

Microscopische wateropnamemodellen en dynamische wortelverdeling in SWAP

M. Heinen, M. Mulder



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH



Microscopische wateropnamemodellen en dynamische wortelverdeling in SWAP

M. Heinen, M. Mulder

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en gesubsidieerd door TKI-Deltatechnologie ('Conceptuele modelverbetering NHI', projectcode DEL143).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, februari 2023

Gereviewd door:

P.E. Dik, onderzoeker (WENR, team Bodem, Water en Landgebruik)

R.P. Bartholomeus, Chief Science Officer en Principal Scientist van team Ecohydrologie (KWR, Nieuwegein)

Akkoord voor publicatie:

M.J.D. Hack-ten Broeke, teamleider van Bodem, Water en Landgebruik

Rapport 3230
ISSN 1566-7197

Heinen, M., M. Mulder, 2023. *Microscopische wateropnamemodellen en dynamische wortelverdeling in SWAP*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3230. 88 blz.; 33 fig.; 8 tab.; 61 ref.

Twee microscopische wateropnamemodellen zijn toegevoegd aan het agrohydrologische model SWAP (Soil Water Atmosphere Plant). Ook is de mogelijkheid ingebouwd om de wortelverdeling dynamisch in de tijd en diepte te simuleren.

The SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) model has been extended with two microscopic root water uptake models and with the option to have dynamically changing rooting patterns both in time and depth.

Trefwoorden: SWAP, wateropname, wortelverdeling

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/583541> 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.

© 2023 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.

Wageningen Environmental Research Rapport 3230 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Shutterstock

Inhoud

Verantwoording	5
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Wateropnamemodellen	12
2.1 Macroscopische wateropname: Fe	12
2.2 Microscopische wateropname	13
2.2.1 Microscopische wateropname: dW	14
2.2.2 Microscopische wateropname: dJvL	15
2.2.3 Microscopische opname vergeleken met een numerieke oplossing	16
2.2.4 Intrinsieke compensatie en hydraulische herverdeling	17
2.2.5 Waterpotentialen in bodem-wortel-blad	17
2.2.6 Situatie met gedeeltelijk verzadigde wortelzone	17
2.3 Matrix flux potentiaal	17
2.4 Oplosmethode	18
2.5 Transpiratie reductiefunctie	19
2.6 Parameters	20
2.6.1 Convergentiecriteria	22
2.6.2 Overigen	22
2.6.3 SWAP-invoer	22
2.7 Berekenen wortellengtedichtheid op basis van wortelgewicht	23
2.8 Hydraulische herverdeling	25
3 Testcases	28
3.1 Technische testcases	28
3.2 Waterwijzer Landbouw-cases	32
4 Gevoeligheidsanalyse	40
5 Van micro naar macro?	43
6 Adaptieve wortelverdeling in SWAP-WOFOST	45
6.1 Inleiding	45
6.2 Concept	46
6.2.1 Aangroei	46
6.2.2 Afsterving	46
6.2.3 Adaptieve wortelverdeling en microscopische wateropname	47
6.2.4 Adaptieve wortelverdeling en statisch gewasgroeimodel	47
6.3 Implementatie	48
6.4 Resultaten	49
6.4.1 Gras	50
6.4.2 Mais	53
6.4.3 Microscopische wateropname	55
7 Algemene discussie	59
7.1 Microscopische wateropname en Jarvis-compensatie	59
7.2 Adaptieve wortelverdeling en Jarvis-compensatie	59
7.3 Microscopische wateropname en zuurstofstress	59
7.4 Discussie	59

8	Bevindingen en aanbevelingen	61
	Literatuur	63
Bijlage 1	Relatie Zhuang et al. (2001)	67
Bijlage 2	Vergelijking uitkomsten met M analytisch berekend of geïnterpoleerd uit een tabel	68
Bijlage 3	Resultaten gevoeligheidsanalyse	70
Bijlage 4	Alternatieve macroscopische wateropname	82
Bijlage 5	Vergelijking microscopisch en macroscopisch voor één laag	83

Verantwoording

Rapport: 3230

Projectnummer: 5200047260

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 1 die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Onderzoeker (team Bodem, Water en Landgebruik)

naam: Pim (P.E.) Dik

datum: november, 2022

Akkoord referent 2 die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Chief Science Officer en Principal Scientist van team Ecohydrologie (KWR, Nieuwegein)

naam: Ruud (R.P.) Bartholomeus

datum: december, 2022

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam (M.J.D.) Hack-ten Broeke

datum: december, 2022

Woord vooraf

In 2021-2022 is een TKI-Deltatechnologie project ('Conceptuele modelverbetering NHI', projectcode DEL143) uitgevoerd waarin aandacht is besteed aan conceptuele modelverbetering voor het gezamenlijk instrumentarium NHI en Waterwijzers. Binnen hydrologisch Nederland wordt met NHI-toepassingen en de Waterwijzers Landbouw en Natuur gerekend om effecten van veranderingen in hydrologie, klimaat en maatregelen op het watersysteem en op natuur en landbouw in beeld te brengen. In verschillende studies komen suggesties voor verbeterpunten van die modellen naar voren. Dergelijke verbeterpunten zijn meestal niet door te voeren via het jaarlijkse beschikbare budget voor beheer en onderhoud. Daarom is het TKI-project opgestart.

In onderhavig rapport komt een tweetal onderwerpen aan bod: a) microscopische wateropnamemodellen als alternatief voor de klassieke macroscopische Feddes wateropname in SWAP en b) de implementatie van dynamische tijd-diepte variërende wortelverdeling in SWAP.

De werkzaamheden rondom de implementatie van twee microscopische wateropnamemodellen zijn uitgevoerd in nauw overleg met Quirijn de Jong van Lier (DVECO/CENA, University of São Paulo, Brazil) en Jos van Dam (WU Soil Physics and Land Management); Quirijn en Jos zijn auteurs van een van beide microscopische wateropnamemodellen. Wij danken hen voor hun opmerkingen en suggesties (met name m.b.t. hoofdstuk 2, 3 en 4).

De voortgang van deze werkzaamheden werden regelmatig voorgelegd aan en besproken met de begeleidingscommissie van het TKI-NHI project onderdeel Waterwijzer Landbouw, bestaande uit Rob Ruijtenberg (STOWA, voorzitter), Jacques Peerboom (NHI, plaatsvervangend voorzitter) en Joost Heijkers (NHI), Saske Klerkx (ACSG), Wim Werkman (Rijkswaterstaat), Tom Hoogland (Vitens), Frank van der Bolt (Waterschap Aa en Maas), Ebbing van Tuinen (Witteveen+Bos), Janneke Pouwels (Deltares).

Samenvatting

Wateropname door plantenwortels is een kernproces in de (globale) watercyclus: meer dan 50% van de evapotranspiratie gaat via de plantenwortels terug naar de atmosfeer. Gebrek aan water in de wortelzone zal leiden tot reductie van de transpiratie en het gevolg is dat gewassen minder goed groeien (opbrengstreductie of opbrengstderving). Met simulatiemodellen voor de waterbalans in de (on)verzadigde bodem berekenen we de wateropname en de gevolgen voor gewasgroei. In Nederland maken we hiervoor gebruik van het agrohydrologische model SWAP (Soil Water Atmosphere Plant), bijvoorbeeld in het kader van de Waterwijzers Landbouw en Natuur. SWAP is ook de basis van het daarvan afgeleide metaSWAP dat wordt gebruikt in het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium. Omdat in het recente verleden met deze modellen voor sommige bodem-gewascombinaties transpiratiereducties werden gesimuleerd die niet goed verklaard konden worden, is voorgesteld om de bestaande concepten voor het simuleren van wateropname in combinatie met een statische wortelverdeling te vergelijken met alternatieve wateropnameconcepten en een dynamische wortelverdeling.

Twee bestaande, in de wetenschappelijke literatuur gepubliceerde, microscopische beschrijvingen voor wateropname door plantenwortels zijn toegevoegd aan SWAP. Deze microscopische concepten beschouwen stroming van water in een cilindervormige bodemkolom rondom een wortel naar de wortelwand toe en vervolgens de wortel in en naar het blad toe. Op deze manier wordt zowel rekening gehouden met de hydraulische eigenschappen van de bodem als met enkele gewaseigenschappen waaronder de doorlatendheid van de wortelwand en de geleidbaarheid in het pad wortel-stam-blad. Daarmee verschillen deze van het meer eenvoudige macroscopische concept van Feddes, waar geen rekening wordt gehouden met stroming naar een wortelwand toe.

Voor alle 79 BOFEK2020-eenheden in combinatie met gras of mais en onder relatief droge en onder relatief natte hydrologische omstandigheden is het volgende waargenomen.

- De wateropname gerealiseerd met beide microscopische concepten is in de meeste gevallen groter dan gesimuleerd met het traditionele macroscopische concept van Feddes.
- De onderlinge verschillen in gesimuleerde wateropname tussen beide microscopische concepten zijn nihil.
- Beide microscopische concepten zijn vrij ongevoelig voor de nieuw geïntroduceerde parameters. De enige parameter waarvoor beide modellen gevoelig kunnen zijn, is de doorlatendheid van de wortelwand, als deze zeer klein is.

Bij dynamische wortelontwikkeling wordt nieuwe biomassa vooral daar aan de bestaande wortelbiomassa toebedeeld waar geen (of de geringste) transpiratiereductie wordt gesimuleerd, en eventuele afsterving van wortels zal plaatsvinden daar waar de meeste transpiratiereductie plaatsvindt. De mate waarin de plant dit dynamische gedrag kan uiten, is deels te sturen met een factor tussen de waarde 0 (geen dynamische wortelverdeling) en 1 (volledige dynamische wortelverdeling). Een belangrijk voordeel van toepassing van dynamische wortelverdeling is dat de wortelverdelingen die in de loop de tijd ontstaan zich relatief onafhankelijk ontwikkelen van de door de gebruiker opgegeven initiële wortelverdeling. Echter, wanneer uitgegaan wordt van een initiële uniforme (blok)verdeling, bestaat de kans dat er relatief veel wortels onder in de wortelzone ontstaan. Zeker bij relatief ondiepe grondwaterspiegeldieptes leidt dit tot een groot aandeel zuurstofstress. Daarom wordt afgeraden om met een initiële uniforme verdeling te starten. Dynamische wortelverdeling is toepasbaar in combinatie met zowel de macroscopische als de microscopische wateropnameconcepten.

Zowel de microscopische wateropnamemodellen als de dynamische wortelverdeling zijn operationeel in de ontwikkelversie van SWAP. Het verdient de voorkeur om in de toekomst beide onderdelen te gaan gebruiken. Het gebruiken van microscopische wateropname past dan ook bij de huidige implementatie van microscopische zuurstofopname (analoge concepten). Het is echter nog wel nodig om eerst een nieuwe manier vast te stellen hoe microscopische wateropname het best gecombineerd kan worden met zuurstofstress (en zout- en vorststress).

1 Inleiding

In Nederland worden effecten van scenario's en maatregelen op het watersysteem, de landbouw en de natuur doorgaans bepaald met behulp van hydrologische modellen, zoals het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI) en de Waterwijzers Landbouw en Natuur. De hydrologische modelconcepten voor de bodem met de gewassen, de ondergrond en het oppervlaktewater daarin zijn vooral toegesneden op de landelijke en regionale schaal; de Waterwijzers kunnen ook de lokale schaal bedienen, via maatwerkopties.

De Waterwijzers zijn indertijd opgebouwd uit modules waarin bestaande kennis was opgenomen. Natuurlijk moest toen ook gekozen worden uit verschillende mogelijkheden, immers sommige deelprocessen konden en kunnen op meerdere wijzen gemodelleerd worden. Bij de toepassingen van de Waterwijzers zijn voor sommige situaties tekortkomingen geconstateerd. In enkele situaties sloot de gesimuleerde wateropname en daaruit volgende opbrengstreductie niet aan bij de verwachtingen. Een van de situaties waar onverwacht hoge opbrengstreducties werden gesimuleerd, betrof een bodemprofiel bestaande uit een venige klei op zeer zware klei op veen (BOFEK-eenheid 1018) met kleine grondwaterspiegeldieptes (Gt I of Gt II). Uit eerdere analyses is gebleken dat dit niet verbeterde wanneer de hydraulische eigenschappen van de kleilaag werden beschreven door een alternatief modelconcept Peters – Durner – Iden (Peters, 2013; Iden and Durner, 2014; Peters, 2014) in plaats van Mualem – Van Genuchten (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) dat beter in staat was om de lichte kromming in de $K(h)$ meetpunten te beschrijven. Het verbeterde ook niet door de statische wortelverdelingsfunctie anders te kiezen. Dit was reden om na te gaan of alternatieven voor die gemaakte keuzes deze tekortkomingen geheel of voor een groot deel kunnen opheffen. Het blijft immers belangrijk om een goede inschatting te maken van de wateropname door plantenwortels, omdat wateropname een kernproces is in de (globale) watercyclus; meer dan 50% van de evapotranspiratie gaat via de plantenwortels terug naar de atmosfeer (Jasechko et al., 2013; Rothfuss and Javaux, 2016).

De genoemde tekortkomingen zijn in veel gevallen terug te voeren op het goed simuleren van de wateropname, maar ook op de interactie van beworteling met de abiotische omgeving in de bodem. In het kader van een TKI-Deltatechnologie project is nader onderzoek gedaan naar de volgende twee toevoegingen in SWAP (Kroes et al., 2017):

- a. microscopische wateropname modellen als alternatief voor de klassieke macroscopische Feddes wateropname in SWAP, en
- b. dynamische tijd-diepte variërende (adaptieve) wortelverdeling in SWAP.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden twee zogenoemde microscopische wateropnamemodellen uit de literatuur samengevat. Deze kunnen als alternatief gezien worden voor het klassieke, macroscopische Feddes-concept. Hierbij wordt ook aandacht geschonken aan de ordegrrootte van de nieuw geïntroduceerde gewasparameters. In hoofdstuk 3 worden enkele test simulaties uitgevoerd waarin de beide microscopische en het macroscopische concept onderling worden vergeleken, waarbij ook testcases uit de Waterwijzer Landbouwomgeving worden gebruikt. Hoofdstuk 4 beschrijft een gevoeligheidsanalyse met betrekking tot de nieuw geïntroduceerde gewasparameters voor enkele praktijksituaties. In hoofdstuk 5 wordt een korte analyse gegeven waaruit blijkt dat het niet mogelijk is om vanuit de microscopische wateropnamemodellen bodem-gewas-specifieke parameters af te leiden waarmee het macroscopische concept geparametriseerd zou kunnen worden. In hoofdstuk 6 wordt nader ingegaan op de nieuwe functionaliteit in SWAP waarbij de wortelverdeling dynamisch in de tijd en diepte kan variëren en waar aangroei en afsterving van wortels daar plaatsvindt waar de omstandigheden voor wateropname respectievelijk het gunstigst dan wel het ongunstigst is. Hoofdstuk 7 bespreekt kort wat voor implicaties deze veranderingen hebben, waarbij sommige modelconcepten niet meer gelijktijdig toegepast kunnen worden.

2 Wateropnamemodellen

Wateropname speelt een belangrijke rol in bodem-water-atmosfeer-plant simulatiemodellen, zoals SWAP (Kroes et al., 2017) of Hydrus (Šimůnek et al., 2009). De algemene stromingsvergelijking voor water in de (on)verzadigde bodem wordt gegeven door de Richards-vergelijking (Richards, 1931):

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial h(\theta)}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S \quad (1)$$

Hierin is θ het volumetrisch watergehalte ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), t is de tijd (d), z is de diepte (cm), h is de drukhoogte (cm), K is de hydraulische doorlatendheid (cm d^{-1}), en S is een putterm, bijvoorbeeld de wateropname door wortels ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$). Voor wateropname S bestaan weer afzonderlijke modellen. Hier beschouwen we drie modellen: i) het macroscopische concept volgens Feddes et al. (1978), ii) het microscopische concept volgens De Willigen et al. (De Willigen and Van Noordwijk, 1987, 1991; De Willigen, 1990; Heinen and De Willigen, 1998; 2001; Heinen, 2001; De Willigen et al., 2012; 2017) en iii) het microscopische concept van De Jong van Lier et al. (2013; voortbouwend op De Jong van Lier et al., 2006, 2008). Deze drie concepten worden kort beschreven in de volgende secties; details zijn terug te lezen in de genoemde referenties. In het vervolg zullen deze drie modellen afgekort worden tot Fe, dW en dJvL. Reductie in wateropname als gevolg van andere processen, zoals zuurstofstress, zoutstress of vorst worden hier buiten beschouwing gelaten. De Willigen et al. (2011, 2012) hebben in een eerder stadium de concepten Fe, dW en de voorloper van dJvL beschreven en vergeleken, waarbij het concept van dJvL uit 2008 werd beschouwd.

Zowel de macroscopische als de microscopische wateropnamemodellen gaan uit van een watervraag door het gewas. Dat is de zogenaamde potentiële transpiratie (T_{pot}). Deze wordt in SWAP-WOFOST vastgesteld op basis van de referentieverdamping, die wordt bepaald door de atmosferische vraag naar water. In SWAP-WOFOST wordt de referentieverdamping meestal berekend volgens Penman-Monteith (alternatief: invoer). Vervolgens wordt deze referentieverdamping op basis van de toestand van het gewas (LAI, gewashoogte) verdeeld over een aandeel potentiële verdamping aan maaiveld (E_{pot}) en een aandeel potentiële verdamping door het gewas (T_{pot}). Dus, de keuze om wateropname via een macroscopisch of een microscopisch model te simuleren, heeft geen invloed op de referentieverdamping. Wel kan het zo zijn dat er gedurende het groeiseizoen verschillende transpiratiereducties worden gesimuleerd door beide concepten. Dit leidt dan tot verschillende gewasontwikkelingen (LAI, gewashoogte) wanneer met WOFOST wordt gerekend. In dat geval kan dat van invloed zijn op de verdeling van de referentieverdamping over de aandelen bodemverdamping en gewasverdamping.

2.1 Macroscopische wateropname: Fe

De macroscopische wateropname gaat uit van een watervraag of potentiële transpiratie, T_{pot} (cm d^{-1}). Deze wordt proportioneel aan de relatieve wortelverdeling verdeeld over de rekenlagen in de wortelzone volgens:

$$S_p(z) = L_{rv,rel}(z) T_{\text{pot}} \quad (2)$$

Hierin is S_p de potentiële watervraag per rekenlaag (d^{-1}) en $L_{rv,rel}$ is de relatieve wortelverdeling als functie van de diepte (cm^{-1}). Vervolgens wordt per rekenlaag de actuele wateropname S_a (d^{-1}) berekend op basis van de drukhoogte in de betreffende laag (h_s , cm) volgens:

$$S_a(z) = \alpha(h_s) S_p(z) \quad (3)$$

waarbij $\alpha(h_s)$ de Feddes reductiefunctie is en welke gegeven is door:

$$\alpha(h_s) = \begin{cases} 1 & h_3 \leq h_s \\ \frac{h_4 - h_s}{h_4 - h_3} & h_4 \leq h_s < h_3 \\ 0 & h_s \leq h_4 \end{cases} \quad (4)$$

In deze uitdrukking is alleen droogtestress beschouwd; reductie in wateropname onder natte omstandigheden (zuurstofstress) wordt hier buiten beschouwing gelaten. De waarde voor h_4 wordt vaak aangeduid als het verwelkingspunt. De waarde voor h_3 is de kritieke drukhoogte in de bodem waarbij reductie in wateropname begint. Vaak wordt hiervoor een relatie met T_{pot} verondersteld: bij hoge waarden voor T_{pot} wordt een hoge waarde voor h_3 gebruikt (dus eerder droogtestress) en bij lage waarden voor T_{pot} wordt een lage waarde voor h_3 gebruikt.

De werkelijke wateropname, ofwel actuele transpiratie T_{act} (cm d⁻¹), volgt dan uit:

$$T_{act} = \int_{z=0}^{Z_r} S_a(z) dz \quad (5)$$

Hierin is Z_r de bewortelingsdiepte (cm).

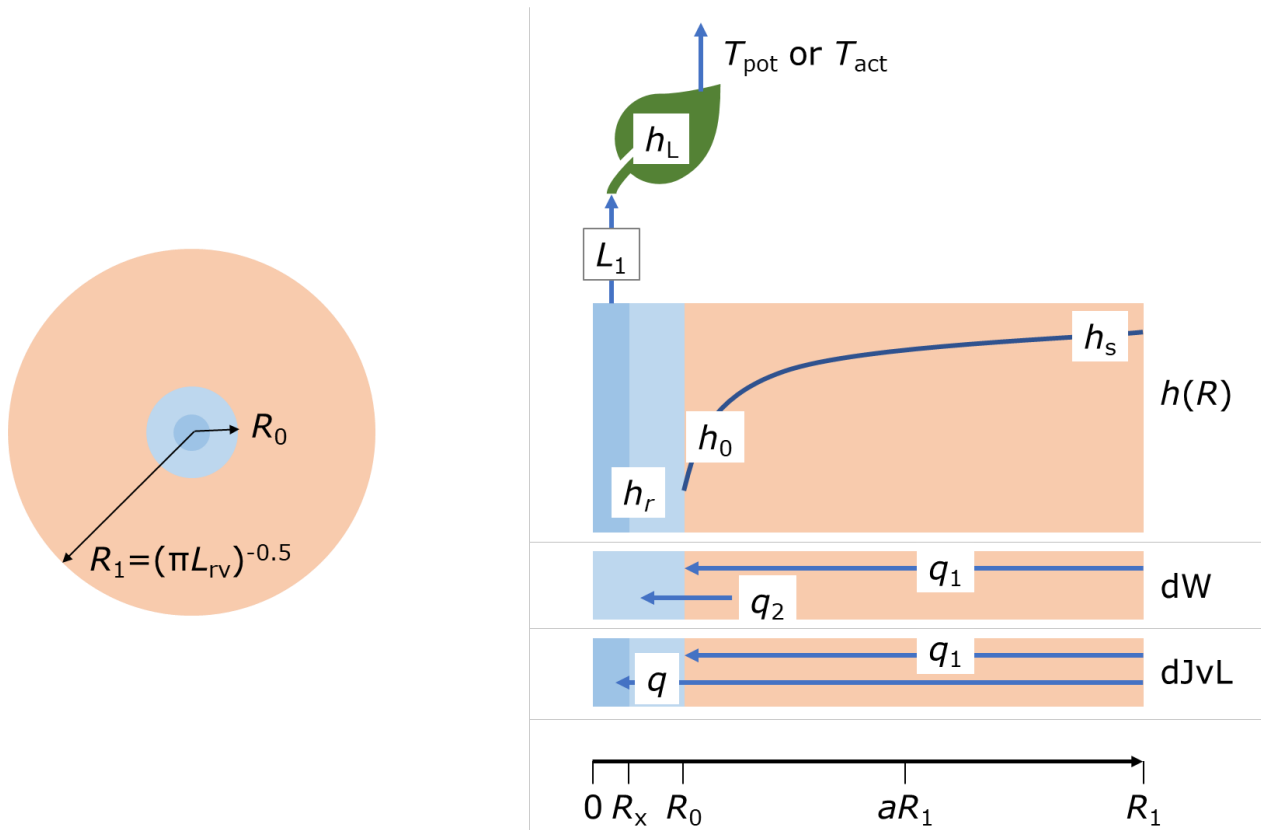
Nadat op bovenstaande manier S_a en T_{act} zijn berekend, kan ervoor gekozen worden om achteraf een compensatie volgens Jarvis (1989; 2011) toe te passen. Het idee van de Jarvis-compensatie, hier toegepast op alleen droogtestress, is dat de feitelijke wateropname per rekenlaagje wordt aangepast (opgehoogd). Als $\alpha_{crit} \leq T_{act}/T_{pot} < 1$, waarbij α_{crit} een door de gebruiker opgegeven waarde is in de range 0 tot 1 (bijvoorbeeld $\alpha_{crit} = 0.7$), vindt volledige compensatie plaats: voor elk rekenlaagje wordt de opname vermenigvuldigd met de factor T_{pot}/T_{act} , zodat $T_{act} = T_{pot}$. Als $T_{act}/T_{pot} < \alpha_{crit}$, dan vindt gedeeltelijke compensatie plaats: voor elk rekenlaagje wordt de opname vermenigvuldigd met de factor $1/\alpha_{crit}$, waarbij T_{act} iets toeneemt (factor $1/\alpha_{crit}$), maar kleiner blijft dan T_{pot} . Het Feddes-concept zonder compensatie wordt aangeduid met Fe_0 en die met compensatie door Fe_1.

2.2 Microscopische wateropname

Anders dan bij het macroscopische concept van Feddes wordt in het microscopische concept uitgegaan van de werkelijke wortellengtedichtheid $L_{rv}(z)$ (cm cm⁻³), dat is de totale wortellengte (cm) per cm³ grond. Bij het afleiden van beide microscopische concepten (dW, dJvL) wordt verondersteld dat de hoeveelheid bodem evenredig verdeeld wordt over de hoeveelheid aanwezige wortels. Omdat wortels cilindervormig zijn, wordt de bodem ook als een cilinder verdeeld rondom elke wortel. De microscopische concepten lossen vervolgens het stromingsprobleem op in het pad bodem-wortel-blad, met als randvoorwaarde de watervraag T_p . In Figuur 1 is het domein wortel-bodem schematisch weergegeven zoals dat in de microscopische concepten wordt beschouwd. De straal van de bodemcilinder, R_1 (cm), wordt bepaald door L_{rv} volgens:

$$R_1(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi L_{rv}(z)}} \quad (6)$$

Hoe meer wortels, des te kleiner de straal van de bodemcilinder.



Figuur 1 Schematische weergave van aspecten van de microscopische wateropnameconcepten. Links: horizontale dwarsdoorsnede met een wortel in het centrum en een deel van de bodem die aan de wortel is toegekend, gebaseerd op de wortellengtedichtheid (Eq. (6)). Rechts: het paneel aangeduid met $h(R)$ geeft een impressie van de drukhoogte als functie van de afstand R , en vervolgens via het pad wortel-stam-blad naar de bladpotentiaal h_L ; de onderste twee panelen geven voor elk van beide microscopische concepten de twee fluxen die worden beschouwd, welke opgeteld voor alle simulatielagen gelijk moet zijn aan T_{pot} dan wel gereduceerd tot T_{act} .

2.2.1 Microscopische wateropname: dW

Het microscopische concept dW stelt dat er een waterflux is in de bodem naar de wortel toe en een flux de wortel in. Deze fluxen moeten aan elkaar gelijk zijn en tevens gelijk zijn aan de watervraag. De flux in de bodem is gegeven als:

$$q_{1,j} = \Delta z_j \rho_{dW,j} (M_{s,j}(h_{s,j}) - M_{o,j}(h_{o,j})) \quad (7)$$

Hierin is q_1 de flux in de bodemcilinder naar de wortel toe (cm d^{-1}), Δz de dikte van de rekenlaag j (cm), M_s is de matrix flux potentiaal (zie paragraaf 2.3) van de rekenlaag en is een functie van de drukhoogte h_s , M_o is de matrix flux potentiaal ($\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$) op het grensvlak bodem-wortel waar de drukhoogte gelijk is aan h_o (cm) en ρ_{dW} is een geometriefactor (cm^{-2}) gegeven door:

$$\rho_{dW} = \frac{r^2 - 1}{R_1^2 0.5 \left(0.25(1 - 3r^2) + r^4 \ln\left(\frac{r}{r^2 - 1}\right) \right)} \quad r = \frac{R_1}{R_0} \quad (8)$$

Hierin is R_0 de straal van de wortel (cm). Merk op dat R_1 per rekenlaag een andere waarde kan hebben.

De flux de wortel in is gegeven als:

$$q_{2,j} = \Delta z_j L_{v,j} K_r (h_{o,j} - h_r) \quad (9)$$

Hierin is q_2 de flux die via de wortelwand de wortel ingaat (cm d^{-1}), K_r de doorlatendheid van de wortelwand (cm d^{-1}) en h_r is de drukhoogte in de wortel (cm). De drukhoogte in de wortel is gerelateerd aan de drukhoogte in het blad via:

$$h_L = h_r - \frac{T_{\text{pot}}}{a_0 + a_1 T_{\text{pot}}} \quad (10)$$

Deze relatie is gebaseerd op metingen van Zhuang et al. (2001), met $a_0 = 3.1844 \cdot 10^{-5} \text{ d}^{-1}$ en $a_1 = 1.7768 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ (De Willigen et al., 2011; zie ook Bijlage 1).

De actuele transpiratie is een functie van de bladpotentiaal: $T_{\text{act}}(h_L)$ (zie paragraaf 2.5).

Per rekenlaag moet worden voldaan aan $q_1 = q_2$ en voor alle rekenlagen samen geldt dat de som van alle q_1 gelijk moet zijn aan T_{act} . Hiervoor moeten waarden gevonden worden voor alle h_o en voor h_L . De technische beschrijving van de oplosmethode is gegeven in paragraaf 2.4.

De hier gegeven beschrijving (en de volgende beschrijving van het concept dJvL) gaat ervan uit dat de wortelwand volledig contact heeft met de bodem. De Willigen et al. (2017) presenteerden formuleringen voor situaties waarbij de wortels geen volledig contact met de bodem hebben. Omdat het dan belangrijk is om te weten hoe de geometrische contacten verlopen (partieel radiaal contact, partieel longitudinaal contact, of mengvormen hiervan), is het niet eenduidig aan te geven welke beschrijving moet worden toegepast.¹ In dit onderzoek gaan we uit van volledig contact.

2.2.2 Microscopische wateropname: dJvL

Ook in het microscopische concept dJvL wordt de waterflux in het systeem bodem-wortel-blad beschouwd. Door andere uitgangspunten is dit concept anders geformuleerd dan het concept dW.

Per rekenlaag moet worden voldaan aan de volgende gelijkheid:

$$h_{o,j} + \phi_{\text{dJvL},j} M_{o,j} = h_L + \phi_{\text{dJvL},j} M_{s,j} + \frac{T_{\text{act}}}{L_1} \quad (11)$$

Hierin is L_1 de geleidbaarheid in het pad wortel-stam-blad (d^{-1}) en ϕ_{dJvL} is een geometriefactor (d cm^{-1}) gegeven door:

$$\phi_{\text{dJvL}} = \frac{R_1^2 \ln\left(\frac{R_0}{R_x}\right)}{2K_r} \rho_{\text{dJvL}} \quad (12)$$

Hierin is R_x de straal van het xyleem (cm) en de geometriefactor ρ_{dJvL} (cm^{-2}) is gegeven als:

$$\rho_{\text{dJvL}} = \frac{4}{\left(R_0^2 - a^2 R_1^2 + 2(R_0^2 + R_1^2) \ln\left(\frac{aR_1}{R_0}\right)\right)} \quad (13)$$

¹ Soms is de impact gering en voor andere situaties is de opname geringer en kan grofweg benaderd worden door L_v proportioneel te verlagen.

Hierin is a een fractie tussen 0 en 1 die aangeeft waar in de bodemcilinder de gemiddelde drukhoogte h_s aanwezig is en R_x is de straal van het xyleem (cm). Uit vooronderzoek hebben De Jong van Lier et al. (2006; 2008; 2013) vastgesteld dat $a = 0.53$ een gemiddelde waarde is die in de meeste gevallen voldoet. De geometriefactor $\rho_{d\text{vL}}$ heeft een grote overeenkomst met $\rho_{d\text{w}}$ in geval $R_1 \gg R_0$ (De Willigen et al., 2011). Merk op dat voor grote waarden van L_{rv} de waarde van R_1 klein wordt, en dat voor $aR_1 = R_0$ de noemer in Eq. (13) gelijk wordt aan nul waarmee het probleem ongedefinieerd is.

De waterflux in de bodemcilinders wordt apart gegeven als:

$$q_{1,j} = \Delta z_j \rho_{d\text{vL},j} (M_{s,j} - M_{o,j}) \quad (14)$$

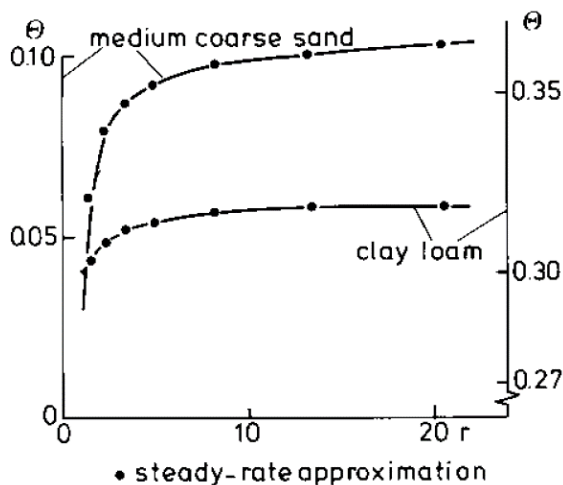
De som van de fluxen in de bodemcilinders moet gelijk zijn aan de actuele transpiratie volgens:

$$T_{\text{act}} = \sum_{j=1}^N \Delta z_j \rho_{d\text{vL},j} (M_{s,j} - M_{o,j}) \quad (15)$$

Dit systeem moet worden opgelost waarbij waarden gevonden moeten worden voor alle h_o en voor h_L . De technische beschrijving van de oplosmethode is gegeven in paragraaf 2.4.

2.2.3 Microscopische opname vergeleken met een numerieke oplossing

De Willigen and Van Noordwijk (1987) hebben de analytische, *steady-rate* oplossing van het microscopische concept dW vergeleken met een numerieke oplossing van de Richards-vergelijking in een cilindervormige bodemkolom met opname in het centrum van de bodemcilinder. Zij lieten zien dat het verloop van het volumetrisch watergehalte in de bodemkolom naar de wortelwand toe afnam en dat er een vrijwel perfecte overeenkomst bestond tussen de analytische, *steady-rate* oplossing en de numerieke oplossing (Figuur 2). Zie lieten de overeenkomst zien voor volumetrisch watergehalte, maar uiteraard bestaat er eenzelfde goede overeenkomst voor drukhoogte en matrix flux potentiaal.



Figuur 2 Overeenkomst tussen de analytische, *steady-rate* oplossing van het microscopische concept dW (symbolen) en een numerieke oplossing van de Richards-vergelijking (lijn) in termen van volumetrisch watergehalte als functie van de relatieve afstand tot de wortelwand ($r = R_1/R_0$) voor twee bodems met wortellengtedichtheid gelijk aan 1 cm cm^{-3} en een transpiratie van 0.5 cm d^{-1} (bron: De Willigen and Van Noordwijk, 1987, Figuur 9.22).

2.2.4 Intrinsieke compensatie en hydraulische herverdeling

Beide microscopische concepten zoeken naar een optimale verdeling van de wateropname over de hele bewortelde diepte. Dat betekent dat er sprake is van intrinsieke compensatie. Wateropname wordt niet laag voor laag uitgerekend zoals bij het macroscopische concept, maar er wordt naar een optimale potentiaalverdeling gezocht in het pad wortelzone-wortel-blad, zodanig dat zo goed mogelijk aan de watervraag kan worden voldaan; reductie in wateropname wordt later besproken in paragraaf 2.5. Voor het macroscopische Fe-concept wordt compensatie achteraf toegepast, maar dat is niet meer nodig voor beide microscopische concepten. In extreme situaties kan het zo zijn dat water vanuit relatief natte bodemlagen via de wortels naar relatief droge bodemlagen wordt getransporteerd. Water zal dan vanuit de wortels de droge lagen instromen, waarbij dan nog steeds kan worden voldaan aan de watervraag. Dit proces heet hydraulische herverdeling. Vaak opwaarts, omdat het boven in de bodem meestal droger is dan onderin. Hydraulische herverdeling wordt in paragraaf 2.8 nader beschouwd.

2.2.5 Waterpotentialen in bodem-wortel-blad

Voor beide microscopische concepten geldt dat er wordt gekeken naar het verloop van de waterpotentiaal in het traject bodem, rhizosfeer, wortel en blad. Water stroomt van de bodem via de wortel naar het blad onder invloed van een gradiënt in de waterpotentiaal over dit traject. Echter, in de praktijk worden deze potentialen weinig of slechts spaarzaam gemeten (Novick et al., 2022). Daardoor missen we enerzijds praktische informatie over de invloed van deze waterpotentialen op de stress die planten ondervinden en anderzijds informatie om modelconcepten te toetsen. De hierboven beschreven microscopische concepten geven wel een eerste indicatie van de ordegrrootte van de potentialen en potentiaalgradiënten.

2.2.6 Situatie met gedeeltelijk verzadigde wortelzone

Het kan voorkomen dat tijdelijk een deel van de wortelzone verzadigd wordt, bijvoorbeeld wanneer het grondwater tijdelijk tot in de wortelzone reikt of wanneer tijdens een zeer intensieve bui de bovenste paar centimeters van de bodem verzadigd raken. Fysisch gezien zou je verwachten dat de microscopische theorieën hiermee om moeten kunnen gaan. Na implementatie van de theorie in SWAP is gebleken dat dit wel lukt voor het concept dW , maar niet voor het concept $dJvL$. In situaties zonder beperking voor wateropname verloopt de wateropname proportioneel met de wortelverdeling (De Willigen et al., 2005). Daarom is de optie ingebouwd dat wateropname in de verzadigde rekencompartimenten proportioneel is aan de relatieve wortelverdeling maal de verdampingsvraag, en het resterende deel aan transpiratie wordt dan volgens het microscopische concept berekend voor het onverzadigde deel van de wortelzone.

Er is een optie toegevoegd om de wateropname in de verzadigde rekencompartimenten buiten beschouwing te laten (zie paragraaf 2.6.2). In dat geval wordt de volledige watervraag toegekend aan de wortels in het onverzadigde deel van de wortelzone. De gebruiker kan hiervoor kiezen onder de veronderstelling dat wortels in een verzadigde bodem niet functioneren door zuurstofgebrek.

2.3 Matrix flux potentiaal

De matrix flux potentiaal, M ($\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$), is gedefinieerd als de integraal van de doorlatendheidsfunctie volgens (Raats, 1970):

$$M(h) = \int_{x=h_{\text{ref}}}^h K(x) dx \quad (16)$$

Hierin is h_{ref} een referentiedrukhoogte, bijvoorbeeld $h_{\text{ref}} = -20000$ cm en x is de dummy variabele (drukhoogte) voor integratie (cm). Alleen voor speciale $K(h)$ -relaties is M analytisch uit te schrijven. Voor de veelvuldig gebruikte Mualem (1976)-Van Genuchten (1980) $K(h)$ -relatie is M analytisch te benaderen in termen van de Gauss hypergeometrische functie (De Jong van Lier et al., 2009; Heinen and Bakker, 2016). Daarvoor bestaat een efficiënte oplosmethode (Michel and Stoitsov, 2008), maar desondanks is deze

rekenintensief wanneer toegepast in dynamische simulaties. Als alternatief wordt voorgesteld om $M(h)$ (en bijbehorende $K(h)$) initieel als een tabel te berekenen en vervolgens tijdens de dynamische simulatie lineair te interpoleren in deze tabel. Voor zes testcases is vastgesteld dat de overeenkomst in langjarige, gesimuleerde cumulatieve transpiratie, waarbij M analytisch is benaderd dan wel via lineaire interpolatie uit een tabel is berekend, zeer groot en vaak identiek is (zie Bijlage 2). Omdat de tabeloptie vele malen sneller rekent, verdient deze optie de voorkeur in toekomstige simulaties.

2.4 Oplosmethode

Voor beide microscopische concepten geldt dat ze zijn gedefinieerd als een stelsel van N niet-lineaire vergelijkingen met N onbekenden, aangevuld met de eis dat de som van de N opnames gelijk moet zijn aan de actuele transpiratie die een functie is van de aanvullende onbekende h_L . Er geldt dat er N rekenlagen zijn die de bewortelde zone aanduiden, de N onbekenden zijn h_o voor elke rekenlaag waarbij genoteerd dat de onbekenden M_o tijdens het iteratieproces berekend worden op basis van de update van h_o . De niet-lineariteit van het probleem komt voort uit de niet-lineaire relaties $M(h)$ en $T_a(h_L)$.

Dit probleem kan opgelost worden via een dubbele (geneste) iteratieprocedure. In de buitenste iteratieprocedure zoeken we eerst iteratief twee waarden voor h_L waarvoor de volgende functie 1x positief en 1x negatief is:

$$F(h_L) = U(h_L) - T_{act}(h_L) \quad (17)$$

De functie $U(h_L)$ wordt hieronder besproken. Wanneer deze grenswaarden gevonden zijn, kan de definitieve schatting voor h_L gevonden worden, waarbij geldt $F(h_L) = 0$ (of in absolute zin kleiner dan een gewenst convergentiecriteria) volgens standaard nulpuntzoekende functies (bijv. zbrent uit Press et al., 1992).

De functie $U(h_L)$ is de oplossing van de binnenste iteratieloop waarin het stelsel van N niet-lineaire vergelijkingen wordt opgelost. Het stelsel vergelijkingen volgens dW is gegeven als:

$$\begin{aligned} u_1 &= Q_1(x_1 - h_L) - S_1(M_{s,1} - M_{o,1}) = 0 \\ u_2 &= Q_2(x_2 - h_L) - S_2(M_{s,2} - M_{o,2}) = 0 \\ &\dots \\ u_N &= Q_N(x_N - h_L) - S_N(M_{s,N} - M_{o,N}) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

waarin $x = h_o$ en $S = \Delta z L_{rv} K_r$ en $Q = \Delta z \rho_{dW}$. In matrix-vector notatie is dit geschreven als $\mathbf{U}(\mathbf{x}) = 0$.

Het stelsel vergelijkingen volgens dJvL is gegeven als:

$$\begin{aligned} u_1 &= h_L - x_1 + SS_1(M_{s,1} - M_{o,1}) + \frac{T_a}{L_1} = 0 \\ u_2 &= h_L - x_2 + SS_2(M_{s,2} - M_{o,2}) + \frac{T_a}{L_1} = 0 \\ &\dots \\ u_N &= h_L - x_N + SS_N(M_{s,N} - M_{o,N}) + \frac{T_a}{L_1} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

waarin $x = h_o$ en $SS = \phi_{dJvL}$. In matrix-vector notatie is dit geschreven als $\mathbf{U}(\mathbf{x}) = 0$.

Dit probleem wordt opgelost volgens een Newton-Raphson-methode (Press et al., 1992). Hiertoe wordt het oorspronkelijke probleem $\mathbf{U}(\mathbf{x}) = 0$ herschreven als (op basis van Taylor expansie rondom u_i)

$$\mathbf{U}(\mathbf{x} + \delta\mathbf{x}) = \mathbf{U}(\mathbf{x}) + \mathbf{J} \cdot \delta\mathbf{x} + O(\delta\mathbf{x}^2) \quad (20)$$

hierin is \mathbf{x} de vector met onbekenden $h_{o,i}$ en \mathbf{U} is de vector met de uitdrukkingen voor u_i . We verwaarlozen de tweede orde term aan de rechterkant en er geldt dat $\mathbf{U}(\mathbf{x} + \delta\mathbf{x}) = 0$, zodat het probleem nu is gegeven als:

$$\mathbf{J} \cdot \delta\mathbf{x} = -\mathbf{U} \quad (21)$$

Dit matrixprobleem kan worden opgelost, en de schatting voor \mathbf{x} kan worden geüpdatet als:

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{x}_{\text{old}} + \delta\mathbf{x} \quad (22)$$

Dit wordt iteratief herhaald totdat convergentie is bereikt waarbij $\delta\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{0}$ (ofwel de som van alle $|\delta x_i|$ is kleiner dan een bepaald convergentiecriteria).

De Jacobiaan \mathbf{J} bevat de afgeleiden van u_i naar $x_i = h_{o,i}$. Voor het concept dW is deze gegeven als (NB $dM(h)/dh = K(h)$):

$$\mathbf{J} = \begin{vmatrix} Q_1 + S_1 K_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q_2 + S_2 K_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Q_N + S_N K_N \end{vmatrix} \quad (23)$$

Voor het concept van dJvL is deze gegeven als:

$$\mathbf{J} = \begin{vmatrix} -1 - SS_1 K_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 - SS_2 K_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -1 - SS_N K_N \end{vmatrix} \quad (24)$$

Omdat \mathbf{J} alleen op de hoofddiagonaal waarden ongelijk aan nul bevat, is de inverse \mathbf{J}^{-1} direct beschikbaar: alle diagonaal elementen van \mathbf{J}^{-1} zijn gelijk aan de reciproke van de diagonaalelementen van \mathbf{J} . Daarmee is Eq. (21) direct op te lossen: $\delta\mathbf{x} = -\mathbf{J}^{-1} \cdot \mathbf{U}$.

2.5 Transpiratie reductiefunctie

Beide microscopische modellen veronderstellen dat de transpiratie wordt gereduceerd wanneer de waterpotentiaal in de plant (blad) te negatief wordt. Bij de oorspronkelijke beschrijving van het dJvL-model (De Jong van Lier et al., 2013) wordt hiervoor een stap-functie gebruikt, die gegeven is als:

$$T_r(h_L) = \frac{T_{\text{act}}}{T_{\text{pot}}} = \begin{cases} 1 & h_w < h_L \\ [0 \dots 1] & h_w = h_L \\ 0 & h_L < h_w \end{cases} \quad (25)$$

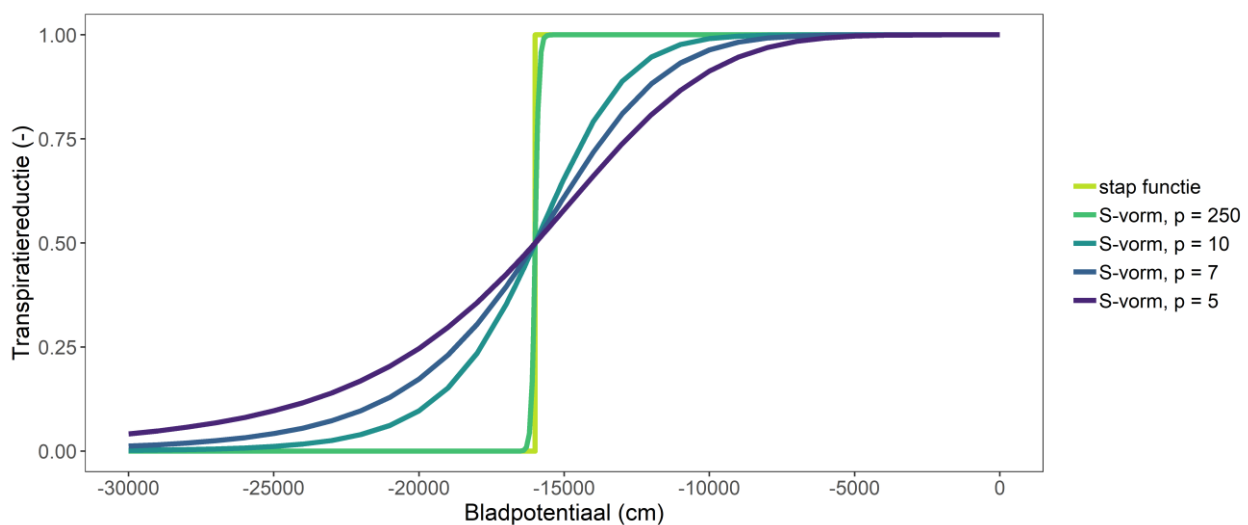
Hierin is T_r de transpiratiereductie (-), T_{act} is de actuele transpiratie, ofwel actuele wateropname (cm d^{-1}), T_{pot} is de potentiële transpiratie, ofwel watervraag (cm d^{-1}), h_L is de bladpotentiaal (cm) en h_w is de limiterende bladpotentiaal waarbij transpiratiereductie optreedt (cm). Het valt op dat voor de situatie dat $h_L = h_w$ de

transpiratiereductie niet gedefinieerd is en kan liggen tussen 0 en 1. Tijdens het berekenen van de oplosmethode zal volgen wat de feitelijke reductie is.

In het dW-model wordt uitgegaan van een S-vormige transpiratie-reductiefunctie, die gegeven is als (zie ook Campbell, 1985;1991; Kremer et al., 2008):

$$T_r(h_L) = \frac{T_{\text{act}}}{T_{\text{pot}}} = \left(1 + \left(\frac{h_L}{h_{L,1/2}} \right)^p \right)^{-1} \quad (26)$$

Hierin is p een vormparameter (-) en $h_{L,1/2}$ is de bladpotentiaal waarbij $T_r = 0.5$ (cm). Voor grote waarden van p verloopt deze relatie vrij steil. Dat betekent dat de eerdergenoemde stapfunctie (Eq. (25)) vrij goed benaderd kan worden door Eq. (26), waarbij $h_{L,1/2} = h_w$ en p zeer groot. Dit is geïllustreerd in Figuur 3 voor $h_w = h_{L,1/2} = -16000$ cm en $p = 250$. Het voordeel van een S-vormige reductiefunctie is dat deze voor alle waarden van h_L gedefinieerd is. Bovendien kan deze de stap-functie vrij goed benaderen door p groot te kiezen. Het verdient aanbeveling om altijd uit te gaan van de S-vormige reductiefunctie.



Figuur 3 Voorbeeld van stap-reductiefunctie (Eq. (25)) en een S-vormige reductiefunctie (Eq. (26)).

2.6 Parameters

In beide microscopische wateropnameconcepten wordt een aantal gewasparameters geïntroduceerd waarvoor realistische invoergegevens nodig zijn. Het betreffen over het algemeen parameters die in principe te meten zijn en waarvoor in de literatuur waarden zijn gerapporteerd. Het valt buiten de opzet van deze studie om in detail de plantenfysiologische literatuur hier op te scannen. In Tabel 1 zijn voor de betreffende parameters (ranges van) waarden gegeven, zoals die in het verleden zijn toegepast voor beide microscopische wateropnamemodellen.

Tabel 1 Toelichting en waarden voor de parameters uit de twee microscopische wateropnamemodellen.

Parameter	dW	dJvL	Toelichting
R_0	+	+	<p>Straal van de wortel (cm). Verwijzend naar de literatuur geven de Jong van Lier et al. (2013) aan dat R_0 vaak in range 0.005 en 0.05 cm ligt; zij gebruikten $R_0 = 0.05$ cm. De Willigen et al. (2012) gebruikten $R_0 = 0.075$ cm. De Willigen et al. (2017) gebruikten $R_0 = 0.01$ cm.</p> <p>De Willigen and Van Noordwijk (1987) geven R_0 waarden uit de literatuur verzameld: granen: 0.009-0.0165 cm, mais 0.0095-0.0105 cm, gras: 0.005- 0.0145 cm, aardappel: 0.014 cm. Over het algemeen zijn deze waarden kleiner dan hiervoor genoemd.</p> <p>Spek (1988) publiceerde gemeten R_0 voor hoofdwortels in de range 0.034-0.054 cm en voor zijwortels in de range 0.0084-0.0124 cm.</p> <p>De Willigen et al. (2005) geven aan dat R_0 slechts van kleine invloed is op radiale weerstand voor waterstroming in de wortel alsook voor de benodigde drukhoogtegradiënten in de bodemcilinder rondom de wortel.</p>
R_1	+	+	<p>Straal van bodemcilinder rondom een wortel (cm). Berekend uit L_{rv} (Eq. (6)).</p> <p>Op basis van literatuurgegevens geven De Willigen and Van Noordwijk (1987) gemiddelde L_{rv} waarden voor de laag 0-30 cm voor enkele gewassen: bonen: 0.5-2 cm cm⁻³, aardappel: 1-2 cm cm⁻³, suikerbiet: 1-2 cm cm⁻³, mais: 3 cm cm⁻³, granen: 4-5 cm cm⁻³, grasland: 3-20 cm cm⁻³. Zie ook paragraaf 2.7.</p>
R_x	-	+	<p>Straal van het xyleemvat in de wortel (cm). Volgens De Jong van Lier et al. (2013) is de verhouding R_x/R_0 meestal in de range 0.1 – 0.9, gebaseerd op morfologische waarnemingen. Zij gebruikten $R_x = 0.02$ cm en $R_0 = 0.05$ cm.</p>
a	-	+	<p>Op basis van numerieke analyses stellen De Jong van Lier et al. (2006; 2008; 2013) voor dat a als constant beschouwd kan worden met waarde $a = 0.53$.</p>
K_r	+	+	<p>Hydraulische doorlatendheid van de wortel (cm d⁻¹).</p> <p>8.143 10⁻⁵ cm d⁻¹ (De Willigen et al., 2012)</p> <p>3.6 10⁻⁶ cm d⁻¹ (De Willigen et al., 2017)</p> <p>range: 4 10⁻⁸ tot 3 10⁻⁵ cm d⁻¹ (De Jong van Lier et al., 2013); zij gebruikten: 3.5 10⁻⁶ cm d⁻¹</p> <p>range: 0.26 10⁻⁶ tot 23.3 10⁻⁶ cm d⁻¹ (De Willigen and Van Noordwijk, 1987)</p> <p>range (mais, graan): 0.26 10⁻⁶ tot 5.9 10⁻⁶ cm d⁻¹ (De Willigen and Van Noordwijk, 1987).</p> <p>In de plantenfysiologie is het mogelijk om de geleidbaarheid L_{root} van de wortelwand te meten, en dit kan dan worden omgerekend naar K_r voor bekende waarden van R_0 en R_x.</p>
L_1	-	+	<p>Geleidbaarheid in het pad wortel-stam-blad (d⁻¹). Gebaseerd op data van Zhuang et al. (2001) geven De Jong van Lier et al. (2008) aan dat $L_1 = 0.7$ 10⁻⁴ d⁻¹ bij $T_p = 2$ mm d⁻¹ en dat $L_1 = 2.1$ 10⁻⁴ d⁻¹ bij $T_p = 10$ mm d⁻¹. Zij gebruikten als gemiddelde waarde $L_1 = 1$ 10⁻⁴ d⁻¹. (NB $L_1 = a_0 + a_1 T_p$, met a_0 en a_1 hieronder gegeven. de waarde van $L_1 = 1$ 10⁻⁴ d⁻¹ correspondeert met een T_p van ca. 4 mm d⁻¹.)</p>
a_0	+	-	<p>$a_0 = 3.1844$ 10⁻⁵ d⁻¹; gebaseerd op data van Zhuang et al. (2001); zie De Willigen et al. (2011; 2012); zie ook bij L_1.</p>
a_1	+	-	<p>$a_1 = 1.7768$ 10⁻⁴ cm⁻¹; gebaseerd op data van Zhuang et al. (2001); zie De Willigen et al. (2011; 2012); zie ook bij L_1.</p>
h_w	-	+	<p>Bladpotentiaal waarbij transpiratiereductie optreedt volgens stapfunctie. Te vergelijken met $h_{L,1/2}$. De Jong van Lier et al. (2013) gebruikten $h_w = -15000$ of -20000 cm.</p>
$h_{L,1/2}$	+	(+)	<p>Bladpotentiaal waarbij de transpiratiereductie 0.5 is (cm). Gebaseerd op Kremer et al. (2008) geven De Willigen et al. (2012) de volgende waarde: $h_{L,1/2} = -16600$ cm.</p> <p>De Jong van Lier et al. (2013) geven aan dat in de literatuur limiterende bladpotentialen waarbij transpiratie volledig is gereduceerd voor mais ongeveer -17000 cm is. Dat is dicht bij de vuistregel dat verwelking optreedt bij een waterpotentiaal van ca. -16000 cm.</p> <p>Op basis van de literatuur geven De Jong van Lier et al. (2013) aanvullende waarden: -7000 cm (purple bush bean), -20000 cm (sorghum), -13000 cm (tabak), -8000 tot -12000 cm (rijst).</p>
p	+	(+)	<p>Gebaseerd op Kremer et al. (2008) geven De Willigen et al. (2012): $p = 7$.</p> <p>Campbell (1991) geeft aan dat p in de range 5-10 ligt.</p> <p>Een stapfunctie kan benaderd worden door p groot te kiezen, bijv. $p = 250$ (zie Figuur 3).</p>

In Waterwijzer Landbouw (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018; zie ook waterwijzerlandbouw.wur.nl) wordt rekening gehouden met zuurstofstress volgens het concept van Bartholomeus et al. (2008). In dit concept komen ook enkele worteleigenschappen voor. Het verdient dus aanbeveling om, wanneer gelijktijdig naar droogte- en zuurstofstress wordt gekeken, de overeenkomstig parameters op elkaar af te stemmen. Het betreft hier de wortelstraal (R_0) en de specifieke wortelmassa (zie later in paragraaf 2.7). Stofberg en

Bartholomeus (2018) geven een overzicht vanuit de literatuur van deze gegevens. Tabel 2 geeft de gemiddelde wortelstraal voor enkele gewassen. De range van wortelstraal voor al deze gewassen is 0.009-0.032 cm en komt overeen met de range zoals gegeven in Tabel 1 (0.005-0.075 cm).

Tabel 2 Gemiddelde wortelstraal verzameld uit de literatuur door Stofberg en Bartholomeus (2018) voor enkele akkerbouwgewassen en vollegroondsgroenten.

Gewas	Wortelstraal (cm)
Akkerbouwgewassen	
(Winter)tarwe	0.012
Aardappelen	0.013
Suikerbieten	0.009
Zomergerst	0.017
Zaaiuien	0.026
Vollegroondsgroenten	
Bloemkool	0.021
Prei	0.032
Aardbeien	0.025
Spruitkool	0.021
Sla	0.018
Peen	0.014
(Sperzie)boon	0.015

2.6.1 Convergentiecriteria

Bij de iteratieve oplosmethode worden nulpunten gezocht. Om niet onnodig lang te itereren, wordt convergentie bereikt indien het proces een functiewaarde kleiner dan een bepaald convergentie criterium heeft bereikt. Voor de binnenste iteratieloop moet gelden $|\delta x| < \text{myTolX}$ (default: 10^{-5}). Voor de buitenste iteratieloop moet gelden $|F(h_L)| < \text{Tol}_2$ (default: 10^{-6}). Bij het zoeken naar de twee grenswaarden waarbinnen h_L moet liggen, worden een vermenigvuldigings- en delingsfactor gebruikt: `factor` (default: 1.25). Voor beide iteraties geldt dat er maximaal `Ntrial` iteraties per keer mogen worden gedaan (default: 500).

Er worden waarschuwingen naar de logfile geschreven indien $|F(h_L)| > \text{TolConv}$ (default: 10^{-4} ; `TolConv` moet groter of gelijk zijn aan `Tol_2`) of indien range voor h_L niet binnen `Ntrial` pogingen kan worden gevonden.

2.6.2 Overigen

In paragraaf 2.2.6 is aangegeven dat het mogelijk is om wateropname door wortels die zich in een verzadigd deel van de wortelzone bevinden te laten plaatsvinden proportioneel aan de relatieve wortelverdeling (`swDoSatRel = .true.`; default) dan wel dat deze wortels niet meedoen aan wateropname (`swDoSatRel = .false.`).

De keuze voor type reductiefunctie wordt aangegeven met `swTypeTred`: `swTypeTred = 1` verwijst naar de S-vorm van Eq. (26), en `swTypeTred = 2` verwijst naar stap-vorm van Eq. (25) (default: 1).

Met de switch `swHydrLift` kan het toestaan van hydraulische herverdeling worden aan- (1) of uitgezet (0) (default: 0).

2.6.3 SWAP-invoer

In Tabel 3 is aangegeven hoe de parameters en switches – behorende bij beide microscopische wateropnameconcepten – in SWAP en de invoer voor SWAP zijn genoemd. Merk op dat de variabele `ROOTRADIUS` ook voorkomt in de beschrijving van de zuurstofstress routine (Bartholomeus et al., 2008). Het is aan de gebruiker om ervoor te zorgen dat beide invoervariabelen dezelfde waarde hebben indien microscopische wateropname en zuurstofstress gezamenlijk worden gesimuleerd.

Tabel 3 Naamgeving SWAP invoer variabelen, inclusief toegestane range, voor de parameters van beide microscopische wateropnameconcepten.

Parameter	dW	dJvL	Toelichting	Eenheid	SWAP naam	Range
R_0	+	+	Wortelstraal	cm	ROOTRADIUS	[10 ⁻⁴ ...1]
R_x	-	+	Straal xyleem	cm	ROOTXYLEM	[10 ⁻⁴ ...1]
a	-	+	Straal waar $h = h_{\text{bulk}}$	-	ROOTCOEFA	[0...1]
K_r	+	+	Doorlatendheid wortelwand	cm d ⁻¹	KROOT	[10 ⁻¹⁰ ...0.1]
L_1	-	+	Conductance plant	d ⁻¹	LSTEM	[10 ⁻¹⁰ ...10]
a_0	+	-	Intercept van lineaire relatie Lstem(Tpot)	d ⁻¹	LSTEM_A0	[10 ⁻⁶ ...0.01]
a_1	+	-	Helling van lineaire relatie Lstem(Tpot)	cm ⁻¹	LSTEM_A1	[10 ⁻⁶ ...0.01]
h_w	-	+	Bladpotentiaal waarbij 50% transpiratiereductie optreedt volgens stap-functie	cm	HLHALF	[-50000...-1000]
$h_{L,1/2}$	+	(+)	Bladpotentiaal waarbij 50% transpiratiereductie optreedt volgens Campbell-functie	cm	HLHALF	[-50000...-1000]
p	+	(+)	Vormparameter Campbell-transpiratie-reductiefunctie	-	PCAMP	[1...500]
swTypeTred	+	+	Type functie voor transpiratiereductie: 1 = Campbell S-vorm (default) 2 = stapfunctie	-	swTypeTred	[1,2]
swHydrLift	+	+	Toestaan van hydraulische herverdeling: 0 = niet (default), 1 = wel	-	swHydrLift	[0,1]
swDoSatRel	+	+	Wateropname in verzadigd deel proportioneel met relatieve wortelverdeling: 0 = niet, 1 = wel (default)	-	swDoSatRel	[0,1]

2.7 Berekenen wortellengtedichtheid op basis van wortelgewicht

De microscopische wateropnamemodellen maken gebruik van de wortellengtedichtheid L_{rv} (cm cm⁻³). Dat is geen vast gegeven voor een gewas en zal variëren in tijd en diepte. Het ligt voor de hand om deze grootte af te leiden uit informatie beschikbaar in gewasgroeimodellen. Hierin zal meestal het totale wortelgewicht beschikbaar zijn of zijn in te schatten. De Willigen and Van Noordwijk (1987) geven een overzicht van literatuurgegevens over de lengte-massaverhouding (L_M) van wortels voor diverse gewassen, daarnaast geven zij ook informatie over de lengte per eenheid van grondoppervlak (L_A). Hieruit kan de hoeveelheid wortelmassa per eenheid oppervlak berekend worden. Deze gegevens zijn vermeld in Tabel 4.

Tabel 4 Gemiddelde waarden voor wortellengte-wortelmassa verhouding L_M , wortellengte per eenheid bodemoppervlak L_A en wortelmassa per eenheid bodemoppervlak M_A zoals door De Willigen and Van Noordwijk (1987) uit de literatuur verzameld. Tussen haakjes staan de ranges (minimum, maximum) en het aantal (n) gerapporteerde waarden.

Gewas	L_M (m g ⁻¹)	L_A (cm cm ⁻²)	M_A (kg ha ⁻¹)
Granen	173 (70-268; n = 9)	221 (60-380; n = 7)	1278
Mais	101 (8-280; n = 13)	94 (75-112; n = 2)	923
Gras	384 (161-273; n = 14)	627 (117-1272; n = 8)	1635
Suikerbiet	380 (122-741; n = 5)	n.b.	n.b.
Aardappel	234 (n = 1)	40 (n = 1)	171

n.b.: niet beschikbaar.

Er zijn verschillende methodes om de hoeveelheid wortels (massa, lengte) in de bodem te meten (Oliveira et al., 2000; Van Noordwijk et al., 2000; Smit et al., 2000). Deze variëren van het nemen van steekmonsters, het visueel beoordelen in kuilen tot het nemen van intacte grote bodemmonsters (spijkerbord) waaruit wortels worden vrijgespoeld. Geen van alle methoden kan garanderen de absolute hoeveelheid wortels te duiden. Daarnaast speelt ruimtelijke variabiliteit een grote rol, zijn de

omstandigheden tussen de verschillende bodems, weerjaren en gewasvariëteiten vaak verschillend en ook het tijdstip in het groeiseizoen van bemonsteren kan een rol spelen. Dat allemaal kan verklaren waarom er grote spreiding is in de gerapporteerde gegevens over L_M en L_A .

Omdat niet voor alle gewassen gegevens beschikbaar zijn en de gegevens uit Tabel 4 een grote spreiding vertonen, kan als alternatief L_M geschat worden op basis van enkele worteleigenschappen volgens:

$$L_M = \frac{1}{\pi R_0^2 D_r \rho_r} \quad (27)$$

Hierin is L_M de totale wortellengte per eenheid wortelmassa (cm g^{-1}), R_0 is de wortelstraal (cm), D_r is het drogestofgehalte van wortels (g g^{-1}) en ρ_r is de natte dichtheid van wortels (g cm^{-3}). Bijvoorbeeld: voor $R_0 = 0.02$ cm, $D_r = 0.08$ g g^{-1} en $\rho_r = 1.0$ g cm^{-3} volgt $L_M = 100$ m g^{-1} ; indien $R_0 = 0.01$ cm dan is $L_M = 398$ m g^{-1} . Deze waarden komen dan overeen met de waarden in Tabel 4.

Vanaf versie 4.2.9 wordt in SWAP het wortelgewicht per rekenlaag in de wortelzone bijgehouden (M_A ; kg ha^{-1}). Dat betekent dat L_{rv} (cm cm^{-3}) per rekenlaag j eenvoudig berekend kan worden uit:

$$L_{rv,j} = \frac{L_M M_{A,j}}{\Delta z_j} 10^{-5} \quad (28)$$

Hierin is 10^{-5} een eenheidsconversiefactor (10^3 $\text{g kg}^{-1} \times 10^{-8}$ ha cm^{-2}) en L_M is in cm g^{-1} .

Bijvoorbeeld: bij SWAP-WOFOST-berekeningen met grasland wordt gestart met een initiële wortelmassa van 300 kg ha^{-1} en een worteldiepte van 20 cm. Gemiddeld is dat 15 kg ha^{-1} per rekenlaag van 1 cm dikte. Met $L_M = 38400$ cm g^{-1} (zie Tabel 4) komt dat overeen met $L_{rv} = 5.8$ cm cm^{-3} . Midden in het groeiseizoen kan de totale wortelmassa oplopen tot (iets boven de) 2000 kg ha^{-1} bij een worteldiepte van 40 cm. In dat geval is de gemiddelde wortellengtedichtheid gelijk aan $L_{rv} = 19.2$ cm cm^{-3} . Deze waarden vallen in de range van gemiddelden die De Willigen and Van Noordwijk (1987) gaven voor de laag 0-30 bij grasland (hun range: $3-20$ cm cm^{-3}). Voor grasland publiceerde Spek (1988) gemeten (totale) L_{rv} waarden in de range $49-79$ cm cm^{-3} (laag 0-7,5 cm) tot $4.1-15.9$ (laag 25-35 cm).

Voor de gegevens uit Tabel 4 volgt dat de gemiddelde L_{rv} in een wortelzone van 0-40 cm gelijk is aan 5.5 (granen), 2.3 (mais), 15.7 (gras) en 1.0 (aardappel) cm cm^{-3} . In Dos Santos et al. (2017) worden exponentiële wortelverdelingen gebruikt met gemiddelde L_{rv} -waarden van 0.01 , 0.1 en 1 cm cm^{-3} , die als laag, midden en hoog worden aangeduid. Vergeleken met de gemiddelde waarden van $1.0-15.7$ cm cm^{-3} zoals hierboven vermeld, zijn de waarden gebruikt in Dos Santos et al. (2017) aan de lage kant.

In Waterwijzer Landbouw (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018; zie ook waterwijzerlandbouw.wur.nl) wordt rekening gehouden met zuurstofstress volgens het concept van Bartholomeus et al. (2008). In dit concept komen ook enkele worteleigenschappen voor. Het verdient dus aanbeveling om, wanneer gelijktijdig naar droogte- en zuurstofstress wordt gekeken, de overeenkomstige parameters op elkaar af te stemmen. Het betreft hier de wortelstraal (R_0) en de specifieke wortellengte. Stoffberg en Bartholomeus (2018) geven een overzicht vanuit de literatuur van deze gegevens. Tabel 5 geeft de gemiddelde specifiek wortellengte voor enkele gewassen. Voor aardappelen en suikerbieten zijn deze waarden kleiner dan de waarden gegeven door De Willigen and Van Noordwijk (Tabel 4); de waarden voor (winter)tarwe en zomergerst vallen in de range gegeven door De Willigen and Van Noordwijk (Tabel 4).

Tabel 5 Gemiddelde specifieke wortellengte verzameld uit de literatuur door Stofberg en Bartholomeus (2018) voor enkele akkerbouwgewassen en vollegrondsgroenten.

Gewas	SRL (m g ⁻¹)
Akkerbouwgewassen	
(Winter)tarwe	156
Aardappelen	175
Suikerbieten	147
Zomergerst	145
Zaaiuien	84
Vollegrondsgroenten	
Bloemkool	70
Sla	258
Peen	300
(Sperzie)boon	175

2.8 Hydraulische herverdeling

Uit plantenfysiologisch onderzoek is gebleken dat plantenwortels niet alleen water opnemen, maar ook water kunnen afstaan aan de bodem. Dat gebeurt onder specifieke omstandigheden waarbij de waterpotentiaal in de bodem negatiever is dan de waterpotentiaal in de wortel. Dit proces staat bekend als hydraulische herverdeling (Eng: *hydraulic redistribution*, *hydraulic lift*)² (De Willigen et al., 2005; Baker and van Bavel, 1986; 1988; Tzohar et al., 2021). Jackson et al. (2000) vermelden dat er – destijds – voor minstens vijftig gewassoorten aangetoond is dat deze processen kunnen optreden, onder allerlei klimatologische omstandigheden. Maar er zijn ook studies die concluderen dat de herverdeling moeilijk meetbaar is, zoals in de lysimeterstudie waarin kunstmatig natte en droge zones werden opgelegd waaruit wel bleek dat compensatie van wateropname plaatsvindt, maar waarbij niet voldoende bewijs voor herverdeling kon worden aangetoond (Thomas et al., 2020).

Beide microscopische modellen (dW, dJvL) hebben dit aspect intrinsiek in hun formuleringen zitten. Dat komt omdat in beide modellen de verdeling van waterpotentialen tussen bodem en plant leidt tot waterstroming waarbij het systeem neigt naar een nieuw evenwicht, waarbij de verschillen in waterpotentiaal in plant en in bodem worden genivelleerd. Daarbij kan het voorkomen dat water uit een relatief nat gedeelte van de bodem wordt opgenomen en weer wordt afgestaan in een droger deel van de bodem.

Er zijn ook fundamentele en praktische aspecten te benoemen die leiden tot de keuze om hydraulische herverdeling niet toe te passen.

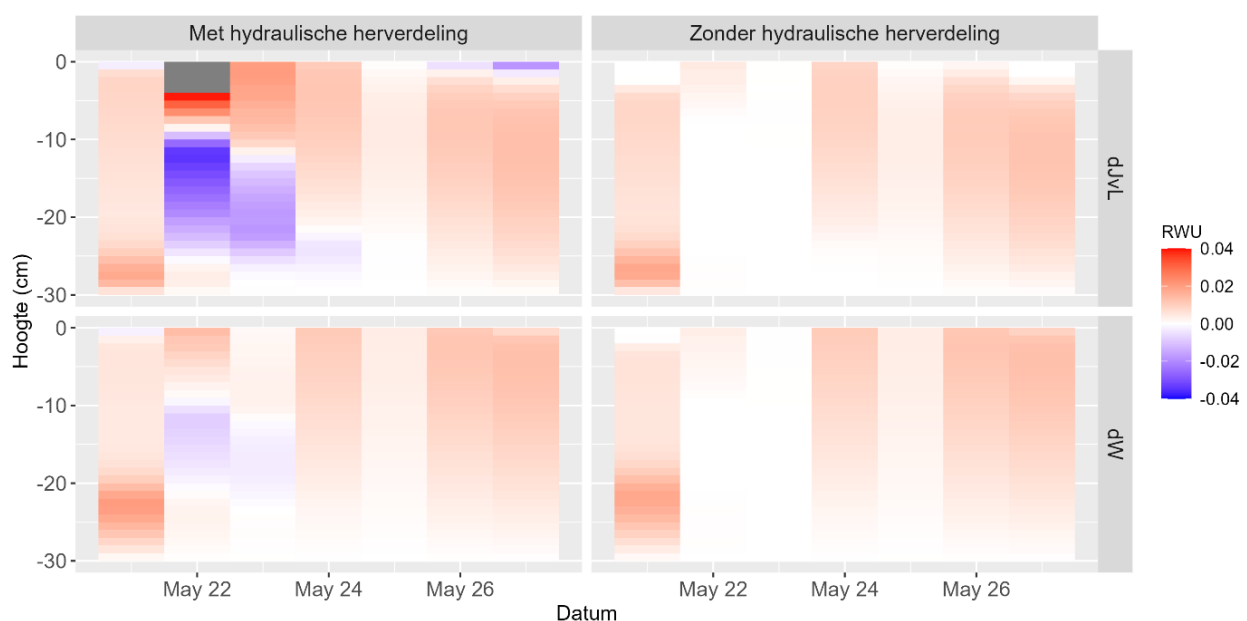
- Hoewel er experimenteel bewijs is dat dit proces optreedt, wordt er door sommigen aan getwijfeld of dit voor alle gewassen geldt. Mogelijk dat de doorlatendheid voor het uittredende proces anders is dan voor het opnameproces.
- In de huidige opzet in SWAP moet naast transpiratiereductie via wateropname ook reductie beschouwd worden via zuurstofstress, zoutstress en vorst. Wanneer hydraulische herverdeling leidt tot (lokale) negatieve wateropname (hydraulische herverdeling), kan de verdeling van de reductie over deze vier processen niet meer berekend worden.

Vanwege deze aspecten is besloten om in de oplosmethode een optie toe te voegen die dit proces verhindert. In dat geval wordt voor de rekenlagen waar wateruitscheiding plaatsvindt de opname (en uitscheiding) op nul gesteld en wordt vervolgens nagegaan of de overige rekenlagen in de gevraagde wateropname kunnen voorzien. Het advies is om simulaties uit te voeren waarbij hydraulische herverdeling niet wordt toegestaan.

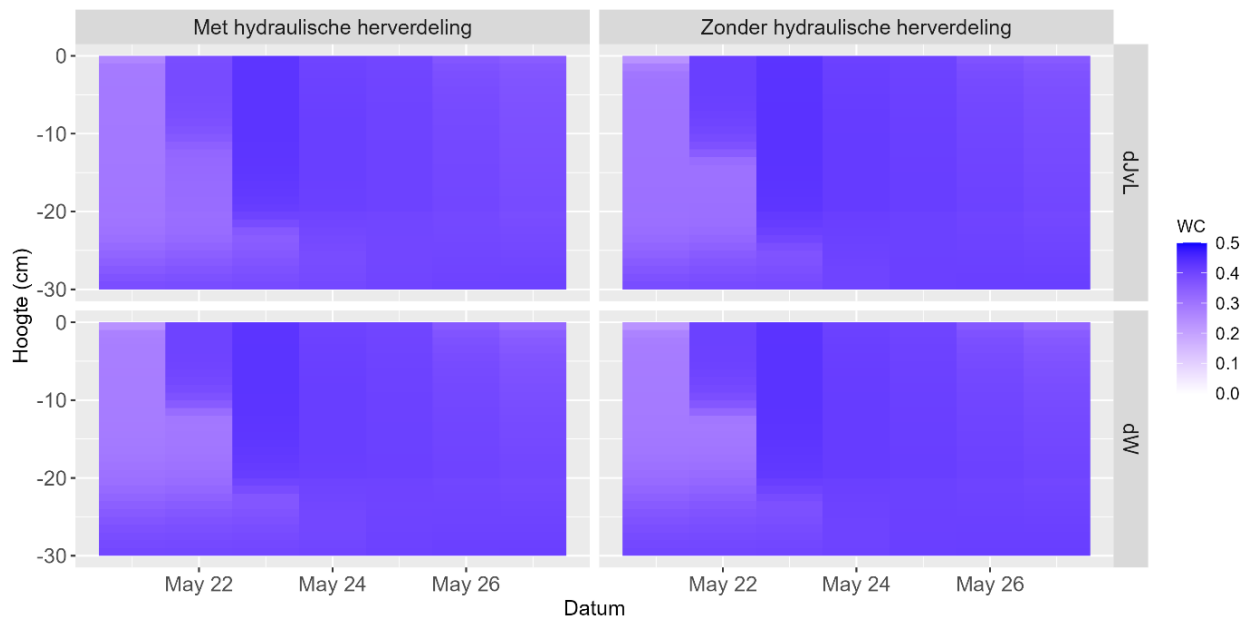
² In sommige definities wordt de term *hydraulic lift* toegekend aan het proces waarbij op diepere lagen water wordt opgenomen en boven in het bodemprofiel wordt afgegeven; de term *hydraulic redistribution* wordt dan toegekend aan het omgekeerde pad. In dit rapport prefereren we de term hydraulische herverdeling (*hydraulic redistribution*) voor beide processen, ofwel herverdeling in algemene zin.

Voorbeeld

Figuur 4 illustreert het verschil in wateropnameberekeningen met beide microscopische concepten met en zonder hydraulische herverdeling: voor zeven achtereenvolgende dagen is de wateropname per rekenlaagje (elk 1 cm dik) getoond. Het betreft een situatie waarbij de grond op 21-05-2016 relatief droog is, er op 22 en 23 mei neerslag valt en de potentiële transpiratie gering is. Volgens beide microscopische concepten vindt er op die dagen hydraulische herverdeling plaats: op dieptes tussen -10 en -25 cm vindt uitscheiding van water plaats, hetgeen wordt gecompenseerd door een relatief grote wateropname in de bovenste 10 cm. Dit effect is extremer aanwezig in het concept van dJvL dan in het concept van dW. Wanneer hydraulische herverdeling niet wordt toegestaan, zien we op beide dagen een geringe wateropname, immers de watervraag is gering. Voor elke van de vier situaties geldt dat de gerealiseerde wateropname per dag aan elkaar gelijk is. Ook de verdeling van het watergehalte verschilt nauwelijks tussen de vier situaties (Figuur 5). Blijkbaar vindt er in de bodem ook hydraulische herverdeling plaats. Het wel of niet toestaan van hydraulische herverdeling heeft weliswaar effect op de wateropname per rekenlaagje, maar de onderlinge verschillen vallen weg wanneer wordt gekeken naar de totale dagelijkse opname en naar de verdeling van het watergehalte in de wortelzone. In dat geval kan dus inderdaad, zoals hierboven al geadviseerd, gerekend worden met de optie zonder hydraulische herverdeling in wateropname.



Figuur 4 Tijd-diepte-relaties van berekende microscopische wateropname (RWU, cm d^{-1}) voor de concepten dJvL en dW voor zowel simulaties waarbij hydraulische herverdeling werd toegestaan als waarbij deze niet werd toegestaan: natte kleigrond (BOFEK2020 eenheid 4001) met gras.



Figuur 5 Tijd-diepte-relaties van het volumetrisch watergehalte ($WC, \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) voor de simulaties met beide microscopische wateropnameconcepten $dJvL$ en dW voor zowel simulaties waarbij hydraulische herverdeling werd toegestaan als waarbij deze niet werd toegestaan: natte kleigrond (BOFEK2020 eenheid 4001) met gras.

3 Testcases

Onderstaande testcases zijn alle doorgerekend zonder hydraulische herverdeling (in geval van microscopische wateropname) en zonder Jarvis-compensatie (in geval van macroscopische wateropname).

3.1 Technische testcases

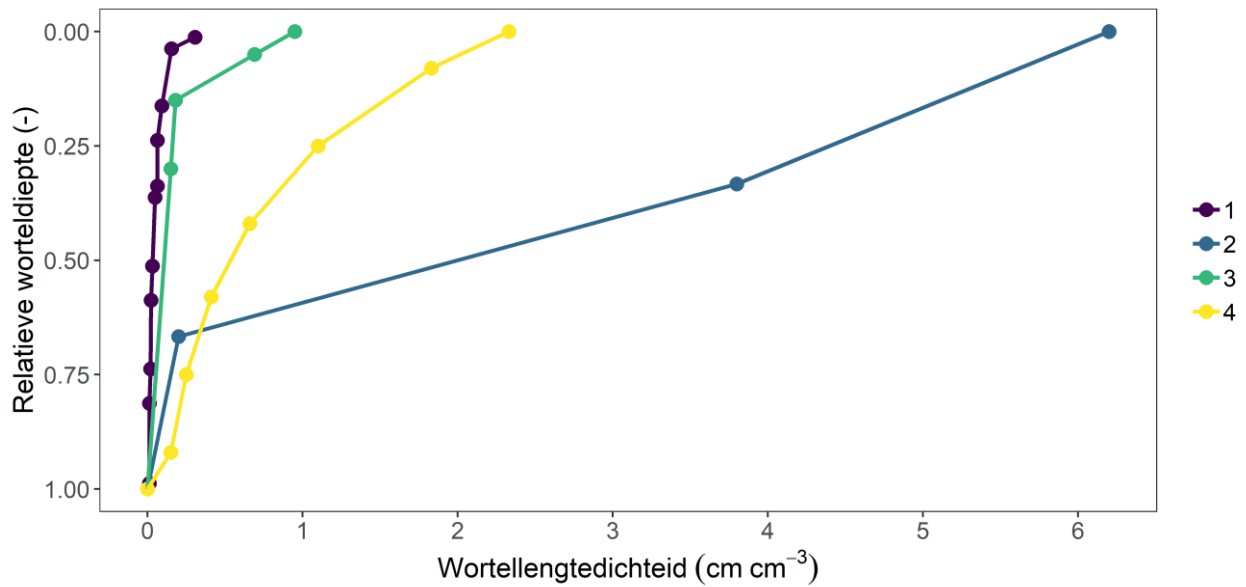
Tijdens de ontwikkeling van het microscopische concept dJvL zijn vier testcases gebruikt om het concept technisch te toetsen. Hier worden deze vier testcases gebruikt om te laten zien dat onder verschillende omstandigheden de macroscopische en microscopische wateropname modellen functioneren, en om na te gaan of en waar ze onderling verschillen. In deze testcases zijn de parameterwaarden uit Tabel 6 gebruikt.

Tabel 6 Waarden voor de parameters van de drie toegepaste concepten.

Fe	Waarde [#]	dW	Waarde	dJvL	Waarde
$h_{3,h}$ (cm)	-325	R_0 (cm)	0.05	R_0 (cm)	0.05
$h_{3,l}$ (cm)	-600			R_x (cm)	0.02
h_4 (cm)	-8000			a (-)	0.53
		K_r (cm d ⁻¹)	$2.3 \cdot 10^{-5}$	K_r (cm d ⁻¹)	$3.5 \cdot 10^{-5}$
		a_0 (d ⁻¹)	$3.1844 \cdot 10^{-5}$	L_1 (d ⁻¹)	$1.03 \cdot 10^{-4}$
		a_1 (cm ⁻¹)	$1.7768 \cdot 10^{-4}$		
		$h_{L,1.2}$ (cm)	-20000	$h_{L,1.2}$ (cm)	-20000
		p (-)	7	p (-)	7

[#]: hoewel verschillende gewassen zijn gebruikt in de vier testcases zijn de Feddes-parameters hier niet op aangepast.

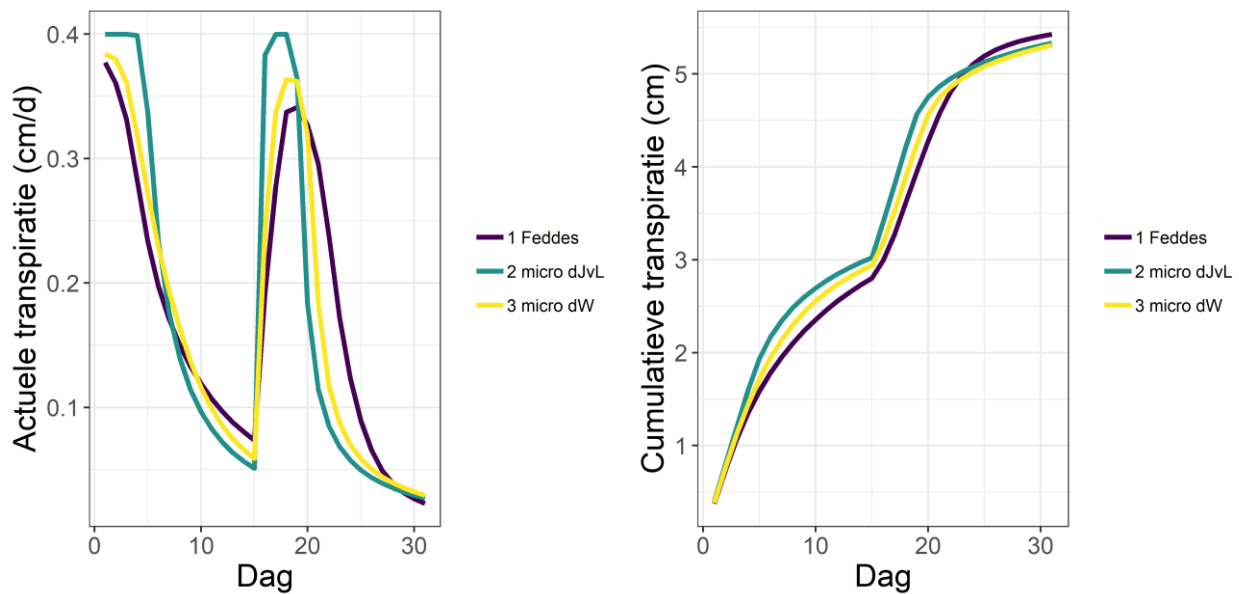
Naast deze parameters is het ook nodig om de wortelverdeling op te geven. Voor het Fe-concept geldt dat hiervoor alleen de relatieve wortellengtedichtheidsverdeling nodig is, maar voor beide microscopische concepten geldt dat de absolute waarden voor $L_{rv}(z)$ nodig zijn. Figuur 6 toont de L_{rv} als functie van de relatieve worteldiepte zoals gebruikt in de vier technische testcases. De gemiddelde L_{rv} -waarden voor de cases 1-4 zijn bij benadering 0.05, 2.0, 0.2 en 0.7 cm cm⁻³. In vergelijking met de discussie in paragraaf 2.7 zijn dit vrij lage waarden: case 1 en 2 betreffen respectievelijk mais en gras en de gemiddelde waarden zijn aan de lage kant. De verdelingen van case 3 (sojaboon) en 4 (boon) zijn eerder gebruikt in De Jong van Lier et al. (2013). De wortelzones waren respectievelijk 50, 40, 100 en 50 cm diep.



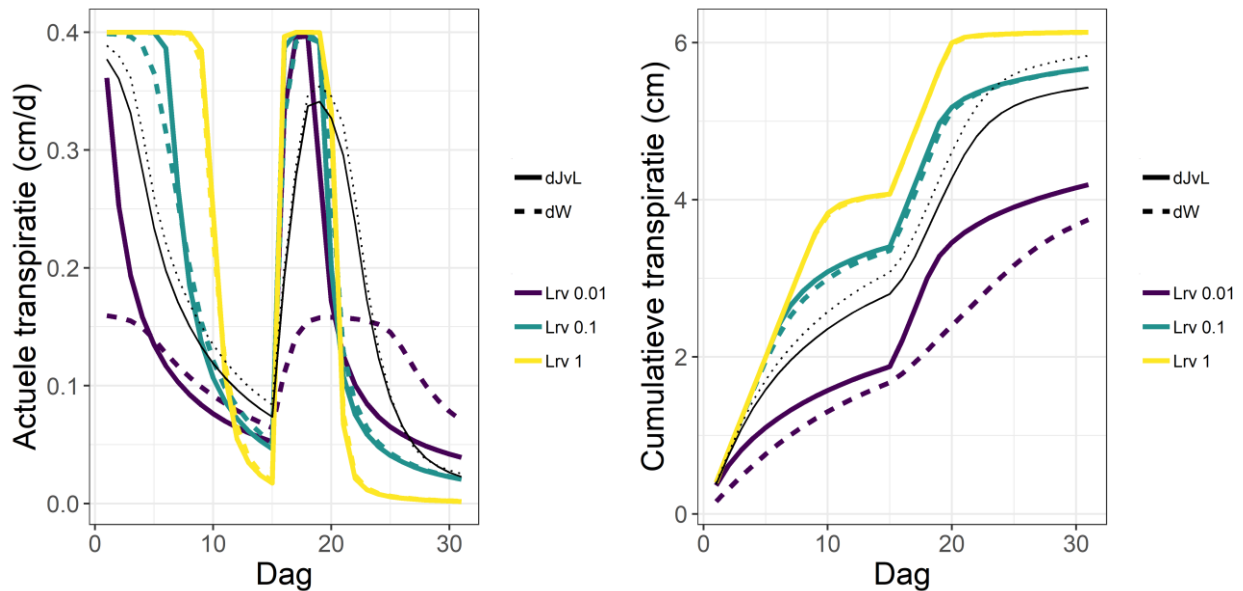
Figuur 6 Wortellengtedichtheid als functie van de relatieve worteldiepte zoals gebruikt in de vier technische testcases.

Test 1

Dit betreft een afgesloten bakje met grond waar $T_{pot} = \text{constant} = 4 \text{ mm d}^{-1}$, en op dag 16 wordt 20 mm water toegediend. De drie concepten laten kleine onderlinge verschillen in de dynamiek van de wateropname zien (Figuur 7). Uiteraard worden die veroorzaakt door de parameterinstellingen die zijn gebruikt. Zo zal het Fe-concept iets meer water kunnen opnemen indien de waarde voor h_4 van -8000 naar -16000 cm wordt verlaagd (zie hieronder). Zoals hierboven gemeld, is de gemiddelde absolute L_{rv} zoals gebruikt in beide microscopische concepten als vrij laag te karakteriseren. Aanvullende simulaties zijn gedaan voor gemiddelde L_{rv} waarden van 0.01, 0.1 en 1.0 cm cm⁻³ (Figuur 8). Hieruit valt op te maken dat de verschillen tussen beide microscopische concepten kleiner worden bij grotere waarden voor de gemiddelde L_{rv} . Maar ook dat er bij grotere waarden voor de gemiddelde L_{rv} meer water kan worden opgenomen en ook meer dan volgens het Fe-concept (Figuur 8).



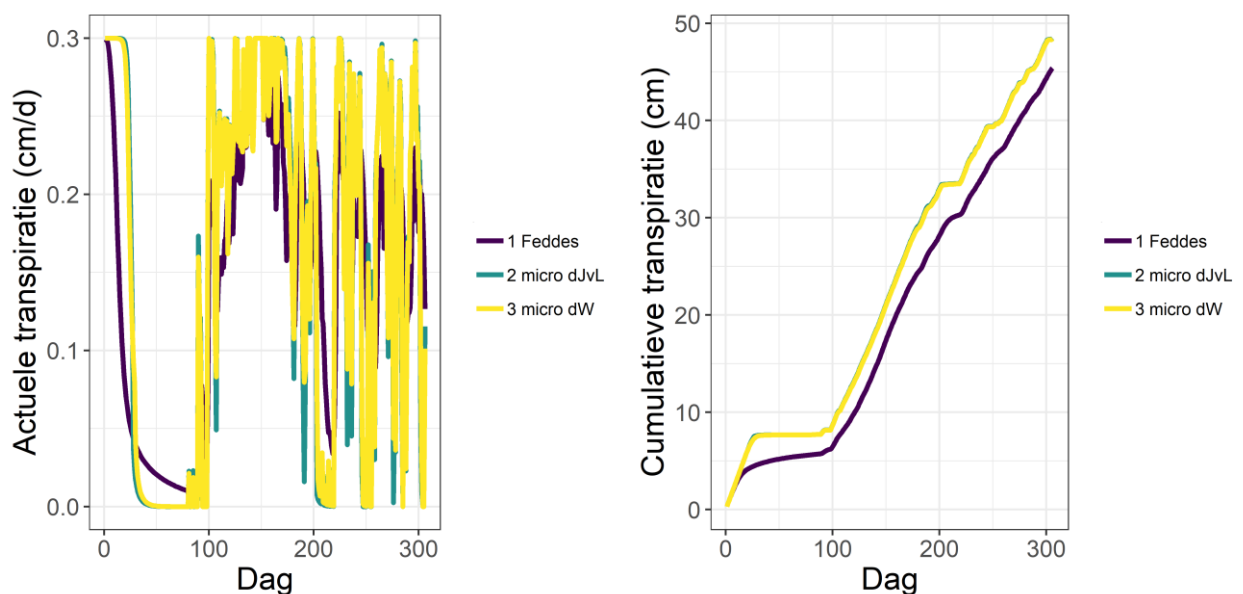
Figuur 7 Actuele en cumulatieve transpiratie als functie van de tijd voor drie wateropnameconcepten: macroscopisch Fe (zonder compensatie) en microscopische concepten dJvL en dW voor testcase 1.



Figuur 8 Actuele en cumulatieve transpiratie als functie van de tijd voor de twee microscopische wateropnameconcepten voor drie gemiddelden van de wortellengtedichtheitsverdelingen voor testcase 1. De gele gestippelde en gele doorgetrokken lijnen vallen vrijwel samen. De dunne zwarte doorgetrokken en gestippelde lijnen betreffen de resultaten met het Fe-concept voor $h_4 = -8000$ cm en -16000 cm.

Test 2

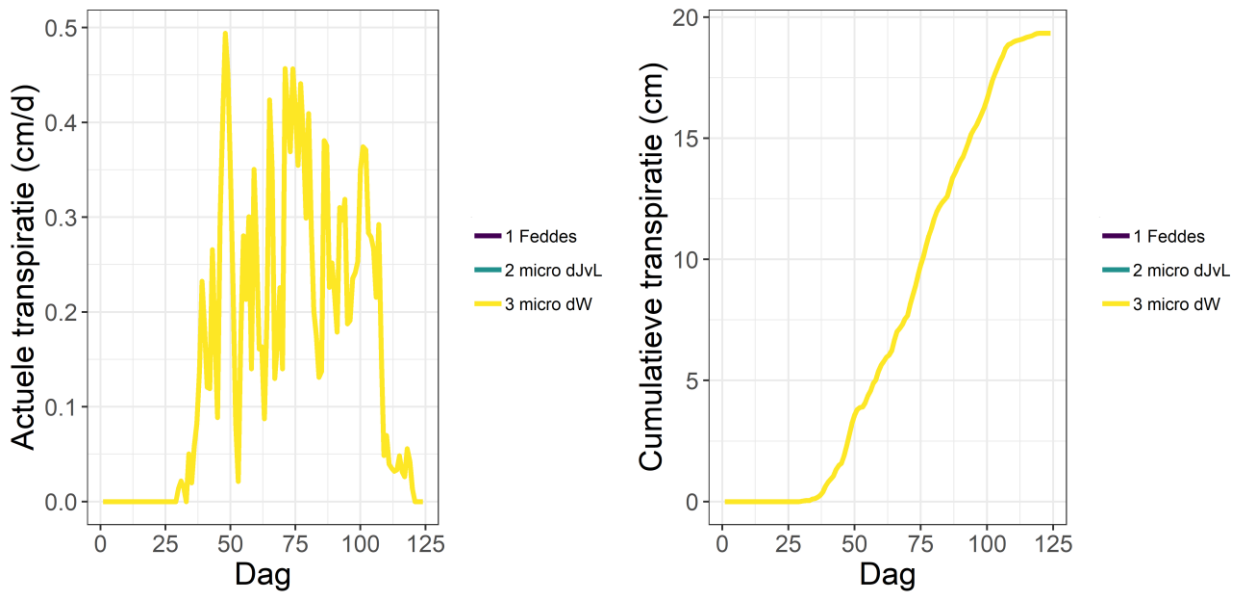
Deze test refereert aan grasgroei in de omgeving van Wageningen voor de periode maart-december 2006. Er is een constante verdampingsvraag opgelegd van $T_{pot} = 3$ mm d^{-1} , en de neerslag voor de periode tot half mei is op nul gesteld. Beide microscopische concepten laten een vergelijkbare totale wateropname zien, maar dat geldt niet voor alle afzonderlijke dagen (Figuur 9). Met beide microscopische concepten kan er meer water aan de bodem onttrokken worden dan volgens het macroscopisch concept van Fe (Figuur 9).



Figuur 9 Actuele en cumulatieve transpiratie als functie van de tijd voor drie wateropnameconcepten: macroscopisch Fe (zonder compensatie) en microscopische concepten dJvL en dW voor testcase 2.

Test 3

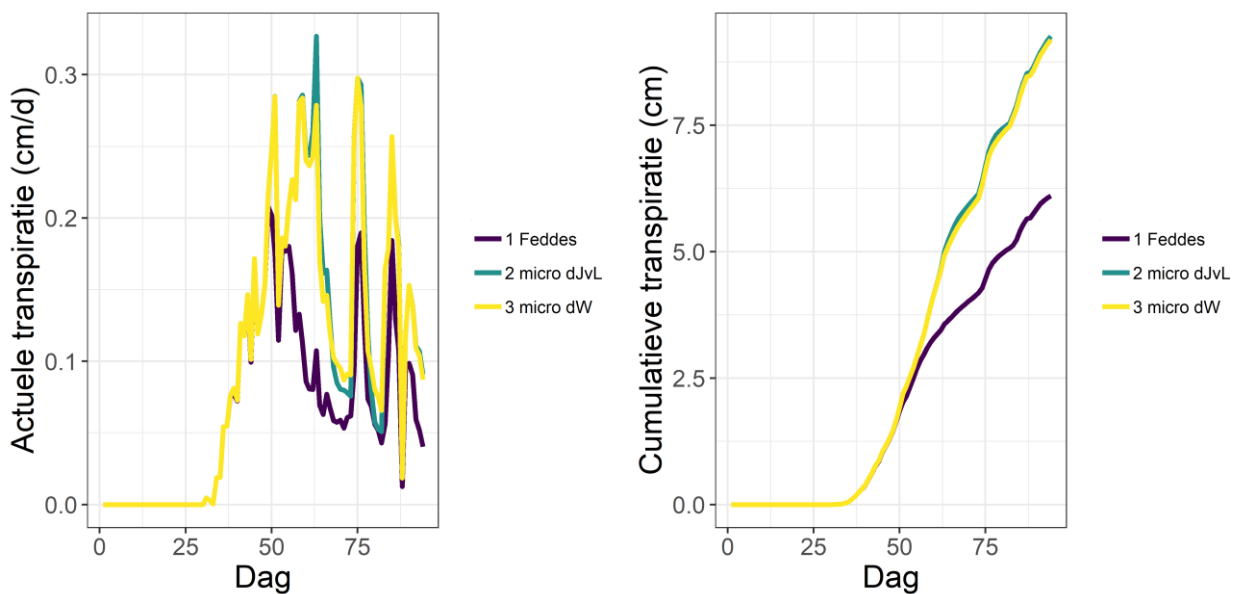
Voor Test 3 is sprake van variabele watervraag voor een periode van 125 d met dagen waarbij T_{pot} groter is dan in beide voorafgaande testcases. Toch is er voor deze situatie geen sprake van tekorten in waterbeschikbaarheid: volgens alle drie de concepten kan steeds aan de watervraag worden voldaan (Figuur 10).



Figuur 10 Actuele en cumulatieve transpiratie als functie van de tijd voor drie wateropnameconcepten: macroscopisch Fe (zonder compensatie) en microscopische concepten dJvL en dW voor testcase 3. Merk op dat de resultaten van de drie modellen zo goed als identiek zijn.

Test 4

Test 4 heeft betrekking op een periode van drie maanden tijdens het groeiseizoen van bonen in Brazilië met actueel weer. Het bodemprofiel is 150 cm diep, met vrije drainage aan de onderrand. Gedurende de eerste vijftig dagen van deze periode kan steeds aan de watervraag worden voldaan volgens de drie concepten. Daarna is duidelijk dat er volgens het macroscopische concept veel minder water kan worden opgenomen dan volgens beide microscopische concepten (Figuur 11).



Figuur 11 Actuele en cumulatieve transpiratie als functie van de tijd voor drie wateropnameconcepten: macroscopisch Fe (zonder compensatie) en microscopische concepten dJvL en dW voor testcase 4.

Deze testcases hebben niet tot doel gehad om in detail na te gaan waarom bepaalde wateropname patronen optreden of niet, en wat de bijkomende tijd-diepteverdelingen van watergehalte of drukhoogte zijn. De belangrijkste boodschap is om te laten zien dat macroscopische en microscopische wateropnameconcepten onder sommige situaties vergelijkbare wateropname opleveren en in andere gevallen leiden tot verschillen, waarbij de totale wateropname gerealiseerd met de microscopische concepten hoger uitvalt dan met het macroscopische concept. Deze tests zijn eerder gebruikt door De Jong van Lier et al. (2013) in hun testfase van het microscopische concept dJvL.

3.2 Waterwijzer Landbouw-cases

Uit de Waterwijzer Landbouw-database (WWL 2.0.4, database 3.0.0) zijn maatwerkcases gehaald. In sommige gevallen wordt ingezoomd op specifieke BOFEK2020-eenheden en in andere gevallen worden alle BOFEK2020-eenheden (Heinen et al., 2021; 2022) beschouwd. Steeds worden twee grondwaterregimes (Gt II, relatief nat; Gt VII, relatief droog) beschouwd. De specifieke BOFEK2020-eenheden zijn (Figuur 12):

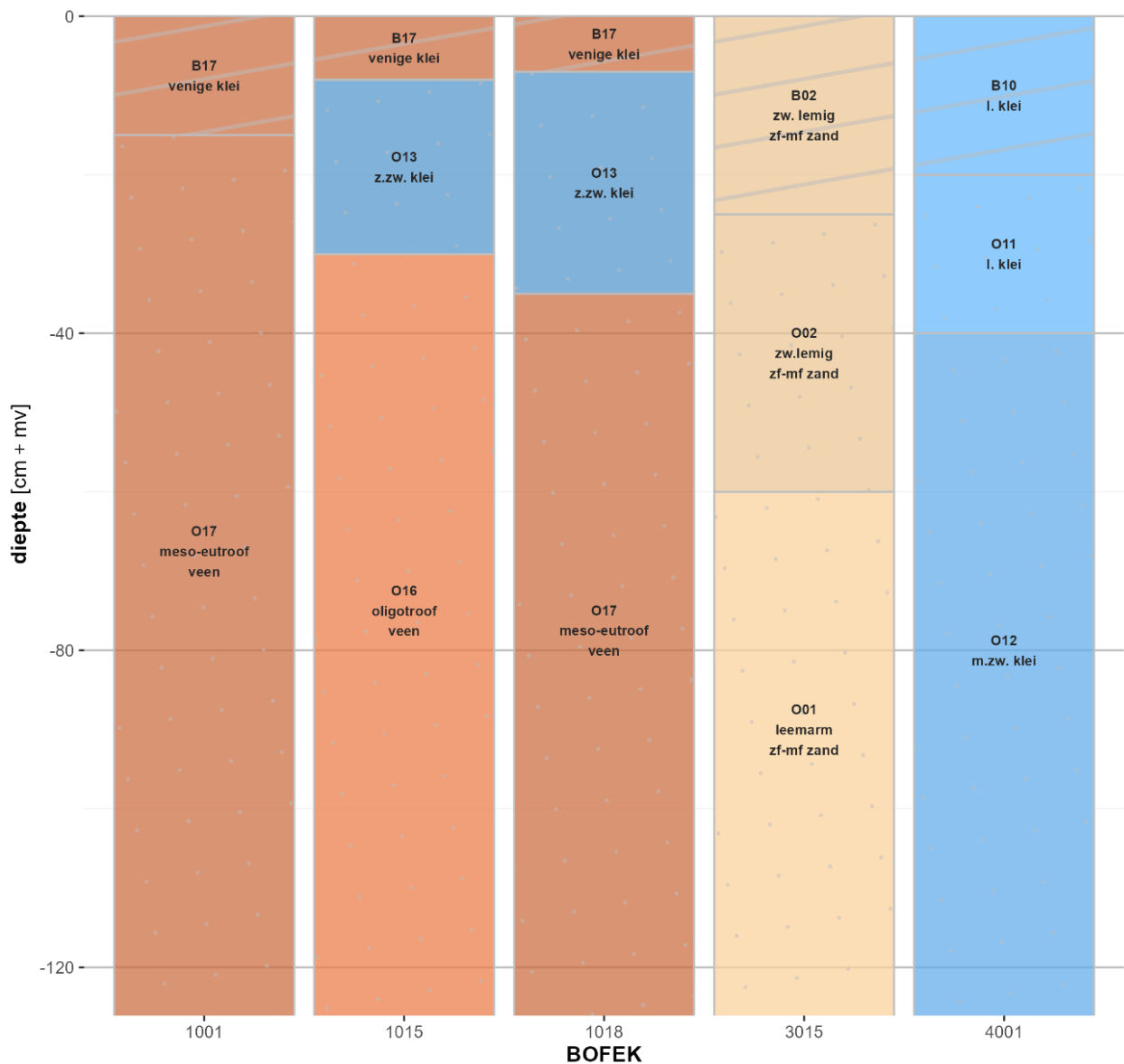
- 1001: dikke veengronden: kleiig moerige bovengrond op bos-/zeggeveen (31874 ha)
- 1015 en 1018: dikke veengronden: klei(ig) dek op veenmosveen (22399 ha) of kleidek op bos-/zeggeveen of klei (60397 ha)
- 3015: zwak lemige zandgronden III (335206 ha; meest voorkomende zandgrond in Nederland)
- 4001: knipkleigronden (zavel en lichte klei) (13489 ha)

Er is gekozen voor een spreiding over veen (1001), zand (3015) en klei (4001). BOFEK-eenheden 1015 en 1018 zijn geselecteerd, omdat dit veenbodems betreffen met een tussenlaag bestaande uit zware klei (met een weinig kleidek). Voor deze twee profielen werd in het verleden veel droogtestress berekend bij relatief kleine grondwaterspiegeldieptes. Het zandprofiel (3015) is het meest voorkomende zandprofiel in Nederland.

Er zijn twee gewassen gekozen: gemaaid grasland en mais (met vanggewas). De periode 1991-2020 is doorgerekend waarbij de meteorologische condities afkomstig zijn van het KNMI-weerstation De Bilt. Voor elk van de zestien situaties zijn vier simulaties uitgevoerd:

- wateropname volgens Feddes (Fe) zonder compensatie (Fe_0)
- wateropname volgens Feddes (Fe) met Jarvis compensatie (Fe_1), met *alphacrit* = 0.7
- wateropname volgens het microscopische concept van dJvL
- wateropname volgens het microscopische concept van dW

Dezelfde modelparameters zijn gebruikt als bij de technische testcase (Tabel 6), uitgezonderd de parameters h_{3h} , h_{3l} en h_4 : grasland: $h_{3h} = -200$ cm, $h_{3l} = -800$ cm en $h_4 = -8000$ cm; mais: $h_{3h} = -400$ cm, $h_{3l} = -500$ cm en $h_4 = -10000$ cm. Zuurstofstress is buiten beschouwing gelaten, evenals de indirecte effecten.



Figuur 12 Schematische weergave van de vijf gebruikte BOFEK2020-profielen.

Resultaten gras

De gesimuleerde cumulatieve actuele transpiratie voor Fe met compensatie was groter dan voor Fe zonder compensatie. Vooral in droge jaren zien we dat de beide microscopische wateropnameconcepten meer wateropname realiseren dan volgens het gecompenseerde Fe-concept. Dit is te zien voor de jaren 2018 en 2020 (Figuur 13), en is vooral goed zichtbaar voor bodem 1018 (droog en nat) en 4001 (onder natte omstandigheden).

Dat vertaalt zich ook in verschillen in opbrengstreducties (Figuur 14). Voor de zandgrond (3015) zien we dat er onder natte omstandigheden geen sprake is van droogtestress en onder droge omstandigheden is er vrijwel geen verschil tussen de microscopische wateropnameconcepten en de gecompenseerde Fe-wateropname. Voor de kleigrond (4001) geldt steeds dat de microscopische concepten minder opbrengstreductie opleveren dan Fe. Voor de veengrond met kleidek (1018) is dat verschil nog duidelijker zichtbaar.



Figuur 13 Cumulatieve transpiratie voor gras voor de jaren 2017-2020 voor de acht WWL bodem-Gt cases zoals berekend met Fe zonder compensatie (Fe_0), Fe met compensatie (Fe_1) en de microscopische concepten dW en $dJvL$.



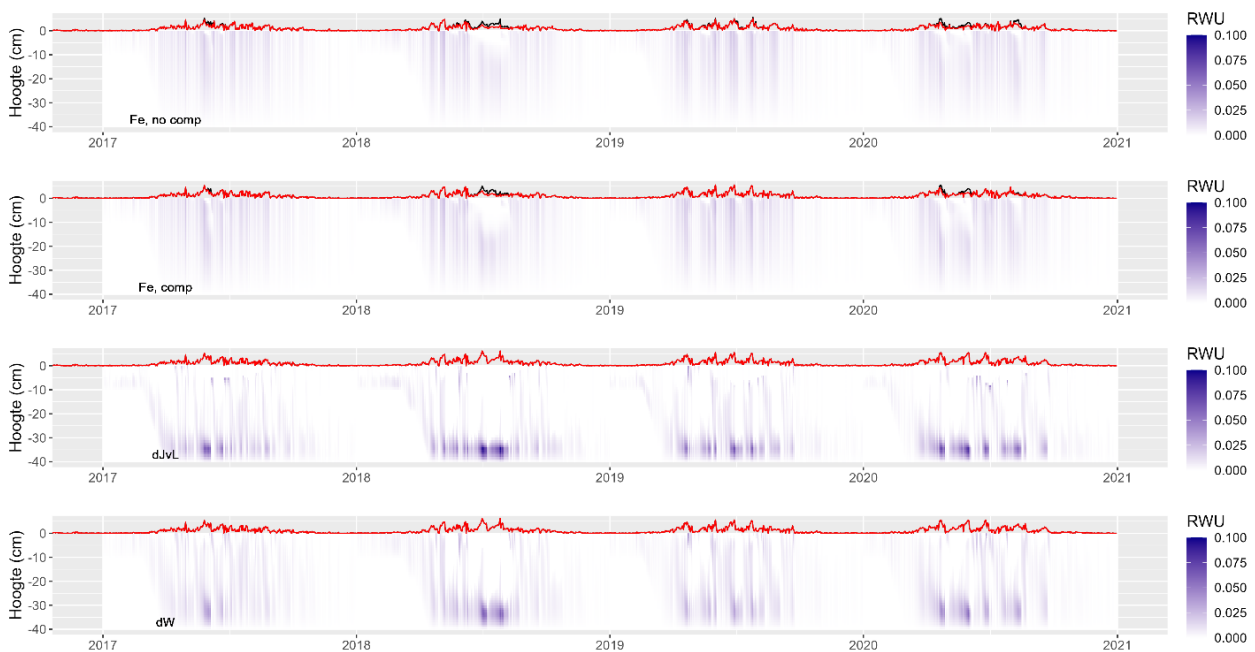
Figuur 14 Jaarlijkse opbrengstvermindering voor gras voor de acht WWL bodem-Gt-cases voor de vier wateropnameconcepten: dertigjarig gemiddelde voor de periode 1991-2020, voor een relatief nat jaar (1998) en voor een droog jaar (2018).

De verdeling van wateropname als functie van de diepte en de tijd is weergegeven in Figuur 15 voor 1018 onder natte omstandigheden. Hoe natter het jaar, hoe meer de wateropnamepatronen op elkaar lijken (dat is bijvoorbeeld heel duidelijk bij 3015 onder natte omstandigheden; hier niet getoond). Voor droge jaren (2018, 2020) zien we dat er bij de microscopische concepten relatief meer water onder in de wortelzone wordt opgenomen en dat de wortels in de bovenlaag veel minder bijdragen aan de totale opname. Dat zien we in ook in veel andere situaties. Met andere woorden: de microscopische concepten hebben zeer de neiging om het water daar op te nemen waar dit het makkelijkst beschikbaar is of het aanwezig is. De watervoorraad, en eventueel bijkomende aanvoer van elders, wordt optimaal benut. Bij het macroscopische wateropnameconcept is de watervraag over de bewortelde diepte proportioneel aan de wortelverdeling over

deze diepte. Daar waar relatief weinig wortels voorkomen, zal ook minder water worden onttrokken. Met het Jarvis compensatiemechanisme wordt dit slechts in beperkte mate gecompenseerd.

De waargenomen verschillen tussen de macroscopische en microscopische concepten zijn deels toe te schrijven aan hun parameterinstellingen. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de gevoeligheid van beide microscopische concepten op hun parameters.

Over het algemeen kan gesteld worden dat beide microscopische concepten (dW, dJvL) zeer overeenkomstige wateropname vertonen, zowel op jaarbasis als op tijd-dieptepatronen. Hoewel verschillend in uitgangspunten, maar wel gebaseerd op stroming naar de wortelwand toe en door de wortelwand heen en transport naar de bladeren en enkele overeenkomstige parameters, leveren beide concepten dus blijkbaar vrijwel dezelfde wateropnameschattingen op. Er is dus geen reden om te stellen dat een van beide de voorkeur verdient boven de ander.



Figuur 15 Tijd-dieptediagrammen van wateropname door gras (cm d^{-1}) met wit duidend op geen opname en donkerblauw duidend op relatief veel opname; voor BOFEK-eenheid 1018 met kleine grondwaterspiegeldieptes. Van boven naar beneden: Fe_0, Fe_1, dJvL, dW. Aan de bovenzijde van elke plot is in rood de actuele transpiratiesnelheid weergegeven en in zwart de potentiële transpiratiesnelheid. Daar waar de zwarte lijn boven de rode lijn ligt, is sprake van transpiratiereductie.

Resultaten mais

Bij de simulaties voor mais is alleen voor het groeiseizoen van mais naar de verschillen in wateropnameconcepten gekeken (wateropname vanggewas is buiten beschouwing gelaten). Over het algemeen zien we vergelijkbare patronen in de resultaten (Figuur 16, Figuur 17) als bij grasland.

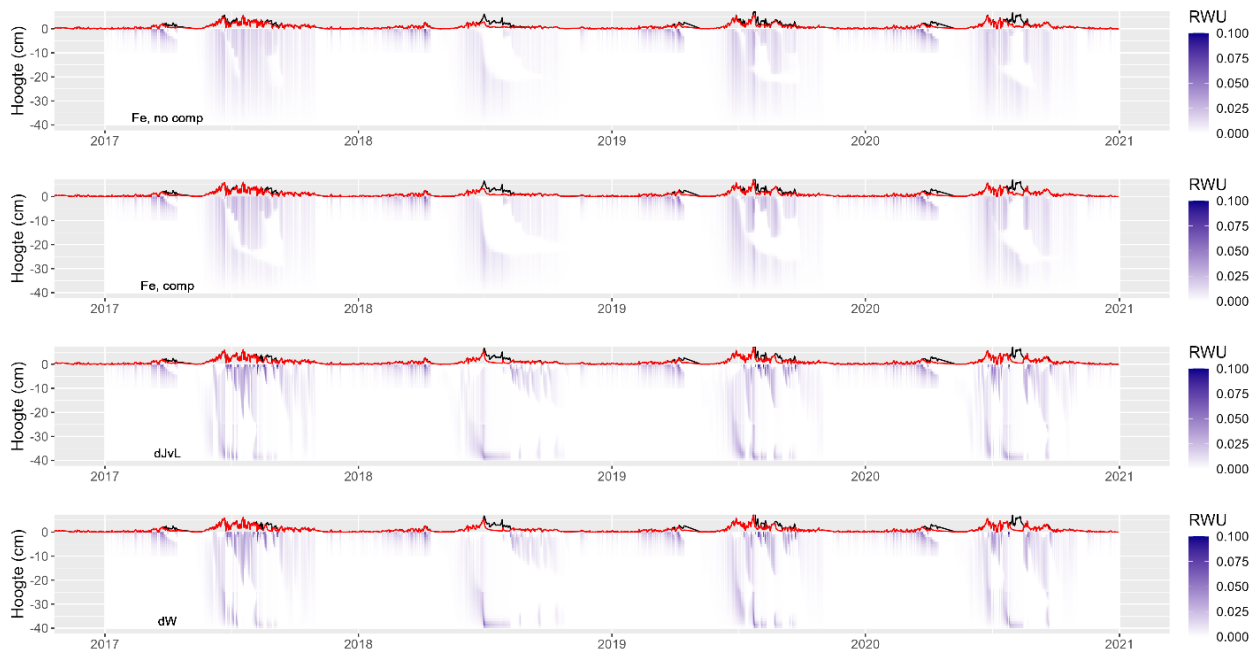


Figuur 16 Cumulatieve transpiratie voor mais voor de jaren 2017-2020 voor de acht WWL bodem-Gt-cases zoals berekend met Fe zonder compensatie (Fe_0), Fe met compensatie (Fe_1) en de microscopische concepten dW en dJvL.



Figuur 17 Jaarlijkse opbrengstreductie voor mais voor de acht WWL bodem-Gt-cases voor de vier wateropnameconcepten: dertigjarig gemiddelde voor de periode 1991-2020, voor een relatief nat jaar (1998) en voor een droog jaar (2018).

De verdeling van wateropname als functie van de diepte en de tijd is weergegeven in Figuur 18 voor 3015 onder droge omstandigheden. Hoe natter het jaar, hoe meer de wateropnamepatronen op elkaar lijken (dat is bijvoorbeeld heel duidelijk bij 3015 onder natte omstandigheden; hier niet getoond). Voor droge jaren (2018, 2020) zien we dat er bij de microscopische concepten relatief meer water onder in de wortelzone wordt opgenomen en dat de wortels in de bovenlaag veel minder bijdragen aan de totale opname. Dat zien we ook in veel andere situaties. Met andere woorden: de microscopische concepten hebben zeer de neiging om het water daar op te nemen waar dit het makkelijkst beschikbaar is of het aanwezigst is. De watervoorraad, en eventueel bijkomende aanvoer van elders, wordt optimaal benut.

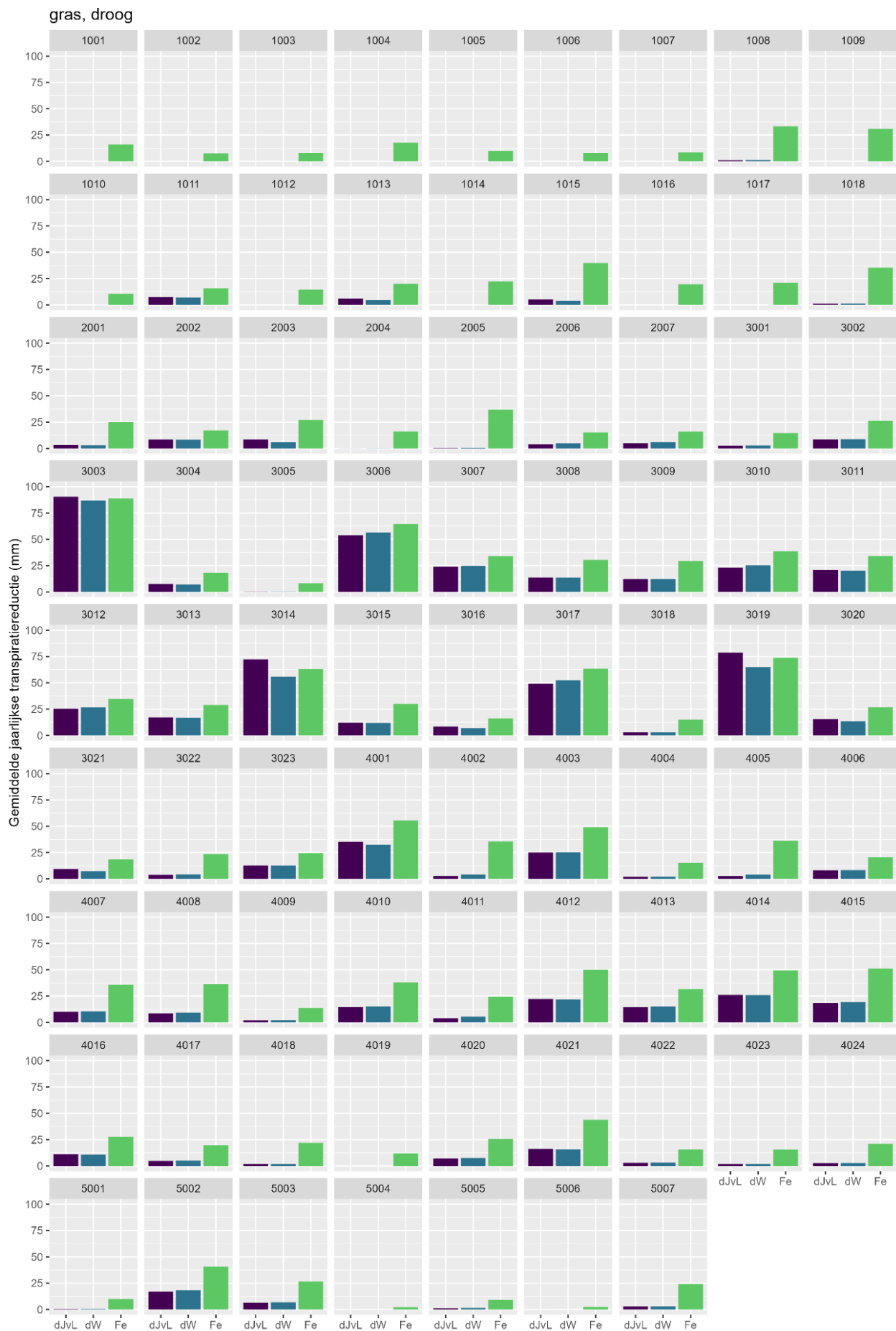


Figuur 18 Tijd-dieptediagrammen van wateropname door mais (cm d^{-1}) met wit duidend op geen opname en donkerblauw duidend op relatief veel opname; voor BOFEK-eenheid 3015 met grote grondwaterspiegeldieptes. Van boven naar beneden: Fe_0, Fe_1, dJvL, dW. Aan de bovenzijde van elke plot is in rood de actuele transpiratiesnelheid weergegeven en in zwart de potentiële transpiratiesnelheid. Daar waar de zwarte lijn boven de rode lijn ligt, is sprake van transpiratiereductie.

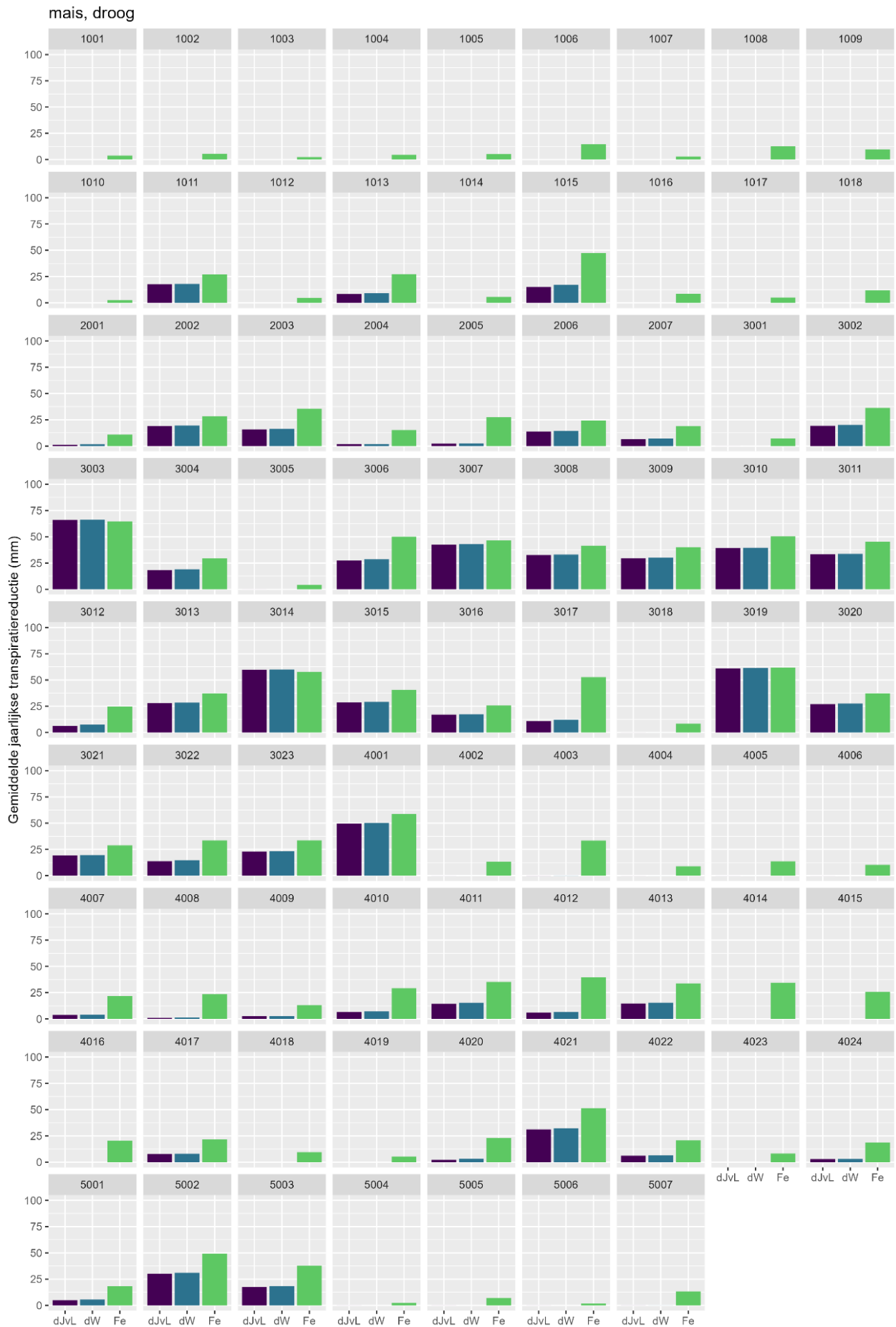
Net zoals bij gras kan over het algemeen gesteld worden dat beide microscopische concepten (dW, dJvL) zeer overeenkomstige wateropname vertonen, zowel op jaarbasis als op tijd-dieptepatronen. Er is dus geen reden om te stellen dat een van beide de voorkeur geniet.

Naast deze zestien getoonde combinaties zijn ook simulaties uitgevoerd voor alle 79 BOFEK-eenheden voor droge en natte situaties voor gras en mais. Alle situaties konden probleemloos worden doorgerekend. In vrijwel alle situaties bleek dat de wateropname gesimuleerd met de microscopische modellen groter was dan gesimuleerd met het macroscopische concept en dat het onderlinge verschil tussen beide microscopische concepten nihil was (Figuur 19, Figuur 20). Bij deze simulaties zijn andere stressfactoren buiten werking gesteld; er is dus alleen gekeken naar de verschillen in droogtestress.

Wanneer gesimuleerd wordt met microscopische wateropname, dan leidt dat tot iets langere rekentijden; in de meeste gevallen is de rekentijd voor het microscopische concept van dW geringer dan die voor het microscopische concept van dJvL; de rekentijd voor het microscopische concept van dW is nauwelijks groter dan die voor het macroscopische concept.



Figuur 19 Dertigjarige gemiddelde reductie in transpiratie (alleen droogtestress) voor alle 79 BOFEK-eenheden volgens het macroscopische concept (Fe; zonder Jarvis-compensatie) en beide microscopische concepten (dJvL, dW) voor gras met relatief grote grondwaterspiegeldieptes.



Figuur 20 Dertigjarig gemiddelde reductie in transpiratie (alleen droogtestress) voor alle 79 BOFEK-eenheden volgens het macroscopische concept (Fe; zonder Jarvis-compensatie) en beide microscopische concepten (dJvL, dW) voor mais met relatief grote grondwaterspiegeldieptes.

4 Gevoeligheidsanalyse

Beide microscopische concepten introduceren nieuwe (gewas)parameters die als invoer moeten worden opgegeven. In dit hoofdstuk wordt een praktijkgerichte gevoeligheidsanalyse voor de nieuwe parameters beschouwd. Met praktijkgericht wordt bedoeld dat wordt gekeken naar de invloed van de parameters op de simulatieresultaten voor enkele Nederlandse bodem-gewas-grondwater-klimaatomstandigheden. Er zijn drie bodemprofielen beschouwd: BOFEK-eenheden 1015, 3015 en 4001; het gewas was mais (groei seizoen: 16 april-31 oktober); er zijn twee grondwaterspiegeldiepteregimes beschouwd (droog: Gt VI, nat: Gt II); er is gerekend voor de klimaatperiode 1991-2020 (De Bilt). De gevoeligheidsanalyse is bedoeld om het systeemgedrag in kaart te brengen, vandaar dat ook niet-realistische gewas-hydrologiecombinaties zijn meegenomen (mais op Gt II).

Gevoeligheidsanalyses kunnen op verschillende manieren worden uitgevoerd. Hier is gekozen voor de eenvoudige 'een-per-keer'-methode, waarbij steeds één parameter wordt gewijzigd en vervolgens naar het resultaat wordt gekeken ten opzichte van de referentiesituatie. De referentiewaarden voor de parameters zijn gegeven in Tabel 7. Deze liggen in de range zoals beschreven in paragraaf 2.6. Vervolgens zijn de parameters afzonderlijk van elkaar gevarieerd tussen de in Tabel 7 opgegeven minimum- en maximumwaarden (zie range zoals beschreven in paragraaf 2.6; voor a_0 en a_1 zie Bijlage 1); voor R_0 , en K_r 21 waarden; voor de overige parameters elf waarden.

Tabel 7 Referentiewaarden en minimum- en maximumwaarden voor de parameters gebruikt als uitgangspunt voor de gevoeligheidsanalyse van de twee microscopische concepten.

dW	Referentie	Minimum	Maximum	dJvL	Referentie	Minimum	Maximum
R_0 (cm)	0.05	0.005	0.075	R_0 (cm) [#]	0.05	0.005	0.075
				R_x (cm) [#]	0.02	0.002	0.045
				a (-)	0.53	0.25	0.9
K_r (cm d ⁻¹)	$3.5 \cdot 10^{-6}$	$4.0 \cdot 10^{-8}$	$8.143 \cdot 10^{-5}$	K_r (cm d ⁻¹)	$3.5 \cdot 10^{-6}$	$4.0 \cdot 10^{-8}$	$8.143 \cdot 10^{-5}$
a_0 (d ⁻¹)	$3.1844 \cdot 10^{-5}$	0	$8.1254 \cdot 10^{-5}$	L_1 (d ⁻¹)	0.0001	0.00007	0.00021
a_1 (cm ⁻¹)	$1.7768 \cdot 10^{-4}$	$1.29 \cdot 10^{-4}$	$2.26 \cdot 10^{-4}$				
$h_{L,1,2}$ (cm)	-16600	-8000	-20000	$h_{L,1,2}$ (cm)	-16600	-8000	-20000
p (-)	7	5	10	p (-)	7	5	10
L_{rv} (cm cm ⁻³) [§]	4	0.01	10	L_{rv} (cm cm ⁻³) [§]	4	0.01	10

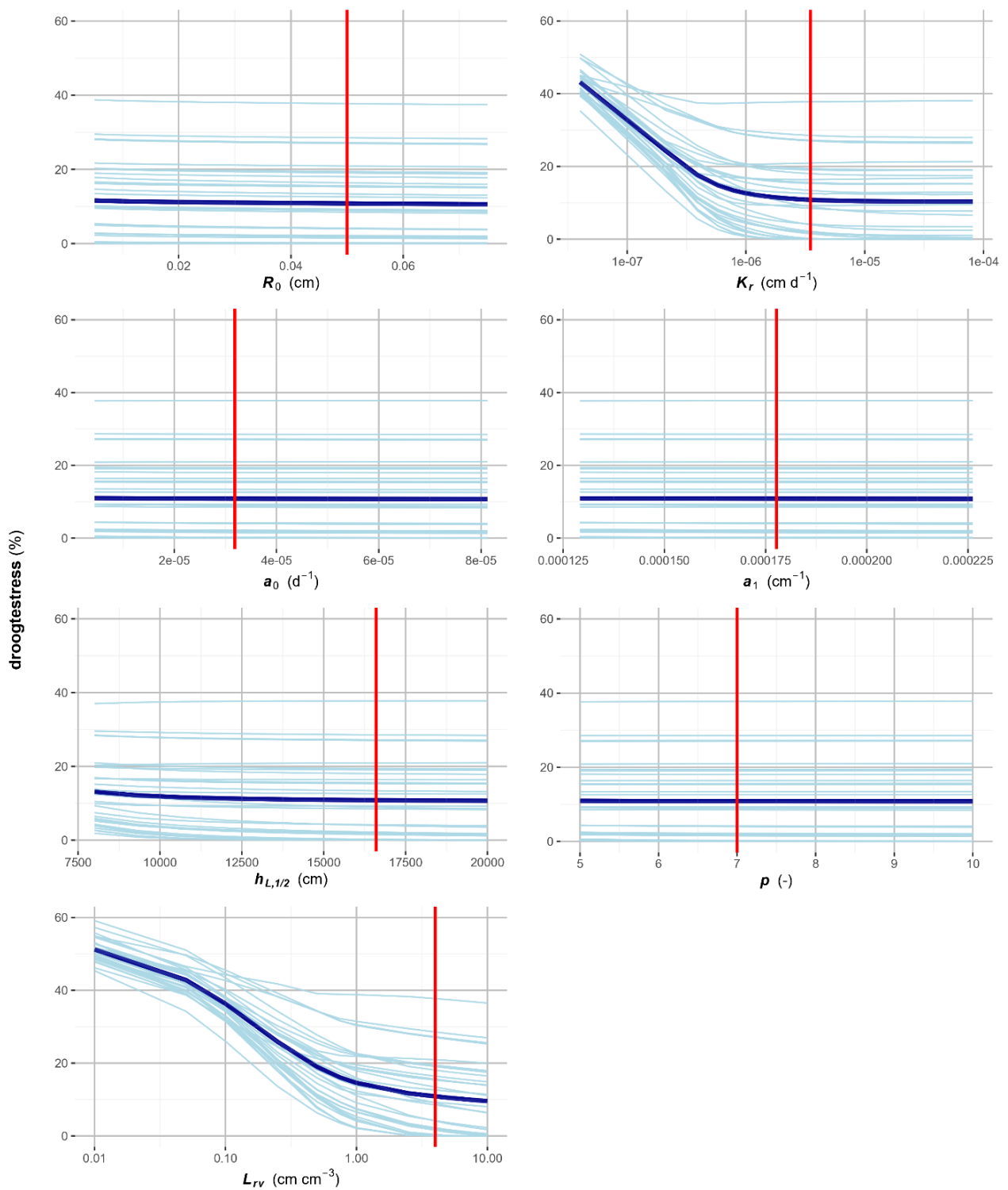
#: omdat R_x per definitie kleiner moet zijn dan R_0 , is ervoor gekozen om bij verandering van R_0 de waarde van R_x mee te veranderen volgens $R_x = 0.4R_0$, waarbij 0.4 de verhouding is van de referentiewaarden ($0.4 = 0.02/0.05$).

§: de genoemde L_{rv} -waarden gelden aan maaiveld en nemen lineair af met de diepte.

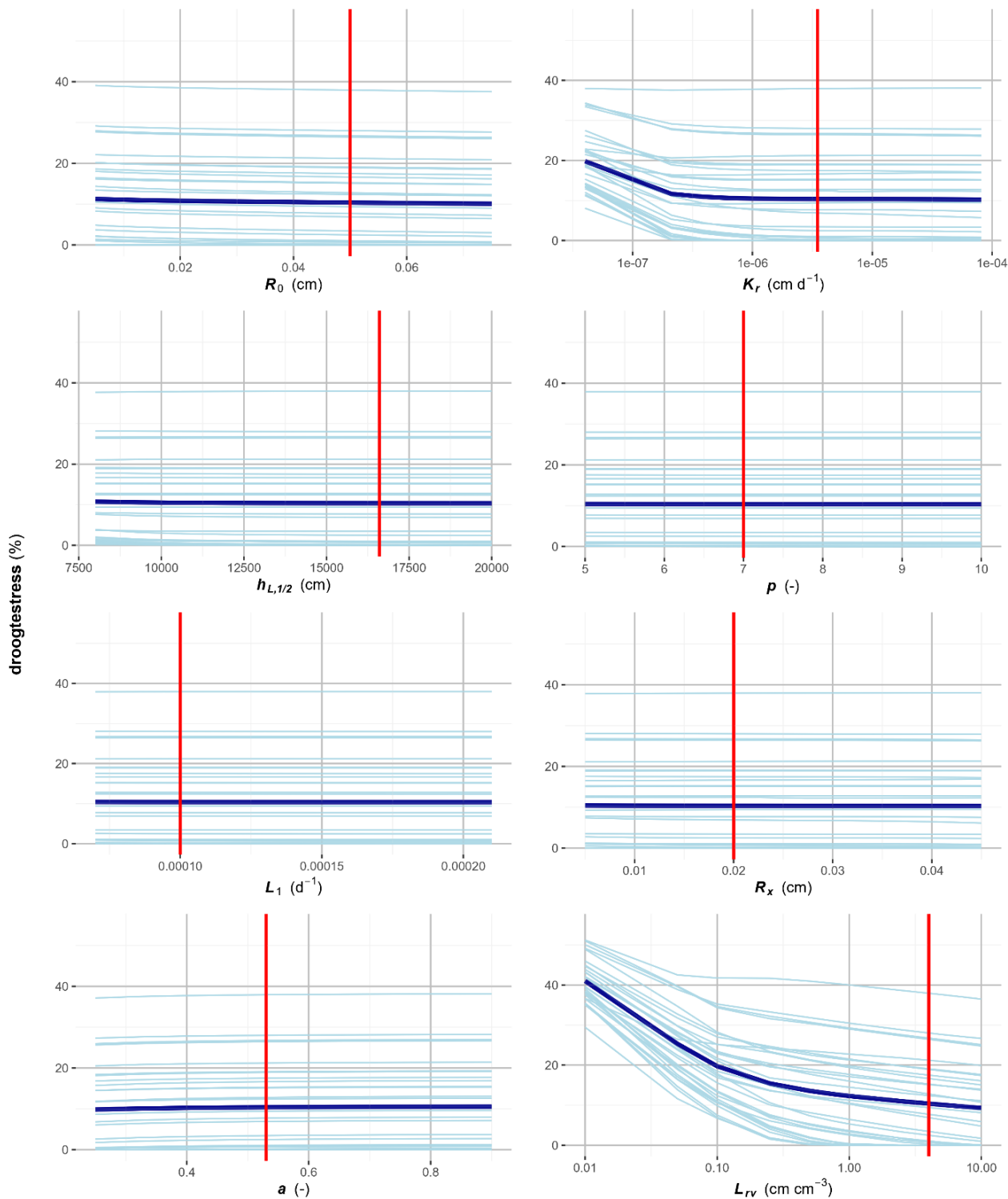
In Figuur 21 en Figuur 22 zijn de gevoeligheden voor de droogtestress voor beide modellen voor hun respectievelijke parameters gegeven voor de zandgrond (BOFEK 3015) bij Gt VI. Voor beide modellen geldt dat de grootste gevoeligheid ligt bij de waarde voor de doorlatendheid van de wortelwand (K_r). Merk op dat alleen voor deze deelfiguren de x-as (K_r) op een log-schaal is weergegeven. De uitkomsten zijn relatief ongevoelig voor de waarden voor R_0 , R_x , L_1 , a_0 en a_1 . Opvallend is ook dat de droogtestress onder deze praktijkomstandigheden vrij ongevoelig is voor de parameters $h_{L,1/2}$ en p die de transpiratie-reductiefunctie beschrijven. De microscopische wateropnameconcepten zijn voor L_{rv} -waarden groter dan circa 1 à 2 cm cm⁻³ ook vrij ongevoelig. Dit beeld zien we ook bij de twee andere grondsoorten (zie Bijlage 3); onder natte omstandigheden (Gt II) is er vaak geen sprake van droogtestress, zodat daar weinig gevoeligheden worden waargenomen.

Omdat deze analyse niet voor alle mogelijke bodem-gewas-grondwater combinaties is uitgevoerd, kunnen deze bevindingen (nog) niet als universeel geldend beschouwd worden. Het lijkt erop dat rondom de geadviseerde referentiewaarden de microscopische modellen relatief ongevoelig zijn in hun voorspelling van de droogtestress. De grootste gevoeligheid zit in de keuze voor de doorlatendheid van de wortelwand. Dat is

een parameter die in principe goed meetbaar is en daarvoor kunnen ook waarden in de literatuur gevonden worden (zie ook Tabel 1).



Figuur 21 Gesimuleerde droogtestress als functie van veranderingen in de microscopische parameters van het concept dW. De rode lijn geeft de referentiewaarde van elke parameter weer, de lichtblauwe lijnen geven de resultaten voor elk van de dertig afzonderlijke jaren en de dikke blauwe lijn geeft het dertigjarige gemiddelde weer. Merk op dat voor parameters K_r en L_{rv} een log-schaal is gehanteerd. Resultaten voor zandgrond (3015) onder droge omstandigheden (Gt VI).



Figuur 22 Gesimuleerde droogtestress als functie van veranderingen in de microscopische parameters van het concept dJvL. De rode lijn geeft de referentiewaarde van elke parameter weer, de lichtblauwe lijnen geven de resultaten voor elk van de dertig afzonderlijke jaren en de dikke blauwe lijn geeft het dertigjarige gemiddelde weer. Merk op dat voor parameters K_r en L_{rv} een log-schaal is gehanteerd. Resultaten voor zandgrond (3015) onder droge omstandigheden (Gt VI).

5 Van micro naar macro?

Een logische vraag zou zijn of het mogelijk is om de parameters van het macroscopische wateropnameconcept van Feddes af te leiden vanuit een van beide microscopische concepten. Deze vraag is vaker aan de orde geweest. In de internationale literatuur is daarbij onder meer kritisch gekeken naar de voor- en nadelen van de Feddes-wateropnamefunctie (De Melo and De Jong van Lier, 2021) en is zelfs gepoogd om de Feddes-parameters te optimaliseren, zodat de berekende wateropname vergelijkbaar is met die verkregen met het microscopische concept van dJvL (Dos Santos et al., 2017). Het voert te ver om alle bevindingen van deze twee studies hier te herhalen. Een paar hoofdbevindingen (conclusies) worden hier benoemd. De Melo and De Jong van Lier (2021) vermelden:

- Het aantal kalibraties van het Fe-concept in de literatuur is relatief beperkt. Hierdoor moet vanwege de beperkte beschikbaarheid van een betrouwbare parametrisatie getwijfeld worden aan de toepasbaarheid voor een breed spectrum aan bodem-gewas-klimaatscenario's.
- Soms wordt met het Fe-concept een redelijke totale wateropname en gewasproductie verkregen. Dat is dan het resultaat van simulatieberekeningen waar naast het Fe-concept nog andere modelconcepten worden beschouwd. Dus die redelijke overeenkomst is dan niet per definitie vanwege de juistheid van het Fe-concept, maar het resultaat van het totale simulatiemodelconcept.

Uit de studie van Dos Santos et al. (2017) volgt:

- Het is niet mogelijk om met het Fe-concept de dynamiek in en de ruimtelijke verdeling van de wateropname zoals berekend met het microscopische concept dJvL (De Jong van Lier et al., 2013) te reproduceren, zelfs niet na kalibratie (optimalisatie) (zie Figuur 6 en Figuur 7 in Dos Santos et al., 2017). Een redelijke overeenkomst is alleen te verkrijgen voor situaties waarbij nauwelijks sprake is van compensatie in de wortelzone.

De studie van Dos Santos et al. (2017) geeft dus het antwoord op de hierboven gestelde vraag: het is niet mogelijk om de Fe-parameters te kalibreren op basis van een vergelijking met een microscopisch wateropnamemodel. De oorzaak moet gezocht worden in het feit dat in het microscopische concept intrinsieke compensatie wordt gesimuleerd die afwezig is in het macroscopische Fe-concept. Een eenvoudige, achteraf, lineaire compensatie (bijv. Jarvis-concept) zal dat verschil niet kunnen oplossen.

De auteurs laten ook resultaten zien van een nieuw macroscopisch concept waarmee, na optimalisatie, een vrij goede overeenstemming met het microscopische wateropnamemodel wordt verkregen (concept beschreven in Bijlage 4). Wel wordt daarbij opgemerkt dat de (empirische) parameters in het nieuwe concept op de een of andere manier moeten worden vastgesteld of gekalibreerd. Dat zou kunnen via vergelijking (optimalisatie) met een microscopisch concept. Dat vraagt om een uitgebreide studie om de afhankelijkheden van gewas, grondsoort en potentiële transpiratie goed in kaart te brengen. De vraag is dan wat de meerwaarde is ten opzichte van de microscopische wateropnameconcepten.

Ook de microscopische concepten hebben aanvullende informatie (parameters) nodig om deze te kunnen toepassen. Veel van de parameters in de microscopische concepten hebben een fysische of fysiologische betekenis en zijn in principe meetbaar (zie paragraaf 2.6). Merk op dat bij optimalisatie van een macroscopisch concept gebaseerd op vergelijking met een microscopisch concept, de uitkomsten mede bepaald worden door de juistheid van de invoergegevens van het microscopisch concept. Die informatie zal dus te allen tijde zo goed mogelijk bekend moeten zijn.

De studie van Dos Santos et al. (2017) ging uit van homogene bodemprofielen met één bodemtype en vrije drainage aan de onderzijde. In praktijksituaties, bijvoorbeeld de Nederlandse bodemprofielen, is vaak sprake van meerdere bodemlagen in de wortelzone en een grote dynamiek in de grondwaterspiegeldieptes. Zeker wanneer de wortelzone bestaat uit verschillende bodemlagen, zal het des te lastiger worden om macroscopische wateropname concepten te kalibreren (optimaliseren) aan de hand van microscopische wateropnameconcepten.

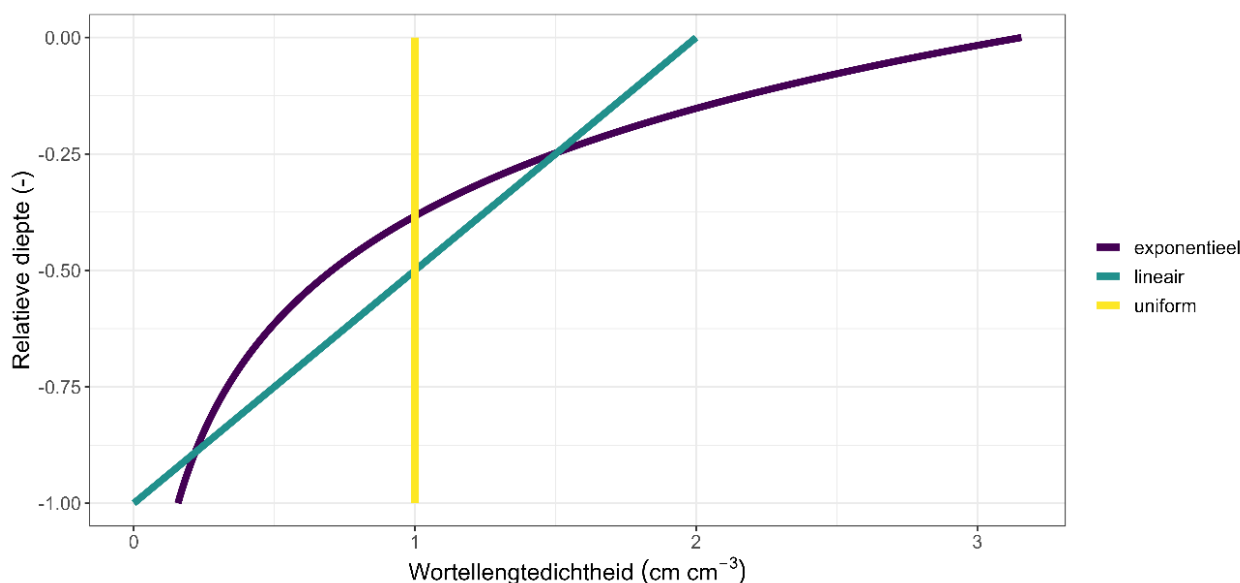
Om toch een idee te krijgen of er, afgezien van de invloed van de intrinsieke compensatie, enige vorm van analogie tussen de microscopische en macroscopische wateropnamemodellen bestaat, is in Bijlage 5 een analyse uitgevoerd waarbij de concepten voor één enkele rekenlaag – waarbij dus geen sprake is van intrinsieke compensatie – onderling worden vergeleken. Hieruit blijkt dat de transpiratiereductie als gevolg van droogte wanneer gekoppeld aan de drukhoogte in de bodem (de facto de werkwijze van het macroscopische concept) volgens het microscopische concept a) niet-lineair afneemt en b) gewas- en grondsoortafhankelijk is.

6 Adaptieve wortelverdeling in SWAP-WOFOST

6.1 Inleiding

In het kader van het project Waterwijzer Landbouw wordt SWAP-WOFOST ingezet voor de simulatie van de potentiële en de actuele gewasopbrengst. Ongunstige omstandigheden als gevolg van te droge, te natte en/of te zoute condities resulteren in een reductie van de transpiratie en beïnvloeden daarmee de gewasontwikkeling. De potentiële transpiratie is afhankelijk van de meteorologische condities en de gewaseigenschappen en -ontwikkeling. Voor de transpiratie wordt water onttrokken aan de bodemcompartimenten in de wortelzone. In geval van het macroscopische wateropnameconcept is de potentiële wateronttrekking per bodemcompartiment proportioneel aan de hoeveelheid wortels en de potentiële transpiratie. Op basis van de bodem-hydrologische condities per bodemcompartiment wordt vervolgens bepaald (al dan niet met compensatie) of aan deze watervraag voldaan kan worden.

In SWAP wordt tot nu toe een vaste relatieve wortelverdeling aangehouden waarmee (afgezien van het Jarvis-compensatiemechanisme voor transpiratiereductie) geen rekening wordt gehouden met het aanpassingsvermogen van het gewas, zie Figuur 23. Op voorhand is niet met zekerheid te zeggen welke wortelverdeling zorgt voor de optimaalste wateronttrekking. De optimale wortelverdeling zal onder droge hydrologische omstandigheden anders zijn dan onder natte omstandigheden. Bij grote grondwaterspiegeldieptes is de bovenzijde van de wortelzone gevoelig voor het ondervinden van droogtestress. Een exponentiële wortelverdeling (exponentieel, of E) zal in dat geval tot meer droogtestress leiden dan een lineair afnemende wortelverdeling (lineair, of L). Onder natte omstandigheden (kleine grondwaterspiegeldieptes) is juist de onderzijde van de wortelzone gevoelig voor het ondervinden van zuurstofstress. Een met de diepte afnemende wortelverdeling heeft in dit geval waarschijnlijk de voorkeur boven een gelijkmatige (uniforme of blokvormige) wortelverdeling (uniform of U). Naast de hydrologische omstandigheden spelen ook bodemfysische eigenschappen en meteorologische condities een belangrijke rol. Zo zal de optimale wortelverdeling niet alleen per situatie, maar ook per dag anders zijn. Een gewas zal zich echter in beperkte mate kunnen aanpassen aan de omstandigheden die heersen. Het is dan niet realistisch om voor elk moment uit te gaan van de optimaalste wortelverdeling.



Figuur 23 Verschillende wortelverdelingen (het oppervlak van (d.w.z. links van) elke verdeling is gelijk).

6.2 Concept

Hier introduceren we een concept om de wortelverdeling adaptief te maken: aangroei en afsterven van wortels zal daar plaatsvinden waar de omstandigheden gunstig zijn (aangroei) of ongunstig zijn (afsterven). Hiermee kan rekening worden gehouden door uit te gaan van de hoeveelheid biomassa aan wortels die per tijdstap wordt gevormd en afsterft. In geval een simulatie wordt uitgevoerd met dynamische gewasontwikkeling (WOFOST, GRASS³) is deze informatie beschikbaar vanuit het gewasgroeimodel. Daarnaast is er informatie over de transpiratiereductie die in de afgelopen dag per bodemcompartiment is opgetreden. Daarmee is bekend welk deel van de wortelzone relatief gunstig dan wel ongunstig is. De nieuwe vormen wortelbiomassa kan worden verdeeld over de wortelzone proportioneel aan de relatieve wateronttrekking. De afnemende wortelbiomassa kan worden verdeeld proportioneel aan de transpiratiereductie. Hiermee zal de wortelverdeling elke tijdstap worden aangepast.

6.2.1 Aangroei

Stel dat aangroei volledig bepaald wordt door de bestaande verdeling aan wortels, dus onafhankelijk van eventuele reductie in transpiratie, dan is de nieuwe verdeling te berekenen als:

$$W_{j,t+1} = W_{j,t} + \frac{W_{j,t}}{\sum W_{j,t}} G_t \Delta t \quad (29)$$

Hierin is W het wortelgewicht (kg ha^{-1}), t is de tijd (d), G is de aangroeisnelheid van wortels ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$), Δt is de tijdstap (d; hier altijd gelijk aan 1 d) en j is laagnummer. De facto beschrijft dit de bestaande berekening van de statische wortelverdeling in SWAP.

Stel dat aangroei volledig bepaald wordt door de bestaande verdeling aan actuele wateropname, dus onafhankelijk van de bestaande wortelverdeling, dan is de nieuwe verdeling te berekenen als:

$$W_{j,t+1} = W_{j,t} + \frac{T_{a,j,t}}{\sum T_{a,j,t}} G_t \Delta t \quad (30)$$

Hierin is T_a de actuele transpiratie (cm d^{-1}). Beide beschrijvingen (Eq. (29) en Eq. (30)) kunnen samengevoegd worden via een weegfactor f_1 (aanpassings- of relaxatiefactor in de range [0..1]), waarmee gewogen wordt welk aandeel gestuurd wordt door reeds aanwezige wortels en welk aandeel door transpiratiereductie, volgens:

$$W_{j,t+1} = W_{j,t} + \left[(1 - f_1) \frac{W_{j,t}}{\sum W_{j,t}} + f_1 \frac{T_{a,j,t}}{\sum T_{a,j,t}} \right] G_t \Delta t \quad (31)$$

Indien er geen aangroei is ($G = 0$), geldt $W_{t+1} = W_t$ en zowel de verdeling in W als de verdeling in T_a doet niet ter zake. Indien $\sum T_{a,j,t} = 0$, dan moet die dag Eq. (29) gebruikt worden.

6.2.2 Afsterving

In analogie kan een vergelijkbare redenatie voor de afsterving worden opgesteld. De gecombineerde vergelijking luidt dan:

$$W_{j,t+1} = W_{j,t} - \left[(1 - f_2) \frac{W_{j,t}}{\sum W_{j,t}} + f_2 \frac{T_{\text{red},j,t}}{\sum T_{\text{red},j,t}} \right] D_t \Delta t \quad (32)$$

³ In SWAP-WOFOST is GRASS een op WOFOST gebaseerde implementatie voor grasgroeï. In de toekomst mogelijk vervangen door LINGRA (Schapendonk et al., 1996).

Hierin is D de sterftesnelheid van wortels ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$), f_2 is een relaxatiefactor ($[0..1]$) en T_{red} is de transpiratiereductie ($T_{\text{red}} = T_p - T_a$), waarbij alleen de positieve waarden relevant zijn. Indien er geen sterfte is ($D = 0$), geldt $W_{t+1} = W_t$ en zowel de verdeling in W als de verdeling in T_{red} doet niet ter zake. Als $\sum T_{\text{red},j,t} = 0$, dan moet die dag de volgende vergelijking gebruikt worden:

$$W_{j,t+1} = W_{j,t} - \frac{W_{j,t}}{\sum W_{j,t}} D_t \Delta t \quad (33)$$

In extreme situaties zou $W_{j,t+1}$ negatief berekend kunnen worden; in dat geval wordt een minimumwaarde verondersteld. Omdat later de wortellengtedichtheid wordt berekend op basis van de relatieve verdeling van de wortelgewichten (zie verderop in paragraaf 6.3), zal dit niet leiden tot een fout in de massabalans voor wortellengtedichtheid.

6.2.3 Adaptieve wortelverdeling en microscopische wateropname

Het concept van adaptieve wortelverdeling kan ook toegepast worden wanneer microscopische wateropname wordt gebruikt. Omdat bij microscopische wateropname sprake is van intrinsieke compensatie zal de herverdeling sterk door T_a gestuurd kunnen worden. Intrinsieke compensatie kan voor enkele rekenlagen leiden tot een grotere wateropname dan je zou verwachten op basis van de hoeveelheid aanwezige wortels. Daarom herschrijven we Eq. (31) als volgt:

$$W_{j,t+1} = W_{j,t} + \left[(1 - f_1) \frac{W_{j,t}}{\sum W_{j,t}} + f_1 \frac{\min[T_{a,j,t}, T_{p,j,t}]}{\sum \min[T_{a,j,t}, T_{p,j,t}]} \right] G_t \Delta t \quad (34)$$

waarbij de T_p de wortellengtedichtheid-gewogen potentiële wateropname is volgens:

$$T_{p,j} = \frac{L_{rv,j} \Delta z_j}{\sum L_{rv,j} \Delta z_j} T_{\text{pot}} \quad (35)$$

Ook bij afsterving geldt dat er rekening gehouden moet worden met intrinsieke compensatie, omdat voor enkele rekenlagen een negatieve transpiratiereductie berekend kan worden ($T_p - T_a < 0$); Eq. (32) herschrijven we daarom als volgt:

$$W_{j,t+1} = W_{j,t} - \left[(1 - f_2) \frac{W_{j,t}}{\sum W_{j,t}} + f_2 \frac{\max[0, T_{\text{red},j,t}]}{\sum \max[0, T_{\text{red},j,t}]} \right] D_t \Delta t \quad (36)$$

Eq. (34) en Eq. (36) zijn zowel toepasbaar bij macroscopische als microscopische wateropname.

Wanneer de wortelbiomassa per rekenlaagje bekend is, kan hieruit eenvoudig volgens Eq. (28) de wortellengtedichtheid (L_{rv} , cm cm^{-3}) per rekenlaagje berekend worden.

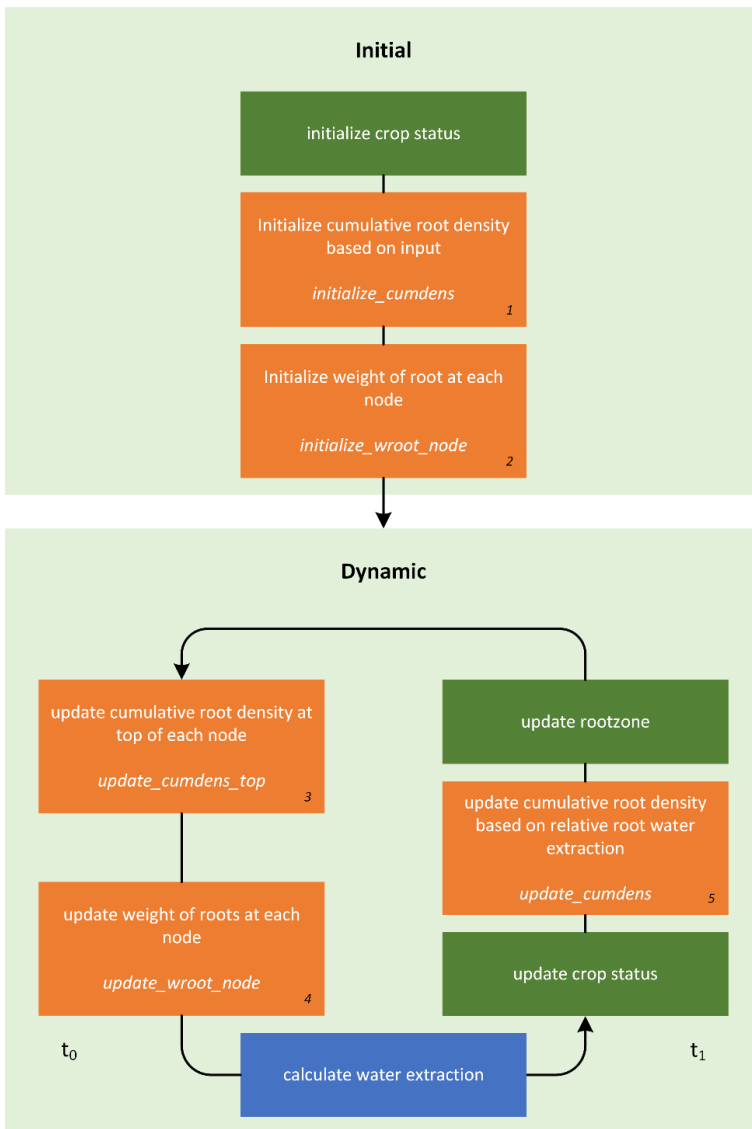
6.2.4 Adaptieve wortelverdeling en statisch gewasgroei-model

In de oorspronkelijke versie van het statische gewasgroei-model in SWAP wordt geen wortelgewicht berekend. Voor de microscopische zuurstofopname is de wortelbiomassa (aan de bovenzijde) van elk rekencompartiment nodig. Voor een statisch gewas was hiervoor t.b.v. de zuurstofmodule een functionaliteit (lees: aanvullende invoer) toegevoegd aan SWAP. Deze bestond uit het inlezen van de wortelbiomassa aan maaiveld ($w_{\text{ROOT_SS}}$) als functie van het ontwikkelingsstadium (DVS) van het gewas (via tabel w_{RTB}). Dit gecombineerd met de relatieve wortelverdeling als functie van de diepte ($RDCTB$), levert in feite de totale biomassa wortels als functie van de tijd (ontwikkelingsstadium). Deze aansturing heeft een nadeel. Indien ervoor wordt gekozen om een simulatie met een andere wortelverdeling uit te voeren, dient ook de wortelbiomassa aan maaiveld aangepast te worden om de totale biomassa aan wortels gelijk te houden. Voor

consistentie en een beter begrip voor de gebruikers is ervoor gekozen om bij de invoer van statische gewassen de wortelbiomassa als functie van ontwikkelingsstadium op te geven. Op die manier kan dan de wortelgroei (en eventueel sterfte aan het einde van het groeiseizoen) beschouwd worden volgens de geschetste aanpak in paragraaf 6.2.3. Voor de zuurstofstressmodule wordt dan tevens de wortelbiomassa aan de bovenzijde van elk rekencompartiment berekend; dat is het gemiddelde van de waarde in de rekenlaag en de rekenlaag erboven; voor de eerste rekenlaag wordt geëxtrapoleerd.

6.3 Implementatie

In de modelcode van SWAP is de implementatie van adaptieve wortelverdeling in vijf subroutines geregeld (zie Figuur 24; de routines zijn ondergebracht in de module *rootdistribution.f90*). Na de initialisatie van het gewas aan het begin van het groeiseizoen wordt de genormaliseerde cumulatieve wortelverdeling berekend op basis van de door gebruiker gespecificeerde relatieve wortelverdeling (routine 1; inlezen en verwerking van variabele `RDCTB`). Daarna vindt er een allocatie plaats voor het bijhouden van de wortelbiomassa in elk bodemcompartiment (routine 2). Elke tijdstap vindt er een update plaats van de relatieve wortelverdeling. In deze fase maken we onderscheid tussen routines die aan het begin of aan het einde van de dag worden aangeroepen. Aan het begin van de dag wordt eerst de genormaliseerde cumulatieve wortelverdeling bepaald aan de bovenzijde van elk bodemcompartiment (stap 3; dit voorkomt het onnodig vaak aanroepen van de `AFGEN`-functie in de modules *rootwaterextraction.f90* en *oxygenstress.f90*). Met deze wortelverdeling wordt vervolgens de hoeveelheid biomassa aan wortels in elk bodemcompartiment bepaald (stap 4). Op basis van de genormaliseerde cumulatieve wortelverdeling en de potentiële transpiratie wordt de wateronttrekking per bodemcompartiment uitgerekend (blauw). Aan het einde van de dag krijgt de gewasstatus een update die afhankelijk is van de totale transpiratiereductie die gedurende de dag is opgetreden. Op basis van de hoeveelheid biomassa aan wortels per bodemcompartiment (stap 4), de wateronttrekking per bodemcompartiment en de verandering in wortelbiomassa wordt er een nieuwe wortelverdeling berekend (stap 5).



Figuur 24 Aanroep van verschillende routines ten behoeve van adaptieve wortelverdeling.

Na de laatste stap vindt er een update plaats van de dikte van de wortelzone en de bijbehorende hoeveelheid wortels. Dit heeft tot resultaat dat bij een toenemende dikte van de wortelzone het gewicht van de wortels een kleine beetje naar beneden worden getrokken bij de volgende dag (afhankelijk van de dikte van de rekenlaagjes die gehanteerd worden). De aangepaste wortelverdeling heeft dan namelijk betrekking op een grotere wortelzone. Dit treedt overigens hoofdzakelijk aan het begin van het groeiseizoen op (toename van de dikte van de wortelzone is vastgelegd in de gewas-invoerfile).

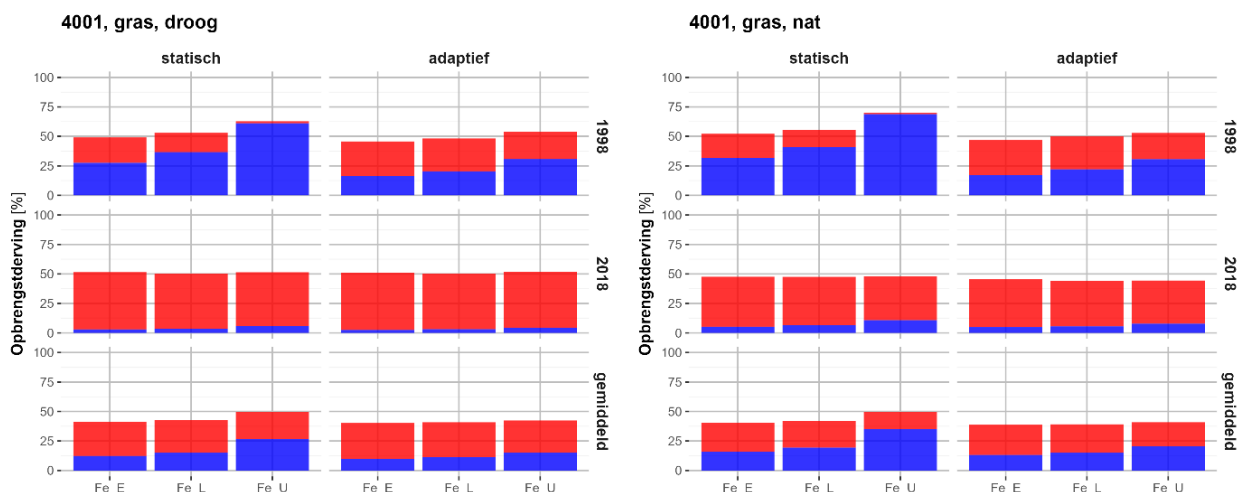
6.4 Resultaten

De invloed van de adaptieve wortelverdeling op de gesimuleerde gewasopbrengst(reductie) en het aandeel droogtestress en zuurstofstress hierin beschrijven we aan de hand van zestien maatwerkcases uit Waterwijzer Landbouw zoals beschreven in paragraaf 3.2. Wateropname is gesimuleerd volgens het macroscopische concept Fe (zonder compensatie), waarbij initieel drie opgelegde wortelverdelingsfuncties beschouwd worden: exponentieel (Fe_E), lineair (Fe_L) en uniform (Fe_U). Opbrengstderving als gevolg van indirecte effecten zijn buiten beschouwing gelaten.

6.4.1 Gras

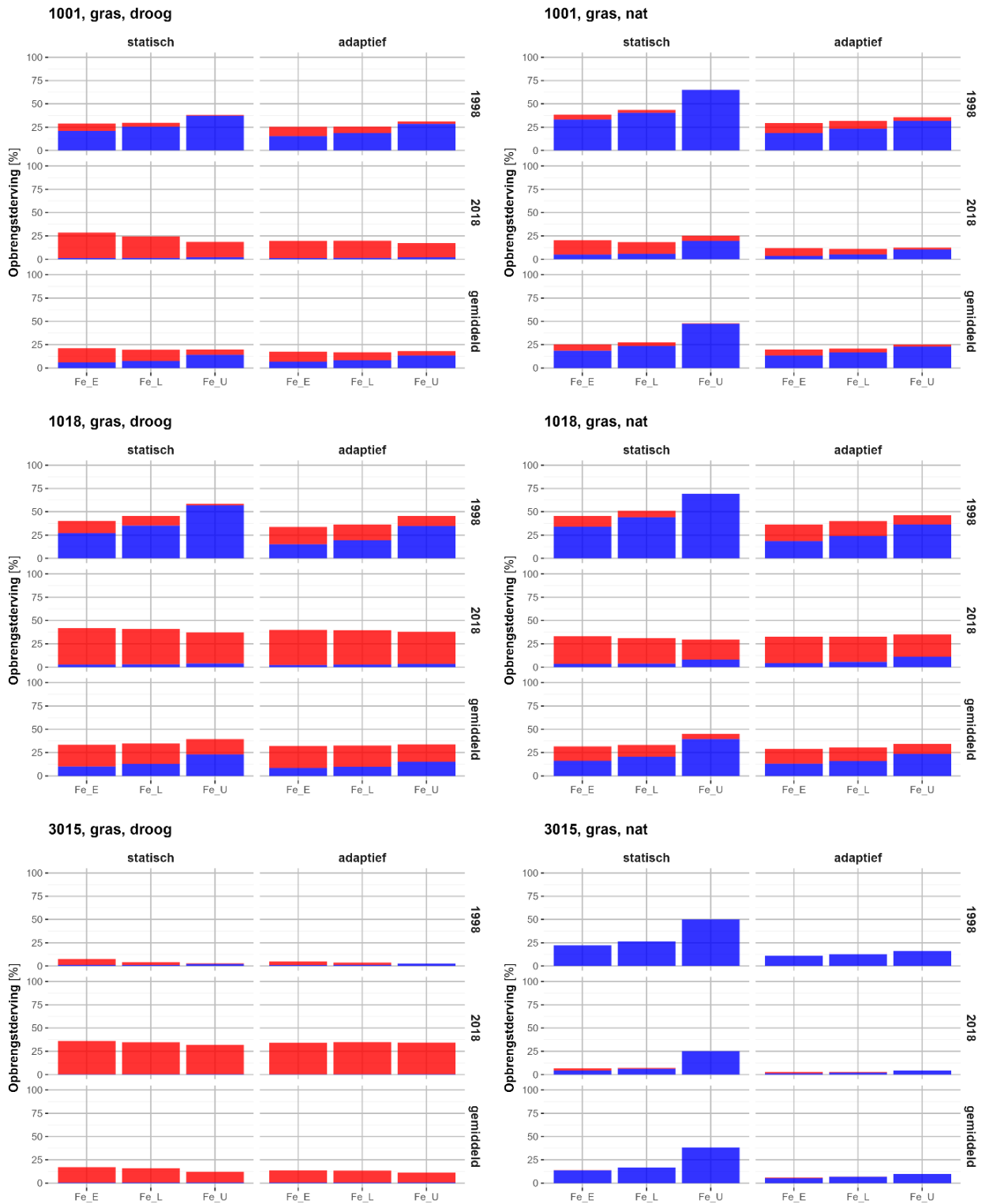
Figuur 25 toont de opbrengstderving op een kleigrond (BOFEK-eenheid 4001) met een grote en kleine grondwaterspiegeldiepte (respectievelijk Gt VII en II) als gevolg van gecombineerde droogte- (rood) en zuurstofstress (blauw) voor statische wortelverdeling en volgens een adaptieve wortelverdeling (met $f_1 = f_2 = 1$) voor het dertigjarig gemiddelde, voor een relatief nat jaar (1998) en een droog jaar (2018). De resultaten zijn gegeven voor een relatief nat jaar (1998), een droog jaar (2018) en voor het dertigjarige gemiddelde. Hierin valt op dat bij een statische wortelverdeling de hoeveelheid droogte- en zuurstofstressverdeling afhankelijk is van de initieel gekozen verdeling. Een exponentiële verdeling leidt tot meer droogtestress en een uniforme verdeling tot meer zuurstofstress. Wanneer de wortelverdeling adaptief wordt berekend, verdwijnen de onderlinge verschillen voor een groot deel.

Daarnaast is te zien dat de initieel gekozen wortelverdeling bij de statische benadering sterk kan doorwerken in de gesimuleerde gewasopbrengst wanneer de opbrengstderving voornamelijk wordt beïnvloed door een enkele stressor (droogte- dan wel zuurstofstress). In Figuur 25 is te zien dat een uniforme wortelverdeling onder natte omstandigheden tot meer opbrengstderving leidt in vergelijking met de twee andere initiële wortelverdelingen. Voor deze situatie wordt minder opbrengstderving berekend met een adaptieve wortelverdeling.



Figuur 25 Opbrengstreductie voor BOFEK-eenheid 4001 met gras bij grote en kleine grondwaterspiegeldieptes bij een statische en een dynamische wortelverdeling bij drie initiële wortelverdelingen (Fe_E: exponentieel; Fe_L: lineair; Fe_U: uniform) in een relatief nat jaar (1998), een droog jaar (2018) en het dertigjarige gemiddelde. De totale reductie is opgesplitst in droogtestress (rood) en zuurstofstress (blauw).

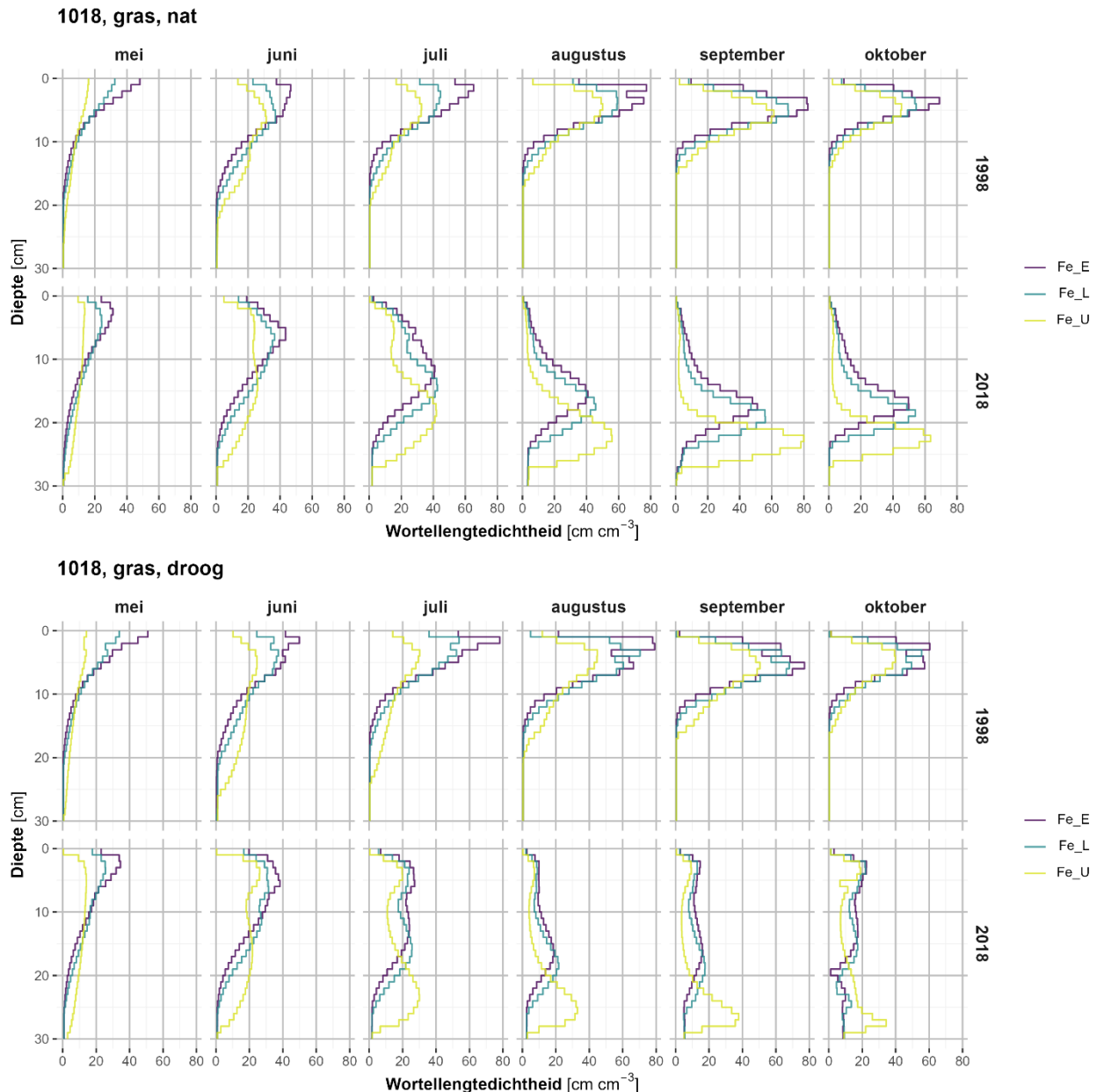
Figuur 26 geeft min of meer dezelfde resultaten voor de overige bodem- en Gt-combinaties. De gesimuleerde opbrengstderving voor simulaties uitgevoerd met een adaptieve wortelverdeling zijn onderling vergelijkbaar. In veel gevallen doet de initiële aangenomen wortelverdeling er veel minder toe in de uiteindelijke inschatting van droogte- en zuurstofstress dan bij een statische wortelverdeling. Wanneer zowel droogte- als zuurstofstress optreedt, leidt het toepassen van een adaptieve wortelverdeling niet tot een sterke reductie in de gesimuleerde opbrengstderving.



Figuur 26 Als Figuur 25 voor gras voor drie BOFEK-eenheden (1001, 1018 en 3015) met relatief grote en relatief kleine grondwaterspiegeldieptes.

Figuur 27 geeft een voorbeeld van de $L_v(z)$ verdeling voor bodemprofiel 1018 met een relatief kleine grondwaterspiegeldiepte (Gt II) en een relatief grote grondwaterspiegeldiepte (Gt VII). Hierin worden de verdelingen gegeven op de eerste dag van de maanden mei tot en met oktober voor de dynamische situaties voor een relatief nat jaar (1998) en een droog jaar (2018). Doordat een adaptieve wortelverdeling reageert op zowel meteorologische, hydrologische condities als bodemfysische eigenschappen, zien we dat de verdelingen in de loop der tijd meer en meer op elkaar gaan lijken. Maar we zien ook dat de patronen voor droge en natte jaren onderling verschillend zijn; in een nat jaar concentreren de wortels zich meer bovenin,

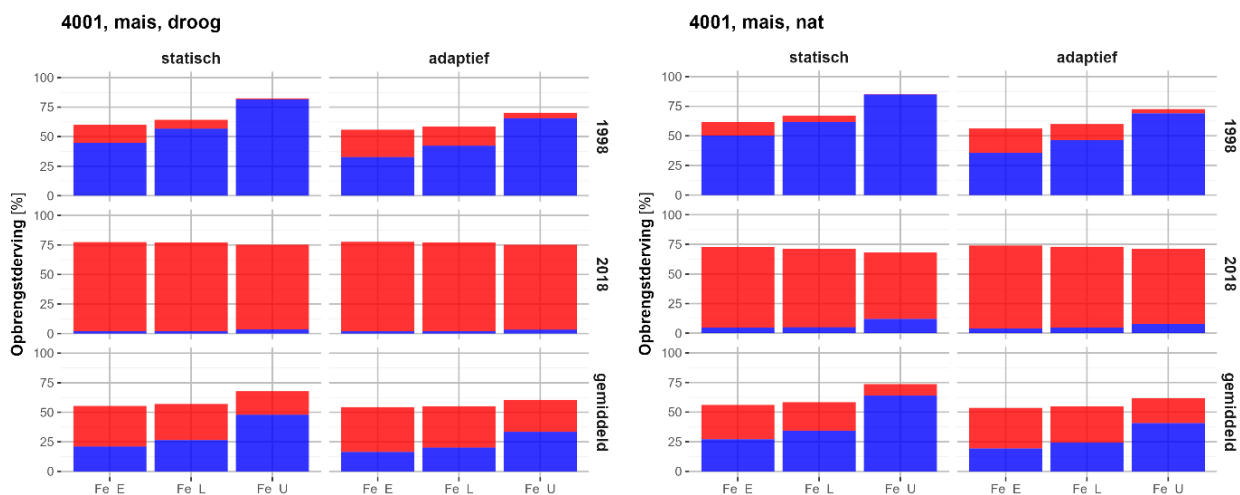
omdat het onder in de bodem te nat is waardoor zuurstofgebrek aldaar ervoor zorgt dat de wortels daar niet gaan groeien. In het droge jaar 2018 zien we dat de wortels zich dieper in het profiel gaan concentreren, omdat de bovengrond te veel uitdroogt en niet voldoende van water wordt voorzien. Dat beeld wordt versterkt indien de hydrologische omstandigheden droger worden. Voor andere bodem-grondwatercombinaties zien we vergelijkbaar gedrag; uiteraard op detailniveau ontstaan verschillen. Wel is het in veel gevallen zo dat de patronen met name voor initieel lineaire en exponentiële verdelingen steeds sterk op elkaar gaan lijken, en dat soms de verdeling die ontstaat wanneer initieel een uniforme verdeling wordt aangenomen hier iets van afwijkt, met de kans dat de wortels zich te veel onderin gaan concentreren en dat dit dan mogelijk sneller tot zuurstofstress kan leiden.



Figuur 27 Wortellengtedichtheid (cm cm^{-3}) als functie van de diepte (cm) op de eerste dag van de maanden mei tot en met oktober voor gras op bodem 1018 met kleine (boven) en grote (onder) grondwaterspiegeldieptes voor dynamische wortelverdeling bij drie initiële wortelverdelingen (Fe_E: exponentieel; Fe_L: lineair; Fe_U: uniform): in een relatief nat jaar (1998) en in een droog jaar (2018).

6.4.2 Mais

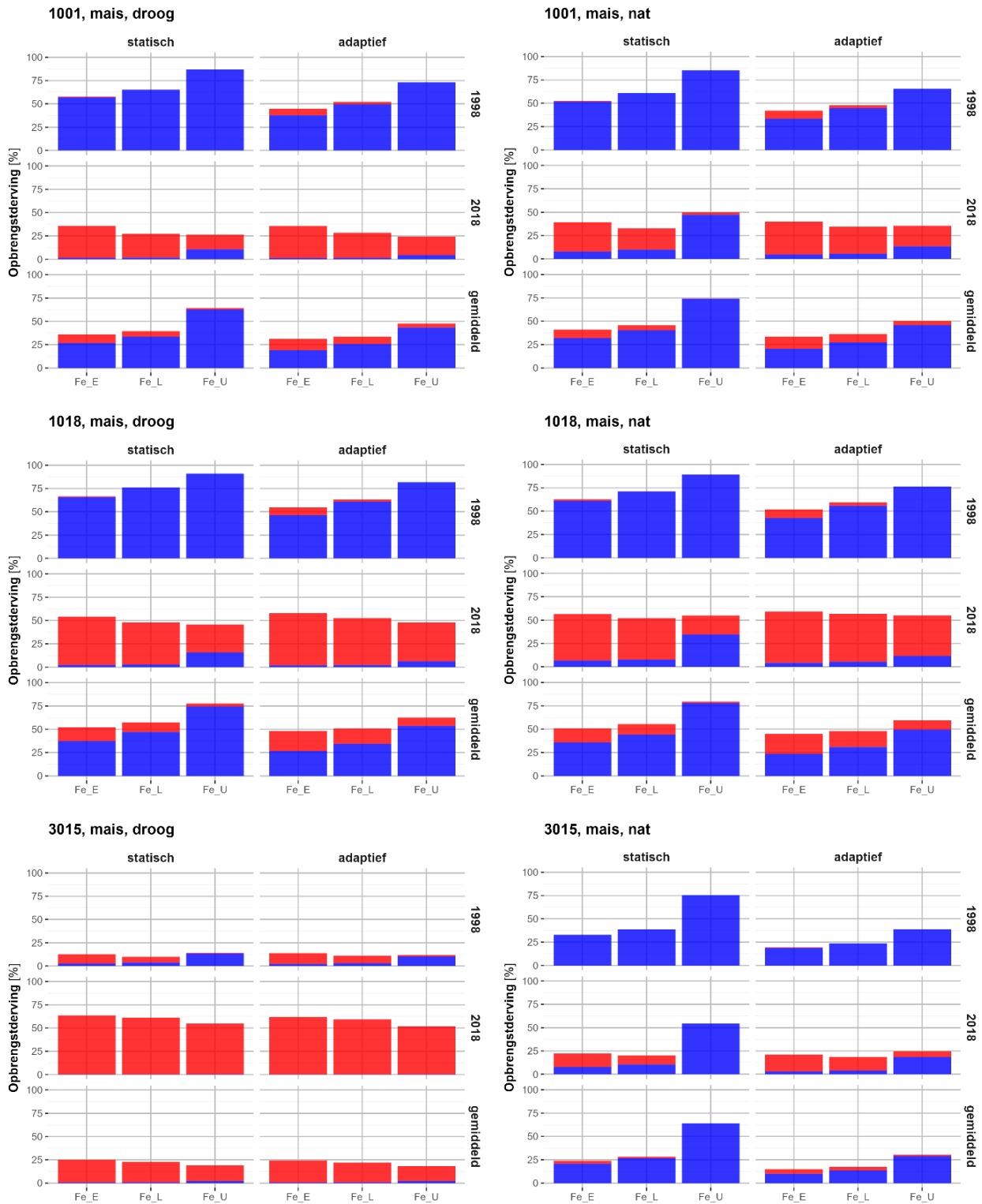
Over het algemeen zien we bij mais vergelijkbare bevindingen als hierboven beschreven bij gras (Figuur 28). Wel zien we bij mais dat de nivellering voor zuurstofstress minder volledig is en dat met name bij initieel uniforme wortelverdelingen de zuurstofstress wat groter uitvalt. Daarom is het advies om initieel te beginnen met een aflopende wortelverdeling, zodat initieel niet veel wortels op grotere diepte aanwezig zijn waar de kans op zuurstofstress het grootst is, hetzij via aanwezigheid ondiep grondwater dan wel via het feit dat het zuurstof-diepte-profiel per definitie afneemt met de diepte.



Figuur 28 Als Figuur 25 voor mais voor de bodem 4001 met relatief grote en relatief kleine grondwaterspiegeldieptes.

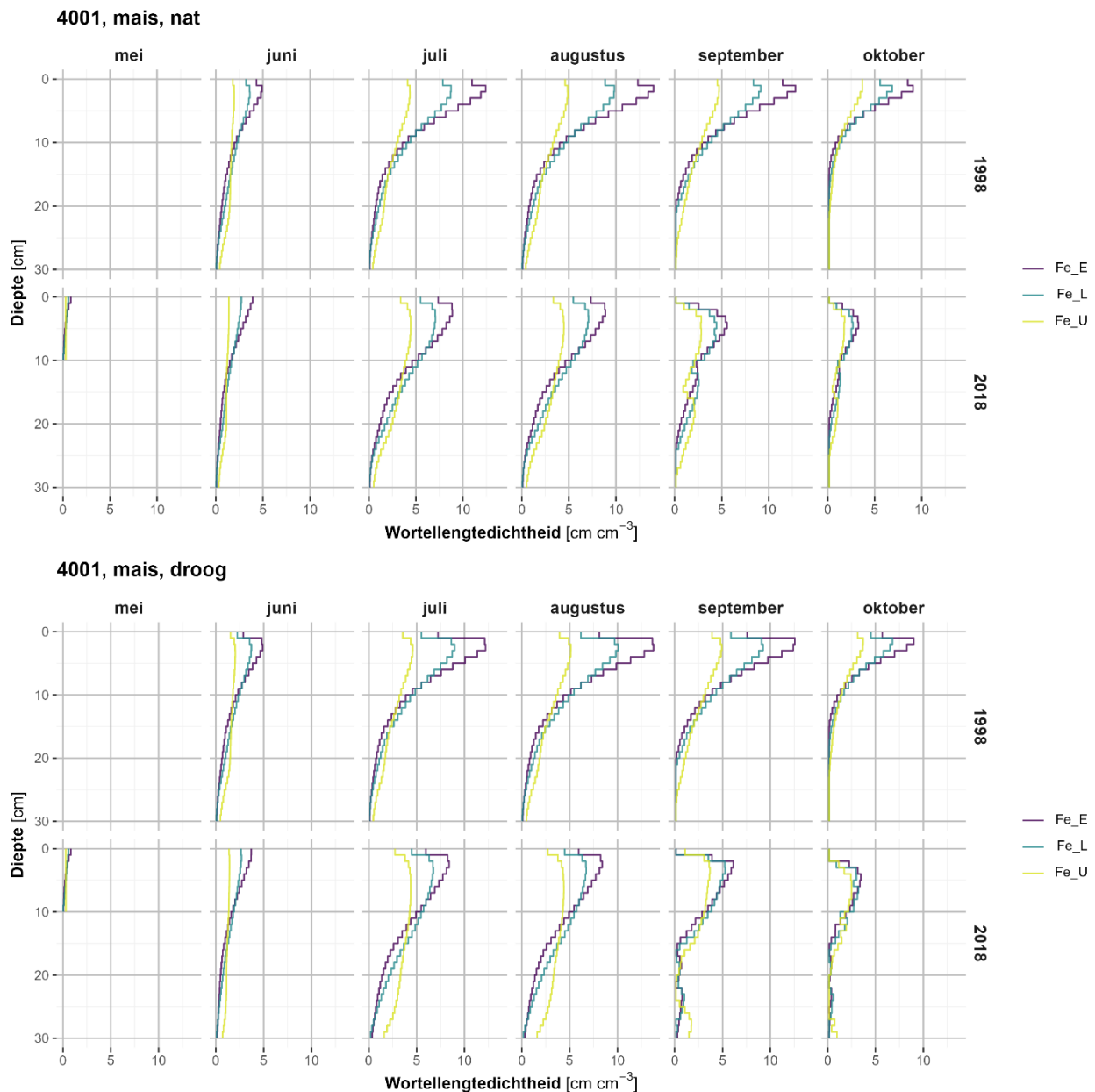
Dat de nivellering bij mais minder volledig is ten opzichte van grasland zien we ook bij de overige bodem- en Gt-combinaties waarvan de resultaten zijn weergegeven in Figuur 29. Dit gedrag is te verklaren aan de hand van de vorming en afsterving van wortelbiomassa. Gras vormt gedurende het groeiseizoen gemiddeld meer wortelbiomassa dan mais. Daarnaast is er bij gras gedurende het gehele groeiseizoen sprake van zowel aangroei als afsterving van wortels. Bij de gewasontwikkeling van mais is dit niet het geval. Bij mais is aan het begin van het groeiseizoen ($DVS < 0.9$) alleen sprake van aangroei van wortelbiomassa en zal de adaptieve wortelverdeling alleen reageren op relatief gunstige omstandigheden in de wortelzone. Later in het groeiseizoen ($DVS > 1.5$) treedt er alleen afsterving op, waardoor de ongunstige omstandigheden in de wortelzone de wortelverdeling beïnvloeden. Vlak voor de bloeiperiode tot aan halverwege de kolfvorming treedt er geen verandering op in de wortelbiomassa en zal dus de wortelverdeling ook niet worden aangepast.

Hiermee wordt duidelijk dat de gesimuleerde gewasontwikkeling (mate van aangroei en afsterving van wortelbiomassa) ook van grote invloed is op het adaptieve vermogen van de wortelverdeling. De mate van aangroei wordt in het WOFOST-model onder andere gestuurd door de verdeling van biomassa (partitionering) over de verschillende gewasonderdelen (ondergrondse delen (wortel) en bovengrondse delen (stam, blad, orgaan)). De verdeling van biomassa gedurende het groeiseizoen wordt hierbij niet beïnvloed door de mate van ondervonden stress. Nader onderzoek hiernaar zal moeten uitwijzen in welke mate de ongunstige omstandigheden de partitionering beïnvloeden en/of daarmee het adaptieve vermogen van de wortelverdeling/ontwikkeling kan worden vergroot.



Figuur 29 Als Figuur 26 voor maïs voor drie BOFEK-eenheden (1001, 1015, 3015) met relatief grote en relatief kleine grondwaterspiegeldieptes.

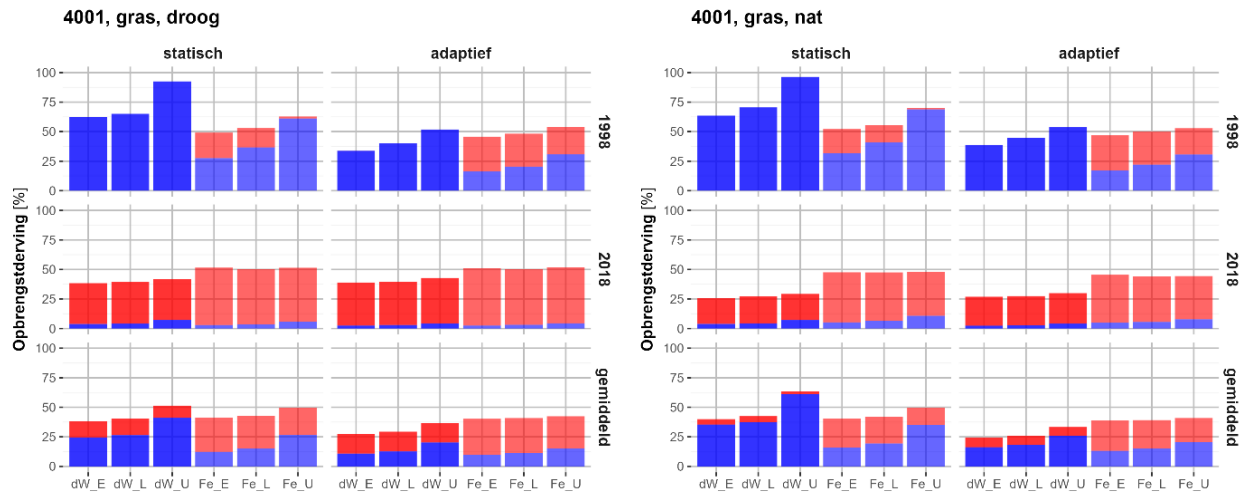
Figuur 30 geeft een voorbeeld van de $L_v(z)$ -verdeling voor bodemprofiel 4001 met een relatief kleine grondwaterspiegeldiepte (Gt II) en een relatief grote grondwaterspiegeldiepte (Gt VII). Hierin worden de verdelingen gegeven op de eerste dag van de maanden mei tot en met oktober voor de dynamische situaties voor een relatief nat jaar (1998) en een droog jaar (2018). Ook bij maïs zien we dat de verdelingen in de loop der tijd meer en meer op elkaar gaan lijken. Maar in tegenstelling tot gras blijft de initieel gekozen wortelverdeling sterker doorwerken.



Figuur 30 Als Figuur 27 voor mais op BOFEK-eenheid 4001.

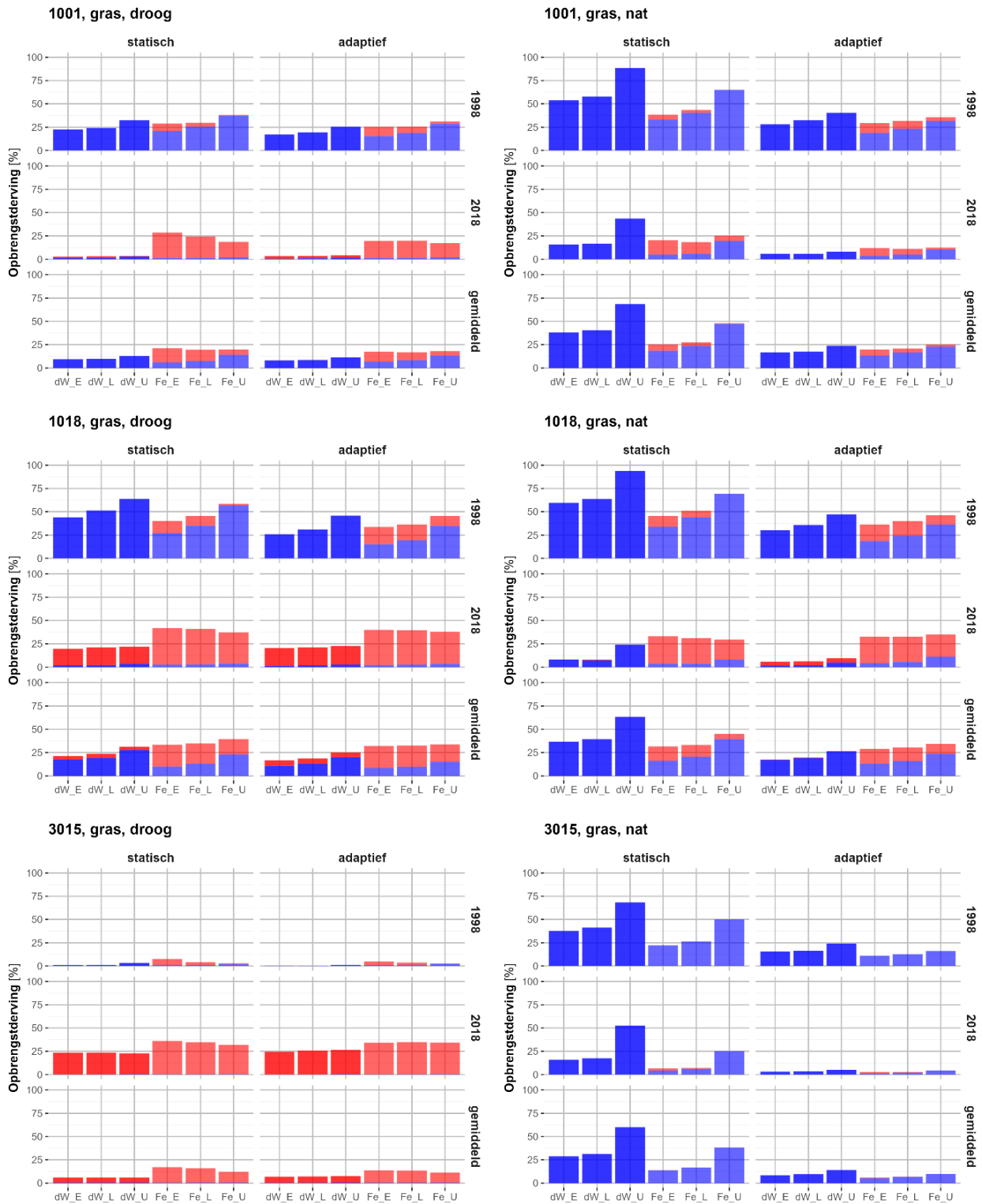
6.4.3 Microscopische wateropname

De waargenomen invloed op de opbrengstderving en de verdeling hiervan over droogtestress en zuurstofstress zoals hierboven voor het macroscopische concept, worden in vergelijkbare mate ook waargenomen wanneer met microscopische wateropname wordt gerekend. Figuur 31 toont de gesimuleerde opbrengstderving voor BOFEK-eenheid 4001 voor gras met relatief diepe en ondiepe grondwaterspiegeldiepte berekend met zowel de macroscopische als de microscopische wateropname. Hierin is te zien dat met de microscopische wateropname minder droogtestress wordt gesimuleerd. Wanneer de opbrengstderving voornamelijk door zuurstofstress wordt veroorzaakt, is er een behoorlijke spreiding in modelresultaten te zien bij een statische wortelverdeling als gevolg van de gekozen initiële wortelverdeling. Bij adaptieve wortelverdeling werkt de initieel gekozen wortelverdeling minder sterk door in de gesimuleerde opbrengstderving.



Figuur 31 Opbrengstreductie volgens zowel de microscopische (dW) als de macroscopische wateropname (Fe) voor BOFEK-eenheid 4001 met gras bij grote en kleine grondwaterspiegeldieptes bij een statische en een dynamische wortelverdeling bij drie initiële wortelverdelingen (*_E: exponentieel; *_L: lineair; *_U: uniform) in een relatief nat jaar (1998), een droog jaar (2018) en het dertigjarige gemiddelde. De totale reductie is opgesplitst in droogtestress (rood) en zuurstofstress (blauw).

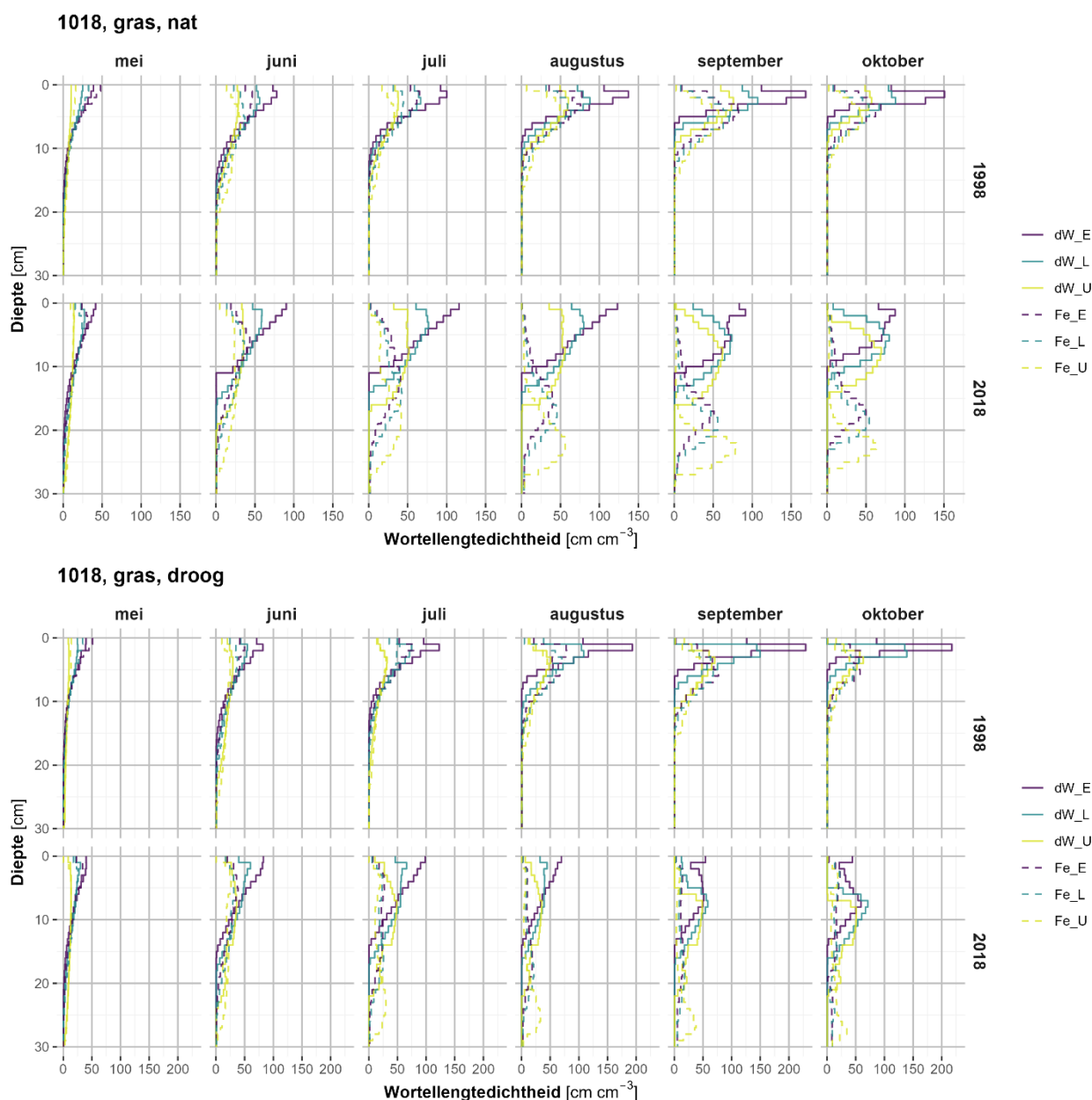
Vergelijkbare resultaten worden verkregen bij de overige bodem- en Gt-combinaties, zie Figuur 32.



Figuur 32 Als Figuur 31 voor de drie BOFEK-eenheden (1001, 1015, 3015) met relatief grote en relatief kleine grondwaterspiegeldieptes.

Wel is het zo dat de wortelverdelingen in sommige gevallen onderling afwijken. Dat heeft alles te maken met het feit dat bij microscopische wateropname sprake is van intrinsieke compensatie. Dit versterkt de aangroei van nieuwe wortels daar waar de opnamecondities het gunstigst zijn. Figuur 33 toont voor BOFEK-eenheid 1018 de gesimuleerde wortelverdeling gedurende het groeiseizoen voor gras onder relatief kleine en grote grondwaterspiegeldieptes. Bij een kleine grondwaterspiegeldiepte in combinatie met een droog jaar zijn de $L_{rv}(z)$ -verdelingen verkregen bij microscopische (dW) en macroscopische (Fe) wateropname duidelijk verschillend. Een complex samenspel van de omstandigheden in de bodem, de ondervonden stress in

wateropname en de daaropvolgende groeireductie bepalen uiteindelijk wat de watervraag is en waar de wortels zich ontwikkelen.



Figuur 33 Wortellengtedichtheid (cm cm^{-3}) als functie van de diepte (cm) op de eerste dag van de maanden mei tot en met oktober voor gras op bodem 1018 met kleine (boven) en grote (onder) grondwaterspiegeldieptes voor dynamische wortelverdeling bij drie initiële wortelverdelingen (Fe_E : exponentieel; Fe_L : lineair; Fe_U : uniform): in een relatief nat jaar (1998) en in een droog jaar (2018).

7 Algemene discussie

7.1 Microscopische wateropname en Jarvis-compensatie

In de basisversie van SWAP met het Feddes-concept voor verdampingsreductie is het mogelijk om achteraf compensatie op transpiratiereductie toe te passen. Hierbij wordt de totale transpiratiereductie (als gevolg van droogtestress, zuurstofstress, zoutstress en vorststress) lineair gecompenseerd volgens Jarvis (zie Kroes et al., 2017). Het ligt dus voor de hand om te stellen dat wanneer de intrinsieke gecompenseerde wateropname volgens de microscopische concepten wordt gehanteerd, een dergelijke achteraf compensatie niet meer opportuun is. Daarom is de combinatie van achteraf compensatie en het gebruik van een van beide microscopische wateropnamemodellen niet toegestaan in de recente SWAP-versie.

Om in de toekomst toch rekening te kunnen houden met compensatie voor zuurstof- of zoutstress, is het aan te bevelen om bij die processen al rekening te houden met mogelijkheden van compensatie. Met andere woorden, compensatie kan het best per proces apart gereguleerd worden.

7.2 Adaptieve wortelverdeling en Jarvis-compensatie

Zoals hierboven is vermeld, kan in de basisversie van SWAP de transpiratiereductie worden gecompenseerd volgens Jarvis. Met de implementatie van een adaptieve wortelverdeling wordt gestuurd door de wateropname daar te laten plaatsvinden waar de omstandigheden gunstig zijn. Ten opzichte van de statische wortelverdeling kan dit gezien worden als een vorm van compensatie. Het lijkt daarmee voor de hand te liggen om het compensatievermogen volgens Jarvis naar beneden bij te stellen indien gerekend wordt met de macroscopische wateropname in combinatie met adaptieve wortelverdeling.

7.3 Microscopische wateropname en zuurstofstress

Naar verwachting kunnen microscopische wateropname en zuurstofstress gezamenlijk beschouwd worden. Wanneer de functionaliteit van hydraulische herverdeling wordt toegestaan bij de microscopische wateropnameberekeningen kan dit in sommige situaties gepaard gaan met onrealistische zuurstofstress (groter dan T_{pot}) en zelfs negatieve actuele transpiratie. Zoals de concepten nu ingebouwd zijn, is er dus sprake van een modelartefact dat opgelost moet worden. De oorzaak is zeer waarschijnlijk toe te schrijven aan situaties waarbij in een laag waar extra water wordt opgenomen (wat gebruikt wordt om in een andere laag weer uit te scheiden), deze opname vervolgens wordt gereduceerd als gevolg van zuurstofstress. Daarmee is de waterbalans met betrekking tot de hydraulische herverdeling niet meer sluitend. Dit probleem moet nader worden uitgezocht. Vooralsnog wordt de combinatie van hydraulische herverdeling en zuurstofstress niet toegestaan in SWAP.

7.4 Discussie

In SWAP-WOFOST is in het verleden een bepaalde werkwijze gevolgd voor het afhandelen van de invloed van stressoren (droogte, zuurstof, zout, vorst). In feite komt het erop neer dat elke stressor afzonderlijk optreedt, waarna deze gesommeerd bepalen wat de totale reductie in wateropname is. Hierbij kan achteraf nog een compensatie (c.f. Jarvis) worden toegepast. Zoals hierboven beschreven, leidt het simpelweg vervangen van het macroscopische wateropnameconcept door het microscopische wateropnameconcept in sommige gevallen tot niet realistisch gedrag. Bovendien is compensatie al geregeld in de microscopische

wateropname, zodat achterafcompensatie volgens Jarvis niet meer opportuun is. In de toekomst zal hiertoe een andere aanpak gekozen moeten worden om de meerdere stressoren tegelijkertijd te laten werken.

Als optie zou dan onderzocht kunnen worden of de volgende aanpak gevolgd kan worden. Het idee van zuurstofstress, zoutstress en eventueel vorststress is dat deze processen ertoe leiden dat er minder water wordt opgenomen. Als modelconcept zou er dan voor gekozen kunnen worden om de 'activiteit' van het wortelsysteem te beïnvloeden door de vooraf geconstateerde zuurstof-, zout- of vorststress. Dat zou gedaan kunnen worden door de microscopische wateropname te berekenen op basis van een effectieve wortellengtedichtheid. Deze is dan gedefinieerd als de werkelijke wortellengtedichtheid, vermenigvuldigd met de reductiefactoren voor zuurstof-, zout- en vorststress. De intrinsieke compensatie in het microscopische wateropnameconcept kan ertoe leiden dat een deel (of het geheel) aan overige stressfactoren wordt opgeheven.

8 Bevindingen en aanbevelingen

In dit rapport is beschreven dat a) twee bestaande microscopische wortelopnameconcepten in SWAP zijn geïmplementeerd, en dat b) een nieuw concept voor dynamische wortelontwikkeling is toegevoegd aan SWAP.

De twee microscopische wateropnameconcepten zijn i) het microscopische concept van De Willigen et al. (De Willigen and Van Noordwijk, 1987, 1991; De Willigen, 1990; Heinen and De Willigen, 1998; 2001; Heinen, 2001; De Willigen et al., 2012; 2017) en ii) het microscopische concept van De Jong van Lier et al. (2013; voortbouwend op De Jong van Lier et al., 2006, 2008). In beide concepten wordt de waterstroming in de bodem naar de wortelwand toe en de wortel in beschouwd. Ze verschillen op enkele details. Vanwege de analogie kon de implementatie via dezelfde geneste, dubbele iteratie worden geïmplementeerd. Uit diverse voorbeeldsimulaties is gebleken dat:

- de wateropname gerealiseerd met beide microscopische concepten in de meeste gevallen groter is dan gesimuleerd met het traditionele macroscopische concept van Feddes;
- de onderlinge verschillen in gesimuleerde wateropname tussen beide microscopische concepten nihil zijn;
- dat beide microscopische concepten vrij ongevoelig zijn voor de nieuw geïntroduceerde parameters. De enige parameter waar beide modellen gevoelig voor kunnen zijn, is de doorlatendheid van de wortelwand indien deze zeer klein is.

Doordat met de microscopische wateropnameconcepten in veel gevallen meer water kan worden opgenomen dan met het macroscopische concept zal er, indien in SWAP-WOFOST met dynamische gewasgroei (WOFOST, GRASS) wordt gerekend, een verschil in gewasontwikkeling ontstaan. Hierdoor zal in de loop der tijd een verschil gaan ontstaan in de berekening van het aandeel van de referentieverdamping dat wordt toegekend aan gewasverdamping (T_{pot}), die is gebaseerd op enkele gewas toestandsvariabelen (LAI, gewashoogte). De referentieverdamping is uiteraard onafhankelijk van de gekozen wateropnameconcepten.

Omdat uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat beide microscopische wateropnameconcepten niet of in zeer geringe mate afhankelijk zijn van de waarden van de invoerparameters, kunnen in veel gevallen standaardwaarden gekozen worden. **Tabel 8** geeft de in dit rapport gebruikte referentiewaarden, die in toekomstige simulaties als uitgangspunt gekozen kunnen worden. Uiteraard kan op basis van aanvullende informatie (literatuur, metingen) besloten worden om hiervan af te wijken.

Tabel 8 Referentiewaarden parameters voor de twee microscopische concepten.

dW	Referentie	dJvL	Referentie
R_0 (cm)	0.05	R_0 (cm) [#]	0.05
		R_x (cm) [#]	0.02
		a (-)	0.53
K_r (cm d ⁻¹)	$3.5 \cdot 10^{-6}$	K_r (cm d ⁻¹)	$3.5 \cdot 10^{-6}$
a_0 (d ⁻¹)	$3.1844 \cdot 10^{-5}$	L_1 (d ⁻¹)	$1.0 \cdot 10^{-4}$
a_1 (cm ⁻¹)	$1.7768 \cdot 10^{-4}$		
$h_{L,1,2}$ (cm)	-16600	$h_{L,1,2}$ (cm)	-16600
p (-)	7	p (-)	7

#: omdat R_x per definitie kleiner moet zijn dan R_0 , is ervoor gekozen om bij verandering van R_0 de waarde van R_x mee te veranderen volgens $R_x = 0.4R_0$, waarbij 0.4 de verhouding is van de referentiewaarden ($0.4 = 0.02/0.05$).

Bij dynamische wortelontwikkeling wordt nieuwe wortelbiomassa vooral daar aan de bestaande wortelbiomassa toebedeeld waar geen (of de meest geringe) transpiratiereductie wordt gesimuleerd, en eventuele afsterving van wortels zal plaatsvinden daar waar de meeste transpiratiereductie plaatsvindt. De mate waarin de plant dit dynamische karakter kan uiten, is deels te sturen met een factor tussen de waarde 0 (geen dynamische wortelverdeling) en 1 (volledige dynamische wortelverdeling). Een belangrijk voordeel

van toepassing van dynamische wortelverdeling is dat de wortelverdelingen die in de loop der tijd gaan ontstaan, zich relatief onafhankelijk ontwikkelen van de door de gebruiker opgegeven initiële verdelingsfunctie. Wanneer gekozen wordt om uit te gaan van een initiële uniforme (blok)verdeling, dan bestaat de kans dat er relatief veel wortels onder in de wortelzone ontstaan. Zeker bij relatief ondiepe grondwaterspiegeldieptes leidt dit tot een groot aandeel zuurstofstress. Daarom wordt afgeraden om met een initiële uniforme verdeling te starten. De dynamische wortelverdeling is toepasbaar in combinatie met zowel de macroscopische als de microscopische wateropnameconcepten.

Aanbevelingen

In het verleden was er mogelijk sprake van weinig extreme neerslagtekorten tijdens een groeiseizoen. In dergelijke gevallen is er vaak sprake van beperkte droogtestress en heeft een macroscopisch wateropnameconcept redelijk kunnen functioneren. In huidige en toekomstige situaties is de kans op langdurige neerslagtekorten tijdens het groeiseizoen groter. In dergelijke gevallen wordt het steeds belangrijker om het proces van wateropname beter te begrijpen en te conceptualiseren. Daarom is het beter om in de toekomst wateropname in SWAP-WOFOST-simulaties uit te voeren met het microscopische concept.

Het is goed om te melden dat de modelconcepten voor microscopische wateropname en microscopische zuurstofopname volgens Bartholomeus et al. (2008) (zoals reeds geïmplementeerd in SWAP-WOFOST) beide geënt zijn op dezelfde uitgangspunten zoals beschreven in De Willigen and Van Noordwijk (1987). Wanneer zowel wateropname als zuurstofopname in SWAP-WOFOST via deze microscopische concepten worden beschouwd, wordt daarmee consistentie verkregen in de manier waarop de opname van water en zuurstof door wortels wordt beschreven. In de toekomst kan ook nutriëntenopname via een analoog concept (De Willigen and Van Noordwijk, 1987; 1994a,b) worden beschouwd.

Bij het verschijnen van dit rapport is de implementatie van de microscopische wateropname in SWAP-WOFOST gerealiseerd en deze functioneert goed in situaties waar alleen naar droogtestress wordt gekeken. Wanneer voor toepassingen, zoals in Waterwijzer Landbouw, gelijktijdig naar droogte- en zuurstofstress gekeken moet worden, dient eerst verder uitgezocht te worden hoe meerdere stressoren (droogte-, zuurstof-, zout-, vorststress) gelijktijdig beschouwd kunnen worden. Wanneer dat is gerealiseerd, kan in toekomstige Waterwijzer Landbouw-applicaties of in andere studies gebruikgemaakt worden van de microscopische wateropnameconcepten. Een mogelijke uitwerking kan zijn door eerst per rekenlaagje voor alle overige stressoren (zuurstof, zout, vorst) reductiefracties vast te stellen en deze vervolgens te gebruiken om een effectieve wortellengtedichtheid (= werkelijke wortellengtedichtheid maal de genoemde reductiefracties) te berekenen die dan gebruikt wordt om de microscopische wateropname uit te rekenen.

Daarnaast zijn er nog enkele overige aanbevelingen voor toekomstige aanpassingen dan wel verbeteringen in SWAP:

- Microscopische wateropnamemodellen uitbreiden met zoutstress: wateropname wordt dan beschreven op basis van een verschil in drukhoogte plus een verschil in osmotische potentiaal (gebaseerd op Dalton et al., 1975 en zoals geïmplementeerd in FUSSIM2 beschreven in Heinen and De Willigen, 1998). Hiermee wordt dan gelijktijdig intrinsiek gecompenseerd voor water- en zoutstress.
- Ter discussie: beide microscopische wateropnamemodellen samenvoegen tot één enkelvoudige (nieuwe) versie waarbij onderlinge sterke eigenschappen worden gecombineerd.
- Microscopische wateropname uitbreiden met een wortelgeleidbaarheid voor uittredend water die afwijkt (kleiner) van de wortelgeleidbaarheid voor wateropname (gereguleerde hydraulische herverdeling). Bijvoorbeeld: $K_{r,out} = f \cdot K_{r,in}$, waarbij f ligt tussen 0 (geen hydraulische verdeling toegestaan) en 1 (volledige hydraulische herverdeling toegestaan).
- Zorgen voor goede afstemming van gewasinvoergegevens die in verschillende deelprocessen (gewasgroei, wortelverdeling, zuurstofstress, microscopische wateropname) worden beschouwd. Hierbij moet voorkomen worden dat verschillende invoerwaarden voor dezelfde grootte worden gebruikt.
- Nader onderzoek naar adaptief vermogen van de wortelverdeling door de partitionering van ondergrondse en bovengrondse gewasonderdelen te beïnvloeden. Hierbij ook aandacht voor aangroei en afsterving van wortelbiomassa bij akkerbouwgewassen gedurende het gehele groeiseizoen.

Literatuur

- Baker, J.M. and C.H.M. van Bavel. 1986. Resistance of Plant Roots to Water Loss. *Agronomy Journal* 78: 641-644.
- Baker, J.M. and C.H.M. van Bavel. 1988. Water Transfer through Cotton Plants Connecting Soil Regions of Differing Water Potential. *Agronomy Journal* 80: 993-997.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam and R. Aerts. 2008. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology*, 360: 147-165. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.029>.
- Bouten, W., T.J. Heimovaara and A. Tiktak. 1992. Spatial patterns of throughfall and soil water dynamics in a Douglas fir stand. *Water Resources Research* 28: 3227-3233. doi: 10.1029/92WR01764.
- Campbell, G.S. 1985. *Soil physics with BASIC*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Campbell, G.S. 1991. Simulation of water uptake by plant roots, in: Hanks J., Ritchie J.T. (Eds.), *Modeling Plant and Soil Systems*, Agronomy Monograph 31, ASA CSSA SSSA, Madison, WI, pp. 273-285.
- Dalton, F.N., P.A.C. Raats and W.R. Gardner. 1975. Simultaneous uptake of water and solutes by plant roots. *Agronomy Journal* 67: 334-339.
- de Jong van Lier, Q., D. Dourado Neto and K. Metselaar. 2009. Modeling of transpiration reduction in van Genuchten-Mualem type soils. *Water Resources Research*, 45(2), W02422. doi:10.1029/2008wr006938.
- de Jong van Lier, Q., K. Metselaar and J.C. van Dam. 2006. Root water extraction and limiting soil hydraulic conditions estimated by numerical simulation. *Vadose Zone Journal* 5:1264-1277. doi:10.2136/vzj2006.0056.
- de Jong van Lier, Q., J.C. van Dam, K. Metselaar, R. de Jong and W.H.M. Duijnisveld. 2008. Macroscopic Root Water Uptake Distribution Using a Matric Flux Potential Approach. *Vadose Zone Journal*, 7(3), 1065-1078. doi:10.2136/vzj2007.0083.
- de Jong van Lier, Q., J.C. van Dam, A. Durigon, M.A. dos Santos and K. Metselaar. 2013. Modeling Water Potentials and Flows in the Soil-Plant System Comparing Hydraulic Resistances and Transpiration Reduction Functions. *Vadose Zone Journal*, doi:10.2136/vzj2013.02.0039.
- de Melo, M.L.A. and Q. de Jong van Lier. 2021. Revisiting the Feddes reduction function for modeling root water uptake and crop transpiration. *Journal of Hydrology* 603: 126952. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126952>.
- de Willigen, P. 1990. Calculation of uptake of nutrients and water by a root system. Nota 210. DLO Inst. for Soil Fertility Research, Haren, the Netherlands. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/200738>.
- de Willigen, P. and M. van Noordwijk. 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural Univ., Wageningen, the Netherlands. Available at: <https://edepot.wur.nl/202228>.
- de Willigen, P. and M. van Noordwijk. 1991. Modelling nutrient uptake: From single roots to complete root systems. In: F.W.T. Penning de Vries et al., editors, *Simulation and systems analysis for rice production (SARP): Selected papers presented at workshops on crop simulation of a network of national and international research centres of several Asian countries and the Netherlands, 1990-1991*. PUDOC, Wageningen, the Netherlands. p. 277-295.
- de Willigen, P. and M. van Noordwijk 1994a. Mass flow and diffusion of nutrients to a root with constant or zero-sink uptake I. Constant uptake. *Soil Science* 157: 162-170.
- de Willigen, P. and M. van Noordwijk. 1994b. Mass flow and diffusion of nutrients to a root with constant or zero-sink uptake II. Zero-sink uptake. *Soil Science* 157: 171-175.
- de Willigen, P., M. Heinen and M.B. Kirkham. 2005. 70: Transpiration and Root Water Uptake. In: M.G. Anderson (ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, part 6 Soils, pp. 1055-1068. <https://onlinelibrary.wiley.com/browse/book/10.1002/0470848944/toc>.
- de Willigen, P., M. Heinen and M. van Noordwijk. 2017. Roots partially in contact with soil: Analytical solutions and approximation in models of nutrient and water uptake. *Vadose Zone Journal* 17:170060. doi:10.2136/vzj2017.03.0060.

-
- de Willigen, P., J.C. van Dam, M. Javaux and M. Heinen, 2011. Comparison of the root water uptake term of four simulation models. Alterra-rapport 2206. Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/183284>.
- de Willigen, P., J.C. van Dam, M. Javaux and M. Heinen. 2012. Root Water Uptake as Simulated by Three Soil Water Flow Models. *Vadose Zone Journal* doi:10.2136/vzj2012.0018.
- dos Santos, M.A., Q. de Jong van Lier, J.C. van Dam and A.H.F. Bezerra. 2017. Benchmarking test of empirical root water uptake models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21: 473–493. doi:10.5194/hess-21-473-2017.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen. Available at: <https://edepot.wur.nl/168026>.
- Heinen, M. 2001. FUSSIM2: Brief description of the simulation model and application to fertigation scenarios. *Agronomie* 21:285–296. doi:10.1051/agro:2001124.
- Heinen, M. 2014. Compensation in Root Water Uptake Models Combined with Three-Dimensional Root Length Density Distribution. *Vadose Zone Journal*, 13, doi:10.2136/vzj2013.08.0149.
- Heinen, M. and G. Bakker. 2016. Implications and Application of the Raats Superclass of Soils Equations. *Vadose Zone Journal* 15(8), doi:10.2136/vzj2016.02.0012.
- Heinen, M. and P. de Willigen. 1998. FUSSIM2 A two-dimensional simulation model for water flow, solute transport and root uptake of water and nutrients in partly unsaturated porous media, Quantitative Approaches in Systems Analysis No. 20, DLO Research Institute for Agrobiology and Soil Fertility and the C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology, Wageningen, The Netherlands, 140 p. <https://edepot.wur.nl/4408>.
- Heinen M. and P. de Willigen. 2001. FUSSIM2 version 5. New features and updated user's guide. Alterra rapport 363, Alterra, Wageningen, the Netherlands. <https://edepot.wur.nl/41784>.
- Heinen, M., H.M. Mulder, G. Bakker, J.H.M. Wösten, F. Brouwer, K. Teuling and D.J.J. Walvoort. 2022. The Dutch soil physical units map: BOFEK. *Geoderma* 427, 116123, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116123>.
- Heinen, M., F. Brouwer, K. Teuling en D. Walvoort. 2021. BOFEK 2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland. Update bodemfysische eenhedenkaart. WENR rapport 3056, Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/541544>.
- Iden, S. and W. Durner. 2014. Comment to "Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range" by A. Peters. *Water Resources Research* 50: 7530–7534.
- Jackson, R.B., J.S. Sperry and T.E. Dawson. 2000. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science* 5(11): 482-488. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01766-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01766-0).
- Jarvis, N.J. 1989. A simple empirical model of root water uptake. *Journal of Hydrology* 107: 57-72.
- Jarvis, N.J. 2011. Simple physics-based models of compensatory plant water uptake: concepts and eco-hydrological consequences. *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 3431-3446.
- Jasechko, S., Z.D. Sharp, J.J. Gibson, S.J. Birks, Y. Yi and P.J. Fawcett. 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496: 347-350. <https://doi.org/10.1038/nature11983>.
- Kremer, C., C.O. Stöckle, A.R. Kemanian and T. Howell. 2008. A canopy transpiration and photosynthesis model for evaluating simple crop productivity models. In: L.R. Ahuja et al. (eds.), *Response of crops to limited water: Understanding and modeling water stress effects on plant growth processes*. Advances in Agricultural Systems Modeling 1. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit and P.E.V. van Walsum. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands. Available at: <https://edepot.wur.nl/416321>, <https://swap.wur.nl/>.
- Li, K.Y., R. de Jong and J.B. Boisvert. 2001. An exponential root-water-uptake model with water stress compensation. *Journal of Hydrology* 252: 189–204.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12: 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.
- Michel, N. and M. Stoitsov. 2008. Fast computation of the Gauss hypergeometric function with all its parameters complex with application to the Pöschl-Teller-Ginocchio potential wave functions. *Computer Physics Communications* 178 (7): 535-551. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.11.007>.
- Molz, F. and I. Remson. 1970. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resources Research*, 6: 1346–1356.

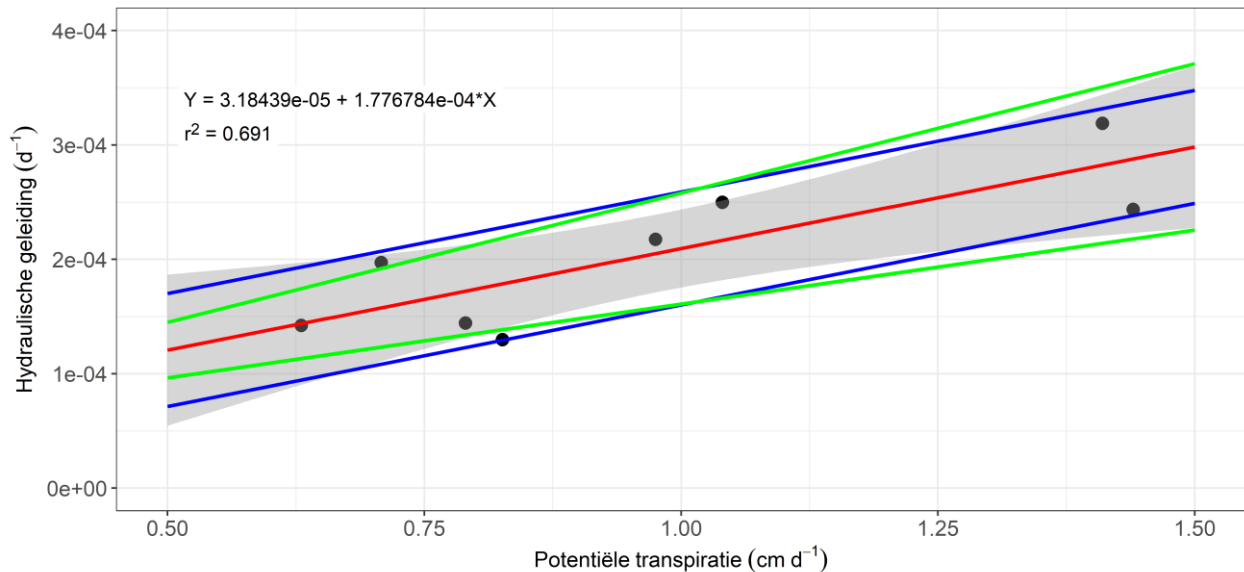
- Novick, K.A., D.L. Ficklin, D. Baldocchi, K.J. Davis, T.A. Ghezzehei, A.G. Konings, N. MacBean, N. Raoult, R.L. Scott, Y. Shi, B.N. Sulman and J.D. Wood. 2022. Confronting the water potential information gap. *Nature Geoscience* 15: 158–164. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00909-2>.
- Oliveira, M.R.G., M. van Noordwijk, S.R. Gaze, G. Brouwer, S.Bona, G. Mosca and K. Hairah. 2000. Auger Sampling, Ingrowth Cores and Pinboard Methods. In: A.L. Smit, A.G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin and S.C. van de Geijn, *Root Methods. A Handbook*. Chapter 6, pp. 175-201. Springer. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-04188-8>.
- Peters, A. 2013. Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resources Research* 49: 6765–6780.
- Peters, A. 2014. Reply to comment by S. Iden and W. Durner on Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resources Research* 50: 7535–7539.
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery. 1992. *Numerical Recipes in Fortran 77. The art of scientific computing*, second edition. Cambridge University Press.
- Raats, P.A.C. 1970. Steady infiltration from line sources and furrows. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 709-714. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400050015x>.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1: 318-333.
- Rothfuss, Y. and M. Javaux. 2016. Isotopic approaches to quantifying root water uptake and redistribution: a review and comparison of methods. *Biogeosciences Discussion*, doi:10.5194/bg-2016-410.
- Schapendonk, A.H.C.M., W. Stol, D.W.G. van Kraalingen and B.A.M. Bouman. 1996. Description of LINGRA. In: B.A.M. Bouman, A.H.C.M. Schapendonk, W. Stol, D.W.G. van Kraalingen (eds.), *Description of the growth model LINGRA as implemented in CGMS*, pp. 11-22. *Quantitative Approaches in Systems Analysis No. 7*, DLO Research Institute for Agrobiological Sciences and the CT. de Wit Graduate School for Production Ecology, Wageningen. Available at: <https://edepot.wur.nl/336784>.
- Selim, H. and I. Iskandar. 1978. Nitrogen behavior in land treatment of wastewater: A simplified model. *State of Knowledge in Land Treatment of Wastewater*, 1: 171–179.
- Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai and M.Th. van Genuchten. 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, version 4.08. Department Of Environmental Sciences, University Of California Riverside, Riverside, California. Available at: https://www.pc-progress.com/Downloads/Pgm_hydrus1D/HYDRUS1D-4.08.pdf.
- Smit, A.L., E. George and J. Groenwold. 2000. Root observations and measurements at (transparent) interfaces with soil. In: A.L. Smit, A.G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin and S.C. van de Geijn, *Root Methods. A Handbook*. Chapter 8, pp. 235-271. Springer. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-04188-8>.
- Spek, Th. 1988. *Bodemverdichting onder grasland. Een verkennend onderzoek naar de invloed van bodemverdichting op de bewortelingsintensiteit en wortelmorfologie van een cultuurgrasland*. Doctoraal Thesis, Landbouwniversiteit, Wageningen.
- Stofberg, S.F. en R. Bartholomeus. 2018. *Parameterisatie Zuurstofstress*. Memo gericht aan Werkgroep Waterwijzer Landbouw. KWR, Nieuwegein.
- Thomas, A., B.K. Yadav and J. Šimůnek. 2020. Root water uptake under heterogeneous soil moisture conditions: an experimental study for unraveling compensatory root water uptake and hydraulic redistribution. *Plant Soil* 457: 421-435. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04738-3>.
- Tzohar, D., M. Moshelion and A. Ben-Gal. 2021. Compensatory hydraulic uptake of water by tomato due to variable root-zone salinity. *Vadose Zone Journal* 20(6): e20161. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20161>.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(3): 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
- van Noordwijk, M., G. Brouwer, F. Meijboom, M. do Rosario G. Oliveira and A.G. Bengough. 2000. Trench profile techniques and core break methods. In: A.L. Smit, A.G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin and S.C. van de Geijn, *Root Methods. A Handbook*. Chapter 7, pp. 211-233. Springer. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-04188-8>.
- Werkgroep Waterwijzer Landbouw. 2018. *Waterwijzer Landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie*. Rapport 2018-48, Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), Amersfoort. Beschikbaar via:

<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202018/STOWA%202018-48%20WWL%20defversie.pdf>.

Zhuang, J., K. Nakayama, G.-R. Yu and T. Urusjisaki. 2001. Estimation of root water uptake of maize: An ecological perspective. *Field Crops Research* 69:201– 213. doi:10.1016/S0378-4290(00)00142-8.

Bijlage 1 Relatie Zhuang et al. (2001)

Zhuang et al. (2001) geven gemeten *conductance* (hydraulische geleiding) van mais als functie van de potentiële transpiratie. Hiervoor is een gemiddeld lineair verband afgeleid, zoals getoond in Figuur B1.1. Op basis van de standaardfouten voor de schattingen van het intercept en de helling, zijn onder- en bovengrensrelaties berekend die als minimum en maximum gebruikt zijn in de gevoeligheidsanalyse (Tabel B1.1).



Figuur B1.1 Relatie hydraulische geleiding van de plant als functie van de potentiële transpiratie.

Symbolen: gemeten data uit Zhuang et al. (2001); rode lijn: lineaire regressie door de meetpunten: $y = a_0 + a_1 \cdot x$; grijs gearceerd gebied: 95% betrouwbaarheidsinterval rondom de rode lineaire regressielijn; blauwe lijnen: relaties waarbij intercept a_0 is aangepast: $a_0 + se(a_0)$ en $a_0 - se(a_0)$; groene lijnen: relaties waarbij helling a_1 is aangepast: $a_1 + se(a_1)$ en $a_1 - se(a_1)$; se : standard error van de schatting van de betreffende parameters a_0 of a_1 (zie ook Tabel B3.1).

Tabel B1.1 Intercept en helling van de lineaire relatie uit Figuur B3.1 met bijbehorende standaardfout, t - en Pr -waarden.

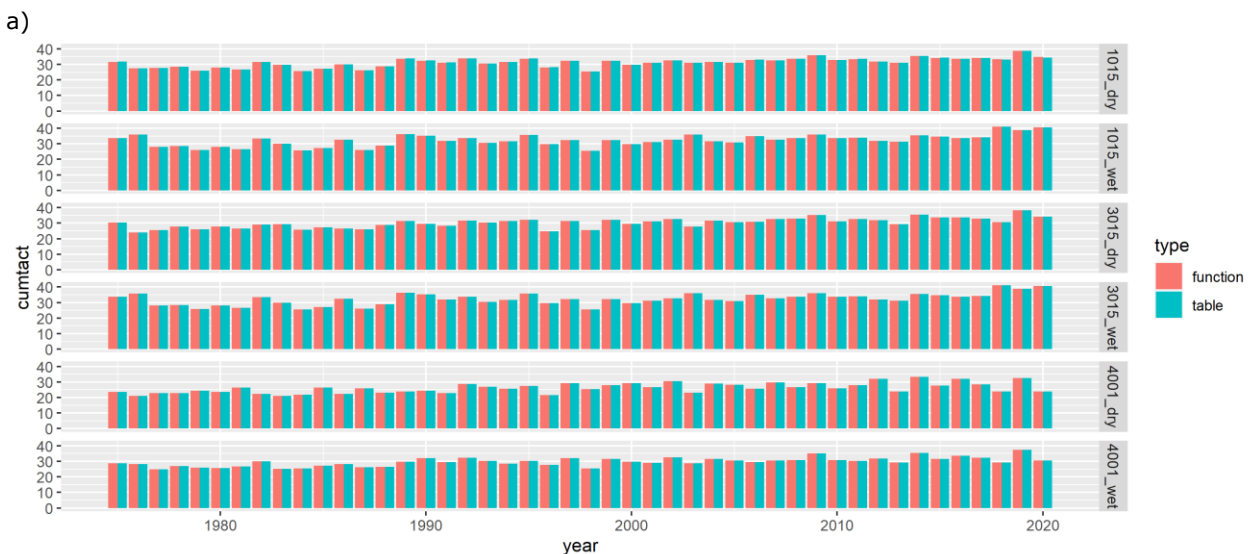
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	3.18439e-05	4.94099e-05	0.6445	0.5431
Helling	1.77678e-04	4.85132e-05	3.6625	0.0105

Bijlage 2 Vergelijking uitkomsten met M analytisch berekend of geïnterpoleerd uit een tabel

In Figuur B2.1 worden achtereenvolgens de jaarlijkse cumulatieve actuele transpiratie, de jaarlijkse cumulatieve reductie in wateropname als gevolg van droogte, de jaarlijkse transpiratiereductie (T_{act}/T_{pot}) en de gesimuleerde gemaaide grasopbrengst weergegeven voor de jaren 1975-2020 voor drie BOFEK2020-eenheden (1015, 3015, 4001) bij twee grondwaterregimes (VI: relatief droog; IV: relatief nat). Per jaar worden twee uitkomsten gegeven: een waarbij M is berekend volgens een analytische functie en een waarbij M is berekend via lineaire interpolatie uit een vooraf berekende tabel.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de optie om M via een tabel te berekenen vrijwel identieke resultaten oplevert als wanneer deze volgens de analytische functie wordt berekend.

Het voordeel van simuleren op basis van de 'tabeloptie' ten opzichte van de 'analytische functieoptie' is dat de simulaties met de 'tabeloptie' vele malen sneller gaat; zeker >10 keer zo snel (NB Voor veengrond met Gt VI was dit verschil extreem veel groter: bijna een factor 100). Simulatie van 46 jaar ging voor de zes cases met 'tabeloptie' in 48-68 seconden. Ter vergelijking: simulatie met gecompenseerde Feddes-reductie duurt ongeveer 33 seconden. Uiteraard kost het extra rekentijd om het iteratieve microscopische wateropnameproces te simuleren.

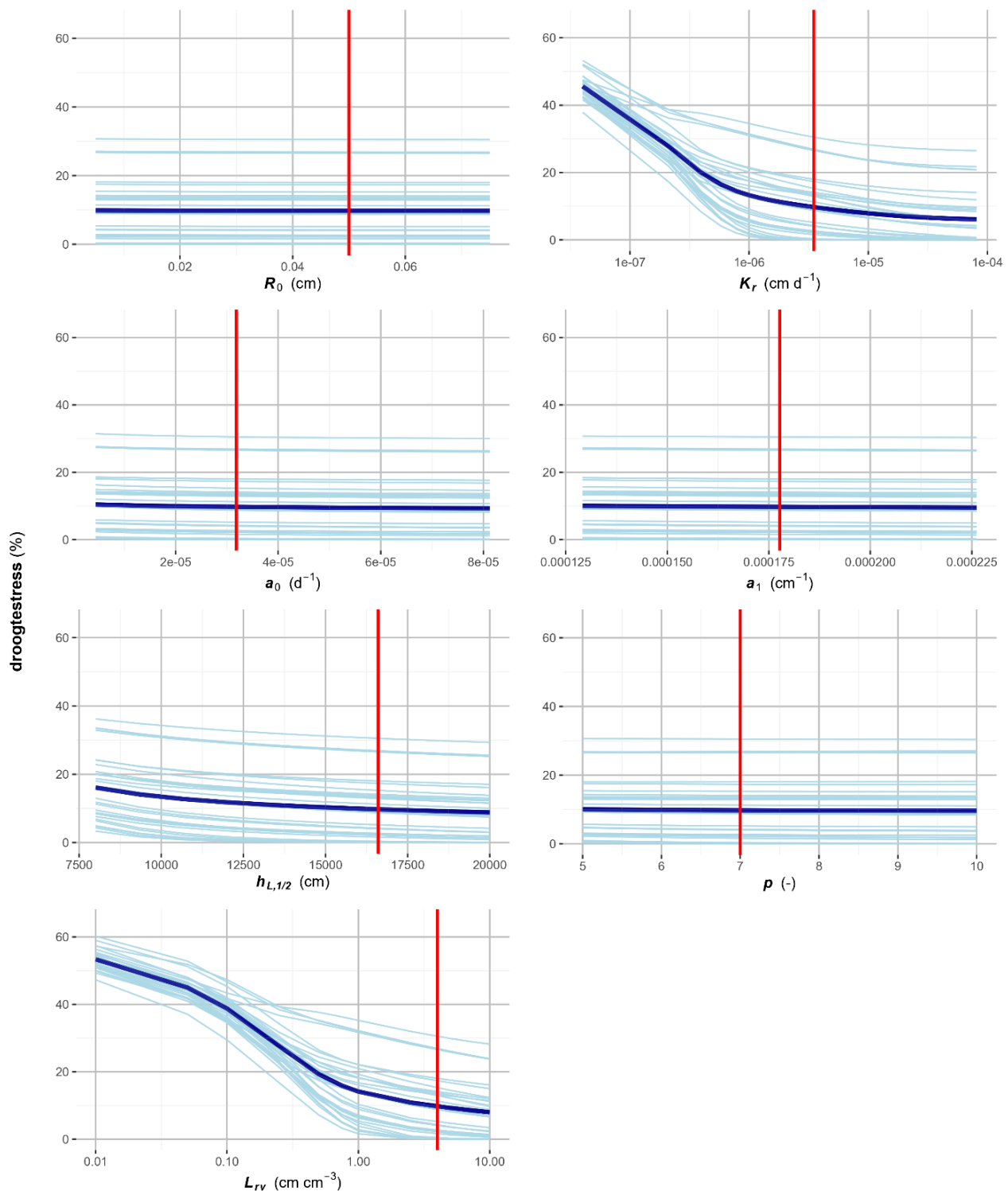




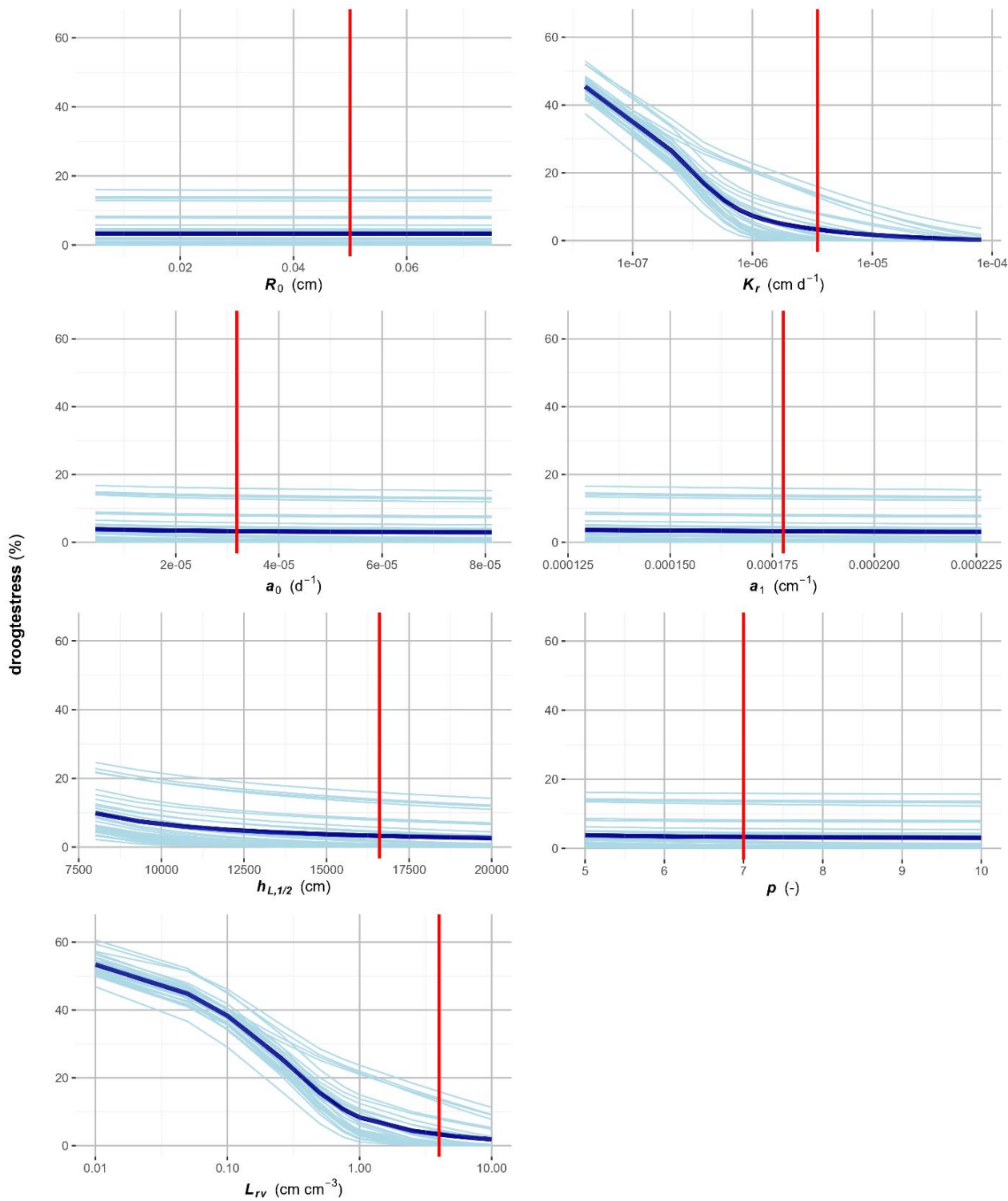
Figuur B2.1 De jaarlijkse cumulatieve actuele transpiratie, de jaarlijkse cumulatieve reductie in wateropname als gevolg van droogte, de jaarlijkse transpiratiereductie (T_{act}/T_{pot}) en de gesimuleerde gemaaide grasopbrengst weergegeven voor de jaren 1975-2020 voor drie BOFEK2020-eenheden (1015, 3015, 4001) bij twee grondwaterregimes (VI: relatief droog; IV: relatief nat). Per jaar worden twee uitkomsten gegeven: een waarbij M is berekend volgens een analytische functie en een waarbij M is berekend via lineaire interpolatie uit een vooraf berekende tabel.

Bijlage 3 Resultaten gevoeligheidsanalyse

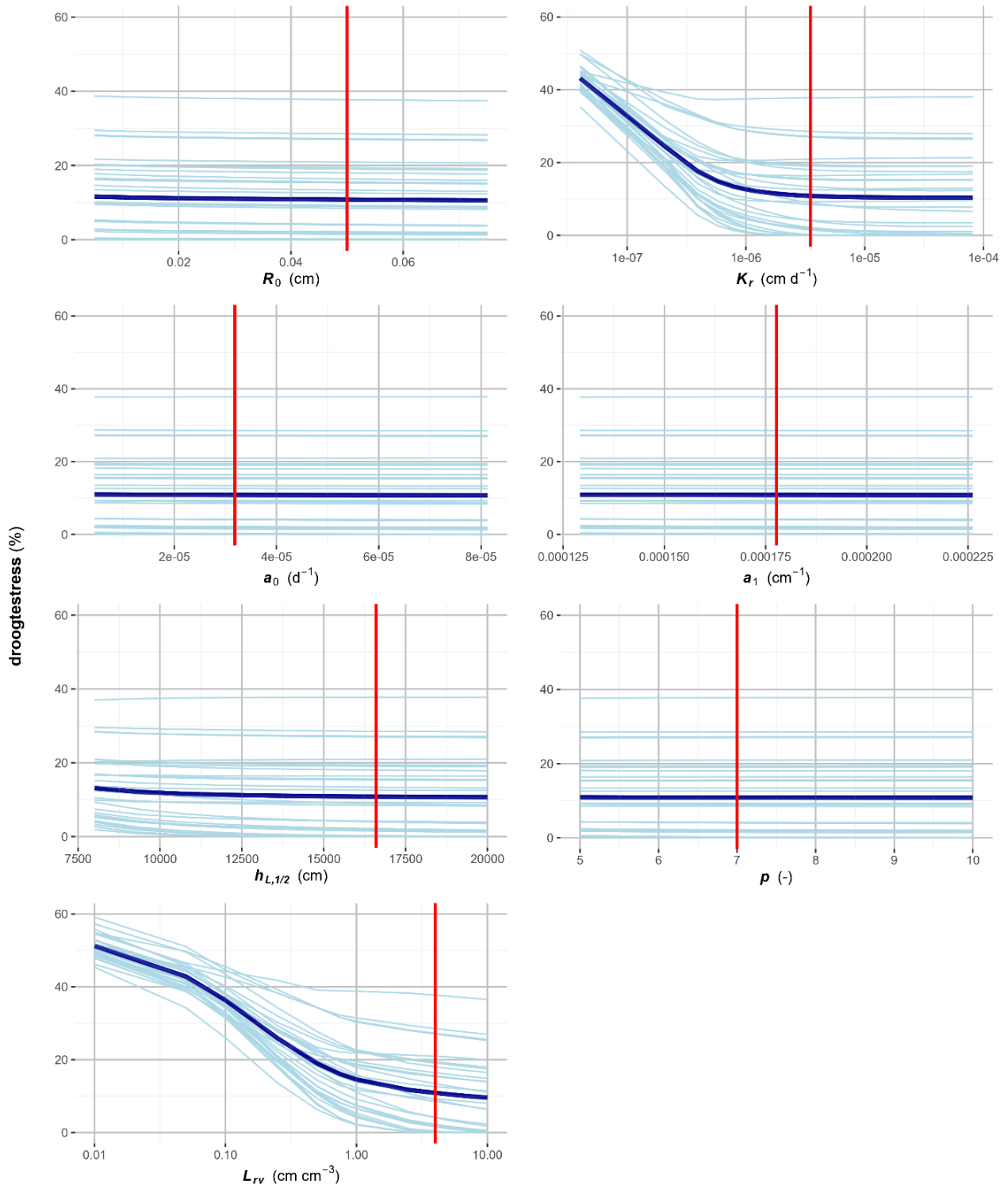
In hoofdstuk 4 zijn in Figuur 21 en Figuur 22 voorbeelden gegeven van de gevoeligheden per microscopische modelparameter voor een zandgrond met relatief grote grondwaterspiegeldieptes. Hier worden alle figuren voor de BOFEK2020-eenheden 1105, 3015 en 4001 met relatief kleine (Gt II) en grote (Gt VI) grondwaterspiegeldieptes gegeven, zonder nadere toelichting.



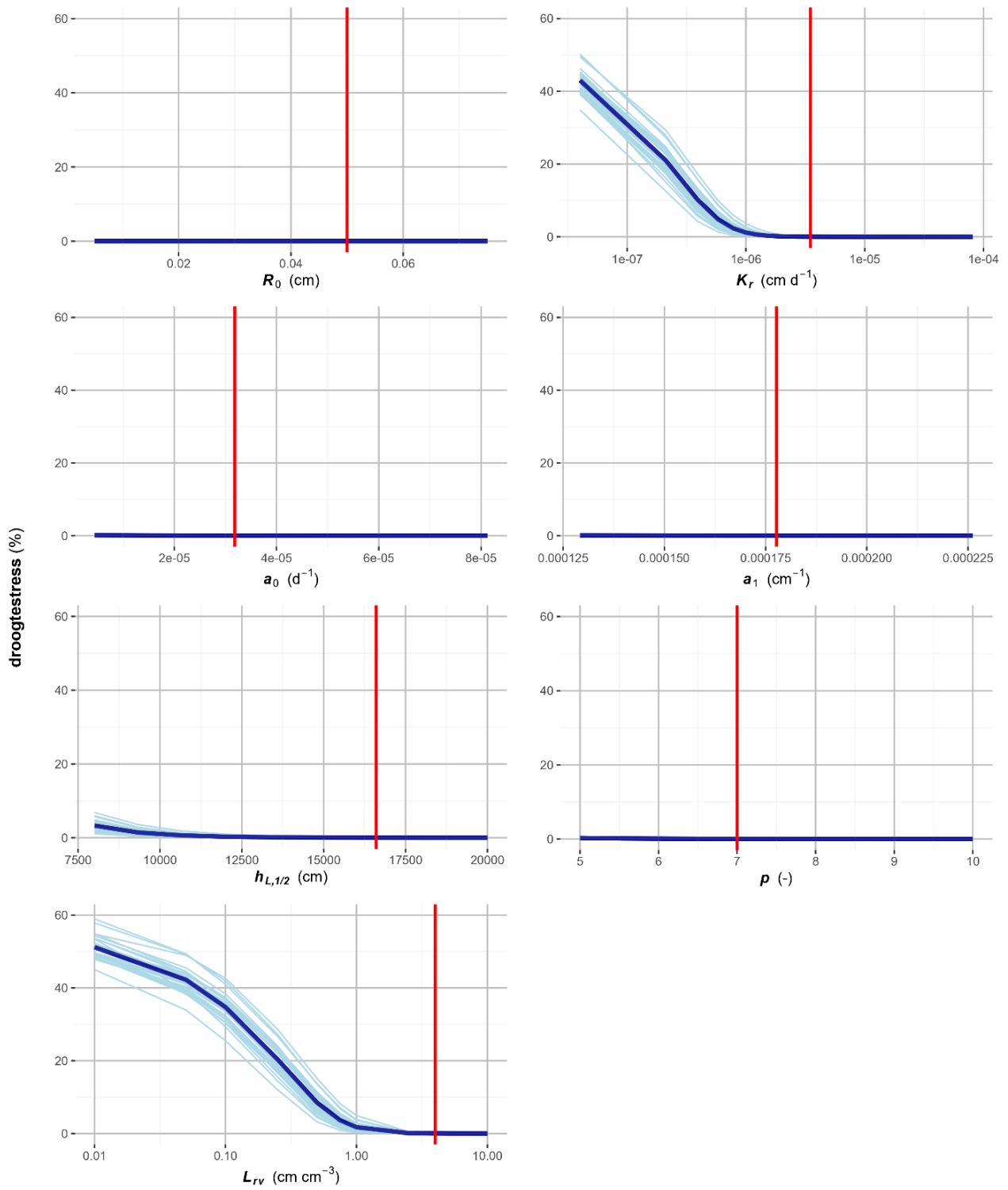
Figuur B3.1 Microscopisch model *dW*; 1015, Gt VI.



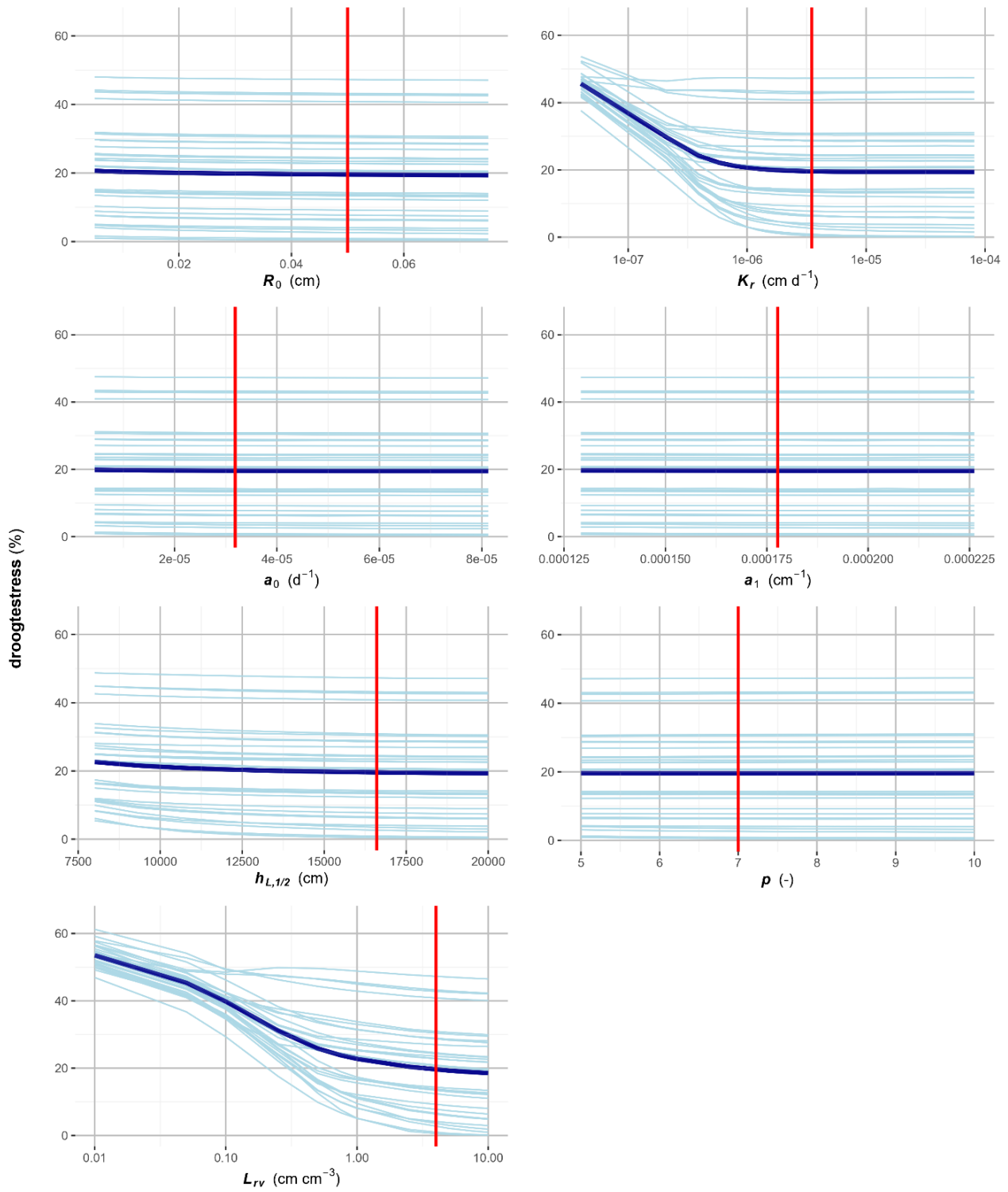
Figuur B3.2 Microscopisch model dW; 1015, Gt II.



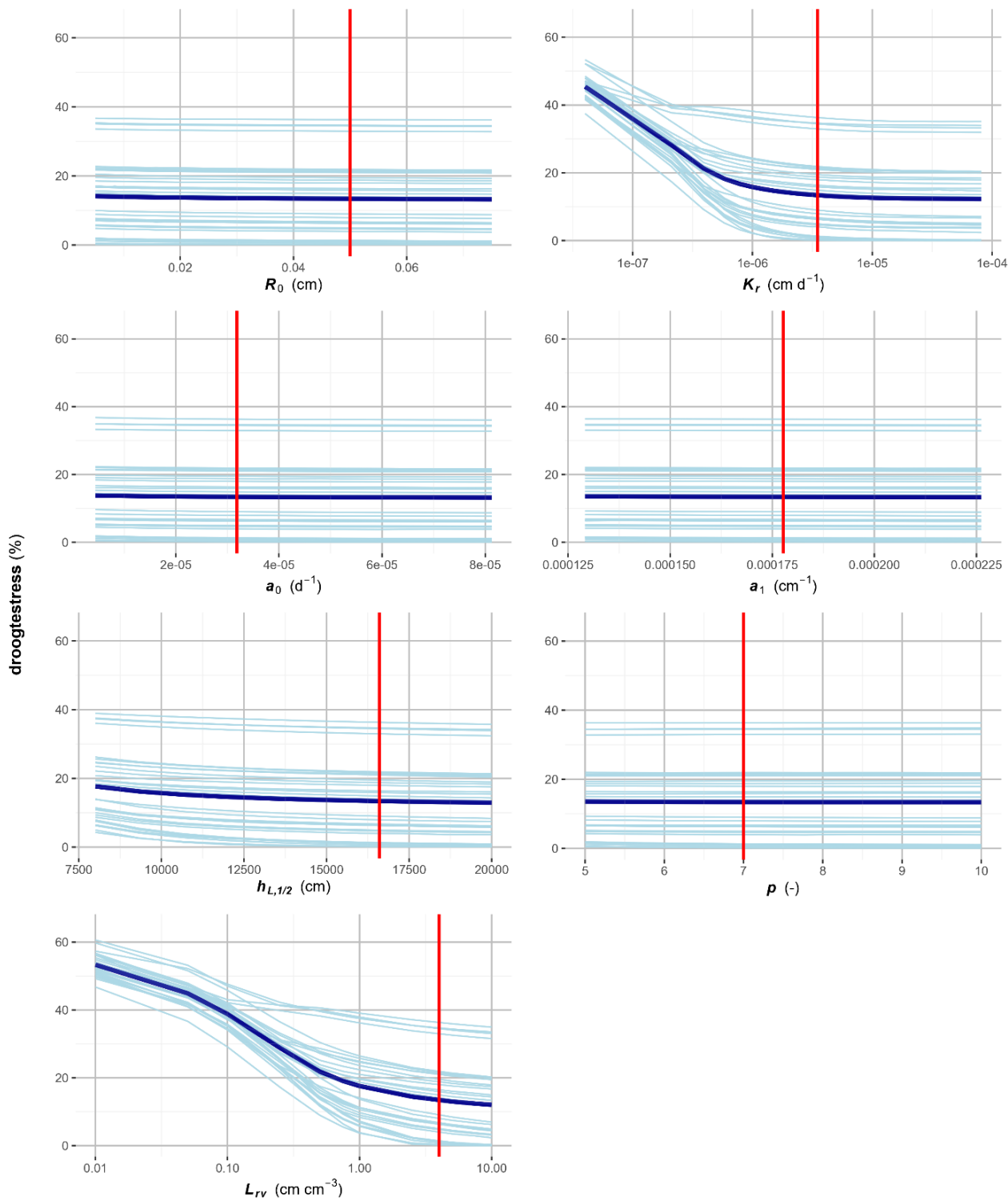
Figuur B3.3 Microscopisch model dW; 3015, Gt VI.



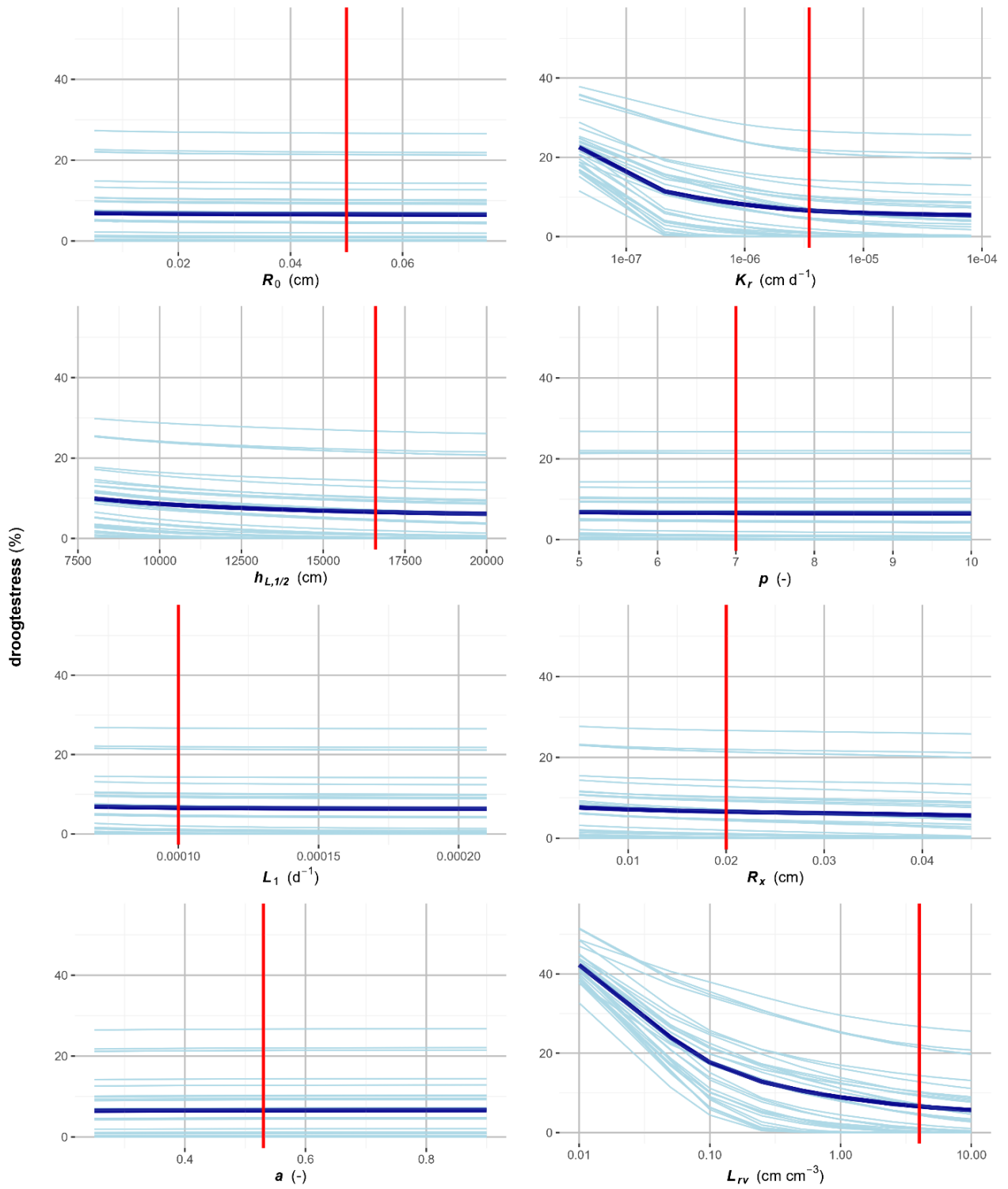
Figuur B3.4 Microscopisch model dW; 3015, Gt II.



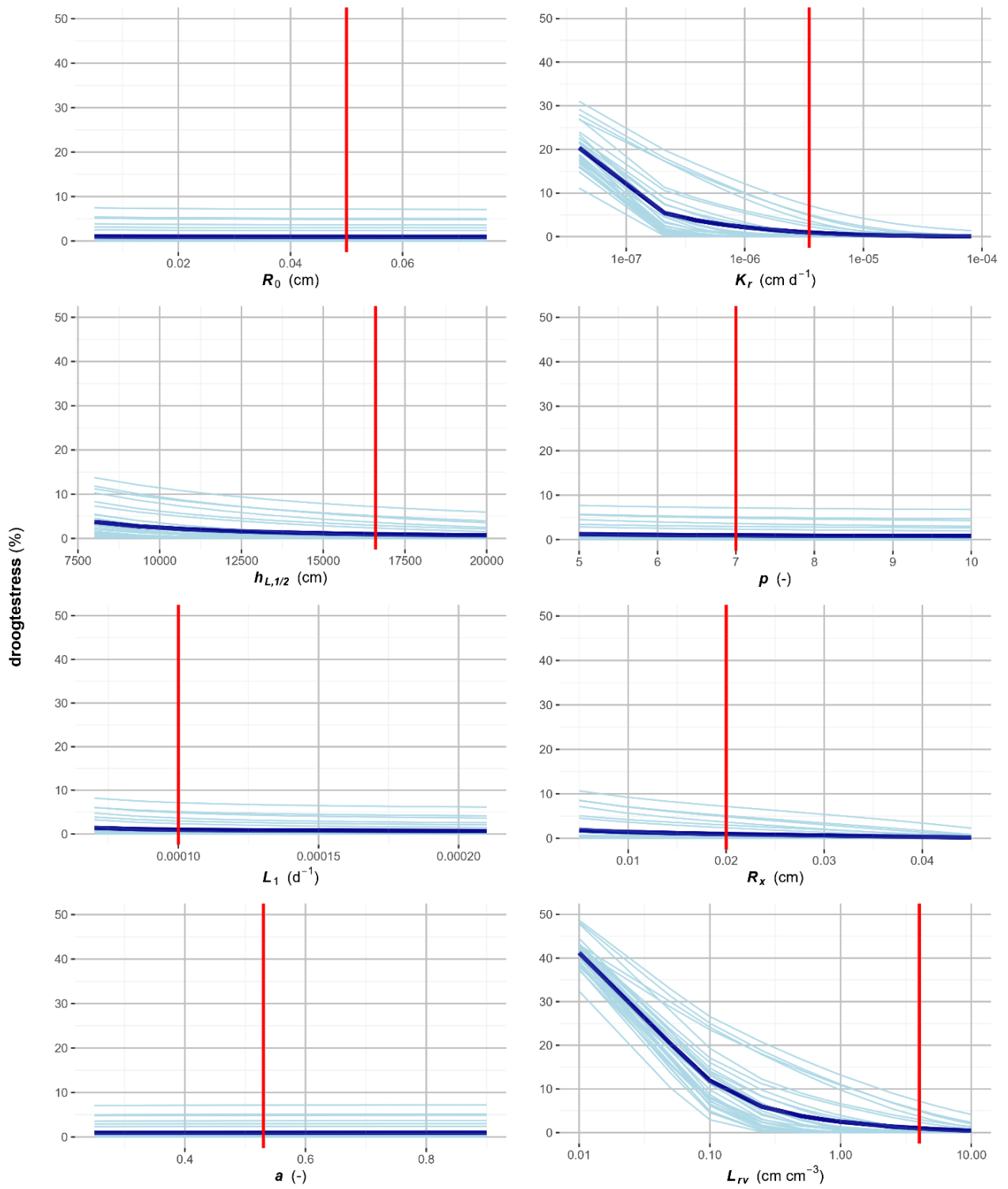
Figuur B3.5 Microscopisch model dW; 4001, Gt VI.



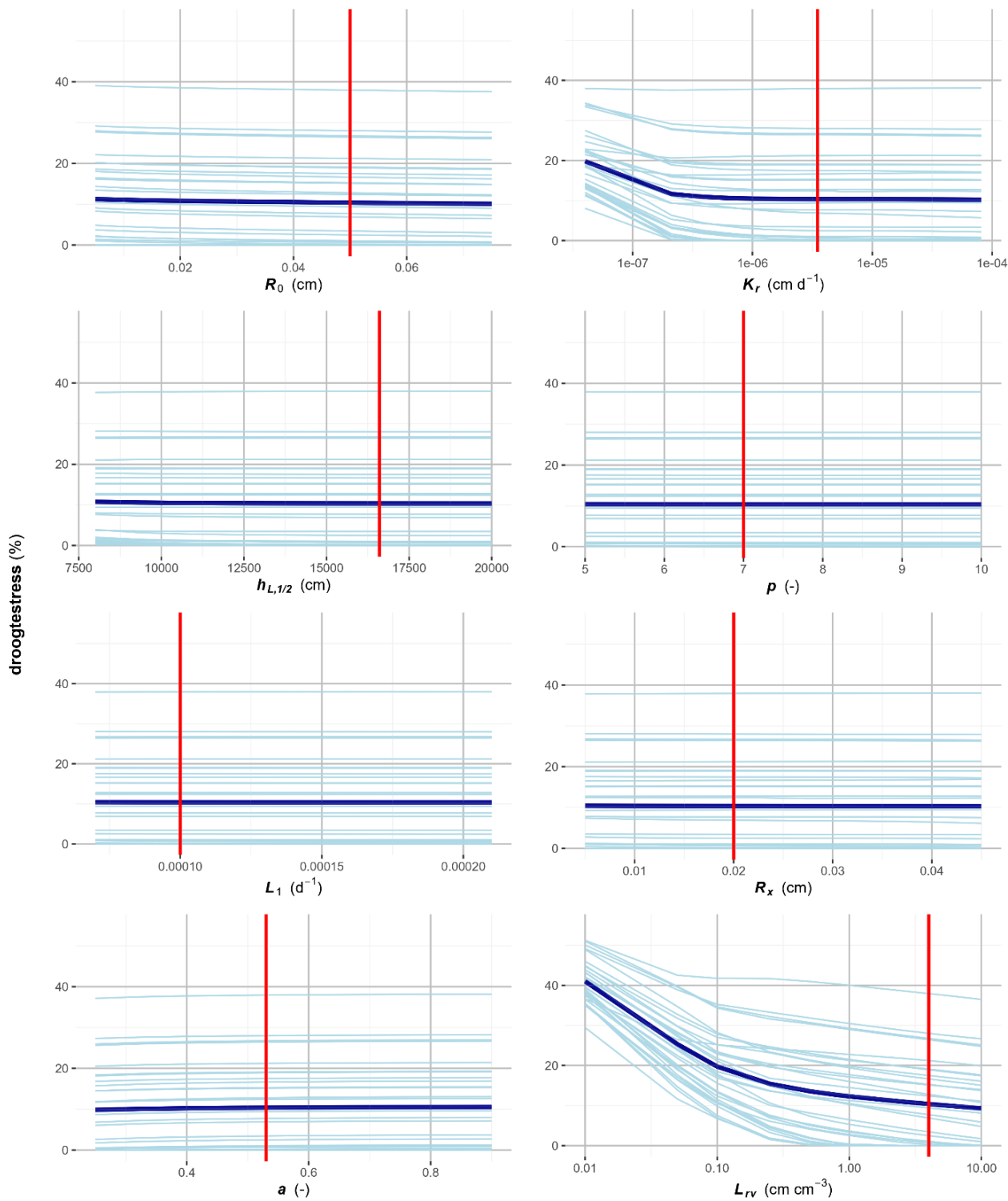
Figuur B3.6 Microscopisch model dW; 4001, Gt II.



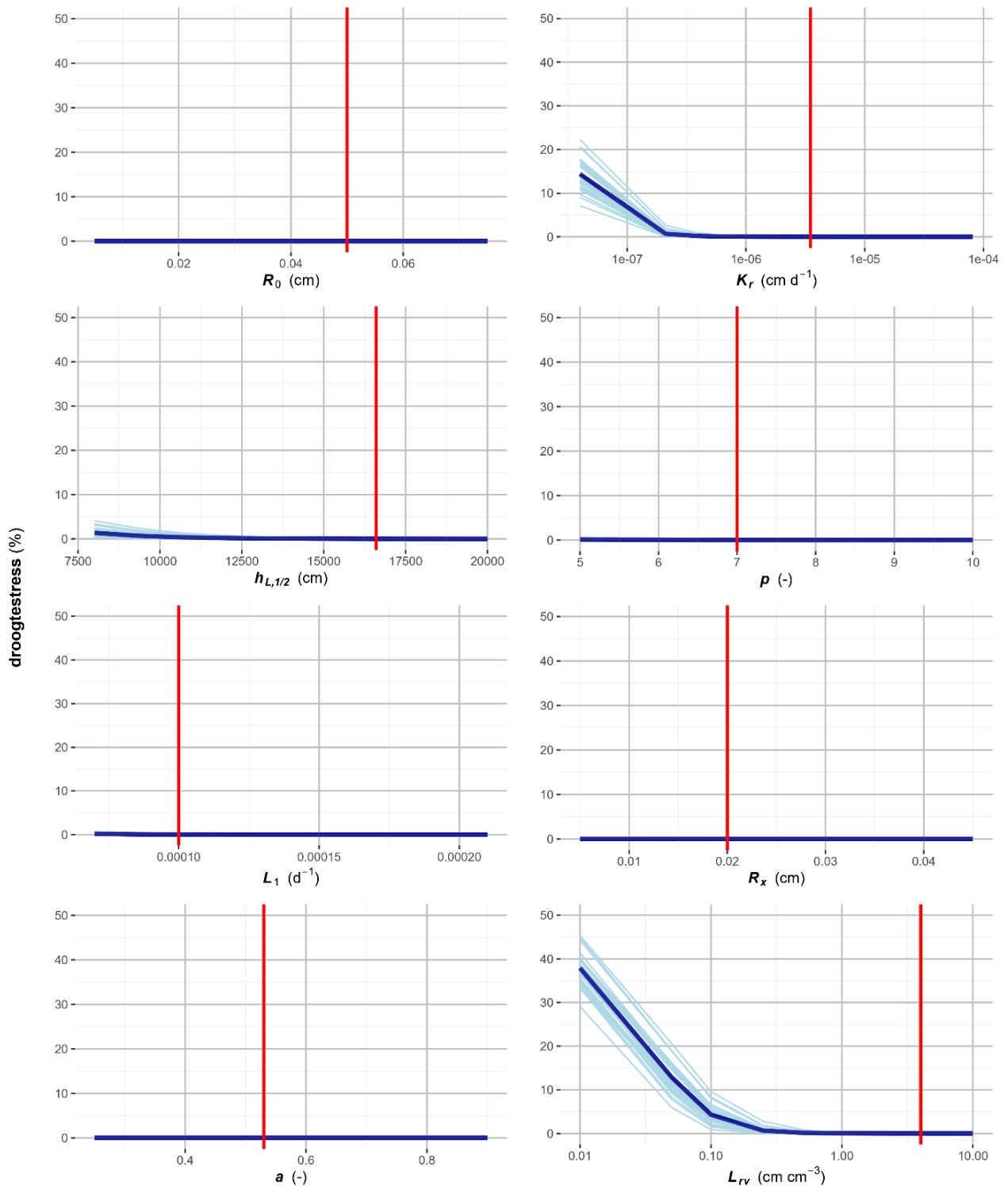
Figuur B3.7 Microscopisch model dJvL; 1015, Gt VI.



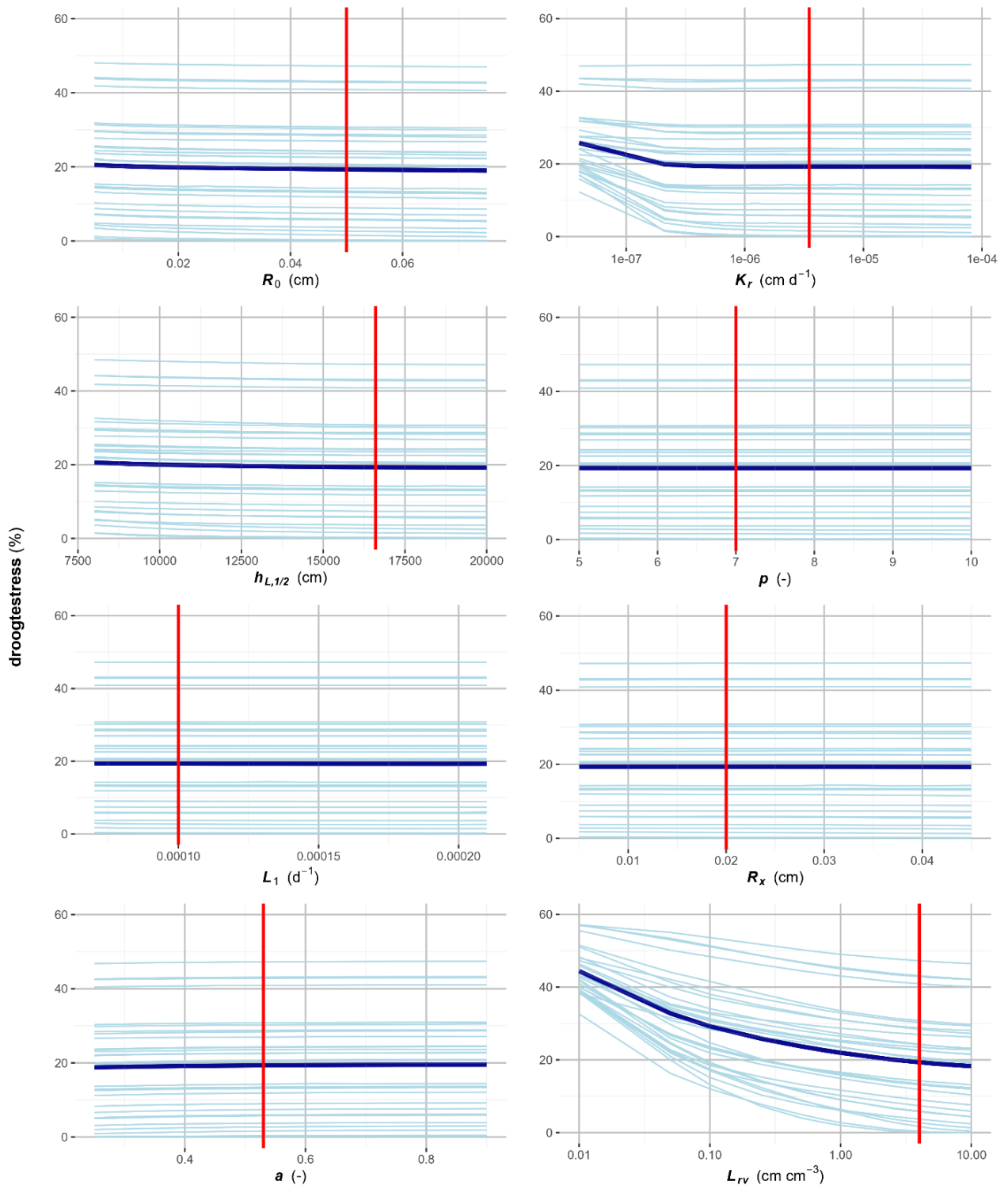
Figuur B3.8 Microscopisch model dJvL; 1015, Gt II.



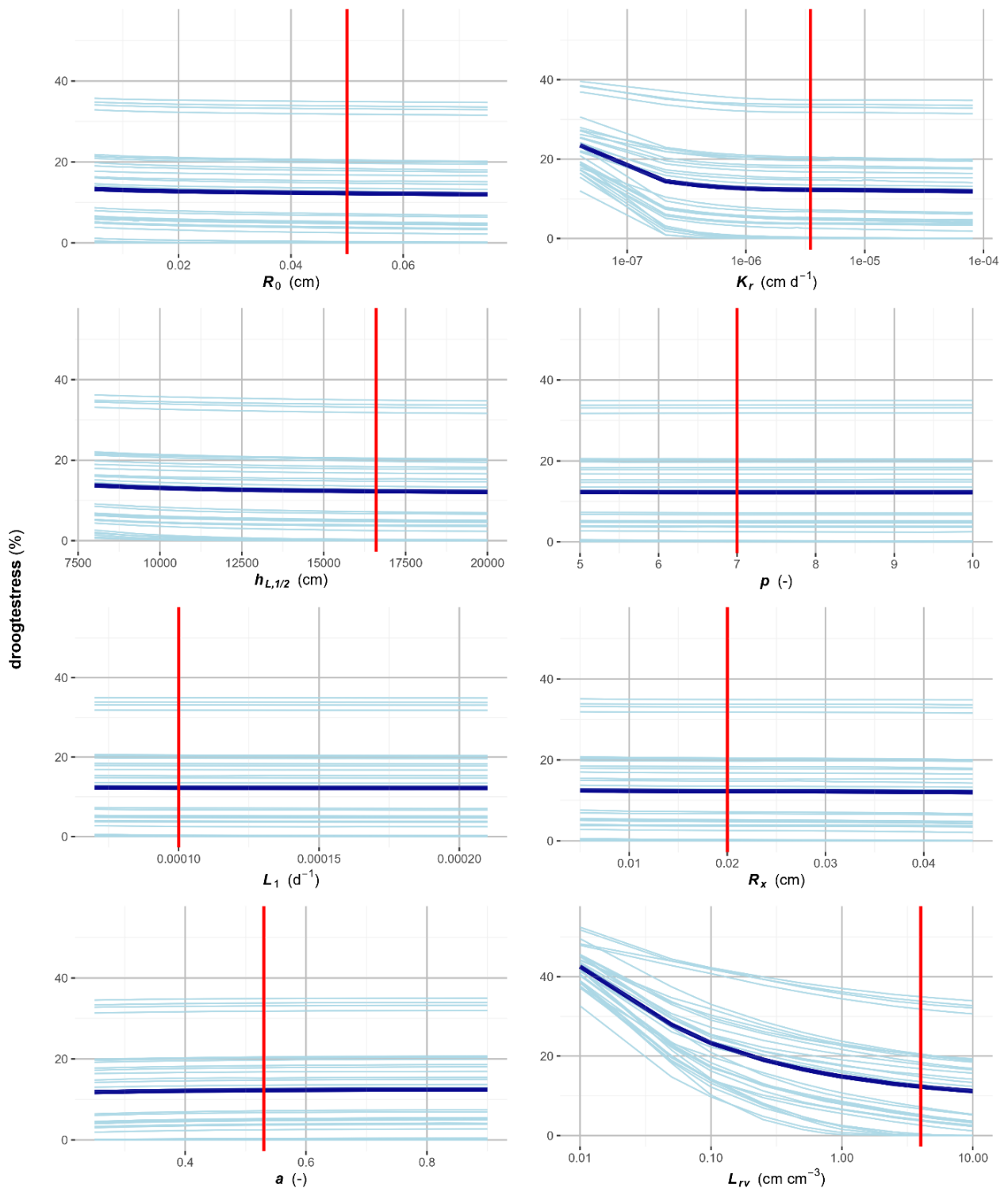
Figuur B3.9 Microscopisch model dJvL; 3015, Gt VI.



Figuur B3.10 Microscopisch model dJvL; 3015, Gt II.



Figuur B3.11 Microscopisch model dJvL; 4001, Gt VI.



Figuur B3.12 Microscopisch model dJvL; 4001, Gt II.

Bijlage 4 Alternatieve macroscopische wateropname

Dos Santos et al. (2017) introduceerden een macroscopische wateropnameconcept dat als alternatief voor het Feddes-concept gebruikt kan worden. Zij lieten zien dat, in tegenstelling tot het Feddes-concept, het alternatieve concept wel goed geoptimaliseerd kon worden aan het microscopische wateropnameconcept van De Jong van Lier et al. (2013).

Het Feddes-concept is gegeven als:

$$S = \alpha_F(h) \frac{L_{rv}}{z_r} T_p - \int_{z=0}^{z_r} L_{rv} dz \quad (37)$$

Hierin is S de wateropname in een bodemlaag ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1} = \text{d}^{-1}$), α_F is de bekende Feddes-reductiefunctie (dimensieloos), L_{rv} is de wortellengtedichtheid (cm cm^{-3}), z is de diepte (cm), z_r is de totale worteldiepte (cm) en T_p is de potentiële transpiratie (watervraag) ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ d}^{-1} = \text{cm d}^{-1}$). Hierin wordt de watervraag dus naar rato van de wortelverdeling in het profiel over de diverse rekenlagen verdeeld.

Het alternatieve concept is gegeven als:

$$S = \alpha_M(M) \frac{L_{rv}^{\ell_M} M(h)}{z_r} T_p - \int_{z=0}^{z_r} L_{rv}^{\ell_M} M(h) dz \quad (38)$$

Hierin is M de matrix fluxpotentiaal ($\text{cm}^2 \text{ d}^{-1}$; zie paragraaf 2.3), α_M is een reductiefactor als functie van M (dimensieloos) en ℓ_M is een vormparameter die medebepalend is voor de vorm van de wateropnameverdeling over de diepte (dimensieloos). Voor $0 < \ell_M < 1$ geldt dat wateropname in lagen met relatief weinig wortels wordt verhoogd, hetgeen bijdraagt aan compensatie; voor $\ell_M > 1$ geldt dat de opname in lagen met relatief veel wortels groter is. De toevoeging van M in de relatieve verdeling van de watervraag zorgt ook voor compensatie. Deze vorm van compensatie is gebaseerd op eerdere ideeën zoals voorgesteld door Molz and Remson (1970), Selim and Iskandar (1978), Bouten et al. (1992), Li et al. (2001) en Heinen (2014). De reductiefunctie α_M is als volgt gedefinieerd: voor $M_c < M < M_{\max}$ geldt $\alpha_M = 1$, en voor $0 < M < M_c$ neemt α_M lineair af naar nul.

Uit de optimalisaties die door Dos Santos et al. (2017) zijn uitgevoerd, bleek dat zowel M_c als ℓ_M een functie is van bodemsoort, L_{rv} en T_p . Hoe groter L_{rv} , des te kleiner deze twee parameters en hoe groter T_p , des te groter deze twee parameters. De waarden voor ℓ_M zijn soms kleiner dan 1 en soms groter dan 1.

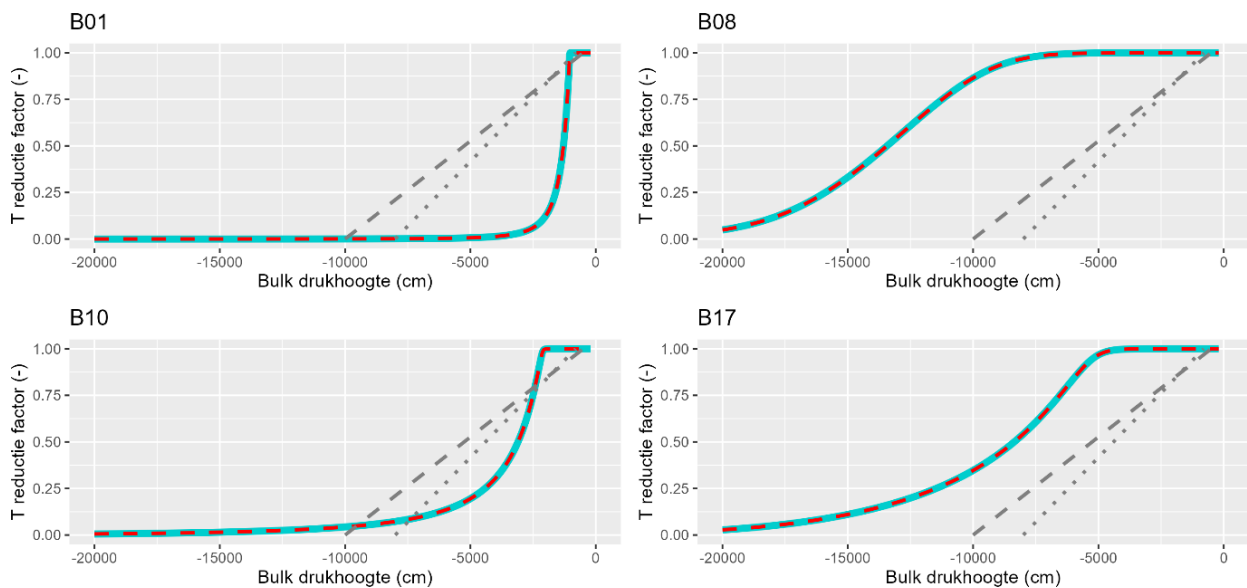
Bijlage 5 Vergelijking microscopisch en macroscopisch voor één laag

Wanneer de microscopische en macroscopische wateropnamemodellen op één laag worden toegepast, is een onderlinge vergelijking mogelijk. Voor een enkelvoudige laag is er immers geen sprake meer van compensatie bij het microscopische concept. Hoewel één laag beschouwen niet realistisch is, geeft het toch enig inzicht in de verschillen tussen beide concepten. Wanneer het microscopische concept op een enkelvoudige laag wordt toegepast, kan hiervoor de relatie tussen bulk drukhoogte in de bodem en de berekende transpiratiereductie worden berekend. Hier is dat gedaan voor het microscopische concept dW voor de 36 Staringreeks-bouwstenen. Hieruit volgt dat er een gekromd verband bestaat (Figuur B5.1), dat dus afwijkt van het lineaire verband dat volgens het macroscopische concept wordt gehanteerd.

Nu blijkt dat dit kromlijnige verband (voor alle 36 bouwstenen) vrijwel exact te berekenen valt uit de matrix flux potentialen in de bulk bodem (M_s) en die op het grensvlak bodem-wortelwand (M_0), volgens:

$$\frac{T_a}{T_p} = \frac{M_s - M_0}{M_{s,no} - M_{0,no}} \quad (39)$$

waarbij het verschil in de noemer de waarden voor M zijn waarbij nog geen transpiratiereductie optreedt; hier is die berekend bij een drukhoogte van -200 cm.

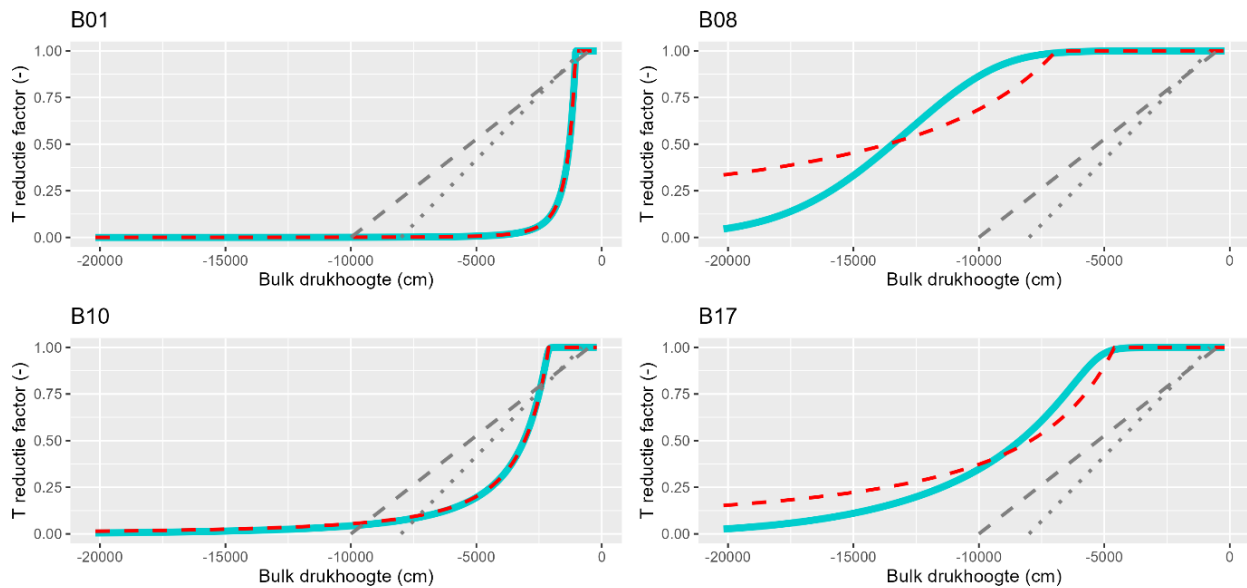


Figuur B5.1 Transpiratiereductie als functie van de bulk drukhoogte in de bodem volgens het microscopische concept dW (blauw) en het relatieve verschil in matrix flux potentiaal op R_1 en R_0 (Eq. (39)) (rood, onderbroken lijn) voor vier Staringreeks-bouwstenen: B01 (leemarm zand), B08 (matig lichte zavel), B10 (lichte klei) en B17 (venige klei). De rechte, grijze lijnen zijn de reductiefunctie van Feddes voor gras (gestippelde lijn) en mais (onderbroken lijn).

Indien de matrix flux potentiaal op het grensvlak bodem-wortelwand flink veel lager is dan die in de bulk, dan zou een alternatieve benadering zijn:

$$\frac{T_a}{T_p} = \frac{M_s}{M_{s,x}} \quad (40)$$

waarbij $M_{s,x}$ de matrix flux potentiaal is bij drukhoogte h_x vanaf waar de transpiratiereductie snel toeneemt. Deze waarde voor h_x dient per bodemsoort iteratief vastgesteld te worden. Voor sommige bouwstenen werkt deze benadering vrij goed, maar voor andere weer niet (Figuur B5.2; Tabel B5.1). Voor de bouwstenen B08 en B17 uit Figuur B5.2 geldt dat M_0 niet veel kleiner is dan M_s .



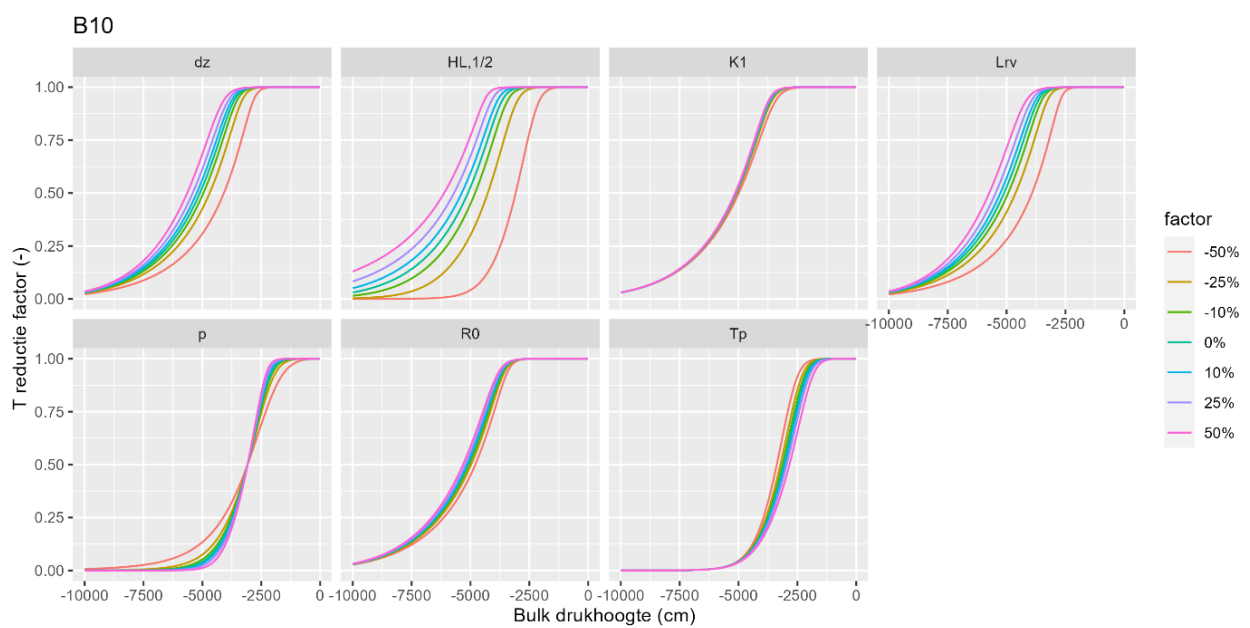
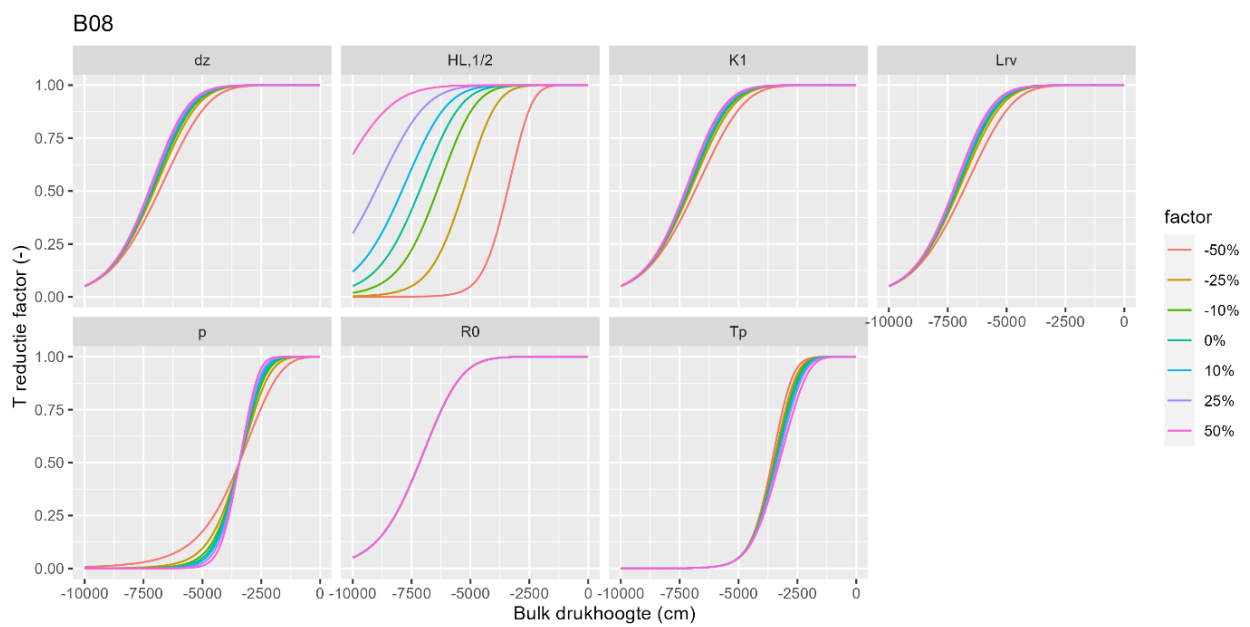
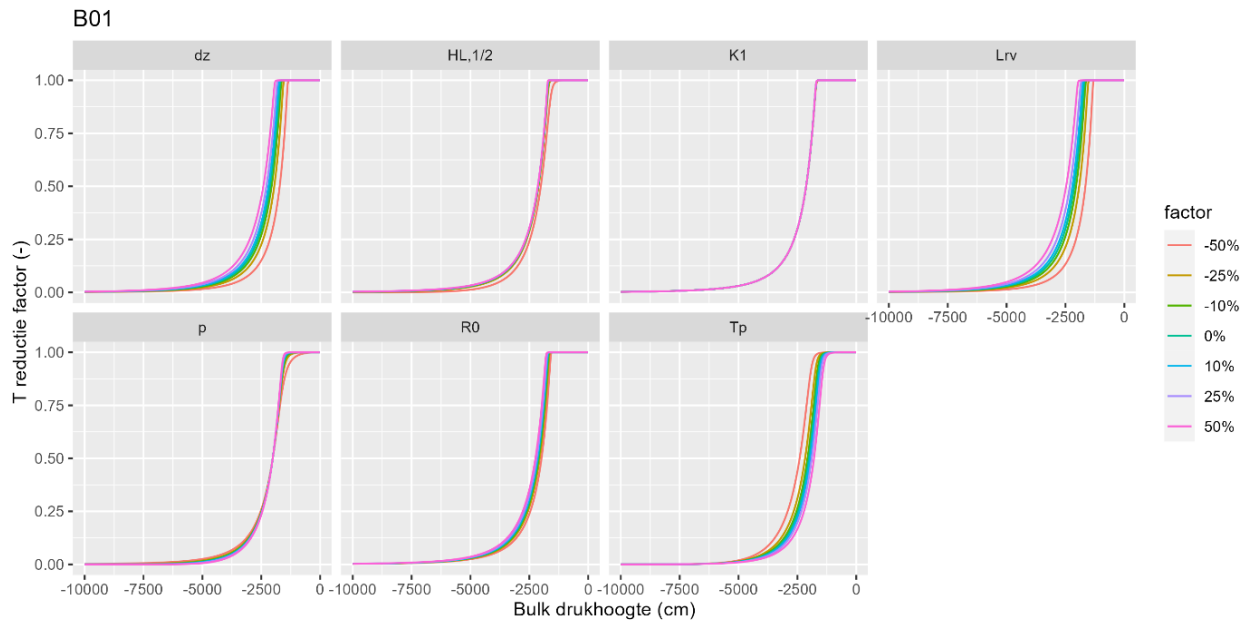
Figuur B5.2 Transpiratiereductie als functie van de bulk drukhoogte in de bodem volgens het microscopische concept dW (blauw) en de matrix flux potentiaal op R_1 relatief ten opzichte van $M_{s,x}$ (Eq. (40)) (rood, onderbroken lijn) voor vier Staringreeks-bouwstenen: B01 (leemarm zand), B08 (matig lichte zavel), B10 (lichte klei) en B17 (venige klei). De rechte, grijze lijnen zijn de reductiefunctie van Feddes voor gras (gestippelde lijn) en mais (onderbroken lijn).

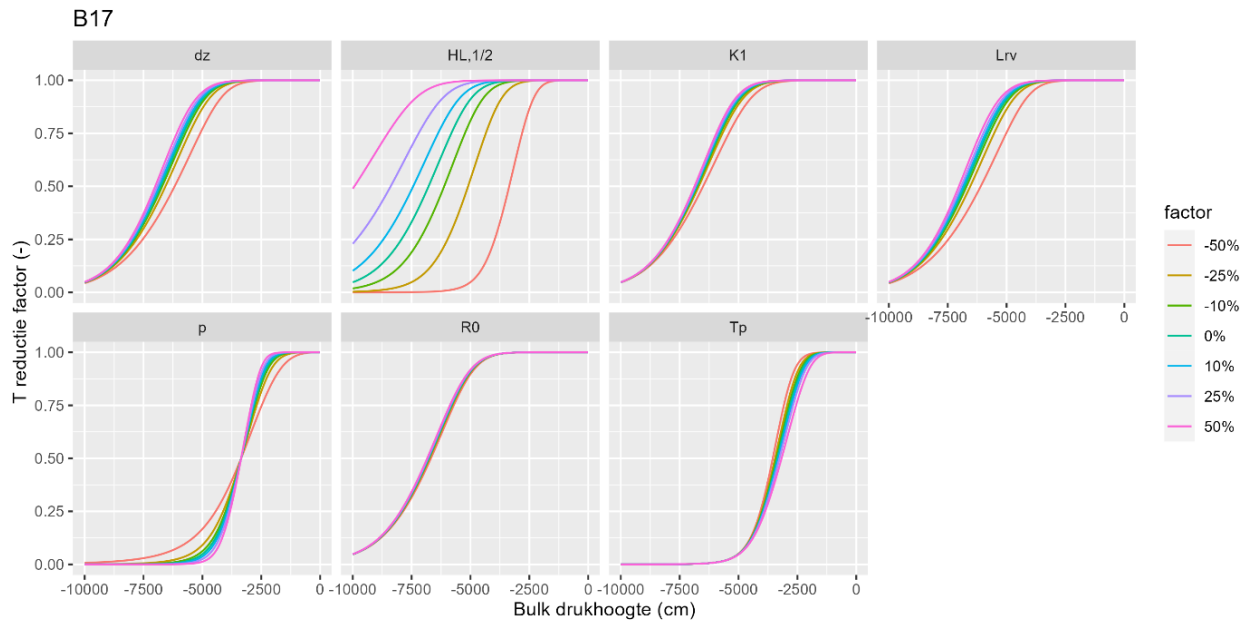
Tabel B5.1 Gefitte waarden voor h_x en bijbehorende $rmse$ -waarden voor de vier Staringreeks-bouwstenen.

Bodem	h_x (cm)	rmse
B01	1040	0.0005894
B08	6920	0.1437
B10	2120	0.009335
B17	4600	0.08479

De belangrijkste bevinding uit deze analyse is dat volgens het microscopische concept (in één laag) de transpiratiereductie niet-lineair afneemt met toenemende drukhoogte in de bodem, hetgeen anders is dan de lineaire afname die in het Feddes macroscopische concept wordt gehanteerd. Deze niet-lineaire afname is volledig toe te schrijven aan het verloop van de matrix flux potentiaal in de bodem naar de wortelwand toe en is daarmee dus bodemsoort-afhankelijk. De Feddes macroscopische aanpak kent geen onderscheid tussen verschillende bodems.

De vorm en ligging van de getoonde curves blijken ook nog afhankelijk te zijn van overige gewas- en transpiratieparameters. Voor de bouwstenen B01, B08, B10 en B17 is dit getoond in Figuur B5.3 als functie van de gewasparameters K_r , R_0 en L_{rv} , de transpiratie reductie-functieparameters $h_{L,1/2}$ en p en van de watervraag, ofwel potentiële transpiratie T_p . De waarden van deze parameters zijn steeds gevarieerd ten opzichte van een referentiewaarden met -50%, -25%, -10%, +10%, +25%, +50%.





Figuur B5.3 Transpiratiereductie volgens het microscopische concept dW als functie van de bulk drukhoogte in de bodem voor verschillende waarden van de modelparameters voor Staringreeks-bouwstenen B01, B08, B10 en B17.



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

Wageningen Environmental Research
Rapport 3230
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, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 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 3230
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, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 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.

