

Korte-slag belichting bij roos

A.H.C.M. Schapendonk



Gefinancierd door Productschap Tuinbouw
PT-projectnr12029

16 maart 2005

Uitvoering:

Plant Dynamics B.V.¹
Dr ir A.H.C.M. Schapendonk
Adres : Englaan 8
Tel. : 0317 - 482348
Fax : 0317 - 485572
E-mail : mail@plant-dynamics.nl
Internet : www.plant-dynamics.nl

¹ © 2005 Wageningen, Plant Dynamics BV

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Plant Dynamics BV

Plant Dynamics B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Inhoudsopgave

	pagina
1 Samenvatting _____	4
2 Inleiding _____	6
3 Materiaal en Methoden _____	7
3.1 Proefopzet _____	7
3.2 Lichtmetingen _____	8
3.3 Fotosynthesemetingen _____	8
3.4 Oogstwaarnemingen _____	9
3.5 Growlab waarnemingen _____	10
3.6 Modelberekeningen _____	10
4 Resultaten _____	12
4.1 Lichtmetingen _____	12
<i>Voorlopige conclusies lichtverdeling:</i> _____	13
4.2 Fotosynthesemetingen en de invloed van lichtintensiteit _____	14
4.3 Effecten van slagfrequentie en intensiteit _____	17
4.4 Effect van lamphoogte _____	21
Effecten van mobiel licht op temperatuur van blad en bloem _____	24
Kasklimaat tijdens de experimenten _____	25
Effecten van CO ₂ _____	26
Modelberekeningen _____	27
Conclusies _____	30
5 Referenties _____	31
Bijlage 1 Gemiddelde fotosynthese karakteristieken van planten onder mobiel+vast en vast-licht _____	35
Bijlage 2 Analyse van de CO₂ response _____	37
Bijlage 3 lichttabellen _____	38
Bijlage 4 Fotosynthese _____	38

1 Samenvatting

De discussie of mobiel licht bij roos rendabel is, blijft de gemoederen bezighouden. Roos onderscheidt zich van veel andere bloemisterijgewassen door een hoge assimilatiesnelheid. Als de temperatuur niet boven de 28-30 °C komt dan is de assimilatie het hele jaar rond, zomer en winter, erg hoog. Zelfs rozen die 24 uur worden belicht blijven fotosynthetisch actief. De huidmondjes blijven continu ver open staan, ook als perioden met hoge lichtintensiteit worden afgewisseld met donkere perioden. Hierdoor kan roos beter dan andere gewassen volop profiteren van snelle wisselingen in de lichtintensiteit. Tot aan een lichtintensiteit (totaal daglicht + assimilatiebelichting) van $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (=16200 lux SON²) is de toename van de bladassimilatie evenredig met de lichtintensiteit. Voor sommige topbladeren bleef de evenredigheid met de lichtintensiteit zelfs tot $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (= 20200 lux). Uiteraard zullen er verschillen zijn tussen verschillende cultivars, maar een eerste schatting laat zien dat de fotosynthese met een optimale efficiëntie opereert tot $200 \mu\text{mol PAR}$ (inclusief daglicht).

Het onderzoek richtte zich op de volgende onderzoeksvragen die door de commissie roos van LTO gesteld werden t.a.v. mobiele belichting:

- Wat is het verschil in productie tussen 10.000 lux met vaste installatie en 5000 vast en 5000 bewegend?
- Wat is de invloed op de huidmondjes (functioneren huidmondjes bij mobiele belichting beter dan vaste installatie? (Belangrijk i.v.m. houdbaarheid, ook bij 24 uur belichten).
- Wat is de optimale snelheid van een mobiele installatie?
- Wat is de optimale afstand tussen lamp en gewas? (o.a. invloed plant-/bladtemperatuur)?
- Zijn er verschillen van mobiel licht in een "vol" en een 'leeg' gewas?
- Indien men lichtintensiteit wil verminderen moet men dan eerst de mobiele of eerst de vaste belichting uitzetten?

Wat is het verschil in productie tussen 10.000 lux met vaste installatie en 5000 vast en 5000 bewegend?

Door de hoge waarde van de lichtintensiteit die nog optimaal benut kan worden, kunnen de lampen in een rozen gewas relatief dicht op het gewas gepositioneerd worden. Het voordeel van zo'n maatregel, is de hogere absorptie van het assimilatielicht door het gewas. Mobiele belichting op 1.10 meter boven het gewas geeft 8 -10% meer lichtabsorptie door het gewas dan een vaste belichting op 2.20 meter. De toename van de lichtabsorptie bij een lage positie van de lampen wordt veroorzaakt door een betere lichtdoordringing tussen de bedden en tegelijkertijd een verhoogde lichtabsorptie aan de zijkant van de aangrenzende bedden. Een lage lamppositie biedt dus inderdaad voordelen, ware het niet dat dan de homogeniteit van de belichting in het geding komt. Gegeven de hoge vermogens van de huidige assimilatiebelichting, en de introductie van de 1000 Watt lampen, is het mobiel maken van de lampen een goede mogelijkheid om de gegenereerde hoge intensiteit van de lampen toch gelijkmatig over het gewas te verdelen. Zowel de hoek waaronder het licht wordt uitgestraald (type armatuur) als de opbouw van het gewas

² De omrekening van μmol naar lux is geldig voor Philips Green Power 230 V. Het 400 Volt systeem levert ongeveer 5% meer μmol per lux.

hebben dan uiteraard invloed op de mate waarin de lage positie van de lampen voordeel biedt. In combinatie met de structuur van de bedden kunnen verliezen door reflectie geminimaliseerd worden door een juiste keuze van de lamphoogte en het type armatuur.

Wat is de invloed op de huidmondjes (functioneren huidmondjes bij bewegende belichting beter dan vaste installatie? (Belangrijk ivm houdbaarheid, ook bij 24 uur belichten).

Een belangrijke voorwaarde voor het succes van mobiel licht is een hoge geleidbaarheid van de huidmondjes zodat de opname van koolzuur de snelle wisselingen van het licht kan volgen. Uit de metingen bleek dat roos zeer goed voldoet aan die voorwaarde omdat de huidmondjes zich niet, of slechts zeer langzaam sluiten wanneer de lamp zich van de plant verwijderd. Bij langdurig belichte rozen blijven de huidmondjes openstaan en wordt elke quant licht optimaal benut tot het niveau waarop de lichtresponse curve gaat afbuigen ($200-250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (=16100 - 20200 lux SON).

Wat is de optimale snelheid van een mobiele installatie?

Uit een reeks metingen bleek duidelijk dat de effecten van de frequentie waarmee de lamp passeert te verwaarlozen zijn. Optimalisatie van de frequentie is bij roos dus niet aan de orde. Dit betekent dat in principe ook een lange slag belichting bij roos zou moeten werken, mits de lampen laag hangen en mits dat tot gevolg heeft dat de totale lichtabsorptie toeneemt. Voor een optimaal rendement blijft het onder alle omstandigheden belangrijk dat de intensiteit van het licht aan de top van het gewas niet hoger is dan $200 \mu\text{mol PAR}$.

Indien men lichtintensiteit wil verminderen moet men dan eerst de mobiele of eerst de vaste belichting uitzetten?

Door de diepere lichtdoordringing in het gewas was de fotosynthese activiteit van de laagste bladeren aan de bloemstengels verhoogd. De activiteit van het uitgebogen blad daarentegen was in beide behandelingen niet significant anders en bleef onveranderd laag. De ademhaling in de bladeren was hoger in de mobiel+vast behandeling dan in de vast-licht behandeling. Hierdoor werd een gedeelte van de hogere fotosynthesecapaciteit in mobiel+vast genivelleerd. Een vergelijking van beide behandelingen stelde vast dat deze fysiologische verschillen elkaar op het gewasniveau compenseerden. Dit werd door berekeningen met modelstudies bevestigd. Voor gelijke totale lichtsommen werden voor beide behandelingen exact gelijke opbrengsten voorspeld. Als er al verschillen in opbrengst werden gevonden, dan moesten die uitsluitend worden toegeschreven aan de hierboven gerefereerde toename lichtabsorptie in de mobiel+vast behandeling. Op basis van oogstgewichten kon de meerwaarde van de toegenomen hoeveelheid geabsorbeerd licht echter nog niet worden bevestigd. De gemiddelde verschillen tussen de geoogste gewichten waren klein. De reden hiervoor is nog onduidelijk maar zal later nader worden bediscussieerd.

Wat is de optimale afstand tussen lamp en gewas? (o.a. invloed op plant-/bladtemperatuur op knopgrootte en assimilatie)?

De zorg dat de temperatuur van het gewas te hoog zou oplopen bleek met de getoetste mobiele 4300 lux installatie ongegrond. De temperatuurverhoging van het blad was 0,3 - 0,6 graad en de temperatuurstijging van de bloem was 0,4 - 0,8 graden tijdens het passeren van de lamp op een

hoogte van 1,10 m. Eventuele voordelen van de lage lamppositie zijn de sterkere drogende werking die een wisselende hoge lichtintensiteit induceert waardoor de gevoeligheid voor ziekten mogelijk zal afnemen. Daarnaast biedt de lage lamppositie logistieke voordelen voor het wisselen van lampen en het toevoegen van bepaalde stuurlichtbronnen (zie verder) om effecten op formatieve processen zoals knopuitloop en lengtegroei te bestuderen.

Zijn er verschillen van mobiel licht in een "vol" en een 'leeg' gewas?

Een voordeel van de betere lichtdoordringing van mobiel licht is een de hogere activiteit onderin het gewas. Dit voordeel speelt midden in de winter nauwelijks een rol omdat het licht dat de onderste bladlagen bereikt erg laag is. Bij oogsten op snede zou het voordeel eerder zichtbaar moeten zijn omdat dan de assimilatie geheel door het oudere blad overgenomen moet worden. Om andere redenen verwacht ik dat ook dan een positief effect niet direct zal blijken. Het weghalen van alle bloemen zal waarschijnlijk een sterke negatieve terugkoppeling geven op de fotosynthese waardoor het effect van de verhoogde activiteit door mobiel licht verdwijnt. Pas in in de periode februari - maart kan de fotosynthetisch actievere bladlaag tot zijn recht komen door meer te profiteren van de toenemende natuurlijke straling. Het effect van de lage lamppositie en de daarmee gerelateerde hoge lichtintensiteit neemt dan juist om een andere weer af: door de toename van de natuurlijke achtergrondstraling wordt vaker een lichtniveau bereikt dat hoger is dan het niveau waar de fotosynthese de hoogste efficiëntie heeft (200-250 $\mu\text{mol PAR}$).

Indien men lichtintensiteit wil verminderen moet men dan eerst de mobiele of eerst de vaste belichting uitzetten?

Dat is afhankelijk van de tijd in het seizoen. In de donkere wintermaanden december en januari is het wenselijk om de mobiele installatie in te schakelen vanwege de verwachte winst in lichtabsorptie. Later in het jaar zal door de toename van de natuurlijke achtergrondstraling snel de intensiteit worden bereikt waarboven het rendement van de belichting afneemt (zie bovenstaande paragraaf). In dat geval is het waarschijnlijk beter om eerst de mobiele installatie uit te schakelen.

Kortom; mobiel licht heeft voordelen omdat de mogelijkheid wordt gecreëerd de lampen laag te hangen. Het verdient aanbeveling om bij nieuw te maken belichtingsplannen, zeker in het geval de belichting mobiel gemonteerd wordt, niet alleen te kijken naar de lichtverdeling in een lege kas maar ook de te verwachten karakteristieke licht absorptie eigenschappen van een gewas mee te wegen. Bij het planten van een nieuw gewas kan dan bovendien gezocht worden naar een architectuur waarbij de belichting optimaal rendeert. Mobiel licht biedt dus het voordeel van een betere lichtbenutting in samenhang met de gewasstructuur maar is ook moeilijker te optimaliseren dan een hoog gepositioneerde vaste homogene verlichting.

2 Inleiding

Licht is de belangrijkste productiefactor in de rozenteelt en er is geen commercieel kasgewas dat zo positief op licht reageert als roos (Zieslin and Mor, 1990; Bredmose, 1994, 1998, 2000, Mortensen et al., 1992a,b; Zieslin and Tsujita, 1990) . Licht drijft de fotosynthese, waardoor assimilaten beschikbaar komen voor groei/ontwikkeling. Fotosynthese en groei/ontwikkeling zijn als twee armen van een balans die in evenwicht moeten zijn om een optimale productie te

realiseren (Schapendonk et al., 1984; Mortensen en Gislerod, 1992). Fotosynthese wordt door de lichthoeveelheid gestuurd terwijl groei/ontwikkeling met name door temperatuur en lichtkwaliteit worden bepaald. Dit project richt zich vooral op het optimaliseren van de fotosynthese, dus op de optimalisering van de lichthoeveelheid. Aspecten die met sturing van de morfologie te maken hebben in relatie tot temperatuur en lichtkwaliteit worden in de navolgende rapportage niet in detail behandeld. Voor een goed begrip van de interactie tussen de vraag naar assimilaten en het aanbod ervan, (Zieslin and Tsujita 1990; Jiao et al. 1991 a,b; Grossi et al., 2003) is het belangrijk dat bij de uiteindelijke evaluatie van teeltmaatregelen naast lichtintensiteit ook lichtkwaliteit en temperatuur als stuur van de ontwikkeling meegewogen moeten worden. Als voorbeeld kan het uitlopen van zijknoppen worden genoemd. Als er geen assimilaten aanbod is zullen de knoppen niet uitlopen maar als er geen knoppen zijn aangelegd heeft een hoog assimilaten aanbod geen effect (Cockshull, 1975, 1977; De Vries et al., 1982.) Het uitlopen van knoppen wordt o.a. beïnvloed door lichtkwaliteit met name door een hoge verhouding tussen rood en verrood licht in het aangeboden spectrum. In dit rapport ligt het accent echter volledig op de fotosynthese en dat is slechts de helft van het verhaal. Aspecten van lichtkwaliteit en temperatuur vormen de andere helft. De hier beschreven gegevens dienen dan ook gezien te worden naast de effecten op plantontwikkeling, met name gerelateerd aan bloei. Zie appendix voor een korte beschouwing.

De assimilatiesnelheid, ook wel fotosynthese snelheid genoemd wordt grotendeels bepaald door de hoeveelheid lichtenergie. De factor licht is vooral in de winter een dure productiefactor en het is daarom juist dan van groot belang dat bij toepassing van assimilatiebelichting ervoor wordt gezorgd dat andere factoren zoals CO₂ en temperatuur niet begrenzend werken. Deze factoren samen bepalen uiteindelijk hoe efficiënt het licht door de plant kan worden benut. Het is dus van belang dat al deze groeifactoren zo optimaal mogelijk zijn om vervolgens een maximale efficiëntie van het licht te kunnen realiseren.

Het onderzoek concentreerde zich op de verschillen in fotosynthese tussen een vaste en een combinatie van mobiel+vaste belichting. Aan de hand van metingen van fotosynthese, fluorescentie en microklimaat van de plant werd een analyse verricht die de verschillen tussen beide belichtingssystemen aantoonde, gebaseerd op deelprocessen zoals warmtebalans, lichtverdeling in het gewas en reactie van huidmondjes op lichtwisselingen.

3 Materiaal en Methoden

3.1 Proefopzet

De metingen werden verricht aan het ras Temptation op het bedrijf de Berckt Roses in Baarlo in december 2004 en januari 2005. De behandelingen bestonden uit belichten met een vaste configuratie op 2.15 m boven het gewas met een vaste belichting van 8600 lux of een combinatie met 4300 lux vast en 4300 lux mobiele belichting. De slag van de mobiele belichting was 7 - 8 minuten en de lampen bewogen op een hoogte van 1.10 m boven de top van het gewas. Mede vanwege deze geringe hoogte tussen gewas en lamp en de mogelijke effecten daarvan op de blad/bloem temperatuur zijn er gedetailleerde tijdreeksen geregistreerd van zowel blad- als bloem-temperatuur. Met de LiCor-6400 zijn metingen van fotosynthese en verdamping verricht tijdens het passeren van de lamp. De apparatuur werd hiervoor speciaal geprogrammeerd zodat de lichtintensiteit in de meetopstelling exact de lichtintensiteit in de kas volgt via een meting met een externe sensor.

Er is uitvoerig onderzoek verricht naar de effecten van de duur van de slag en de intensiteit van het licht tijdens de passage van de lamp. Op verschillende hoogten in het gewas is de fotosynthesecapaciteit gemeten van de bladeren zowel bij mobiel als bij stationair licht. De dynamiek van de huidmondjes in diverse belichtingsscenario's is in kaart gebracht. Ook de verschillen in ademhaling tussen de behandelingen is gekwantificeerd. Om de fysiologische resultaten te vertalen is een gewasgroeimodel gebruikt. De gemeten fotosynthese response van de studieobjecten is daarbij ingevoerd in het model en vervolgens zijn de opbrengstverschillen doorgerekend voor gemiddelde Nederlandse winteromstandigheden.

3.2 Lichtmetingen

Met een integrerende lichtmeter (lengte 1,2 meter) zijn er PAR verricht boven de bedden en in de smalle paden tussen de bedden. De metingen werden verricht zonder daglicht. Aanvullend op de metingen die door Hortilux zijn verricht ten behoeve van de installatie van de armaturen zijn er lichtmetingen verricht om de verschillen in lichtverdeling tussen de behandelingen te koppelen aan de gemeten verschillen in fotosynthese capaciteit.

De metingen in deze tabel zijn verricht met een lange lichtmeter die de lichtintensiteit over een lengte van 120 cm integreert.

De metingen zijn op 2 posities in de paden tussen de bedden verricht: 1 op de exacte positie van de lamp in de rij (bovenste deel van de tabellen met geel vakje bovenaan) en 2 precies tussen 2 lampen in (onderste deel van de tabellen met gele vakje in het midden). De rode cijfers geven het gemiddelde over het gehele profiel. Er zijn ook metingen in de bedden verricht door de lichtmeter dwars in het gewas te steken.

3.3 Fotosynthesemetingen

Met de LiCor-6400 zijn metingen van fotosynthese en verdamping verricht. De apparatuur was hiervoor speciaal geprogrammeerd zodat de lichtintensiteit van de LED-belichting in de meetcuvette de lichtintensiteit in de kas volgde via een meting met een externe sensor. Op die manier kon in de afgesloten cuvette toch exact de variatie lichtfluctuaties in de kas worden gevolgd. Om de effecten van CO₂ concentratie te bestuderen werd de lucht die door de meetcuvette stroomde voorbehandeld en op de gewenste concentratie afgesteld.

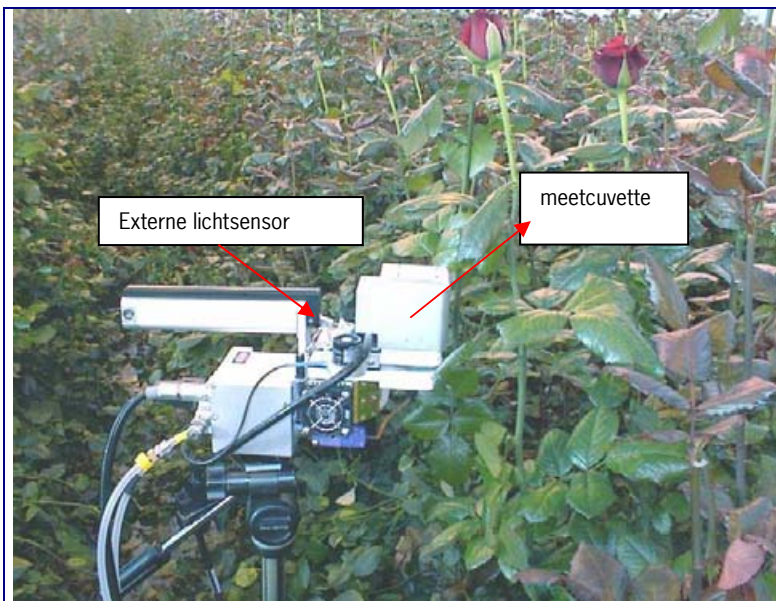


Fig. 1

LiCor-6400 meetapparatuur
 Metingen zijn uitgevoerd met de LiCor 6400. In de meetcuvette van deze apparatuur kunnen de lichtintensiteit, de CO₂ concentratie, de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid gevarieerd worden. Hierdoor kan de reactie van de fotosynthese op deze veranderingen bepaald worden. De standaardcondities tijdens de metingen waren zoveel mogelijk gelijk aan de kascondities tenzij anders vermeld.



Fig. 2

Metingen met Growlab monitoring apparatuur:
 Bladtemperatuur.
 Worteltemperatuur.
 Luchttemperatuur.
 Stengeldiktegroei bloemsteel.
 Fluorescentie/Stress metingen met de Plantivity meter.
 Gedurende de maanden december en januari werden in de Mobiel+vaste behandeling elke 5 minuten waarnemingen gedaan die vervolgens gebruikt werden om de dagelijkse groei te berekenen.

3.4 Oogstwaarnemingen

Door medewerkers van Rosa Plaza zijn in afgebakende proefvakken in de lichtbehandelingen metingen verricht van het aantal geknipte rozen en het geoogste gewicht. Deze metingen zullen nog enige tijd worden gecontinueerd. Op dit moment zijn nog niet alle data beschikbaar maar de voorlopige resultaten zullen in dit verslag worden vergeleken met de hier beschreven fysiologische resultaten en de modelberekeningen.

3.5 Growlab waarnemingen

In de maanden december en januari zijn fluorescentiemetingen verricht met de Growlab Plantivity meter. Op basis van de verrichte waarnemingen is een schatting gemaakt van de productiviteit van het gewas onder mobiel licht. De berekeningen zijn vergeleken met de modelberekeningen zie paragraaf 4.6. Aanvullend op de fluorescentiemetingen zijn waarnemingen gedaan die inzicht geven in de veranderingen van het microklimaat van de plant waaraan de fluorescentiemetingen werden verricht (Figuur 2).

3.6 Modelberekeningen

Plant Dynamics heeft met een eenvoudig simulatiemodel de gemeten fotosynthese en fluorescentie vertaald naar productie (Dynrose). Invoerparameters waren fluorescentie (Figuur 3,4), licht, en fotosynthese. Het rozenmodel Dynrose is via Excel toegankelijk. Zo kunnen parameters die voor een bepaald ras de fotosynthese bepalen worden gemeten en ingevoerd. De eindgebruiker bepaalt zelf hoe gedetailleerd de kennis is die hij wil inbrengen in het model. Aspecten van de morfologie en bloemontwikkeling zijn in eerste instantie hier niet in beschouwing genomen. Het model houdt wel rekening met latere uitbreiding in die richting. De aanpassing van de fotosynthese en de effecten van verschillende belichting daarop, in interactie met temperatuur, CO₂, vormen de kern van het model.



Bij de keuze van assimilatiebelichting moeten kosten en baten van verschillende opties worden afgewogen. De kosten zijn relatief makkelijk te bepalen want er zijn diverse betrouwbare economische modellen m.b.t. teeltmaatregelen en belichtingsplannen. De schatting van de baten is aanzienlijk lastiger te maken. Deze kant van de balans is veel moeilijker te schatten omdat rassenkeuze, variatie in microklimaat en aanpassing van de assimilatie aan seizoensinvloeden een belangrijke rol spelen bij het uiteindelijk rendement van de geïnstalleerde belichting op de plantproductiviteit. Om de effecten van assimilatiebelichting op plantproductiviteit te kunnen schatten is het belangrijk dat de dynamiek cq aanpassing van fotosynthese en verdamping over de dag wordt vastgesteld tegen de achtergrond van belichting, RV, CO₂ en temperatuur. Een simulatiemodel kan hierbij van dienst zijn (Yin et al., 2004)



Meetvak mobiel+vast



Meetvak met vast licht



Fig. 3

Detectie van geaccumuleerde stress in planten is belangrijk om tijdig maatregelen te kunnen nemen om de negatieve effecten van stress op de groei en ontwikkeling van kasgewassen tegen te gaan. De balans tussen groei en de hoeveelheid straling die door de plant wordt geabsorbeerd dient in evenwicht te zijn. De plant kan dit realiseren dmv regulering van de fotosynthese en de aanmaak van pigmenten die de plant beschermen als er teveel energie door het blad wordt geabsorbeerd (oxidatieve stress). Met behulp van fluorescentie parameters is het mogelijk om een vinger achter die regulering te krijgen (Krause en Weiss, 1991, Schreiber et al., 1994, 1998; Schapendonk et al., 1991).



Fig. 4

De Plantivity meter meet elke 5 minuten met behulp van een zeer gevoelige sensor de verschillen tussen de basisfluorescentie van het bladgroen en de maximale fluorescentie tijdens een zeer krachtige korte lichtpuls. Tevens wordt de lichtintensiteit gemeten die op dat moment het blad bereikt via natuurlijk daglicht of assimilatie licht. Op basis van de gemeten lichtintensiteit en de verhouding tussen de basis fluorescentie en de maximale fluorescentie kan de energieopslag in de chloroplasten worden bepaald. Deze informatie maakt het mogelijk om de fotosynthese en de momentane groei te schatten.

4 Resultaten

De resultaten in de volgende hoofdstukken zijn gericht op de vragen die door de sector gesteld werden m.b.t. mobiel licht. Uit eerdere metingen door Plant Dynamics is geconstateerd dat er aanzienlijke variatie is in de fotosynthese en de regulering van de fotosynthese over de dag. Dit heeft gevolgen voor de efficiëntie van de lichtbenutting in relatie tot diverse omgevingsfactoren. De interactie tussen de verschillende omgevingsfactoren is complex. Naast gedetailleerde informatie op het niveau van de processen is het daarom het belangrijk dat:

- 1 de situatie ook onder praktijkomstandigheden goed in kaart wordt gebracht met behoud van fundamentele inzichten.
- 2 de metingen alle benodigde informatie bevatten om daarmee de effecten van mobiel licht op de totale dagelijkse drogestof toename te kunnen berekenen.

4.1 Lichtmetingen

De theoretische verwachting is dat de gemiddelde lichtintensiteit in beide behandelingen gelijk zou zijn omdat de totaal geïnstalleerde hoeveelheid licht exact gelijk was. Wanneer we de lichtverdeling vergelijken zijn er echter duidelijke verschillen tussen mobiel+vast en vast-licht alleen. Deze verschillen hebben te maken met de hoek van lichtuittreding en de verschillen in hoogte waarop de lampen zijn bevestigd.

mobiel+vast licht		vast licht	
153	125	101	95
143	122	93	95
133	112	88	94
115	103	75	88
102	81	67	61
74	49	49	48
47	36	15	31
31	20	5	12
11	11	4	8
90	73	55	59
61	64	99	89
61	65	91	87
65	64	87	87
67	61	59	72
57	53	36	57
35	47	22	39
20	29	11	29
11	17	5	9
5	6	2	5
42	45	46	53
Gemiddeld:	<u>62</u>		<u>53</u>

De metingen in deze tabel zijn verricht met een lange lichtmeter die de lichtintensiteit over een lengte van 120 cm integreert. In de tabel zijn de lichtmetingen ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) voor de 2 behandelingen weergegeven, gemeten in de smalle paden tussen de bedden van de top van het gewas naar de bodem in stappen van 14 cm. De metingen zijn op 2 breedtes in het pad verricht: 1 op de exacte positie van de lamp in de rij (bovenste deel van de tabellen met geel vakje bovenaan) en 2 precies tussen 2 lampen in (onderste deel van de tabellen met gele vakje in het midden). De rode cijfers geven het gemiddelde over het gehele profiel.

Er zijn ook metingen in de bedden verricht door de lichtmeter dwars in het gewas te steken. Uit deze metingen bleek dat 90% van het licht dat de top van het bed bereikt, in de bovenste 30cm wordt geabsorbeerd.

Gemiddeld over het gehele gewasprofiel was de lichtintensiteit voor mobiel 62 en voor vast+mobiel 53 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

De hoek van lichtuittreding uit het armatuur is ongeveer 60 graden. Naarmate het licht hoger hangt is de lichtverdeling diffuser, met andere woorden het licht wordt gelijkmatiger verdeeld en bereikt de top van het gewas in een random verdeling.

In dit verband zijn 2 aspecten van groot belang:

- Alleen vast - licht geeft een betere horizontale verdeling waarin slechts kleine verschillen zijn tussen de lichtintensiteiten in het horizontale vlak. In de combinatie mobiel+vast is een veel grotere variatie waarbij de intensiteit op de top van het gewas afhankelijk is van de positie van de mobiele lamp. De intensiteit is bij mobiel+vast 2 tot 2,5 keer hoger bij de lamp dan tussen 2 lampen in.
- Door de sterkere gerichtheid van het mobiele licht worden in de combinatie mobiel+vast de zijkanten van de bedden 40-50% meer belicht tijdens het passeren van de lamp dan in de vaste opstelling terwijl midden tussen de mobiele lampen slechts 15% minder licht is dan in de vaste lamp configuratie.

Uit de metingen blijkt dus dat de theoretische verwachting en de praktijk hier enigszins uiteen lopen en dat de verschillen in de belichtingsconfiguratie (met name de hoogte) tot verschillen in lichtabsorptie in het gewas kunnen leiden. Hoe groot die verschillen zijn hangt sterk af van de gewasarchitectuur, padbreedte en hoogte van de lampen. In dit experiment lijkt de hoeveelheid licht die de planten ten goede komt met een voorzichtige schatting 10 % hoger te zijn in de mobiel+vast licht combinatie. Dit wordt veroorzaakt door een geringere reflectie. Bij de installatie van assimilatiebelichting verdient het daarom aanbeveling om niet alleen de intensiteit aan de top van het gewas te meten maar ook op posities in het gewas waar het licht de plant bereikt. In dat opzicht geeft de combinatie mobiel+vast een betere relatieve lichtdoordringing, met name in de paden op de flanken van de bedden.



Fig. 5 Meer licht in de paden tussen de bedden. De verdeling is afhankelijk van de hoek van licht uittreding en de hoogte van de lamp.

Voorlopige conclusies lichtverdeling:

De combinatie mobiel+vast brengt meer licht in het gewas (10%), met de aantekening dat de gewasstructuur zodanig dient te zijn dat er tussen de bedden een zekere ruimte voor paden is gelaten. De hogere lichtabsorptie van de mobiel+vast behandeling wordt

veroorzaakt door een diepere lichtdoordringing tussen de bedden met daardoor een geringere (gemiddelde) reflectie aan de bovenste bladlagen.

4.2 Fotosynthesemetingen en de invloed van lichtintensiteit

Voor plantengroei is met name het licht in het golflengtegebied tussen 400 en 700 nm (PAR-licht) belangrijk

Voor roos neemt de bladfotosynthese lineair toe met PAR licht tot een intensiteit van 200 μmol PAR (Figuur 6). Bij hogere lichtintensiteiten treedt echter verzadiging op. In onderstaande figuur zijn voorbeelden weergegeven van het verband tussen de lichtintensiteit en de fotosynthese bij

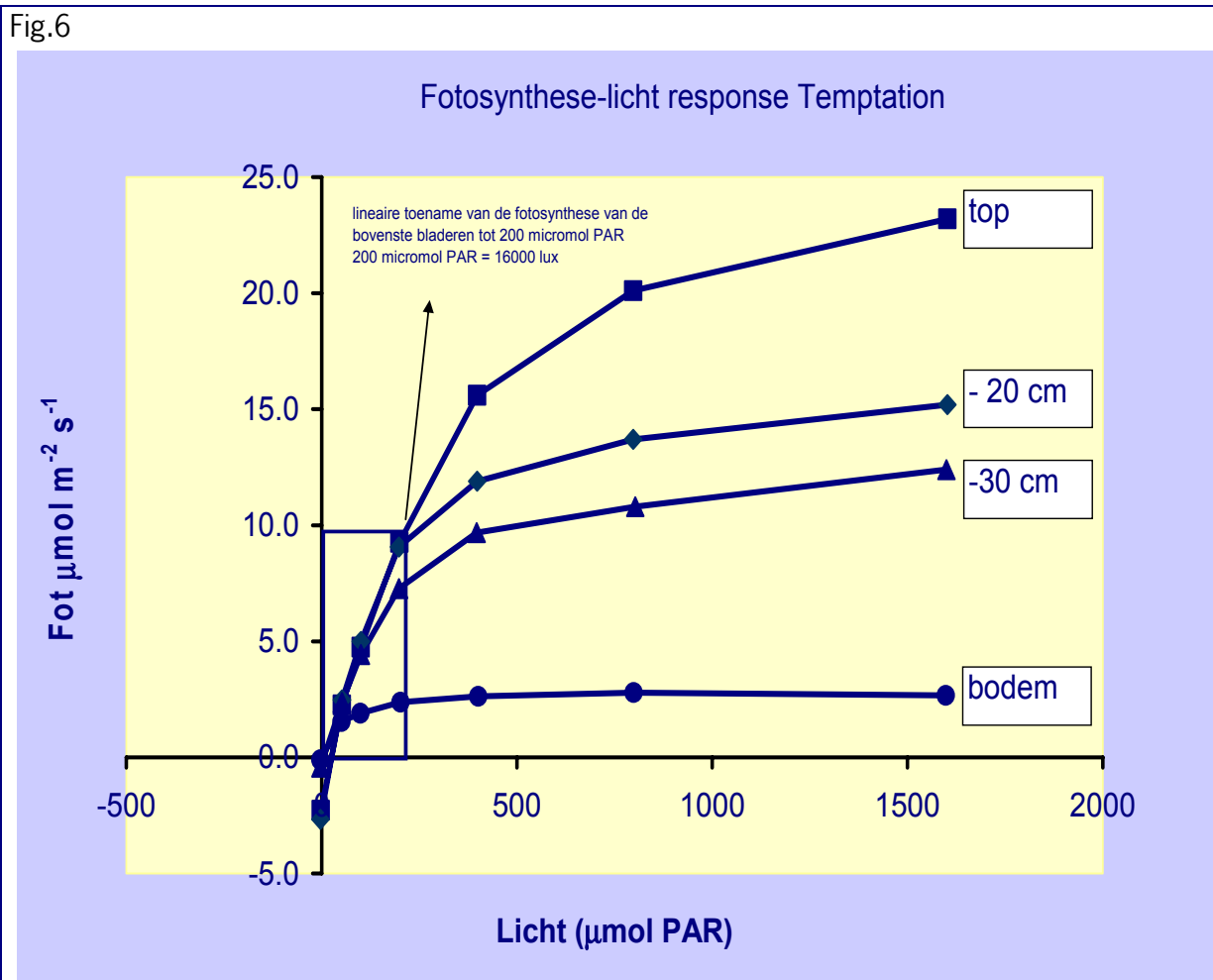


Fig. 6. Metingen in december. Fotosynthesemetingen op verschillende hoogten in het gewas. Door de hoeveelheid licht in de meetopstelling te variëren kon de reactie van de fotosynthese op een veranderde lichtintensiteit bepaald worden. Op de x-as staat de lichtintensiteit in $\mu\text{mol PAR}$. Om dit om te rekenen naar globale straling buiten moet het getal op de x-as met een factor 0.6 vermenigvuldigd te worden.

400 $\mu\text{mol PAR}$ binnen is dus gelijk aan 240 Watt globaal buiten. Bij de berekening is een hoge transmissie coëfficiënt van 75 % gehanteerd. De gemeten fotosynthese is hoog, zeker voor een winterconditie.

verschillende lichtintensiteiten. De CO₂ concentratie was 600 ppm. Tot ongeveer 200 μmol PAR neemt de fotosynthese van de bovenste bladeren vrijwel lineair toe. Dit is dus tevens de bovengrens voor een maximale lichtbenutting. Daarboven neemt de meeropbrengst af. Een μmol fotosynthese per seconde komt overeen met 0.1 - 0.2 gram drogestof productie per m²blad per uur, ofwel 1 tot 2 kg drogestof per ha. De fotosynthese van de bladeren was veel hoger dan verwacht mag worden in een wintergewas. Vergelijkingen met metingen aan rozen in de herfst lieten zien dat er nauwelijks een lagere fotosynthese werd gemeten en er was minder verschil tussen de metingen in de ochtend en de avond.

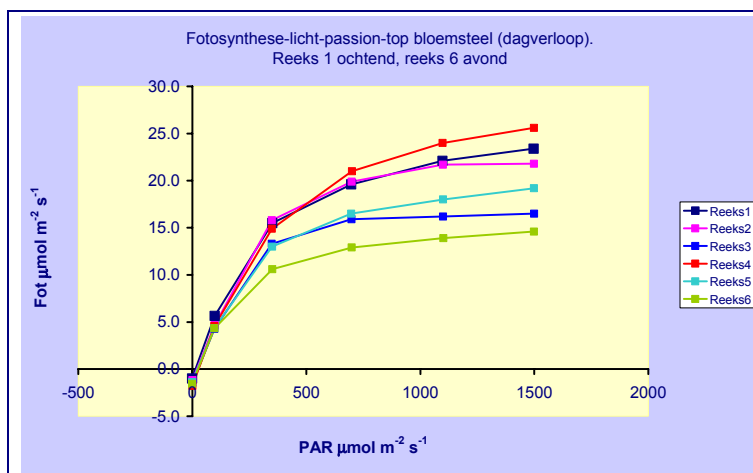


Fig. 7

Metingen verricht in oktober 2003 aan het gewas Passion op een zeer zonnige dag. Een vergelijking tussen de metingen in midden winter (Figuur 6) en in het najaar (deze figuur) laat zien dat er weinig verschil is in fotosynthese capaciteit tussen beide periodes.

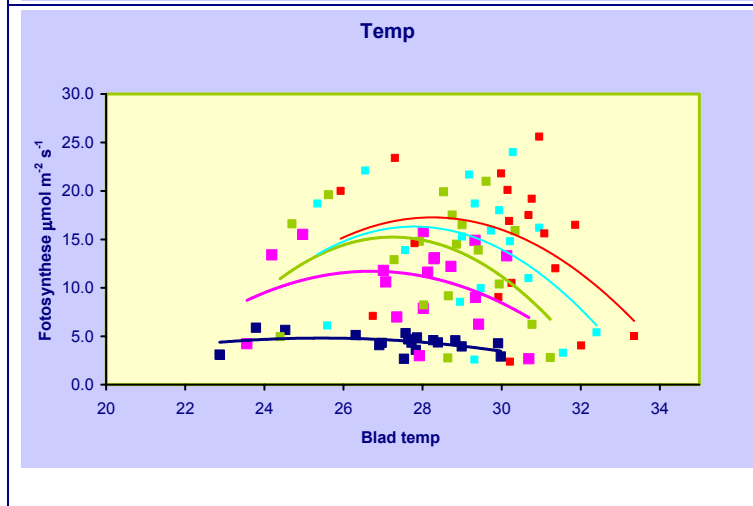


Fig. 8

Effect van temperatuur op de fotosynthesemetingen in oktober. Door de hoge instraling werden bladtemperaturen boven 28 °C bereikt waardoor de fotosynthese in de middag sterk afnam. Dat effect werd tijdens de metingen voor dit project niet gevonden. Het lijkt erop dat een rozen gewas het gehele jaar een hoge productie kan realiseren mits de bladtemperatuur gematigd blijft.

Het belangrijkste verschil tussen de metingen in oktober 2003 en de huidige metingen is de lagere bladtemperatuur. Mogelijk is dit een reden dat de waargenomen afname in de fotosynthese over de dag (Figuur 8 en 9) in de huidige experimenten nauwelijks is waargenomen. Gedurende 24 uur belichting was er wel sprake van een geringe afname van de huidmondjes geleidbaarheid tijdens de "nacht", zie verder figuur 21, maar dat is niet te vergelijken met het effect dat in figuur 7 en 8 is geschetst. Uit de licht response curve van het topblad (Figuur 6) blijkt dat de fotosynthese zelfs bij een lichtniveau van 1000 μmol PAR (585 Watt globaal buiten) nog niet geheel verzadigd is. Dit is opmerkelijk voor een gewas dat opgroeit bij een lichtintensiteit van 100 tot 200 μmol. Dit geeft tevens aan dat we bij roos gedurende bijna alle maanden van het jaar

meer opbrengst mogen verwachten door bijbelichting. Uiteraard is dit economisch niet haalbaar maar het geeft wel aan hoe belangrijk bijbelichting voor roos is.

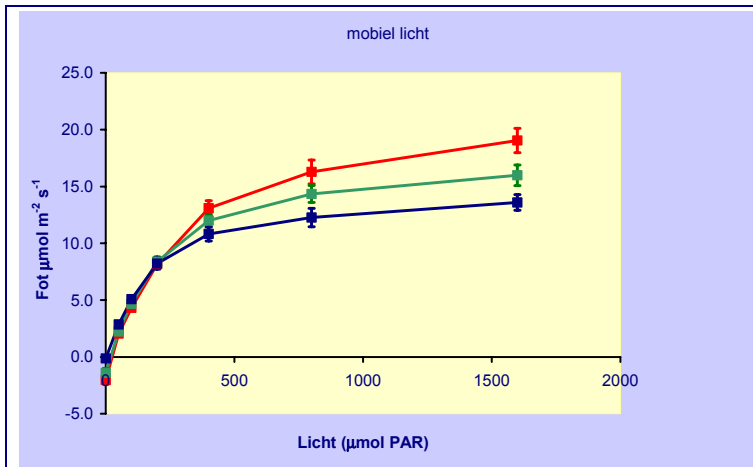


Fig. 9

Metingen verricht in januari. Vergeleken met de metingen in december (figuur 7) is de fotosynthese iets lager, gemeten op 3 hoogtes aan de bloemstengel. Er is niet consequent het ingebogen blad gemeten omdat de fotosynthese daar steeds zeer laag is met een grote spreiding tussen de waarnemingen.

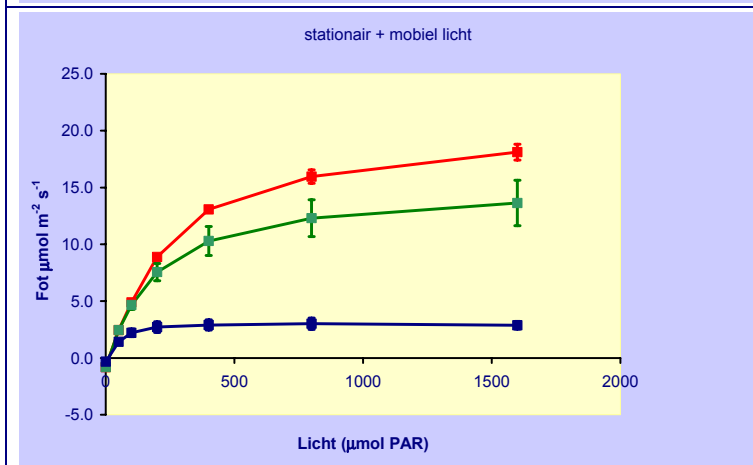


Fig. 10

Er zijn geen verschillen tussen de behandelingen voor wat betreft de fotosynthesecapaciteit van de top- en middelste bladeren (vergelijk de rode en groene lijnen in figuur 9 en 10). In het algemeen kan worden gesteld dat de variatie tussen de bladeren van verschillende planten zeer gering is. De bladeren onderaan de stengel hadden een significant lagere fotosynthesecapaciteit in de mobiel+vaste belichtingsconfiguratie. Dit had overigens nauwelijks consequenties voor de productiviteit.

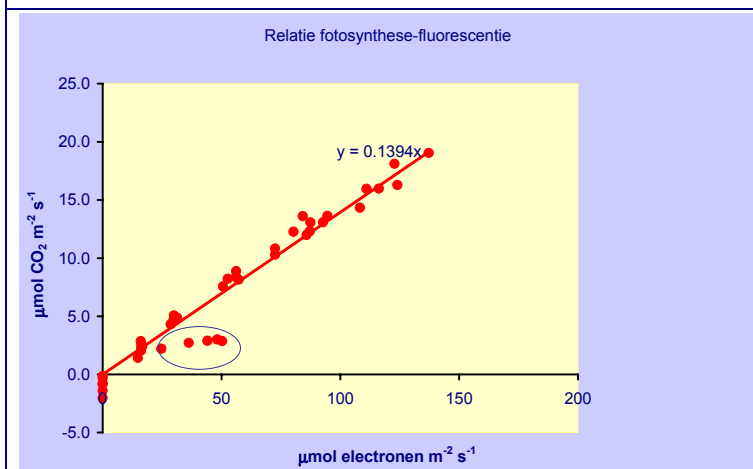


Fig. 11

In de actieve jonge topbladeren is de fotosynthese van de bladeren zeer goed gecorreleerd met het elektron transport, berekend uit de gemeten chlorofylfluorescentie. In de oude bladeren was het verband duidelijk afwijkend (zie lage waarden onderin figuur 11).

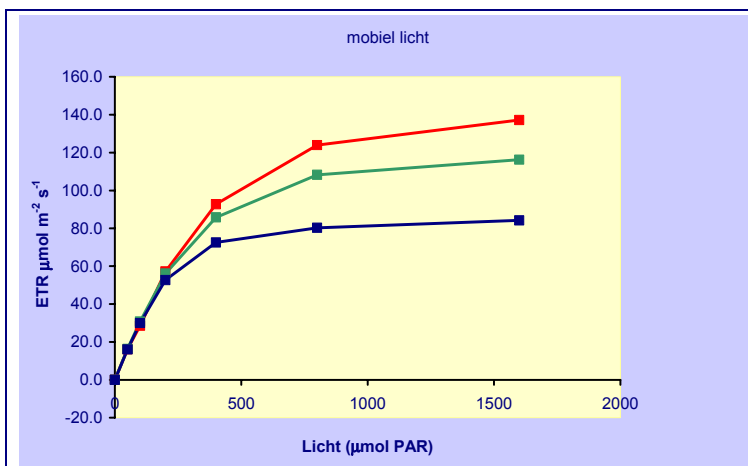


Fig. 12

Fotosynthese gemeten met fluorescentie. Het met de plantivity meter gemeten signaal moet een afspiegeling zijn van de fotosynthese. In een ideale situatie zouden de resultaten in figuur 12 en 13 exact gelijk moeten zijn aan de resultaten in figuren 9 en 10. Hierbij moet aangetekend worden dat ETR ongeveer 6x zo hoog is als Fot vanwege de omrekening van elektronen naar CO₂

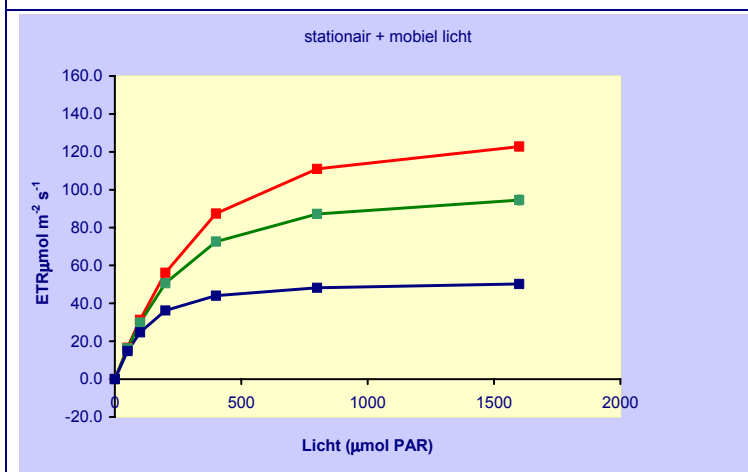


Fig. 13

Het belangrijkste verschil tussen de geschatte fotosynthese met de plantivity meter en de gemeten fotosynthese, is de overschatting van de fotosynthese in de oude bladeren. In de overige situatie geeft de plantivity meter een redelijk betrouwbaar beeld van de wijze waarop de bladfotosynthese reageert op toename in lichtintensiteit.

4.3 Effecten van slagfrequentie en intensiteit

Licht is weliswaar de drijvende kracht voor de fotosynthese maar de grondstof voor de fotosynthese (de koolzuur) moet via huidmondjes in het blad worden opgenomen. Gelukkig is de openingstoestand van de huidmondjes lichtafhankelijk. Als de lichtintensiteit toeneemt gaan de huidmondjes verder open omdat in het blad sensoren waarnemen dat het koolzuurgehalte in het blad afneemt door de fotosynthese. Omgekeerd gaan ze dicht bij lagere lichtintensiteiten. Dat is uiteraard niet wenselijk als we mobiel licht willen gebruiken want het duurt enige tijd voor de bladeren reageren en dat kan betekenen dat de huidmondjes niet voldoende open staan als de lamp weer terug is. Het samenspel van de frequentie van de slag en de opening- en sluiting van de huidmondjes bepaalt de haalbaarheid van mobiele belichting. Het voordeel van mobiele belichting is maximaal als de huidmondjes tussen twee passages van de lamp open blijven. Mocht dit niet het geval zijn dan bestaat de kans dat ze bij een volgende passage te traag open gaan waardoor er onvoldoende koolzuur door het blad kan worden opgenomen waardoor het licht niet optimaal

benut wordt. Dit gevaar wordt groter naarmate de slag langer wordt.

Effect van slagfrequentie

In figuur 14 is te zien dat de fotosynthese van de getoetste bladeren exact de lichtintensiteit volgt. Zelfs de dip in de lichtintensiteit bij het maximum wordt nauwkeurig gevolgd. Dit betekent dat de fotosynthese nog lineair reageert op het licht (zie ook figuur 6) en dat het licht maximaal wordt benut. We zien wel bij de hoogste intensiteit een geringe afwijking van het lineaire verband wat aangeeft dat dit een overgangsgebied is, waarboven het licht minder efficiënt benut zal gaan worden. Dit is een uitstekende methode om te bepalen tot welk belichtingsniveau assimilatiebelichting het maximale rendement oplevert.

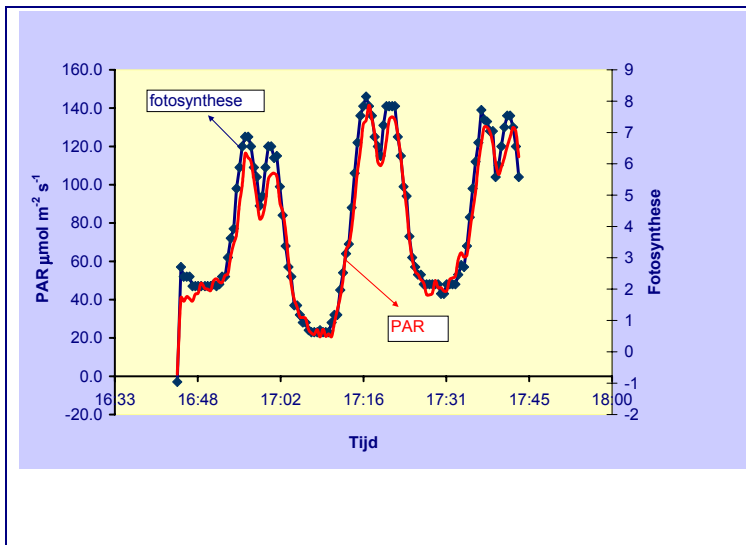


Fig. 14
Verloop van de fotosynthese in Mobiel+vast, aangegeven op de rechter Y-as en de simultaan gemeten lichtintensiteit in de kas (en in de meetcuvet). De fotosynthese is voor de gebruikte intensiteit van de belichting vrijwel lineair met de lichtintensiteit. Dit betekent dat het licht optimaal wordt benut. De twee dichtbij elkaar gelegen pieken worden veroorzaakt doordat deze metingen zijn verricht bij het keerpunt van de lamp.

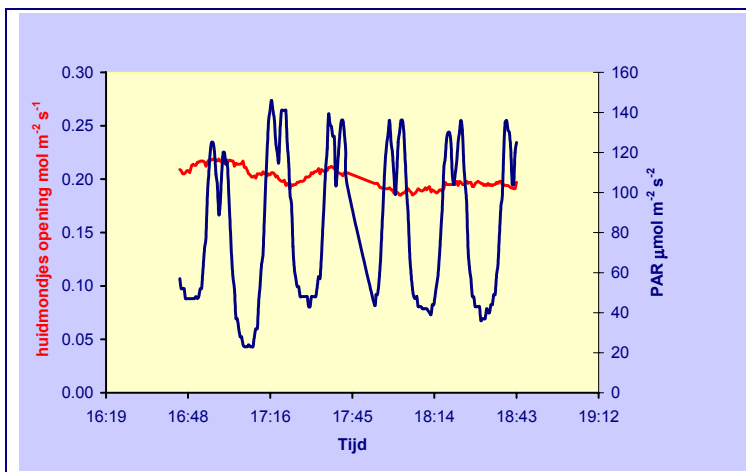


Fig. 15
Meting vooraan in de rij evenals in figuur 14. De rode lijn is de huidmondjes geleidbaarheid, die nauwelijks reageert op de lichtveranderingen. De metingen zijn verricht bij 600 ppm CO_2 (eerste 3 passages en bij 1000 ppm CO_2). Ook bij een hogere CO_2 concentratie blijven de huidmondjes tussen 2 passages open staan.

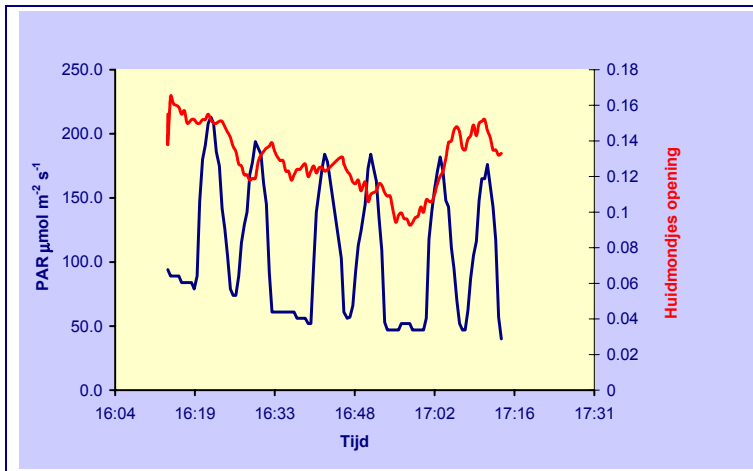


Fig. 16

Meting op andere plaats in de gewas rij. Door de wijziging van de positie in de rij verschuift de frequentie tussen 2 opvolgende pieken. Ook hier blijven de huidmondjes tussen 2 passages open staan zowel bij 600 ppm CO₂ (eerste 3 passages) als bij 1000 ppm CO₂ (laatste 3 passages).

Uit een reeks metingen bleek duidelijk dat de effecten van de frequentie waarmee de lamp passeert te verwaarlozen zijn (Figuur 17). De fotosynthese is, binnen de range van te verwachten slagduren (< 30 - 40 minuten) onafhankelijk van de snelheid waarmee de lamp beweegt. Optimalisatie van de frequentie is bij roos dus niet aan de orde. Dit betekent dat in principe ook een lange slag belichting bij roos zou kunnen werken, mits de lampen laag hangen en mits dat tot gevolg heeft dat de totale lichtabsorptie toeneemt. Het blijft onder alle omstandigheden belangrijk dat de intensiteit van het licht aan de top van het gewas niet hoger is dan 200 µmol.

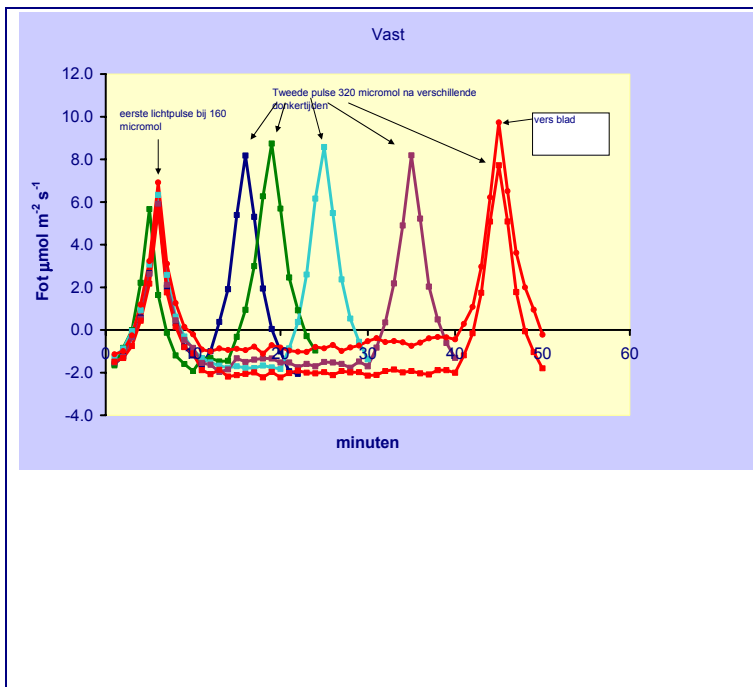


Fig. 17

De fotosynthese bij verschillende lichtfrequenties. In dit experiment zijn steeds series van 2 opeenvolgende lichtpulsen gegeven met verschillende donkerperiodes tussen beide lichtpulsen. De eerste pulse had een intensiteit van 160 µmol. De tweede pulse een intensiteit van 320 µmol. Deze pulse ligt in het traject dat de efficiëntie van de fotosynthese begint af te nemen en daardoor erg gevoelig voor limitering van de huidmondjes. De gehanteerde frequentie varieert van 5 minuten tot 45 minuten.

Rozen hebben de kenmerkende eigenschap dat bij langdurig belichten het patroon van openen en sluiten van huidmondjes wordt verstoord. Zelfs bij een langdurige donkerperiode is de afname van de gemeten geleidbaarheid erg gering.

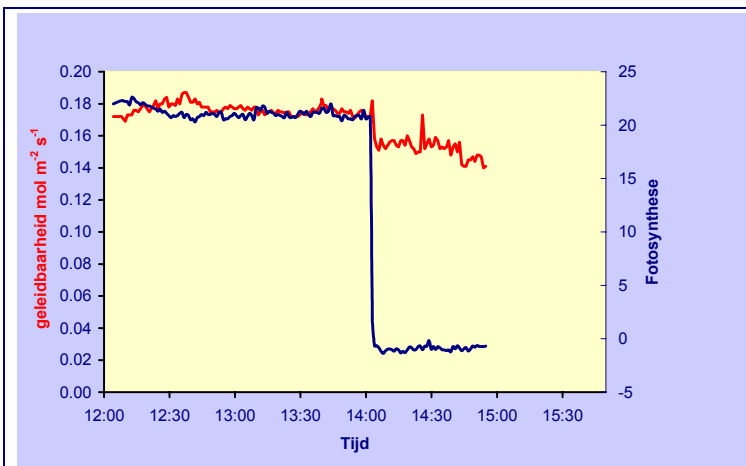


Fig. 19

In dit experiment (mobiel+vast) is de lichtintensiteit gedurende 2 uur op een zeer hoge intensiteit ingesteld; 1200 $\mu\text{mol PAR}$ & 1000 $\mu\text{mol CO}_2$. Ondanks het feit dat de planten zijn aangepast aan een intensiteit die maximaal 1/5 van deze piekbelasting was, is er geen terugloop in de fotosynthese door foto-inhibitie. De hoge intensiteit heeft ook geen gevolgen voor de hoge geleidbaarheid in de donkerperiode daarna.

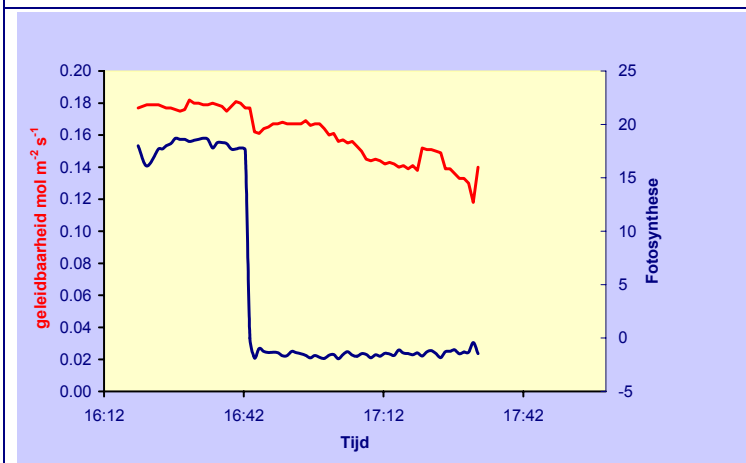


Fig. 20

In een vergelijkbaar experiment maar dan in de vaste belichting is de huidmondje geleidbaarheid gemeten gedurende een uur na verduistering. De huidmondjes geleidbaarheid neemt langzaam af maar komt niet in het gebied dat het limiterend zou kunnen worden voor de koolzuropname bij de heersende lichtintensiteiten. Er lijkt geen significant verschil te zijn tussen beide behandelingen.

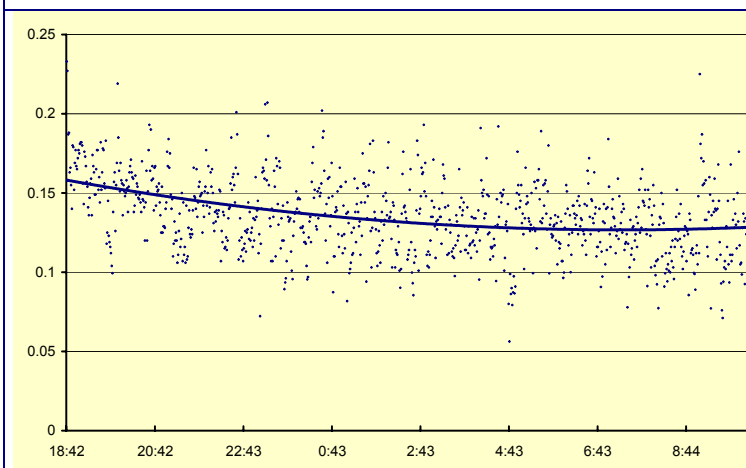


Fig. 21

Verloop van de huidmondjes geleidbaarheid in de vast-licht behandeling gedurende de nacht met een bijbelichting van 80 $\mu\text{mol PAR}$.

4.4 Effect van lamphoogte

De lamphoogte is om twee redenen cruciaal:

1 de lamphoogte dient zodanig te zijn dat de absorptie door het gewas optimaal is. Dit is een kwestie van meten en proefondervindelijk een keuze maken voor een lamparmatuur met de gewenste hoek van lichtuittreding.

2 de lichtintensiteit van het mobiele licht mag niet hoger zijn dan de hoogste waarde waarbij de fotosynthese nog lineair toeneemt (ongeveer 200 $\mu\text{mol PAR}$). Dit betreft de totale lichtsom dus assimilatielicht plus daglicht. Wanneer er veel daglicht is, zal de effectiviteit van het mobiele licht minder worden doordat de fotosynthese langzaam maar zeker minder efficiënt wordt. In de periode november-januari zal dit nog niet het geval zijn maar in lichte februari maanden kan de intensiteit zodanig oplopen dat het rendement om die reden lager wordt. Voor een vaste opstelling boven in de kas geldt dat in mindere mate omdat het licht niet in pieken wordt toegediend maar met een gelijkmatiger lagere intensiteit. Voor laag hangende mobiele belichting ligt het economisch kantelpunt om het licht uit te schakelen dus lager dan bij vast licht.

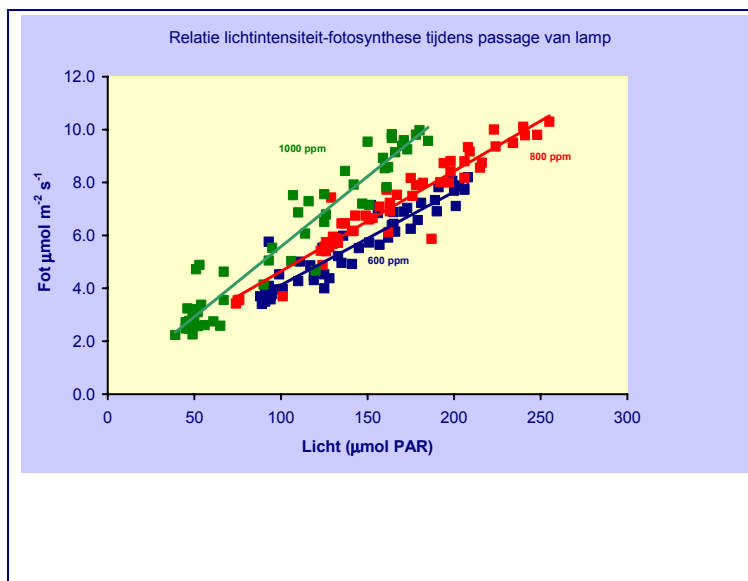


Fig. 22

De relatie tussen de lichtintensiteit tijdens het passeren van de lamp en de fotosynthese bij 600, 800 en 1000 ppm CO_2 . In deze figuur is duidelijk te zien dat er een lineair verband bestaat tussen de fotosynthese en PAR en dat er nog geen sprake is van een afname van de efficiency, minimaal tot 200 micromol. De verschillen in het lichtintensiteit bereik worden veroorzaakt door verschillen in de daglichtintensiteit tijdens de metingen

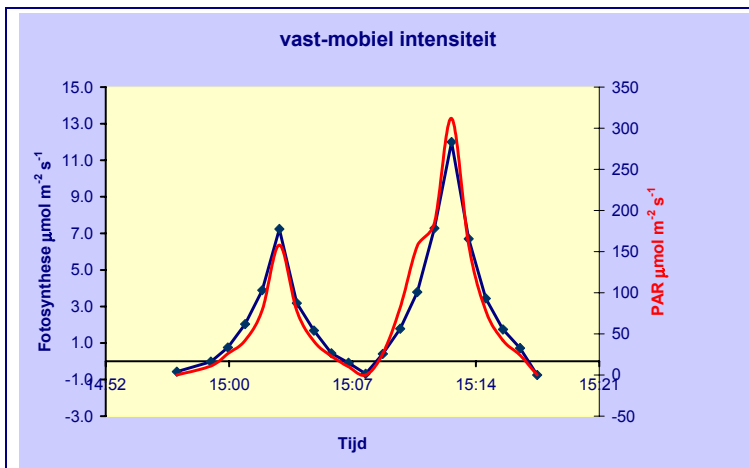


Fig. 23

Twee opeenvolgende lamppassages. De eerste tot een maximum niveau van 160 $\mu\text{mol PAR}$ en de tweede tot een niveau van 320 $\mu\text{mol PAR}$. De piekwaarden zijn respectievelijk 7,2 μmol en 12 $\mu\text{mol CO}_2$. Indien de toename bij deze intensiteit nog proportioneel zou zijn geweest, zou de hoogte van de tweede piek gelijk aan 14 μmol zijn geweest.

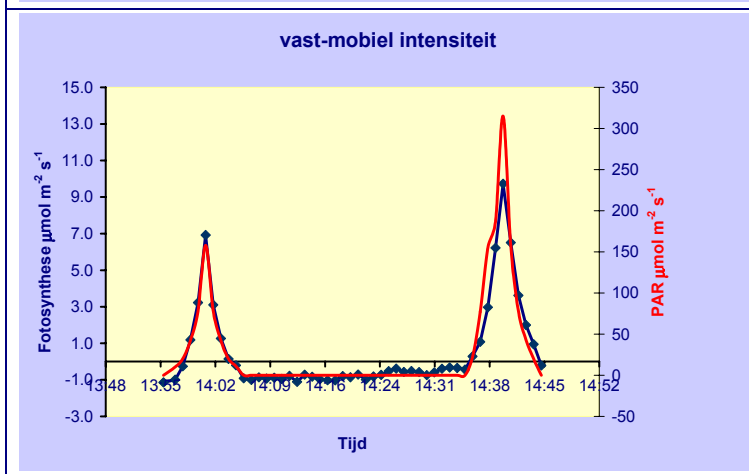


Fig. 24

Eenzelfde meting aan een ander blad maar met een donkertijd van een half uur. Deze meting illustreert dat in sommige gevallen de fotosynthese na een langere donkertijd, toch lager is dan na een korte donkertijd (vergelijk figuur 23 en 24). Dit werd niet veroorzaakt door een sluiting van de huidmondjes. Het betreft hier een uitzondering waarvan de oorzaak niet bekend is.

De belangrijkste oorzaak voor huidmondjessluiting bij roos is dus niet een gebrek aan licht maar een te hoge temperatuur (zie ook Figuur 8).

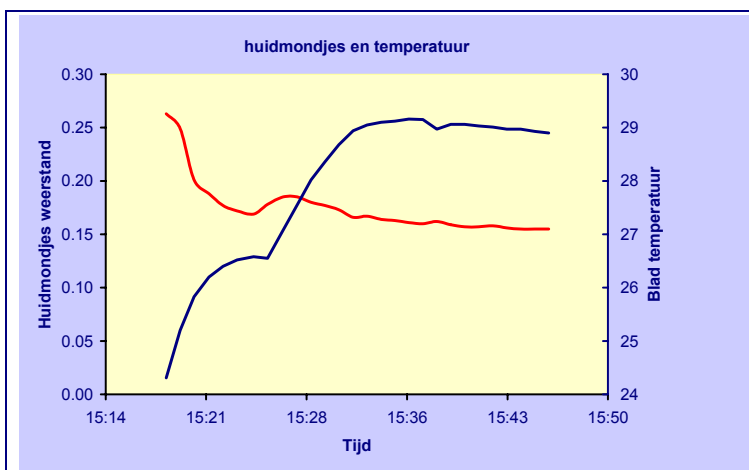


Fig. 25

Tijdsverloop van de huidmondjes geleidbaarheid rode lijn en de temperatuur van het blad (blauwe lijn). Een temperatuuroptoe name kan zowel een direct effect hebben als via een verhoging van het dampdruk deficit. De sluiting verloopt langzaam.

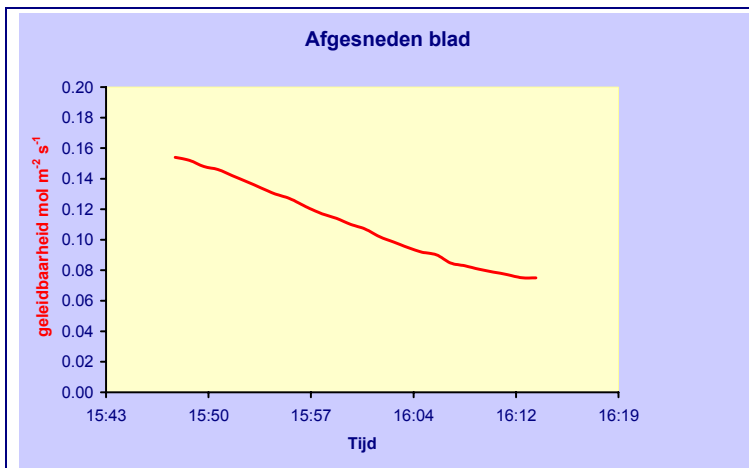


Fig. 26

Zelfs als een blad wordt afgesneden in het licht duurt het nog 20 minuten voordat de huidmondjes geleidbaarheid is gehalveerd.

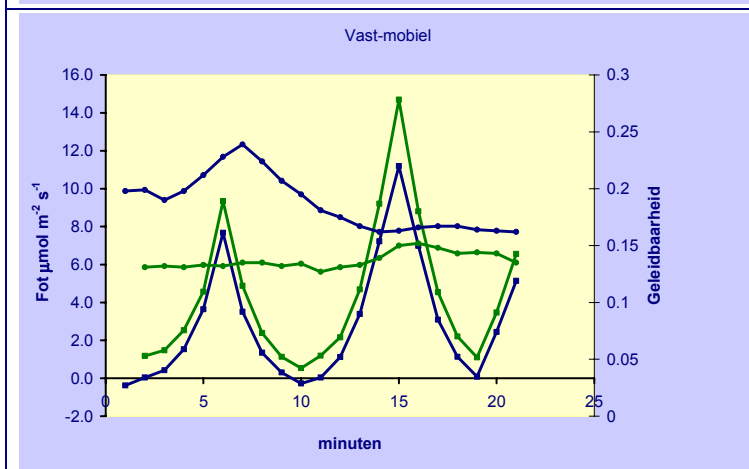


Fig. 27

De blauwe lijnen geven de fotosynthese van topbladeren bij een CO₂ concentratie van 600 ppm, de groene lijnen bij 1000 ppm. De response in de Vast licht behandeling was vrijwel identiek aan de resultaten in de mobiel+vast behandeling.

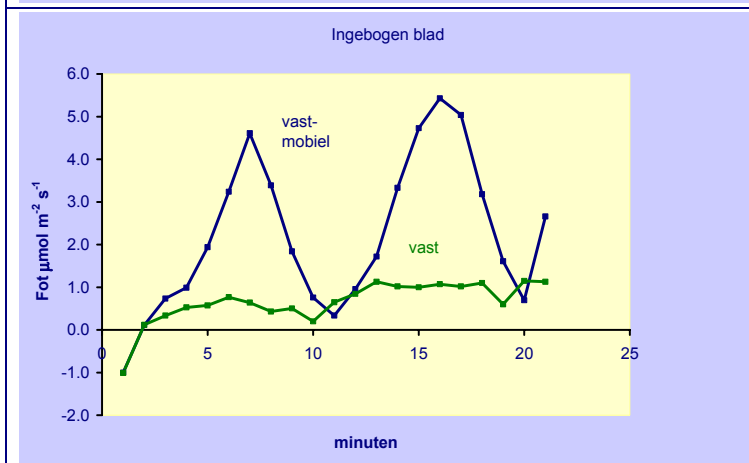


Fig. 28

Eerste piek bij 160 μmol PAR, tweede piek bij 320 μmol PAR. Voorbeelden van de effecten van mobiel licht op het uitgebogen blad in de mobiel+vast behandeling (blauwe lijn en de vast-licht behandeling (groene lijn). De verschillen lijken hier groot maar gezien de absolute waarden en de grote variatie tussen individuele uitgebogen scheuten mag hier geen grote waarde aan worden toegekend. Wel blijkt heel duidelijk dat de tweede piek met een dubbele lichtintensiteit hier veel minder effect heeft dan in de topbladeren (Figuur 27).

Effecten van mobiel licht op temperatuur van blad en bloem

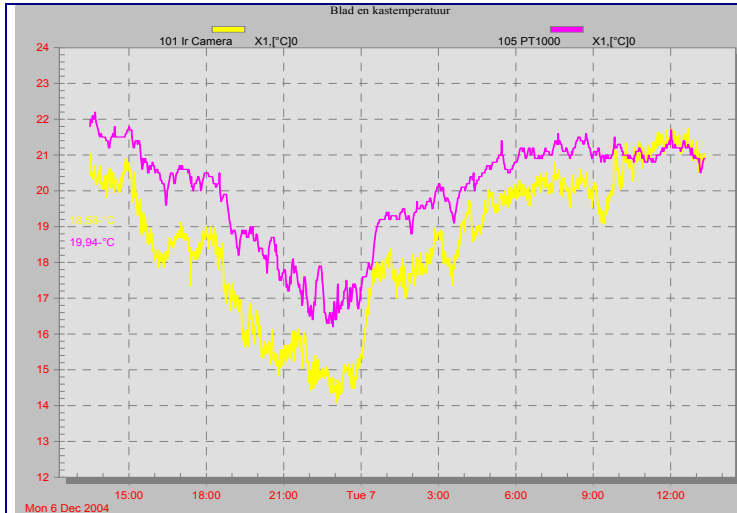


Fig. 29
Metingen van temperatuur in mobiel+vast behandeling. Tijdverloop van de temperatuur in het gewas (op hoogte van ingebogen takken (roze lijn) en de bladtemperatuur in de top van het gewas, gemeten met een infrarood camera (gele lijn).



Fig. 30
Metingen van temperatuur in mobiel+vast behandeling. Tijdverloop van de PAR-licht (roze lijn) en bladtemperatuur (gele lijn).

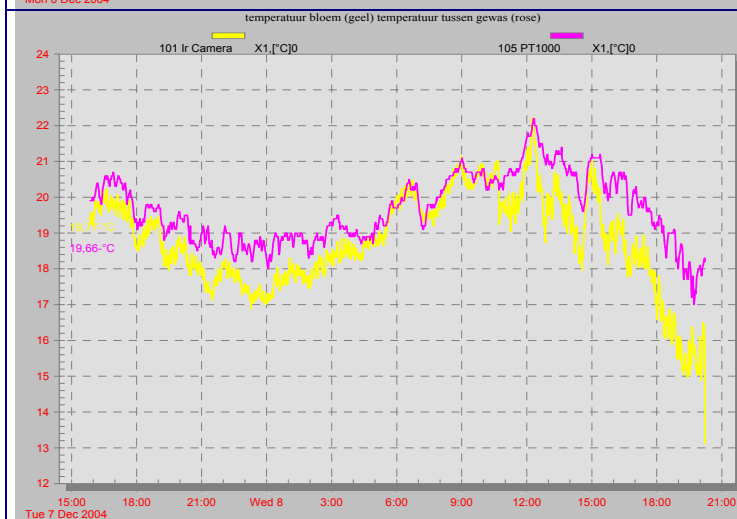


Fig. 31 Bloemtemperatuur
Metingen van temperatuur in mobiel+vast behandeling. Tijdverloop van de temperatuur in het gewas (op hoogte van ingebogen takken (roze lijn) en de bloem temperatuur gemeten met een infrarood camera (gele lijn).

De blad-, c.q. bloemtemperatuur boven in het gewas is vrijwel continu lager dan de kasttemperatuur onder in het gewas. Zowel de bladtemperatuur als de bloemtemperatuur reageren minder op de passage van het mobiel licht dan verwacht. Detail analyses lieten een opwarming van het blad zien tussen 0.2 en 0.6 graden en van de bloem tussen 0.3 en 0.8 graden.



Infrarood camera voor temperatuurmeting aan bloem

Kasklimaat tijdens de experimenten

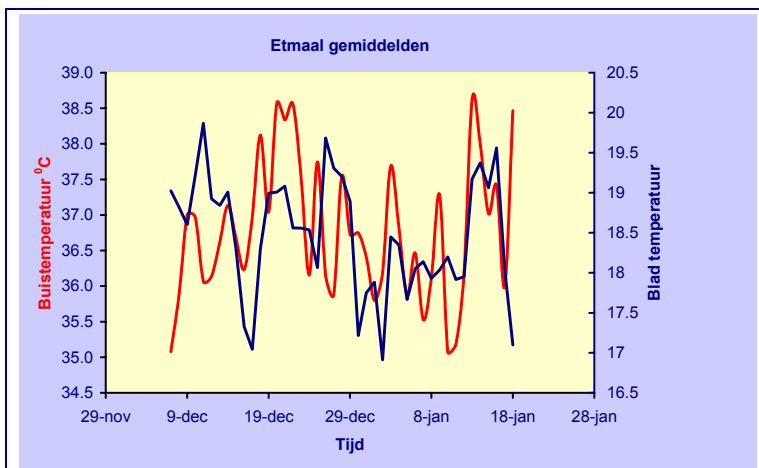


Fig. 32

Etmaal gemiddelden van buistemperatuur (rode lijn) en bladtemperatuur (blauwe lijn). Elke 5 minuten is een meting verricht. Er is een verband tussen de buistemperatuur beneden in het gewas en de bladtemperatuur aan de top van het gewas.

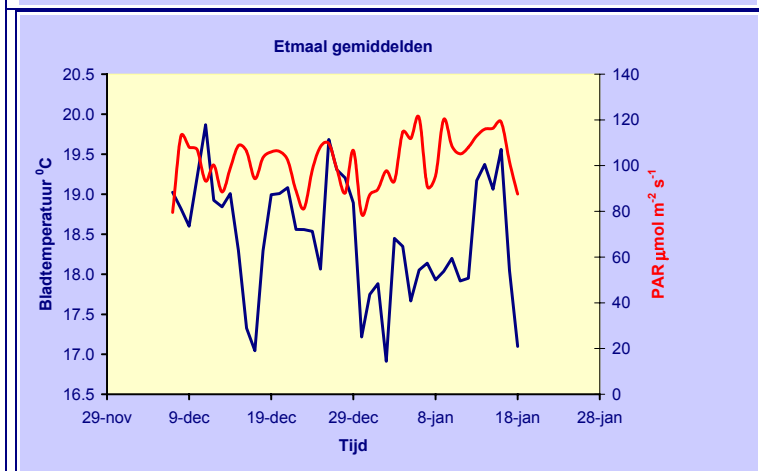


Fig. 33

Gemiddelden van bladtemperatuur en PAR. PAR, gemeten aan de top van het gewas (Mobiël+vast) is zeer constant. De gemiddelde 24-uurs straling in december en januari was exact equivalent aan $102 \mu\text{mol PAR} = 8.8 \text{ mol} (= 545 \text{ Joule/cm}^2 \text{ globaal buiten bij een kastransmissie van } 75\%)$. De bladtemperatuur blijft op een acceptabel gemiddelde van $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$. De bladtemperatuur wordt meer beïnvloed door de buis (Figuur 32) dan door de straling.

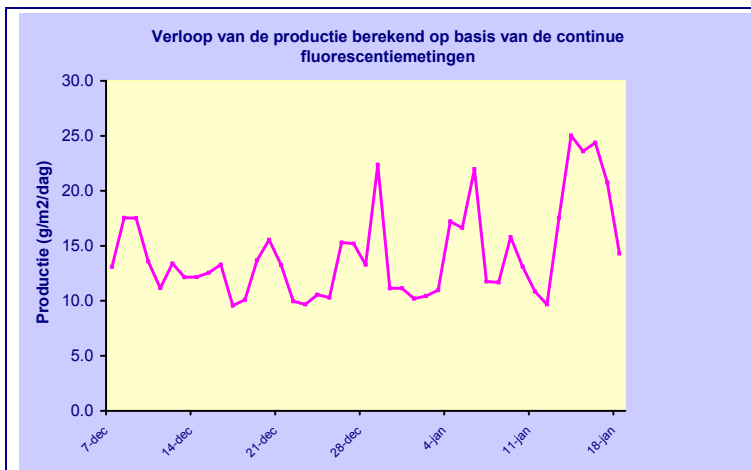


Fig. 34

Op basis van de gemeten fluorescentie in de top van de mobil+vast behandeling is een schatting gemaakt van de dagelijkse productiviteit van het gewas. De dagelijkse productie in december is gemiddeld $13 \text{ g m}^{-2}/\text{dag}^{-1}$ en in januari $15,9 \text{ g m}^{-2}/\text{dag}^{-1}$.

Effecten van CO_2

In bovenstaande grafiek is het effect van de koolzuurconcentratie op de productiviteit te zien. De metingen zijn verricht aan de bovenste bladeren bij een lichtintensiteit van $200 \mu\text{mol PAR}$. Deze metingen laten duidelijk zien hoe belangrijk een goede CO_2 dosering is. Ik wil hier wel de kanttekening bij maken dat op de lange termijn de effecten van een hoge CO_2 concentratie meestal kleiner worden dan de momentaan gemeten effecten omdat de plant zich aanpast aan veranderingen in de CO_2 concentratie. Toch denk ik dat, voor de fotosynthese, in het licht een CO_2 concentratie van minimaal 600 ppm en als de omstandigheden het toelaten een hogere concentratie gewenst is. Ook zou een korte periode met een lage concentratie de "gewenning" aan hoog CO_2 kunnen doorbreken.

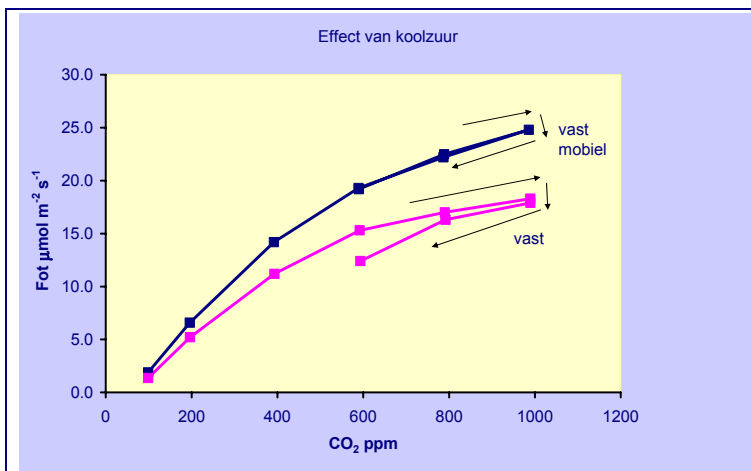


Fig. 35

Verloop van de fotosynthese bij verschillende CO_2 concentraties. De CO_2 concentratie is verhoogd volgens de pijlen in de figuur. In de vast-licht opstelling sluiten de huidmondjes tijdens de opeenvolgende verhogingen van de CO_2 concentratie, waardoor de fotosynthese in de neergaande lijn lager is dan in de opgaande lijn.

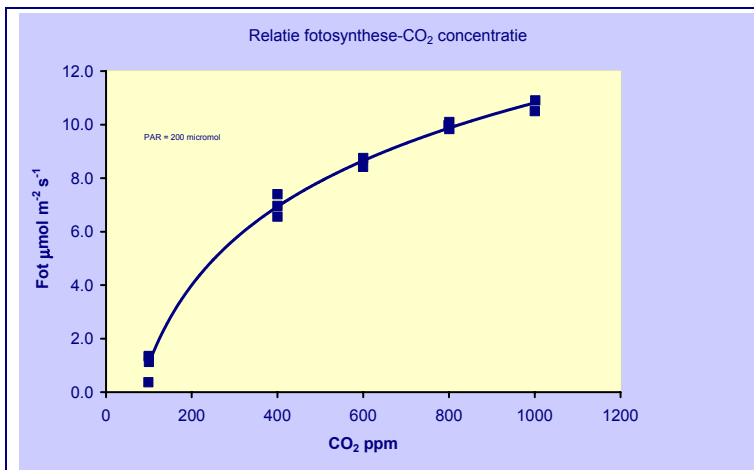
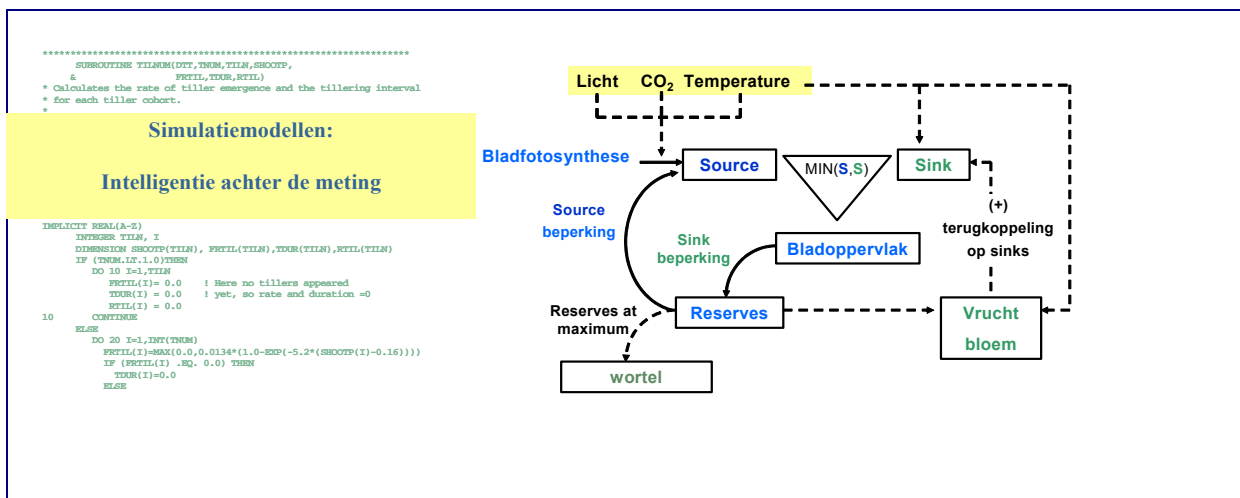


Fig. 36

Effect van CO₂ in de mobiel+vast behandeling bij een lichtintensiteit van 200 μmol PAR. Deze grafiek illustreert duidelijk het belang van een hoge CO₂ dosering ook bij relatief lage lichtintensiteiten.

Modelberekeningen

De gemeten licht response curven voor beide belichtingsbehandelingen zijn in een model gebruikt de fysiologische waarnemingen te vertalen naar productie. Het model berekent de drogestof productie van het gewas op basis van een langjarig gemiddelde straling op uurbasis in de wintermaanden + de geïnstalleerde assimilatiebelichting. Bij de berekeningen is uitgegaan van een lichtverdeling in het gewas zoals weergegeven in de tabel op pagina 12.

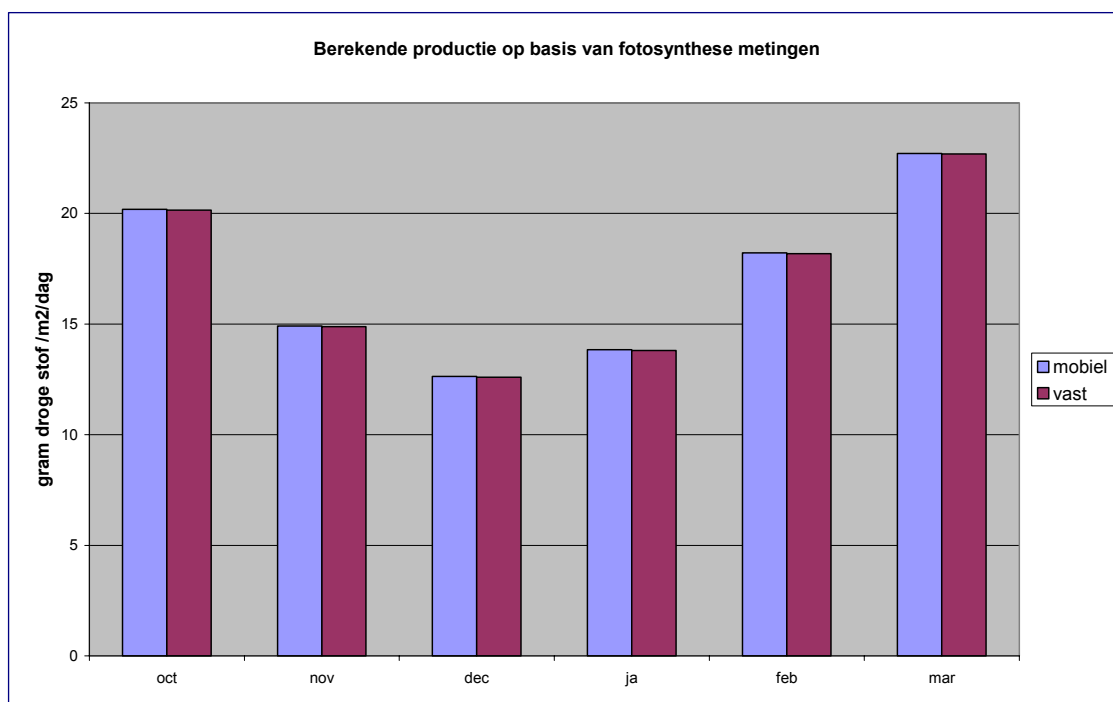


Voor de berekeningen van de groei zijn de fotosynthese karakteristieken op verschillende gewashoogtes gebruikt zoals in bijlage 1 is uiteen gezet. De lichtbenutting efficiëntie, de ademhaling en de maximale fotosynthese capaciteit zijn bepaald op basis van de fotosynthesemetingen met een statistische regressie voor de relatie tussen lichtintensiteit en fotosynthese. In figuur 38 is de berekende dagelijkse drogestof productie weergegeven voor de behandeling mobiel+vast en de behandeling vast-licht. De berekeningen zijn gebaseerd op exact gelijke hoeveelheden geabsorbeerd licht, in tegenstelling tot de hypothese dat de mobiel+vaste installatie resulteert in 10% meer lichtabsorptie. Op die manier kan worden bepaald hoe de

hogere lichtbenutting onderin het gewas bij de mobiel+vast behandeling doorwerkt. Het is duidelijk dat de fysiologische verschillen tussen de behandelingen nauwelijks een effect hebben. Voor een deel wordt dit veroorzaakt doordat de verhoogde fotosynthese wordt gecompenseerd door de verhoogde ademhaling. De gesimuleerde data komen erg goed overeen met de drogestof toename die berekend werd op basis van de plantivity metingen (Fig. 34).

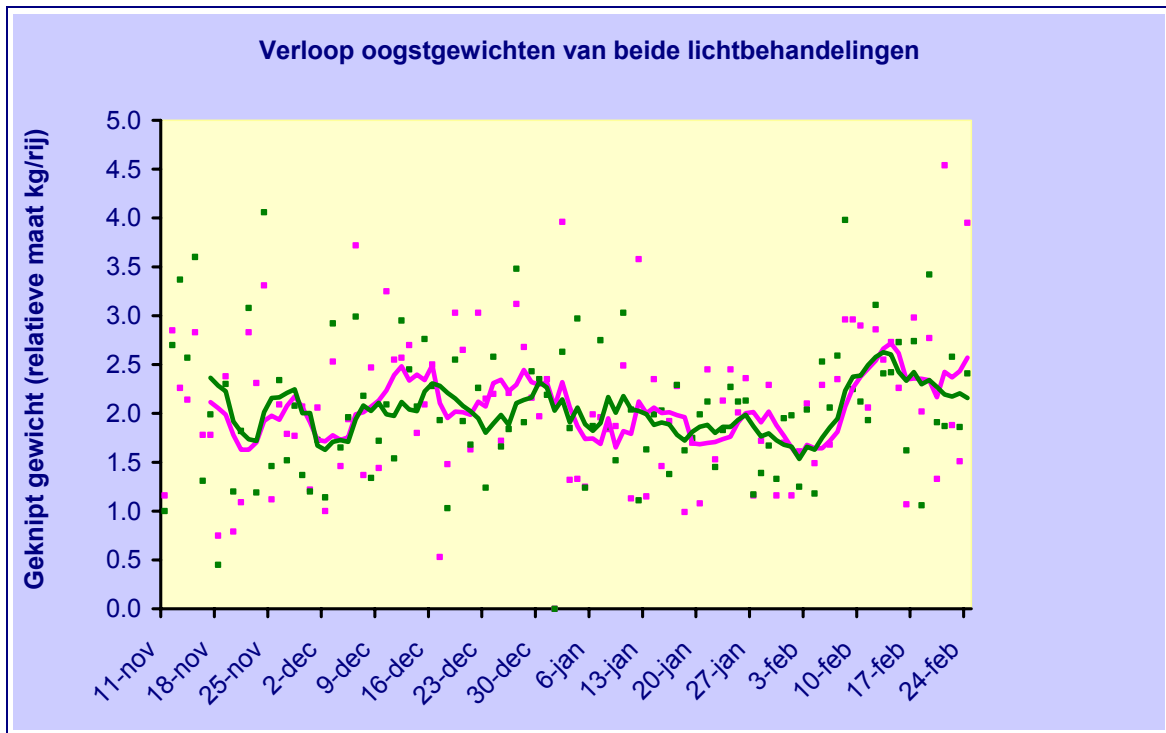
Op basis van deze resultaten kunnen we concluderen dat mobiel licht geen netto effect heeft op de productie, wanneer verschillen in licht absorptie tussen de behandelingen niet worden meegewogen.

Fig. 38

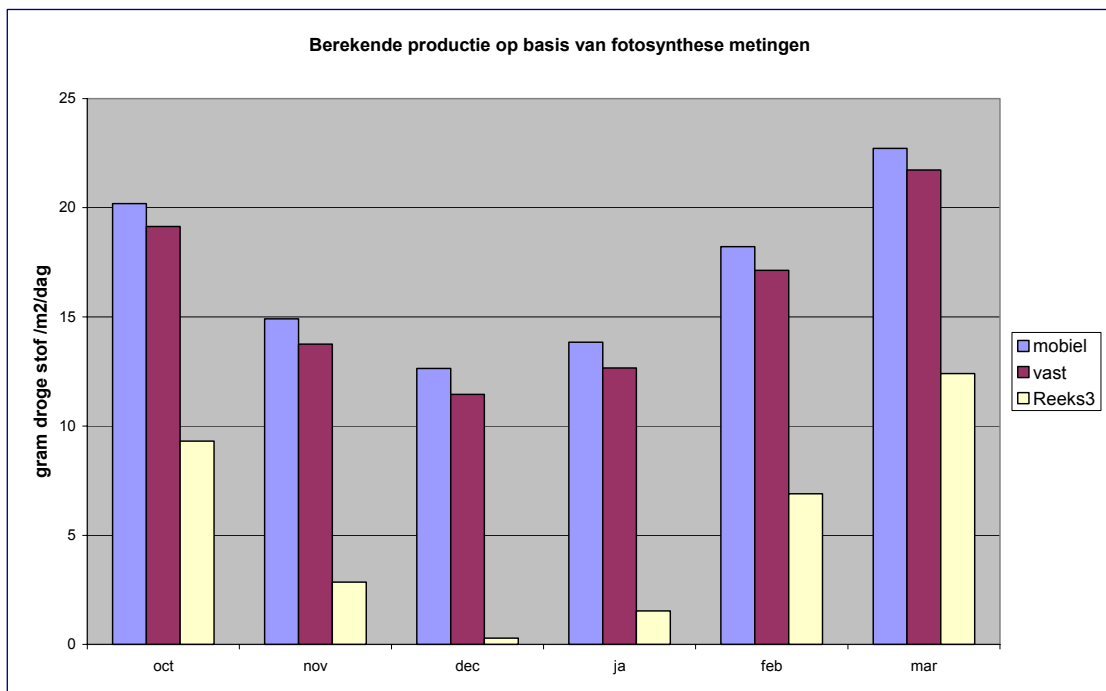


In onderstaande figuur is het dagelijks gemeten oogstgewicht voor beide behandelingen weergegeven. Als er al verschillen zijn, dan zijn ze gering. Daarbij moet worden opgemerkt dat de variatie in de waarnemingen erg groot is. Om die reden heb ik voor de waarnemingen een voortschrijdend gemiddelde weergegeven in de getrokken lijnen (groen= vast-licht, roze = mobiel+vast). Er is een trend dat in de donkerste maanden mobiel licht een voordeel heeft boven vast-licht. Door het gebrek aan herhalingen in de proef is dat statistisch echter niet hard te maken. Op basis van de oogstwaarnemingen wordt deze winst niet bevestigd. Daar kunnen een aantal redenen voor zijn:

- 1 De waargenomen hogere absorptie door het gewas is overschat.
- 2 De grote variatie in de waargenomen oogstgegevens maskeert een vrij klein verschil in opbrengst zodat dit niet aantoonbaar wordt.
- 3 De extra hoeveelheid assimilaten die in de mobiel+vast behandeling wordt aangemaakt wordt niet benut voor bloemvorming maar opgeslagen in wortels of stengelreserves.



Om het effect van de gepostuleerde toename in de hoeveelheid licht te schatten zijn dezelfde berekeningen als in Figuur 38 herhaald maar nu met een is gerekend met een 10% hogere absorptie van de straling door verstrooiing van licht tussen de bloembedden bij de lage lamp positie van de mobiel+vast behandeling. Uit deze berekeningen wordt een voordeel van 7-8% voorspeld voor mobiel licht. Reeks 3 is de berekende groei zonder assimilatielicht.



5 Conclusies

1. De lichtabsorptie door het gewas is in de mobiel+vast behandeling ongeveer 10% hoger door een lagere positie van de lampen en een daarmee samenhangende afname in reflectie.
2. Het licht penetreert dieper tussen de bedden met als gevolg een actiever gewas onderin.
3. Dit leidt echter niet tot een veel hogere fotosynthese vanwege de lage lichtintensiteiten onderin. De kleine toename in fotosynthese wordt bovendien gecompenseerd door een gelijktijdige toename van de ademhaling. Het resultaat is dat beide behandelingen op basis van de fysiologische processen exact gelijke opbrengstverwachtingen hebben. De meerwaarde van mobiel zou dus liggen in de toegenomen lichtabsorptie.
4. Deze meerwaarde wordt niet bevestigd door de oogstwaarnemingen waarbij opgemerkt moet worden dat de variatie in de meetresultaten een definitieve uitspraak niet rechtvaardigt.
5. Doordat de huidmondjes tussen de lamppassages open blijven is roos bij uitstek geschikt voor mobiel licht. Als mobiel licht kans van slagen heeft dan is het bij roos.
6. De effectiviteit van mobiel licht is bij roos onafhankelijk van de slagduur mits korter dan een half uur.
7. Het is aan te bevelen om ervoor te zorgen dat piekintensiteit bij het passeren van de lamp niet hoger is dan 200 $\mu\text{mol PAR}$.
8. Bij toenemende daglicht intensiteiten zal uitschakelen van mobiel licht eerder economisch verantwoord zijn dan het uitschakelen van de vast-licht installatie.
9. Er is geen reden om aan te nemen dat de effecten van mobiel licht tot een onacceptabele stijging van de blad c.q. bloemtemperatuur zullen leiden.
10. Bij het installeren van lampen verdient de gewasstructuur meer aandacht en zou in de optimalisatie van lamphoogte, armatuur keuze meegewogen moeten worden. Lichtverdeling zou niet alleen in het horizontale vlak moeten plaatsvinden maar er zou ook aandacht moeten zijn voor de verdeling in het gewas.

6 Referenties

- Aikin, W.J. and Hanan, J.J., 1975. Photosynthesis in the rose; effect of light intensity, water potential and leafage. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 100: 551-553
- Ballaré C.L., Sánchez R.A., Scopel A.L., Casal J.J. and Ghera C.M. (1987). Early detection of neighbour plants by phytochrome perception of spectral changes in reflected sunlight. *Plant, Cell and Environment* 10: 551-557.
- Beeson, R.C.-Jr. Ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activities in leaves of greenhouse roses. *J-Exp-Bot.* 1990. v. 41(222) p. 59-65.
- Blom-Zandstra-Margaretha, Sander-Pot-C, Maas-Frank-M, Schapendonk-Ad-H-C-M Effects of different light treatments on the nocturnal transpiration and dynamics of stomatal closure of two rose cultivars. *Scientia-Horticulturae-Amsterdam.* 1995, 61 (3-4) 251-262.
- Bozarth, C.S., Kennedy, R.A. and Schekel, K.A., 1982. The effects of leafage on photosynthesis in rose. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 107: 707-712.
- Bredmose-Niels Biological efficiency of supplementary lighting on cut roses the year round. *Scientia-Horticulturae-Amsterdam.* 1994, 59 (1) 75-82.
- Bredmose-Niels-B Growth, flowering, and postharvest performance of single-stemmed rose (*Rosa hybrida* L.) plants in response to light quantum integral and plant population density. *Journal-of-the-American-Society-for-Horticultural-Science.* 1998, 123 (4) 569-576.
- Brednose, N.B. Light quantum integral and plant density affects bud and shoot growth, fresh biomass production and bloom quality in single-stemmed roses. *Acta-hortic.* Leuven, Belgium : International Society for Horticultural Science. Apr 2000. (515) p. 105-109.
- Byrne, T.G. and Doss, R.P., 1981. Development time of 'Cara Mia' rose shoots as influenced by pruning position and parent shoot diameter. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 106: 98-100.
- Carpenter, W.J. and Anderson, G.A., 1972. High intensity supplementary lighting increases yields of greenhouse roses. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 97:331-334.
- Carpenter, W.J. and Rodriguez, R.C., 1971. Supplemental lighting effects on newly planted and cut-back greenhouse roses. *HortScience*, 6: 207-208.
- Casal J.J. & Smith H. (1989). Effects of blue light pretreatment on internode extension growth in mustard seedlings after the transition to darkness: analysis of the interaction with phytochrome. *J. Exp. Bot.* 40: 893-899.
- Cockshull, K.E. and Horridge, J.S., 1977. Apical dominance and flower initiation in the rose. *J. Hortic. Sci.*, 52: 421-427.
- Cockshull, K.E., 1975. Roses II. The effects of supplementary light on winter bloom production. *J. Hortic. Sci.*, 50:193-206.
- De Vries, D.P., Smeets, L. and Dubois, L.A.M., 1982. Interaction of temperature and light on growth and development of hybrid tea-rose seedlings, with reference to breeding for lowenergy requirements. *Scientia Hortic.*, 17: 377-382.

Doorn, W.G.-van, Vojinovic, A. Petal abscission in rose flowers: effects of water potential, light intensity and light quality. *Ann-bot. London*, New York : Academic Press, Nov 1996. v. 78 (5) p. 619-623.

Doorn, W.G.-van, Vojinovic, A. Growth, flowering, and post harvest performance of single-stemmed rose (*Rosa hybrida* L.) plants in response to light quantum integral and plant population density. *J-Am-Soc-Hortic-Sci. Alexandria, Va.* :. July 1998. v. 123 (4) p. 569-576.

Fuchs, H.W.M., 1986. Harvesting, pruning and root reactions of roses. *Acta Hortic.*, 189:109-115.

Gislerod, H.R., Fjeld, T., Mortensen, L.M. The effect of supplementary light and electrical conductivity on growth and quality of cut roses. *Acta-hortic. Wageningen : International Society for Horticultural Science.* June 1993. (342) p. 51-60.

Grossi, J.-A.S., Pemberton, H.B., Baker, J.-T., Blom, T., Criley, R. Leaf photosynthesis, flower respiration and flower longevity of pot roses influenced by cultivar and growing environment. *Acta-Horticulturae.* 2003, (624): 329-333

Halevy, A.H., 1972. Phytohormones in flowering regulation of self-inductive plants. *Proc. 18th Int. Hort. Congr., March 1970, Tel Aviv, (J.S.H.S.), V*, 187-198.

Heo-Jeong Wook., Chakrabarty, D., Paek-Kee Yoeup. Longevity and quality of cut 'Master' carnation and 'Red Sandra' rose flowers as affected by red light. *Plant-Growth-Regulation.* 2004, 42(2): 169-174

Horridge, J.S. and Cockshull, K.E., 1974. Flower initiation and development in the glasshouse rose. *Scientia Hortic.*, 2: 273-284.

Hughes J.E. & Wagner E. (1987). Photomorphogenesis in *Chenopodium album*. Effects of supplementary far-red light on the kinetics of stem extension. *Planta* 172: 131-138.

Jiao, J., Tsujita, M.J. and Grodzinski, B., 1988. Predicting growth of Samantha roses at different light, temperature and CO₂ levels based on net carbon exchange. *Acta Hortic.*, 230: 435-442.

Jiao, J., Gilmour, M., Tsujita, M.J., Grodzinski, B. Photosynthesis and carbon partitioning in Samantha roses. *Can-J-Plant-Sci-Rev-Can-Phytotechnie.* Ottawa : Agricultural Institute of Canada. Apr 1989. v. 69 (2) p. 577-584.

Jiao, J., Tsujita, M.J., Grodzinski, B. Influence of radiation and CO₂ enrichment on whole plant net CO₂ exchange in roses. *Can-J-Plant-Sci Rev-Can-Phytotech.* Ottawa : Agricultural Institute of Canada. Jan 1991a. v. 71 (1) p. 245-252.

Jiao, J., Tsujita, M.J., Grodzinski, B. Influence of temperature on new CO₂ exchange in roses. *Can-J-Plant-Sci-Rev-Can-Phytotech.* Ottawa : Agricultural Institute of Canada. Jan 1991b. v. 71 (1) p. 235-243.

Khosh-Khui, M. and George, R.A.T., 1977. Responses of glasshouse roses to light conditions. *Scientia Hortic.*, 6: 223-235.

Maas F.M., Bakx E.J. & Morris D.A. (1995a). Photocontrol of stem elongation and dry weight partitioning in *Phaseolus vulgaris* L. by the blue-light content of photosynthetic photon flux. *J. Plant Physiol.* 146: 665-671.

- Maas F.M. & Van Hattum J. (1998). Thermomorphogenic and photomorphogenic control of stem elongation in *Fuchsia* is not mediated by changes in responsiveness to gibberellins. *J Plant Growth Regulation* 17: 39-45.
- Maas F.M., Bakx E.J. (1995b). Effects of light on growth and flowering of *Rosa hybrida* 'Mercedes'. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 20: 571-576.
- McLaren J.S. & Smith H. (1978). Phytochrome control of the growth and development of *Rumex obtusifolius* under simulated canopy light environments. *Plant, Cell and Environment* 1: 61-67.
- Moe, R., 1972. Effect of daylength, light intensity and temperature on growth and flowering in roses. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 97(6): 796-800.
- Moe,-R. Growth and flowering in roses. *Acta-Hortic* 1988. (218) p. 121-130.
- Mohr H. (1987). Regulation from without: darkness and light. *Annals of Botany* 60: 139-155.
- Mor, Y. and Halevy, A.H., 1984. Dual effect of light on flowering and sprouting of rose shoots. *Physiol. Plant.*, 61: 119-124.
- Mortensen, L.M., Gislerod, H.R. and Mikkelsen, H., 1992. Maximizing the yield of greenhouse roses with respect to artificial lighting. *Norw. J. Agric. Sci.*, 6: 27-34.
- Mortensen-L-M, Gislerod-H-R Effects of summer lighting, plant density, and pruning method on yield and quality of greenhouse roses. *Gartenbauwissenschaft*. 1994, 59 (6) 275-279.
- Mortensen-L-M., Gislerod-H-R., Mikkelsen-H. Maximizing the yield of greenhouse roses with respect to artificial lighting. *Norwegian-Journal-of-Agricultural-Sciences*. 1992a, 6 (1): 27-34.
- Mortensen-L-M., Gislerod-H-R., Mikkelsen-H Effects of different levels of supplementary lighting on the year-round yield of cut roses.*Gartenbauwissenschaft*. 1992b, 57 (4) 198-202.
- Pasian, C.C. and Lieth J.H., 1989. Analysis of the response of net photosynthesis of rose leaves of varying ages to photosynthetically active radiation and temperature. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 114: 581-586.
- Rajapakse-Nihal-C., Kelly-John-W Influence of spectral filters on growth and postharvest quality of potted miniature roses.*Scientia-Horticulturae-Amsterdam*. 1994, 56 (3) 245-255.
- Rey, F.A. and Tsujita, M.J., 1987. Copper nutrition of greenhouse roses relative to supplementary irradiation and growing medium. *J. Plant Nutr.*, 10: 47-65.
- Ritter A., Wagner E. & Holmes M.G. (1981). Light quantity and quality interactions in the control of elongation growth in light-grown *Chenopodium rubrum* L. seedlings. *Planta* 153: 556-560.
- Roberts,-G.L., Tsujita,-M.J., Dansereau,-B., 1993 Supplemental light quality affects budbreak, yield, and vase life of cut roses. 28 (6) p. 621-622.
- Schapendonk, A.H.C.M., Challa, H., Broekharst, P.W. and A.J. Udink ten Cate, 1984. Dynamic climate control, an optimization study for earliness of cucumber production. *Scientia Hort.* 23: 137-150.
- Schapendonk, A.H.C.M., M. Van Oijen, Riki van den Boogaard, and Jeremy Harbinson, 1999. Nitrogen shortage in a tomato crop; scaling up from effects on electron-transport rate to plant productivity. *Z. Naturforsch.* 54C 9-10: 840-848.

- Schapendonk, A.H.C.M., van der Putten, P.E.L., Tonk, W.J.M., Dolstra, O. and S.R. Haalstra, 1991. Chlorophyll fluorescence: a non-destructive method for detecting damage in the photosynthetic apparatus in plants, 1992. *Acta Horticulturae* 304: 61-76.
- Schapendonk, A.H.C.M., W. Jordi, C.S. Pot, G.M. Stoop, P. Dijkstra, and M. van Oijen, 2000. Effects of elevated Carbon Dioxide concentration and temperature on photosynthetic acclimation and productivity of Potato. *Australian Journal of Plant physiology* 27,12: 1119-1130
- Krause, G. H. and E. Weis. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42: 313-49.
- Schreiber, U., W. Bilger, and C. Neubauer. 1994. Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. p. 49-70. In: E. d. Schulze and M. M. Caldwell (ed.), *Ecophysiology of Photosynthesis*. Vol. 100. Springer, Berlin.
- Schreiber, U., W. Bilger, H. Hormann, and C. Neubauer. 1998. Chlorophyll fluorescence as a diagnostic tool: basics and some aspects of practical relevance. p. 320-336. In: A. S. Raghavendra (ed.),
- Smith H. (1994). Sensing the light environment: the functions of the phytochrome family. In: *Photomorphogenesis in plants*, 2nd edition, R.E. Kendrick and G.H.M. Kronenberg (eds.), pp. 377-416.
- Smith H. (1995). Physiological and ecological function within the phytochrome family. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 46: 289-315.
- White-J.W., Richter-D. Supplementary fluorescent lighting and low moisture stress improve growth of greenhouse roses. *Journal-of-the-American-Society-for-Horticultural-Science*. 1973, 98 (6): 605-607.
- Yin, X, M. van Oijen & Ad H.C.M. Schapendonk. 2004. Extension of a biochemical model for the generalised stoichiometry of electron transport limited C3 photosynthesis. *Plant Cell & Environment* 27: 1211-1222
- Zieslin, N. Mor, Y. Light and roses. A review. *Scientia Horticulturae* 43 (1990) 1-14.
- Zieslin, N., Tsujita, M.J. Response of miniature roses to supplementary illumination 1. Light intensity. *Scientia-Horticulturae-Amsterdam*. 1990, 42 (1-2): 113-122.

Bijlage 1 Gemiddelde fotosynthese karakteristieken van planten onder mobiel+vast en vast-licht

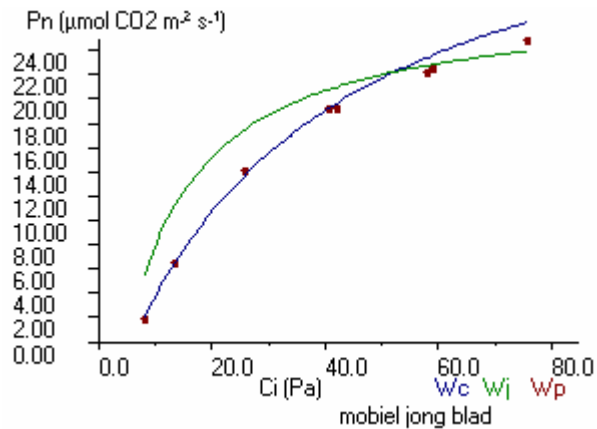
Gefitte curves van de gemiddelde fotosynthese op verschillende hoogtes in het gewas. De punten geven de gemiddelde meetwaarden weer.

<p>Pn ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Light ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Mobiel top</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resp -1.72 ademhaling • QE 0.0783: hellingshoek (quantum efficiëntie) • Amax 23.8 maximale fotosynthese • Convexity 0.256 buigpunt van curve
<p>Pn ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Light ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Mobiel midden</p>	<p>Resp -1.41</p> <p>QE 0.0802</p> <p>Amax 19.0</p> <p>Convexity 0.402</p>
<p>Pn ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Light ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Mobiel onder</p>	<p>Resp -0.129</p> <p>QE 0.0674</p> <p>Amax 14.5</p> <p>Convexity 0.516</p>

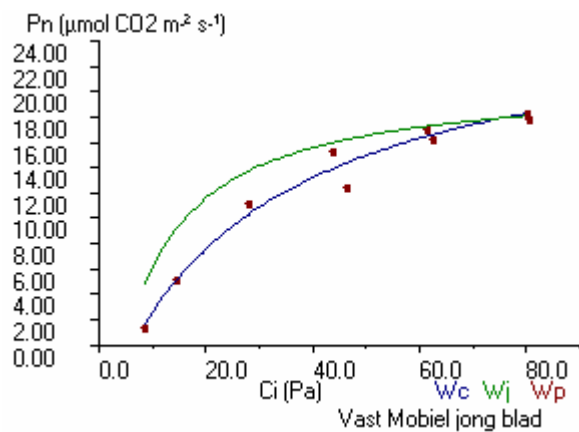
<p>Pn ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Light ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Vast-Mobiel boven</p>	<p>Resp -0.814 QE 0.0707 Amax 20.9 Convexity 0.457</p>
<p>Pn ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Light ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Vast-Mobiel midden</p>	<p>Resp -0.809 0 QE 0.0776 0.00123 Amax 15.9 0.0757 Convexity 0.223</p>
<p>Pn ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Light ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)</p> <p>Vast-Mobiel onder</p>	<p>Resp -0.330 QE 0.0411 Amax 3.33 Convexity 0.828</p>

Bijlage 2 Analyse van de CO₂ response

CO₂ response gemeten bij 200 μmol PAR. Op basis van de metingen werden schattingen gemaakt van het elektronentransport (J max, groene lijnen; de energievastlegging in de bladgroenkorrels) en de snelheid waarmee CO₂ aan het Rubisco bindt (Vcmax ; blauwe lijnen) (Beeson, 1990).



Resp 2.07
 Vcmax 43.5
 Jmax 134



Resp 1.62
 Vcmax 28.8
 Jmax 95.0 Fixed

Bijlage 3 lichttabellen

Ter informatie zijn in tabel 1 de gemiddelde uur en dagsommen van de lichtverdeling over het jaar voor Nederlandse condities weergegeven.

Tabel 1

Maand	Daglengthe uren	Stralingssom In MJ m ⁻² d ⁻¹ Buiten de kas	Lichtsom PAR In mol m ⁻² d ⁻¹ Buiten de kas	Lichtsom PAR In μmol m ⁻² d ⁻¹ In de kas, 70% transmissie	Gemiddelde? Intensiteit PAR In μmol m ⁻² d ⁻¹ In de kas.
januari	8.0	2.36	5.1	3.8	124
februari	9.7	4.71	10.1	7.1	202
maart	11.8	7.80	16.8	11.8	277
april	13.8	12.15	26.1	18.3	368
mei	15.3	16.05	34.5	24.2	438
juni	16.4	18.28	39.3	27.5	466
juli	16.2	15.84	34.1	23.9	409
augustus	14.6	13.96	30.0	21	400
september	12.7	10.25	22.0	15.4	337
oktober	10.7	5.90	12.7	8.9	231
november	8.8	2.70	5.8	4.1	128
december	7.6	1.89	4.1	2.9	105

Bijlage 4 Fotosynthese

De plant als sucrose fabriek

Licht is een onmisbare factor voor de groei en ontwikkeling van planten. Groei wordt in eerste instantie bepaald door de efficiëntie waarmee zonlicht wordt omgezet in chemische energie die wordt gebruikt voor de assimilatie van CO₂ in suikers (fotosynthese). In de tweede plaats is er een groot effect van bepaalde lichtkleuren op de ontwikkeling van planten (fotomorfogenese).

Hoeveel licht heeft een plant nodig?

Welke lichtintensiteit is in gesloten teelten rendabel? Het antwoord op deze vraag is uiteraard afhankelijk van het product dat geteeld wordt, het seizoen en de kostprijs voor elektriciteit en exploitatie van de belichtingsinstallatie. In deze beschouwing zal met name het effect van bijbelichting op de CO₂-assimilatie centraal staan en daarnaast de algemeen bekende morfogenetische reacties van planten op verandering in lichtkwaliteit en de mogelijkheid om de plantontwikkeling in een gewenste richting te sturen.

Lichtenergie en fotosynthese

Fotosynthese is het proces waarbij licht-energie, die geabsorbeerd is door het chlorofyl van bladeren, wordt gebruikt om water te oxideren en koolzuur te reduceren tot suikers. De suikers worden vervolgens gebruikt als substraat voor groei. Voor de reductie van 1 molecuul koolzuur zijn 8 lichtkwanten nodig. De energie-inhoud van suiker is $17,6 \text{ KJ g}^{-1}$. Uit energiemetingen blijkt dat de energie-inhoud van zonlicht 220 KJ mol^{-1} bedraagt. Dit betekent dat er zonder energieverliezen, uit 1 mol lichtkwanten 12,5 g suiker zou kunnen worden gesynthetiseerd. Door verliezen bij de fotochemische processen in de energie transductie van de fotosynthese, is het theoretisch maximaal te behalen rendement echter slechts 27%: $3,4 \text{ g mol}^{-1}$.

Het enzym RUBISCO, dat nodig is voor de binding van CO_2 , heeft ook een geringe affiniteit voor zuurstof. Omdat de concentratie zuurstof in de atmosfeer echter 600 keer hoger is dan die van CO_2 is er toch een noemenswaardige competitie. Door de onvermijdelijke binding van zuurstof aan het koolzuurbindende enzym komt er als verliespost koolzuur vrij. Door dit proces loopt het rendement van de fotosynthese nog verder terug tot 18%: $2,3 \text{ g mol}^{-1}$. Door hoge CO_2 concentraties te gebruiken kan deze verliespost worden voorkomen. Na het verdisconteren van verliezen tengevolge van reflectie en transmissie door het bladoppervlak blijft uiteindelijk een rendement van 13% over: $1,6 \text{ g mol}^{-1}$. Bij de omzetting van sucrose in structurele drogestof worden bovendien nog eens 30% van de suikers gebruikt als brandstof voor de benodigde synthese-energie, hetgeen de maximaal haalbare efficiëntie terugbrengt tot netto $1,3 \text{ g drogestof per mol geabsorbeerde kwanten}$.

Wat betekent dit in kwantitatieve zin voor het rendement van kunstlicht? Uitgaande van een belichting van $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ PAR, equivalent aan een gesloten TL plafond op 30-40 cm boven het gewas, resulteert dit in een maximale productie van ongeveer $2.5 \text{ g m}^{-2} \text{ uur}^{-1}$. Dit geldt voor de situatie van een volledige bodembedekking. De meeropbrengst vermindert proportioneel met de fractie onbedekte bodem.

In de plantenfysiologie wordt de lichthoeveelheid uitgedrukt in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. De omrekeningsfactoren van W m^{-2} naar micromol en van Lux naar micromol zijn in onderstaande tabel weergegeven voor verschillende types lichtbronnen:

Omrekeningsfactoren van W/m^2 naar μmol en van Lux naar μmol		
	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ per W.m^2	Lux per $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Lichtbron	400-700 nm	400-700 nm
Daglicht	4.57	54
Blue sky only	4.24	52
Hogedruk natrium	4.95	82
Halogeen	4.59	71
Kwik	4.52	84
TL warm-wit	4.67	76
TL koel-wit	4.59	74
Gloeilamp	5.00	50
Lage-druk natrium	4.92	106

Studies naar de efficiëntie waarmee fotonen met verschillende golflengtes worden gebruikt voor de CO_2 fixatie hebben aangetoond dat weliswaar alle golflengtes tussen 400 en 700 nm voor de

fotosynthese gebruikt kunnen worden, maar dat de efficiëntie waarmee dit gebeurt niet voor elk foton gelijk is. De kwantumefficiëntie van licht met golflengten rond de 650 nm (rood licht) is hoger dan die van licht met een golflengte rond de 450 nm (blauw licht). De hoeveelheid chlorofyl en carotenoiden en de verhouding van deze pigmenten in een blad is afhankelijk van de lichtkwaliteit waarin het blad zich heeft ontwikkeld. Er is meer chlorofyl en carotenoiden in bladeren aanwezig die zijn opgekweekt in rood licht dan in bladeren opgekweekt in blauw licht. Teelt in geel en groen licht leidde tot bleekgroene bladeren. De effecten zijn echter vaak soortspecifiek en plantensoorten kunnen verschillen in de mate waarin zij zich kunnen aanpassen aan veranderingen in lichtkwaliteit.

Grote winst bij kleine planten

In de eerste groeifase groeien de planten exponentieel. Dit betekent dat een hogere fotosynthese rente op rente oplevert. Nemen we als fictief voorbeeld de opkweek van komkommerplanten in de maand december. Bij een plantgewicht van 50 mg en een daglichtsom van 2.5 mol is de relatieve groeisnelheid 0.15 g g^{-1} . Verdubbeling van de netto assimilatie snelheid betekent echter niet dat de relatieve groeisnelheid zal verdubbelen. Bij hogere lichtintensiteiten wordt het blad namelijk wat dikker waardoor het "rente op rente" effect van de bladgroei negatief wordt beïnvloed. De relatieve groeisnelheid zal toenemen van 0.15 g g^{-1} tot 0.22 g g^{-1} .

De economische afweging voor telen onder kunstlicht is per bedrijfstak verschillend en er moeten modelberekeningen worden gemaakt met specifieke gewasafhankelijke opbrengstfactoren. Bij grote planten is de winst die met bijbelichting te behalen is veel geringer omdat de bladeren van grote planten elkaar beschaduwen en daardoor extra bladvorming niet meer leidt tot opbrengstvermeerdering.

Welke lichtintensiteit is optimaal?

Om deze vraag te beantwoorden is enig inzicht vereist in de regulering van de fotosynthese. De basisprocessen van de fotosynthese worden op een aantal niveaus gereguleerd. Voor de praktijk betekent dit dat de efficiëntie van de fotosynthese afneemt bij hogere lichtintensiteiten. De efficiëntie neemt af doordat de geabsorbeerde lichtenergie niet wordt benut voor de aanmaak van assimilaten maar weer verloren gaat als warmte. De afname van de efficiëntie is er de oorzaak van dat de licht-respons curve de vorm heeft van een asymptotische exponentiele verzadigingsfunctie. Bij lage lichtintensiteiten is het licht rendement daardoor 10-15 maal hoger dan bij hoge lichtintensiteiten. Een lage lichtintensiteit met een daaraan gekoppelde hoge efficiëntie van de fotosynthese is echter ongunstig in gesloten teelten omdat de groei traag verloopt waardoor het beslag op de teeltruimte lang duurt. De manier waarop de efficiëntie daalt bij hogere lichtintensiteiten wordt zowel erfelijk bepaald als door de opkweekcondities. Bij schaduwplanten, waaronder de meeste potplanten neemt de efficiëntie al zeer snel af terwijl bij zonneplanten het traject veel langer doorloopt. Ook de opkweekcondities spelen een belangrijke rol.

Effect van stressfactoren

Allerlei stressfactoren leiden tot een sterkere afname van de efficiëntie bij oplopende lichtintensiteiten. Voor de tuinbouw kunnen nutriëntentekort en of vochtgebrek factoren zijn die de efficiëntie verlagen. In een gesloten systeem zijn stressfactoren doeltreffend te voorkomen door de optimale mogelijkheden voor teeltmaatregelen.

Effecten van temperatuur en koolzuurconcentratie

Het effect van belichting wordt beïnvloed door de temperatuur (Jiao et al., 1988,1989). Dit wordt veroorzaakt door de toename van de ademhalingsprocessen bij een hogere temperatuur. De efficiëntie van belichting voor de fotosynthese zal in principe afnemen bij hogere temperatuur, tenminste bij C_3 planten. Dit negatieve aspect wordt tegengegaan door de positieve werking van temperatuur op het specifieke bladgewicht en daardoor op de relatieve groeisnelheid.

Temperatuur is een belangrijke sturende factor waarmee de teelt geoptimaliseerd kan worden. CO_2 dosering stimuleert de fotosynthese en de groei. Een verdubbeling van de CO_2 concentratie geeft een productieverhoging van 20 tot 40% (Schapendonk et al., 2000). Het CO_2 effect wordt in het algemeen versterkt door hoge lichtintensiteit. Dit betekent dat bijbelichting effecten in geringe mate worden vergroot door een goede CO_2 -dosering. Deze dosering is uiteraard gewasspecifiek.

Controle van de morfologie

Licht heeft niet alleen effect op de kwantumefficiëntie voor de fotosynthese en groei van de plant (Aikin en Hanan, 1975; Carpenter, 1971, 1972), maar daarnaast heeft de lichtkwaliteit effect op veranderingen in bladmorfologie en bladstand. Lichtkwaliteiten die de stengelstrekking beperken ten gunste van de bladgroei vergroten het totale lichtonderscheppende bladoppervlak en kunnen hierdoor een groot effect hebben op de groei (Ballare et al., 1987; Casal, 1989). Het vaststellen van actiespectra, niet alleen voor de energiehuishouding maar ook voor morfologische processen, is essentieel. De verlichting moet een optimaal spectrum hebben, zowel voor de fotosynthese, d.w.z. een spectrum dat goed aansluit bij een of meerdere pieken van het fotosynthetisch actie spectrum als voor de morfogenese. Lage-druk natriumlampen die monochromatisch licht uitzenden van 589 nm en zeer efficiënt zijn in de omzetting van elektriciteit in fotosynthetisch actieve straling, zijn bijvoorbeeld ongeschikt als enige lichtbron zonder daglicht voor plantengroei omdat gebrek aan blauw licht (golflengtegebied 400 tot 500 nm) bij de meeste plantensoorten leidt tot een overmatige strekkingsgroei en soms ook tot chlorose. Normale groei en ontwikkeling van planten onder uitsluitend kunstlicht is goed mogelijk indien de spectrale verdeling van de gebruikte lampen of combinaties van lampen uitgebalanceerd is, d.w.z. met betrekking tot de relatieve hoeveelheden blauw, rood en verrood licht redelijk overeenkomen met die van daglicht. De snelheid van uitlopen wordt daarentegen bepaald door de licht intensiteit. Als er onvoldoende rood licht is lopen de knoppen niet uit ook al is de totale lichthoeveelheid voldoende. Ander voorbeeld met betrekking tot lichtkwaliteit zijn de lengte groei en houdbaarheid. Hoewel er veel schijnbaar tegenstrijdige resultaten worden gerapporteerd is het duidelijk dat de vorm van het pigment fytochroom een rol speelt bij de strekking van de stengel. Voor de strekkingsgroei is voor een zeer groot aantal plantensoorten aangetoond dat er een duidelijke lineair verband bestaat tussen het aandeel fytochroom in de Pfr vorm en de mate van strekking. Hoe hoger de R/VR en des te hoger de Pfr/Ptotaal des te minder stengelstrekking. In de natuur wordt een afname van de R/VR waargenomen in licht dat door bladeren wordt doorgelaten en wordt gereflecteerd. Planten kunnen aan de hand deze verandering in R/VR bepalen in hoeverre ze door andere planten worden overschaduwd of dreigen te worden overschaduwd door hun buurplanten (Smith 1986,1994,1995; Ballare et al. 1987). De mate van strekkingsgroei op een afname in Pfr/Ptotaal verschilt sterk van plantensoort tot plantensoort. Daarnaast speelt de hoeveelheid blauw licht een rol. Toevoeging van blauw licht vermindert de strekkingsgroei en geeft dikkere donker groenere bladeren. Ook het wegfilteren van blauw licht uit het spectrum van witte TL buizen leidde tot een sterke toename van de strekkingsgroei bij roos (Maas et al. 1995b) en fuchsia (Maas & Van Hattum, 1998).

Lampcombinaties die ten opzicht van het daglicht verrijkt zijn in het rode of blauwe deel van het spectrum resulteren in verschillen in droge stofverdeling tussen blad en stengel en beïnvloeden de zijscheut vorming. De effecten variëren echter sterk per plantensoort.

Veel blauw licht onderdrukt de stengelstrekking respons. Kortere planten kunnen worden geteeld door een relatieve toename in de hoeveelheid blauw licht t.o.v. de andere golflengtes in het 400-700 nm golflengtegebied en het wegfilteren van de verrode straling.

UV-B

UV-B heeft met name een effect op de synthese van flavonoiden in de bladeren die de het fotosynthese apparaat beschermen tegen de hoogenergetische UV straling. Bijbelichting van gewassen met UV-B en UV-A straling biedt perspectieven om de synthese van bladpigmenten als flavonoiden te stimuleren, te strekkingsgroei te remmen en de planten stress-toleranter te maken. Andere beschreven effecten zijn verandering van de samenstelling en van dikte van de cuticula en remming van de strekkingsgroei van stengels en bladeren.

Effecten van lichtkwaliteit op ziekten en plagen in kasgewassen

In diverse kasgewassen is waargenomen dat het optreden en de verspreiding van een aantal ziekten en plagen in kasgewassen in belangrijke mate wordt beïnvloed door de spectrale verdeling van het licht. Hierdoor kunnen veranderingen in het lichtspectrum, bedoeld om de ontwikkeling van de plant in een bepaalde richting te sturen, het ongewenste neveneffect hebben dat zij de planten gevoeliger maken voor een bepaalde plaag of ziekte. Omgekeerd kunnen lichtkwaliteiten die een bepaalde ziekte of plaag onderdrukken juist weer tot een ongewenste ontwikkeling van de planten leiden. Een aantal effecten van lichtkwaliteit op het optreden van zowel gebreksziekten als aantastingen door schimmels, virussen, aaltjes en, witte vlieg zijn hieronder samengevat. Een tekort of volledig ontbreken van blauw licht en UV-A straling leidde bij de teelt van katoen tot het ontstaan van chloroseverschijnselen in de bladeren overeenkomstig aan die van ijzerchlorose. Deze chlorose is het gevolg van een verminderde fotochemische reductie van Fe^{3+} ionen tot Fe^{2+} ionen die nodig zijn bij de synthese van chlorofyl.

Ook de ontwikkeling van plaagdieren zoals bijvoorbeeld aaltjes en witte vlieg kan worden beïnvloed door de kwaliteit van het licht. Zo werden wortels van tomatenplanten, geteeld in grond afgedekt met een rood licht reflecterend materiaal, sterker aangetast door nematoden dan planten in dezelfde bodem afgedekt met een wit reflecterend materiaal. Ook de aantasting van kerststerren door witte vlieg wordt beïnvloed door de lichtreflecterende eigenschappen van de bodembedekking. Meer larven en volwassen witte vliegen werden waargenomen op planten gekweekt in met rood of zwart folie bedekte grond dan op planten geteeld op een witte ondergrond. Een veranderde chemische samenstelling van de planten geteeld in de verschillende lichtkwaliteit wordt verondersteld een rol te spelen bij de ontwikkeling van deze plaagdieren.