A 146

PLANT RESEARCH INTERNATIONAL

Hydrion-line: On-line monitor- en besturingssysteem voor proceswater in een gesloten teeltsysteem in de glastuinbouw

Vertrouwelijk eindrapport van het project EETK99038

Consortium
- Alterra B.V.
- ATO B.V.
- HortiMaX B.V.
- Hydrion B.V.
- IMAG B.V.
- Plant Research International B.V.
- Wageningen Universiteit



Wageningen, april 2003

WAGENINGEN UR

Hydrion-line: On-line monitor- en besturingssysteem voor proceswater in een gesloten teeltsysteem in de glastuinbouw

Vertrouwelijk eindrapport van het project EETK99038

Riki van den Boogaard, Theo Gieling, Marius Heinen, Olaf van Kooten, Leo Marcelis, Joyce Schroot, Jan Snel, Gerrit van Straaten en Guido Wieringa.

Plant Research International B.V., Wageningen
April 2003

WAGENINGEN UR

2252035

Plant Research International B.V.

Adres	:	Droevendaalsesteeg 1, Wageningen
	:	Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel.	:	0317 - 47 70 00
Fax	:	0317 - 41 80 94
E-mail	:	post@plant.wag-ur.nl
Internet	:	http://www.plant.wageningen-ur.nl

WAGENINGEN UR

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
1. Projectgegevens	3
2. Samenvatting	4
3. Uitvoering van het project	6
4. Resultaten en perspectieven	8
4.1 Deelproject Ionselectief meten	9
4.2 Deelproject Waterzuivering	18
4.3 Deelproject Nutriëntendosering	29
4.4 Deelproject Substraatfysica	33
4.5 Deelproject Plantensensoren	46
4.6 Deelproject Nutriëntenbehoefte	62
4.7 Deelproject Plantmodel	71
4.8 Deelproject Regeling en besturing	87
4.9 Deelproject Procesintegratie	111
4.10 Perspectief Hydrion-line	114
5. Evaluatie	118
6. Eindconclusie	126
Bijlage I. Overzicht deliverables per deelproject	128

Voorwoord

Voor u ligt het werk van ruim 6 jaar onderzoek, uitgevoerd door een consortium van 3 bedrijven en 6 onderzoeksinstellingen. Het is in 1995 begonnen met het idee dat het mogelijk moest zijn om de zouten in gietwater voor tuinbouwgewassen zo te doseren dat er precies genoeg in zat voor de planten. Hierdoor zou het resterende water dat terugkomt uit de substraatmatten geen afvalstoffen meer bevatten, omdat die daar bleven waar ze voor bedoeld waren, namelijk in de planten. Deze simpele gedachte werd geopperd door medewerkers van het bedrijf Hydrion BV en werd vervolgens uitgewerkt door medewerkers van het toenmalige ATO-DLO en AB-DLO. Voor de uiteindelijke uitwerking in de praktijk werd een kasautomatiseringsbedrijf Technische Handelsmaatschappij Van Vliet-Pijnacker BV (later HortiMaX BV) bereid gevonden om deel te nemen aan het project. Het project kreeg de naam *Hydrion-line* mee omdat de te ontwikkelen on-line ionselectieve sensor, die het hart van het idee vormde, ook de naam Hydrion droeg.

De eerste 2,5 jaar van het project werd met behulp van een stevige subsidie vanuit het projectbureau E.E.T. uitgevoerd en richtte zich voornamelijk op de mogelijkheid het plantmateriaal te sturen en te voorspellen, het zuiveren van eventueel spuiwater indien de planten toch niet alle zouten consumeerden en het verder ontwikkelen van de Hydrion ionselectieve sensor. Deze eerste fase werd positief afgesloten, maar grote lacunes in de kennis omtrent sturing van het systeem en het inkoppelen van metingen op verschillende tijdschalen met de modellen kwamen daarin aan het licht.

In de tweede fase van het project, *Hydrion-line II*, werd aansluiting gezocht met expertise in meet- en regelsystemen en in de modellering van het nutriëntengedrag in de substraatmat. Het nieuwe consortium bestond uit Hortimax BV, Hydrion BV, Alterra, ATO, IMAG, Meet- Regel- en Systeemkunde, PRI en Tuinbouwproductieketens. In de tweede helft van het project is het bedrijf Grodan Rockwool BV mee gaan participeren. Vanaf het begin was duidelijk dat de grootste uitdaging van *Hydrion-line II* lag in het laten samenwerken van de 'plant' georiënteerde mensen met de meer 'proces' georiënteerde mensen. Achteraf kan gezegd worden dat dit moeizame proces ongeveer 1,5 jaar de tijd moest hebben voordat er duidelijk synergie ontstond uit deze samenwerking. Maar toen die inderdaad ontstond, ging het ineens heel hard. Via een gezamenlijke inspanning werd het bovengrondse plantmodel gekoppeld aan het wortel/substraat transportmodel en dit gecombineerde plant/substraatmodel werd geschikt gemaakt als een lange termijnregelaar voor de strategische setting van de klimaat- en nutriëntendosering (setpointgenerator). Daarnaast werd een z.g. observer (virtuele sensor) voor water en nutriënten gemaakt op basis van een verkort model waarmee de korte termijn regeling op setpoints werd verwezenlijkt. Zo kon het probleem van de verschillende tijdschalen worden opgelost. Het zware plant/wortelmodel berekent eens per dag de setpoints voor nutriënten en watergift op basis van het verwachtte klimaat. De water- en nutriëntenregeling, gebaseerd op de observer, werkt op kortere tijdschaal en handhaaft de ingestelde setpoints. Het plantmodel zelf wordt regelmatig bijgestuurd middels metingen van plantparameters zoals bladdichtheid, gewicht en fotosynthese. Dit zorgt er voor dat de setpointgenerator in de toekomst bruikbaar is voor verschillende gewassen, voor verschillende kassen en in verschillende klimatologische omstandigheden. Er is een vorm van zelflerende capaciteit in het systeem ingebracht, hoewel deze nog duidelijk veel verder ontwikkeld moet worden. Door uitgebreid in het gewas te meten waar verschillende monitorsystemen het beste geplaatst kunnen worden en hoeveel er nodig zijn, is het duidelijk geworden dat met enkele monitoring systemen een compleet gewas gemonitord kan worden en er voldoende informatie verzameld wordt om voor een adequate terugkoppeling naar de modellen te zorgen. Er zijn prototypes van gewassensoren ontwikkeld voor de hoeveelheid ingevangen licht, voor de fotosynthese en voor het gewicht van de bovengrondse delen. Tevens is er zeer hard gewerkt naar het robuust maken van het ionselectieve meetsysteem zodat dit minstens 6 maanden zonder ingrijpen in een kas zou kunnen meten. De elektronica is geminiaturiseerd en in de meetkop verwerkt, zodat deze met een simpele handeling vervangen kan worden zodra er storing optreedt of als de selectieve membramen aan vervanging toe zijn. Dit geheel is

in de tweede helft van 2003 getest in een experimentele kas op het terrein van het IMAG. Hierbij moest duidelijk worden of het geheel kon samenwerken zoals uit het testen van de onderdelen vermoed werd. Dit werd de 'Proof of Principle' genoemd. Er moest nog een maand verlenging aangevraagd worden tot 1 februari 2003 om de laatste data uit deze Proof of Principle te kunnen verwerken. Dit heeft er toe geleid dat we kunnen zeggen dat dit geslaagd is.
Daarnaast is er een systeem ontwikkeld waarmee eventueel spuiwater ontdaan kan worden van 99% van het nitraat en 95% van het fosfaat. Het systeem (Sludge Bed Reactor) is dusdanig uitgevoerd dat zij goed en betaalbaar in te passen is in een tuinbouwkas.

De weg ligt nu open om specifieke toepassingen voor de praktijk te ontwikkelen. We durven te stellen dat we hier een doorbraak in technologie bereikt hebben waarmee een gesloten kasteelt verwezenlijkt kan worden. Hiermee kan een bijdrage geleverd worden aan andere projecten waarin een gesloten kas ontwikkeld is voor wat betreft het bovengrondse deel, dit wil zeggen en kas zonder (geopende) ramen die toch niet te warm wordt (Ecofys/PPO Naaldwijk). Een dergelijke kas kan alleen goed draaien met een geïntegreerd meet- en regelsysteem als ontwikkeld in dit project. Daarmee worden ideeën als de 'Kas als Energiebron' nu langzamerhand een mogelijkheid in de realiteit. Samenwerking met deze projecten vindt er reeds op informele schaal plaats, waardoor een zuinige, duurzame, veilige en economisch rendabele teelt van vraaggestuurde hoogwaardige tuinbouwproducten een mogelijkheid wordt, niet alleen in Nederland maar ook in andere landen. Deze langdurige samenwerking tussen kennisinstellingen en bedrijfsleven, ondersteund door het subsidie instrument E.E.T. van de overheid, leidt daarmee tot duurzame systeemtransities in de agrobusiness.

Prof. Dr. Olaf van Kooten
Hoogleraar Tuinbouwproductieketens

Wageningen, 15 april 2003

1. Projectgegevens

Projecttitel	Hydrion-line: On-line monitor- en besturingssysteem voor proceswater in een gesloten teeltsysteem in de glastuinbouw
Projectnummer	EETK 99038
Looptijd project	December 1999 – januari 2003
Naam projectleider	Prof. dr O. van Kooten
Naam contactpersoon penvoerder	Dr. H. A.G. M. van den Boogaard

2. Samenvatting

In het Hydrion-line II project is het proof-of-principle geleverd dat het haalbaar is om, met behulp van een regeling gebaseerd op modellen en sensoren, water en nutriënten zodanig te doseren dat het verlies van nutriënten tijdens wateremissies wordt geminimaliseerd. Een dergelijk meet- en regelsysteem biedt tevens de mogelijkheid om de productie en kwaliteit van het gewas te sturen. Dat het proof-of-principle geleverd is wil zeggen dat het totale geïntegreerde systeem gedurende een teelt operationeel is geweest in een onderzoekskas en dat is aangetoond dat kwaliteitssturing mogelijk is en emissie van water en nutriënten geminimaliseerd kan worden terwijl gelijktijdig zelfs een productiestijging van 12% werd behaald.

Het Hydrion-line II project kende 9 deelprojecten. Per deelproject zijn de volgende resultaten behaald:

1. Ionselectief meten

- Een werkend en in praktijkomstandigheden getest proefmodel die de volgende elementen in de voedingsoplossing meet: K, Na, Ca, NH_4, NO_3, Cl, HCO_3 (en een schatting maakt voor Mg en Sulfaat) en tevens de EC, pH en temperatuur meet.
- Een verbeterde referentiesensor met een stabieler signaal.
- Laboratoriummodel van Sulfaat sensor.
- Communicatieprotocollen waarmee de sensoren kunnen communiceren met andere apparatuur en via telecom of internet op afstand kan worden gemonitored.

2. Waterzuivering

- Mobiele USB reactor voor denitrificatie en defosfatering van recyclewater gekoppeld aan de ionselectieve Hydrionsensor.
- Mobiel, geautomatiseerd membraanfiltratiesysteem voor desinfectie van recyclewater.

3. Nutriëntendosering

- Er is een nutriëntendoseerunit ontwikkeld, die volledig geïntegreerd in een gesloten teeltsysteem kan functioneren. De doseerunit kan worden beïnvloed door de modellen die de nutriëntenbehoefte bepalen en door de on-line analyse van het recirculatiewater. Er zijn bovendien nieuwe regelalgoritmen ontwikkeld die de analyse van het recirculatiewater vertalen naar een aanpassing van het nutriënten recept.

4. Substraatfysica

- Een substraatmodel dat de water- en nutriëntentransport in de wortelzone en de wortelverdeling dynamisch beschrijft is operationeel en gekoppeld aan het plantmodel tot een plant/substraatmodel.

5. Plantsensoren

- Lichtonderschepping en bladoppervlakte: Een prototype sensor op basis van reflectiemetingen bij specifieke golflengten is gebouwd en is in een onderzoekskas bij tomaat en sla getest. De sensor blijkt zeer goed bruikbaar om lichtonderschepping en bladoppervlakte van het gewas te schatten.
- Plantgewicht: er is een meetsysteem ontwikkeld voor de meting van het gewicht van het gewas. Dit meetsysteem functioneert goed. Het kan gebruikt worden voor de bepaling van plantgewicht of voor de bepaling van de groei van de plant.
- Fotosynthese: Er is met name aandacht besteed aan de verbetering van de nauwkeurigheid van de schatting van fotosyntheseparameters. Metingen van chlorofylfluorescentie, en lichtgeïnduceerde absorptieveranderingen in combinatie met chlorofylgehalte kunnen gebruikt worden om fotosyntheseparameters nauwkeurig te schatten.

6. Nutriëntenbehoefte

- Effecten van kortdurende tekorten van verschillende nutriënten (N, K, Ca) gevolgd door voldoende nutriëntenbeschikbaarheid zijn gekwantificeerd m.b.t. dynamiek van nutriëntenopname en effecten op groei bij tomaat.
- De interacties tussen de verschillende kationen op het opnameproces zijn gekwantificeerd bij tomaat.
- De regulering van groei door N en P is uitvoerig onderzocht in termen van effecten op bladgroei, drogestofverdeling en fotosynthese bij tomaat. Dit onderdeel heeft geresulteerd in een proefschrift.
- Effecten van sub-optimale N-voeding op kwaliteit van tomatenvruchten zijn nader onderzocht.

7. Plantmodel

- Een plantmodel gekoppeld aan een substraatmodel is operationeel voor tomaat. Het model berekent op basis van klimaatfactoren en teeltcondities de groei, productie, enkele kwaliteitsaspecten, en behoefte en opname van nutriënten en water.
- Het model is gevalideerd aan de hand van verschillende datasets uit de praktijk en in proefkassen
- Het plantmodel is zelflerend gemaakt voor de ontwikkelde plantsensoren: Metingen van fotosynthese, lichtonderschepping en plantgewicht worden gebruikt voor autocalibratie van het model. Dit is een unicum voor plantkundige modellen. Door middel van deze autocalibratie wordt het simulatieresultaat aanzienlijk verbeterd.

8. Regeling en besturing

- Er is een drain flow sensor gerealiseerd, op basis van het 'tipping bucket' principe, plus een methode van signaalverwerken.
- Opzet van on-line real-time database voor verwerken en distribueren van meetdata met data visualisatie routines.
- Twee regelingen zijn ontworpen en getest. Een basale regelaar voor constante drainwater flow en een regelaar voor constante concentratie van nutriënten in het drainwater.
- Een meetgoot is gebouwd voor het regelen van het water en nutriëntentoediening naar de gehele kas aan de hand van signalen uit één centrale meetgoot. De meetgoot dient daarbij als representant voor de hele kas (onderdeel van de softsensor).
- Het concept van een softsensor, een observer voor de reconstructie van wateropname en nutriëntenopname, is uitgewerkt en in een praktijknabije kas uitgetest.
- Een Model-based regelaar is ontwikkeld en getest. Het gaat hierbij om een generator van optimale setpoints voor water en nutriëntengift op basis van expliciet geformuleerde doelen (door gebruiker zijn verschillende doelen in te stellen). De setpoint generator maakt gebruik van het plant/substraatmodel dat geautocalibreerd wordt aan de hand van metingen van de plantsensoren.

9. Procesintegratie

- Om de resultaten van alle deelprojecten te kunnen integreren in één proces, is een infrastructuur ontwikkeld waarmee zowel op user interface niveau als op regelniveau verschillende deelprocessen met elkaar gekoppeld kunnen worden. Op dit nieuwe hardware platform kunnen alle softwaremodules van de diverse deelprocessen geïntegreerd worden.

3. Uitvoering van het project

Technische en organisatorische problemen

In deelproject 1 zijn bij de ontwikkeling van de fosfaat- en sulfaat sensoren op basis van nieuwe membraantechnologie onvoorziene technische problemen gerezen. De sulfaat elektrode blijkt (nog) te gevoelig voor nitraat. Bij fosfaat moet nog een oplossing gevonden worden voor de oplosbaarheid van het ionofoor in de overige membraancomponenten. Het verder testen op verbeterde duurzaamheid van sensoren, door gebruik te maken van andere typen membranen heeft duidelijk vertraging opgelopen. Dit laatste is veroorzaakt door de niet voorziene tijd en werkzaamheden ten behoeve van het draaiend houden van de proefopstellingen bij de projectpartners, m.n. tijdens het Proof of Priniple experiment.

Wijzigingen ten opzichte van het projectplan

De belangrijkste wijziging ten opzichte van het projectplan is het gelegen in het feit dat het geplande jaar 4 vervallen is. Dat betekent dat de echte evaluatie van het systeem onder praktijkcondities is vervallen. In plaats daarvan is aan het eind van jaar 3 een beperkt experiment uitgevoerd om het Proof of Principle te leveren.

Hieronder volgen per deelproject de wijzigingen ten opzichte van het werkplan.

Waterzuivering
Na anderhalf jaar is duidelijk geworden dat de ontwikkeling van een waterzuiveringsinstallatie voor verwijdering van monovalente kationen op economische en technologische gronden niet haalbaar is. In plaats daarvan is onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van verwijdering van kleine virussen uit kaswater met membraanfiltratie.

Plantsensoren
Door de snelle ontwikkelingen op het gebied van infraroodthermometrie, met name voor toepassing in de glastuinbouw, is besloten in deze fase van dit project geen tijd te stoppen in het ontwikkelen van een commerciële sensor voor bladtemperatuur. In het project is ook geen aandacht besteed aan het ontwikkelen van een prototype voor een fotosynthesemeter voor een kasomgeving. In plaats daarvan is het onderzoek gericht op het nagaan van de meerwaarde van het gebruik van deze meting. Hierdoor konden een aantal activiteiten uitgevoerd worden die oorspronkelijk voor het vierde jaar gepland stonden. Het gaat met name om de verificatie en technische verbeteringen van de sensor voor lichtonderschepping en plantgewicht.

Regelen en besturen
De werkgroep 'Model based control', met daarin vertegenwoordigers van alle deelprojecten, heeft in 2001 geconcludeerd dat een modelvoorspellende regeling het best geïmplementeerd in de vorm van een setpointgenerator ('model based feedforward' regeling) omdat deze het best aansluit bij de huidige technologie en bij de in praktijk gangbare teeltsturing. Dit heeft kleine verschuivingen opgeleverd in de taken en werkzaamheden van de betrokken deelprojecten, overigens zonder grote verschuivingen in budgetten van de betrokken deelprojecten.

Verschillen tussen de begroting en de werkelijk gemaakte kosten

Er zijn geen significante wijzigingen t.o.v. de begroting

.

Planning budget:	F.O.: €4.260.991	I.O.: €832.890	P.O.: €115.334	totaal: € 5.208.814
Realisatie budget:	F.O.: €3.627.155	I.O.: €665.794	P.O.: € 37.151	totaal: € 4.330.100

Toelichting: Bij het gerealiseerde budget zijn de budgetten weergegeven die gerealiseerd zijn tot 1 juli 2002. Naar verwachting zal op 1 februari 2003 het volledige budget gerealiseerd zijn.

Invulling van de samenwerking tussen de projectpartners

"Hydrion-line II" is een voortzetting van het project "Hydrion-line". Er is een consortium gevormd waarin vier nieuwe partners opgenomen zijn: Alterra, IMAG, Wageningen Universiteit met de leerstoel Meet- en regelsystemen en de leerstoel Tuinbouwproductiesystemen. Halverwege het project is ook Grodan bij het project betrokken Een dergelijk complex project, met partners afkomstig van verschillende culturen – universiteit, onderzoeksinstituut en bedrijfsleven - en met verschillende expertise gebieden, vereist een goede coördinatie om de gestelde doelen te kunnen bereiken.

Management team
Er is een management team (MT) gevormd met daarin de projectleiders van de deelprojecten. Het MT komt 6 maal per jaar bijeen en neemt beslissingen over de inhoudelijke en organisatorische zaken.

Coördinatie
De coördinatie is verzorgd door een team, bestaande uit de projectcoördinator, de projectbegeleider en de management assistente. Dit team heeft wekelijks vergaderd om de projectvoortgang te volgen, het MT van de benodigde informatie te voorzien. Hiertoe is de projectbegeleider betrokken geweest bij het werkoverleg van de clusters MRS en Plant (zie onder).

Clusters
De deelprojecten zijn, in tegenstelling tot het projectvoorstel, niet in drie maar in twee clusters gegroepeerd: de clusters Plant en MRS. De cluster Plant omvat de deelprojecten 4, 5, 6, en 7 en de cluster MRS de deelprojecten 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8. De clusters hebben regelmatig werkoverleg gehad., varierend van 1x per twee weken tot 1x per 6 weken.

Werkgroepen
Daarnaast zijn kleinere werkgroepen ingesteld voor het aanpakken van specifieke problemen. Het gaat hierbij om de werkgroepen 'Model based control', ' Communicatieprotocollen' en Hydrion-line III.

Plenaire bijeenkomsten
Voor de algemene informatievoorziening zijn er in totaal zes plenaire bijeenkomsten georganiseerd waarin alle projectmedewerkers geïnformeerd zijn over de voortgang en de perspectieven van het project..

Internetgebaseerd kennisbeheersysteem
Daarnaast is er een beschermd, internetgebaseerd, kennisbeheersysteem opgezet waarin iedere partner de agenda's en verslagen van de bijeenkomsten kon inzien en actief kon deelnemen aan discussies. Dit systeem is voorzien van een URL (www.hydrion-line.nl) waarmee een beperkte hoeveelheid informatie voor buitenstaanders toegankelijk is.

Conclusie
Er is in de afgelopen jaren een intensieve, constructieve en vruchtbare samenwerking ontstaan tussen de projectpartners. Hiermee is veel synergie gecreëerd in een fase van het project waarin dat, met het oog op de complexe materie, dringend gewenst was.

4. Resultaten en perspectieven

4.1 Deelproject Ionselectief meten

Deelnemende partijen

Hydrion, HortiMaX

Samenvatting

In dit EET project heeft Hydrion BV de handbediende Hydrion-10 ontwikkeld tot een, in de praktijk te gebruiken, geautomatiseerd on-line meetapparaat. Hiermee kunnen de voedingselementen in irrigatiewater en drainwater in een kas gemeten worden. Om dit te realiseren is nieuwe hardware en bedienings- en besturingssoftware ontwikkeld. De resultaten zijn in praktijkomstandigheden getest op gebruikersgemak, onderhoud en duurzaamheid. Daarnaast heeft de Hydrion-line, met goed gevolg, meegedraaid in de Proof of Principle van dit EET project. Verder is onderzoek gedaan naar verbetering van de duurzaamheid en nauwkeurigheid van verschillend sensoren, die in de Hydrion gebruikt worden. Voor deze sensoren is een nieuw type membraan ontwikkeld op basis van keramiek. Dit heeft geresulteerd in een duurzamer, mechanisch te reinigen en biologisch inert membraan. Op deze ontwikkeling is patent aangevraagd en toegekend. Deze verbeteringen zijn voor een aantal sensoren geslaagd en in de praktijk getest (bijv. Na en referentiesensor). Voor andere sensoren dient nog vervolgonderzoek en duurzaamheidstesten te worden uitgevoerd. (K, NH_4 en Ca). Tevens zijn prototypes voor fosfaat- en sulfaatsensoren ontwikkeld, die op dit moment in reguliere titrimetrische analyse-apparatuur worden getest. Verder is een verbeterde referentie elektrode ontwikkeld die een, in de tijd, stabieler signaal genereert.

Summary

In this EET-project, Hydrion BV has reconstructed the handheld Hydrion-10 into an automated, on-line measuring instrument, that can be used under practical circumstances. Herewith nutrients in irrigation and drain water in greenhouses can be measured. For realising this, new hardware and operation and control software is developed. The results are tested under practical circumstances on users convenience, maintenance and durability. Besides this, the Hydrion-line has successfully worked in the Proof of Principle of this EET-project. Tests are performed, to improve the durability and accuracy of the sensors, that are used in the Hydrion. For these sensors a membrane is developed, based on a ceramic filter. This has resulted in a durable, mechanical cleanable and biological inert membrane. On this membrane, a patent is requested and awarded. These improvements were successfully tested in practice for the sodium and reference sensor. Other sensors (K, NH_4 and Ca) need more durability and stability tests. Besides this prototypes for phosphate and sulphate are developed. At this moment, they are tested in regular titrimetric analysing equipment. Furthermore a reference sensor is developed, that has a more stable signal.

Deliverables

		Status	Datum	
No.	Omschrijving	(% gereed)	Start	Oplevering
I	Deelproject Ionselectief meten			
I-1	Ontwikkelen praktijkopstelling Hydrion-line tot werkend proefmodel	100%	Dec 2000	Okt 2001
	Uitwisselbare, onafhankelijke sensorunit	100%	Jan 2000	Okt 2001
	Geminiaturiseerde sensor-unit	50 %	Jan 2000	Okt 2002
	Verdunningsunit	100%	Jun 2001	Okt 2001
	Communicatieprotocollen	100 %	Jan 2001	Mrt 2002

I-2	Elektrode ontwikkeling			
	Referentie-elektrode Laboratoriummodel	100%	Jan 2000	Mei 2002
	Praktijkmodel	75 %	Mrt 2000	Okt 2002
	Sulfaat elektrode Laboratoriummodel	100 %	Jan 2001	Okt 2001
	Werkend proefmodel	50 %	Okt 2001	Okt 2002
	Fosfaat elektrode Laboratoriummodel	100 %	Jan 2001	Okt 2001
	Werkend Proefmodel	0 %		Okt 2002
I-3	Kation elektrodes op basis van nieuwe matrix, biologisch inert			
	Laboratoriummodel Na	100 %	Mrt 2000	Oct 2001
	Laboratorium K NH4 Ca	80 %	Aug 2001	Mei 2002
	Werkend Proefmodel	0 %		0ct 2002
	Praktijkmodel	0%		Jan 2003
I-4	Software voor: automatische kalibratie	100 %	Dec 2000	Oct 2001
	controle en alarmering	100 %	Dec 2000	Mrt 2002
	communicatie met andere apparatuur	100 %	Dec 2000	Mrt 2002
	Werkend proefmodel testen in kas bij tuinder	100 %	Dec 2001	Jun 2002

Inleiding

Hydrion BV heeft, mede voor gebruik in de glastuinbouw, een ionen concentratiemeter ontwikkeld, die de belangrijkste voedingselementen in irrigatie- en drainwater direct kan meten. Uitgaande van een vrij simpel handbediend apparaat, heeft Hydrion BV in de eerste fase van het project, deze ionen-concentratiemeter omgebouwd tot een werkend proefmodel-meetapparaat, dat on-line kan meten. Hiervoor moest nieuwe hardware en bedienings- en besturings-software ontwikkeld worden.

Drie werkende proefmodellen zijn getest, in verschillende configuraties, op verschillende locaties. Hier werden gebruikersaspecten verbeterd, geoptimaliseerd en getest. Een aantal zaken die werden onderzocht zijn: nauwkeurigheid, datacommunicatie, duurzaamheid van de sensoren, gebruikersgemak, onderhoud, automatische ijking en oplossingen om microbiologische vervuiling te voorkomen.
Tot slot is het een proefmodel getest op een praktijklocatie (in samenwerking met Grodan).

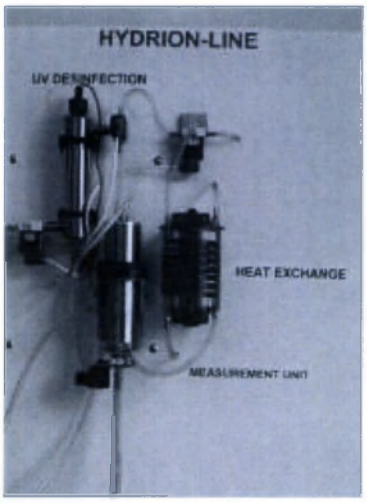
Naast de kationen kalium, natrium, ammonium, calcium, chloride, nitraat en bicarbonaat, was het streven gericht op het ontwikkelen van sensoren voor het ion-selectief meten van fosfaat en sulfaat. Hiervoor zijn prototypes ontwikkeld die op dit moment in reguliere titrimetrische analyse-apparatuur worden getest.

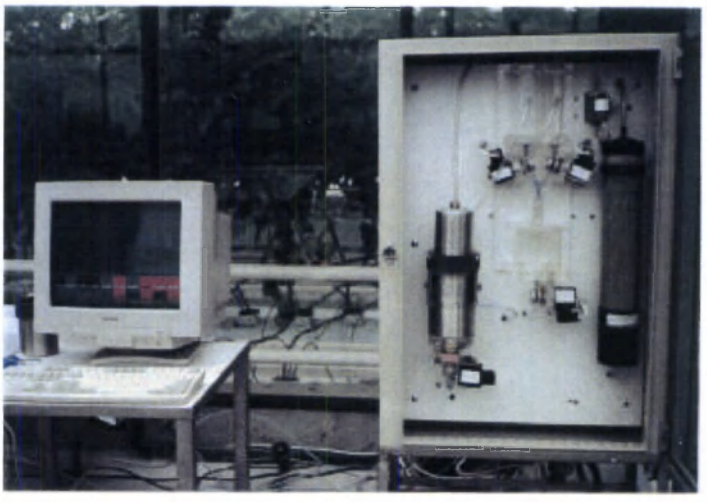
Voor de sensoren (ISE's) die kalium, natrium calcium en ammonium meten en die bij het meten van recirculatiewater enkele beperkingen ondervinden, is onderzocht en getest, hoe dit verbeterd kon worden. Met name de levensduur (biologische aantasting) en problemen met meten van hoge concentratie. Dit onderzoek richtte zich voornamelijk op het ontwikkelen van een nieuw type membranen voor deze sensoren. Op het resultaat van deze ontwikkelingen is patent aangevraagd en toegekend.

Tevens is een verbeterde referentie elektrode ontwikkeld die in de tijd een stabieler signaal genereert, waardoor de Hydrion-line apparatuur betrouwbaarder meet en minder vaak hoeft te worden geijkt.

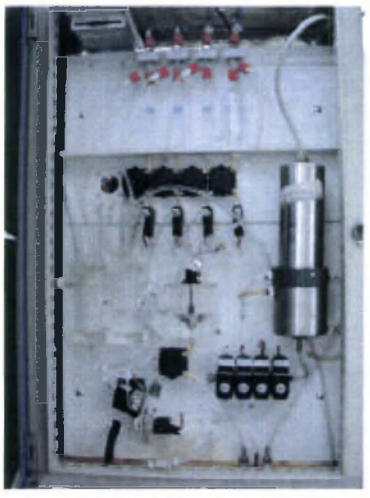
Materiaal, methoden en conclusies

On-line praktijkopstelling Hydrion-line: ontwikkelen tot werkend proefmodel









In het bovenstaande ziet u de ontwikkeling over de afgelopen jaren van de Hydrion-line module.
Vanaf een werkend laboratoriummodel, heeft de Hydrion-line, geleidelijk een definitief ontwerp gekregen, waarin aspecten, die voor toepassing in de praktijk noodzakelijk bleken, zijn geïmplementeerd.
Zoals in het vorige jaarverslagen aangegeven, hebben deze aanpassingen aan de praktijk meer tijd gekost dan beraamd. Door Hydrion is dan ook gevraagd om een gedeelte van het project dat was gereserveerd voor uitbesteed werk, in eigen beheer uit te voeren. Voortschrijdend inzicht en opgebouwde kennis speelden hierbij ook een rol. Hydrion BV heeft in de afgelopen jaren veel kennis vergaard over ISE's, membraantechnologie, micro-elektronica, besturingssoftware en geautomatiseerde meetapparatuur.
De volgende deelaspecten, zoals genoemd bij de deliverables, zijn allen geïmplementeerd:

- Uitwisselbare, onafhankelijke sensorunit,
- verdunningsunit en
- communicatieprotocollen

In het nu volgende worden de verschillende proefopstellingen besproken.

A Proefmodel IMAG (opstelling in Kas)

Bij deze proefopstelling zijn de volgende aanpassingen uitgevoerd en getest:

Temperatuursinvloeden
Het bleek dat in de kas de temperatuurfluctuaties zodanig waren dat de sensoren hierdoor afwijkingen gingen vertonen. Met name de kalium-sensor fluctueerde zodanig dat niet meer gesproken kon worden

van een betrouwbare meting. Hiervoor is een soort van warmtewisselaar ingebouwd waarmee het probleem is verholpen.

Gebruik demiwater
Om zuiniger met de ionenwisselaar kolom om te kunnen gaan, is een RO installatie ingebouwd (reverse osmose), waardoor de levensduur van de ionenwisselaars kolom van één week tot tien weken wordt verlengd.

Nieuwe referentiesensor
Deze opstelling is als eerste uitgerust met een werkend proefmodel van de in eigen beheer ontwikkelde referentiesensor.(zie referentiesensor). De eerste resultaten wijzen op stabielere en nauwkeurigere metingen. In de tweede helft van 2002 is deze opstelling bij het IMAG gebruikt bij de Proof of Principle.(POP)

B Proefmodel ATO

Naast de metingen die bij het ATO worden verricht t.b.v. de zuiveringsunit, werd deze opstelling gebruikt om communicatieprotocol te ontwikkelen met overige (aansturings-) apparatuur via internet.

C Getest proefmodel (incl door Hydrion ontwikkelde sensoren in kas bij tuinder)

In samenwerking met Grodan is eind december 2001 een proefopstelling bij PPO te Horst (praktijkonderzoek Plant en Omgeving)

Monsters uit de mat
Naast het meten van de samenstelling van het drainwater is hier geëxperimenteerd met monsters die direct uit de mat worden gezogen.
Direct meten uit de mat levert de volgende voordelen:

- meten dichter bij de wortel en
- mogelijkheid om te meten als er geen drain is.

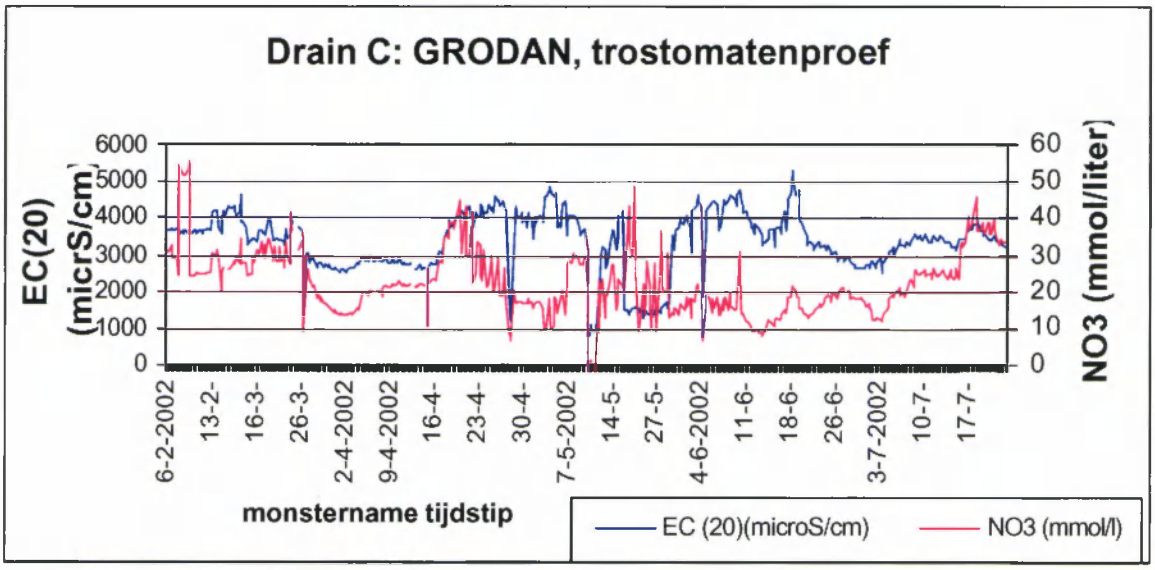
Voor het aanzuigen uit de mat is een speciaal zuigsysteem gebruikt dat een monster uit de mat kan halen. De resultaten van deze metingen, hebben nog niet opgeleverd wat er van werd verwacht. Dit had met allerlei praktische problemen te maken:

- Te grote afstand mat en meetopstelling waardoor drukverlies optrad.
- Onvoldoende monster dat opgezogen werd.
- En vervuiling met micro-organismen in de opstelling.

De meetopstelling staat in principe in een omgeving waar productie prioriteit heeft, en waarin zo min mogelijk aan de praktijkomstandigheden veranderd mag worden en geëxperimenteerd.

Onverdund meten
Er is onverdund gemeten: De waarde van de onverdunde metingen op zich, waren in vergelijking met schaduwmetingen betrouwbaar. De levensduur van de door Hydrion BV ontwikkelde sensoren (voor Na, K, NH4 Ca) bedroeg 1 tot 3 maanden. Dit is nog niet de gewenste levensduur van een half jaar of meer (wat de doelstelling is). De voornaamst oorzaak lag voornamelijk in vervuiling door micro-organismen in het bemonsteringssysteem. Bij verdund meten (factor 10) zoals bij het IMAG is de levensduur van de sensoren duidelijk langer (factor 2 tot 3). Het draaiende houden van deze opstelling heeft veel tijd en improvisatie gekost. In deze opstelling is een PC moederboard, modem en disk drive ingebouwd zodat het systeem zelfstandig kan draaien en niet met een externe PC aangesloten hoeft te worden Data communicatie kan verlopen via netwerk telefoon of via laptop aan te sluiten.

Conclusie
Verder duurzaamheidtesten in de praktijk en verbetering van de sensoren op deze toepassing zijn daarvoor noodzakelijk gebleken. Voor het mogelijk maken van direct meten in de mat is een voorstel ingediend in Hydrion-line lll voorstel.



Figuur 4.1.1: Resultaten van onverdunde metingen aan de drain in de praktijkopstelling in Horst.

Miniaturisering

Het miniaturisering omvatte 2 aspecten

- Het miniaturisering van de elektronica zodat deze in de sensorkoker ondergebracht kon worden.
- De tweede doelstelling was om met miniaturisering het benodigde monstervolume te verkleinen.

Minaturisering elektronica

In eerste instantie was het de bedoeling om de, voor de Hydrion noodzakelijke elektronica, in de sensor koker in te bouwen, maar het resultaat voldeed niet aan de verwachtingen. Er is destijds gekozen voor een systeem, waarin de voorversterking van signaal, AD-conversie, etc., centraal geschakeld werd.
Dit heeft geresulteerd in een Hydrion-line waarin de elektronica in de koker ingebouwd kon worden. Voorheen zaten data-logger en een gedeelte van de elektronica in een apart kastje. In de praktijk bleek, dat voor miniaturisering, het veel geschikter is, dat elke sensor apart wordt uitgerust met micro-elektronica. Dit geeft veel minder storingsgevoeligheid en sensoren kunnen als aparte modules worden beschouwd en vervangen. Aangezien Hydrion BV gedeeltelijk gebruik maakt van sensoren die geleverd worden door derden, was op korte termijn deze ombouw in zijn totaal niet te realiseren.

Sinds juli 2002 is er onderzoek gedaan naar de mogelijke haalbaarheid van deze manier van toepassen. Theoretisch zijn de daarvoor benodigde elektronica componenten beschikbaar. Het komt er dan wel op neer dat Hydrion alle sensoren in eigen beheer moet produceren. Vandaar dat in het vorige jaarverslag de volgende opmerking stond. "Deze miniaturisering loopt synchroon met de ontwikkelingen van de eigen sensoren van Hydrion: vervolg verdere ontwikkeling half maart 2002."

De doelstelling van dit deelproject, om deze miniaturisering te realiseren is in zoverre geslaagd dat alle elektronica in de sensor koker ingebouwd kan worden. Voor praktisch toepassing, zodat ook kleinere monstervolumes gemeten kunnen worden, is het noodzakelijk dat de sensoren apart van micro elektronica worden voorzien.

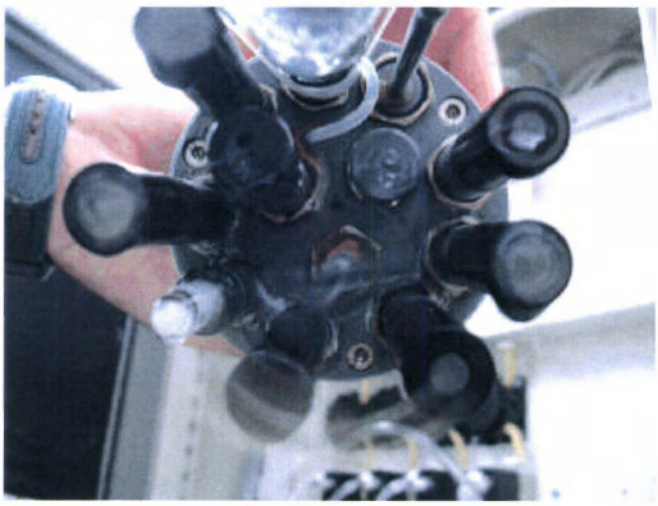
Conclusie

Miniaturisering, zodat kleine monster volumes gemeten kunnen worden is zeer wel mogelijk maar, voor toepassing in de praktijk, is het noodzakelijk de sensoren apart met micro-elektronica uit te rusten.

Communicatie met andere apparatuur

Er is een werkgroepje samengesteld waarin Hydrion, ATO, IMAG en Hortimax zijn vertegenwoordigd. De afspraken over communicatieprotocollen tussen de verschillende apparatuur is hierin gecoördineerd. Deze groep is een aantal malen bijeen geweest. Er is een communicatie protocol gekozen, dat verder is uitgewerkt (TCP/IP protocol). Verder implementatie en afstemming heeft plaatsgevonden via de MRS overleggroep.

Sensorontwikkeling



Referentie

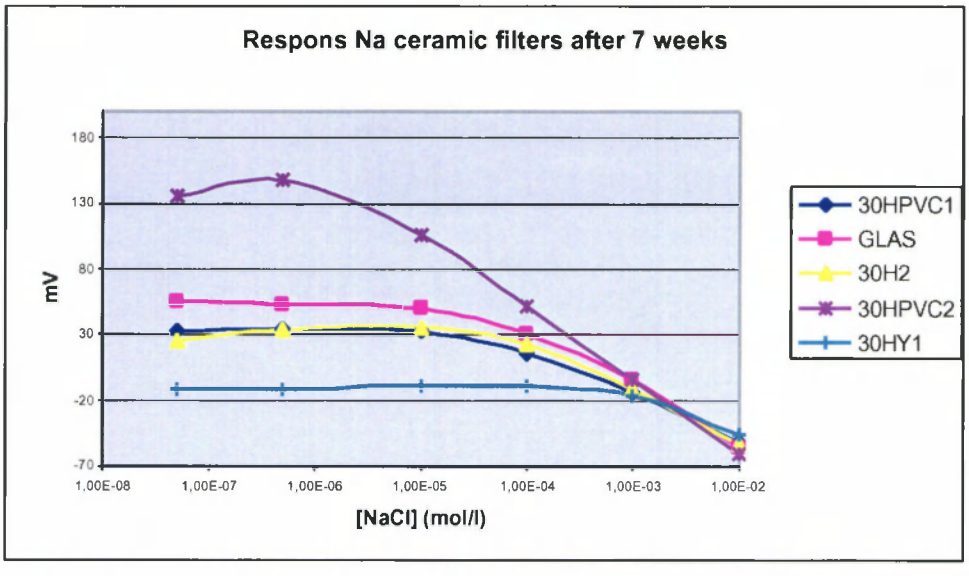
Vanaf de start van de onwikkeling van de Hydrion-10 en -line is Hydrion BV op zoek geweest naar en geschikte stabiele referentiesensor. De bekende sensoren waren niet stabiel genoeg of lekten teveel referentievloeistof. (dubbel junction reference electrode). In het kader van dit project heeft Hydrion een eigen referentiesensor ontwikkeld op basis van een nieuw uitstroomprincipe. Eerste resultaten bij het IMAG wijzen in de richting van stabielere metingen. Dit heeft als grootste voordeel dat de Hydrion-line minder vaak geijkt hoeft te worden. In plaats van een eenpuntsijking elke twee uur, hoeft deze naar verwachting nog maar eenmaal per week te worden uitgevoerd. De ontwikkelingen en testen aan het proefmodel van deze referentiesensoren, lopen vanaf maart 2002. De resultaten zijn zodanig dat in januari 2003 patent is aangevraagd.

Kation selectieve elektrodes op basis van nieuwe matrix, biologisch inert en onderhoudsarm

Voor de pH gevoelige Na sensor heeft Hydrion BV een sensor ontwikkeld die in plaats van boven pH 6,5 gebruikt kan worden boven pH 3,5. De Natruim sensor met keramisch membraan werkt nu in ieder geval 7 weken (zie figuur 2, werkend Labmodel 100 % gereed). Als de levensduur nog kan worden verbeterd is dit een ideale sensor om in (het licht zure) kaswater te meten.

Na-, K-, NH4-, en Ca-sensoren zijn getest en werken in PVC lager dan 3 maanden. Van deze sensoren worden Na, K en NH_4 nu al toegepast in de Hydrion-line. Ca wordt nog niet gebruikt omdat deze sensoren nog te weinig stabiel zijn.

Keramiek-versies van deze sensoren zouden in 2002 verder getest worden Zoals al eerder vermeld heeft het werkend maken en houden van de proefopstellingen hier een vertragend effect op gehad..



Figuur 4.1.2: Na+ keramiek grafische weergave van signaal van 7 weken oude sensoren

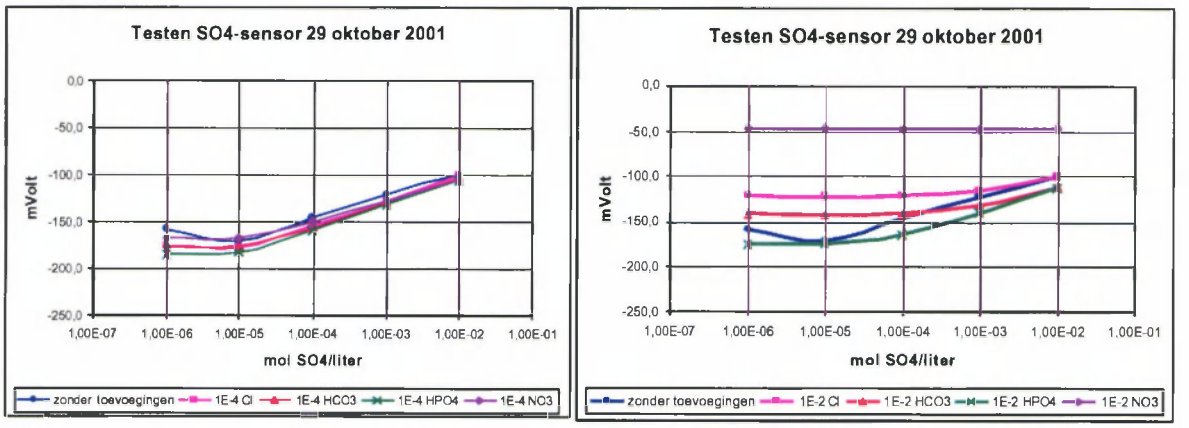
Anion selectieve elektrodes

Twee belangrijke ionen (fosfaat en sulfaat) konden nog niet gemeten worden, omdat er geen ISE elektroden voor beschikbaar zijn. Voor de ontwikkeling van prototypes is gebruik gemaakt van, in de literatuur beschreven, ionoforen. Op basis van deze ionoforen zijn membraanmodules gebouwd. Hiermee zijn met behulp van een Hydrion–10 laboratoriumopstelling, interactie experimenten en duurzaamheidstesten uitgevoerd.

Sulfaat ionofoor werkt als conventioneel PVC membraan minimaal 1 maand onder voorwaarde dat niet te veel andere ionen in de oplossing aanwezig zijn (zie bijgevoegde figuren). Met name de aanwezigheid van nitraat in de oplossing zorgt nog voor te grote storingen (de sensor meet dan nitraat in plaats van sulfaat). Om deze reden is deze sensor vooralsnog niet geschikt voor de tuinbouw. Zie voor meetgegevens figuur 4.1.3 a en b.

Voor toepassingen in reguliere titrimetrische bepalingen zijn testen uitgevoerd door Applikon De resultaten van deze experimenten zijn op dit moment nog niet beschikbaar.

Er zijn tevens tests gedaan met fosfaatsensoren met uit de literatuur bekende ionoforen. De eerste resultaten zijn voorzichtig positief. Nader onderzoek naar de meest optimale omstandigheden waarin het fosfaat ionofoor oplost in de overige membraancomponenten is nodig om een goed reproduceerbaar membraan wordt verkregen. Deze slechte oplosbaarheid zorgt er nu nog voor dat de reproduceerbaarheid van de membraansamenstelling moeizaam verloopt. Tot op heden is hiervoor geen oplossing gevonden. De eerste gegevens zijn weergegeven in figuur 4



Figuur 4.1.3: Sulfaatsensor getest voor verschillende kruisbeïnvloedingen. A (links): signaal sulfaatsensor bij achtergrond concentraties 10^{-4} M. B(rechts): signaal sulfaatsensor bij achtergrond concentraties 10^{-2} M.

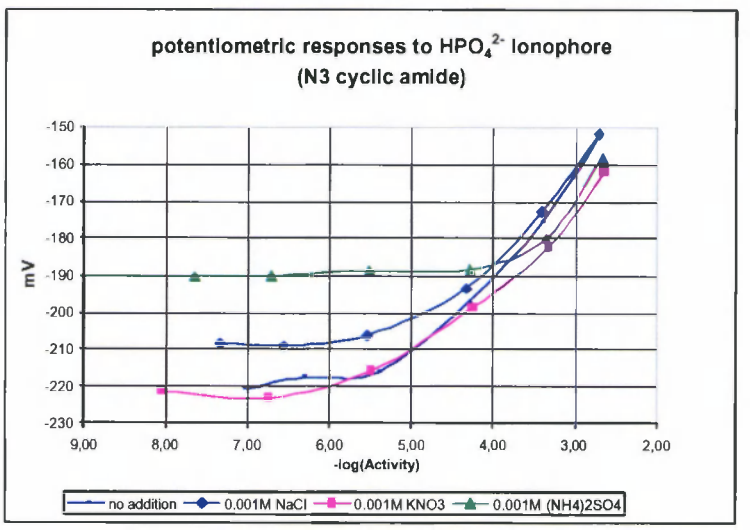
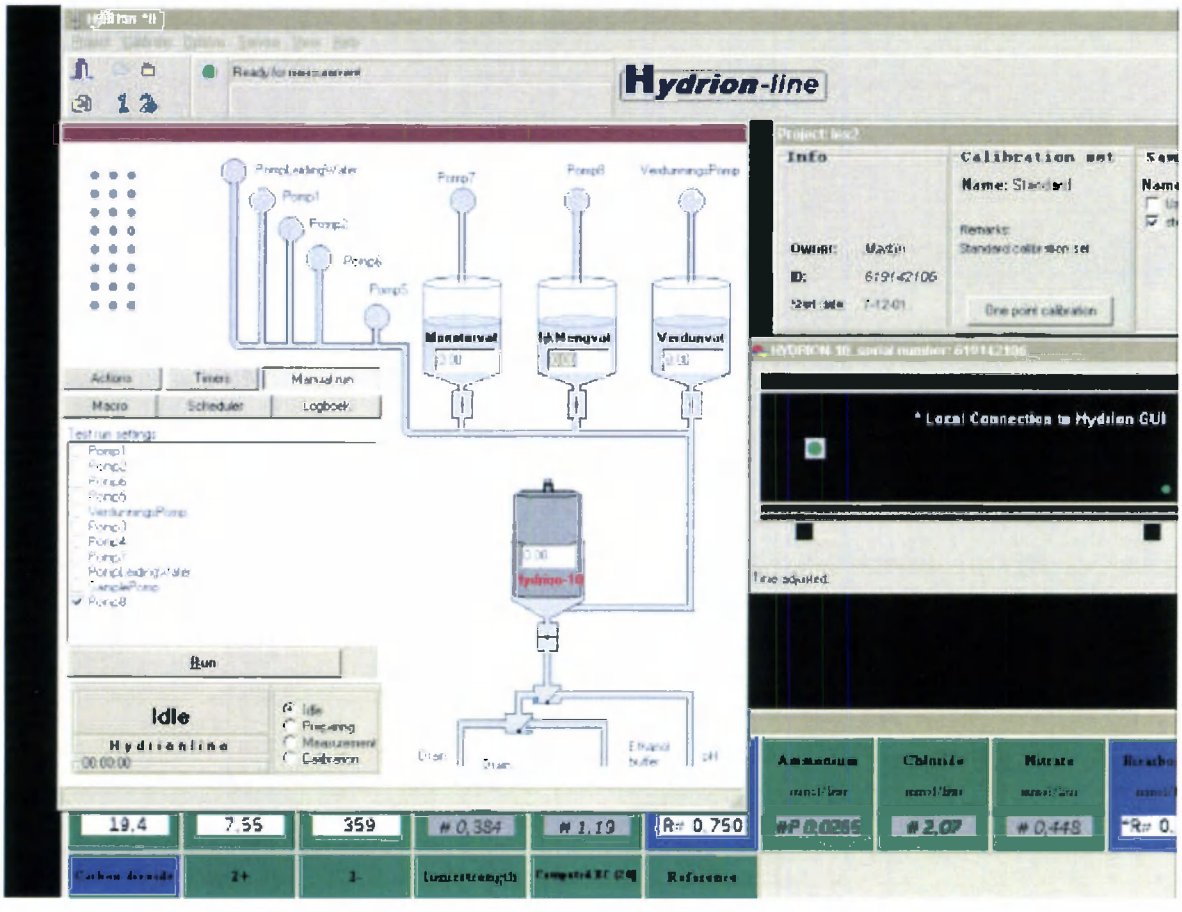


Fig. 4.1.4.

Software ontwikkelingen.

Voor de on-line opstelling is een "bedieningsschil" ontwikkeld die het apparaat visualiseert voor de gebruiker, zodat deze kan zien wat het apparaat op dat moment uitvoert. Voor degene die het apparaat onderhoudt, is het eenvoudig om ijktijden, monsterpunten, monstertijden en een andere ijkserie in te voeren.

Zie fig. 4.1.5 voor een voorbeeld van weergave op beeldscherm van bedieningsinterface.



Figuur 4.1.5: Bedieningssoftware

Conclusies

- De ontwikkeling van een Hydrion-10 handmodel, naar een geautomatiseerde on-line opstelling, die in het Proof of Principle experiment is getest voor het meten van irrigatie en drainwater is gerealiseerd.
- Een tweede belangrijk aspect: ontwikkelen van een stabielere referentiesensor, is ook geslaagd (patent aangevraagd).
- De ontwikkeling van pH ongevoelige Na sensor is ook naar tevredenheid afgerond.
- De ontwikkeling van de fosfaat- en sulfaat sensoren, op basis van nieuwe membraantechnologie is ten dele gerealiseerd. De sulfaat elektrode blijkt (nog) te gevoelig voor nitraat. Bij fosfaat moet nog een oplossing gevonden voor de oplosbaarheid van het ionofoor in de overige membraancomponenten.
- Het verder testen op verbeterde duurzaamheid van sensoren, door gebruik te maken van ander typen membranen heeft duidelijk vertraging opgelopen. Dit is veroorzaakt door de niet tevoren begrootte extra tijd en werkzaamheden, om de proefopstellingen draaiende te houden.

Blik in de toekomst en aanbeveling.

Voor een gebruikersvriendelijk on-line meting is het aan te bevelen om de ISE's, zoals zij nu gebruikt worden, individueel uit te rusten met micro-elektronica, waardoor storingsgevoeligheid zal verminderen en miniaturisering en in-line metingen mogelijk worden.
Indien in-line meten mogelijk wordt, is het ook mogelijk om in de mat (bij de wortel) te meten; ook op momenten dat er geen drain is. Hierdoor zal nauwkeuriger kunnen worden bepaald welke voeding de plant tot haar beschikking heeft.

4.2 Deelproject Waterzuivering

Deelnemende partijen

ATO

Summary

The first objective was to develop of a system for the removal of undesired salts from recirculationwater. After one and a half year the objective was modified to the removal of bacteria and viruses on the basis of the results of the recycling-scenario-verification. Two properly functioning waterpurification systems were developed and tested at greenhouse conditions: an upflow sludge reactor and an ultrafiltration unit. Both literature studies and scenario calculations showed that a selective intervention in the ionbalance is from a technological as well as an economical perspective not feasible on the short to middle term. By minimisation of overdosage at the feed side, a selective intervention in the drain- or recyclewater is also not necessary.

Samenvatting

Doel is de ontwikkeling van een systeem voor de behandeling van recirculatiewater waarbij ongewenste zouten uit het water verwijderd worden. Na anderhalf jaar is de doelstalling aangepast en veranderd in verwijdering van ongewenste bacteriën en virussen op basis van de resultaten van de recycling-scenario-verificatie. Er zijn twee goed functionerende waterzuiveringssystemen ontwikkeld. Literatuur studies en scenario berekeningen hebben aangetoond dat selectief ingrijpen in de ionenbalans vanuit technologisch en economisch perspectief op de korte en middellange termijn niet haalbaar is. Als aan de voedingszijde de huidige overdosering verminderd kan worden, dan is een selectief ingrijpen in het drain- of recyclewater ook niet nodig.

Deliverables

Omschrijving deliverable	Status (%)	Start	Oplevering
I. Scenario's			
Definitie en opzet	100	juli 00	dec 00
II. Recycling			
Experimentele verificatie scenario's	100	jan 01	juni 01
Opzet prototype	100	juli 01	dec 01
Exp. Prototype	100	sept 02	nov 02
Verificatie scenario recycling	100	aug 01	nov 01
Integratie ontwerp	100	dec 01	dec 01
III. Reststoffen			
Lab onderzoek	100	juli 00	juni 01
Ontwikkelingen meet- en regel	100	juli 01	juni 02
Opzet / ontwerp prototype	100	juni 01	dec 01
Exp. Prototype	100	juli 02	dec 02
IV. Integraal water prototype			
Integreren recycling en reststoffen	0		
Kwantitatieve verificatie van scenario's	100	juni 02	juni 02
Optimalisatie	0		
Evaluatie van scenario's	100	juni 02	juni 02

Inleiding

Onderzoeksdoel is de ontwikkeling van een systeem voor de behandeling van recirculatiewater waarbij ongewenste zouten uit het water verwijderd worden. Na anderhalf jaar is dit veranderd in verwijdering van ongewenste bacteriën en virussen op basis van de resultaten van de recycling-scenario verificatie. Uit de scenario verificatie bleek dat het binnen dit Hydrion-line II project om technologische en economische gronden niet zinvol is om te blijven focussen op de verwijdering van natrium en chloride uit recyclewater. Enerzijds is er geen (membraan)techniek voorhanden waarbij selectief in de ionenconcentratie ingegrepen kan worden tenzij gebruik wordt gemaakt van vloeibare organische membranen (mogelijk toxisch, duur en instabiel). Maar dit bleek binnen de doelstellingen van dit project geen haalbare optie. Anderzijds is uit verificatie van mogelijke waterscenario's gebleken dat de behandelkosten middels end-of-pipe-technieken van recyclewater hoger zijn dan de besparing op de benodigde verse hoeveelheid drink- of regenwater. De volgende scenario's zijn doorgerekend voor verschillende kaswaterstromen:

1. Complete ontzouting (middels omgekeerde osmose (RO))
2. Gedeeltelijke ontzouting (middels nanofiltratie evt. gekoppeld met desinfectie middels uv of membraanfiltratie)
3. Gecontroleerde spui (door meting van het zoutgehalte in het recyclewater een spui in geval van een te hoog natrium / chloride gehalte; desinfectie middels uv of membraanfiltratie)

Indien de wetgever geen 'nul'-norm opstelt voor wat betreft de lozing van recycle- of drainwater, is gecontroleerde spui economisch de meest gunstige oplossing. Dit is zelfs zo bij een verhoging van de lozingskosten en / of vers water kosten met 100 tot 500% in combinatie met het gebruik van de huidige voedingsconcentraties nutriënten. Verlaging van de nutriëntconcentraties in het voedingswater zorgt er voor dat de nutriëntconcentraties in het recyclewater verlaagd worden, waardoor dit water in combinatie met een goede desinfectie vaker hergebruikt kan worden. Een kasimplementatie van de USB reactor voor denitrificatie en defosfateren is onder meer vanwege bovenstaande economische evaluatie niet verder uitgewerkt. Alle experimenten (ook met kasrecyclewater) zijn bij het ATO uitgevoerd. Pas na de koppeling van Hydrion-sensor en -software met de ATO netwerkomgeving is het project goed op gang gekomen. Hydrion B.V. is er in geslaagd om de sensor voor langere tijd goed te laten functioneren onder de vergelijkbare praktijkomstandigheden van de USB reactor.

Een aandachtspunt voor kaswaterkwaliteit wordt bij langdurige recirculatie: inzicht in en het voorkomen van de ophoping van overtollige gewasbeschermingsmiddelen, hormonale plantenresiduen en ziektekiemen in het recyclewater. Voorlopig is een continue verswater toevoer van 5 % bij gebruik van desinfectietechnieken zoals uv, verhitting, membraanfiltratie en ozon economisch gezien het meest rendabele proces om zowel ecologisch als economisch verantwoord het waterverbruik te verlagen.

Technologie	Minimaal % spui [theoretisch]	Desinfectie-Capaciteit	Commentaar / onderzoeksonderwerpen
UV	0	Bacterie + virus	Mogelijkheid vorming toxische verbindingen
Verhitting	0	Bacterie + virus	Hoge energiekosten plus kalkaanslag
Membraanfiltratie (UF)	5	Bacterie + virus	Bedrijfszekerheid, mogelijkheid verwijdering plantenhormonen
Langzame zandfiltratie	0	Bacterie	Lage kosten, onvoldoende desinfectiecapaciteit
Ozon	0	Bacterie + virus	Mogelijkheid vorming toxische verbindingen

Materialen & methoden

In de eerste twee onderzoeksjaren is vrijwel continu gebruik gemaakt van modeloplossing tomatendrainwater waarvan de samenstelling in tabel 4.2.1 is weergegeven.

Tabel 4.2.1. Samenstelling modeloplossing tomatendrainwater; werkelijke ionconcentratie.

			Ion	K^+	NH_4^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	Cl^-	SO_4^{2-}
			Mw	39.1	18.0	23.0	40.1	24.3	62.0	97.0	35.5	96.1
			Mg N P/l		6.4				324.4	31.4		218.6
			mg/l	313.16	8.33	186.71	400.58	107.50	1436.83	98.35	268.41	656.68
Zout	Mw	Mg/l	**mmol/l**	**8.01**	**0.46**	**8.12**	**9.99**	**4.42**	**23.17**	**1.01**	**7.56**	**6.83**
NH_4NO_3	80	37	0.46		0.46				0.46			
KNO_3	101.1	220	2.18	2.18					2.18			
$Ca(NO_3)_2\,4H_2O$	236.1	1466	6.21				6.21		12.42			
$CaCl_2$	111.1	420	3.78				3.78				7.56	
$MgSO_4\,7H_20$	246.4	1090	4.42					4.42				4.42
KH_2PO_4	136.1	138	1.01	1.01						1.01		
K_2SO_4	174.3	420	2.41	4.82								2.41
$NaNO_3$	85	690	8.12			8.12			8.12			

Opmerking: de concentraties voor fosfaat, nitraat en nitriet zijn weergegeven per atoom P en N ($P\text{-}PO_4$, $N\text{-}NO_2$ en $N\text{-}NO_3$); deze waarden zullen verder worden gebruikt.

In loop verwijdering van overtollige nutriënten

Uit een inventarisatie van kaswaterstromen bleek dat natrium het ion is dat voornamelijk verwijderd moet worden uit ingaand water en / of recyclewater. Uit een literatuurstudie naar selectieve verwijdering van natrium bleek dat nanofiltratie (NF) op de korte termijn de meeste kans biedt op realisatie van een praktijkinstallatie binnen het Hydrion line II project. Daarom zijn vijf typen commercieel beschikbare NF membranen getest met modeloplossing tomaat (samenstelling zie tabel 4.2.1) in een 500 ml kunststof Amicon NF/UF cel met een doorsnede van 9.2 cm bij 21 ± 2 °C en 4 bar stikstofdruk. De eigenschappen van deze membranen zijn in tabel 4.2.2 weergegeven.
Deze experimenten leverden gegevens op over de selectiviteit waarmee bepaalde ionen verwijderd kunnen worden, gegevens over de productiecapaciteit per membraan en verder ideale procesomstandigheden zoals druk en temperatuur per membraantype.

Tabel 4.2.2. Eigenschappen geteste membranen in tabelvorm

Membraan	Lading	Membraan type	Opp [m^2]	Cutoff	PH bereik	Max. temp en druk
ASP50	-	NF	$6.65*10^{-3}$		2-11	52 °C, 60 bar
ATF50	-	RO / UF	$6.65*10^{-3}$		3-10	60 °C, 60 bar
MPF34	+	NF	$6.65*10^{-3}$	250 D	2-10	40 °C
NF45	0	NF	$6.65*10^{-3}$		2-10	50 °C, 55 bar
WFB4125	-	UF	$2.17*10^{-2}$	50 kD	2-10	70 °C, 10 bar

De resultaten van deze experimenten zijn gebruikt bij evaluatie van waterscenario's waarbij economische en technologische mogelijkheden doorgerekend zijn voor kasoppervlakken van 2 en 10 hectare (zie tabel 4.2.3). Gebruikte variabelen zijn: kasoppervlak, waterbron (ingaande natriumconcentratie), behandelingstechnologie, recyclepercentage en natriumopname door de plant.

Tabel 4.2.3. Overzicht doorgerekende scenario's van combinaties watertype en technologie.

Waterbron	Ontzouting met RO	Ontzouting met RO + NF	Deelontzouting door Gecontroleerde spui	Desinfectie middels UV	Desinfectie middels MF of UF
Vers water * 100% daggift	X	x	n.v.t.	x	X
Recyclewater 30 tot 50 % daggift	n.v.t.	x	x	x	X

* Onderzochte vers water mogelijkheden: regenwater, rivierwater, drinkwater, ontijzerd water, bronwater en mengsels hiervan.

Desinfectie recyclewater

De resultaten van de scenarioberekeningen waren samen met het ontbreken van een snel toepasbare selectieve technologie om natrium te verwijderen de aanleiding om de focus van het onderzoek te verleggen naar desinfectiemogelijkheden. Allereerst zijn hiervoor diverse typen membranen getest op labschaal voor wat betreft de effectiviteit waarmee pepino mosaic virus verwijderd kan worden uit recyclewater. Uit dit onderzoek bleek dat microfiltratiemembranen niet geschikt zijn voor deze toepassing omdat de poriën te snel dicht gaan zitten met organisch materiaal ongeacht het type membraanmateriaal. Deze conclusie wordt ondersteund door de waarneming dat zowel het 0.1 µm als het 0.2 µm membraan (beide DSS) eerst pepino mosaic virus doorlaten. Na korte tijd wordt het virus wel tegengehouden. In een cross flow configuratie wordt de vorming van een foulinglaag voorkomen of in elk geval vertraagd. Virussen gaan in dat geval en bij gebruik van grotere poriën continu door het membraan. Tevens vindt bij toepassing van grotere poriën een mogelijk irreversibele fouling plaats doordat deeltjes in de poriën gaan zitten.

Ultrafiltratiemembranen met een MWCO van 100 tot 200 kD zijn in staat het pepino mosaic virus tegen te houden. Aan de permeaatzijde was geen virus aantoonbaar terwijl de voedingsconcentratie 60 tot 170 µg/ml was. De detectiegrens van de gebruikte analysemethode lag op 0.5 µg/ml waardoor de desinfectiegraad minstens 99.3 tot 99.7 % was.

Vervolgens is een pilot UF systeem gebouwd, geoptimaliseerd en getest met kaswater bij het ATO (zonder virus). Dit proces is vervolgens getest in een kassituatie zonder gewas waarbij membraanfiltratie vergeleken is met uv desinfectie en langzame zandfiltratie (zie figuur 4.2.1). De desinfectiecapaciteit is in deze testen bepaald met het tomaten mosaic virus (TMV) afkomstig van PRI. Als analysemethode zijn laesies tellingen op bemonsterde glutonisa planten verricht (door PRI).

Voor de pilottesten is een X-flow holle vezel module gebruikt type UFC M5 met MWCO van 150 tot 200 kD, 2 mm vezeldiameter, 0.9 m^2 gemodificeerd polysulfon in een PVC-C behuizing. Het totale membraansysteem exclusief PC vraagt 360 W en levert een schoonwaterdebiet van 10 tot 12 l/uur. De UV installatie bevatte lage druk UVc buizen (Etn. C. Beeckman uit Mechelen (Be)). De gebruikte Philips UV lamp heeft een vermogen van 36 W. Daarnaast is een slangenpomp met een vermogen van 36 W bij een debiet van 3.5 l/uur gebruikt.
De langzame zandfiltratie unit bestond uit een kolom met zandkorrels waar met een slangenpomp (36W) een debiet van 3.5 l/uur (0.2 m/uur) ingesteld kan worden.

Inoculatie van het tomatenmosaicvirus TMV vond bij de UV installatie en bij de langzame zandfiltratie plaats door een 1000 maal verdunde oplossing van TMV reincultuur (4.7 mg/ml) met behulp van een trechter en een slang vlak voor de desinfectie unit aan te brengen. Bij de membraanfiltratie werd 1.2 ml reincultuur in het voorfilter gepipetteerd met een voedingsvolume van 12 liter. De voeding werd eerst 5 minuten drukloos rondgepompt voordat er druk op de module gezet werd waarna de permeaatproductie startte.



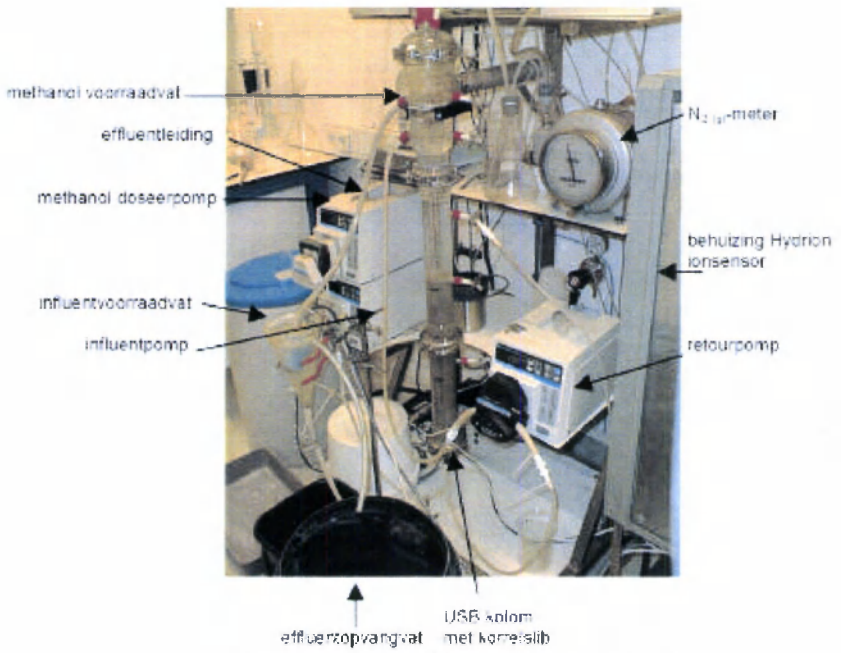
Figuur 4.2.1. Desinfectieapparatuur in de IMAG energiekas met bovenaan de lichtgrijze voedingscontainer. In de PVC buizen zandfilters voor de langzame zandfiltratie. Achter de PVC buizen de UV lampen (zie detail 1). De PVC buizen: ultrafiltratie opstelling met pomp (blauw) en X-flow module (zie detail 2).

Denitrificatie en fosfaatverwijdering

Uit het Hydrion-line I project is gebleken dat de beste optie voor de verwijdering van het nitraat en fosfaat een denitrificerende upflow sludge blanket reactor (USB) is. Het korrelslib zet met behulp van methanol als elektronendonor nitraat om in stikstofgas en slaat fosfaat neer als calciumzout doordat bij denitrificatie loog wordt gevormd dat fosfaatprecipitatie bij een hogere pH bevordert.

De experimenten zijn in het eerste jaar uitgevoerd in een 5.0 l reactor (diameter 10 cm en hoogte 64 cm) gevuld met korrelslib (2.0 kg nat slib, 12% VSS) afkomstig van eerder uitgevoerde denitrificatie experimenten. In de daarop volgende twee jaar is een 2.8 l reactor gebruikt van 5 cm doorsnee, 100 cm hoogte met 1.8 kg nat slib met 11 % VSS. In februari 2002 bevatte de reactor 197 g biomassa en eind december 2002 was dit met 30 % toegenomen tot 256 gr. De hoeveelheid nat slib is ongeveer constant gebleven (7 % afname). De in tabel 4.2.1 beschreven modeloplossing tomaat is tevens gebruikt voor deze experimenten, tenzij anders weergegeven.

Het afvalwater werd uit een voorraadvat de bioreactor ingepompt eventueel in combinatie met recirculatie van het effluent. De reactorverblijftijd varieerde van 1 tot 7 uur. Nitraat, fosfaat, nitriet en COD zijn regelmatig gemeten in zowel het voorraadvat als in het effluent met behulp van Dr. Lange cuvetten testen. Daarnaast is de gasopbrengst (stikstof) continu bepaald met een gasmeter. Een deel van het effluent werd als recyclestroom gebruikt. Het debiet van de recyclestroom varieerde van 300 ml tot 9 liter per uur. Tijdens de continu experimenten werd het influent door de reactor geleid en het effluent werd apart opgevangen.



Figuur 4.2.2. Opstelling 2.8 liter USB reactor

Vanwege het in de literatuur vermelde positieve effect van roeren op de denitrificatie (Klapwijk et al., 1979) waarbij gevormd stikstofgas uit het slibbed wordt geroerd, is dit allereerst onderzocht. In plaats van een roerder is al snel gebruik gemaakt van een hoge effluent retourflow. Zowel met als zonder roeren van de 5 liter reactor was de maximale nitraatverwijderingscapaciteit gelijk (1.3 g-N l^{-1} d^{-1}). Andere onderzochte parameters in de 2.8 liter reactor zijn:

- optimale methanoldosering in verhouding tot nitraatgehalte influent
- robuustheid systeem voor variatie in nitraatinfluent gehalte middels stapresponsmetingen
- optimale opstroomsnelheid
- capaciteitsbepaling van het reactorbed

Resultaten

De scenarioberekeningen lieten zien dat het voorlopig nog niet zinvol is om de nadruk te leggen op de selectieve verwijdering van natrium uit recyclewater. Door optimalisatie van de samenstelling van het voedingswater kan een natriumophoping zeer sterk gereduceerd worden. Gecontroleerde spui van maximaal 5 % van het voedingsvolume is daarnaast economisch het meest rendabele en eenvoudige proces om overtollige nutriënten te verwijderen uit het kaswater. Plantenpathogenen en overtollige gewasbeschermingsmiddelen kunnen zich bij langdurig waterhergebruik ophopen in het kaswater. Om dit water te kunnen blijven gebruiken is desinfectie van het recyclewater nodig.

Desinfectie recyclewater

Na systeemoptimalisatie van de membraanfiltratie is de pilot unit verhuisd naar de IMAG energiekas. Daar zijn parallel aan elkaar met dezelfde voedingsoplossing, temperatuur e.d. in totaal 6 experimenten uitgevoerd (een duplo met elke techniek). Op bepaalde tijdstippen zijn monsters genomen en het bijbehorende aantal getelde laesies (vlekjes) zijn weergegeven in tabel 4.2.4. Het aantal ingesmeerde bladeren is weergegeven (n= x). Een voorbeeld van een glutinosa plantje met laesies (witte vlekken) en een overzicht van alle geïnfecteerde planten zijn te zien in figuur 4.2.3.

Tabel 4.2.4. Desinfectiegraad als functie van behandelde hoeveelheid water en techniek.

Behandeld	Langzame zandfiltratie			UV desinfectie			Ultrafiltratie		
water [liter]	Laesies telling		Log reductie	Laesies telling		Log reductie	Laesies telling		Log reductie
5	0	n = 6	[1]	1 tot 3	n = 12	log 2	0	n = 6	> log 3
10	0	n = 12	[1]	1 tot 3	n = 12	log 2	0	n = 12	> log 3
15	1	n = 12	log 2	n.b.			0	n = 6	> log 3
20	0	n = 12	>log 3	n.b.			0	n = 12	> log 3
25	1	n = 6	log 2	n.b.			0	n = 6	> log 3
30	0	n = 6	[1]	n.b.			n.b.		

[1] Bij langzame zandfiltratie is er een lange aanlooptijd, eerst moet er 10 liter water afgevoerd worden voordat een eventuele virusdoorslag gemeten kan worden.

n.b. = niet bepaald





Figuur 4.2.3a. Glutinosa plant vol laesies (witte vlekken). 4.2.3b. Overzicht geïnfecteerde glutinosa planten

Uit de uitgevoerde experimenten blijkt dat ultrafiltratie het best in staat om het TMV gedurende langere tijd uit het water te verwijderen. De lage desinfectiecapaciteit van UV is opmerkelijk, deze is zelfs lager dan de capaciteit van een zandfilter! Bij UV en zandfiltratie is het 1000 maal verdunde virus in één plug van 1 liter toegediend. Bij de ultrafiltratie is het 1000 maal verdunde virus continu rondgepompt waardoor de contacttijd tussen virus en grenslaag groter was dan bij UV en zandfiltratie. Bij alle drie geteste technieken is het behandelde water direct afgevoerd.
De log 2 en log 3 reducties zijn niet hoog, veelal wordt in termen van log 4 tot log 6 reducties gesproken. In dit experiment zijn echter de gebruikte virusconcentratie en de detectiegrens van $4 * 10^{-6}$ mg TMV/ml de beperkende factor geweest. De verwachting was dat een lagere virusconcentratie nog aantoonbaar was geweest. Toch kan op basis van de uitgevoerde experimenten gesteld worden dat voor ultrafiltratie log 4 tot log 6 reducties voor TMV haalbaar zijn, voor langzame zandfiltratie en UV desinfectie niet.
Technische gezien zijn langzame zandfiltratie en UV eenvoudiger en hierdoor goedkoper. De energieconsumptie voor de desinfectie van één liter water zijn in tabel 4.2.5 weergegeven.

Tabel 4.2.5. Overzicht energie- en investeringskosten van drie desinfectietechnieken

Desinfectietechniek	Watt per liter	Raming investeringskosten
Langzame zandfiltratie	10	Zandfilterinstallatie 10 tot 23 k□ [1]
UV desinfectie	20	Lage druk UV installatie 20 tot 46 k□ [1]
Ultrafiltratie	30	10 tot 27 k□ voor de desinfectie van 10 tot 200 m^3/dag[2]

[1] Bron: Kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw 2000 – 2001, J.P. Bakker / S.C. van Woerden

[2] Extrapolatie van gegevens m.b.t. RO installatie zoals voorkomend in [1]

Denitrificatie en fosfaatverwijdering

De theoretisch benodigde hoeveelheid voor denitrificatie is gelijk aan 3 gram methanol per gram N-NO_3 oftewel 0.69 gr methanol per gram nitraat. Tijdens de eerste experimenten is een kleine

overdosering gehanteerd om een maximale nitraatverwijdering te krijgen. De belangrijkste resultaten zijn weergegeven in tabel 4.2.6.

Tabel 4.2.6. Verwijderingsrendementen van $N\text{-}NO_3$, $P\text{-}PO_4$ en COD bij diverse USB reactor experimenten.

Omschrijving experiment	Opstroom snelheid [$m.u^{-1}$]	$N\text{-}NO_3$ [1] verwijdering [%]	$P\text{-}PO_4$ [1] verwijdering [%]	COD [1] verwijdering [%]
Staprespons (snelheid systeem): 2.5 g $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$; voeding 7.2 $L.dag^{-1}$; ratio retour / voeding 30				
1.5 g MeOH.per g $N\text{-}NO_3$	4.7	35	85	> 97.8
3 g MeOH.per g $N\text{-}NO_3$	4.7	77	85	> 98.6
Halvering nitraatdosering: voeding 7.2 $L.dag^{-1}$; 3 g MeOH per g $N\text{-}NO_3$; ratio retour / voeding 18				
1.3 g $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$	4.7	99.9	n.b.	n.b.
Variatie opstroomsnelheid: 2.5 g $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$; voeding 7.2 $L.dag^{-1}$; 3 g MeOH.per g $N\text{-}NO_3$				
Ratio retour / voeding 1	0.3	95.7	93.1	98.5
Ratio retour / voeding 10	1.7	90.0	90.9	99.0
Ratio retour / voeding 30	4.7	94.9	93.1	97.0
Reactorbedcapaciteit: voeding 0.35 g $N\text{-}NO_3.L^{-1}$;3 g MeOH per g $N\text{-}NO_3$; ratio retour / voeding 1				
2.5 g $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$	0.3	> 99.3	n.b.	n.b.
5.0 g $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$	0.6	> 98.9	n.b.	n.b.
10.1 g $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$	1.2	> 98.2	n.b.	n.b.
20.2 g $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$	2.4	71.7	97.3	80
Kaswater: voeding 7.2 $L.dag^{-1}$; 3 g MeOH per g $N\text{-}NO_3$; ratio retour / voeding 1				
2.6 g $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$	0.3	99.99	82.5	97.6

[1] $N\text{-}NO_3$ is gemeten m.b.v. Hydrion sensor, $P\text{-}PO_4$ en COD middels Dr. Lange testen

n.b. = niet bepaald

De robuustheid van het systeem voor variatie in het nitraatinfluent gehalte is bepaald door [a] de methanoldosering te halveren bij constante nitraatdosering. Daarnaast is [b] de invloed van een halvering van de nitraatdosering bij constante methanoldosering bepaald. Bij een halvering van de methanoldosering heeft de reactor een dag reactietijd d.w.z. na één dag is een verlaging van het denitrificatie percentage te zien. De snelheid waarmee een verdubbeling van de methanoldosering verwerkt wordt is veel hoger, na 4 uur is de denitrificatie weer op het oorspronkelijke niveau.

Een halvering van de nitraatdosering resulteert in een verhoging van het verwijderingspercentage (99.9 % t.o.v. 94.9%) zelfs bij een relatief hoge opstroomsnelheid van 4.7 $m.u^{-1}$ als gevolg van het gebruik van een hoge retourflow.

Tijdens de Hydrion metingen van drainwater in de IMAG kas van 10 augustus tot en met 3 september 2002 varieerde het nitraatgehalte van 150 tot 300 mg $N\text{-}NO_3$ per liter. Het effect van deze variatie is klein als gekeken wordt naar het nitraatgehalte in het effluent. Daarom is besloten om gebruik te maken van een eenvoudige constante methanoldosering in plaats van een procesgeïntegreerde regeling. Als in de praktijk naar verhouding te weinig methanol gedoseerd wordt, dan blijft de denitrificatie toch nog een dag op gang. Een dagelijkse controle bij wisseling in de groei en / of bij plantenziekten is in de praktijk voldoende om nitraatlozingen te voorkomen. Bij constante teeltomstandigheden is een wekelijkse controle mogelijk al afdoende.

Er zijn diverse duurexperimenten uitgevoerd met opstroomsnelheden variërend van 0.3 $m.u^{-1}$ tot 52 $m.u^{-1}$. Boven de 2.5 $m.u^{-1}$ begint bij een belasting van 20 g $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$ biomassa uitspoeling plaats te vinden. Bij een 10 x zo lage belasting is dit effect niet bij een opstroomsnelheid van 4.7 $m.u^{-1}$ waar te nemen. Dit komt omdat bij een lage belasting de reactorcapaciteit verre van volledig benut wordt. Wanneer de opstroomsnelheid verlaagd wordt tot 0.3 $m.u^{-1}$ dan heeft dit een positief effect op de denitrificatie en kan de capaciteit van het reactorbed beter benut worden. De belasting van het bed vindt dan meer plaats richting een plugflow en minder als een ideaal gemengde reactor. De retourflow dient gelijk te zijn aan de influentflow, zodat de capaciteit van het bed optimaal benut wordt en het gevormde stikstofgas toch goed afgevoerd kan worden.

Als in het effluent maximaal 5.6 $mg.l^{-1}$ $N\text{-}NO_3$ aanwezig mag zijn en de concentratie in het influent varieert van 150 $mg.l^{-1}$ tot 450 $mg.l^{-1}$, dan blijkt uit de capaciteitsbepaling in combinatie met het benodigd verwijderingspercentage dat met de 2.8 liter USB reactor maximaal 10 g $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$ afgebroken kan worden. Extrapolatie van de huidige gegevens laat zien dat voor de zuivering van 50 $m^3.dag.ha^{-1}$ drainwater met 300 mg $N\text{-}NO_3.l^{-1}$ (15 kg $N\text{-}NO_3.dag^{-1}$) een reactor van 4 m^3 nodig is. De reactorverblijftijd bedraagt in een dergelijk systeem 2 uur en is hiermee korter dan in vergelijkbare waterzuiveringssystemen waarbij verblijftijden van 4 tot 8 uur normaal zijn. Het grote voordeel van een korte verblijftijd is dat een dergelijke reactor minder ruimte vraagt. De reactorbelasting kan mogelijk verhoogd worden (en de benodigde ruimte per m^3 schoon water verlaagd) door de vorm van de USB reactor te optimaliseren. Dit kan gedaan worden door verbreding en / of verlaging van het reactorbed, met een vernauwing om bij de effluentafvoer biomassauitspoeling te verminderen.

Het gebruikte kaswater is drainwater afkomstig uit de IMAG energiekas waar door o.a. PRI additionele experimenten met nutriëntdosering aan tomaten uitgevoerd zijn (monsterdatum 2 december 2002). Dit kaswater dat gedurende 8 dagen aangevoerd is naar de USB reactor bevatte 355 $mg.l^{-1}$ $N\text{-}NO_3$, 9.7 $mg.l^{-1}$ $P\text{-}PO_4$,0.87 $mg.l^{-1}$ $N\text{-}NO_2$ en had een COD gehalte van 1731 mg $O_2.l^{-1}$. Reiniging van dit water met de USB reactor resulteerde in 99.99 % $N\text{-}NO_3$ verwijdering, 82.5 % $P\text{-}PO_4$ verwijdering, > 98.7 % $N\text{-}NO_2$ verwijdering en 97.6 % COD verwijdering. De absolute gehalten in het effluent zijn in tabel 4.2.7 te vinden evenals de drinkwaternormen van enkele componenten.

Tabel 4.2.7. Effluent samenstelling bij toevoer reëel kasdrainwater en drinkwaternormen voor nitraat, nitriet, fosfaat en COD.

	USB effluent	Nederlandse drinkwaternorm
Nitraat $N\text{-}NO_3$	< 0.018 mg/l	< 11 mg$N\text{-}NO_3$/l (EU < 5.6 mg/l)
Nitriet $N\text{-}NO_2$	< 0.011 mg/l	< 0.06 mg/l
Fosfaat $P\text{-}PO_4$	1.7 mg/l	< 1 mg/l
COD	42 mg O_2/l	regio afhankelijk

De nitraat en nitriet drinkwaternormen worden ruimschoots gehaald, de fosfaatnorm bijna. De lozingsnormen, die elke waterbeheerder apart opstelt, zullen hoger liggen. Het COD gehalte in het effluent is laag en zal naar verwachting geen problemen opleveren met een waterbeheerder. De fosfaatverwijdering voldoet nog niet aan de drinkwaternorm. Er is slechts één experiment uitgevoerd waarbij het effluent minder dan 1 mg $P\text{-}PO_4.l^{-1}$ bevatte. Een verwijderingspercentage van 85 tot 90 % is haalbaar met dit systeem. Om meer fosfaat als calciumfosfaat neer te laten slaan (verhogen verwijderingsrendement) zijn er aanwijzingen dat een korte verblijftijd hiervoor noodzakelijk is. Voor een goede denitrificatie is echter een relatief lange verblijftijd gewenst omdat dit een biologisch proces is. Uit de experimenten is ook gebleken dat als het fosfaatverwijderingspercentage verlaagd wordt, dit veroorzaakt kan worden doordat zowel biomassa als calciumfosfaat uitspoelt als gevolg van een te hoog debiet.

De methanoldosering kan naar verwachting met reëel kasdrainwater verlaagd worden door de aanwezigheid van organische componenten die ook als electronendonor dienst kunnen doen. Dit principe wordt in reeds bestaande USB systemen toegepast (o.a. in de afvalwaterzuivering van de

suikerindustrie en aardappelverwende industrie: zie www.uasb.org). Positief effect van de verlaging van de methanoldosering is verlaging van de exploitatiekosten.

Het overtollige slib van UASB reactoren wordt op dit moment nog steeds verkocht omdat de vraag ernaar bij nieuwe reactoren groter is dan het aanbod. Het is aan te bevelen om een kleine hoeveelheid achter te houden in geval van calamiteiten. Het slib is zeer stabiel en wordt bij verse toevoer van voedingsstoffen weer actief. Dit specifieke slib bevat calciumfosfaat en biomassa en kan mogelijk als meststof voor tuinborders gebruikt worden. Het is op dit moment niet duidelijk wat de eigenschappen van het korrelslib zijn als er in het voedingswater overtollige gewasbeschermingsmiddelen en plantenhormonen zitten.

Conclusies

Er zijn binnen het Hydrion line II deelproject waterzuivering twee goed functionerende waterzuiveringssystemen ontwikkeld. Selectief ingrijpen in de ionenbalans is vanuit technologisch en economisch perspectief op de korte en middellange termijn niet haalbaar. Als aan de voedingszijde de huidige overdosering verminderd kan worden, dan is een selectief ingrijpen in het drain- of recyclewater niet nodig.

Desinfectie van recyclewater is zeker bij recycling nodig. Membraantechnologie en ultrafiltratie in het bijzonder is een geschikte techniek gebleken waarmee virussen verwijderd kunnen worden. De desinfectiecapaciteit van een ultrafiltratiesysteem (log4 tot log6) is hoger dan van een langzame zandfiltratie (log2) en van UV desinfectie bij 250 $mJ.cm^{-2}$ (log2). De energiekosten van een ultrafiltratie zijn hoger doordat een pomp met een grotere capaciteit nodig is. De investeringskosten van ultrafiltratie zijn op dit moment nog slechts weinig hoger dan die van lage druk UV. De potentiële mogelijkheden van membraantechnologie zijn groot doordat bij gebruik van dichtere ultrafiltratiemembranen ook kleinere moleculen zoals gewasbeschermingsmiddelen en plantenhormonen verwijderd kunnen worden. In verder onderzoek dient de aandacht gericht te worden op de kwaliteit van het recyclewater als functie van de waterbehandelingstechniek, waarbij naast bacteriën en virussen ook andere ophopende componenten gemonitored dienen te worden.

Met behulp van een USB reactor is stabiele biologische denitrificatie en fosfaatverwijdering middels precipitatie uit kasdrainwater technologisch mogelijk gebleken met een rendement van 99 resp. 85 % bij gebruik van een constante methanol- of COD dosering. Het behandelde water voldoet qua nitraat en nitriet gehalte aan de drinkwaternorm, zelfs bij een dagvariatie van de $N\text{-}NO_3$ influent concentratie van 300 $\pm$ 150 $mg.l^{-1}$. Er zijn aanwijzingen dat bij een verlaging van het denitrificatiepercentage het percentage verwijderd fosfaat verhoogd wordt, zodat deze dan ook aan de drinkwaternorm voldoet. Om tot een grootschalige economisch haalbare kastoepassing te komen, is een aanpassing in de vorm van de USB reactor nodig zodat een reactor ontstaat met een grotere omzettingscapaciteit bij gebruik van dezelfde hoeveelheid korrelslib. Als de hoeveelheid korrelslib te groot wordt, dan kan dit mogelijk als bodemmeststof afgezet worden. Verkoop van korrelslib voor het opstarten van nieuwe bioreactoren is op dit moment de gebruikelijke weg. Het gereinigde water kan ofwel hergebruikt worden of geloosd worden op het oppervlaktewater.

Het onderzoek heeft fysiek de volgende twee producten opgeleverd:

- Mobiele USB reactor voor biologische denitrificatie en fosfaatprecipitatie van recyclewater gekoppeld aan Hydrion sensor
- Mobiel, geautomatiseerd membraanfiltratiesysteem voor desinfectie van recyclewater

Een additioneel resultaat met positieve ecologische effecten is het feit dat door optimalisatie c.q. verlaging van nutriëntdosering aan de voedingszijde een end-of-pipe-techniek voor hergebruik van drainwater economisch voorlopig niet noodzakelijk is. Voorkomen is nog steeds beter dan bestrijden.

Literatuur

Klapwijk A., Jol C. and Donker H.J.G.W. (1979). The aplication of an upflow reactor in the denitrification step of biological sewage purification. Water Research 13:1009-1015.

Lesjean B., Gnirrs, R. and Adam, C.. Process configurations adapted to membrane bioreactors for enhanced biological phosphorous and nitrogen removal; Desalination 149 (2002) 217-224.

Publieke informatie over UASB reactoren, producenten en dergelijke: www.uasb.org

Tarre S, Moshe A. and Green M. (2000). Denitrification of greenhouse leachates in an upflow sludge blanket reactor. Water Science and Technology 41(12), 95-100.

Schroot, J.H. 2000. Membraantechnologie voor het sluiten van de kaswaterkringloop; deskstudie. Intern ATO rapport, december 2000.

Schroot, J.H. 2001. Membraanscreening ten behoeve van Hydrion II. Intern ATO rapport, juni 2001.

Schroot, J.H. 2001. Waterscenario's in de glastuinbouw. Intern ATO rapport, november 2001.

Schroot, J.H. 2002. Desinfectie tomatendrainwater middels membraanfiltratie. Intern ATO rapport, januari 2002.

4.3 Deelproject Nutriëntendosering

Deelnemende partijen

HortiMaX, IMAG, WU-MRS, Hydrion.

Summary

This sub project involved the development of a dosing unit which adds liquid fertilisers to the supply water of the greenhouse. The nutrient mix is determined by the nutrient need as determined by the plant model and by the measured ion concentrations of the drain water that is recycled for the use in supply water.

Samenvatting

In dit deelproject is een doseerunit ontwikkeld die de verschillende nutriënten aan het voedingswater toedient. De samenstelling van de nutriënten-mix wordt bepaald door de nutriënten behoefte van de plant (uit het plant model) en de ion-analyse van het drainwater dat gerecirculeerd wordt voor hergebruik in het voedingswater.

	Status	Datum	
Omschrijving deliverable	(% gereed)	**Start**	**Oplevering**
Integratie van doseerunit in procesautomatisering	100	Jan 2000	Dec 2000
Ontwikkeling van interface met ionselectieve sensor module	90	Jun 2002	Aug 2002
Ontwikkeling van regelalgoritmen voor aanpassing nutriëntendosering op basis van on-line analyse van recirculatiewater	90	Jan 2000	Jul 2002
Bouwen van testopstelling met doseerunit, substraat computers en ionselectieve sensor module	100	Feb 2001	Okt 2001
Aanpassing PLC software	100	Juli 2001	Feb 2002
Testen van nutriëntendosering met terugkoppeling van on-line drain analyse	100	Aug 2002	Dec 2002
Ontwikkeling van interface met groeimodellen voor bepaling nutriëntenbehoefte	90	Jan 2002	Jul 2002
Ontwikkeling van regelalgoritmen voor aanpassing nutriëntendosering op basis van output groeimodellen	90	Jan 2000	Jul 2002
Testen interface groeimodellen en nutriëntendoseerunit	100	Aug 2002	Sep 2002
Implementatie van regelalgoritmen in nieuw platform voor totaal geïntegreerde procesautomatisering	0	-	-

Inleiding

De nutriëntendosering vindt in de huidige praktijk plaats op basis van vaste recepten van de verschillende meststoffen. Deze recepten bepalen de verhouding van de verschillende nutriënten in het voedingswater. De totale hoeveelheid meststoffen (met de vaste 'recept' samenstelling) wordt geregeld op basis van de EC (elektrische geleidbaarheid) en pH. Voedingswater met een bepaalde recept samenstelling wordt gemend met 'vers' water om zo tot de gewenste EC te komen. De pH wordt met een specifiek nutriënt afgeregeld tot de gewenste waarde. Als er sprake is van recirculatie van het drainwater, waarbij naast 'vers' water ook drainwater gebruikt wordt voor voedingswater, moet rekening gehouden worden met de ion-samenstelling van dit drainwater. Dit gebeurt in de huidige praktijk door ongeveer eenmaal per twee weken de ion-samenstelling van het drainwater via een

laboratorium analyse te laten vast stellen. Op basis van deze analyse worden de nutriënten recepten handmatig aangepast.
De doelstelling van het gehele project is om een gesloten teeltsysteem te ontwikkelen waarbij de nutriënten dosering continu geregeld wordt op basis van de nutriënten behoefte (komend uit het planten model) en de on-line analyse van het drain water. Dit betekent dat de samenstelling van het voedingswater continu aangepast moet kunnen worden en er dus niet meer via 'vaste' recepten gewerkt kan worden. Dit stelt dus specifieke eisen aan de nutriënten doseerunit. Het project is een voortzetting van EET project EETK96083 waarin een eerste prototype van een nieuwe doseerunit ontwikkeld is. Dit prototype werkt nog stand-alone volgens het huidige doseerconcept (met vaste recepten). In dit vervolgproject zal deze doseer unit volledig worden geïntegreerd in de totale procesautomatisering. Hiervoor is een koppeling nodig met de ionselectieve sensor module en de groeimodellen die in andere deelprojecten ontwikkeld worden. Voor deze koppelingen zullen diverse nieuwe regelalgoritmen ontwikkeld worden.

Resultaten

Test opstelling IMAG kas:

In december 2000 is de testopstelling in de IMAG kas opgebouwd. Deze opstelling bestaat uit een doseerunit voor vloeibare meststoffen, een irrigatieunit en een management software systeem waarmee beide units geïntegreerd bestuurd kunnen worden. Het management software pakket heeft ook dataopslag en dataverwerkingsfunctionaliteit.

De opstelling is in Februari voor het eerst in gebruik genomen waarbij technische problemen geconstateerd zijn die tot vertraging hebben geleid van de eerste experimenten. Deze problemen werden voornamelijk veroorzaakt door het feit dat de doseerunit 'geschaald' is voor de relatief kleine hoeveelheden te doseren nutriënten. Daarnaast bleek dat de experimenten die gepland waren in de tweede helft van 2001 (bepalen van de karakteristiek van het substraat) andere en zwaardere eisen stelden aan de apparatuur dan uit een gebruik volgens de tuinderpraktijk zou volgen. Voor deze proeven waren met name twee zaken van belang die in eerste instantie niet realiseerbaar bleken:

- de lengte van de tests (tot een week continu dosering) vereiste een langdurige dosering zonder alarmen, waarbij kleine afwijkingen van het te doseren nutriëntenrecept minder belangrijk werden geacht dan continuïteit van de dosering (tuinders willen juist bij de kleinst mogelijke afwijking al een alarm, hetgeen leidt tot onderbreking van de dosering)
- De EC diende bij deze tests snel te wisselen (EC-pulsen). Bij gebruik van een mengbak, zoals in de testopstelling, was deze EC-toename of afname niet snel genoeg te realiseren.

De bovenstaande afwegingen hebben in de tweede helft van 2001 geleid tot een aantal aanpassingen aan de unit, waardoor de tests vanaf half 2002 doorgang hebben kunnen vinden.

Koppeling met regelalgoritme voor aanpassing recept

In eerste instantie waren we uitgegaan van het gebruik van een meststoffen berekeningsprogramma van een van de meststoffen leveranciers voor het berekenen van de benodigde veranderingen aan het meststoffen recept op basis van de ion-analyse van het drain water. We zijn echter tot de conclusie gekomen dat dit tot technische problemen kan leiden die in een later stadium niet beheersbaar zijn. Er is daarom besloten om de functionaliteit van het berekenen van het nieuwe recept zelf te implementeren. Omdat de analyse die op dit moment gedaan kan worden beperkt is (niet alle ionen kunnen al gemeten worden), kunnen we de meststoffen berekening hieraan aanpassen. Om de meststoffenberekenings-module te kunnen koppelen met de doseerunit moet er als het ware een 'virtuele' gebruiker gedefinieerd worden die het mogelijk maakt om de recepten aan te passen. De voorzieningen die hiervoor gemaakt moeten worden in de database van het systeem zijn inmiddels gereed. Er is tevens een specificatie opgesteld en met betrokkenen (deelproject 8) besproken van het

data-interface met de doseerunit om de doseerunit via het 'standaard' automatiseringssysteem in de IMAG kas gedeeltelijk te kunnen aansturen.

In de tweede helft van 2001 is de hierboven geschetste 'nutriëntenmodule' ontworpen, geïnstalleerd in de IMAG-kas en vrij uitgebreid getest. Het is hiermee nu mogelijk om een gewenste nutriëntensamenstelling, alsmede gietbeurtkarakteristieken als grootte van de gietbeurt, tijdstip van de gietbeurt en dergelijke, online aan de doseercomputer door te geven. Deze vertaalt deze data dan naar een recept van verschillende meststoffen, waarmee de gewenste nutriëntensamenstelling van het gietwater zo goed mogelijk benaderd wordt.

De input voor de nutriëntenmodule (gewenste nutriëntensamenstellling, grootte van de gietbeurt, etc.) zal automatisch worden gegeven door het 'standaard' automatiseringssysteem van het IMAG, dat deze data zal moeten bepalen aan de hand van de gemeten drainhoeveelheid en samenstelling. De hiervoor benodigde regelalgortimes zijn in de eerste helft van januari 2002 geïmplementeerd.

Koppeling met sensor module

In de tweede helft van 2002 is er een interface gedefinieerd en opgeleverd tussen de sensor module (Hydrion-Line) en het IMAG computersysteem. Hiermee is alle softwarefunctionaliteit beschikbaar gekomen die benodigd is voor het online aanpassen van water- en nutriëntengift op basis van gemeten drainhoeveelheid en samenstelling.

Ontwikkeling van regelalgoritmen

Er is in het kader van deelproject 8 in het eerste halfjaar van 2002 veel gediscussieerd over hoe de nutriëntendosering geregeld zou moeten worden. Een definitief resultaat van deze besprekingen is in de tweede helft van 2002 gedefinieerd. Het systeem heeft diverse regellagen gekregen:

- Op het laagste niveau wordt een 'basale' regeling gemaakt (IMAG) die als doel heeft de drainhoeveelheid en nutrëntenhoeveelheid in de drain te regelen door de water- en nutriëntengift aan te passen;
- Eén niveau hoger wordt een plantmodel (PRI) gebruikt om de setpoints voor de optimale water- en nutriëntengift te bepalen. Dit telkens voor enkele dagen vooruit.
- Op het hoogste niveau wordt het plantmodel voortdurend op de hoogte gehouden van de gewasstaat doordat met plantsensoren essentiële plantparameters gemeten worden en worden doorgekoppeld aan het plantmodel.

Conclusies

Vergelijkt men de resultaten met de planning, dan valt op dat verreweg het grootste deel van de milestones is gehaald – soms wat eerder dan gepland en soms wat later.

Een aantal milestones zijn nog niet helemaal gehaald – het gaat hier met name om de ontwikkeling van interfaces en regelalgoritmes. Dit moet niet worden geïnterpreteerd als zijnde dat deze regelalgoritmen nog niet volledig zijn ontwikkeld – dat zijn ze wel en tevens zijn ze uitgetest in de proof of principle experimenten. De reden dat bij deze milestones 90% realisatie is ingevuld, is, de wijze waarop ze zijn geïmplementeerd in een test opstelling. Omdat het een test opstelling betreft is minder aandacht is besteed aan 'veiligheden' die voor commerciële tuinders zeer belangrijk zijn (zoals alarmeringen bij storingen) terwijl in plaats daarvan is gefocused op het 'aan de gang krijgen' van het systeem.

Voor het daadwerkelijk inzetten van de regelalgoritmen en interfaces in de commerciële tuinbouw dient aan het aspect van de veiligheid dan ook nog veel aandacht te worden besteed. Eén aspect daarvan dat nog niet is geïmplementeerd en dat met name voor dit deelproject van belang is, is het inbouwen van chemische en fysische evenwichten in de doseeralgoritmes, m.a.w. indien de nutrientenmodule

gevraagd wordt om vloeibare meststoffen te doseren in concentraties die leiden tot het uitkristalliseren van vaste stoffen, zal deze dit doen. Dit is voor een testopstelling, die door hoog-opgeleiden wordt bediend, aanvaardbaar, maar zal in de commerciele tuinbouw niet acceptabel zijn.

Bij het maken van de afwegingen m.b.t. wat wel en niet moest worden ingebouwd binnen dit project is met name gefocused op wat minimaal nodig was om tijdens het proof-of-principle experiment wetenschappelijk te onderbouwen resultaten te behalen en minder op de directe practische inzetbaarheid van de algoritmes. Immers, de resultaten van de proof of principle zullen mede bepalen of er uit dit project commercieel interessante producten voortvloeien. In dat licht moet ook beschouwd worden dat de laatste milestone, de volledige implementatie op het nieuwe hardwareplatform (komende uit deelproject 9) nog niet is ingezet.

Concluderend kan gezegd worden dat het 'eindproduct' van het deelproject nutrientendosering, namelijk de nutrientendoseerunit, de interfaces tussen de diverse apparatuur en de regelalgoritmes die nodig waren voor online aanpassing van de nutrientengift, tijdens het proof of principle experiment zonder noemenswaardige problemen hebben gedraaid.

4.4 Deelproject Substraatfysica

Deelnemende partijen

Alterra, IMAG, Plant Research International, WU-MRS

Summary

In sub-project 4 'Substrate Physics' a simulation model for describing water movement, solute transport and root uptake was made suitable for a rockwool growing system. Via a synchronization layer the existing substrate model and the existing (tomato) plant growth model were linked and adapted for implementation in a model based control system in sub-project 8. The combined Plant/substrate model was succesfully tested during the Proof of Principle.

Samenvatting

Deelproject 4 'Substraatfysica' betreft de ontwikkeling en het toepasbaar maken van een simulatiemodel voor waterbeweging, stoffentransport en wortelopname in een steenwol teeltsysteem. Het model is geschikt gemaakt voor communicatie met het plantgroeimodel en het gecombineerde plant/substraatmodel, geinplementeerd in een modelgebaseerde regeling (deelproject 8) en succesvol getest in het Proof of Principle experiment.

Deliverables

	Omschrijving deliverable	Status (% gereed)	Datum Start	Datum Oplevering
1.	Gekoppeld substraat-plant-model	100%	jan 2002	jun 2002
2.	Toepasbaar maken substraatmodel	100%	jan 2000	dec 2002
3.	Fysisch-chemische eigenschappen substraat	100%	jan 2000	dec 2001
	- waterretentiekarakteristiek nieuwe en gebruikte mat			
4.	- dispersielengtes			
5.	Wortelverdeling in substraat in relatie tot fertigatie en gewasgroeisnelheid. Eventueel verfijnde beschrijving wortelgroei en wortelverdeling	100%	jan 2001	jun 2002
6.	Scenario's voor verschillende fertigatiestrategieën	75%	jan 2000	dec 2002
7.	Verificatie model en meest perspectiefvolle fertigatiestrategie	20%	jan 2002	-
	Gepland voor vierde jaar: niet uitgevoerd omdat vierde jaar niet is uitgevoerd; echter, deels toegepast in nieuwe deliverable 7			
8.	Modelgebaseerde regeling, 'proof-of-principle'	100%	jan 2002	dec 2002

Inleiding

In een (gesloten) teeltsysteem in de glastuinbouw zijn zeer veel processen aan de orde. Vele van die processen kunnen worden beschreven aan de hand van (al dan niet eenvoudige) simulatiemodellen (bijvoorbeeld, klimaat, gewasgroei). Voor de voeding en wateropname (transpiratie) worden water en voedingsstoffen aan de wortelzone (substraat of grond) toegediend. Het toegediende water met voedingsstoffen zal zich herverdelen in de wortelzone, en zal naar de plantenwortels moeten worden getransporteerd alvorens daadwerkelijke opname gerealiseerd kan worden. Eventuele overmaat aan

water en nutriënten zal via de drain (of grondwater) worden afgevoerd. Ook deze processen kunnen in een numeriek simulatiemodel worden beschreven.

Het doel van deelproject 4 "Substraatfysica" is om een bestaand transportmodel (Heinen, 1997, 2001; Heinen and de Willigen, 1998, 2001; de Willigen and Heinen, 1998) in te zetten in het project Hydrion-Line II: verder ontwikkelen en toepasbaar maken. Dit model beschrijft de waterbeweging, het stoffentransport en de wortelopname van water en nutriënten in de wortelzone (substraat, grond). Het simulatiemodel, gekoppeld aan een gewasgroeimodel, wordt gebruikt bij de ontwikkeling van een meet- en regelsysteem (technische doelstelling), van fertigatiestrategieën met het oog op minimalisering van emissie van water en nutriënten (ecologische doelstelling) en optimaal gebruik van water en meststoffen en optimaal gebruik van productie en productkwaliteit (economische doelstelling).

Materiaal en methode

Uitgangspunt van deelproject 4 "Substraatfysica" was een bestaand simulatiemodel welke de waterbeweging, het stoffentransport en de wortelopname van water en nutriënten in de wortelzone (substraat, grond) beschrijft (Heinen, 1997, 2001; Heinen and de Willigen, 1998, 2001; de Willigen and Heinen, 1998). In het vervolg wordt dit simulatiemodel 'het substraatmodel' genoemd. Het bestaande substraatmodel beschrijft transport in twee dimensies: één horizontale richting overeenkomend met de lengteas van een substraatmat en de verticale richting.

In deze rapportage is het niet mogelijk om alle resultaten in detail te bespreken. De getoonde resultaten geven een indicatie van de mogelijkheden van het substraatmodel.

Koppeling substraatmodel met gewasgroeimodel

Vanwege de enorme link met het gewas (wortelopname) is het substraatmodel gekoppeld met het gewasgroeimodel uit deelproject 7 (deliverable 1).

Parameterisatie substraatmodel

Bepalend voor de waterbeweging in het substraat zijn de fysische en fysisch-chemische eigenschappen van het substraat (deliverable 3). Voor het substraatmodel zijn hiervoor van belang: de waterretentiekarakteristiek (pF-curve) $\theta(h)$, de doorlatendheidskarakteristiek $K(\theta)$, de longitudinale dispersielengte a_L, en de transversale dispersielengte a_T. De relatie $\theta(h)$ heeft hysterese (Mualem, 1984). De afzonderlijke takken van de relatie $\theta(h)$ worden door de van Genuchten (1980) functie beschreven, en de relatie $K(\theta)$ door de Mualem (1976) relatie, welke is gebaseerd op dezelfde parameters als de van Genuchten functie. De doorlatendheid bij verzadiging is niet apart gemeten, maar er is een waarde uit de literatuur (da Silva *et al.*, 1995) gebruikt. Uitdrogingscurven zijn bepaald met de zandbakmethode (NEN 5787, 1994), en uitdroging plus vernatting zijn bepaald met de hangende waterkolommethode (NEN 5786, 1991). Metingen zijn uitgevoerd aan een nieuwe mat en aan een gebruikte mat. Tevens is ter oriëntatie de Windmethode (NEN 5791, 1995) toegepast om na te gaan of voor steenwol de methode ook geschikt is om gelijktijdig de $\theta(h)$ en $K(\theta)$ relaties vast te stellen.

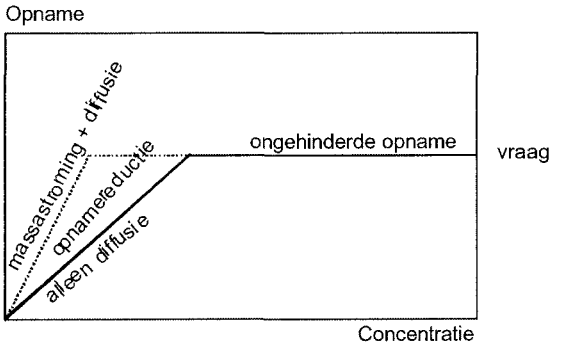
De dispersielengtes zijn bepaald aan de hand van een doorbraakcurve. Via druppelaars werd aan een steenwolmat met constante snelheid schoon water toegediend. Water kon vrij over de hele lengte van de onderkant van de mat draineren. Op het moment dat een stationaire toestand is bereikt (uitstroomsnelheid = instroomsnelheid) is overgeschakeld op een oplossing met een bekende EC. Vervolgens is het drainwater regelmatig bemonsterd en geanalyseerd op EC. Op basis van de gemeten veranderingen in EC in het drainwater zijn de twee dispersielengtes a_L en a_T gecalibreerd door met het substraatmodel het doorbraakexperiment na te bootsen.

Wortelverdeling

Wortelverdelingen (wortellengtedichtheid L_{rv}, aantal cm wortel per volumeeenheid substraat, cm cm^{-3}) op drie tijdstippen in de 1e teelt van 2001 (22 jan – 12 jun) zijn bepaald door PRI (deliverable 4). Een kwart van het bewortelde volume van 3 afzonderlijke planten per tijdstip zijn bepaald. Het steenwol van deze sub-monsters is opgelost in sterk zuur, zodat de lengte van wortels die resteerden eenvoudig kon worden vastgesteld (van Noordwijk en Brouwer, 1978). De gemeten L_{rv} is gebruikt ter calibratie van de wortelgroeimodule in het substraatmodel. Tevens is de initiële L_{rv} verdeling in de aangekochte plantblokjes bepaald, welke als begintoestand bij de parameteroptimalisatie is gebruikt. Omdat het substraatmodel wortelverdeling in 2 dimensies beschrijft zijn de metingen in de y-richting gemiddeld.

Nutriëntenopnamemodel

In het eerste jaar van het project werd vanuit deelproject 6 de vraag gesteld of nutriëntenopname door de plant afhankelijk is van de concentratie in de substraatoplossing, volgens de hypothese zoals weergegeven in Figuur 4.4.1. Bij hoge concentraties zal de opname gelijk zijn aan de vraag. Bij lage concentraties zal minder worden opgenomen dan de vraag. De concentratie waarbij opnamereductie optreedt zal als gevolg van massastroming plus diffusie lager liggen dan in de situatie dat alleen diffusie een rol zou spelen. Een paar voorbeeldberekeningen met het substraatmodel zien hiertoe uitgevoerd om de hypothese te verifiëren.



Figuur 4.4.1. Hypothese opname als functie van concentratie. Zie tekst voor nadere uitleg.

Scenario's voor verschillende fertigatiestrategieën

Met het gekoppelde substraat-plant-model (SPM) kunnen op relatief snelle wijze diverse scenarios doorgerekend worden om te zien of maatregelen bepaalde (verwachtte) effecten vertonen. De planning was dat een dergelijke analyse zou worden uitgevoerd ter voorbereiding op validatie-verificatie fase van Hydrion-Line II project (deliverables 5 en 6), dat stond gepland voor het vierde jaar. Gedurende de looptijd van het project werd duidelijk dat de uitvoering van het vierde jaar zeer onzeker was. Daarom heeft aanpassing van dit onderwerp plaatsgevonden. Enerzijds zijn scenarios bedacht welke in het 'proof-of-principle' experiment met het SPM model elke dag zouden worden geanalyseerd (deliverable 7). Ten tweede zijn resultaten van kleinschalige experimenten nagerekend waarin twee watergeeffrequenties en vijf EC niveaus van de voedingsoplossing werden gebruikt (in samenwerking met deelproject 6). De opnamegegevens van dit laatste experiment zijn met name gebruikt ter calibratie van de water- en nutriëntenopnamemodules in het substraatmodel. Voor een gedetailleerde beschrijving van het experiment zie Heinen *et al.* (2003).

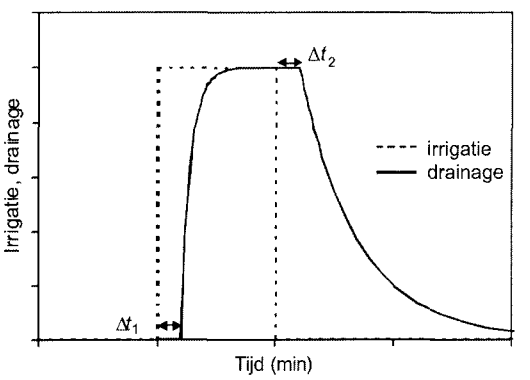
DLL voor modelgebaseerde regeling tijdens 'proof-of-principle'

Voor de integratie van het gekoppelde substraat-plant-model (SPM) in de regeling (deelproject 8) was het gedurende de looptijd van het project noodzakelijk gebleken om SPM model als DLL aan te bieden

met de specifieke eis dat het SPM model een volledige statusbeschrijving naar file kan wegschrijven dan wel inlezen (deliverables 2 en 7). Op die manier is het mogelijk om het SPM model te onderwerpen aan diverse scenarioberekeningen uitgaande van een bekende toestandsbeschrijving van het SPM model, zoals is uitgevoerd in het 'proof-of-principle' experiment (zie uitgebreide beschrijving hierover in deelproject 8). Enkele aanpassingen in het substraatmodel zijn hiervoor nodig gebleken, onder meer met betrekking tot het watergeefregime. Tevens was het wenselijk om de schil waaronder de twee modellen met elkaar gekoppeld waren aan te passen, zodat ook van de schil een volledige statusbeschrijving kon worden vastgelegd.

Het substraatmodel is een rekenintensief model omdat iteratief een niet-lineair probleem moet worden opgelost. Hiertoe wordt het substraat in een aantal rekencellen ingedeeld. Hoe groter het aantal rekencellen, des te groter is de resolutie van de oplossing van de verdeling van water en nutriënten in het substraat. Het aantal cellen moet ook weer niet absurd groot gekozen worden, omdat dan fouten als gevolg van afronding kunnen gaan ontstaan. Te weinig rekencellen betekent te grote numerieke dispersie. Vooraf is niet aan te geven wat de meest optimale hoeveelheid rekencellen moet zijn. Derhalve is voor drie hoeveelheden rekencellen nagegaan wat de verdeling van water en nutriënten na 60 dagen is en wat integrale grootheden zijn. Hieruit kan worden afgeleid of er teruggegaan kan worden in het aantal rekencellen. Er zijn drie scenarios doorgerekend (halve plantafstand, 25 cm): grof: 16 rekencellen; middel: 36 rekencellen; fijn: 140 rekencellen. Het aantal rekencellen van het fijne scenario was tot op heden steeds gebruikt, en geldt derhalve als referentie.

Vanuit deelproject 8 is de vraag naar voren gekomen wat de dynamiek van de drain is. Hiertoe zijn enkele voorbeeldberekeningen met het substraatmodel uitgevoerd, waarbij zeer in detail naar de dynamiek van de drainage is gekeken. In dit rapport worden ter illustratie de dynamiek van water gegeven, en kwalitatief vergeleken met de hypothese uit Figuur 4.4.2.



Figuur 4.4.2. Hypothese drainagedynamiek bij een irrigatiepuls. Zie tekst voor nadere uitleg.

Voor een irrigatiepuls wordt een exponentieel gedrag van de drain verwacht met een vertraging aan het begin (? t_1) en aan het eind (? t_2) van de irrigatiepuls. Dit gedrag wordt gegeven voor een dag met enkele irrigatie-drainage gebeurtenissen, en tevens wordt getoond wat de invloed is van hysterese in de fysische eigenschappen.

Resultaten

Koppeling substraatmodel met gewasgroeimodel

De modellen zijn niet softwarematig geïntegreerd, maar zijn als afzonderlijke modellen gekoppeld onder een bestaande schil (FSE4; Rappoldt, 2003). Op gezette tijden (typisch: elke 15 minuten) wisselen beide modellen onderling informatie uit (Tabel 4.4.1), waarna de modellen een tijdstap doorrekenen.

Tabel 4.4.1. Overzicht informatie uitwisseling tussen substraatmodel en plantmodel.

Van model A naar model B	Informatie
Plantmodel → substraatmodel	cumulatieve straling
	gevraagde wateropname (snelheid)
	drooggewicht wortels
	gevraagde nutriëntenopname (snelheid)
	gewenste verdeling N opname over NO_3 en NH_4
Substraatmodel → plantmodel	schatting actuele wateropname (snelheid)
	schatting actuele nutriëntenopname (snelheid)
	actuele verdeling N opname over NO_3 en NH_4
	gemiddelde EC van de wortelzone

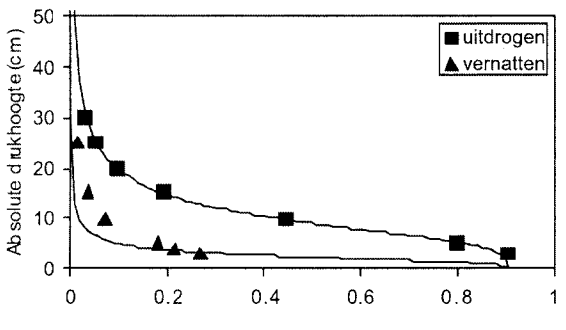
In een later stadium is de bestaande schil vervangen door een vereenvoudigde schil in verband met de wens om een DLL te maken van het gekoppelde substraat-plant-model (zie sectie *"DLL voor modelgebaseerde regeling tijdens 'proof-of-principle'"*). Dit was nodig om er zeker van te zijn dat de volledige toestandsbeschrijving van de schil apart bewaard kan blijven.

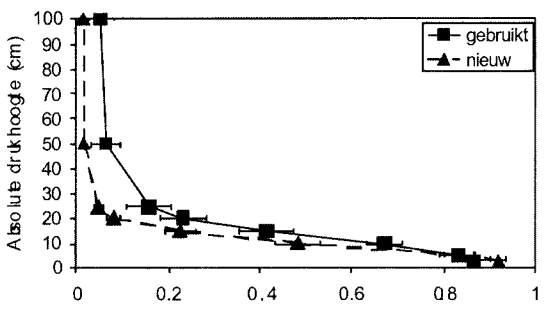
Parameterisatie substraatmodel

De Windmethode bleek niet geschikt voor de simultane meting van de $\theta(h)$ en $K(\theta)$ relaties. De uitdrogingscurven bepaald met de zandbakmethode en de hangende waterkolommethode kwamen redelijk overeen; de monsters op de zandbak waren bij overeenkomstige drukhoogte iets natter. De uitdrogingscurve kwam vrij goed overeen met de curve van Da Silva *et al.* (1995). Er was duidelijk sprake van hysterese (Figuur 4.4.3A). De uitdrogingscurve kon zeer goed door de van Genuchten (1980) functie worden beschreven. In het substraatmodel dient de vernattingscurve te worden opgegeven met, op één na, dezelfde parameters als de uitdrogingscurve. Deze 'gefitte' curve bleek niet geheel goed de metingen te beschrijven. Er is gekozen om de curve te handhaven en niet om het model aan te passen, omdat dat veel te veel tijd zou gaan kosten. In Tabel 4.4.2 zijn de gefitte van Genuchten parameters vermeld.

Tabel 4.4.2. Van Genuchten parameters voor steenwol zoals gebruikt in Hydrion-Line II project bepaald via de onderdrukmethode met buret (Expert nieuw 1) en met de zandbakmethode (Expert nieuw 2 en Expert gebruikt): residueel volumetrisch watergehalte θ_r (cm^3 cm^{-3}), volumetrisch watergehalte bij verzadiging θ_s (cm^3 cm^{-3}), vormparameter n (-), en vormparameters α_d en α_w (cm^{-1}) voor respectievelijk de uitdrogingscurve en de vernattingscurve; n.b.: niet bepaald.

	θ_r	θ_s	α_d	α_w	n
Expert nieuw 1	0.0	0.91	0.118	0.462	3.53
Expert nieuw 2	0.0	0.92	0.110	n.b.	3.74
Expert gebruikt	0.0	0.87	0.081	n.b.	3.32

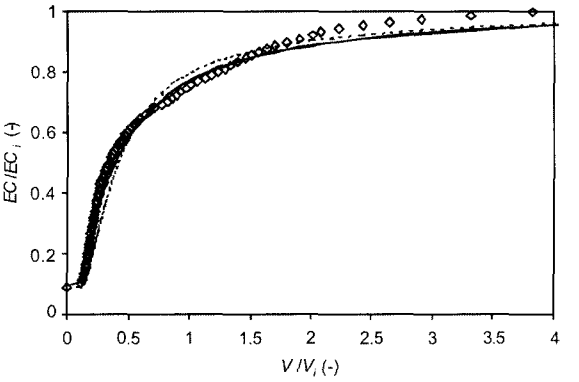




Figuur 4.4.3. (A) Gemeten (symbolen) en gefitte (lijnen) waterretentiekarakteristiek van steenwol volgens de hangende waterkolommethode. (B) de uitdrogingscurve (zandbakmethode) van een nieuwe en een gebruikte steenwolmat; horizontale lijntjes representeren 2x standaardafwijking.

Er is een duidelijk verschil geconstateerd in de uitdrogingscurve van een gebruikte versus een nieuwe mat. Naarmate de mat veroudert, neemt het watervasthoudend vermogen toe (Figuur 4.4.3B). Mogelijke oorzaken hiervoor zijn: verandering van poriënstructuur, waarbij meer kleinere poriëndiameters zijn ontstaan. Die verandering kan ontstaan door enerzijds krimp van het steenwol en anderzijds door toename wortelbiomassa in de tijd. Mogelijk kan ook de 'adhesie' van water aan de steenwolvezels zijn veranderd. Het substraatmodel is echter niet in staat rekening te houden met tijdsafhankelijke fysische eigenschappen. In vervolgstadium zou hier rekening mee gehouden moeten gaan worden.

Het substraatmodel was vrij goed in staat om de gemeten doorbraakcurven te beschrijven. In Figuur 4.4.4 zijn de gemeten en geoptimaliseerde doorbraakcurven gegeven.



Figuur 4.4.4. Gemeten (symbolen) en gefitte (lijn) doorbraakcurve voor steenwol. De onderbroken lijn geeft de situatie weer indien de dispersielengtes worden verwaarloosd. Op de x-as staat de doorspoelfractie, volume toegediende oplossing V gedeeld door volume water in de mat V_i, en op de y-as staat de relatieve EC, gemeten EC in drainwater gedeeld door EC_i van de toegediende oplossing.

De beste fit was verkregen voor a_L = 2 cm en a_T = 0.2 cm. Deze waarden komen overeen met die gevonden voor kleine grondmonsters in het laboratorium. Tevens is in de figuur de doorbraakcurve gegeven in geval de dispersielengtes worden verwaarloosd.

Uit de doorbraakcurve kan ook geschat worden hoeveel doorstroming nodig is om een bepaalde oplossing in de mat te vervangen door een nieuwe oplossing. Zo moet circa drie keer het in de mat aanwezige volume water verplaatst worden voordat de drainconcentratie (en daarmee het grootste deel van de oplossing in de mat) 95% van de nieuwe concentratie heeft bereikt.

Wortelverdeling

In Figuur 4.4.5 zijn de gemiddelde verdelingen (wortellengtedichtheid L_{rv}) weergegeven. Opvallend is dat op het laatste tijdstip de metingen aangeven dat de wortels accumuleren tussen twee planten in. Volgens Gerard Brouwer (PRI) wordt dit wel vaker waargenomen bij planten die dicht op elkaar staan. In de proef stonden de planten op 25 cm afstand in de rij. Eerdere ervaringen met gemeten wortelverdelingen hebben betrekking gehad op groter onderlinge plantafstanden (35, 50 cm), en daarbij was deze accumulatie niet waargenomen. De diffusie-wortelverdelingsmodule in het substraatmodel is niet in staat het laatste gemeten patroon te voorspellen. Dit maakt het dus onmogelijk om op basis van het laatste tijdstip de benodigde parameters te calibreren. De resultaten van het tijdstip t = 56 dagen zijn gebruikt in een manuscript waarin de numerieke oplossing van het diffusie wortelgroeimodel wordt

gepresenteerd en waarin wordt laten zien dat een dergelijk diffusiemodel vrij goed de gemeten wortelverdelingen kan beschrijven (Heinen *et al.*, 2003; in een eerdere manuscript hebben de Willigen *et al.* (2002) een analytische beschrijving van het diffusie wortelgroeimodel gegeven). De verkregen parameters zijn in Tabel 4.4.3 opgenomen, en de bijbehorende berekende wortelverdeling is weergegeven in Figuur 4.4.5.

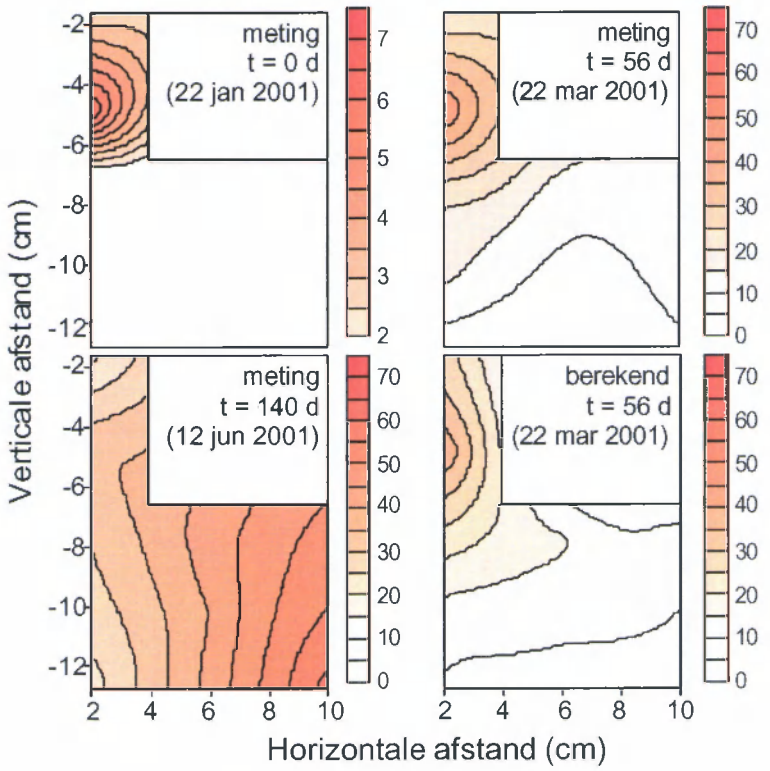
Tabel 4.4.3. De vier parameters van het wortelgroei diffusiemodel: diffusiecoëfficiënten in de x, D_x, en z, D_z, richtingen, de gemiddelde aangroeisnelheid q en de specifieke sterfte λ.

D_x (cm^2 d^{-1})	D_z (cm^2 d^{-1})	q (cm cm^{-2} d^{-1})	λ (d^{-1})
12.91	2.93	22.19	0.135

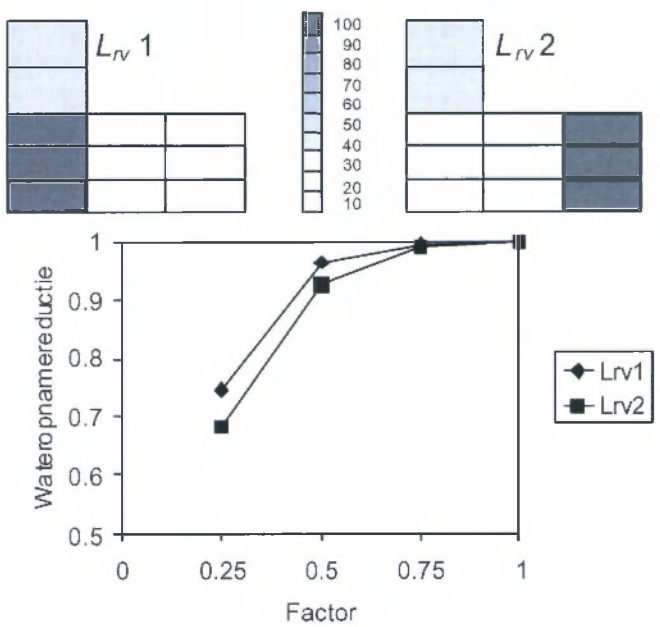
Om toch iets met de data van het laatste tijdstip te kunnen doen is nagegaan of het mogelijk is de aanvoer van wortel biomassa (welke nu steeds in het plantblokje wordt verondersteld) na verloop van tijd ook te laten plaatsvinden op het grensvlak tussen twee planten. De eerste indicaties zijn dat de gemeten patronen redelijk zijn na te bootsen. Echter, een dergelijke aanpak is wel erg empirisch. Deze aanpak is verder niet meer gehanteerd, en wortelverdeling is uitgevoerd op basis van de hierboven gegeven parameters.

Met betrekking tot de waargenomen 'ophoping' van wortels tussen twee planten het volgende. Met gesimuleerde wortelverdelingen (op basis van parameters vastgesteld aan eerste bemonstering wortelmetingen) zijn 120 dagen doorgerekend (teeltduur proef). De gesimuleerde wortelverdeling aan eind was dus afwijkend van waargenomen verdeling (tweede bemonstering wortelmetingen). Er trad geen tekort in water- en nutriëntenopname op. In deze situatie nam de worteldichtheid af met de afstand tot de plant. In een tweede berekening zijn de wortelverdelingen in de mat gespiegeld, zodat de meeste wortels (in de mat) zich tussen twee planten bevonden. Ook voor deze situatie trad geen tekort in water- en nutriëntenopname op.

Vervolgens is nog wat nader gekeken of 'extreme' verdelingen van wortels in het substraat gunstig c.q. ongunstig zijn m.b.t. opname. Zonder de details van de uitgevoerde berekeningen in te gaan hier kort een weergave van de bevindingen. Twee 'extreme' wortelverdelingen zijn toegepast: 1) de meeste wortels geconcentreerd onder het plantblokje, en 2) de meeste wortels geconcentreerd tussen twee plantblokjes (zie schema in Figuur 4.4.6). De gemiddelde wateropname door tomaat op jaarbasis bedraagt 700 mm. Bij teeltduur van ca. 350 dagen betekent dit een verdamping van 2 mm d^{-1}. Deze is volgens een grove sinusbenadering (driehoek) verdeelt over 15 uur per dag.



Figuur 4.4.5. Gemeten wortellengtedichtheidsverdeling (cm cm^{-3}) op 3 tijdstippen en de gefitte (berekende) verdeling voor t = 56.



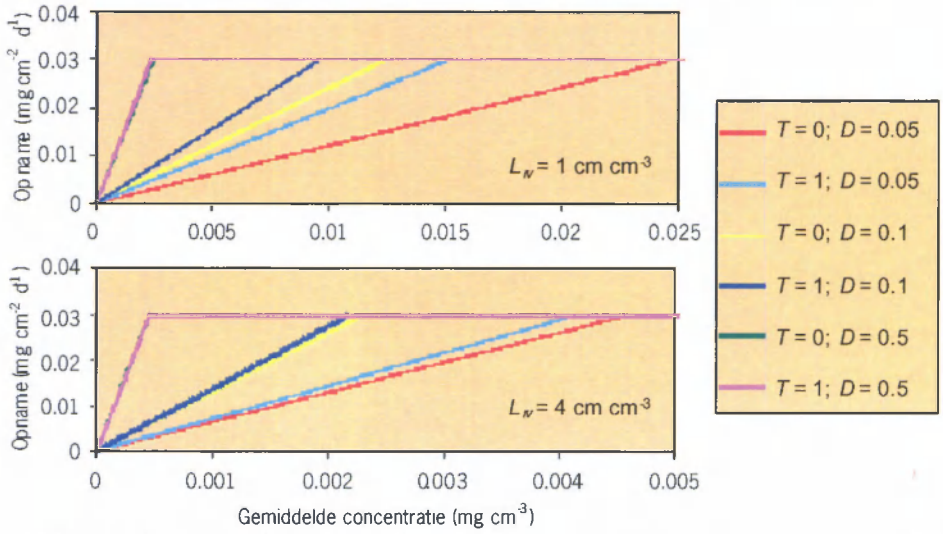
Figuur 4.4.6. Effect van extreme wortelverdeling op reductie in wateropname (zie tekst voor uitleg factor).

De gemiddelde stikstofopname door tomaat op jaarbasis bedraagt ongeveer 945 kg ha^{-1}. Bij teeltduur van ca. 350 dagen betekent dit een N-vraag van 2.7 kg ha^{-1} d^{-1}. Deze is constant over de dag verondersteld. In alle uitgevoerde berekeningen was nooit sprake van tekort in N-opname. Er is regelmatig water (voedingsoplossing) gegeven. Elke 0.3 mm (actuele) verdamping werd aangevuld waarbij 0.375 mm werd toegediend (drainpercentage 25%). Dit betekent dat dagelijks ruim voldoende water (en N) werd toegediend. Eventuele tekorten in opname zijn dan het gevolg van transportproblemen door het substraat naar de wortelwand toe. Deze situatie is gedurende 30 dagen

doorgerekend. Voor water blijkt geen noemenswaardig verschil te bestaan tussen de twee wortelverdelingen. Vervolgens is gekeken naar de hoeveelheid wortels. Deze is respectievelijk gesteld op 1.0, 0.75, 0.5 en 0.25 keer de getoonde wortelverdeling. Dan blijkt dat de wateropname wordt gereduceerd bij afname van de hoeveelheid wortels. Deze afname is groter voor wortelverdeling 2 (meeste wortels tussen twee plantblokken). Hetzelfde effect kan worden verkregen door respectievelijk de watervraag met factoren 4/3, 2, en 4 te vermenigvuldigen. Met andere woorden, de drijvende kracht is hier dus de watervraag per cm wortel.

Nutriëntenopnamemodel

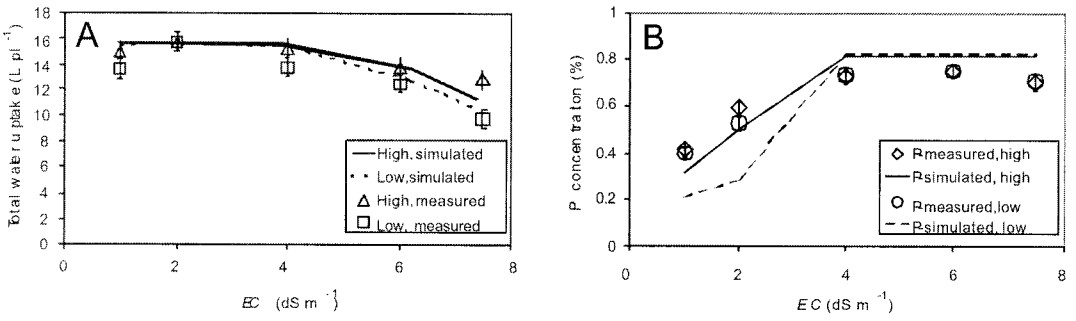
Het opnamemodel in het substraatmodel levert een relatie op tussen opname en gemiddelde concentratie in het substraatvocht rond een wortel welke overeenkomstig is met de hypothese (Figuur 4.4.7; hypothese in Figuur 4.4.1). Het effect van massastroming is duidelijk aanwezig bij lage wortellengtedichtheid L_{rv} maar nauwelijks meer bij hoge L_{rv}. In de praktijk is L_{rv} vele malen hoger dan in dit voorbeeld gebruikt, zodat massastroming in die situaties er niet toe zal doen. Merk op dat bij hoge L_{rv} de concentratie waarbij opname reductie optreedt veel lager is dan bij lage L_{rv}.



Figuur 4.4.7. Berekende opname als functie van de gemiddelde concentratie in substraat rond een wortel bij twee verschillende wortellengtedichtheden L_{rv} (boven en onder). Berekeningen voor drie waarden van de diffusiecoëfficiënt (D, cm² d⁻¹) en voor al (transpiratie T = 1 cm d⁻¹) dan niet (T = 0) rekening houdend met massatransport via het opgenomen water.

Scenario's voor verschillende fertigatiestrategieën

Heinen *et al.* (2003) hebben laten zien dat met het gekoppelde substraat-plant-model (SPM) vrij goed de waargenomen effecten van EC (van de voedingsoplossing) op de opname kan worden gesimuleerd (Figuur 4.4.8). Bij lage EC (< 2 dS m^{-1}) worden minder nutriënten opgenomen wat resulteerde in lagere nutriënten concentraties in de plant (Figuur 4.4.8B). Bij hoge EC (> 4 dS m^{-1}) werd minder water opgenomen als gevolg van osmotische hindering (Figuur 4.4.8A). De effecten bij hogere ECs is duidelijker naarmate het watergeven minder frequent plaatsvindt. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat tussen twee watergeefbeurten het substraat sterker uitdroogt, waardoor de EC in de wortelzone toeneemt en daardoor de osmotische hindering op wateropname toeneemt. Deze bevindingen geven aan dat het mogelijk is om met het SPM model scenarios door te rekenen voor een modelgebaseerde regeling, omdat het model gewasreacties op veranderende samenstelling van de voedingsoplossing kan voorspellen. Echter, uit deze analyse is niet duidelijk geworden op wat voor een tijdschaal een bepaald regime een effect vertoont. Met andere woorden, indien de samenstelling van de voedingsoplossing wordt verhoogd, hoe lang duurt het dan voordat dit effect heeft.



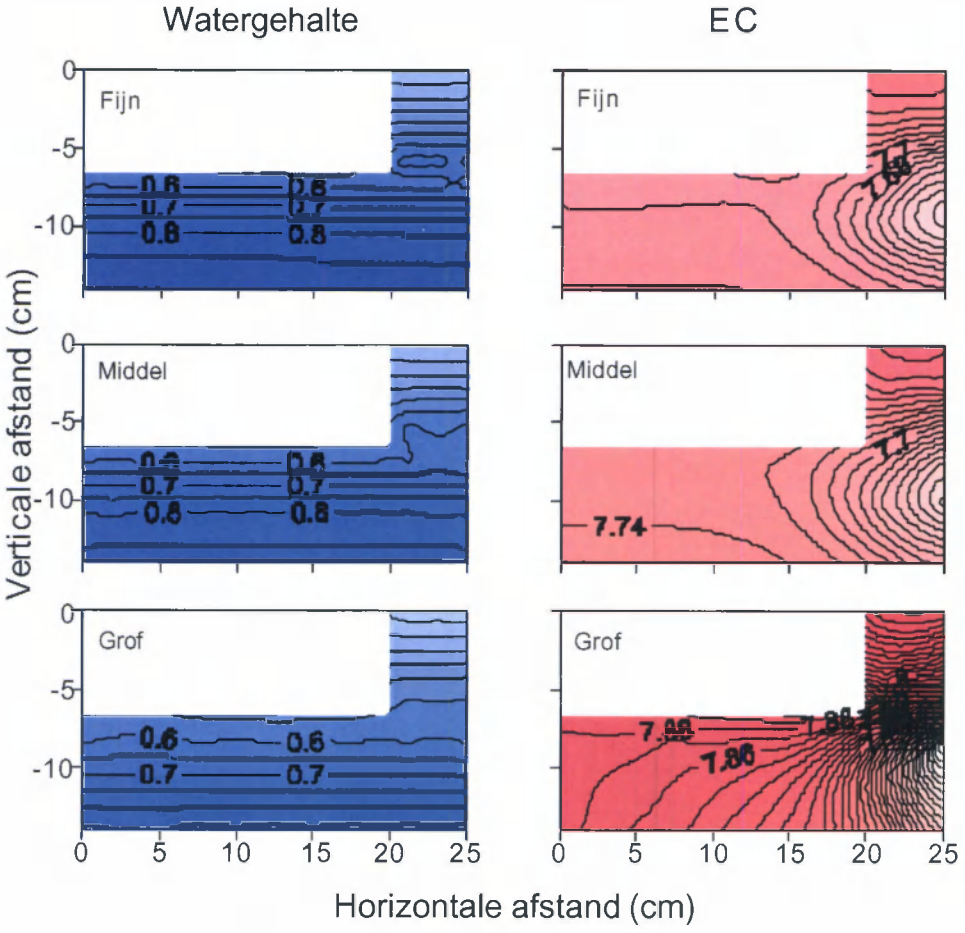
Figuur 4.4.8. Effect van EC op (A) wateropname en (B) P concentratie in plant bij frequent watergeven (high) en bij minder frequent watergeven (low) (naar Heinen et al., 2003).

DLL voor modelgebaseerde regeling tijdens 'proof-of-principle'

Het substraatmodel (en ook plantmodel, zie deelproject 7) zijn zodanig aangepast dat ze van buitenaf opdrachten kunnen krijgen een volledige statusbeschrijving naar een file uit te voeren, dan wel een simulatie uit te voeren op basis van een bekende in te lezen statusbeschrijving. Daartoe is van het substraatmodel een complete statusbeschrijving vastgesteld, welke ((un)formatted) naar een file wordt weggeschreven dan wel uit een file kan worden ingelezen. Het gekoppelde substraat-plant-model (SPM) wordt vanuit een driver (deelproject 8) aan geroepen, waarbij communicatie verloopt via een ASCII datafile. Er zijn twee communicatiefiles: één voor communicatie vanuit driver richting SPM en de andere voor de omgekeerde richting.

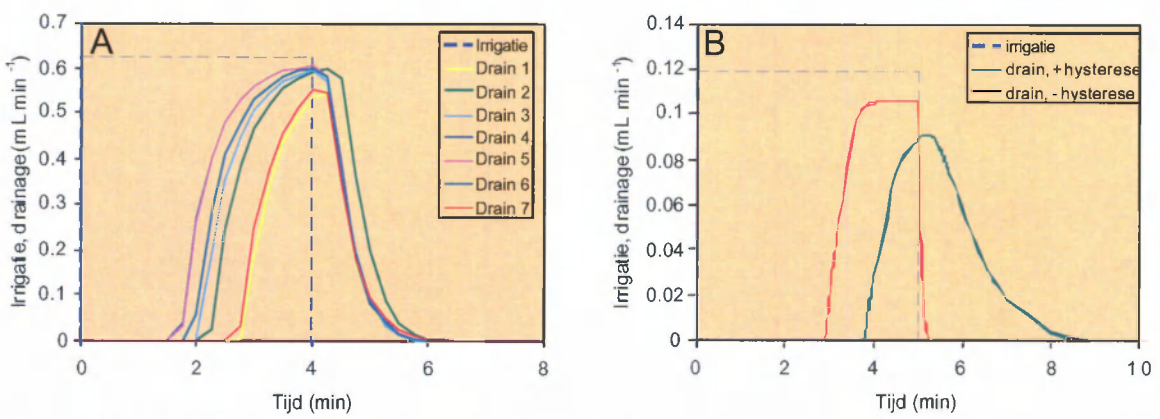
Het substraatmodel heeft hiertoe enkele wijzigingen ondergaan om de scenarioanalyse tijdens het 'proof-of-principle' experiment te kunnen utvoeren. Dit had met name betrekking op het watergeefregime. Het watergeefregime kan worden opgegeven als: a) watergeven bij het bereiken van een bepaalde stralingssom, b) watergeven op een vast tijdstip (opgegeven door de driver; bijvoorbeeld 1 uur na zonsopkomst), en c) watergeven op door de driver opgegeven tijden. Bij methode a) moet de watergift worden opgegeven als het aantal mL water per m^2 (kas) per eenheid (J m^{-2} (kas)) straling, en bij methodes b) en c) moet de totale afgifte per gietbeurt in mL m^{-2} (kas) worden opgegeven. Methodes a) en b) worden toegepast bij de scenarioanalyse, terwijl methode c) wordt gebruikt bij een status update (aanpassing toestandbeschrijving op basis van werkelijk uitgevoerd watergeefregime en werkelijk klimaat). Tevens moet worden aangegeven welke samenstelling van de voedingsoplossing moet worden gebruikt.

De berekening met het kleinste aantal rekencellen (grof scenario) leidde tot afwijkende resultaten ten opzichte van de andere twee. In Figuur 4.4.9 staan de gesimuleerde verdeling van water en EC in het substraat aan het eind van de simulatieperiode (60 dagen). Het fijne scenario laat een duidelijk afwijkende EC verdeling zien, en ook een afwijkende waterverdeling. Het middel scenario wijkt nauwelijks af van het fijne scenario, zodat ook met het geringere aantal rekencellen van het middel scenario gerekend kan worden. Hierbij wordt dan een versnelling van de rekentijd verkregen van een factor 5. Wel dient opgemerkt et worden dat de berekeningen zijn uitgevoerd onder optimale omstandigheden, dat wil zeggen dat er geen tekorten in water- en nutriëntenopname zijn opgetreden.



Figuur 4.4.9. Verdeling na 59.5 dagen van volumetrisch watergehalte (linkerkolom; mL cm³) en EC (rechterkolom; dS m⁻¹) voor verschillend aantal rekenelementen: veel (fijn), middel, en weinig (grof).

De dynamiek van de drain is geïllustreerd in Figuur 4.4.10, waarin duidelijk het exponentiële gedrag, zoals gesteld in de hypothese (Figuur 4.4.2) naar voren komt. Duidelijk is dat elke irrigatie-drainage gebeurtenis gedurende een dag verschillend is (Figuur 4.4.10A), en dat hysterese een duidelijk invloed heeft ((Figuur 4.4.10B). Dat betekent dat hysterese beschouwd moet worden, maart ook dat er geen éénduidige tijdconstante, met faseverschuivingen (? t_1, ? t_2), voor het drainageproces bestaat.



Figuur 4.4.10. (A) Dynamiek van drainage gedurende een willekeurige dag waarop zeven irrigatiepulsen zijn gegeven, en (B) het effect van al dan niet beschouwen van hysterese op de drainagedynamiek.

Conclusies

Het substraatmodel is met succes toegepast in het Hydrion-Line II project. Het substraatmodel is gekoppeld met het plantmodel uit deelproject 7. Het gekoppelde substraat-plant-model (SPM) is met succes als DLL opgezet, en toegepast in een modelgebaseerde regeling (deelproject 8) in het 'proof-of-principle' experiment.

Deliverable 6 ("verificatie model en meest perspectiefvolle fertigatiestrategie") is niet uitgevoerd. Dit komt omdat dit gepland stond voor het vierde jaar, welke niet is uitgevoerd. Dat betekende ook dat een uitvoerige scenarioanalyse (deliverable 5) die hieraan vooraf zou zijn gegaan niet in de geplande vorm is uitgevoerd. De geplande tijd voor deze twee deliverables is vervolgens gebruikt voor deelname in het 'proof-of-principle' experiment, dat gedurende de looptijd van het project is opgestart. Dit heeft geleid tot de extra deliverable 7, welke niet in de oorspronkelijke projectplanning was opgenomen. Scenarioberekeningen zijn in het Hydrion-Line II project wel degelijk uitgevoerd. Ten eerste, in het 'proof-of-principle' experiment is het SPM model gebruikt voor scenarioanalyses ter bepaling van de meest optimale watergeefregime(in samenwerking met deelprojecten 7 en 8). Ten tweede, is het SPM model gevalideerd en gecalibreerd aan de hand van opname experimenten bij verschillende watergeefregimes en EC van de voedingsoplossing (in samenwerking met deelproject 6).

Tenslotte, het substraatmodel is tevens gebruikt om de partners van het Hydrion-Line II project te laten zien wat voor een dynamiek het substraatmodel vertoont. Zo is wat nader ingegaan op de nutriëntenopname (voor deelproject 6) en op de drainagedynamiek (voor deelproject 8). Dit waren ongeplande werkzaamheden, maar bleken gedurende de looptijd van het project nuttige informatie te verschaffen.

Referenties

Da Silva F.F., R. Wallach and Y. Chen, 1995. Hydraulic properties of rockwool slabs used as substrates in horticulture. *Acta Horticulturae* 401, p. 71-75.

De Willigen P. and M. Heinen, 1998. Modelling water and nutrient uptake of crops grown in protected cultivation. Acta Horticulturae 456: 227-235.

De Willigen P., M. Heinen, A. Mollier, and M. Van Noordwijk, 2002. Two-dimensional growth of a root system modelled as a diffusion process. I. Analytical solutions. Plant Soil 240: 225-234.

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. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 270 p.

Heinen M., 2001. FUSSIM2: brief description of the simulation model and application to fertigation scenarios. Agronomie 21: 285-296.

Heinen M, and P. de Willigen, 1999. Adsorption and accumulation of Na in recirculating cropping systems. Acta Horticulturae 507:181-187.

Heinen, M., and P. de Willigen, 1998. FUSSIM2 A two-dimensional simulation model for water flow, solute transport and root uptake of water and nutrients in partly unsaturated porous media, *Quantitative Approaches in Systems Analysis No. 20*, DLO Research Institute for Agrobiology and Soil Fertility and the C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology, Wageningen, The Netherlands, 140 p.

Heinen M. and P. de Willigen (eds.), 2001. FUSSIM2 version 5. New features and updated user's guide. Alterra rapport 363, Alterra, Wageningen, 164 p.

Heinen M., L.F.M. Marcelis, A. Elings, R. Figueroa, and F.M. del Amor, 2003. Effects of EC and fertigation strategy on water and nutrient uptake of tomato plants. Acta Horticulturae, *accepted.*

Heinen M., A. Mollier, and P. de Willigen, 2003. Growth of a root system described as diffusion. II. Numerical model and application. Plant and Soil, *accepted.*

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

Mualem Y., 1984. A modified dependent-domain theory of hysteresis, Soil Sci. 137: 283-291.

Rappoldt C., 2003. Description of FSE4. Alterra-rapport, Alterra, Wageningen, *in prep.*

Van Genuchten M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 982-989.

Van Noordwijk M. en G. Brouwer, 1978. Het met zoutzuur vrijspoelen van wortels uit steenwol, en het effect daarvan op het wortelgewicht (with a summary: Separation of roots from rockwool by means of washing with HCl, and the effect thereof on root weight). Rapport 4-78, IB, Haren, 11 p.

NEN 5786, 1991. Bodem - Onverzadigde zone - Bepaling van de waterretentiekarakteristiek - Onderdrukmethode tot h = -200 cm - Bepaling met een poreuze plaat in combinatie met een buret. Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 4 p.

NEN 5787, 1994. Bodem - Onverzadigde zone - Bepaling van de waterretentiekarakteristiek - Onderdrukmethode tot h = -500 cm – Onderdrukmethode – Gravimetrische laboratoriumbepaling. Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 7 p.

NEN 5791, 1995. Bodem - Onverzadigde zone - Bepaling van de onverzadigde waterdoorlatendheidskarakteristiek en de waterretentiekarakteristiek met de verdampingsmethode volgens Wind. Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 7 p.

4.5 Deelproject Plantensensoren

Deelnemende partijen

ATO, Plant Research International

Summary

The aim of the task crop sensors is to develop measurement systems that give information on the status of the crop, such that in combination with crop growth models the demand for nutrients can be predicted. Attention has been given to the measurement of light interception of the crop and the determination of plant weight to support the crop growth model and finally the control system for water and nutrients. Also, attention has been paid to the development of sensors for photosynthetic traits such as actual photosynthetic rate and photosynthetic capacity. Integration of sensors with crop growth models should lead to an improved estimate of the demand for nutrients of the crop, to enable better control of the dosage of nutrients and improved control of the greenhouse climate.
A sensor for the measurement of light interception has been developed, based on the measurement of crop reflection. This method has been tested for tomato and lettuce. The sensor has been tested in an experimental greenhouse and has proved to be suitable for the measurement of light interception and leaf area. A measurement system for crop weight has been developed. The sensor has proved to be useful for the measurement of crop weight of for the measurement of daily crop growth. The accuracy of the estimation of photosynthetic parameters has been improved. Measurements of chlorophyll fluorescence and light induced absorbance changes in combination with chlorophyll concentration, can be used to predict photosynthetic traits. It turns out that there was a large variation in photosynthetic parameters in the course of the growing season. Especially, a large variation in photosynthetic capacity was found in a tomato crop. This variation in photosynthetic capacity is of important influence on crop growth and fruit production. A strong relationship was found between photosynthetic capacity and incoming irradiance. This relationship has been described mathematically.
Measurements in an experimental greenhouse with the sensors for light interception, plant weight and photosynthetic traits have been integrated with crop growth models to predict growth an nutrient demand of the crop.

Samenvatting

Doel van het deelproject plantensensoren is meetsystemen te ontwikkelen die informatie geven over de status van het gewas, zodat in combinatie met groeimodellen de nutriëntenbehoefte van het gewas ingeschat kan worden. Er aandacht besteed aan de bepaling van de lichtonderschepping van het gewas middels een sensor en aan de meting van plantgewicht ter ondersteuning van het groeimodel en het meet- en regelsysteem. Verder is er aandacht besteed aan sensoren voor fotosyntheseparameters die de actuele fotosynthesesnelheid en capaciteit voor fotosynthese meten. Integratie van deze sensoren met gewasgroeimodellen moet een betere inschatting van de nutriëntenbehoefte van het gewas en een betere sturing van nutriëntengift en kasklimaat mogelijk maken.
Voor de meting van lichtonderschepping is een prototype sensor ontwikkeld op basis van reflectiemetingen. Dit meetprincipe is getest voor tomaat en sla. De sensor is getest in een semi-praktijkkas en blijkt zeer goed bruikbaar om lichtonderschepping en bladoppervlakte van het gewas te schatten. Er is een meetsysteem ontwikkeld voor de meting van het gewicht van het gewas. Dit meetsysteem kan gebruikt worden voor de bepaling van plantgewicht of voor de bepaling van de groei van de plant. De nauwkeurigheid van de schatting van fotosyntheseparameters is verbeterd. Metingen van chlorofylfluorescentie, en lichtgeïnduceerde absorptieveranderingen in combinatie met chlorofylgehalte kunnen gebruikt worden om fotosyntheseparameters nauwkeurig te schatten. Er bleken grote verschillen te zijn in fotosyntheseparameters in de loop van het groeiseizoen, met name in

de maximale fotosynthesesnelheid bij lichtverzadiging. Deze variatie in maximale fotosynthese had een belangrijke invloed op gewasgroei en productie. Er is een sterke relatie gevonden tussen de fotosynthesecapaciteit en de hoeveelheid inkomende straling gedurende het groeiseizoen. Deze relatie is modelmatig beschreven.
De sensoren voor lichtonderschepping, plantgewicht en fotosynthese zijn in een semi-praktijkkas gebruikt om de gemeten toename in plantgewicht te gebruiken als input in gewasgroeimodellen, ten behoeve van de voorspelling van groei en nutriëntenopname.

Deliverables

	Status	Datum	
Omschrijving deliverable	(% gereed)	Start	Oplevering
De ontwikkeling van een schatting van de bladtemperatuur in het gewas [1]	0		
De ontwikkeling van een meting van bladoppervlak of lichtonderschepping en van plantgewicht en transpiratie	100%	januari 2000	maart 2002
Verbetering van de nauwkeurigheid van de meting van de actuele fotosynthesesnelheid en van de meting van fotosynthesecapaciteit.	100%	januari 2000	juli 2002
De ontwikkeling en het testen van plantensensoren voor gebruik in een kasomgeving.[2]	50%	januari 2000	juli 2002
De ontwikkeling van het gebruik van fotosynthese- en andere gewasparameters in een stabiel regelsysteem voor mineralengift en kasklimaat.	100%	januari 2002	januari 2003

Inleiding

Algemeen

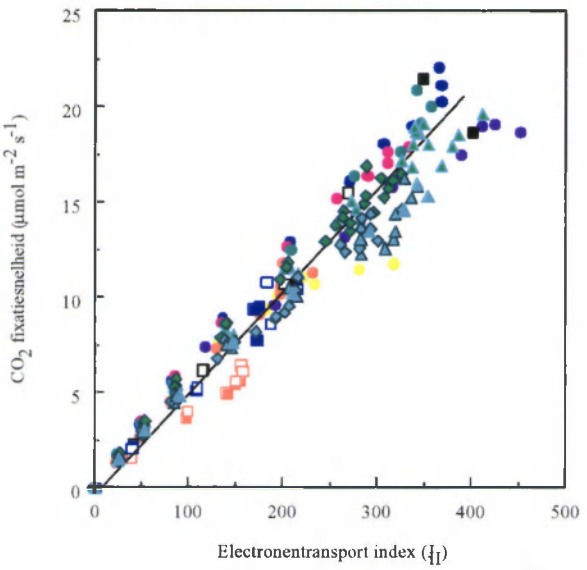
In het deelproject plantensensoren worden meetsystemen ontwikkeld die informatie geven over de status van het gewas, zodat in combinatie met groeimodellen de nutriëntenbehoefte van het gewas ingeschat kan worden. Centraal staan sensoren voor fotosyntheseparameters die de actuele fotosynthesesnelheid en capaciteit voor fotosynthese meten. Ook voor de bepaling van de lichtonderschepping van het gewas wordt een sensor ontwikkeld. Tenslotte wordt een meting van plantgewicht ontwikkeld ter ondersteuning van het groeimodel en het meet- en regelsysteem. Integratie van deze sensoren met gewasgroeimodellen moet een betere inschatting van de nutriëntenbehoefte van het gewas en een betere sturing van nutriëntengift en kasklimaat mogelijk maken.

Fotosynthesesensoren

De metingen van fotosynthese zullen gebruikt worden ter ondersteuning van de modelberekeningen. De belangrijkste parameter hiervoor is fotosynthesecapaciteit. Een schatting van fotosynthesecapaciteit kan op verschillende manieren verkregen worden. Ten eerste kan door directe meting van de snelheidsconstante van P_{700}^{+}-reductie de fotosynthesecapaciteit worden geschat. Deze meting is technisch gezien ingewikkeld om in een kas uit te voeren. Daarnaast kan de fotosynthesecapaciteit

[1] In het project is deze taak niet uitgevoerd omdat inmiddels apparatuur op de markt is voor de meting van temperatuur in een gewas
[2] Voor de meting van fotosynthese is in het project geen aandacht besteed aan het ontwikkelen van een prototype meetapparaat voor een kasomgeving. In plaats daarvan is het onderzoek gericht op het nagaan van de meerwaarde van het gebruik van deze meting . Daarvoor is gebruik gemaakt van bestaande labororium apparatuur, gebruikt in een semie-praktijkkas

afgeleid worden uit de lichtresponscurve, geconstrueerd uit metingen van de lichtintensiteit en de efficiëntie van fotosysteem I of II.
Gekozen is het onderzoek vooral te richten op schatting van de fotosynthesecapaciteit uit de lichtresponscurve verkregen door fluorescentiemetingen. Deze schatting omvat een aantal stappen. De fotosynthese- of CO_2-fixatiesnelheid kan worden geschat uit meting van de efficiëntie van fotosysteem II en de lichtintensiteit. De efficiëntie van fotosysteem II geeft aan welk deel van het geabsorbeerde licht wordt gebruikt voor fotosynthese en wordt gemeten door middel van chlorofylfluorescentie. Vervolgens kan de elektronentransport-index (J_{II}) worden berekend. J_{II} is het product van efficiëntie van fotosysteem II en de lichtintensiteit.



Figuur 4.5.1: Relatie tussen electronentransport-index (J_{II}) en fotosynthesesnelheid van tomatenbladeren opgekweekt en gemeten onder verschillende omstandigheden (Hydrion-line jaarrapportage EETK96083, juli 1999, figuur 1, pagina 26)

Uit onderzoek tijdens de voorgaande fase van Hydrion-line is gebleken dat er een lineaire relatie bestaat tussen de elektronentransport-index en de fotosynthesesnelheid (figuur 4.5.1). In deze relatie is ruime variatie in bladleeftijd, groei- en meettemperatuur en stikstofdepletie verwerkt. Met behulp van deze relatie kan de fotosynthesecapaciteit worden geschat door J_{II} uit te zetten tegen de lichtintensiteit en de verkregen lichtresponscurve te beschrijven met een functie.

Belangrijke aandachtspunten in verband met het verkrijgen van een betrouwbare relatie zijn de nauwkeurigheid van de individuele meting en de nauwkeurigheid waarmee uit meerdere puntmetingen een schatting van de modelparameter kan worden verkregen. Bij de nauwkeurigheid van een individuele meting moet rekening worden gehouden met de effecten van absorptie van licht door het blad op het punt van de meting, het chlorofylgehalte, de temperatuur en de interne CO_2-concentratie. Voor het verkrijgen van een nauwkeurige schatting voor een modelparameter uit een verzameling puntmetingen moet rekening worden gehouden met de aanwezige variatie in de ruimte.

Effect van chlorofylconcentratie, lichtabsorptie en stikstofgebrek

In de eerste fase van Hydrion-line bleek uit een oriënterend experiment dat stikstofdepletie een enorm en snel effect heeft op de fotosynthesecapaciteit. Daarom is in een uitgebreid experiment de respons van fotosyntheseparameters op stikstofgebrek bestudeerd. Informatie wordt gepresenteerd met betrekking tot de gevoeligheid van de relatie J_{II} en fotosynthesesnelheid voor veranderingen in chlorofylconcentratie en lichtabsorptie als gevolg van stikstofdepletie. Ook wordt de relatie tussen snelheidsconstante van P_{700}^+-reductie en de fotosynthesecapaciteit verder onderzocht. Daarnaast geven

de resultaten een indruk van de snelheid waarmee fotosyntheseparameters veranderen bij stikstofgebrek.

Effect van temperatuur en CO_2-concentratie

Uit resultaten uit de eerste fase van het Hydrion-line project bleek dat de relatie tussen elektronentransport en CO_2-fixatie afhankelijk is van de bladtemperatuur (R. van den Boogaard et al., 1999). Deze afhankelijkheid lag niet in de lijn van de theoretische verwachting. Het effect van temperatuur op de relatie tussen J_{II} en fotosynthesesnelheid is verder onderzocht bij een groter bereik van meettemperaturen.
De CO_2-concentratie kan sterk variëren in de kas. In het koude seizoen, wanneer de verwarming volop draait en de ramen over het algemeen gesloten blijven wordt CO_2-bemesting gegeven. Hierbij kan de CO_2-concentratie in de kas hoog op lopen (~700 tot 1000 ppm). In de zomer wanneer het gewas veel CO_2 fixeert en de ramen vaak opstaan, is de CO_2-concentratie veel lager.
Tot nu toe zijn alle metingen voor de relatie elektronentransport-index en fotosynthesesnelheid uitgevoerd bij circa 350 ppm CO_2. In een zogenaamd A/ci-experiment is een start gemaakt met het onderzoek naar het effect van CO_2-concentratie op die relatie.

Metingen in de semi-praktijkkas

Er is experimenteel onderzoek verricht naar de ruimtelijke variatie in fotosynthese eigenschappen van een tomatengewas. In de semi-praktijkkas van IMAG zijn metingen gedaan in verschillende bladlagen en aan verschillende planten tijdens twee groeiseizoenen, 2001 en 2002. In beide jaren is gemeten aan zowel een voorjaarsteelt als een najaarsteelt.

Plantgewicht

Tomatenplanten ondersteunen zichzelf niet door middel van een dragende stam, maar worden opgehangen aan een draad hoog in de kas. Daardoor is het betrekkelijk eenvoudig om een systeem te construeren voor het meten van de dagelijkse groei door middel van gewichtssensoren. Het totale gewicht van de plant, inclusief vruchten, maar zonder wortels wordt daarbij gemeten. In dit project werden gewichtsensoren ontwikkeld die vervolgens uitgebreid zijn getest in een experimentele en semi-praktijkkas.

Lichtonderschepping

Voor de meting van lichtonderschepping of bladoppervlak is een afweging gemaakt tussen verschillende beschikbare technieken. Op grond van praktische overwegingen is gekozen om een sensor te ontwikkelen die lichtonderschepping schat van het tomatengewas.
Voor sla is aangetoond dat de reflectiemeting met behulp van de CropScan bruikbaar is als sensor om lichtonderschepping te voorspellen. Er bestaat een goede correlatie tussen lichtonderschepping door het slagewas en reflectie van licht met een golflengte van 810 nm wanneer het gewas op een zwarte ondergrond geteeld wordt (Hydrion-line jaarrapportage EETK96083, juli 1999, figuur 5, pagina 29). Onder experimentele omstandigheden wordt onderzocht of deze methode ook bruikbaar is voor tomaat. Uit metingen met de CropScan in een breed golflengtegebied zal een keuze van golflengte(s) gemaakt worden zodat een eenvoudige sensor kan worden ontwikkeld. Vervolgens worden testmetingen in de kas verricht om de relatie te leggen tussen lichtonderschepping van het gewas en de gekozen meetmethode. Op grond van deze testmetingen kan dan de sensor gebouwd worden die verder getest kan worden in de kasomgeving.

Materiaal en methode

Fotosynthesesensoren

Respons op stikstofdepletie
In dit experiment werden tomatenplanten opgekweekt met overmaat stikstof en daarna overgezet op voedingsoplossing zonder stikstof of voedingsoplossing met helft van de initiële hoeveelheid stikstof.

Op deze manier werd het stikstofgehalte en het chlorofylgehalte van de bladeren gevarieerd en werden verschillen in fotosynthesecapaciteit gecreëerd. Naast informatie over de respons op stikstofgebrek levert dit experiment ook belangrijke informatie over het effect van variatie in absorptie van licht en chlorofylgehalte op de schatting van de fotosynthese activiteit en capaciteit.
Bij de analyse van de resultaten werd ook gebruik gemaakt van een bestaande dataset waar fotosynthesecapaciteit en chlorofylgehalte varieerde door verschillende lichthoeveelheden waarbij de planten opgekweekt waren (Hydrion-line jaarrapportage EETK96083, figuur 4 op pagina 28). Tomatenplanten zijn in een klimaatkast bij een temperatuur van 22°C op beluchte Steiner voedingsoplossing (12mM stikstof) opgekweekt. Na twee weken werden de planten overgezet op voedingsoplossing waarin de stikstofconcentratie gehalveerd was (6 mM stikstof) of op oplossing zonder stikstof (0 mM), beide volgens Steiner. Op 0,1,2,4 en 7 dagen na overzetten zijn fotosynthesemetingen uitgevoerd bij 5 verschillende lichtniveaus, een zogenaamde verkorte lichtresponscurve. Bij elk lichtniveau zijn de volgende metingen verricht: CO_2-fixatie, efficiëntie van fotosysteem I en II en de snelheidsconstante voor P_{700}^+-reductie. Van de bladeren is verder het chlorofylgehalte, het bladoppervlak en de absorptie van licht bepaald.

Relatie met meettemperatuur
Voor het experiment werden planten opgekweekt in een klimaatkast bij een temperatuur van 22°C op beluchte Steiner voedingsoplossing. Vervolgens werden bij 4 verschillende temperaturen met 3 replica's per temperatuur lichtresponscurves gemeten, waarbij naast CO_2-opname ook de parameters voor het elektronentransport werden gemeten. De meettemperaturen waren: 16°, 22°, 28° en 34°C.

Relatie met CO_2-concentratie
Voor het experiment waarbij de invloed van de CO_2-concentratie wordt onderzocht, zijn tomatenplanten opgekweekt in een klimaatcel bij een temperatuur van 22°C. Na een kiemperiode van twee weken werden de planten op beluchte Steiner voedingsoplossing opgekweekt bij twee lichtintensiteiten, 160 (LL) respectievelijk 300 (HL) µmol m^{-2} s-1 gedurende 12 uur per etmaal. Na drie weken werden de fotosynthesemetingen uitgevoerd aan drie replica's per groeilichtintensiteit. Voor de meting van A/c_i-curves werd de laboratoriumopstelling aangepast zodat ook stomataire geleidbaarheid berekend kon worden.
Tijdens de meting werden 10 CO_2-concentraties aangeboden tussen 68 en 750 ppm bij circa 1000 µmol m^{-2} s^{-1}. Bij elk CO_2-stap zijn de volgende metingen verricht: CO_2-fixatie, transpiratie, efficiëntie van fotosysteem I en II, en de snelheidsconstante voor P_{700}^+-reductie. Van de bladeren is verder het chlorofylgehalte, het bladoppervlak en de absorptie van licht bepaald.

In de semi-praktijkkas
In de semi-praktijkkas van IMAG werden in 2001 en 2002 zeer regelmatig fotosynthese-metingen uitgevoerd, door middel van gasuitwisseling. Daarvoor is een unieke opstelling gebouwd, die bestaat uit het Minicuvetsysteem van Walz voor de luchtbehandeling en differentieelmeting van de CO_2-opname en drie bladcuvetten van PP-systems. Deze commercieel verkrijgbare apparaten zijn verbonden door een zogenaamde flowbox die speciaal door ATO werd ontwikkeld voor dit doel. Deze flowbox verzorgt de monstername van iedere bladcuvet en kan op afstand worden aangestuurd. Dit geheel is flexibel gemonteerd op een aangepaste oogstwagen (Technische Dienst, IMAG) die in de kas kan worden gereden op de gebruikelijk wijze, namelijk over de verwarmingsbuizen. De bladcuvetten zijn bevestigd aan een uitschuifbare buis zodat op iedere willekeurige hoogte in het gewas gemeten kan worden (figuur 4.5.2).

Zowel in 2001 als in 2002 zijn twee teelten gedaan, de eerste van januari tot en met juli en in augustus is gestart met de tweede teelt die duurde tot en met december. De dagelijkse verzorging van het gewas was in handen van de Proeftechnische Dienst van IMAG.



Figuur 4.5.2: Opstelling voor fotosynthesemeting door middel van gasuitwisseling, met rechts een detailopname van het bladcuvet

In 2001 is maandelijks op drie hoogtes in het gewas gemeten met drie replica's per meettijdstip. Daarnaast is maandelijks de fotosynthesesnelheid van de top van het gewas gemeten met zes replica's per meettijdstip. In augustus werd de eerste teelt gestaakt en is gestart met een nieuw gewas. Vervolgens zijn de fotosynthesemetingen weer op dezelfde manier voortgezet. Tijdens de najaarteelt van 2002 werd wekelijks fotosynthese gemeten in de top van het gewas met drie replica's.
Alle metingen zijn uitgevoerd bij meerdere lichtniveaus zodat uit de lichtresponscurves verschillende fotosyntheseparameters geschat konden worden. Hiervoor is een functie gebruikt die de lichtresponscurve beschrijft met drie parameters: de initiële kwantum efficiëntie (α), de kromming (θ) en de maximale fotosynthesesnelheid (P_{max}) (Thornley, J.H.M. and Johnson, I.R., 1990). Alle gemeten lichtresponscurves zijn geanalyseerd om deze parameters te schatten.
De fotosynthesemetingen in het najaar van 2002 werden gekoppeld aan de stralingsgegevens. Elke twee minuten werd buiten de kas de hoeveelheid straling geregistreerd. De straling op de plek van de fotosynthesemetingen, in de kas op circa 3 m hoogte, bedraagt ongeveer 62% van de straling buiten de kas. Na analyse bleek dat de stralingssom van 7 dagen voorafgaande aan de fotosynthesemeting de informatie gaf. Als fotosyntheseparameter is de gemiddelde maximale fotosynthese (P_{max}) van 3 replica's boven in het gewas gebruikt.

'Proof of Principle'
Tijdens de najaarsteelt van 2002 werden resultaten van de fotosynthesemeting gebruikt bij het doorrekenen van de scenario's van de setpointgenerator.

Plantgewicht

Ontwikkeling
Het meetsysteem bestaat uit een balk met aan beide uiteinden een gewichtsopnemer. Een opnemer is een metalen 'load cell', voorzien van rekstrookjes. De twee opnemers worden samen op een meetversterker aangesloten. Er zijn 4 van deze gewichtsensoren gebouwd.
De signalen van de meetversterker worden gedigitaliseerd door middel van een A/D-converter. Deze converter is voorzien van een digitale RS-485 aansluiting en kan op een PC worden aangesloten. Het systeem is modulair en kan dus gemakkelijk uitgebreid worden naar meerdere converters of andere apparaten met als voorbeeld een thermokoppel voor meting van bladtemperatuur. Op de PC draait eenvoudige software voor het berekenen van de dagelijkse groei en hoeveelheid geoogst product.
Overdag kan geen goede maat voor de groei verkregen kan worden, omdat de waterstatus van de plant kan variëren door verschuiving van de balans tussen wateropname en verdamping. Gedurende de nacht is de verdamping minimaal door het ontbreken van zonlicht en fotosynthese. Er kan dus 's nachts een gewicht gemeten worden, waarbij de waterstatus veel beter gedefinieerd is. Hierdoor kan eenmaal per etmaal de groei bepaald worden. Wanneer de groei negatief is, kan aangenomen worden dat er tomaten

geoogst zijn of bladeren geplukt. Het verschil tussen het verwachtte plantgewicht en de werkelijk gemeten waarde is dan een maat voor de hoeveelheid geoogst product.



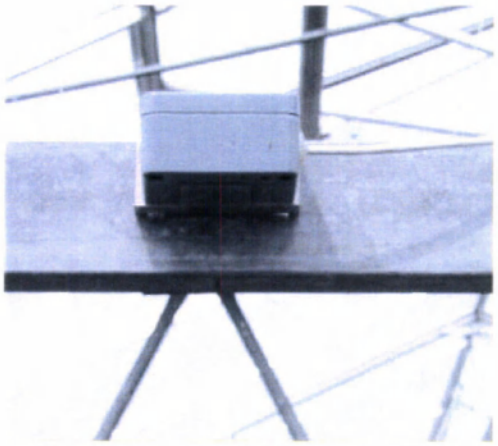
Figuur 4.5.3: Meting van plantgewicht in de kas

'Proof of Principle'
Tijdens de najaarsteelt van 2002 werden meetresultaten van de gewichtsensor gebruikt bij het doorrekenen van de scenario's van de setpointgenerator.

Lichtonderschepping

Ontwikkeling
In de praktijk wordt een tomatengewas geteeld op een witte ondergrond die bovendien gedurende een groeiseizoen vervuilt. In de eerste experimenten werd onderzocht of de CropScan een geschikte sensor is om lichtonderschepping in een tomatengewas op wit plastic te voorspellen en hoe de invloed van de bevuiling van het witte plastic is.
Daarvoor tomatenplanten met een plantlengte van ongeveer 1 meter gebruikt in een experimentele kas. Door plantafstand te variëren werden verschillende plantdichtheden en daarmee LAI-waarden gecreëerd, waarvan lichtonderschepping en reflectie van verschillende golflengtes (tussen 460 en 810 nm) werd gemeten. Er zijn metingen gedaan met een zwarte ondergrond en op wit plastic. Het witte plastic werd bovendien bevuild met zand en met dorre plantresten om de praktijksituatie te simuleren.
Vervolgens werd in de semi-praktijkkas met een tomatengewas de bruikbaarheid van de CropScan nader getest als niet-destructieve meetmethode om lichtonderschepping te voorspellen. Van januari tot mei 2001 zijn op 10 tijdstippen metingen uitgevoerd. Op elk tijdstip is op verschillende plaatsen in de kas gemeten in de middelste rij planten aan zuid-, midden- en noordzijde van de kas. De metingen met de CropScan zijn uitgevoerd op een hoogte van 4.20 m. Op iedere plaats is boven de planten en boven het pad gemeten. Lichtonderschepping is gemeten met lichtstok met de halve rijafstand. De lichtstok is direct boven het gewas gehouden en onderin het gewas. Per meetplaats zijn 8 metingen gedaan en deze zijn gemiddeld. Er is niet gecorrigeerd voor lichtverlies in de kas.
Vervolgens werd een eenvoudige maar doeltreffende sensor gebouwd om uit instraling en gewasreflectie bij 460 nm lichtonderschepping door het gewas af te leiden. Het apparaat werd in de kas geïnstalleerd (figuur 4.5.4). Alleen bij diffuus licht kan een betrouwbare waarde voor lichtonderschepping worden afgeleid. Metingen van de klimaatcomputer in de kas geven aan wanneer sprake is van diffuus licht. De lichtsensor werd uitgebreid getest.

'Proof of Principle'
Tijdens de najaarsteelt van 2002 werden meetresultaten van de lichtsensor gebruikt bij het doorrekenen van de scenario's van de setpointgenerator.



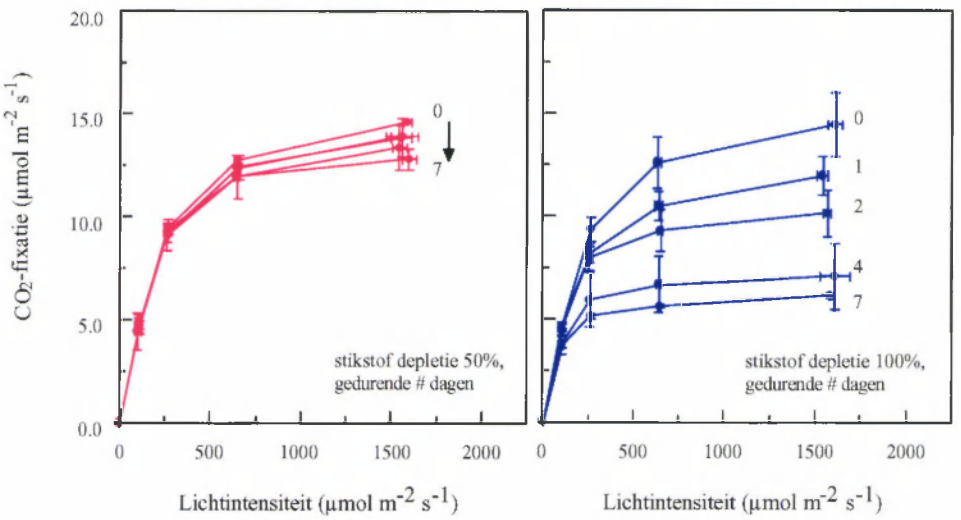
Figuur 4.5.4: Lichtsensor 460 nm in kas

Resultaten

Fotosynthesesensoren

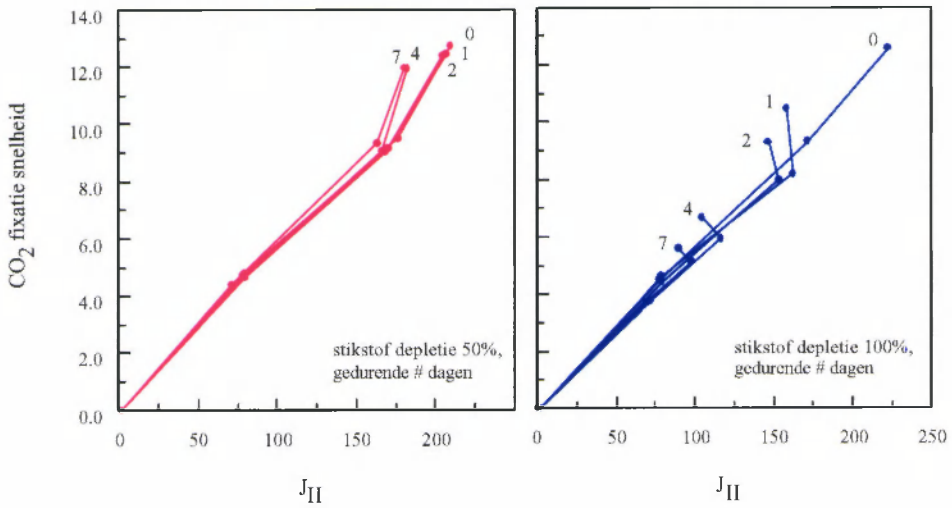
Respons op stikstofdepletie

Al snel is het effect van stikstofdepletie van 12 naar 0 mM op de fotosyntheseparameters meetbaar. Dit effect is zeer duidelijk bij de maximale fotosynthesesnelheid met een daling van van ongeveer 14 naar 6 µmol m^{-2} s^{-1}, maar ook bij lagere lichtintensiteit trad een duidelijk vermindering van de fotosynthesesnelheid op zoals te zien is in figuur 4.5.5.



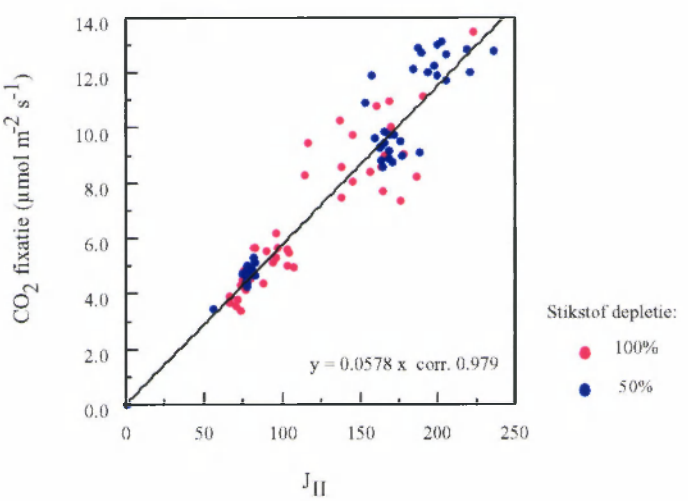
Figuur 4.5.5: Lichtresponsecurve van de fotosynthesesnelheid van tomatenplanten (3 replica's) 0 tot 7 dagen na stiktofdepletie voor 50% (links) en 100% (rechts).

Het effect van stikstofdepletie van 12 naar 6 mM op de fotosynthesesnelheid is minder drastisch. Vooral bij de lagere lichtintensiteiten is de daling van de fotosynthesesnelheid nauwelijks zichtbaar. Opkweek van tomatenplanten bij 12 mM stikstof betekent dat stikstof in overmaat aanwezig is en waarschijnlijk een voorraad is opgebouwd. Blijkbaar kan de plant zich aardig redden wanneer de hoeveelheid stikstof in de voedingsoplossing wordt gehalveerd.



Figuur 4.5.6: Relatie tussen elektronentransportindex (J_{II}) en CO_2-fixatiesnelheid van tomatenplanten (3 replica's) 0 tot 7 dagen na stikstofdepletie voor 50% (links) en 100% (rechts).

Wanneer de relatie CO_2-fixatiesnelheid en elektronentransport-index wordt uitgezet, zie figuur 4.5.6, is ook hier een duidelijk effect van stikstofdepletie waar te nemen. De hoogste waarden van de relatie tussen J_{II} en fotosynthesesnelheid gaan afwijken van de rechte lijn. Dit wordt veroorzaakt door de lage efficiëntie van fotosysteem II. Dit effect wordt verklaard door fluorescentie van andere componenten dan chlorofyl, waarvan het aandeel groter wordt naarmate de efficiëntie van fotosysteem II lager wordt. Dit fenomeen is in andere experimenten ook waargenomen maar als gevolg van het optredende stikstofgebrek treedt de daling van de efficiëntie al op bij lagere lichtintensiteit.

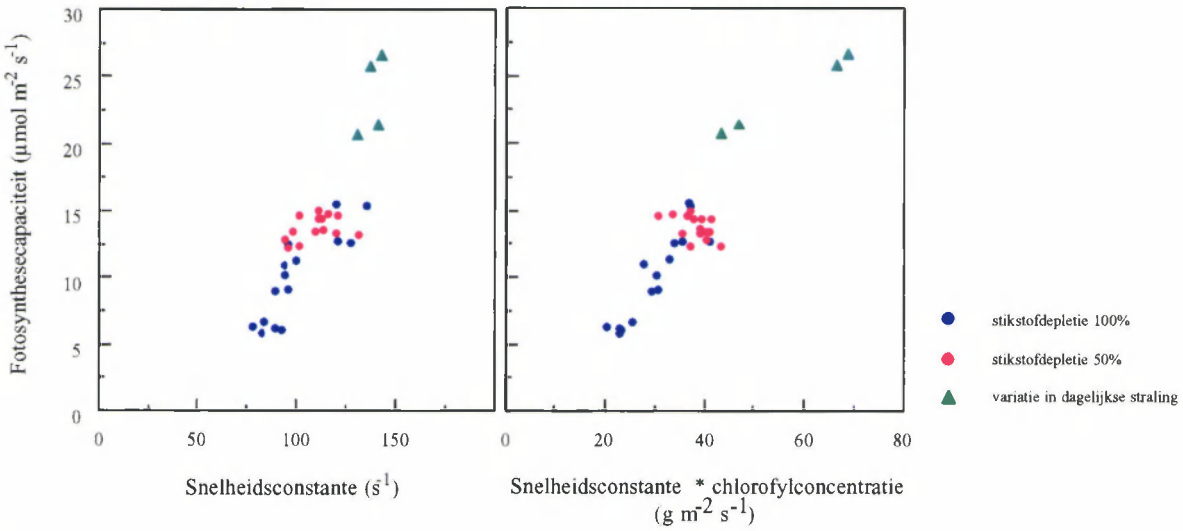


Figuur 4.5.7: Relatie tussen elektronentransportindex (J_{II}) en CO_2-fixatiesnelheid van tomatenplanten 0 tot 7 dagen na stikstofdepletie voor 50% en 100%, met bijhorende regressielijn door de afzonderlijke meetpunten en correlatiecoëfficiënt.

Effect van chlorofylconcentratie

Resultaten van het stikstofdepletie-experiment laten verder zien dat de relatie tussen de snelheidsconstante voor reductie van P_{700}^+ en de maximale snelheid van CO_2-fixatie niet lineair is. Bijvoorbeeld in het geval van stikstofdepletie van 12 naar 6 mM varieert de snelheidsconstante

aanzienlijk terwijl er minder variatie is in de fotosynthesecapaciteit. In het geval van stikstofdepletie van 12 naar 0 mM is er sprake van een curvilineair verband. Bij de verschillende lichtniveaus varieert de snelheidsconstante nauwelijks terwijl er wel een duidelijk verschil is in fotosynthesecapaciteit (figuur 4.5.8, links). Dit wijst erop dat de fotosynthesecapaciteit niet alleen van de snelheidsconstante afhangt. Om na te gaan of de gevonden variatie verklaard kan worden door verschillen in de hoeveelheid P_{700}, die op zijn beurt weer gerelateerd evenredig kan zijn met de hoeveelheid chlorofyl, is het product van de snelheidsconstante en de chlorofylconcentratie berekend. Op deze manier wordt zowel rekening gehouden met de snelheid van reductie als de hoeveelheid P_{700}, in relatie tot de capaciteit voor elektronentransport.



Figuur 4.5.8: Relatie tussen snelheidsconstante voor reductie van P_{700}^+ en de maximale fotosynthesesnelheid (links) en de relatie tussen het product van de snelheidsconstante voor reductie van P_{700}^+ en de chlorofylconcentratie van het blad en de maximale fotosynthesesnelheid (rechts). ●: stikstofdepletie 50 en 100%; ▲: variatie in dagelijkse straling,

De relatie tussen het product van de snelheidsconstante voor reductie van P_{700}^+ en chlorofylconcentratie van het blad en de maximale snelheid van CO2-fixatie blijkt lineair te zijn wanneer deze relatie wordt bekeken voor de gehele dataset, maar ook in de afzonderlijke gevallen wordt een lineaire relatie gevonden (figuur 4.5.8, rechts). Dit betekent dat fotosynthesecapaciteit beter kan worden geschat als naast de snelheidsconstante ook de hoeveelheid chlorofyl in de schatting wordt betrokken.

Effect van lichtabsorptie

Als de hoeveelheid licht die door het blad wordt geabsorbeerd niet constant is, kan een fout worden gemaakt bij de schatting van de elektronentransportsnelheid. Bijvoorbeeld in het geval van een blad met een laag chlorofylgehalte en lage lichtabsorptie wordt de elektronentransportsnelheid overschat als niet de geabsorbeerde hoeveelheid licht maar de hoeveelheid opvallend licht boven het blad voor de berekening wordt gebruikt.

Om na te gaan hoe groot de invloed is van verschillen in lichtabsorptie op de schatting van de CO_2-fixatiesnelheid, is gebruik gemaakt van metingen van CO_2-fixatie en efficiëntie van fotosysteem II en lichtintensiteit in de planten met verschillende niveaus van stikstofdepletie en derhalve verschillende chlorofylgehaltes en lichtabsorptie. De efficiëntie van fotosysteem II is daarbij gemeten met behulp van 2 golflengtes meetlicht, rood meetlicht (660 nm) en groen meetlicht (560 nm). Het rode licht zal sterk door het blad geabsorbeerd worden en daarom vooral de waarden weerspiegelen van de bovenste bladlagen, het groene meetlicht zal minder sterk geabsorbeerd worden en daarom meer een beeld over de gehele diepte van het blad. Het blijkt dat bij de meting met groen meetlicht de relatie tussen elektronentransport-index en CO_2-fixatiesnelheid verschillend is bij verschillende niveaus van

stikstofdepletie. Echter, bij de meting met rood licht wordt een zelfde relatie gevonden tussen elektronentransport-index en CO_2-fixatiesnelheid voor alle niveaus van stikstofdepletie. Dit betekent dat er, mits rood meetlicht gebruikt wordt, geen effect is van verschillende absorptie op de schatting

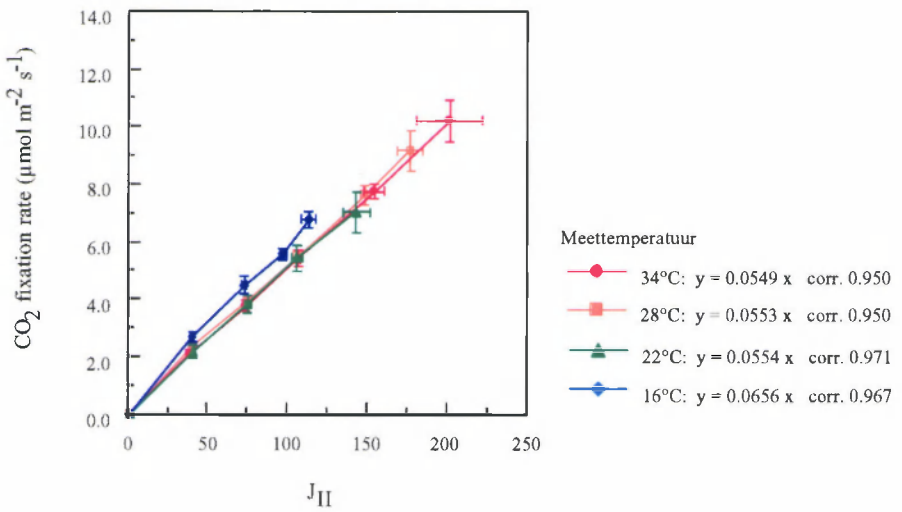
CO_2-fixatiesnelheid.

Relatie met meettemperatuur

Zoals verwacht stijgt de maximale fotosynthesesnelheid met de meettemperatuur, van circa 7.5 bij 16°C naar gemiddeld 10.5 µmol m-2 s-1. Deze fotosynthesnelheden liggen relatief laag. Dit is onder andere te wijten aan een lage groeilichtintensiteit.

De lichtresponscurves zijn beschreven met behulp van de vergelijking die in materiaal en methode bij metingen in de praktijkkas wordt behandeld. Daaruit blijkt dat de lichtresponscurve een andere vorm heeft bij verschillende meettemperaturen. De initiële kwantumefficiëntie is bij de lagere temperatuur hoger, met andere woorden het licht wordt efficiënter gebruikt, terwijl de kromming van de curve naar lichtverzadiging sterker wordt bij hogere temperatuur.

De relatie tussen elektronentransportindex (J_{II}) en de CO_2-fixatie snelheid geeft een kleine verschuiving te zien bij de laagste meettemperatuur (figuur 4.5.9). Bij een zelfde elektronentransportindex wordt dan meer CO_2 gefixeerd. Dit ligt theoretisch gezien in de lijn van de verwachting omdat Rubisco bij lagere temperaturen minder goed O_2 bindt zodat relatief meer reducerend vermogen beschikbaar is voor het binden van CO_2.

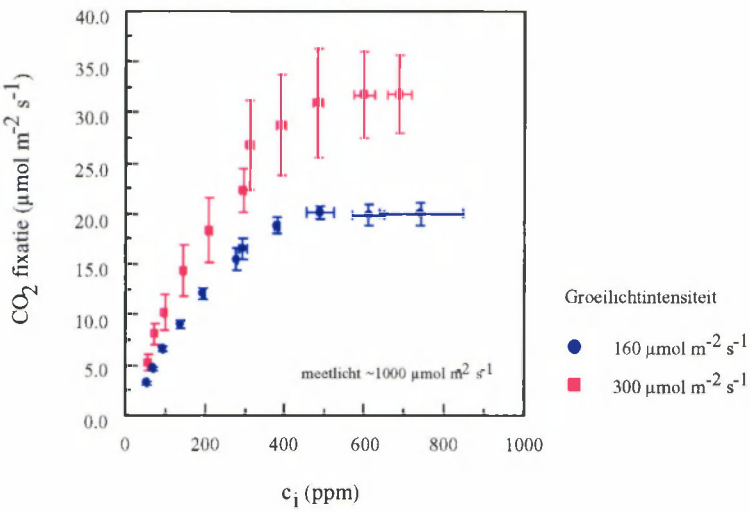


Figuur 4.5.: Relatie tussen elektronentransportindex (J_{II}) en CO_2-fixatiesnelheid van planten gekweekt bij 22 °C en gemeten bij 4 verschillende temperaturen, met bijbehorende functie na lineaire regressie met correlatiecoëfficiënt

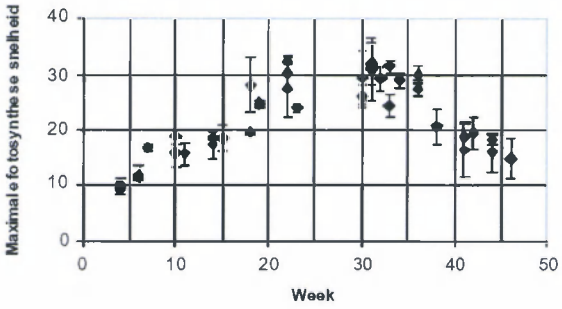
Relatie met CO_2-concentratie

Beide A/c_i-curves in figuur 4.5.10 laten zien dat de fotosynthesesnelheid gemeten bij 1000 µmol m^{-2} s^{-1} sterk afhangt van de interne CO_2-concentratie en dus ook van de CO_2-concentratie in bijvoorbeeld de kas. Nadat de planten zijn opgekweekt bij de hogere lichtintensiteit (HL) wordt zelfs een fotosynthesecapaciteit van gemiddeld ruim µmol m^{-2} s^{-1} tegen ruim 20 µmol m^{-2} s^{-1} bij ongeveer 350 ppm CO_2. Bij planten die bij de lagere groeilichtintensiteit (LL) zijn opgekweekt heeft een hogere CO_2-concentratie weinig effect op de maximale fotosynthesesnelheid. Dit kan worden vertaald naar de situatie in de kas. In het koude, donkere seizoen kan een hoge CO_2-concentratie worden gerealiseerd door stoken terwijl weinig gelucht wordt. Terwijl juist in het zomerseizoen wanneer geprofiteerd zou kunnen worden van een hogere CO_2-concentratie door een hogere fotosynthesecapaciteit, de ramen openstaan en de CO_2-concentratie zelfs kan dalen door hoge CO_2-absorptie door het gewas.

Ook in dit experiment is de relatie tussen fotosynthesesnelheid en elektronentransportindex gelegd. Voor iedere groeilichtintensiteit liggen de meetpunten keurig op een lijn ondanks de grote spreiding in fotosynthesesnelheid bij de met name de hogere lichtintensiteit. Beide relaties lopen nagenoeg parallel alleen draait het elektronentransport bij HL sneller dan bij LL voor dezelfde fotosynthesesnelheid en bereiken de HL-planten veel hogere fotosynthesesnelheid en J_{II}. Beide relaties hebben een wezenlijk andere hellingshoek dan in alle andere experimenten waarbij zowel omgevings- als plantfactoren zijn gevarieerd. Met de informatie uit deze metingen en de literatuur valt te verwachten dat de invloed van de CO_2-concentratie in de kas modelmatig beschreven kan worden. Al zal hiervoor meer onderzoek nodig zijn.



Figuur 4.5.10: Relatie tussen interne CO_2-concentratie en fotosynthesesnelheid bij 1000 µmol m^{-2} s^{-1} van tomatenplanten opgekweekt bij 160 (LL) en 300 (HL) µmol m^{-2} s^{-1} van drie replica's per meetpunt.



Figuur 4.5.11: Maximale fotosynthesesnelheid in de loop van het groeiseizoen 2001 voor de bovenste bladlaag in het gewas

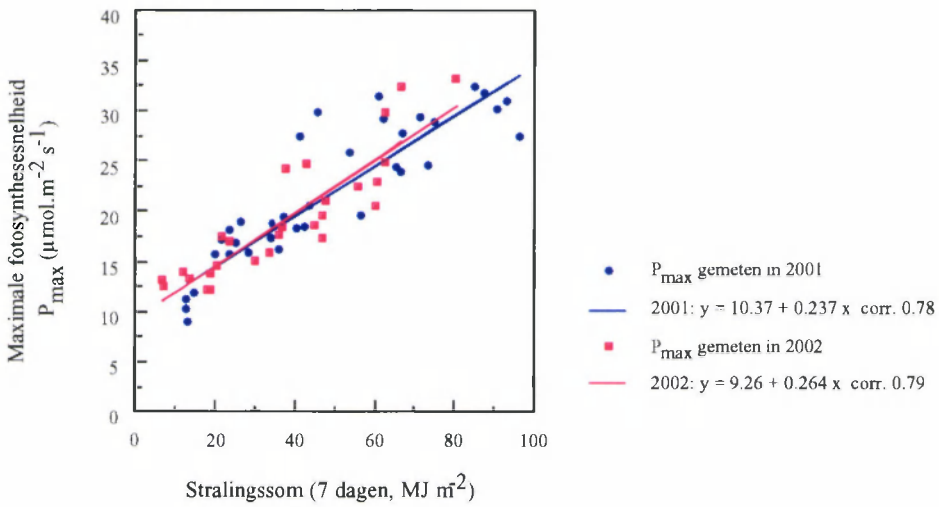
In de semi-praktijkkas

Resultaten uit het groeiseizoen 2001 (figuur 4.5.11) laten zien dat de maximale fotosynthese van het gewas toeneemt tijdens de eerste helft van het teeltseizoen vervolgens daalt in de tweede helft, ook al werd in week 30 gestart met een nieuwe teelt. In 2002 werd een vergelijkbaar verloop gemeten.

De initiële kwantumefficiëntie wordt lager naarmate de bladeren lager in het gewas hangen en de kromming wordt juist wat sterker. Het effect van een hogere bladleeftijd en verminderde instraling kunnen daarbij niet onderscheiden worden. De metingen uitgevoerd in 2001 en 2002 zijn gebruikt om met het groeimodel door te rekenen wat de invloed is van de gemeten variatie van de fotosynthesesnelheid voor groei en nutriënten behoefte, en aan de vraag of fotosynthese ingeschat

moet worden middels een groeimodel of door gebruik te maken van een on-line meting. Dit is uitgevoerd binnen deelproject 7, Plantmodel. Middels een gevoeligheidsanalyse is bekeken wat de variatie in bijvoorbeeld maximale fotosynthesesnelheid betekent voor de gemodelleerde groei en productie van het gewas.

Het verloop van de maximale fotosynthesesnelheid tijdens het groeiseizoen wekt de indruk dat de fotosynthesecapaciteit in grote mate bepaald wordt door de hoeveelheid straling en minder door het stadium waarin het gewas verkeert. Dit verloop van de fotosynthesecapaciteit tijdens het groeiseizoen geldt ook voor de andere bladlagen in het gewas, maar op een ander maximum niveau.
De maximale fotosynthesesnelheid wordt voor bijna 80% verklaard door straling in de week die hieraan voorafgaat (figuur 4.5.12). Voor de straling is de stralingssom van de week voor de fotosynthesemeting gekozen daar deze de beste correlatie gaf met de fotosynthese. De relatie tussen straling en fotosynthese is in 2001 en 2002 vrijwel gelijk. De punten in de figuur geven aan de spreiding enorm is en dat ook andere omgevingsfactoren een grote rol hebben in het bereiken van een zekere fotosynthesecapaciteit.



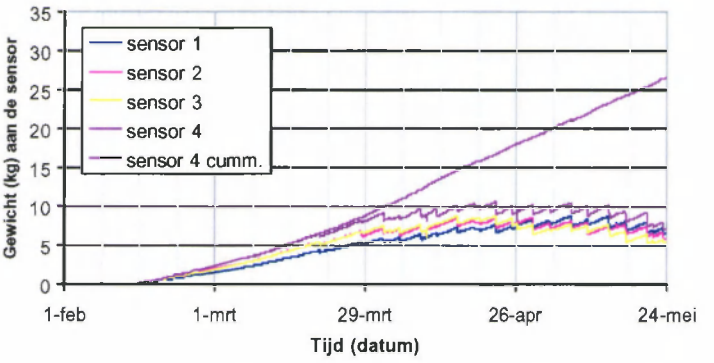
Figuur 4.5.12: Relatie tussen de maximale fotosynthesesnelheid in de top van het tomatengewas en de stralingssom van 7 dagen voorafgaand aan de meting, in 2001 en 2002, met regressielijn en correlatiecoëfficiënt.

Plantgewicht

Ontwikkeling

Het meetsysteem voor plantgewicht is in eerste instantie getest in een experimentele kas. De resultaten in 2001 lieten zien dat de nauwkeurigheid van de sensoren voldoende was om in een volgroeid gewas gewichtstoename per dag te meten. Bij één van de vier geteste sensoren was de nauwkeurigheid aanzienlijk beter, zodat deze ook in de beginfase van de groei voldoende nauwkeurig gewichttoename kon meten.

Van de andere sensoren is de nauwkeurigheid verder vergroot, zijn enige aanpassingen gedaan en zijn de gewichtsensoren gebruikt in de semi-praktijkkas in de teelt van 2002, onder andere ten behoeve van de 'Proof of Principle'.



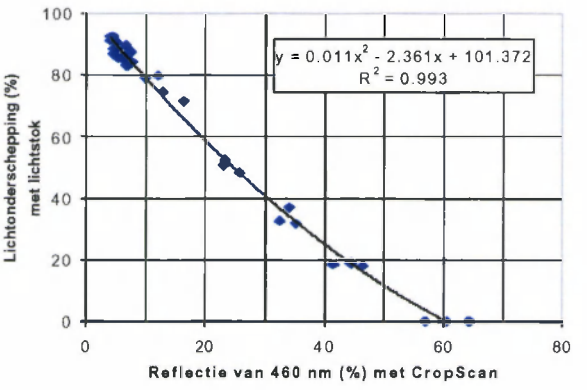
Figuur 4.5.13: Het gewicht van 3 tomatenplanten per gewichtsensor (1 t/m 4) van februari tot eind mei 2002 in de semi-praktijkkas. Van sensor 4 is tevens het cumulatieve gewicht weergegeven.

De sensoren zijn getest met een referentiegewicht dat aan de tomatenplanten werd gehangen. Uit deze test bleek dat de sensoren een meetfout maken tussen 0.4 en 4.5% afhankelijk van de sensor. Deze meetfout is eenvoudig te corrigeren. Figuur 4.5.13 laat het geregistreerde gewicht aan de vier sensoren zien. Typisch is het zaagtandverloop dat veroorzaakt wordt door het oogsten van tomaten en het plukken van blad. Van sensor 4 wordt tevens het cumulatieve gewicht weergegeven. Uit deze lijn kan de groeisnelheid worden afgeleid.

Lichtonderschepping

Ontwikkeling

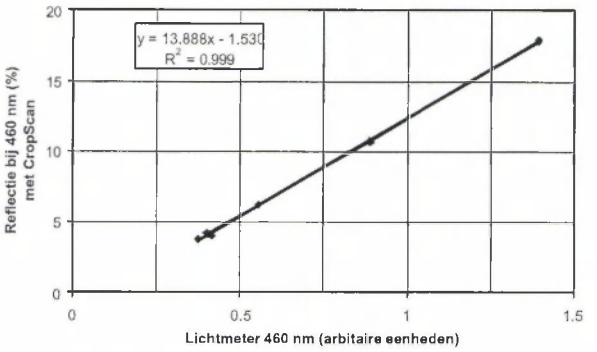
Bij tomaatplanten, neergezet op een zwarte ondergrond werd een goede correlatie gevonden tussen lichtonderschepping en de reflectie van 810 nm. Op een witte ondergrond werd een goede correlatie gevonden tussen lichtonderschepping en de reflectie van licht met een golflengte van 460 nm gemeten met de CropScan. Bij lichtonderschepping lager dan 50% wordt de meting verstoord door vervuiling van het plastic. Waneer lichtonderschepping hoger wordt dan 50% is er niet of nauwelijks verstoring door het vuil worden van het witte plastic.



Figuur 4.5.14: Relatie tussen lichtonderschepping gemeten met de lichtstok en de reflectie van 460 nm gemeten met een CropScan. Met 2e orde polynoom en correlatiecoëfficiënt.

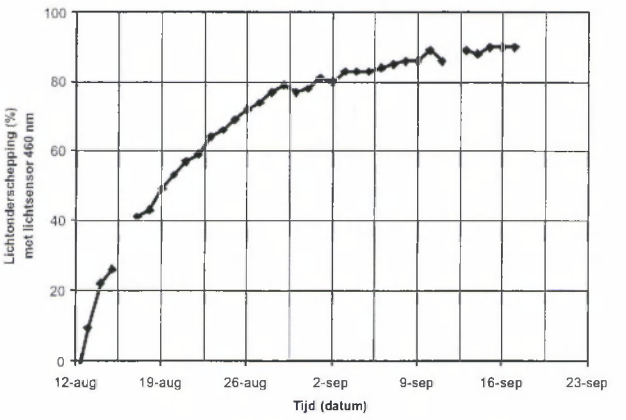
In figuur 4.5.14 is de relatie tussen reflectiemeting met de CropScan en lichtonderschepping gemeten met de lichtstok weergegeven. Er werd een duidelijk verband gevonden tussen gewasreflectie en lichtonderschepping over de groeiperiode waarbij lichtonderschepping varieerde van 0 tot ca. 90%.
Op grond van deze resultaten werd de lichtsensor 460nm ontworpen en gebouwd. Deze sensor meet zowel invallend licht als de reflectie van het gewas van licht met een golflengte van 460 nm. Uit de ratio kan vervolgens na calibratie de lichtonderschepping door het gewas worden berekend.
Nadat de lichtsensor 460nm in de kas is geïnstalleerd, werd deze getest door vergelijking met metingen

van de CropScan. Hiervoor werd aan het einde van de teelt bladeren geplukt van volgroeide planten om variatie in lichtonderschepping te creëren. Figuur 4.5.15 laat het verband tussen beide apparaten zien. De relatie is lineair en heeft een hoge correlatiecoëfficiënt.



Figuur 4.5.15: Relatie tussen metingen met de CropScan (%) en de lichtsensor bij 460 nm

De meting met de lichtsensor geeft de ratio tussen invallende straling en de reflectie van licht met een golflengte van 460 nm, dit levert arbitraire eenheden op. Na calibratie kan het percentage lichtonderschepping uit de meetwaarden worden berekend. In figuur 4.5.16 wordt de groei van het gewas tijdens de najaarsteelt van 2002 als percentage lichtonderschepping gemeten met de lichtsensor 460 nm weergegeven. In een periode van 5 weken bereikt het gewas een zodanige bladoppervlakte dat het licht voor ongeveer 90% wordt onderschept.



Figuur 4.5.16: Verloop van de lichtonderschepping (%) van het gewas gemeten met de lichtsensor 460 nm tijdens de najaarsteelt van 2002

Conclusies

- Lichtonderschepping en bladoppervlakte: Er is een prototype sensor op basis van reflectiemetingen bij specifieke golflengten gebouwd en is in een semi-praktijkkas bij tomaat en sla getest. De sensor blijkt zeer goed bruikbaar om lichtonderschepping en bladoppervlakte van het gewas te schatten.
- Plantgewicht: Er is een meetsysteem ontwikkeld voor de meting van het gewicht van het gewas. Dit meetsysteem functioneert goed. Het kan gebruikt worden voor de bepaling van plantgewicht of voor de bepaling van de groei van de plant. De sensoren zijn in een semi-praktijkkas gebruikt om de gemeten toename in plantgewicht te gebruiken als input in gewasgroeimodellen, ten behoeve van de voorspelling van groei en nutriëntenopname.
- Fotosynthese: De nauwkeurigheid van de schatting van fotosyntheseparameters is verbeterd. Metingen van chlorofylfluorescentie, en lichtgeïnduceerde absorptieveranderingen in combinatie

4.6 Deelproject Nutriëntenbehoefte

Deelnemende partijen (onderstrepen verantwoordelijke partner)

Plant Research International

Summary

In the present greenhouse industry nutrients are supplied together with water in a fixed ratio. Usually they are supplied far in excess. This supply method leads to pollution with water and nutrients. Due to this method possibilities to control quantity, timing and quality of production cannot be used. Control of nutrient supply is yet not based on the different nutrients, but is based on the control of the total salt concentration (EC, electrical conductivity) of the nutrient solution. Consequences of this procedure can be that at the same time there is a shortage of one of the nutrients while there is a surplus of other nutrients. In order to be able to control the nutrient supply in relation tot the dynamically changing demand of the crop, knowledge of the regulation of nutrient uptake and the demanded and critical concentrations are necessary.
In this sub project detailed research has been conducted to quantify the regulation of nutrient uptake as well as the regulation of growth by nutrition. This has led to an integrated view on the physiological regulation of plant nutrition in tomato. This regulation is described in a quantitative manner and has subsequently been used to improve the plant models in Sub Project 7 ('Plant model'). Furthermore, it has been shown that it is possible to supply nitrogen in proportion to the daily demand of the crop without limiting production. This allows the possibility to grow a crop at a strongly reduced input of nitrogen.

Samenvatting

In de huidige (glas)tuinbouw worden nutriënten tegelijk met water gedoseerd in een vaste verhouding, over het algemeen in overmaat. Deze werkwijze leidt tot emissie van water en nutriënten en laat mogelijkheden om de kwantiteit, timing en kwaliteit van de productie te sturen onbenut. Sturing van de nutriëntengift gebeurt nu niet op basis van afzonderlijke nutriënten, maar op basis van de geleidbaarheid van de voedingsoplossing (EC). Dit kan een tekort van bepaalde nutriënten en tegelijkertijd een overschot aan andere nutriënten tot gevolg hebben. Om de nutriëntengift te sturen in relatie tot de dynamische vraag van het gewas, is kennis van de regulering van nutriëntenopname en de gevraagde en kritische concentratie noodzakelijk.

In dit deelproject is uitgebreid onderzoek gedaan aan kwantificering van enerzijds de regulering van nutriëntenopname en anderzijds de regulering van de groei door nutriënten. Hieruit is met name voor tomaat een totaalbeeld van de fysiologische regulering ontstaan. Deze regulering is kwantitatief beschreven en vervolgens gebruikt in verbetering van de gewasgroeimodellen in Deelproject 7 ('Plantmodel). Het is verder vastgesteld dat het doseren van stikstof op basis van de dagelijkse plantbehoefte kan zonder de productie te beperken. Dit maakt het in principe mogelijk om te telen bij een zeer sterk verlaagde stikstofinput.

Deliverables

Omschrijving deliverable	Status (% gereed)	Datum Start	Oplevering
Relatie nutriëntengehaltes met teeltfactoren	100	2000-1	2002-4
Kwantificeren van tijdconstanten	100	2000-6	2002-4
Sturen van productkwaliteit	95	2002-1	2002-12
Doseren naar behoefte*)	50*)	2002-4	2003-1
Fysiologische regulatie door N en P voeding	100	2000-1	2002-9

*) Onderzoek m.b.t. Doseren naar behoefte was grotendeels na No Go moment gepland

Inleiding

In de huidige (glas)tuinbouw worden nutriënten tegelijk met water gedoseerd in een vaste verhouding, over het algemeen in overmaat. Sturing van de nutriëntengift gebeurt niet op basis van de afzonderlijke nutriënten, maar op basis van de geleidbaarheid van de voedingsoplossing (EC). Dit kan een tekort van bepaalde nutriënten en tegelijkertijd een overschot aan andere nutriënten tot gevolg hebben. Als de plant meer water nodig heeft voor verdamping, wordt niet alleen meer water maar worden ook meer nutriënten gedoseerd, ondanks het feit dat in het algemeen geldt dat de nutriëntenbehoefte niet afhangt van de verdamping. De nutriëntengift is veel groter dan wat de planten nodig hebben. Tuinders doen dit als een soort verzekering tegen eventuele nutriëntendeficiënties, die tot opbrengstreducties kunnen leiden. Echter deze werkwijze leidt tot emissie van water en nutriënten. Om de nutriëntengift te sturen in relatie tot de dynamische vraag van het gewas, is kennis van de regulering van nutriëntenopname en de gevraagde en kritische concentratie noodzakelijk.
De oorspronkelijke doelen van dit deelproject waren:

- Kwantificeren in welke mate de gewenste en de kritische nutriëntengehaltes en daarmee respectievelijk de nutriëntenbehoefte en nutriëntendeficiëntie afhangt van teeltfactoren
- Kwantificeren van de tijdconstanten waarmee de plant zijn nutriëntenbehoefte aanpast aan veranderende omstandigheden. Dit bepaalt o.a. de snelheid waarmee de nutriëntenvoorziening bij de wortels moet kunnen worden geregeld.
- Sturen van productkwaliteit door middel van gereguleerde voeding
- Kwantificeren van de fysiologische regulatie van groei door N en P voeding
- Implementatie van techniek van doseren naar behoefte in een steenwolsysteem in een experimentele kas (In de planning na het No Go moment)

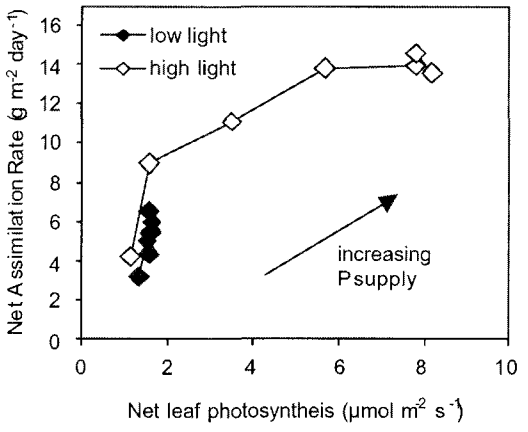
Materiaal en methode

Er zijn een groot aantal experimenten uitgevoerd worden onder volledig geconditioneerde klimaatcondities van klimaatkamers en bij wisselende klimaatcondities in kassen. Er worden zowel experimenten gedaan met planten (tomaat, sla) gekweekt op watercultuur opdat de nutriëntenhuishouding optimaal gecontroleerd kan worden als met planten gekweekt op een kunstmatig substraat (steenwol). Tevens zijn uitgebreide literatuurstudies verricht.

Resultaten

Groeiregulatie door fosfor en stikstof

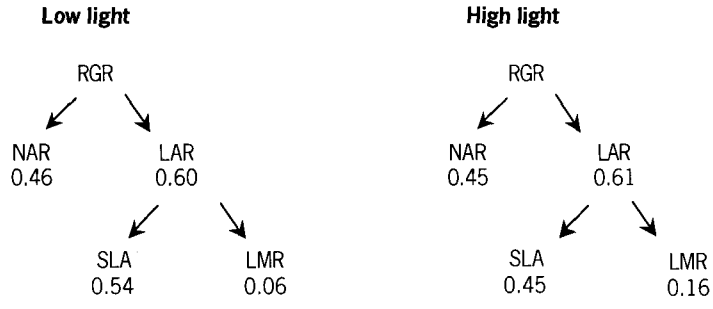
Fosfor en stikstof zijn twee belangrijke nutriënten voor plantengroei. De effecten van deze nutriënten op groei zijn onderzocht door de relatieve groeisnelheid (RGR; mg g^{-1} dag^{-1}) onder te verdelen in een morfologische component en een fysiologische component. Deze morfologische component is de bladoppervlakte per eenheid plantgewicht (LAR; m^2 kg^{-1}).
De fysiologische component is de netto assimilatie snelheid (NAR; g mg^{-2} dag^{-1}). Uit experimenten met fosfor is gebleken dat bij ernstige fosforlimitatie vooral de netto assimilatie snelheid (NAR; g m^{-2} dag^{-1}) van belang is en dat bij milde fosforlimitatie het bladoppervlak per plantgewicht (LAR; m^{-2} kg^{-1}) de belangrijkste factor is in het bepalen van de effecten van fosfor op de groeisnelheid.



Figuur 4.6.1 De relatie tussen de netto blad fotosynthese en de netto assimilatie snelheid.

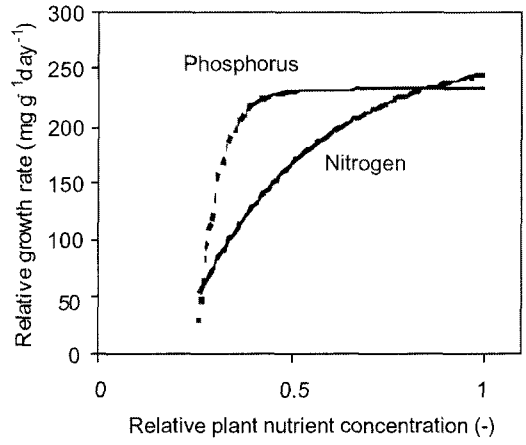
Omdat NAR zo belangrijk is in het bepalen van P effecten op groei zijn fotosynthese metingen uitgevoerd om een uitspraak te kunnen doen over het belang van fotosynthese in het bepalen van NAR bij P limitatie (Figuur 4.6.1). NAR is namelijk grotendeels de balans tussen fotosynthese en respiratie. Bij lage netto blad fotosynthese snelheden heeft een kleine stijging in fotosynthese een groot effect op de NAR. Bij P limitatie speelt fotosynthese dus een belangrijke rol in het verklaren van effecten van P op NAR. Als bij mildere P limitatie NAR minder belangrijk wordt in het bepalen van RGR, vermindert ook het effect van fotosynthese op NAR (Figuur 4.6.1), hier speelt waarschijnlijk een verhoogde respiratie een rol. Bij toenemende fosfor beschikbaarheid wordt de netto blad fotosynthese minder belangrijk in het bepalen van NAR (en dus groei) en stijgt waarschijnlijk het belang van respiratie.

Hetzelfde experiment is ook uitgevoerd met stikstof. Daaruit bleek dat bij stikstof de morfologische component (LAR) het meest van belang is in het bepalen van effecten van stikstof op groei (RGR) (Figuur 4.6.2). Dit is in overeenstemming met wat in de literatuur beschreven is. Het effect van milde en sterke N limitatie op het belang van LAR en NAR in het bepalen van RGR wordt nog onderzocht.



Figuur 4.6.2. Relatieve belang van groei parameters in het bepalen van het effect van toenemende stikstof dosering op RGR bij laag en hoog licht

Wanneer het verloop van de RGR tegen de fosfor of stikstof concentratie in de plant tussen de beide experimenten word vergeleken, valt op dat de curve van RGR tegen de fosfor concentratie in de plant een veel groter plateau heeft van die van RGR tegen de plant stikstof concentratie (Figuur 4.6.3). Een verklaring voor dit verschil kan zijn een relatief hogere luxe consumptie van fosfaat dan van nitraat.



Figuur 4.6.3. Relatie tussen RGR en de fosfor en stikstof concentratie van de plant. De fosfor en stikstof concentraties zijn uitgedrukt in fracties van de concentraties van volledig gevoede planten.

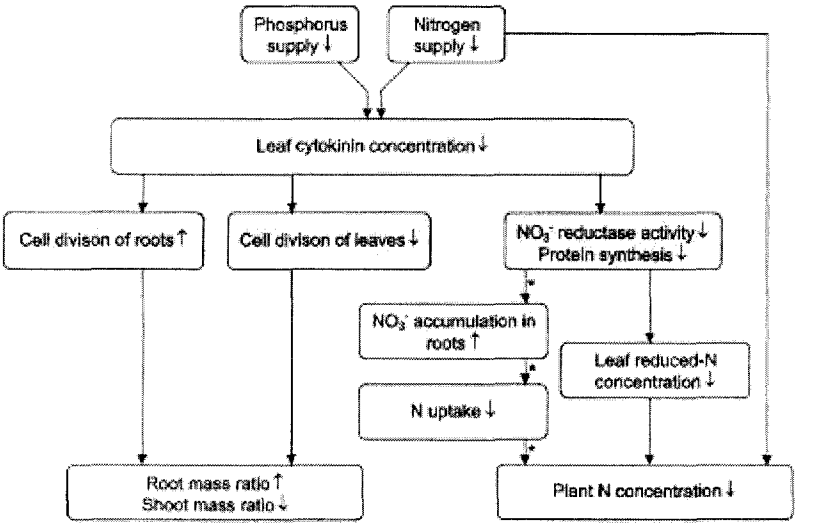
Sturing van stikstofconcentratie in de plant door cytokininen

In experimenten waarin de effecten van stikstof (N) en fosfor (P) voeding op de groei van tomatenplanten werd bestudeerd bleek dat de stikstofconcentratie van de plant daalt als gevolg van een verlaagde fosforvoeding. Deze daling bleek niet verklaard te kunnen worden door een verschuiving in droge stof verdeling van hoog N organen naar laag N organen. Verder is het onwaarschijnlijk dat een gebrek aan energie in de wortels een rol heeft gespeeld bij de verminderde stikstofopname. Mogelijkerwijs spelen cytokininen een rol bij de verlaagde plant N concentratie bij P limitatie. Om deze mogelijkheid te testen zijn cytokininenbepalingen gedaan. In onderstaande tabel zijn de resultaten weergegeven.

Tabel 4.6.1. Concentraties (pmol [g drooggewicht]$^{-1}$) van zeatineriboside (ZR) equivalenten en isopentenyladenosine (IPAR) equivalenten in bladeren.

Nutriëntenbehandeling	N experiment		P experiment	
	ZR	IPAR	ZR	IPAR
Laag (170 mg g^{-1} dag^{-1})	12	83	< 5	136
Hoog (320 mg g^{-1} dag^{-1})	24	148	14	203
Vrije beschikbaarheid	41	221	27	205
LSD (5%)	27	81	18	145

Het is duidelijk dat de cytokinineconcentraties afnemen met een afnemende beschikbaarheid van zowel N als P. De verlaging van de N concentratie in de plant als gevolg van een verlaagde P voeding kan als volgt worden verklaard: een lage beschikbaarheid van P leidt tot een reductie van de cytokinineproductie in de wortels en een verlaagde cytokinineconcentratie in de scheut. Hierdoor kunnen de nitraat reductaseactiviteit en de eiwitsynthese geremd worden met als gevolg een verlaging van de N incorporatie. Dit resulteert uiteindelijk in een verlaagde concentratie N in de plant zoals in onderstaande figuur is weergegeven.



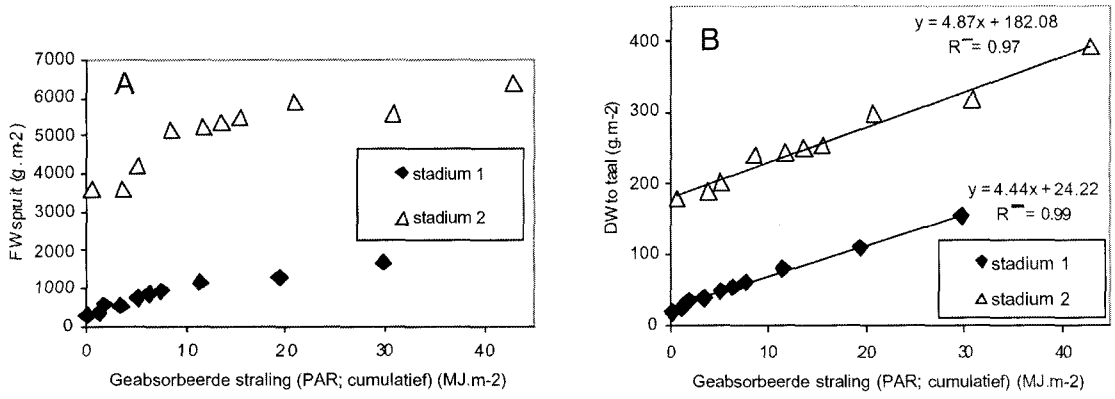
Figuur 4.6.4. Hypothetisch model voor de regulatie van droge stof verdeling en de stikstofconcentratie in de plant door cytokininen. In de tekstblokken betekent ↓ een afname en ↑ een toename. Pijlen tussen de tekstblokken geeft de volgtijdelijkheid van effecten aan. Een * naast de pijlen geeft aan dat de volgtijdelijkheid alleen betrekking heeft op P limitatie.

Effecten van stikstof en fosfor op de fotosynthese

Resultaten van experimenten waarin N en P limitatie werd aangelegd, gaven aan dat als N limiterend is de fotosynthesesnelheid bepaald wordt door het gebruik van assimilaten, terwijl als fosfor gelimiteerd wordt de productie van assimilaten zelf gelimiteerd is. Met behulp van uitgebreide bladfotosynthesemetingen aan planten die zijn opgekweekt bij hoog en laag N en P is dit uitgangspunt getoetst. Het blijkt dat de activiteit van het electronentransportsysteem en de structuren in de chloroplasten die het licht onderscheppen zich aanpassen aan nutriëntenstress. Verder bleken N en P limitatie een heel verschillend effect te hebben op de fotosynthese. Bij N gebrek is de fotosynthese gereduceerd, waarschijnlijk doordat het blad minder efficiënt licht absorbeerde en door een verminderd gebruik, dus ophoping van assimilaten. Wanneer P gebrek optreedt wordt de carboxylatiecapaciteit (i.e. de binding van CO_2) beïnvloed, en dus de productie van assimilaten.

Effecten van N op groei bij sla

In een kasproef is het effect van N-depletie op groei van sla onderzocht. In lijn met eerdere aanwijzingen zien we dat bij stikstoftekort in eerste instantie de groei van het gewas geremd wordt door een verlaging van het watergehalte, waardoor de versgewichtgroei afneemt terwijl de drogestofgroei gelijk blijft. Bovenstaande kan afgeleid worden uit het kromlijnige verband tussen versgewicht en cumulatief geabsorbeerde straling terwijl het drooggewicht een rechtlijnig verband laat zien (figuur 4.6.5).



Figuur 4.6.5. Relatie tussen versgewicht (A) van de spruit en totaal drooggewicht (B) van sla (g m^{-2}) en de geabsorbeerde hoeveelheid straling.

Regulatie van nutriëntenopname, wateropname en groei tijdens calciumonthouding en herstel

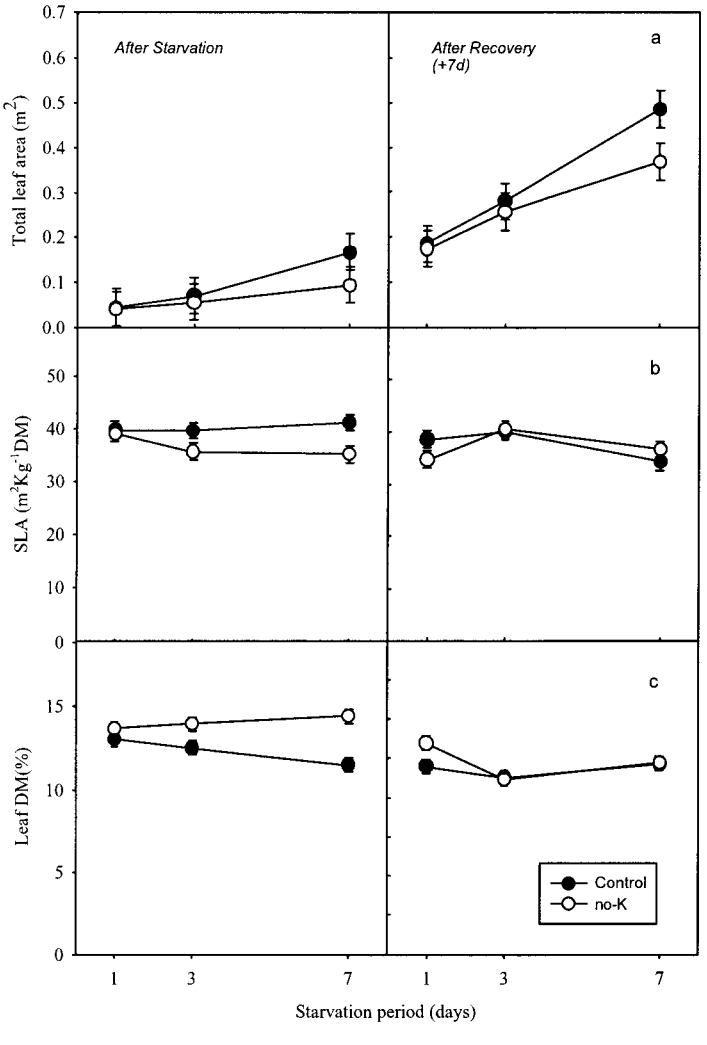
Voor modellering van nutriëntenopname is een belangrijke vraag met welke tijdstap gesimuleerd moet worden, hoe snel de plant reageert op een verandering in voeding en over welke periode de plant kan compenseren. Hiervoor zijn experimenten met vegetatieve tomatenplanten uitgevoerd. De planten zijn opgekweekt onder volledig gecontroleerde omstandigheden in een klimaatkamer. De groei, water- en nutriëntenopname worden tegelijkertijd gemeten gedurende periodes van calciumonthouding gedurende 1, 3 of 7 dagen en herstel van de calciumgift gedurende 7 dagen daarna.
De resultaten laten zien dat al na 1 dag calciumonthouding de waterrelaties van de plant sterk beïnvloed waren. Na 3 dagen calciumonthouding namen zowel vers- als drooggewicht af. Na 1 dag calciumonthouding en daarna een 7-daagse herstelperiode was de fotosynthesesnelheid volledig hersteld en vertoonden de planten een opname van 70% vergeleken met de controleplanten. Tomaten bleken niet in staat groei en netto fotosynthese te herstellen na 3 dagen zonder calcium.

Effect van kaliumonthouding op groei en opname van water en nutriënten

Voor modellering van nutriëntenopname is een belangrijke vraag met welke tijdstap gesimuleerd moet worden, hoe snel de plant reageert op een verandering in voeding en over welke periode de plant kan compenseren. Hiervoor zijn experimenten met vegetatieve tomatenplanten uitgevoerd. De planten zijn opgekweekt onder volledig gecontroleerde omstandigheden in een klimaatkamer. De groei, water- en nutriëntenopname worden gelijktijdig gemeten gedurende periodes van kaliumonthouding gedurende 1, 3 of 7 dagen en herstel van de kaliumgift gedurende 7 dagen daarna. Kaliumonthouding gedurende 1 dag had geen effect op droge stof toename (groei) van de plant. Na 3 dagen was er wel een duidelijke reductie van de groei. De resultaten laten zien dat na 3 dagen kaliumonthouding de specifieke bladoppervlakte afnam (figuur 4.6.6), terwijl na 7 dagen de droge stof verdeling naar de wortels toenam. Na 3 dagen kaliumonthouding en daarna een 7-daagse herstelperiode bleken groei en de kaliumconcentratie in de plant zich volledig te kunnen herstellen (figuur 4.6.7). Na 7 dagen kaliumonthouding bleek volledig herstel niet meer mogelijk. De resultaten wijzen er op dat de kaliumopname gemodelleerd kan worden als een lineaire functie van de droge stof groeisnelheid.

Dynamiek van nutriëntenopname door een tomatengewas in relatie tot kasklimaat

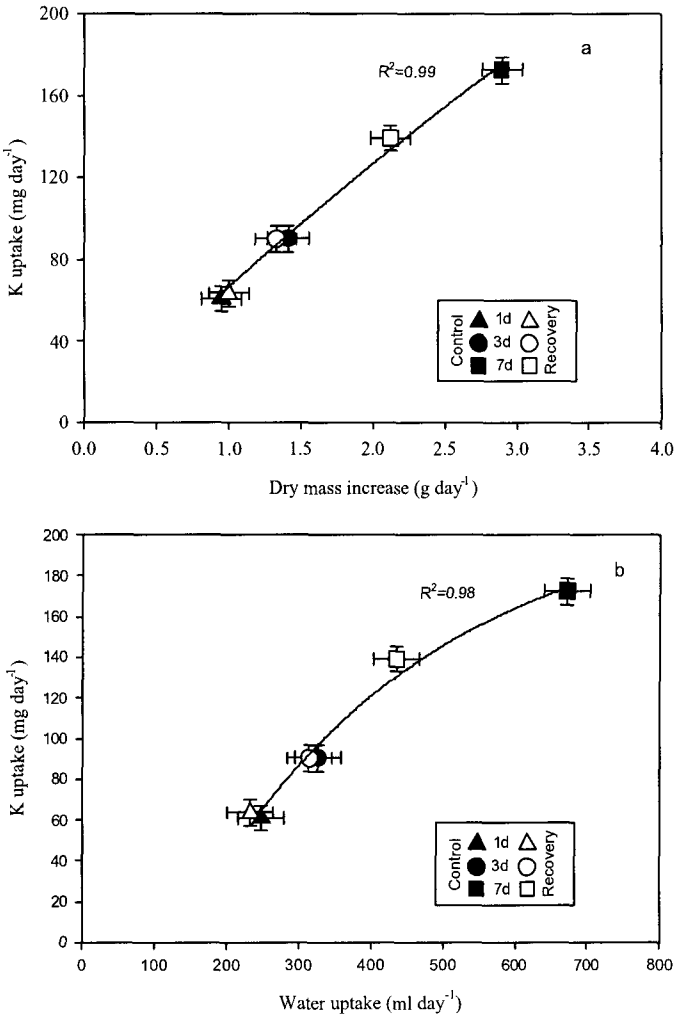
De basis voor de ontwikkeling voor het geïntegreerde monitoring- en besturingssysteem dat in het project opgeleverd moet worden, wordt gevormd door een model, waarmee de gewenste voedingsstromen optimaal gestuurd kunnen worden. Binnen de gebruikte modellen wordt gerekend met één waarde voor nutriëntenopname per dag. Om de nutriëntenopname nauwkeuriger te kunnen beschrijven, is in 2001 een experiment uitgevoerd waarin de opnamedynamiek van de nutriënten die in het model gebruikt worden gedurende de dag bepaald zijn onder verschillende klimaatomstandigheden (instraling en temperatuur in de kas) van planten in verschillende ontwikkelingsstadia.



Figuur 4.6.6. Totaal bladoppervlakte, specifieke bladoppervlakte (SLA) en droge stof gehalte van het blad van jonge tomatenplanten na 1, 3 of 7 dagen kaliumonthouding (linkerfiguren) en na 1, 3 of 7 dagen kaliumonthouding gevolgd door 7 dagen herstel (rechterfiguren).

De nutriëntenopname is gevolgd door periodiek met intervallen van 2 uur monsters van de voedingsoplossing te nemen. Hierin zijn de volgende nutriënten bepaald: stikstof, fosfaat, sulfaat, kalium, calcium en magnesium. Wateropname en groei van de planten is gevolgd met behulp van respectievelijk balansen en treksensoren. De treksensoren zijn ontwikkeld in deelproject 5

'Plantensensoren' en in dit deelproject getest. Vanwege de lage concentraties en geringe concentratieverschillen in een tijdspanne van 2 uur bleek het niet mogelijk de nutriënten fosfaat, sulfaat, kalium, calcium en magnesium te relateren aan het kasklimaat. De stikstofopname bleek sterk gecorreleerd te zijn aan de straling. Deze data waren in deze vorm bruikbaar voor het plantmodel (deelproject 7).



Figuur 4.6.7. Kaliumopname in relatie tot de groei (droge stof toename; a) en de wateropname (b).

Stikstofdosering naar behoefte: sturing van groei en kwaliteit

In samenwerking met ATO (kwaliteitsmetingen tomatenvruchten), IMAG (kasruimte), de leerstoelgroep Tuinbouwproductieketens (kwaliteitsmetingen tomatenvruchten) en Hortimax (gewichtssensoren) is in de laatste maanden van 2002 een experiment uitgevoerd met een tomatenteelt op steenwol. Aan de tomatenplanten werd stikstof gedoseerd in overmaat (standaardpraktijk; continu 12 mM NO_3) of 100, 85 of 70% van de dagelijkse N-behoefte. Het versgewicht van de plant is dagelijks bepaald en op basis hiervan werd elke ochtend N gedoseerd. In deze behandeling waar naar behoefte

werd gedoseerd was de NO3 concentratie aan het eind van de dag altijd nul mM NO_3 (ter vergelijking de Overmaatbehandeling bevatte 12mM NO_3). De dosering bleek uiteindelijk op 100 ± 0.1, 89 ± 0.2 en 68 ± 4.3% van de behoefte uit te komen. Het cumulatieve versgewicht van de plant (inclusief geplukte bladeren en geoogste vruchten) bleek niet significant beïnvloed te worden door de behandelingen overmaat, 100 of 85%. Dit houdt in dat voor een goede groei de plant met aanzienlijk minder stikstof toekan dan gebruikelijk is in de praktijk. Alleen als de dosering gereduceerd werd tot 70% van de dagelijkse behoefte, was het versgewicht van de plant 12% lager dan bij de overmaat N. Het versgewicht van de geoogste vruchten bleek niet significant verschillend te zijn tussen alle behandelingen. Dit houdt in dat de planten die beperkt stikstof tot hun beschikking hebben, naar verhouding generatiever worden (relatief meer assimilaten naar vruchten sturen). De rijpe vruchten aan de planten zijn periodiek geoogst en hiervan is de kwaliteit (vers- en drooggewicht, kleur, suikers op moment van oogst en na een week bewaring) bepaald. Uit metingen van het ATO bleek dat er geen verschillen konden worden aangetoond in versgewicht, drogestof gehalte of kleur van de geoogste vruchten. Tomaten geteeld op 70 of 100% N bleken minder stevig te zijn dan tomaten geteeld op 85% of overmaat N. Verschillen in suikergehalte waren gering, op 70% en overmaat N geteelde vruchten waren iets zoeter dan op 85 en 100% N. Resultaten van de kwaliteitsmetingen van Tuinbouwproductieketens moeten nog geanalyseerd worden.

Conclusies

In de afgelopen jaren is uitgebreid onderzoek gedaan aan kwantificering van enerzijds de regulering van nutriëntenopname en anderzijds de regulering van de groei door nutriënten. Hieruit is met name voor tomaat een totaalbeeld van de fysiologische regulering ontstaan. Deze regulering is kwantitatief beschreven en vervolgens gebruikt in verbetering van de gewasgroeimodellen in Deelproject 7 ('Plantmodel). Het is verder vastgesteld dat het doseren van stikstof op basis van de dagelijkse plantbehoefte kan zonder de productie te beperken. Dit maakt het in principe mogelijk om te telen bij een zeer sterk verlaagde stikstofinput.

4.7 Deelproject Plantmodel

Deelnemende partijen

Plant Research International, ATO, IMAG, WU-MRS

Summary

A dynamic crop model has been developed that can simulate crop growth, plant-water relations and plant-nutrient relationships well. The model has been coupled to a substrate model (see sub project 4). The development and calibration of the model was based on extensive data sets, which were gathered in sub project 5 and sub project 6. The crop model has been validated on independent data sets, which were gathered from commercial farms. The model appeared to simulate crop growth quite accurately when climate conditions and some cultivation aspects were provided as input variables to the model. Crop models were made self learning, which is a unique feature in the international scientific horticultural world. The self learning capacity consisted of an automatic calibration procedure based on plant sensors (for this the sensors were developed in sub project 5). Feed back from sensor information to the crop model appeared to be very useful for accurate simulation of periodic fluctuations in photosynthesis, leaf area and growth rate. It was concluded that this feed back from sensors is an important prerequisite for successful application of crop models at different farms.
In collaboration with sub projects 4, 5 and 8 a model based Feed-Forward control system for water and nutrients has been developed. This system was based on models, sensors and optimisation techniques. This control system can be considered as a continuous generator for adaptation of set-points for water and nutrient supply. The proof of principle of the this model based control system was shown in a greenhouse experiment during the last six months of the project. The control system appeared to be capable to realise the goals that had been formulated in advance. It was shown that a Feed-Forward control system enables to reduce the drainage of water and nutrients while production increased and the product met the quality requirements.

Samenvatting

Er is een dynamisch groeimodel ontwikkeld dat gekoppeld aan een substraatmodel (zie Deelproject 4) zowel groei, waterhuishouding als nutriëntenhuishouding goed kan simuleren. Voor ontwikkeling en calibratie van het model is gebruik gemaakt van een groot aantal experimentele gegevens welke veelal in Deelproject 5 en Deelproject 6 zijn verzameld. Het plantmodel is gevalideerd op onafhankelijke datasets, welke op praktijkbedrijven zijn verzameld. Het model blijkt de gewasgroei vrij nauwkeurig te kunnen voorspellen op basis van klimaatcondities en enkele teeltmaatregelen.
Voor het eerst in de internationale tuinbouw zijn groeimodellen voorzien van zelflerende aspecten. Deze zelflerendheid is geïmplementeerd in de vorm van autocalibratie op basis van plantsensoren (sensoren ontwikkeld zoals in Deelproject 5). Terugkoppeling van sensorinformatie naar het model blijkt zeer zinvol om tussentijdse schommelingen van fotosynthese, totale bladoppervlak- en gewichtstoename correct te simuleren. Deze terugkoppeling van sensoren wordt als een belangrijke voorwaarde gezien voor succesvolle toepassing van groeimodellen op uiteenlopende bedrijven.
In samenwerking met Deelprojecten 4, 5 en 8 is een model based Feed-Forward regeling van water en nutriënten uitgewerkt op basis van modellen, sensoren en optimalisatietechniek. Deze regeling kan gezien worden als een continue generator van aanpassingen aan setpoints voor water en nutriëntengift. De proof of principle van deze model based Feed-Forward regeling is het laatste halfjaar van het project in een kasexperiment geleverd. De regeling bleek in staat om de van te voren gedefinieerde doelstellingen (de optimalisatiecriteria) te realiseren. In meer technische zin is het –hoewel er nog enkele 'kinderziektes' om verbetering vragen- mogelijk gebleken om een systeem bestaande uit verschillende soft- en hardware componenten operationeel te krijgen, en de optimalisatie mogelijk te

maken. Tenslotte is duidelijk gemaakt dat een Feed-Forward regeling het in principe mogelijk maakt om zowel de drain van water en nutriënten te verminderen als de productie te verhogen, terwijl kwaliteit voldoet aan de gestelde eisen.

Deliverables

Omschrijving deliverable	Status (% gereed)	Datum Start	Datum Oplevering
1. Modelontwikkeling	100	2000-1	2002-7
2. Modelvereenvoudiging	100	2000-1	2001-6
3. Koppeling plant- en substraatmodel	100	2002-1	2002-6
4. Modelvalidatie	100	2001-1	2002-7
5. Zelflerende modellen gekoppeld aan sensoren	100	2001-1	2003-1

Inleiding

De groei en ontwikkeling van kasgewassen kan met wiskundige modellen beschreven worden. Op basis van die modelberekeningen kunnen keuzes gemaakt worden voor bijvoorbeeld de gewenste temperatuur, luchtvochtigheid, CO2-concentratie, voeding etc. met als doel een optimale groeisnelheid en productkwaliteit te realiseren, terwijl de milieubelasting geminimaliseerd wordt.
De regeling van het kasklimaat en de voeding vindt op moderne glastuinbouwbedrijven computergestuurd plaats. De tuinder stelt ten behoeve van deze sturing van het productieproces de computer handmatig in met honderden set-points, welke hij op basis van zijn 'groene-vingergevoel' regelmatig bijstelt. Het is evident dat integratie in de kascomputer van simulatiemodellen die het productieproces beschrijven, de controle over het productieproces sterk kan vergroten.
Doel van dit deelproject was een dynamisch simulatiemodel te ontwikkelen en te valideren. Dit model diende gebaseerd op fysiologische plantprocessen de groei, watergebruik, nutriëntenbehoefte en nutriëntenopname van de plant en productkwaliteit te voorspellen. Door koppeling van simulatiemodel met on-line meting van relevante modelparameters over plantstatus en het zelflerend vermogen van het model, kan het model onder uiteenlopend teeltomstandigheden betrouwbare voorspellingen geven en eenvoudig toepasbaar gemaakt worden voor andere gewassen.

Materiaal en Methoden

In dit deelproject zijn deskstudies verricht naar de ontwikkeling, calibratie en validatie van zelflerende modellen met feed-back van sensoren. Hierbij is gebruik gemaakt van experimentele data verzameld in andere deelprojecten en aanvullend zijn gegevens op praktijkbedrijven ter validatie verzameld. Ten slotte is in samenwerking tussen een groot aantal deelprojecten een proof-of-principle geleverd voor een modelgebaseerde regeling in een proef in een onderzoekskas.

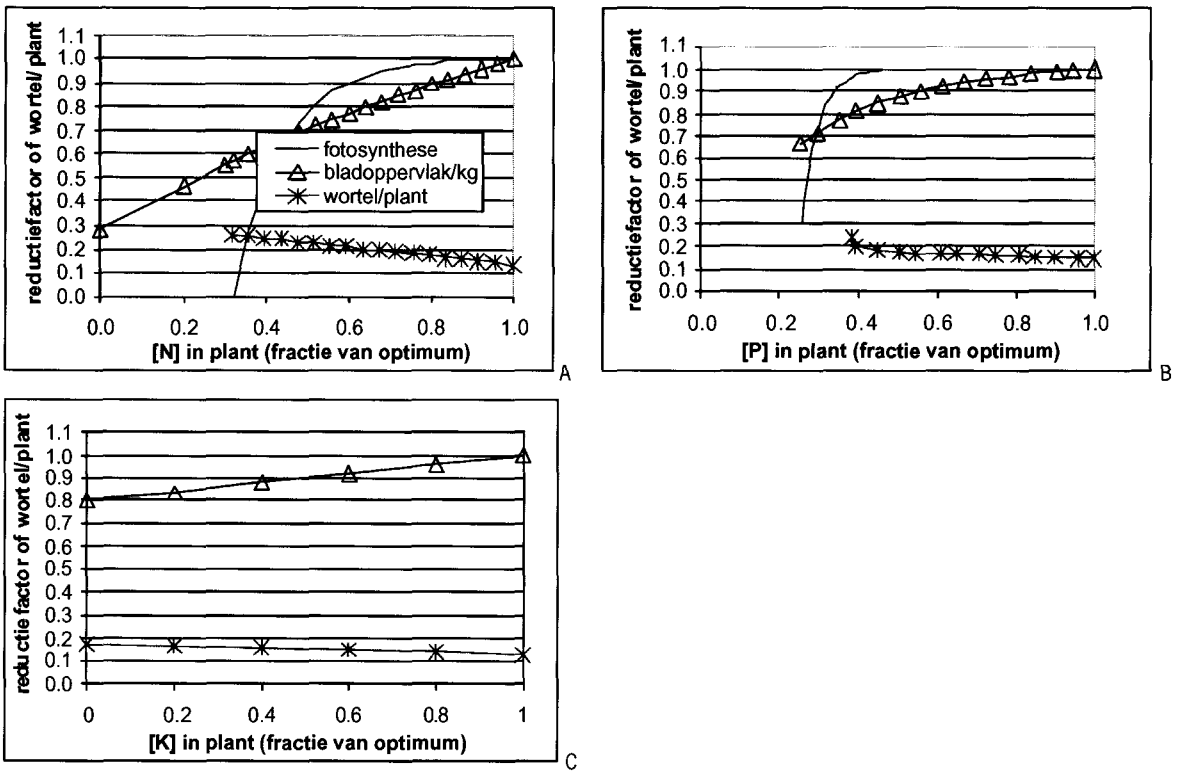
Resultaten

Modelontwikkeling- effecten van sub-optimale voeding op gewasgroei

In het gewasgroeimodel zijn effecten van alle macronutriënten (stikstof, fosfor, kalium, calcium, zwavel en magnesium) op de groei van het gewas geïncorporeerd. De onderliggende kwantitatieve gegevens zijn experimenteel bepaald in deelproject 6 'Nutriëntenbehoefte' en zijn aangevuld met literatuurgegevens.

Op basis van deze gegevens werd duidelijk dat effecten van nutriëntentekorten op gewasgroei tot stand komen door effecten op drie plantprocessen, en wel de processen:
1. Fotosynthese

2. Bladontwikkeling
3. Drogestofverdeling



Figuur 4.7.1. Reductie van fotosynthese en specifiek bladoppervlak, en effect op de drogestofverdeling naar de wortel (ratio tussen wortelgewicht en totaal vegetatief gewicht) van tomatenplanten voor de elementen stikstof (A), fosfor (B) en kalium (C).

Per plantproces is voor elke nutriënt afzonderlijk het relatieve effect van de nutriëntenconcentratie in de plant gekwantificeerd. In figuur 4.7.1, wordt voor de elementen N, P en K de relatieve effecten op fotosynthese, bladontwikkeling en drogestofverdeling weergegeven. In het model wordt per proces nagegaan welk nutriënt de sterkste limitatie vertoont. Dit nutriënt bepaalt de uiteindelijke reductie van het plantproces als gevolg van nutriëntentekort.

Koppeling plant-substraatmodel

Het plantmodel is gekoppeld aan een substraatmodel, zodat de water en nutriëntenhuishouding in plant en substraat als een continuüm gesimuleerd kan worden. voor beschrijving van deze taak wordt verwezen naar Deelproject 4 'Substraatfysica'

Vereenvoudigen van model.

In verband met de relatief lange rekentijd van model was in de projectplanning voorzien dat het model mogelijk vereenvoudigd zou moeten worden. In plaats van vereenvoudiging van het model bleek een alternatief efficiënter met voordelen voor zowel integratie in het regelsysteem als voor de koppeling met sensoren: dit alternatief betrof het ombouwen van het model tot een DLL die een statusdump kan afgeven en inlezen.
Tijdens het project was namelijk gebleken dat om in het model feed-back informatie van sensoren te kunnen gebruiken en om het model in een regelsysteem optimaal te kunnen gebruiken, een aantal aanpassingen van de modelsoftware nodig was. Deze aanpassingen hadden betrekking op het model kunnen aanroepen als DLL (dynamic link library) en het kunnen maken van een volledige statusdump om vervolgens later met deze (of een andere) status weer verder te kunnen rekenen. Dit was niet voorzien bij aanvang van het project en heeft een grote tijdinvestering gevraagd.

Met de hier gekozen aanpak werd tevens hetzelfde doel ((verkorting van rekentijd) bereikt als wat het doel was van vereenvoudiging. Bovendien had deze aanpak voordelen ten opzichte van vereenvoudiging. Vereenvoudiging zou als nadeel hebben dat veel van de mogelijkheden tot koppeling met sensoren zouden komen te vervallen, of dat het model erg in onbalans zou raken (bijvoorbeeld veel aandacht voor sensorkoppeling, en weinig aandacht voor de drogestofverdeling).

Er zijn nieuwe generieke routines in Fortran geschreven die het mogelijk maken om tijdens de simulatie al die variabelen naar een file weg te schrijven die voor een correcte voortzetting van het model van belang zijn. De uit te voeren procedure is als volgt:

1. Het simulatiemodel simuleert het gewas tot aan elk gewenst moment waarop een beslissing t.a.v. regelstrategie moet worden genomen of sensormeting wordt uitgevoerd, en vanaf welk moment de scenarioberekeningen moeten worden uitgevoerd.
2. Er wordt een statusdump naar een file uitgevoerd.
3. Uitgaande van de situatie op dat moment worden een aantal scenarioberekeningen uitgevoerd. Aan het begin van iedere scenarioberekening wordt de uitgangsituatie ingelezen. Dit voorkomt dat steeds vanaf dag 0 moet worden gerekend, wat extra tijd zou vergen.
4. Aan het einde van iedere scenarioberekening wordt weer een statusdump uitgevoerd, of een meer beperkte uitvoer gegenereerd
5. Deze informatie vormt de basis voor de vorming van een metabase.

Belang van fotosynthesemetingen voor plantmodel

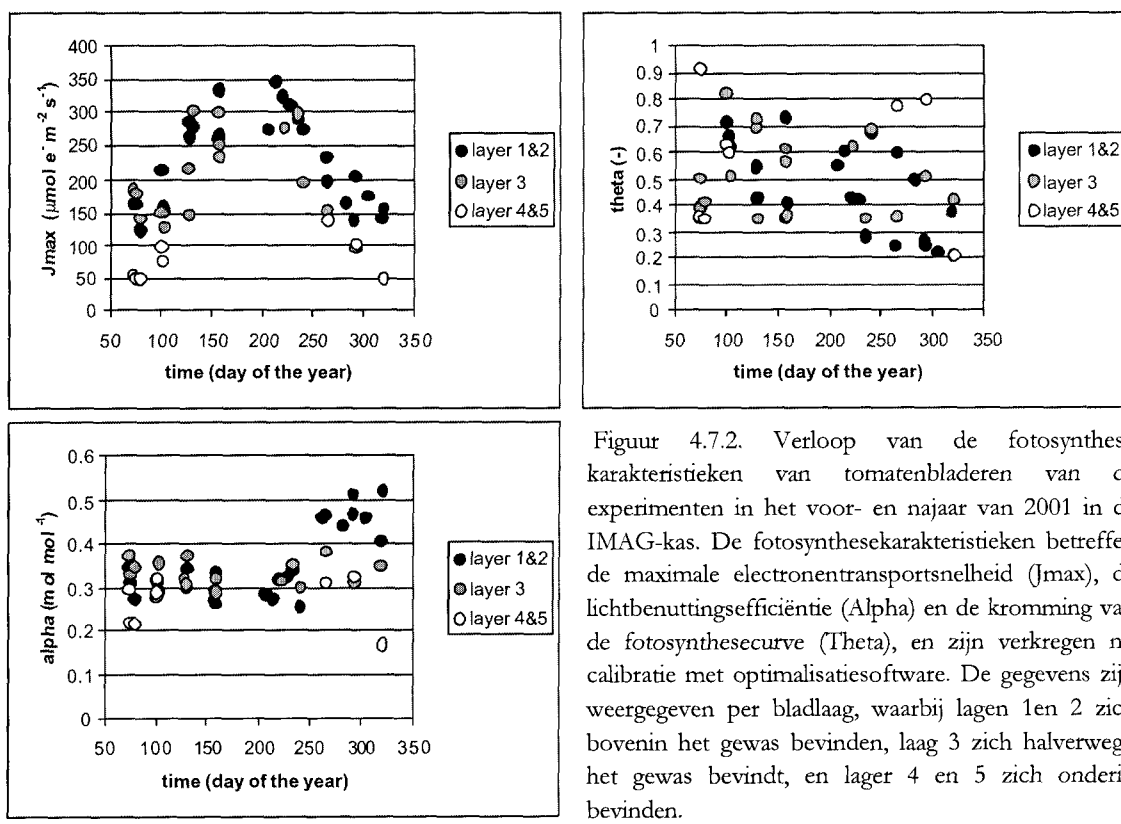
In deelproject 5 zijn een groot aantal fotosynthesemetingen uitgevoerd en beschreven. Voor het plantmodel zijn deze gegevens gebruikt om de parameters in het model (off-line) te calibreren. Tevens is geanalyseerd welke variatie in fotosyntheseparameters voorkomt en tot welke verschillen in productie en nutriëntenopname dit kan leiden. Deze informatie is essentieel om te kunnen beoordelen of het belangrijk is om model tijdens een teelt geregeld bij te stellen op basis van fotosynthesesensoren. Tevens is het fotosyntheseprofiel in het gewas geanalyseerd, om vast te stellen of metingen op 1 diepte in het gewas voldoende is en hoe metingen op 1 gewasdiepte vertaald kunnen worden naar fotosynthese op andere gewasdiepten.
Er is een gevoeligheidsanalyse verricht met betrekking tot de gevolgen van de gemeten variatie in fotosyntheseparameters voor gesimuleerde seizoensproductie (metingen zijn verzameld in twee tomatenteelten in IMAGkas in 2001). Hierdoor is een globaal inzicht verkregen in de noodzaak om variatie in van waarden van fotosyntheseparameters aan het model over te dragen. Deze simulaties leidden tot de volgende conclusies:

- De fotosynthesekarakteristieken veranderen duidelijk gedurende een heel seizoen (Figuur 4.7.2.). De maximale electronentransportsnelheid van het fotosyntheseproces (Jmax) vertoont een duidelijke seizoenstrend, en verkrijgt in de zomermaanden de hoogste waarde. De initiële lichtbenuttingsefficiëntie (Alpha) is erg stabiel in de voorjaarsteelt, maar lijkt voor de bovenste en middelste lagen in de najaarsteelt te stijgen. De kromming van de fotosynthesecurve (Theta) tenslotte lijkt voor de bovenste lagen in de loop van het jaar te dalen.
- De effecten op totaal- en vruchtgewicht van de gemeten variatie in fotosynthesekarakteristieken van de
  - onderste bladlagen is zeer klein;
  - middelste bladlaag is eveneens zeer klein;
  - bovenste bladlagen bedraagt maximaal 7% (a.g.v. maximaal 25% verandering);
- Voor het meten van fotosynthesekarakteristieken kan worden volstaan met metingen boven in het gewas. De variatie in fotosynthese karakteristieken op verschillende gewasdiepten blijken namelijk vrij sterk gerelateerd aan die bovenin het gewas en eventuele afwijkingen hiervan blijken nauwelijks door te werken in totale groei van het gewas.
- De meetgegevens zijn gebruikt om de fotosyntheseparameters te calibreren zonder een seizoenstrend in te brengen. Vervolgens is gekeken hoeveel effect het heeft om ook nog rekening te houden met de variatie van fotosynthesekarakteristieken in de tijd. Calibratie van het model op

basis van gemiddelde waarden leverde een duidelijke verandering van de gesimuleerde productie op (zie Tabel 4.7.1). Ook laat de tabel zien dat in de voorjaarsteelt de gesimuleerde productie circa 10% beïnvloed werd door de waargenomen variatie in fotosynthesekarakteristieken. Aangezien naast deze variatie in de tijd er ook variatie tussen kassen bestaat, welke variatie bovendien groter wordt als er suboptimale condities op gaan treden, wordt geconcludeerd dat het zinvol is om on-line fotosynthesesensor beschikbaar te hebben en deze informatie automatisch terug te koppelen naar een plantmodel.

Tabel 4.7.1. Simulatie van totale drogestofproductie bij verschillende waarden voor de fotosynthesekarakteristieken in een voorjaars- (Teelt 1) en een najaarsteelt (Teelt2) van tomaten in Imag-kas in 2001.

	totale drogestofproductie (g/m2)	
	Teelt 1	- Teelt 2
oude parameterwaarden	1639	- 1243
met gecalibreerde gemiddelde parameterwaarden	1477	- 1114
Rekening houdend met variaties in de tijd:	1338	1099



Figuur 4.7.2. Verloop van de fotosynthese karakteristieken van tomatenbladeren van de experimenten in het voor- en najaar van 2001 in de IMAG-kas. De fotosynthesekarakteristieken betreffen de maximale electronentransportsnelheid (Jmax), de lichtbenuttingsefficiëntie (Alpha) en de kromming van de fotosynthesecurve (Theta), en zijn verkregen na calibratie met optimalisatiesoftware. De gegevens zijn weergegeven per bladlaag, waarbij lagen 1en 2 zich bovenin het gewas bevinden, laag 3 zich halverwege het gewas bevindt, en lager 4 en 5 zich onderin bevinden.

Zelflerendheid van plantmodel op basis van autocalibratie en plantsensoren

De water- en nutriëntenbehoefte van het gewas wordt berekend in het plantmodel. Het plantmodel moet valide uitkomsten geven voor het betreffende gewas in de betreffende kassituatie. Omdat van bedrijf tot bedrijf of teelt tot teelt verschillen kunnen zijn die nooit allemaal in een theoretisch model kunnen zitten, is geconcludeerd dat voor daadwerkelijke toepassing van een plantmodel in de praktijk het model zelflerend moest worden gemaakt. Dit wil zeggen dat er terugkoppeling is van gewasstatus middels sensoren. De zelflerendheid is in feite uitgewerkt als een auto-calibratie van enkele van belangrijke modelparameters op basis van frequente sensormetingen van karakteristieken van het gewas. De opzet van dit zelflerende systeem, i.e. modelberekeningen en terugkoppeling via sensorinformatie, wordt beschreven in deze sectie. De daadwerkelijke test wordt beschreven in de

sectie over de 'Proof of Principle van de model based Feed-Forwardregeling'. In deze 'Proof of Principle' is gekozen voor de sensorinformatie van een beperkt aantal gewaseigenschappen, die essentieel geacht werden voor goede inschatting van de groei van het gewas:

1. fotosynthese eigenschappen. De fotosynthese levert de assimilaten voor de groei. Als de assimilatie goed wordt gekwantificeerd, is de basis gelegd voor een goede groeisimulatie.
2. lichtonderschepping. Het bladoppervlak bepaalt de hoeveelheid onderschepte straling en het verdampend oppervlak. Op basis van sensorinformatie over bladoppervlak en fotosythesecapaciteit (zie 1) kan de assimilatenproductie per eenheid kasoppervlak nauwkeurig worden berekend.
3. plantgewicht. In het model is het plantgewicht een resultante van een groot aantal berekeningen en gewas- en teelteigenschappen. Een juiste inschatting van de groei en de daarmee verbonden nutriëntenvraag is noodzakelijk om een hierop afgestemde nutriëntentoediening te realiseren. De toename van het plantgewicht in de tijd wordt via sensoren geregistreerd en on-line verwerkt in het gewasgroeimodel.

De sensoren voor fotosynthese, lichtonderschepping (of bladoppervlakte) en plantgewicht staan beschreven in Deelproject 5.

De sensorinformatie van deze 3 gewaseigenschappen is in een automatische calibratieprocedure (zie paragraaf 4) gebruikt om de modelparameters te fitten die fotosynthese, lichtonderschepping en versgewicht van de plant berekenen. Hoe grijpt deze informatie in op het model:
Ad 1. Fotosynthese: uit de licht-respons curve kunnen de belangrijkste fotosynthese-parameters voor het model berekend worden. Het betreft de parameters 'maximale electronentransportsnelheid' (Jmax), lichtbenuttingsefficiëntie' (alpha) en kromming van de licht-respons curve (theta).
Ad 2. Lichtonderschepping/Bladoppervlak: Lichtonderschepping wordt in het model uitgerekend op basis van het bladoppervlak. de bijgroei van bladoppervlak wordt berekend uit de drogestofproductie van het blad, vermenigvuldigd met het specifiek bladoppervlak (SLA, specific leaf area). Door de SLA aan te passen in de autocalibratie zal het bladopppervlak wijzigen. Voor de SLA-berekening wordt in het huidige model sterk gereguleerd door de parameters minimum- en maximum-SLA: deze parameters worden gebruikt in de calibratie.
Ad 3. Plantgewicht: calibratie van bovengenoemde twee processen maakt de simulatie van de bruto assimilatie op gewasniveau betrouwbaar. De modelberekening van het feitelijke verse plantgewicht bevat echter nog enkele onzekerheden. Er is gekozen voor calibratie van enkele parameters die het plantgewicht sterk beïnvloeden. Deze keuze is enigszins arbitrair: het wil niet zeggen dat de vele andere betrokken parameters zondermeer juist zijn. De meest relevante parameters zijn: (a) vraag naar assimilaten door de vruchten, (b) drogestofgehalte vruchten, (c) correctiefactor voor bruto gewasassimilatie. De verwachting was dat zowel een grotere assimilatenvraag (='sinksterkte') als een lager drogestofgehalte van de vruchten het versgewicht van de plant verhoogt, en dat correctie op de bruto gewasassimilatie (indien nodig na calibratie van fotosyntheseproces en bladoppervlak) alle groeiprocessen beïnvloedt.

Werkwijze autocalibratie
Voorafgaand aan calibratie worden door middel van sensoren plantmetingen (fotosynthese, lichtonderschepping/bladoppervlak, versgewicht) verricht. In het proof of principle experiment van de 'model based Feed-Forward' regeling, waar het geheel experimenteel getest is, werd wekelijks een autocalibratie uitgevoerd.
De gemeten fotosynthese eigenschappen werden de dag na de meting verwerkt in de fotosynthesemodule van het gewasmodel. Hiervoor werd de fotosynthesemodule gedraaid binnen een optimalisatieprogramma, gebaseerd op een genetisch algoritme (zie Jansen, 2002). Het optimalisatieprogramma werd een set fotosyntheseparameters met hun bandbreedte aangeboden, waarna de beste fit tussen simulatie en waarneming werd berekend.

Meting licht-response curve bovenste bladlaag (dinsdag)

↓

Calibratie fotosynthese-parameters met stand-alone fotosynthese-module (woensdag)

↓

Invoer fotosynthese-parameters in plantmodel

↓

Inlezen sensorinformatie m.b.t. (a) versgewicht plant en (b) lichtonderschepping

↓

Simulatie groei en oogst in afgelopen week met plantmodel (niet gekoppeld aan substraatmodel)

↓

Reruns van model met een reeks waarden voor SLAmin, gewasassimilatie, Sinksterkte en drogestofgehalte vrucht

↓

Selectie beste parameter set op basis van fit met gemeten bladoppervlak en versgewicht

↓

Gecalibreerde parameterwaarden worden geleverd aan gekoppeld plant/substraat model

↓

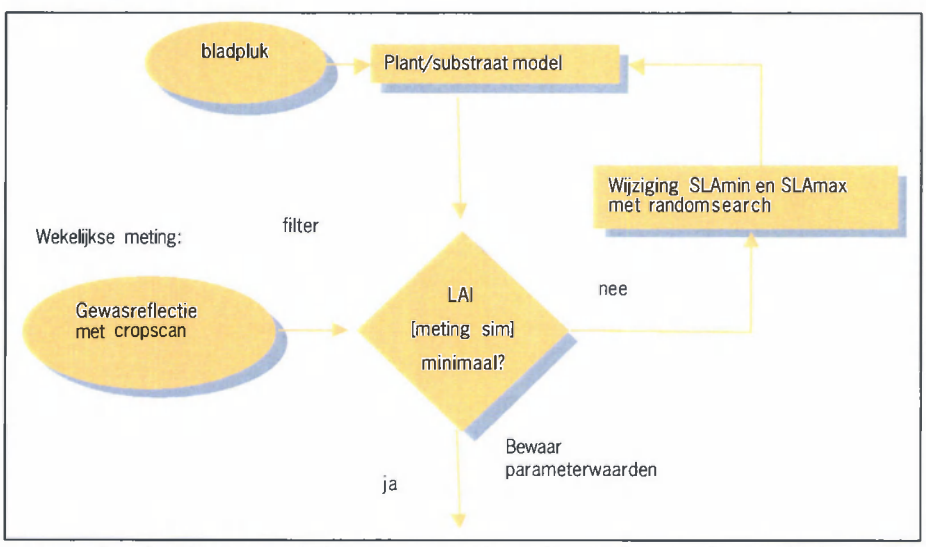
Plant/substraat model berekent juiste vraag afgelopen week en verwachtte vraag komende week

Schema 4.7.1. Processtappen in autocalibratieprocedure

Vervolgens werd de gecalibreerde fotosynthesemodule in het gewasgroeimodel verwerkt, en werd op dezelfde dag het complete model gebruikt voor calibratie van de gekozen parameters voor bladoppervlak en plantgewicht (zie paragraaf 3a). Sensorinformatie van bladoppervlak (verkregen via de gemeten gewasreflectie) en plantgewicht was dagelijks beschikbaar voor de calibratieprocedure. De calibratie had tot doel bladoppervlak/lichtonderschepping en plantgewicht op 24.00 uur op de voorgaande dag correct te simuleren. De calibratie van gekozen parameters voor bladoppervlak en plantgewicht kwam tot stand via een zelflerende proces gebaseerd op 'random search'. Dit hield in dat het gewasmodel via een batch-procedure een groot aantal reruns doet tot een optimum modelresultaat is behaald. Dit proces is voor de calibratie van bladoppervlak weergegeven in schema 4.7.2.

Schema 4.7.2. Proces van zelflerendheid van gewasmodel voor simulatie van bladoppervlak (LAI).

De 'random search' procedure werd voor 5 parameters als volgt uitgevoerd:

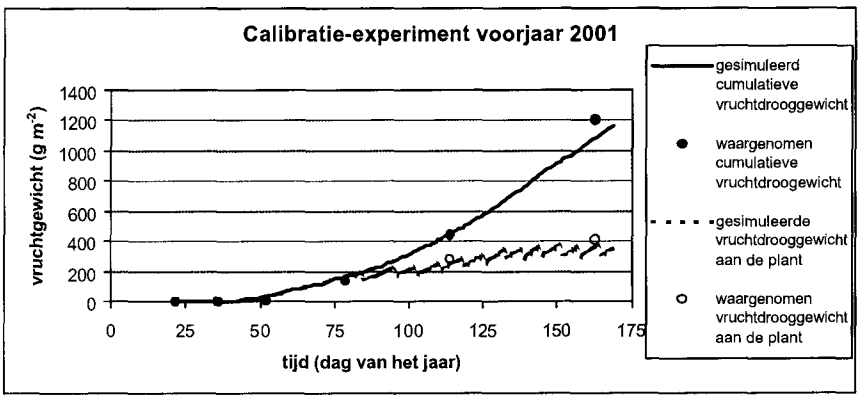


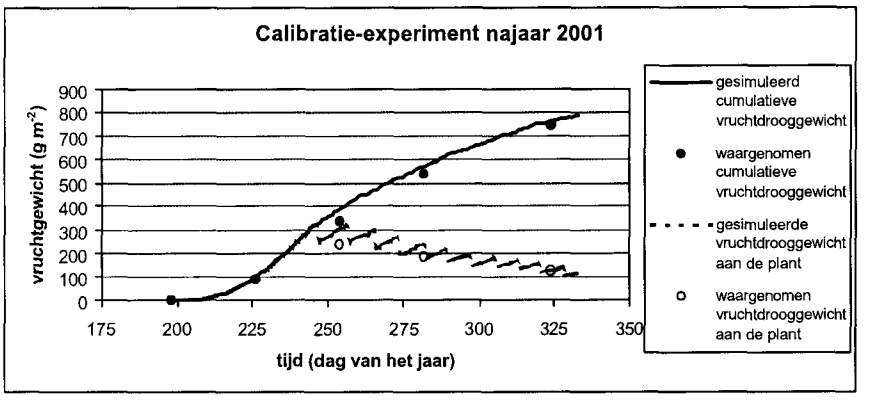
1 - aangeven van het bereik (van minimum tot maximum) van de waarde van de betreffende parameter SLAmin: 0.005 - 0.060; SLAmax: 0.010 - 0.070; Correctie gewasassimilatie: 0.6 - 1.8;

Sinksterkte van de vruchten: 0.5 - 1.5; Drogestofgehalte Vruchten: 0.5 - 1.5.
2 - vervolgens werden maximaal 1600 combinaties van parameterwaarden gedefinieerd en doorgerekend met het gewasmodel. De combinatie van 5 parameters met het kleinste verschil tussen meting en simulatie met betrekking tot zowel lichtonderschepping als gewicht werd als beste verkozen.

Het zelflerende gewasmodel is zodanig geprogrammeerd, dat tot de voorafgaande week de oude waarden worden gebruikt, en dat in de huidige week begonnen moet worden met het schatten van de 5 bovengenoemde parameters om tot een fit met de waarneming te komen.

1. Modelontwikkeling en calibratie.
In deelproject 6 zijn een groot aantal data verzameld om het model verder te verfijnen. Zo zijn de routines voor nutriëntenopname en met name de tijdconstanten en interactie tussen ionen verbeterd. De simulatie van drogestofgehalte is nader uitgewerkt als maat voor kwaliteit van vruchten.
De voor- en najaarsexperimenten van 2001 op het IMAG zijn gebruikt om het gewasgroeimodel te calibreren, met name met betrekking tot fotosynthese (zie de sectie 'Belang van fotosynthesemetingen voor plantmodel'. Door het model te calibreren op deze experimenten van 2001, werd het cumulatieve vruchtgewicht aan de plant adequaat gesimuleerd, met een lichte onderschatting het voorjaar en een lichte overschatting in het najaar (zie figuren 4.7.3). Er kan worden geconcludeerd dat het gewasmodel, de vruchtgroei voldoende goed simuleert om te worden ingezet in een regelsysteem. In de sectie 'Validatie van het plantmodel met praktijkgegevens' wordt het model gevalideerd op onafhankelijke praktijkdata.

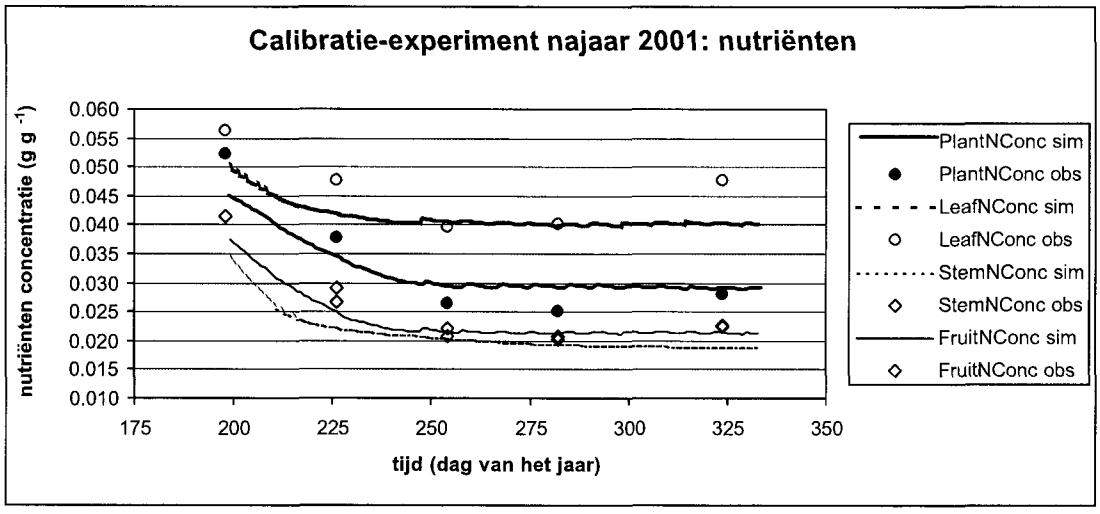




Figuur 4.7.3. Het waargenomen en gesimuleerde vruchtgewicht aan de plant en het cumulatieve vruchtdrooggewicht in de experimenten uitgevoerd in de calibratie-experimenten van het voor- en najaar van 2001.

Voor beide teelten konden de nutriëntengehalten op adequate wijze gesimuleerd kunnen. Ter illustratie zijn voor de najaarsteelt de waargenomen en gesimuleerde N-concentraties van de gehele plant, de bladeren, de stengel en de vruchten in onderstaande figuur weergegeven. Er is wel geconstateerd dat er

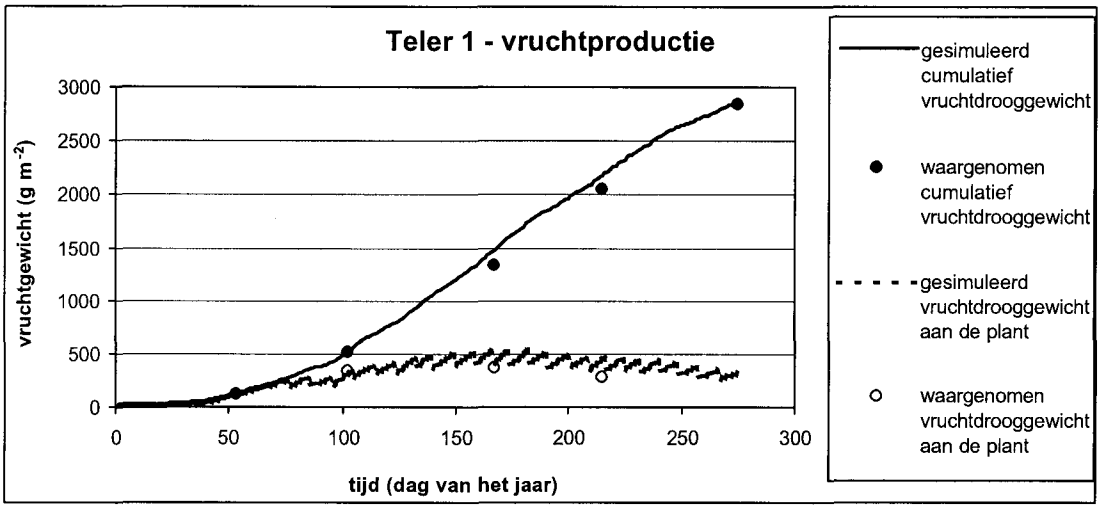
seizoensverschillen aanwezig zijn met betrekking tot de maximale en minimale nutriëntenconcentraties. Zo leidt toepassing van de najaars-waarden in het voorjaar tot een onderschatting van de P concentraties. Er kan worden geconcludeerd dat, mits de maximale en minimale nutriëntenconcentraties voldoende goed zijn gecalibreerd, deze een goed uitgangspunt vormen voor de berekening van de nutriëntenvraag.

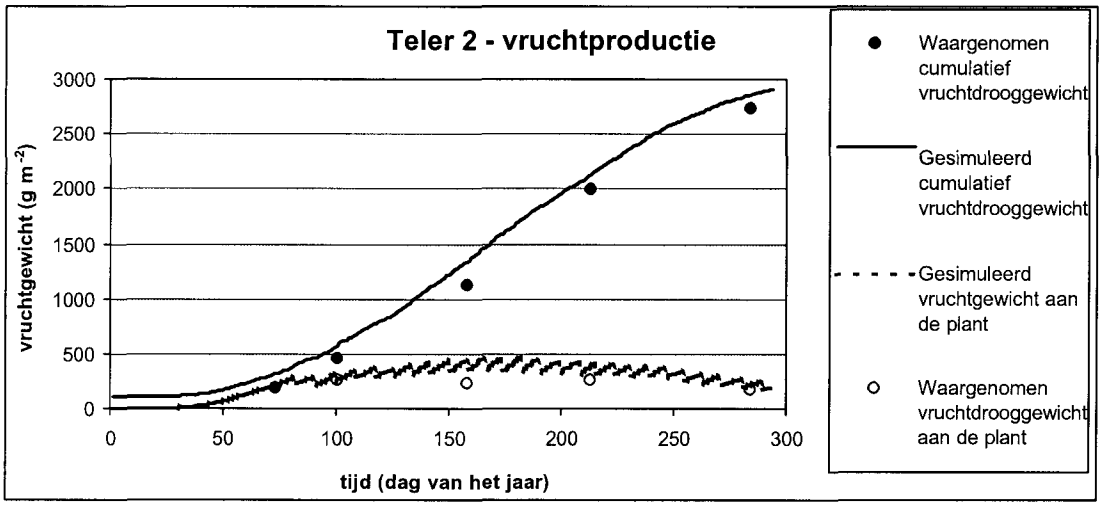


Figuur 4.7.4. Voor de najaarsteelt de waargenomen en gesimuleerde N-concentraties van de gehele plant, de bladeren, de stengel en de vruchten.

Validatie van het plantmodel met praktijkgegevens.

Van drie tomatenbedrijven in het Westland zijn klimaatgegevens, vruchtproductiegegevens en periodiek plantgegevens verzameld. Van Tuinder 1 en 2 betroffen het data van het seizoen 2000 en van Tuinder 3 van seizoen 1999. Deze gegevens zijn gebruikt om het plantmodel te valideren. Input in model was kasklimaat (uurwaarden), plantdichtheid en aantal stengels per plant. Het bleek noodzakelijk om de ontwikkelingsnelheid (trosvormingssnelheid met 10% te verlagen, wat mogelijk de consequentie is van de raskeuze. Het aantal gemeten vruchten per tros bleek 8.5 te zijn. Naast deze calibratie van invoergegevens zijn er geen modelaanpassingen doorgevoerd. Gemeten en gesimuleerde vruchtproductie en vruchtgewichten aan de plant blijken zeer goed met elkaar overeen te stemmen (zie figuur 4.7.5).





Figuur 4.7.5. Waargenomen en gesimuleerd droog vruchtgewicht aan de plant en cumulatief vers vruchtgewicht, voor twee validatieproeven op praktijkbedrijven (resultaten teler 1: zie vorige pagina).

Setpointgenerator: Proof of Principle

Aanleiding

In het laatste halfjaar van het Hydrion-line2 project is in samenwerking met Deelprojecten 4, 5 en 8 een 'Proof of Principle experiment uitgevoerd om te onderzoeken of een regeling op basis van modellen en sensoren zinvol is en werkt. De aanpak kan in het kort als volgt omschreven worden:
Wekelijks (periode 12 september - 12 november) werden gegevens van plantsensoren (fotosynthese, lichtonderschepping en plantgewicht) aan het plant-substraatmodel doorgegeven, waarna er een autocalibratie van de plantkundige modules van het plant-substraatmodel plaatsvond. Dagelijks werden met het plantsubstraatmodel een zestigtal fertigatiescenario's voor de komende dagen doorgerekend. Een scenario omvatte het tijdstip van watergeven, de hoeveelheid water en de concentratie aan nutriënten erin. Met behulp van een optimalisatieproducedure werd vervolgens dat scenario gekozen dat het meest voldeed aan van te voren gedefinieerde doelstellingen. De gekozen doelstellingen konden betrekking hebben op productie, kwaliteit, drainvolume en concentraties (voor nadere omschrijving van deze doelstellingen zie kopje 'Doelstellingen'). Samengevat kan de type regeling omschreven worden als een Feed-Forward regeling of als een setpointgenerator.

De teelt

Tomatenplanten werden op 13 augustus 2002 (dag 225) geplant in een kas van het IMAG. Gedurende de eerste maand waren de bladeren erg bros en konden de planten moeilijk worden ingedraaid. Dit bleek een tekort aan het micro-nutriënt Borium te zijn, waarna extra micro-nutriënten zijn toegediend. Later bleken de gehalten aan de micro-nutriënten Mn, B en Mo nog steeds zeer laag te zijn, zodat deze nutriënten op 29 oktober (dag 302) handmatig werden aangevuld. Dit bleek afdoende. Dit probleem stond los van de nieuw ontwikkelde regeling van nutriënten (deze regeling betreft namelijk alleen de macro-nutriënten).
Op 12 september (dag 255) begon de feitelijke proef met de Feed-Forwardregeling van de water en nutriëntengift en deze proef liep door tot 12 november (dag 316). Tot aanvang van de proef (12 september) was voor de fertigatie gebruik gemaakt van het standaard A/B recept. Periodieke oogsten vonden plaats op 13 augustus (dag 225), 11 september (dag 254), 14 oktober (dag 287) en 12 november (dag 317). Hierbij werd waargenomen: vers- en drooggewichten van bladeren, stengel en vruchten, LAI, aantal trossen, aantal vruchten per tros, en nutriëntenconcentraties van bladeren, stengel en vruchten. Gedurende de gehele teelt werden de rijpe tomaten met een frequentie van twee maal per week geoogst (vanaf 10 oktober, dag 282). De versgewichten werden geregistreerd. Iedere woensdag werd blad geplukt. Het gewas was relatief zwaar.

Er werden 64 verschillende fertigatiescenario's toegepast, bestaande uit 16 combinaties van nutriënten en vier verschillende watergiften. Er werd 3 of 4 ml H_2O m^{-2} kasoppervlak per J cm^{-2} globale straling, gedoseerd na iedere 100 of 200J m^{-2} globale straling (afgekort 3/100, 4/100, 3/200 en 4/200). Vanaf 16 september (dag 259) werd an begin van elke dag een tijdstart van 3 of 4 ml H_2O m^{-2} kasoppervlak per J cm^{-2} toegevoegd, aangezien geconstateerd werd dat op donkere dagen een dosering na iedere 200 J m^{-2} leidde tot het helemaal niet geven van water, aangezien deze stralingsom niet altijd werd bereikt. De waarden van 3 en 4 ml H_2O m^{-2} / J cm^{-2} zijn asymptotische waarden die gelden bij een hoge dagelijkse cumulatieve straling. Echter, bij lage stralingsniveaus is er meer water per eenheid straling nodig. Begin november werd gekenmerkt door veel donkere dagen, zodat er per eenheid straling een watervraag hoger dan 3 en 4 ml H_2O m-2 / J cm^{-2} werd gesimuleerd. In de proef bleek er rond deze tijd geen drain aanwezig te zijn. Er is op 5 november daarom besloten over te gaan op een hogere hoeveelheid en frequentie van watergift, weergegeven door de notatie 3/100, 4.5/100, 6/100 en 7/100. Dit bleek voldoende om de drain te herstellen.

Doelstellingen van de regeling

Er gold een combinatie van de volgende optimalisatiecriteria (het systeem is overigens flexibel opgesteld zodat keuze van doelstellingen eenvoudig aangepast kan worden):

1. Drainage (watervolume) minimaal 312.5 ml m^{-2} kasoppervlak d^{-1} (harde eis), om het mogelijk te maken metingen in de drain te kunnen doen.
2. Drainage (watervolume) minimaal 10% van de irrigatiehoeveelheid op etmaalbasis (harde eis), om te verzekeren dat de doorspoeling en daarmee de homogeniteit van de mat gehandhaafd blijft.
3. Een minimaal drogestofgehalte van de vruchten van 5% (harde eis). Er is van uit gegaan dat een hoog drogestofgehalte een goede kwaliteit (vooral smaak) betekent. Een tuinder kan kiezen om op kwaliteit te telen of op bulkproductie. In het experiment is gekozen voor kwaliteitsproductie. Het criterium is pas geactiveerd toen er een voldoende grote hoeveelheid vruchten aan de planten aanwezig was
4. De toegediende hoeveelheid van elk van de 6 macronutriënten (N, P, K, Ca, Mg, S) mag niet kleiner zijn dan 90% van wat het gewas op etmaalbasis vraagt, en mag niet groter zijn dan 125% van de etmaalvraag (harde eis). De eerste eis is om te voorkomen dat er zich tekorten en daardoor groeireductie voordoen; de tweede is heeft een milieu-oogmerk om niet teveel nutriënten te geven. Als geen van de scenario;s volledig aan de eis voldeed is de beste gekozen, d.w.z. het scenario dat minst onder de 125% zit, waarbij de volgorde van belangrijkheid is: N, P, K, Ca, Mg, S.
5. Drainage (watervolume) minimaliseren op etmaalbasis, waarbij echter wel rekening gehouden werd met bovenstaande harde eisen. Dit betekent dat een drainage van rond de 10% werd nagestreefd, zodat water en energie voor ontsmetting en zuivering werd gespaard. Aan elke m^3 water drain

werd een kostprijs toegekend van 0.05, 0.04 resp. 1.09 euro voor resp. regenwater, rivierwater en drinkwater (bron: Hydrion-line II jaarverslag 2001. In eerste instantie berekeningen uitvoeren voor regenwater.

6. Maximaliseren van de dagelijkse versgroei van vruchten (dus niet oogst per dag). Aan elke kg werd een opbrengst van 67 eurocent toegekend (tuindersprijs ronde tomaat (hoge draadteelt, steenwol) gemiddeld over laatste 3 jaar is 67 eurocent per kg; bron: S. van Woerden, PPO: op basis van KWIN).
   In beginfase van teelt is vruchtgroei nog heel gering en zou deze procedure kunnen leiden tot verwaarlozing van optimale productie. Om dit te ondervangen wordt de vruchtgroei op eerste dag na planten met een factor 10 zwaarder gewogen. Deze weging neemt geleidelijk af tot 50 dagen na planten, waarop wegingsfactor 1 is.

De laatste twee criteria werden geïmplementeerd door de kosten van de drainage minus de opbrengst van de vruchtgroei te minimaliseren. De criteria 1 tot en met 4 waren in feite randvoorwaarden waaraan de de optimale fertigatie moest voldoen.

Resultaten

Opzet van Autocalibratie in het Proof of Principle experiment

Wekelijks werd fotosynthese gemeten. Op basis van de fotosynthesemetingen werden de volgende drie modelparameters gecalibreerd: JmaxTop (maximale electronentransportsnelheid van topbladeren), Theta (kromming van de fotosynthese-lichtresponscurve) en Alpha (lichtbenuttingsefficiëntie). Op basis van reflectiemetingen werd de LAI geschat. Op basis hiervan werd de modelparameter SLAmin (minimale specific leaf area) gecalibreerd. Tot dag 289 was een niet helemaal correcte omrekening van reflectie naar LAI gebruikt. Vanaf dag 289 (16 oktober) is dit gecorrigeerd en werd op die dag in het model een soort extra bladplukken geïntroduceerd om de gesimuleerde LAI overeen te laten komen met LAI geschat op basis van reflectiemeting. Plantgewicht werd geschat met behulp van load cells. In eerste instantie werd het model gecalibreerd opdat het gesimuleerde plantversgewicht zo goed mogelijk met dit gemeten gewicht overeenkwam. Echter kleine afwijkingen in timing van oogst van vruchten of verwijderen van bladeren bleek tot fouten te leiden. Daarom is op dag 289 besloten om vanaf dat moment niet te calibreren op plantgewicht, maar op cumulatief plantgewicht (dus inclusief gewicht van geoogste vruchten en bladeren). Calibratie vond steeds plaats door een correctiefactor op de parameter voor dagelijkse bruto fotosynthese aan te brengen. Wijziging in de parameters voor drogestofgehalte en sinksterkte van vruchten bleek niet nodig.

Tabel 4.7.2. Gecalibreerde parameterwaarden van het fotosyntheseproces, bladontwikkeling en plantgewicht. De gecalibreerde parameters zijn: JmaxTop: maximale electronentransportsnelheid van de fotosynthese van de topbladeren, Theta: kromming van de fotosynthesecurve, Alpha: initiële lichtbenuttingsefficiëntie, SLAmin: minimaal specifiek bladoppervlak, en CORRgewasfot: correctiefactor voor de dagelijkse bruto gewasfotosynthese

Dag	JmaxTop	Theta	Alpha	SLAmin	CORRgewasfot
225	295	0.492	0.329	0.016	0.72
232	295	0.492	0.329	0.016	0.72
239	250	0.540	0.289	0.036	0.65
246	264	0.505	0.300	0.036	0.72
253	242	0.647	0.250	0.036	0.72
260	224	0.610	0.316	0.005	1.02
267	174	0.653	0.313	0.036	1.05
274	153	0.521	0.288	0.040	1.12
281	130	0.702	0.335	0.005	0.76
288	136	0.548	0.271	0.005	1.00
295	143	0.732	0.290	0.040	1.40
302	108	0.705	0.293	0.010	1.15
309	119	0.702	0.290	0.011	1.09
316	110	0.714	0.296	0.011	1.09

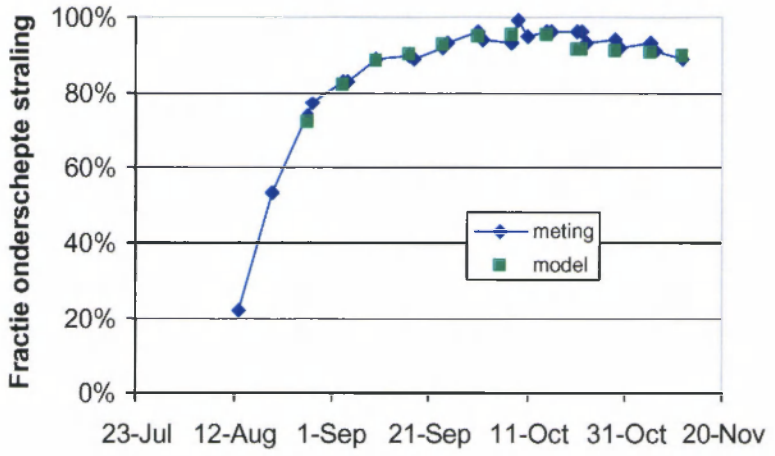
Autocalibratie fotosynthese parameters

Het model kon met de betrokken parameters de fotosynthese licht-response curves goed beschrijven: de meeste fits hebben een $R^2 > 0.95$. de parameter JmaxTop laat een geleidelijke daling in de loop van de teelt zien (Tabel 4.7.2). De parameter alpha (lichtbenuttingsefficiëntie) lijkt weinig te wijzigen en schommelt rond de 0.3. De parameter theta (kromming van de licht-response curve) neemt toe gedurende de teelt. Het tijdsverloop van de gecalibreerde parameters verschilde van het verloop voor een vergelijkbare tomatenteelt een jaar eerder: in het najaar 2001 werd in dezelfde kas wel een afnemende JmaxTop gemeten, maar nam alpha sterk toe en theta sterk af.

Autocalibratie bladoppervlak en plantgewicht

Reeds bij de eerste calibraties bleek dat wijziging van Drogestofgehalte en Sinksterkte weinig effect (<2%bij ±50% wijziging) had op de versgewichttoename. Deze parameters hebben de gehele teelt hun default waarden behouden.

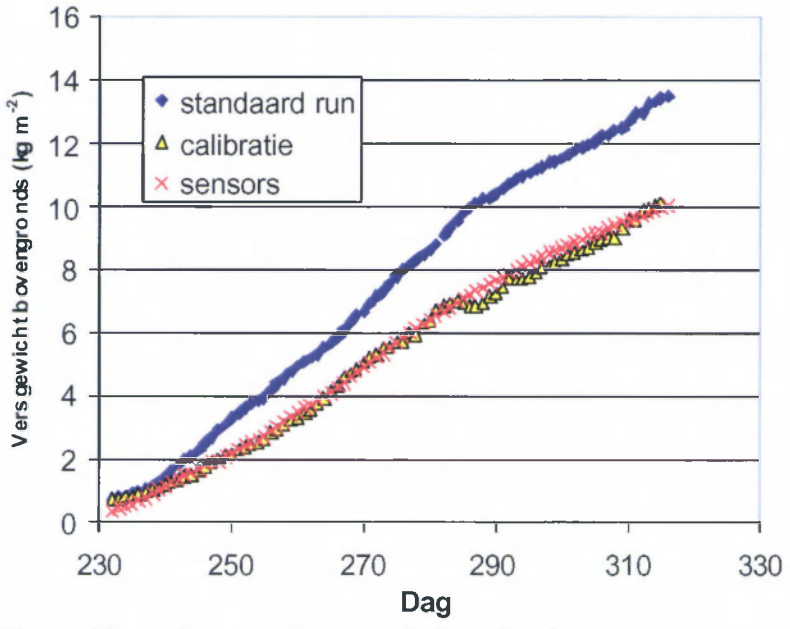
Tot dag 289 (16 oktober) werden lichtonderschepping (Fig. 4.7.6) en plantgewicht (Fig. 4.7.7) correct gesimuleerd d.m.v. een hogere SLAmin (ca. 0.036) t.o.v. default (0.022) en een ca. 25% verlaagde gewasfotosynthese (CORRgewasfot, zie Tabel 4.7.2).



Figuur 4.7.6. Lichtonderschepping volgens meting en simulatie met gecalibreerd model.

Ook na dag 289 werden LAI en toename in bruto plantgewicht correct gemodelleerd na autocalibratie. Hierbij valt op dat de SLAmin over het algemeen lager was dan de defaultwaarde, en de gewasassimilatie hoger moest worden ingeschat (CORRgewasfot > 1).

De calibratie resulteerde in wijzigingen in simulatie van versgewichtgroei van gemiddeld 170 g m^2 per week (gemiddeld 20%); de eerste calibratieperiode had hierin een groot aandeel door sterke overschatting bij gebruik van defaultwaarden. Sterke schommelingen in bijvoorbeeld SLAmin (Tabel 4.7.2) kunnen zich voordoen als in week X een verlaging van de LAI noodzakelijk is voor de fit met de waarneming, waarna in week X+1 soms een aanpassing de andere kant op werkt. Op de termijn van een teelt gerekend kunnen deze effecten enigszins uitgemiddeld worden. Het gecalibreerde model volgde accuraat de sensormetingen (zie Figuur 4.7.7)



Figuur 4.7.7. Versgewicht van het gewas bovengronds (kg m-2) volgens sensormetingen, model met en zonder calibratie.

Aan het eind van de teelt was de cumulatieve groei van versgewicht bovengronds 10.0 kg m^{-2} volgens de sensoren, en 13.5 kg m^{-2} volgens het model. Het default model voorspelde een cumulatieve groei van 10.1 kg m^{-2}. Later bleek echter dat de sensorgewichten een overschatting hadden gegeven van de werkelijke gewichten van de planten; dit verklaart ook waarom resultaten van default model sterk afwijken van de sensormetingen. Hoewel in andere proeven de betrouwbaarheid van de load cells als sensor voor plantgewicht was gebleken, maakt dit wel duidelijk dat zeer zorgvuldig met deze sensoren moet worden omgegaan.
Geconcludeerd kan worden dat de ontwikkelde methode van autocalibratie van de plantkundige modules het mogelijk maakt om het cumulatief plantgewicht tot op 1% nauwkeurig te simuleren.

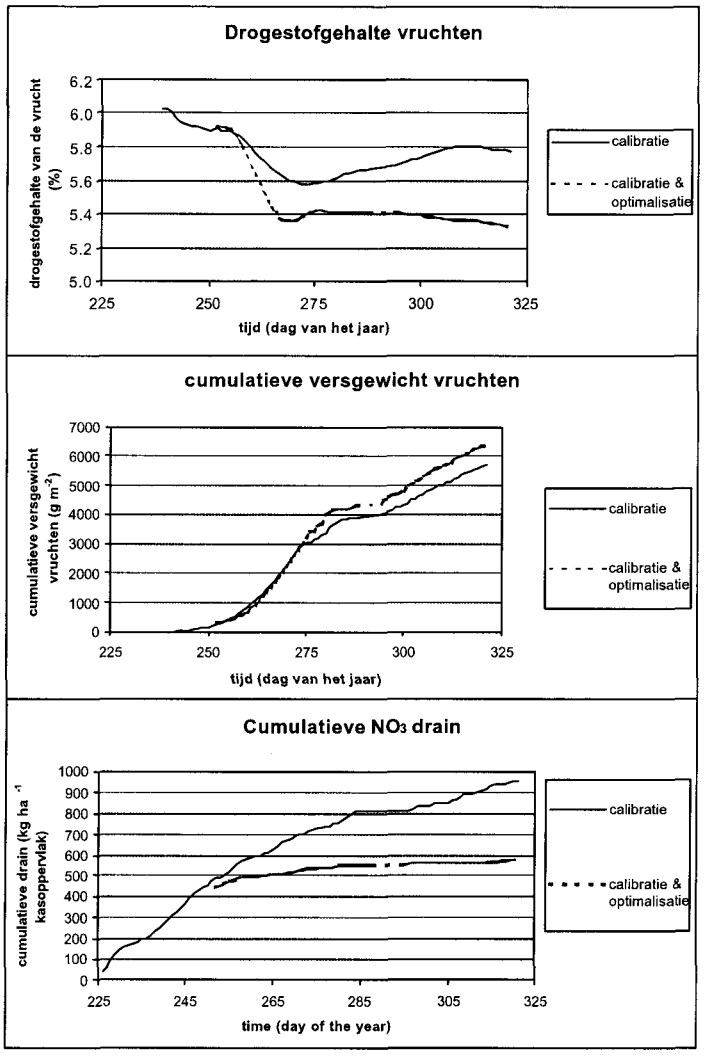
Resultaten van de Setpointgenerator
De groei van het gewas kan door het zelflerende plant-substraatmodel goed voorspeld worden. De hoeveelheid drain werd door het model onderschat, wat waarschijnlijk kwam door een overschatting van de wateropname door de planten. Het is daarom aan te bevelen om het model niet alleen op groei-eigenschappen te calibreren maar ook aan de hand van drainmetingen of de in Deelproject 8 ontwikkelde softsensor voor wateropname.

Samenvattend heeft de optimalisatie in deze Feed-Forwardregeling in vergelijking met een gesimuleerde 'normale' teelt tot het volgende geleid:

- Meestal werd voldaan aan de doelstellingen die als een randvoorwaarde waren geïmplementeerd (criteria 1 tot en met 4). Echter aan Criterium 1 (minimaal 312.5 ml drain m^{-2} d^{-1}) kon vaak niet voldaan worden. Om hieraan te kunnen voldoen hadden bij de van te voren gedefinieerde scenario's, ook scenario's met een hogere watergift gekozen moeten worden.
- Zowel de hoeveelheid toegediend water als de hoeveelheid drain (Fig. 4.7.8) tonen een sterke reductie, terwijl de wateropname nagenoeg gelijk blijft.
- Dit geldt eveneens voor de hoeveelheden toegediend en gedrainde nutriënten: beide vertonen een sterke reductie van meer dan 70% in het geoptimaliseerde systeem.
- De hoeveelheid toegediend N lijkt de meest groeibeperkende factor, aangezien dit nutriënt de sterkste optimalisatie-respons vertoonde.
- Het drogestofgehalte van de vrucht voldeed aan het optimalisatiecriterium van minimaal 5% drogestof (Figuur 4.7.8), zodat kan worden geconcludeerd dat een optimalisatiecriterium gericht op vruchtkwaliteit operationeel kan worden gemaakt. Echter de keuze voor minimaal 5%

drogestofgehalte leidde in deze proef niet tot een verhoging van drogestofgehalte, omdat de bovengrondse condities zodanig waren dat het drogestofgehalte ook bij de standaard fertigatie ruim boven de grens van 5% lag.

- De productie van vruchten werd duidelijk verhoogd door de Feed-Forward regeling (+12%; zie Figuur 4.7.8). Deze winst werd vooral gehaald door verlaging van het zoutgehalte in de substraatmat. Deze verlaging leidde tot een verlaging van het drogestofgehalte en daardoor tot een hoger vruchtgewicht. Deze verlaging van het drogestofgehalte kan als verlaging van de productkwaliteit gezien worden. Echter deze verlaging was toegestaan omdat het gehalte toch ruim boven de grenswaarde van 5% drogestofgehalte lag.



Figuur 4.7.8. Effecten van de Model based Feedworward regeling (FF regeling) op drogestofgehalte van de vruchten (maat voor vruchtkwaliteit), de vruchtproductie en de hoeveelheid drain van nitraat. De regeling was vanaf dag 255 geïmplementeerd. Als controle is een standaard fertigatiestrategie gekozen. Alle data zijn gebaseerd op modelberekeningen.

Duidelijk bleek uit dit experiment dat de hier voorgestelde aanpak van de Feed-Forward regeling het goed mogelijk maakt om van te voren gedefinieerde doelen te halen. En dat **dit kan leiden tot zowel vermindering van drain als tot verhoging van productie, terwijl kwaliteit voldoet aan de gestelde eisen.** Uit analyse van de resultaten bleek wel dat verschillende doelstellingen die gelijktijdig geïmplementeerd kunnen zijn, leiden tot tegengestelde keuzen voor fertigatie. Een nadere analyse van hoe de doelstellingen precies gekozen moeten worden en welk gewicht aan de verschillende

doelstellingen wordt toebedeeld is nog wel gewenst en zal zeker leiden tot een nog beter resultaat van de optimaliseringsprocedure. Verder werd in deze Feed-Forward regeling steeds een inschatting gemaakt van de komende dagen op basis van standaard klimaatdata. De resultaten van de optimalisatie bleken gevoeliger voor het klimaat dan oorspronkelijk gedacht, waardoor de resultaten verder verbeterd kunnen worden als gebruik gemaakt wordt van voorspeld weer in plaats van gemiddeld weer.

Conclusie

Er is een dynamisch groeimodel ontwikkeld dat gekoppeld aan een substraatmodel (zie Deelproject 4) zowel groei, waterhuishouding als nutriëntenhuishouding goed kan simuleren.
Terugkoppeling van sensorinformatie naar het model blijkt zeer zinvol om sterke tussentijdse schommelingen van fotosynthese, totale bladoppervlak- en gewichtstoename correct te simuleren.
Er kan worden geconcludeerd dat een model based Feed-Forward regeling op basis van modellen, sensoren en optimalisatietechniek goed kan functioneren, doordat het in staat is gebleken de van te voren gedefinieerde doelstellingen (de optimalisatiecriteria) te realiseren. Dit biedt goede perspectieven voor het implementeren van aangescherpte doelstellingen. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan een andere afweging tussen drogestofgehalte (gerelateerd aan vruchtkwaliteit) en versgroei. In meer technische zin is het mogelijk gebleken om een systeem bestaande uit verschillende soft- en hardware componenten operationeel te krijgen, en de optimalisatie mogelijk te maken: echter de technische communicatie tussen de verschillende onderdelen kende nog een aantal 'kinderziektes' die om verbetering vroegen. Tenslotte was het belangrijkste resultaat dat duidelijk is gemaakt dat een Feed-Forward regeling het in principe mogelijk maakt om zowel de drain te verminderen als de productie te verhogen, terwijl kwaliteit voldoet aan de gestelde eisen.

Literatuur

Marcelis, L.F.M. 2001. Nutriënten en waterhuishouding in beschermde teelten. Agro-Praktica Agenda 2001. p98

Marcelis, L.F.M., Van den Boogaard, R. & Meinen, E., 2000. Control of crop growth and nutriënt supply by the combined use of crop models and plant sensors. Proceedings Int. Conf. Modelling and control in agriculture, horticulture and post-harvested processing. IFAC 351-356.

Heinen M., Marcelis L.F.M. Elings A., Figueroa R. & Del Amor F.M., 2001. Effects of EC and fertigation strategy on water and nutriënt uptake of tomato plants. Acta Hortic (in press)

4.8 Deelproject Regeling en besturing

Deelnemende partijen

IMAG, WU-MRS, Plant Research International, Alterra

Summary

The obtained results are related to the measurement techniques, the data processing and storage, the dosage of nutrients and water, an observer or software sensor, and the effect with regard to environmental impact and plant/product quality.

Measurement Techniques The principle of a representative measurement gully has been worked out, which allows measurement of the incoming and outgoing nutrient solution on basis of appropriate sensors that measure the flow rates and ion-concentrations. The ion-specific measurement unit of the Hydrion company has been used for the measurement of ion concentrations. The incoming flow has been measured with commercially available sensors of Hortimax. The returning drain flow has been measured with so-called 'tipping-buckets'. The measurement unit has been adapted to process samples from the feeding flow and drain flow. In order not to interfere with the plant experiments in the greenhouse, a second measurement unit (with gully) was build in the corridor of the greenhouse on which most of the control experiments were conducted. During the proof-of-principle experiment a sensitive point that needed to be addressed was the fact that the water supply cycle and the measurement cycle did not synchronise accurately.

Data processing and Storage The ion-specific measurement and dosage installation and the measurement set-ups for plant measurements are all supplied with their own computing equipment that produce data on independent time instances. This complex, often messy, set-up has been organised in a central data processing and storage unit that collects all the data on-line in a real-time database. The real-time database communicates the data batch wise to an internet-page for presentation and external access and, also, on-line as input to the control systems, regulators and models. During the proof-of-principle experiment it has become abundantly clear that in a practical set-up the tuning of the equipment can be a problem.

Dosage The Hortimax equipment handles the dosage of water and nutrients. A water supply unit is controlled through the operating system Synopta. The nutrient dosage is coupled with the water dosage via a mixing unit. Each water supply cycle pure solutions of certain ion combinations are mixed together in a vessel in order to establish the required nutrient solution. The recipe is calculated by the model based controller (set point generator). The dosage units have been made applicable (with considerable effort and ingenuity) for the specific set-up in the greenhouse.

Controller The measurements have been used to realise the basic control of the water supply that compensates for the plant evaporation automatically. This guarantees an exactly satisfactory water supply to the plant, without unnecessary recirculation. In an equal manner a basic controller for the nutrient supply of individual ions that automatically compensates for the nutrient demands of the plant. Both controllers are closed-loop controllers, meaning that the measured flow rates and nutrient concentrations have been used as feedback. For both controllers the proof-of-principle has been delivered. In addition, the proof-of-principle has been delivered for a more advanced control-ler where the dosage of nutrients and water are based on the predicted plant demand in conjunction with a specified goal or cost function. Herewith it becomes possible to apply dosages that contribute to the future quality of the product. In its current form, the more advanced controller is open-loop, i.e. no feedback is realised on the basis of the truly achieved water and nutrient demands of the plant. In the future such a feedback is essential for the robustness of the control system.

Software sensor The true and current uptake of individual ions by the plant cannot be measured with a simple sensor. For this reason research has been conducted on an observer, a familiar device in systems and control theory, that is used as a soft(ware)-sensor. The softsensor reconstructs the uptake

from the substrate-gully model and available data for the inflow and drain of water and nutrients. For reconstruction of the water uptake a good result has been achieved, while the results for the nutrient uptake are promising.

Effect w.r.t. environmental impact and plant quality The model based controllers can weight the water and nutrient dosages that the plant needs against the costs of environmental impact and recirculation. The reported results provide an excellent basis for a model based, optimal controller that uses the plant-substrate model and the principle of feedback on basis of a (soft)-sensor.

Samenvatting

De behaalde resultaten hebben betrekking op meettechniek, dataverwerking en opslag, de dosering, de regeling, een observer als softsensor en het effect op milieubelasting en plantkwaliteit.

Meettechniek: Het principe van een representatieve meetgoot is uitgewerkt, waarmee in samen-hang met de juiste sensoren de debieten en de ion-concentraties van het ingaande voedingswater en de uitstromende drain nauwkeurig kunnen worden gemeten. De ion specifieke meetunit van het bedrijf Hydrion is gebruikt voor het meten van ionconcentraties. De flow in de aanvoer van de meetgoot is gemeten met commerciële sensoren van Hortimax. De flow in de retour is gemeten met z.g. "tipping bucket" regenmeters. De meetinstallatie is geschikt gemaakt om samples uit de voedingswaterstroom en drainstroom te verwerken. Om de plantkundig getinte proeven in de kas niet te verstoren is in een corridor van de kas een tweede opstelling met meetgoot gemaakt, waarop het merendeel van de regeltechnische proeven zijn uitgevoerd. Tijdens de proof of principle is als gevoelig punt naar voren gekomen dat watergeefcyclus en meetintervallen niet samen vallen.

Dataverwerking en opslag: De ionspecifieke meet- en doseerinstallatie en de meetopstellingen voor de plantkundige metingen zijn allen voorzien van eigen computerapparatuur, die data produ-ceren op meestal onafhankelijk van elkaar gekozen momenten. Deze complexe, vaak rommelige, structuur is gefatsoeneerd via een centraal dataverwerkings- en opslag systeem, dat al deze data vergaart in een on-line real-time database. De real-time database communiceert de resultaat data batchgewijs naar een internetpagina voor presentatie en externe toegang, en on-line als input voor besturingsystemen, regelaars en modellen. Tijdens de 'proof of principle' werd duidelijk dat in een praktijkuitvoering de onderlinge afstemming van de apparatuur een probleem kan zijn.

Dosering: De dosering van water en nutriënten vindt plaats met apparatuur van Hortimax. Een watergeefunit wordt aangestuurd door het besturingssysteem Synopta. De nutriënt dosering is daaraan gekoppeld via een mengbaksysteem. Per watergeefcyclus worden in de mengbak enkel-voudige vloeibare meststoffen gedoseerd om zo een gewenst recept te bereiken. Het recept wordt vooraf berekend door de modelgebaseerde regelaars. De doseerinstallaties zijn met veel inspanning en inventiviteit geschikt gemaakt voor dit project.

Regeling: De meetgegevens zijn gebruikt om de basale regeling voor de watertoediening te realiseren, die de gevraagde gewasverdamping automatisch via de watergift compenseert. Dit garandeert precies voldoende watervoorziening naar de plant, zonder dat er sprake is van onnodige recirculatie. Op vergelijkbare wijze is voorzien in een basale regeling van ionconcentratie van de afzonderlijke nutriënt-ionen, die automatisch de door de plant gerealiseerde nutriëntopname compenseert. Beide regelingen zijn gesloten lus regelingen, waarvoor de gemeten debieten en ionconcentraties als feedback zijn gebruikt. Voor beide regelaars is het proof-of-principle geleverd.

Tevens is het proof-of-principle geleverd van een meer geavanceerde regeling, die de dosering baseert op een voorspelling van de plantopname, in samenhang met expliciet geformuleerde doelen. Hiermee wordt het in de toekomst mogelijk om doseringen toe te passen die bijdragen aan de kwaliteit van het geoogste product. In zijn huidige vorm is deze regeling 'open lus', dat wil zeggen dat er nog geen terugkoppeling wordt gerealiseerd op basis van de werkelijk opgetreden water- en nutriëntopname. Zo'n terugkoppeling is voor de robuustheid van het systeem essentieel.

Softwaresensor: De werkelijke momentane plantopname van individuele ionen kan niet met een simpele sensor worden gemeten. Om die reden is gewerkt aan een observer, een bekende methode uit de systeemkunde, die wordt gebruikt als soft(ware)sensor. De softsensor reconstrueert de opname uit het substraat-goot model en beschikbare meetdata voor de instroom en drain van water en nutriënten.

Reconstructie van de wateropname geeft een goed resultaat, terwijl de resultaten voor nutriëntopname veelbelovend zijn.

Effect t.a.v. milieubelasting en plantkwaliteit: Model gebaseerde regelaars kunnen de water- en nutriëntdosering die de plant nodig heeft afwegen tegen de kosten van recirculatie en de milieubelasting. De deelresultaten bieden een uitstekende basis voor een modelgebaseerde, optimale regelaar, die gebruikmaakt van het plant-substraat model, en van terugkoppeling door middel van (soft)sensors.

Deliverables

Omschrijving deliverable	Status (% gereed)	Datum Start	Datum Oplevering
1) oplevering van een basaal regelalgoritme voor de regeling van de nutriëntdosering in een recirculatiesysteem op basis van ion-selectieve metingen.	100%	2001	2002
2) Kas met gewas en meet- en doseerinstallaties voor water, nutriënten, klimaat en ICT-datatransport en web.	100%	2000	2003
3) oplevering van een schattingsalgoritme voor het bepalen van de relevante gewastoestand uit plantstatus metingen.	100%	2001	2002
4) oplevering van een adaptatiealgoritme voor de voorspellende gewasmodellen die in de regeling worden gebruikt, met name ten aanzien van verdamping, gewasgroei en nutriëntopname.	100%	2002	2002
5) integratie van de onderdelen onder 1, 2 en 3 in een model-voorspellende regeling voor de nutriënt- en waterdosering met koppelingen naar het kasklimaat.	100%	2002	2003
6) rapportage t.a.v. de feitelijke werking van de onderdelen 1 t/m 4 in een kas van voldoende omvang. Na het go/no-go moment aan het eind van het derde jaar.	20%	2002	2003
7) rapportage t.a.v. de samenwerking tussen de onderdelen 1 t/m 4 voor het waterzijdige gedeelte met de eerder ontwikkelde geavanceerde model-gebaseerde optimale regeling van het kasklimaat.	20%	2002	2003
8) publicatie in wetenschappelijke journals, proceedings, vakbladen en rapporten	100%	2000	2003

Ad 1) Rapport H. Wouters en beschrijving in het Eindverslag
Ad 2) Rapport Janssen en Gieling
Ad 3) In twee delen: - schattingsalgoritme wateropname en nutriëntopname (rapport Werner)
- schattingsalgoritme plantopname (zie ook hieronder 4)(rapport Werner)
Ad 4) Onderdeel van de setpointregelaar, zoals getest in de proof-of-principle (rapport Werner)
Adaptieve plantparameter (deelproject 7: Marcelis/Elings/Visser)
Ad 5) Integratie van onderdelen heeft plaats gevonden in de proof-of-principle test (zie ook deelprojecten 6,7,9)
Ad 6/7) Ligt achter het Go/Nogo punt. Zou in vierde jaar worden uitgevoerd. Toch deels gerealiseerd tijdens proof-of-principle.
Ad 8) Publicaties zie lijst in Eindrapportage.

Inleiding

Dit deelproject heeft zich gericht op de volgende doelen:

Kas en (data)installaties t.b.v. onderzoek
Het IMAG zorgt dat een kas beschikbaar is van voldoende afmeting en voldoende technische installaties en data acquisitie- en besturingssoftware voorzieningen (Real Time data base), en het beheren van de databases van de metingen in de kas voor de partners. De kas en het gewas wordt zodanig gekozen dat voor het aanbrengen van extra apparatuur van de partners (doseerinstallaties, meetgoot, fotosynthese apparatuur) ruimte beschikbaar is.

Basale regelaar
Ontwikkeling IMAG i.s.m. WAU-MRS van de basale regeling op water- en nutriënttoediening (teruggekoppelde regeling op basis van drainmetingen). Deze regeling is nodig als referentie voor de te ontwikkelen modelvoorspellende regeling, en om experimenten voor de andere partners mogelijk te maken. De regeling wordt vooreerst getest in MATLAB-SIMULINK, en vervolgens geïmplementeerd in de kas in een gesloten recirculatie-teeltsysteem met gebruikmaking van de apparatuur van Hortimax (v/h VanVliet-Pijnacker b.v.)

Model based controller: set-point generator en 'softwaresensor'
Deze onderdelen zijn gericht op het ontwerp van een op modellen gebaseerd regelconcept, waarin informatie verkregen uit het plant-substraatmodel wordt aangevuld met informatie over de activiteit van de plant (i.c. de nutriëntopnamesnelheid), verkregen door middel van een software sensor die gebruik maakt van ion-selectieve nutriëntmetingen. In het laatste jaar van het project is dit concept omgebogen tot het realiseren van een setpointgenerator, waarbij uit een dagelijks doorgerekende reeks scenario's het scenario wordt gekozen dat optimaal voldoet aan teeltkundige en milieudoelstellingen. Deze structuur wordt in het eindverslag aangehouden.

Meten, doseren, dataverwerking

Materialen en methoden

Proefopstelling

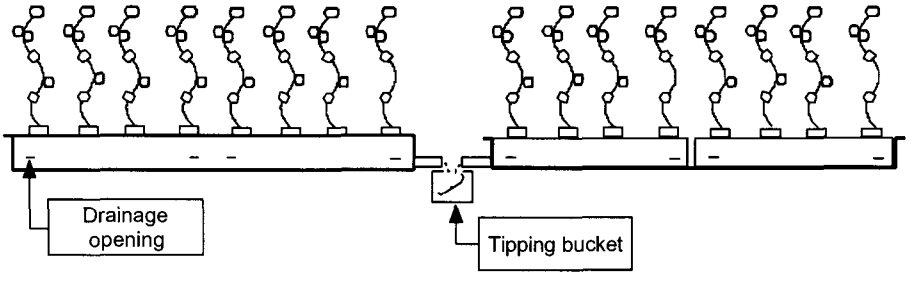
Een gesloten teeltsysteem houdt in dat het water dat eenmaal aan de planten gegeven is binnen het systeem blijft. De planten krijgen in een moderne kas individueel water met daarin opgeloste voedingstoffen. In een gesloten systeem vindt er geen uitstoot van water met opgeloste meststoffen naar de omgeving plaats. Het restant water (drain) wordt opgevangen en opnieuw gebruikt. Sommige storende, maar ook nuttige, ionen kunnen gedurende dit proces accumuleren in de vloeistof die in het gesloten systeem wordt rondgepompt. Om te voorkomen dat deze accumulatie toxische waarden bereikt moet het in uiterste instantie een hoeveelheid vloeistof worden geloosd (= spui).
Bij gesloten teeltsystemen wordt niet in de grond geteeld maar op een kunstmatig groei-medium. Bij dit systeem staan de planten in een goot, maar kunnen zich nu wortelen in een anorganisch substraat, bijv. steenwol, glaswol, vulkanische mineralen (perlite), geëxpandeerde kleikorrels (o.a. vermiculite) (van Os et al., 2002).
Om de constante drainregeling werkelijk te testen, is een opstelling gemaakt in de Hydrion-line proefkas (IMAG Lichtkas). In deze kas zijn tomatenplanten geteeld die door de te ontwikkelen regelaar van water en nutriënten voorzien kunnen worden. Om het gewas geen onbedoelde schade toe te brengen, is geëxperimenteerd met een proefopstelling in de corridor van de kas, die bestaat uit een identieke meetgoot. In de proof of principle voor de regeltechniek is de regeling op de planten in de echte kas toegepast.

Tabel 4.8.1. Eigenschappen van de verschillende onderdelen in de kas

Onderdelen	Eigenschappen
Totaal aantal planten	444
Aantal planten per rij	2 x 42 (randrijen) en 5 x 72
Aantal matten per rij	18
Steenwol mat	7,5 x 20 x 100 cm Grodan
Opbrengst druppelaar	2 l/h
Hydrion meetset	CO_2, HCO_3, Cl, Na, NH_3, NO_3, K, Ca
Nauwkeurigheid meting Hydrion	10%
Grootte monster waarna meting Hydrion volgt	250 ml

Teeltsysteem

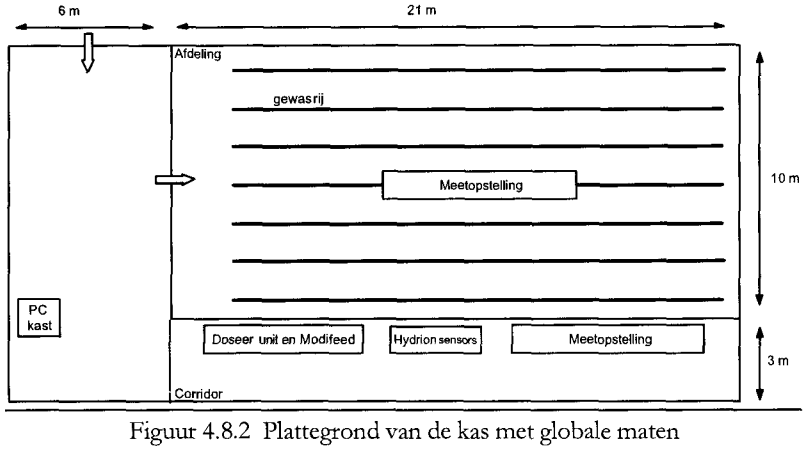
Grodan steenwol is gebruikt als kunstmatig substraat, waarin de tomatenplanten worden geteeld. De planten staan in een steenwol blokje, dat geplaatst is op een steenwol mat. De zijkanten van het blokje en de gehele mat zijn omhuld met een wit plastic folie. Dit is aangebracht om verdamping van water uit de mat tegen te gaan. In het folie zijn kleine drainageopeningen aangebracht, zoals ook te zien is in Het overtollige water kan hier uitstromen en wordt opgevangen in een aflopende goot.



Figuur 4.8.1. Zestien planten in een meetgoot. De hoeveelheid drain wordt gemeten met de tipping bucket

De opstelling uit Fig. 4.8.1 is opgenomen in de middelste rij tomatenplanten van de kas.

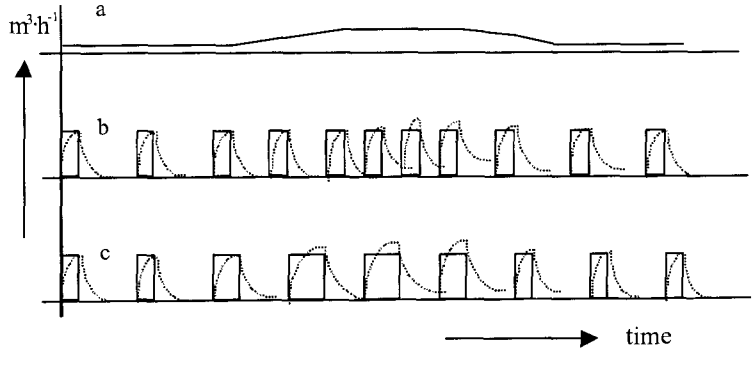
Figuur 4.8.2 toont een plattegrond van de kas met de plaatsing van de verschillende onderdelen. Eigenschappen en aantallen zijn aangegeven in Tabel 4.8.1.



Figuur 4.8.2 Plattegrond van de kas met globale maten

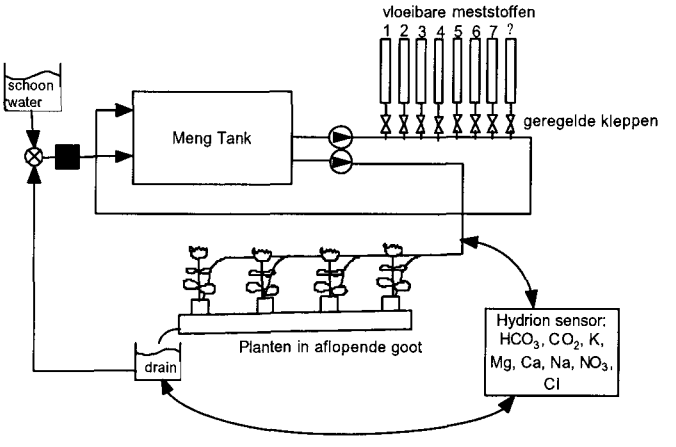
Water doseersysteem

In het onderzoek is gebruik gemaakt van individuele bevloeiing door middel van druppelaars. De lay-out van de druppelleidingen is bepalend voor de verblijftijd, dit is de tijd die het kost om water te transporteren van mengbak naar druppelaar. Voor de watergift is de verblijftijd niet van belang, immers als er water gegeven wordt bij volle leidingen komt voor elke liter die er in gepompt wordt aan de zijde van de druppelaars onmiddellijk weer een liter uit. Voor de nutriëntengift is dit natuurlijk anders. Als er bijv. een stapvormige verandering op de concentratie gegeven wordt, duurt het minimaal de verblijftijd in de leidingen, voordat deze stap de druppelaars bereikt.
In de proefkas is gekozen voor de standaard lay-out. Deze lay-out heeft afgesloten uiteinden aan de druppelleidingen, die vooral bij lange leidingen grote invloed hebben op de verblijftijd van het water in de druppelleidingen. Desondanks is in de proefkas is toch gekozen voor een standaard systeem, omdat dit in de huidige praktijk het meest voorkomt en de proefkas relatief klein is.
In de praktijk wordt een kas opgedeeld in verschillende kraanvakken. De kraanvakken worden opeenvolgend aangestuurd. De relatief dure doseerapparatuur wordt zo gemultiplexed over de kraanvakken, hetgeen resulteert in opeenvolgende gietbeurten. Het doseerapparaat kan zo verschillende kraanvakken afzonderlijk bedienen. Het effect is dat de toediening pulsvormig is, omdat elk kraanvak korte tijd is aangesloten op de doseereenheid.



Figuur 4.8.3. Twee mogelijke vormen van watergift. (b) constante pulsduur; (c) constante cyclusduur; beide hebben hetzelfde resultaat (a)

De gewenste gift bij een gietbeurt is op twee manieren te realiseren (Fig.4.8.3). Een constante pulsduur met variabel interval (b), of een variabele pulsduur met een constant interval (c). In dit onderzoek is gebruik gemaakt van variant b: constante pulsduur. De gewenste pulsduur is in te stellen. Dit gebeurt met een apparaat waarmee ook de samenstelling van de nutriënten kan worden ingesteld. Het voordeel van toepassen van een meetgoot boven het meten van water van de hele kas, is de snellere response tijd. Het water hoeft niet alle leidingen en de goten te doorstromen naar de grote verzamelput voordat er bemonsterd kan worden. Zo ontstaat uiteindelijk een sneller systeem en er kan beter geregeld worden.
De nutriënten worden in een gesloten teeltsysteem getransporteerd door het water. De Modifeed van de firma Hortimax doseert de voedingstoffen en water aan de planten in de kas. Eén gedeelte van de Modifeed doseert de meststoffen in een mengleiding. Het water in deze leiding wordt door het andere gedeelte van de Modifeed met grote snelheid rondge-pompt over een mengbak. Uit de mengbak wordt het water naar de kas gepompt.
De ontwerp capaciteit van de Modifeed is 45 m^3/uur, terwijl de proefkas maar 0.6 m^3/uur afneemt. De machine moet regelmatig de minimum hoeveelheid meststoffen doseren, waardoor kleine onnauwkeurigheden in het doseren een groot effect hebben op de uiteindelijke concentratie. Veel werk is besteed om de Modifeed en de proefkas op elkaar af te stemmen (Janssen en Gieling) en heeft tot veel vertragingen aanleiding gegeven.



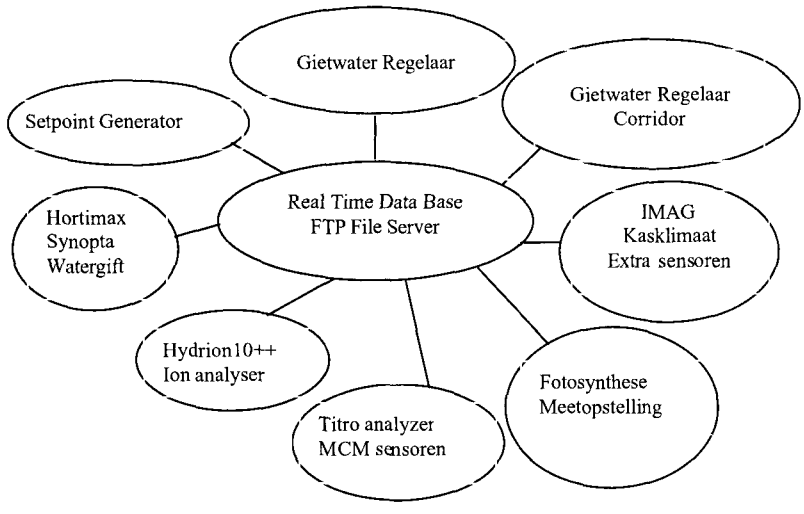
Figuur 4.8.4. Afzonderlijk toedienen van vloeibare meststoffen (1 t/m 7) en sporenelementen (μ) in een gesloten teeltsysteem. De Hydrion sensor meet de concentraties in het giet- en drainwater: pH, EC, CO_2, HCO_3, Cl, Na, Ammonium, NO3, K en Ca

Nutriënten meetsysteem

De concentratie in het drain- en gietwater wordt on-line gemeten met ionselectieve sensoren in de Hydrion meetset, in een monster van 250 ml. Nadat het drainwater de tipping bucket uit is gepasseerd, wordt het monster verzameld. De meetwaarden worden weggeschreven naar de centrale real-time database. Niet alle ionen kunnen (nog) door de Hydrion sensors gemeten worden.

ICT infrastrucuur /datastructuur

Aan het netwerk wordt de eis gesteld dat alle betrokken partijen met hun meet- en regelsystemen, modellen en analyse programma's met voldoende performance en securtiy over de vereiste data kunnen beschikken en ter beschikking kunnen stellen. Voor de uitwisseling van datafiles is een FTPserver opgezet, het FTP protocol wordt op alle platformen ondersteund en wordt geaccepteerd in AGROnet. De gebruikers kunnen via een username/password en b.v. de Internet browser bestanden uitwisselen. Door de FTPserver in het domain van WURnet op te nemen is deze bereikbaar vanuit WURnet, AGROnet en Internet, de beveiliging zit op het niveau van WURnet. Door deze indeling kunnen bedrijven als Hydrion via Internet ook rechtstreeks bestanden uitwisselen.



Figuur 4.8.5 Real Time Data Base APLINK met de aangekoppelde meet- en stuurprocessen

Het watergeefsysteem van Hortimax is zowel werktuigbouwkundig als ook besturingstechnisch aangepast. Een gietbeurt wordt geactiveerd door een ASCII bestand waarin het recept, de tijdsduur en het kraanvak zijn beschreven naar de Synopta (procescomputer) te sturen. Alle meet- en regelsystemen en modellen zijn onderling via het netwerk gekoppeld. De uitwisseling van data tussen de diverse systemen en subsystemen gaat via ASCII files (FTP protocol) en een zgn. Real Time Data Base (RTDB) die door IMAG is ontwikkeld (zie fig. 4.8.5). De meet- en regelsystemen en de modellen zijn vrijwel volledig via de RTDB gekoppeld. Deze RTDB bevat niet alleen de actuele waarden van de procesgrootheden maar ook de historische waarden. Er is gebruik gemaakt van het COM interface. Het koppelen van modellen geschreven in Matlab en C++ en Fortran kan nu probleemloos. De performance van de RTDB is goed, de snelheid van de transacties (2 -4 mS op een 100Mb/s netwerk en 100MHz werkstation) bleef vrijwel constant ook als deze enkele honderden Mb's aan data bevat. De stabiliteit van de RTDB tijdens de proeven is goed gebleken. Het watergeef- en nutriëntenregelprogramma zijn opgezet in Matlab. Sommige deelsystemen moeten buiten het IMAG netwerk bereikbaar zijn. Hiervoor zijn twee lowbudget gateways in het netwerk opgenomen, toegankelijk voor specifieke gebruikers. Via het netwerk zijn de deelsystemen gekoppeld als aangegeven in Figuur 4.8.5.

Conclusies

1. De apparatuur voor watergeven en nutriëntdoseren van Hortimax moest op veel punten in hard- en software aanpassingen ondergaan.
2. Het is gelukt om de verschillende onderdelen van het systeem zodanig aan te passen dat er een bruikbare infrastructuur is ontstaan voor het uitvoeren van het in dit project voorziene onderzoek.
3. De ervaringen die zijn opgedaan leren, dat er voor implementatie in de praktijk veel aandacht moet worden besteed aan de storingsgevoeligheid van de apparatuur.
4. De uitwisseling van data tussen de diverse deelsystemen via ASCII files en de Real Time Data Base APLINK voldoet goed. De koppeling via standaard protocollen (COM en OPC) heeft aangetoond dat dit concept een uitstekende vervanging is voor een wildgroei van files met verschillende formaten en een uitstekende oplossing is voor het simultaan beschikbaar zijn van data voor meerdere deeltaken zoals in dit project.

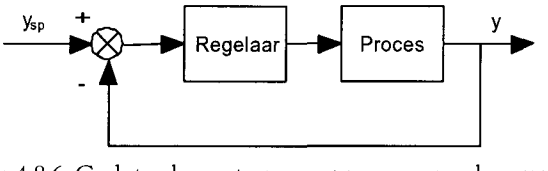
De basale regelaars

Inleiding

De gekozen methode van besturen bij de basale regelaar heeft als eigenschap dat het de opname van de plant precies compenseert. Deze regelaar wordt een basale regelaar genoemd, omdat hij alleen een bepaald setpoint moet realiseren, zonder vast te stellen of dat het optimale setpoint voor het gewas is, bijv. aan de hand van een model. In Van Straten en Gieling (2002) is geanalyseerd waaraan het set-point moet voldoen opdat gegarandeerd kan worden dat de plant niet wordt belemmerd in zijn groei door nutriëntgebrek. De regeling is zodanig opgezet dat de drainflow en de concentraties van de individuele ionen in de drain constant worden gehouden. Dit betekent dat de plant opname wordt opgevat als een verstoring van de te regelen uitgangs-grootheden drainflow en drainconcentraties. Het constant houden van beide type grootheden wordt gerealiseerd via een terugkoppeling via het meten van flow en ion concentraties in de drain van een meetgoot die centraal in de kas is opgesteld. Niet al het drainwater wordt gemeten, maar van 16 planten die op de meetgoot zijn opgesteld in het midden van de gewashaag in de kas op een aparte meetgoot, waarbij de 16 planten op de meetgoot representatief zijn voor de gehele kas.
Het voordeel van regelen op constante drain is, dat er op gewasvraag gestuurd wordt. Hetgeen de plant opneemt wordt aan de mat onttrokken. Als de mat drain produceert, betekent dit dat het punt van verzadiging is overschreden en de mat voldoende vochtig is. Indien de drain constant blijft, is er gecompenseerd voor de opname door de plant. Dit laatste geldt alleen als er geen blijvende accumulatie in de mat optreedt. Ion accumulatie in de mat kan optreden, hetgeen nadelig voor de plant kan zijn (bijvoorbeeld doordat de plant dan slechter water opneemt, het zogenaamde droogzetten).
Doorstroming van het substraat wordt gegarandeerd door beide grootheden onafhankelijk op een constante waarde te regelen, waarbij de drainflow van voldoende waarde moet zijn.

Ontwerp methode bij het watergeven

Ontwerp regelaar voor watertoediening
Het regelaar ontwerp is gebaseerd op een model van het proces dat geregeld moet worden. De watergift wordt in pulsen gegeven. Dit is ook terug te vinden in het vrijkomen van het drainwater. De regelaar houdt daarom de gemiddelde drainflow constant. De gemiddelde drainflow moet over een watergeefcyclus aan een bepaald setpoint voldoen. Een extra complicatie is, dat bij het water geven in pulsen de regelaar niet continu de gift kan aanpassen. De gewenste momentele gift die de regelaar terugkoppelt moet dus omgerekend worden naar een cyclustijd (is de gifttijd plus de pauzetijd).
Het procesmodel model is verkregen door het doen van een 'black box' identificatie experiment. Nadat er een model van het proces gemaakt is, wordt er door middel van poolplaatsing een regelaar ontworpen die bij het sluiten van de lus, variaties in de wateropname door de plant kan wegregelen en de gemiddelde drain op een gewenst setpoint kan houden. De gesloten lus (Figuur 4.8.6) bestaat uit het terugkoppelen van de hoeveelheid drain via de ontworpen regelaar naar de ingang van het proces, hier de watergift.



Figuur 4.8.6. Gesloten lus systeem van proces en regelaar met setpoint

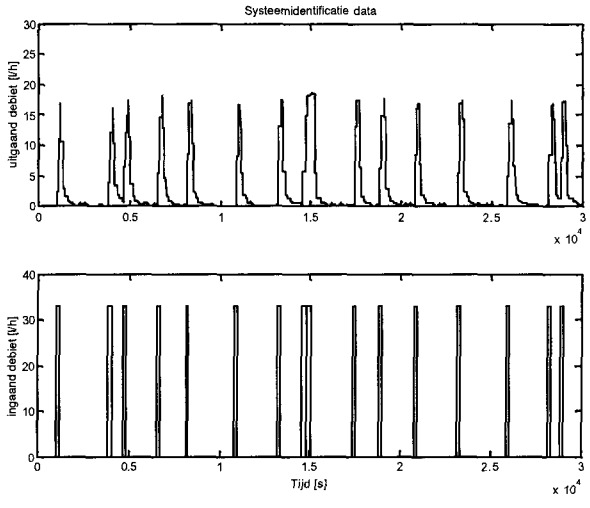
Het programma Simulink is gebruikt om het geregelde watergeefproces met de ontworpen regelaar te simuleren. De simulatie geeft vooraf inzicht in het functioneren van de regelaar. Eigenschappen van de regelaar kunnen snel en gemakkelijk worden aangepast. De uiteindelijk ontwikkelde regelaar is in de praktijk getest.

In eerste instantie is geëxperimenteerd in de corridor naast de kas. daarna in de kas zelf. Door het gebruik van een doseermachine uit de praktijk in de relatief kleine onderzoekskas, ontstonden veel problemen t.g.v. de minimum capaciteit van de apparatuur.
Een globaal overzicht van de ontwerpmethode wordt hierna gegeven, details in Wouters, 2002.

Systeem identificatie

Systeemidentificatie is gebruikt om een (black box) model van het te regelen systeem vast te stellen. Het gevonden model is tevens gebruikt bij het simuleren van het hele watergeefsysteem in Simulink. De goot met planten op substraat, is het systeem waarop de identificatie gedaan is.

De plantopname wordt opgevat als een verstoring op het geregelde systeem. De overdracht van het ingaande debiet naar het uitgaande debiet van de goot (drain) is uitgevoerd door een test met een volgens witte ruis verdeelde intervaltijd van de gietbeurten (Wouters, 2002) Figuur 4.8.7.
De systeemidentificatie is gedaan met de System Identification Toolbox van Matlab, waarbij de data is gesplitst in een identificatie deel, waarmee het model ontwikkeld wordt en een validatiedata deel, waarmee het model achteraf getoetst wordt.



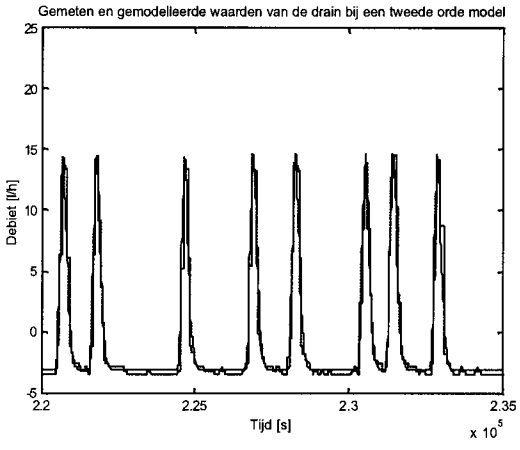
Figuur 4.8.7 Gedeelte uit de meetwaarden. Onder het ingaande debiet, boven de drain.

In state space structuur, ziet het model er als volgt uit:

$$x(k+1) = F\ x(k) + Gu(k)$$
$$y(k) = C\,x(k)$$
$$F = \begin{bmatrix} 1.901 & 1 \\ -0.9045 & 0 \end{bmatrix};\quad G = \begin{bmatrix} 0.002322 \\ 0 \end{bmatrix};\quad C = [1 \quad 0]$$

Hierin is u de afwijking van de gemiddelde ingangsflow, y de afwijking van de gemiddelde drain. De 2 dimensionale variabele x is een interne toestand zonder directe fysische betekenis. Het model wordt hier uitsluitend gegeven ter illustratie van de relatieve eenvoud; de feitelijke getalswaarden zijn afhankelijk van de afmetingen van de goot, en van het bemonsteringsinterval, en zullen dus in iedere nieuwe situatie opnieuw moeten worden bepaald.

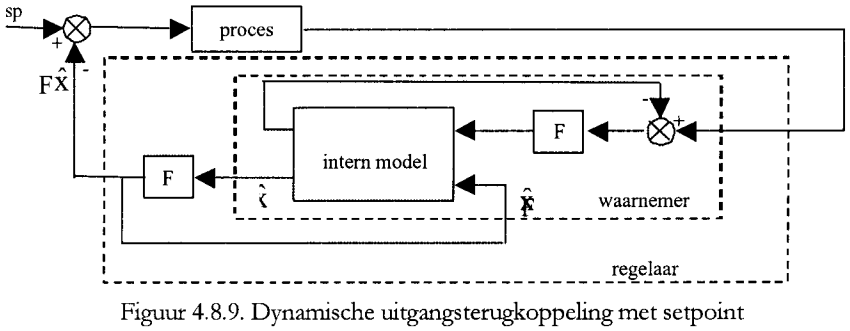
De beschrijvende waarde van het model is getoetst op de validatiedata. Het resultaat is weergegeven in Figuur 4.8.8, waar meetuitkomst en modeluitkomst zijn weergegeven. Uit Figuur 4.8.8 blijkt dat - ondanks de complexe hydraulica - een tweede orde model de werkelijkheid voldoende goed beschrijft om daarop het ontwerp van de watergiftregelaar te baseren.



Figuur 4.8.8. Validatie data (doorgetrokken lijn) en model uitkomst (gestippelde lijn) van de drain als gevolg van een watergift. Het gegeven draindebiet is uitgedrukt als afwijking ten opzichte van de gemiddelde drain.

Ontwerpen van de regelaar voor waterdosering

Het ontwerp gaat uit van een regelaar op grond van feedback. Het proces is redelijk snel. Een dagritme, zoals de opkomende zon, heeft direct invloed op de verdamping en dus op de drain. In principe zou dit kunnen worden opgevangen door middel van feed-forward compensatie, maar een nadeel van het gebruik van feedforward is, dat het model van het wateropnameproces van hoge kwaliteit moet zijn. In de praktijk is dit moeilijk te verwezenlijken, omdat het oogsten en bladplukken een grote invloed hebben op de verdamping, en derhalve ook op het opnamemodel. Daarom is gekozen voor een regeling zuiver op feed-back.



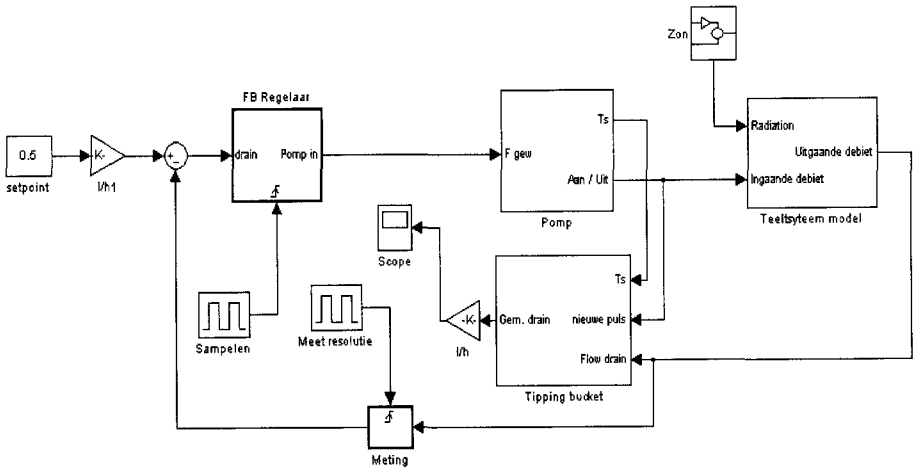
Figuur 4.8.9. Dynamische uitgangsterugkoppeling met setpoint

De meetwaarde y van het systeem is niet gelijk aan de toestand x. Regelen kan dan niet op basis van alleen toestandsterugkoppeling, maar alleen met uitgangsterugkoppeling. De toestand moet dan geschat worden uit de uitgang y van het systeem. Dit wordt gedaan door de waarnemer die een intern model van het proces bevat. De uitgang van de waarnemer is de geschatte toestand, die vervolgens gebruikt kan worden voor 'gewone' toestandsterug-koppeling. De waarnemer en de totale regelaar zijn schematisch weergegeven in Figuur 4.8.9.
Voor het realiseren van de feedbackregeling worden de waarnemer matrix en de regelmatrix bepaald. Aan de hand van de waarneembaarheids matrix en de regelbaarheidsmatrix is vastgesteld dat de het systeem waarneembaar en regelbaar is. De state space regelaar is ontworpen aan de hand van stapresponsies en poolplaatsing. Voor details wordt verwezen naar Wouters, 2002.

Simulatie van het regelgedrag

Om de regelaar beter af te stemmen op de omstandigheden uit de praktijk, is het hele systeem pomp, goot, substraat en regelaar gesimuleerd in SIMULINK (een toolbox van Matlab).

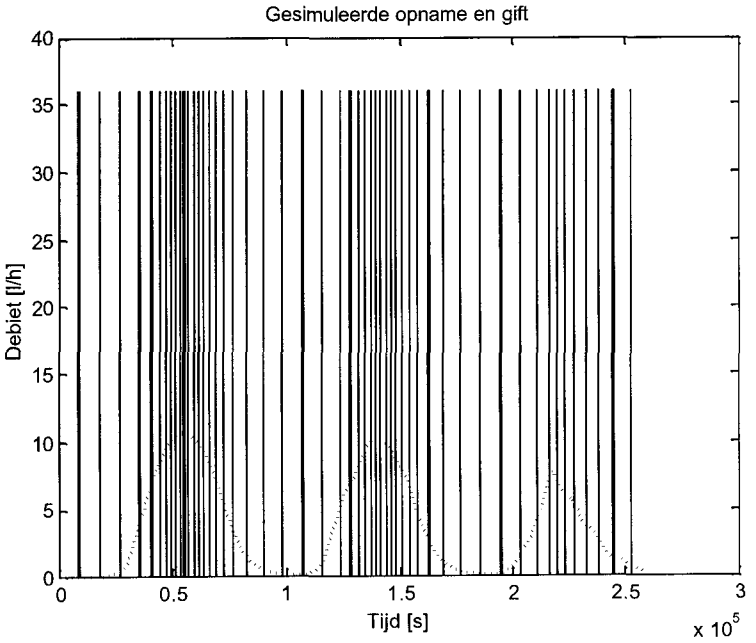
De details zijn beschreven in Wouters, 2002. Figuur 4.8.10 toont alleen het overall-simulatieschema).



Figuur 4.8.10. Simulink model van het hele systeem

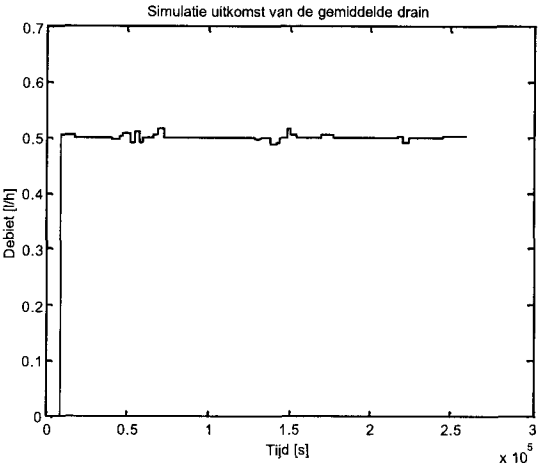
Resultaten watergeefregeling

Simulaties: Het uiteindelijke model met regelaar geeft de hieronder afgebeelde pulsverdeling bij een halve sinus verstoring te zien:



Figuur 4.8.11 Pulsverdeling bij verstoring van het model met echt gemeten zoninstraling. Duur van de simulatie is drie dagen. Doorgetrokken lijn is de gift, gestippeld is de wateropname.

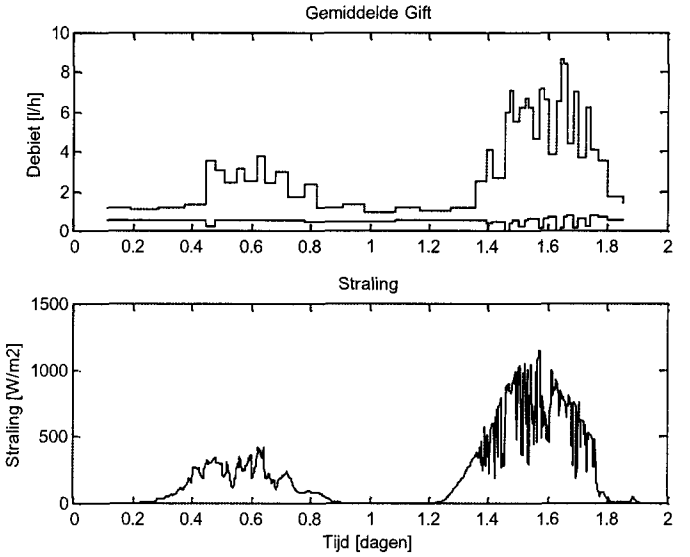
Uit Figuur 4.8.12 blijkt dat de gemiddelde drain goed constant gehouden kan worden met deze regeling. Een afweging, tussen enerzijds een snelle respons en anderzijds stabiliteit (zie Wouters, 2002) leidt tot een geschikte keuze van de polen van de regelaar en die van de waarnemer.



Figuur 4.8.12. Simulatie uitkomst van de gemiddelde drain. Het verloop van de drain, weergegeven als gemiddelde per watergeefcyclus over een dag geplot. Het setpoint is ingesteld op 0,5 l/h.

Praktijkregeling

De regelaar is vanuit Simulink direct op een werkelijk proces toegepast. Er is een programmalus gemaakt, die achtereenvolgens de instelling inleest, meetwaarde van de drain flow ophaalt, de regelactie uitrekent en vervolgens een gietbeurt laat starten. Het resultaat van twee meetdagen met zeer verschillende zonnestraling is weergegeven in Figuur 4.8.13.



Figuur 4.8.13. Boven: cyclusgemiddelde van gift (gestippeld) en drain (doorgetrokken) bij een drain setpoint van 0,5 l/h. Onder: de zoninstraling als motor achter de opname als verstoring.

Conclusies omtrent de watergift regeling

1. Het is gelukt een regelaar ontwerpen die door constant houden van de pulsgemiddelde drain automatisch compenseert voor de variabele wateropname van de plant.
2. Een dergelijke regelaar garandeert dat de watervoorziening naar de substraatmat zodanig is dat geen limitering van de groei door watergebrek optreedt.

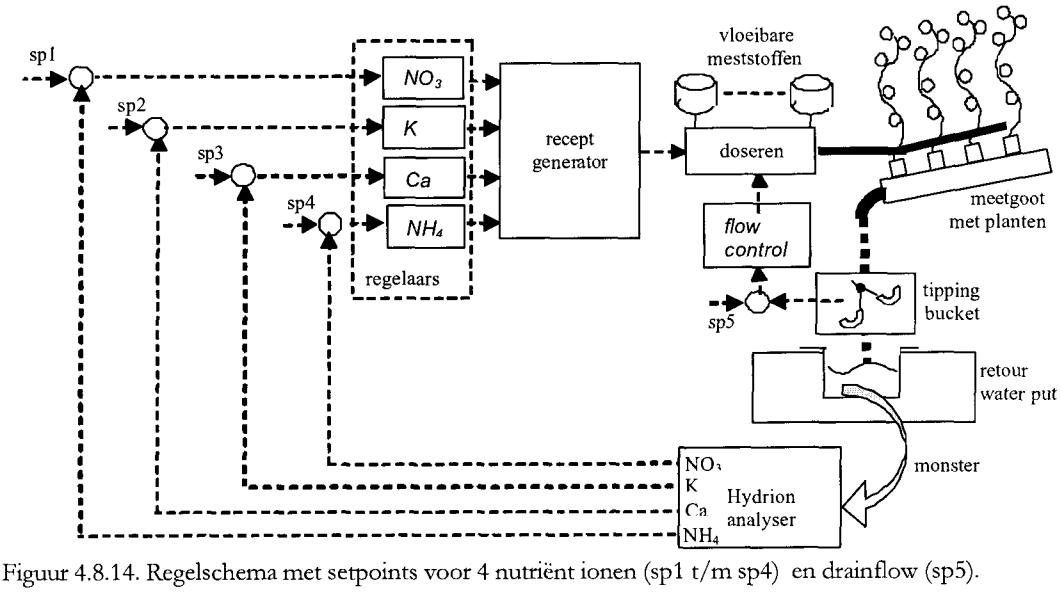
Ontwerpmethode voor de nutriëntdosering

Het ontwerp van de regeling voor nutriënten is langs twee wegen uitgevoerd. Een state space ontwerp, waarbij in grote lijnen dezelfde manier gevolgd wordt als bij de watergift. Op grond van de waargenomen responsies is ook een methode uitgewerkt voor een PI regelaar.

State space ontwerp

Op een aantal punten is de aanpak anders dan bij de watergift:

- De regeling regelt een aantal nutriënten afzonderlijk. De systeemidentificatie is in eerste instantie één keer uitgevoerd met de EC (maat voor de totale ionen concentratie). Aangetoond is dat de ionen NO_3^-, K^+ en waarschijnlijk ook NH_4^+ zich hetzelfde gedragen als de EC in de steenwol mat (Van Straten, 2002).
- Zowel variaties in ingangsconcentratie als de doorstroming van het water in de mat moeten als ingangsvariabelen bij het identificatie experiment betrokken worden. Beide zijn namelijk van invloed op het proces. Een verhoging in de concentratie zal na verloop van tijd als responsie een verhoging van de concentratie in de drain tot gevolg hebben. De doorstroming beïnvloedt echter ook het proces. Hoe meer water er doorstroomt, hoe sneller de responsie van de concentratie in het drainwater is. Dit betekent dat het toedienen van water en doseren van nutriënten feitelijk een MIMO proces is. Ter vereenvoudiging is één enkele realistische waarde voor de drainflow aangenomen, hetgeen overeenkomt met de situatie in de beoogde toepassing. Derhalve is alleen de ingaande concentratie is gevarieerd bij het identificatie-experiment.
- In eerste instantie leek het niet mogelijk de regelaar in simulatie te testen, omdat er veel onbekende factoren zijn zoals de opname van de plant en de invloed van de watergift op de snelheid van het proces (Wouters, 2002). In tweede instantie is het mogelijk gebleken op basis van een grey box model dat wordt gekalibreerd op de meetdata toch simulaties uit te voeren (Van Straten, 2002).



Figuur 4.8.14. Regelschema met setpoints voor 4 nutriënt ionen (sp1 t/m sp4) en drainflow (sp5).

De PI regelaar

De PI regelaar is ontworpen op basis van de response curve methode. Hierbij wordt een stapresponsie gemeten. De tuningregels van Cohen en Kuhn geven de regelaar parameters.

Het recept wordt zodanig aangepast dat aan alle (rand)voorwaarden is voldaan. Vervolgens wordt er water gegeven met een recept, dat de concentratie in de drain op het setpoint houdt. Gegeven het systeem in Figuur 4.8.14, wordt het gedrag van de nutriënten vanaf voeding aan de ingang tot uitgang op de drain sensor gekenmerkt door:

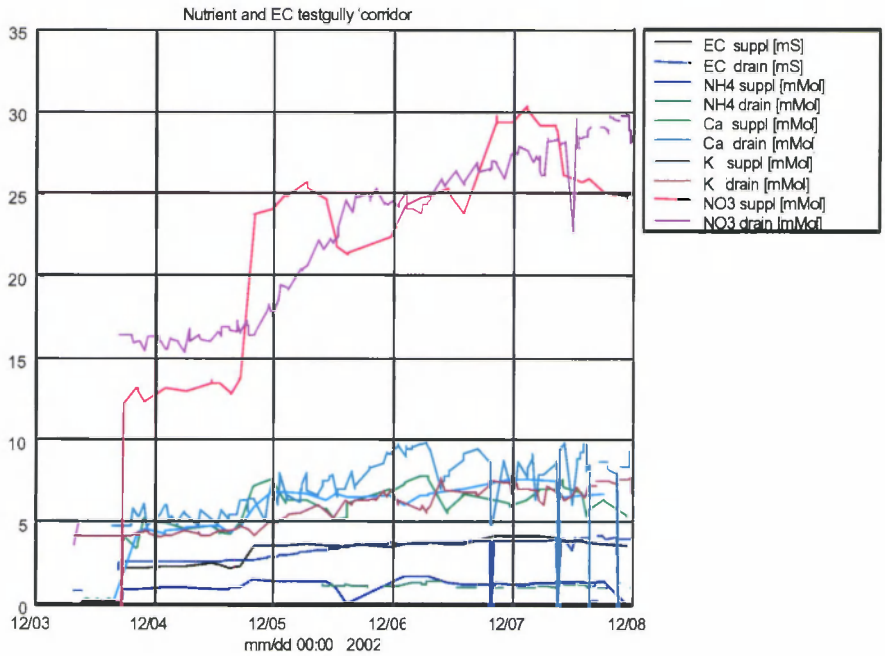
- een korte dode tijd van druppelaar naar flowsensor aan de ingangszijde

- verschijnselen i.v.m. transport en menging in het zaailingblokje
- verschijnselen i.v.m. transport en menging in de substraatmat
- menging in de verzamelput (hoeveelheidaccumulator dat zich als eerste orde filter gedraagt met variabele tijdsconstante voor de concentratie
- tijd gemoeid met de verwerking van het monster in de ion analyser

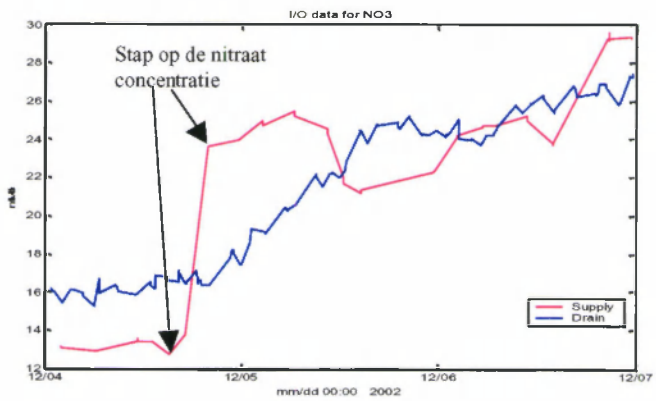
De Hydrion analyser wordt geactiveerd door voldoende water in de drain opvangbak. Een goed werkende drain flow regeling leidt tot een regelmatig bemonsteringsinterval. Verandering van drain flow setpoint betekent dat er een variabel bemonsteringsinterval ontstaat. Bij het regelaarontwerp voor nutriënten is uitgegaan van een bemonsteringsinterval van 0.05 tot 0.1 maal de snelste tijdconstante in het systeem. Dit betekent dat er altijd een sample-hold operatie op de laatst verkregen meetwaarde wordt uitgevoerd, hetgeen een extra tijdsafhankelijke vertraging introduceert. Soms kan de regelaar meetwaarden missen als de monstername sneller is.

Systeemidentificatie

Figuur 4.8.15 is een typisch voorbeeld van systeem identificatie met stapresponsie experimenten.



Figuur 4.8.15 Waargenomen ionconcentraties als response op een stap excitatie in de meetgoot in de 'corridor',3-12-, 2002.



Figuur 4.8.16. Input-output data voor een stap op de nitraat concentratie

Figuur 4.8.16 laat als detail grafiek zien hoe de reactie is van een stap op de nitraatconcentratie.

State space model ('grey box model')

De respons curves laten zien dat het gedrag kan worden benaderd als een tweede orde proces met dode tijd. Met behulp van de system identification toolbox is een tweede orde model afgeleid. Uitgaande van tweede orde is het ook mogelijk een 'grey box' fysisch model te maken, wat als voordeel heeft dat de relatie tussen de systeemparameters en de fysische parameters zichtbaar wordt. Bovendien kunnen er realistische simulaties mee worden uitgevoerd. Onder de aanname van constante drainflow wordt het volgende gecompartimenteerde nutriëntenmodel afgeleid:

$$\varepsilon V_1 \frac{dC_1}{dt} = -(F_d + \alpha_2 W)C_1 + (F_d + W)C_{in} - (1-\beta_2)WC_x$$

$$\varepsilon V_2 \frac{dC_2}{dt} = +(F_d + \alpha_2 W)C_1 - F_d C_2 - \beta_2 W C_x$$

$$C_d = C_2$$

Hierbij zijn:

V_1, V_2	het volume van de bovenste laag resp. onderste laag van het substraat (cm^3)
F_d, W	resp. drain flow en de wateropnamesnelheid ($cm^3\ min^{-1}$)
a_2, $ß_2$	de fractie van de totale wateropname, resp. nutriëntopname die plaats vindt in laag 2
C_1, C_2	de concentraties in de boven- en onder laag (mS of mmole cm^{-3})
C_x	de opnameconcentratie, d.w.z. U/W, waar U is de nutriënt opnamesnelheid (mS $cm^3\ min^{-1}$ of mmole min^{-1})

In state-space vorm $x = [C_1 \quad C_2]^T$, $u = [C_{in} \quad C_x]^T$ met: $\dot{x} = Ax + Bu$, $y = Cx$ is dit:

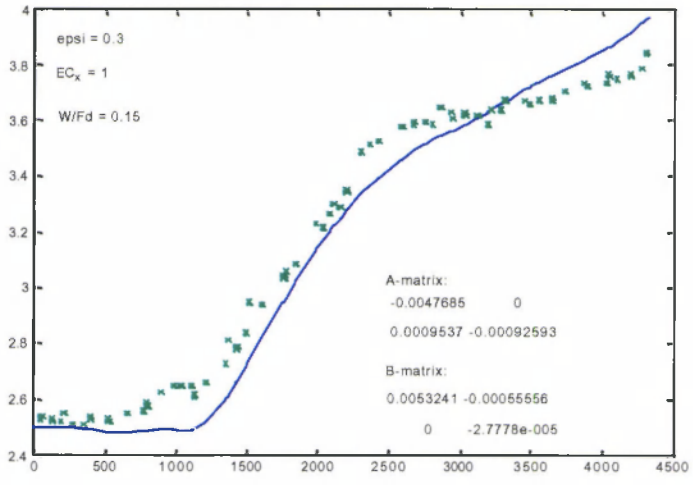
met: $A = \begin{pmatrix} \frac{-F_d - \alpha_2 W}{\varepsilon V_1} & 0 \\ \frac{F_d + \alpha_2 W}{\varepsilon V_2} & \frac{-F_d}{\varepsilon V_2} \end{pmatrix}$, en: $B = \begin{pmatrix} \frac{F_d + W}{\varepsilon V_1} & \frac{-(1-\beta_2)W}{\varepsilon V_1} \\ 0 & \frac{-\beta_2 W}{\varepsilon V_2} \end{pmatrix}$, en: $C = (0 \quad 1)$

De parameter e is een coëfficiënt (<1) om de porositeit te kunnen verrekenen en het effectieve doorstroomde volume. Parameter e is de belangrijkste kalibratie parameter. De termen F_d and W in de coëfficiënten veranderen in de tijd. In de 'constante drainflow' situatie, dus als de cycle-averaged drainflow constant wordt gehouden door zijn regelaar, wordt F_d constant, maar blijft W nog wel tijdsvariant. Deze tijdsafhankelijkheid is bij de identificatie genegeerd.

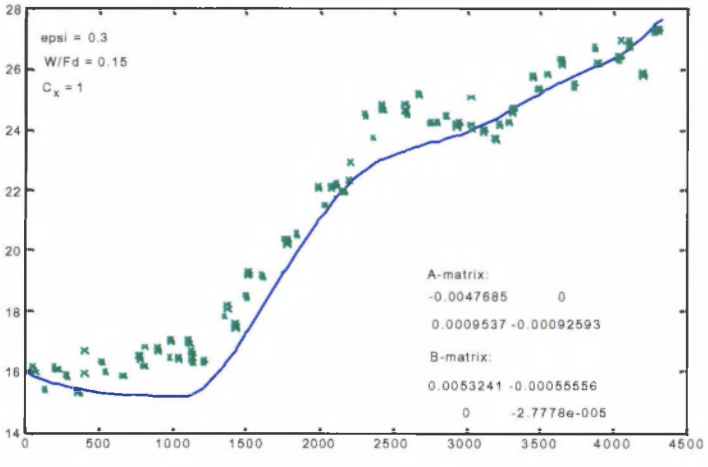
Resultaat van de identificatie

De stap response experimenten zijn gebruikt voor een eerste ruwe voorbereidende identificatie. Een voorafgaande test, die is gebaseerd op een zuivere stapvormige aanpassing van de EC, toont dat e = 0.3 een acceptabele response geeft. Vervolgens is de parameter e zodanig aangepast dat de gesimuleerde response op het waargenomen ingangssignaal goede overeenkomst vertoont met de werkelijk waargenomen response, waarbij gebruik wordt gemaakt van de state space versie van het model. Hierbij is de W/Fd verhouding op 0.15 gezet. Als eerste is de identificatie uitgevoerd op basis van EC (Figuur 4.8.17). Hoewel niet helemaal perfect, is de fit acceptabel. De gevonden A en B matrices gelden bij een sample tijd van 2000 s, en voor de gegeven configuratie (volumina etc.) Vervolgens zijn dezelfde parameterwaarden gebruikt om de ingang-naar-uitgang overdracht te simuleren van NO_3^- and K^+. Deze test is uitgevoerd om vast te stellen of de overdracht dezelfde is voor verschillende ionen en EC, zoals hierboven is afgeleid in de theoretische benadering. Aanpassingen voor de opname concentratie voor K^+: C_x=1, for NO_3^-: C_x=3. Voor het onderste compartiment is de begintoestand gelijk gemaakt aan de waargenomen drain concentratie, en voor het bovenste compartiment aan de werkelijk gemeten

voedingsconcentratie. Deze keus voorkomt wegdriften tijdens inschakelen. Het model is niet erg gevoelig voor initiële condities.



Figuur 4.8.17. Kalibratie van het State Space model op EC. Begin toestand: 2.5, W/F_d = 0.15, C_x = 1 mS. De gekalibreerde waarde van e = 0.3. de betrokken A, B, C, D matrices waarden staan in de figuur.



Figuur 4.8.18. Simulatie van een nitraat stap responsie, die gebruik maakt van kalibratieparameters uit de EC identificatie.

De Figuren 4.8.18 en 4.8.19 laten het resultaat zien. De conclusie is, dat de parameters die verkregen zijn als resultaat van de kalibratie op basis van EC, ook voldoende het gedrag van nitraat en kalium beschrijven. Het blijkt dat het "grey-box model" een acceptabele beschrijving geeft van het gedrag van nutriënten in relatie tot EC, en een goede beschrijving voor het gedrag van nitraat en kalium.

Resultaat van het regelaarontwerp

Voor de State space regelaar wordt verwezen naar Wouters, 2002. Hier wordt volstaan met een weergave van de vorm van het regelalgoritme, omdat dit van belang is voor de implementatie. De algemene regelaarstructuur is:

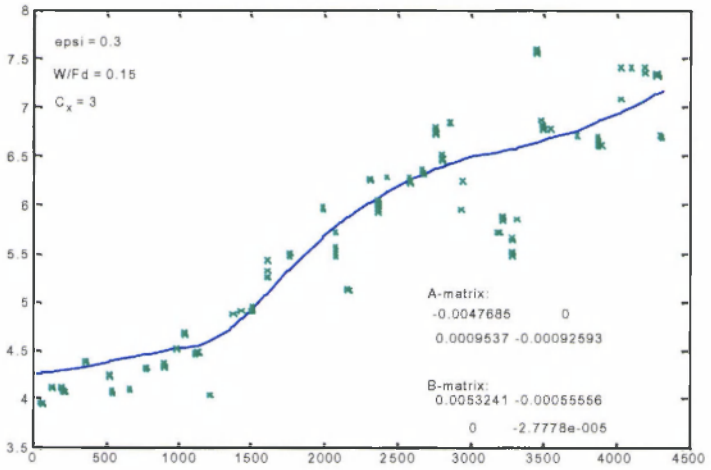
$$\dot{x} = A_c x + B_c e$$

$$u = C_c x + D_c e$$

waarin: x de interne regelaar toestand

e de afwijking tussen de waargenomen concentratie en het set-point

u de uitgang van de regelaar, d.w.z. de gewenste concentratie in het irrigatiewater. Deze uitkomst wordt als recept doorgegeven naar de doseereenheid.



Figuur 4.8.19. Simulatie van een K^+-stapresponsie, waarbij de EC kalibratieparameters zijn gebruikt

De matrices A_c, B_c, C_c, D_c zijn de regelaarparameters die de uitkomst zijn van het ontwerpproces. Het resulaat voor een stuurinterval van 33.33 minuten (2000 s) voor EC in de gegeven configuratie is:

$$A_c = \begin{pmatrix} -0.2891 & 0 \\ -2.01 & 1 \end{pmatrix} \qquad B_c = \begin{pmatrix} 0.2901 \\ 2.01 \end{pmatrix} \qquad C_c = \begin{pmatrix} 99.42 & 1 \end{pmatrix} \qquad D_c = 0$$

PI regelaar

Uit de metingen t.b.v. de responsecurve is een statische versterking K, een karakteristieke tijdconstante t en een dode tijd t_d afgeleid. Hieruit volgen de regelaarparameters volgens Cohen en Kuhn. Voor EC:

$$K_c = \frac{1}{K}\frac{\tau}{t_d}\left(0.9 + \frac{t_d}{12\tau}\right) = 4.2 \text{ mS/mS} \qquad \text{en} \qquad \tau_I = t_d \frac{30 + 3t_d/\tau}{9 + 20t_d/\tau} = 630 \text{ min}$$

Het PI-regelalgorithme kan in dezelfde vorm worden gebracht als de state space regelaar (van Straten, 2002). Het resultaat is

$$x_{k+1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -K_c & 1 \end{pmatrix} x_k + \begin{pmatrix} 1 \\ K_c\left(1 + \frac{T_c}{\tau_I}\right) \end{pmatrix} e_k \quad , \text{ en } \quad u_k = \begin{pmatrix} -K_c & 1 \end{pmatrix} x_k + K_c\left(1 + \frac{T_c}{\tau_I}\right) e_k$$

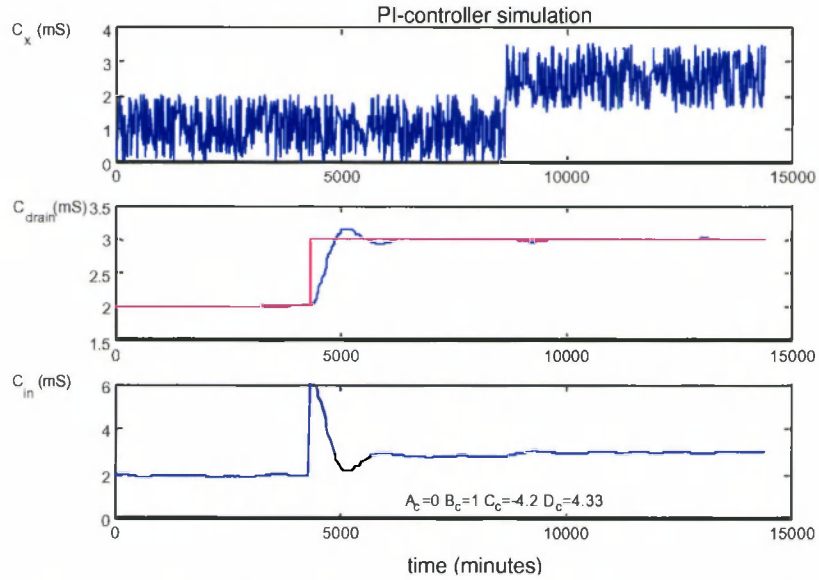
Toestand 1 representeert in dit geval de vorige afwijking, en toestand 2 de vorige regelactie. De uitkomst in getalswaarden voor een regelinterval van 33.33 min (2000 s) bij de gegeven configuratie is

$$A_c = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -4.2 & 1 \end{pmatrix}, B_c = \begin{pmatrix} 1 \\ 4.42 \end{pmatrix}, C_c = \begin{bmatrix} -4.2 & 1 \end{bmatrix}, D_c = [4.42]$$

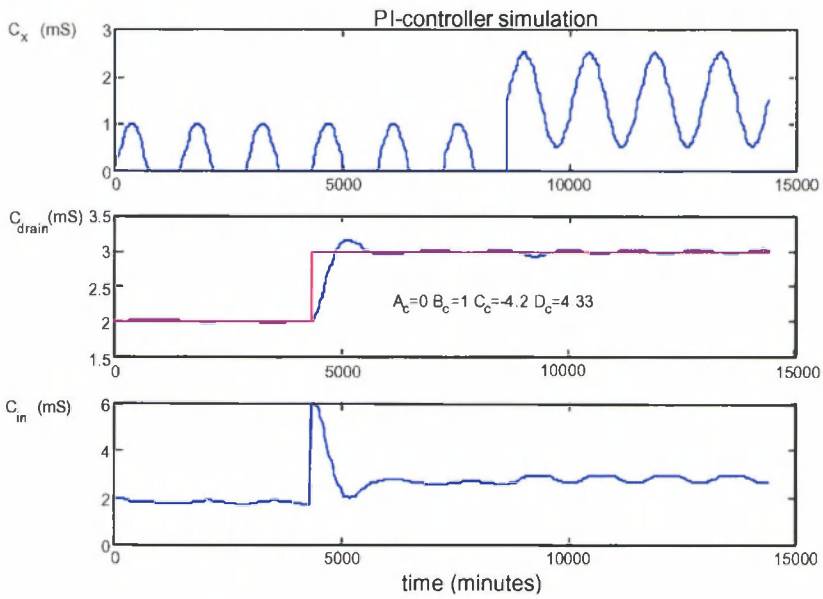
Het getal 4.42 kan worden aangepast om de overshoot te verminderen, maar mag niet kleiner worden dan 4.2. De regelaar kan het best worden geïnitialiseerd door de tweede state gelijk te maken aan het (ongeregelde) niet veranderende ingangssignaal.

Test van de regelaar

Het grey-box state space model is gebruikt om de regelaar te testen. Deze test is uitgevoerd in Matlab-Simulink. Een testprocedure is opgezet voor in een closed loop response op een stapvormige verandering op de setpoint waarde. Verschillende typen testsignalen zijn gebruikt als verstoring: witte ruis en het positieve halve deel van een sinus als verstoring in dagritme. Na enige tijd is in beide gevallen het gemiddelde niveau stapvormig veranderd. De Figuren 4.8.20 en 4.8.21 tonen de verstoring, de geregelde drain concentratie, samen met het setpoint en de vereiste regel waarde, die wordt gelimiteerd op een bovenwaarde van 6 mS.

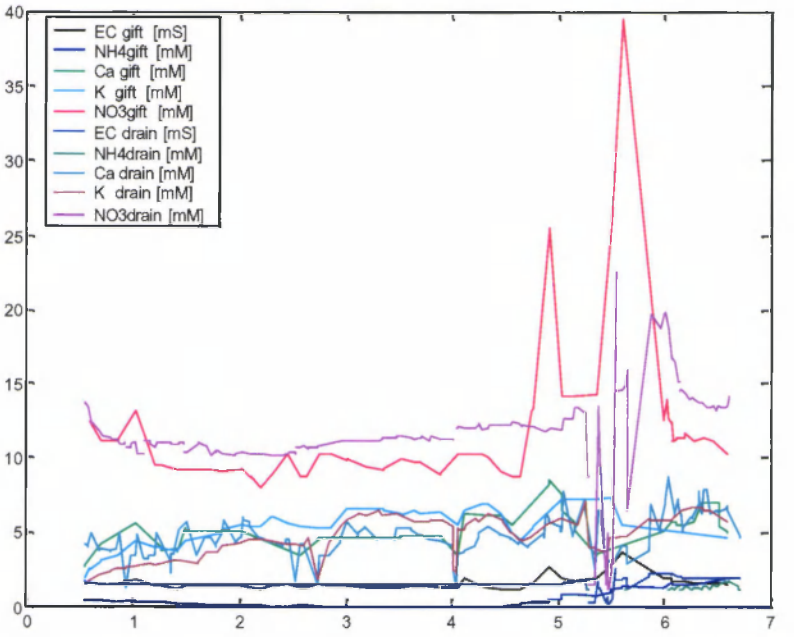


Figuur 4.8.20. Gedrag van een PI-regelaar in simulatie, met nutriënt opname volgens witte ruis (top). Het middelste diagram toont het setpoint en de closed-loop response, het onderste diagram de gevraagde regelwaarde.



Figuur 4.8.21. Gedrag van een PI-regelaar in simulatie, met een halve sinus als nutriënt opname (top). Het middelste diagram toont het setpoint en de closed loop response, het onderste diagram de gevraagde regelwaarde.

Voor resultaten met de toestandsteruggekoppelde regelaar wordt verwezen naar Van Straten (2002). Deze regelaar gaf in het algemeen iets onrustiger resultaten, en bleek minder robuust voor variaties in de modelparameters.
Figuur 4.8.22 laat zien dat de regelaar de concentratie van de nutriënten in de drain redelijk constant regelt op de ingestelde waarde van 1 tot 4 januari. Tengevolge van een technische storing in de



meetinstallatie vertoont de geregelde waarde van de nutriëntenconcentratie tussen 4 en 6 januari grote afwijkingen. De regelaar probeert deze fouten te corrigeren door grote ingrepen in de dosering. Nadat de meetinstallatie is hersteld op 6 januari probeert de regelaar opnieuw de setpoints te realiseren. Deze acties geven aan dat de regelaar naar behoren functioneert als corrigerend orgaan. Het bepalen van de kwaliteit van de regeling, in termen van robuustheid en nauwkeurigheid, benodigt een langere periode van ongestoord meten en regelen.
Figuur 4.8.22. Resultaten van de regeling in een praktijk situatie van 2 tot 9 januari 2003. Setpoints: NO_3 10mM, voor K en Ca 5mM, en voor NH_4 1mM

Conclusies

1. Het systeem kan bij benadering worden omschreven als tweede orde met een dode tijd.
2. In simulatie kan het systeem worden geregeld met een eenvoudige PI-regelaar, waarvan de parameters kunnen worden ingesteld met de regels volgens Cohen en Kuhn, gebaseerd op een waargenomen proces response.
3. Een grey box model gebaseerd op twee compartimenten met extra dode tijd geeft een redelijke afspiegeling van het waargenomen i/o gedrag voor ionen in opgeloste toestand (EC, K^+, NO_3^-).
4. Naast de PI regelaar is ook een toestandsteruggekoppelde regelaar mogelijk. In theorie biedt deze meer flexibiliteit in het tunen van het regelgedrag. Een PI regelaar is in het algemeen robuuster.
5. De kalibratie van het model laat zien dat in de testopstelling maar ca. 30% van het werkelijk substraatvolume deelneemt aan het proces.
6. Er is een methodiek ontwikkeld waarmee regelaars kunnen worden ontworpen en bestudeerd voor verschillende nutriënt opname patronen.
7. De nutriënten regeling functioneert naar behoren in een praktijknabije situatie in de IMAG kas.
8. De nutriëntenregelaars zijn geïmplementeerd, maar konden binnen de projectduur onvoldoende worden getest om een uitspraak te kunnen doen over de kwaliteit van regelen.

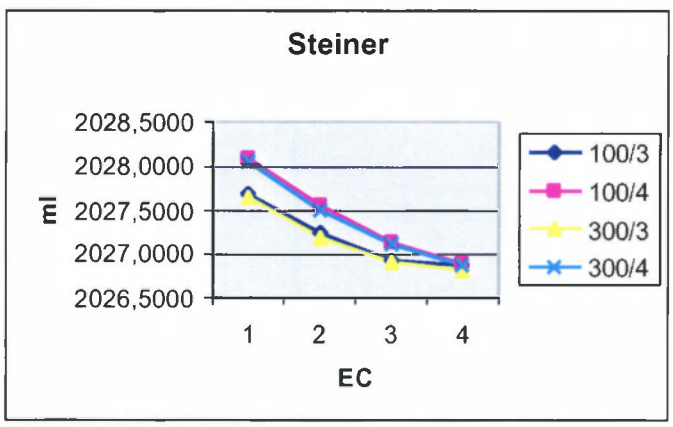
Setpoint Generator

Introductie

Een belangrijk onderdeel in het HYDRIONLINE project is de setpoint generator die de optimale instellingen genereert voor de actuatoren (water- en nutriënten gift regelaar van Hortimax) zodanig dat een doelfunctie, e.g. nutriënt afval in de drain gecombineerd met versgewicht van de vruchten, wordt geoptimaliseerd. In feite wordt in de setpointgenerator dus een belangrijke doelstelling van het project gerealiseerd, namelijk de bepaling van een scenario die het afval in de drain minimaliseert.
In de optimalisatie wordt een eindig aantal scenario's (56 in het proof-of-principle) geëvalueerd met behulp van het gecombineerde plant/substraat model. Dit gebeurt in een optimalisatie schil (geprogrammeerd in FORTRAN) die het plant-substraat model aanroept en de verschillende scenario's evalueert. Deze optimalisatie routine is in staat om (i) het model te initialiseren en vervolgens een simulatie uit te voeren, (ii) een status dump en/of update uit te voeren waardoor simulering van het model mogelijk is vanaf een *willekeurig* tijdstip en (iii) een geassocieerde kostenfunctie te evalueren en vervolgens uit alle scenario's het optimale te kiezen. Dit optimale scenario wordt vervolgens aangeboden aan de Hortimax apparatuur en, meer specifiek, gecommuniceerd naar de nutriënten module van Synopta – het besturingssysteem van de Hortimax apparatuur. Voor een uitgebreide beschrijving van de werking en programmering van de setpoint generator verwijzen we naar Werner, 2002.

Resultaten Setpoint Generator

In onderstaand figuur staat een voorbeeld waarin het resultaat van een aantal scenario's wordt gepresenteerd. Dit voorbeeld laat de cumulatieve wateropname van de plant zien voor een zogenaamde Steiner-oplossing (irrigatie water) voor een viertal verschillende straling setpoints (3 resp. 4 ml irrigatiewater per 100 Joule straling na cumulatie van 100 resp. 300 Joule zonlicht). Verhoging van de EC waarde van het irrigatie water resulteert in dit geval tot een daling van de water opname [ml] van de plant. De scenario's worden geëvalueerd voor een periode van drie dagen en de optimalisatie wordt `on-line' elke ochtend uitgevoerd. Met andere woorden: Er is een zogenaamde model voorspellende regelaar gerealiseerd binnen het project en met name de communicatie tussen de optimalisatie software,



het plant-substraat model en de hardware (actuatoren) wordt gezien als een substantiële vooruitgang binnen HYDRIONLINE. In het proof-of-principle (hfdst 4.7) wordt in meer detail ingegaan op de resultaten die met deze regel strategie zijn verkregen.

Figuur 4.8.23. Opname water door de plant voor verschillende EC waarden en irrigatie scenario's.

Tot slot: een meer gedetailleerde beschrijving en handleiding van de setpointgenerator in FORTRAN wordt gepresenteerd in Werner, (2002).

Observer nutrienten en water opname

Introductie

Om tot een minimale afvalstroom in de drain van de kas te komen is het belangrijk om de plant precies te geven wat ze nodig heeft aan water en nutriënten. Echter, de plant behoefte is niet direct meetbaar en vereist een indirecte meting waarmee, door middel van een massabalans over de meetgoot, kan worden *gereconstrueerd* wat de opname is. Deze berekening vindt plaats in de observer of software sensor.

'On-line' schatten van toestanden en parameters in een systeemmodel is een bekend onderzoeksthema binnen de systeemtheorie. Met name het (extended) Kalman filter wordt veel gebruikt in deze context. In Stigter, (1997), wordt een observer voorgesteld in continu-discrete vorm, dwz continue dynamica en discrete waarnemingen, die valt binnen de categorie `recursive-prediction-error methods', Ljung (1987). Essentieel element in de observer theorie is dat er een balans gemaakt wordt tussen *modelonzekerheid* en *meetonzekerheid* met als doel om de schatting van zowel de nutriënt concentratie, het water volume en de respectievelijke opnames van deze grootheden door de plant te verbeteren met behulp van metingen en adaptieve modelvoorspellingen. Voor een meer theoretische discussie van het gebruikte algoritme verwijzen we naar de eerder genoemde referenties maar ook Werner, (2000), Gijsbertsen, (2002) waarin verdere uitbreidingen en convergentie eigenschappen van recursive-prediction-error methoden worden besproken en onderzocht.

Omdat het plant-substraat model te log en complex is om dienst te kunnen doen voor een *snelle* software sensor werd allereerst een vereenvoudigd model van de substraatmat geconstrueerd, R. Stappers (2001). De plant wordt hier gezien als *verstoring* die moet worden geschat op basis van irrigatie en drain metingen aan de meetgoot. Dit vereenvoudigde model is succesvol toegepast in het observerschema in Werner *et al.*, 2003.

Resultaten Observer (in silicon)

In onderstaand figuur hieruit een resultaat voor een *gesimuleerde* case. In de figuur is duidelijk te zien dat de wateropname goed kan worden gereconstrueerd door het filter na het bekende `in-slinger verschijnsel' wordt de opname van zowel water als nutriënten getrouw weergegeven.

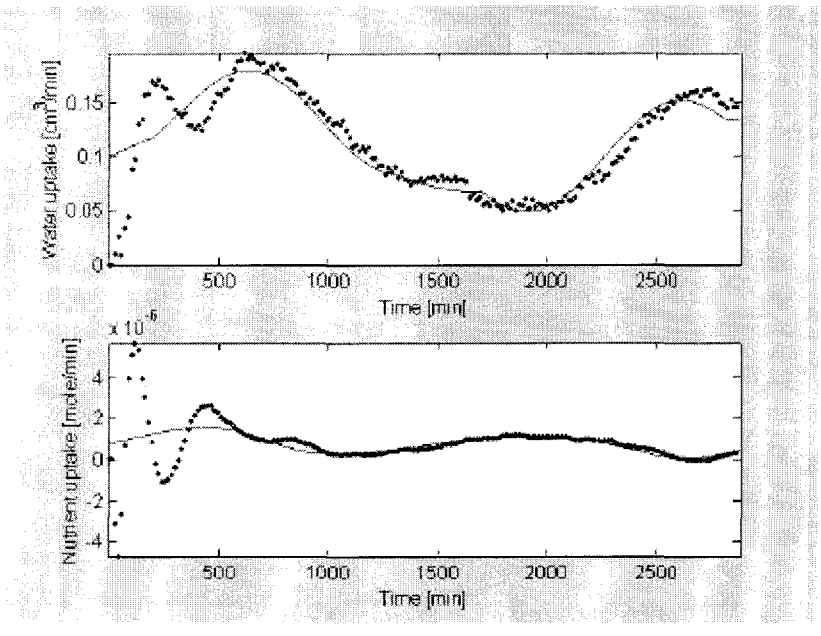


Figure 4.8.23. Opname reconstructie van water (boven) en nutriënten (onder) van de plant

In geval er echte data werden gebruikt uit de meetgoot blijkt dat reconstructie nog niet succesvol kan plaatsvinden omdat, waarschijnlijk, het niet equidistant zijn van de bemonstering van zowel water als nutriënten met respectievelijk de `tipping bucket' en de hydrion sensor, instabiliteit veroorzaken. Er wordt verwacht dat voor dit instabiele gedrag een oplossing kan worden gevonden door bijvoorbeeld de data te `pre-filteren' waardoor op een willekeurig tijdstip een meting beschikbaar kan komen. Toekomstig onderzoek zal hier opheldering over geven en er wordt verwacht dat dit binnen een redelijk korte termijn kan worden uitgevoerd.

Conclusies (Observer en Setpointgenerator)
In conclusie kunnen we de voortgang samenvatten in het volgende:

1. Er is een setpoint generator ontwikkeld in FORTRAN die in staat is te communiceren met het plant-substraat model, de nutriënten module van de Hortimax unit, en op basis van scenario evaluaties een optimale regelstrategie voor de kas kan uitkiezen. Ook kan de kosten functie die impliciet het optimaal gedrag van het systeem bepaalt vooraf worden gespecificeerd naar de eisen van de gebruiker.
2. Er is een observer ontwikkeld die in staat is om, in simulatie, de nutriënten en water opname van de plant te reconstrueren met behulp van een vereenvoudigd model van de substraatmat.
3. Het is mogelijk gebleken om diverse *afzonderlijke* eenheden in de kas te integreren tot een synergie waarin de afzonderlijke elementen als onderdeel van de regelsoftware samenwerken onder een vooraf bepaalde doelstelling, e.g. minimalisatie van de drain uit de kas onder voorwaarde dat de vruchtopbrengst zo hoog mogelijk is.

Conclusies van het deelproject

De behaalde resultaten hebben enerzijds betrekking op de noodzakelijke meettechniek, op de regeling zelf, en op het effect t.a.v. milieubelasting en plantkwaliteit.

Wat betreft de meettechniek is het principe van een representatieve meetgoot uitgewerkt, waarmee in samenhang met de juiste sensoren de debieten en ion-concentraties nauwkeurig kunnen worden gemeten. Er is een ICT-infrastructuur en real time database gerealiseerd, waarmee de meetgegevens op een transparante wijze beschikbaar worden gemaakt voor de verschillende typen besturingen. Het succesvol laten samenwerken van de verschillende onderdelen in de water- en nutriënten cyclus is een belangrijk resultaat.

De meetgegevens zijn gebruikt om een regeling te realiseren die de gevraagde gewasverdamping automatisch via de watergift compenseert, zodat een maximale watervoorziening naar de plant is gegarandeerd zonder dat er sprake is van een onnodige recirculatie. Deze regelaar is succesvol geïmplementeerd in de proefkas. Op een soortgelijke wijze is een regeling ontworpen voor de nutriënten, die automatisch de door de plant gerealiseerde nutriëntopname per individueel ion compenseert. Deze regelaar is in simulatie uitgewerkt, terwijl enkele voorlopige praktijkproeven zijn uitgevoerd, die laten zien dat automatische opnamecompensatie mogelijk is.

Bovengenoemde regelingen zijn gesloten lus regelingen, waarin geen gebruik wordt gemaakt van plantmodellen. Plantmodellen worden wel gebruikt in een meer geavanceerde regeling, die de dosering baseert op een voorspelling van de plantopname, in samenhang met expliciet geformuleerde doelen. Voor de haalbaarheid van deze methode van regeling is het proof-of-principle geleverd. In deze benadering wordt de nutriëntdosering die de plant nodig heeft afgewogen tegen de kosten van recirculatie en de milieubelasting. Bovendien wordt het hiermee in de toekomst mogelijk om doseringen toe te passen die bijdragen aan de kwaliteit van het geoogste product.

In zijn huidige vorm is deze regeling 'open lus', dat wil zeggen dat er nog geen terugkoppeling wordt gerealiseerd op basis van de werkelijk opgetreden water- en nutriëntopname. Zo'n terugkoppeling is voor de robuustheid van het uiteindelijke systeem essentieel. Eén manier om dit te realiseren is met

behulp van een softwaresensor, waarmee de opname kan worden gereconstrueerd uit de beschikbare meetsignalen. Voor de wateropname is reeds een goed resultaat bereikt, terwijl de resultaten voor nutriëntopname veelbelovend zijn. Ook de basale regelaars kunnen worden gebruikt om informatie te krijgen over de water en nutriëntopname. Al deze deelresultaten bieden een uitstekende basis voor een modelgebaseerde, optimale regelaar, die gebruikmaakt van het plant-substraat model, en van terugkoppeling door middel van (soft)sensors.

De nadruk in dit deelproject heeft gelegen op aantonen van de technische haalbaarheid van de principes van optimalisatie, en het ontwerp en de implementatie van prototypes. De directe effecten op de milieubelasting en de economie van het proces konden binnen de afgesproken projectduur van het onderzoek niet expliciet worden gekwantificeerd. De belangrijkste winst wordt geboekt doordat risico's van foutieve water- en nutriëntgift worden geminimaliseerd. Hierdoor kan onnodig productieverlies worden voorkomen, en wordt het beslag op meststoffen verminderd. Gezien de belangstelling van de toeleverende industrie heeft het deelproject duidelijk bijgedragen aan de innovatieve kracht van de Nederlandse tuinbouwsector.

4.9 Deelproject Procesintegratie

Deelnemende partijen (onderstrepen verantwoordelijke partner)

- HortiMaX b.v.: Technische implementatie en integratie van alle deelprocessen.
- LUW/IMAG: Definitie van (nieuwe) regelalgoritmen voor de verschillende deelprocessen en interactie tussen de deelprocessen.
- Overige partijen: definitie van interfaces voor de betreffende deelprocessen

Summary

This subproject involves the integration of the different sub projects into a closed growing system. For this purpose, a technical infrastructure is being developed consisting of a modular hardware platform and a software integration layer allowing the implementation and integration of the sub systems.

Samenvatting

In dit deelproject vindt de integratie plaats van de verschillende deelprojecten tot een gesloten teeltsysteem. Hiervoor wordt een technische infrastructuur ontwikkeld bestaande uit een modulair hardware platform en een software integratielaag waarop de diverse deelsystemen geïmplementeerd kunnen worden en tot één systeem geïntegreerd.

Deliverables

	Status	Datum	
Omschrijving deliverable	(% gereed)	**Start**	**Opleverir**
Ontwikkeling nieuw modulair hardware platform voor real time koppeling proces modules	100	Jan 2000	Dec 2002
Specifieke ontwikkeling nieuw modulair hardware platform uitbesteed door van Vliet aan ingenieursburo	100	Jan 2000	Dec 2001
Ontwikkeling van systeemsoftware voor de nieuwe generatie procescomputers	100	Jun 2000	Dec 2001
Integratie nieuw hardwareplatform in Synopta	100	Jan 2002	Dec 2002
Inventarisatie input-output parameters verschillende modules	100	Feb 2001	Aug 2001
Ontwikkeling regelalgoritmen voor diverse proceskoppelingen	100	Jun 2001	Dec 2002
Eerste test in kas	100	Aug 2002	Dec 2002
Implementatie van alle regelalgoritmen in nieuw platform voor totaal geïntegreerde procesautomatisering	50	Jan 2002	Dec 2002
Tweede test in kas	0	-	-

Inleiding

De huidige procesautomatisering in de glastuinbouw is gericht op het automatiseren van de verschillende deelprocessen (klimaat, irrigatie, meststoffen- voorbereiding en -dosering, desinfectie van recirculatiewater). Veel van deze processen worden apart geautomatiseerd en er bestaan slechts nog beperkte koppelingen tussen deze processen. Er is hier sprake van 'automatiseringseilanden'. In het gesloten teeltsysteem dat in dit project ontwikkeld wordt, moet veel informatie tussen de verschillende deelsystemen uitgewisseld worden. Er is daarbij ook sprake van enkele 'real-time' koppelingen t.b.v. proces regelingen waarbij gegevens van het ene proces direct beschikbaar moeten zijn voor het andere proces. Dit vraagt om een technische infrastructuur die deze koppelingen mogelijk maakt.

Tijdens het vorige EET project (EETK96083) is een begin gemaakt met deze infrastructuur door middel van de ontwikkeling van een nieuw management software pakket (Synopta) waar de bestaande Van Vliet procescomputers mee gekoppeld kunnen worden. Deze integratie vindt plaats op het niveau van user interface en data verwerking (opslag en representatie historische gegevens). De verschillende procescomputers zijn echter nog niet op 'real time' niveau met elkaar gekoppeld, m.a.w. het is niet mogelijk om gegevens die in de ene regelcomputer gemeten worden direct (real time) beschikbaar te hebben voor een proces in een andere regelcomputer. Deze gegevens kunnen wel via de managementsoftware worden uitgewisseld maar dan hebben de gegevens de status van historische data. Voor een real time koppeling is het gewenst dat de regelcomputers een directe koppeling met elkaar hebben, dus buiten de managementsoftware om. Om dit te realiseren is er in het kader van het vorige project een haalbaarheidstudie gedaan en wordt in het huidige project daadwerkelijk een nieuw hardware platform ontwikkeld waarmee verschillende regelunits 'real time' gekoppeld kunnen worden. Naast de infrastructuur bestaande uit het nieuwe hardware platform en het management software pakket, zullen er ook nieuwe regelalgoritmen ontwikkeld moeten worden die betrekking hebben op de koppelingen in het systeem met de nieuwe modules zoals de on-line analyse van het recirculatiewater, de plant modellen, de specifieke plantsensoren en de waterbehandeling.

Resultaten

Ontwikkeling nieuw hardware platform

In 2001 is de ontwikkeling van het hardware platform afgerond en is de nul-serie geproduceerd. De systeem software voor het nieuwe hardware platform is ook grotendeels afgerond.
Er heeft in 2001 een belangrijke organisatiewijziging plaatsgevonden bij Van Vliet die in het kader van dit deelproject genoemd moet worden vanwege de (positieve) gevolgen die hieruit voortgevloeid zijn. Van Vliet is gefuseerd met het bedrijf PB-Systems uit Naaldwijk. PB-Systems was een voormalige concurrent van Van Vliet en heeft een soortgelijk productportfolio op het gebied van procesautomatisering voor de glastuinbouw. Na een grondige evaluatie van beide productportfolio's en lopende nieuwe ontwikkelingen is een strategische keuze gemaakt voor verdere ontwikkelingen van het nieuwe bedrijf. Voor de procesautomatisering bij de grotere/complexere tuinbouwbedrijven is gekozen om de infrastructuur van PB-Systems te gebruiken en verder te ontwikkelen. Omdat in deze infrastructuur gebruik gemaakt wordt van een Industriële PC (IPC) biedt deze infrastructuur flexibele mogelijkheden om de benodigde integratie functionaliteit die in dit project gewenst is, te realiseren. Het platform zoals door Van Vliet ontwikkeld is, kan binnen dit nieuwe hardwareplatform ingezet worden voor het toepassen van remote-IO. Voor het project betekent dit concreet dat er binnen het nieuwe bedrijf (Van Vliet en PB-Systems) meer mogelijkheden zijn om de verschillende deelprocessen binnen dit project te integreren. Afhankelijk van de behoefte zullen de verschillende systemen ingezet kunnen worden.
In 2002 is het hardware platform verder uitontwikkeld, hetgeen heeft geresulteerd in een eerste commerciële versie die begin 2003 in de markt is gezet.

Inventarisatie input-output parameters verschillende modules

Er zijn in 2001 diverse discussies geweest over de koppelingen tussen de verschillende deelsystemen. Deze hebben in 2002 geleid tot implementatie in een testsysteem, zoals gemeld in de verschillende deelprojecten (o.a. deelproject 3, nutriënten dosering en deelproject 8, regeling en besturing).

Ontwikkeling regelalgoritmen voor diverse proces koppelingen

In het kader van deelproject 3 is een meststoffencalculatie module gemaakt inclusief een koppeling met de doseerunit om zodoende aan te kunnen sluiten op de regelaar die in deelproject 8 ontwikkeld wordt. Verder is in 2002 de benodigde koppeling met het plantmodel ontwikkeld en geïmplementeerd. Zie de andere deelprojecten voor de verdere details.

Conclusies

De Milestones overziende, kan gesteld worden dat vrijwel alle milestones gehaald zijn.

De milestone 'tweede test in kas' is niet gehaald – dit had met name te maken met het feit dat de eerste 'proof of principle' test pas aan het eind van de looptijd van het project kon worden ingezet (zie de andere delprojecten voor de reden hiervan).

Met betrekking tot de implementatie van alle regelalgoritmen in het nieuwe platform kan worden opgemerkt dat een deel van de regelalgoritmen reeds is geïmplementeerd, het nieuwe hardwaresysteem wordt momenteel wel commercieel ingezet in de tuinbouw maar is niet als zodanig ingezet in het proof-of-principle experiment. De motivatie hierachter was de realisatie dat tijdens een (wetenschappelijk) experiment andere eisen aan de apparatuur worden gesteld dan tijdens commercieel bedrijf. Als voorbeeld kan genoemd worden dat tijdens een wetenschappelijk experiment het van belang is dat de database met alle instellingen direct door alle betrokkenen benaderd en aangepast kan worden - dit is tijdens commercieel bedrijf niet wenselijk! Vandaar dat in overleg met alle betrokkenen ervoor gekozen is om de implementatie van alle regelalgoritmen tijdens het proof of principle experiment op te zetten door de diverse testsystemen met elkaar te laten communiceren middels speciaal daarvoor ontworpen interfaces. Voor de uiteindelijke commerciele toepassing zal natuurlijk alsnog één overall systeem benodigd zijn, waarbij met name nog veel aandacht besteed moet worden aan de veiligheden zoals die in een dergelijk high-tech systeem moeten worden ingebouwd (zie conclusies deelproject 3).

Met betrekking tot de planning van de oorspronkelijke werkzaamheden en de daadwerkelijke uitvoering ervan kan wel worden opgemerkt dat de in 2001 te realiseren milestones meer tijd kostten dan oorspronkelijk gedacht was. De acquisitie van het bedrijf PB-systems (waarvan het hardware platform al verder was uitontwikkeld dan het door van Vliet ontwikkelde platform) heeft ertoe geleid dat de hardware-gerelateerde milestones van dit project niet alleen binnen de duur van het project konden worden gerealiseerd maar er ook extra mogelijkheden zoals remote-IO aan konden worden toegevoegd.

4.10 Perspectief Hydrion-line

De bewuste burger eist dat agroproductie op een maatschappelijk geoorloofde wijze plaatsvindt. Naar aanleiding hiervan hebben de overheid en de tuinbouwsector een convenant gesloten m.b.t. vermindering van de milieubelasting. Zo moet in 2010 de emissie van stikstof en fosfaat met 95% gereduceerd zijn t.o.v. het referentiejaar 1985. Deze doelstelling is vooralsnog niet haalbaar. De projectaanvraag kan als een uitdaging worden gezien om de milieudoelstellingen voor 2010 toch te realiseren.

Het doel van Hydrion-line is een geïntegreerd monitoring- en besturingssysteem voor nutriënten en water bij kasteelt te ontwikkelen, dat het mogelijk maakt voor de commerciële partners hun marktaandeel wereldwijd te consolideren en zo mogelijk uit te bouwen. Het richt zich hierbij op volledige sluiting van de kringloop van water en nutriënten waarbij geen stoffen weglekken naar bodem en het grond- of oppervlaktewater. Tevens moet productie planmatig plaatsvinden, zodat veiligheid, kwaliteit en hoeveelheid product voortdurend via informatie uit de keten kunnen worden afgestemd op de eisen van de overheid en op de veranderende consumentenvraag.

Octrooiaanvragen

Verschillende onderdelen rondom ion sensoren zijn reeds door de partners octrooien aangevraagd of worden door hen al onderhouden.. Het idee en de uitvoeringsvorm van de softsensor, de model-based controller en de sensor voor lichtextinctie zullen op octrooieerbaarheid worden onderzocht.
Het internationale karakter van de glastuinbouw en de dominante positie van de commerciële partners op deze markt, maakt dat internationale octrooien van belang zijn.

Commerciële vooruitzichten

Het belangrijkste projectresultaat is een nieuw concept voor monitoring, advisering en besturing in gesloten teeltsystemen. Dit concept zal in het vervolgtraject moeten worden getoetst en uitontwikkeld tot geïntegreerd monitoring-, adviserings- en besturingssysteem voor nutriënten en water bij kasteelten. Dat systeem zal uit verschillende modules zijn opgebouwd, die afzonderlijk ook in andere gebieden hun toepassing kunnen vinden, zoals boomkwekerij, akkerbouw, visteelt en behandeling van irrigatiewater, oppervlaktewater en industrieel proceswater.

Productvernieuwing, die ingaat op de problemen van de tuinder, is in de verzadigde Nederlandse markt van besturingssystemen voor kassen van levensbelang. De commerciële partners zien in dat door samenwerking in het Hydrion-line project een echte systeeminnovatie gerealiseerd kan worden en dat ze door dit project unieke producten kunnen gaan vermarkten. Om het vervolgtraject succesvol te kunnen afronden is echter uitbreiding met een commerciële partner gewenst. Hiertoe is Priva Hortimation B.V. benaderd en bereid gevonden om te investeren in de volgende fase van Hydrion-line teneinde haar productassortiment te kunnen uitbreiden. De exportmarkt voor deze bedrijven richt zich vooral op de Zuid-Europa, waar de problemen zich vooral toespitsen op watergebruik en sterk vervuilde acquifers, waardoor water een schaarse resource is geworden. De Zuid-Europese tuinder is vooral in vernieuwing op gebied van waterbehandeling geïnteresseerd en minder op bijv. klimaatregelen, waar de vernieuwing van de producten van Hortimax en Priva in het verleden in Nederland vooral op was gericht.

<u>Economische voordelen Kennisinstellingen</u>
De commerciële voordelen voor de WUR onderzoeksinstellingen zijn evident. Het Hydrion-line onderzoek past uitstekend in hun missie gericht op het verrichten van vooraanstaand wetenschappelijk, strategisch en toegepast onderzoek ten behoeve van agrarisch Nederland en ten

behoeve van de milieuproblemen in de groene Nederlandse ruimte. Kennis opgedaan in het kader van de Hydrion-line projecten is in deze kennismarkt van evident belang. De uitstraling van de projecten Hydrion-line I en II is van groot belang voor het verwerven van nieuwe projecten op deze genoemde onderwerpen. Een voorbeeld is het EU project Closys, gecoördineerd door Plant Research International, waarin negen partners, waaronder Hydrion, HortiMaX en Grodan, onderzoek doen naar gesloten glasteeltsystemen.

Economische voordelen automatiseringsbedrijven
De bedrijven Hortimax BV en Priva Hortimation BV hebben in Nederland een gezamenlijk marktaandeel van 68% op gebied van kasautomatisering. Wereldwijd is het aandeel 40% van de industriële glastuinbouw. Gezamenlijk zijn er vestigingen in 8 landen (zoals België, Canada, Frankrijk, UK, Spanje). In feite is de meeste groei van de bedrijven te verwachten in de export van kennisintensieve producten. Hydrion BV heeft goede contacten binnen de waterschappen en zuiveringsschappen. Bij deze organisaties bestaat grote belangstelling voor het on-line kunnen meten van de macro-ionen die in water, al dan niet door vervuiling, voorkomen. Verwacht wordt dat het nieuwe concept 5 jaar na aanvang van het beoogde project op de markt zal komen.

De verwachting is dat de gemiddelde extra investering in apparatuur en installatie per glastuinbouwbedrijf van gemiddelde grootte ca € 55.000 zal bedragen. Uitgaand van een commerciële introductie periode van 5 jaar en een conservatieve schatting van het aantal bedrijven dat tot aanschaf overgaat ontstaat het volgend financiële plaatje voor de toeleverende bedrijven HortiMaX en Priva Hortimation (niet gecorrigeerd voor inflatie).

Jaar	Aantal bedrijven (cumulatief)	Omzet in k€ (cumulatief)
2006	15	825
2007	40	2.200
2008	200	11.000
2009	400	22.000
2010	800	44.000

Plannen voor een vervolgtraject

De bedrijven Hortimax en Priva zijn zeer enthousiast geworden over de mogelijkheden van de nieuwe technologieën die in het Hydrion-line II project ontwikkeld zijn, hoewel de technologie nog niet het stadium marktrijp heeft bereikt. Zij willen daarom fors investeren in verder onderzoek en ontwikkeling van deze technologieën, om die vervolgens te kunnen exploiteren en om aan de wieg te kunnen staan van een systeeminnovatie in de tuinbouw. Deze bedrijven hebben de haalbaarheid en potenties van alle potentiële producten die voortvloeien uit het Hydrion-line II project geëvalueerd. Op basis hiervan is een selectie gemaakt van producten die verder ontwikkeld dienen te worden in dit vervolgproject. De producten m.b.t. ionselectief concentratiemeting, lichtreflectiemeting, drainmeting via een meetgoot, reconstructie van de wateropname door de plant via een softsensor en de basale regelaars voor water en nutriënten een stadium hebben bereikt, waarbij zich een haalbaar praktisch eindresultaat aftekent. Het onderzoek, dat bij deze producten nog nodig is, is self-tuning van de regelalgoritmen, nadere verificatie van de resultaten, het oplossen van enkele problemen die tijdens het Hydrion-line II onderzoek naar voren zijn gekomen, het generaliseren van het resultaat over meerdere gewassen, het verfijnen van technieken, het robuust maken van het ontwerp voor praktijkomstandigheden en inpassen in de productrange van de commerciële partners. Voor deze reeks van onderzoektaken is op een aantal onderdelen fundamenteel onderzoek noodzakelijk, terwijl voor een aantal ook van de onderzoekinstellingen een industriële onderzoekinspanning is vereist om het proces van praktijkinpassing goed te begeleiden.

De producten fotosynthese monitor, water- en nutriënten opnamemonitor, de feedforward en feedback model-based regelaars en de advies- en waarschuwingssystemen hebben dit stadium nog niet bereikt. Hier moet nog worden ingegaan op problemen die tijdens analyse van de proefresultaten uit het Hydrion-line II onderzoek naar voren zijn gekomen. Deels was afhandeling van deze problemen oorspronkelijk gepland om te worden opgelost na het Go/NoGo punt, deels is gebleken dat oplossing van alle 'witte vlekken' binnen het Hydrion-line II project niet mogelijk was. Tijdens de uitvoering van het Hydrion-line II onderzoek werd duidelijk, dat de ambitie om de modelbased regelaars en de softsensor voor nutriënt opname al tijdens dit onderzoek in een fase van "gereed voor uitwerken naar een praktische toepassing" te hebben, als té ambitieus moet worden aangemerkt en deels zijn perspectieven gebleken voor nog niet geplande producten (Advies- en waarschuwingssystemen). Het opleveren van een toepasbaar product is binnen een vervolgproject waarschijnlijk, gezien de veelbelovendheid van de resultaten, maar ook binnen een Hydrion-line III project blijft het benodigde onderzoek en ontwikkeling een ambitieuze onderneming. Toch hebben de commerciële partners aangegeven over deze innovatieve producten te willen beschikken en hebben de ambitie uitgesproken aanzienlijk te willen investeren in wetenschappelijk-fundamenteel onderzoek om een werkelijke systeeminnovatie te bereiken.

De punten van aandacht voor een vervolgproject zijn samen te vatten als:

1. Tijdens Hydrion-line II is geëxperimenteerd met één gewas in een semipraktijk/proefkas. De focus op één gewas is uit onderzoeksoogpunt evident. Daarmee is voor enkele producten principieel aangetoond dat praktische applicatie, wetenschappelijk gezien, haalbaar is. In een vervolgfase is het nodig om de producten generieker voor meer gewassen toepasbaar te maken.
2. In de afgelopen fase is door de uitbreiding van de partnergroep een veel groter marktaandeel (68%) ontstaan. Dit kan als een versnellende factor worden gezien in een nieuw Hydrion-line III project, gezien het extra potentieel aan technieken en technologieën die daarmee voor een nieuw project beschikbaar komen (o.a. ISFET sensoren en monitoringssystemen). Echter, daardoor zal integratie extra inspanning vergen, omdat er een partner is bijgekomen met eigen basisapparatuur en ICT platvorm.
3. Stapsgewijze introductie van aparte producten is een noodzaak, omdat de bedrijven dit eisen, gezien hun economisch perspectief. Dit brengt met zich mee dat niet alleen het integrale systeem in een praktisch bruikbare vorm opgeleverd moet worden, maar ook de afzonderlijke tussenproducten.
4. De realisatie van de model gebaseerde regelaars, de 'softsensor' (observer) en advies- en waarschuwingssystemen zijn dé uitdaging van het vervolgproject. Het onderzoek voor met name deze producten is nog grotendeels fundamenteel van aard.

Meer interactie met de eindgebruiker wordt door de commerciële partners geëist. Het Productschap Tuinbouw als vertegenwoordiger van de eindgebruiker is vooral om die reden in het project actief en wil investeren om te bevorderen dat vooral dit proces goed wordt doorlopen. Dit vereist vaak dat daarmee een stap terug moet worden gezet in het ontwikkelen van de producten en een onderzoekstraject opnieuw moet worden ingezet. Dit vergt meer fundamenteel en industrieel onderzoek dan oorspronkelijk ingeschat.

In de volgende fase van het project zijn dan ook 4 deelprojecten te onderscheiden: 1. Sensoren en Monitoringssystemen (techniekontwikkeling; concepten en software om sensoren te gebruiken), 2. Besturingssystemen (basale, uitgebreide en optimale besturing), 3. Advies en waarschuwingssystemen en 4. Marktintroductiestrategie.

Het beoogde samenwerkingsverband is uniek voor Nederland met twee concurrerende automatiseringsbedrijven (Hortimax BV en Priva Hortimation BV, met een gezamenlijk marktaandeel van 68%), een bureau voor meet- en regeltechniek (Hydrion BV), het Productschap Tuinbouw en zeven kennisinstellingen van Wageningen Universiteit en Researchcentrum. Het samenwerkingsverband zal t.o.v. Fase 2 van het project uitgebreid met het automatiseringsbedrijf Priva

Hortimation waardoor een brede toepassing van de resultaten gewaarborgd is. Tevens wordt het uitgebreid met Praktijkonderzoek Plant en Omgeving en Productschap Tuinbouw, ten behoeve van de verificatie van de concepten en testen van β-releases in de praktijk.

Het type onderzoek zal ten opzichte van de eerdere projectfasen duidelijk verschuiven van fundamenteel in de richting van industrieel en preconcurrentiëel onderzoek. In het eerste jaar van het driejarige traject is er weliswaar ook nog vrij veel fundamenteel onderzoek, maar tijdens het traject verschuift dit steeds meer naar industrieel onderzoek en preconcurrentiële ontwikkeling. In het derde jaar vindt geen fundamenteel onderzoek meer plaats.

Kennisoverdracht en –verspreiding

Kennisoverdracht van de resultaten is belangrijk voor een goede acceptatie van de resultaten in de praktijk van de tuinbouw. Voor de commerciële partners is kennisoverdracht van het allerhoogste belang, omdat daarmee nauw het succes na marktintroductie samenhangt. Kennisoverdracht is tot stand gekomen door publicaties (wetenschappelijk, vakblad en brochure), open dagen, seminars, symposia, Hydrion-line website en experimenten op praktijkbedrijven.

Er is gepubliceerd in internationale tijdschriften, zoals Plant Cell & Environment, Netherlands Journal of Agricultural Science, Scientia Horticulturae, Journal of Horticultural Science and Biotechnology, Agricultural Systems en Journal of Experimental Botany. Het gaat hierbij om minimaal 10 wetenschappelijke en 10 overige publicaties per jaar. De onderwerpen van publicatie zijn: modellen van plant en substraat, model based control, optimal control, teeltsystemen, water- en nutriëntentoediening, sensoren en doseersystemen. De wetenschappelijke partners in het project hebben deelnemen aan internationale congressen, symposia en workshops (o.a. ISHS, IFAC, CIGR). Op de bijeenkomsten is gecommuniceerd via lezingen, posters, abstracts en congresproceedings. Het feit dat veel lezingen op uitnodiging hebben plaatsgevonden is een blijk van het succes van het project, zowel inhoudelijk als op het gebied van de communicatie richting collega-onderzoekers.

Voor de externe communicatie is een Hydrion-line insteekmap gemaakt met een korte beschrijving van het Hydrion-line concept. Hiervan zijn er ca. 5000 uitgegeven met als inhoud hand-outs van posters, presentaties, verslagen etc.

In hoofdstuk 5.3 worden de activiteiten op dit gebied samengevat.
Naarmate de marktintroductie van Hydrion-line producten dichterbij komt, wordt de disseminatie richting de tuinder ook steeds belangrijker. Hiervoor is een andere manier van communicatie nodig. In het vervolgtraject zal daarom het Productschap Tuinbouw aan het consortium toegevoegd worden, juist om dat aspect van de kennisoverdracht te waarborgen. Hierbij valt te denken aan actief benaderen van tuinders-studieclubs voor uitleg in de proefkas en bij de pilotprojecten in praktijkkassen en presentaties op de technische vakbeurs Hortifair.

5. Evaluatie

5.1 Ecologie

Op nationale schaal heeft de tuinbouw, in de regio's waar zij geconcentreerd is, een grote nadelige impact op de ecologische kwaliteit van het oppervlaktewater. Als gevolg van gedoogde lozingen van drainwater komen er grote hoeveelheden nitraat en fosfaat in het oppervlaktewater terecht. Deze lozingen hebben een sterk eutrofiërend en vermestend effect. De ecologische kwaliteit van het oppervlaktewater kan sterk verbeterd worden als er teelttechnologie wordt ontwikkeld die er voor zorgt dat lozingen van nutriëntenhoudend spuiwater niet meer voorkomen. Na beëindiging van de emissies en na het uitvoeren van een aantal aanvullende beheersmaatregelen kan de oorspronkelijke ecologische kwaliteit van het oppervlaktewater worden hersteld.

De milieudoelstelling waarnaar gestreefd wordt, is een teeltsysteem waarin alle voedingsstoffen zo efficiënt mogelijk benut worden, zonder ophoping van reststoffen, zowel in het gewas als in het recirculatiewater. De zogenaamde gesloten kassystemen die de laatste jaren ontstaan zijn als gevolg van een verplichting tot recirculeren van drainwater zijn niet echt gesloten omdat als gevolg van ophoping van stoffen nog steeds grote hoeveelheden drainwater geloosd mogen worden. Ondanks de huidige verplichting tot recirculeren worden er dus nu nog steeds agro-chemicaliën en grote hoeveelheden nutriënten geloosd op het oppervlaktewater.

Het Hydrion-line project pakt het probleem van het recirculatiewater integraal aan door overschotten te voorkomen en noodzakelijke lozingen volledig te zuiveren. Tevens zal de integratie van de totale kassturing de mogelijkheid bieden om efficiënter met energie om te gaan en om de productkwaliteit te verhogen. Hoeveel energie hiermee bespaard wordt, en hoeveel doordraai van groenten tot organisch afval hiermee wordt voorkomen, is op voorhand niet te zeggen. Kort samengevat is de milieudoelstelling van het project: beperking van het watergebruik, beperken van de bijdrage van de glastuinbouwsector aan eutrofiëring of vermesting van het oppervlaktewater.

Voor Nederland als geheel kunnen de volgende besparingen op watergebruik en lozingen van meststoffen worden berekend:

Watergebruik in Nederlandse glastuinbouw (kubieke meters per jaar)

		Verbruik	Besparing
1995	zonder recirculatie	100.000.000 m^3	
1998	met recirculatie	84.700.000 m^3	15.300.000 m^3
2010	toekomst met Hydrion-line	77.770.000 m^3	22.230.000 m^3

Het Hydrion-line project beoogt een reductie van de stikstoflozing met 99% en van de fosfaatlozing met 90%. Dit zijn realistische haalbare doelstellingen. Optimaal is een totale terugdringing met 100%.

Nutriëntenemissie in Nederlandse glastuinbouw (Jaarlijkse vrachten)

	1995		2010 met Hydrion-line	
	ton N	ton P	ton N	ton P
4271 ha groenteteelt	507	90	5	9
10000 ha totaal	1205	215	12	22

In grote tuinbouwlanden als Spanje en Marokko, waar de arealen vele malen groter zijn, zijn de effecten op het milieu meer dan evenredig groter. In de landen rond de Middellandse Zee, waar het kasareaal circa 80.000 hectare omvat, is recirculatie niet verplicht en worden grote hoeveelheden nitraat en

fosfaat in de bodem geloosd. In die landen is de hoeveelheid beschikbaar zoet water veel kleiner en ontstaat een probleem op het gebied van de (drink)watervoorziening en inzijging van zeewater.
In Israël waar veel energie en grondstoffen zijn gestoken in de productie van glasgroenten en -bloemen, krijgt men op dit moment de rekening gepresenteerd van het lozen van restwaterstromen in de bodem. Het grondwater is daar verontreinigd en kan moeilijk opnieuw gebruikt worden.

5.2 Economie

Economisch ambitieniveau en perspectief

Het projectresultaat heeft in de eerste plaats betrekking op de glastuinbouw. Het belangrijkste projectresultaat is een nieuw concept voor monitoring, advisering en besturing in gesloten teeltsystemen. Dit geïntegreerd monitoring-, adviserings- en besturingssysteem voor nutriënten en water bij kasteelten zal uit verschillende modules zijn opgebouwd, die afzonderlijk ook in andere gebieden hun toepassing kunnen vinden, zoals boomkwekerij, akkerbouw, visteelt en behandeling van irrigatiewater, oppervlaktewater en industrieel proceswater.
De bedrijven Hortimax BV en Priva Hortimation BV hebben in Nederland een gezamenlijk marktaandeel van 68% op gebied van kasautomatisering. Wereldwijd is het aandeel 40% van de industriële glastuinbouw. Gezamenlijk zijn er vestigingen in 8 landen (zoals België, Canada, Frankrijk, UK, Spanje). In feite is de meeste groei van de bedrijven te verwachten in de export van kennisintensieve producten. Hydrion BV heeft goede contacten binnen de waterschappen en zuiveringsschappen. Bij deze organisaties bestaat grote belangstelling voor het on-line kunnen meten van de macro-ionen die in water, al dan niet door vervuiling, voorkomen.
Verwacht wordt dat het nieuwe concept 5 jaar na aanvang van het beoogde project op de markt zal komen.

Economische voordelen automatiseringsbedrijven

De verwachting is dat de gemiddelde extra investering in apparatuur en installatie per glastuinbouwbedrijf van gemiddelde grootte ca € 55.000 zal bedragen.
Uitgaand van een commerciële introductie periode van 5 jaar en een conservatieve schatting van het aantal bedrijven dat tot aanschaf overgaat ontstaat het volgend financiële plaatje voor de toeleverende bedrijven Hortimax en Priva Hortimation (niet gecorrigeerd voor inflatie).

Jaar	Aantal bedrijven (cumulatief)	Omzet in k€ (cumulatief)
2006	15	825
2007	40	2.200
2008	200	11.000
2009	400	22.000
2010	800	44.000

Economische voordelen glastuinbouwsector

Door de dosering van voedingsstoffen optimaal af te stemmen op de behoefte van het gewas ontstaat de mogelijkheid om onnodige ophoping van afvalstoffen in het gewas (nitraat) tot een minimum te beperken. Op deze wijze wordt een veiliger product geteeld en kan voldaan worden aan de strengere normgen die opgelegd worden. Tevens biedt deze manier van nutriëntendosering mogelijkheden om de kwaliteit (smaak, houdbaarheid) en gezondheid van het product (bijv. carotenoïdengehalte tomaat) te verhogen, welke factoren in steeds belangrijkere mate de marktwaarde van het product bepalen.
Betrouwbare productieprognoses en betere garanties op kwaliteit geeft de Nederlandse glastuinbouw een afzetvoordeel; dat zich vertaalt in hogere prijzen. Met de juiste teeltmaatregelen is de productie voor 95% vooruit te plannen en daarmee af te stemmen op de dynamisch veranderende vraag vanuit de markt. Verdere productie verhoging bij tomaat van 5 kg/m^2 en bij Roos van 1,5 kg/ m^2 is haalbaar.

Technische middelen voor een beheerste water- en nutriëntengift, in combinatie met klimaatsturing worden hiervoor in Hydrion-line III gerealiseerd. Continue monitoring van opname en inzicht in opname verhoudingen van de diverse voedingsstoffen geeft dagen tot weken eerder inzicht in verstoring in gewasontwikkeling verband houdend met ziekten als Pythium, Fusarium en Pepinomozaiek virus. Gerichte teeltmaatregelen kunnen de schade beperken en voorkomen zo overmatige inzet van bestrijdingsmiddelen. Ook zijn de huidige problemen met kwaliteit bij sterke weersovergangen beter te voorkomen. Voor tomaat is hiervoor een rekensom gemaakt door K. Ammerlaan van het LEI, Den Haag: bij 3kg mindere kwaliteit van tomaat met daardoor €0,20 lagere prijs geeft dit een opbrengst derving van €6.000 per ha. Tevens schatte hij een opbrengstverhoging van €40.000 per ha per jaar. Een oppervlak van 1350 ha tomaten onder glas in Nederland geeft 64 M€ resultaatverbetering. De verwachting is dat bij de andere grote groentegewassen (paprika en komkommer) en de grote sierteeltgewassen (roos en gerbera) resultaatverbeteringen in dezelfde orde van grootte mogelijk zijn. Hiermee zou het resultaat op circa 300M€ per jaar uitkomen. Naast de voordelen op gebied van kwaliteit, productie en afzet, zijn er voordelen als gevolg van besparing op meststoffen en water. Hoewel tegenwoordig de tuinders het voedingswater recirculeren en daarmee vaak gedacht wordt dat er weinig water en nutriënten verloren gaan, wordt om een onbalans in de voedingssamenstelling en daarmee productie en kwaliteitsreductie te voorkomen veelvuldig gespuid. De verwachting is dat spui tot 1% van het huidige niveau teruggebracht kan worden met behulp van de nieuwe producten die in dit project ontwikkeld worden. Per hectare bedraagt de geschatte jaarlijkse besparing op water 500 euro per ha en op meststoffen 900 euro. Voor de hele Nederlandse glastuinbouw komt de jaarlijkse besparing op water en nutriënten daarmee op 14 miljoen euro.

Samenvattend zijn de voordelen voor de glastuinbouw:
- Besparing op meststoffengebruik: jaarlijks 9 miljoen euro in NL en mondiaal een veelvoud.
- Besparing op waterverbruik: jaarlijks 5 miljoen euro in NL, mondiaal een veelvoud. Momenteel is de waterprijs te laag om dit te rechtvaardigen, maar we mogen verwachten dat deze prijzen zullen stijgen.
- Betere kwaliteit en timing van producten en productieverhoging: circa 300 miljoen euro per jaar.
- Minder productverliezen in de keten.
- Een verfijnde afstemming van de productiekwantiteit en -kwaliteit op de voorspelde behoefte bij een voortdurende doorberekening van de prijs/kwaliteit verhouding op niveau van de teler.

Voordelen voor de kennisinstellingen

WAGENINGEN UR zal haar kennis op het gebied van het modelleren van gewasgroei en fysische transportprocessen in bodem en substraat praktisch toepasbaar kunnen maken voor meerdere gewassen. Hierdoor wordt de positie van Wageningen als agrarisch kenniscentrum versterkt. Dit creëert ingangen naar andere internationale onderzoeksprojecten (bijv. NASA). De Nederlandse glastuinbouw zal haar kennis over gesloten teeltsystemen in het buitenland kunnen exploiteren, met name in het verre Oosten en middellandse zeegebied waar de milieuproblematiek steeds nijpender wordt.

Economische aanpak en slaagkans

De vermarkting van de producten in de tuinbouw zal door de bedrijven Hortimax en Priva Hortimation worden uitgevoerd. Hydrion zal zijn ionselectieve meetsysteem vermarkten in die sectoren die buiten de glastuinbouw vallen (met name waterzuivering, drinkwaterbedrijven, waterschappen). Om het nieuwe concept succesvol op de tuinbouwmarkt te brengen is het nodig dat de nieuwe technologie door de tuinder als eindgebruiker wordt geaccepteerd. Om marktacceptatie te bespoedigen is het samenwerkingsverband in deze derde fase van het Hydrionlineproject ten opzichte van de tweede fase uitgebreid met het Productschap Tuinbouw (koepelorganisatie van de eindgebruikers). Verder is het voor een goede marktacceptatie nodig dat introductie stapsgewijs plaatsvindt en zullen een aantal producten al gedurende de looptijd van het project op de markt gebracht worden. De eerste stap is het gebruik van monitoring in kassen waarbij de tuinder de ontwikkelde technologie, en dan met name de sensoren, gebruikt voor monitoring van het gewas. De beslissingen over het management van het gewas worden in deze fase nog door de tuinder zelf genomen, en het monitoringssysteem is hierbij een

extra tool dat de tuinder tot zijn beschikking krijgt. In een volgende fase wordt een adviseringssysteem op de markt gebracht dat de tuinder ook daadwerkelijk adviseert over te nemen beslissingen in de teelt. Laatste stap is de introductie van een volledig besturingssysteem voor de teelt, waarbij de beslissingen over de teelt volledig geautomatiseerd zijn.
In het Convenant Glastuinbouw en Milieu zijn de reducties in milieubelasting vastgelegd voor de periode tot het jaar 2010. Momenteel zijn er nog nauwelijks harde sancties als een tuinder niet aan de normen voldoet. Echter het niet voldoen aan de steeds strenger wordende normen zal in de toekomst beboet gaan worden. Dit zal de marktintroductie van de hier ontwikkelde producten sterk vergroten.

Er is een grote diversiteit van eisen voor de verschillende gewassen. Elk gewastype/regelaar combinatie zal een eigen marktbenadering behoeven. Als onderdeel van dit project zal geanalyseerd worden hoe de producten het best in de markt geïntroduceerd kunnen worden en hoe ze op een goede acceptatie van de eindgebruikers (tuinders) kunnen rekenen. Van elk product worden pilotexperimenten met betaversies op praktijkbedrijven (tomaten-, paprika- en rozenbedrijven) gehouden. Deze tests op praktijkbedrijven dragen sterk bij aan acceptatie van de ontwikkelde technologie.

5.3 Kennisoverdracht

Aangevraagde octrooien
Hydrion b.v.
- Hydrion heeft, in het kader van het EET project, twee patenten aangeraagd. Nederlands patent Nummer WO 01/ 57508 AZ ofwel NL 101 / 4256 C gepubliceerd 9 aug 2001 is reeds toegekend. (titel: meetinstrument geschikt voor het meten van kationen en anionen en membraan als onderdeel van het meetinstrument)
- Er staat een patentaanvraag uit (Wereldpatent) voor een nieuw type referentiesensor. De haalbaarheid hiervoor is door het patentbureau reeds aangetoond.

Verschenen publicaties

Wetenschappelijke publicaties

De Groot C.C., Marcelis L.F.M., Van den Boogaard R. & Lambers H. (2001). Growth and dry mass partioning as affected by phosphorus nutrition and light. Plant Cell and Environment 24: 1309-1317

De Groot C.C., Marcelis L.F.M., Van den Boogaard R. & Lambers H. (2001) Regulation of growth by phosphorus supply in whole tomato plants. In: Plant Nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. Eds. W.J. Horst et al. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 114-115

De Groot C.C., Marcelis L.F.M., Van den Boogaard R., Kaiser W.M. & Lambers H. 2003 Interaction of nitrogen en phosphorus nutrition in determining growth. Plant and Soil 248: 257-268.

De Groot C.C., Marcelis L.F.M., Van den Boogaard R. & Lambers H. 2002. Interactive effects of nitrogen and irradiance on growth and partitioning of dry mass and nitrogen in young tomato plants. Functional Plant Biology (29, 1319-1328)

De Groot C.C., Van den Boogaard R., Marcelis L.F.M., Harbinson J. & Lambers H. Contrasting effects of N and P deprivation on the regulation of photosynthesis in tomato plants in relation to feedback limitation J. Exp. Bot (accepted for publication).

De Groot C.C., 2002. Phosphorus and nitrogen nutrition in tomato – a physiological analysis of plant growth. Proefschrift Universiteit Utrecht, 144 pp

De Groot CC, Marcelis LFM, Van den Boogaard R and Lambers H. Response of growth of tomato to phosphorus and nitrogen nutrition. Acta Hortic. (in press).

De Pinheiro Henriques A.R. & Marcelis L.F.M. 2000. Regulation of Growth at Steady-state Nitrogen Nutrition in Lettuce (Lactuca sativa L.): Interactive Effects of Nitrogen and Irradiance. Annals of Botany 86: 1073-1080.

De Visser, P.H.B. H.B., Marcelis, L.F.M., Van der Heijden, G.W.A.M., Vos, J.A., Struik, P.C. & Evers, J.B. 2002. 3D modelling of plants: a review. Plant Research International Report 52.

De Willigen P., M. Heinen, A. Mollier, and M. Van Noordwijk, 2002. Two-dimensional growth of a root system modelled as a diffusion process. I. Analytical solutions. Plant Soil 240: 225-234.

Del Amor, F.M., Marcelis, L.F.M. & Martinez, V. 2003.Differential effects of N, K and Ca on growth of tomato plants during nutrient starvation and recovery. Acta Hortic (in press)

Del Amor F.M. & Marcelis L.F.M. Regulation of nutrient uptake, water uptake and growth under calcium starvation and recovery. Journal of Horticultural Science & Biotechnology (in press)

Del Amor, F.M., Marcelis. Regulation of K-uptake, water uptake and growth of tomato during K starvation and recovery. Scientia Hortic (submitted).

Gieling, Th.H., J. Bontsema, H.J.J. Janssen and G. van Straten (2000). Control of water and nutrient supply to plants in closed soilless growing systems. Journal A, Benelux Quarterly Journal on Automatic Control, 41 (3), 29-36.

Gieling, Th.H., G. van Straten and H.J.J. Janssen, M. Suurmond, 2000. A greenhouse water supply controller: a design based on system identification of closed growing systems. In: Computers and Electronics in Agriculture Vol 26 (2000), p. 361-374, Elsevier.

Gieling, Th. H., 2001. Control of water supply and specific nutrient application in closed growing systems. PhD thesis Wageningen UR, ISBN90-5808-525-2.

Gieling Th.H., G. van Straten and B.W. Veen (2000). Analysis of solute movement in inert substrates. Proceedings of the International Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-harvest Processing. Wageningen 2000, p357-363.

Gijsbertsen, 2002. Towards an Improved Continuous-Discrete Recursive State/Parameter Reconstruction Algorithm, Graduation Thesis , March 2002.

Heinen M., 2001. FUSSIM2: brief description of the simulation model and application to fertigation scenarios. Agronomie 21: 285-296.

Heinen M., A. Mollier, and P. de Willigen, 2003. Growth of a root system described as diffusion. II. Numerical model and application. Plant and Soil, accepted.

Heinen M., L.F.M. Marcelis, A. Elings, R. Figueroa, and F.M. del Amor, 2003. Effects of EC and fertigation strategy on water and nutrient uptake of tomato plants. Acta Horticulturae 593: 101-107.

Heuvelink E., L.F.M. Marcelis &O. Körner 2003. How to reduce yield fluctuations in sweet pepper ? Acta Hortic (in press)

Janssen, H.J.J. en Th.H. Gieling, 2003. Installaties betreffende ICT, meten, watergift en nutriëntdoseren t.b.v. het Hydrion-line project. Intern IMAG rapport, 2003.

Marcelis, L.F.M., Van den Boogaard, R. & Meinen, E., 2000. Control of crop growth and nutrient supply by the combined use of crop models and plant sensors. Proceedings Int. Conf. Modelling and control in agriculture, horticulture and post-harvested processing. IFAC 351-356.

Marcelis L.F.M. 2001. Yield and quality prediction of vegetabels: the case of cucumber. In: Food process modelling (L.M.M. Tijskens, M.L.A.T.M. Hertog, B.M. Nicolai, eds). Woodhead Publishing. 183-200

Marcelis L.F.M., Maas F.M. & Heuvelink. E. 2002. The latest developments in the lighting technologies in dutch horticulture. Acta Hortic 580: 35-42

Os, E.A. van, Th.H. Gieling, M.N.A. Ruijs, 2002. Equipment for hydroponic installations. In: D. Savvas and H. Passam (Ed.) Hydroponic production of Vegetables and Ornamentals. Chapter 3, pp 103-142. Embryo Publications, Athens, Greece. ISBN 960-8002-12-5.

Schroot J., 2001. Waterscenario's in de glastuinbouw; ATO publicatie 2001.

Schroot J., J. Wichers en N. Tan, 2002. Desinfectie tomatendrainwater middels membraanfiltratie;, Januari 2002.

Speetjens, S. L. 2003. Optimal Input Design for Estimation of Parameters in a Substrate Model, Graduation Thesis, Wageningen UR, January 2003.

Stappers, R. 2001. Identification for Control of Fertigation in Closed Growing Systems, Graduation Thesis, Wageningen UR, May 2001.

Stigter, J. D., D. Vries, K. J. Keesman, 2003. On Adaptive Optimal Input Design. Submitted to the European Control Conference, Cambridge, United Kingdom.

Van den Boogaard R., Harbinson, J., Mensink, M. and Ruijsch, J. 1999, Photosynthesis and electron transport in tomato: alternative electron sinks at low temperature. J H M Thornley and I R Johnson (1999), Plant and Crop Modelling, Clarendon Press, Oxford.

Van Straten, G., Th.H. Gieling, 2002. Controller settings for closed system ion control in greenhouses, 2002 ASAE Annual International Meeting/ CIGR XVth World Congress, Chicago, CD-ROM, Paper No. 023031, 9pp.

Van Straten, G., 2003. Design of a basic nutrient controller, Internal Report, Systems and Control Group, Wageningen UR.

Werner, B., 2000. Analyse van Twee Algoritmes voor het Schatten van Parameters van Continue, Dynamische Modellen met behulp van Discrete Data.

Werner, B., J. D. Stigter, G. van Straten, R. Stappers, 2003. On-Line Estimation of Water and Nutrient Uptake by Plants Grown on Substrate Mats, in preparation for Agricultural Systems.

Werner, B., 2002. Werking van de Setpointgenerator, Intern rapport Systems and Control Group, Wageningen UR.

Wouters, H. 2002. Het Regelen van de Voorziening van Water en Specifieke Nutriënten op een Gemiddelde Constante Drain in een Gesloten Teeltsysteem, Graduation Thesis (in Dutch).

Artikelen in vakbladen en populaire pers

Gieling, Th.H. en H.J.J. Janssen, 2002. Online Mess- und Regelungssystem für Nährstofflösung in geschlossenen Anbausystemen im Gartenbau. Verzonden en geaccepteerd februari 2002.

Gieling, Th.H., 2001. Bemesting sturen op ionenopname. Groenten en Fruit nr. 46, p. 34-35 en Vakblad voor de Bloemisterij 56 (46), p. 44-45. Interview artikel met P. Visser.

Marcelis, L.F.M. 2001. Nutriënten en waterhuishouding in beschermde teelten. Agro-Praktica Agenda 2001. p98

Marcelis 2001. Voor ieder proces en ieder gewas een afzonderlijk teeltmodel. Oogst Tuinbouw, 19 okt 2001. Pp50-51(Interview)

Marcelis 2001. Theoretisch Groeimodel. Oogst Tuinbouw, 26 okt 2001(Interview)

Marcelis 2001. Simulatie bespaart energie. Groenten & Fruit. Week 46: pp28-31 (Interview)

Marcelis, L.F.M. 2003. Monitoring in gesloten teeltsystemen. Luister waar de plant naar vraagt. Agro-Praktica Agenda 2003. P110-11

Presentaties op (internationale) congressen/workshops/symposia

De Groot C.C., 2000. Regulation of growth by phosphorus supply in tomato plants.12de FESPP congres in Budapest, 21-25 augustus 2000.

De Groot, C.C. : XIV International Plant Nutrition Colloquium, 27 July – 3 August 2001, Hannover, Duitsland. Posterpresentatie.

De Groot, C.C. : Workshop on roots, Crawley Australië. November 2001. Lezing.

Del Amor, F.M.: Nutrient uptake, water uptake and growth in relation to Ca supply in tomato. Lezing op het ISHS symposium 'Product and process innovation for protected cultivation in mild winter climate'. 5-8 maart 2002, Ragusa, Italië

Elings, A. 2003. Concept and development of an on-line monitoring and control system for closed greenhouses. International symposium for plant growth, Potsdam, Germany.

Gieling, T.G. (2000). AgriControl2000: International Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-harvest Processing. Wageningen 2000

Gieling, T.G. (2002). The Sense of Contact: National Conference on Sensors, Zeist, Mei 2002

Heinen M., L.F.M. Marcelis, A. Elings, R. Figueroa, F.M. del Amor, 2001. Effects of EC and fertigation strategy on water and nutrient uptake of tomato plants. Modeling for the 21st century: agronomic and greenhouse crop models. Joint meeting of the Biological Systems Simulation Group and international Society for Horticultural Science, 25-29 March 2001, Beltsville, Maryland, USA.

Marcelis, L.F.M., Van den Boogaard, R. & Meinen, E., 2000. Control of crop growth and nutriënt supply by the combined use of crop models and plant sensors. Int. Conf. Modelling and control in agriculture, horticulture and post-harvested processing. IFAC.

Marcelis, L.F.M. & Heuvelink, E., 2000. Prediction of yield and quality of greenhouse crops by the use of crop growth models. Book of abstracts XIVth international symposium on horticultural economics: Managing the quality chain (environment, production, distribution, marketing). Guernsey, UK.
Marcelis L.F.M., Maas F.M. & Heuvelink. E. 2001. Efficiency of assimilation light in greenhouse tomatoes: a simulation study. Beltsville, USA
Marcelis, L. 2000. Monitoring en besturing van waterkringlopen in de glastuinbouw. Kringlopen Workshop Wageningen
Marcelis, L. 2001. Monitoring plantgroei. LTO-Landelijke komkommerdag.
Marcelis, L. 2002. Plantmodellen in de glastuinbouw. LTO-Landelijke tomatendag.
Marcelis L.F.M. 2001. Modelling greenhouse cucumber production. International Symposium on cucurbits. Tsukuba, Japan (invited speaker)
Marcelis, L.F.M. (2002). High-tech plant production in practice. Lezing tijdens workshop 'Plant Spectrofluorometry: Applications and Basic Research. International workshop', Wageningen 2002 (invited speaker).
Marcelis L.F.M. 2003. Decision support systems. International conference on Integrated Biological systems, Texas, USA (invited speaker)
Marcelis L.F.M. 2003.Nutriënt management in protected cultivation. International symposium on Nutriënt, substrate and water management in prtected cropping systems.Izmir, Turkije (invited speaker)
Schroot, J. Posterpresentatie op International Conference on Membranes 7 to 12 July 2002 in Toulouse (France) met als titel: 'Waste water treatment with membranes: disinfection of greenhouse drain water using UF / MF'.
Snel J.F.H. Presentatie Hydrion-line II op Bedrijveninformatiemarkt Wageningen UR 2001, april 2000, Wageningen.
Snel, J.F.H. Presentatie Hydrion-line op NTV/Hortifair 2001.
Van Straaten, G. (2002) CIGR XVth World Congress, Chicago, Juli 2002.

Insteekmap

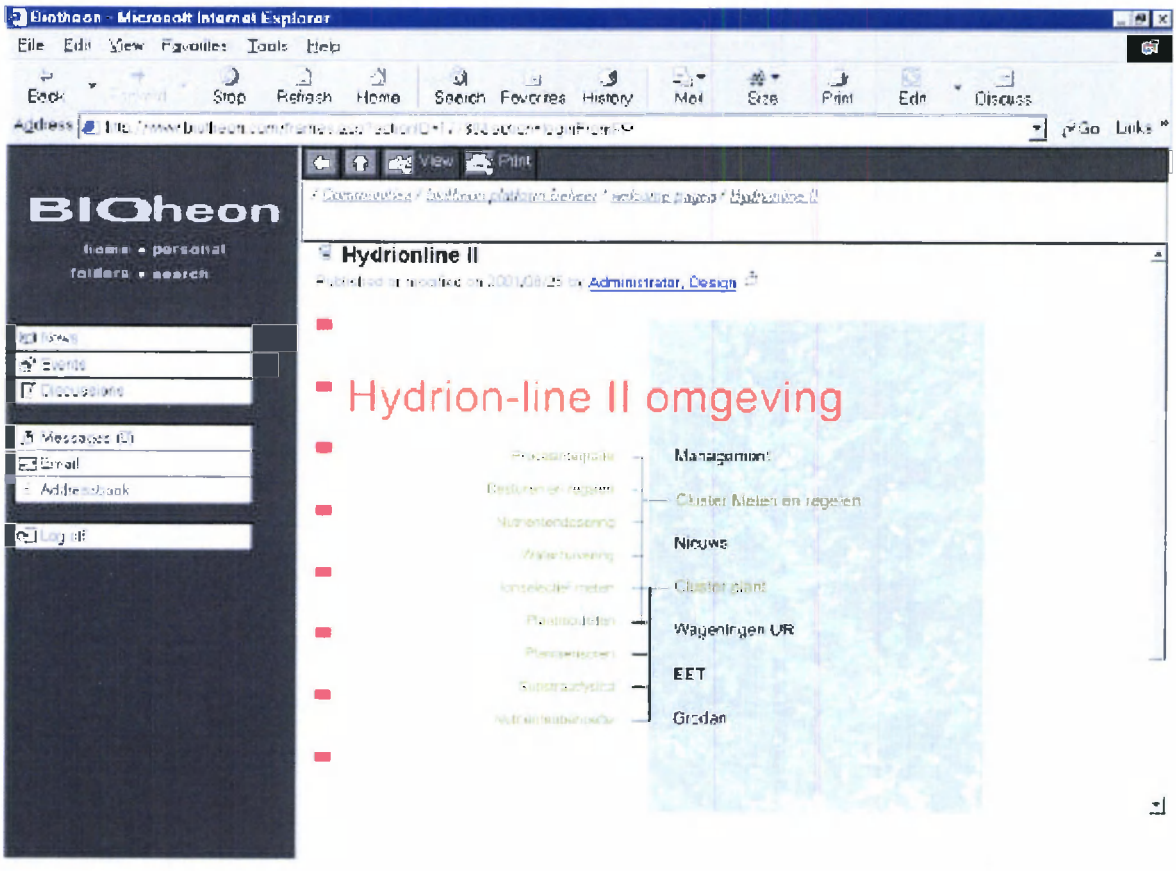
Voor presentatie van folders, flyers en ander informatiemateriaal is een Hydrion-line insteekmap gemaakt (zie foto).



Website

Voor de externe communicatie naar het brede publiek is een website opgezet, gekoppeld aan het interne kennisbeheerssysteem Biotheon/Topshare (zie foto's volgende bladzijde). Op deze website staat een algemene projectbeschrijving en vanaf deze website kunnen geautoriseerde personen inloggen op het interne kennisbeheersysteem.


Login Home Projectbeschrijving Projecten
Click to log in
Hydrion- line
On-line monitoring- en besturingssystemen voor gesloten kassen


Bioheon - Microsoft Internet Explorer
File Edit View Favorites Tools Help
Back Stop Refresh Home Search Favorites History Mail Size Print Edit Discuss
Address Go Links
BIOheon
home • personal
folders • search
Messages
Email
Address book
Log off
View Print
Hydrionline II
Administrator, Design
Hydrion-line II omgeving
Management
Cluster Meten en regelen
Nieuws
Wageningen UR
EET
Gradan

6. Eindconclusie

6.1 Relatie tot oorspronkelijke doelstelling

De oorspronkelijke doelstelling bestond uit het ontwikkelen van een geïntegreerd monitoring- en besturingssysteem voor optimale besturing van de voedingsstromen, toepasbaar in gesloten teeltsystemen in de glastuinbouw, waarvan de basis wordt gevormd door een gewasteeltmodel. De ontbrekende sensoren, zuiveringsapparatuur en regelsysteem om het model van informatie te voorzien en de corrigerende acties uit te kunnen voeren, zijn nu gedeeltelijk in laboratoriumversie beschikbaar of worden binnen de vervolgfase ontwikkeld. Voeding en hergebruik van recirculatiewater kunnen hiermee zodanig op elkaar worden afgestemd dat de afvalstroom tot een minimum wordt beperkt. Implementatie van de Hydrion-line resultaten leidt tot een optimaal functioneren van gesloten teeltsystemen. Daarnaast worden zeer goede mogelijkheden geboden om de kwaliteit van de geproduceerde gewassen te verbeteren en de productie beter af te stemmen op de consumentenvraag. Het Hydrion-line systeem biedt de teler tevens de mogelijkheid om zijn gewas energiezuinig te telen.

In Hydrion-line II was vanaf het begin duidelijk dat de wetenschappelijke uitdaging en de uiteindelijke EET ambitie was te vinden in het geïntegreerd inzetten van innovatieve technologie in een totaalsysteem, om zo binnen grenzen van economische haalbaarheid, ecologische uitgangspunten te halen. Het ging met name om de vanwege teeltkundige redenen noodzakelijke spui van nutriënten overbodig te maken en water optimaal te benutten bij behoud van productieniveau en productkwaliteit. Tijdens het Proof of Principle experiment is vastgesteld dat grote milieubesparing tezamen met kwaliteit- en productiesturing mogelijk is. Hiermee is aangetoond dat de oorspronkelijke ambitieuze doelstellingen haalbaar zijn. In het Proof of Principle experiment is ook aangetoond dat de producten m.b.t. ionselectief concentratiemeting, lichtreflectiemeting, drainmeting via een meetgoot, reconstructie van de wateropname door de plant via een softsensor en de basale regelaars voor water en nutriënten een stadium hebben bereikt, waarbij zich een haalbaar praktisch eindresultaat aftekent.

De producten fotosynthesemonitor, water- en nutriënten opnamemonitor, de feedforward en feedback model-based regelaars en de advies- en waarschuwingssystemen hebben dit stadium nog niet bereikt, maar zijn zondermeer perspectiefvol. Deels was afhandeling van een aantal problemen oorspronkelijk gepland om te worden opgelost na het Go/NoGo punt, deels is gebleken dat oplossing van alle 'witte vlekken' binnen het Hydrion-line II project niet mogelijk was. Tijdens de uitvoering van het Hydrion-line II onderzoek werd duidelijk, dat de ambitie om de model-based regelaars en de softsensor voor nutriënt opname al tijdens dit onderzoek in een fase van "gereed voor uitwerken naar een praktische toepassing" te hebben, als té ambitieus moet worden aangemerkt. De technologische haalbaarheid is wel aangetoond.

6.2 Oordeel partners over resultaat project

Het Hydrion-line II project heeft tot aansprekende resultaten geleid, niet alleen in de vorm van nieuwe kennis en producten, maar ook in nieuwe samenwerkingsverbanden. Door de resultaten van Hydrion-line II zijn de kasautomatiseringsbedrijven HortiMaX en Priva zeer enthousiast geworden over de mogelijkheden van Hydrion-line. Hoewel de technologie nog niet het stadium marktrijp heeft bereikt, willen zij daarom fors investeren in verder onderzoek en ontwikkeling van deze technologieën, om die vervolgens te kunnen exploiteren en om aan de wieg te kunnen staan van een systeeminnovatie in de tuinbouw. Deze bedrijven hebben de haalbaarheid en potenties van alle potentiële producten die voortvloeien uit het Hydrion-line II project geëvalueerd. Op basis hiervan is een selectie gemaakt van producten die verder ontwikkeld dienen te worden in het vervolgtraject (zie onder 6.3).

6.3 Vervolgactiviteiten

Er is inmiddels een consortium gevormd bestaande uit de huidige partners, uitgebreid met het het bedrijf Priva, het Productschap Tuinbouw, en PPO-Naaldwijk, dat een voorstel voor de vervolgfase Hydrion-line III heeft ingediend bij EET.

Bijlage I. Overzicht deliverables per deelproject

Tabel I-1. Overzicht resultaten Hydrion-line II deliverables

	Deliverable	Status	Datum	
No.	**Omschrijving**	**(% gereed)**	**Start**	**Oplevering**
I	**Deelproject Ionselectief meten**			
I-1	Ontwikkelen praktijkopstelling Hydrion-line tot werkend proefmodel	100%	Dec 2000	Okt 2001
	Uitwisselbare, onafhankelijke sensorunit	100%	Jan 2000	Okt 2001
	Geminiaturiseerde sensor-unit	50 %	Jan 2000	Okt 2002
	Verdunningsunit	100%	Jun 2001	Okt 2001
	Communicatieprotocollen	100 %	Jan 2001	Mrt 2002
I-2	Elektrode ontwikkeling			
	Referentie-elektrode Laboratoriummodel	100%	Jan 2000	Mei 2002
	Praktijkmodel	75 %	Mrt 2000	Okt 2002
	Sulfaat elektrode Laboratoriummodel	100 %	Jan 2001	Okt 2001
	Werkend proefmodel	50 %	Okt 2001	Okt 2002
	Fosfaat elektrode Laboratoriummodel	100 %	Jan 2001	Okt 2001
	Werkend Proefmodel	0 %		Okt 2002
I-3	Kation elektrodes op basis van nieuwe matrix, biologisch inert			
	Laboratoriummodel Na	100 %	Mrt 2000	Oct 2001
	Laboratorium K NH4 Ca	80 %	Aug 2001	Mei 2002
	Werkend Proefmodel	0 %		0ct 2002
	Praktijkmodel	0%		Jan 2003
I-4	Software voor: automatische kalibratie	100 %	Dec 2000	Oct 2001
	controle en alarmering	100 %	Dec 2000	Mrt 2002
	communicatie met andere apparatuur	100 %	Dec 2000	Mrt 2002
	Werkend proefmodel testen in kas bij tuinder	100 %	Dec 2001	Jun 2002
II	**Deelproject Waterzuivering**			
II-1	Scenario's			
	definitie en opzet	100	Jul 2000	Dec 2000
II-2	Recycling			
	experimentele verificatie scenario's	100	Jan 2001	Jun 2001
	opzet prototype	100	Jul 2001	Dec 2001
	exp. Prototype	100	Sep 2002	Nov 2002
	verificatie scenario recycling	100	Aug 2001	Nov 2001
	Integratie ontwerp	100	Dec 2001	Dec 2001
II-3	Reststoffen			
	lab onderzoek	100	Jul 2000	Jun 2001
	ontwikkelingen meet- en regel	100	Jul 2001	Jun 2002
	opzet / ontwerp prototype	100	Jun 2001	Dec 2001
	exp. Prototype	100	Jul 2002	Dec 2002
II-4	Integraal water prototype			
	integreren recycling en reststoffen	0		
	kwantitatieve verificatie van scenario's	100	Jun 2002	Jun 2002
	Optimalisatie	0		

	Evaluatie van scenario's	100	Jun 2002	Jun 2002
III	**Deelproject Nutriëntendosering**			
III-1	Integratie van doseerunit in procesautomatisering	100	Jan 2000	Dec 2000
III-2	Ontwikkeling van interface met ionselectieve sensor module	90	Jun 2002	Aug 2002
III-3	Ontwikkeling van regelalgoritmen voor aanpassing nutriëntendosering op basis van on-line analyse van recirculatiewater	90	Jan 2000	Jul 2002
III-4	Bouwen van testopstelling met doseerunit, substraat computers en ionselectieve sensor module	100	Feb 2001	Okt 2001
III-5	Aanpassing PLC software	100	Jul 2001	Feb 2002
III-6	Testen van nutriëntendosering met terugkoppeling van on-line drain analyse	100	Aug 2002	Dec 2002
III-7	Ontwikkeling van interface met groeimodellen voor bepaling nutriëntenbehoefte	90	Jan 2002	Jul 2002
III-8	Ontwikkeling van regelalgoritmen voor aanpassing nutriëntendosering op basis van output groeimodellen	90	Jan 2000	Jul 2002
III-9	Testen interface groeimodellen en nutriëntendoseerunit	100	Aug 2002	Sep 2002
III-10	Implementatie van regelalgoritmen in nieuw platform voor totaal geïntegreerde procesautomatisering	0	-	-
IV	**Deelproject Substraatfysica**			
IV-1	Gekoppeld substraat-plant-model	100%	Jan 2002	Jun 2002
IV-2	Toepasbaar maken substraatmodel	100%	Jan 2000	Dec 2002
IV-3	Fysisch-chemische eigenschappen substraat - waterretentiekarakteristiek nieuwe en gebruikte mat - dispersielengtes	100%	Jan 2000	Dec 2001
IV-4	Wortelverdeling in substraat in relatie tot fertigatie en gewasgroeisnelheid. Eventueel verfijnde beschrijving wortelgroei en wortelverdeling	100%	Jan 2001	Jun 2002
IV-5	Scenario's voor verschillende fertigatiestrategieën	75%	Jan 2000	Dec 2002
IV-6	Verificatie model en meest perspectiefvolle fertigatiestrategie gepland voor vierde jaar: niet uitgevoerd omdat vierde jaar niet is uitgevoerd; echter, deels toegepast in nieuwe deliverable 7	20%	Jan 2002	-
IV-7	Modelgebaseerde regeling, 'Proof-of-Principle'	100%	Jan 2002	Dec 2002
V	**Deelproject Plantensensoren**			
V-1	De ontwikkeling van een schatting van de bladtemperatuur in het gewas[3]	0%		
V-2	De ontwikkeling van een meting van bladoppervlak of lichtonderschepping en van plantgewicht en transpiratie	100%	Jan 2000	Mrt 2002
V-3	Verbetering van de nauwkeurigheid van de meting van de actuele fotosynthesesnelheid en van de meting van fotosynthesecapaciteit.	100%	Jan 2000	Jul 2002
V-4	De ontwikkeling en het testen van plantensensoren voor gebruik in een kasomgeving.[4]	50%	Jan 2000	Jul 2002

[3] In het project is deze taak niet uitgevoerd omdat inmiddels apparatuur op de markt is voor de meting van temperatuur in een gewas

[4] Voor de meting van fotosynthese is in het project geen aandacht besteed aan het ontwikkelen van een prototype meetapparaat voor een kasomgeving. In plaats daarvan is het onderzoek gericht op het nagaan van de meerwaarde van het gebruik van deze meting . Daarvoor is gebruik gemaakt van bestaande laborioriumapparatuur, gebruikt in een semi-praktijkkas

V-5	De ontwikkeling van het gebruik van fotosynthese- en andere gewasparameters in een stabiel regelsysteem voor mineralengift en kasklimaat.	100%	Jan 2002	Jan 2003
VI	**Nutriëntenbehoefte**			
VI-1	Relatie nutriëntengehaltes met teeltfactoren	100%	Jan 2000	Apr 2002
VI-2	Kwantificeren van tijdconstanten	100%	Jun 2000	Apr 2002
VI-3	Sturen van productkwaliteit	95%	Jan 2002	Dec 2002
VI-4	Doseren naar behoefte*)	50%*)	Apr 2002	Jan 2003
VI-5	Fysiologische regulatie door N- en P-voeding	100%	Jan 2000	Sep 2002
VII	**Plantmodel**			
VII-1	Modelontwikkeling	100	Jan 2001	Jul 2002
VII-2	Modelvereenvoudiging	100	Jan 2000	Jun 2001
VII-3	Koppeling plant- en substraatmodel	100	Jan 2002	Jun 2002
VII-4	Modelvalidatie	100	Jan 2001	Jul 2002
VII-5	Zelflerende modellen gekoppeld aan sensoren	100	Jan 2001	Jan 2003
	Regeling en besturing			
VIII-1	Basaal regelalgoritme voor de regeling van de nutriëntdosering	100%	2001	2002
VIII-2	Kas met gewas, klimaat, meet- en doseerinstallaties voor water, nutriënten, klimaat en ICT-datatransport en web.	100%	2000	2003
VIII-3	Schattingsalgoritme voor het bepalen van de gewastoestand uit plantstatus metingen.	100%	2001	2002
VIII-4	Adaptatiealgoritme voor de voorspellende gewasmodellen die in de regeling worden gebruikt, met name ten aanzien van verdamping, gewasgroei en nutriëntopname.	100%	2002	2002
VIII-5	Integratie van de onderdelen onder 1, 2 en 3 in een model-voorspellende regeling voor de nutriënt- en waterdosering met koppelingen naar het kasklimaat.	100%	2002	2003
VIII-6	Evaluatie van de feitelijke werking van de onderdelen 1 t/m 4 in een kas van voldoende omvang. Na het go/no-go moment aan het eind van het derde jaar.	20%	2002	2003
VIII-7	Rapportage t.a.v. de samenwerking tussen de onderdelen 1 t/m 4 voor het waterzijdige gedeelte met de eerder ontwikkelde geavanceerde model-gebaseerde optimale regeling van het kasklimaat.	20%	2002	2003
VIII-8	Publicatie in wetenschappelijke journals, proceedings, vakbladen en rapporten	100%	2000	2003
IX	**Procesintegratie**			
IX-1	Ontwikkeling nieuw modulair hardware platform voor real time koppeling proces modules	100	Jan 2000	Dec 2002
IX-2	Specifieke ontwikkeling nieuw modulair hardware platform uitbesteed door van Vliet aan ingenieursburo	100	Jan 2000	Dec 2001
IX-3	Ontwikkeling van systeemsoftware voor de nieuwe generatie procescomputers	100	Jun 2000	Dec 2001
IX-4	Integratie nieuw hardwareplatform in Synopta	100	Jan 2002	Dec 2002
IX-5	Inventarisatie input-output parameters verschillende modules	100	Feb 2001	Aug 2001

IX-6	Ontwikkeling regelalgoritmen voor diverse proceskoppelingen	100	Jun 2001	Dec 2002
IX-7	Eerste test in kas	100	Aug 2002	Dec 2002
IX-8	Implementatie van alle regelalgoritmen in nieuw platform voor totaal geïntegreerde procesautomatisering	50	Jan 2002	Dec 2002
IX-9	Tweede test in kas	0	-	-