



Optimaliseren van de energie-efficiëntie van belichting

Tom A. Dueck, Raymond E.E. Jongschaap, Feije de Zwart, Hendrik-Jan van Telgen,
Johan W. Steenhuizen, Dik Uenk & Leo F.M. Marcelis





Optimaliseren van de energie-efficiëntie van belichting

Tom A. Dueck¹, Raymond E.E. Jongschaap¹, Feije de Zwart¹, Hendrik-Jan van Telgen², Johan W. Steenhuizen¹, Dik Uenk¹ & Leo F.M. Marcelis¹

¹ Plant Research International B.V.

² Praktijkonderzoek Plant & Omgeving

© 2007 Wageningen, Plant Research International B.V.

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 Research International B.V.

Exemplaren van dit rapport kunnen bij de (eerste) auteur worden besteld.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Productschap Tuinbouw (PT) en het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselzekerheid (LNV).

PT projectnummer 12180

Sector/deelsector Bloemen, Groenten & Fruit

Plant Research International B.V.

Adres : Droevendaalsesteeg 1, Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 00
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : info.pri@wur.nl
Internet : www.pri.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Samenvatting	1
1. Achtergrond en doel van het onderzoek	3
1.1 Achtergrond	3
1.2 Doel fase A	3
2. Werkwijze	5
2.1 Inventarisatie terugval van de fotosynthese	5
2.2 Data-analyse t.b.v. vaststellen verlaagde fotosynthesecapaciteit	5
2.2.1 Dataverzameling	5
2.2.2 Data-analyse t.b.v. vaststellen momenten met verlaagde fotosynthesecapaciteit	5
2.3 Metingen in de praktijk	6
3. Resultaten Fase A	9
3.1 Inventarisatie	9
3.2 Interviews telers	12
3.3 Selectie bedrijven	13
3.4 Dataverzameling en data-analyse	13
3.5 Meting van het verloop bladfotosynthese gedurende de dag	15
3.6 Verificatie van fotosynthese respons: interacties met licht, CO ₂ en temperatuur	18
4. Conclusies Fase A	21
5. Fase B: Modelberekeningen ten behoeve van optimalisering energie-efficiëntie	23
5.1 Definitie van standaardteelt voor het kasmodel	23
5.1.1 Kasconstructie	23
5.1.2 Kasklimaat	23
5.1.3 WKK	23
5.2 Aanpassingen in het gewasmodel	24
5.3 Vaststellen van energie-efficiëntie van belichting	25
5.3.1 Simulatiescenarios	25
5.3.2 Calibratie van de rozenproductie	25
5.3.3 Berekening van opbrengsten, energieverbruik en kosten	27
5.3.4 Berekening van de energie-efficiëntie	28
5.4 Achtergrond bij het opstellen van belichtingsadviezen	31
5.4.1 De referentieteelt	31
5.5 Optimalisatie van belichtingstrategieën en testen van vereenvoudigde stelregels	33
5.5.1 Optimalisatie van energie-efficiëntie	34
5.5.2 Optimalisatie van saldo	36
5.6 Eenvoudige strategieën voor het belichten	37
5.6.1 Voor energie-efficiënt gebruik	38
5.6.2 Voor optimalisering van het saldo	38
5.6.3 Voor optimalisering van energie-efficiëntie en het saldo	38
6. Conclusies Fase B	40

6.1	Simulatie van energie-efficiëntie en saldo	40
6.2	Energiedoelstelling	40
6.3	Vereenvoudigde belichtingsstrategieën	41
6.3.1	Belichtingstrategie voor energie-efficiënt gebruik	41
6.3.2	Belichtingstrategie voor optimalisatie van saldo	41
6.3.3	Belichtingstrategie voor optimalisatie van energie-efficiëntie en saldo	41
7.	Kennisinteractie	43
8.	Referenties	45
Bijlage I. Optimale belichtingsscenario's voor maximale energie-efficiëntie (g DM MJ ⁻¹)		1
Bijlage II. Optimale belichtingsscenario's voor maximaal saldo roos cv. <i>Red Berlin</i> (€ m ⁻²)		1
Bijlage III. Optimale belichtingsscenario's voor maximaal saldo roos cv. <i>Red Berlin</i> (€ m ⁻²)		1

Samenvatting

Inleiding

In de rozenteelt in Nederland wordt veel en langdurig belicht. Het gebruik van assimilatiebelichting verhoogt de productie en de kwaliteit, maar vergt wel een hoge investering en kost veel energie. Over het algemeen wordt gedurende een vast aantal uren per dag belicht, en worden de lampen daarnaast alleen uitgeschakeld als de instraling van de zon boven een bepaalde waarde komt. Echter, de efficiëntie van de belichting hangt sterk af van de overige klimaatcondities en teeltomstandigheden. Om zo energie-efficiënt mogelijk te belichten is het dus van groot belang te kijken onder welke omstandigheden de belichtingsefficiëntie te laag wordt. Op die momenten zouden de lampen beter uitgeschakeld kunnen worden. In deze studie is nagegaan hoe de energie-efficiëntie van belichting in een rozen-gewas geoptimaliseerd kan worden en welke effecten dit heeft op het energiegebruik, de productie en het saldo.

Fotosynthese

Om de energie-efficiëntie van belichting te kunnen bepalen is het belangrijk om te weten of een plant op elk moment van de dag even efficiënt om kan gaan met het licht dat hij krijgt. Om dit na te gaan is in het eerste deel van het onderzoek in mei en juni op een praktijkbedrijf de fotosynthese gemeten bij een vaste lichthoeveelheid in de meet-cuvet van een fotosynthesemeter. Uit deze metingen bleek dat de fotosynthese onder gelijke omstandigheden over de dag geleidelijk afnam, van ongeveer 4,5 g CO₂ m⁻² per uur, naar ongeveer 3 g CO₂ m⁻² per uur. Dat betekent dat de plant in de loop van de dag minder goed in staat is om de beschikbare hoeveelheid licht te gebruiken voor het aanmaken van assimilaten. Ook bleek dat de fotosynthesesnelheid onder gelijke omstandigheden in het voor- en najaar lager was dan in de zomer.

Modelberekeningen

In het tweede deel van het onderzoek zijn modelberekeningen gedaan om de energie-efficiëntie van een rozenteelt te berekenen bij verschillende belichtingstrategieën. Hiervoor is het model eerst aangepast aan het hierboven beschreven verloop van de fotosynthesesnelheid over de dag en in het seizoen. In de berekeningen is rekening gehouden met wel of geen WKK, een donkerperiode van 4 of 8 uur, belichtingsintensiteiten van 5 tot 25 W PAR m⁻² (2000 tot 10.000 lux) en drempelwaardes van PAR straling (buiten) waarboven de belichting uitgeschakeld wordt, variërend van 20 tot 200 W m⁻². Per belichtingstrategie is het energiegebruik bepaald als som van het gasverbruik en elektriciteitsgebruik.

Energie-efficiëntie

De energie-efficiëntie van een belichtingstrategie wordt berekend als de hoeveelheid drogestof die geproduceerd wordt per MJ energie die is gebruikt. Zonder warmtekrachtkoppeling neemt de energie-efficiëntie af bij toenemende belichtingsduur, belichtingsintensiteit en het uitschakelen van de belichting bij meer licht buiten. Met een WKK neemt de energie-efficiëntie toe als de belichtingsintensiteit toeneemt van 5 naar 15 W PAR m⁻². De berekende energie-efficiëntie is het hoogst als er een WKK is, en er 16 uur belicht wordt met 15 W PAR m⁻² die bij een straling buiten van 60 tot 80 W PAR m⁻² uit wordt gezet. De energie-efficiëntie is dan 804 g drogestof per MJ per m² per jaar. Dit is 38% hoger dan de uitgangssituatie waarin (met WKK) 20 uur belicht wordt met 25 W PAR m⁻², waarbij de belichting bij 200 W PAR per m² buiten wordt uitgeschakeld.

Optimaliseren

Bovenstaande berekeningen en resultaten gingen uit van een belichtingsstrategie die het hele jaar door op dezelfde manier wordt toegepast. Als per productieperiode van 4 weken de optimale belichtingsstrategie wordt toegepast, stijgt de energie-efficiëntie nog iets verder, naar 825 g drogestof per MJ per m² per jaar. Deze energie-efficiënte strategie heeft echter een negatief effect op het saldo, dat is berekend als het verschil in opbrengst aan rozen en de energiekosten. Vergeleken met de uitgangssituatie (WKK, 20 uur belichten met 25 W PAR per m² en belichting uitschakelen bij 200 W PAR m² buiten) is het saldo 16% (ongeveer 10 euro per m²) lager.

Deel van het jaar

Het effect van het toepassen van een energie-efficiënte belichtingstrategie op het saldo verschilt tussen zomer- en wintermaanden. Als deze energie-efficiënte strategieën alleen toegepast worden in de periodes dat het ook saldo-voordeel oplevert (productieperiodes 7-11), kan de energie-efficiëntie verhoogd worden met 27% van 577 tot 732 g drogestof MJ⁻¹ m². Hierbij wordt het energieverbruik op jaarbasis gereduceerd met 789 tot 4188 MJ m² (-16%). Dit levert, afhankelijk van de geteelde rooscultivar, een saldooverhoging op van ongeveer 2 euro per m².

Richtlijnen voor belichtingsstrategie

In dit onderzoek zijn eenvoudige richtlijnen opgesteld om de belichtingsstrategie aan te passen aan de doelstelling: optimaliseren van de energie-efficiëntie of optimaliseren van het saldo. Voor beide doelen geldt dat de strategieën vooral afhankelijk zijn van de productieperiode, omdat per periode de hoeveelheid globale straling verschilt, en ook de prijs van de rozen.

In dit onderzoek zijn op basis van modelstudies eenvoudige strategieën opgesteld voor de belichtingstrategie, in afhankelijkheid van (verwachte) weersomstandigheden (m.n. straling) per productieperiode. Bij het hanteren van deze strategieën kan de hoeveelheid energie voor de belichting verlaagd worden, waarbij het saldo hetzelfde blijft of hoger wordt. De strategieën voor belichting kunnen onderverdeeld worden in:

1. Strategieën ten behoeve van energie-efficiënt gebruik van energie en energiebesparing:

- In periodes 11, 12, 13, 1 en 2 (week 41 t/m week 8) kan bij een lage globale buitenstraling (< 200 W m⁻²) een hoge belichtingsintensiteit (25 W PAR m⁻², 10.000 lux) aangehouden worden waarbij de belichting uitgeschakeld wordt bij een globale buitenstraling hoger dan 20 W m⁻². Bij globale stralingsniveaus hoger dan 200 W m⁻² kan een lagere belichtingsintensiteit aangehouden worden, gecombineerd met het uitschakelen van de belichting bij hogere globale buitenstraling.
- In periode 11 (week 41-44) kan bij hogere globale buitenstraling (> 600 W m⁻² d⁻¹) de belichtingsperiode verkort worden naar 16 uur.
- In periodes 3, 4 en 5 (week 9-21) is de optimale belichtingsintensiteit tussen de 10 en 15 W PAR m⁻². Vanaf periode 5 is het gunstig een kortere belichtingsduur van 16 uur aan te houden.
- In periodes 6, 7, 8, 9 en 10 (week 21-39) en bij veel licht buiten in periode 11 (week 41-44) kan de belichtingsduur verkort worden van 20 naar 16 uur.

2. Strategieën ten behoeve van optimalisatie van het saldo

- In periodes 12, 13 en 1 tot en met 6 (week 45 t/m 24) moet een hoge belichtingsintensiteit (25 W PAR m⁻²) worden toegepast.
- In periodes 13, 1, 2, 3 en 4 (week 48 t/m week 8) is een belichtingsduur van 20 uur optimaal.
- In periodes 4, 5 en 6 (week 13-24) moet de drempel voor globale straling waarop de belichting wordt uitgeschakeld niet te laag worden ingesteld.

3. Strategieën ten behoeve van energie-efficiënt gebruik van energie en energiebesparing, met handhaving of verbetering van het saldo

- In de periodes 7 tot en met 11 (week 25-44) moet:
 - de belichtingsduur verkort worden van 20 naar 16 uur.
 - lage belichtingsintensiteiten gebruikt worden (5-15 W PAR m⁻²).
- In periodes 7 tot en met 10 (week 25-40) moet de belichting uitgeschakeld worden bij een buitenstraling van 40 tot 60 W PAR m⁻².

Het hanteren van deze stelregels kan het saldo van een rozenteelt met ongeveer 2 euro per m² verhogen en leiden tot een energiebesparing van ongeveer 16% (ca. 800 MJ per m² per jaar).

Verder onderzoek

Op basis van dit onderzoek wordt een handreiking gegeven voor een beter rendement gebaseerd op energie-efficiënte belichtingstrategieën. Op dit moment vindt door WUR Glastuinbouw nog aanvullend onderzoek plaats om een verfijning aan te brengen en resultaten nog verder aan te scherpen. Dit gebeurt in de projecten 'Efficiënt belichten gedurende het etmaal' (PT12737; 10-10-2006 t/m 1-6-2700) en 'Belichting, soms zinvol, soms verspilling' (PT12740; start 1-1-2007).

1. Achtergrond en doel van het onderzoek

1.1 Achtergrond

Assimilatiebelichting wordt steeds intensiever toegepast bij steeds meer gewassen. Al vraagt assimilatiebelichting een hoge investering en kost het veel energie, de productie en kwaliteit worden positief beïnvloed. Toch blijven er nog veel vragen over deze effecten in relatie tot momenten waarop belicht wordt.

Het vermoeden bestaat dat er nog veel energie bespaard kan worden door kritischer om te gaan met belichting. Op bedrijven met groeilampen worden deze lampen meestal aangezet zodra de instraling van de zon onder een bepaalde waarde daalt (met uitzondering van een donkerperiode). Echter de energie-efficiëntie van de belichting kan sterk variëren afhankelijk van de overige teelt- en klimaatcondities. Zo wordt regelmatig belicht op momenten dat de warmte van de WKK niet meer nuttig gebruikt kan worden. De luchtramen worden dan geopend om warmte af te voeren tijdens belichten. Dit betekent niet alleen energieverlies maar kan ook betekenen dat belicht wordt als de CO₂ concentratie van de kaslucht laag is; op deze momenten is het effect van belichting op productie relatief gering. Dit geeft aan dat het optimale moment waarop lampen uitgeschakeld moeten worden nog niet bekend is en dat de energie-efficiëntie van belichting verbeterd kan worden.

In deze studie wordt bepaald hoe de energie-efficiëntie van belichting geoptimaliseerd kan worden. Het project wordt uitgevoerd met roos, waarbij de resultaten op hoofdlijnen van toepassing zullen zijn voor andere gewassen. Eerst wordt vastgesteld of en in welke mate de fotosynthesecapaciteit in de praktijk terug kan lopen (een zogenaamde fotosynthesedip) en onder welke condities dat dit optreedt. De fotosyntheserespons in relatie tot licht, temperatuur en CO₂, zoals die in het gewasgroeimodel beschreven is, wordt geverifieerd middels enkele metingen. Als deze fotosynthesemetingen aanleiding toe geven, wordt in fase B zonodig een gewasgroeimodel aangepast, waarna de energie-efficiëntie van belichting kan worden vastgesteld onder uiteenlopende omstandigheden.

1.2 Doel fase A

Doelstelling van deze studie is een verlaging van het energieverbruik met 5-10% bij belichte teelten, door lampen alleen aan te schakelen op momenten dat het lamplicht efficiënt benut kan worden. Zijn er momenten waarop de fotosynthese minder is dan je op basis van klimaat zou mogen verwachten? Zo ja, wanneer zijn die momenten en is er een verklaring voor?

2. Werkwijze

2.1 Inventarisatie terugval van de fotosynthese

Er is een korte inventarisatie in literatuur gedaan (werkpakket A1) naar terugval van fotosynthesecapaciteit in relatie tot ontwikkelingsstadium en naar terugval van fotosynthese midden op de dag. Tevens zijn een aantal tuinders bevroegd op het voorkomen van momenten dat de CO₂ vraag van de kas laag is. Hierbij zijn vragen opgenomen over op welk moment en bij welk gewasstadium dit voorkomt. Vervolgens werd een geschikte bedrijf geselecteerd (werkpakket A2) waarop de metingen plaats kunnen vinden.

2.2 Data-analyse t.b.v. vaststellen verlaagde fotosynthesecapaciteit

2.2.1 Dataverzameling

Alle drie geselecteerde bedrijven hebben Hoogendoorn klimaatcomputers (van verschillende leeftijd). Daarnaast hebben Hoogervorst en Porta Nova beiden een Growlab plantmonitor staan waarvan de data ook gebruikt kunnen worden. Achteraf bleek de dataverzameling ook minder eenvoudig te zijn dan aanvankelijk gedacht.

Geen van de drie bedrijven beschikte over de KlimLink module, waardoor het verzamelen van de data niet vanachter de PC op PPO gedaan kon worden, maar moest een beroep gedaan worden op derden voor het toesturen van de data. Deze medewerking werd overigens probleemloos verleend.

Aangezien op twee van de drie bedrijven ook Growlab plantmonitoren aanwezig waren, is hiervan dankbaar gebruik gemaakt om, behalve de gegevens uit de klimaatcomputer, aanvullende data uit de plantmonitoren te verzamelen. Uit de klimaatcomputer werden de gegevens betreffende de schakelstand van de assimilatielampen, raamstand, CO₂ dosering, gemeten globale straling en gemeten windsnelheid en -richting gehaald. De CO₂-concentratie en het PAR niveau op gewasniveau waren afkomstig van de plantmonitoren. Door problemen met het uitlezen van de benodigde data is tussentijds bedrijf 3 afgevallen. Hiervoor in de plaats zijn toen de, wel volledige, datasets van een tomatenbedrijf geanalyseerd.

2.2.2 Data-analyse t.b.v. vaststellen momenten met verlaagde fotosynthesecapaciteit

Op basis van de verzamelde data is de terugloopsnelheid in CO₂-concentratie berekend. Aangezien de terugloop in CO₂ niveau, behalve van de fotosynthese, ook afhankelijk is van verliezen door lekkage of via geopende luchtramen, zijn vooral de perioden van belang waarbij de CO₂ terugloopt maar de ventilatieverliezen naar buiten zeer laag zijn. Dit is het geval bij gesloten luchtramen. In een eerste analyse van de 5-minuten metingen werd geen duidelijk beeld verkregen. Er bleken, zowel tussen verschillende dagen als op een dag, redelijk grote verschillen in zowel absolute CO₂ niveaus als CO₂ afname patronen te zijn. In een tweede analyse is er daarom voor gekozen om de data per dag te analyseren. De datasets zijn daartoe omgezet naar grafieken (zie ook Figuur 3.2) en hieruit is, op momenten dat luchtramen gesloten waren en voldoende PAR licht (assimilatiebelichting of natuurlijke straling) aanwezig was, de afname van CO₂ in de tijd berekend.

In deze grafische weergave is een zaagtandpatroon in de CO₂ concentratie zichtbaar. Op momenten in de nacht dat de assimilatiebelichting volledig is ingeschakeld en de luchtramen gesloten zijn, kan hieruit de basisconsumptie worden berekend door, direct nadat CO₂ gedoseerd is, de snelheid waarmee de CO₂ concentratie afneemt (= helling van de zaagtand) te berekenen. Door dit over de hele dag te doen worden er soms momenten zichtbaar waarbij de afname van CO₂ lager is dan dit basisniveau. Als deze momenten dan samenvallen met een voldoende hoog PAR niveau en gesloten luchtramen, vormt dit een aanwijzing dat de efficiëntie van het fotosyntheseproces is verlopen ofwel dat er haperingen in het fotosyntheseproces opgetreden zijn. Door de frequentie waarmee dit optreedt en de

condities te vergelijken waarbij deze verstoringen in het reguliere dagpatroon optreden kan dan mogelijk een oorzaak vastgesteld worden.

2.3 Metingen in de praktijk

Op een aantal dagen dat de terugloop in CO₂-concentratie (lage fotosynthesecapaciteit) naar verwachting gedurende een aantal uren laag is, is met draagbare fotosynthesemeetapparatuur gemeten of de fotosynthese inderdaad terugloopt (werkpakket A5) en of deze terugval parallel plaatsvindt met de achterblijvende terugloopsnelheid in CO₂-concentratie. Om te meten of de efficiëntie van het fotosyntheseproces verloopt (d.w.z. dat er haperingen in het fotosyntheseproces ontstaan) is er gedurende de dag de fotosynthesesnelheid gemeten van verschillende bladeren bij 2 vaste lichtniveaus in de meetcuve van de bladfotosynthese-apparaat.

De werkpakketten A1-A5 richten zich op het vaststellen van een terugval in fotosynthese die groter is dan op basis van klimaatomstandigheden verwacht mag worden. De fotosynthese-efficiëntie kan sterk variëren onder invloed van klimaatcondities zoals licht, temperatuur en CO₂. Voordat in werkpakket B berekeningen van fotosynthese en groei m.b.v. een plantmodel kan worden uitgevoerd, zal de fotosyntheserespons in relatie tot licht, temperatuur en CO₂, zoals die in het model zit, specifiek voor roos geverifieerd te worden door enkele metingen van fotosynthese. Begin januari, eind februari/begin maart en in april zijn lichtresponscurves (metingen bij circa 5 lichtniveaus) gemaakt bij 3 verschillende CO₂ concentraties en 3 verschillende temperaturen. De condities waaronder de lichtresponscurves zijn gemaakt zijn weergegeven in Tabel 2.1.



Figuur 2.1. Metingen aan bladfotosynthese in roos bij Alex Hoogervorst.

Tabel 2.1. *Conditie in de meetkamer waaronder de lichtresponscurves zijn gemaakt.*

Curve	Licht niveau ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	CO ₂ (ppm)	Temperatuur (°C)
LR-1	0 - 100 - 250 - 500 - 750 - 1000	400	20
LR-2	0 - 100 - 250 - 500 - 750 - 1000	700	20
LR-3	0 - 100 - 250 - 500 - 750 - 1000	1000	20
LR-4	0 - 100 - 250 - 500 - 750 - 1000	700	17
LR-5	0 - 100 - 250 - 500 - 750 - 1000	700	23

In het gewas zijn metingen uitgevoerd op vergelijkbare bladeren aan bloemtakken in bloemknop stadium. Er is altijd gemeten aan een blad aan de hoofdstengel in een bladkamer met een oppervlakte van 6.25 cm². Het topblad van het vijfblad van het zesde onbeschaduwde blad onder de bloemknop (knopstadium 0, bloemblaadjes nog net niet

zichtbaar) werd gemeten. De keuze van het blad is bepaald door: a) blad moet volledig ontwikkeld en uitgegroeid zijn; b) blad moet direct aan assimilatiebelichting en zonlicht blootgesteld zijn; c) blad is goed bereikbaar voor de fotosynthesemeter; d) blad is onbeschadigd.

De verschillende niveaus van licht, CO₂ en temperatuur werden aangebracht in de meetcuvet van de draagbare fotosyntheseapparatuur. De plant stond bij de heersende klimaatomstandigheden zoals ingesteld door de tuinder. Elke meetdag is ook een beperkt aantal referentiemetingen uitgevoerd om vast te stellen dat de fotosynthese-efficiëntie niet verloopt gedurende de dag in verband met onderlinge vergelijkbaarheid van de responscurven over een dag.

3. Resultaten Fase A

3.1 Inventarisatie

Op bedrijven met assimilatiebelichting wordt deze meestal pas aangezet wanneer het niveau van de natuurlijke straling onder een bepaalde drempel daalt. Afhankelijk van de voorafgaande én heersende klimaatcondities kan men zich afvragen of dit wel zo efficiënt is.

Belichten op momenten dat de warmte van de WKK niet gebruikt kan worden en afgelucht moet worden is niet zinvol. Ook het belichten bij wijd geopende luchtramen wanneer de CO₂ concentratie nauwelijks hoger dan het buitenniveau is.

Behalve deze economische motieven kunnen er ook andere redenen zijn om te overwegen om niet onmiddellijk de belichting aan te zetten als het stralingsniveau onder een drempelwaarde komt. Daarbij moet dan gedacht worden aan de fysiologische respons van het gewas op de belichting. In een snelle scan van de literatuur is geprobeerd een beeld te krijgen van het optreden van de terugval in CO₂ opname onder omstandigheden die verder optimaal lijken. Bij verschillende gewassen is dit verschijnsel gemeten en gepubliceerd. Het gaat hierbij vaak om complexe interacties.

Op korte termijn verhoogt een hogere CO₂ concentratie de fotosynthese door de carboxylering van Rubisco en koolhydraatsynthese te stimuleren (Faria *et al.*, 1996; Kramer, 1981), resulterend in meer groei. Op lange termijn worden de gunstige effecten van verhoogd CO₂ bepaald door de balans tussen koolhydraatproductie in 'source' bladeren en de capaciteit van de plant deze koolhydraten te gebruiken in de 'sinks' als vruchten en bloemen (Gunderson & Wullschleger, 1994; van Oosten & Besford, 1994).

In sink gelimiteerde planten kan een verlies van fotosynthese efficiëntie het gevolg zijn van de (biochemische) limitering van anorganisch fosfaat en/of regeneratie van ribulose 1,5-bifosfaat (RuBP; Sage, 1991), maar ook van de down-regulering op genexpressie niveau. De down-regulatie van de fotosynthese onder hoog CO₂ wordt nog versterkt door hoge stralingsniveaus (Dorais *et al.*, 1996) en/of lange fotoperioden (Stutte *et al.*, 1996).

Onder hoog CO₂ en hoog stralingsniveau, wordt de fotosynthesesnelheid vooral bepaald door de regeneratie van RuBP en de capaciteit van de sucrose synthesesweg om anorganisch fosfaat te leveren. Tekorten hiervan kunnen uiteindelijk consequenties hebben voor de groei. Het belang van dit soort processen wordt zelden meegenomen bij de productie in (belichte) kassen (Ayari *et al.*, 2000a). Onder Nederlandse kasomstandigheden lijkt dit echter nauwelijks een rol te spelen (Nederhoff, 1994; Dieleman, 2005).

Ook is waargenomen dat bij veel planten die gedurende lange tijd continu aan een hoger CO₂ niveau dan het natuurlijke niveau waren blootgesteld, zowel de huidmondjesdichtheid (aantal huidmondjes per mm²) als de dikte van het palissadenparenchym veranderde (Woodward & Kelly, 1995; Woodward *et al.*, 2002). Bij een analyse van 100 species zijn zowel toenames als afnames in de betreffende parameter gemeten (Woodward & Kelly, 1995). Bij paprika werd echter geen adaptatie aan hoge CO₂ niveaus waargenomen (Dieleman, 2003), hetgeen suggereert dat dit soort reacties op hoog CO₂ niveau niet altijd hoeven voor te komen.

Bij roos is onder andere waargenomen dat na inbuigen de fotosynthese van de ingebogen takken tijdelijk verlaagd was (Kim *et al.*, 2004). Naarmate de ingebogen takken ouder en meer beschaduwd werden nam de fotosynthese capaciteit sterk af (Gutierrez-Colomer *et al.*, 2001). Ook zijn er wel berichten van een dagritme in de reactie van de fotosynthese op licht bij roos (Kittas *et al.*, 2000), die overigens minder werd indien mistapparatuur werd ingezet, wat een verband met de waterhuishouding suggereert. Veel van de publicaties waarin hysteresis wordt beschreven is echter afkomstig uit landen met hogere daglichtniveaus dan in Nederland (Spanje, Griekenland, Israel).

Het aantal publicaties over roos bij Nederlandse kasomstandigheden is zeer beperkt en het is dan ook maar de vraag in hoeverre onder Nederlandse kasomstandigheden hysteresis zal optreden. Voor tomaat, komkommer en paprika is in het verleden geen relatie gevonden tussen fotosyntheseniveau en tijdstip van de dag. Voor een aantal tuinbouwgewassen in Nederland is hysteresis onderzocht door Nederhoff & Vegter (1995), door Dieleman & Kemkes (2005) en Heuvelink (*et al.*, 2006). In deze onderzoeken is beschreven dat de fotosynthese gedurende de dag geen hysteresis of 'middagdip' vertoont, maar uitsluitend een functie is van lichtintensiteit (en CO₂ concentratie en

temperatuur). Nederhoff & Vegter (1994) hebben de gewasfotosynthese van tomaat, komkommer en paprika gemeten. Voor tomaat vonden zij geen relatie tussen het niveau van de fotosynthese en het tijdstip van de dag. Ook voor komkommer en paprika vonden zij geen systematische afname van de gewasfotosynthese in de loop van de dag. Nederhoff en Vegter maakten hierbij het voorbehoud dat zij geen fotosynthesemetingen hebben gedaan op zeer zonnige dagen (lichtniveau was maximaal $640 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en dat een effect op de fotosynthese onder hoog licht omstandigheden niet uit te sluiten is. Heuvelink *et al.* (1996) hebben wel metingen gedaan aan gewasfotosynthese op zeer zonnige dagen (tot ongeveer $1400 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Er was geen systematisch verschil tussen fotosynthese in de ochtend en in de middag (Heuvelink *et al.*, 1996). Ook voor enkele niet-tuinbouwgewassen is beschreven dat er geen verloop van de fotosynthese over de dag te vinden was, bijvoorbeeld voor tarwe tot het stadium van afrijping (Singh *et al.*, 1993). Volgens Hand *et al.* (1992, 1993), die de gewasfotosynthese van aubergine gemeten hebben, is er voor planten die voldoende water krijgen nauwelijks verschil tussen lichtresponscurven gemaakt in de ochtend of de middag.

Bij gerbera (Issa *et al.*, 2001) is gevonden dat de CO_2 assimilatiesnelheid om circa 10.00 uur 's ochtends een piek vertoonde en daarna significant afnam tot ongeveer 60 % tussen 14 en 16 uur. Ook waren er invloeden van seizoenen en substraat aanwezig. Gegevens over lichtintensiteiten ontbreken helaas. De twee onderzochte gerberarassen vertoonden ook verschillen in fotosynthese.

Bij kastomaten zijn duidelijke (dagelijkse) variaties in de fotosynthese efficiëntie waargenomen (Ayari *et al.*, 2000a). Daarbij lijken er twee processen aanwezig te zijn: een lange termijn response op hoge PPF en CO_2 dosering die zich uit in een down-regulatie van de fotosynthese in de loop van het seizoen (winter -> lente) en een korte termijn respons (dagelijks) die zich manifesteert als een middagdepressie. Gesuggereerd wordt wel dat de eerste respons het gevolg is van sink limitering en de tweede meer van onbalans tussen wateropname en -verdamping.

Bij tomaat kon een duidelijk verband met plantleeftijd vastgesteld worden (Ayari *et al.*, 2000b). Bij de vijf jongste bladeren die onder dezelfde omstandigheden ontwikkeld waren, vertoonden die aan planten van 11 maanden oud een duidelijk dagritme met een sterke afname van de CO_2 assimilatiesnelheid ($A\text{-CO}_2$) in de loop van de ochtend en middag; bij planten van 5 maanden oud was dit niet aanwezig. Op basis van verdere metingen werd geconcludeerd dat de terugval in $A\text{-CO}_2$ een gevolg was van limitering op huidmondjesniveau die niet afhankelijk was van de omgevingsomstandigheden maar eerder gerelateerd was aan het ontwikkelingsstadium van de planten. Murillo *et al.* (2000) hebben ook binnen een plant verschillen gemeten. Tussen 9.00 en 12.00 uur waren de fotosynthese en waterbenutting efficiënter in het bovenste bladeren, terwijl in de middag (15.00 uur) de huidmondjes geleidbaarheid en verdamping juist beter waren in de lagere bladeren.

Als dit ook bij roos het geval zou zijn, zou dit dus kunnen betekenen dat een oud en jong gewas verschillende karakteristieken hebben, maar ook hogere en lagere bladeren. Gezien de complexiteit van de lange termijn respons lijkt het voorlopig zinvoller te concentreren op de korte (dagelijkse) respons. Deze zogenaamde middagdepressie is in zuidelijke landen een bekend verschijnsel, zowel in de kas (Ayari *et al.*, 2000a,b) als in de natuur (Franco & Lüttge, 2002). Onder Nederlandse omstandigheden is dit echter nooit duidelijk aangetoond (Nederhoff, 1994; Dieleman, 2005).

Er zijn verschillende oorzaken te bedenken waardoor op de dag de fotosynthesecapaciteit kan afnemen. De oorzaak van een middagdepressie wordt meestal gezocht in een onbalans in de waterhuishouding, maar vaak gaat het om een interactie van meerdere factoren. Het fotosyntheseapparaat zelf kan ook beschadigd zijn en/of zich onvoldoende herstellen (zie hierboven), de (blad)temperatuur kan te hoog oplopen, er treedt biochemische productremming op. Hoewel de huidmondjes weerstand de verdamping aanzienlijk kan beperken, is slecht zelden aangetoond dat hierdoor de fotosynthese ernstig beperkt wordt; die is direct afhankelijk van andere factoren. Gezien echter het belang van verdamping voor de bladtemperatuur is de rol van huidmondjes wat nader bekeken, omdat er ook effecten van licht en CO_2 op de huidmondjes bekend zijn. Hiervoor en voor het nu volgende gedeelte over waterrelaties is gebruik gemaakt van het boek van Kramer & Boyer (1995) en de referenties daarin.

De waterstatus van een plant wordt bepaald door het verschil tussen transpiratie en absorptie. Het is een algemeen gegeven dat de waterabsorptie achterloopt bij de transpiratie. Dat komt omdat voor de absorptie van water een bepaalde weerstand overwonnen moet worden: het substraat laat het water niet zo maar los en de wortel is geen

open buis met gaten waardoor het water naar binnen stroomt maar een orgaan met levende cellen waardoor het water zich moet bewegen.

Slechts in bepaalde zones van de wortel kan water opgenomen worden; deze bevindt zich meestal enkele cm achter de worteltop. Aangenomen wordt dat de absorptie via twee processen kan verlopen: het eerste proces is de actieve of osmotische absorptie in langzaam transpirerende planten waarbij de wortels zich min of meer als osmometers gedragen, het tweede is de verdampingsgedreven passieve absorptie waarbij de wortels als absorptieoppervlakken fungeren (Kramer & Boyer, 1995; Kramer, 1932) en zoals die bij afgesneden bloemen en takken optreedt. De nacht- en ochtendabsorptie verlopen voornamelijk via het osmotische mechanisme, maar naarmate de verdamping de vraag naar water doet toenemen, zal het aandeel van de passieve absorptie toenemen. De passieve opname loopt echter achter op de dagtranspiratie

Daardoor kan verlies van turgor optreden met als gevolg slap gaan van bladeren in de middag, ook wanneer er voldoende vocht in de grond aanwezig is.

Een belangrijke rol bij verdamping is weggelegd voor huidmondjes (stomata). Via deze gespecialiseerde cellen in het blad vindt uitwisseling van water en CO₂ plaats. De uitwisselingsnelheid wordt voor een groot deel bepaald door de mate van opening van de stomata. Het openen/sluiten wordt geregeld via toe of afname van de turgor door toename of verlies van K⁺ en tegen-ionen. Het hormoon abscisinezuur (ABA) werkt direct op dit mechanisme in. In de sluitcellen lijkt een gespecialiseerde CO₂ fixatie aanwezig die verschilt van die in de mesofylcellen van het blad. Mansfield *et al.* (1990) suggereren dat er meerdere processen concurreren om CO₂, waarbij de een remmend en de ander stimulerend is voor stomata opening. Ook kan hoog CO₂ de dichtheid van de huidmondjes beïnvloeden (Woodward & Kelly, 1995). Het openen-sluiten is verder sterk lokaal gereguleerd (via ABA), wat tot gevolg heeft dat in hetzelfde blad de stomata zelden of allemaal open of allemaal dicht zijn, maar meestal statistisch verdeeld zijn.

De belangrijkste fysiologische factoren die de opening van stomata beïnvloeden zijn licht, CO₂, luchtvochtigheid en temperatuur. De openingstoestand van de huidmondjes (meestal gemeten via geleidbaarheidsmetingen) is gevoelig voor fotoperiode en intensiteit. Als na periodes van cyclisch belichten planten in het donker worden gezet, houden de huidmondjes nog enkele dagen het licht-donker ritme aan. Sterke wisselingen in lichtintensiteit veroorzaken een brede variatie in geleidbaarheidsmetingen. Tussen soorten zijn er grote verschillen in respons en reactietijd op lichttoename. Bij komkommer is de reactie van de huidmondjes binnen 20 minuten meetbaar; bij Impatiens worden bij een sterke lichttoename de bladeren onmiddellijk slap, maar pas na uren kon een afname van de geleidbaarheid gemeten worden

Ook wisselingen in de CO₂ concentratie blijken oscillaties in de huidmondjes opening teweeg te kunnen brengen. Nadere beschouwing liet zien dat de huidmondjesopening omgekeerd evenredig is met de CO₂ concentratie: hoe lager de CO₂, hoe opener de huidmondjes en hoe hoger de CO₂, hoe dichter de huidmondjes. Wel wordt de reactie op CO₂ ook nog beïnvloed door lichtintensiteit, temperatuur, RV en aanwezigheid van ABA. Daarnaast is waargenomen dat door de toename van atmosferisch CO₂ in de loop van de laatste 200 jaar de huidmondjesdichtheid en N-inhoud van bladeren is afgenomen.

Lang is verondersteld dat de middagsluiting van stomata vooral veroorzaakt wordt door verlies van de blad-turgor. Blazen van droge lucht langs het blad (dat zorgt voor een snelle afname van de RV) bleek dit echter ook te veroorzaken. De reactie op daling van de RV is sterk soortbepaald.

De experts zijn het er echter niet over eens of de absolute vochtigheid aan het bladoppervlak, verschillen in dampdruk tussen binnen of buiten of de transpiratiesnelheid de opening van de huidmondjes reguleren. Sojka & Stolzy (1980) hebben gemeten dat zuurstofgebrek in het wortelmilieu sluiting van huidmondjes veroorzaakte en suggereren zelfs dat de invloed van zuurstofgebrek in het wortelmilieu minstens zo groot is als de invloed van onvoldoende vocht. Mijn inschatting is dat het hier mogelijk om hetzelfde fenomeen gaat: door zuurstofgebrek kan de wortelfunctie verstoord worden en daarmee de wateropname. Wat is in dit geval oorzaak en wat is gevolg?

Voor temperatuur is het moeilijk om directe en indirect effecten te onderscheiden. Bij vijf boomsoorten is afname van de huidmondjes opening gemeten bij toename van de temperatuur van 20 naar 40°C. Hierbij was echter niet de VPD constant, dus het is niet duidelijk of dit puur een temperatuureffect was. Ook zijn aanzienlijke interacties

waargenomen van lichtintensiteit en temperatuur op de opening van de huidmondjes. Tenslotte bleek ook (heftig) schudden huidmondjessluiting te kunnen veroorzaken.

3.2 Interviews telers

Om te verkennen in hoeverre terugloop van de fotosynthese in de praktijk optreedt, zijn aan verschillende spelers in het veld de volgende vragen voorgelegd:

Zijn er in uw ervaring momenten dat de vraag naar CO₂ laag is? Dit kan zich bijvoorbeeld uiten in een terugval van de CO₂ doseringsfrequentie (aantal keren per uur) of duur van de dosering.

Zo ja, op welke momenten treedt dit dan meestal op?

Is er een verband te leggen met weersomstandigheden? Zonnig, donker, wisselend?

Is er een verband te leggen met een bepaald gewasstadium? Jong, oud, uitlopend, afrijpend.

Hieronder een samenvatting van de antwoorden.

Leon Dukker - Porta Nova

Roos, cv. *Passion* 15 -16.000 lux. Licht gaat aan om 0.00 uur. Bij vorst is er wel licht maar toch zie je geen groei. Naast licht en CO₂ zijn meer factoren van invloed zoals: o.a. bladtemperatuur, verdamping en voeding. Wil graag meewerken aan verder onderzoek. Graag voor eind maart. Kent het pendelen van de CO₂-concentratie tussen min en max niveau. Werkt vanwege hoge belichting al snel met minimum raamstand van 2%.

Alex Hoogervorst

Roos, cv. *Passion*, 10.000 Lux . Heeft sinds zomer 2004 een phytomonitor van Ad Schapendonk en heeft al gezien dat er stressmomenten zijn. Nog geen tijd gehad om er uitgebreider naar te kijken. Wil wel graag meedoen aan verder onderzoek juist om het effect van stress op de groei te bezien. Kent het pendelen van de CO₂-concentratie tussen min en max niveau, 900-1100 ppm. Doet mee in een groepje Passiontelers t.a.v. energiebesparing.

Peter Buren - Perfect Roses

Roos, cv. *Rubinet / New York*, 5000 lux. Veel problemen gehad met rookgasvervuiling doordat ook WKK-gassen werden aangezogen voor- en nadat de Codinox reiniger goed draaide. Vervuilde gassen doen huidmondjes sluiten en stoppen zowel assimilatie als verdamping (gewas ging van de wortel). Verder met name bang voor te lage RV en minder voor hoge kastemperaturen. Vooral wisselingen zijn schadelijk, in de zomer is het gewas aangepast.

Ron v Zwet

Trosroos, 11 cvs, zowel belicht als onbelicht (CO₂ opname lager dan bij gewone rozen!). Kent perioden met lage CO₂-opname. Deels is dit geweten aan vervuilde CO₂ uit de ketel; nu omgeschakeld naar zuiver CO₂ met positief effect. Ziet daarnaast een hogere CO₂-opname bij een gewas dat goed verdampt, vooral bij helder weer. Voor het gevoel moet RV > 65% blijven.

Jaques vd Hulst - Van der Hulst Rozen

Teelt roos bij beperkt belichtingsniveau (4500 Lux). Verstookt relatief weging en schakelt vrij snel het licht uit. Als warmteopslagtank vol is, zal hij niet meer het licht inschakelen. Teelt bij 1000 ppm CO₂, 's nachts 600 ppm. Kent dagen dat de dosering maar 3-4 keer per dag inkomt (donker+hoge vochtigheid). Ook bij stress doet het gewas weinig, lage RV (buis temperatuur >68°C) en hoge kastemperatuur (>30°C). Hij teelt veel op snee en ziet dan hoogste opname in de strekkingsfase van het gewas, minder in de rijpingsfase. In de uitloof fase wordt zelfs het CO₂-niveau verlaagd naar 600 PPM omdat dit niet zo relevant is. Zorgt 's zomers voor handhaving natuurlijk CO₂-niveau (80 m³/3 ha).

Leo Verkade - Agrocare

Trostomaat, 10.000 lux met en zonder afscherming (in kas met scherm (85% doek) mag 's nachts alleen worden belicht als scherm volledig dicht ligt).

In seizoen 2003/04 is nieuw gewas geplant in september met enkele weken plantdatum verschil. In maart was het productieverval tussen de wel en niet geschermd opgelopen tot 6kg/m² in het voordeel van de geschermd kas. In de geschermd kas was de RV vrijwel altijd lager dan in de niet geschermd kas. Rond 1 april moest in de geschermd kas behoorlijk geventileerd worden om oplopen van de kastemperatuur te voorkomen.

Door het ventileren was de RV in deze kas veel lager dan in de niet geschermd kas zonder ventilatie. De gewassen stonden vergelijkbaar maar het gewas in de geschermd kas ging nu zichtbaar achteruit. De productievoorsprong ging geheel verloren en eind augustus stond de kas op een productieachterstand van 1,5 kg/m². Was de achteruitgang van het gewas toe te schrijven aan verminderde assimilatie of door gesloten huidmondjes door een te lage RV.

Wim en Herman Boerlage

Roos, 5000 lux. Problemen gehad met aanzuiging van vervuilde lucht rondom TE. Betere groei zonder dan met CO₂-dosering. Ook problemen met ongelijke pH in de mat (vervuilde leidingen) met groei problemen tot gevolg. Schoonmaken van leidingen gaf direct verbetering.

Harry Keizer - particulier voorlichter, roos

Soms is de CO₂ vraag inderdaad wel laag (weinig tot geen vraag), maar ik kan niet zeggen dat ik dat onder de gegeven (donkere) omstandigheden vreemd vind. Wat ik wel zeker weet is dat de CO₂ vraag vrijwel nihil is als de kwaliteit van CO₂ slecht is. Het gewas neemt dan helemaal niets op. Ook is dan de CO₂-productie van het gewas zelf in de donkerperiode niet goed waarneembaar, terwijl bij goed groeiende gewassen deze dan een duidelijk stijgende lijn te zien geeft. Ook kan de CO₂-vraag laag zijn door een hoog aandeel van natuurlijke CO₂ (vanuit de grond, gewasresten) bij rooien en weer jong aanplanten.

3.3 Selectie bedrijven

Op basis van de gevoerde gesprekken zijn in eerste instantie de volgende bedrijven geselecteerd:

Bedrijf 1: Porta Nova: 16.000 Lux.

Bedrijf 2: Hoogervorst: 10.000 Lux. Hier zijn ook de fotosynthesemetingen uitgevoerd.

Bedrijf 3: Van der Hulst: 4.500 Lux.

Porta Nova en Hoogervorst telen het zelfde ras maar onder verschillende belichting. Van der Hulst teelt ander ras, maar teelt vooral rustig en gaat voor kwaliteit. Gezien de grote verschillen in teeltwijze en belichten tussen de drie bedrijven, werden bij deze drie bedrijven de interessantste gegevens verwacht.

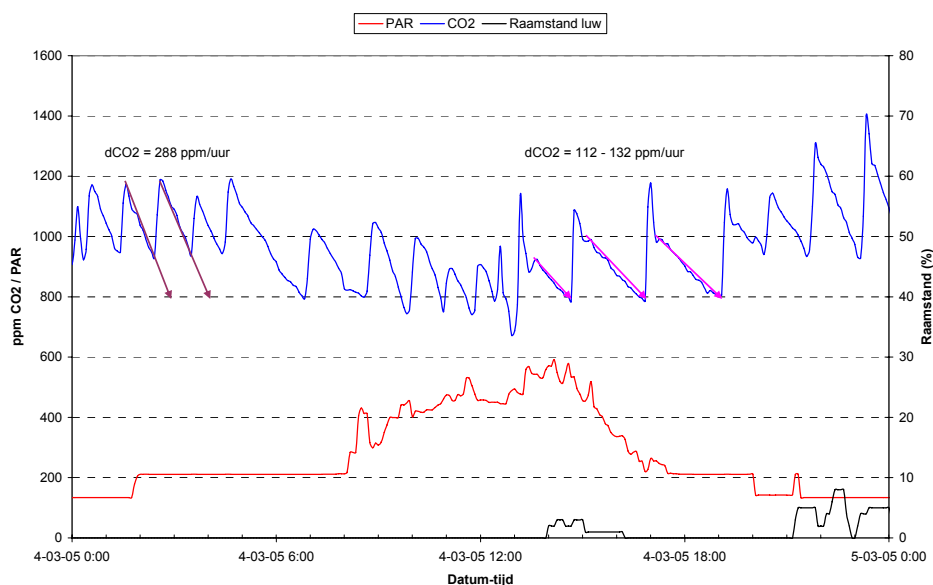
3.4 Dataverzameling en data-analyse

Bij de voorbereiding van de dataverzameling bleek dat de Hogendoorn systemen de data standaard twee weken opslaan en daarna weer overschrijven. Hierdoor waren niet alle gewenste datasets meer beschikbaar op het moment dat met data verzamelen werd begonnen. Ook bleek bij het bedrijf uiteindelijk toch niet mogelijk een deel van de gewenste gegevens uit de computer te halen, waardoor onverwacht bedrijf 3 alsnog afviel; vanwege de korte termijn is er toen voor gekozen met de twee overgebleven bedrijven door te gaan en de datasets van deze bedrijven aan te vullen met die van een belichtend tomatenbedrijf. Aangezien bij de resterende twee bedrijven ook Growlab plantmonitoren geïnstalleerd waren, zijn de data uit de plantmonitoren met die uit de klimaatcomputer tot één grote dataset per bedrijf gecombineerd en kon een deel van de overschreven data alsnog achterhaald worden.

Het verloop van de CO₂ concentratie in de kas zichtbaar als een zaagtandpatroon, waarbij na dosering de CO₂ concentratie zeer snel toeneemt en daarna met een lagere snelheid afneemt (Figuur 3.1). In Figuur 3.1 is te zien dat

om 02.00 uur de assimilatiebelichting volledig is ingeschakeld tot een PAR niveau van circa $210 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Uit de datasets is voor elke dag afzonderlijk de gemiddelde afname in CO_2 concentratie/uur in de nacht (paarse pijlen in Figuur 3.1) bij volledig ingeschakelde assimilatiebelichting en gesloten luchtramen) bepaald.

Hoewel er in de tijd aanzienlijke verschillen waren, bleek de nachtconsumptie over een kortere periode redelijk constant te zijn. In het getoonde voorbeeld is dat gemiddeld 280 ppm uur^{-1} ; gemiddeld lag dit tussen de $170\text{-}250 \text{ ppm uur}^{-1}$. Deze nachtconsumptie is vervolgens als maat voor de basisconsumptie ten gevolge van belichting aangenomen. Vervolgens is gekeken in welke perioden overdag bij hoger of gelijk lichtniveau, en bij gesloten luchtramen, de CO_2 afnamesnelheid ($112 - 132 \text{ ppm uur}^{-1}$) lager was dan deze basisconsumptie. In het getoonde voorbeeld is te zien dat vanaf ongeveer 13.00 uur de helling van de CO_2 afname minder steil verloopt (aangegeven met roze pijlen), terwijl het PAR niveau hoger is en zelfs de ramen iets geopend zijn. Dit vormt dan een aanwijzing voor een verlaagde opnameactiviteit van het gewas.



Figuur 3.1. Voorbeeldgrafiek van CO_2 verloop, PAR en raamopening op dag dat in de middag een terugloop in CO_2 opname optreedt. De helling van de afname in CO_2 concentratie worden aangegeven (bruine lijnen 's nachts en paarsroze lijnen overdag).

Bij de analyse bleek het lastig consistente datasets te vinden. In de periode van 9 januari tot en met 20 maart 2005 waarvan de datasets zijn onderzocht, deed zich op de bedrijven in totaal zes keer een situatie voor waar zich een duidelijk meetbare vermindering in de CO_2 consumptie leek voor te doen (zie Tabel 3.1). Op bedrijf 2 werd geen enkele keer een duidelijke verandering in de CO_2 afname gevonden, mogelijk doordat hier een andere doseringsfrequentie was ingesteld of omdat hier met een lagere lichtintensiteit werd belicht.

Tabel 3.1. Overzicht dagen waarop zich op bedrijven een meetbare vertraging in CO₂ afname voordeed.

Datum	Hoogste CO ₂ afname (ppm uur ⁻¹)	Laagste CO ₂ afname (ppm uur ⁻¹)	Tijdstip dip(uur)
13-2-2005	246	109 - 123	13.25
15-2-2005	264	81	13.00
18-2-2005	277	195	12.30
22-2-2005	232	55	14.45
03-3-2005	204	70	15.15
04-3-2005	288	112 - 132	13.40

Uit de analyse blijkt dus dat zich in de periode januari tot midden maart in (zeer) beperkte mate perioden voordoen dat de CO₂ opname met 50-70% wegzakt. Er kon geen verband gelegd worden tussen het teruglopen van CO₂ afname en bepaalde weersomstandigheden. De vermindering deed zich zowel op dagen met een laag als op dagen met een hoog PAR niveau voor. Hierdoor zijn moeilijk harde uitspraken te doen, maar toch lijken er wel een aantal trends aanwezig:

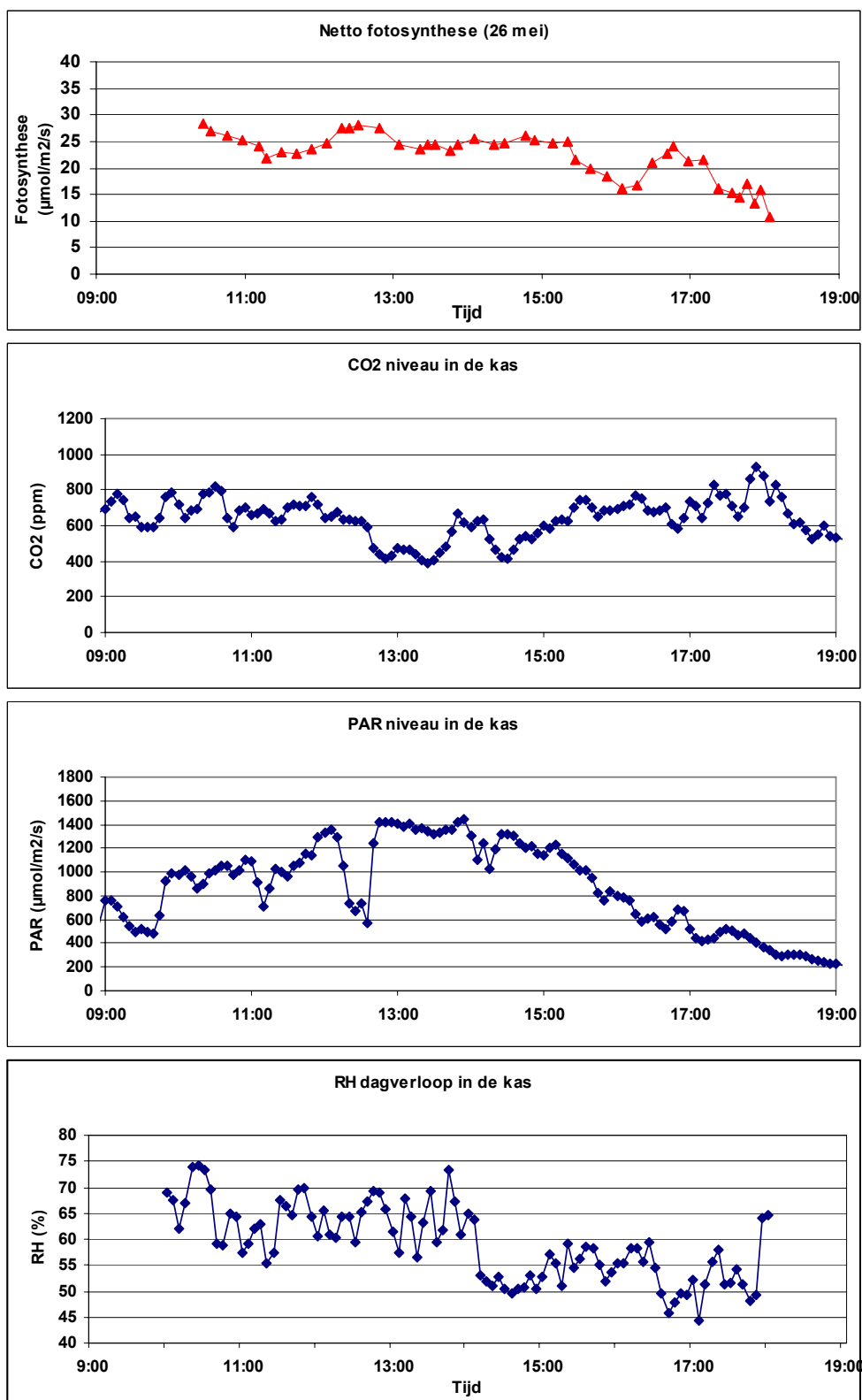
Onregelmatig en beperkt komen overdag wel momenten voor dat de CO₂-afnamesnelheid lager is dan de nachtafname onder alleen assimilatiebelichting. Niet alleen gebeurde dit aan het eind van de middag bij afnemend buitenlichtniveau, maar soms trad het ook eerder op de middag op. Als het zich voordeed was dit altijd na 12.00 uur (wintertijd). Er lijkt een verband te bestaan met het de verlopen tijd en het verschil tussen de hoogste en de laagst gemeten waarde van de CO₂ consumptie. Dit ligt waarschijnlijk aan het geleidelijk wegzakken van de fotosynthese over de dag zoals waargenomen in de metingen (Zie sectie 3.5). De nachtconsumptie aan CO₂ over een beperkte periode lijkt redelijk constant. Er is wel variatie maar over het algemeen is bij volledig ingeschakelde assimilatiebelichting een regelmatige afname tussen de 170-250 ppm uur⁻¹. Na zonsopgang zie je de CO₂ afnamesnelheid sterk toenemen, deels door een hogere fotosynthese en deels doordat er meer gelucht wordt.

De conclusie lijkt gerechtvaardigd dat een afname van de fotosynthese gedurende de dag in de hier geanalyseerde meetperiode slechts sporadisch is opgetreden. In de meeste gevallen viel deze afname op verschillende dagen en duurde slechts enkele uren, waarna weer herstel tot een 'normaal' basisniveau optrad. De uitzondering hierop vormden 3 en 4 maart, toen een plotselinge koudegolf van enkele dagen op is getreden. Dit geeft al aan dat het zeer moeilijk zal zijn om een eventuele middagdip te herkennen en te voorspellen aan de hand van de CO₂-concentratie, hierop vooraf adequaat in te spelen en daarmee een grote besparing te bereiken. In het vroege voorjaar lijkt het wegzakken van de fotosynthese in de middag daarom weinig relevant te zijn, wat in overeenstemming is met waarnemingen zoals gedaan bij groentegewassen (Nederhoff, 1994; Dieleman *et al.*, 2005; Heuvelink *et al.*, 1996). De vraag lijkt zelfs gerechtvaardigd of het hier om een echte middagdepressie gaat of dat hierbij andere oorzaken een rol spelen. Wellicht dat in het late voorjaar en hoogzomer dit verschijnsel vaker en gedurende langere perioden optreedt, maar dit is dan juist de periode waarin het minst belicht wordt zodat weinig bespaard kan worden. Het volgen van de CO₂ concentratie op kasniveau lijkt echter een veel te grove en onnauwkeurige parameter om hierover dan betrouwbare uitspraken te doen. Misschien dat het volgen van de CO₂ concentratie in bladkamers gerichtere aanwijzingen kan geven.

3.5 Meting van het verloop bladfotosynthese gedurende de dag

In het voorjaar zijn op acht dagen metingen gedurende de dag vanaf ca. 10.00 tot 18.00 uur uitgevoerd aan de rozenteelt bij Alex Hoogervorst. Elke meting duurde ca. 10 minuten. De metingen zijn uitgevoerd bij 500 μmol m⁻² s⁻¹ PAR en 700 ppm CO₂ in de bladkamer. Deze metingen zijn uitgevoerd om te zien of de fotosynthese terugloopt (fotosynthesedepressie) en of dat gebeurt in relatie tot een verandering in de CO₂ concentratie. Deze meting is een test om vast te stellen of een terugval in fotosynthese groter is dan op basis van klimaatomstandigheden verwacht mag worden. Dit zouden haperingen in het fotosyntheseproces genoemd kunnen worden. Ook als er geen

haperingen zijn varieert de fotosynthese-efficiëntie sterk onder invloed van klimaatcondities; met name de interacties tussen licht, temperatuur en CO_2 zijn hierbij van belang.



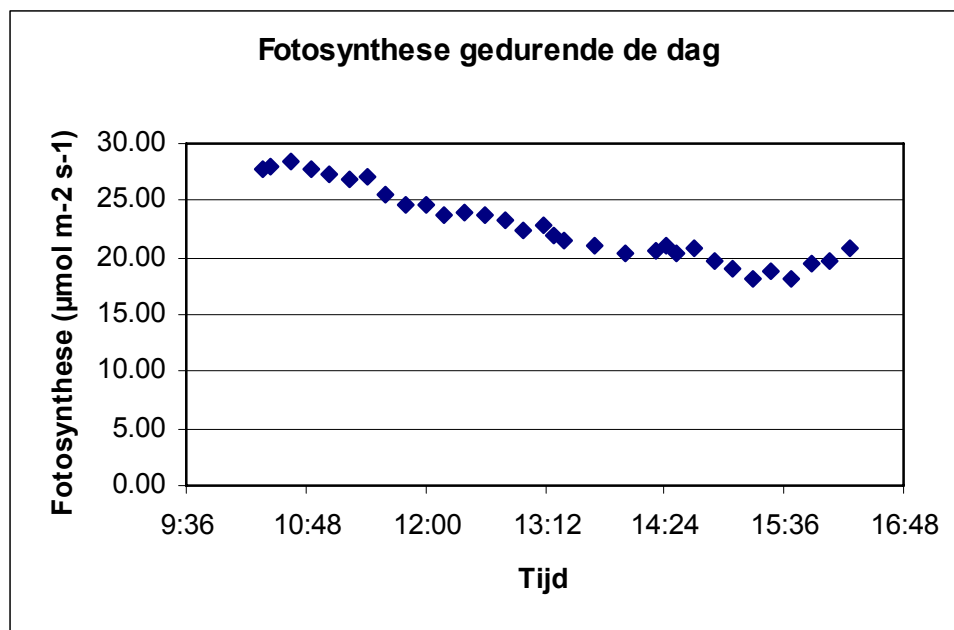
Figuur 3.2. Voorbeeld van metingen van de netto fotosynthese, het CO_2 verloop en PAR niveau in de kas. Het betreft metingen op 26 mei, 2005. Fotosynthese is gemeten bij $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR en 700 ppm CO_2 in de bladkamer.

Figuur 3.2 geeft de metingen weer op één van de acht meetdagen bij roos. Het betreft een dag waarop een middagdepressie was waar te nemen. Zes van de dagen vertonen een vergelijkbaar beeld van het verloop van de fotosynthese en CO₂ gedurende de dag.

Onder het verloop van de fotosynthese is het CO₂, PAR niveau en RV in de kas weergegeven. Er lijkt geen relatie te bestaan tussen het verloop van de fotosynthese in de meetcuve bij 700 ppm CO₂ en de CO₂ concentratie in de kas. Ondanks de veelvuldig geopende ramen in het voorjaar, is CO₂ concentratie eerder aan de hoge kant dan te laag, overwegend tussen de 800-1000 ppm overdag, terwijl deze in Figuur 3.2 schommelt tussen 600-800 ppm met een terugval tot 400 ppm rond 13.00 uur. Het verloop van de RV gedurende deze dag lijkt een aanwijzing te zijn dat een afname in de fotosynthese gerelateerd is aan vocht, mogelijk de damp druk deficit, water in de mat of tijdstip van watergift.

Er zijn aanwijzingen dat een langere blootstelling aan hogere lichtintensiteit op het midden van de dag een rol zou kunnen spelen bij het optreden van een middag depressie. Dit zou kunnen betekenen dat er door overmatige transpiratie of wijze van watergiften geven gedurende de dag een vochttekort ontstaat dat onvoldoende aangevuld wordt 's middags, waardoor de fotosynthesesnelheid afneemt. Echter, de bladtemperatuur, een eventuele vochtgebrek en ophoping van assimilaten zijn in de experimentele fase van het project niet gemeten.

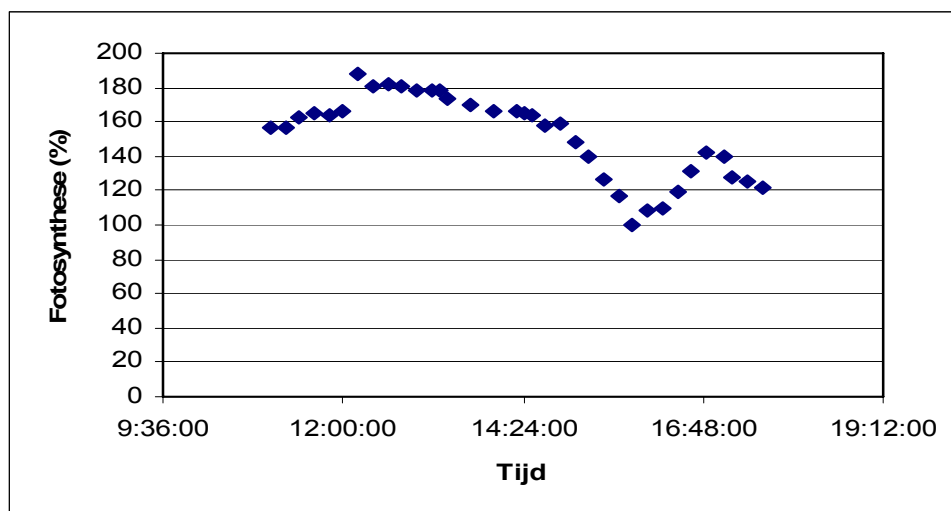
Wanneer de fotosynthesemetingen gedurende de dag worden gemiddeld, komt een beeld van het verloop van de fotosynthese naar voren zoals in Figuur 3.2 is te zien.



Figuur 3.3. Het verloop van de fotosynthese gedurende de dag, gemiddeld over de dagen waarop een middagdepressie waargenomen werd.

Gemiddeld over de dagen die een middagdepressie vertoonden, verliep de fotosynthese van ca. 28 µmol CO₂ m² s⁻¹ om 10 uur 's morgens terug tot ca. 18 µmol CO₂ m² s⁻¹ 's middags (Figuur 3.3). Bij zonnig weer liep de fotosynthese eerder terug op de dag en ook vaak verder terug. Op 6 van 8 meetdagen is er duidelijk sprake van een middagdepressie in het verloop van de fotosynthese zoals weergegeven in Figuur 3.2 voor één dag (26 mei) en gemiddeld over 6 dagen (Deze middagdepressie vond plaats tussen 15.00 en 17.00 uur, waarna het leek te herstellen in de uren daarna.

Om een algemeen beeld te geven van de metingen waarin een middagdepressie optrad, is gebruik gemaakt van de voortschrijdende gemiddelden (zie Figuur 3.4). Het beeld is genormaliseerd door het laagste punt in het verloop van de fotosynthese (de middagdepressie) op 100 % te stellen en de overige fotosynthesemetingen daaraan te relateren. In Figuur 3.4 is duidelijk te zien dat er sprake is van een middagdepressie, waarna een herstel optreedt. Hoe het verloop van de fotosynthese in de daarop volgende avonduren onder invloed van overwegend assimilatiebelichting is niet bekend.



Figuur 3.4. Het verloop van de fotosynthese gedurende de dag, genormaliseerd naar de laagste punt (tijdstip waarop de middagdepressie optrad), gemiddeld over de dagen waarop een depressie waargenomen werd.

Een dergelijke teruggang en dip is vaker gezien in de praktijk door onderzoekers. Analyse van de beschikbare data in dit project liet zien dat wanneer de gesommeerde gemiddelde fotosynthese tussen 13.00 en 15.00 uur hoger werd dan ca. $6 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, reductie van de fotosynthesesnelheid optrad. De dip en achteruitgang in fotosynthesesnelheid heeft naar alle waarschijnlijkheid te maken met een suboptimale vochtvoorziening, of een negatieve feedback van assimilatieophoping in het blad. Beide zouden te meten zijn, maar dat zou een hele nieuwe meetreeks betekenen.

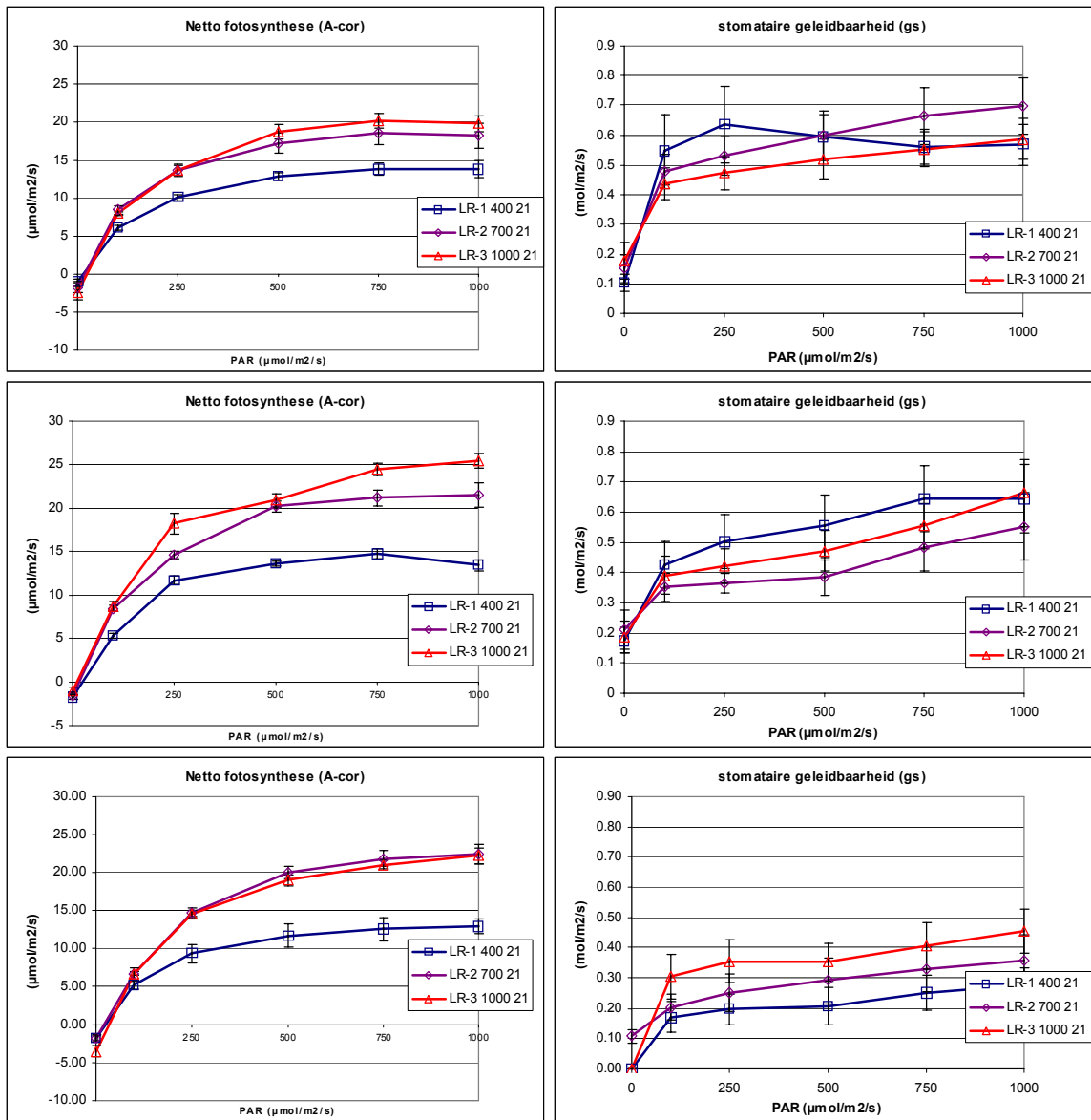
3.6 Verificatie van fotosynthese respons: interacties met licht, CO₂ en temperatuur

De werkpakketten A1-A5 van dit project richten zich op het vaststellen van een terugval in fotosynthese die groter is dan op basis van klimaatomstandigheden verwacht mag worden. Ook als er geen haperingen zijn, varieert de fotosynthese-efficiëntie sterk onder invloed van klimaatcondities; met name de interacties tussen licht, temperatuur en CO₂ zijn hierbij van belang. Voordat in werkpakket B berekeningen van fotosynthese en groei m.b.v. een plantmodel zullen worden uitgevoerd, dient de fotosyntheserespons in relatie tot licht, temperatuur en CO₂, zoals die in het model zit, specifiek voor roos geverifieerd te worden door enkele fotosynthese responscurven te meten.

Vanaf eind januari, in februari/maart en begin april werden een drietal meetcampagnes uitgevoerd op het bedrijf van Alex Hoogervorst. Daarin werden lichtresponscurven gemaakt door de bladfotosynthese aan roos te meten bij 6 lichtniveaus, bij 3 verschillende CO₂ concentraties en 3 verschillende temperaturen. De verschillende niveaus van licht, CO₂ en temperatuur werden aangebracht in de meetcuve van de draagbare fotosyntheseapparatuur. De teelt

stond bij de heersende klimaatomstandigheden zoals ingesteld door de tuinder. Elke meetdag werden ook referentiemetingen uitgevoerd om vast te stellen of de fotosynthese-efficiëntie niet verloopt gedurende de dag in verband met onderlinge vergelijkbaarheid van de responscurves gedurende een dag.

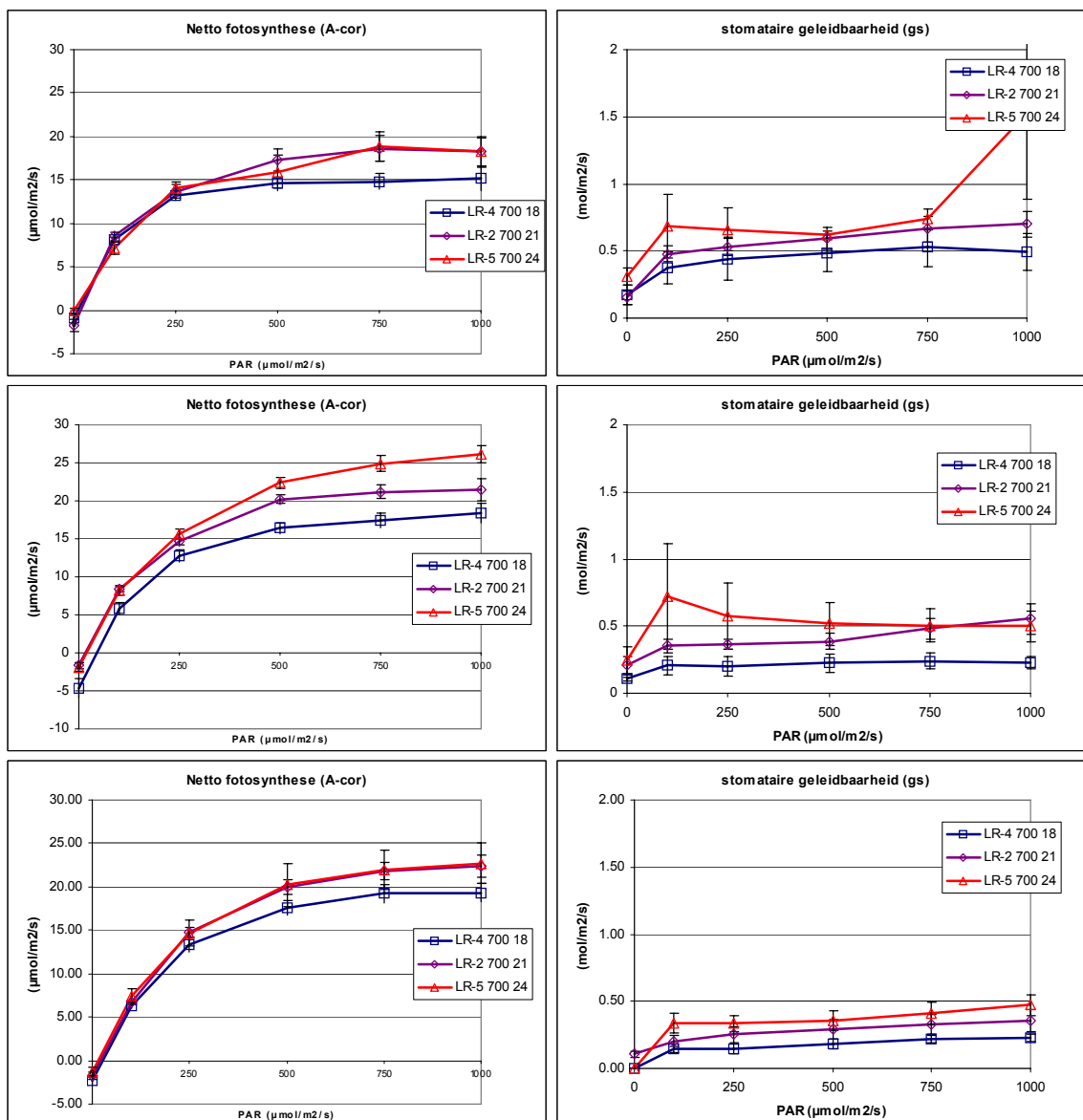
De lichtresponscurves bij verschillende CO₂ niveaus zijn weergegeven in Figuur 3.5. De maximum fotosynthese bij 400 ppm CO₂ is beduidend lager dan bij 700 en 1000 ppm CO₂ en alle curves volgen de te verwachten patronen. In januari ligt het maximum bij 15-20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en stijgt in de volgende metingen naar 20-25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij 700 en 1000 ppm CO₂, terwijl het maximum bij 400 ppm CO₂ blijft bij $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.



Figuur 3.5. Lichtresponscurves (fotosynthese en stomataire geleiding) onder invloed drie verschillende CO₂ niveaus (300, 700 en 1000 ppm CO₂) bij 21°C. De bovenste set is gemeten eind januari, de tweede eind februari en de laatste set begin april.

Ook de fotosyntheseresponscurves onder invloed van temperatuur geven een normaal beeld weer (Figuur 3.6). Daarin is te zien dat de maximum fotosynthese bij 21°C gelijk of hoger is dan bij 24°C, terwijl die bij 18°C steeds achter blijft. De huidmondjes (stomataire geleiding) gaan snel open al bij laag licht, maar snel daarna bereiken de

huidmondjes openingtoestand het maximum waarop de toenemende lichtintensiteit niet veel invloed meer heeft. In het model wordt een maximale fotosynthese van ca. $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ berekend, maar de metingen laten nu zien dat het iets lager is, nl. $20\text{-}25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, wat komt overeen met de bevindingen uit het project 'Energiebesparing mobiele belichting roos' (Marissen *et al.*, 2005). Deze gemeten waarden wijken dus af van de parameter in het model en zal het daarom het voor roos aangepast moeten worden in onderdeel B van dit project. Omdat de fotosynthese neemt af gedurende de dag zoals te zien is in Figuur 3.3 zal het model op dat punt ook aangepast moeten worden. Bezien moet worden of in het model rekening gehouden moet worden met de verschillende maximale fotosynthesewaarden gemeten tussen eind januari en begin april. Op basis van de fotosyntheseresponscurven alleen is dat niet mogelijk. Daarvoor moeten deze analyse in onderdeel B uitgevoerd moeten worden.



Figuur 3.6. Lichtresponscurves (fotosynthese en stomataire geleiding) onder invloed van 700 ppm CO_2 en drie verschillende temperaturen (18, 21 en 24°C). De bovenste set is gemeten eind januari, de tweede eind februari en de laatste set begin april.

4. Conclusies Fase A

Inventarisatie

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat het optreden van lange (seizoen) en korte (dagelijks) termijn variaties in fotosynthese efficiëntie en daarmee de CO₂ opname regelmatig voorkomen in tal van verschillende plantensoorten. Mogelijk de belangrijkste factoren daarbij zijn licht(intensiteit), CO₂ en temperatuur, hoewel ook de waterstatus van het gewas niet genegeerd mag worden.

Het is aannemelijk dat ook bij roos dit proces zal optreden. Ook al zijn daar in de literatuur geen concrete aanwijzingen voor gevonden, in de praktijk wordt regelmatig waargenomen dat de CO₂-dosering overdag afneemt. Dit suggereert dat op deze momenten het gewas om de één of andere redenen minder CO₂ opneemt of verwerkt en dat de fotosynthesecapaciteit ook lager is geworden.

Indien dit soort momenten herkend kan worden of de oorzaak van de terugloop betrouwbaar vastgesteld kan worden, zou dit de teler kunnen helpen veel gericht, en daardoor efficiënter, met zijn lichtinstallatie om te springen.

Is een middagdepressie te voorspellen?

Er is gebleken dat zich in de periode januari tot midden maart in zeer beperkte mate perioden voordoen waarin de CO₂ opname met 50-70% wegzakt. Er kon geen verband gelegd worden tussen het teruglopen van CO₂ afname en bepaalde weersomstandigheden. De vermindering deed zich zowel op dagen met een laag als op dagen met een hoog PAR niveau voor. Hierdoor zijn moeilijk harde uitspraken te doen.

Voorspellende waarde lijkt er, aan de hand van de geanalyseerde datasets, nauwelijks mogelijk. De dagen waarop in de periode februari/maart iets van een middagdip in CO₂ afname te zien was, vertoonden onderling een grote variatie in PAR (soms hoog, soms laag), zodat een verband met PAR er niet lijkt te zijn.

Het lijkt erop dat we behoorlijk geluk hebben gehad dat we überhaupt iets hebben kunnen zien aan de CO₂ niveaus bij Porta Nova en het tomatenbedrijf. Wij hebben de indruk dat de manier van CO₂ doseren (en meten) wel eens een rol zou kunnen spelen bij het wel of niet zichtbaar worden van de dip in CO₂ consumptie. Hoewel de gemiddeld CO₂ concentraties in de meetperiode bij Porta Nova en Hoogervorst exact dezelfde waarde hadden (914 ppm), krijgen we uit de grafieken af en toe de indruk dat Alex Hoogervorst zijn dosering eerder laat terugkomen dan Porta Nova, waardoor een vlakke zaagtand ontstaat. Mogelijk zou dat kunnen verklaren waarom er geen dip ontdekt kon worden. Met alleen de data van Alex Hoogervorst, zou er waarschijnlijk geen indicatie zijn geweest voor het optreden van een depressie. Daaruit moet geconcludeerd worden dat het volgen van de CO₂ concentratie op kasniveau te grof en te onbetrouwbaar is om als indicator voor een fotosynthesedip van het gewas te kunnen fungeren.

Treedt een middagdepressie op?

Metingen aan roos gedurende de dag laten een middagdepressie zien die vaak optreedt. Deze middagdepressie kan niet gerelateerd worden aan de CO₂ concentratie in de kas. Volgend op de middagdepressie, lijkt er een herstel op te treden. Analyse van klimaatdata geeft aan dat een middagdepressie in het voorjaar lijkt niet zo vaak voor te komen als van tevoren gedacht, althans niet op basis van de CO₂ concentratie in de kas. De CO₂ concentratie lijkt een minder betrouwbare graadmeter te zijn, het lijkt te grof en wordt toch teveel beïnvloed door teeltmaatregelen, waardoor betrouwbare metingen te weinig voor kunnen komen. Het overzicht van de literatuur geven aan dat de middagdepressie lijkt niet voorspelbaar te zijn door veranderingen in klimaatcondities zoals m.n. veranderingen in de CO₂ concentratie.

Lichtresponscurves

De lichtresponscurves voor roos geven een normaal beeld te zien. In het model is de maximale fotosynthese ca. $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, maar de metingen laten nu zien dat het iets lager is, nl. $20\text{-}25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Deze gemeten waarden wijken dus af van de parameter in het model. en zal het daarom het voor roos aangepast moeten worden in onderdeel B van dit project.

Analyses in onderdeel B van dit project moeten uitwijzen of rekening gehouden moet worden in het model met de verschillende maximale fotosynthesewaarden in het seizoen, gemeten tussen eind januari en begin april.

5. Fase B: Modelberekeningen ten behoeve van optimalisering energie-efficiëntie

5.1 Definitie van standaardteelt voor het kasmodel

5.1.1 Kasconstructie

Een rozenkas is in de regel uitgevoerd als Venlo-kas met een poothoogte van rond de 5 meter. Als representatief kasoppervlak is uitgegaan van 2 ha. Het kasdek bestaat uit twee kappen van 4 meter op een tralie van 8 meter en een pootafstand van 4.5 meter. Onder de tralie liggen 6 teeltbedden en tussen deze teeltbedden ligt het hoofdverwarmingssysteem, bestaande uit 12 51-ers per kap. Rozenkassen hebben meestal ook een bovennet, bestaande uit 6 buizen van 28 mm. Hierop is in de regel de condensor aangesloten.

5.1.2 Kasklimaat

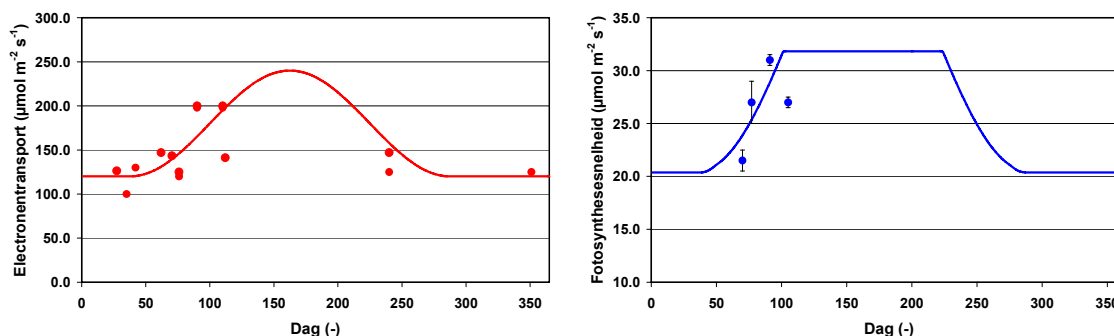
In de berekeningen is voor de koude periode van het jaar met een vrij laag temperatuursetpoint gerekend (19 °C overdag en tussen 20.00 en 04.00 uur 15 °C). In de warmere periode van het jaar (april t/m augustus) is voor de dagtemperatuur 22 °C gehanteerd en voor de nachttemperatuur 19 °C. Met name 's nachts is de ventilatielijndicht op de stooklijn gezet, teneinde te voorkomen dat etmaaltemperaturen teveel oplopen. Overdag staat de ventilatielijndicht 2.5 °C boven de stooklijn. De stooklijn wordt overdag ook beïnvloed door een lichtverhoging. Deze zorgt ervoor dat het setpoint voor de temperatuur 2 °C oploopt over een traject van 100 tot 300 W m² globale straling. Er wordt veel gebruik gemaakt van 'minimum buis'. Deze staat jaarrond dag en nacht op 45 °C ingesteld, maar wordt op lichtintensiteit afgebouwd in het traject van 200 tot 300 W m². De bovengenoemde instellingen dienen voor het zover mogelijk opkrikken van de warmtevraag om de afvalwarmte van de WKK-installatie kwijt te kunnen raken. Indien de luchtvochtigheid boven de 80 % RV komt, wordt het raam geopend om de luchtvochtigheid te kunnen verlagen. CO₂-dosering vindt plaats door middel van WKK- en ketelrookgassen van zonopkomst tot een uur voor zonsondergang, maar ook tijdens belichting. De doseersnelheid is 150 kg ha⁻¹ uur⁻¹ en het setpoint voor de CO₂-concentratie in de kas is 1000 ppm. Voor de berekeningen wordt roos het hele jaar belicht, met uitzondering van de donkerperiodes (4 of 8 uur) en wordt de belichting uitgeschakeld bij verschillende drempelwaarden van de buitenstraling. In de verschillende scenario's worden de lichtintensiteiten en het aantal uren per dag gevarieerd. De donkerperiode gaat in om 20:00 's avonds. In de cases met 4 uur donker gaan de lampen dus om 24:00 weer aan en in de cases met 8 uur donker gaat de belichting om 04:00 weer aan. Verandering in het aantal belichtingsuren ten gevolge van een andere keus van de donkerperiode vallen dus allemaal in het laag-tarief tijdvak. Ten behoeve van de lichtafscherming wordt een voor 95% gesloten doek gebruikt. Het doek gaat dicht wanneer de belichting aan is, of wanneer het 's nachts kouder is dan 8 °C.

5.1.3 WKK

In de helft van de doorgerekende scenario's wordt gebruik gemaakt van een WKK. Bij kleine lampvermogens is het WKK-vermogen gelijk gekozen aan het lampvermogen. Echter bij een belichtingsintensiteit van meer dan 60 W m² wordt het surplus aan benodigd elektrisch vermogen ingekocht uit het openbaar net. De grootste WKK-installatie waarmee gerekend is heeft dus een elektrisch vermogen van 60 W m². Qua elektrisch rendement van de WKK is gerekend met 36 %. Het thermisch rendement is gesteld op 55 %. Het energievoorzieningsysteem is uitgerust met een buffer van 120 m³ ha⁻¹.

5.2 Aanpassingen in het gewasmodel

Uit de fotosynthesemetingen die in voorgaande hoofdstukken (Fase A) beschreven zijn, kan geconcludeerd worden dat de fotosynthesesnelheid in de zomer hoger ligt dan in het voor- en najaar. Dit blijkt ook uit beschikbare gegevens uit andere projecten (Figuur 5.1), cf. 'Energiebesparing mobiele belichting roos' (Marissen *et al.*, 2005) en 'Effecten van langdurig hoog CO₂ op de groei en fotosynthese bij paprika' (Dieleman *et al.*, 2003).



Figuur 5.1 Simulatie (—) en beschikbare metingen (●) in voor- en najaar van elektronentransport en de snelheid van het fotosyntheseprocess ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en simulatie (—) en beschikbare metingen (●) in het voorjaar van maximale fotosynthesesnelheid ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) afhankelijk van de dag in het jaar.

In het gewasgroei-simulatiemodel INTKAM (Gijzen *et al.*, 1998; Marcelis *et al.*, 1998) had de maximale fotosynthesesnelheid oorspronkelijk een waarde van ca. $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ die het gehele jaar gehaald zou kunnen worden, afhankelijk van bladtemperatuur en CO₂ concentratie in de kas. Metingen in roos in het vroege voorjaar laten echter zien dat de maximale fotosynthesesnelheid iets lager ligt in deze periode, ca. $20\text{-}25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Deze gemeten waarden wijken dus af van de parameters in het model en het model voor roos is daarmee getest. Er is een seizoensafhankelijkheid voor de fotosynthesesnelheid in het model geïntroduceerd, gebaseerd op gegevens uit dit project en uit eerdere projecten (Dieleman *et al.*, 2003; Marissen *et al.*, 2005). Hierbij kan de maximale fotosynthesesnelheid nog steeds ca. $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ zijn (plateau), maar deze waarde kan pas in de loop van het jaar gehaald worden en ligt lager in het vroege voorjaar en in het najaar (Figuur 5.1).

Naast de seizoensinvloed, is eveneens op enkele meetdagen in dit project een middagdepressie (tussen 15.00 en 17.00 uur) in de fotosynthesesnelheid waargenomen bij roos, die niet in verband kon worden gebracht met de luchttemperatuur en de CO₂ concentratie in de kas. Er zijn wel aanwijzingen gevonden dat een langere blootstelling aan hogere lichtintensiteit op het midden van de dag een rol zou kunnen spelen. Dit zou kunnen betekenen dat er door overmatige transpiratie een vochttekort ontstaat dat niet aangevuld is, waardoor de fotosynthesesnelheid afneemt. Ook zou het mogelijk kunnen zijn dat bij deze continue hoge stralingsintensiteiten zoveel assimilaten worden geproduceerd, dat deze niet snel genoeg afgevoerd kunnen worden, waardoor de fotosynthesesnelheid geremd wordt ('feedback inhibitie'). Bladtemperatuur, vochtgebrek en ophoping van assimilaten zijn in de experimentele fase van het project niet gemeten waardoor de werkelijke oorzaak moeilijk te achterhalen is.

De middagdepressie is gesimuleerd met INTKAM, door de fotosynthesesnelheid met maximaal 10 % te reduceren tussen 15.00 en 17.00 uur, maar alleen als de gemiddelde fotosynthese tussen 13.00 en 17.00 uur hoger werd dan $6 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Deze drempelwaarde van $6 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ is gebaseerd op de metingen (dit project), zonder dat de precieze oorzaak achterhaald kon worden. Deze aanpassing van het model had als resultaat dat de gesimuleerde jaarlijkse drogestofproductie van roos met ca. 0.5 % afnam voor de referentieteeft.

De afname van de fotosynthese over de dag die is vastgesteld in dit project kon niet gerelateerd worden aan kasomstandigheden. Wel werd duidelijk uit de metingen dat tot 10 uur na belichten er weinig tot geen reductie van de fotosynthese optreedt en dat de reductie maximaal 30% is (Figuur 3.3). De hypothese dat hysteresis bij roos een

belangrijke rol kan spelen is daarom opgenomen in INTKAM, door een reductiefunctie op te nemen die na 10 uur belichten een steeds grotere invloed krijgt, tot de maximum reductie van 30 % na ca. 6 uur bereikt is. Hierdoor wordt het belichten in de middaguren minder efficiënt en heeft een langere donkerperiode (van 20.00 - 04.00 uur) tot gevolg dat er overdag efficiënter met het aangeboden licht kan worden omgegaan.

Het effect van een teruglopende fotosyntheseactiviteit (tot 30 %) na 10 uur belichten resulteerde in een verminderde drogestofproductie van $4921.1 - 4372.6 = 548.5$ g DM m², dat overeenkomt met ca. 11% van de totale drogestofproductie onder de referentieomstandigheden uit KWIN (scenario met WKK, 20 uur belichten, intensiteit 15 W m² PAR en stralingsdrempel 100 W m²: KWIN, 2004). Door het fitten van de drogestofproductie op het aantal geproduceerde takken uit KWIN (2004), kan het effect tussen de scenario's toch op een eenduidige manier bekeken worden.

Gezien de geringe reductie van de gesimuleerde drogestofproductie bij het introduceren van de middagdip, is ervoor gekozen om deze modelaanpassing niet te gebruiken bij de verdere analyses. Wel is rekening gehouden met de afname van de fotosynthese over de dag (tot maximaal 30%), zoals hierboven is beschreven.

Voor de toekomst betekent dit dat hysteresis bij roos in NL onderzocht moeten worden om: a) aan te tonen dat het fenomeen in NL voorkomt, en b) om het effect te kwantificeren.

5.3 Vaststellen van energie-efficiëntie van belichting

5.3.1 Simulatiescenarios

Met het kasmodel KASPRO (de Zwart, 1996) en het aangepaste gewasmodel INTKAM (Gijzen *et al.*, 1998; Marcelis *et al.*, 1998), zijn kasklimaat, energieverbruik, CO₂-uitstoot, energie-efficiëntie en gewasproductie berekend voor verschillende belichtingstrategieën. Er is uitgegaan van de standaardteelt van roos, waarbij een aantal factoren gevarieerd zijn (zie ook Tabel 5.1):

- Wel (1) of geen (0) Warmtekrachtkoppeling (WKK) met rookgasreiniger.
- Donkerperiode van 4 en 8 uur (overeenkomstig met een belichtingsduur van 20 en 16 uur).
- Vijf niveaus van belichtingsintensiteit (2000, 4000, 6000, 8000 en 1000 lux, overeenkomend met 5, 10, 15, 20 en 25 W m² PAR).
- Tien niveaus van buitenstraling waarboven de lampen worden uitgeschakeld (tussen 20 tot 200 W m² in stappen van 20 W m²).

Dit betekent dat in totaal 200 modelscenario's zijn doorgerekend met de weergegevens (uurwaarden) van een representatief jaar voor Nederlandse omstandigheden (naar het 'SEL-jaar' van Breuer & van de Braak (1989)). Het SEL-jaar is met dezelfde methodiek opnieuw gedefinieerd, waarbij weersgegevens van na 1989 zijn geïntegreerd. Dit 'nieuwe' SEL-jaar is gebruikt bij de berekeningen.

5.3.2 Calibratie van de rozenproductie

Het model KASPRO berekent eerst het kasklimaat, energieverbruik en CO₂ uitstoot. Deze gegevens zijn vervolgens gebruikt in het model INTKAM om de gewasproductie (g drogestof m² en # takken m²) te berekenen. Om aan te sluiten bij de praktijk zijn de gesimuleerde drogestofproducties gecalibreerd op gegevens van takproductie van 2 roos cultivars (cv. *Red Berlin* en cv. *Sphinx*) die verschillen in takproductie en opbrengst (Tabel 5.2).

Tabel 5.1. Factoren voor de simulatie van een standaard rozenteelt. De (vetgedrukte) combinatie van WKK1, Donkerperiode 4 uur (belichtingsperiode 20 uur), lichtintensiteit 10000 lux (of 25 W m² PAR) en een drempelwaarde van 200 W m² PAR buitenstraling voor uitschakeling van de belichting binnen is gekozen als referentieteelt.

WKK (-)	Donkerperiode (uur)	Belichtingsintensiteit ¹ (lux)	(W PAR m ²)	Drempelwaarde voor uitschakeling (W m ²)
0	4	2000	5	020
1	8	4000	10	040
		6000	15	060
		8000	20	080
		10000	25	100
				120
				140
				160
				180
				200

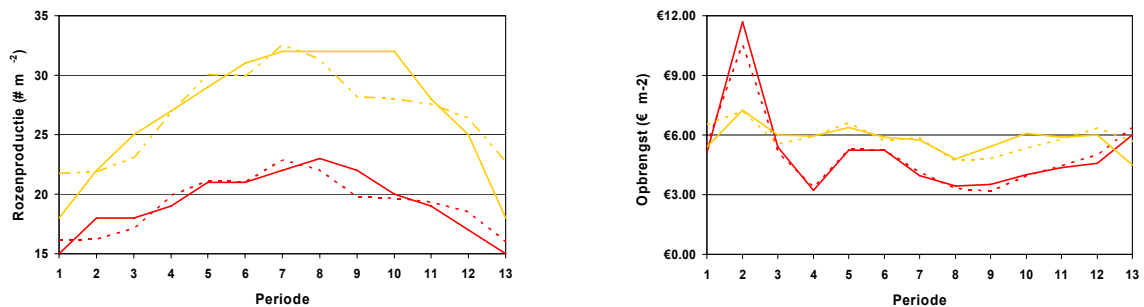
¹ Belichtingsintensiteit uitgedrukt als W m² betreft PAR

Tabel 5.2. Roos cv. Red Berlin en cv. Sphinx: prijs, productie en opbrengst per periode van 4 weken. Productie met WKK, ca. 4500 uur belicht met 6000 lux (ca. 15 W m² PAR). Bron: KWIN, (2004).

Periode Nr (weken)	cv. Red Berlin			cv. Sphinx		
	Prijs per tak (€)	Productie (# m ²)	Opbrengst (€ m ²)	Prijs per tak (€)	Productie (# m ²)	Opbrengst (€ m ²)
01 (01-04)	0.34	15	5.10	0.30	18	5.40
02 (05-08)	0.65	18	11.70	0.33	22	7.26
03 (09-12)	0.30	18	5.40	0.24	25	6.00
04 (13-16)	0.17	19	3.23	0.22	27	5.94
05 (17-20)	0.25	21	5.25	0.22	29	6.38
06 (21-24)	0.25	21	5.25	0.19	31	5.89
07 (25-28)	0.18	22	3.96	0.18	32	5.76
08 (29-32)	0.15	23	3.45	0.15	32	4.80
09 (33-36)	0.16	22	3.52	0.17	32	5.44
10 (37-40)	0.20	20	4.00	0.19	32	6.08
11 (41-44)	0.23	19	4.37	0.21	28	5.88
12 (45-48)	0.27	17	4.59	0.24	25	6.00
13 (49-52)	0.40	15	6.00	0.25	18	4.50
Totaal		250	65.82		351	75.33

Deze omstandigheden uit KWIN komen overeen met het simulatiescenario WKK1 met 4 uur donkerperiode (20 uur belicht), met 15 W m² PAR (≈ 6000 lux) en een drempelwaarde van 100 W m² buitenstraling waarbij de binnenverlichting uitgeschakeld wordt (ca. 4500 branduren voor de gehele teelt). Door de gesimuleerde drogestofproductie van dit scenario in de periode 1-4 (week 1-16), 5-8 (week 17-32) en 9-13 (week 33-52) te fitten op de takproductie uit KWIN (2004) (Tabel 5.2), is het takgewicht verkregen waarmee ook in de andere scenario's

gerekend is. De resultaten van deze fit voor bovengenoemd scenario zijn voor beide cultivars weergegeven in Figuur 5.2: takproductie (#) en opbrengst (€) per m² (takproductie: RMSE = 1.1 tak m⁻² voor cv. *Red Berlin* en 2.4 tak m⁻² voor cv. *Sphinx*; opbrengst: RMSE = €0.40 m⁻² voor cv. *Red Berlin* en €0.56 m⁻² voor cv. *Sphinx*).



Figuur 5.2. Rozenproductie (takken m²) en opbrengst (€ m²) voor cv. *Red Berlin* (rood) en cv. *Sphinx* (geel) per periode van 4 weken in 2004. Doorgetrokken lijnen geven de gegevens uit KWIN (2004) en de gestippelde lijnen zijn door Intkam gesimuleerde gegevens.

Het takgewicht is in de praktijk bij de verschillende scenario's naar alle waarschijnlijkheid niet gelijk. Bij meer licht worden de extra assimilaten deels gebruikt voor meer takken en deels voor zwaardere takken. Hier is in de modelberekeningen geen rekening gehouden, omdat de verdeelsleutel tussen het investeren in nieuwe takken of in zwaardere takken niet modelmatig beschreven is, maar er een calibratie op KWIN gegevens is gebruikt. Omdat in deze studie gekozen is voor een vast takgewicht per periode, wordt de financiële opbrengst waarschijnlijk iets onderschat bij belichtingsstrategieën die meer straling opleveren dan het scenario waarop gefit is (> 6000 lux (15 W m⁻² PAR), stralingsdrempels < 100 W m⁻² PAR). In de andere situaties geldt waarschijnlijk een overschatting van het saldo. De grootte hiervan is niet aan te geven.

Bij de berekening van de relatie tussen drogestofproductie en takproductie, is rekening gehouden met een periode van maximaal 7 weken voordat de geproduceerde drogestof als tak geoogst wordt. De verschillen tussen de werkelijke en gesimuleerde takproductie die zichtbaar zijn in Figuur 5.2, zijn te verklaren uit het gebruik van het 'nieuwe' SEL-jaar voor de simulatie van landelijke productiestatistieken die de weersomstandigheden van verschillende locatie en teeltinstellingen in 2004 weergeven.

5.3.3 Berekening van opbrengsten, energieverbruik en kosten

Voor alle 200 scenario's is de drogestofproductie gesimuleerd en is het aantal geproduceerde takken per m² berekend. Door de takproductie te combineren met de prijs per tak per periode uit KWIN (2004), zijn de opbrengsten per cultivar per m² berekend. Het energieverbruik van de 200 scenario's is berekend door de verbruikte hoeveelheid gas en elektra voor elk scenario uit te drukken in MJ m². Zo kan per productieperiode aangegeven worden welk scenario het minste energie verbruikt.

$$\text{Energieverbruik (MJ m}^2\text{)} = \text{Gasverbruik (m}^3\text{ m}^2\text{)} * 31.67 \text{ MJ m}^3 + \text{Elektriciteitsverbruik (kWh m}^2\text{)} * 3.6 \text{ MJ kWh}^{-1}$$

Bij het berekenen van de kosten van de verschillende scenario's is alleen uitgegaan van de variabele kosten van gas en elektra en zijn de investeringskosten voor warmtekrachtkoppeling en andere teeltmaatregelen niet meegenomen. Voor de gasprijs is een waarde van 22 cent per m³ aangehouden en de kosten per kWh waarmee gerekend is bedroegen 6.4 cent (normaal tarief) en 3.7 cent (daluren), conform de prijzen in januari 2006.

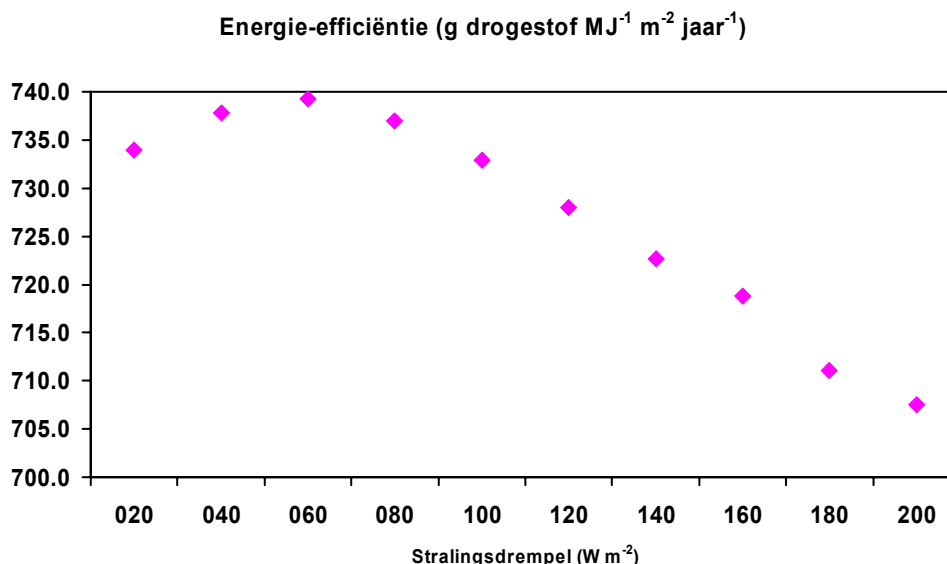
Het 'energiesaldo' (verder aangeduid als 'saldo') van een bepaalde belichtingstrategie is berekend als het verschil tussen de opbrengsten aan rozen en de bij het scenario behorende energiekosten voor gas en licht.

$$\text{Saldo (€ m}^2\text{)} = \text{rozenproductie (\# m}^2\text{)} * \text{rozenprijs (€ \#}^{-1}\text{)} - \text{Energiekosten (€ m}^2\text{)}$$

De vaste kosten die een (rozen-) teler kan hebben lopen nogal uiteen, waardoor deze kosten niet zijn opgenomen in de berekeningen.

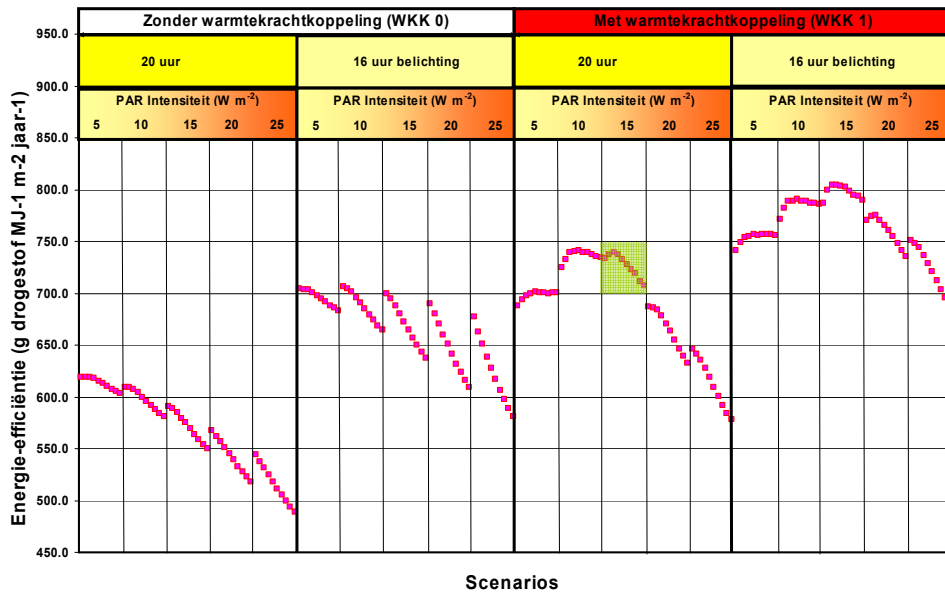
5.3.4 Berekening van de energie-efficiëntie

De energie-efficiëntie (g drogestof MJ⁻¹) is berekend door de drogestofproductie te delen door het energieverbruik per m². De berekeningen maken duidelijk in welke mate de efficiëntie van belichting afhangt van verschillende belichtingsstrategieën.



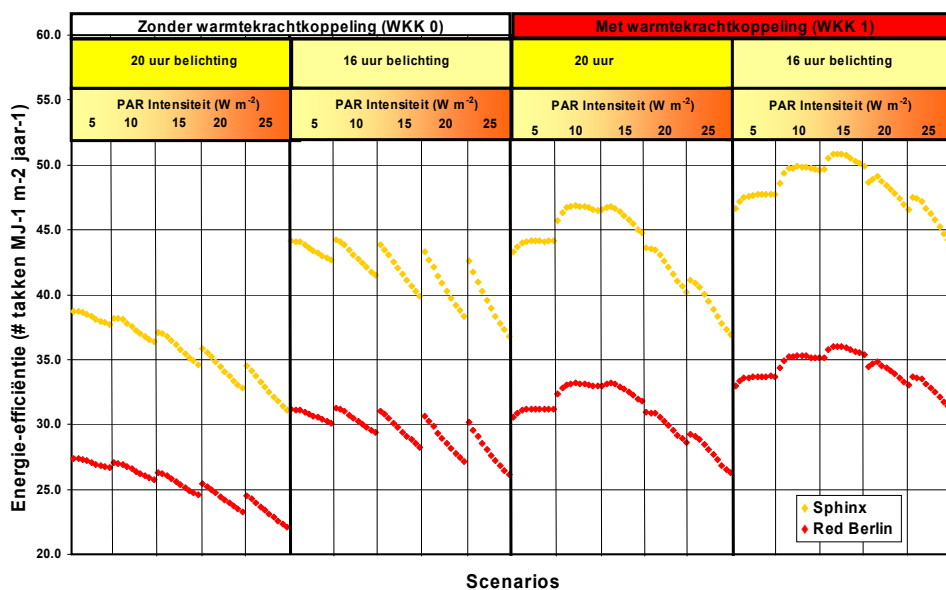
Figuur 5.3. Uitvergroting van de situatie WKK1, 20 uur belichten met 15 W m² PAR (zie groene vlak Figuur 5.4), met op de x-as de (buiten-) stralingsdrempels waarboven de verlichting wordt uitgeschakeld

In de Figuren (5.4 - 5.5 - 5.6), zijn de verschillende invloedsfactoren tegelijk in beeld gebracht. De linkerhelft van de figuur betreft de situatie ZONDER warmtekrachtkoppeling (WKK 0). De rechterhelft van de figuur voor de situatie MET warmtekrachtkoppeling (WKK 1). Elk WKK-scenario is onderverdeeld in een belichtingsduur van 20 en 16 uur, en elke belichtingsduur is weer onderverdeeld in de lichtintensiteitsklassen 5, 10, 15, 20 en 25 W m² PAR. De 10 losse punten onder iedere belichtingsintensiteit geven de 10 stralingsdrempels weer, van 20 tot 200 in stapjes van 20 W m² (zie ook Figuur 5.3).



Figuur 5.4. Jaarlijkse energie-efficiëntie (g drogestof MJ⁻¹ m²) voor 200 belichtingsstrategieën. Linkerhelft van de grafiek de situatie zonder warmtekrachtkoppeling (WKK 0), rechterhelft met warmtekrachtkoppeling (WKK 1). Beide helften onderverdeeld in een belichtingsduur van 20 en 16 uur. Belichtingsduur is onderverdeeld in belichting met 5, 10, 15, 20 en 25 W m² PAR. De (buiten-) stralingsdrempels voor het uitschakelen van de belichting is onderverdeeld in drempelwaarden van 20 tot 200 W m² in 10 stapjes, van 20 W m² (zie Tabel 5.1). Het groene vak is uitvergroot in Figuur 5.3.

In Figuur 5.4 is het effect van de verschillende scenario's op de jaarlijkse energie-efficiëntie weergegeven. De resultaten geven aan in welke mate het gebruik van aangeboden licht verbeterd kan worden en hoe het gebruikt kan worden voor het opstellen van stelregels voor aan en uitschakelen van lampen. De hoogste jaarlijkse energie-efficiënties (g drogestof MJ⁻¹ m² jaar⁻¹) worden behaald in situaties met warmtekrachtkoppeling, bij een korte belichtingsduur (16 uur) en onder gematigde belichting (15 W m² PAR) die al bij stralingsdrempels van ca. 60-80 W m² moet worden uitgezet. Door het toepassen van deze strategie kan een energie-efficiëntie bereikt worden van ca. 804 g drogestof MJ⁻¹ m² jaar⁻¹, een toename van 38 % ten opzichte van de referentie van ca. 578 g drogestof MJ⁻¹ m² jaar⁻¹ (Figuur 5.4).

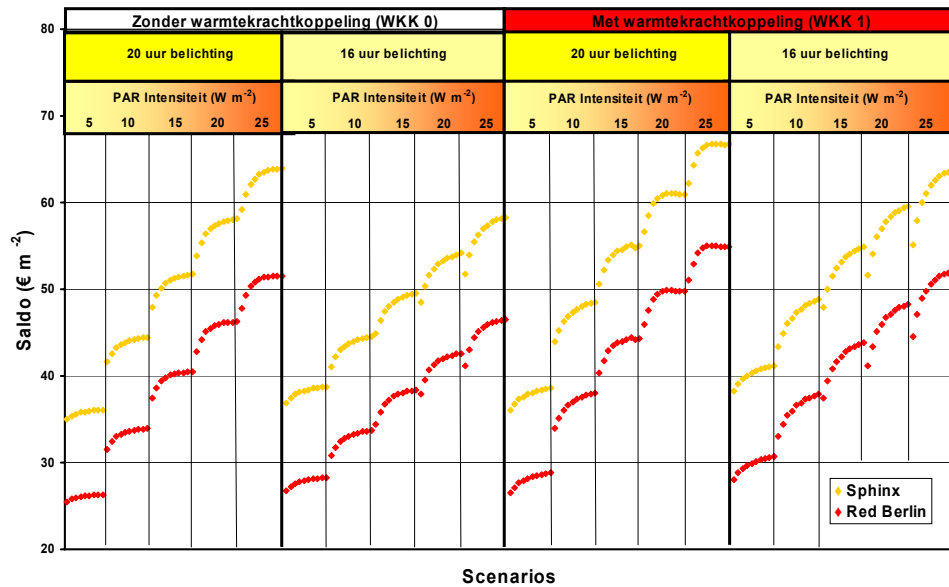


Figuur 5.5 Jaarlijkse energie-efficiëntie (#takken MJ⁻¹ m⁻²) voor roos cv. Red Berlin (♦) en cv. Sphinx (◆) voor 200 belichtingsstrategieën.

Als de energie-efficiëntie wordt uitgedrukt als het aantal geproduceerde takken per MJ geïnvesteerde energie (Figuur 5.5), komt hetzelfde beeld naar voren als bij de drogestofproductie per MJ (Figuur 5.4). Het niveauverschil in energie-efficiëntie tussen de cultivars *Red Berlin* en *Sphinx* ontstaat doordat het jaarlijks aantal geproduceerde takken tussen de beide cultivars verschilt (zie ook Tabel 5.2).

In Figuur 5.6 is het saldo weergegeven dat met beide cultivars behaald zou kunnen worden met de verschillende belichtingsstrategieën. De opbrengsten zijn verkregen door het geproduceerde aantal takken per dag te vermenigvuldigen met de prijzen uit de bijbehorende periode (Tabel 5.2; KWIN, 2004). De productiekosten zijn berekend door het verbruikte gas (m³ m⁻²) te vermenigvuldigen met de gasprijs van 22 cent m⁻³ en door het elektriciteitsverbruik (kWh m⁻²) te vermenigvuldigen met 6.4 cent (normaal tarief) of 3.7 cent (daluren), conform de prijzen in januari 2006.

Bij het analyseren van de het effect van de belichtingsstrategieën op het saldo is duidelijk dat het gebruik van een WKK installatie in alle gevallen het saldo verhoogt (Figuur 5.6). De toename van het saldo is groter bij toenemende belichtingsduur en bij toenemende belichtingsintensiteit. Echter bij het gebruik van een WKK installatie bij hogere belichtingsintensiteiten (>10 W m⁻² PAR) en bij 20 uur belichten geven stralingsdrempels >80 W m⁻² voor het uitschakelen van de belichting geen saldooverhoging meer (of zelfs saldooverlies). Bij 16 uur belichten ligt de verzadigingsdrempel op ongeveer 120 W m⁻² maar treedt geen saldooverlies op. Verder valt op dat het saldo sterker beïnvloed wordt door hogere belichtingsintensiteiten dan door een langere belichtingsduur.



Figuur 5.6 Jaarlijks saldo (€ m²) voor roos cv. Red Berlin (♦) en cv. Sphinx (♦) voor 200 belichtingsstrategieën.

Als het saldo (Figuur 5.6) vergeleken wordt met de energie-efficiëntie (Figuren 5.4 en 5.5), valt op dat strategieën met de hoogste energie-efficiëntie het laagste saldo opleveren in situaties zonder WKK. In situaties met WKK geven de meest energie-efficiënte scenario's (belichting met 15 W m² PAR uitschakeling bij 80 W m²) een inkomstenderving van ca. €66.54 - €55.97 = €12.93 m² (ca. 16 %) (cv. *Sphinx*) en €54.63 - €45.69 = €8.94 m² (ca. 16 %) (cv. *Red Berlin*) bij 20 uur belichten. Bij 16 uur belichten met 15 W m² PAR en uitschakeling bij buitenstralingsdrempels >120 W m² is het saldooverlies ca. €66.54 - €53.58 = €12.96 (ca. 19%) (cv. *Sphinx*) en ca. €54.63 - €42.62 = €12.01 m² (22 %) (cv. *Red Berlin*).

5.4 Achtergrond bij het opstellen van belichtingsadviezen

Uit de Figuren 5.4, 5.5 en 5.6 wordt duidelijk dat het optimaliseren van de belichtingstrategie naar energie-efficiëntie (drogestof MJ⁻¹ of # takken MJ⁻¹) een andere strategie oplevert dan het optimaliseren van het saldo (€ m²). Met de huidige prijzen voor elektriciteit en gas, levert bijna ieder kWh elektriciteit en iedere m³ gas nog steeds meer op dan dat het kost en wordt het gebruik van een WKK-installatie beloond (in aanmerking genomen dat de investeringskosten voor WKK niet worden meegerekend). Daarbij moet opgemerkt worden dat het eerder uitschakelen van de belichting (bij lagere drempelwaarden voor buitenstraling) dan in de referentie zowel gunstig kan zijn voor de energie-efficiëntie (energie-efficiëntie afname in Figuur 5.4 laat sterke afname zien met intensiteit), als voor het saldo. Een teruggang van 20 uur naar 16 uur belichten maakt qua energie-efficiëntie wel verschil. Zonder WKK installatie geeft deze teruggang in belichtingsduur in alle situaties een verhoging van de energie-efficiëntie, terwijl dat met WKK alleen geldt bij de hogere belichtingsintensiteiten (>15 W m² PAR). De teruggang in belichtingsduur heeft uiteraard wel negatieve gevolgen voor het saldo.

5.4.1 De referentieteeft

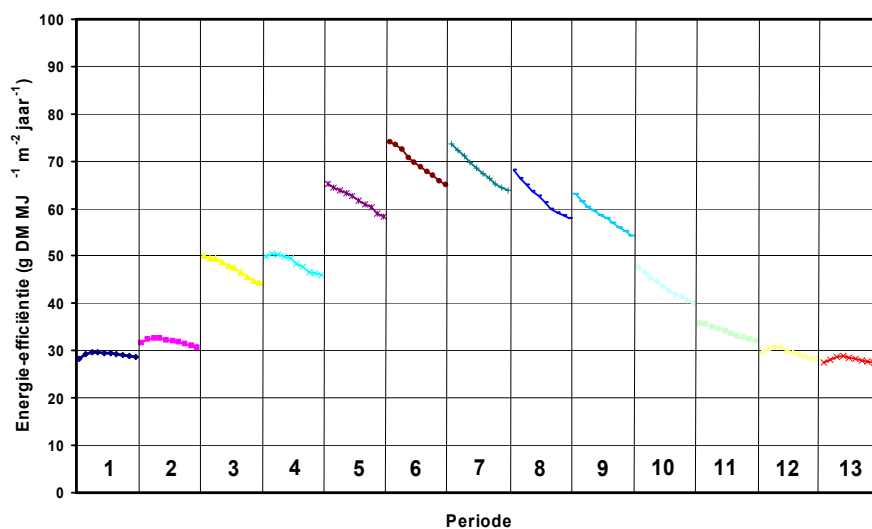
Om inzicht te krijgen waar er winst behaald kan worden door de belichtingstrategie aan te passen worden de referentieteeft (zie Tabel 5.2) en de meest energie-efficiënte scenario's op jaarbasis (Zie Figuren 5.4 en 5.5) nader geanalyseerd. Daarvoor worden de belichtingstrategieën per productieperiode van 4 weken bekeken, om per productieperiode efficiënter met de benodigde energie om te gaan en daarbij bij voorkeur een hoger saldo te

realiseren. Om algemene uitspraken te kunnen doen over het gebruik van een bepaalde belichtingsstrategie, is het van belang te weten hoe het globale stralingsniveau en de temperaturen in Nederland verdeeld zijn over de productieperiodes (Tabel 5.3).

Tabel 5.3. Globale buitenstraling en buitentemperatuur per productieperiode van 4 weken in Nederland gebaseerd op het 'nieuwe' SEL-jaar (naar Breuer & van de Braak, 1989).

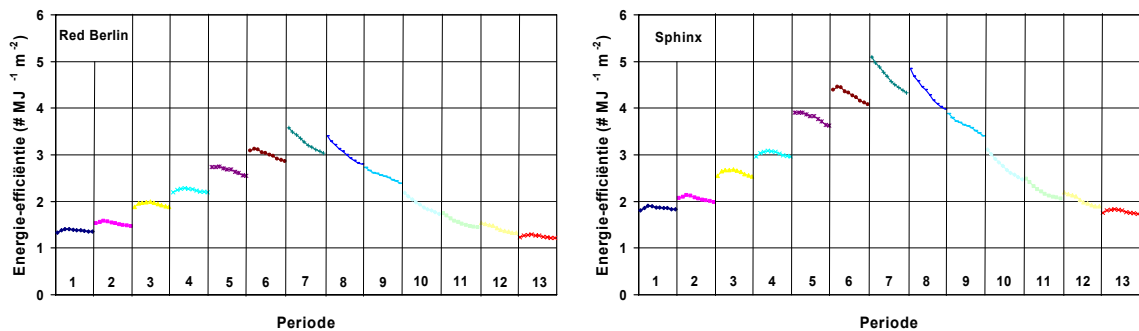
Periode	Globale straling		Gemiddelde temperatuur	Maximum temperatuur	Minimum temperatuur
Nr: weken	(MJ m ⁻²)	(W m ⁻²)*	(° C)	(° C)	(° C)
01: week 01 - 04	59.6	24.6	3.8	9.4	-7.4
02: week 05 - 08	92.4	38.2	6.3	12.4	-2.2
03: week 09 - 12	242.1	100.1	7.3	15.6	-5.0
04: week 13 - 16	299.1	123.6	8.2	20.2	-1.4
05: week 17 - 20	436.1	180.3	13.1	22.2	3.6
06: week 21 - 24	523.0	216.2	15.2	27.9	4.9
07: week 25 - 28	554.0	229.0	17.5	32.1	5.3
08: week 29 - 32	501.3	207.2	19.4	32.0	8.6
09: week 33 - 36	419.2	173.3	16.9	28.1	7.2
10: week 37 - 40	257.0	106.2	13.5	22.5	5.5
11: week 41 - 44	139.0	57.5	11.1	19.1	2.1
12: week 45 - 48	79.5	32.9	7.5	12.9	-0.6
13: week 49 - 52	47.7	19.7	4.5	11.3	-3.9
Totaal	3649.9	1508.7			

* Gemiddelde waarde over een periode van 28 dagen

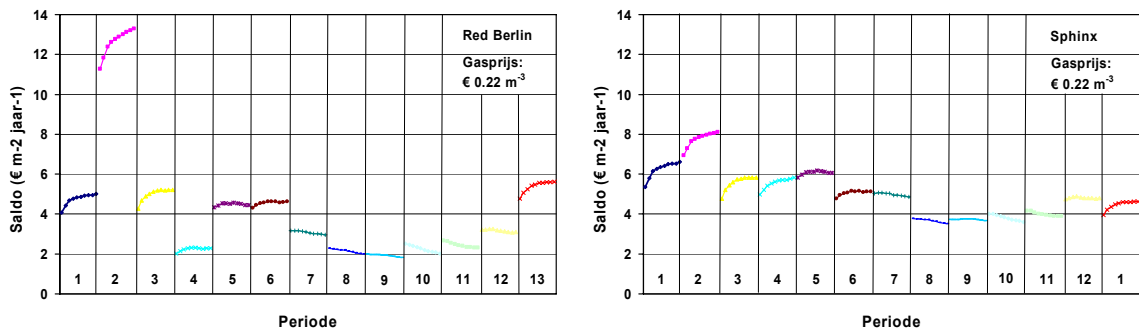


Figuur 5.7. Referentieteel: energie-efficiëntie (g drogestof MJ⁻¹ m²) per periode van 4 weken met WKK, 20 uur belichtingsduur met een belichtingsintensiteit van 25 W m⁻² PAR en met verschillende buitenstralingsdrempels van 20-200 W m⁻² voor het uitschakelen van de belichting.

De energie-efficiëntie ($\text{g drogestof MJ}^{-1}$) in de referentieteelt is in de winterperiodes lager dan in de zomerperiodes (Figuur 5.7). Het inzetten van energie door middel van WKK en belichting behoudt echter dezelfde efficiëntie in de winterperiodes, i.t.t. de zomerperiodes. Dat geldt zowel voor de energie-efficiëntie van de drogestofproductie als voor de takproductie. Bij langer belichten (hogere drempelwaarden voor de buitenstraling voor het uitschakelen van de belichting) gaat de energie-efficiëntie in de winterperiodes veel minder achteruit dan in de zomerperiodes; in de zomerperiodes kan per MJ toegevoegde energie (door elke verhoging van de stralingsdrempel) steeds minder drogestof of takken per MJ geproduceerd worden (Figuren 5.7 en 5.8). De totale productie neemt natuurlijk wel toe bij een toename van de belichtingsuren



Figuur 5.8. Referentie-teelt: energie-efficiëntie ($\# \text{takken MJ}^{-1} \text{m}^2$) per productieperiode van 4 weken voor roos cv. Red Berlin en cv. Sphinx.



Figuur 5.9. Referentie-teelt: saldo (€ m^2) per productieperiode van 4 weken voor roos cv. Red Berlin en cv. Sphinx.

Het saldo dat gerealiseerd kan worden is in de winterperiodes hoger dan in de zomerperiodes (Figuur 5.9). Deze resultaten laten zien dat de huidige praktijksituatie valide is, door energie juist in de winterperiodes (periode 12 en met 6) aan te wenden en besparingen te richten op de zomerperiodes (periode 7 t/m 11; week 25-44). In de volgende hoofdstukken wordt duidelijk hoeveel er precies bespaard zou kunnen worden.

5.5 Optimalisatie van belichtingstrategieën en testen van vereenvoudigde stelregels

Bij de huidige gasprijzen kan het gebruik van een WKK-installatie zowel de energie-efficiëntie als het saldo aanzienlijk verhogen. Er valt echter ook energie te besparen, zonder dat het saldo daar teveel onder lijdt. Per productieperiode is de optimale belichtingsstrategie bepaald voor de energie-efficiëntie (Tabel 5.4) als voor het saldo (Tabel 5.6).

Daarnaast is gekeken of de globale straling per productieperiode een leidraad kan zijn voor het aanpassen van de belichtingstrategie.

5.5.1 Optimalisatie van energie-efficiëntie

Vanuit energetisch oogpunt kan er nóg efficiënter met energie worden omgegaan door de belichtingsduur te verlagen van 20 naar 16 uur in de periodes 3 t/m 11 (week 9-44). In periodes 6 t/m 9 (week 21-36) wordt de energie-efficiëntie nog meer verhoogd door daarbij de belichtingsintensiteit te verlagen van 25 naar 10 W PAR m² (van 10000 lux naar 4000 lux) en zelfs naar 5 W PAR m² (2000 lux) in periode 8 (week 29-32). Dit is in combinatie met het verlagen van de stralingsdrempels waarop de belichting wordt uitgeschakeld. Vooral in de zomerperiodes (6 t/m 9; week 21-36) kunnen de drempels omlaag van 200 W m² naar 60 W m². Maar ook in het najaar en winter (periode 11 t/m 13 en 1 t/m 3; week 41-12) kunnen de stralingsdrempels voor een energie-efficiënter gebruik naar 120-160 W m² of lager.

Tussen belichtingsduur, belichtingsintensiteit en stralingsdrempel bestaat een uitruil, vooral in najaar en in de winter. In periodes 9-13 (week 33-52) kan de belichtingsintensiteit verhoogd worden, en de stralingsdrempel waarbij de belichting uitgeschakeld wordt daarbij omlaag. Als er in periode 12 en 13 (week 45-52) langer belicht gaat worden, kan de stralingsdrempel ook omlaag. Gaat in periode 1 en 2 (week 1-8) de belichtingsintensiteit weer omlaag, dan moet de stralingsdrempel waarbij de belichting wordt uitgeschakeld weer opgeschroefd worden.

Als in alle productieperiodes de optimale belichtingstrategie zou worden gehanteerd, kan de energie-efficiëntie toenemen met 248 g drogestof MJ⁻¹ m² jaar⁻¹ tot 825 g drogestof MJ⁻¹ m² jaar⁻¹. Dat is een toename t.o.v. de referentieteeelt van ca. 43 %. Ten opzichte van één vaste geoptimaliseerde belichtingstrategie (1-4-10-100, zie Figuur 5.3) is de winst ca. 40 g drogestof MJ⁻¹ m² jaar⁻¹ of ca. 5 %.

Repercussies op het saldo

Het optimaliseren van de energie-efficiëntie heeft een duidelijk effect op het saldo dat gerealiseerd kan worden (Tabel 5.4). Aan de ene kant is er een besparing door het verlagen van de energie-input, maar door de bijbehorende verlaging van de productie kan er minder verdiend worden. Uit Tabel 5.4 wordt duidelijk dat het streven naar energie-efficiëntie een positief effect heeft op het saldo in de productieperiodes 7 t/m 11. Dit is ook al in de praktijk herkend en wordt ook al toegepast.

Tabel 5.4. Optimale belichtingsstrategieën voor maximale energie-efficiëntie (van roos per productieperiode in Nederland gebaseerd op het 'nieuwe' SEL-jaar (naar Breuer & van de Braak (1989)).

Periode	Referentie ²		Efficiëntietoename t.o.v. referentie-teelt ²		Saldoverschil t.o.v. referentie-teelt ²			
	Nr (weken)	(g drogestof MJ ⁻¹ m ²)	Scenario	(g drogestof MJ ⁻¹ m ²)	(%)	cv. <i>Red Berlin</i>		cv. <i>Sphinx</i>
01 (01-04)	28.7	1 - 4 - 15 - 160	1.7	5.9	-€1.62	- 32.3%	-€2.13	- 32.3%
02 (05-08)	30.7	1 - 4 - 15 - 140	3.5	11.3	-€4.72	- 35.5%	-€2.91	- 35.9%
03 (09-12)	44.3	1 - 8 - 15 - 120	13.8	31.1	-€2.25	- 43.2%	-€2.51	- 43.0%
04 (13-16)	45.9	1 - 8 - 15 - 200	11.4	24.7	-€0.72	- 31.6%	-€1.77	- 30.5%
05 (17-20)	58.4	1 - 8 - 15 - 100	24.2	41.5	-€0.65	- 14.6%	-€0.97	- 15.9%
06 (21-24)	65.0	1 - 8 - 10 - 060	32.8	50.5	-€0.96	- 20.8%	-€1.09	- 21.1%
07 (25-28)	63.9	1 - 8 - 10 - 060	41.9	65.6	+€0.21	+ 7.2%	€0.02	0.5%
08 (29-32)	57.9	1 - 8 - 05 - 060	50.8	87.7	+€0.50	+ 25.2%	€0.36	10.3%
09 (33-36)	54.3	1 - 8 - 10 - 060	34.1	62.8	+€0.41	+ 22.6%	€0.20	5.6%
10 (37-40)	40.0	1 - 8 - 15 - 040	20.7	51.7	+€0.78	+ 38.7%	€0.64	17.8%
11 (41-44)	32.1	1 - 8 - 15 - 140	7.8	24.3	+€0.45	+ 19.7%	€0.25	6.3%
12 (45-48)	28.4	1 - 4 - 15 - 100	4.1	14.6	-€0.16	- 5.1%	-€0.53	- 11.0%
13 (49-52)	27.3	1 - 4 - 25 - 080	1.6	5.8	-€0.21	- 3.7%	-€0.14	- 3.1%
Totaal	576.9		248.4	43.1	-€8.94	- 16.4%	-€10.57	- 15.9%

¹ Belichtingsstrategieën in Tabel 5.1

² Energie-efficiëntie van referentieteelt (1-4-25-200: 1: met WKK, 4 uur donkerperiode (20:00-00:00 uur), belichtingsintensiteit 25 W m² PAR, buitenstralingsdrempel 200 W m² PAR voor uitschakeling belichting) = 576.9 g drogestof MJ⁻¹ m² jaar⁻¹.

In Tabel 5.4 staan de optimale belichtingsstrategieën voor een maximale energie-efficiëntie en het bijbehorende effect op het saldo van roos cv *Red Berlin* en roos cv *Sphinx*. In Tabel 5.5 staat de energiebesparing per productieperiode ten opzichte van het referentiescenario.

Om tot een combinatie van energiebesparing en saldoverhoging over te gaan, zou bv alleen de energiebesparende belichtingsstrategieën in periode 7 t/m 11 (week 25-44) aangehouden kunnen worden (Tabel 5.4). Het gaat dan vooral om het verkorten van de belichtingsduur, een verlaging van de belichtingsintensiteit en een verlaging van de stralingsdrempels waarop de belichting uitgeschakeld wordt. Zo kan ipv 576.9 g drogestof per MJ⁻¹ m² een efficiëntie van 732.2 g drogestof per MJ⁻¹ m² bereikt worden, oftewel een toename van 27%. Tegelijkertijd kan dan het saldo van roos cv *Red Berlin* met €2.34 m² (4.3%) verhoogd worden tot €56.62 en het saldo van cv *Sphinx* met €1.47 m² toenemen (2.2%) tot €56.10, gemiddeld is dat zo'n 3.2%.

Tabel 5.5. *Energieverbruik referentieteelt en optimale belichtingsstrategieën¹ voor maximale energie-efficiëntie van roos per productieperiode in Nederland gebaseerd op het 'nieuwe' SEL-jaar (naar Breuer & van de Braak (1989)).*

Periode	Energieverbruik referentieteelt ²		Energieverbruik optimale belichtingsstrategie per periode			Energieverbruik tov. referentie	
	(MJ m ⁻²)	(%)	Scenario	(MJ m ⁻²)	(%)	(MJ m ⁻²)	(%)
01 (01-04)	509.4	10.2%	1 - 4 - 15 - 160	326.4	10.6%	-183.1	-35.9%
02 (05-08)	489.6	9.8%	1 - 4 - 15 - 140	312.5	10.2%	-177.0	-36.2%
03 (09-12)	398.7	8.0%	1 - 8 - 15 - 120	238.0	7.8%	-160.6	-40.3%
04 (13-16)	375.9	7.6%	1 - 8 - 15 - 200	251.9	8.2%	-124.0	-33.0%
05 (17-20)	302.7	6.1%	1 - 8 - 15 - 100	192.6	6.3%	-110.1	-36.4%
06 (21-24)	255.0	5.1%	1 - 8 - 10 - 060	154.1	5.0%	-100.9	-39.6%
07 (25-28)	249.8	5.0%	1 - 8 - 10 - 060	132.3	4.3%	-117.6	-47.1%
08 (29-32)	256.9	5.2%	1 - 8 - 05 - 060	115.0	3.7%	-141.9	-55.2%
09 (33-36)	282.2	5.7%	1 - 8 - 10 - 060	142.7	4.6%	-139.5	-49.4%
10 (37-40)	381.4	7.7%	1 - 8 - 15 - 040	184.2	6.0%	-197.2	-51.7%
11 (41-44)	454.3	9.1%	1 - 8 - 15 - 140	261.6	8.5%	-192.7	-42.4%
12 (45-48)	499.9	10.0%	1 - 4 - 15 - 100	296.0	9.6%	-203.9	-40.8%
13 (49-52)	522.2	10.5%	1 - 4 - 25 - 080	463.5	15.1%	-58.7	-11.2%
Totaal	4977.7	100.0%		3070.6	100.0%	-1907.1	-38.3%

¹ *Belichtingsstrategieën in Tabel 5.1*

² *Energie-efficiëntie referentieteelt (1-4-25-200: 1: met WKK, 4 uur donkerperiode (van 20:00-0:00 uur), belichtingsintensiteit 25 W PAR m⁻², buitenstralingsdrempel 200 W m⁻² PAR voor uitschakeling belichting) = 576.9 g drogestof MJ⁻¹ m² jaar⁻¹.*

5.5.2 Optimalisatie van saldo

De belichtingsstrategieën die gehanteerd moeten worden om het saldo te optimaliseren liggen anders dan bij het optimaliseren naar energie-efficiëntie (Tabel 5.5). Een lange belichtingsduur van 20 uur is voor beide cultivars aan te raden t/m periode 6 (week 1-24) en vanaf periode 11 (week 41-44) voor cv. *Sphinx* en periode 12 (week 45-48) voor cv. *Red Berlin*. Te allen tijde moet de WKK installatie gebruikt worden. Met uitzondering van de periodes 8, 9 en 10 (week 29-40) (en periode 11 (week 41-44) voor cv. *Red Berlin*) kan in alle periodes met hoge belichtingsintensiteiten worden gewerkt, maar kunnen de stralingsdrempels waarop de belichting uitgeschakeld wordt omlaag om het saldo te verhogen. Ook in de zomerperiodes bij kortere belichting kunnen de stralingsdrempels omlaag voor een hoger saldo.

Als voor alle productieperiodes de optimale belichtingsstrategie voor het saldo wordt gehanteerd (Tabel 5.6), kan het saldo van cv. *Red Berlin* toenemen met ca. €3.00 m² jaar⁻¹ tot ca. €56.54 m² jaar⁻¹, een toename t.o.v. de referentieteelt van ca. 5.5 %. Voor cv. *Sphinx* is een mogelijke toename van ca. €2.22 m² jaar⁻¹ tot ca. €67.91 m² jaar⁻¹, een toename t.o.v. de referentieteelt van ca. 3.3 %. De grootste saldotoename wordt gerealiseerd in de periodes 8-10 (week 29-40).

Ten opzichte van een vaste geoptimaliseerde belichtingsstrategie voor de energie-efficiëntie (1-4-25-140, dwz met WKK, 25 W PAR m⁻² (10000 lux)) en stralingsdrempel >140 W m⁻²; zie Figuur 5.5) is de winst voor cv. *Red Berlin* al ca. €2.10 m² jaar⁻¹ (3.9 %) en voor cv. *Sphinx* al ca. €1.76 m² jaar⁻¹ (2.7 %).

Tabel 5.6. Optimale belichtingsstrategieën voor maximaal saldo van roos cv. Red Berlin en cv. Sphinx per productieperiode in Nederland gebaseerd op het 'nieuwe' SEL-jaar (naar Breuer & van de Braak, 1989).

Periode	cv. Red Berlin			cv. Sphinx		
	Optimale strategie ¹ voor saldo	Saldotoename t.o.v. referentie-teelt ²		Optimale strategie ¹ voor saldo	Saldotoename t.o.v. referentie-teelt ²	
Nr (weken)	(-)	(€ m ²)	(%)	(-)	(€ m ²)	(%)
01 (01-04)	1 - 4 - 25 - 200	€0.00	0.0%	1 - 4 - 25 - 200	€0.00	0.0%
02 (05-08)	1 - 4 - 25 - 200	€0.00	0.0%	1 - 4 - 25 - 200	€0.00	0.0%
03 (09-12)	1 - 4 - 25 - 180	€0.01	0.2%	1 - 4 - 25 - 180	€0.01	0.1%
04 (13-16)	1 - 4 - 25 - 100	€0.02	0.8%	1 - 4 - 25 - 200	€0.00	0.0%
05 (17-20)	1 - 4 - 25 - 120	€0.11	2.5%	1 - 4 - 25 - 120	€0.10	1.6%
06 (21-24)	1 - 4 - 25 - 140	€0.02	0.5%	1 - 4 - 25 - 140	€0.02	0.4%
07 (25-28)	1 - 8 - 25 - 060	€0.37	12.4%	1 - 8 - 25 - 120	€0.30	6.2%
08 (29-32)	1 - 8 - 10 - 160	€0.57	28.5%	1 - 8 - 15 - 200	€0.49	13.9%
09 (33-36)	1 - 8 - 10 - 160	€0.44	24.6%	1 - 8 - 15 - 200	€0.29	7.9%
10 (37-40)	1 - 8 - 10 - 060	€0.81	40.3%	1 - 8 - 10 - 100	€0.66	18.4%
11 (41-44)	1 - 8 - 10 - 200	€0.48	20.7%	1 - 4 - 25 - 020	€0.27	6.8%
12 (45-48)	1 - 4 - 25 - 080	€0.17	5.3%	1 - 4 - 25 - 080	€0.08	1.7%
13 (49-52)	1 - 4 - 25 - 200	€0.00	0.0%	1 - 4 - 25 - 200	€0.00	0.0%
Totaal		€3.00	5.5%		€2.22	3.3%

¹ Belichtingstrategieën in Tabel 5.1

² Saldo referentieteelt (1-4-25-200; 1: met WKK, 4 uur donkerperiode (van 20:00-0:00 uur), belichtingsintensiteit 25 W m² PAR, buitenstralingsdrempel 200 W m² PAR voor uitschakeling belichting) = €54.27 m² jaar¹ voor cv. Red Berlin en €66.08 m² jaar¹ voor cv. Sphinx

5.6 Eenvoudige strategieën voor het belichten

In de voorgaande hoofdstukken is aangegeven wat (per productieperiode) de meest energie-efficiënte belichtingstrategie (5.5.1) en de meest saldorenderende belichtingstrategie (5.5.2) zou moeten zijn, als uitgegaan wordt van karakteristieke klimaatgegevens voor Nederland (berekend met het 'nieuwe' SEL-jaar naar Breuer en van de Braak (1989)). Daarbij is aangegeven wat er verwacht kan worden aan energiebesparing en aan het saldorendement.

Om tot een combinatie van energiebesparing en saldoverhoging over te gaan, zou bv alleen de energiebesparende belichtingstrategieën in periode 7 t/m 11 (week 25-44) aangehouden kunnen worden (Tabel 5.4). Het gaat dan vooral om het verkorten van de belichtingsduur, een verlaging van de belichtingsintensiteit en een verlaging van de stralingsdrempels waarop de belichting uitgeschakeld wordt.

Om additionele eenvoudige stelregels voor het belichten op te stellen voor energie-efficiënt gebruik van de belichting of voor optimalisering van het saldo, zou een teler op basis van de te verwachten weersomstandigheden (en dan vooral globale straling) een beslissing moeten kunnen nemen over welke combinatie van maatregelen (WKK, donkerperiode, belichtingsintensiteit en stralingsdrempel waarbij de belichting wordt uitgeschakeld) er genomen moet worden. In het uitgevoerde simulatieonderzoek is gezocht naar een relatie tussen de productieperiode, de globale buitenstraling en bovengenoemde belichtingstrategieën, waarvan de resultaten en stelregels in de volgende hoofdstukken worden gepresenteerd.

In dit onderzoek zijn op basis van modelsimulaties eenvoudige regels opgesteld voor de belichtingstrategie, in afhankelijkheid van (verwachte) weersomstandigheden (m.n. straling) per productieperiode. Bij het hanteren van deze regels in de praktijk, kan belichtingsenergie worden bespaard en het saldo gehandhaafd of verhoogd worden.

5.6.1 Voor energie-efficiënt gebruik

De analyse ten behoeve van het energie-efficiënt gebruik van de belichting is op grafisch wijze weergegeven in Bijlage 1. Omdat er een uitruil bestaat tussen de verschillende opties in de belichtingstrategieën, is het moeilijk om duidelijke patronen te herkennen. Toch staan hier een aantal stelregels die uit de data naar voren zijn gekomen.

Samengevat kan worden gesteld dat:

- In periodes 11, 12, 13, 1 en 2 (week 41 t/m week 8) kan bij een lage globale buitenstraling ($< 200 \text{ W m}^{-2}$) een hoge belichtingsintensiteit (25 W PAR m^{-2} , 10.000 lux) aangehouden worden waarbij de belichting uitgeschakeld wordt bij een globale buitenstraling hoger dan 20 W m^{-2} . Bij globale stralingsniveaus hoger dan 200 W m^{-2} kan een lagere belichtingsintensiteit aangehouden worden, gecombineerd met het uitschakelen van de belichting bij hogere globale buitenstraling.
- In periode 11 (week 41-44) kan bij hogere globale buitenstraling ($> 600 \text{ W m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) de belichtingsperiode verkort worden naar 16 uur.
- In periodes 3, 4 en 5 (week 9-21) is de optimale belichtingsintensiteit tussen de 10 en 15 W PAR m^{-2} . Vanaf periode 5 is het gunstig een kortere belichtingsduur van 16 uur aan te houden.
- In periodes 6, 7, 8, 9 en 10 (week 21-39) en bij veel licht buiten in periode 11 (week 41-44) kan de belichtingsduur verkort worden van 20 naar 16 uur.

5.6.2 Voor optimalisering van het saldo

Omdat er een uitruil bestaat tussen de verschillende opties in de belichtingstrategieën, is het moeilijk om duidelijke patronen te herkennen. Toch staan hier een aantal stelregels die uit de data naar voren zijn gekomen. De analyse ten behoeve van een saldo-optimaliserend gebruik van de belichting is op grafisch wijze weergegeven in Bijlage 2 voor roos cv. *Red Berlin* en in Bijlage 3 voor roos cv. *Sphinx*.

Samengevat kan worden gesteld dat:

- In periodes 12, 13 en 1 tot en met 6 (week 45 t/m 24) moet een hoge belichtingsintensiteit (25 W PAR m^{-2}) worden toegepast.
- In periodes 13, 1, 2, 3 en 4 (week 48 t/m week 8) is een belichtingsduur van 20 uur optimaal.
- In periodes 4, 5 en 6 (week 13-24) moet de drempel voor globale straling waarop de belichting wordt uitgeschakeld niet te laag worden ingesteld.

5.6.3 Voor optimalisering van energie-efficiëntie en het saldo

Om energie-efficiënt om te gaan met energie, het energieverbruik te verlagen en tegelijkertijd het saldo te handhaven of te verhogen, zouden de hierboven beschreven stelregels alleen toegepast moeten worden in de productieperiodes 7 t/m 11 (week 25-44).

- In de periodes 7 tot en met 11 (week 25-44) moet:
 - de belichtingsduur verkort worden van 20 naar 16 uur.
 - lage belichtingsintensiteiten gebruikt worden ($5 - 15 \text{ W PAR m}^{-2}$).
- In periodes 7 tot en met 10 (week 25-40) moet de belichting uitgeschakeld worden bij een buitenstraling van 40 tot 60 W PAR m^{-2} .

6. Conclusies Fase B

6.1 Simulatie van energie-efficiëntie en saldo

Het gewasgroei-simulatiemodel INTKAM is aangepast door de maximaal te realiseren fotosynthesesnelheid te corrigeren voor seizoensvariaties en voor variaties gedurende de dag die door metingen in fase A van dit onderzoek zijn vastgesteld. Voor de analyses is alleen vastgehouden aan het seizoensafhankelijke verloop van de fotosynthesesnelheid en de afname van de fotosynthesesnelheid over de dag, en niet aan de 'middagdip', vanwege de geringe invloed van dit fenomeen op de productie, als ook de afname over de dag is meegenomen. Voor het simuleren van takproductie roos cv. *Red Berlin* en roos cv. *Sphinx* is de gesimuleerde drogestofproductie gefit op praktijkgegevens (KWIN, 2004).

Simulatie resultaten laten zien dat de hoogste energie-efficiënties (g drogestof MJ⁻¹) behaald worden in situaties met warmtekrachtkoppeling onder gematigde belichting die al bij lage stralingsdrempels uitgezet kan worden om zo energie-efficiënt mogelijk te blijven produceren.

De hoogste energie-efficiënties (g drogestof MJ⁻¹) worden behaald in de zomer, maar elke MJ toegevoegde energie wordt minder efficiënt benut dan in de winter. Het langer laten branden van de verlichting in het late voorjaar en de zomer verlaagt de energie-efficiëntie snel, waar deze in het vroege voorjaar, het najaar en de winterperiode nagenoeg hetzelfde rendement blijft geven.

In de standaard situatie (met gebruik van warmtekrachtkoppeling) blijft de energie-efficiëntie nagenoeg gelijk of wordt groter, bij belichtingsintensiteiten in een traject van 2000-4000-6000 lux en buitentralingsdrempels <120 W m². In alle andere situaties neemt de energie-efficiëntie af bij toenemende belichtingsduur, belichtingsintensiteit en hogere buitenstralingsdrempels voor het uitschakelen van de belichting. Energie-efficiëntie lijkt hiermee een slecht bruikbaar kengetal en een teler zou zich beter kunnen richten op energiegebruik en saldo.

Het bedrijfseconomisch resultaat (saldo), dat berekend is door de opbrengst van de rozen te verminderen met de kosten voor het energieverbruik (gas en elektra), laat zien dat het bij de huidige energieprijzen nog steeds baat om extra energie in de vorm van gas en licht te gebruiken. Het effect van toenemend energieverbruik wordt minder bij meer belichtinguren. Er ontstaat een negatief resultaat bij hoge belichtingsintensiteiten in combinatie met lange belichtingsduur.

6.2 Energiedoelstelling

De energiedoelstelling om het energieverbruik te verlagen met 5-10 % is ruimschoots te halen, maar dit heeft repercussies op het saldo. Als per productieperiode de meest energie-efficiënte scenario's worden gehanteerd, kan de energie-efficiëntie met ca. 43% toenemen. Dit houdt in dat het energieverbruik met ca. 38 % kan dalen. De negatieve gevolgen voor de productie en daarmee de opbrengsten bedragen dan ca. 16 %.

Om bij gelijk (of hoger saldo) toch energie te besparen ligt vooral in de productieperiodes 7 t/m 11 (in de zomer) (Tabel 5.4), waar door korter (16 uur) belichten en met lagere belichtingsintensiteiten (2000-4000-6000 lux; 5-10-15 W m² PAR) en lagere buitenstralingsdrempels (40-60 W m² PAR) een energiebesparing van 789 MJ m² jaar⁻¹ (≈15.7% t.o.v. de referentieteel) een saldooverhoging van ca. 4.3 % voor cv. *Red Berlin* en ca. 2.2 % voor cv. *Sphinx* te halen is.

6.3 Vereenvoudigde belichtingsstrategieën

Omdat het gewas niet op alle uren van de dag even efficiënt met het aangeboden licht kan omgaan en omdat de opbrengst die kan worden gerealiseerd met het aangeboden licht per productieperiode verschilt door en verloop van de fotosynthesesnelheid over het seizoen en de seizoensafhankelijke prijs per tak, is het onder bepaalde omstandigheden (dwz. de hoogte van de globale buitenstraling, de periode in het jaar en de tijd op de dag) minder effectief (en dus duur) om bepaalde vormen van assimilatiebelichting te gebruiken.

Zo bleek uit het de eerste projectfase A dat er na ca. 10 uur belichten een reductie van de fotosynthesecapaciteit optreedt. Bij lang (20 uur) belichten houdt dat in dat er vanaf 10.00 uur 's ochtends al minder effectief met het aangeboden licht kan worden omgegaan en er bespaard kan worden door de belichting eerder uit te schakelen of met lagere belichtingsintensiteiten te werken. Bij het korter belichten (16 uur) betekent dat dat de reductie pas optreedt vanaf 14.00 uur 's middags en dat er langer geprofiteerd kan worden van de buitenstraling en additionele belichting.

In de volgende hoofdstukken is beschreven welke vereenvoudigde stelregels er op basis van de productieperiode en de globale buitenstraling kunnen worden genomen om zo efficiënt mogelijk met energie om te kunnen gaan, of om het saldo te optimaliseren.

6.3.1 Belichtingstrategie voor energie-efficiënt gebruik

Voor productieperiode en weersafhankelijke strategieën kan worden gesteld dat:

- In periodes 11, 12, 13, 1 en 2 (week 41 t/m week 8) kan bij een lage globale buitenstraling ($< 200 \text{ W m}^{-2}$) een hoge belichtingsintensiteit (25 W PAR m^{-2} , 10.000 lux) aangehouden worden waarbij de belichting uitgeschakeld wordt bij een globale buitenstraling hoger dan 20 W m^{-2} . Bij globale stralingsniveaus hoger dan 200 W m^{-2} kan een lagere belichtingsintensiteit aangehouden worden, gecombineerd met het uitschakelen van de belichting bij hogere globale buitenstraling.
- In periode 11 (week 41-44) kan bij hogere globale buitenstraling ($> 600 \text{ W m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) de belichtingsperiode verkort worden naar 16 uur.
- In periodes 3, 4 en 5 (week 9-21) is de optimale belichtingsintensiteit tussen de 10 en 15 W PAR m^{-2} . Vanaf periode 5 is het gunstig een kortere belichtingsduur van 16 uur aan te houden.
- In periodes 6, 7, 8, 9 en 10 (week 21-39) en bij veel licht buiten in periode 11 (week 41-44) kan de belichtingsduur verkort worden van 20 naar 16 uur.

6.3.2 Belichtingstrategie voor optimalisatie van saldo

Samengevat kan worden gesteld dat:

- In periodes 12, 13 en 1 tot en met 6 (week 45 t/m 24) moet een hoge belichtingsintensiteit (25 W PAR m^{-2}) worden toegepast.
- In periodes 13, 1, 2, 3 en 4 (week 48 t/m week 8) is een belichtingsduur van 20 uur optimaal.
- In periodes 4, 5 en 6 (week 13-24) moet de drempel voor globale straling waarop de belichting wordt uitgeschakeld niet te laag worden ingesteld.

6.3.3 Belichtingstrategie voor optimalisatie van energie-efficiëntie en saldo

Om energie-efficiënt om te gaan met energie en daarbij het energieverbruik te verlagen en tegelijkertijd het saldo te handhaven of te verhogen, zouden de hierboven beschreven stelregels alleen toegepast moeten worden in de productieperiodes 7 t/m 11 (week 25-44).

- In de periodes 7 tot en met 11 (week 25-44) moet:

- de belichtingsduur verkort worden van 20 naar 16 uur.
- lage belichtingsintensiteiten gebruikt worden (5 -15 W PAR m²).
- In periodes 7 tot en met 10 (week 25-40) moet de belichting uitgeschakeld worden bij een buitenstraling van 40 tot 60 W PAR m².

7. Kennisinteractie

Een interview over de bevindingen van dit project (fase B) is gepubliceerd in het vakblad "Onder glas" (Arkesteijn, 2006). Bijeenkomst(en) met tuinders waarin bevindingen uit dit project (inclusief fase A) gedeeld zullen worden vinden plaats in het kader van het vervolgproject "Belichting, soms zinvol, soms verspilling" dat wordt uitgevoerd door WUR-Glastuinbouw (PT12740; 1-1-2007 t/m 31-12-2007).

8. Referenties

- Arkesteijn, M., 2006.
Jongschaap: 'Belichten in winter is energetisch gunstiger dan in zomer': belichtingsstrategie achter de computer bepalen. In: *Onder glas 4* (april 2006), pp. 11-13.
- Ayari, O., M. Dorais, A. Gosselin, 2000a.
Daily variations of photosynthetic efficiency of greenhouse tomato plants during winter and spring. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 125, 235 - 241.
- Ayari, O., G. Samson, M. Dorais, R. Boulanger, A. Gosselin, 2000b.
Stomatal limitation of photosynthesis in winter production of greenhouse tomato plants. *Physiologia Plantarum* 110: 558 - 564.
- Breuer, J.J.G., N.J. van de Braak, 1989.
Reference year for Dutch greenhouses. *Acta Hort.* 248, 101-108.
- Dieleman, J.A., E. Meinen, A. Elings, D. Uenk, J.J. Uittien, A.G.M. Broekhuijsen, P.H.B. de Visser, L.F.M. Marcelis, 2003.
Effecten van langdurig hoog CO₂ op groei en fotosynthese bij paprika. Eindrapport van het project 'Efficiënt gebruik van CO₂'. Wageningen, Plant Research International, Nota 274, 31 pp.
- Dieleman, J.A., F. Kempkes, 2005.
Schermen in de tomatenteelt: mogelijkheden en beperkingen. Wageningen, Plant Research International, Nota 359, 84 pp.
- Dorais, M., S. Yelle, A. Gosselin, 1996.
Influence of extended photoperiod on photosynthate partitioning and export in tomato and pepper plants. *NZ J. Crop Hort. Sci.* 24, 29-37.
- Faria, T., D. Wilkins, R.T. Besford, M. Vaz, J.S. Pereira, M.M. Chaves, 1996.
Growth at elevated CO₂ leads to down-regulation of photosynthesis and altered response to high temperature in *Quercus suber* L. seedlings. *J. Expt. Bot.* 47, 1755-1761.
- Franco, A.C., U. Lüttge, 2002.
Midday depression in savanna trees: coordinated adjustments in photochemical efficiency, photorespiration, CO₂ assimilation and water use efficiency. *Oecol.* 131, 356-365.
- Gijzen, H., E. Heuvelink, H. Challa, L.F.M. Marcelis, E. Dayan, S. Cohen, M. Fuchs, 1998.
HORTSIM: A model for greenhouse crops and greenhouse climate. *Acta Hort.* 456, 441-450.
- Gunderson, C.A., S.D. Wullschleger, 1994.
Photosynthetic acclimation in trees to rising CO₂: a broader perspective. *Photosyn. Res.* 39, 369-388.
- Gutierrez-Colomer, R.P., M.M. Gonzales-Real, A. Baille, 2001.
Influence of shoot bending on the photosynthetic capacity of a greenhouse rose (*Rosa hybrida*) canopy. *Acta Hort.* 559, 377-382.
- Issa, M., G. Ouzounidou, H. Maloupa, H.I.A. Constantinidou, 2001.
Seasonal and diurnal photosynthetic responses of two gerbera cultivars to different substrates and heating systems. *Sci. Hort.* 88, 215-234.
- Kim, S.H., K.A. Shackel, J.H. Leith, 2004.
Bending alters water balance and reduces photosynthesis of rose shoots. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 129, 896-901.
- Kittas, C., N. Katsoulas, A. Baille, 2000.
Influence of misting on the diurnal hysteresis of canopy transpiration rate and conductance in a rose greenhouse. *Acta Hort.* 534, 155-161.
- Kramer, P.J., 1932.
The absorption of water by root systems of plants. *Am. J. Bot.* 19, 148-164.
- Kramer, P.J., J.S. Boyer, 1995.
Water relations of Plants and Soils. Academic Press, San Diego, Ca., USA, 495 pp.
- Kramer, P.J., 1981.
Carbon dioxide concentration, photosynthesis and dry matter production. *Biosci.* 3, 29-33.

KWIN, 2004.

Kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw 2004.

Mansfield, T.A., A.M. Hetherington, C.J. Atkinson, 1990.

Some current aspects of stomatal physiology. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 41, 55-75.

Marcelis, L.F.M., H.A.G.M. van den Boogaard, E. Meinen, 2000.

Control of crop growth and nutrient supply by the combined use of crop models and plant sensors. In: *Proc. Int. Conf. Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-Harvested Processing. IFAC*, pp. 351-356.

Marissen, N., A. Elings, J. Snel, M.G. Warmenhoven, E. Meinen, P. Dijkhuis, D. Kouwenhoven, P.M.M. Schrama, D. Uenk, 2005.

Energiebesparing mobiele belichting roos. Vergelijking van de productie en fotosynthese en modelmatige groeianalyse van roos onder lange slag mobiel licht en onder vast licht. Naaldwijk, Praktijkonderzoek Plant en Omgeving, Rapport 41616002, pp. 64.

Murillo-Amador, B., F. Borrego-Escalante, E. Troyo-Diequez, 2000.

Physiological characteristics and yield of eight tomato cultivars under experimental greenhouse conditions. *Phyton Int. J. Exp. Bot.* 66, 107-117.

Nederhoff, E., 1994.

Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse vegetable crops. Proefschrift Landbouwniversiteit Wageningen.

Oosten, J.J. van, R.T. Besford, 1994.

Sugar feeding mimics effect of acclimation to high CO₂-rapid down regulation of RuBisCo small subunit transcripts but not of the large subunit transcripts. *J. Plant Physiol.* 143, 306-312.

Sage, R.F., 1991.

A model describing the regulation of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase, electron transport, and triose phosphate use in response to light intensity and CO₂ in C₃ plants. *Plant Physiol.* 94, 1728-1734.

Sojka, R.E., L.H. Stolzy, 1980.

Soil-oxygen effects on stomatal response. *Soil Sci.* 130, 350-358.

Stutte, G.W., N.C. Yorio, R.M. Wheeler, 1996.

Interacting effects of photoperiod and photosynthetic photon flux on net carbon assimilation and starch accumulation in potato leaves. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121, 264-268.

Woodward, F.I., C.K. Kelly, 1995.

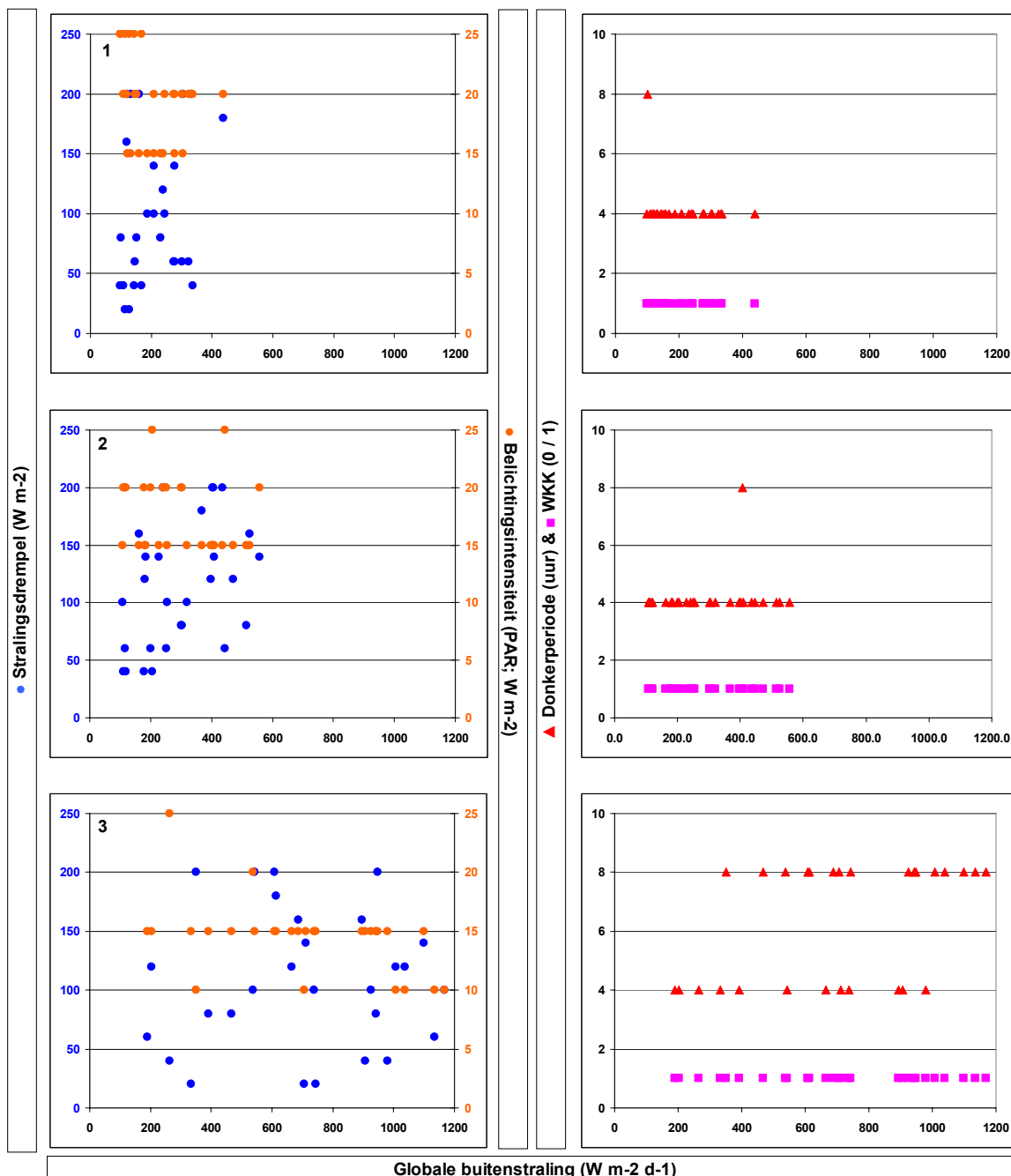
The influence of CO₂ concentration on stomatal density. *New Phytologist* 131, 311-327.

Woodward, F.I., J.A. Lake, W.P. Quick, 2002.

Stomatal development and CO₂: ecological consequences. *New Phytologist* 153, 477-484.

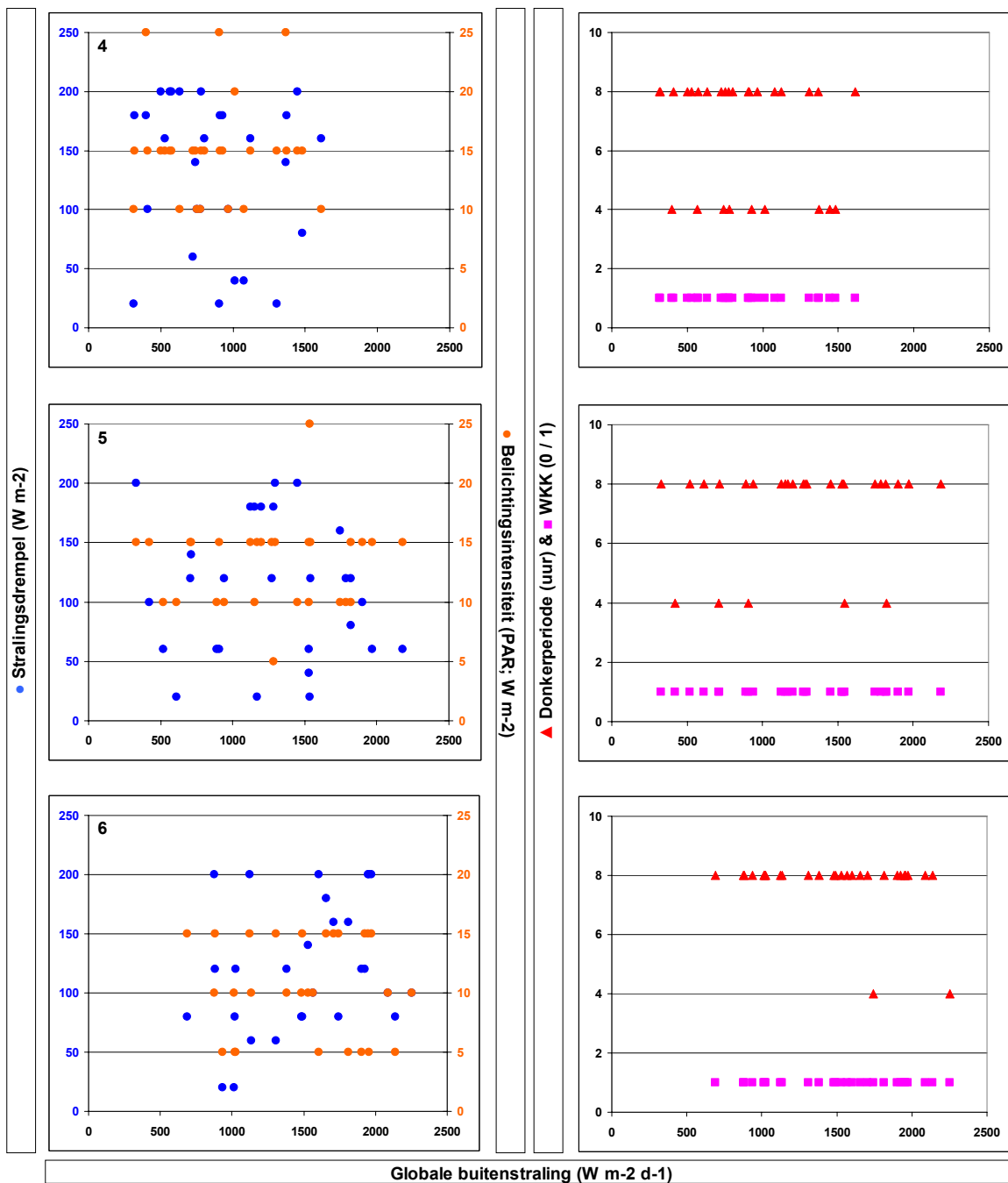
Bijlage I.

Optimale belichtingsscenario's voor maximale energie-efficiëntie (g DM MJ⁻¹)

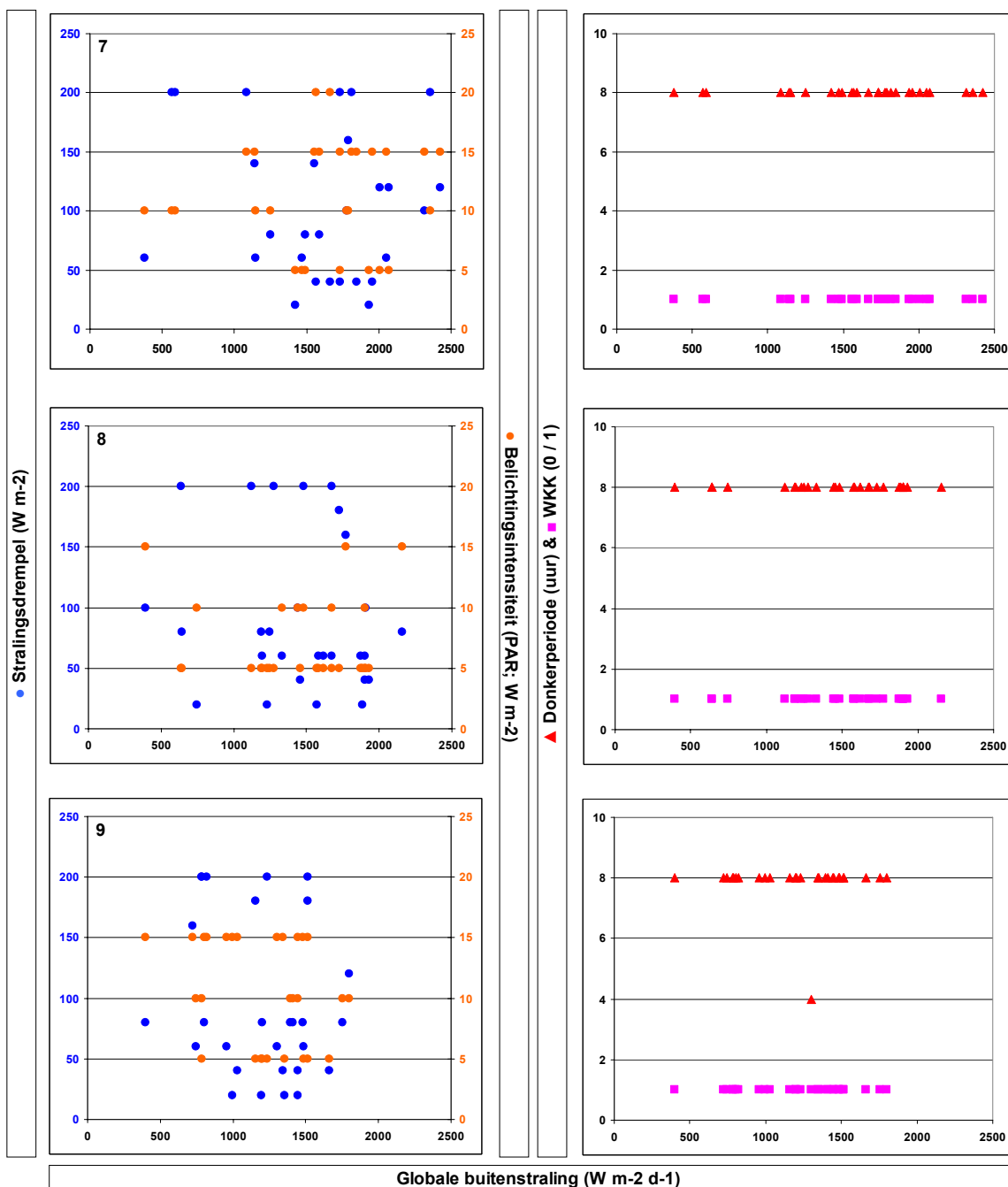


Figuur 1.1. Optimale belichtingsstrategie voor maximale energie-efficiëntie voor 1, 2 en 3, gerelateerd aan de globale buitenstraling.

● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK

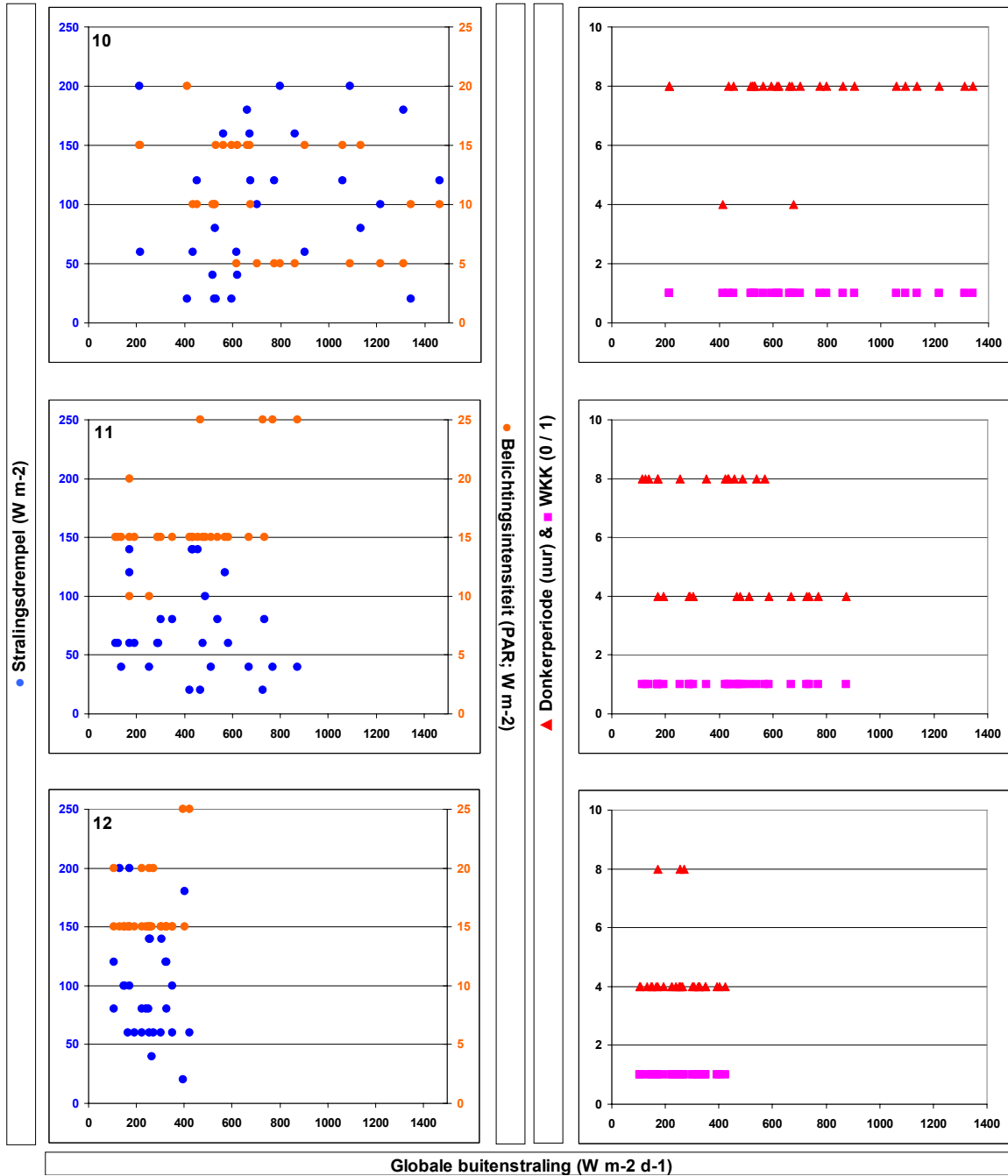


Figuur 1.2. Optimale belichtingsstrategie voor maximale energie-efficiëntie voor 4-weekse productieperiode 4, 5 en 6, gerelateerd aan de globale buitenstraling.
 ● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK

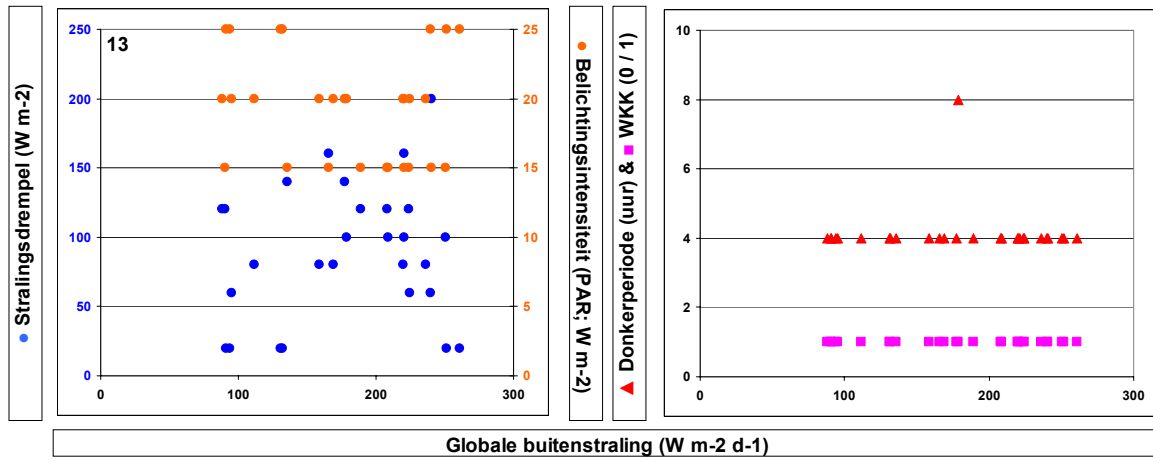


Figuur 1.3. Optimale belichtingsstrategie voor maximale energie-efficiëntie voor 4-weekse productieperiode 7, 8 en 9, gerelateerd aan de globale buitenstraling.

● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK



Figuur 1.4. Optimale belichtingsstrategie voor maximale energie-efficiëntie voor 4-weekse productieperiode 10, 11 en 12, gerelateerd aan de globale buitenstraling.
 ● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK

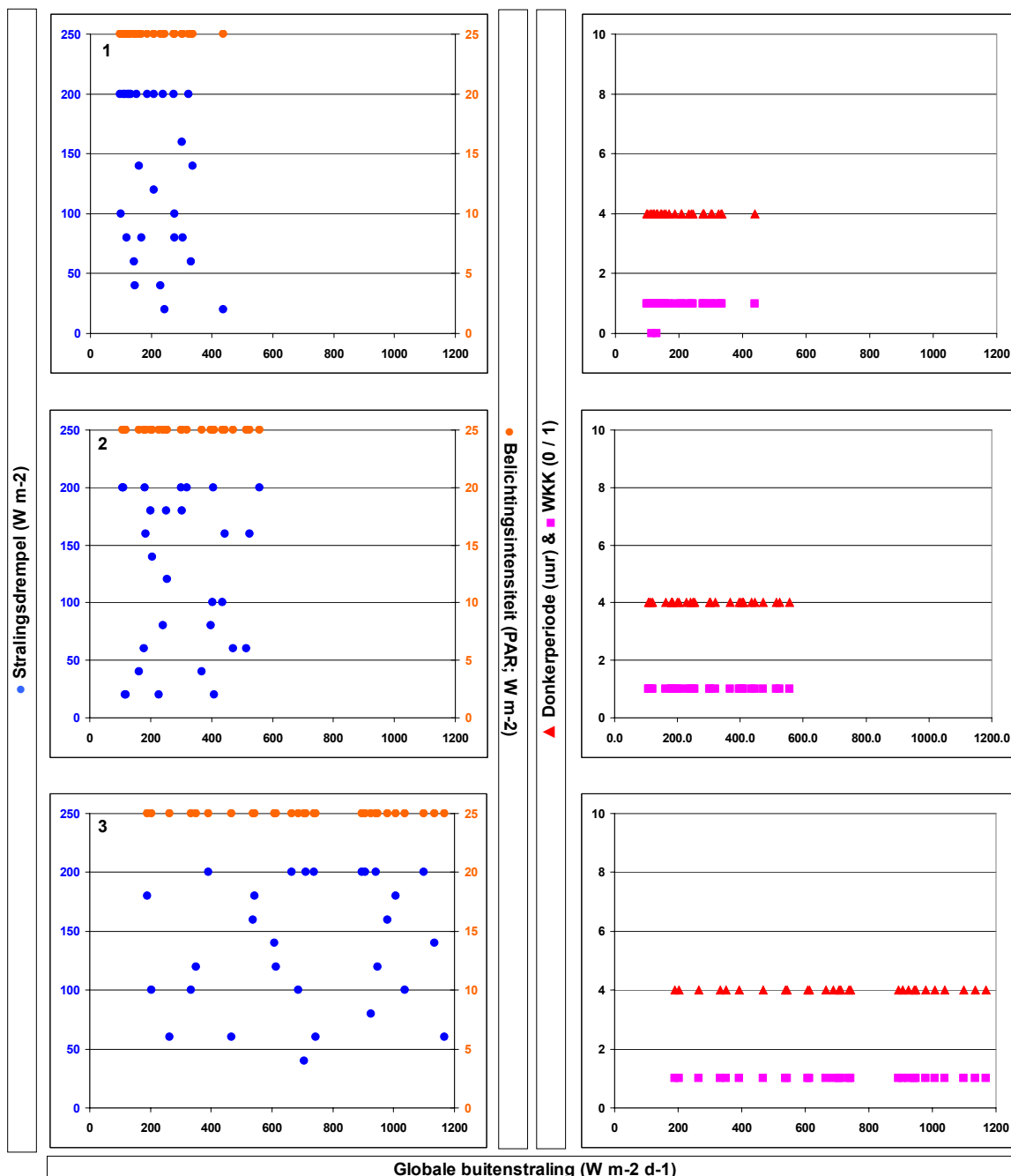


Figuur 1.5. Optimale belichtingsstrategie voor maximale energie-efficiëntie voor 4-weekse productieperiode 13, gerelateerd aan de globale buitenstraling.

● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK

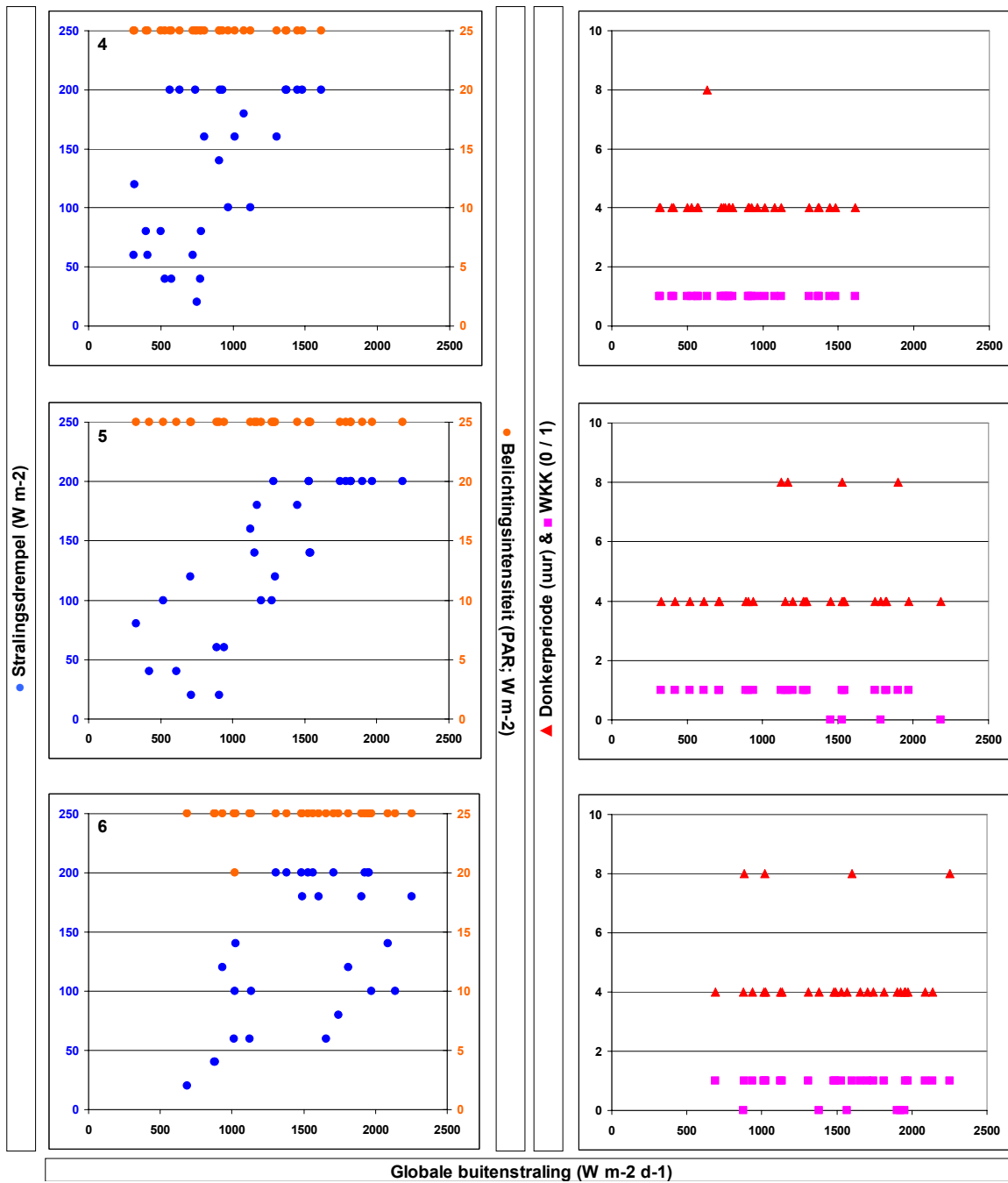
Bijlage II.

Optimale belichtingsscenario's voor maximaal saldo roos cv. *Red Berlin* (€ m⁻²)

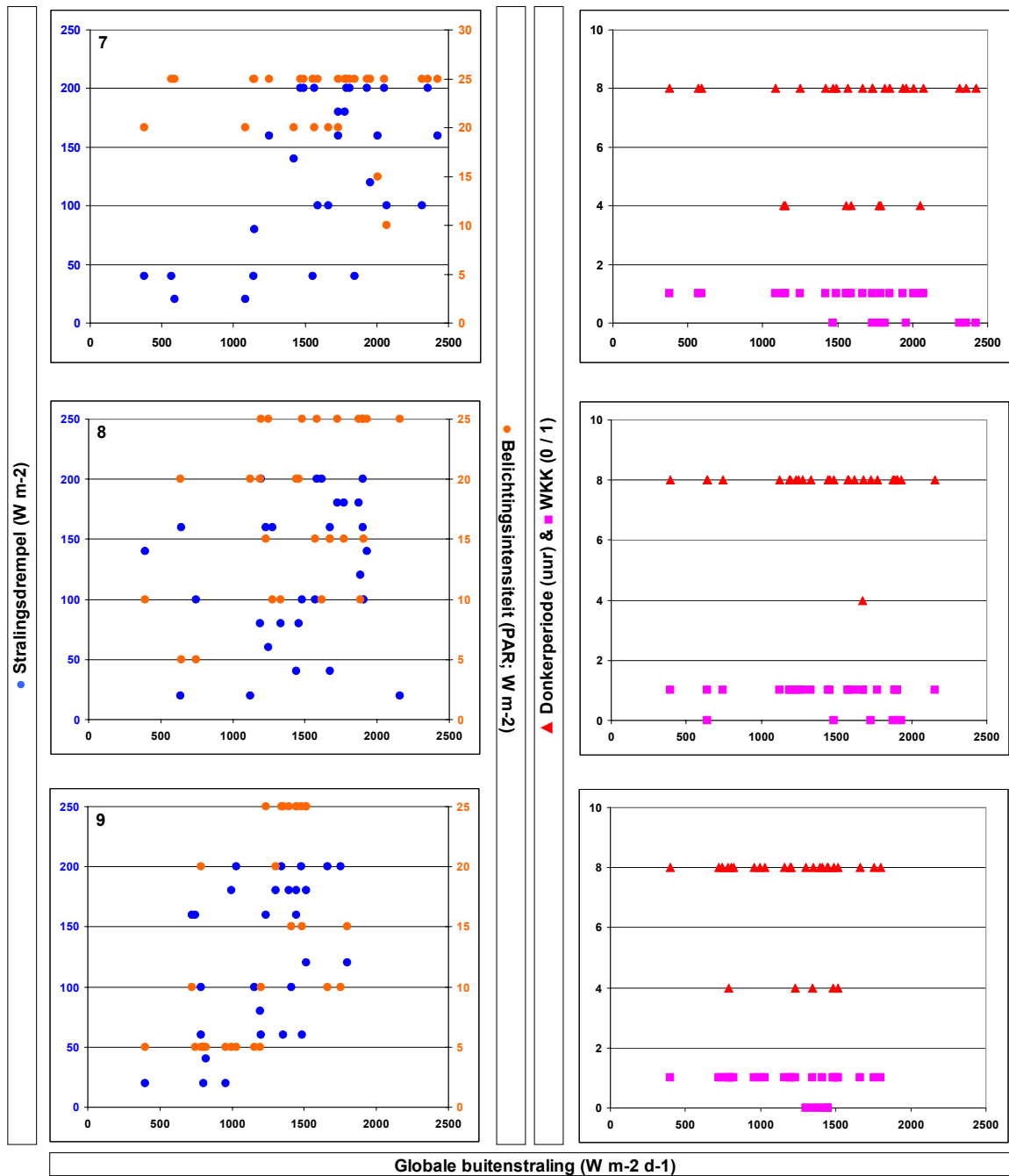


Figuur 2.1. Optimale belichtingsstrategie voor maximaal saldo roos cv Red Berlin voor 4-weekse productieperiodes 1, 2 en 3, gerelateerd aan de globale buitenstraling.

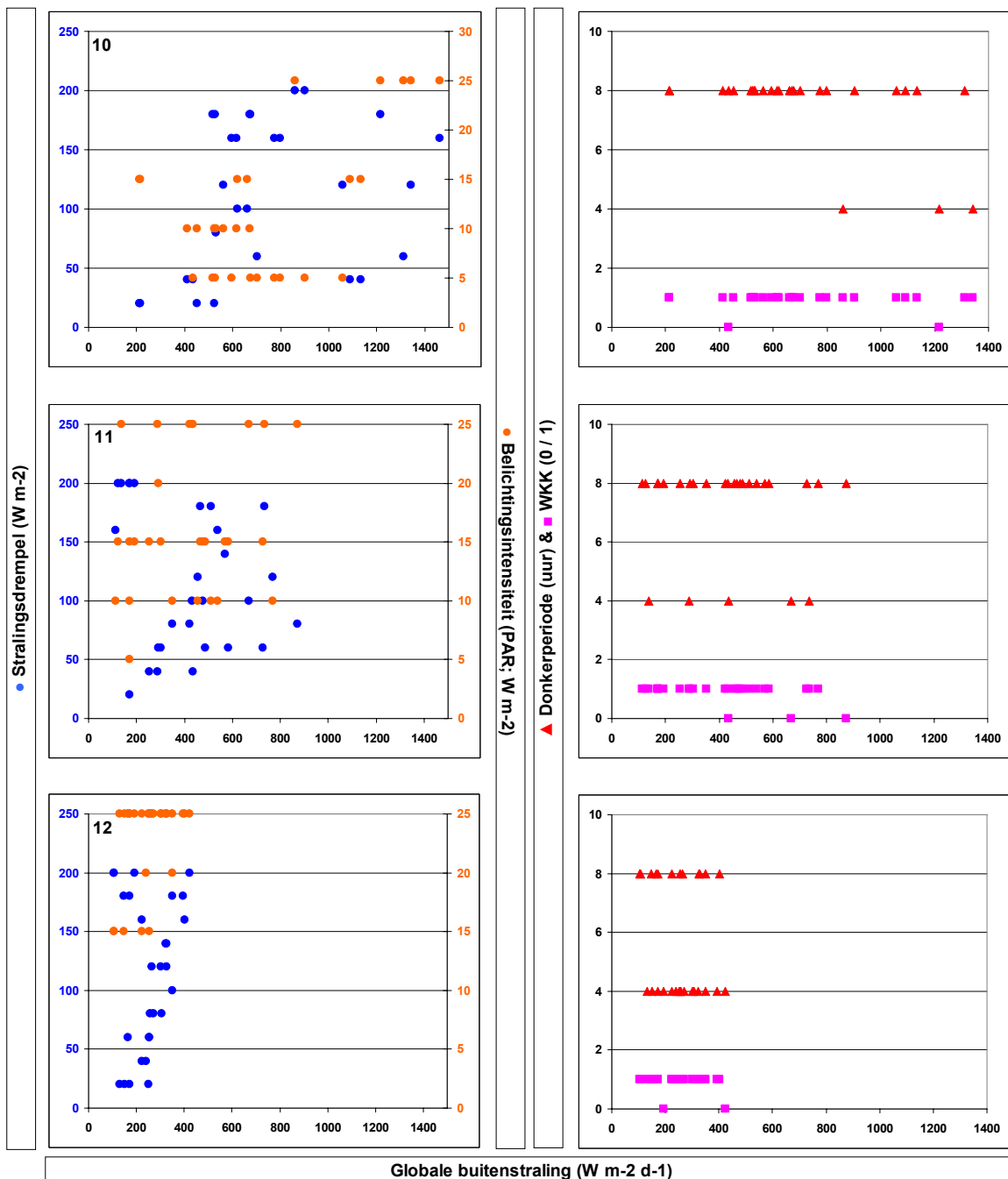
● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK



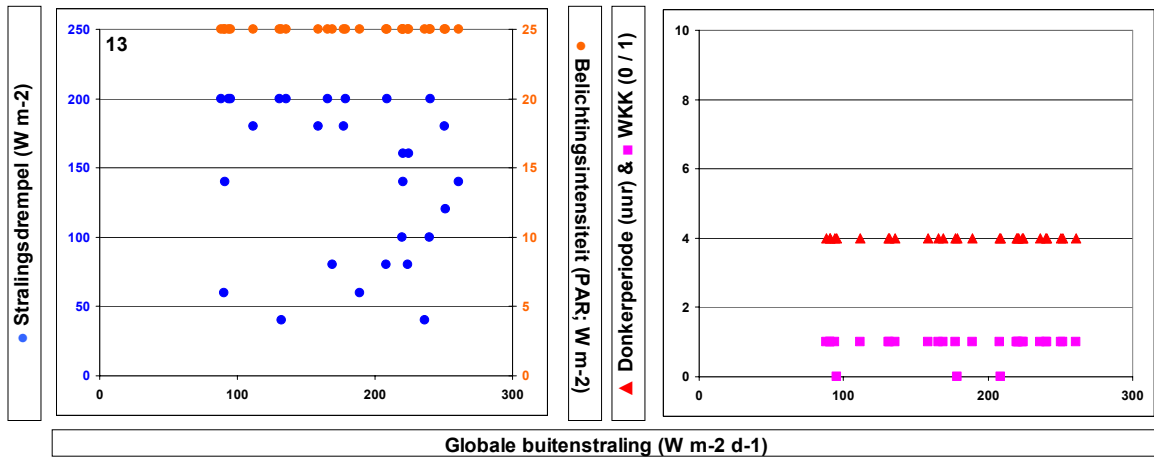
Figuur 2.2. Optimale belichtingsstrategie voor maximaal saldo roos cv. Red Berlin voor 4-weekse productieperiodes 4, 5 en 6, gerelateerd aan de globale buitenstraling.
 ● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK



Figuur 2.3. Optimale belichtingsstrategie voor maximaal saldo roos cv. Red Berlin voor 4-weekse productieperiodes 7, 8 en 9, gerelateerd aan de globale buitenstraling.
 ● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK



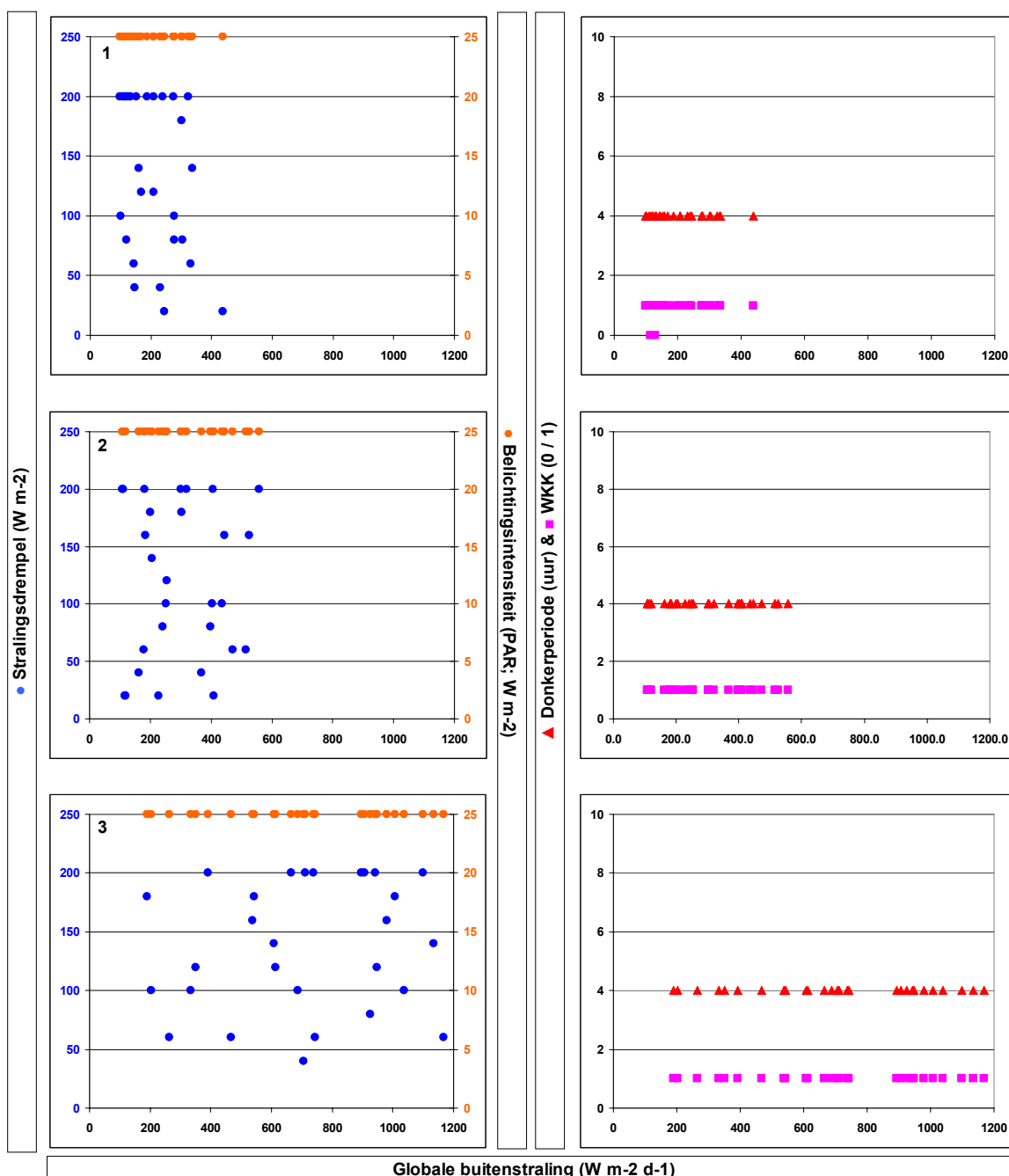
Figuur 2.4. Optimale belichtingsstrategie voor maximaal saldo roos cv. Red Berlin voor 4-weekse productieperiodes 10, 11 en 12, gerelateerd aan de globale buitenstraling.
 ● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK



Figuur 2.5. Optimale belichtingsstrategie voor maximaal saldo roos cv. Red Berlin voor 4-weekse productieperiode 13, gerelateerd aan de globale buitenstraling.
 ● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK

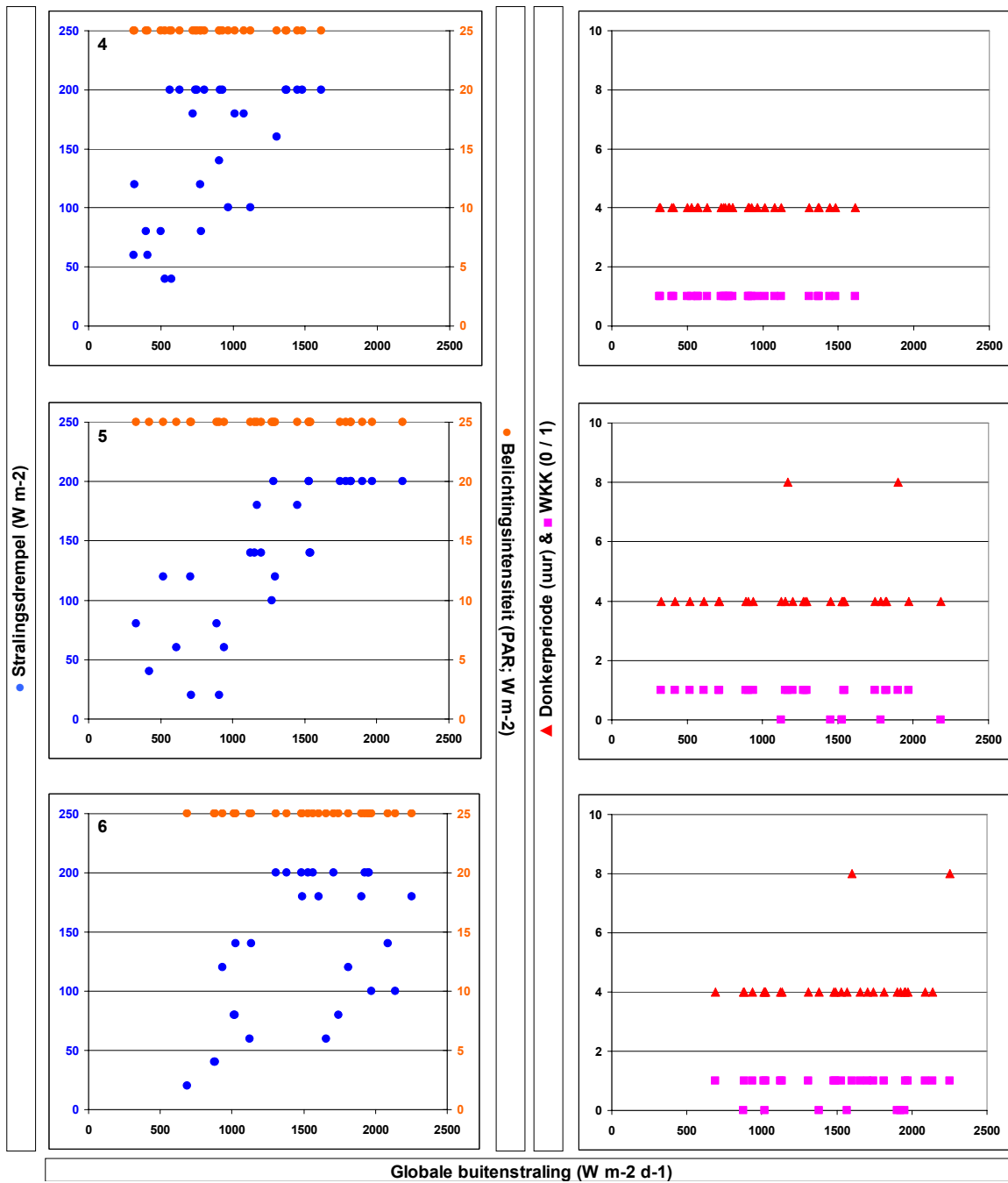
Bijlage III.

Optimale belichtingsscenario's voor maximaal saldo roos cv. *Red Berlin* (€ m⁻²)

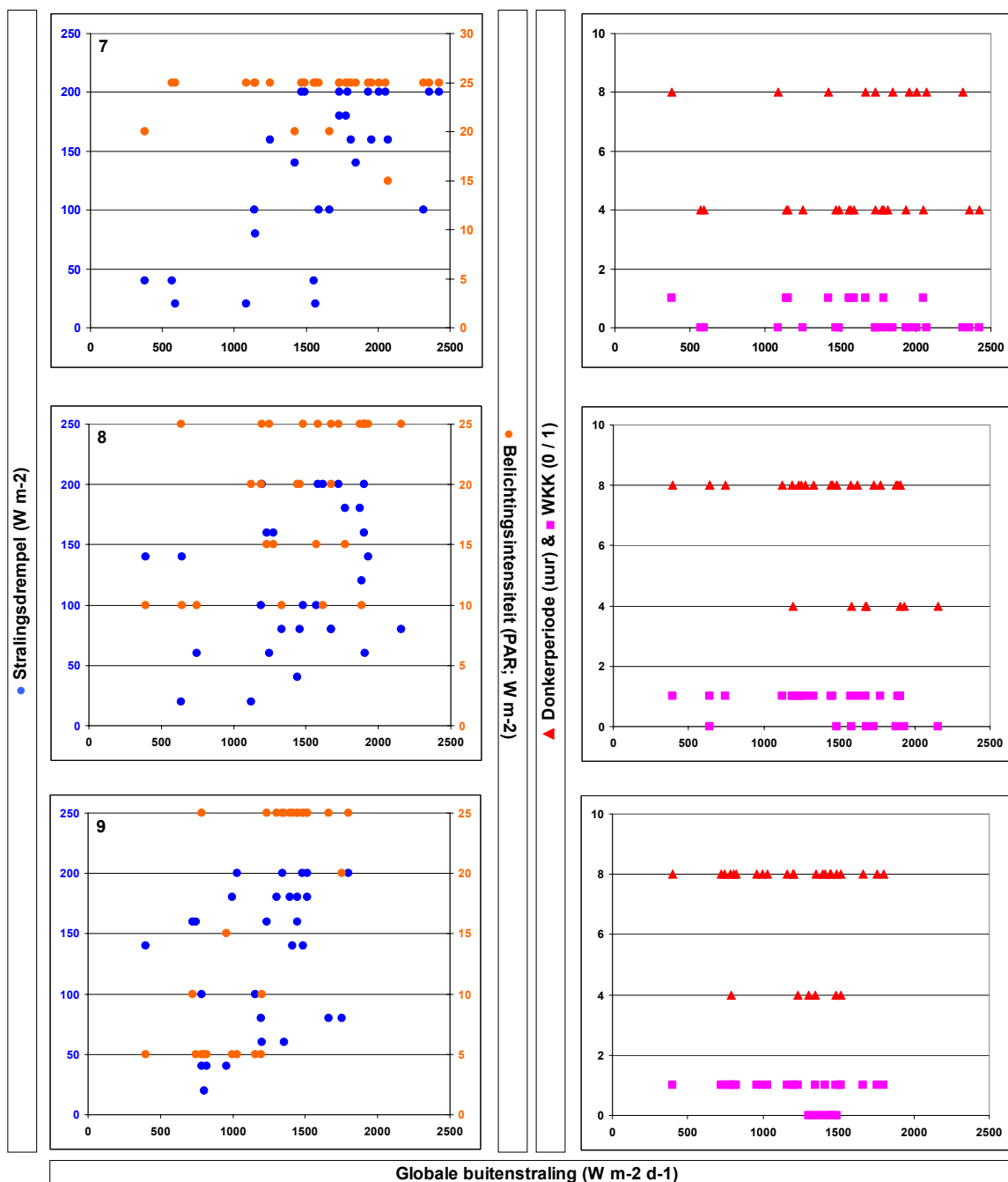


Figuur 3.1. Optimale belichtingsstrategie voor maximaal saldo roos cv. *Sphinx* voor 4-weekse productieperiodes 1, 2 en 3, gerelateerd aan de globale buitenstraling.

● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK

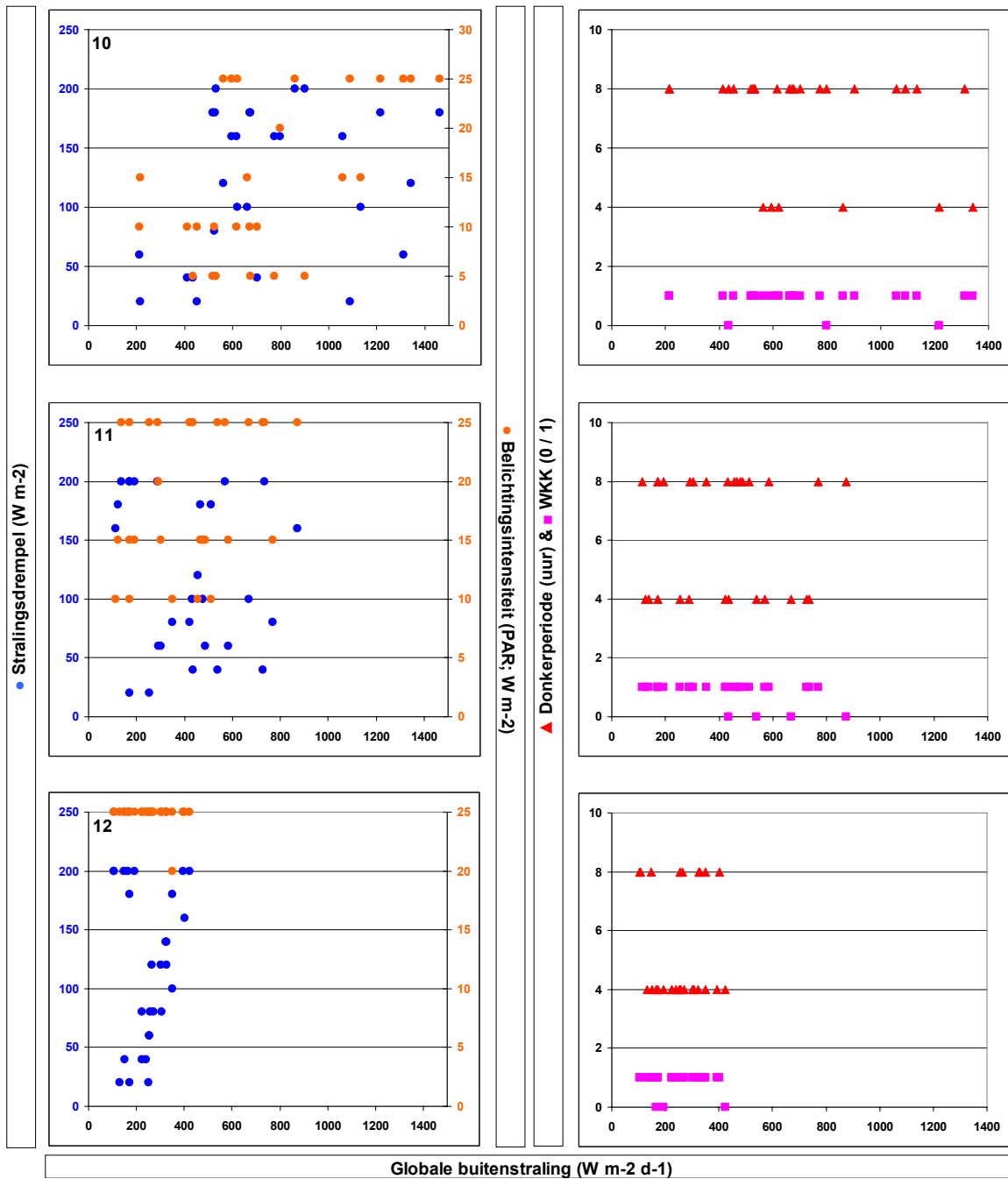


Figuur 3.2. Optimaal belichtingsstrategie voor maximaal saldo roos cv. Sphinx voor 4-weekse productieperiodes 4, 5 en 6, gerelateerd aan de globale buitenstraling.
 ● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK

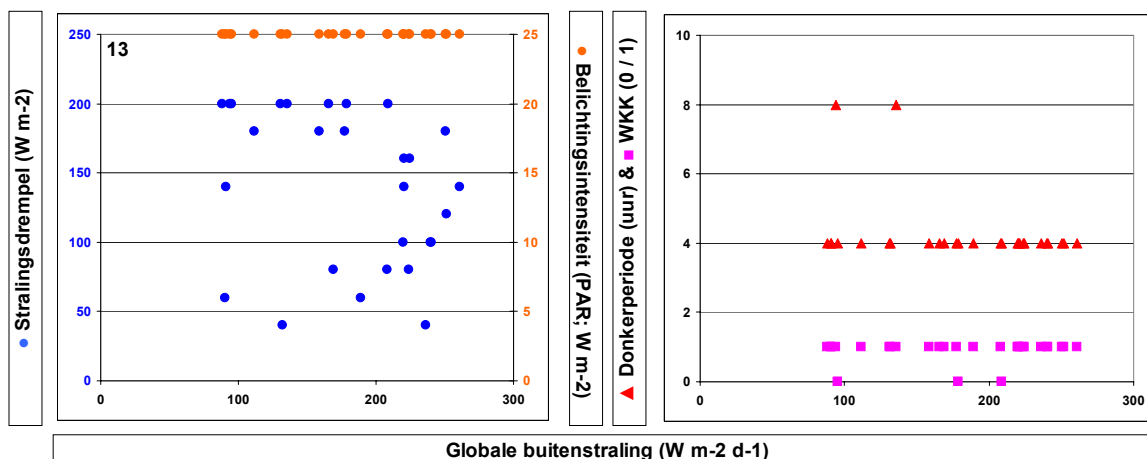


Figuur 3.3. Optimale belichtingsstrategie voor maximaal saldo roos cv. Sphinx voor 4-weekse productieperiodes 7, 8 en 9, gerelateerd aan de globale buitenstraling.

● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK



Figuur 3.4. Optimale belichtingsstrategie voor maximaal saldo roos cv. Sphinx voor 4-weekse productieperiodes 10, 11 en 12, gerelateerd aan de globale buitenstraling
 ● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK



Figuur 3.5. Optimale belichtingsstrategie voor maximaal saldo roos cv. Sphinx voor 4-weekse productieperiode 13, gerelateerd aan de globale buitenstraling.
 ● stralingsdrempel ● belichtingsintensiteit ▲ donkerperiode ■ WKK

