekende transpiratie, interceptie en bodemverdamping. Ook zijn de verschillen weergegeven met de berekende verdampingshoeveelheden zoals weergegeven in Tabel 18. De parameters die de verdampingshoeveelheden bepalen, zijn de bodemweerstand RSOIL, de interceptiecapaciteit SICCAPLAI en de gewasweerstand RSOIL. Uit de tabel blijkt het volgende:

- De verschillen tussen de berekende verdampingshoeveelheden en de doelwaarden hiervan blijven meestal beperkt tot 5 mm/j, met enkele uitschieters tot maximaal 10 mm/j. Dit zijn acceptabele hoeveelheden gezien de onzekerheden in de grootte van de verdampingshoeveelheden.
- De evapotranspiratie (som van de drie termen) wijkt tot maximaal enkele millimeters per jaar af van de doelwaarden.

- De bepaalde gewasweerstand op basis van het Rutterconcept met dagelijkse neerslag en die zonder Rutterconcept uit Tabel 18 tonen een duidelijke relatie en zijn van dezelfde orde grootte. Dit is weergegeven met de blauwe punten in de onderstaande figuur.



Figuur 8 Relatie tussen bepaalde gewasweerstand met en zonder Rutter-concept in vergelijking met de gewasweerstand met over de dag verdeelde neerslag (blauw) en die met de uurneerslagen (bruin).

Tabel 20 Gewasweerstand en verdeling verdampingstermen voor verschillende gewassen in de periode 1961-1990 bij gebruik van SWAP-versie 4.2.94 en geparametriseerd voor het Rutter-concept met dagneerslagen inclusief neerslagduur. Plus de verschillen van de verdampingshoeveelheden met de referentehoeveelheden (Tabel 18) (SICCPLAI: interceptieberging per eenheid van de Leaf Area Index, RSOIL: bodemweerstand en RSC: gewasweerstand).

Crop	SICCPLAI cm/LAI	RSOIL s/m	RSC s/m	Transpiratie mm/j	Interceptie mm/j	Bodem-verdamping mm/j	dTranspiratie mm/j	dInterceptie mm/j	dBodem-verdamping mm/j
Gras	0.0281	300	108.3	300	79	150	-10	3	8
Gerst	0.0223	75	170.8	191	36	219	4	1	-3
Mais	0.0196	75	157.6	263	48	195	3	2	-2
aardappel	0.0230	75	210.2	258	51	167	0	2	2
suikerbieten	0.0248	75	145.7	221	50	197	5	2	-2
sperziebonen	0.0239	75	276.8	168	39	207	1	1	-2
zaai-uien	0.0234	75	70.7	169	23	226	9	1	-5
winterpeen	0.0244	75	128.2	153	25	229	6	1	-5
prei	0.0240	75	395.5	134	37	203	5	1	-2
appelbomen	0.0160	75	173.4	510	125	78	-4	4	1
laanbomen	0.0377	75	221.3	324	125	134	-2	4	-3
bloemkool	0.0257	75	105.6	217	46	203	2	2	-3
sla	0.0260	75	157.9	130	25	226	3	1	-6
spruitkool	0.0256	75	191.3	217	70	187	3	3	-5
tulp	0.0229	75	68.3	173	32	219	-3	1	-5
lelie	0.0267	75	18.7	220	46	208	10	2	-5

5.7.5 Gewasweerstand bij uurlijkse meteogegevens

Interceptieberging en bodemverdamping

Als eerste zijn voor het Rutter-concept en de bodemverdamping de parameters bepaald. In Tabel 21 zijn deze waarden opgenomen voor de gewassen. Uit de tabel blijkt dat de interceptieverdamping exact benaderd wordt en de bodemverdamping met een verschil tot circa 8 mm/j. Dat is een afwijking van 0 tot 5% in de bodemverdamping; gezien de onzekerheden in de grootte van de bodemverdamping wordt dit als voldoende nauwkeurig beschouwd.

Tabel 21 Bepaalde capaciteit interceptieberging per LAI bij gebruik van uurlijkse meteo, de bepaalde bodemweerstand (RSOIL) en het verschil van interceptiehoeveelheid (dINTERC) en de bodemverdamping (dEACT) met de referentieberekening (Tabel 18).

crop	SICCAPLAI (cm/LAI)	RSOIL (s/m)	Interc_yr (mm/j)	Eact_yr (mm/j)	dINTERC (mm/j)	dEACT (mm/j)
gras	0.0294	300	76	150	0	8
gerst	0.0247	75	35	220	0	-2
mais	0.0200	75	46	198	0	1
aardappel	0.0238	75	49	172	0	7
suikerbieten	0.0260	75	48	199	0	0
sperziebonen	0.0255	75	38	208	0	-1
zaai-uien	0.0220	75	22	227	0	-4
winterpeen	0.0234	75	24	230	0	-4
prei	0.0234	75	36	205	0	0
appelbomen	0.0179	75	121	82	0	5
laanbomen	0.0439	75	121	139	0	2
bloemkool	0.0265	75	44	205	0	-1
sla	0.0264	75	24	227	0	-5
spruitkool	0.0271	75	67	188	0	-4
tulp	0.0258	75	31	218	0	-6
lelie	0.0285	75	44	209	0	-4

Gewasweerstand

Bij de kalibratie van de gewasweerstand zijn de interceptiecapaciteit (per LAI) en de bodemweerstand zoals weergegeven in Tabel 21 gebruikt.

In Tabel 23 zijn de resultaten van de kalibratie van de gewasweerstand (RSC) gegeven plus de berekende transpiratie, interceptie en bodemverdamping en de verschillen met de verdampingshoeveelheden die zijn bepaald voor de periode 1961-1990, met WOFOST-gewas-parametrisaties en SWAP-versie 4.2.20 (Tabel 18). De parameters die de verdampingshoeveelheden bepalen, zijn de bodemweerstand RSOIL, de interceptiecapaciteit SICCAPLAI en de gewasweerstand RSOIL. Belangrijk zijn de volgende punten:

- De interceptiecapaciteit SICCAPLAI en de gewasweerstand RSOIL zijn afhankelijk van de resolutie van de meteogegevens. In Figuur 9 zijn de verschillen verbeeld als van andere basisgegevens en concepten wordt uitgegaan. Voor de vergelijking is het van belang de randvoorwaarden voor de meteorologie van de verschillende varianten goed te onderscheiden. In Tabel 22 zijn de kenmerken weergegeven.

Tabel 22 Overzicht van de verschillende varianten voor het interceptieconcept en de kenmerken van de spreiding van neerslag en verdamping over de dag.

Variant	Interceptieconcept	Neerslag	Verdamping
Basis (paragraaf 5.6)	Hoyningen-Braden of Gash	Uniform over dag	Uniform over dag
Rutter_dag (paragraaf 0)	Rutter	Neerslag aan begin van de dag	Uniform over dag
Rutter_uur (paragraaf 1.1.1)	Rutter	Per uur variërend	Per uur variërend

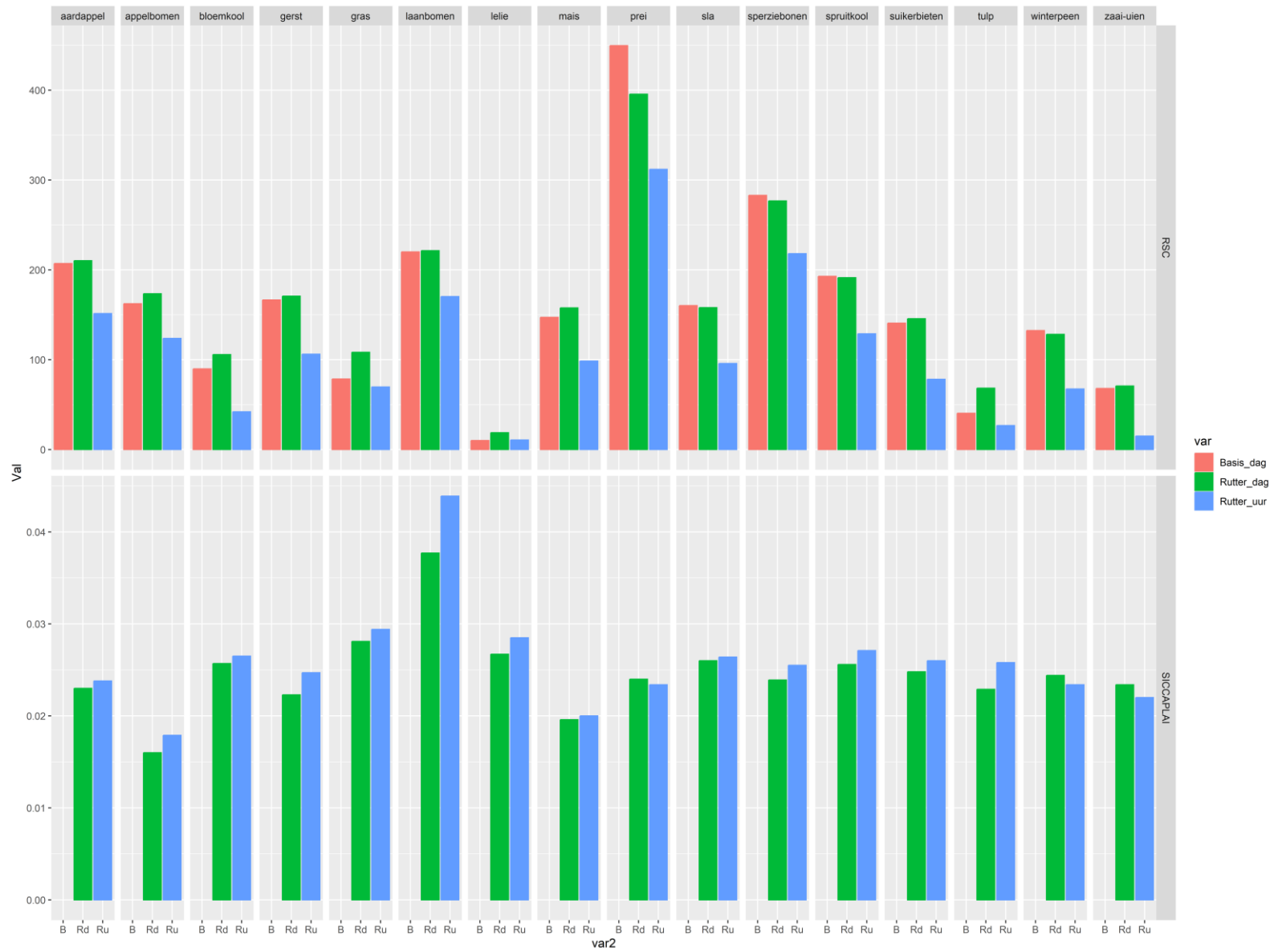
-
- Als van etmaalgegevens gebruik wordt gemaakt, moet voor het Rutter-concept ook een tijdsduur aan de neerslaggebeurtenissen worden toegevoegd. Want gebruikmaken van het Rutter-concept vereist de invoer van realistische neerslagintensiteiten.
 - De gewasweerstand op basis van de uurlijkse meteogegevens bedraagt tot gemiddeld 40% van de waarde van de gewasweerstand op basis van dagelijkse gegevens (inclusief buiduur), zie Figuur 8. Maar er zit een grote variatie in dit percentage; voor zaaiuien is de waarde circa 20% van de dagelijkse gewasweerstand.

De reden dat de gewasweerstand bij gebruik van uurgegevens voor de neerslag lager is, heeft verschillende oorzaken:

- de verdamping is geconcentreerd op de momenten dat het licht is. De potentiële verdampingsflux is dan hoger, er wordt harder aan de bodem getrokken waardoor de potentialen in de bodemlagen sterker zullen dalen. Om toch dezelfde waterhoeveelheden te kunnen leveren, wordt de gewasweerstand lager gekalibreerd.
- Bij de variant met dagneerslagen met opgegeven tijdsduur wordt in het SWAP-model aangenomen dat de neerslag aan het begin van de dag valt, dus vanaf 12 uur 's nachts. In deze variant is ook van een verdeling van de verdamping over de dag uitgegaan. De bepaalde gewasweerstand ligt dicht bij de resultaten van de variant Basis (paragraaf 5.6).
- Bij dagneerslagen met opgegeven tijdsduur wordt de neerslag uitgespreid over de opgegeven duur. Bij uurgegevens varieert de neerslagintensiteit sterker en kunnen de pieken hoger zijn. Ook varieert de verdamping dan over de dag. Dit zal tot verschillen in interceptiedynamiek leiden; de tijdsduur dat het bladoppervlak nat blijft, zal dan overdag korter zijn en 's nachts juist langer (in vergelijking met de variant Rutter-dag). Dit heeft effect op de transpiratie van het gewas. Maar ook de transpiratie zal zich concentreren in de uren dat het licht is. Dus een kortere periode met een hogere transpiratie. En dan is een lagere gewasweerstand te verwachten.

Tabel 23 Gewasweerstand en verdeling verdampingstermen voor verschillende gewassen in de periode 1961-1990 bij gebruik van SWAP-versie 4.2.94 en geparametriseerd voor het Rutter-concept met uurneerslagen. Plus de verschillen van de verdampingshoeveelheden met de referentehoeveelheden (Tabel 18). (SICCPLAI: interceptieberging per eenheid van de Leaf Area Index, RSOIL: bodemweerstand en RSC: gewasweerstand).

gewas	SICCPLAI cm/LAI	RSOIL s/m	RSC s/m	Transpiratie mm/j	Interceptie mm/j	Bodemverdamping mm/j	dTranspiratie mm/j	dInterceptie mm/j	dBodemverdamping mm/j
gras	0.0294	300	69.6	295	79	154	-15	3	12
gerst	0.0247	75	106.1	192	36	228	5	1	6
mais	0.0200	75	98.4	266	48	204	6	2	7
aardappel	0.0238	75	151.3	258	51	177	0	2	12
suikerbieten	0.0260	75	78.2	222	50	205	6	2	6
sperziebonen	0.0255	75	217.9	168	39	215	1	1	6
zaai-uien	0.0220	75	14.9	171	23	233	11	1	2
winterpeen	0.0234	75	67.4	155	25	237	8	1	3
prei	0.0234	75	311.8	136	37	212	7	1	7
appelbomen	0.0179	75	123.7	501	126	85	-13	5	8
laanbomen	0.0439	75	170.2	314	125	143	-12	4	6
bloemkool	0.0265	75	42.0	220	46	211	5	2	5
sla	0.0264	75	95.8	130	25	234	3	1	2
spruitkool	0.0271	75	128.8	214	70	194	0	3	2
tulp	0.0258	75	26.7	171	32	225	-5	1	1
lelie	0.0285	75	10.6	195	46	216	-15	2	3



Figuur 9 Vergelijking van de parameters voor de verdampingstermen bij verschillende basisgegevens.

6 Conclusies en discussie

Het automatiseren van het bepalen van de gewasweerstand is gerealiseerd. Uit de basisberekening blijkt dat het automatiseren zo goed als dezelfde resultaten oplevert als de handmatige kalibratie (uit 2018), voor zowel de gewasweerstand als de ETpot.

Sinds 2017/2018 zijn er verbeteringen doorgevoerd in de SWAP-executable en is ook de parametrisatie van de SWAP-kolommen en de gewasfiles aangepast. Bij gebruik van de nieuwste SWAP-executable en nieuw bepaalde gewasparameters (met het groeiseizoen volgens de Feddes-gewasfactoren) veranderen de gekalibreerde gewasweerstand voor zomergerst en aardappel aanzienlijk en voor gras, mais en suikerbieten minimaal.

De bepaalde gewasweerstand zijn gevoelig voor de klimaatperiode die bij de kalibratie gebruikt wordt. Dit heeft te maken met de toename van de Makkink-verdamping gedurende de afgelopen decennia. De kalibratie van de parameter voor de bodemverdamping is weinig gevoelig voor de bodemfysische eenheid van de bovengrond.

De gewasweerstand zijn afhankelijk van de tijdstapgrootte van de weergegevens waarmee wordt gerekend en bepalen de verdeling van de neerslag en verdamping over de dag. Ook de parametrisatie van bodemverdamping en de interceptie met het Rutter-concept zijn afhankelijk van de verdeling van de neerslag en verdamping over de dag. Bij toepassing van het Rutter-concept is het van belang dat zowel voor de neerslag als de verdamping wordt uitgegaan van de gedetailleerde neerslag- en verdampingsgegevens (bv. uurwaarden).

De herkomst van de door Feddes voor kalibratie gebruikte gewasfactoren blijkt niet gedocumenteerd. Aanbevolen wordt om te verkennen of de nieuwste inzichten voortbouwend op FAO-publicatie 56 en de actuele FAO-database met gewasfactoren aanleiding geven de uitgevoerde berekeningen te herzien door te kalibreren aan rekenresultaten van deze gewasfactoren.

Idealiter komen meetgegevens voor de evapotranspiratie en de verdeling over de verdampingstermen beschikbaar om de rekenresultaten te valideren dan wel te kalibreren. Onzekerheden omtrent de lengte van het groeiseizoen, effecten van gewasveredeling en effecten van klimaatverandering zijn dan minder van belang.

Literatuur

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). "Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements." Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Dam, J. van, Walsum, P.E.V. van, 2017. Kalibratie verdamping Waterwijzer voor metarelaties.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1977) Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome
- Heinen, M., G. Bakker, J.H.M. Wösten, 2020. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks – Update 2018. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2978.
- Kroes, J.G., Dam, J.C. van, Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I., Walsum, P.E.V. van, 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Wageningen, Wageningen Environmental Research. Report 2780.
- Projectgroep Grevelingen zout/zoet, werkgroep landbouw 1982. Landbouwwatervoorziening in zuid-west Nederland. Keuze zout of zoet Grevelingenmeer.
- Walsum, P.E.V. van, 2017a. Operationalisering directe en indirecte schade groente-, fruit- en boomteelten in waterwijzer landbouw.
- Walsum, P.E.V. van, 2017b. Kalibratie gewasweerstand overige teelten zonder WOFOST model.
- Walsum, P.E.V. van, 2018a. Kalibratie verdamping van extra gewassen voor Waterwijzer.
- Walsum, P.E.V. van, 2018b. Herkalibratie van gewasfactoren voor NHI.
- de Wit, A. J. W., Boogaard, H. L., Supit, I., & van den Berg, M. (Eds.) (2020). System description of the WOFOST 7.2, cropping systems model. (rev. 1.1 ed.) Wageningen Environmental Research.
<https://edepot.wur.nl/522204>

Bijlage 1 Kalibratie verdamping Waterwijzer Landbouw

Artikel Jos van Dam en Paul van Walsum, 2017

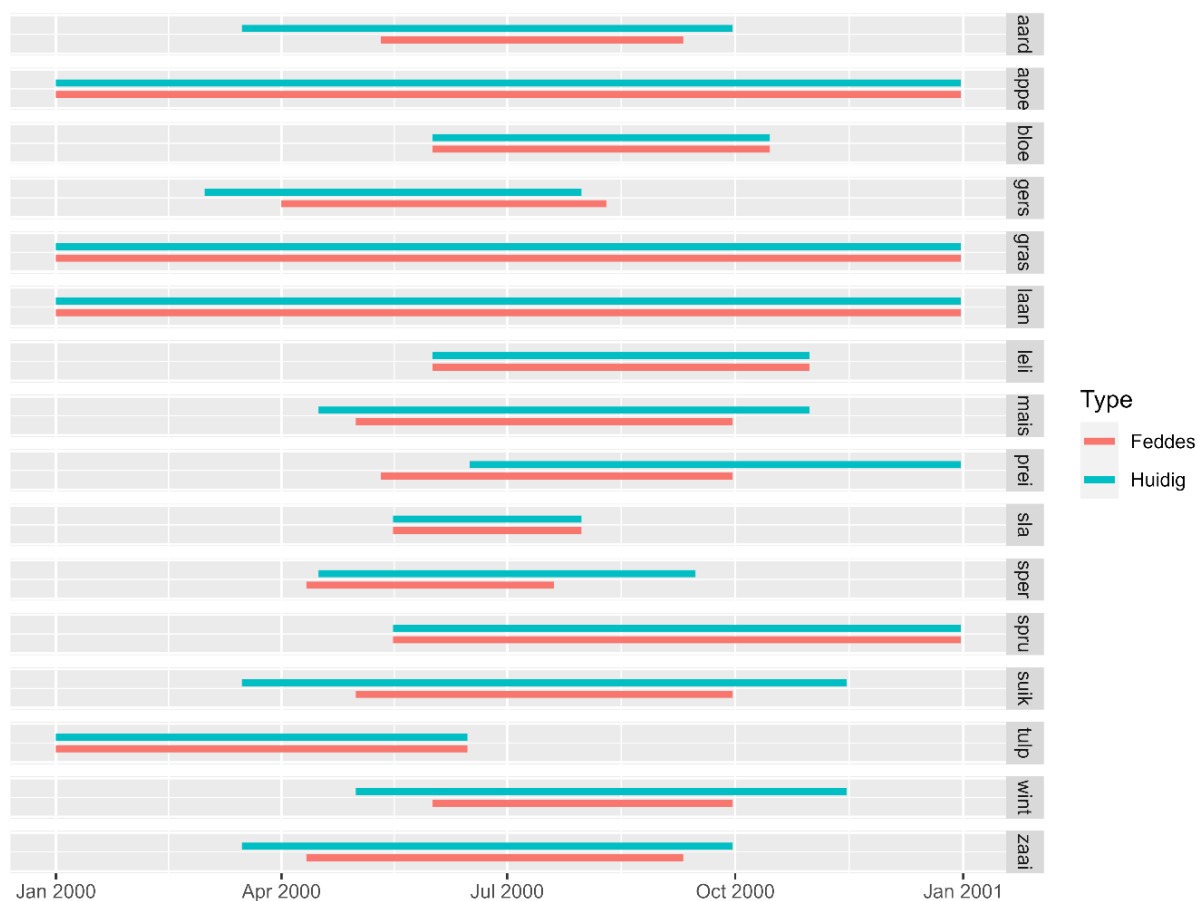
Bijlage 2 Aanvullende gewassen

Naast de hoofdgewassen is voor een aantal aanvullende gewassen de gewasweerstand bepaald. De Feddes-gewasfactoren gaan uit van een vast groeiseizoen.⁶ In de methodiek voor het bepalen van de gewasweerstand is van de lengte van dit groeiseizoen uitgegaan. Dit kan afwijken van het groeiseizoen zoals dat in de huidige gewasfiles wordt gehanteerd. In Tabel B2.1 zijn de groeiseizoenen gegeven voor de verschillende gewassen. De indicator CROPTYPE geeft aan welk type gewas het betreft:

- Type 1: een simpele gewas-parametrisatie
- Type 2: WOFOST-gewas
De WOFOST gewassen zijn beschreven in de hoofdtekst
- Type 3: Gras

Voor de ontwikkeling van de aanvullende gewassen is een TSUMEA en TSUMAM nodig, deze is op basis van het groeiseizoen bepaald uit de meteo-gegevens voor de door te rekenen periode. Hiervoor is een aanvullende R-functie opgesteld.

Basisgedachte is dat op basis van de Feddes-gewasfactoren een gewasweerstand wordt afgeleid die ook in de huidige gewasfiles toegepast kan worden.



Figuur B2.1 Verschil groeiseizoen bij Feddes-gewasfactoren en in de huidige gewasfiles.

⁶ De uitgangspunten zoals weergegeven in de Uitgangspunten op pagina 11.

Tabel B2.1 Verschil groeiseizoen bij Feddes-gewasfactoren en in de huidige gewasfiles (in groen de aanvullende gewassen).

gewas	Croptype	Feddes		Huidige gewasparametrisatie	
		Start	Eind	Start	Eind
gras	3	01-01	12-31	01-01	12-31
gerst	2	04-01	08-10	03-01	07-31
mais	2	05-01	09-30	04-16	10-31
aardappel	2	05-11	09-10	03-16	09-30
suikerbieten	2	05-01	09-30	03-16	11-15
bloemkool	1	06-01	10-15	06-01	10-15
zaai-uien	1	04-11	09-10	03-16	09-30
prei	1	05-11	09-30	06-16	12-31
sla	1	05-16	07-31	05-16	07-31
spruitkool	1	05-16	12-31	05-16	12-31
tulp	1	01-01	06-15	01-01	06-15
sperziebonen	1	04-11	07-20	04-16	09-15
winterpeen	1	06-01	09-30	05-01	11-15
lilie	1	06-01	10-31	06-01	10-31
appelbomen	1	01-01	12-31	01-01	12-31
laanbomen	1	01-01	12-31	01-01	12-31

Bij de kalibratie van de gewasweerstanden van de aanvullende gewassen is gebruikgemaakt van de recentste gewasfiles (maart 2023).

In Tabel B2.2 zijn de resultaten weergegeven van de optimalisatie. Bij vergelijking met de resultaten van de eerdere kalibratie valt op dat:

- In één geval, Lelie, is de weerstand zo goed als gelijk aan de ingestelde minimumwaarde voor de gewasweerstand (10 s/m).
- Opvallend zijn de lage waarden van TPOT voor verschillende gewassen: minder dan 200 mm/j voor sperziebonen, zaai-uien, winterpeen, prei, sla en tulp. Dit is vrij laag in vergelijking met de WOFOST-gewassen, waarvoor deze waarde gelegen is tussen de 210 en 290 mm/j.

Tabel B2.2 Gewasweerstanden (RSC) in vergelijking met weerstanden 2019 plus aanvullende info m.b.t. verdampingstermen.

crop	RSC	rsc2019	dRSC	ETpot_swap	ETpot2019	dETpot	TPOTmean	INTERCmean	EACTmean
	s/m	s/m	s/m	mm/j	mm/j	mm/j	mm/j	mm/j	mm/j
sperziebonen	283	273	10	414	419	-5	167	38	209
zaai-uien	68	149	-81	413	430	-17	160	22	231
winterpeen	132	83	50	405	413	-8	147	24	234
prei	450	368	82	371	380	-9	129	36	205
appelbomen	162	144	18	713	735	-22	514	121	77
laanbomen	220	188	32	584	600	-16	326	121	137
bloemkool	90	116	-26	466	484	-18	215	44	206
sla	160	189	-29	382	395	-13	127	24	232
spruitkool	193	181	12	473	491	-18	214	67	192
tulp	40	172	-132	431	425	6	176	31	224
lilie	10	59	-49	467	491	-24	210	44	213

De lage waarden voor de TPOT en de vaak hoge waarden van de EACT zijn reden om de oorzaak te onderzoeken. De hoge waarde van de bodemverdamping hangt samen met de soms lage waarden van de LAI. Mogelijk kan de ontwikkeling hiervan aangepast worden. Voor zaaiuien is overgestapt op een dynamische gewasontwikkeling. Dit heeft wat invloed op de Eact, maar niet heel veel. Wel is te zien dat de ontwikkeling van het gewas sneller verloopt, maar dat de LAI ook weer eerder een afname laat zien.

Bijlage 3 Rekentool en basisdata

In deze bijlage is de rekentool beschreven. Voor het bepalen van de gewasweerstand is het volgende noodzakelijk:

- **Basisdata:**
De kalibratiegegevens zijn de gegevens waarop gekalibreerd wordt. Het betreft hier de potentiële verdamping op basis van de gewasfactoren, waarbij tevens de Makkink-verdamping wordt gebruikt. Een ander benodigd onderdeel is een SWAP-parametrisatie inclusief executable, waarmee de gewasweerstand wordt berekend.
- **Kalibratie-tool:**
Dit is de eigenlijke rekenkern. Hier worden de gewasweerstand gekalibreerd.
- **Toepassing kalibratie-tool:**
Hoe kan de toepassing gebruikt worden?
Deze drie onderdelen zijn in het onderstaande uitgewerkt.

Basisdata

De basisgegevens voor het uitvoeren van de kalibratie van de gewasweerstand zijn in R-package meegeleverd. Na installeren van de package zijn deze beschikbaar. In de directory RCrop/Feddes staan de volgende files:

- File Feddes_gewasfactoren.xlsx: de gewasfactoren voor het berekenen van de potentiële verdamping;
- File gewas_Makkink_pot.csv: Feddes ETpot-gegevens, welke zijn gebaseerd op de gewasfactoren en de Makkinkverdamping. Deze file is een zogeheten 'comma separated file' met de volgende kolommen:
 - Date: dagen van 1960 tot en met 2021
 - ETref: referentiegewasverdamping
 - Decade: nummer 1-36
 - "Gewas" (naam van het gewas): gewasfactor
 - "Gewas"_ET: potentiële verdamping van het gewas

Tevens staan in deze directory twee figuren (png), waarvan één met de gewasfactoren en één met de jaarsommen van de potentiële verdamping. Plus nog de oorspronkelijke meteofile van de KNMI met de gegevens voor het station De Bilt op basis waarvan de ETref is berekend.

In de directory RCrop/Templates/Templ_GSfeddes_Rutter staan de basisfiles voor de parametrisatie van de SWAP-berekeningen:

- **meteo-file:**
 - "260_wf.met": dagelijkse meteodata van 1960 t/m 2021, gemiddelde windsnelheid op basis van 7-19 uur. Deze file is standaard de input wanneer met dagelijkse neerslag wordt gerekend;
 - "260_nowf.met": dagelijkse meteodata van 1960 t/m 2021, gemiddelde wind op basis van daggemiddelde;
 - "260_h.met": uurlijkse meteodata van 1960 t/m 2021;
- **CO₂-file:** "atmospheric_1965-2020.co2" file met de CO₂-concentraties van 1965-2020. Aangenomen is dat deze concentratie in de tijd constant is;
- **SWAP-basisfile:**
 - swap.temp: SWAP-basisfile bij dagelijkse meteodata.
 - Swap24.temp: SWAP-basisfile bij uurlijkse meteodata.
- **Variabele parameters:** deze zijn met dubbele apostroffen "{ }" aangegeven en kunnen als variabele waarde worden meegegeven. In de gewasfile is dat de gewasweerstand "RSC" en de interceptiecapaciteit per LAI "SICCAPLAI". In de SWAP-file zijn dat de parameters m.b.t. de start- en einddag van de simulatie, de bodemweerstand, de gewasrotatie, de grondwaterstand en de maximale worteldiepte.
- **Gewasfiles:** directories met de verschillende gewasfiles, bijvoorbeeld 'aardappel'.
- **Aanvullende simulatiegegevens (SWAPparam_dag.xlsx en SWAPparam_uur.xlsx):**
 - per gewas de geoptimaliseerde gewasweerstand plus de potentiële transpiratie van de verschillende gewassen zoals berekend in 2018.

- Per gewas verschillende aanvullende parameters:
 - SICCAPLAI: capaciteit interceptie per LAI
 - RSOIL: bodemweerstand
 - RDS: bewortelingsdiepte
 - GWLI: grondwaterstand tijdens simulatie

Tevens staat in deze directory de executable van SWAP (swap_4.2.94z2_X64_Release_20231221.exe)

Kalibratietool

De basis van de kalibratietool bestaat uit de R-package RCrop. Deze package maakt gebruik van een aantal andere packages. De eisen aan de versies van deze packages zijn:

Package: RCrop

Version: 0.3.1

Depends: R ($\geq 4.0.0$)

Imports: stringr ($\geq 1.5.0$), SWAPtools ($\geq 0.1.74$), dplyr ($\geq 1.0.10$),
readr ($\geq 2.1.3$), ggplot2 ($\geq 3.4.0$), lubridate ($\geq 1.9.0$)

License: GPL (≥ 3)

De R-package RCrop bestaat uit een aantal functies. Om van deze functies een package te kunnen maken, dienen ze aan een standaard format te voldoen, waarbij de functie, de invoerparameters, de gebruikte functies uit andere packages en de uitvoer beschreven dienen te worden. In het onderstaande is de beschrijving van het format van de functies van de package RCrop gegeven:

- cm2mm: functie om vectoren te converteren van de eenheid cm naar mm.

Header file:

```
#' convert vector from unit cm to mm and round it to three decimals
#'  
#' @param x numeric vector, vector waterbalance term.  
#' @export cm2mm  
#' @keywords internal  
cm2mm <- function(x)
```

- ETPOT_swap: functie om een SWAP-model samen te stellen, te runnen en de verdampingstermen te verzamelen.

Header file:

```
#' Set up a SWAP model, run it and get the rainfall, evaporation terms per date  
#' vector with DATETIME, RAIN, INTERC, RUNOFF, TPOT, TACT, EPOT, EACT, LAI, ETPOT_swap  
#'  
#' @param templ_swp string location of swp-template  
#' @param templ_crp string location of crp-template  
#' @param dir_work string location to put the simulation assignment and the results  
#' @param crop string crop name  
#' @param RSC numeric crop resistance (s/m)  
#' @param TSTART date start date simulation (yyyy-mm-dd)  
#' @param TEND date end date simulation (yyyy-mm-dd)  
#' @param CROPTYPE string croptype (1 simple, 2 wofost, 3 grass)  
#' @param CROPSTART string start growing season (mm-dd)  
#' @param CROPEND string end date simulation (mm-dd)  
#' @param GWLI numeric groundwater level (cm+sl)  
#' @param RSOIL numeric soil resistance (mm-dd)  
#' @param COFAB Interception storage per unit of LAI (cm/LAI)  
#' @param RDS numeric rooting depth (cm-sl)  
#' @param TSUMEA numeric tsum crop emergence - anthesis (celsius)  
#' @param TSUMAM numeric tsum crop anthesis - maturity (celsius)  
#' @param command string referring to the executable  
#' @importFrom readr read_csv read_lines write_lines  
#' @importFrom stringr str_c str_replace  
#' @importFrom SWAPtools set_variable_SWAP run_SWAP get_settings_SWAP  
#' @importFrom dplyr %>% select all_of mutate across
```

```
#' @export ETPOT_swap
ETPOT_swap <- function(templ_swp,
  templ_crp,
  dir_work,
  crop,
  TSTART,
  TEND,
  RSC,
  CROPTYPE,
  CROPSTART,
  CROPEND,
  GWLI,
  RSOIL,
  COFAB,
  RDS,
  TSUMEA,
  TSUMAM,
  command)
```

- diffETPOT: functie om een SWAP-simulatie te laten aanmaken, te runnen en te vergelijken met de potentiële verdamping volgens de Feddes-gewasfactoren. Een aantal files en figuren wordt aangemaakt in `dir_work`:

- `opt_iter.csv`: ontwikkeling van de iteraties voor verschillende termen. Subscript “_GS” heeft betrekking op de resultaten voor het groeiseizoen.

Header file:

```
#' Set up a SWAP model, run it and compare with the Feddes crop factor evaporation
#'
#' @param templ_swp string location of swp-template
#' @param templ_crp string location of crp-template
#' @param dir_work string location to put the simulation assignment and the results
#' @param crop string crop name
#' @param RSC numeric crop resistance (s/m)
#' @param TSTART date start date simulation (yyyy-mm-dd)
#' @param TEND date end date simulation (yyyy-mm-dd)
#' @param CROPTYPE string croptype (1 simple, 2 wofost, 3 grass)
#' @param CROPSTART string start growing season (mm-dd)
#' @param CROPEND string end date simulation (mm-dd)
#' @param GWLI numeric groundwater level (cm+sl)
#' @param RSOIL numeric soil resistance (mm-dd)
#' @param COFAB Interception storage per unit of LAI (cm/LAI)
#' @param RDS numeric rooting depth (cm-sl)
#' @param TSUMEA numeric tsum crop emergence - anthesis (celsius)
#' @param TSUMAM numeric tsum crop anthesis - maturity (celsius)
#' @param command string referring to the executable
#' @param t_ETPOT_feddes_GS t_ETPOT_feddes_GS vector with the potential evaporation according to
the Feddes cropfactors
#' @param target string type of goal function ME or RMSE
#' @importFrom readr write_csv
#' @importFrom stringr str_c
#' @importFrom dplyr %>% left_join select mutate group_by summarise_all ungroup rename filter
tibble join_by
#' @importFrom lubridate year
#' @export diffETPOT
```

```
diffETPOT <- function (templ_swp,
  templ_crp,
  dir_work,
```

```

crop,
RSC,
TSTART,
TEND,
CROPTYPE,
CROPSTART,
CROPEND,
GWLI,
RSOIL,
COFAB,
RDS,
TSUMEA,
TSUMAM,
command,
t_ETPOT_feddes_GS,
target)

```

- `get_tsum`: functie om de TSUMAM en TSUMEA voor (alleen) zomergewassen af te leiden. Dat definieert het begin en eind van het groeiseizoen. Deze functie wordt gebruikt om de lengte van het groeiseizoen volgens Feddes en WOFOST te harmoniseren.

Header file:

```

#' Get the TSUM for the crop development
#' ALLEEN VOOR ZOMERGEWASSEN
#' @param file_met string file meteorological data
#' @param file_crp string file crop data
#' @param TSTART date start date simulation
#' @param TEND date end date simulation
#' @param CROPSTART string start growing season (mm-dd)
#' @param CROPEND string end date simulation (mm-dd)
#' @param CROPTYPE string croptype (1 simple, 2 WOFOST, 3 grass)
#' @importFrom readr read_csv
#' @importFrom stringr str_c
#' @importFrom SWAPtools get_value_SWAP set_table_SWAP
#' @importFrom dplyr %>% mutate filter group_by ungroup summarise
#' @importFrom lubridate as_date year month day
#' @export get_tsum

```

```
get_tsum <- function (file_met, file_crp, TSTART, TEND, CROPSTART, CROPEND)
```

Het R-script dat de kalibratie uitvoert op basis van de functies uit de hierboven beschreven R-package heet `kal_Rcrop_2023.R`.

De opbouw van het script is als volgt:

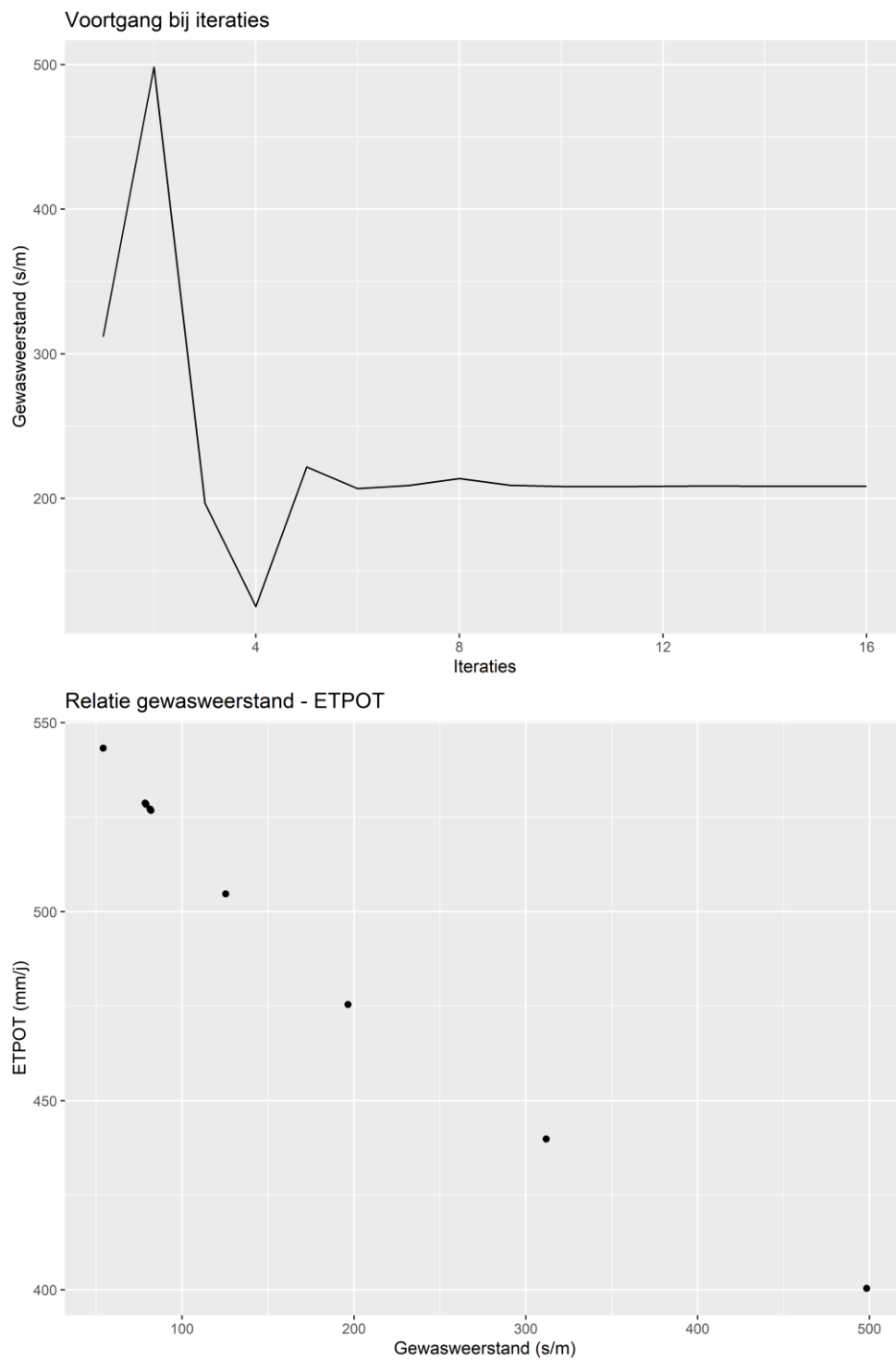
- Input
- Kalibration: prepare
- Kalibration: get SWAP input parameters
- Kalibration: get Feddes cropfactor potential evaporation
- Kalibrate or only run SWAP
- Kalibration: results

Een aantal files en figuren wordt aangemaakt in `dir_work` en `dirwork/<crop>`:

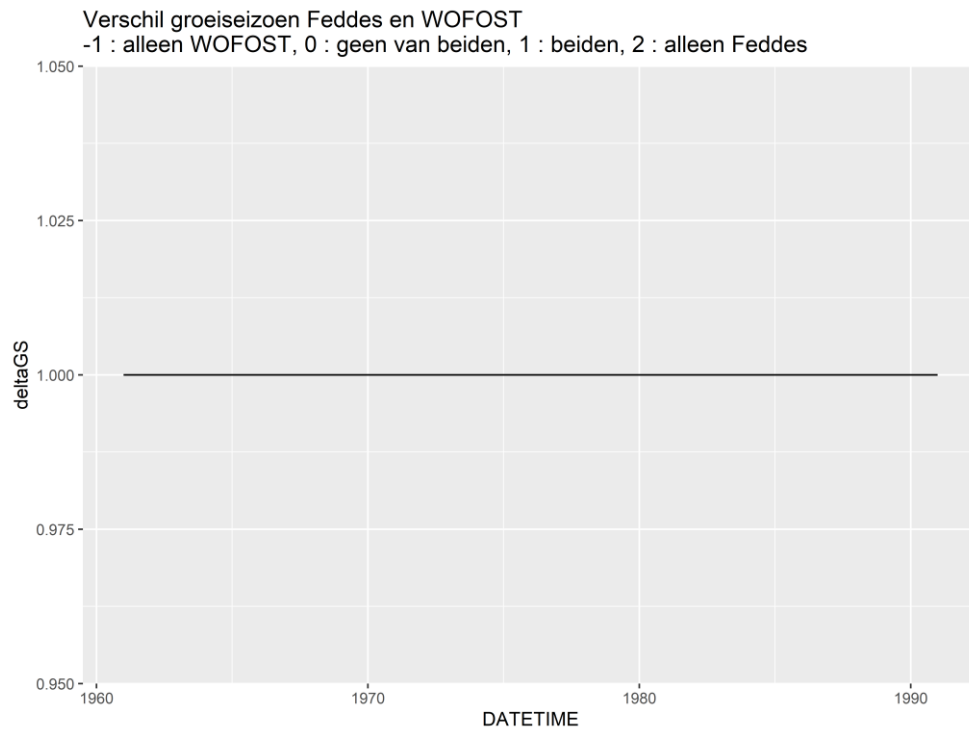
- `<fopt_csv>`⁷: een overzichtsfile met de resultaten van de kalibratie, zowel invoergegevens, gewasweerstand als berekende runoff, verdampingstermen (per jaar in mm) volgens Feddes en SWAP-WOFOST (`crop`, `tstart`, `tend`, `rsc`, `Factor_ET`, `ETpot_feddes`, `ETpot_swap`, `target`, `delta`, `DVSmax`, `LAImax`, `HEIGHTmax`, `PONDmax`, `RAINmean`, `RUNOFFmean`, `Tpotmean`, `Intercmean`, `Eactmean`, `Tredwetsum`, `Treddrysum`). Dit geeft een overzicht van de resultaten en inzicht in de berekeningen;
- `opt_rsc_ETpot.png`: figuur met de relatie tussen gewasweerstand en ETPOT.

⁷ Zoals gedefinieerd in de input.

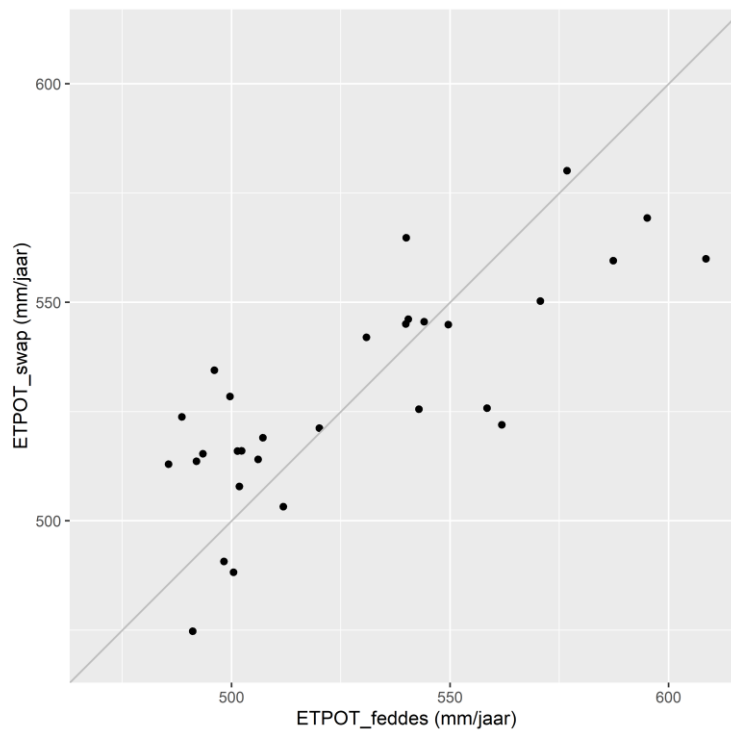
- o [opt_iter_rsc.png](#): figuur met de ontwikkeling in bepaalde gewasweerstand bij de iteraties.



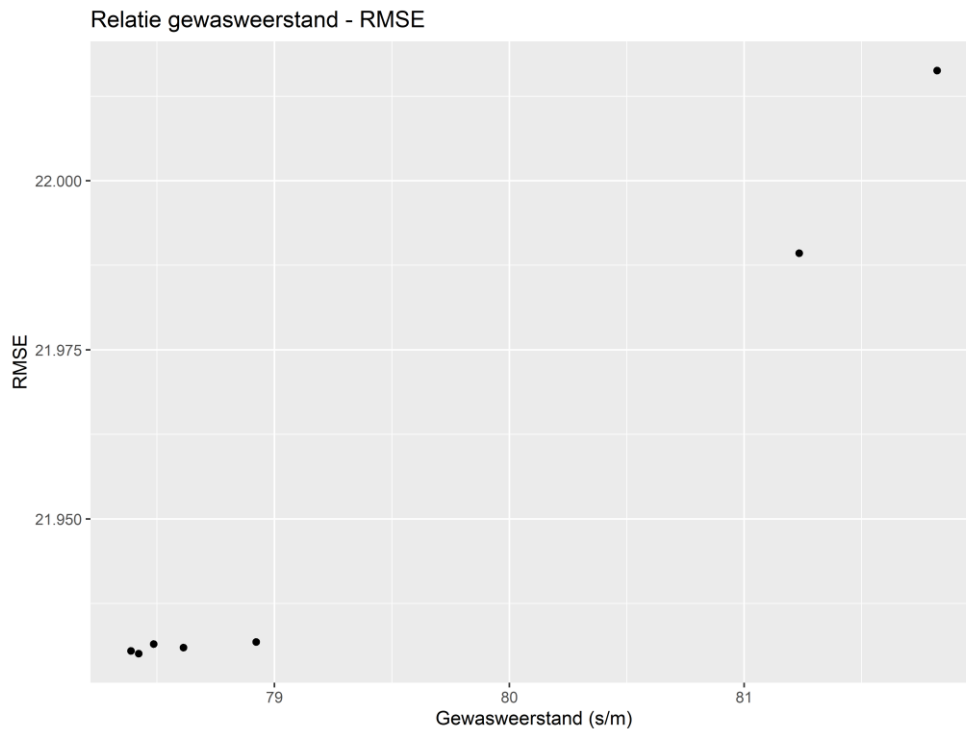
- o [groeiseizoen_Feddes_WOFOST.png](#): een vergelijking tussen het groeiseizoen volgens Feddes en in de SWAP-simulatie.



- o [result_ETPOT_feddes_swap.png](#): een png-file met een vergelijking tussen de Feddes-verdamping en de verdamping volgens SWAP.



- [opt_rsc_RMSE.png](#): relatie tussen de gewasweerstand en de waarde van de doelfunctie.



In de figuur zijn de tien laagste waarden van de doelfunctie weergegeven.

Toepassing kalibratie-tool

Hier staan de files `install_libraries.cmd` en `Kalibreer.cmd`, waarmee de kalibratie voorbereid dan wel uitgevoerd kan worden.

Pas de verwijzing naar de R-install directory aan in [1_set_Rversion.cmd](#) (R dient geïnstalleerd te zijn)! Draai [2_install_libraries.cmd](#) om de R-packages te installeren. Daarna kan de kalibratietool gedraaid worden met [3_Kalibreer.cmd](#). Deze roept een R-script aan [kal_Rcrop_2023.R](#). In de eerste regels van dit script staan de invoerparameters die de kalibratie aansturen. De namen van de verschillende parameters zijn in het script toegelicht. De resultaten worden weggeschreven naar de directory `dir_run`.

```
# ----- Input -----
# General
TSTART          <- "1961-01-01"    # Kalibration period
TEND            <- "1990-12-31"
crops           <- c("gras")
target          <- "RMSE"          # Target function ("RMSE" or "ME")
do_optval       <- TRUE             # if FALSE, no kalibration and only analysis of the output

# Set values Feddes
f_ETACTFeddes   <- system.file("Feddes/gewas_Makkink_pot.csv", package = "RCrop")
Factor_ET       <- 1.00            # correction factor for the potential Feddes-evapotranspiration

# Set values SWAP (hourly)
dir_run         <- "../Resultaten/AutKal_6190_GSfeddes_Rutter_RSC_uur"
dir_tmpl        <- system.file("Templates/templ_GSfeddes_Rutter", package = "RCrop")
f_cropparam     <- "SWAPparam_uur.csv"
f_swap          <- "swap24.temp"
f_met           <- "260_h.met"
f_atm           <- "atmospheric_1965-2020.co2"
```

```

f_swapexe          <- "SWAP_4.2.94z2_X64_Release_20231221.exe"

# Set values SWAP (daily)
dir_run            <- "../Resultaten/AutKal_6190_GSfeddes_Rutter_RSC_dag"
dir_tmpl           <- system.file("Templates/templ_GSfeddes_Rutter", package = "RCrop")
f_cropparam        <- "SWAPparam_dag.csv"
f_swap             <- "swap.temp"
f_met              <- "260_wf.met"
f_atm              <- "atmospheric_1965-2020.co2"
f_swapexe          <- "SWAP_4.2.94z2_X64_Release_20231221.exe"

# ----- Output -----
fopt_csv           <- "opt_feddes_swap.csv"    # file with the calibration results

```

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3340
ISSN 1566-7197



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Rapport 3340
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

