

.....Energiezuinigheid door
innovatieve vlijt

PROF. DR. IR. L.F.M. MARCELIS

Inaugurale rede bij de aanvaarding van het ambt van
buitengewoon hoogleraar Plantenteelt in Energiezuinige Kassen
aan Wageningen University op 1 oktober 2009



WAGENINGEN UNIVERSITY

WAGENINGEN UR

Energiezuinigheid door innovatieve vlijt

PROF. DR. IR. L.F.M. MARCELIS

Inaugurele rede bij de aanvaarding van het ambt van
buitengewoon hoogleraar Plantenteelt in Energiezuinige Kassen
aan Wageningen University op 1 oktober 2009



WAGENINGEN UNIVERSITY

WAGENINGEN UR

ISBN 987-90-8585-282-7

• • •

2

Prof. dr. ir. L.F.M. Marcelis Energiezuinigheids door innovatieve vlijt

Energiezuinigheid door innovatieve vlijt

Geachte mijnheer de Rector Magnificus, waarde collega's en vakgenoten, vertegenwoordigers van Westland Energie en representanten uit de glastuinbouw, beste familieleden, vrienden en kennissen.

Als u naar de voorpagina van dit boekje kijkt, kunt u op hoofdlijnen al zien waar mijn leerstoel zich mee bezig houdt. Op de voorgrond van de foto staat een gewas. In mijn onderzoek staat het gewas ook centraal en daarbij gaat het mij vooral om de onderliggende fysiologische processen in de plant. Boven het gewas ziet u een blauwe lucht en dat betekent veel zoninstraling. Die zon is onze gratis energiebron die we maximaal willen benutten, zodat we zo min mogelijk fossiele energie nodig hebben. Op de foto is ook veel innovatieve instrumentatie te zien om de kas te conditioneren en sensoren die de condities monitoren. Voor de goede kijkers onder ons is te zien dat de luchtramen ondanks de blauwe lucht slechts een klein stukje open staan, om de zonne-energie maximaal te benutten en om de teeltcondities helemaal naar wens van de plant te maken.

De tuinbouwsector heeft mij al van jongs af aan bijzonder geboeid. Als mij als peuter werd gevraagd wat ik later wilde worden, was mijn antwoord stevast 'bloemen', waarmee ik bedoelde bloemen telen en onderzoeken. Die belangstelling is nooit weggegaan. Ik ben blij dat ik vandaag de gelegenheid krijg om mijn interesses in planten en de tuinbouw met u te mogen delen.

Met de titel 'Energiezuinigheid door innovatie vlijt' bedoel ik dat we werk moeten maken van innovaties zodat we energiezuinig kunnen telen. In mijn oratie wil ik dit graag belichten tegen de achtergrond van het economisch belang van de tuinbouwsector en het belang van energiebesparing. Vervolgens wil ik stilstaan bij de continue innovatie in de sector en ik wil uitgebreid ingaan op de plaats van het onderzoek van mijn leerstoel daarbij.

. . .

Het belang van de Nederlandse tuinbouw

Enkele jaren geleden heeft het innovatieplatform onder leiding van minister president Balkenende de tuinbouw aangewezen als een sleutelgebied van de Nederlandse economie. De glastuinbouwsector is economisch gezien van groot belang. Ik noem een paar kengetallen (Anonymous, 2009a,b; Berkhout en van Bruchem, 2009). De glastuinbouw geeft werk aan 110.000-120.000 mensen. De toegevoegde waarde van het glastuinbouwcomplex is 5,6 miljard euro. Het areaal glastuinbouw bedraagt 10.000 ha. De glastuinbouw beslaat hiermee slechts 0,5% van het totale landbouw-areaal in Nederland, terwijl de productiewaarde 22% van het totale Nederlandse agrocomplex bedraagt. 70 tot 75% van de glastuinbouwproducten worden geëxporteerd.

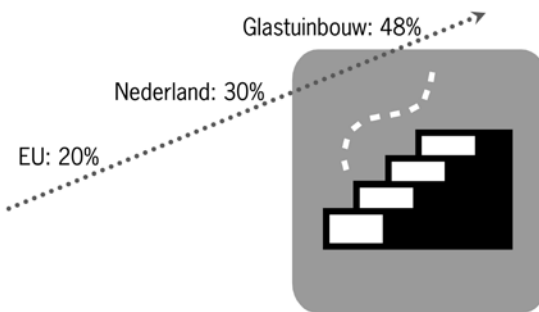
Het belang van energiebesparing in de glastuinbouw

Het Kyoto protocol van 1997 en Al Gore hebben gezorgd voor wereldwijde bewustwording dat we bijzonder zuinig moeten zijn op onze fossiele brandstoffen. Ik ben benieuwd wat uit de komende klimaattop in Kopenhagen komt. Zuinig zijn op fossiele brandstoffen geldt in het bijzonder voor de glastuinbouw. Het verbruik van aardgas door de glastuinbouw bedraagt circa 10% van het nationale verbruik. De energiekosten bedragen tussen de 15 en 30% van de totale kosten van een glastuinbouwbedrijf (Vermeulen, 2008). Dit grote verbruik van fossiele energie maakt glastuinbouwbedrijven bovendien afhankelijk van energieleverende landen, die instabiel of onbetrouwbaar kunnen zijn: denk hierbij aan recente ruzies tussen landen over gasdoorvoer.



Bewustwording van zuinig zijn op fossiele brandstoffen

Maatschappelijke bewustwording, hoge kosten en afhankelijkheid van weinig stabiele regio's hebben de Nederlandse tuinbouwsector er toe gebracht om bijzonder ambitieuze doelstellingen voor energiebesparing te definiëren. Daar waar de EU 20% vermindering van CO₂ emissie nastreeft en de regering Balkenende 30% reductie, heeft de glastuinbouwsector met de overheid in het convenant 'Schone en zuinige agrosectoren' als doelstelling afgesproken om de CO₂ emissie in het jaar 2020 met 48% gereduceerd te hebben ten opzichte van het referentiejaar 1990. Ik noem hier de reductie van CO₂ emissie; dat betekent in de praktijk vrijwel hetzelfde als reductie van gebruik van fossiele energie. De ambitie is dat in de kassen die vanaf het jaar 2020 gebouwd worden, klimaatneutraal en rendabel geteeld kan worden.



Doelstellingen energiebesparing

Innovaties in de glastuinbouw

We telen planten in kassen om de teeltomstandigheden zo optimaal mogelijk voor de planten te maken. Oranjeriers kunnen gezien worden als een van de eerste kassen. In Nederland kwam de ontwikkeling van oranjeriers na afloop van de 80-jarige oorlog in de 17^e eeuw volop in gang (Van den Muijzenberg, 1980). Deze oranjeriers waren echter veelal alleen voorbehouden aan de rijkelui.

Commerciële glastuinbouw kwam pas goed op gang aan het begin van de 20^e eeuw. In 1906 was er nog maar ca 200 ha teelt onder glas. Dit was in 1950 al uitgebreid tot

meer dan 3000 ha (Van den Muijzenberg, 1980). Kenmerkend voor de ontwikkelingen van de afgelopen eeuw is dat er een steeds verdergaande beheersing van de teeltcondities heeft plaatsgevonden.



komkommerkas

druivenkas



Komkommerkas en druivenkas in de eerste helft van de 20^e eeuw

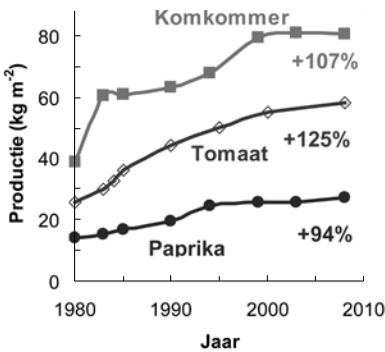
We zijn kassen gaan verwarmen, we zijn CO₂ gaan doseren, we telen veelal op een substraat los van de grond, het klimaat in de kas wordt geregeld op basis van een computer en als er te weinig licht is zetten we de lampen aan. Van recente datum is dat we luchtvochtigheid in de zomer op peil houden, dat we niet alleen de hoeveelheid licht in de kas willen regelen maar ook de diffuusheid en de kleur van het licht.

Deze voorbeelden geven aan hoe we gedurende de jaren de ene na de andere klimaatfactor verder zijn gaan beheersen en dit is een trend die zich ook de komende jaren sterk zal en moet doorzetten.

De ontwikkelingen in de regeltechniek en ICT hebben een sterke impuls gegeven aan de sturing van het klimaat, van handbediend, via analoog, naar digitaal met steeds geavanceerdere computers. Maar om het klimaat in een kas te regelen moet een teler een zeer groot aantal setpoints instellen, waarbij het ene setpoint soms het andere weer overruled. In de toekomst moeten we toe naar meer intelligentie in deze regeling zodat we die wirwar aan instellingen los kunnen laten en

dat we setpoints voor doelstellingen voor de teelt kunnen opgeven. Dus dat we niet meer op de computer instellen wat de temperatuur moet zijn, maar dat we instellen dat we bijvoorbeeld donderdag 1 oktober 3 rozentakken per m² willen oogsten en dat die takken elk 80 cm lang zijn, bij een energieverbruik in de afgelopen week van niet meer dan 0.1 m³ aardgas per m² kas. Dit is een hoog ambitie niveau, en vereist een grote kennis van reacties van het gewas op de omstandigheden in de kas.

Als gevolg van de steeds betere beheersing van de teeltoomstandigheden zijn de productieniveaus door de jaren heen continu gestegen. Zo is de productie per m² van tomaten de laatste 30 jaar meer dan verdubbeld (Anonymous, 1981; Vermeulen, 2008). Dit terwijl het energiegebruik sinds 1980 met een kwart is verminderd (Anonymous, 1981; Vermeulen, 2008). De vraag die dan al snel opkomt is: waar liggen de grenzen? Theoretisch kan de productie nog wel een keer verdubbelen en netto geen gebruik van fossiele energie is niet onrealistisch. Belangrijke uitdaging hierbij is om dit dan zodanig vorm te kunnen geven dat de teelt economisch rendabel is. Zo zullen veel energiebesparende ingrepen alleen van de grond komen als ze gepaard gaan met grote productiestijgingen. Veel van die ingrepen vragen namelijk om hoge investeringen. Investerings die economisch gezien veelal onvoldoende terugverdiend kunnen worden uit alleen de besparing op energie. Om de investering terug te verdienen is gelijktijdig ook een productiestijging of een kwaliteitsverbetering nodig. Aldus geldt dat energiebesparing en productieverbetering hand in hand moeten gaan!

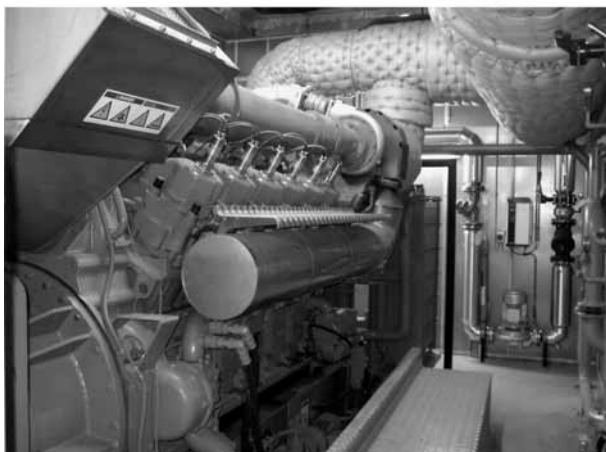


Productietoename afgelopen 25 jaar

Innovaties op het gebied van energiebesparing

De afgelopen jaren hebben we een aantal innovaties gezien die tot verandering van het energiegebruik leiden.

Allereerst de sterke opkomst van warmtekrachtkoppeling gedurende de laatste 10 jaar, waarbij gelijktijdig warmte en elektriciteit wordt opgewekt. Door benutting van zowel de warmte, elektriciteit als CO₂ kan een hoog rendement gehaald worden. Mede door de liberalisering van de energiemarkt leidt dit tot een goede rentabiliteit. Vanuit energie oogpunt is het een hoge benutting, maar geen energiebesparing in de teelt. Naar de toekomst toe is meer nodig dan alleen warmtekrachtkoppeling.



Warmtekrachtkoppeling

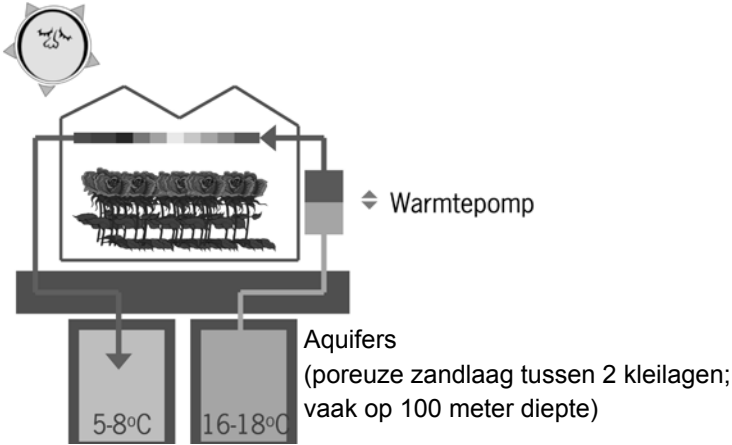
Na het verschijnen van een deskstudie van Wageningen UR (Knies & Bakker, 2005), heeft het gebruik van aardwarmte inmiddels zijn eerste intrede gedaan in de glastuinbouw. De verwachting is dat het gebruik van aardwarmte de komende jaren verder zal toenemen.



Boren naar aardwarmte

Een andere ontwikkeling is die van de gesloten of semi-gesloten kassen. De kas wordt hier gebruikt als zonnecollector. Er is een overschot aan warmte in de zomer, dat gebruikt kan worden om de kas in de winter te verwarmen. Warmte wordt in de zomer opgeslagen in een aquifer. Vervolgens wordt deze warmte in de winter gebruikt om de kas te verwarmen. Deze technologie heeft vooral een sterke impuls gegeven aan het steeds verder conditioneren van de teeltomstandigheden. De gesloten of semi-gesloten kassen kunnen zelfs zo ingericht worden dat het energie-producerende kassen worden. De energieproductie bestaat op dit moment uit de productie van (laagwaardige) warmte die dan door een ander bedrijf of een ander deel van het bedrijf

kan worden gebruikt. Clustering tussen glastuinbouwbedrijven of tussen glastuinbouw en industrie wordt door een aantal bedrijven toegepast om op energiegebruik te bezuinigen.



Semi-gesloten kas: Gebruik van energie uit aquifer

We gaan nog een stap verder door de kas niet zozeer warmte te laten produceren maar elektriciteit. Hier in Wageningen staan inmiddels al de eerste prototypen elektriciteit producerende kassen (Sonneveld et al., 2009). Hierbij wordt een deel van de zonnestraling dat niet door planten kan worden benut naar zonnecellen geleid in plaats van naar de planten om zo elektriciteit op te wekken.

Tenslotte gaan we in het onderzoek nog weer een stap verder en verkennen we de mogelijkheden om de planten zelf stroom te laten produceren (Strik et al., 2008). De eerste lampen hebben we op deze manier al laten branden. We maken hierbij gebruik van het fenomeen dat planten exudaten uitscheiden, dat zijn kleine organische moleculen, zoals citroenzuur, glucose en fructose. Deze exudaten laten we door electrogene bacteriën in een brandstofcel omzetten in elektriciteit. Door de exuderende plant te koppelen aan de microbiële brandstofcel kan met levende

planten groene stroom geproduceerd worden. Binnen mijn leerstoel is inmiddels in het kader van een Europees samenwerkingsproject een aio gestart om die productie van exudaten door planten nader te onderzoeken.

Velen van u hebben waarschijnlijk thuis nog een aantal gloeilampen hangen. Binnen een paar jaar zullen deze lampen niet meer verkocht mogen worden omdat ze teveel energie gebruiken. In de glastuinbouw worden voor de groei van de planten veel zuiniger lampen gebruikt met een voor de plant gunstig licht spectrum, namelijk hogedruk natriumlampen, ofwel SONt-lampen. In feite zijn dit straatlampen. Ondanks het feit dat ze veel efficiënter zijn dan gloeilampen is de noodzaak tot verhoging van energie-efficiëntie van belichtingsystemen bijzonder groot, omdat elektriciteit voor lampen een groot deel van het energieverbruik bepaalt. Want nog altijd wordt twee-derde deel van de elektriciteit niet benut als licht. De energie-efficiëntie van LED-verlichting is nu vrijwel gelijk aan die van de natriumlampen. De LED-technologie is volop in ontwikkeling en de verwachting is dan ook dat de efficiëntie van de LED-lampen snel die van de SONt-lampen voorbij zal streven. Dit nieuwe type lampen biedt bovendien nieuwe mogelijkheden om de plantengroei te sturen, omdat we de lichtkleur kunnen kiezen, de warmte- en lichtproductie van de lamp gescheiden is en omdat LEDs het mogelijk maken om het licht op een andere manier in het gewas te verdelen.

De automobilisten onder ons kennen waarschijnlijk het begrip ‘Het nieuwe rijden’. Evenzo kennen we sinds kort in de glastuinbouw het begrip ‘Het nieuwe telen’. Bij ‘Het nieuwe telen’ wordt een forse energiebesparing nagestreefd. De energiebesparing wordt bereikt door intensief gebruik te maken van isolerende schermen. Dit wil zeggen meer uren schermen, meerdere schermen toepassen en werken met beter isolerende schermen. We gaan telen met de natuur mee, dit wil zeggen het kasklimaat sterk de buitencondities laten volgen, temperatuurintegratie toepassen, meer licht in de kas toelaten en plant- en oogstdata aanpassen aan het buitenklimaat. Bij ‘Het nieuwe telen’ verlagen we luchtvochtigheid niet door te stoken in combinatie met openen van ramen, maar we voeren vocht af door gecontroleerd inbrengen van droge buitenlucht. Omdat de luchtvochtigheidsverdeling hierdoor wordt verbeterd (Campen et al., 2009), kan er in de kas een hogere luchtvochtigheid worden aangehouden.

. . .

De gewasverdamping neemt hierdoor af, net zoals het warmteverlies per eenheid afgevoerd vocht. Hierdoor wordt de ontvochtiging van de kas energiezuiniger. Op zonnige momenten bevochtigen we de lucht zodat het niet te warm wordt en de ramen dicht kunnen blijven. Hierdoor kan de CO₂ in de kas bij de planten gehouden worden. Tenslotte verbeteren we het microklimaat door gecontroleerde luchtbeweging.

In onderzoekskassen in Bleiswijk hebben we dit jaar laten zien dat je met ‘Het nieuwe telen’ kwalitatief en kwantitatief goede producten kunt telen met 40% minder gasverbruik. U ziet hier in de zaal prachtige bloemen en groenten die al allemaal volgens ‘Het nieuwe telen’ zijn geproduceerd. Door ‘Het nieuwe telen’ te combineren met een aquifer is nog meer energiebesparing mogelijk.



*Het nieuwe
RIJDEN*

*Het nieuwe
TELIEN*

Het nieuwe rijden en telen

Onderzoek van de leerstoel

Om energiezuinigheid te bereiken zullen we vooral de energiebehoefte van het gewas moeten verminderen. De Trias Energetica blijft namelijk van kracht. We moeten eerst de energiebehoefte verminderen, dan de benodigde energiebehoefte invullen met duurzame energie en tenslotte zo efficiënt mogelijk gebruik maken van de dan nog noodzakelijke fossiele energie. In mijn leerstoel wil ik mij richten op de eerste stap van de Trias Energetica: het verminderen van de energiebehoefte. Hierbij ligt mijn focus op het beter benutten van de potenties van het gewas in interactie met de mogelijkheden van de kas.

Hiermee wil ik met mijn leerstoel bereiken dat een energiebesparing van meer dan 50% mogelijk wordt terwijl een hoge productie gerealiseerd kan worden. Deze energiezuinigheid is alleen te bereiken door creatieve innovaties en door noeste vlijt van de onderzoekers, telers en overige partijen in de tuinbouwsector. Dit betekent ook dat er voldoende goed opgeleide medewerkers moeten zijn. Met mijn leerstoel wil ik dan ook een bijdrage leveren aan het enthousiasmeren en opleiden van studenten voor de tuinbouwsector.

Nieuwe teeltcondities doen beroep op gewasfysiologische kennis

Alle maatregelen die tot substantiële energiebesparing leiden, resulteren in forse wijzigingen van de teeltcondities. Dit zien we bijvoorbeeld niet alleen bij ‘Het nieuwe telen’, bij het gebruik van LED-belichting en gebruik van restwarmte, maar ook bij (semi-)gesloten kassen waar combinaties van temperatuur, licht en CO₂ voorkomen, die in gangbare kassen nooit voorkwamen. Denk hierbij aan de combinatie van veel licht, relatief lage temperatuur en tegelijk een hoge CO₂-concentratie. De stromingen als gevolg van geforceerde luchtbeweging, de ruimtelijke gradiënten en dynamische veranderingen van kasklimaat zijn sterk afwijkend van die in gangbare kassen. In sommige systemen zoals semi-gesloten kassen hebben we te maken met een heel constant klimaat. In andere systemen zoals ‘Het nieuwe telen’ zien we juist sterke variatie in klimaat. De vraag is wat betekent dit voor het gewas?

De gewasreactie op nieuwe teeltcondities kan in veel gevallen niet accuraat voorspeld worden op basis van bestaande inzichten. Kennis op dat gebied is cruciaal om een rendabele teelt in energiezuinige kassen mogelijk te maken. Anderzijds biedt een gedegen kennis van de onderliggende fysiologie mogelijkheden om de juiste klimaatcondities te creëren om optimaal de potenties van het gewas te benutten. Dit vraagt om systeemanalytisch onderzoek onder uiteenlopende teeltcondities waarbij gewasgroei, gewasontwikkeling en productie als ‘emergent properties’ van onderliggende fysiologisch-genetische eigenschappen worden beschouwd. Binnen mijn leerstoel zal ik daarom een combinatie van experimenteel en modelmatig onderzoek toepassen.

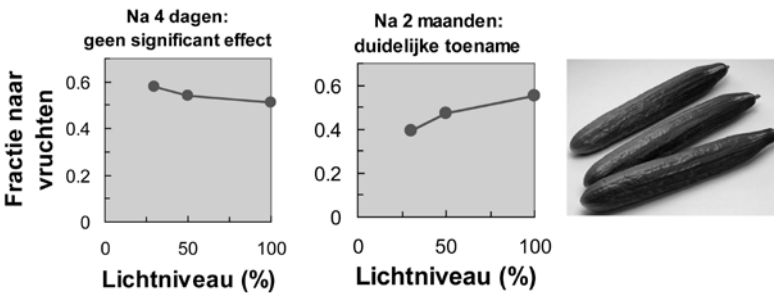
Het onderzoek van mijn leerstoel kent drie onderzoekslijnen, die onderling sterk verweven zijn:

- Dynamiek van gewasfysiologische respons op nieuwe teeltcondities
- Verklarende gewasmodellen
- On-line gewasmonitoring

Dynamiek van gewasfysiologische respons op nieuwe teeltcondities

Respons van planten op een wijziging in teeltcondities kan sterk verschillen tussen korte termijn en lange termijn. Bijvoorbeeld als de lichtintensiteit verhoogd wordt, zien we bij komkommer dat gedurende de eerste dagen de relatieve verdeling van assimilaten tussen vruchten en de rest van de plant niet verandert (Marcelis, 1993). Echter als planten gedurende meerdere weken bij een hogere lichtintensiteit worden geteeld, dan neemt de relatieve verdeling naar de vruchten toe (Marcelis, 1993). Deze toename is het gevolg van de verminderde abortie van jonge vruchten, waarvan de effecten op assimilatenverdeling zich pas na enige tijd manifesteren. Fysiologische processen in de plant passen zich op de langere termijn vaak aan de heersende teeltcondities aan. De dynamiek van plantresponsen op veranderingen in teeltcondities en de aanpassing van planten aan gewijzigde condities vormen een speerpunt van de leerstoel.

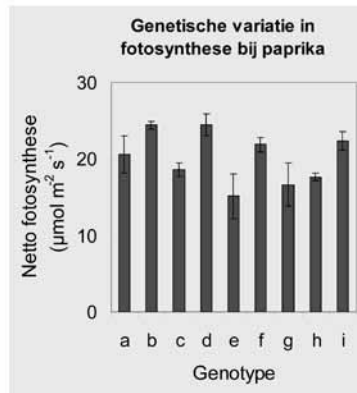
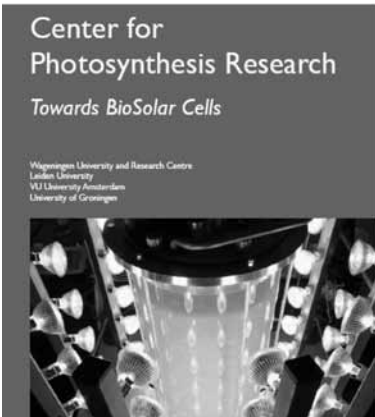
Voorbeeld: assimilatenverdeling bij komkommer



Korte termijn respons anders dan lange termijn

Teelt in kassen betekent dat de plant geconfronteerd wordt met dynamische veranderingen van een groot aantal teeltfactoren tegelijk. De respons van de plant op de afzonderlijke teeltfactoren is veelal niet-lineair en de verschillende responsen vertonen vaak interactie.

Reductionistisch onderzoek waarbij één factor tegelijk onderzocht wordt onder constante omstandigheden in korte proeven is absoluut noodzakelijk om het inzicht in het functioneren van een plant te vergroten. Dit onderzoek zorgt voor de broodnodige bouwstenen. Echter, enkel reductionistisch onderzoek volstaat niet meer. Een systeemanalytische en systeemintegrerende aanpak zijn nodig om de complexiteit van factoren in hun onderlinge samenhang te kunnen bestuderen.



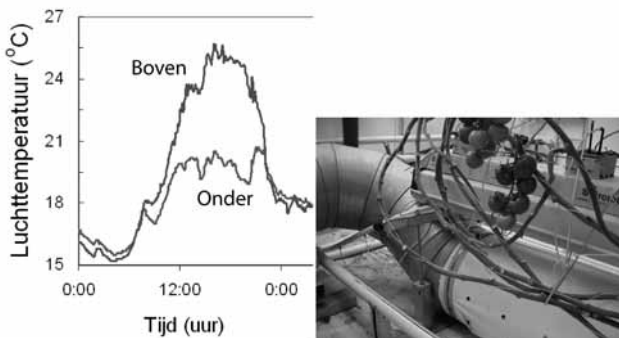
Fotosynthese voor optimale energie-efficiëntie

Verbeteren van de fotosynthese van een gewas biedt nog veel mogelijkheden om de opbrengst van gewassen te verhogen (Long et al., 2006). In de miljoenennota van 2 weken geleden is te lezen dat een budget van 25 miljoen euro is toegekend aan het programma Towards Biosolar Cells. In het kader van dat programma zullen naar verwachting enkele aio's binnen mijn leerstoel gaan werken aan het ontrafelen en kwantificeren van het fotosyntheseproces van gewassen in energiezuinige kassen.

Resposen op snel veranderende omstandigheden, acclimatie van de fotosynthese-machinerie en feedback mechanismen zullen in detail onderzocht worden. In dit fotosynthese-onderzoek gaan we niet alleen kijken naar de aanmaak van assimilaaten, maar ook naar de verwerking ervan. Alleen door een goede balans tussen source en sink is een optimale productie mogelijk. In dit onderzoek kijken we in samenwerking met veredelaars eveneens naar de genetische regulatie. Interessant genoeg blijkt er namelijk een behoorlijke genotypische variatie te zijn in fotosynthese en lichtbenuttingsefficiëntie van kasgewassen (De Swart et al., 2006; Higashide & Heuvelink, 2009).

De verhouding tussen planttemperatuur en luchttemperatuur was tot voor kort een gegeven. De verschillende nieuwe energiebesparende systemen kunnen leiden tot totaal andere temperatuurgradiënten in het gewas en tot een andere verhouding tussen lucht en planttemperatuur. Laat me dit met twee voorbeelden illustreren.

In conventionele kassen is de verticale temperatuurgradiënt zeer beperkt. Echter in semi-gesloten kassen waar koele lucht onder het gewas ingeblazen wordt, zien we afhankelijk van temperatuur en debiet van de ingebrachtte lucht dat het onder in het gewas veel kouder is dan bovenin. Zo ziet u in de figuur dat op een zonnige dag (bij veel instraling) het temperatuurverschil kan oplopen tot circa 5 graden.



.....
Koeling vanaf onderen bij zonnig weer: 5° C kouder onder gewas dan erboven

Een tweede voorbeeld is een proef met LED-belichting bij Chrysant. Hier zien we dat de bovenste bladeren meer dan een graad Celsius koeler kunnen zijn dan die bij SONt-belichting terwijl alle overige omstandigheden identiek zijn (Meinen et al., 2009). Wat het betekent dat het ene plantendeel warmer is dan het andere heeft in het onderzoek nog weinig aandacht gehad, omdat het tot voor kort niet zo veel relevantie had. Het kon immers toch niet beïnvloed worden. Binnen mijn leerstoel wordt een aio aangesteld om de effecten van temperatuurgradiënten op de fysiologie van de plant te ontrafelen.

Verklarende gewasmodellen

Verklarende simulatiemodellen die de processen in plant en kas beschrijven zijn een effectief hulpmiddel bij het onderzoek naar energiebesparing. De combinatie van modellen en experimenten is een kenmerkend aspect van het onderzoek van de leerstoel om tot energiebesparing te komen. Modellen vormen ook de basis om de eerder genoemde wirwar van klimaat setpoints van de klimaatcomputer te vervangen door een regeling op basis van teeltdoelen.

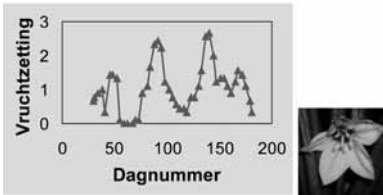
De gewasmodellen die de afgelopen decennia zijn ontwikkeld richten zich veelal op de simulatie van drogestofproductie met fotosynthese als drijvende kracht. Het is nu tijd om een stap verder te gaan. We willen nu ook structuur en morfogenese van het gewas modelleren. We willen de variabiliteit in tijd en ruimte in beschouwing nemen en rekening houden met acclimatieprocessen. Tenslotte willen we effectief gebruik maken van genetische en moleculaire kennis in gewasmodellen.

Mijn leerstoel gaat gebruik maken van vernieuwende modelleringsconcepten; zoals zelflerende modellen, virtuele-plantmodellen (functie-structuurmodellen), state-space modellen, systeembioïologische, gen gerelateerde modellen. Hierdoor wordt het mogelijk om groei-, ontwikkeling-, en productiegerelateerde toestandsvariabelen van gewassen als ‘emergent properties’ te beschouwen, die het gevolg zijn van effecten op onderliggende processen.

Een mooi voorbeeld van een ‘emergent property’ is de cyclische fluctuatie in vruchtzetting in gewassen zoals paprika en komkommer (Heuvelink et al., 2004; Mathieu et al., 2008). De zetting van vruchten hangt af van de source/sink verhouding in de plant (Marcelis et al., 2004). De source hangt vooral af van de fotosynthese

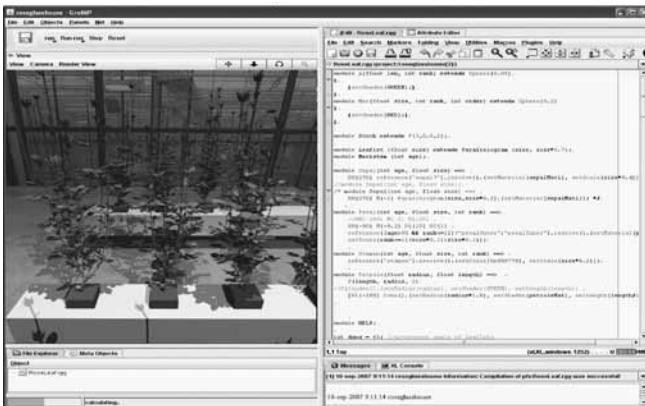
. . .

in de plant en de sink van het aantal vruchten aan de plant en het ontwikkelingsstadium van die vruchten. Deze fluctuaties zijn alleen te voorspellen op basis van modellen die de onderliggende processen beschrijven.



Cyclische vruchtzetting paprika (vruchtzetting is weergegeven als aantal niet-aborterende vruchten aan de plant, die jonger dan 10 dagen zijn)

Virtuele-plantmodellen ook wel functie-structuur modellen genoemd (Godin & Sinoquet, 2005; Vos et al., 2007) zijn gewasmodellen die niet alleen fysiologische processen in de plant beschrijven maar waarbij deze processen gekoppeld zijn aan de drie-dimensionale ontwikkeling van gewasarchitectuur. Internationaal gezien is dit een onderzoeksveld dat momenteel snel in opkomst is. Zelf hebben we inmiddels al virtuele-plantmodellen voor roos, chrysaant en tomaat ontwikkeld.



Virtuele-plantmodellen

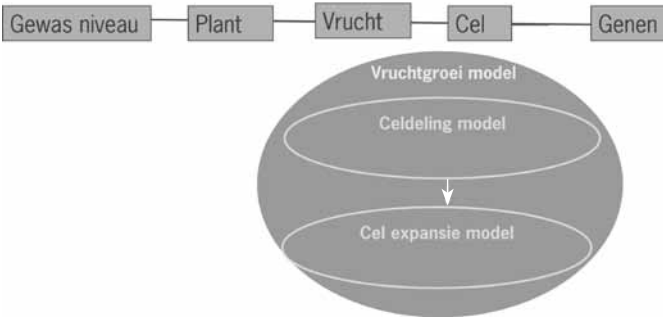
Virtuele-plantmodellen zijn een geschikt hulpmiddel om bijvoorbeeld bij rozen te onderzoeken op welke plek geknipt moet worden, op welke plek de nieuwe scheuten ontstaan en wat de invloed van licht daarop is. Zo roept de ontwikkeling van LED-lampen de vraag op waar we de lampen het best kunnen hangen. Hierbij kunnen virtuele-plantmodellen helpen om de meest ideale lichtverdeling in het gewas te vinden en wat daarvan de consequenties zijn voor de groei en ontwikkeling van het gewas. Bijvoorbeeld, kunnen we LED-lampen tussen de planten hangen? En kunnen we op die manier lichtemissie als gevolg van gewasreflectie voorkomen? En krijgen we dan een betere verticale lichtverdeling in het gewas en daarmee een hogere gewasfotosynthese? Nu blijkt de plant ook weer zijn bladstand aan te kunnen passen aan de positie van de lampen. Consequenties hiervan kunnen onderzocht worden met virtuele-plantmodellen.

Dit type modellen kan ondersteunend zijn bij het opzetten van experimenten en het ontwikkelen van energiezuinige concepten waarbij de doelstelling is een energiezuinige productie door toepassing van nieuwe technieken.

Semi-gesloten kassen waarbij het onderin de kas kouder is dan bovenin leidt tot grovere vruchten bij tomaat (Wageningen UR Glastuinbouw, 2009 ongepubliceerd), terwijl in een proef met komkommer kleinere vruchten werden geoogst (De Gelder et al., 2008). Als de vruchttemperatuur van komkommer gedurende een paar dagen verhoogd wordt, dan blijft daarna de groeisnelheid relatief groot (Marcelis & Baan Hofman-Eijer, 1993). Dit komt niet door een effect op celdeling, maar celstrekking. Hoe het effect van temperatuur op vruchtgrootte precies tot stand komt, begrijpen we nog niet goed. Het begrijpen van deze regulatie is echter heel belangrijk als we energiezuinige temperatuurstrategieën willen ontwikkelen.

We zullen hier de onderliggende processen op verschillende aggregatieniveaus, te weten cel, orgaan, plant en gewas moeten bestuderen om het te kunnen gaan begrijpen. Zo gaan 2 aio's werken aan modellering van de groei van de tomatenvrucht op basis van celdeling en celstrekking waarbij de regulerende fysiologische parameters gekoppeld worden aan het genetische regelsysteem binnen de cel.

Vijf verbonden niveaus:



Regulering van vruchtgroei

We gaan hierbij dus op gewasniveau ook gebruik maken van biotechnologisch of ‘omics’ onderzoek. Echter de kloof tussen ‘omics’ onderzoek en het onderzoek aan productiesystemen is nog groot. Modellen die een systeem beschrijven op basis van onderliggende processen zijn hierbij een uitstekend hulpmiddel. Het opkomende onderzoeksveld van systeembioïogie biedt verdere kansen om deze kloof te verkleinen. De term systeembioïogie wordt veelal gebruikt voor modelmatig onderzoek naar een verklaring van het gedrag en functioneren van cellen op basis van onderliggende processen (Kitano, 2002). Echter de kloof tussen het biotechnologisch en productie-systeem onderzoek zal niet gedicht worden, als systeembioïologisch onderzoek stopt op het niveau van hele cellen. Het is nu tijd voor ‘Crop systems biology’, waarbij biotechnologische kennis ingebouwd wordt in gewasgroeimodellen (Yin & Struik, 2007).

Energiezuinigheid vraagt om rassen aangepast aan energiezuinig telen. Om het veredelingsproces efficiënt te laten verlopen zijn goede fenotyperingsmethodieken essentieel. Internationaal is er momenteel veel aandacht voor high throughput phenotyperingstechnieken. Veelal richt men zich hier op het snel meten van een bepaalde al dan niet fysiologische parameter van de plant, maar ook beperkt men zich vaak nog tot alleen het meten van de totale productie. Echter door een sterke

GxE interactie, dit wil zeggen interactie tussen genotype en teeltomstandigheden, valt de waarde van deze metingen nogal eens tegen. Hier kan een modelmatige benadering van fenotypering ons een stap verder helpen (Yin et al., 2004; Uptmoor et al., 2008). We gaan hierbij genetische informatie koppelen aan parameters van een gewasmodel. Dus bijvoorbeeld QTL of kandidaat genen koppelen aan de potentiële groeisnelheid van een vrucht. Op deze manier verwachten we stabielere QTLs te vinden (Dingkuhn et al., 2007) en kunnen we de performance van een genotype onder een grotere range van omstandigheden beter voorspellen en zijn minder grootschalige fenotyperingsexperimenten nodig.

On-line gewasmonitoring

Energiebesparing betekent veelal de grenzen van de mogelijkheden van het gewas opzoeken. Continue on-line monitoring van de meest relevante plantprocessen is daarbij van groot belang. Denk hierbij aan meten van fotosynthese, verdamping, wateropname en bladstrekking. Ontwikkelingen in de ICT-sector maken dat draadloze sensoren en sensornetwerken beschikbaar komen. Zo kunt u rechtsboven in de figuur een meting zien van temperatuur en vochtigheid rondom de gerberabloem met behulp van een draadloze sensor. In energiezuinige kassen volstaat het niet meer om alleen maar een meting te hebben van het gemiddelde kasklimaat; nee, we zullen ons steeds meer moeten richten op het microklimaat.

Kunstvrucht →
Vruchttemperatuur



Infrarood camera →
gewastemperatuur



Draadloze sensor →
microklimaat



Weeggoot
→ groei, verdamping



Gewasmonitoring: voorbeelden van plantsensoren

De belangrijkste vragen die zich nu voordoen op het gebied van monitoring van planten liggen op het gebied van de interpretatie van metingen, de te nemen acties naar aanleiding van de metingen en op het gebied van meetprotocollen. Met meetprotocollen bedoel ik het vaststellen onder welke condities, op welk moment of op welke plaats in het gewas moet er gemeten worden. Dat dit geen sinecure is blijkt bijvoorbeeld wel bij het KNMI, waar afgelopen week discussie ontstond of de klimaatgegevens van afgelopen jaren wel correct zijn.



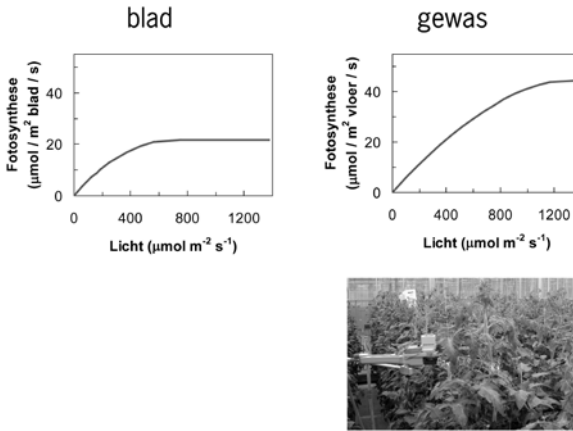
Een goed meetprotocol is geen sinecure

Metten is niet direct weten. De meting moet zo gedaan worden dat de gestelde vraag beantwoord kan worden. Hiervoor is niet alleen een juist meetprotocol nodig, maar daarnaast moet er aan de data een goede analyse en een juiste interpretatie gegeven worden; pas dan is meten ook weten! Door de veelheid van verschillende metingen die mogelijk zijn, is het juist nu van groot belang om deze fundamentele principes voorop te laten staan.

Als er één sensor in de kas hangt die aan 1 vierkante mm van een blad een meting doet, wat betekent dat dan voor mijn hele kas? Hierbij moeten we ons dan bedenken dat in een kas van 1 ha meestal 3 ha blad aanwezig is. Dus de vraag is hoe kan 1 vierkante mm iets zeggen over 3 ha?

Een meting aan één blad kan niet zondermeer van toepassing verklaard worden op het hele gewas. Laat me dit illustreren aan de hand van een klassiek voorbeeld, maar iets waarmee tot op de dag van vandaag nog veel fouten gemaakt worden.

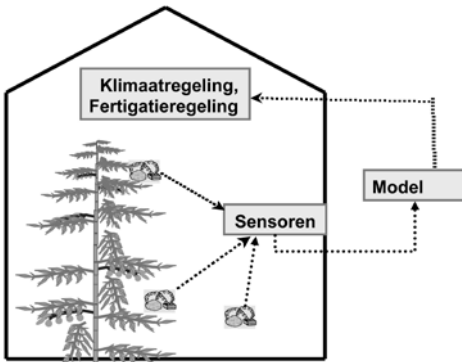
Metingen aan fotosynthese van het bovenste blad laten zien dat het blad bij 500 micromol $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ licht is verzadigd. De conclusie is dan snel getrokken dat meer licht geen zin heeft voor de plant. Echter onder dit bovenste blad liggen ook nog veel bladeren die half in de schaduw zitten. Bij verhoging van de lichtintensiteit krijgen deze bladeren meer licht, waardoor de fotosynthese van het gewas wel tot 1000 micromol $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ kan blijven toenemen (Marcelis & De Pascale, 2009). Gewasgroeimodellen die gebaseerd zijn op fysiologische plantprocessen maken het mogelijk om metingen aan afzonderlijke bladeren te vertalen naar responsen van het gehele gewas.



Fotosynthese blad is niet gelijk aan gewas

Zowel voor de interpretatie van sensorinformatie als voor beslissingen over te nemen acties, moet informatie van verschillende sensoren aan elkaar gekoppeld worden en sensoren moeten gekoppeld worden aan zelflerende modellen

(Marcelis et al., 2000). Modellen kunnen bijvoorbeeld zelflerend worden gemaakt door automatische parametercalibratie (Elings et al., 2004). Het koppelen van informatie van verschillende sensoren aan elkaar en dat combineren met modelberekeningen, maakt het mogelijk om niet alleen een gewas te monitoren maar ook om optimaliserende regelsystemen voor kasklimaat en voor voeding en water te ontwikkelen. Hierbij geldt dat ondergrondse en bovengrondse processen niet onafhankelijk van elkaar zijn. Het wordt dan ook tijd dat substraatcomputer en klimaatcomputer van de tuinder geïntegreerd worden in één computer. De innovatieve technieken zijn er. Het zal nu vlijt vragen om ze tot praktische waarden te brengen.



Koppelen van sensoren en modellen

In mijn leerstoel wil ik graag nuttig gebruik maken van wereldwijde kennis en die benutten om in Nederland energiezuiniger te kunnen telen. Ik wil hier graag één voorbeeld geven. Zo werkt er binnen mijn leerstoel momenteel een aio aan monitoring van de waterstatus van planten. We willen onder andere de celturgor continu in de plant kunnen meten en dat terwijl we de plant niet willen verstoren. We verwachten dat ons dit veel kan vertellen over de respons van planten op energiebesparende maatregelen. Tot nu toe was een on-line non-destructieve meting van turgor in de plant onmogelijk. Vorig jaar heeft prof Zimmermann van

de Universiteit van Würzburg een nieuwe techniek beschreven om dit te meten (Zimmermann et al., 2008). Naar aanleiding van zijn publicatie hebben we contact gezocht en zijn een samenwerking aangegaan en we meten nu continu de turgor in tomatenbladeren in onze kassen. Internettechnologie helpt bij internationale samenwerking want dit maakt het bijvoorbeeld mogelijk dat we samen met Zimmermann on-line de metingen kunnen analyseren.



Een nieuw meetinstrument voor schatten van turgordruk in bladeren

Bij onze Zuiderburen aan de universiteit van Gent loopt onder leiding van professor Steppe ook onderzoek aan monitoring van de plant-waterstatus. Zij hebben een goede methodologie voor het gebruik van sapstroommeters en stengeldiktemeters in combinatie met modellen die de interpretatie van de turgormetingen vergemakkelijken (Steppe et al., 2006, 2008). Samenwerking maakt het mogelijk om snel vorderingen op dit terrein te maken. Momenteel komen van dit onderzoek de eerste resultaten binnen.

De vorderingen op het gebied van sensortechnologie, gewasmodellen en kennis van de fysiologie van de plant, maken het mogelijk dat het zogenaamde speaking plant concept nu echt binnen handbereik komt. We willen ons in het onderzoek nu volop inzetten op het ontwikkelen van methodologie om de toestand van de plant continu te kunnen monitoren en op basis daarvan het klimaat te regelen. Belangrijk hierbij is de methodologie voor de juiste interpretatie van sensorgegevens door informatie van verschillende sensoren te koppelen en dat te combineren met een gewasmodel

Ik kom nu aan het einde van mij rede. Ik hoop dat u een beeld gekregen heeft wat mij vooral boeit. Namelijk het verdiepen van plantenfysiologische kennis en die gelijktijdig toepassen om kasteelten energiezuiniger te maken. Een systeem benadering om de kennis van de fysiologie in de integrale omgeving van het gewas en de kas te benutten biedt de ruimte om energiezuinig en duurzaam glastuinbouw te bedrijven in Nederland. Ik wil met veel vlijt aan deze innovaties werken.

Dankwoord

Rest mij nog een woord van dank. Ik ben bijzonder gelukkig met een groot aantal stimulerende, deskundige, coöperatieve en hulpvaardige mensen in mijn omgeving waar ik mee samen werk. Zonder jullie zou ik hier nooit gestaan hebben. Ik kan jullie nu niet allemaal noemen, maar een paar mensen wil ik nu in het bijzonder bedanken.

Hooggeleerde Rector Magnificus, beste Martin,
Bedankt voor je nooit aflatende enthousiasmering voor onderzoek en onderwijs;
bedankt voor het in mij gestelde vertrouwen dat tot mijn benoeming heeft geleid.

Tijdens de overname van Westland Energie Services door Essent in 2007 is het idee ontstaan om een leerstoel te sponsoren. De leerstoel toont het belang dat beiden hechten aan innovatie in de glastuinbouw. De directie en medewerkers van Westland Energie Services ben ik bijzonder erkentelijk voor het vertrouwen in de kwaliteit en nut van mijn onderzoek en voor het financieren van mijn leerstoel. Zij geven mij de ruimte om objectief wetenschappelijk onderzoek te doen dat bijdraagt

aan duurzame innovaties in de glastuinbouw. In het bijzonder wil ik Peter van Marion noemen als brein achter het idee om deze leerstoel in te stellen.

Raoul Bino, tot voor kort directeur van de Plant Sciences Group. Bedankt voor de niet aflatende steun om mijn benoeming tot stand te brengen.

Hugo Challa, die helaas veel te vroeg is overleden, en Siebe van de Geijn waren mijn leermeesters. Zij hebben mij vooral conceptueel denken, scherp analyseren en bondig formuleren bijgebracht.

Olaf van Kooten, Beste Olaf, jij was vanaf het begin enthousiast over deze leerstoel. Beste collega's van de leerstoelgroep Tuinbouwproductieketens. Ik voelde me al direct bij jullie thuis en zie dat de samenwerking steeds meer gestalte krijgt en resultaten begint op te leveren.

Ep Heuvelink, universitair hoofddocent bij de leerstoelgroep Tuinbouwproductieketens. Ep, ik weet nog goed dat ik de eerste colleges die je gaf heb bijgewoond. Vervolgens hebben we elkaar gedurende onze carrières steeds beter leren kennen. Wij kennen elkaar door en door en weten elkaar altijd weer te stimuleren om gezamenlijk iets moois neer te zetten. We hebben altijd meer zaken te bespreken dan we tijd hebben. Bedankt voor de gezellige en leerzame gezamenlijke bezoeken aan circa 20 symposia en voor de 25 gezamenlijke wetenschappelijke publicaties. Ik hoop dat we onze succesvolle samenwerking nog lang zo kunnen voortzetten.

Sjaak Bakker, manager van Wageningen UR Glastuinbouw. We zijn het meestal verrassend snel met elkaar eens. Jij hebt bij de start van onze business unit de ambitie kenbaar gemaakt dat binnen enkele jaren één van de medewerkers hoog-leraar zou worden. Dat is je goed gelukt.

Team Gewasmanagement, Fysiologie en Modelleren van Wageningen UR Glastuinbouw. Ik ben bijzonder trots dat ik teamleider mag zijn van deze dynamische groep. Ik ben erg blij dat jullie ondanks het feit dat we op 2 verschillende locaties zitten je volop inzetten om er gezamenlijk iets moois van te maken.

. . .

Gevraagd en ongevraagd heb ik van jullie veel hulp gehad bij de voorbereiding van deze oratie. Ik heb hierbij ook dankbaar gebruik gemaakt van resultaten van jullie onderzoek. In het bijzonder wil ik hiervoor Arie de Gelder, Anja Dieleman, Pieter de Visser, Steven Driever, Anne Elings, Fleur Sterk, Esther Meinen en Jan Snel bedanken.

Ik heb veel nuttige discussies gevoerd met collega's van de andere teams van Wageningen UR Glastuinbouw en van Wageningen Universiteit. In het bijzonder wil ik Marc Ruijs en Feije de Zwart noemen. Verder ben ik Gerhard Buck-Sorlin dankbaar voor het gereed maken van de demonstratie van het virtuele-plantmodel voor roos.

De AIO's Benno, Maaike, Julienne, Vaia, Didi, Kangmo, Meiyin, Yosef, Okello, René en Andreas jullie geven kleur aan mijn onderzoek. Jullie creativiteit, nieuwsgierigheid en enthousiasme geven mij veel voldoening. Het is bovendien heel prettig om de begeleiding van deze aio's samen met een groot aantal collega's uit te voeren. De volgende personen mede-begeleiden elk een of meerdere aio's: Eefje den Belder, Harro Bouwmeester, Anja Dieleman, Steven Driever, Anne Elings, Fred van Eeuwijk, Gerie van der Heijden, Lia Hemerik, Ep Heuvelink, Wim van Ieperen, Olaf van Kooten, Jan Snel, Paul Struik, Pieter de Visser en Jan Vos

Beste studenten. Ik verheug me er op deze maand mijn eerste colleges te geven en jullie te begeleiden in het onderzoek naar de mysteries van het functioneren van planten en hoe je met dat onderzoek kan bijdragen aan een duurzame en innovatieve glastuinbouw.

Het Productschap Tuinbouw en ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het bijzonder Dennis Medema, Aat Dijkshoorn en Leo Oprel ben ik dankbaar voor de sterke impuls van het onderzoek op het gebied van energiebesparing. Een groot deel van mijn kennis van energiebesparing heb ik opgedaan in onderzoeksprojecten die in opdracht van jullie zijn uitgevoerd. Ik hoop dat jullie oog blijven houden voor verdieping van onze kennis van het functioneren van planten. Dat is de basis om een steeds verdere energiebesparing te realiseren.

. . .

Pa en ma, ik wil jullie bedanken dat jullie me altijd gestimuleerd hebben om mezelf verder te ontplooien.

Lieve Christianne, Eloy, Jolien en Carli zonder jullie zou ik hier niet hebben gestaan. Eloy, Jolien en Carli, drie heel lieve kinderen, een spel, een grap, een lach, een knuffel, dat zijn de dingen die me veel vreugde geven. Christianne samen studeren, tegelijk promoveren, samen kinderen, alles kunnen delen; dat is heel bijzonder. Ik maak het je niet altijd even gemakkelijk als ik er weer eens niet ben, maar toch zorg jij altijd dat het thuis allemaal blijft lopen. Ik hou ontzettend veel van jullie.

Beste mensen, ik dank u voor uw aandacht.

Ik heb gezegd.

Referenties

- Anonymous. 1981. Vademecum voor de glastuinbouw. LEI Den Haag, 244 pp.
- Anonymous. 2009^a. CBS Statline databank. www.statline.cbs.nl.
- Anonymous. 2009^b. Tuinbouwcijfers. www.tuinbouw.nl/artikel/tuinbouwcijfers.
- Berkhout P & van Bruchem C. 2009. Landbouw-Economisch Bericht 2008. Rapport 2009-047. LEI Wageningen UR. Den Haag, 228 pp.
- Campen JB, Kempkes FLK & Bot GPA. 2009. Mechanically controlled moisture removal from greenhouses. *Biosystems Engineering* 102: 424-432.
- De Gelder A, Janse J & Lagas P. 2008. Teelt komkommer in een geconditioneerde kas. Wageningen UR Glastuinbouw Nota 529.
- De Swart EAM, Marcelis LFM.& Voorrips RE. 2006. Variation in relative growth rate and growth traits in wild and cultivated Capsicum accessions grown under different temperatures. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 81: 1029-1037.
- Dingkuhn M, Luquet D, Clément-vidal A, Tambour L, Kim HK & Song YH. 2007. Is plant growth driven by sink regulation? Implications for crop models, phenotyping approaches and ideotypes. In: J.H.J. Spiertz, P.C. Struik and H.H. van Laar (eds.), *Scale and Complexity in Plant Systems Research: Gene-Plant-Crop Relations*. Springer Dordrecht: 157-170.
- Elings A, De Visser PHB, Marcelis LFM, Heinen M, van den Boogaard HAGM, Gieling T & Werner BE. 2004. Feed-forward control of water and nutrient supply in greenhouse horticulture: development of a system. *Acta Horticulturae* 654: 195-202.
- Godin C & Sinoquet H. 2005. Functional-structural plant modelling. *New Phytologist* 166: 705-708.
- Heuvelink E, Marcelis LFM & Körner O. 2004. How to reduce yield fluctuations in sweet pepper? *Acta Horticulturae* 633: 349-355.
- Higashide T & Heuvelink E. 2009. Physiological and morphological changes over the past 50 years in yield components in tomato. *Journal of American Society for Horticultural Science* 134: 460-465.
- Kitano H. 2002. Systems Biology: a brief overview. *Science*, 295: 1662-1664.
- Knies P & Bakker JC. 2005. Aardwarmte als duurzame warmtebron in de glastuinbouw. Rapport 322. Agrotechnology & Food Innovations, Wageningen.

. . .

- Long SP, Zhu XG, Naidu SL & Ort DR. 2006. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant Cell and Environment* 29: 315-330.
- Marcelis LFM. 1993. Fruit growth and biomass allocation to the fruits in cucumber. 2. Effect of irradiance. *Scientia Horticulturae* 54: 123-130.
- Marcelis LFM & Baan Hofman-Eijer LR. 1993. Effect of temperature on the growth of individual cucumber fruits. *Physiologia Plantarum* 87: 313-320.
- Marcelis LFM & De Pascale S. 2009. Crop management in greenhouses: adapting the growth conditions to the plant needs or adapting the plant to the growth conditions? *Acta Horticulturae* 807: 163-173.
- Marcelis LFM, 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 International conference on modelling and control in agriculture, horticulture and post-harvested processing*. IFAC 351-356.
- Marcelis LFM, Heuvelink E, Baan Hofman-Eijer LR, Den Bakker J & Xue LB. 2004. Flower and fruit abortion in sweet pepper in relation to source and sink strength. *Journal of Experimental Botany* 55: 2261-2268.
- Mathieu A, Cournède PH, Barthélémy D & De Reffye P. 2008. Rhythms and alternating patterns in plants as emergent properties of a model of interaction between development and functioning. *Annals of Botany* 101: 1233-1242.
- Meinen E, Marcelis L, Steenhuizen J & Dueck T. 2009. Is een μmol een μmol ? Groei en ontwikkeling van chrysant geteeld onder SON-T belichting en onder LED belichting, Wageningen UR Glastuinbouw (in druk).
- Sonneveld PJ, Swinkels GLAM, Campen J, van Tuijl BAJ, Janssen H, Bot GPA & Flamand G. 2009 Feasibility study for combining cooling and high grade energy production in a solar greenhouse. *Biosystems Engineering* (in press).
- Steppe K, De Pauw DJW, Lemeur R & Vanrolleghem PA. 2006. A mathematical model linking tree sap flow dynamics to daily stem diameter fluctuations and radial stem growth. *Tree Physiology* 26: 257-273.
- Steppe K, De Pauw DJW & Lemeur R. 2008. A step towards new irrigation scheduling strategies using plant-based measurements and mathematical modeling. *Irrigation Science* 26: 505-517.
- Strik D, Hamelers HVM, Snel JFH & Buisman CJN. 2008. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*: 32: 870-876.

- Uptmoor R, Schrag T, Stützel H & Esch E. 2008. Crop model based QTL analysis across environments and QTL based estimation of time to floral induction and flowering in *Brassica oleracea*. *Molecular Breeding* 21: 205-216.
- Van den Muijzenberg, E.W.B. 1980. A History of greenhouses. IMAG Wageningen, The Netherlands, 435 pp.
- Vermeulen PCM. 2008. Kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw 2008. Kengerallen voor Groenten - Snijbloemen - Potplanten teelten. Wageningen UR Glastuinbouw, Rapport 185. Wageningen, 146 pp.
- Vos J, Marcelis LFM, de Visser PHB, Struik PC & Evers JB. 2007. Functional-structural plant modelling in crop production. Springer, Dordrecht, 268 pp.
- Yin X & Struik PC. 2007. Crop systems biology: an approach to connect functional genomics with crop modelling. In: J.H.J. Spiertz, P.C. Struik and H.H. van Laar (eds.), *Scale and Complexity in Plant Systems Research: Gene-Plant-Crop Relations*. Springer Dordrecht: 63-73.
- Yin X, Struik PC & Kropff MJ. 2004. Role of crop physiology in predicting gene-to-phenotype relationships. *Trends in Plant Science* 9: 426-432.
- Zimmermann D, Reuss R, Westhoff M, Geßner P, Bauer W, Bamberg E, Bentrup FW & Zimmermann U. 2008. A novel, non-invasive, online-monitoring, versatile and easy plant-based probe for measuring leaf water status. *Journal of Experimental Botany*. 59: 3157-3167.



Drastische vermindering van energiegebruik in de glastuinbouw is vereist. Dit vraagt een herziening van productiemethoden. Optimale teeltcondities moeten gecreëerd worden met een minimum aan energieverbruik of zelfs energieproductie uit de kas. De leerstoel Plantenteelt in Energiezuinige Kassen richt zich op de teelt in nieuwe typen kassen zoals semi-gesloten kassen, waarbij energiebesparing de doelstelling is. Onderzocht wordt hoe de plant zich aan teeltcondities aanpast en hoe dit verklaard, gekwantificeerd en gemonitord kan worden op basis van plantfysiologische processen.