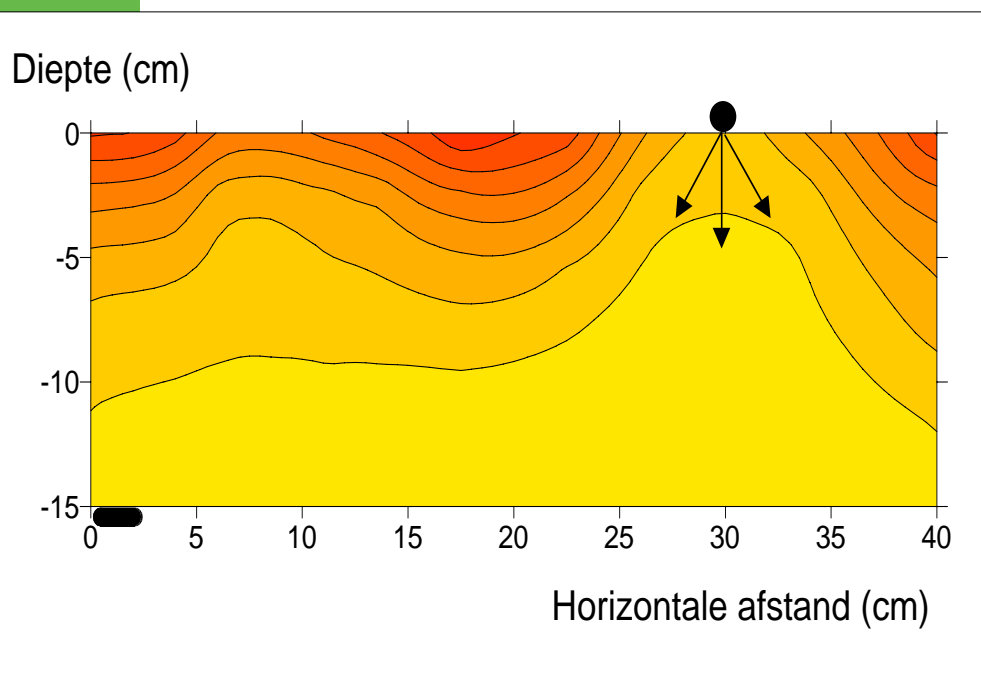


Waar en wat meten met sensoren in een substraat?

Modelverkenning naar geschikte meetvariabelen en meetplekken in een zandbed- en steenwolteeltsysteem in de glastuinbouw

F.B.T. Assinck
M. Heinen



Alterra-rapport 264, ISSN 1566-7197

Waar en wat meten met sensoren in een substraat?

Waar en wat meten met sensoren in een substraat?

Modelverkenning naar geschikte meetvariabelen en meetplekken in een zandbed- en steenwolteeltsysteem in de glastuinbouw.

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

Alterra-rapport 264

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

REFERAAT

F.B.T. Assinck & M. Heinen, 2001. *Waar en wat meten met sensoren in een substraat; Modelverkenning naar geschikte meetvariabelen en meetplekken in een zandbed- en steenwolteeltsysteem in de glastuinbouw*. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 264. 38 blz. 11 fig.; 2 tab.; 18 ref.

In gesloten, recirculerende teelten op substraat zijn de omstandigheden in de wortelzone goed onder controle te houden. De hoeveelheid, frequentie en manier van fertigeren kan gebruikt worden om de omstandigheden in de wortelzone te sturen. Daarvoor moeten de omstandigheden wel goed gemeten worden. Maar: "Waar en wat moet er gemeten worden in een teeltsysteem?" Modelberekeningen met het simulatiemodel FUSSIM2 laten zien dat het meten van de *EC* in de buurt van de plant het meest geschikt is om de omstandigheden te beoordelen. Met een berekening is aangetoond dat het mogelijk is om fertigatie te sturen op basis van de waarde van de *EC*, gemeten op een plek in het teeltsysteem.

Trefwoorden: drukhoogte, *EC*, elektrische geleidbaarheid, fertigatie, glastuinbouw, sensor, simulatiemodellen, steenwol, watergehalte, zandbed

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door NLG 30,00 (€14,-) over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 264. 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	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Materiaal en methoden	13
2.1 Het simulatiemodel FUSSIM2	13
2.2 De teeltsystemen	14
2.2.1 Zandbed-teeltsysteem	14
2.2.2 Steenwol-teeltsysteem	16
2.3 Scenario's	17
2.3.1 Zandbed	17
2.3.2 Steenwol	18
2.4 Beoordelingscriteria	18
3 Resultaten en discussie	21
3.1 Zandbed	21
3.1.1 Effect van het aantal druppelaars	21
3.1.2 Effect van het irrigatiecriterium	23
3.1.3 Effect van irrigeren met 'schoon' water	26
3.1.4 Waar en wat meten in het zandbed-teeltsysteem	27
3.2 Steenwol	28
3.2.1 Meetplekken in het steenwol-teeltsysteem	28
3.2.2 Drainwater	29
3.2.3 Fertigatie sturen op de EC in een meetplek	30
4 Conclusie	33
Referenties	35
Bijlage I. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek	37

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.

Met dank aan Leo Marcelis (Plant Research International) voor het beschikbaar stellen van het model INTKAM.

Samenvatting

Gesloten, recirculerende teelten op substraat krijgen in de Nederlandse glastuinbouwsector een steeds groter aandeel. Een belangrijke reden is de betere controle over de omstandigheden in de wortelzone en dus over de groei van het gewas. De hoeveelheid, frequentie en manier van fertigeren kan daarbij gebruikt worden om de omstandigheden te sturen. Voor een goede controle over en sturing van de omstandigheden in de wortelzone is het van belang om deze omstandigheden goed te meten. Daarvoor moet eerst de vraag beantwoord worden: "Waar en wat moet er gemeten worden in een teeltsysteem?"

Modelberekeningen met het simulatiemodel FUSSIM2 laten zien dat het meten van de *EC* in de buurt van de plant het meest geschikt is om te beoordelen of omstandigheden in het substraat gunstig zijn voor de groei van de plant. Met een berekening is aangetoond dat het ook mogelijk is om fertigatie te sturen op basis van de waarde van de *EC*, gemeten op een plek in het teeltsysteem.

1 Inleiding

Sinds de tweede helft van de jaren '70 heeft er een omschakeling in de Nederlandse glastuinbouwsector plaatsgevonden van telen in de grond naar telen op substraat (Sonneveld, 2000). Deze ontwikkeling werd begin jaren '90 nog eens extra gestimuleerd door het beleid van de Nederlandse regering (Nationaal Milieubeleidsplan, Structuurnota Landbouw). Daarin werd namelijk gesteld dat tuinders over moeten stappen op gesloten, recirculerende teeltsystemen. Substraten lenen zich uitstekend om gebruik te worden in deze systemen. Technisch is het bij substraten namelijk veel makkelijker om drainagewater op te vangen en eventueel weer geschikt te maken als voedingsoplossing.

Een zeer groot voordeel van telen op substraat is dat de omstandigheden in het substraat en daarmee de groei van het gewas veel beter onder controle gehouden kunnen worden. De hoeveelheid, frequentie en manier van irrigeren met een voedingsoplossing kan daarbij gebruikt worden om de omstandigheden te sturen. Zowel bij telen in de grond als bij telen op substraat bestaat het gevaar van ophoping van zouten en nutriënten in het systeem. Enerzijds omdat water aan het grond- c.q. substraatoppervlak verdampt en de zouten en nutriënten achterblijven. Anderzijds omdat nutriënten en zouten in een lagere concentratie worden opgenomen dan de concentratie van de aangeboden voedingsoplossing. In het laatste geval kan onderscheid worden gemaakt tussen voedingsstoffen en andere zouten (zoals Na en Cl). De concentratie in de voedingsoplossing is groter gesteld dan de verwachte opnameconcentratie om uitputting te voorkomen. Andere zouten worden vaak in hele kleine hoeveelheden (of eventueel in het geheel niet) opgenomen maar deze worden wel constant aangevoerd met (slecht) gietwater. Met name in recirculerende systemen is ophoping dan het geval.

Te hoge zoutconcentraties in de wortelzone kunnen negatief zijn voor het gewas. Wortels zullen niet snel zones ingroeien waar hoge concentraties aanwezig zijn. Bijvoorbeeld Schwarz et al (1995) vonden dat er minder wortels aanwezig waren in zones met een hoge *EC*. Indien de hele wortelzone een te hoge zoutconcentratie heeft, zal het gewas groeireductie vertonen (zie bijvoorbeeld Maas & Hoffman, 1977). Wanneer een plant geforceerd wordt om met een deel van het wortelstelsel in een zone met hoge *EC* te groeien en het andere deel in een zone met lage *EC*, dan zal de plant voornamelijk nutriënten opnemen uit de zone met de hoge *EC* en voornamelijk water uit de zone met de lage *EC* (Sonneveld, 2000).

De manier om te controleren of de omstandigheden in het substraat gunstig zijn voor de groei van een gewas is het uitvoeren van metingen. Het is dan wel van belang om te weten wat er het beste gemeten kan worden en waar het beste gemeten kan worden in het teeltsysteem. Op deze twee vragen wordt in dit onderzoek met behulp van modelberekeningen voor een zandbed- en een steenwol-teeltsysteem antwoord gegeven. Daarnaast wordt ook onderzocht of het mogelijk is om fertigatie te sturen op basis van de waarde van een meetvariabele op een bepaalde meetplek.

In dit rapport wordt toelichting gegeven op het gebruikte rekenmodel (FUSSIM2), de gemodelleerde teeltsystemen en de aanpak van het probleem. Vervolgens worden de resultaten van de modelberekeningen besproken en enkele conclusies gegeven.

2 Materiaal en methoden

In dit rapport worden simulatieberekeningen uitgevoerd voor een zandbed- en een steenwolteeltsysteem met behulp van het model FUSSIM2. Het model FUSSIM2 is ontwikkeld door Heinen (1997) en Heinen & De Willigen (1998, 2001). De in dit rapport uitgevoerde simulatieberekeningen zijn verkennend van aard en zijn derhalve niet getoetst aan metingen.

In dit hoofdstuk zullen de hoofdzaken van het model FUSSIM2 en de beide teeltsystemen weergegeven worden. Daarnaast wordt beschreven welke simulatieberekeningen uitgevoerd zijn en hoe de resultaten van deze berekeningen zijn beoordeeld.

2.1 Het simulatiemodel FUSSIM2

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

Waterbeweging

In FUSSIM2 wordt de Richards-vergelijking numeriek opgelost voor een gegeven begintoestand en gegeven randvoorwaarden. De beweging van water in poreuze media is sterk afhankelijk van de fysische eigenschappen van het medium. De waterretentievergelijking (Van Genuchten, 1980) en de doorlatendheidsvergelijking (Mualem, 1976) worden in FUSSIM2 gebruikt om de fysische eigenschappen van het poreuze medium te beschrijven. Er wordt hierbij rekening gehouden met hysteresis.

Stoftransport

Het transport van stoffen in poreuze media wordt beschreven met behulp van de convectie-dispersie/diffusie vergelijking. FUSSIM2 kan rekening houden met adsorptie, maar voor de beschouwde media (zandbed en steenwol) is dit niet van belang.

Opname van water en nutriënten door wortels

De gebruikte vergelijkingen voor waterbeweging en stoftransport houden rekening met de opname van water en nutriënten door het wortelsysteem. Gebaseerd op de analyse van de opname door één wortel hebben De Willigen & Van Noordwijk (1987, 1994a,b) analytische oplossingen verkregen voor water- en nutriëntenopname, welke via opschaling toepasbaar zijn voor een compleet wortelstelsel.

Gewasgroei

Om de wisselwerking tussen het gewas en de omstandigheden in het substraat goed te kunnen simuleren, is een koppeling van FUSSIM2 met een gewasgroeimodel

noodzakelijk. In de simulatieberekeningen van dit rapport gaat de aandacht echter vooral uit naar de omstandigheden in het substraat. Daarom is volstaan met de koppeling van FUSSIM2 aan een dummy-gewasgroeimodel. Het dummy-gewasgroeimodel stelt vooraf bekende gegevens ter beschikking aan FUSSIM2 over de vraag naar water, de vraag naar nutriënten, de wortelgroei en de wortelverdeling van het gewas. Er vindt dus geen terugkoppeling naar het gewas toe plaats. De gegevens worden nader toegelicht bij de teeltsystemen.

2.2 De teeltsystemen

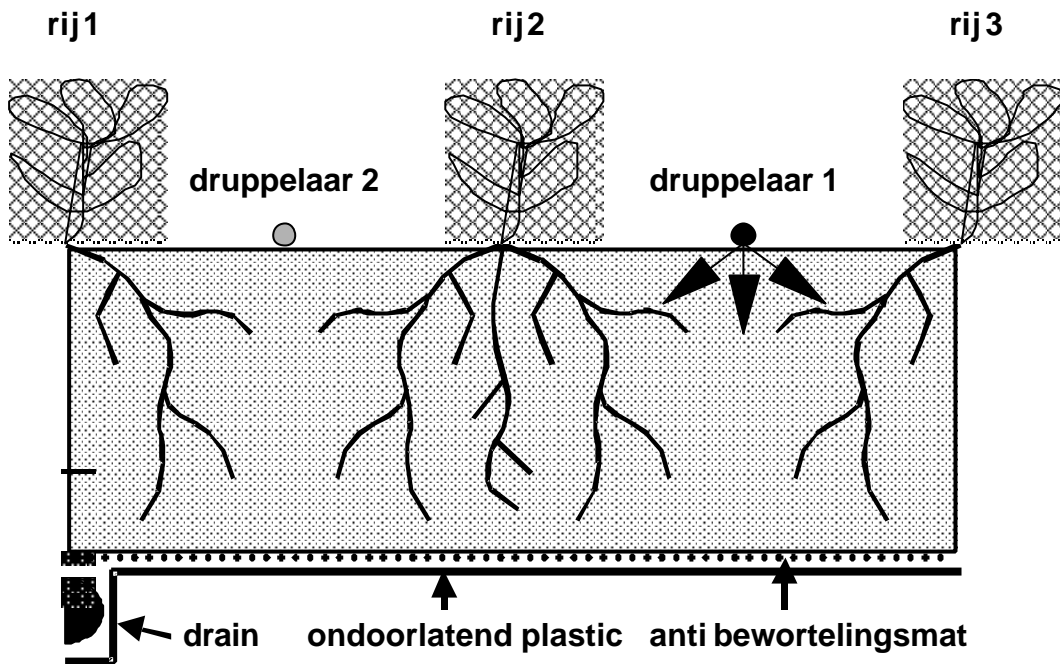
De simulatieberekeningen in dit rapport zijn uitgevoerd voor twee teeltsystemen met als poreuze media respectievelijk grof zand en steenwol.

2.2.1 Zandbed-teeltsysteem

Heinen (1997) maakte bij de teelt van sla gebruik van 45 m² grote zandbedden. In Heinen (1997) is de precieze constructie van het zandbedteeltsysteem beschreven. De druppellijnen voor fertigatie kunnen in dit systeem bij benadering beschouwd worden als parallelle lijnbronnen. De stroming van water en stoffen zal in zo'n systeem bij benadering alleen maar plaatsvinden in de richting loodrecht op de druppellijnen. Rekening houdend met symmetrievlakken kan het aldus ontstane 2-dimensionale zandbed schematisch worden gerepresenteerd door figuur 1.

De schematische voorstelling van het zandbed (figuur 1) heeft een laagdikte van 15 cm en een halve drainafstand van 40 cm. In de linkeronderhoek bevindt zich een drain met straal 2 cm. Op 0, 20 en 40 cm van de drain staat een rij planten. Midden tussen twee planten bevindt zich een druppelaar voor fertigatie. De parameters van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van het wortelmedium (grof zand: mediaan 0.6 mm) zijn weergegeven in tabel 4-5 van Heinen (1997).

De gekozen initiële samenstelling van de oplossing in het substraat is gelijk aan de samenstelling van de voedingsoplossing ($EC = 2.6$ mS/cm), waarmee gefertigeerd wordt (zie "sla in recirculerend water", Sonneveld en Straver, 1994). Het profiel is aan het begin van de modelberekening in evenwicht met een drukhoogte aan de onderrand van -1 cm.



Figuur 1. Schematische voorstelling van één helft van de wortelzone tussen twee drains (naar Heinen, 1997).

Heinen (1997) gebruikte het zandbedstelsel voor de teelt van sla. Uit analyse van de metingen van de productie van sla blijkt dat de geproduceerde hoeveelheid droge stof als functie van de tijd goed te beschrijven is met behulp van de volgende logistische functie:

$$X(t) = \frac{X_{\max}}{\left(1 + e^{-k(t-t^*)}\right)}, \quad (1)$$

waarin	X	hoeveelheid droge stof	g/plant
	X_{\max}	asymptotisch eindhoeveelheid droge stof	g/plant
	k	inverse tijdconstante	d ⁻¹
	t	tijd	d
	t^*	tijdstip van het buigpunt	d

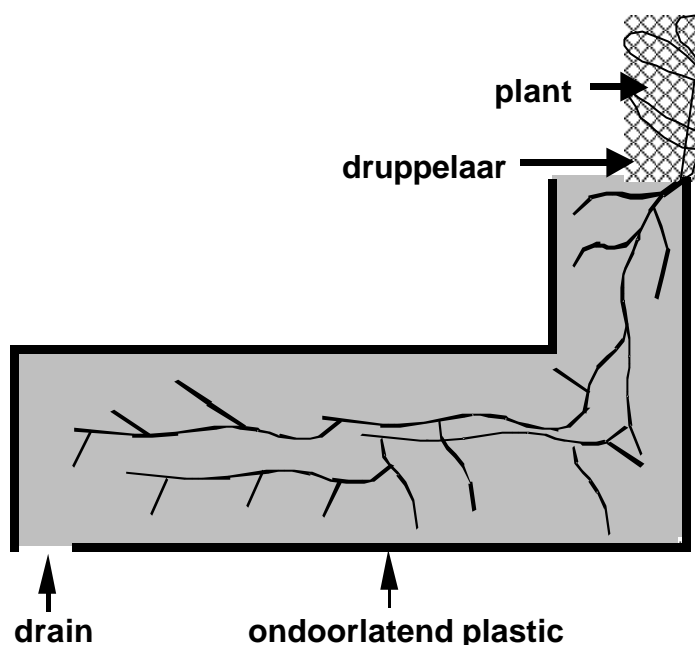
Voor sla geldt: $X_{\max} = 16.9$, $k = 0.2157$ en $t^* = 34.0$ (Heinen, 1997). Uit figuur 6-9 van Heinen (1997) is voor het experiment 'Growth & Uptake' een watergebruiksconstante afgeleid door de gemiddelde helling te bepalen tussen drooggewicht en cumulatieve transpiratie. De watergebruiksconstante is 2.67 mm waterverbruik per g droge stofproductie. Met behulp van formule 1 en de watergebruiksconstante is voor elk tijdstip een potentiële transpiratie berekend.

Analoog aan formule 1 zijn door Heinen (1997) ook parameters vastgesteld voor de vraag van het gewas naar de nutriënten N, K, P, Ca, Mg, S, Na en Cl (zie tabel 6-4 van Heinen, 1997).

Heinen (1997) heeft ook de wortellengtedichtheidsverdeling in de loop van de tijd beschreven naar analogie van formule 1 (zie blz 216 van Heinen, 1997).

2.2.2 Steenwol-teeltsysteem

Steenwolmatten, die dienen als substraat voor bijvoorbeeld de tomatenteelt, zijn meestal 1 m lang en 7.5 cm hoog (breedte 15 cm). Op zo'n mat worden dan bijvoorbeeld twee plantblokjes (L X B X H = 10 X 10 X 6.5 cm) geplaatst. In een plantblokje groeit één plant en is één druppelaar geplaatst. Strooming loodrecht op het beschouwde vlak wordt verwaarloosbaar klein geacht. In zo'n steenwolmat zijn een aantal vlakken (vlak door de as van elke plant en het vlak midden tussen twee planten) te onderscheiden waardoor theoretisch gezien geen strooming van water en stoffen plaatsvindt. Gebruik makend van deze symmetrievlakken kan de steenwolmat in vier delen opgesplitst worden. In figuur 2 is zo'n deel schematisch weergegeven.



Figuur 2. Schematische voorstelling van $\frac{1}{4}$ de deel van de steenwolmat met daarin weergegeven de positie van de plant, de druppelaar en de drain.

Het gemodelleerde deel van de steenwolmat (figuur 2) is 25 cm lang en 7.5 cm hoog. In de linkeronderhoek is een drain aanwezig van 2.5 cm. Rechts is bovenop de mat een plantblokje geplaatst met hoogte 6.5 en breedte 5 cm. Er wordt aangenomen dat de aansluiting tussen mat en plantblokje goed is. Uit data van Kipp en Wever (1993) zijn voor steenwol waarden bepaald voor de parameters van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek (zie bijlage 1).

Aan het begin van de simulatieberekening is de ionensamenstelling in het hele systeem gelijk aan die van de voedingsoplossing ($EC = 2.44$ mS/cm) (zie “tomaat in steenwol”, Sonneveld & Straver, 1994).

Met het gewasgroeimodel INTKAM (Gijzen, 1994) zijn de potentiële transpiratie, de wortelgroei en de vraag naar nutriënten voor een tomatenplant vooraf berekend. Deze gegevens zijn vervolgens ter beschikking gesteld aan FUSSIM2. FUSSIM2 berekende hiermee o.a. de actuele transpiratie en de werkelijke opname van nutriënten door het gewas. Het voert in dit rapport te ver om de details van het gewasgroeimodel INTKAM te bespreken. Daarvoor wordt verwezen naar Gijzen (1994).

2.3 Scenario's

2.3.1 Zandbed

Bij het zandbed-teeltsysteem is eerst met behulp van scenario's berekend waar in het systeem geschikte en minder geschikte meetplekken te vinden zijn. De gehanteerde criteria voor een (on)geschikte meetplek en de methode van bepaling van deze plekken wordt beschreven in paragraaf 2.4. Nadat de (on)geschikte meetplekken gevonden zijn, zijn de scenarioberekeningen herhaald. Bij deze tweede serie berekeningen zijn de tijdsverlopen van enkele grootheden bepaald.

Bij de berekeningen met het zandbed-teeltsysteem zijn verschillende fertigatiestrategieën gebruikt. Hierbij was het niet de bedoeling om te zoeken naar de beste strategie, maar om te onderzoeken hoe de omstandigheden in het teeltsysteem reageren op de gebruikte fertigatiestrategie. De volgende fertigatieaspecten zijn beschouwd:

- Aantal druppelpunten: 1 op $(x,z) = (30,0$ cm) of 2 op $(x,z) = (10,0$ cm) en $(x,z) = (30,0$ cm). Druppelaar 1 uit figuur 1 wordt altijd gebruikt, druppelaar 2 afhankelijk van het scenario.
- Irrigatiecriterium: er wordt geïrrigeerd op het moment, dat er een bepaalde hoeveelheid gesommeerde potentiële evapotranspiratie ($\sum ET_{pot}$) heeft plaatsgevonden, namelijk bij $\sum ET_{pot} = 0.2, 1.0$ en 2.0 cm.
- Irrigatie-overmaat (EX): bij elke irrigatie wordt meer irrigatiewater gegeven dan dat er afgelopen periode potentieel verdampt is via evapotranspiratie. Deze overmaat zorgt voor de doorspoeling van het systeem en wordt beschreven als fractie van $\sum ET_{pot}$; $EX = 0.5$ en 1.0 (respectievelijk 1.5 keer en 2.0 keer $\sum ET_{pot}$).
- Frequentie van de voedingsoplossing: de voedingsoplossing wordt elke irrigatiegift gegeven ($FREQF = 1$) of elke tweede irrigatiegift ($FREQF = 2$), waarbij de andere irrigatiegift uit schoon water bestaat.

In tabel 1 zijn de beschouwde scenario's voor het zandbed-teeltsysteem weergegeven.

Tabel 1. De beschouwde scenario's voor het zandbed-teeltsysteem

Scenario	# druppelaars	ΣET_{pot}	EX	FREQF
A	1	1.0	0.5	1
B	1	1.0	1.0	1
C	2	1.0	0.5	1
D	2	1.0	1.0	1
E	2	0.2	0.5	1
F	2	0.2	1.0	1
G	2	2.0	0.5	1
H	2	2.0	1.0	1
I	2	1.0	0.5	2
J	2	1.0	1.0	2

2.3.2 Steenwol

Aangezien het steenwol-teeltsysteem een andere geometrie heeft dan het zandbed-teeltsysteem, zijn eerst een aantal verkennende berekeningen uitgevoerd. Doel van deze berekeningen is om te kijken hoe dit systeem reageert en om te beoordelen waar de (on)geschikte meetposities zijn in dit systeem. Bij de berekeningen is alleen maar gevarieerd met de waarde van het irrigatiecriterium ($\Sigma ET_{pot} = 1.0, 0.5$ en 0.1 cm). Bij de beoordeling van de resultaten is de aandacht vooral gericht op *EC*.

Vervolgens is onderzocht of het mogelijk is om de irrigatiegiften te sturen op basis van een toestandvariabele op een (on)geschikte meetplek. Het irrigatiecriterium (wel of niet irrigeren) werd bij 2 berekeningen bepaald door de waarde van de *EC* op respectievelijk een geschikte en minder geschikte meetplek. Gefertigeerd zal worden wanneer de *EC* op de meetplek groter wordt dan 4.0 mS/cm. Voor tomaat betekent deze *EC* in de bodemoplossing in de (gehele) wortelzone een groeireductie van $\pm 15\%$ (Maas & Hoffman, 1977 en Rhoades & Loveday, 1990).

2.4 Beoordelingscriteria

Bij de analyse van de simulatieresultaten worden de volgende variabelen nader beoordeeld:

- het volumetrische watergehalte (q),
- de drukhoogte (h),
- de elektrische geleidbaarheid (*EC*).

De *EC* is een maat voor de totale zoutconcentratie.

Bij de beoordeling van de resultaten wordt gebruik gemaakt van de volgende criteria/hulpvariabelen:

- de kleinste waarde MIN en de grootste waarde MAX gedurende de hele simulatieperiode worden op 135 (zandbed) c.q. 140 (steenwol) regelmatig verdeelde locaties vastgesteld. Tevens kan het verschil tussen de grootste en kleinste waarde (vanaf nu MAX-MIN-interval genoemd) beschouwd worden.
- het tijdsverloop van een grootheid op verschillende locaties in de wortelzone.

- het tijdsverloop van de *EC* in het drainagewater of in het substraatwater dicht bij de drain.

De MAX-MIN-intervallen voor *h* en *q* worden weergegeven voor de 135 c.q. 140 posities van het stroomdomein in de vorm van een contourplot. De resultaten zijn geïnterpoleerd met behulp van de Kriging-methode. Voor *EC* worden de MAX-waarden na interpolatie weergegeven in een contourplot. De kleinste *EC*-waarden (MIN) zijn allemaal gelijk aan de *EC* in de initiële toestand en dus ook aan de *EC* van de voedingsoplossing (met uitzondering van scenario I en J). Het is niet zinvol om deze waarden te gebruiken of weer te geven. In de contourplots worden de posities van de druppelaars aangegeven met een (?) en de positie van de drain met een (■).

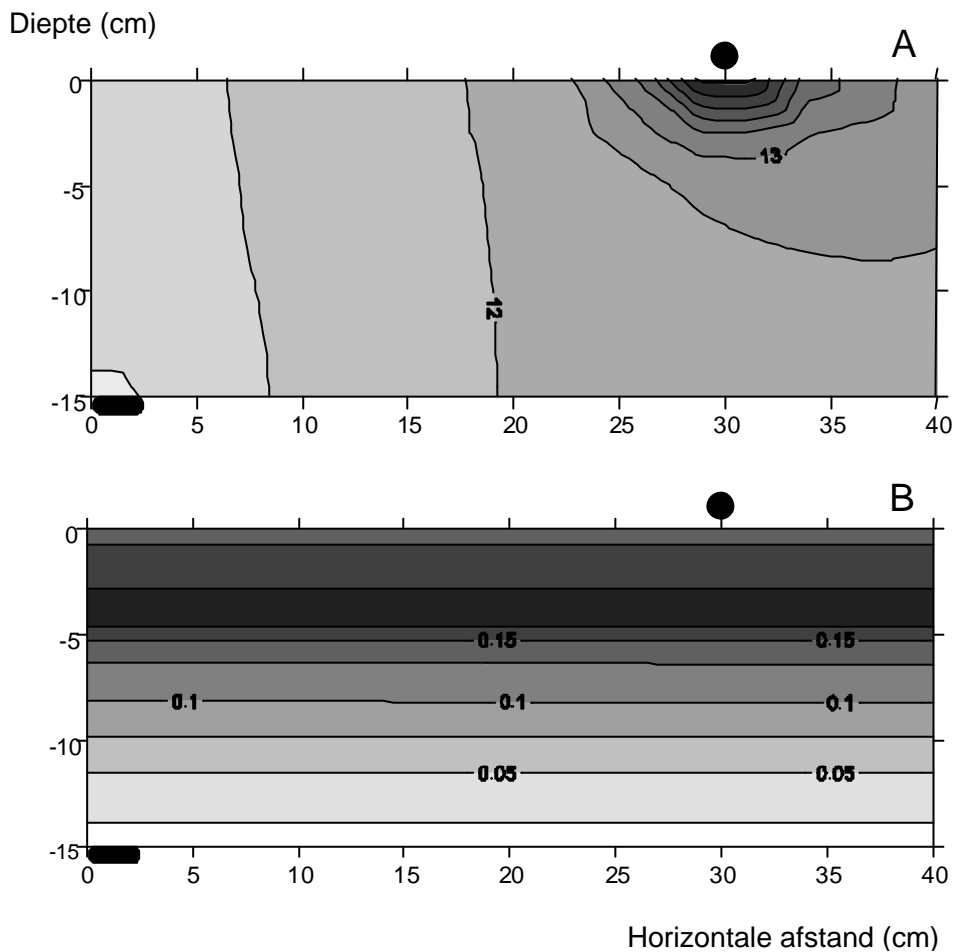
Het tijdsverloop van de grootheden wordt weergegeven in de vorm van tijddiagrammen.

3 Resultaten en discussie

3.1 Zandbed

3.1.1 Effect van het aantal druppelaars

In figuur 3 zijn voor scenario A respectievelijk de MAX-MIN-intervallen gegeven voor h (figuur 3A) en q (figuur 3B).

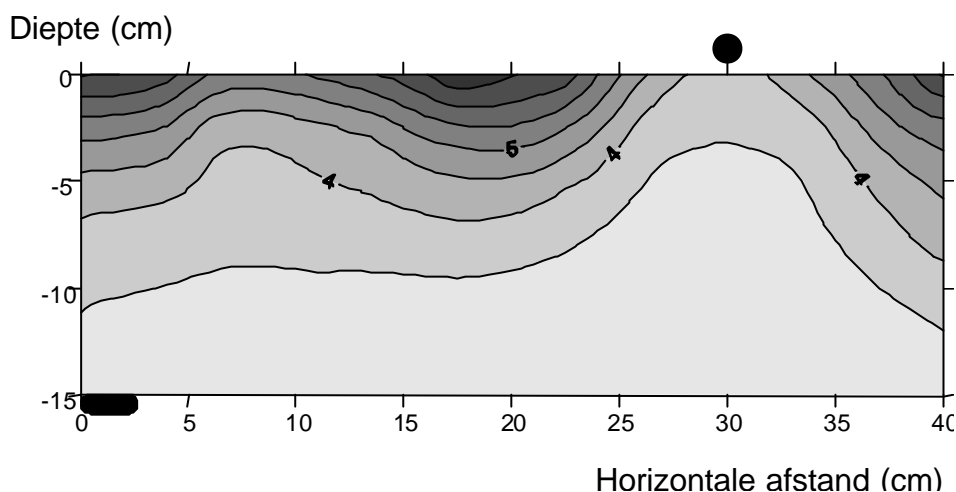


Figuur 3. MAX-MIN-intervallen voor h (cm) [A] en q (-) [B] van scenario A (één druppelaar).

Uit figuur 3A blijkt dat de grootste veranderingen in h optreden rond de druppelaar ((x,z) = (30,0)): MIN = -25.9 cm, MAX = -10.2 cm. De kleinste verandering in h treedt op nabij de drain in de linkeronderhoek van het profiel: MIN = -10.9 cm, MAX = 0 cm.

Het grootste verschil tussen het maximum en minimum watergehalte komt voor op ongeveer 4 cm diepte (MIN = 0.10, MAX = 0.29) en het kleinste verschil (MIN = 0.30, MAX = 0.31) bij de onderrand (figuur 3B).

In figuur 4 zijn de MAX-waarden voor EC (mS/cm) weergegeven, die tijdens de simulatieberekening optreden in de wortelzone. De maximum EC 's bovenin het profiel zijn veel groter dan onderin het profiel. Er zijn echter bovenin het profiel verschillende EC -zones aanwezig. Direct onder de planten zijn de meeste wortels aanwezig en vindt dus de meeste opname plaats. Aangezien de opnameconcentratie lager is dan de concentratie van de voedingsoplossing leidt dit tot indikking (hogere zoutconcentraties). De maximale EC -waarden in de buurt van de planten (horizontale afstand 0, 20 en 40 cm) zijn daarom veel hoger dan tussen de planten. De frequente gift van voedingsoplossing zorgt voor buffering van de EC nabij druppelaar 1 (figuur 4).

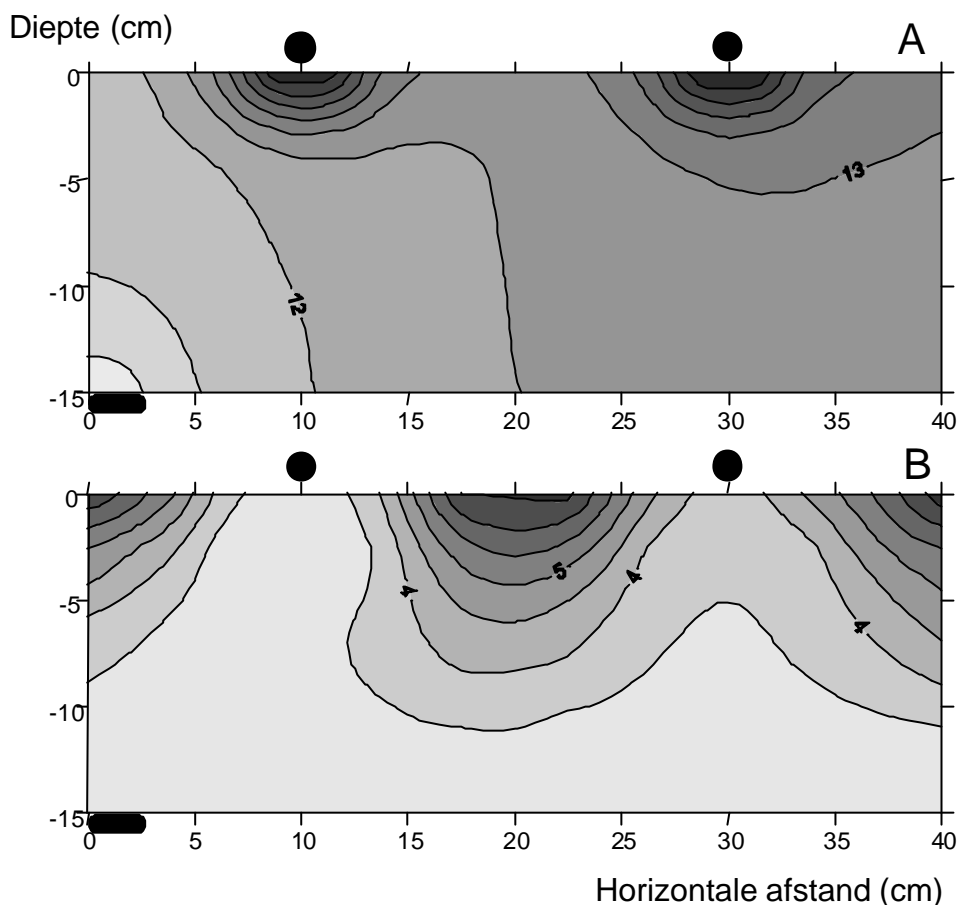


Figuur 4. Verdeling van de maximum EC -waarden (mS/cm), die optreden tijdens de scenario A-berekening.

Bij scenario B is de irrigatie-overmaat voor de doorspoeling van het systeem 2 keer zo groot als bij scenario A. Dit resulteert in een 30% grotere irrigatiegift en meer drainage. De extreme omstandigheden (MIN, MAX, MAX-MIN-interval) in het zandbed veranderen als gevolg van deze extra doorspoeling echter weinig. Er treedt wel iets verdunning van de nutriënten (c.q. zouten) in het systeem op, maar de verdeling van de MAX EC -waarden lijkt sterk op die van scenario A (zoals weergegeven in figuur 4).

In scenario C is de gift voedingsoplossing verdeeld over 2 druppelaars (in plaats van één bij scenario A). De verdeling van de MAX-MIN-intervallen voor h (figuur 5A) laat zien, dat er nu 2 regio's zijn met grote verschilwaarden in de drukhoogte, namelijk nabij de beide druppelaars. Dit komt echter niet tot uiting in de MAX-MIN-intervallen voor q , die een vergelijkbaar patroon als in figuur 3B laten zien. Het effect van de tweede druppelaar is wel duidelijk te herkennen in de verdeling van de maximum EC -waarden (figuur 5B). Bij de 2^{de} druppelaar zijn de berekende maxima

veel lager dan in scenario A. Onderin het profiel heeft de extra druppelaar geen effect op de maximum *EC*-waarden.



Figuur 5. Contourplotje van de MAX-MIN-intervallen voor h (cm) [A] en een contourplotje van de maximum EC -waarden (mS/cm) [B] van scenario C (twee druppelaars).

Verdeling van de irrigatiegift over meerdere druppelaars gaat eventuele verzouting (hoge *EC*'s) van het systeem veel effectiever tegen dan het geven van dezelfde gift via één druppelaar. Zeker gezien vanuit het oogpunt van verbruik werkt deze maatregel beter tegen verzouting dan het geven van extra veel irrigatie-overmaat.

3.1.2 Effect van het irrigatiecriterium

De gekozen waarde van het irrigatiecriterium bepaalt niet alleen het fertigatie-tijdstip, maar ook het aantal fertigaties. Bij scenario E, C en G wordt respectievelijk 22, 4 en 2 keer gefertigeerd in de beschouwde periode. Kijkend naar een tijdstip waarop in alle scenario's net fertigatie heeft plaatsgevonden, blijkt dat de totale hoeveelheid gift bij alle scenario's gelijk is. De totale hoeveelheid water, dat via de drain het zandbed verlaten heeft, verschilt echter. Het scenario, waarbij met zeer grote regelmaat gefertigeerd wordt (E), geeft veel minder uitspoeling dan het scenario met het minste

aantal giften (G). Als gevolg van de gekozen $\sum ET_{pot}$ en EX wordt tijdens een fertigatie bij scenario G zoveel voedingsoplossing gegeven, dat het zandbed meer water ontvangt dan het vast kan houden in zijn evenwichtssituatie. Dit leidt dus tot extra drainage.

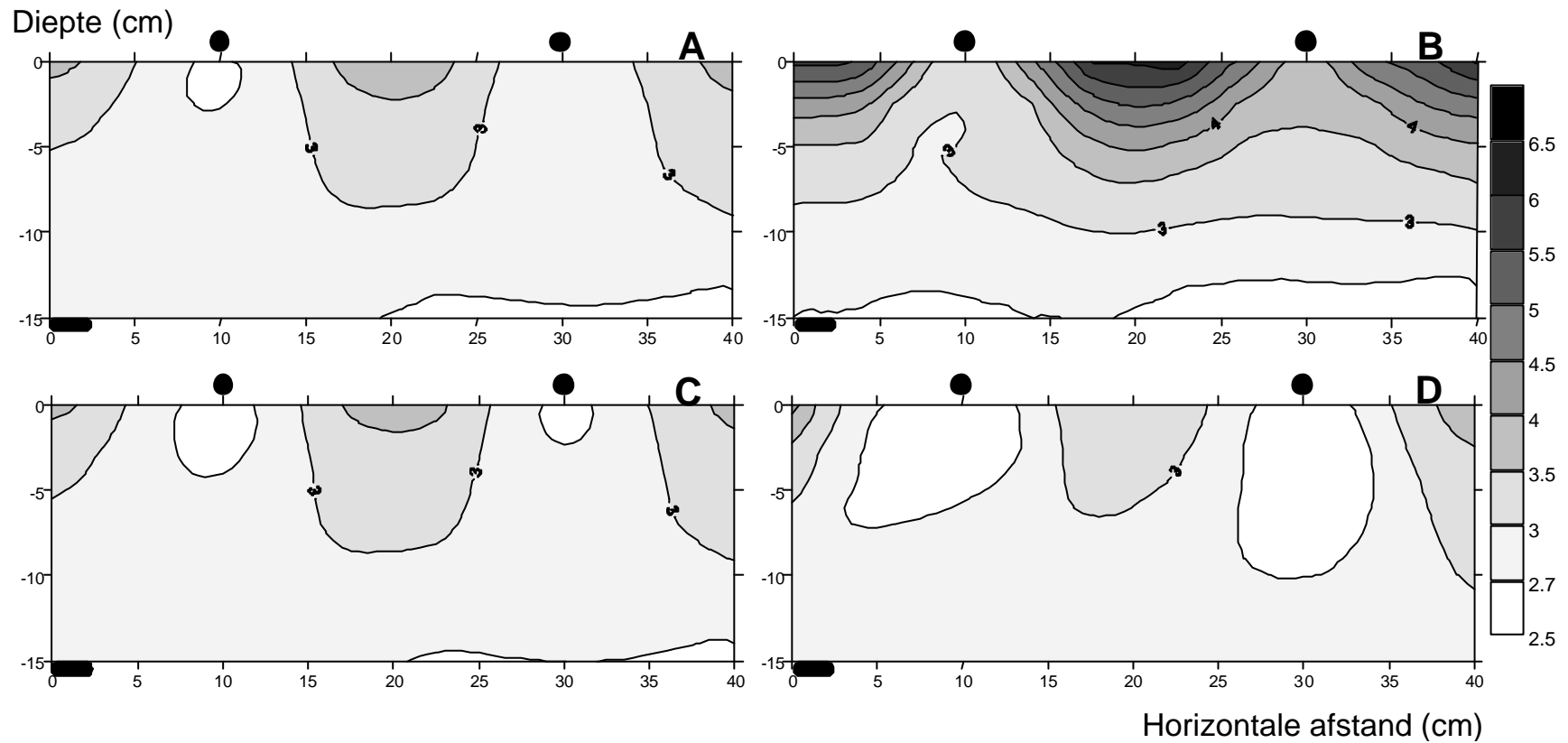
Bij alle scenario's is het verschil tussen de maximum en minimum drukhoogte nabij de druppelaars het grootst en bij de drain het kleinst. Het te meten drukhoogtebereik is echter niet hetzelfde. Bij scenario E zijn de MAX-MIN-intervallen voor h in het stroomdomein groter dan 4 maar kleiner dan 7 cm. Bij scenario G zijn de MAX-MIN-intervallen voor h in het stroomdomein groter dan 16 maar kleiner dan 23 cm. Bij dit systeem zal het veel makkelijker zijn om verschillen in drukhoogte als functie van tijd te meten of om verschillen tussen plekken in het zandbed te meten.

De verandering in watergehalten is het grootst op ongeveer 4 cm diepte behalve bij scenario E . Hier wordt zo vaak gefertigeerd, dat het watergehalte bijna niet verandert ten opzichte van de begintoestand. Alleen bovenin zijn kleine verschillen in het watergehalte berekend als gevolg van uitdroging door verdamping.

Bij alle scenario's wordt de EC onder de druppelaars in meer of mindere mate gebufferd door de giften. Figuur 5B geeft de maximum EC 's weer voor scenario C . Het EC -patroon in dit scenario is in grote lijn ook terug te vinden bij scenario E en G . De waarden verschillen echter aanzienlijk. De buffering met de voedingsoplossing ($EC = 2.6$ mS/cm) bij scenario E is zo groot, dat de EC nergens in het zandbed groter wordt dan 4.8 mS/cm. Bij scenario G wordt veel minder vaak gefertigeerd en lopen de EC 's in het zandbed op tot maximaal 8.2 mS/cm.

De verzouting bij scenario E is niet groot (figuur 6A en C). Veel kleine giften resulteren in een geringe dynamiek in de EC -verdeling. Bij scenario G wordt veel minder vaak gefertigeerd. Hier zijn EC -waarden te vinden in de buurt van de 6 mS/cm (figuur 6B). Na een fertigatiebeurt (6D) zijn de EC -waarden drastisch verlaagd, deels door verdunning en deels door uitspoeling van zouten. De wit gekleurde zones in de plotjes hebben een EC die overeenkomt met de EC -waarde van de voedingsoplossing.

Verdubbeling van de irrigatie-overmaat heeft over het algemeen niet zo veel invloed op de h - of q -toestand in het zandbed voor de diverse irrigatiecriteria-scenario's. Kijkend naar de maximum EC 's heeft verdubbeling van de irrigatie-overmaat bij het scenario met de meeste giften wel effect. Het oppervlak aan zones in het zandbed met lage maximum EC -waarden (bijvoorbeeld maximum $EC < 3.1$ mS/cm) is bij scenario F met 31% veel groter dan bij scenario E met 18%. Dit effect is bij de scenario's met andere waarden voor het irrigatiecriteria niet terug te zien. Een verdubbelde irrigatie-overmaat zal bij deze scenario's vlak na een fertigatie wel degelijk effect hebben op de EC , maar dat komt door de lage giftfrequentie niet tot uiting in de maximum EC .

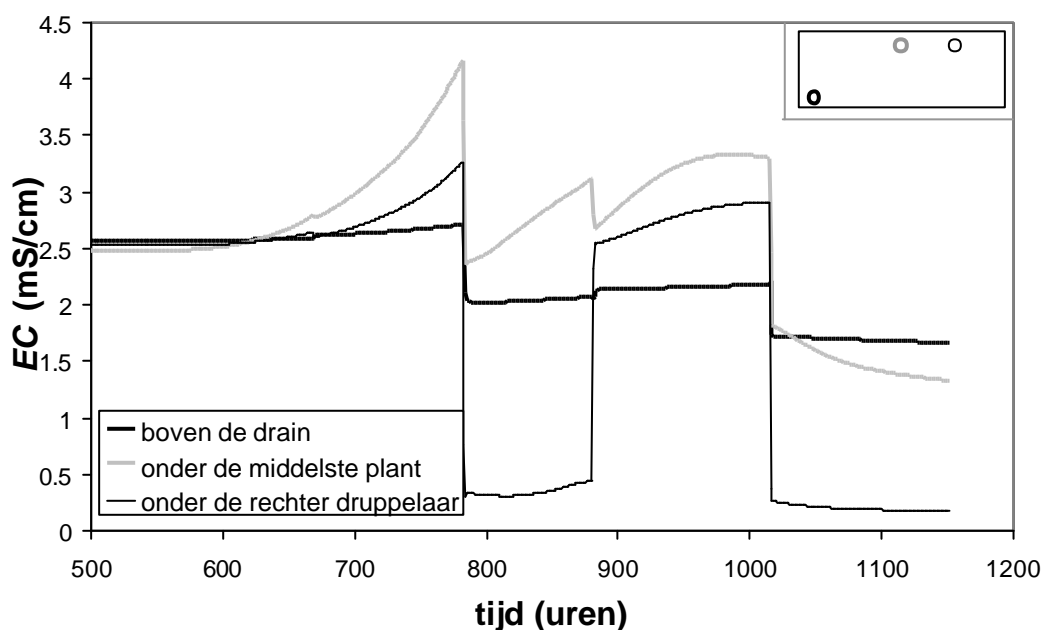


Figuur 6. EC-waarden in het zandbed vlak voor en vlak na een fertigatie voor scenario E en G. Plot A geeft de EC weer in het zandbed voor scenario E (vaak fertigeren) op tijdstip 782 uur (vlak voor een fertigatie). Plot C is de situatie voor dit scenario vlak na de fertigatie (tijdstip 786 uur). Plot B en D geven respectievelijk de EC weer voor scenario G op tijdstip 782 uur (vlak voor fertigatie) en tijdstip 786 uur (vlak na fertigatie).

Vaak, kleine fertigatiegiften geven is gunstig ter voorkoming van verzouting. Verdubbeling van de irrigatie-overmaat heeft meer effect bij veel kleine giften dan bij weinig grote giften.

3.1.3 Effect van irrigeren met 'schoon' water

De maximum EC 's zijn bij eens in de twee keer irrigeren met voedingsoplossing, lager dan bij elke keer irrigeren met voedingsoplossing. Bij I/J wordt de EC nooit groter dan 5.3 mS/cm en bij scenario C/D nooit groter dan 6.8 mS/cm. Deze waarden zijn wel afhankelijk van het gekozen irrigatiecriterium ($\Sigma ET_{pot} = 1.0$ cm). Er ontstaat echter een probleem bij het gebruik van dit fertigatieaspect op deze manier. Tijdens de irrigatie met gewoon water spoelen veel nutriënten uit het zandbed. Deze verliezen worden onvoldoende gecompenseerd tijdens de volgende irrigatie (met voedingsoplossing). Het systeem verarmt. Figuur 7 geeft de EC 's weer als functie van de tijd voor verschillende posities in het zandbed gedurende 1 teelt. De eerste 500 uur zijn niet weergegeven, omdat toen geen veranderingen plaatsgevonden hebben. In de figuur is heel duidelijk de dalende trend van de EC c.q. de verarming waar te nemen. Het is onduidelijk of deze verarming (op dezelfde wijze) door zal zetten, wanneer meteen na deze teelt de volgende teelt gestart wordt (zonder doorspoeling vooraf) met dezelfde fertigatiemethode. Wanneer dit het geval is, lijkt het teeltsysteem niet echt duurzaam.



Figuur 7. EC -waarden bij scenario I als functie van de tijd voor verschillende posities in het zandbed, te weten: net boven de drain, net onder de middelste plant en net onder de rechter druppelaar. Het inset-figuurtje geeft de posities schematisch weer.

Om en om irrigeren met 'schoon' water en deze voedingsoplossing is wel goed ter bestrijding van verzouting, maar lijkt geen duurzaam teeltsysteem. Irrigieren met een voedingsoplossing met hogere concentraties en schoon water of irrigeren met twee verschillende voedingsoplossingen is misschien wel een duurzame oplossing tegen verzouting.

3.1.4 Waar en wat meten in het zandbed-teeltsysteem

Drukhoogte en (volumetrisch) watergehalte zeggen iets over de vochttoestand in een systeem. *EC* daarentegen is completer want het is een soort resultante van de vochttoestand en nutriëntentoestand samen. *EC* geeft een goede indicatie van de te verwachten reactie van het gewas op de omstandigheden in een teeltsysteem. Of de ongunstige *EC*-waarden (over het algemeen: te hoge) veroorzaakt worden door de aanwezigheid van teveel nutriënten of door de afwezigheid van vocht, maakt voor een plant niet uit. In beide gevallen zal het gewas niet optimaal presteren en is er dus een ingreep in de vorm van fertigatie nodig. De variatie, zowel tussen posities als in de tijd, is bij *EC* groter dan bij *h* of *q*. Het zal daardoor iets makkelijker zijn om geschikte en ongeschikte *EC*-meetposities van elkaar te onderscheiden. Het nadeel is wel dat een net iets verkeerd geplaatste *EC*-sensor waarschijnlijk slechter werkt dan een net iets verkeerd geplaatste vochtmeter. Naast fluctuaties van de *EC* binnen één watergeefcyclus is er afhankelijk van het systeem ook vaak een trend waar te nemen in de *EC*. Oftewel de *EC* kan ook een indicatie geven van de ontwikkeling op langere termijn.

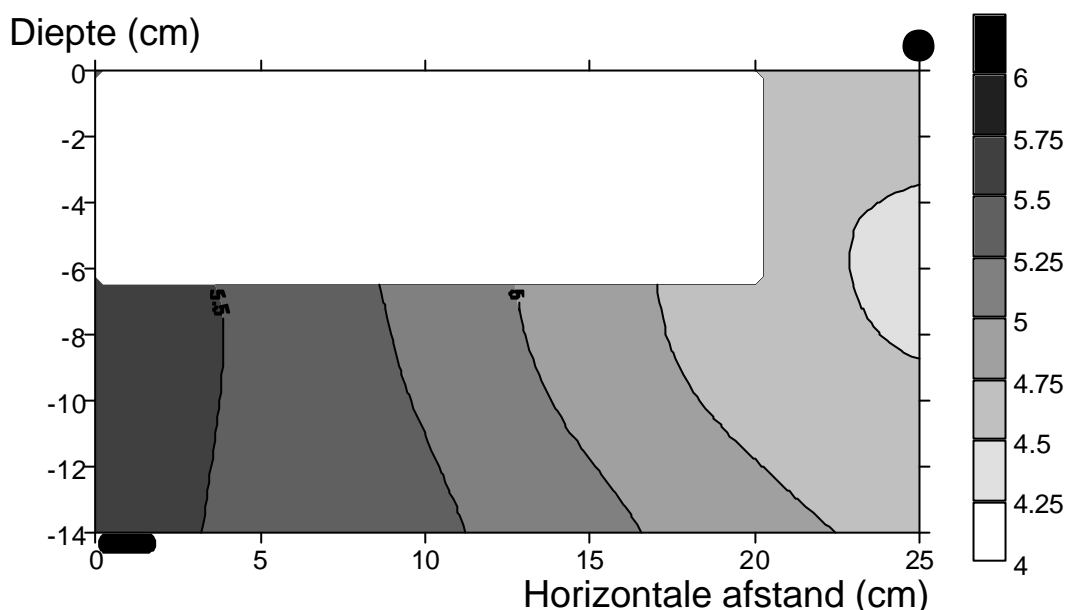
Behalve inhoudelijke gronden zijn er ook andere argumenten, die mede bepalen welke variabele (*h*, *q* en *EC*) het best gemeten kan worden. Gedacht moet hierbij worden aan het meetbereik, de meetnauwkeurigheid, de kosten (aanschaf en gebruik) en de praktische bruikbaarheid van de verschillende meters. In dit rapport zijn deze argumenten niet meegenomen bij de beoordeling.

Er zijn twee belangrijke redenen om de *EC* te meten in (de buurt van) het wortelstelsel van de plant. Ten eerste is de dynamiek in *EC* op deze positie het grootst. Het verschil tussen gunstige omstandigheden en ongunstige omstandigheden is hierdoor makkelijker te meten. Ten tweede zijn teeltsystemen gemaakt om gewassen zo optimaal mogelijk op te laten groeien. Het is daarom zinvol om te weten of de omstandigheden in de buurt van de planten gunstig zijn voor groei. De omstandigheden elders in het teeltsysteem zijn eigenlijk niet interessant. Wel moet gerealiseerd worden dat in de eerste plaats het volume wortelzone in dit soort teelten gering is. De omstandigheden in de wortelzone zijn in het ideale geval dus overal gunstig. In de tweede plaats kunnen de metingen van sensoren, die te dicht bij wortels staan, verstoord worden door de aanwezigheid van de wortels.

3.2 Steenwol

3.2.1 Meetplekken in het steenwol-teeltsysteem

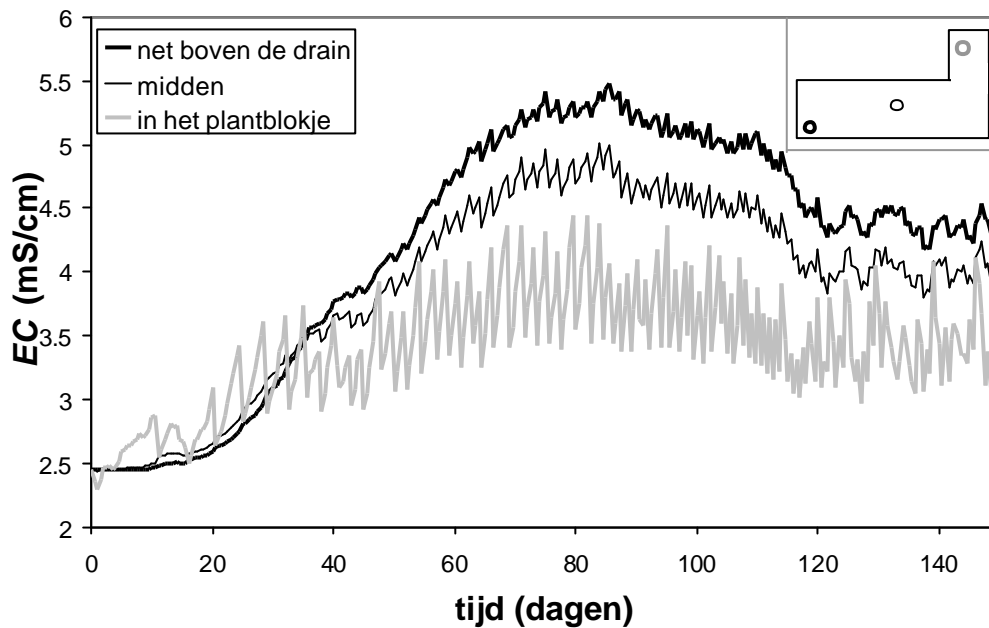
De grootste maximum EC 's bevinden zich bij het steenwol-teeltsysteem in de buurt van de drain (figuur 8). In figuur 9 zijn de EC -waarden als functie van de tijd weergegeven voor verschillende posities in het teeltsysteem. Daaruit blijkt dat de variatie in de tijd (binnen een watergeefcyclus) bij het plantblokje veel groter is dan midden in het systeem of bij de drain. De meeste dynamiek in EC treedt bij dit systeem dus op in het plantblokje.



Figuur 8. Verdeling van de maximum EC -waarden (mS/cm) voor het steenwol-teeltsysteem met een irrigatiecriterium ($\dot{a}ET_{pot}$) van 1.0 cm.

Als gevolg van een ongelijke vraag naar water en nutriënten door de plant, neemt de concentratie toe (figuur 9). De vraag naar water is blijkbaar groter dan de vraag naar nutriënten, waardoor de concentraties en dus de EC -waarden toenemen. In een later stadium van de plant komen de vraag naar water en nutriënten meer in evenwicht. Samen met de aanvoer van voedingsoplossing heeft dit eerst een verdunning en vervolgens een soort stabilisatie van de EC 's tot gevolg. In de buurt van de druppelaar wordt de EC meer gebufferd door de voedingsoplossing dan op grotere afstand van de druppelaar. Hierdoor stijgt de EC op grote afstand van de druppelaar tot een hoger niveau.

De dynamiek van de EC -waarden in het plantblokje neemt af naarmate de frequentie van de giften toeneemt. Vaak fertigeren zorgt namelijk voor buffering van de samenstelling van de oplossing in de steenwol en dus voor veel minder dynamiek.



Figuur 9. *EC*-waarden als functie van de tijd voor verschillende posities in het steenwol, te weten: net boven de drain, in midden van het systeem en in het plantblokje ($\dot{a}ET_{pot} = 1.0$ cm). Het inset-figuurtje geeft de posities schematisch weer.

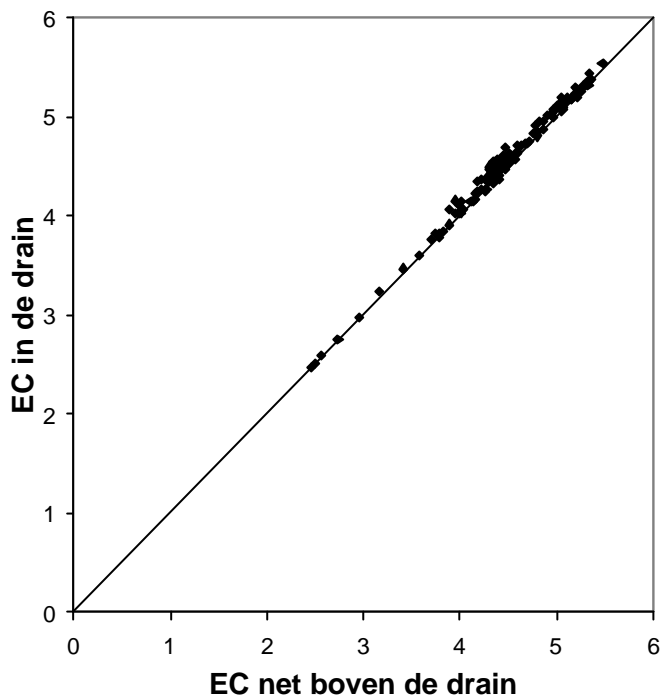
3.2.2 Drainwater

Uit figuur 10 blijkt dat de *EC* in het drainagewater bij benadering gelijk is aan de *EC* in de oplossing in het steenwol net boven de drain. Bij het gebruikte teeltsysteem hangt de hoeveelheid drainagewater en het tijdstip van draineren heel erg af van het gekozen fertigatiesysteem. De drainageduur behelst in dit voorbeeld veelal niet meer dan 10 minuten per dag. Over het overgrote deel van de dag is bij meten in het drainwater eigenlijk niets bekend.

Tevens blijkt uit figuur 9 dat de situatie nabij de drain (en dus de concentratie in het drainagewater) niet representatief is voor de situatie in het overige deel van de steenwolmat.

Een ander nadeel van het meten in drainwater (of het meten net boven de drain) is dat er veel minder dynamiek in de *EC* waar te nemen is binnen een watergeefcyclus dan bij meten in het plantblokje (figuur 9). Daarom zal het veel moeilijker zijn om het juiste fertigatiemoment te bepalen.

Bij het steenwol-teeltsysteem kan dus ook het best gemeten worden in de buurt van de plant. In de praktijk is het echter zeer gebruikelijk om juist te meten in het drainagewater.

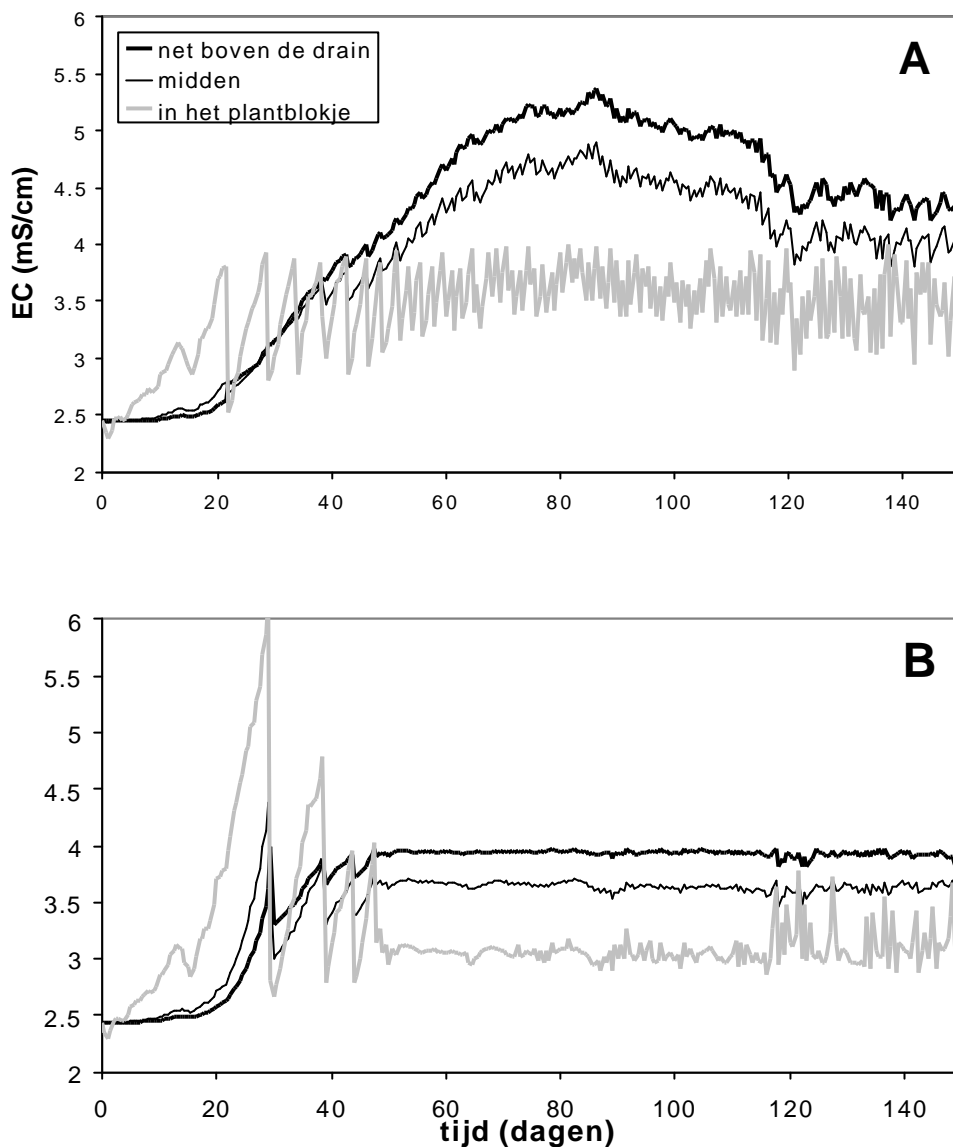


Figuur 10. *EC in het drainage water als functie van de EC in de oplossing in het steenwol net boven de drain ($\hat{a}ET_{pot} = 1.0$ cm). De 1:1-lijn is ter verduidelijking ook weergegeven.*

3.2.3 Fertigatie sturen op de EC in een meetplek

Voor twee verschillende posities in het steenwol is nagegaan of sturing van de fertigatie via een sensor mogelijk is. Fertigatie vond plaats op het moment dat bij de sensor de *EC* groter werd dan 4 mS/cm. Figuur 11 laat het verloop van de *EC* op drie posities in de wortelzone zien als functie van de tijd. Wanneer gestuurd wordt op een sensor geplaatst in het plantblokje (figuur 11A), dan kan ter plaatse de *EC* beneden de 4 mS/cm gehouden worden. De *EC*'s in de overige zones worden echter veel groter. De patronen lijken op de situatie waarbij water gegeven wordt op basis van waterverbruik (figuur 9). Wanneer wordt gestuurd op meting van de toestand nabij de drain (figuur 11B), kan ter plaatse de *EC* ook beneden de 4 mS/cm gehouden worden. Dit kan echter alleen maar plaatsvinden door een continue watergift. De *EC*'s op de overige posities blijven ook kleiner dan 4 mS/cm. Deze laatste situatie is gunstig, maar levert mogelijk praktische problemen op omdat continue moet worden watergegeven.

Sturen op de meetplek net boven de drain leidt tot 10% meer gebruik van voedingsoplossing ten opzichte van sturen op de meetplek in het plantblokje. Dit leidt ook tot een toename van de hoeveelheid drainwater.



Figuur 11. EC als functie van de tijd voor verschillende posities in het steenwol, te weten: net boven de drain, in het midden van het systeem en in het plantblokje. Figuur A geeft de situatie weer wanneer gestuurd wordt op de EC in het plantblokje. Bij figuur B wordt gestuurd op de EC net boven de drain. Zie voor de schematische weergave van de posities het inset-figuurtje uit figuur 9.

Een EC van 4.0 mS/cm in het gehele wortelstelsel van de tomaat betekent een groeireductie van 15%. Bij een EC van 2.5 mS/cm ondervindt een tomatenplant geen stress (en dus groeireductie) ten gevolge van zout (Maas & Hoffman, 1977 en Rhoades & Loveday, 1990). Door middel van berekeningen met FUSSIM2 is ook geprobeerd om sturend op metingen in het plantblokje of metingen nabij de drain de EC beneden deze kritische waarde te houden. Deze berekeningen zijn niet gelukt. Heel waarschijnlijk houden de rekenproblemen verband met de ongelofelijke hoge frequentie van fertigeren, die nodig is om aan het EC-criterium te voldoen.

4 Conclusie

Met behulp van simulatiemodellen zoals FUSSIM2 is het mogelijk om de stroming van water en het transport van nutriënten in een substraat voor verschillende teeltsystemen te onderzoeken en 'zichtbaar te maken' (zie ook Heinen 1997 en 1999). FUSSIM2 is hier gebruikt om te onderzoeken welke variabele het beste gemeten kan worden en waar het beste gemeten kan worden in een tweetal teeltsystemen. De modelresultaten zijn niet getoetst aan een experiment. Onderstaande conclusies gelden alleen voor de hier gebruikte systeemconfiguraties.

Zandbed

Verdeling van de fertigatiegift over meerdere druppelaars gaat eventuele verzouting van het teeltsysteem veel effectiever tegen dan het geven van dezelfde gift via één druppelaar. Het gebruik van meerdere druppelaars helpt zelfs beter tegen verzouting dan het geven van extra veel irrigatie-overmaat, zeker wanneer rekening gehouden wordt met het verbruik. Vaak, kleine fertigatiegiften geven is gunstiger ter voorkoming van verzouting dan een paar grote giften. Om en om irrigeren met 'schoon' water en voedingsoplossing is goed ter bestrijding van verzouting, maar lijkt niet erg duurzaam. Het teeltsysteem verarmt doordat (onnodig) veel nutriënten uitspoelen.

Uit dit onderzoek blijkt dat de *EC* het meest geschikt is als meetvariabele. De *EC* is een indicatie van de nutriëntentoestand. Toename van de *EC* kan het gevolg zijn van een combinatie van a↓ indikking omdat de opnameconcentratie lager is dan de concentratie van de voedingsoplossing, b↓ verdamping van water waarbij nutriënten achterblijven. De indikking volgens a↓ geeft dus (indirect) aan dat de vochttoestand afneemt. Bovendien is het makkelijker om bij *EC* variaties te meten tussen posities en in de tijd. Bij de *EC* is vaak ook een trend waar te nemen, die een soort indicatie geeft voor de ontwikkeling op langere termijn.

De meest geschikte meetplek is in de buurt van de plant. Hier is de dynamiek in de tijd (binnen een watergeefcyclus) het grootst. Op deze plek zal dan ook het eerst en best te bepalen zijn of omstandigheden gunstig of ongunstig zijn.

Steenwol

Ook voor een steenwolteeltsysteem geldt dat de meest geschikte meetplek in de buurt van de plant is. De grootste maximum *EC*'s bevinden zich weliswaar in de buurt van de drain, de grootste dynamiek in de tijd (binnen een watergeefcyclus) vindt echter plaats in het plantblokje.

Het doen van metingen in drainagewater is minder geschikt, want in de gebruikte teeltsystemen vindt de drainage alleen maar plaats gedurende een klein deel van de tijd. Daarnaast blijkt de situatie nabij de drain (en dus de concentratie in het drainagewater) niet representatief voor de situatie in de rest van de steenwolmat.

Met een berekening is aangetoond dat het mogelijk is om fertigatie te sturen op basis van de *EC*, gemeten op een plek in de buurt van de plant of op een plek in de buurt van de drain. Sturen op basis van een plek nabij de drain resulteert in lage *EC*-waarden, maar ook in bijna continue watergeven en extra drainage. De grenswaarde voor de *EC* moet niet te dicht in de buurt gekozen worden van de *EC* van de voedingsoplossing.

Referenties

Anomynous, 1989. Nationaal Milieubeleidsplan (NMP). Tweede kamer, vergaderjaar 1988 – 1989, 21 137, nrs. 1-2, 's-Gravenhage.

Anomynous, 1990. Structuurnota Landbouw. Tweede kamer, vergaderjaar 1989 – 1990, 21 148, nrs. 2-3, 's-Gravenhage.

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.

Gijzen, H., 1994. Ontwikkeling van een simulatiemodel voor transpiratie en wateropname en van een integraal gewasmodel. Rapport 18, DLO Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek, Wageningen.

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 Landbouwuniversiteit 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. New features and updated user guide (*tentative title*). Alterra rapport xxx, Alterra, Wageningen (*in prep.*).

Kipp, J.A. & G. Wever, 1993. Wortelmedia. Indormatiereeks 103, Proefstation voor tuinbouw onder glas, Naaldwijk.

Maas, E.V. & G.J. Hoffman, 1977. Crop salt tolerance – current assessment. *Journal of the irrigation and drainage division ASCE* 103(IR2): 115-134.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12:513-522.

Rhoades, J.D. & J. Loveday, 1990. Salinity in irrigated agriculture. In: Stewart, B.A. & D.R. Nielsen (eds.), *Irrigation of agricultural crops*, p. 1089-1142. Series in Agronomy 30, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

Schwarz, D., M. Heinen & M. van Noordwijk, 1995. Rooting characteristics of lettuce grown in irrigated sand beds. *Plant and Soil* 176: 205-217.

Sonneveld, C., 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Proefschrift Wageningen Universiteit, Wageningen.

Sonneveld, C. & N. Straver, 1994. Voedingsoplossingen voor groenten en bloemen geteeld in water of substraten. Voedingsoplossingen glastuinbouw No. 8, Proefstation voor tuinbouw onder glas, Naaldwijk.

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.

Bijlage I. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek

Hydraulische eigenschappen van poreuze media worden veelal beschreven met behulp van een waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek. De door ons gebruikte vergelijking voor de waterretentiekarakteristiek is beschreven door Van Genuchten (1980). De vergelijking van Mualem (1976) is gebruikt voor de doorlatendheidskarakteristiek. In hoofdstuk 4 van Heinen (1997) wordt uitgebreid ingegaan op beide vergelijkingen en de bijbehorende parameters.

De waarden van de verschillende parameters voor steenwol (data afkomstig uit Kipp en Wever (1993)) zijn weergegeven in tabel A.

Tabel A. Parameters van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek voor steenwol.

a_r (1/cm)	a_w (1/cm)	n	m	L	q_s (-)	q_r (-)	K_s (cm/d)
0.0257	0.0514	4.55	0.780	0.5	0.85	0.0	8640

