

Modelverkenning naar het effect van niet-uniform verdeelde watergiften op de opname van chrysanten onder glas

**F.B.T. Assinck
M. Heinen**

Alterra-rapport 393

Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2001

REFERAAT

F.B.T. Assinck & M. Heinen, 2001. *Modelverkenning naar het effect van niet-uniform verdeelde watergiften op de opname van chrysanten onder glas*. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 393. 36 blz. 8 fig.; 3 tab.; 24 ref.

Om waterlozingen en emissies van meststoffen vanuit de glastuinbouw naar het oppervlaktewater te voorkomen, moet het gebruik afgestemd worden op de gewasbehoefte. Helaas wordt gietwater bij de huidige sproeiersystemen ruimtelijk niet gelijkmatig verdeeld. Leiden deze ruimtelijke variaties tot verschillen in de vochttoestand van de bodem en tot verschillen in de wateropname? Wat is de minimale watergift bij een systeem met een bepaalde waterverdeling waarbij alle planten voldoende water op kunnen nemen? Hoeveel transpiratiereductie is te verwachten wanneer netto geen wegzijging mag optreden? Uit scenarioberekeningen met het simulatiemodel FUSSIM2 blijkt dat de vochtgehalten in het stroomdomein aanzienlijk kunnen verschillen bij systemen met een slechte waterverdeling. Planten in droge zones kunnen dan onvoldoende water opnemen. Bij meer water geven maar dezelfde ruimtelijke verdeling kunnen de planten meer opnemen, maar is er ook meer wegzijging. Minder water geven reduceert de wegzijging maar ook de opname. Stoffentransport is buiten beschouwing gelaten, zodat er geen aandacht is geweest voor verzouting noch voor osmotische hindering op wateropname.

Trefwoorden: chrysant, drainage, drukhoogte, glastuinbouw, irrigatie, niet-uniform, opname, simulatiemodellen, transpiratie

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door NLG 30,00 (€13,-) over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 393. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2001 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: postkamer@alterra.wag-ur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

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

Alterra is de fusie tussen het Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (IBN) en het Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC). De fusie is ingegaan op 1 januari 2000.

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	9
2 Materiaal en methoden	11
2.1 Het simulatiemodel FUSSIM2	11
2.2 Beschouwde situaties	13
2.3 Calibratie	14
2.3.1 Potentiële transpiratie	15
2.3.2 Watergift	15
2.3.3 Wortelgroei	15
2.3.4 Bodem	15
2.3.5 Grondwaterstand	16
2.4 Scenarioberekeningen	17
2.4.1 Invoergegevens	17
2.4.2 Doorstart procedure bij de scenario's	18
2.4.3 Scenario's	18
3 Resultaten en discussie	21
3.1 Calibratie	21
3.2 Effect van het verspreiden van de neerslag in de tijd	22
3.3 Effect van niet-uniform verdeelde watergiften	22
3.3.1 Effect op de waterbalans	22
3.3.2 Effect op de drukhoogteverdeling	24
3.3.3 Drainage en uitspoeling	25
3.3.4 Effect op de opname	26
3.4 Effect van meer watergeven	28
3.4.1 Drainage en opname als functie van watergift	28
3.4.2 Minimale gift zonder opname-reductie	30
3.4.3 Maximale gift zonder (netto-)drainage	30
4 Conclusies	31
Referenties	33

Woord vooraf

Dit onderzoek is uitgevoerd onder het DLO-onderzoeksprogramma 256 '*Optimaliseren van water- en nutriëntenbeheer in de beschermde teelten*' (Alterra-projectnummer 10187) dat is gefinancierd door de Directie Wetenschap en Kennisoverdracht van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij.

Onze dank gaat uit naar Wim Voogt (Praktijkonderzoek Plant & Omgeving (PPO)), Feije de Zwart (Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)) en Greet Blom (Plant Research International) voor het beschikbaar stellen van meet- en modelgegevens en voor het bediscussiëren van de resultaten.

Samenvatting

Het beleid van de Nederlandse regering is erop gericht om (waterlozingen en) de emissies van bestrijdingsmiddelen en meststoffen vanuit de glastuinbouw naar het oppervlaktewater te reduceren. Een mogelijkheid om het gebruik van water en meststoffen te beperken is door het af te stemmen op de behoefte van het gewas. Voorwaarde voor het precies toedienen van de gewenste hoeveelheid gietwater is een nauwkeurig watergeefstelsel. Helaas wordt gietwater bij de huidige systemen ruimtelijk niet-uniform verdeeld.

Dit rapport beantwoordt de vraag of ruimtelijk variaties in de watergiften leiden tot verschillen in de vochttoestand van de bodem en daardoor tot verschillen in de wateropname door de planten. Daarvan zijn de volgende twee vragen afgeleid. Wat is de minimale watergift zodat geen enkele plant stress ondervindt als gevolg van vochttekort? Hoeveel transpiratiereductie is te verwachten wanneer netto geen wegzijging geaccepteerd wordt. Stoffentransport is buiten beschouwing gelaten, zodat er geen aandacht is geweest voor verzouting noch voor osmotische hindering op de wateropname.

De reductie van de actuele transpiratie wordt mede bepaald door een tweetal soortafhankelijk parameters. Deze parameters zijn gecalibreerd aan de hand van de gemeten groeiomstandigheden en bijbehorende groeieresultaten van een teelt uit het jaar 2001 in een kas van PPO (Naaldwijk). Vervolgens zijn scenarioberekeningen uitgevoerd voor een referentie-weerjaar en voor chrysantenteelt onder glas op zandgrond in het algemeen, waarbij water niet-uniform is toegediend aan 13 planten. Elk scenario bestaat uit drie opeenvolgende teelten. De scenario's onderscheiden zich van elkaar door verschillen in niet-uniformiteit van de waterafgifte van een sproeier. De niet-uniformiteit, uitgedrukt als variatiecoëfficiënt, was 0, 9, 12, 27 en 35%.

Scenarioberekeningen met het simulatiemodel FUSSIM2 laten zien dat bij watergeefsystemen met een slechte ruimtelijke waterverdeling de vochtgehalten in de diverse zones van het stroomdomein gaan verschillen. Tussen de twee sproeiers in is het veel droger dan dicht bij een sproeier. Planten in de droge zones kunnen bij deze scenario's dan ook niet altijd voldoende water opnemen hetgeen tot groeireductie kan leiden. Indien de transpiratiereductie verwaarloosbaar klein moet zijn voor de plant die het minste water ontvangt, dan blijkt dit in de derde teelt nog net op te gaan voor de situatie met $VC = 12\%$. De relatieve transpiratie van deze plant bij $VC = 27\%$ en $VC = 35\%$ was respectievelijk 83% en 72%. Bij systemen met een uniformere waterverdeling kunnen alle planten voldoende water opnemen.

Meer watergeven bij een systeem met een bepaalde (slechte) ruimtelijke waterverdeling betekent dat de planten meer water op kunnen nemen, maar dat de netto wegzijging ook toeneemt. Bij een sproeiersysteem met een VC van 27% moet ongeveer 163 mm water gegeven worden om alle planten voldoende water te laten opnemen (basisgift in de beschouwde periode is 134 mm). De netto wegzijging is dan

32 mm. Minder watergeven reduceert de wegzijging maar ook de opname door de planten in de droogste zones, tot wel 85% van de potentiële transpiratie voor de plant die het minste water ontvangt bij een VC van 27% en netto geen wegzijging. Hierbij wordt wel de kanttekening gegeven dat netto wegzijging = 0 nog wel betekende: lokaal wegzijging (onder de natte zone) en lokaal vrijwel evenveel capillaire opstijging (onder de droge zone).

1 Inleiding

Het beleid van de Nederlandse regering is erop gericht om de verontreiniging van het oppervlaktewater tegen te gaan (Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren (WVO)). Aangevoerd is dat de glastuinbouw een behoorlijke bijdrage levert aan de waterverontreiniging (zie voor verwijzingen Heinen, 1999). In het Lozingenbesluit WVO Glastuinbouw (Roos-Schalij et al., 1994) staan algemene regels voor de glastuinbouw met als doel om (waterlozingen en) de emissies van bestrijdingsmiddelen en meststoffen te saneren. In grote lijn zijn de maatregelen in te delen in drie groepen, namelijk: 1 het beperken van het gebruik, 2 het bevorderen van het hergebruik en 3 het saneren van de restlozing. In dit rapport beperken we ons tot punt 1.

Het beperken van het gebruik kan door de giften af te stemmen op de behoefte van het gewas. Alleen kijkend naar het watergebruik is dat in het Lozingenbesluit WVO Glastuinbouw ingevuld door per gewas een maximum hoeveelheid gietwater voor te schrijven. Voogt et al. (2000) gaan met hun fertigatiemodel nog een stap verder door de waterbehoefte daadwerkelijk uit te rekenen en daar de giften op aan te passen.

Voorwaarde voor het precies toedienen van de hoeveelheid gietwater naar de behoefte van het gewas is een nauwkeurig watergeefstelsel. Helaas zijn de huidige systemen niet precies genoeg. De ruimtelijke variatie in de watergiften in de glastuinbouwkassen is afhankelijk van het ontwerp van het watergeefstelsel en de toestand van het watergeefstelsel. Dit rapport beperkt zich tot sproeiersystemen. De variatiecoëfficiënt van slechte sproeiersystemen kan in de praktijk oplopen tot waarden boven de 20%. Goede sproeiersystemen hebben een variatiecoëfficiënt tussen de 5% en 10% (Heemskerk et al., 1997).

Dit rapport heeft tot doel antwoord te geven op de vraag of ruimtelijke variaties in de watergiften als gevolg van het watergeefstelsel leiden tot (meetbare) verschillen in de vochttoestand van de bodem én daardoor tot verschillen in de wateropname door de planten. Van deze hoofddoelstelling zijn de volgende twee vragen afgeleid: 1 hoeveel water moet er minimaal gegeven worden zodat geen enkele plant stress ondervindt als gevolg van vochttekort?, 2 hoeveel transpiratiereductie als gevolg van vochttekort is te verwachten, wanneer er netto geen wegzijging van water geaccepteerd wordt. Randvoorwaarde voor het beantwoorden van deze twee vragen is een bepaalde ruimtelijke variatie in de watergiften.

In dit rapport wordt een korte toelichting gegeven op de theorieën voor waterbeweging en reductie van de wateropname door planten, zoals geïmplementeerd in het gebruikte rekenmodel (FUSSIM2). Vervolgens worden de uitgevoerde modelberekeningen toegelicht, de resultaten van de berekeningen besproken en enkele conclusies gegeven.

2 Materiaal en methoden

Voor een chrysantenteelt onder glas zijn simulatieberekeningen uitgevoerd met behulp van het model FUSSIM2. Dit model is ontwikkeld door Heinen (1997) en Heinen & De Willigen (1998, 2001). Dit hoofdstuk beschrijft de hoofdzaken van het model FUSSIM2, de uitgevoerde calibratie en de simulatieberekeningen.

2.1 Het simulatiemodel FUSSIM2

FUSSIM2 is een 2-dimensionaal simulatiemodel, waarmee waterbeweging, stoftransport en de opname van water en nutriënten door wortels in poreuze media beschouwd kan worden. De belangrijkste processen voor dit rapport worden hier kort beschreven. Voor meer informatie wordt verwezen naar Heinen (1997) en Heinen & De Willigen (1998, 2001).

Waterbeweging

In FUSSIM2 wordt de algemene stromingsvergelijking voor water in poreuze media (Richards, 1931) numeriek opgelost voor een gegeven begintoestand en gegeven randvoorwaarden. De beweging van water in poreuze media is sterk afhankelijk van de niet-lineaire fysische eigenschappen van het medium. De waterretentievergelijking (Van Genuchten, 1980) en de doorlatendheidsvergelijking (Mualem, 1976) worden in FUSSIM2 gebruikt om deze fysische eigenschappen te karakteriseren. Hierbij wordt rekening gehouden met hysteresis (Mualem, 1984).

Opname van water door wortels

De gebruikte vergelijking voor waterbeweging houdt rekening met de opname van water door het wortelsysteem. FUSSIM2 is daarbij in staat om de wateropname voor meerdere planten afzonderlijk te beschouwen. Gebaseerd op de analyse van de opname door één wortel hebben De Willigen & Van Noordwijk (1987, 1994a,b) analytische oplossingen verkregen voor wateropname, welke via opschaling toepasbaar zijn voor een compleet wortelstelsel.

De wateropname uit een bodemlaag (of ander poreus medium) is in deze oplossingen een functie van de hoeveelheid wortels in die laag, de weerstand van de wortelwand voor water, de waterpotentiaal in die laag en de waterpotentiaal in de wortels (zie Heinen & De Willigen, 1998). De actuele transpiratie is gelijk aan de som van de wateropname uit alle lagen van de bodem.

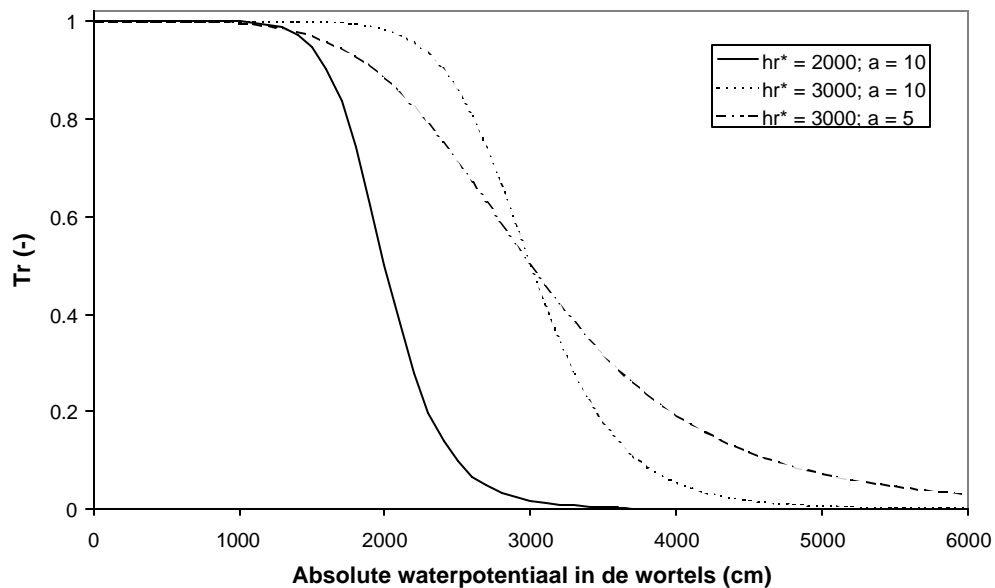
Wanneer er voldoende water in de bodem beschikbaar is voor opname door de plant, zal de actuele transpiratie gelijk zijn aan de potentiële transpiratie. Wanneer bij een gegeven potentiële transpiratie de waterpotentiaal in de wortel te veel afneemt, kunnen de plantenwortels niet meer onbepaald water uit de bodem blijven opnemen. Om uitdroging te voorkomen sluit de plant de huidmondjes, waardoor de actuele transpiratie verminderd wordt. De reductie van de actuele transpiratie is in FUSSIM2

beschreven met behulp van de volgende transpiratiereductiefunctie (Campbell, 1991 en Heinen & De Willigen, 1998):

$$T_r = \frac{T_a}{T_p} = \left[1 + \left(\frac{h_r}{h_{r^*}} \right)^a \right]^{-1}, \quad (1)$$

waarin T_r	relatieve transpiratie	-
T_a	actuele transpiratie	mm/d
T_p	potentiële transpiratie	mm/d
h_r	absolute waterpotentiaal in de wortels	cm
h_{r^*}	soort-afhankelijke absolute waterpotentiaal in de wortels; als $h_r = h_{r^*}$ dan geldt dat $T_r = 0.5$	cm
a	soort-afhankelijke constante	-

In figuur 1 is de transpiratiereductiefunctie (vergelijking 1) grafisch weergegeven voor een aantal combinaties van waarden voor h_{r^*} en a .



Figuur 1. De relatieve transpiratie T_r als functie van de absolute waterpotentiaal in de wortels h_r voor een drietal combinaties van h_{r^*} en a .

Aannamen en afwegingen

Bij het gebruik van modellen om de werkelijkheid na te bootsen, worden te allen tijde vereenvoudigingen van de werkelijkheid aangenomen. De belangrijkste aannamen en afwegingen ten behoeve van deze studie worden hier vermeld.

Om de wisselwerking tussen het gewas chrysant en de omstandigheden in de bodem goed te kunnen simuleren, is een koppeling van FUSSIM2 met een chrysantengroei-model noodzakelijk. Gezien de problematiek, ruimtelijke variatie in de watergift, is het van belang dat het chrysantengroei-model groeiberekeningen uit kan voeren voor meerdere planten tegelijk. Een chrysantmodel met deze

mogelijkheden bestaat helaas nog niet. Daarom is besloten om de potentiële transpiratie niet per plant te laten variëren, maar om overal dezelfde potentiële transpiratie op te leggen. De potentiële transpiratie varieert uiteraard wel in de tijd (zie §2.3.1). Terugkoppeling van de plant naar de bodem, bijvoorbeeld in de vorm van een verminderde potentiële transpiratie als gevolg van door watergebrek opgetreden groeiachterstand, is uitgesloten.

Indien niet voldoende water kan worden opgenomen (transpiratiereductie) zal dit effect hebben op de groei. Met andere woorden, indien we in deze studie transpiratiereductie voorspellen, zal dit een ongewenste situatie zijn.

In de simulatieberekeningen is alleen rekening gehouden met waterstroming en met de opname van water door wortels.

2.2 Beschouwde situaties

In dit modelonderzoek naar de effecten van ruimtelijke variaties in de watergiften wordt onderscheid gemaakt tussen calibratie- en scenarioberekeningen.

Het doel van de calibratie is om aan de hand van een bekende, gemeten situatie waarden te bepalen voor onbekende modelparameters (zie §2.3). De PPO-kassen te Naaldwijk zijn uitermate geschikt om te gebruiken bij de calibratie. Er zijn relatief veel (meet)gegevens bekend over de groeiomstandigheden in deze kassen en daarbij behaalde teeltresultaten.

Met behulp van scenarioberekeningen wordt daadwerkelijk onderzocht wat de effecten zijn van ruimtelijke variaties in de watergiften (zie §2.4). Deze berekeningen hebben geen betrekking op een specifieke situatie, maar hebben betrekking op chrysantenteelt onder glas in het algemeen. Bij deze berekeningen wordt een referentie-weerjaar, namelijk het SEL-jaar (Breuer & Van de Braak, 1989), gebruikt in plaats van één of meerdere gemeten weerjaren. Vanwege zijn eigenschappen zullen vooral op een zandbodem ongunstige effecten op de chrysantengroei te verwachten zijn bij een sproeiersysteem met een slechte ruimtelijke verdeling (pers. comm. W. Voogt). De scenarioberekeningen zullen dan ook uitgevoerd worden voor een teelt op een zandbodem. De PPO-kassen te Naaldwijk bevinden zich op een zandbodem midden in een bekend productiegebied voor chrysanten. Bijkomend voordeel is dat van deze locatie het bodemprofiel en de bijbehorende bodemfysische eigenschappen reeds bekend zijn.

Aangezien de PPO-kassen te Naaldwijk voldoen aan de criteria voor zowel de calibratie- als de scenarioberekeningen, is besloten om de situatie in één van die kassen (nr 402) als basis voor alle modelberekeningen te gebruiken.

In PPO-kas 402 zijn drie kappen van 6,4 meter breed. In elke kap hangen twee regenleidingen met roterende sproeiers, welke bij benadering als lijnbron beschouwd kunnen worden. De watergift kan per kap geregeld worden. Aangenomen is dat elke

regenleiding ongeveer 3 meter teeltbed van water voorziet. Een chrysanthe (in kas 402) heeft gemiddeld 12 bij 12 cm teeltbed tot zijn beschikking. Het grondwaterpeil in de kas varieert tussen de 85 en 90 cm beneden maaiveld. Voor een beschrijving van de bodem wordt verwezen naar paragraaf 2.3.4 van dit rapport.

2.3 Calibratie

Alvorens daadwerkelijk scenario's door te rekenen heeft er een globale calibratie plaatsgevonden van de soort-afhankelijke parameters h_{r^*} en a uit de reductiefunctie (vergelijking 1). De waarden van deze parameters voor chrysanthe zijn bepaald aan de hand van een gemeten situatie.

De gegevens van een teelt (periode 22 januari – 15 april 2001; uit Voogt, 2001, *in prep.*) uit PPO-kas 402 zijn gebruikt bij de calibratie. Tijdens deze teelt hebben de chrysanten in de diverse kappen verschillende behandelingen ondergaan. Hiervan zijn er twee gebruikt ten behoeve van de calibratie. Bij de eerste behandeling is vanaf 15 februari een vochtgehalte in de wortelzone van 12% nagestreefd (behandeld). Bij de tweede behandeling is de watergift gelijk gesteld aan de som van de verdamping van het gewas sinds de vorige gietbeurt (niet-behandeld). Bij de behandelde chrysanten zal eerder sprake zijn van een vochttekort en dus groeireductie dan bij de niet-behandelde chrysanten.

Achteraf gezien is de teelt uit deze periode niet zo bruikbaar geweest voor de calibratie. Verwacht werd namelijk dat de groei van de behandelde en niet-behandelde chrysanten in het begin vergelijkbaar zou zijn en na verloop van tijd steeds verder van elkaar zou gaan afwijken. Bij de behandelde chrysanten zou er dan namelijk een vochttekort en dus groeireductie op gaan treden. In werkelijkheid waren het juist de niet-behandelde chrysanten, waarbij tijdens een groot gedeelte van de teeltperiode groeireductie (ten opzichte van de behandelde chrysanten) optrad. Tussen de laatste tussen oogst en de eind oogst zijn de takken van de behandelde chrysanten echter $\pm 40\%$ minder toegenomen in gewicht dan de takken van de niet-behandelde chrysanten. Dit zal veroorzaakt zijn door vochttekort, maar andere (bv. morfologische) effecten zijn niet uit te sluiten.

Op basis van deze meetresultaten is besloten dat bij de uiteindelijk te kiezen waarden voor de parameters h_{r^*} en a de actuele transpiratie voor de behandelde chrysanten tot aan de laatste tussen oogst gelijk moet zijn aan de potentiële transpiratie. Daarna moet de toename in de actuele transpiratie ongeveer 40% lager zijn dan de toename in de potentiële transpiratie. De actuele transpiratie voor de niet-behandelde chrysanten moet bij benadering altijd gelijk zijn aan de potentiële transpiratie bij de gekozen waarden voor h_{r^*} en a .

Bij de calibratieberekeningen wordt een 1-dimensionale grondkolom met één plant beschouwd. In de volgende sub-paragrafen worden de gegevens, gebruikt bij de calibratie, besproken.

2.3.1 Potentiële transpiratie

De gegevens met betrekking tot potentiële transpiratie zijn afkomstig van PPO¹. Ze zijn berekend met een daarvoor ontwikkeld verdampingsmodel. Dit model berekent de potentiële transpiratie voor het gewas in de kas. De berekening houdt rekening met de actuele weersomstandigheden (straling), het gewasstadium en stookinvloeden in de kas tijdens een bepaalde teelt. Voor meer informatie betreffende het verdampingsmodel zie Voogt et al. (2000).

De potentiële transpiratiegegevens zijn in de modelberekeningen opgelegd aan FUSSIM2.

2.3.2 Watergift

Tijdens de teelt in kas 402 zijn bij zowel de behandelde als niet-behandelde chrysanten het tijdstip en de hoeveelheid van elke watergift geregistreerd¹. Deze giften zijn opgelegd aan FUSSIM2.

2.3.3 Wortelgroei

Van de teelt zijn geen gegevens beschikbaar over wortelgroei en wortelverdeling in de bodem. Tijdens een teelt in 1998 (in de vergelijkbare periode 19 februari – 1 mei) zijn wel op verschillende tijdstippen wortelverdelingen in de bodem gemeten¹. Van deze gegevens is per gemeten laag per tijdstip een gewogen gemiddelde berekend.

Aangenomen is dat het verloop in de wortelverdeling van de teelt in 2001 gelijk is aan het verloop van de teelt in 1998 na correctie voor het verschil in aanvangstijdstip en de totale duur van de teelten. Het verloop in de wortelverdeling is opgelegd aan FUSSIM2.

2.3.4 Bodem

Het bodemprofiel van kas 402 bestaat uit een humusarme zandgrond en is geclassificeerd als een vlakvaaggrond. Het bodemprofiel is onderverdeeld in een viertal lagen (0-25, 25-45, 45-65 en 65-90 cm-Mv.). Voor elke laag zijn door PPO¹ laboratoriummetingen uitgevoerd ten behoeve van de waterretentiekarakteristiek. Hierbij is rekening gehouden met hysteresis.

De 'uitdrogings'- en 'vernattings'-curve van de gemeten waterretentiekarakteristiek kunnen beschreven worden met een door Van Genuchten (1980) opgestelde empirische vergelijking. De parameters uit die vergelijking kunnen uit de meetresultaten geschat worden met behulp van het optimalisatieprogramma RETC (Van

¹ Deze gegevens zijn beschikbaar gesteld door W. Voogt.

Genuchten et al. , 1991). Allereerst zijn de Van Genuchten-parameters (behalve a_w) gefit op basis van de meetgegevens van de 'uitdrogings'-curve. Vervolgens is de parameter a_w gefit met behulp van de meetgegevens van de 'vernattings'-curve. De resultaten van deze fitprocedure voor de verschillende bodemlagen staan in tabel 1.

Tabel 1. Van Genuchten-parameters voor de waterretentiekarakteristiek van vier bodemlagen in PPO-kas 402 (Naaldwijk). De parameter a_i hoort bij de 'uitdrogings'-curve, de parameter a_w bij de 'vernattings'-curve. De vormparameter m is gelijk aan $1 - 1/n$ en is daarom niet vermeld. Voor de precieze betekenis van de parameters zie Wösten et al. (2001).

laag (cm-Mv.)	θ_r (-)	θ_s (-)	a_d (1/cm)	a_w (1/cm)	n (-)
0 - 25	0.1011	0.4652	0.1233	0.3581	1.3859
25 - 45	0.0009	0.4351	0.1323	0.2655	1.2593
45 - 65	0.1272	0.4648	0.0779	0.2017	1.6248
65 - 90	0.0227	0.4309	0.1011	0.7612	1.2151

Met behulp van de parameters uit tabel 1 en twee extra parameters, te weten een vormparameter l en K_s , de doorlatendheid bij verzadiging, is tevens de doorlatendheidskarakteristiek van een bodemlaag te beschrijven. Volgens Mualem (1976) is de parameter l gemiddeld ongeveer 0.5 (-).

Helaas zijn van de vier lagen uit tabel 1 geen doorlatendheden bij verzadiging bekend. Op basis van de profielbeschrijvingen van PPO en de 'Staringreeks' van Wösten et al. (2001) zijn schattingen gemaakt voor K_s van de verschillende bodemlagen. Om problemen met het infiltreren van de berekening te voorkomen, is de verzadigde doorlatendheid van de bovenste laag verhoogd naar 40 cm/d. Deze waarde ligt binnen de onzekerheidsgrenzen (i.c. gemiddelde $K_s \pm$ standaardafwijking) van de Staringreeks-gronden, die het best passen bij de profielbeschrijving van PPO. Als verzadigde doorlatendheid voor de onderste drie bodemlagen is 15 cm/d gekozen.

De aldus verkregen resultaten voor de bodemfysische eigenschappen van de diverse bodemlagen zijn voor discussie vatbaar. Met name enkele gefitte waarden voor het residuele watergehalte θ_r en de waarden van a zijn erg hoog in vergelijking met waarden, die normaal in gronden gevonden worden (zie Wösten et al., 2001). De oorzaak van deze 'slechte' fit is waarschijnlijk de afwezigheid van metingen in het droge traject. De maximum gemeten pF is slechts 2.7. Aangezien er onvoldoende metingen zijn om de waterretentiekarakteristiek voor de gehele range vast te stellen, is besloten om θ_r (en a) dan maar vrij te laten in de fit.

2.3.5 Grondwaterstand

De grondwaterstand in PPO-kas 402 varieert nauwelijks. Het peil bevindt zich tussen de 85 en 90 cm beneden maaiveld. In de berekeningen met FUSSIM is aan de onderrand dan ook een vaste grondwaterstand van 87.5 cm -Mv. opgelegd.

2.4 Scenarioberekeningen

De scenarioberekeningen hebben in tegenstelling tot de calibratieberekeningen geen betrekking op een specifieke locatie in een specifiek jaar. Ze hebben betrekking op de chrysantenteelt onder glas op zandgrond in het algemeen.

2.4.1 Invoergegevens

Bij de scenarioberekeningen is geen specifiek weerjaar gebruikt, maar het SEL-jaar (Breuer & Van de Braak, 1989). Het SEL-jaar is een afgesproken nationale standaard voor weergegevens ten behoeve van energieberekeningen voor de glastuinbouw. Het bestand is opgebouwd uit een selectie van weergegevens van het KNMI voor De Bilt over de periode 1971 tot en met 1980. Het voordeel van het SEL-jaar ten opzichte van gemiddeld weer is dat de dynamiek in het dagelijkse weer behouden blijft. Op basis van het SEL-jaar zijn potentiële transpiratiegegevens berekend². Deze gegevens zijn in de scenarioberekeningen opgelegd aan FUSSIM2.

Op basis van deze potentiële transpiratiegegevens en werkend volgens de beslisregels van het verdampingsmodel van Voogt et al. (2000) zijn de tijdstippen en de hoeveelheden van de bijbehorende watergiften berekend². De intensiteiten van deze watergiften zijn met waarden van 4 mm binnen 7 minuten erg hoog. Tijdens de modelberekeningen traden dan ook problemen op met het infiltreren van deze watergiften in de bodem. Besloten is om elke watergift uit te smeren over 10 keer zoveel tijd. Aangetoond zal worden dat het effect van het uitsmeren van de watergift over meer tijd op de modelresultaten minimaal is.

Bij gebrek aan alternatieve gegevens is bij de scenarioberekeningen hetzelfde verloop in de wortelverdeling opgelegd aan FUSSIM2 als bij de calibratie berekeningen (zie paragraaf 2.3.3).

Besloten is om de bekende gegevens uit tabel 1 (§2.3.4) te gebruiken bij de scenarioberekeningen en daarmee een uitspraak te doen over zandgronden in het algemeen. Als onderrand voor de scenarioberekeningen is een grondwaterstand van 87.5 cm-Mv. aangehouden.

Ten behoeve van de scenarioberekeningen dient het chrysanten-teeltsysteem geschematiseerd te worden. De component van de waterstroming evenwijdig aan de regenleiding wordt verwaarloosbaar klein geacht. Aangenomen is dat ruimtelijke patronen in de vochttoestand links van de sproeier gelijk maar gespiegeld zullen zijn aan de ruimtelijke patronen in de vochttoestand rechts van de sproeier. Tijdens de scenarioberekeningen wordt daarom slechts één zo'n helft doorgerekend. Het gemodelleerde stroomdomein bestaat uit 13 kolommen van 12 cm breed en uit 18 lagen van 5 cm hoog. Elke kolom bevat één plant met bijbehorend wortelstelsel. Vanwege de hoge plantdichtheid is aangenomen dat een plant alleen maar water

² Deze gegevens zijn beschikbaar gesteld door F. de Zwart.

opneemt uit zijn 'eigen' grondkolom. Er is echter wel waterstroming tussen kolommen mogelijk.

2.4.2 Doorstart procedure bij de scenario's

In de chrysantenteelt onder glas is het gebruikelijk dat gedurende de eerste dagen na het planten veel water gegeven wordt. In het verdampingsmodel van Voogt et al. (2000) is deze hoeveelheid gelijk gesteld aan de totale hoeveelheid transpiratie van het gewas van de voorafgaande teelt sinds de laatste beregeningsgift tot aan de oogst. Deze hoeveelheid water wordt toegediend in de eerste twee dagen van de daaropvolgende teelt. Het doel van deze watergift is om het vochttekort in de bodem ontstaan tijdens de voorafgaande teelt op te heffen en om de jonge plantjes 'op gang te helpen'.

In principe zijn bij elke scenarioberekening drie opeenvolgende berekeningen uitgevoerd. Het is namelijk mogelijk dat effecten van een watergeefstelsel met een slechte ruimtelijke verdeling pas in de loop der tijd duidelijk tot uitdrukking komen. Om periode-effecten (als gevolg van verschillen in de groeiomstandigheden) uit te sluiten zijn de drie berekeningen voor dezelfde periode en dus met dezelfde weersomstandigheden uitgevoerd.

De vochttoestand in de bodem aan het eind van de eerste teelt is als beginsituatie opgelegd aan de tweede teelt. De vochttoestand in de bodem aan het eind van de tweede teelt is vervolgens als beginsituatie opgelegd aan de derde teelt.

In feite heeft de eerste berekening alleen maar tot doel gehad om de begin watergift voor de volgende berekening te bepalen. Met behulp van de volgende twee berekeningen is daadwerkelijk het effect van een bepaald scenario op de gewasgroei bepaald.

2.4.3 Scenario's

Een veel gebruikte maat om de niet-uniformiteit van een watergeefstelsel aan te geven is de uniformiteits-coëfficiënt (CU) van Christiansen (Keller & Bliesner, 1990; Li, 1998; Rezende et al., 2000; Solomon, 1987). Bij een volledig uniform systeem heeft CU een waarde van 100%. Hoewel het begrip laag relatief is, wordt in het algemeen een CU van <75% laag bevonden. Voor gevoelige en ondiep wortelende gewassen wordt door Keller & Bliesner (1990) een watergeefstelsel met een CU van tenminste 85% geadviseerd.

In dit rapport wordt niet CU maar de variatiecoëfficiënt (VC) als maat voor niet-uniformiteit gebruikt. De variatiecoëfficiënt is de standaardafwijking gedeeld door het gemiddelde maal 100% (Oude Voshaar, 1995). Hoe lager de VC -waarde, des te uniformer de waterverdeling.

Op basis van vergelijking 6.3c uit Keller & Bliesner (1990) is de volgende benadering gevonden tussen VC en CU :

$$CU \cong 100 \left(1.0 - \frac{VC}{100} * \left(\frac{2}{p} \right)^{0.5} \right). \quad (2)$$

Gietwater wordt niet evenredig over de planten verdeeld als gevolg van verschillen tussen sproeiers en als gevolg van de eigenschappen van de sproeier. Planten in de buurt van de sproeier krijgen in het algemeen meer water dan planten veraf. Het is deze laatste vorm van ruimtelijke variatie, die beschouwd wordt in deze studie. Aangenomen is dat de watergift als functie van de afstand tot de sproeier een soort sinus-vorm heeft. Het gevolg hiervan is dat het vochtgehalte in droge zones minder makkelijk aangevuld kan worden met water uit nattere zones.

De watergift op verschillende afstanden van de sproeier kan berekend worden met behulp van de vermenigvuldigingsfactor f_i en de gemiddelde watergift van het basisscenario $VC0$. $f_i (-)$ is op de volgende manier gerelateerd aan VC :

$$f_i = \left(\mu + \frac{VC}{100} * \frac{2\mu}{\sqrt{2}} * \left(\cos \left(\frac{p * x}{X_T} \right) \right) \right) + y, \quad (3)$$

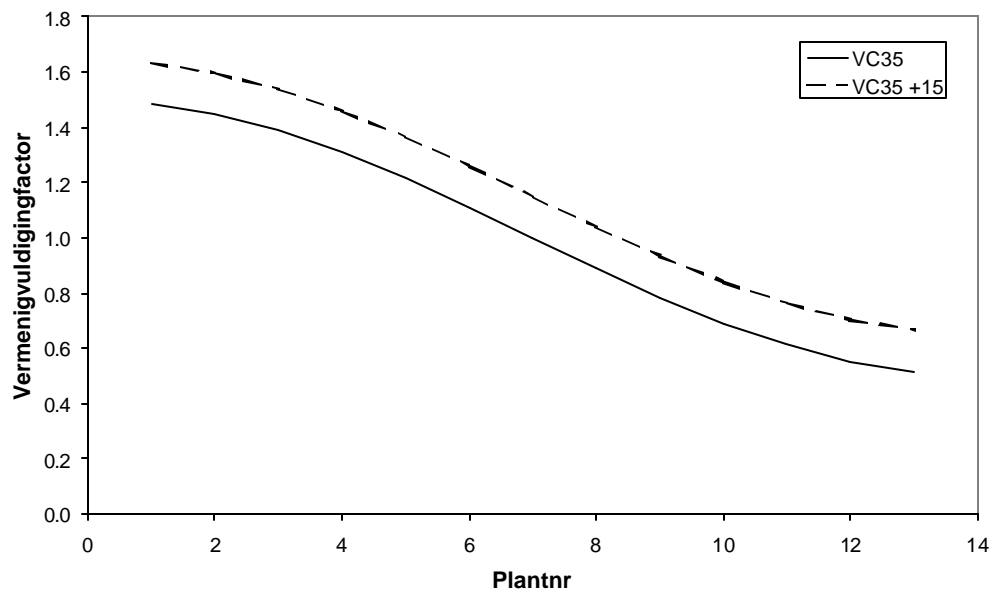
waarin μ in dit onderzoek gelijk is aan 1 (-)
 x afstand tot de sproeier (m)
 X_T maximale afstand tot een sproeier (m)
 $?$ verschuivingsfactor (-), uitleg volgt verderop in deze paragraaf

In figuur 2 is ter illustratie f_i als functie van het plantnummer ofwel de afstand tot de sproeier weergegeven.

In tabel 2 zijn alle uitgevoerde scenario's met de belangrijkste kenmerken vermeld.

Tabel 2. Overzicht van de uitgevoerde scenarioberekeningen inclusief de waarden voor de variatiecoëfficiënt VC en de verschuivingsfactor $?$.

Scenarionaam	VC (%)	$?$ (%)
VC0	0	0
VC9	9	0
VC12	12	0
VC27	27	0
VC35	35	0
VC27 +5	27	5
VC27 +10	27	10
VC27 +15	27	15
VC27 +25	27	25
VC27 +35	27	35
VC35 +15	35	15
VC35 +25	35	25



Figuur 2. De vermenigvuldigingsfactor f als functie van het plantnummer oftewel de afstand tot de sproeier voor scenario VC35 en VC35 +15 (zie tabel 2). Plant 1 bevindt zich dicht bij de sproeier. Plant 13 bevindt zich tussen twee sproeiers in.

De scenario's in dit onderzoek zijn op te delen in een tweetal groepen. De totale watergiften (gesommeerd over tijd en afstand) van de scenario's in de eerste groep zijn gelijk aan elkaar. De VC's en daarmee de verdeling van de watergiften over de planten verschilt echter (VC0 tot en met VC35). Met deze scenario's kan het effect bepaald worden van een niet-uniform verdeelde watergift op de vochttoestand in de bodem en op de wateropname door planten.

Voor de scenario's met de grootste niet-uniformiteit (VC27 en VC35) zijn aanvullende scenarioberekeningen uitgevoerd. De vorm van de verdeling van de watergift over de afstand blijft gelijk. Het gemiddelde niveau is hierbij echter verschoven. Een voorbeeld van een scenario uit deze tweede groep is VC35 +15 (zie figuur 2). Deze is verschoven langs de Y-as ten opzichte van scenario VC35 (uit de eerste groep). Concreet gezegd wordt er bij scenario's uit de tweede groep meer water aan de chrysanten gegeven. Aan de hand van deze scenario's is te bepalen hoeveel water er bij een bepaalde verdeling gegeven dient te worden om er voor te zorgen dat geen enkele plant stress als gevolg van watertekort ondervindt. Daarnaast kan bepaald worden hoeveel transpiratiereductie verwacht moet worden, wanneer netto geen drainage geaccepteerd wordt.

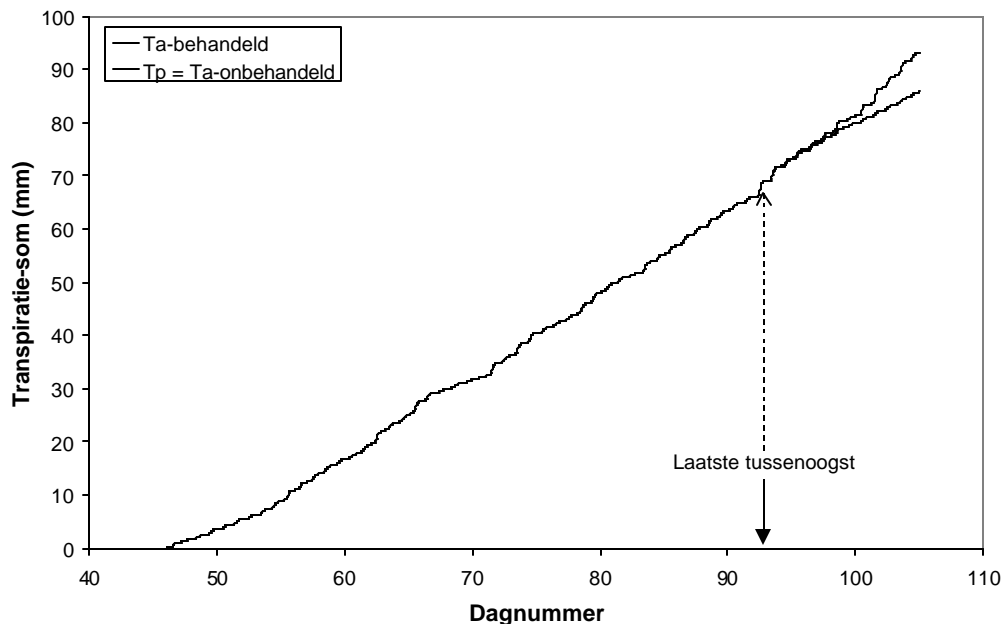
3 Resultaten en discussie

3.1 Calibratie

Het doel van de calibratie is om één combinatie van h_{r^*} en a te vinden, die het best voldoet aan de gestelde eisen (zie §2.3). Bij een aantal combinaties van h_{r^*} en a (h500a10³, h1000a10 en h1000a5) is de actuele transpiratie voor de behandelde chrysanten al voor de laatste tusse oogst lager dan de potentiële transpiratie. Gesteld was dat in ieder geval tot aan de laatste tusse oogst de actuele transpiratie van deze chrysanten gelijk moest zijn aan de potentiële transpiratie. Daarnaast is de actuele transpiratie bij deze combinaties over het algemeen veel lager dan gewenst.

Bij een aantal andere combinaties van h_{r^*} en a (h3000a10, h5000a10 en h3000a5) treedt juist het tegenovergestelde effect op. Bij die combinaties blijft de actuele transpiratie voor de behandelde chrysanten veel te lang gelijk aan de potentiële transpiratie. Dit heeft ook tot gevolg dat de actuele transpiratie onvoldoende gereduceerd wordt ten opzichte van de potentiële transpiratie.

In figuur 3 zijn de potentiële transpiratie (T_p), de gesimuleerde actuele transpiratie (T_a) van de behandelde en onbehandelde chrysanten weergegeven als functie van de tijd voor de combinatie $h_{r^*} = 2000$ en $a = 10$. Alleen de resultaten, vanaf het moment dat de behandeling is ingegaan (15 februari), zijn getoond.



Figuur 3. De potentiële (T_p) en actuele (T_a) transpiratie van de behandelde en onbehandelde chrysanten als functie van de tijd voor de combinatie h2000a10.

³ Met h500a10 wordt in dit rapport de combinatie $h_{r^*} = 500$ en $a = 10$ bedoeld.

Uit figuur 3 blijkt dat de actuele transpiratie van de behandelde chrysanten pas na de laatste tussen oogst (dag 93) minder toeneemt dan de potentiële transpiratie. De toename van actuele transpiratie is ongeveer 30% lager dan die van de potentiële transpiratie. Deze reductie werd voldoende geacht. Er heeft geen verdere optimalisatie van de parameters plaats gevonden. De actuele en potentiële transpiratie van de onbehandelde chrysanten zijn conform de gestelde eisen (§2.3) gelijk aan elkaar. De waarden voor h_{r*} en a , die bij de scenarioberekeningen gebruikt zullen worden, zijn respectievelijk 2000 cm en 10 (-).

Kanttekening is wel dat er onvoldoende geschikte meetgegevens aanwezig zijn voor een goede calibratie. De calibratie is alleen uitgevoerd voor de soort-afhankelijke parameters h_{r*} en a , niet voor bijvoorbeeld de bodemfysische parameters.

3.2 Effect van het verspreiden van de neerslag in de tijd

Bij scenario VC12 is, net als bij alle andere scenario's uit tabel 2, de neerslag verdeeld over 10 keer zoveel tijd. Om te beoordelen wat het effect van het uitsmeren van de neerslag is op de simulatieresultaten, is scenario VC12 herhaald met de neerslag uitgesmeerd over de helft van de tijd (scenario VC12*).

Er zijn lokaal verschillen aanwezig tussen de berekende drukhoogten van scenario VC12 en VC12*. De verschillen tussen de scenario's voor de diverse posten van de waterbalans zijn echter verwaarloosbaar klein. Het verloop in de opname door de planten bij scenario VC12* is identiek aan het opname-verloop bij scenario VC12.

Gezien de doelstellingen van dit onderzoek heeft het uitsmeren van dezelfde hoeveelheid neerslag over meer tijd een te verwaarlozen effect op de modelresultaten.

3.3 Effect van niet-uniform verdeelde watergiften

3.3.1 Effect op de waterbalans

De potentiële transpiratie, berekend op basis van het SEL-weerjaar, is voor alle scenario's gelijk. De hoeveelheid per teelt is 134.7 mm. In tabel 3 zijn voor diverse scenario's de waterbalansen van de tweede en derde teelt weergegeven. Gepresenteerd zijn de gemiddelde irrigatie, actuele transpiratie, drainage en de bergingsverandering. Tevens is voor plant nr. 13 de relatieve transpiratie weergegeven over de totale teeltperiode en over de laatste week van de teelt. Een negatieve waarde voor drainage betekent dat er sprake is van capillaire opstijging. Een negatieve waarde voor de bergingsverandering duidt op indroging van het bodemprofiel. Relatieve transpiratie is gelijk aan de actuele transpiratie gedeeld door de potentiële transpiratie.

Tabel 3. De gemiddelde cumulatieve irrigatie (I), cumulatieve actuele transpiratie (T_a), cumulatieve drainage (D) en bergingsverandering (DB) van de tweede en derde teelt voor de diverse scenario's (in mm). Voor plant nr. 13 is tevens de relatieve transpiratie over een teeltperiode ($T_{r,13}$) en over de laatste week van een teelt ($T_{r,13\#}$) weergegeven.

2^{de} teelt	VC0	VC9	VC12	VC27	VC35
I (mm)	134.1	134.1	134.1	134.1	134.1
T_a (mm)	134.3	134.3	134.3	130.8	127.8
D (mm)	-5.3	-3.5	-2.5	4.9	9.4
DB (mm)	5.1	3.3	2.3	-1.6	-3.1
$T_{r,13}$ (%)	99.7	99.7	99.5	86.2	76.2
$T_{r,13\#}$ (%)	99.9	100	98.9	58.9	47.2
3^{de} teelt	VC0	VC9	VC12	VC27	VC35
I (mm)	134.1	134.1	134.1	134.1	134.1
T_a (mm)	134.3	134.3	134.1	130.0	126.6
D (mm)	-2.6	-0.2	0.6	5.3	8.5
DB (mm)	2.4	0.0	-0.6	-1.2	-1.0
$T_{r,13}$ (%)	99.7	99.7	98.6	83.1	72.2
$T_{r,13\#}$ (%)	100	100	92.9	52.2	44.4

De gemiddelde irrigatie is bij alle scenario's en teelten gelijk, de verdeling van de irrigatie over de planten zal echter verschillen. De gemiddelde actuele transpiratie blijft alleen bij de scenario's VC27 en VC35 beduidend achter bij de potentiële transpiratie. De gemiddelde actuele transpiratie zal echter bij geen enkel scenario helemaal gelijk zijn aan de potentiële transpiratie omdat de chrysanten in het begin net niet de gewenste hoeveelheid water op kunnen nemen. Het feit dat $T_{r,13}$ zelfs bij het scenario met een volledig uniform verdeelde watergift niet precies gelijk is aan 100%, bevestigt dit.

Bij de tweede teelt van scenario VC27 en VC35 is netto sprake van wegzijging, bij de scenario's met een meer uniform verdeelde watergift is er netto sprake van capillaire opstijging. Als gevolg van de beslisregels van het verdampingsmodel van Voogt et al. (2000) wijkt de gemiddelde irrigatie slechts heel weinig af van de potentiële transpiratie. Volgens verwachting is de netto uitspoeling c.q. capillaire opstijging dan ook niet erg groot.

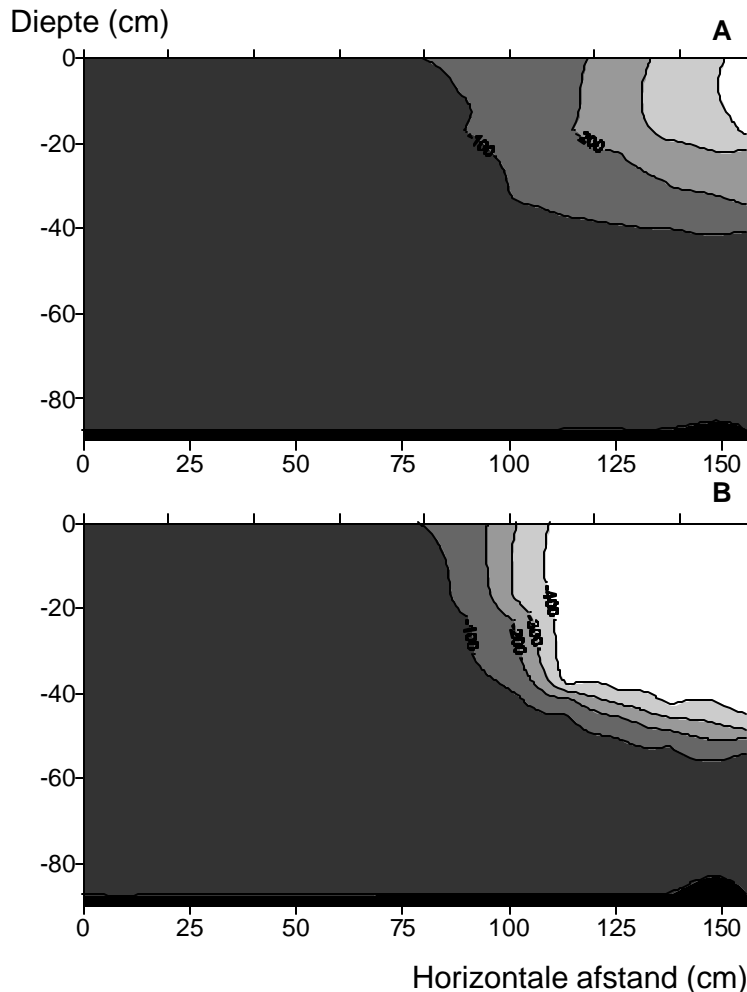
Naarmate het gietwater minder uniform verdeeld wordt, neemt de relatieve transpiratie van de plant, die het minste water ontvangt (ofwel $T_{r,13}$), af. Aan de variabele $T_{r,13\#}$ is te zien dat deze afname voor een deel optreedt in de laatste week voor de oogst. In die week wordt namelijk niet meer geïrrigeerd en moet plant 13 aan zijn opnamevraag voldoen met een ontoereikende watervoorraad.

De resultaten van de derde teelt voor de diverse scenario's versterken het beeld, dat planten (met name degenen die het minste water ontvangen) bij een watergeefstelsel met een slechte uniforme verdeling niet makkelijk aan hun opnamevraag kunnen voldoen. Zo zijn de gemiddelde actuele transpiratie, $T_{r,13}$ en $T_{r,13\#}$ bij de derde teelt lager dan (of gelijk aan) die van de tweede teelt ondanks dezelfde irrigatie en potentiële transpiratie. De verklaring hiervoor is dat de vochtverdeling in de bodem bij de derde teelt nog onregelmatiger verdeeld is dan bij de tweede teelt. Bij de derde teelt neemt de wegzijging toe c.q. de capillaire opstijging af ten opzichte van de tweede teelt. Uitzondering is het scenario met de slechtste

verdeling. Vermoedelijk is het 'teveel' aan water al tijdens de tweede teelt uit dit systeem gedraineerd en ontstaat er een soort evenwichtssituatie. Tijdens de derde teelt is de bergingsverandering bij dit scenario (VC35) namelijk kleiner dan bij VC27.

3.3.2 Effect op de drukhoogteverdeling

De drukhoogteverdeling aan het einde van de derde teelt van scenario VC9 en VC27 is weergegeven in figuur 4.



Figuur 4. Verdeling van de drukhoogten (cm) aan het einde van de 3^e teelt voor scenario VC9 (A) en VC27 (B).

Wanneer het gietwater uniform verdeeld wordt, zullen de drukhoogten alleen variëren met de diepte en niet met de afstand tot de sproeier. Naarmate een watergeefstelsel gietwater minder uniform verdeelt, wordt de verdeling van de drukhoogten in het profiel heterogener. De verschillen tussen natte zones in het stroomdomein en droge zones nemen toe (figuur 4). Planten op grote afstand van de sproeier (rechter bovenhoek) hebben bij het scenario met de slechte waterverdeling

(VC27) te maken met een droge wortelzone en zullen dus meer moeten doen om aan hun opnamevraag te voldoen. Bij het scenario met de uniformere waterverdeling (VC9) is de wortelzone ten opzichte van VC27 veel vochtiger. Hetgeen de wateropname door de chrysanten vergemakkelijkt.

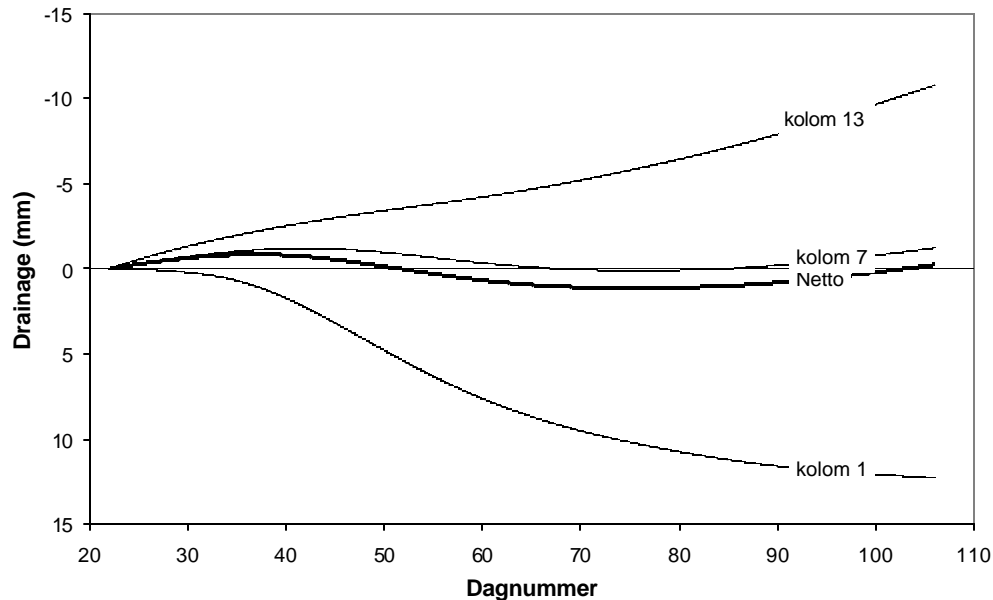
De verdelingen uit figuur 4 zijn weergaven van de drukhoogten op het moment van de oogst, dus na een week lang niet irrigeren. De drukhoogten zijn ook bij het scenario met de slechte waterverdeling niet lager dan -500 cm. De waarden vallen daarmee binnen de range van de gemeten waterretentiekarakteristiek. Het effect van de hoge gefitte waarden voor θ_r (tabel 1) op de modelresultaten zal dan nog niet zo groot zijn.

3.3.3 Drainage en uitspoeling

De suggestie wordt gewekt dat de netto-drainage van scenario VC9 derde teelt bijna 0 mm (tabel 3) is. In werkelijkheid treedt er wel degelijk drainage op. In figuur 5 zijn de netto-drainage en de drainage over de onderrand van kolom 1 (dicht bij de sproeier), 7 (midden) en 13 (tussen 2 sproeiers in) van scenario VC9 derde teelt als functie van de tijd weergegeven. Een negatieve waarde voor drainage betekent capillaire opstijging. Een positieve waarde betekent wegzijging. Let op de waarden op de Y-as staan in omgekeerde volgorde. Wegzijging is daarmee naar beneden gericht en capillaire opstijging omhoog.

Bij deze teelt van scenario VC9 blijkt in de loop van de tijd netto vrijwel geen wegzijging dan wel capillaire opstijging op te treden over de breedte van 156 cm. Dichtbij de sproeier (kolom 1) is wel degelijk sprake van wegzijging van water naar de ondergrond. Tussen twee sproeiers in (kolom 13) vindt juist capillaire opstijging plaats.

Zolang de netto-drainage bij benadering gelijk is aan nul, maakt het niet uit dat er gietwater wegzijgt naar de ondergrond. Via capillaire opstijging komt namelijk water vanuit de ondergrond terug in het bodemprofiel. Dit is geen verontrustende situatie wanneer de aandacht alleen uitgaat naar water. De situatie verandert echter wanneer de aandacht ook uitgaat naar de chemische samenstelling van het water. Aan gietwater in de beschouwde teeltsystemen worden nutriënten toegevoegd. In het gietwater, dat wegzijgt naar de ondergrond, zitten naar alle waarschijnlijkheid nog nutriënten. Deze nutriënten zijn niet meer beschikbaar voor je gewas en hebben bovendien een vermestende invloed op het grond- en/of omringende oppervlaktewater. Water dat vanuit de ondergrond via capillaire opstijging in het bodemprofiel komt, heeft een bepaalde chemische samenstelling. In het ideale geval komt deze samenstelling overeen met de nutriëntenwensen van het gewas. Meestal zal dat echter niet het geval zijn. Lokaal tekort aan nutriënten en verzouting van het bodemprofiel met ongewenste componenten kunnen het gevolg zijn.



Figuur 5. De netto-drainage en de drainage over de onderrand van kolom 1 (dicht bij de sproeier), 7 (midden in het stroomdomein) en 13 (tussen 2 sproeiers in) van scenario VC9 derde teelt als functie van de tijd.

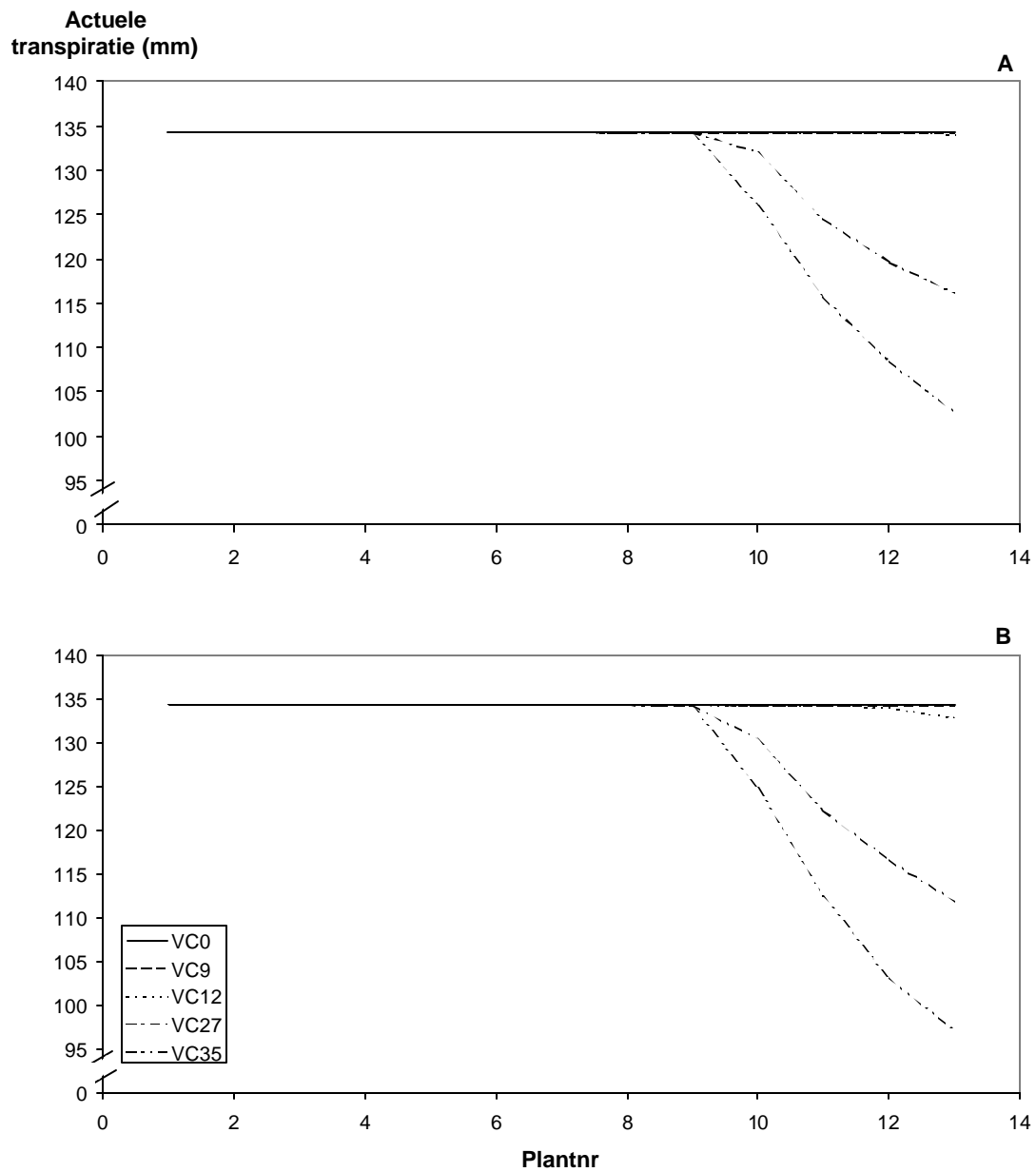
3.3.4 Effect op de opname

Uit tabel 3 blijkt reeds het effect van niet-uniform verdeeld watergeven op de relatieve transpiratie oftewel opname door plant 13. Een watergeefstelsel met een slechte verdeling resulteert in een lagere $T_{r,13}$ dan een systeem met een uniformere waterverdeling.

Niet alleen de plant 13 (midden tussen twee sproeiers) heeft bij een watergeefstelsel met een slechte verdeling problemen om aan zijn opnamevraag te voldoen. Ook andere planten (nr 10 – 12) hebben dat. In figuur 6 is de actuele transpiratie per plant weergegeven als functie van het plantnummer oftewel afstand tot de sproeier voor de tweede en derde teelt van de scenario's. Het verschil tussen de actuele transpiratie en de potentiële transpiratie is voor plant 1 tot en met 9 ongeacht de verdeling van de watergiften verwaarloosbaar klein. Plant 10 tot en met 13 kunnen in ieder geval bij scenario VC27 en VC35 niet voldoende water opnemen.

De variatiecoëfficiënt van een gemiddeld watergeefstelsel in de Nederlandse chrysantenteelt onder glas is ongeveer 12% (pers. comm. W. Voogt). Bij deze VC voor de in deze studie gebruikte zandgrond en voor de gebruikte geïdealiseerde worst-case sinus-vormige waterverdeling blijkt dat alle planten tijdens de tweede teelt wel en tijdens de derde teelt niet meer aan de potentiële transpiratie kan voldoen. Ook bij de derde teelt van VC27 en VC35 (figuur 6) is een verslechtering van de situatie tussen de twee sproeiers in (droge plekken) te zien ten opzichte van de tweede teelt. Meerdere teelten achter elkaar uitvoeren zonder aanvullende

maatregelen lijkt voor systemen met een variatiecoëfficiënt gelijk aan of groter dan 12% niet raadzaam.



Figuur 6. De actuele transpiratie per plant weergegeven als functie van het plantnummer (oftewel afstand tot de spoeier) voor de tweede (A) en derde teelt (B) van de beschouwde scenario's.

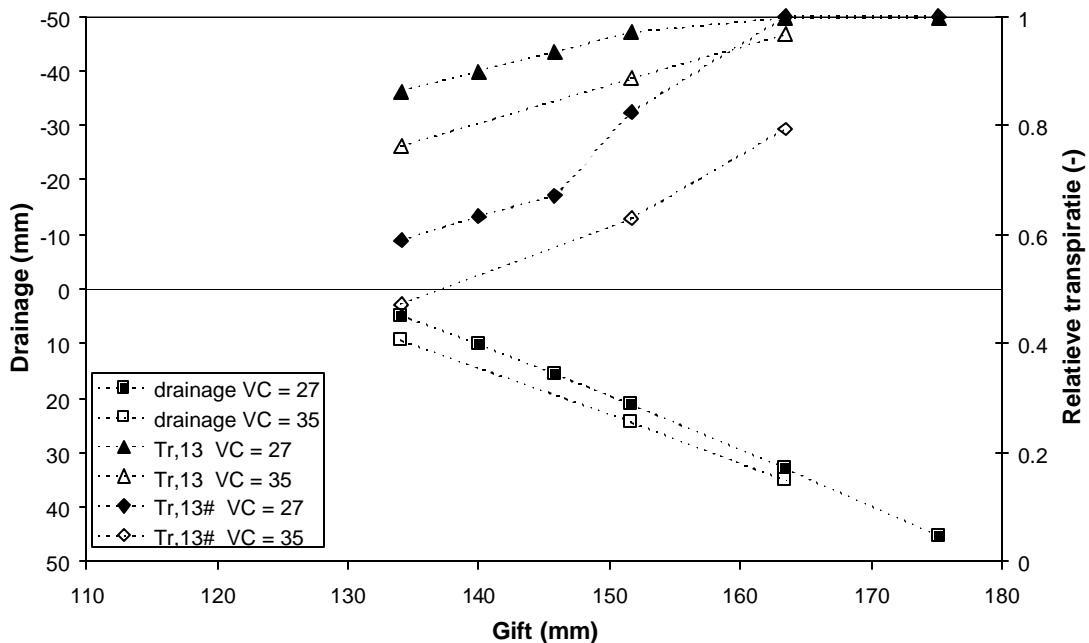
3.4 Effect van meer watergeven

3.4.1 Drainage en opname als functie van watergift

Voor de scenario's met de grootste niet-uniformiteit (VC27 en VC35) zijn aanvullende berekeningen gedaan. Hierbij is de basis-watergift van 134.1 mm bij VC27 verhoogd met stappen van 5, 10, 15, 25 en 35% en bij VC35 verhoogd met 15% en 25%. De verdeling blijft daarbij in principe hetzelfde, alleen het (gemiddelde) niveau is dus verhoogd (figuur 2).

De aandacht bij het beoordelen van de resultaten van deze berekeningen is vooral uitgegaan naar plant 13. Bij deze plant is het eerste en het meeste de invloed merkbaar van de slecht verdeelde watergiftten. Verondersteld wordt dat alle planten voldoende water op kunnen nemen vanuit de bodem, wanneer plant 13 voldoende water op kan nemen uit de bodem.

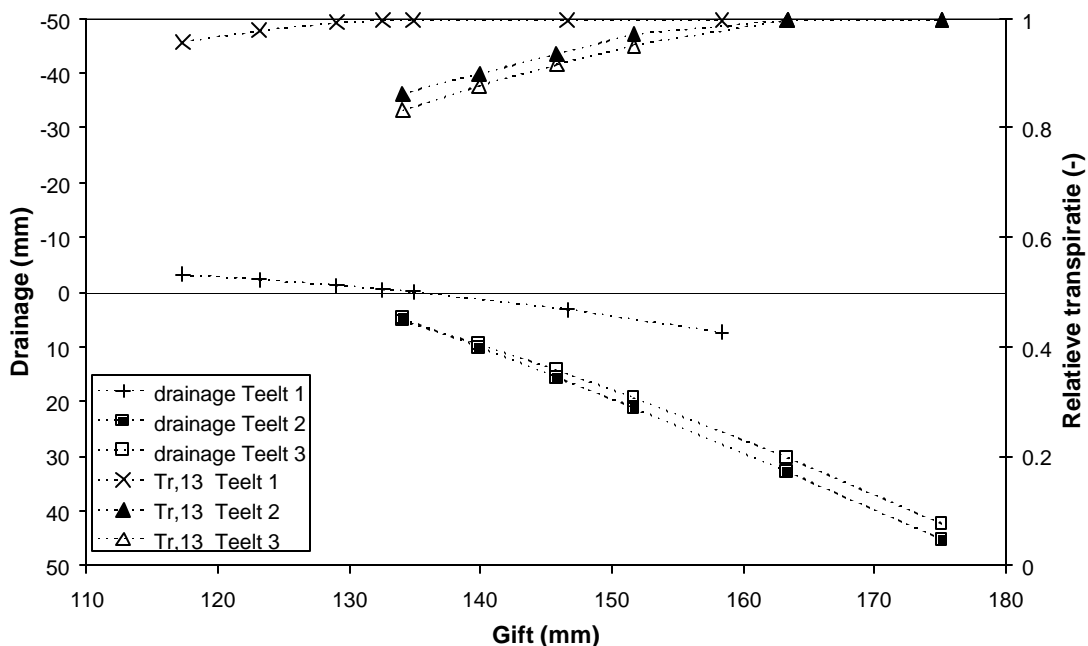
In figuur 7 zijn voor plant 13 de relatieve transpiratie over de 2^{de} teelt ($T_{r,13}$) en over de laatste week van de 2^{de} teelt ($T_{r,13\#}$) weergegeven als functie van de gemiddelde watergift voor alle scenario's met een VC van 27% en 35%. Bij een relatieve transpiratie van 1 is de actuele transpiratie gelijk aan de potentiële transpiratie. Tevens is voor al deze scenario's de netto-drainage weergegeven als functie van de gemiddelde watergift.



Figuur 7. De relatieve transpiratie voor plant 13 over de 2^{de} teelt ($T_{r,13}$) en over de laatste week van de 2^{de} teelt ($T_{r,13\#}$) weergegeven als functie van de gemiddelde watergift voor alle scenario's met een variatiecoëfficiënt van 27 en 35%. Tevens is de netto-drainage als functie van de gemiddelde watergift weergegeven; een negatieve waarde voor drainage betekent capillaire opstijging en een positieve waarde wegzijging.

Uit figuur 7 blijkt dat naarmate er meer water gegeven wordt, er meer drainage te verwachten is. De drainage is bij VC35 hoger dan bij VC27. Naarmate er meer water gegeven wordt, kan plant 13 meer water opnemen en zo beter aan zijn opnamevraag voldoen. Bij een gelijke gemiddelde watergift is de relatieve transpiratie van VC27 beter dan bij VC35. Ter illustratie is ook de relatieve transpiratie van plant 13 over de laatste week van de teelt weergegeven voor de diverse scenario's. Tijdens de laatste week van een teelt wordt in de praktijk (en ook in de berekeningen) geen water gegeven. Het gevolg is dat de actuele transpiratie heel duidelijk achterblijft bij de potentiële transpiratie. Wanneer de gemiddelde watergift duidelijk hoger is dan de basis-gift van 134.1 mm, vindt er in de bodem meer berging plaats waaruit de plant in de laatste week van de teelt kan putten. De $T_{r,13\#}$ gaat in die gevallen dan ook richting de waarde 1.

In figuur 8 zijn de relatieve transpiratie en de netto-drainage van de drie teelten weergegeven voor alle scenario's met een VC van 27%. Hierin is te zien wat het effect is op de relatieve transpiratie en drainage wanneer er meerdere opeenvolgende teelten uitgevoerd worden.



Figuur 8. De relatieve transpiratie voor plant 13 ($T_{r,13}$) en de netto-drainage voor de drie teelten van alle scenario's met een VC van 27% weergegeven als functie van de gemiddelde watergift.

De resultaten van teelt 1 wijken behoorlijk af. De reden is dat in teelt 1 met een natte beginsituatie is gestart en in de eerste twee dagen geen extra water gegeven wordt ter compensatie van eventuele vochttekorten ontstaan in voorafgaande teelten. Teelt 1 heeft immers slechts tot doel om de vochttoestand in de bodem aan het begin van teelt 2 vast te stellen. Strikt genomen zijn de $T_{r,13}$ - en drainage-resultaten van teelt 1 dan ook niet relevant, maar ze zijn wel illustratief.

De relatieve transpiratie van teelt 3 is iets slechter dan van teelt 2. Gunstig is echter dat de netto-drainage bij teelt 3 iets is afgenomen ten opzichte van teelt 2.

3.4.2 Minimale gift zonder opname-reductie

Interessant is de vraag hoeveel water er minimaal gegeven moet worden bij een watergeefstelsel met een bepaalde verdeling zodat bij geen enkele plant de actuele transpiratie achterblijft bij de potentiële transpiratie. Plant 13 moet de meeste moeite doen om water op te nemen uit de bodem. Als $T_{r,13}$ bij benadering gelijk is aan 1, kunnen alle planten voldoende water opnemen. De bijbehorende watergift is dan de minimale gemiddelde watergift waarbij geen opname-reductie optreedt.

Uitgaande van teelt 2 (figuur 7) is deze minimale watergift voor de scenario's met een VC van 27% gelijk aan ongeveer 163 mm. Ter herinnering: de basis-watergift is 134.1 mm. Bij watergeefsystemen met een variatiecoëfficiënt van 35% moet deze minimale watergift nog hoger zijn (schatting met behulp van extrapolatie ± 168 mm).

Een watergeefstelsel met een VC van 27% en een watergift van 163 mm heeft tot resultaat, dat alle planten voldoende water op kunnen nemen. Bijkomend effect is wel dat er netto een drainage van ongeveer 32 mm geaccepteerd moet worden. Bij een watergeefstelsel met een VC van 35% en een watergift van 168 mm is de drainage zelfs nog hoger (ongeveer 40 mm).

3.4.3 Maximale gift zonder (netto-)drainage

Vanuit milieukundig oogpunt gezien is het juist interessant om de (netto-)drainage te minimaliseren. Dit kan door de gemiddelde watergift van een systeem met een bepaalde variatiecoëfficiënt te verlagen. Aan de hand van figuur 7 is (na extrapolatie) bepaald dat bij een gemiddelde watergift van 129 mm er netto geen drainage meer optreedt bij een systeem met een VC van 27%. Helaas kan plant 13 in dat geval slechts 85% van de gewenste hoeveelheid water opnemen.

De watergift, waarbij netto geen drainage optreedt, voor een systeem met een VC van 35% zal veel lager liggen (in de buurt van 124 mm). Plant 13 kan in dat geval ten hoogste 70% van de gewenste hoeveelheid water opnemen.

Ter herinnering: een netto-drainage van 0 mm betekent niet dat er geen wegzijging optreedt (zie §3.3.3).

4 Conclusies

Het simulatiemodel FUSSIM2 is gebruikt om te onderzoeken of ruimtelijke variaties in de watergiften leiden tot (meetbare) verschillen in de vochttoestand van de bodem en daardoor tot verschillen in de wateropname door de planten. Daarnaast is bepaald wat de minimale gift is waarbij geen enkele plant stress ondervindt als gevolg van vochttekort. En er is berekend hoeveel transpiratiereductie als gevolg van vochttekort te verwachten is, wanneer er netto geen wegzijging van water geaccepteerd wordt. In deze studie is geen rekening gehouden met stoffentransport en dus ook niet met verzouting noch met osmotische hindering op de wateropname.

Alvorens scenario's door te rekenen zijn de soort-afhankelijke parameters h_p en a uit vergelijking 1 op een beperkte dataset gecalibreerd. De waarden zijn respectievelijk 2000 cm en 10 (-).

Bij sproeiersystemen met een slechte ruimtelijke verdeling (VC27 en VC35) blijft de actuele transpiratie beduidend achter bij de potentiële transpiratie. Bovendien is er bij deze systemen netto sprake van wegzijging. Bij systemen met een uniformere ruimtelijke verdeling (VC0, VC9 en VC12) kunnen planten veel beter aan hun gewenste opname voldoen. Netto is er bij deze systemen sprake van capillaire opstijging. Wanneer er netto capillaire opstijging optreedt, betekent dat overigens niet dat er lokaal geen wegzijging van water en dus uitspoeling van nutriënten plaatsvindt.

Wanneer gietwater ruimtelijk slecht verdeeld wordt, ontstaan er zones met verschillende vochtgehalten in het beschouwde stroomdomein. Tussen twee sproeiers in is het veel (meetbaar) droger dan vlak bij een sproeier. Wanneer gietwater beter verdeeld wordt, zijn deze verschillen kleiner. Planten, die in een droge zone staan, moeten meer moeite doen om voldoende water op te nemen vanuit de bodem. Bij sproeiersystemen met een slechte ruimtelijk verdeling lukt dat niet altijd. Het gevolg is dat de actuele transpiratie achterblijft bij de potentiële transpiratie en dat er dus groeireductie als gevolg van vochttekort op kan treden.

Wanneer bij systemen met een slechte ruimtelijke waterverdeling zonder aanvullende maatregelen meerdere teelten achter elkaar uitgevoerd worden, zullen de planten in de droogste zones van het stroomdomein bij de latere teelten meer stress en dus groeireductie als gevolg van vochttekort ondervinden.

Indien de transpiratiereductie verwaarloosbaar klein moet zijn voor de plant die het minste water ontvangt, dan blijkt dit in de derde teelt voor de gebruikte zandgrond en voor de gebruikte waterverdeling nog net op te gaan voor de situatie met $VC = 12\%$. De relatieve transpiratie van deze plant bij $VC = 27\%$ en $VC = 35\%$ was respectievelijk 83% en 72%. Bij systemen met een uniformere waterverdeling kunnen alle planten voldoende water opnemen.

Meer watergeven bij een systeem met een bepaalde ruimtelijke waterverdeling heeft tot gevolg dat de planten meer water op kunnen nemen vanuit de bodem. Maar dat heeft netto ook meer wegzijging c.q. minder capillaire opstijging tot gevolg. Bij bijvoorbeeld een watergeefstelsel met een variatiecoëfficiënt van 27% en een watergift van minimaal 163 mm kunnen alle planten voldoende water opnemen uit de bodem. Er is dan wel netto 32 mm wegzijging.

Wanneer netto geen wegzijging geaccepteerd wordt, moet de gemiddelde watergift teruggeschoefd worden (bijvoorbeeld bij VC27 naar 129 mm). In dat geval kunnen planten in de droge zones slechts een deel van de gewenste hoeveelheid water opnemen (plant 13 slechts 85% bij VC27).

De beschouwde periode bevindt zich in het voorjaar. Het is niet ondenkbaar dat in de zomer de effecten van niet-uniform verdeelde watergiftten op de opname door planten groter zullen zijn. De gepresenteerde resultaten kunnen hierover helaas geen uitsluitsel geven.

In deze studie is geen rekening gehouden met stoffentransport, verzouting en eventuele osmotische hindering op wateropname. In dat laatste geval is de hier berekende wateropname overschat.

Referenties

Breuer, J.J.G. & N.J. van de Braak, 1989. Reference year for Dutch greenhouses. *Acta Horticulturae* 248:101-108.

Campbell, G.S., 1991. Simulation of water uptake by plant roots. In: Hanks, J. & J.T. Ritchie (eds.), *Modeling plant and soil systems*, p. 273-285. Series in Agronomy 31, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

Genuchten, M.T. van, 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44:892-898.

Genuchten, M.T. van, F.J. Leij & S.R. Yates, 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report No. EPA/600/2-91/065, US Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma.

Heemskerk, M.J., E.A. van Os, M.N.A. Ruijs & R.W. Schotman, 1997. Verbeteren watergeefsystemen voor grondgebonden teelten. Rapport 84, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk.

Heinen, M., 1997. Dynamics of water and nutrients in closed, recirculating cropping systems in glasshouse horticulture. With special attention to lettuce grown in irrigated sand beds. Proefschrift Landbouwniversiteit Wageningen.

Heinen, M. 1999. Fertigatiestrategieën om de zoutverdeling in de wortelzone te beheersen. Simulatieberekeningen voor een zandbed-teeltsysteem in de glastuinbouw. Rapport 107, DLO Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek, Wageningen.

Heinen, M. & 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.

Heinen, M. & P. de Willigen, 2001. FUSSIM2 version 5. New features and updated user guide. Alterra rapport 363, Alterra, Wageningen (*in press*).

Keller, J. & R.D. Bliessner, 1990. *Sprinkle and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Li, J., 1998. Modeling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system. *Agricultural Water Management* 38:135-146.

- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12:513-522.
- Mualem, Y., 1984. A modified dependent-domain theory of hysteresis. *Soil Science* 137:283-291.
- Oude Voshaar, J.H., 1995. *Statistiek voor onderzoekers. Met voorbeelden uit de landbouw- en milieuwetenschappen.* Wageningen Pers, Wageningen.
- Rezende, R., A.C.A. Gonçalves, J.A. Frizzone, M.V. Folegatti & J.A. Muniz, 2000. Non-uniformity conventional sprinkler irrigation effects on bean yield. *Acta Horticulturae* 537:853-857.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1:318-333.
- Roos-Schali, G.B.K., M.P. Leunissen & K. Krijt, 1994. Lozingenbesluit WVO Glastuinbouw met nota van toelichting zoals verschenen in Staatsblad 699 van 29 september 1994. Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Solomon, K.H., 1987. *Sprinkler irrigation uniformity.* ASPAC, Tapei City.
- Voogt, W., J.A. Kipp, R. de Graaf & L.Spaans, 2000. A fertigation model for glasshouse crops grown in soil. *Acta Horticulturae* 537: 495-502.
- Voogt, W., 2001. Toetsing fertigatiemodel voor chrysantenteelt in grond. PPO-rapport xxx, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Naaldwijk (*in prep.*).
- Willigen, P. de & M. van Noordwijk, 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. Proefschrift Landbouwniversiteit Wageningen.
- Willigen, P. de & 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.
- Willigen, P. de & 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.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot & J. Stolte, 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Alterra rapport 153, Alterra, Wageningen.