

Energiezuinige teeltstrategie in voorjaar en zomer

Eindrapport

Marcel Raaphorst
Frank Kempkes (PRI)
Anne Elings (PRI)
Anja Dieleman (PRI)

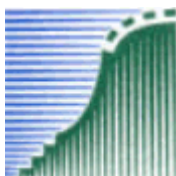
Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.
Business Unit Glastuinbouw
december 2006

© 2006 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, 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 Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

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

Dit project is gefinancierd door het energieprogramma van het ministerie van LNV samen met het Productschap Tuinbouw.



Projectnummer: 32420024

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Business Unit Glastuinbouw

Adres : Kruisbroekweg 5
: Postbus 8, 2670 AA Naaldwijk
Tel. : 0174 - 636700
Fax : 0174 - 636835
E-mail : infoglastuinbouw.ppo@wur.nl
Internet : www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	6
1 INLEIDING	8
1.1 Probleemstelling.....	8
1.2 Doelstellingen.....	8
1.2.1 Technische doelstellingen.....	8
1.2.2 Energiedoelstellingen.....	8
1.2.3 Nevendoelstellingen.....	8
1.2.4 Toepassingstermijn.....	8
1.3 Afbakening.....	9
1.4 Leeswijzer.....	9
2 METHODE	10
2.1 Algemene effecten.....	10
2.2 Gewasspecifieke effecten.....	10
2.3 Modelberekeningen.....	10
2.3.1 Referentie	10
2.3.2 Dode zone: hogere ventilatietemperatuur.....	10
2.3.3 Temperatuurintegratie met verschillende bandbreedten	11
2.4 Evaluatie en terugkoppeling.....	11
2.5 Rapportage en kennisdoorstroming.....	11
3 MODELLERING VAN OMGEVINGSINVLOEDEN OP DE PLANT	12
3.1 Omgevingsinvloeden op fotosynthese.....	12
3.1.1 Invloed van licht, CO ₂ en temperatuur op de fotosynthese	12
3.1.2 Fotosyntheseverloop gedurende de dag	15
3.1.3 Fotosyntheseverloop gedurende het seizoen.....	19
3.1.4 Fotosyntheseverloop in verschillende bladlagen van de plant.....	20
3.1.5 Modelling van de invloeden van licht, CO ₂ en temperatuur op de fotosynthese	21
3.2 Omgevingsinvloeden op groei en ontwikkeling.....	22
3.2.1 Temperatuur	22
3.2.2 Licht.....	23
3.2.3 CO ₂	23
3.2.4 Modelling van de gewasgroei- en ontwikkeling.....	23
3.3 Conclusies invloeden op fotosynthese en gewasontwikkeling.....	24
4 RESULTATEN	26
4.1 Invloeden op energieverbruik	26
4.2 Invloeden op productie en bedrijfsresultaat	27
4.2.1 Temperatuur, vocht en CO ₂	27
4.2.2 LAI en lichtonderschepping.....	31
4.2.3 Bruto assimilatie en onderhoudsademhaling.....	32
4.2.4 Groei van gewas en vruchten.....	33
4.2.5 Vruchtdrogestofgehalte en versooft.....	34
4.2.6 Aantal geogste vruchten.....	35
4.2.7 Assimilatenbalans	36
4.2.8 Gasbenuttingsefficiëntie	38
4.2.9 Economische evaluatie.....	39

4.2.10	Samenvatting.....	40
4.3	Reacties van komkommertelers	41
4.4	Perspectieven bij andere gewassen.....	41
4.4.1	Tomaat	42
4.4.2	Paprika	42
4.4.3	Aubergine	42
4.4.4	Roos.....	43
4.4.5	Chry sant	43
4.4.6	Kalanchoë	43
5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	44
5.1	Discussie	44
5.1.1	Temperatuurintegratie.....	44
5.1.2	Reacties telers	44
5.1.3	Verantwoording groeimodel en cases.....	44
5.1.4	Verschillen en meerwaarde ten opzichte van meerdaagse temperatuurinstelling	45
5.2	Conclusies	45
5.2.1	Invloed productie	45
5.2.2	Invloed energiebesparing en bedrijfsresultaat.....	46
5.2.3	Benauwd klimaat.....	46
5.2.4	Perspectieven andere gewassen.....	46
5.3	Aanbevelingen	46
5.3.1	Aanbevolen klimaatinstellingen	46
5.3.2	Knelpunten	46
5.3.3	Andere gewassen	47
	LITERATUUR.....	48
	BIJLAGE 1 REFERENTIE KOMKOMMER	50
	Kas.....	50
	Gewas- en teeltgegevens.....	50
	Kasklimaat	50
	Buitenklimaat.....	51
	BIJLAGE 2 KOMKOMMERPRIJZEN	52
	BIJLAGE 3 ARBEIDSOMSTANDIGHEDEN	53

Samenvatting

Iedere teler wil een zo hoog mogelijke productie bij zo min mogelijk (energie)kosten om uiteindelijk een hoog bedrijfsresultaat te behalen. Wageningen UR Glastuinbouw (PPO Glastuinbouw, PRI Greenhouse Technology en PRI Cropping Systems) heeft onderzocht hoever telers in het voorjaar en de zomer de kastemperatuur en de CO₂-concentratie kunnen laten oplopen om dit te bereiken.

De CO₂-concentratie en de kastemperatuur hebben invloed op het energieverbruik, de gewasgroei en de productie. CO₂ is een belangrijke factor die de aanmaaksnelheid van assimilaten mede bepaalt. Een hoge temperatuur zorgt voor een snelle gewasontwikkeling, zodat meer vruchten en bladeren worden aangemaakt. Een gewas dat snel een groot bladpakket maakt vangt meer zonlicht op. Aan de andere kant kan een te hoge temperatuur negatief uitwerken voor het gewas. Zeker als het aantal vruchten aan de plant (de plantbelasting) te hoog is kan een hoge temperatuur leiden tot uitputting van het gewas en hiermee tot minder zware vruchten. Ook leidt een hoge temperatuur tot een hogere ademhaling van het gewas, waardoor veel kostbare assimilaten worden verbrand. Uit onderzoek is gebleken dat het temperatuuroptimum voor netto fotosynthese bij veel licht hoger ligt dan bij weinig licht. Een verhoging van de CO₂ concentratie heeft geen of een klein positief effect op de optimale temperatuur. Iedere factor wordt beïnvloed door andere factoren.

Wanneer een teler meer gebruik maakt van de zonnewarmte door minder snel te ventileren, hoeft hij ook minder gas te verstoken om een voldoende hoge etmaaltemperatuur te behalen. Bovendien kan hij met minder ventilatie de CO₂-concentratie in de kas eenvoudiger op peil houden. Hoe hoog je als teler de temperatuur mag laten oplopen kan uiteraard in de praktijk worden getest, maar dit is veel kostbaarder dan het verkennen van temperatuurgrenzen door gebruik te maken van modelberekeningen. Met simulatiemodellen heeft Wageningen UR Glastuinbouw berekend hoe groot het voordeel bij komkommer is als de ramen langer dicht blijven. Hiervoor werden zeven cases doorgerekend die onderling sterk verschillen. De cases betroffen een referentiecasi, drie cases waarin de ventilatietemperatuur (dode zone) met 3, 6 of 9 °C werd verhoogd, en drie cases waarin driedaagse temperatuurintegratie met bandbreedten van 3, 6 of 9 °C werd toegepast.

In alle cases werden twee komkommerteelten doorgerekend: een winterteelt van half december tot en met begin mei en een zomerteelt waar begin mei werd tussengeplant en doorgeteeld tot half augustus. Voor het referentiebedrijf werden klimaatinstellingen verondersteld die in de praktijk gangbaar zijn, zoals een dagtemperatuur van 20 tot 22°C en een nachttemperatuur van 17-21°C afhankelijk van het seizoen en het groeistadium. Vanaf 1 april werd een dode zone van 1°C aangehouden in de referentiecasi. De CO₂-dosering was maximaal 180 kg/ha.uur met de verwarmingsketel of aanvullend met zuivere CO₂, waarbij gestopt werd met doseren bij een CO₂-concentratie van 750 ppm. Er werd geen najaarsteelt doorgerekend, omdat werd verondersteld dat in het najaar de buitentemperatuur van nature al hoog is ten opzichte van de hoeveelheid zonlicht en dat een verhoogde ventilatietemperatuur dan geen positieve bijdrage kan leveren.

Het gebruik van een hogere ventilatietemperatuur (dode zone) bleek volgens de modelberekeningen positief te zijn voor het bedrijfseconomische resultaat. Voor een klein deel kan dit worden verklaard door energiebesparing omdat met een verhoogde ventilatietemperatuur minder hoeft te worden gestookt en ook minder CO₂ hoeft te worden gedoseerd. De productieverhoging bij een verhoogde ventilatietemperatuur heeft een veel grotere invloed op het bedrijfsresultaat. Vooral in de zomerperiode is een flinke productiewinst te boeken. Daar tegenover staat dat een hoge temperatuur in combinatie met een hoge luchtvochtigheid beperkend is voor de arbeidsproductiviteit. Voor iedere handeling is bij een warm en vochtig klimaat meer tijd nodig dan bij een koel en droog klimaat.

Het gebruik van driedaagse temperatuurintegratie bleek volgens de modelberekeningen zeer positief te zijn voor de energiebesparing, maar juist negatief voor de productie. Dit is voor een belangrijk deel te wijten aan de gehanteerde temperatuurintegratie-instellingen waardoor ook overdag veel werd geventileerd om de

driedaagse etmaaltemperatuur voldoende laag te houden. Vaak werd zelfs nog meer geventileerd dan in de referentiecasse. Hierdoor verdween veel CO₂ via de luchtramen en was het economisch gezien niet eens interessant om veel CO₂ te doseren. De lagere CO₂ concentratie leidt tot een lagere groei en productie. Alleen bij een geringe bandbreedte van 3°C gaf driedaagse temperatuurintegratie een beter bedrijfsresultaat dan de referentiecasse.

In tabel a zijn de resultaten weergegeven van de 7 cases met komkommer. Met de case met 9°C dode zone wordt het hoogste bedrijfsresultaat bereikt. Hieruit blijkt dat een verhoogde ventilatietemperatuur in het voorjaar positief uitwerkt voor het rendement van de komkommerteelt. Hierbij moet worden aangetekend dat telers hier niet te ver in moeten doorschieten. Tegenover de productieverhoging en energiebesparing ontstaat bij een verhoogde ventilatietemperatuur namelijk ook een lagere arbeidsproductiviteit. Bij een dode zone van 9°C zouden de extra arbeidskosten door een verlaagde arbeidsproductiviteit het positieve bedrijfsresultaat voor een groot deel teniet doen. Dit zou kunnen worden voorkomen door de arbeidsplanning en de klimaatinstellingen beter op elkaar af te stemmen.

De teeltstrategie om in het voorjaar en de zomer een verhoogde ventilatietemperatuur aan te houden kan naast komkommer ook voor andere gewassen positief uitwerken. Bij aubergine wordt een verhoogde ventilatietemperatuur al volop toegepast, maar ook tomaat en paprika kunnen voordeel hebben bij een verhoogde ventilatietemperatuur. In de sierteelt zijn de perspectieven minder groot, doordat een verhoogde dagtemperatuur vaak negatief uitwerkt op de plantvorm. Zo worden bij roos de takken te kort en treedt bij chrysant juist teveel strekkingsgroei op. Bij een potplantengewas als Kalanchoë kan een hoge temperatuur weer leiden tot bloeivertraging.

Tabel a: Bedrijfseconomisch resultaat ten opzichte van de referentie op basis van verschillen in productie, gasverbruik en verbruik van zuivere CO₂ (bij gelijkblijvende arbeidsproductiviteit)

	Versoogst winter kg m ²	Versoogst zomer kg m ²	Gasverbruik m ³ m ²	CO ₂ kg m ²	Opbrengst € m ²	Gas € m ²	CO ₂ € m ²	Totaal € m ²
Referentie	26,7	39,0	28,6	5,8	tov ref.	tov ref.	tov ref.	tov ref.
DZ_P3	27,1	41,9	28,1	5,3	0,83	0,13	0,05	1,00
DZ_P6	27,2	43,7	27,8	4,1	1,29	0,20	0,17	1,66
DZ_P9	27,7	43,1	27,6	3,0	1,34	0,25	0,28	1,87
TI_B3	26,4	38,0	26,1	4,3	-0,35	0,63	0,15	0,43
TI_B6	25,8	36,0	24,5	2,7	-1,04	1,03	0,31	0,29
TI_B9	26,3	36,2	24,1	2,2	-0,81	1,13	0,36	0,68

Naast een dode zone of temperatuurintegratie zou het toepassen van meerdaagse temperatuurinstelling (MTI) de energie-efficiëntie nog verder kunnen verhogen. Bij MTI wordt de gemiddelde etmaaltemperatuur zodanig ingesteld dat de vraag naar assimilaten over meerdere dagen wordt aangepast aan het assimilatenaanbod. Dit gebeurt dusdanig dat de pieken in de verhouding aanbod/vraag (de assimilatenbalans) worden gedempt. Het toepassen van MTI vereist de dagelijkse inzet van een gewasgroei-rekenmodel. Het gebruik van een dode zone of temperatuurintegratie is in dit opzicht eenvoudiger om tot verlaging van het energieverbruik en/of verhoging van de productie te komen. Verdere energiebesparing vereist echter de verkenning van meer geavanceerde technieken.

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

Gedurende de zomermaanden is het energieverbruik in de meeste teelten vooral afhankelijk van de CO₂-behoefte, bepaald door de gewenste CO₂ concentratie in de kas en de raamopening. De standaard (zomer)teeltstrategie van Nederlandse telers gaat uit van een zo laag mogelijke kastemperatuur (overdag) met zoveel mogelijk CO₂ doseren. Doordat er ruim gelucht wordt gaat daarbij veel CO₂ verloren. Gezien de ervaringen bij Themato lijkt het ook in de gangbare open teelt beter om in de eerste helft van de zomer in periodes met veel instraling een hogere teelttemperatuur aan te houden. Door de kleinere raamstand gaat minder CO₂ verloren. Daarnaast worden door de hogere temperatuur de assimilaten sneller verwerkt door de plant en wordt ten gevolge daarvan meer vegetatieve groei in de kop van de plant verwacht. Het bladoppervlak blijft naar verwachting beter op peil in de zomer en dat zal de lichtonderschepping van het gewas in de tweede helft van de zomer vergroten. De gewijzigde teeltstrategie zal naast meer productie ook leiden tot een lager energieverbruik. Zeker als de hogere dagtemperatuur gecompenseerd wordt met een lagere nachttemperatuur. Een onderzoek gebaseerd op bestaande literatuur, op aanwezige kennis bij gewasdeskundigen en op modelberekeningen met gewijzigde en standaard teeltstrategie moet aantonen dat CO₂ en energie efficiënter ingezet kunnen worden.

1.2 Doelstellingen

1.2.1 Technische doelstellingen

Voor verschillende gewassen en in het bijzonder voor komkommer moet worden aangetoond dat een 5% hogere productie kan worden behaald en sneller een volgroeid zomergewas wordt verkregen door in het voorjaar en de vroege zomer overdag minder te ventileren bij oplopende straling.

1.2.2 Energiedoelstellingen

Aangetoond moet worden dat door minder CO₂ te doseren en door de verhoogde ventilatietemperatuur in de nacht te compenseren in het voorjaar en de zomer 10% energie kan worden bespaard ten opzichte van de huidige teeltmethoden.

1.2.3 Nevendoelstellingen

Door een hogere productie in combinatie met een lager energieverbruik wordt een verbetering van het rendement van de Nederlandse glastuinbouw nagestreefd.

1.2.4 Toepassingstermijn

De resultaten uit het onderzoek kunnen direct door de telers worden toegepast, zonder dat daar investeringen voor moeten worden gedaan.

1.3 Afbakening

De berekeningen beperken zich tot de winter- en zomerteelt van komkommer. Van andere gewassen (tomaat, paprika, komkommer, aubergine, roos, chrysant en Kalanchoë) wordt ook een algemene indruk gegeven van de kansen van een verhoogde ventilatietemperatuur.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden kort de werkwijze en de te behandelen cases voor komkommer weergegeven. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 uitgebreid ingegaan in hoeverre de omgevingsfactoren licht, CO₂ en temperatuur de fotosynthese en de groei van de plant beïnvloeden en hoe dit in groeimodellen is verwerkt. In hoofdstuk 4 staan de resultaten op het gebied van productie, energiebesparing en bedrijfseconomie voor zeven cases vermeld. Bovendien wordt hier ingegaan op de reacties van telers hierop. Ten slotte komen in hoofdstuk 5 enkele discussiepunten aan bod, worden conclusies getrokken en aanbevelingen gegeven.

2 Methode

2.1 Algemene effecten

Op basis van een aantal projecten uitgevoerd binnen het energieprogramma (o.a. 'lichtregel', 'optimalisatie temperatuur en CO₂', 'CO₂ bij paprika') en enkele modelberekeningen wordt een generieke schets gemaakt van de invloed van de temperatuur, CO₂ en licht op de fotosynthese en de plantopbouw. Deze schets zal onderbouwd worden met beschikbare literatuurgegevens. Ook wordt aangegeven in hoeverre de verschillende klimaatinvloeden in de bestaande gewasmodellen zijn verwerkt.

2.2 Gewasspecifieke effecten

Gewasonderzoekers en telers worden ondervraagd naar hun bevindingen over de invloeden van temperatuur, in de praktijk voor de gewassen tomaat, paprika, komkommer, aubergine, roos, chrysant en Kalanchoë. Hierbij zal ook aandacht besteed worden aan grens- en streefwaarden voor de kastemperatuur en de luchtvochtigheid.

2.3 Modelberekeningen

Op basis van de uit de literatuur en de praktijk gevonden invloeden en randvoorwaarden wordt voor komkommer een referentie teeltstrategie opgesteld. Deze referentie teeltstrategie wordt in drie cases aangepast door de lichtinvloed op de ventilatietemperatuur te verhogen (verhoogde dode zone). In drie andere cases wordt de verhoogde ventilatietemperatuur gecompenseerd met behulp van driedaagse temperatuurintegratie (TI). Deze cases moeten aantonen in welke mate het passief benutten van het zonlicht energie kan besparen en de productie verhogen.

Voor CO₂-doseerinstellingen wordt gebruik gemaakt van de "carbonomic-module". In deze module is er een relatie tussen temperatuur en effectiviteit van CO₂-toediening. Hiertoe wordt op dagelijkse basis de buffervulcurve geoptimaliseerd. Daarnaast wordt aan de hand van de marginale kosten voor de CO₂-productie bepaald of meer of minder CO₂ nodig is (financieel /productietechnisch). Deze 'meer'-productie wordt dan als zuivere CO₂ toegediend.

De kasklimaatberekeningen zijn uitgevoerd met het KASPRO model, en de gewasberekeningen zijn uitgevoerd met het INTKAM model (beide PRI).

2.3.1 Referentie

Er zijn berekeningen uitgevoerd aan een winterteelt (14 december – 13 mei) en een zomerteelt (1 mei – 4 augustus), waarbij gebruik is gemaakt van representatieve klimaatgegevens. Een uitgebreide beschrijving van de referentiecasse is opgenomen in bijlage 1. Gasverbruik en productie van de referentiecasse worden gegeven in hoofdstuk 4.

2.3.2 Dode zone: hogere ventilatietemperatuur

Een dode zone is het verschil tussen het setpoint voor ventilatietemperatuur en het setpoint voor de stooktemperatuur. Hoe hoger de dode zone, hoe langer de ramen dicht blijven en daardoor een "dood"

klimaat dreigt. Naast de temperatuur wordt daarom de raamstand ook beïnvloed door de luchtvochtigheid. Bij een RV van meer dan 87% wordt er een kier getrokken. In de cases met verhoogde dode zone is het de bedoeling om ten opzichte van de standaardteelt jaarrond dag en nacht de dode zone met 3, 6 en 9 °C ten opzichte van de standaardteelt te verhogen. Het gebruik van de dode zone maakt het mogelijk om een hogere temperatuur niet met behulp van het verwarmingssysteem maar juist door de zon te realiseren. Hiermee is het een handeling die in principe geen energie kost. De keuzes voor 3, 6 en 9 °C dode zone zijn gesteld om inzicht te krijgen in de ontwikkeling in de energiebesparing en de productieverhoging bij een toenemende dode zone. Hierbij is 9 °C gesteld als de grens waaronder volgens de literatuur nog net geen groeiproblemen door een te hoge temperatuur hoeven te worden verwacht. 3 °C is gesteld als een dode zone die door telers snel kan worden geaccepteerd.

2.3.3 Temperatuurintegratie met verschillende bandbreedten

In deze cases worden hogere dagtemperaturen gecompenseerd middels een 3-daagse temperatuurintegratie regeling. Hierbij worden bandbreedtes van 3, 6 en 9 °C aangehouden. Daarnaast wordt vanuit energiebesparingsoogpunt met de zogenaamde Hollandse methode gewerkt. Bij deze methode worden alleen graaduren opgebouwd als de temperatuurverhoging door de zon wordt veroorzaakt. Deze regeling houdt dus geen rekening met de weersvoorspelling en zal dan ook geen graaduren opbouwen met behulp van de verwarming.

Voor zowel deze instellingenset als voor een gangbare set (referentie) zal met het klimaatmodel KASPRO een berekening worden uitgevoerd op basis van het sel-jaar. Uit deze berekening zal de invloed van de aanpassing op de RV, de kasttemperatuur, de CO₂-concentratie en de benodigde CO₂-dosering worden bepaald, uitgaande van een standaard bedrijfsuitrusting (verwarmingssketel en warmtebuffer). Omdat aanpassingen aan klimaatsetpoints invloed zullen hebben op de vochtinhouding en er bij deze cases door het uitstellen van ventilatie en het toelaten van lage kasttemperaturen grote temperatuurovergangen kunnen ontstaan met de daarbij behorende kans op natslag van het gewas, zal de vochtregeling hiermee rekening houden.

De berekende klimaatdatasets worden gebruikt om met het gewasgroeimodel INTKAM te bepalen wat de invloed van de verhoogde lichtinvloed is op de LAI, SLA en de productie bij komkommer. In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de cases zoals deze nader zullen worden uitgewerkt.

Tabel 1 Overzicht van de cases

case	omschrijving
referentie	standaard komkommerteelt, voor uitgebreide beschrijving zie Bijlage 1
DZ_P3	als referentiecasi maar jaarrond is dag en nacht de dode zone met 3 °C verhoogd
DZ_P6	als referentiecasi maar jaarrond is dag en nacht de dode zone met 6 °C verhoogd
DZ_P9	als referentiecasi maar jaarrond is dag en nacht de dode zone met 9 °C verhoogd
TI_B3	als referentiecasi maar er wordt 3 daagse TemperatuurIntegratie toegepast met een bandbreedte van 3 °C
TI_B6	als referentiecasi maar er wordt 3 daagse TemperatuurIntegratie toegepast met een bandbreedte van 6 °C
TI_B9	als referentiecasi maar er wordt 3 daagse TemperatuurIntegratie toegepast met een bandbreedte van 9 °C

2.4 Evaluatie en terugkoppeling

De cases worden bedrijfseconomisch doorgerekend en aan telers gepresenteerd. Suggesties van telers worden meegenomen in de evaluatie. Ook wordt een indicatie gegeven in hoeverre de resultaten zijn te vertalen naar andere gewassen dan komkommer.

2.5 Rapportage en kennisdoorstroming

De resultaten worden vastgelegd in dit eindrapport. Ook wordt een vakbladartikel geschreven.

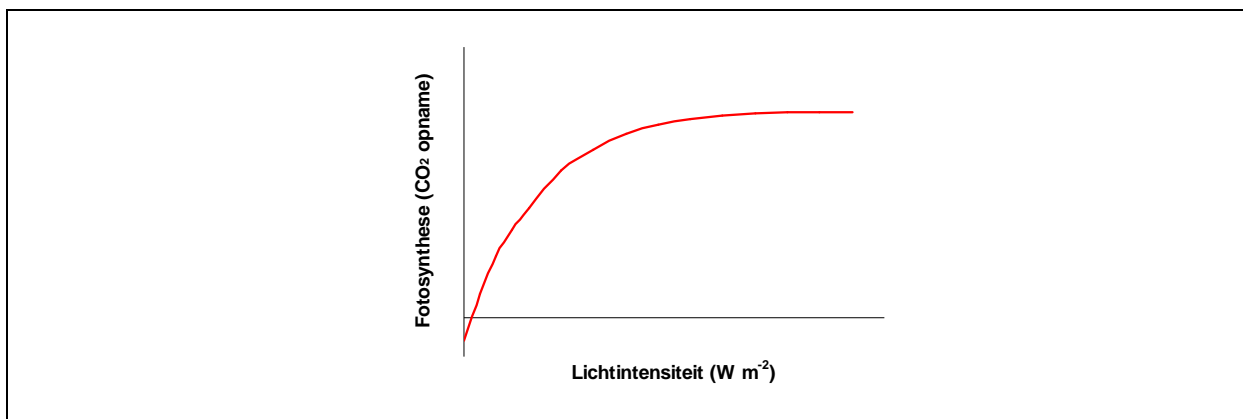
3 Modelling van omgevingsinvloeden op de plant

In dit hoofdstuk wordt eerst ingegaan op de effecten van licht, CO₂ en temperatuur op de fotosynthese (3.1) en op groei en ontwikkeling (3.2). Er wordt aandacht gegeven aan de gewassen komkommer, tomaat paprika en roos. Het was helaas niet mogelijk om alleen voorbeelden van het gewas komkommer te betrekken zonder het aantal besproken aspecten te verminderen. Vervolgens worden de berekeningen ten aanzien van de verschillende teeltstrategieën voor komkommer gepresenteerd (3.3).

3.1 Omgevingsinvloeden op fotosynthese

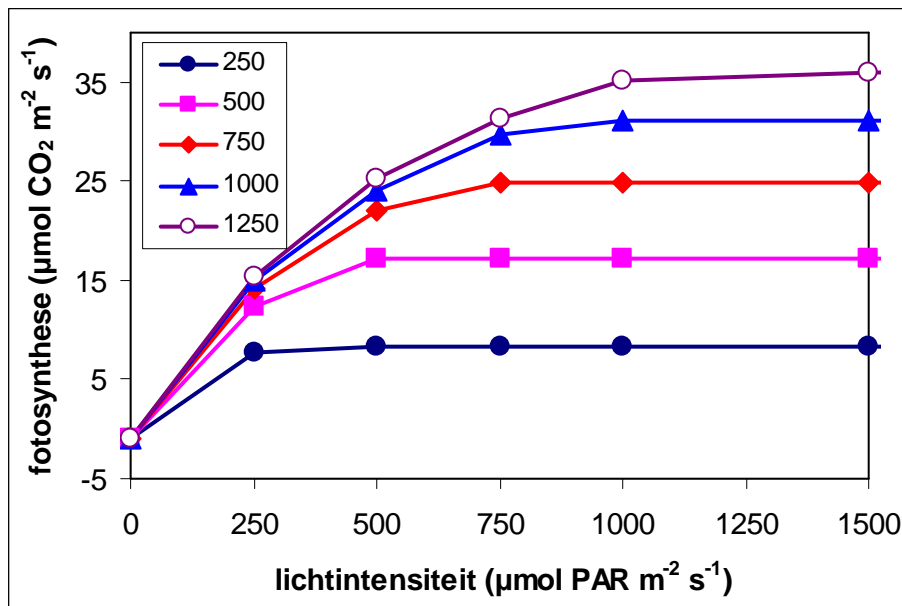
3.1.1 Invloed van licht, CO₂ en temperatuur op de fotosynthese

Tijdens de fotosynthese wordt CO₂ uit de lucht opgenomen en met behulp van lichtenergie omgezet in suikers, die gebruikt worden voor de groei. Als de hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling (PAR) in een kas hoger wordt, neemt de netto fotosynthesesnelheid van een blad toe (Figuur 1) totdat licht niet meer beperkend is voor de fotosynthese. Dan bereikt de fotosynthese een maximum, dat alleen verder verhoogd kan worden door de CO₂-concentratie of temperatuur te verhogen.



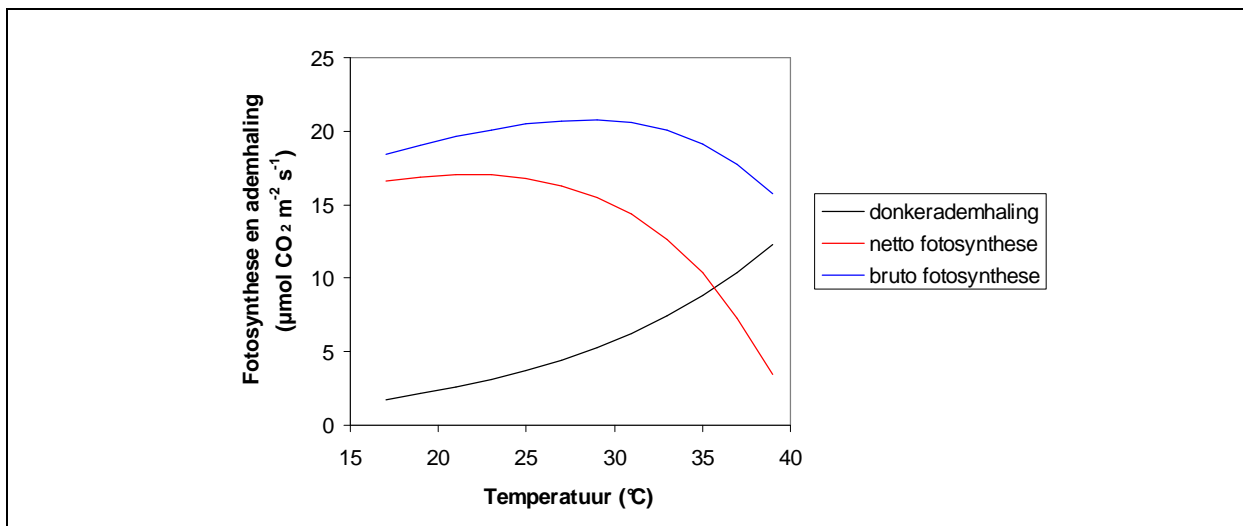
Figuur 1 Standaard lichtresponscurve van een gezond blad.

De fotosynthesesnelheid neemt verder toe als de CO₂-concentratie in de kaslucht wordt verhoogd (Figuur 2; naar Dieleman et al., 2003). Uit deze figuur is duidelijk te zien dat naarmate de lichtintensiteit hoger is, het effect van extra CO₂ groter is. Andersom geldt ook dat bij hogere concentraties CO₂ in de kaslucht, het effect van meer licht op de fotosynthese groter is.



Figuur 2 Berekende lichtresponscurves van paprikabladeren bij een aantal CO₂ concentraties (zie legenda) en bij 22 °C. (Bron van uitgangsggegevens: Dieleman et al., 2003).

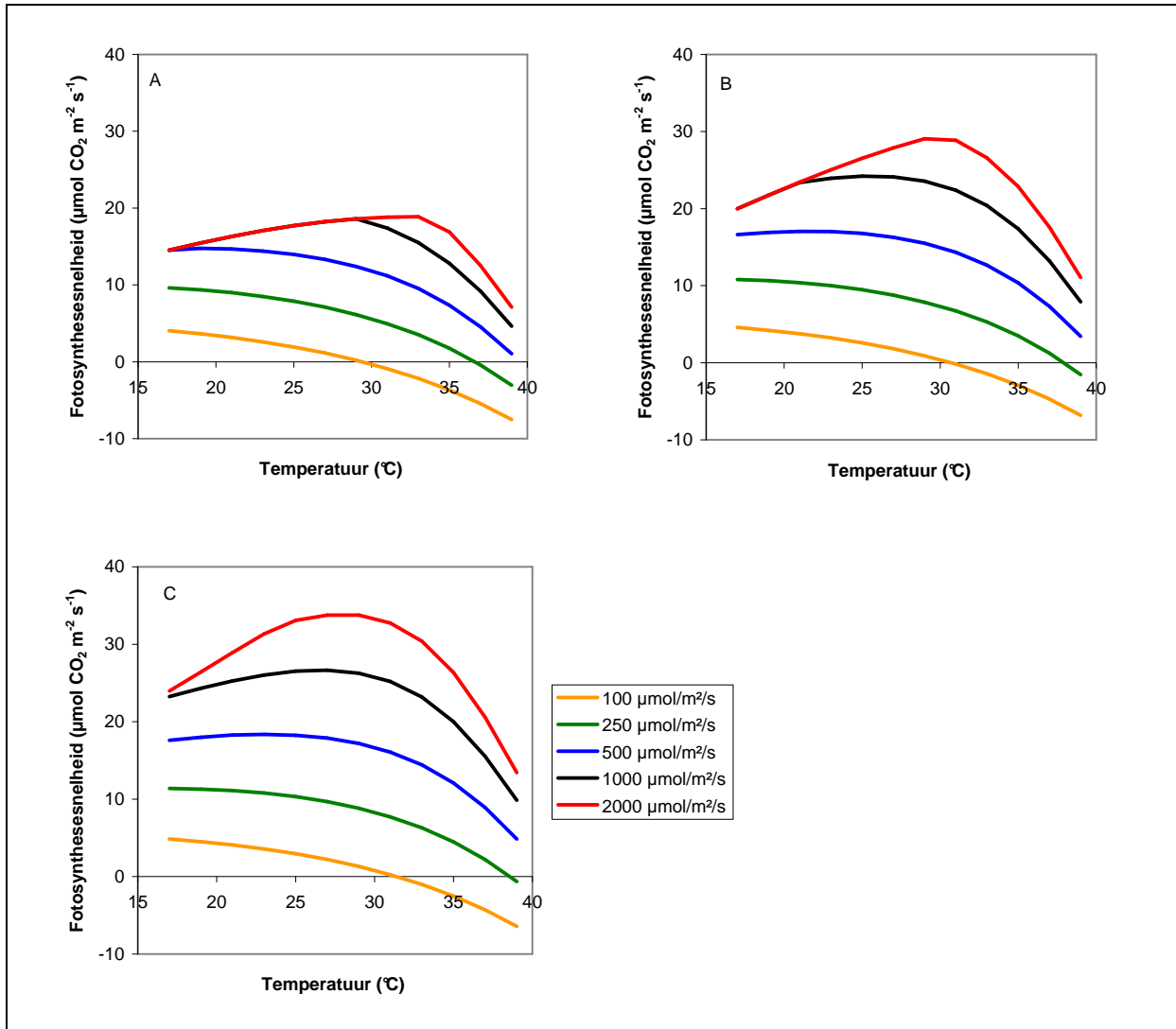
De CO₂-uitwisseling die met fotosynthesemeteapparatuur gemeten wordt, is de resultante van de binding van CO₂ tijdens de fotosynthese en de productie van CO₂ tijdens de donkerademhaling. Dit wordt de netto fotosynthese genoemd. De bruto fotosynthese heeft een beperkte temperatuurafhankelijkheid. De netto fotosynthese daarentegen neemt boven de 25 °C sterk af bij een toename van de temperatuur. Dit wordt veroorzaakt door een stijging van de donkerademhaling, die over een groot temperatuurtraject exponentieel toe neemt met de temperatuur (Figuur 3).



Figuur 3 Temperatuurreponscurves van de donkerademhaling, netto fotosynthesesnelheid en bruto fotosynthesesnelheid bij 500 µmol PAR m² s¹ en 580 ppm CO₂ berekend met een gewasgroeimodel (Bron: Dieleman et al., 2003).

Er bestaat een interactie tussen de temperatuur, de hoeveelheid licht, en de heersende CO₂-concentratie met betrekking tot de netto fotosynthesesnelheid. Uit fotosynthesemetingen en berekeningen met een gewasgroeimodel dat op deze metingen is gekalibreerd, blijkt dat de netto fotosynthesesnelheid bij lage lichtintensiteiten afneemt met toenemende temperatuur. Bij temperaturen boven de 30 °C is de ademhaling zo hoog dat de netto fotosynthese zelfs negatief wordt bij 100 µmol m² s⁻¹ licht. Naarmate de lichtintensiteit

toeneemt, verschuift het optimum van de temperatuur-fotosynthese curve naar hogere temperaturen. De CO_2 -concentratie heeft nauwelijks effect op de optimale temperatuur voor de netto fotosynthese. Over het algemeen zijn bij hogere CO_2 concentraties de optimale temperatuur voor de fotosynthese hoger (Long, 1991) en de temperatuuroptima breder (Vara Prasad et al., 2005).



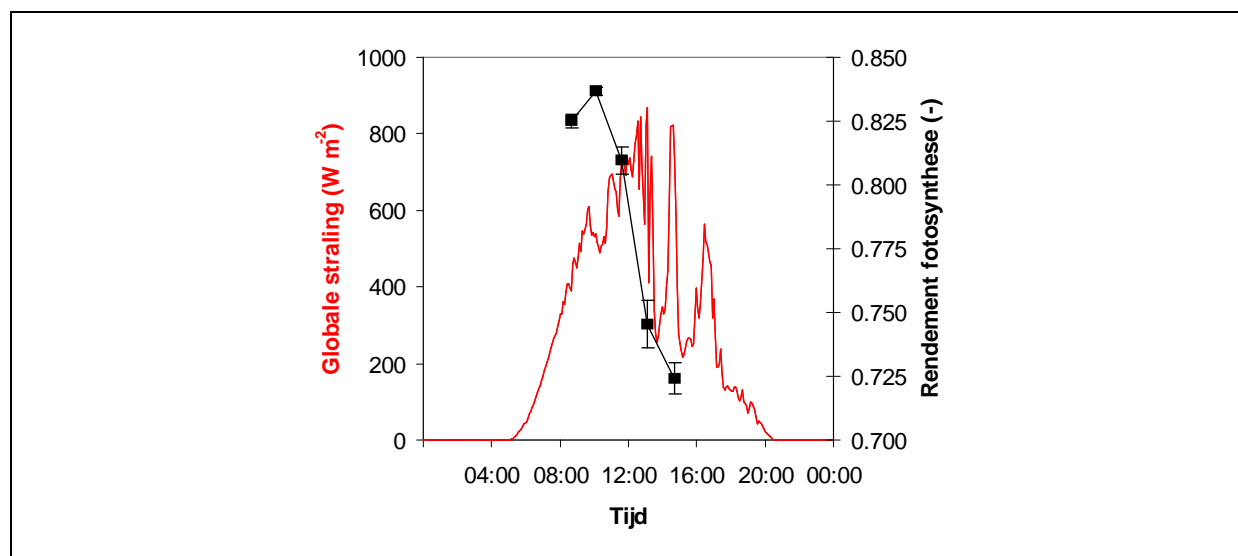
Figuur 4 Temperatuurreponscurves van de netto bladfotosynthese berekend met een gewasgroeimodel bij lichtintensiteiten oplopend van 100 naar 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en bij CO_2 concentraties van 380 ppm (A), 580 ppm (B) en 780 ppm (C) (Bron: Dieleman et al., 2003).

Ook uit Tabel 2 blijkt dat om een hoge bladfotosynthesesnelheid te krijgen licht, de CO_2 -concentratie en temperatuur optimaal moeten zijn. Bij een lage lichtintensiteit heeft het verhogen van de CO_2 -concentratie veel minder effect dan bij een hoge lichtintensiteit. Hetzelfde geldt voor het effect van temperatuur. Pas als lichtintensiteit, CO_2 -concentratie en temperatuur allen hoog zijn, kan het blad met een hoge snelheid fotosynthetiseren (Dieleman en De Zwart, 2004).

Tabel 2 Netto fotosynthesesnelheden gemeten aan paprikabladeren bij verschillende lichtintensiteiten, CO₂-concentraties en temperaturen (Bron: Dieleman en De Zwart, 2004).

Lichtintensiteit (μmol m ⁻² s ⁻¹)	CO ₂ -concentratie (ppm)	Temperatuur (°C)	Fotosynthesesnelheid (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)
250	350	15	8,7
250	350	30	9,8
250	1100	15	14,3
250	1100	30	16,5
1500	350	15	15,1
1500	350	30	20,2
1500	1100	15	24,8
1500	1100	30	53,7

Een verhoging van de hoeveelheid licht, CO₂-concentratie of de temperatuur heeft niet in alle gevallen een positief effect op de fotosynthese. Zoals in Figuur 3 is te zien, loopt bij een hoge temperatuur de ademhaling sterk op, wat resulteert in een verlaagde netto fotosynthese. Wanneer een plant wordt blootgesteld aan zeer hoge lichtintensiteiten, kan foto-inhibitie optreden. Hierbij treden beschadigingen aan het fotosyntheseapparaat van de plant op. Hierdoor kan het opgevangen zonlicht niet meer volledig nuttig gebruikt worden voor de fotosynthese, maar gaat het gedeeltelijk verloren als warmte. In Figuur 5 is te zien dat in een tomatengewas het rendement van de fotosynthese terug loopt bij een globale straling buiten van 600-700 W m⁻². Op minder zonnige dagen, wanneer de lichtintensiteit niet boven de 600 W m⁻² uitkomt, blijkt het rendement van de fotosynthese wel op niveau te blijven. Afhankelijk van de mate van beschadiging, kan de plant het fotosysteem in enkele uren tot dagen herstellen.



Figuur 5 Verloop van de globale straling en het rendement van de lichtreacties van de fotosynthese gedurende een zonnige dag (3 augustus 2004). (Bron: Dieleman & Kempkes, 2005).

Bij te hoge CO₂-concentraties (vanaf ongeveer 1000 ppm) kan het positieve effect van CO₂ op de groei gedeeltelijk ongedaan gemaakt worden door neveneffecten. Door de hogere CO₂-concentratie kunnen de huidmondjes gedeeltelijk sluiten, waardoor de verdamping vermindert. De bladeren kunnen daardoor een verminderde aanvoer van sommige nutriënten krijgen, en er kan een "zwak" gewas ontstaan. Vooral bij plotselinge weersvergangen kan dan zichtbare schade ontstaan in de vorm van bladverwelking of -afsterving (Nederhoff, 1987).

3.1.2 Fotosyntheseverloop gedurende de dag

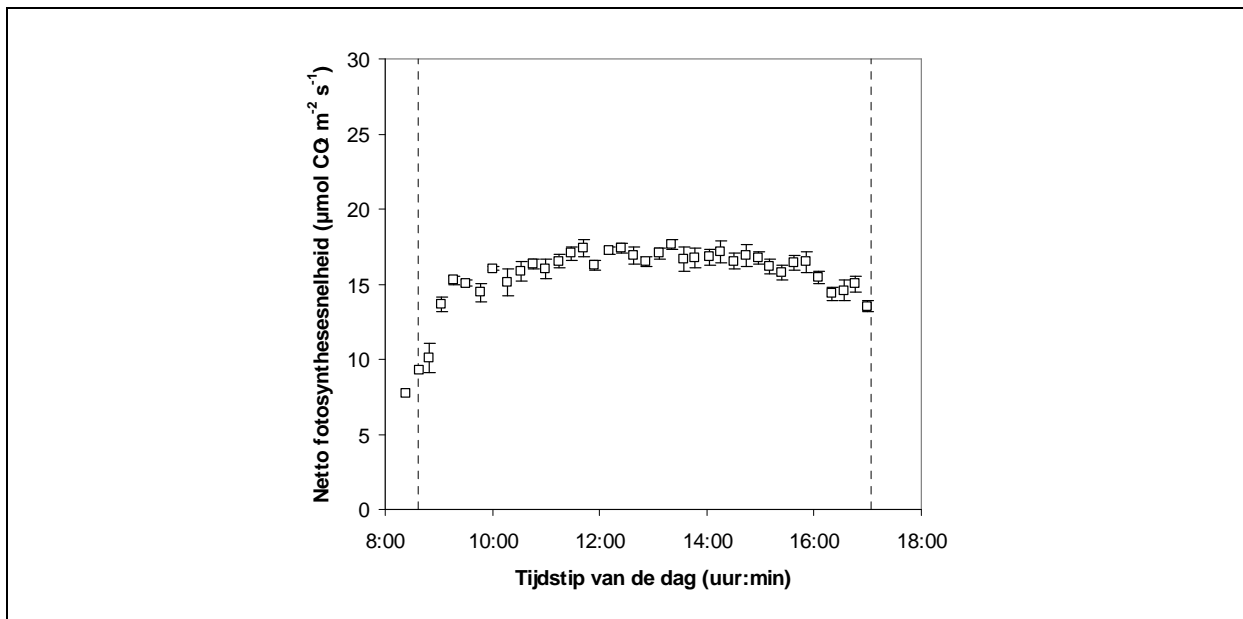
Helaas zijn er geen fotosynthesemetingen aan komkommer bekend die aangeven hoe het verloop van de fotosynthesekarakteristieken over de tijd zijn. Dit is van belang, aangezien de optimale combinatie van CO₂,

licht en temperatuur afhangt van de fotosynthesekarakteristieken. Bij gebrek aan informatie wordt er vooralsnog vanuit gegaan dat deze karakteristieken voor komkommer over de tijd stabiel zijn. Er is wel informatie over een aantal andere gewassen, die hier worden gepresenteerd om duidelijk te maken dat een geavanceerde optimalisatie mogelijk ook met deze tijdsaspecten rekening moet houden. Hoe dit voor komkommer zou uitpakken, is vooralsnog niet aan te geven.

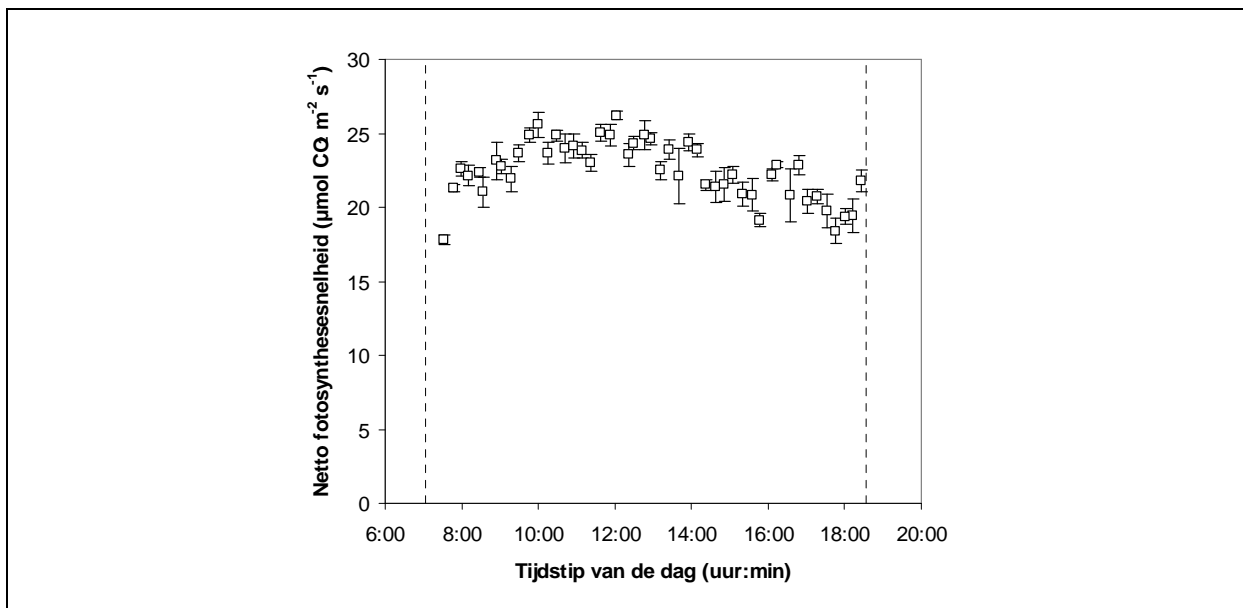
In een aantal studies naar fotosynthese is 'hysterese' beschreven, een fenomeen waarbij de reactie van de fotosynthese op licht in de ochtend een ander verloop heeft dan in de middag. De meest bekende vorm daarvan is de 'midday depression' of meer precies 'sluiting van de huidmondjes midden op de dag'. Wat de reden van de verlaagde fotosynthese door het sluiten van de huidmondjes in de middag is, is niet helemaal duidelijk. Er worden verschillende oorzaken genoemd in de literatuur: hoge temperaturen in de middag (Yu et al., 2001), watertekort dan wel een te groot verschil in waterdampdruk tussen blad en lucht (Ito, 1971; Bodlaender et al., 1985, Raschke & Resemann, 1986), overmaat aan licht (foto-inhibitie; Powles & Thorne, 1981; Yu et al., 2001), assimilatenverzadiging (Ito, 1971; Ayari et al., 2000) of een (onbekend) endogeen mechanisme (Chaumont et al., 1994; Ayari et al., 2000), mogelijk gerelateerd aan het ontwikkelingsstadium van de plant (Singh et al., 1993). Over het algemeen wordt een (plaatselijk) watertekort in de plant om aan de verdampingsvraag te voldoen gezien als belangrijkste oorzaak. Dit is in de meeste gevallen beschreven voor gewassen die in de open lucht in de grond geteeld worden. Door dit watertekort sluiten huidmondjes en loopt de fotosynthese terug. Het watertekort is niet altijd alleen te wijten aan een onvoldoende watervoorziening, maar ook aan een hete of droge lucht in de middag.

Voor een aantal tuinbouwgewassen is daarentegen beschreven dat de fotosynthese gedurende de dag geen hysterese of 'middagdip' vertoont, maar uitsluitend een functie is van lichtintensiteit (en CO₂-concentratie en temperatuur). Nederhoff en 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 (1996) echter, heeft wel metingen gedaan aan gewasfotosynthese op zeer zonnige dagen (tot ongeveer 1400 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Ook hij vond geen hysterese in de gewasfotosynthese, met andere woorden: er was geen systematisch verschil tussen fotosynthese in de ochtend en in de middag (Heuvelink, 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 lichtresponscurves gemaakt in de ochtend of de middag.

In tomaat is gedurende twee meetreeksen in de winter het verloop van de fotosynthese gedurende de lichtperiode bepaald (Figuur 6 en Figuur 7). De fotosynthese blijkt 's ochtends na zonsopkomst in circa een uur toe te nemen tot het niveau dat de plant gedurende de dag handhaaft (Figuur 6). Dit niveau verloopt enigszins als een optimumcurve. 's Ochtends neemt de fotosynthese bij de vaste hoeveelheid licht toe tot het optimum is bereikt rond 12:00 uur. Daarna neemt de fotosynthese weer af. In de eerste meetserie, in januari was deze afname nog beperkt. In de tweede meetserie, begin maart, was deze afname circa 20%. Overigens lag het niveau van de fotosynthese in de tweede meetserie hoger dan in de eerste serie.



Figuur 6. Verloop van de netto fotosynthesesnelheid van tomaat gemeten bij $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gedurende de dag. De verticale stippellijnen geven de tijdstippen van zonsopkomst en zonsondergang aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen in januari 2004 \pm standaardafwijking van het gemiddelde (Bron: Dieleman en Kempkes, 2005).



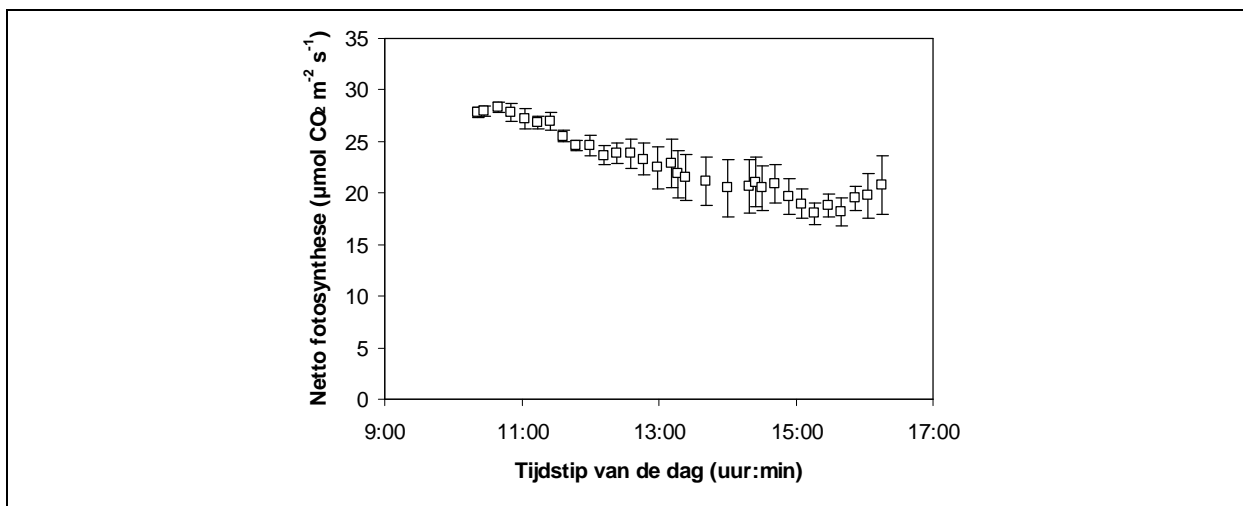
Figuur 7. Verloop van de netto fotosynthesesnelheid van tomaat gemeten bij $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gedurende de dag. De verticale stippellijnen geven de tijdstippen van zonsopkomst en zonsondergang aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen begin maart 2004 \pm standaardafwijking van het gemiddelde (Bron: Dieleman en Kempkes, 2005).

In het project 'Luchtcirculatie' werden luchtstromen in een tomatengewas gecreëerd door vanuit brede slurven met kleine gaatjes die op een hoog en laag niveau in het gewas waren geplaatst, lucht in te blazen. Nadat de volgroeide planten enige tijd aan deze omstandigheden waren blootgesteld, werden in augustus en september de eigenschappen van de fotosyntheselichtresponscurves bepaald. Dit gebeurde bovenin het gewas en halverwege de gewasdiepte. Het verloop binnen de dag van de maximale fotosynthesesnelheid bij hoog lichtniveau ($1395 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) is gemeten door de Gelder et al. (2006) en Elings et al. (2006).

Gemeten bij 1000 ppm CO₂, verandert in de loop van de dag de maximale netto fotosynthese niet. Gemeten bij 700 ppm neemt in de loop van dag de maximale netto fotosynthese af; bovenin het gewas van ongeveer 50 μmol m⁻² s⁻¹ aan het begin van de dag tot ongeveer 40 μmol m⁻² s⁻¹ halverwege de middag. Op halve gewasdiepte treedt er een daling op van ongeveer 40 μmol m⁻² s⁻¹ halverwege de ochtend tot ongeveer 30 μmol m⁻² s⁻¹ aan het einde van de dag. Bij 400 ppm ontstaat slechts een zeer lichte daling van de maximale netto fotosynthese in de loop van de dag.

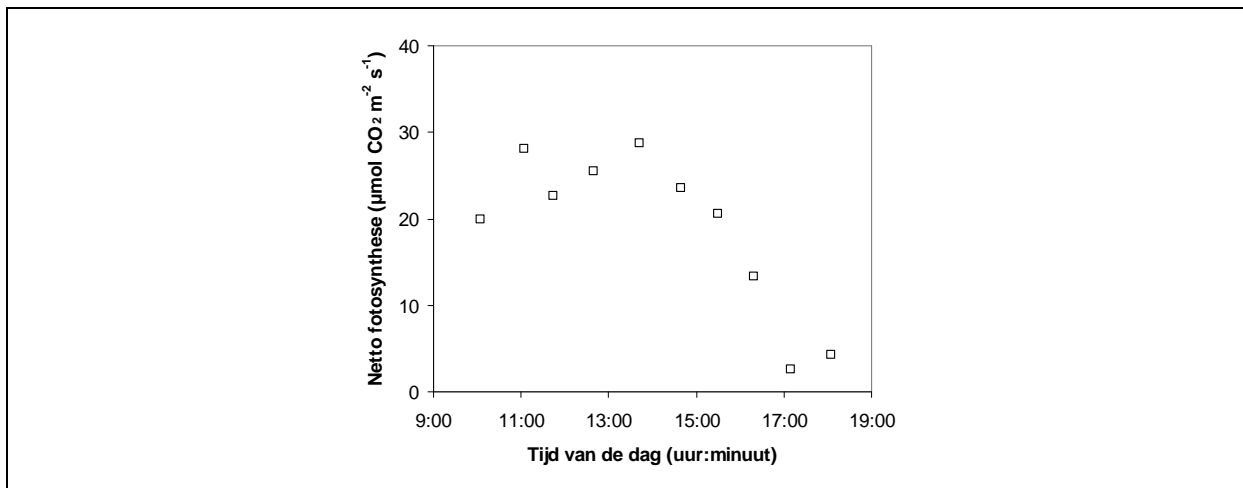
Voor het gewas tomaat kan op basis van bovenstaande onderzoeksresultaten dus worden gesteld dat er binnen een dag hooguit een lichte variatie in de fotosynthesesnelheid bestaat. In de toekomst volgen mogelijk meer metingen op andere momenten in het jaar, die een zekerder beeld verschaffen.

Op een aantal praktijkbedrijven is in 2005 het verloop van de fotosynthese van roos gedurende de dag gemeten (Dueck et al., 2006). De resultaten lieten zien dat de bladfotosynthesesnelheid gedurende de dag afneemt (Figuur 8). In de middag is te zien dat de fotosynthese een “dip” vertoont van een beperkte omvang. Deze tijdelijke afname in fotosynthesesnelheid bleek geen directe relatie te vertonen met de temperatuur, lichtintensiteit of CO₂-concentratie in de kaslucht.

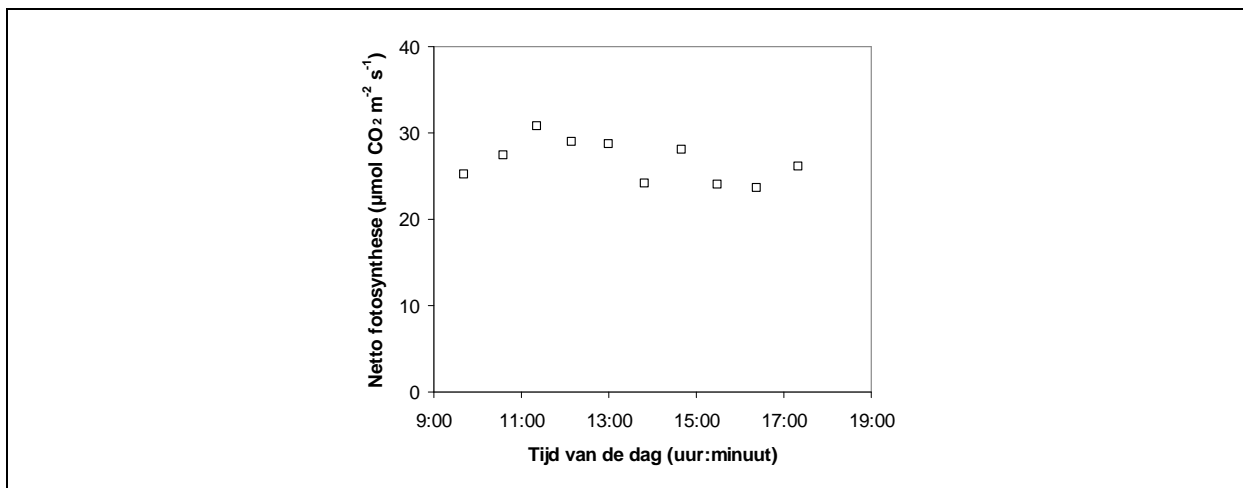


Figuur 8 Verloop van de netto fotosynthesesnelheid van roos gemeten bij 500 μmol PAR m⁻² s⁻¹ gedurende de dag. Waarden zijn gemiddelden van 6 meetdagen in de periode 18 mei tot 9 juni ± standaardafwijking van het gemiddelde. Zonsopkomst in deze periode: 5:30 uur, zonsondergang 21:46 uur (Bron: Dueck et al., 2006).

In een rozengekas dat “op snee” werd geteeld onder vaste en mobiele belichting werden in 2003/2004 fotosynthesemetingen gedaan (Marissen et al., 2005). In een eerste meetserie (november 2003), aan het begin van de eerste snee, werd een zeer sterke afname van de fotosynthese gedurende de dag gemeten (Figuur 9). Aan het einde van de eerste snee (december 2003) bleek de fotosynthese gedurende de hele dag redelijk stabiel te zijn (Figuur 10). Als reden werd geopperd dat de sinkcapaciteit aan het begin van een snee dusdanig klein is dat er een negatieve feedback op de fotosynthese ontstaat (Marissen et al., 2005).



Figuur 9 Verloop van de netto fotosynthesesnelheid van het blad van roos gemeten bij 2000 µmol PAR m² s⁻¹ op 20 november 2003 (begin van de snee) (Bron: Marissen et al., 2005).



Figuur 10 Verloop van de netto fotosynthesesnelheid van het blad van roos gemeten bij 2000 µmol PAR m² s⁻¹ op 17 december 2003 (einde van de snee) (Bron: Marissen et al., 2005).

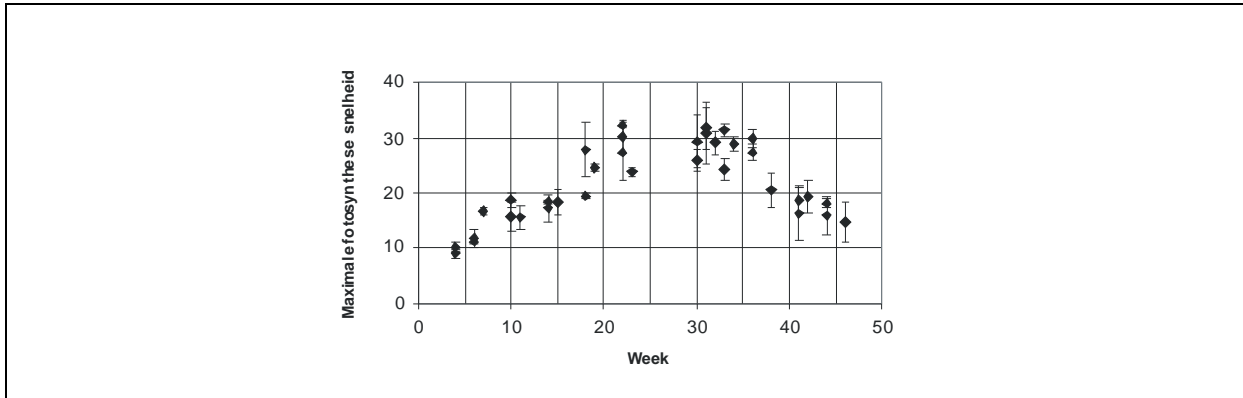
Voor het gewas roos kan op basis van bovenstaande onderzoeksresultaten dus worden gesteld dat er binnen een dag een duidelijke variatie in de fotosynthesesnelheid kan bestaan, afhankelijk van de fase waarin het gewas zich bevindt.

3.1.3 Fotosyntheseverloop gedurende het seizoen

Naast een effect van het tijdstip van de dag, beïnvloedt ook het seizoen de maximale fotosynthesesnelheid van een blad. In een studie aan tomaat waarin gedurende het jaar de fotosynthese van bladeren onder vaste omstandigheden is gemeten, bleek dat de maximale fotosynthesesnelheid in de eerste helft van het jaar een toename vertoonde en in de tweede helft van het jaar een afname (Figuur 11). Deze toe- en afname verliepen synchroon met de toe- en afname van de hoeveelheid globale straling, waaruit af te leiden is dat de bladeren zich aanpassen aan de hoeveelheid straling in de recente afgelopen periode door een verhoogde fotosynthesecapaciteit.

Dit lijkt tegenstrijdig met het idee dat een gewas in de winter efficiënter met licht om gaat dan in de zomer (Marcelis et al., 2004), maar is het niet. In de winter zijn de lichtniveaus lager en bevinden veel bladeren zich in het opgaande gedeelte van de fotosynthese-lichtresponscurve (zie figuur 2). Hier is de verhouding fotosynthese/licht hoger dan bij hogere lichtniveaus, die in de zomer voorkomen, ook al ligt het algemene

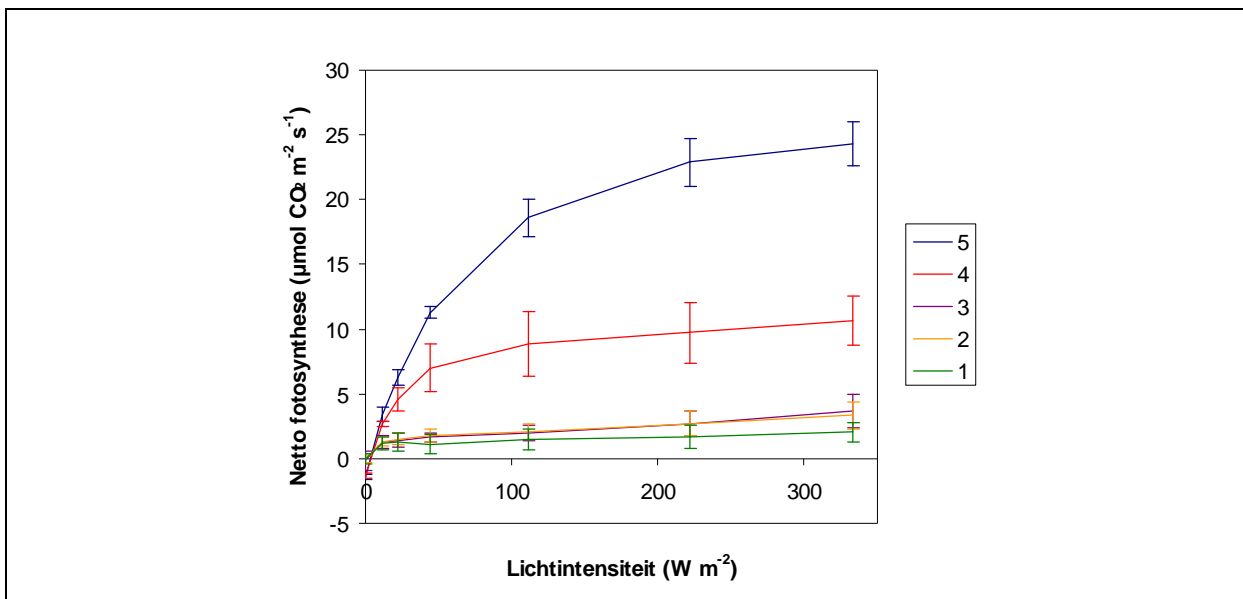
niveau van de curve dan hoger.



Figuur 11 Verloop van de maximale fotosynthesesnelheid (µmol CO₂ m² s⁻¹) in de loop van het groeiseizoen 2001 voor de bovenste bladlaag van een tomatengewas (Bron: van den Boogaard & Elings, 2003).

Er zijn ook enige metingen aan paprika bekend. Dieleman et al. (2003) observeerde in het voorjaar tot en met mei, en Dueck et al. (2005) in juli en september. Binnen de experimenten werden, in tegenstelling tot de situatie bij tomaat, geen veranderingen in de loop van de tijd waargenomen.

3.1.4 Fotosyntheseverloop in verschillende bladlagen van de plant

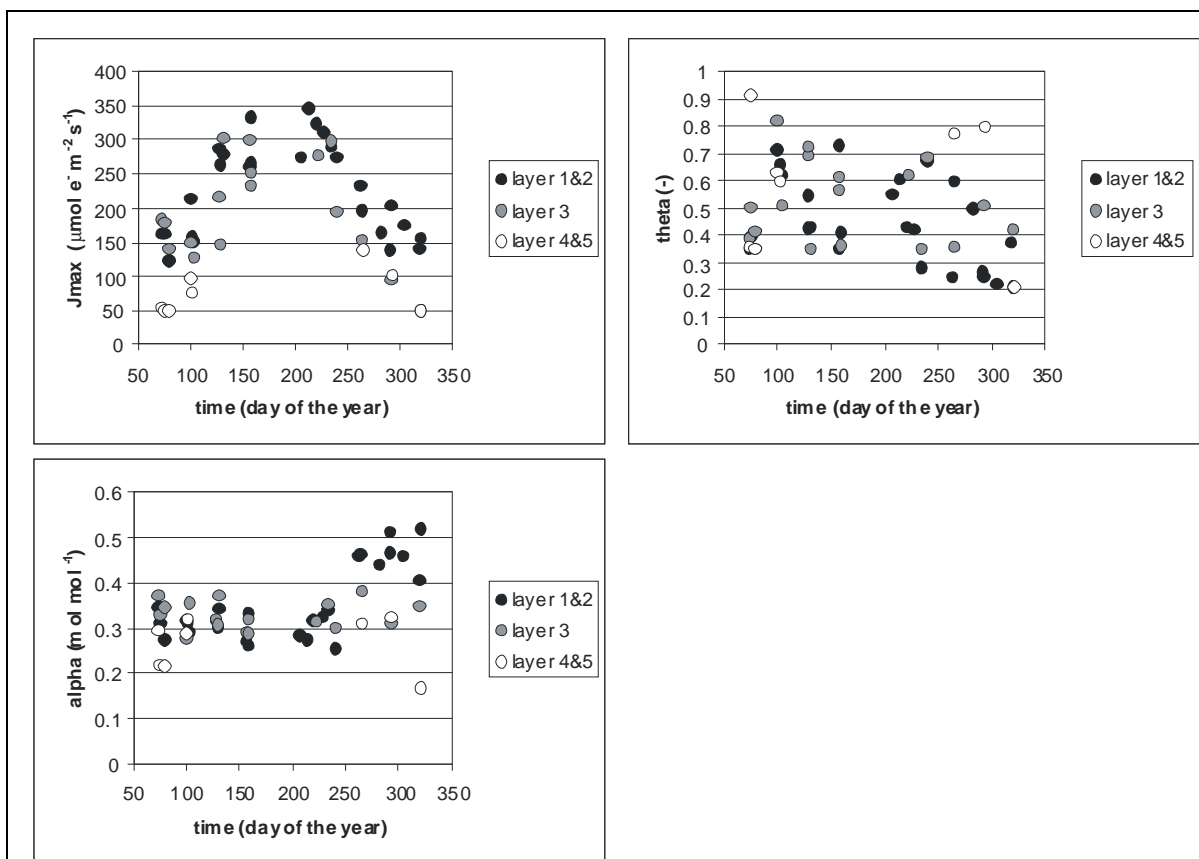


Figuur 12 Lichtresponscurve van de fotosynthesesnelheid van paprikabladeren gemeten op 5 verschillende hoogtes in het gewas (zie legenda). Bladlaag 5 is de bovenste bladlaag aan de plant, bladlaag 1 de onderste. (Bron: Dueck et al., 2005).

In voorgaande paragrafen is grotendeels uitgegaan van metingen en berekeningen van de fotosynthese van bladeren in de bovenste bladlaag van een gewas. Een gewas met een hoge LAI heeft echter relatief veel blad onderin het gewas bij een relatief laag lichtniveau. Met een toenemende LAI zal de fotosynthese dieper in het gewas dus afnemen. Onder dergelijke omstandigheden kan het zo zijn dat de netto fotosynthese van een gewas zo laag is, dat de hoeveelheid assimilaten die nodig is om het blad te onderhouden groter is dan de hoeveelheid assimilaten die het zelf produceert door de fotosynthese. Dit is van belang bij met name een gewas als paprika, dat een hoge LAI kent, en mogelijk productieverlies zal kennen als een teeltmaatregel met een temperatuurverhoging gepaard gaat.

Om na te gaan wat de bijdrage is van bladeren van de verschillende bladlagen in het gewas aan de assimilatenproductie, zijn bij paprika fotosynthesemetingen gedaan op verschillende hoogtes in het gewas (Figuur 12). De bladeren van de bovenste twee bladlagen (op 100% hoogte en 75% hoogte) reageren op een toename in de hoeveelheid licht met een toename in de netto fotosynthese. De onderste bladlagen echter, reageren bij een verhoging van de lichtintensiteit niet of nauwelijks meer met een verhoging van de fotosynthese (Dueck et al., 2005).

Ook uit Figuur 13 (gemeten aan tomaat) blijkt dat de maximale fotosynthesesnelheid bovenin het gewas de hoogste waarde aanneemt.



Figuur 13 Verloop van de fotosynthese-karakteristieken van tomatenbladeren van de experimenten in het voor- en najaar van 2001 in de IMAG-kas. De fotosynthesekarakteristieken betreffen de maximale elektronentransportsnelheid (J_{max}), de lichtbenuttingsefficiëntie (α) en de kromming van de fotosynthesecurve (θ), en zijn verkregen na calibratie met optimalisatiesoftware. De gegevens zijn weergegeven per bladlaag, waarbij lagen 1 en 2 zich bovenin het gewas bevinden, laag 3 zich halverwege het gewas bevindt, en laag 4 en 5 zich onderin bevinden. (Bron: van den Boogaard & Elings, 2003).

3.1.5 Modelling van de invloeden van licht, CO_2 en temperatuur op de fotosynthese

Het INTKAM gewasmodel maakt gebruik van dezelfde fotosyntheseroutine voor alle gewassen. Verschillen bestaan alleen met betrekking tot de parameterwaarden van de vergelijkingen die worden gebruikt. Het gebruiken van dezelfde fotosyntheseroutine is gebaseerd op het feit dat het fotosyntheseproces bij alle planten (althans de C_3 -planten) volgens dezelfde mechanismen loopt, en dus op generieke wijze kan worden beschreven. Het heeft als groot voordeel dat kennis met betrekking tot het ene gewas kan worden geëxtrapoleerd naar andere gewassen. Zo zullen de principes van de interactie tussen temperatuur en CO_2

voor komkommer en paprika hetzelfde zijn. Daarnaast is het vanuit het oogpunt van modelonderhoud erg praktisch als er slechts één rekenmodule onderhouden hoeft te worden.

3.1.5.1 Licht, CO₂ en temperatuur

De effecten van straling, CO₂ en temperatuur op de fotosynthese zijn in het INTKAM gewasmodel van Plant Research International opgenomen. Hiertoe is gekozen voor het Farquhar-model (Farquhar et al., 1980; Farquhar & von Caemmerer, 1982). Het is een biochemisch model dat de genoemde factoren en hun interactie-effecten meeneemt. Het model stelt twee processen centraal:

- De carboxylatie (de binding van CO₂) van ribulose-1,5-bifosfaat (RuP₂). Dit wordt beperkt door de hoeveelheid RuP₂ en de hoeveelheid rubisco (RuP₂-carboxylase-oxygenase) en wordt beïnvloed door de interne CO₂ en O₂ concentraties en door de bladtemperatuur.
- De maximale snelheid van elektronentransport. Dit wordt beperkt door de straling in de vorm van de hoeveelheid opgenomen fotonen, en wordt beïnvloed door de bladtemperatuur.

De opening van de huidmondjes, en daarmee de verdampingssnelheid, speelt een rol in verband met interne CO₂-concentratie.

De fotosynthese-lichtresponscurve (zie bijvoorbeeld Figuur 1) wordt door deze twee processen bepaald. Het opgaande deel van de lijn, van donker naar hogere lichtintensiteiten, wordt bepaald door de maximale snelheid van elektronentransport, welke een temperatuurafhankelijkheid kent. Het afvlakkende deel van de lijn, bij hogere lichtintensiteiten, wordt bepaald door de carboxylatiesnelheid. Naarmate de maximale carboxylatiesnelheid hoger is (bijvoorbeeld bij een hogere CO₂-concentratie), komt dit afvlakkende deel hoger te liggen (Figuur 2).

3.1.5.2 Gedurende de tijd

De parameters die zijn opgenomen in de vergelijkingen van het Farquhar-model zijn niet in alle situaties gelijk. Zoals uiteengezet in de paragrafen 3.1.2 en 3.1.3, varieert de assimilatiesnelheid van CO₂ over de tijd. Langzaam verkrijgen we meer inzicht in dit verloop, wat in het INTKAM-model wordt verwerkt door deze variabelen niet een constante te laten zijn, maar over de tijd te laten variëren.

3.1.5.3 Over bladlagen

In paragraaf 3.1.4 is beschreven dat de fotosynthese bij gelijk lichtniveau daalt naarmate het meetpunt dieper in het gewas ligt. Het INTKAM gewasmodel berekent de bladfotosynthese op vijf verschillende gewasdiepten, waarna deze vijf waarden tot een waarde voor het gehele gewas worden geïntegreerd. Als de verschillende gewasdiepten verschillende parameterwaarden kennen voor de Farquhar-vergelijkingen, dan kunnen deze aan het model worden opgelegd.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de gevoeligheid van het model voor parameterwaarden van de onderste bladlagen relatief klein is, omdat de fotosynthese in deze bladeren zich toch bij vrij lage lichtniveaus afspeelt.

3.2 Omgevingsinvloeden op groei en ontwikkeling

3.2.1 Temperatuur

In het algemeen geeft een verlaging van de temperatuur een vertraging in de gewasontwikkeling. Het gaat hierbij om de afsplitsing van nieuwe bladeren, die vaak in een ruim temperatuurtraject (bijvoorbeeld 17-27 °C) vrijwel lineair toeneemt met de temperatuur. Voor tomaat is gevonden dat, hoewel de

bladafsplitsingssnelheid verschillend is voor verschillende rassen, de reactie op temperatuur voor alle rassen hetzelfde is (De Koning, 1994). Verder leidt een lagere temperatuur vaak tot minder bladstrekking en dikkere bladeren (Heuvelink, 1989; Venema et al., 1999). Dit is met name voor een jong gewas ongunstig omdat het bij lagere temperaturen langer duurt totdat het gewas al het aanwezige licht kan onderscheppen. Dit kan een sterk effect op de productie hebben. In geval van energiebesparende maatregelen kan dit dus beperkingen opleggen aan de mate waarin tijdens de eerste maand van de teelt temperatuurverlagingen kunnen worden toegestaan (Elings et al, 2006).

Een lagere temperatuur geeft vertraging in de bladafsplitsing en daarmee ook in de snelheid waarmee nieuwe bloemen/trossen gevormd worden. Bij paprika, komkommer en aubergine worden echter heel veel meer bloemen gevormd dan er vruchten ontstaan, dus deze vertraagde bloemvorming zal geen beperking van de totale productie betekenen. Voor tomaat zou dat wel het geval kunnen zijn. Voor alle vier de vruchtgroenten betekent een lagere temperatuur bij jonge planten een vertraging in de bloem- en trosaanleg. Dat kan betekenen dat de vroege productie geringer is, zoals bij tomaat. Bij paprika leidt een lagere temperatuur (bijv. 18 °C in plaats van 20 °C) echter tot een betere vruchtzetting zodat er juist eerder vruchten aan de plant zitten dan bij een hogere temperatuur. De uitgroeiduur (van bloei tot oogstrijp) van een vrucht neemt toe bij lagere temperatuur, omdat de ontwikkelingssnelheid van de vrucht negatief beïnvloed wordt, net als de gewasontwikkelingssnelheid die hiervoor genoemd is. Hierdoor kan de oogst later op gang komen.

3.2.2 Licht

Als er meer licht is, zijn er meer assimilaten beschikbaar voor de groei van het gewas. Een jong gewas reageert hierop door het aanleggen van grotere en dikkere bladeren. Wanneer (te) weinig licht beschikbaar is, kan zowel de aanleg van bloemen als de uitgroei van bloemen tot vruchten negatief beïnvloed worden. Bij meer licht zal de totale productie aan bloemen of vruchten van een gewas toenemen en is het totale plantgewicht groter (bij eenzelfde plantdichtheid).

3.2.3 CO₂

De CO₂-concentratie beïnvloedt net als de hoeveelheid licht de beschikbaarheid van assimilaten voor de plant. Bij gemiddeld hogere CO₂-concentraties vormt een jong gewas grotere en dikkere bladeren. Vruchtzetting en gemiddeld vruchtgewicht worden ook positief beïnvloed door hogere CO₂-concentraties. Als er meer CO₂ beschikbaar is voor de plant, heeft dit een positief effect op de groei (gewichtstoename) en productie van vruchten of bloemen.

3.2.4 Modelleren van de gewasgroei- en ontwikkeling

De bespreking van dit hoofdstuk wordt beperkt tot de modellering van de omgevingsfactoren op de ontwikkeling van blad en vrucht.

In dit hoofdstuk wordt behandeld hoe processen zijn gemodelleerd, zonder dit in iedere zin steeds expliciet aan te geven.

3.2.4.1 Temperatuur

Een hogere temperatuur heeft naast het al beschreven effect op de fotosynthese ook een verhogend effect op de onderhoudsademhaling. Omdat dit effect niet afhankelijk is van het lichtniveau, kan het er toe leiden dat onder in een gewas meer assimilaten worden geconsumeerd dan aangemaakt. Dit speelt zeker bij gewassen met een hoge LAI, zoals paprika, een belangrijke rol. Het is overigens wel zo dat een lagere gewasactiviteit van oudere plantendelen tot een lagere onderhoudsademhaling leidt.

Een belangrijk gemodelleerd effect van de temperatuur is dat op de ontwikkelingssnelheid van het gewas,

zoals is beschreven in paragraaf 3.2.1.

In het geval van komkommer wordt het effect van de luchttemperatuur op het drogestofpercentage van de vrucht meegenomen (Marcelis, 1994). Een lagere temperatuur veroorzaakt een hoger drogestofpercentage van de vrucht, wat negatief werkt op de versoogst. Dit mechanisme stelt duidelijke randvoorwaarden aan de temperatuurdaling die kan worden behaald zonder dat de versproductie hieronder leidt (Elings et al., 2006).

3.2.4.2 Licht

In het gewasmodel leidt meer licht tot een hogere fotosynthesesnelheid (waarbij wel sprake is van een maximum). De gevormde assimilaten zijn beschikbaar voor de groei van alle organen, die hierom concurreren. Het betekent dat minder licht leidt tot een lagere groei van het drooggewicht van alle organen. Het bladoppervlak zal minder toenemen, zodat de LAI achterblijft. Als de hoeveelheid licht op korte termijn juist weer hoog is, wat het geval is als donkere en lichte dagen elkaar afwisselen, zal de LAI op lange termijn een normale ontwikkeling vertonen. Als er lange donkere perioden optreden, blijft de ontwikkeling van de LAI achter. Als dit aan het begin van de teelt optreedt, kunnen de negatieve gevolgen voor de productie vaak later in de teelt niet gecompenseerd worden.

Het abortieproces bij komkommer en paprika is sterk afhankelijk van de hoeveelheid aangeboden assimilaten, en daarmee van de lichtintensiteit. Het ontwikkelen van een bloempje tot een vrucht heeft een bepaalde minimumhoeveelheid assimilaten nodig. Als aan deze voorwaarde niet wordt voldaan, aborteert het bloempje. Een lange donkere periode zal zodoende in eerste instantie tot veel abortie leiden, zeker als dit gepaard gaat met hoge temperaturen die tot een hoge assimilatenvraag leiden. Maar op een zeker moment zijn er dusdanig veel vruchten geoogst, dat er toch voldoende assimilaten overblijven voor een zich ontwikkelende bloempje. Dan zal er dus weer zetting plaatsvinden.

Bij roos is de lichthoeveelheid sterk bepalend voor het aantal gevormde scheuten, waarbij meer licht tot een hoger aantal scheuten leidt.

Bij chrysant speelt de daglengte een belangrijke rol voor de bloei-inductie. Bij een teelt wordt daarom op een zeker moment de belichtingsduur aangepast, wat in het model wordt overgenomen.

3.2.4.3 CO₂

De direct gemodelleerde effecten van de CO₂-concentratie van de kaslucht blijven beperkt tot de fotosynthesesnelheid en de verdamping. De fotosynthese leidt uiteraard tot een bepaalde hoeveelheid assimilaten. Meer assimilaten leiden vervolgens weer tot de onder 3.2.3 beschreven effecten.

3.3 Conclusies invloeden op fotosynthese en gewasontwikkeling

Een verhoogde dode zone, waarvan in paragraaf 2.3 de door te rekenen varianten zijn genoemd, zal vooral invloed hebben op de temperatuur, de luchtvochtigheid en het CO₂-niveau. De hoeveelheid licht op het gewas blijft gelijk. In dit hoofdstuk is uitgelegd hoe het groeiemodel INTKAM met de onderlinge invloeden van CO₂, licht en temperatuur omgaat.

Licht en CO₂ hebben de meeste invloed op fotosynthese en daarmee op de gewasgroei. De invloed van de temperatuur is in het traject van circa 17-27 °C beperkt. Bij weinig licht heeft een verhoging van de temperatuur tot gevolg dat veel van de gevormde assimilaten voor de ademhaling worden gebruikt. Gevolg is dat de netto fotosynthese daalt, en een verhoging van de temperatuur bij weinig licht dus negatieve gevolgen heeft voor de gewasgroei. Bij veel licht en een hoge CO₂ concentratie heeft het verhogen van de temperatuur een (beperkt) positief effect op de fotosynthese. Onder deze omstandigheden is het temperatuuroptimum erg breed.

Het tijdstip van de dag en de maand van het jaar kunnen van invloed zijn op de maximale

fotosynthesesnelheid. Vaak is deze het hoogst op het midden van de dag en tijdens de zomermaanden. In perioden met weinig licht maakt de plant bladeren aan die efficiënt met de geringe lichthoeveelheid omgaan. Of de teelttemperatuur hier invloed op uit kan oefenen is onvoldoende bekend en dus ook niet in het gewasgroeimodel meegenomen. Een hogere temperatuur leidt wel tot een snellere gewasontwikkeling en grotere bladeren. Door een hoge LAI kan het gewas meer licht opvangen en meer netto fotosynthese leveren. Bij een hoge temperatuur kunnen de onderste bladeren echter meer assimilaten nodig hebben voor de onderhoudsademhaling en per saldo meer verbruiken dan dat ze aanmaken. Daarom zal de relatief lagere nachttemperatuur bij temperatuurintegratie (cases genoemd in paragraaf 2.3.3) positief uit kunnen vallen.

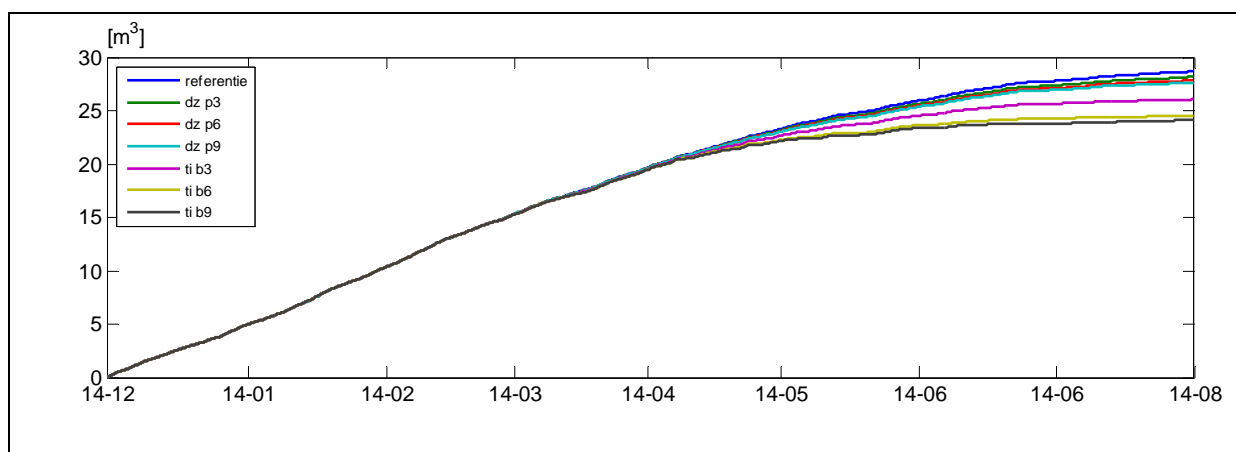
De luchtvochtigheid heeft volgens het gewasmodel invloed op de opening van de huidmondjes en daarmee op de CO₂-opname en de fotosynthesesnelheid. Volgens het gewasmodel is deze invloed op de totale fotosynthese zeer klein.

4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de zes in paragraaf 2.3 besproken strategieën behandeld. Het betreft een strategie zonder temperatuurcompensatie en een strategie met compensatie, waarbij beide strategieën met 3, 6 of 9°C verhoogde ventilatietemperatuur ten opzichte van de referentie worden doorgerekend met behulp van het kasklimaatmodel KASPRO en het gewasgroeimodel INTKAM. Hierin wordt het gasverbruik, het CO₂ verbruik en de productie vergeleken met de referentie. Ten slotte wordt ook een bedrijfseconomische evaluatie van de strategieën weergegeven.

4.1 Invloeden op energieverbruik

De verschillende strategieën hebben grote invloed op het energiegebruik. In Figuur 14 is van alle cases het cumulatieve gasgebruik voor de periode teeltstart tot 14 augustus weergegeven.



Figuur 14 Cumulatief gasgebruik voor de periode 14 december tot 14 augustus.

Zoals uit Figuur 14 blijkt, zijn er tussen de verschillende cases in de periode teeltstart tot ca. 1 april hoegenaamd geen verschillen. Daarna ontstaan duidelijke verschillen, waarbij de cases met TI beter presteren dan de cases met de vergroting van de dode zone. Dit is ook conform de verwachtingen, immers, bij toepassing van TI wordt er gestreefd naar compensatie waardoor er op bepaalde momenten minder gestookt hoeft te worden dan in de referentie. Het kleine verschil tussen de TI-cases met een bandbreedte van 6 en 9 °C wordt veroorzaakt door beperkingen in compensatie mogelijkheden. Anders gezegd: het is vaak niet mogelijk de temperatuur tot 9 °C onder het gewenste setpoint te laten dalen. Dit wordt veroorzaakt door de buitenomstandigheden en de vochtregeling die bij een toename van de bandbreedte vaker ingrijpt. Dat de TI pas laat in het jaar (na 1 april) effect heeft op het energiegebruik wordt veroorzaakt door de grote dode zone die in de referentie-case wordt toegepast zoals in bijlage 1 beschreven is. In Tabel 3 zijn de gasverbruiken en de procentuele besparing voor de periode 14 december t/m 14 augustus weergegeven. Het gasverbruik van de referentiecasse is op jaarbasis 36.9 m³/m².

Tabel 3 Gasverbruiken en de procentuele besparing voor de periode 14 december t/m 14 augustus van de referentie en 6 cases.

Case	referentie	DZ_P3	DZ_P6	DZ_P9	TI_B3	TI_B6	TI_B9
gasverbruik [m ³ /m ²]	28,6	28,1	27,8	27,6	26,1	24,5	24,1
procentueel	100,0	98,2	97,0	96,3	91,0	85,6	84,1

4.2 Invloeden op productie en bedrijfsresultaat

4.2.1 Temperatuur, vocht en CO₂

Temperatuur

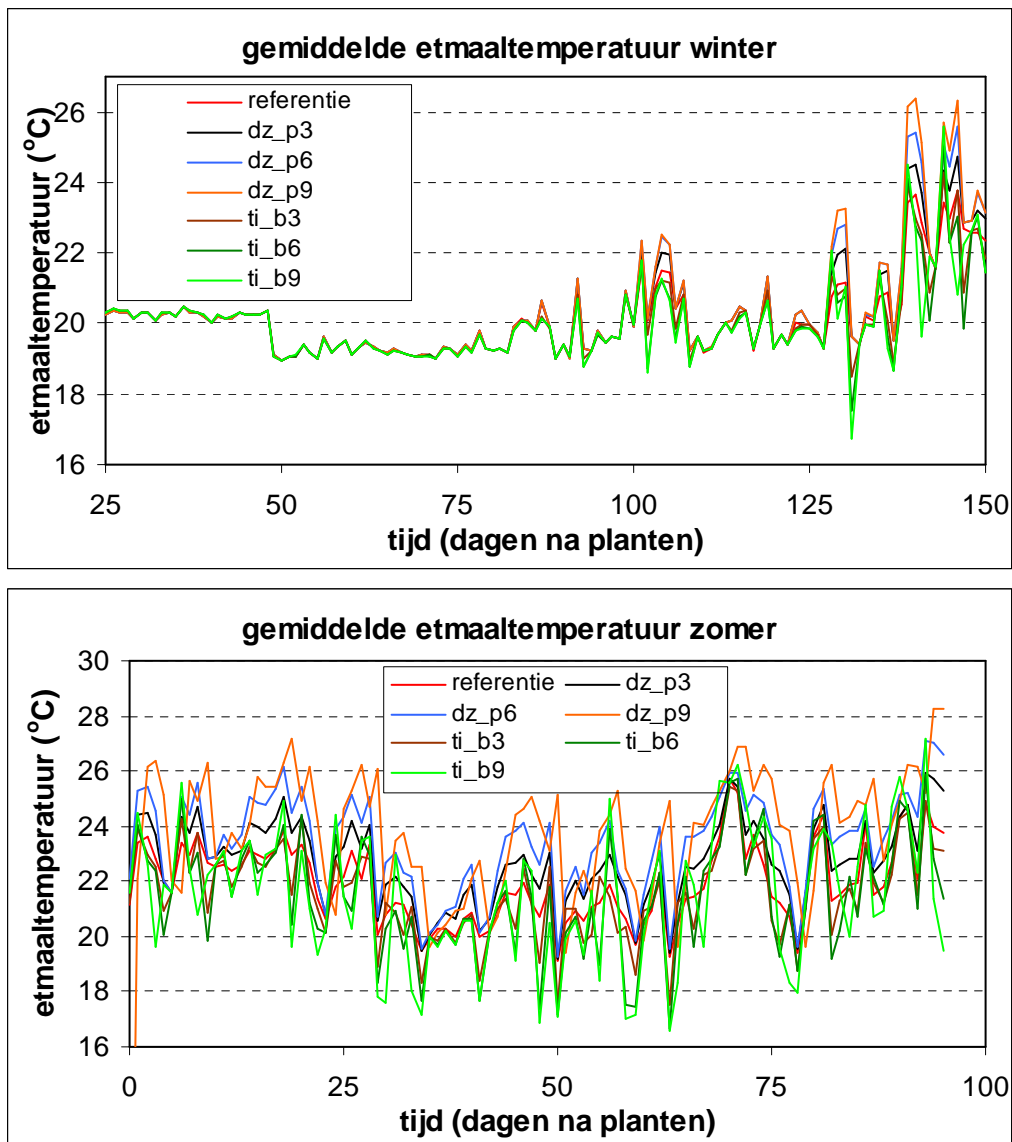
De regelingen werken primair op het temperatuurregime in de kas, wat van grote invloed kan zijn op de groei en ontwikkeling van het gewas. Temperatuurintegratie leidt in de winter tot een gemiddelde etmaaltemperatuur die 0,11 tot 0,06 °C lager is dan in het geval van de referentie (Tabel 4). In de zomer is in het geval van temperatuurintegratie de gemiddelde etmaaltemperatuur maximaal 0,47 °C lager. Temperatuurintegratie heeft dus een beperkt effect op de gemiddelde etmaaltemperatuur, zoals te verwachten is omdat de regeling streeft naar een ongewijzigde temperatuursom op de lange termijn. Het beperkte effect betreft overigens wel een temperatuurverlaging. Het vergroten van de dode zone leidt daarentegen tot een gemiddelde temperatuurverhoging. Terwijl het effect op de gemiddelde etmaaltemperatuur in de winter maximaal 0,17 °C bedraagt, varieert dit in de zomer tussen 0,75 °C voor DZ_P3 tot 1,93 °C voor DZ_P9.

In de winterteelt (tot 1 mei) is dit effect zo klein omdat er dan, vanuit energetisch oogpunt, in de referentiecasse al voor gekozen is om met grote dode zones te werken (zie bijlage 1). Omdat het in de referentiecasse niet vaak zo warm wordt dat de dodezonegrens wordt overschreden zal een vergroting van de dode zone slechts een beperkt effect hebben. Dit effect is ook goed te zien in Figuur 14 waar pas na medio maart (90 dagen na planten) de eerste verschillen in etmaaltemperatuur tussen de verschillende cases ontstaan.

In de zomerteelt is de dode zone van de referentiecasse teruggebracht tot 1 °C. In combinatie met de toename van de buitentemperatuur zal dit wel tot een verhoging van de gemiddelde kasluchttemperatuur leiden. In Figuur 15 is dit te zien doordat er iedere dag tijdens de zomerteelt verschillen in etmaaltemperatuur zijn. Uit deze figuren blijkt ook dat een vergroting van de dode zone tot een verhoging van de etmaaltemperatuur leidt, terwijl de verschillen ten opzichte van de referentie bij de TI cases beperkt blijven. De etmaaltemperatuur bij de TI modules zijn niet exact gelijk vanwege onder andere de integratieperiode van 3 dagen. Daarnaast wordt het in de referentiecasse soms warmer dan gewenst (ondanks het ventileren wordt de kasluchttemperatuur hoger dan het setpoint verwarmen + de dode zone), terwijl in het geval van temperatuurintegratie deze hogere temperatuur wel wordt toegelaten omdat er op geanticipeerd wordt dat er in de toekomst voor gecompenseerd kan worden.

Tabel 4 Gemiddelde etmaaltemperatuur in de winter- en zomerteelt voor de referentie en de zes cases.

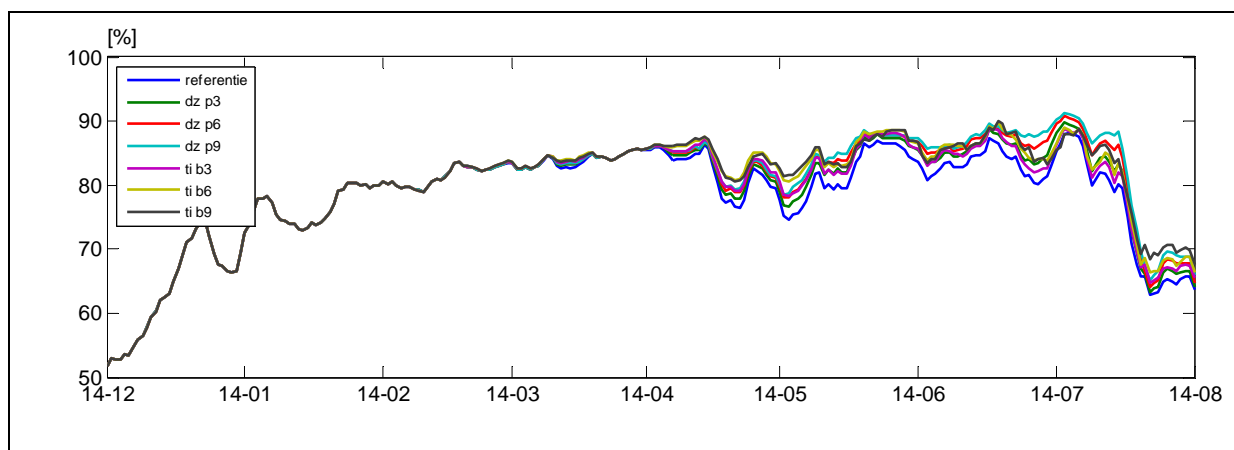
Case	Gemiddelde etmaaltemperatuur winterteelt (°C)	Gemiddelde etmaaltemperatuur zomerteelt (°C)
Referentie	20,15	21,93
dode zone + 3 °C	20,25	22,68
dode zone + 6 °C	20,32	23,35
dode zone + 9 °C	20,35	23,86
temp.int. breedte 3 °C	20,09	21,62
temp.int. breedte 6 °C	20,05	21,47
temp.int. breedte 9 °C	20,04	21,52



Figuur 15 Verloop van de gemiddelde etmaaltemperatuur tijdens de winter- (boven) en zomerteelt (onder) voor de referentie en de zes cases.

Vocht

Veranderingen in de setpoints voor de dode zone, waarbij het moment van ventileren wordt uitgesteld, zullen de vochtthuishouding in de kas beïnvloeden. Daarnaast kan door toepassing van grote dode zones, eventueel in combinatie met verlaging van de setpoints voor temperatuurverlaging (TI), de kasluchttemperatuur snel stijgen. Een gevaar dat hierbij op kan treden is natslag van het gewas. Om dit gevaar te beperken is er in plaats van op kaslucht-RV op gewas-RV geregeld. In Figuur 16 is voor de winter- en zomerteelt de gemiddelde kaslucht-RV weergegeven. Voor alle cases is er een toename van de RV ten opzichte van de referentie. Deze toename is bij de cases met verhoging van de dode zone het grootst.



Figuur 16 Voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen van etmaalgemiddelden van de kaslucht-RV voor de winter en zomerteelt.

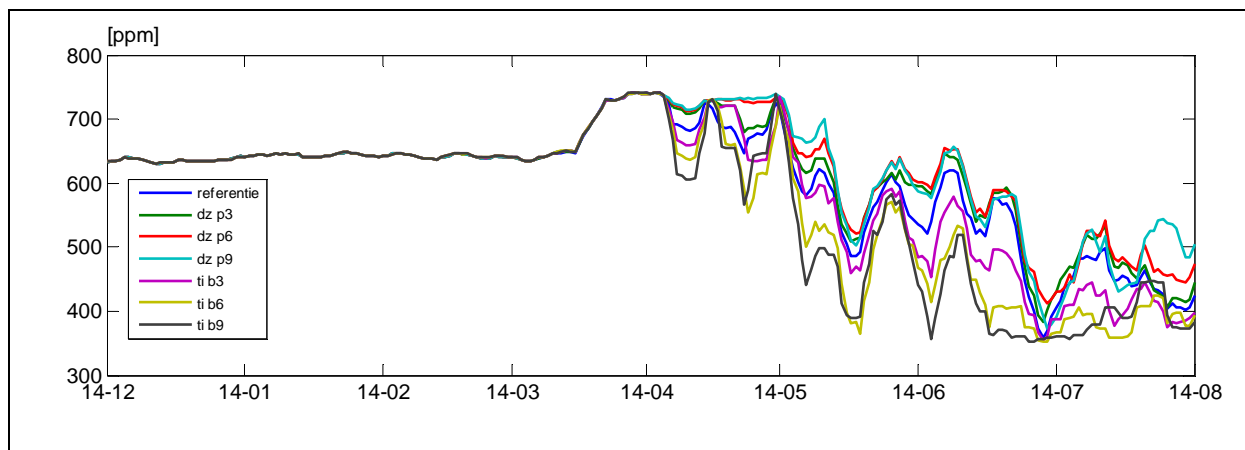
In Tabel 5 is een overzicht gegeven van het aantal uren dat zowel de kaslucht-RV als de gewas-RV binnen een bepaald vochniveau vallen. Zowel een toename van de dode zone als een toename van de TI-bandbreedte leidt tot een groter aantal uren met hoge (<95%) vochniveaus. De verschillen tussen de dode zone verhoging en TI zijn voor de kaslucht-RV beperkt, terwijl dit voor de gewas-RV niet zo is. Ook het aantal uren bladnat is in geval van TI duidelijk hoger dan in geval van verhoging van de dode zone. De oorzaak hiervan moet gezocht worden in de temperatuurverlaging die in de TI-regeling wordt doorgevoerd om graaduren te compenseren. Hierdoor komt het vaker voor dat er grote temperatuurstijgingen voorkomen. Anders gezegd: bij de cases met vergroting van de dode zone wordt in feite maar de helft van de setpointtemperatuursveranderingen gecreëerd als bij TI. Immers bij TI wordt gecompenseerd, waardoor de minimum setpointkasluchttemperatuur lager is dan bij een case waar alleen een dodezoneverhoging wordt toegepast.

Tabel 5 Frequentieverdeling van vocht voor kaslucht- en gewas-RV tijdens de teeltperiode van winter en zomer.

Case	referentie	DZ_P3	DZ_P6	DZ_P9	TI_B3	TI_B6	TI_B9	
kaslucht-RV	<80	2845	2677	2544	2469	2672	2552	2497
	80 – 85	1032	1068	1129	1154	1054	1072	1124
	85 – 90	1126	1127	1143	1167	1106	1138	1139
	90 – 95	755	797	807	817	819	834	832
	>95	122	211	257	273	229	284	288
gewas-RV	<80	2872	2689	2562	2478	2713	2598	2540
	80 – 85	1057	1148	1243	1310	1168	1227	1294
	85 – 90	1242	1350	1466	1553	1315	1384	1452
	90 – 95	732	830	915	970	835	900	935
	>95	217	250	269	274	313	365	374
	nat	27	31	32	32	48	66	71

CO₂

In Figuur 17 is de gemiddelde CO₂-concentratie weergegeven tijdens de uren dat er CO₂ gedoseerd wordt. In de periode tot 1 april is het CO₂-setpoint 650 ppm, daarna 750 ppm. Tot half april is de warmtevraag groot en de CO₂-vraag klein, zodat er voldoende CO₂ beschikbaar is om aan de vraag te voldoen. In de zomer zorgt de regeling er voor dat er gedurende de dag de CO₂-doseersnelheid zodanig wordt aangepast dat er de hele dag CO₂-gedoseerd kan worden. De cases met de verhoging van de dode zone weten hogere CO₂-concentraties vast te houden dan de referentie en de cases met TI.



Figuur 17 Voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen van etmaalgemiddelde CO₂-concentratie tijdens de uren waarin gedoseerd wordt.

De hogere CO₂-concentraties van de cases met verhoging van de dode zone zijn niet het gevolg van een grotere beschikbaarheid van CO₂. In Tabel 6 is de gedoseerde hoeveelheid CO₂ voor de gehele teeltperiode weergegeven. Voor de duidelijkheid is het gasgebruik uit Tabel 3 hier nogmaals weergegeven. Daarbij is uitgerekend wat de vermindering van beschikbare CO₂ ten opzichte van de referentie is als gevolg van het afnemende gasgebruik. Hiervoor is gerekend met 1.8 kg CO₂/m³ aardgas.

Tabel 6 Gedoseerde hoeveelheid CO₂ vanuit de ketel en aanvullend zuiver, het gasgebruik en de afname van de CO₂-beschikbaarheid als gevolg van de afname van het gasgebruik.

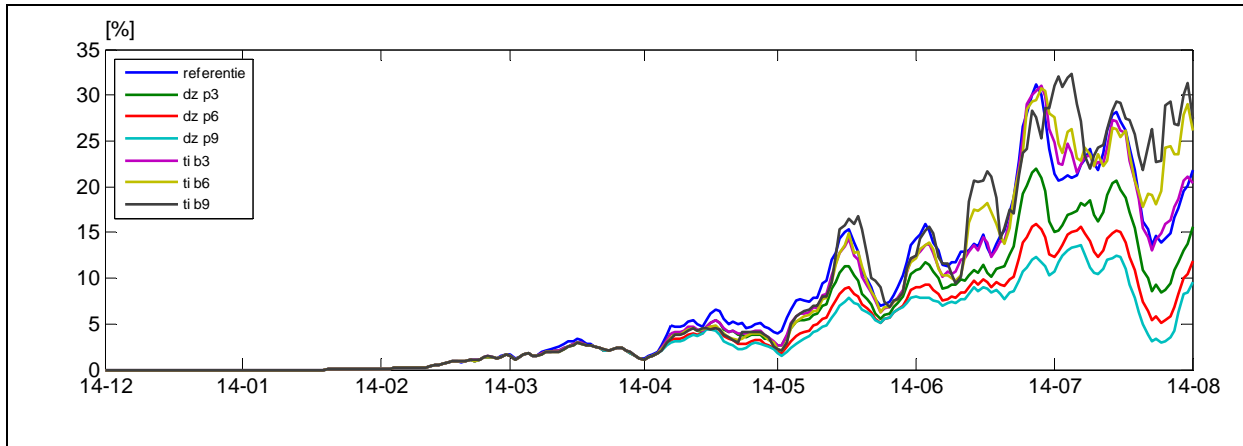
case	referentie	DZ_P3	DZ_P6	DZ_P9	TI_B3	TI_B6	TI_B9
gedoseerde CO ₂ ketel [kg/m ²]	16,6	15,7	15,0	14,5	13,0	10,5	9,8
gedoseerde CO ₂ zuiver [kg/m ²]	5,8	5,3	4,1	3,0	4,3	2,7	2,2
totaal gedoseerde CO ₂ [kg/m ²]	22,4	20,8	18,8	17,1	17,1	13,0	11,8
gasgebruik [m ³ /m ²]	28,6	28,1	27,8	27,6	26,1	24,5	24,1
afname CO ₂ -beschikbaarheid ketel [kg/m ²]	0,0	0,9	1,5	1,9	4,6	7,4	8,2

Uit Tabel 6 wordt duidelijk dat vooral voor de cases met TI de beschikbare hoeveelheid CO₂ sterk afneemt. De besparing van het gasgebruik gaat dan ook vrijwel geheel ten koste van de hoeveelheid beschikbare CO₂. De carbonomic module berekent op dagbasis een optimale buffervulcurve. Vervolgens wordt aan de hand van productprijzen (zie bijlage 2) en een marginale CO₂-prijs (hier gesteld op 10 cent per kg) bepaald of het doseren van extra CO₂ (zuiver) interessant is. Hierbij wordt bepaald of er door toediening van zuiver CO₂, de toename in fotosynthese en daarvan afgeleid een geschatte productieverandering, rekening houdend met de verwachte opbrengst prijs van die extra productie, financieel gezien opweegt tegen de kosten van de extra CO₂. Zo zal bij grote ventilatie door dosering van extra CO₂ de CO₂-concentratie in de kas slechts weinig toenemen, waardoor er ook slechts een gering effect op de productie zal zijn.

In Tabel 6 is ook de gedoseerde zuivere CO₂ opgenomen. Hierbij valt op dat bij een toename van de bandbreedte de dosering afneemt. Bij de cases met grote dode zone is er minder behoefte aan CO₂ omdat de CO₂-concentratie vaak hoger ligt (zie Figuur 17 en bij de cases met TI wordt er met name in de zomerteelt regelmatig zoveel geventileerd dat bij dosering van extra CO₂ de productiewinst te gering voor een financieel positief resultaat. (productieopbrengst versus CO₂-kosten). Deze extra ventilatie is het gevolg van de gekozen TI regeling. Bij deze TI-regeling wordt ter voorkoming van het verhogen van de etmaaltemperatuur regelmatig extra geventileerd om graaduren af te bouwen. Juist deze extra ventilatie voor het afbouwen van graaduren zorgt voor de lage CO₂-concentraties waarbij dosering van extra zuivere CO₂ weinig effect heeft. In de praktijk zal er regelmatig voor gekozen worden om in dergelijke gevallen de graadenteller te "resetten". Zonder een definitie: 'bij welke randvoorwaarden mag de teller gereset worden', is dit in een model niet mogelijk. De keus voor reset wordt dan ook bijna altijd bepaald door de stand van het gewas, een visueel ingestelde beoordeling die (nog) niet in cijfers is uit te drukken,

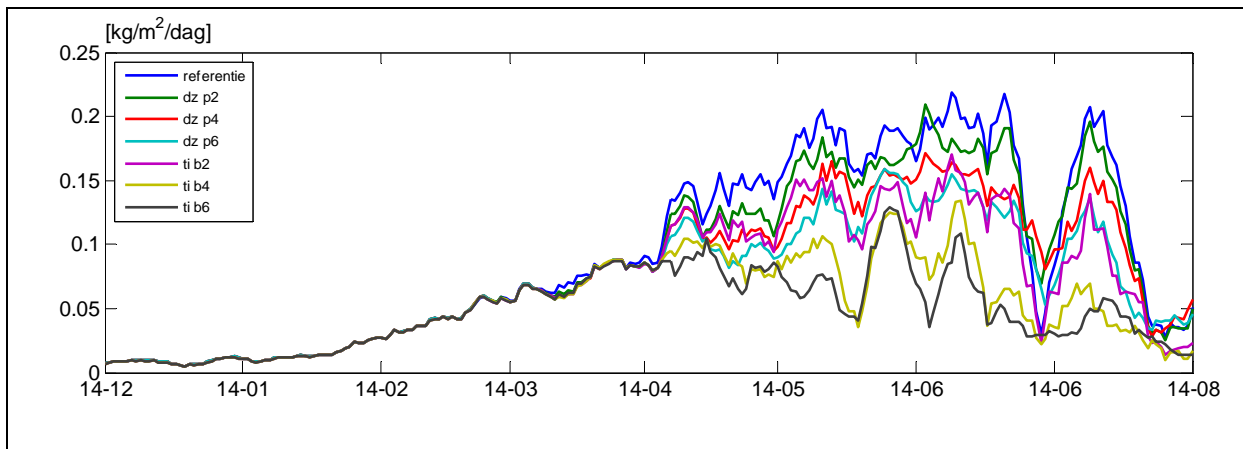
In Figuur 18 is de gemiddelde raamstand van de luwe zijde weergegeven. Er blijkt dat bij een toename van

de dode zone er minder geventileerd gaat worden. Ondanks de verminderde beschikbaarheid van CO₂ leidt dit tot een toename van de CO₂-concentratie (Figuur 17). De cases met TI ventileren regelmatig juist meer dan de referentie. Dit is het gevolg van de regelaar die probeert graaduren te compenseren indien het maximale aantal toegelaten graaduren is bereikt. Dan wordt het setpoint ventilatie verlaagd, waardoor er meer geventileerd wordt.



Figuur 18 Voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen van de raamstand aan de luwe zijde.

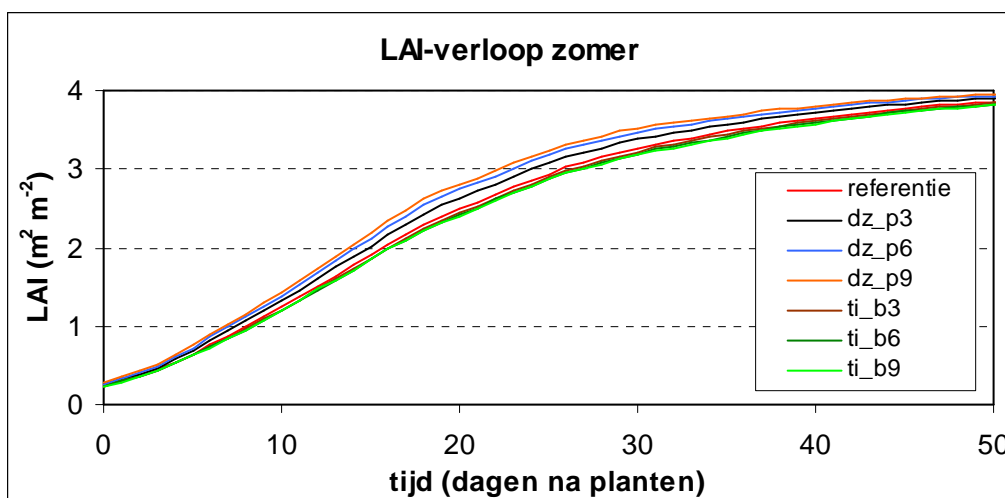
De verschillen in gedoseerde hoeveelheid CO₂ ontstaan vooral in het gevorderde voorjaar / zomer (na half april), zoals in Figuur 19 is te zien.



Figuur 19 Dagelijks gedoseerde totale hoeveelheid CO₂ (ketel + zuiver), een voortschrijdend gemiddelde van 7 dagen

4.2.2 LAI en lichtonderschepping

Een van de effecten van een andere temperatuur is een versnelde of vertraagde ontwikkeling van het bladoppervlak. In de winter treden er geen verschillen op tussen de cases. In de zomer zijn er verschillen in het LAI-verloop zichtbaar. De LAI's van de TI-cases loopt tussen 5 en 50 dagen na planten iets achter bij de referentie, terwijl de LAI's van de DZ-cases voor lopen op de referentie. Direct volgend uit de temperatuurverschillen, lopen de LAI's van de TI-cases minder achter dan de LAI's van de DZ-cases voor lopen op de referentie. Uiteindelijk bereiken de LAI's van alle cases dezelfde maximum waarde aan het einde van de teelt.



Figuur 20 Verloop van de LAI tijdens de eerste 50 dagen van de zomerteelt voor de referentie en de zes cases.

Het gevolg van de verschillende LAI's is dat ook de hoeveelheden onderschepte fotosynthetisch actieve straling (absorbed photosynthetically active radiation, PARabs) in de zomer iets variëren. In de winter bedraagt dit op seizoensbasis voor alle cases 293 MJ m^{-2} . In de zomer bedraagt dit op seizoensbasis voor de referentie 516 MJ m^{-2} , voor de TI-cases $1\text{-}2 \text{ MJ m}^{-2}$ lager, en voor de DZ-cases $2\text{-}5 \text{ MJ m}^{-2}$ hoger.

Tabel 7 De op seizoensbasis hoeveelheden onderschepte fotosynthetisch actieve straling (absorbed photosynthetically active radiation, PARabs), bruto assimilatie, en onderhoudsademhaling in de winter- en zomerteelt voor de referentie en de zes cases.

Case	Totale PARabs winterteelt (MJ m^{-2})	Totale PARabs zomerteelt (MJ m^{-2})	Bruto assimilatie winterteelt ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}$)	Bruto assimilatie zomerteelt ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}$)	Onderhouds- ademhaling winterteelt ($\text{g CH}_2\text{O m}^{-2}$)	Onderhouds- ademhaling zomerteelt ($\text{g CH}_2\text{O m}^{-2}$)
Referentie	293	516	3721	5501	272	314
DZ_P3	293	518	3727	5625	276	339
DZ_P6	293	520	3726	5624	279	363
DZ_P9	293	521	3718	5543	281	381
TI_B3	293	515	3714	5394	273	311
TI_B6	293	514	3682	5172	273	311
TI_B9	293	514	3665	5058	273	317

4.2.3 Bruto assimilatie en onderhoudsademhaling

De bruto assimilatie ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}$) is de opgenomen hoeveelheid CO_2 door middel van gewasfotosynthese. Het wordt beïnvloed door een groot aantal klimaatfactoren, waarvan de CO_2 -concentratie van de kaslucht een belangrijke is. Daarnaast speelt de temperatuur een directe rol bij de netto gewasfotosynthese, zij het dat binnen de gebruikelijke kasluchttemperaturen dit effect beperkt is. Een groter effect wordt veroorzaakt door het effect van de temperatuur op de hoeveelheid bladoppervlak en daarmee de hoeveelheid geabsorbeerde straling (zie paragraaf 3.2.4.2).

Tijdens de winterteelt is er pas vanaf 125 dagen na planten enige variatie in de bruto assimilatie waarneembaar, wat op seizoensbasis tot zeer kleine verschillen leidt (Tabel 7). Alleen in het geval van TI_B9 treedt er een daling van 1,5% op; in de andere gevallen is de bruto assimilatie zo goed als ongewijzigd.

Tijdens de zomerteelt zijn de verschillen groter. Door het toepassen van een dode zone stijgt de bruto

assimilatie op seizoensbasis met 0,8 – 2,3% (de grootste stijging in geval van DZ_P3), en in het geval van temperatuurintegratie daalt de bruto assimilatie met 1,9 – 8,0% (de grootste daling in geval van TI_B9). Aangezien de hoeveelheid PARabs bij temperatuurintegratie ten opzichte van de referentie slechts 0,2-0,3% daalt, moet deze daling worden verklaard uit de lagere CO₂-concentraties in geval van temperatuurintegratie.

De onderhoudsademhaling wordt bepaald door de gewichten van de diverse organen en de temperatuur. Als gevolg van het temperatuureffect treden er in de winter vanaf ongeveer 90 dagen na planten lichte verschillen op in de dagelijkse onderhoudsademhaling. Op seizoensbasis leidt dit in de winter tot een lichte stijging in geval van het toepassen van een dode zone (1,3-3,2%). Op seizoensbasis leidt het toepassen van temperatuurintegratie in de winter niet tot noemenswaardige veranderingen in de onderhoudsademhaling. In de zomer treden er direct vanaf de plantdatum veranderingen in de onderhoudsademhaling op, als gevolg van de direct andere etmaaltemperaturen (het totale plantgewicht verandert niet veel). Het toepassen van dode zones van 3, 6 en 9 °C leidt tot respectievelijk 3, 7 en 9% stijging van de gemiddelde etmaaltemperatuur, en respectievelijk 8, 16 en 21% stijging van de onderhoudsademhaling. Aangezien temperatuurintegratie niet tot erg grote verschillen in etmaaltemperatuur leidt, zijn ook de effecten op de onderhoudsademhaling beperkt.

4.2.4 Groei van gewas en vruchten

De geassimileerde CO₂ wordt omgezet in CH₂O, en wordt na aftrek van de onderhoudsademhaling gebruikt voor de gewasgroei. Dit resulteert ten opzichte van de referentie in de winter in een ongeveer gelijke gewasgroei als een dode zone wordt toegepast (Tabel 8), en in een zeer beperkt lagere gewasgroei als temperatuurintegratie wordt toegepast (maximaal -1,7%). Deze kleine verschuivingen zijn niet verwonderlijk, gezien de kleine verschuivingen in bruto assimilatie en onderhoudsademhaling (paragraaf 3.2.4.3). In de zomer zijn de veranderingen ten opzichte van de referentie eveneens zeer beperkt in het geval van het toepassen van een dode zone (-0,1% tot +2,5%). Het toepassen van temperatuurintegratie in de zomer leidt tot een stevigere daling van de gewasgroei, namelijk van -1,7%, -5,9 en -8,1% voor respectievelijk TI_B3, TI_B6 en TI_B9. Dit komt overeen met de relatieve daling van de bruto assimilatie, aangezien de onderhoudsademhaling weinig varieerde tussen de TI-cases. (paragraaf 3.2.4.3).

Een belangrijk deel van de drogestof wordt gebruikt voor de groei van vruchten. Veranderingen in cumulatief drooggewicht van het gewas komen grotendeels overeen met veranderingen in cumulatief drooggewicht van de vruchten. In de winter neemt ten opzichte van de referentie in geen van de cases het cumulatief drooggewicht van de vruchten toe, maar in de zomer neemt het cumulatief drooggewicht van de vruchten toe als een dode zone wordt toegepast (0,7 – 4,6% stijging).

In de winter bedraagt de drogestofverdeling naar de vruchten ongeveer 62%, en in de zomer ongeveer 67%. Een verbetering ten opzichte van de referentie treedt alleen op in de zomer bij toepassing van een dode zone (0,8 – 2,4% stijging).

Tabel 8 *Seizoenscumulatieven voor droog gewasgewicht, droog vruchtgewicht, en drogestofverdeling naar de vruchten, in de winter- en zomerteelt voor de referentie en de zes cases. Geoogst vruchtgewicht en eventueel afgefallen bladmateriaal worden meegeteld.*

Case	Cumulatief drooggewicht gewas winter (g m ²)	Cumulatief drooggewicht gewas zomer (g m ²)	Cumulatief drooggewicht vruchten winter (g m ²)	Cumulatief drooggewicht vruchten zomer (g m ²)	Drogestofverdeling naar vruchten winter (-)	Drogestofverdeling naar vruchten zomer (-)
Referentie	1744	2597	1088	1737	0,624	0,669
DZ_P3	1745	2661	1081	1799	0,619	0,676
DZ_P6	1741	2653	1084	1817	0,622	0,685
DZ_P9	1736	2595	1081	1750	0,623	0,674
TI_B3	1740	2554	1081	1699	0,621	0,665
TI_B6	1722	2444	1063	1618	0,618	0,662
TI_B9	1715	2387	1063	1583	0,620	0,663

4.2.5 Vruchtdrogestofgehalte en versoogst

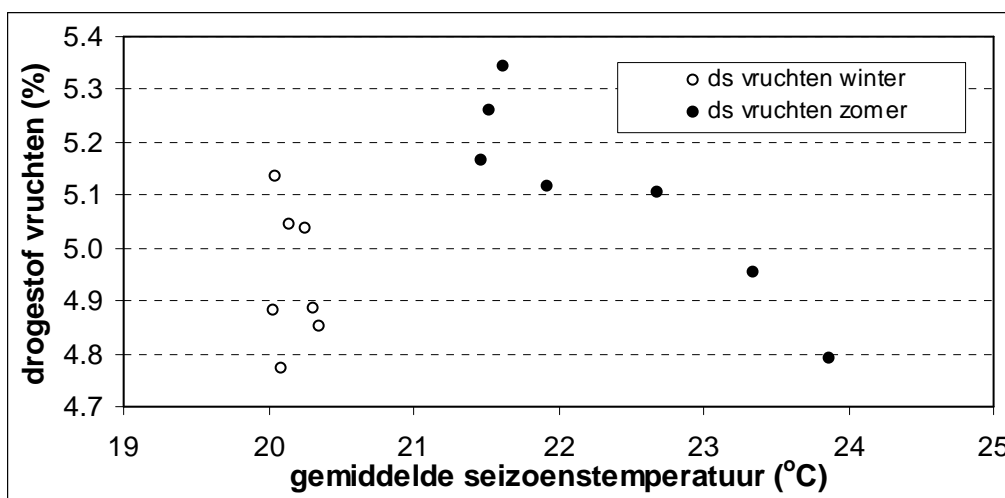
Het drogestofgehalte van de komkommervruchten wordt beïnvloed door onder meer de temperatuur, de fysiologische gewasleeftijd en de assimilatenbalans (Marcelis, 1994). Een lagere temperatuur zal in veel gevallen tot een hoger drogestofgehalte leiden, en daarmee tot een lager versgewicht. Dit nadelige effect verlangt bijzondere aandacht in het geval van energiebesparende maatregelen, omdat hier al snel een temperatuurverlaging kan optreden.

Ondanks het feit dat in de winter de variatie in gemiddelde seizoenstemperatuur zeer klein is (20.04 – 20.32 °C), is er een belangrijke variatie in het drogestofgehalte van de vruchten. Dit is het gevolg van de opeenstapeling van momentane effecten. Het toepassen van een dode zone resulteert in een verlaging van het drogestofgehalte, net als TI_B3 en TI_B9. Alleen het toepassen van TI_B6 leidt tot een hoger drogestofgehalte.

In de zomer leidt het toepassen van een dode zone tot een verlaging van het drogestofgehalte van de vruchten, en het toepassen van temperatuurintegratie tot een stijging van het drogestofgehalte. Dit is in lijn met de veranderingen van de gemiddelde seizoenstemperaturen (Figuur 15).

Tabel 9 *Gemiddeld drogestofgehalte van de vruchten en totale versoogst, in de winter- en zomerteelt voor de referentie en de zes cases.*

Case	Gemiddeld drogestofgehalte vruchten (%) winter	Gemiddeld drogestofgehalte vruchten (%) zomer	Versoogst winter (kg m ²)	Versoogst zomer (kg m ²)
Referentie	5,05	5,12	26,7	39,0
DZ_P3	5,04	5,11	27,1	41,9
DZ_P6	4,88	4,95	27,2	43,7
DZ_P9	4,85	4,79	27,7	43,1
TI_B3	4,77	5,34	26,4	38,0
TI_B6	5,14	5,17	25,8	36,0
TI_B9	4,88	5,26	26,3	36,2



Figuur 21 Het drogestofpercentage van de vruchten in relatie tot de gemiddelde seizoenstemperatuur, in de winter- en zomerteelt, gebundeld voor de referentie en de zes cases.

De versooft van de referentiecasi bedraagt 26,7 kg m² in de winter en 39,0 kg m² in de zomer. In de winter heeft het toepassen van een dode zone nagenoeg geen effect op het cumulatief drooggewicht van de vruchten (zie paragraaf 4.2.4), maar wegens de daling van het drogestofpercentage neemt de versooft toe (Tabel 9). Een bredere dode zone leidt tot een lager drogestofpercentage en daarmee tot een hogere versooft. DZ_P9 geeft een versproductie van 27,7 kg m², wat overeenkomt met een stijging van 3,7%. Het toepassen van temperatuurintegratie leidt in de winter tot een lichte afname van het cumulatief drooggewicht van de vruchten (zie paragraaf 4.2.4), wat in combinatie met het hogere drogestofpercentage resulteert in een lagere versooft. TI_B3 geeft een 1,4% lagere productie, TI_B6 een 3,6% lagere productie, en TI_B9 een 1,5% lagere productie.

In de zomer leidde het toepassen van een dode zone tot een stijging van het cumulatief drooggewicht van de vruchten (zie paragraaf 4.2.4), en in combinatie met het lagere drogestofpercentage stijgt de versproductie: 7,4% voor DZ_P3, 12,0% voor DZ_P6, en 10,5% voor DZ_P9. Het toepassen van temperatuurintegratie leidde tot een lager cumulatief drooggewicht van de vruchten (zie paragraaf 4.2.4), en de combinatie met een hoger drogestofpercentage tot een lagere versooft: 2,8% voor TI_B3, 7,7% voor TI_B6, en 7,2% voor TI_B9.

4.2.6 Aantal geoogste vruchten

In de referentiecasi bedraagt het aantal geoogste vruchten per plant in de winter 44, en in de zomer 59. In de winter vindt er geen verschuiving plaats van de eerste oogst door het toepassen van een dode zone of temperatuurintegratie, aangezien het temperatuurverloop in de eerste periode niet tussen de cases verschilt. Aan het einde van de teelt kan het toepassen van een dode zone tot een zeer lichte stijging van het aantal geoogste vruchten leiden (DZ_P9: 45 vruchten). Het toepassen van temperatuurintegratie leidt tot een lichte daling van het aantal geoogste vruchten, namelijk 42 tot 43 per plant.

In de zomer komt de oogst in geval van temperatuurintegratie een dag later op gang. Dit valt binnen de ruis van de modeluitkomsten. Er treden wel grotere verschillen op in het totaal aantal geoogste vruchten per plant. Dit stijgt in geval van het toepassen van een dode zone (60-63), terwijl het toepassen van temperatuurintegratie tot een daling van het aantal vruchten per plant leidt (54-57).

Tabel 10 Cumulatief aantal geogste vruchten in de winter- en zomerteelt voor de referentie en de zes cases.

Case	Geogste vruchten winterteelt (aantal plant-1)	Geogste vruchten zomerteelt (aantal plant-1)
Referentie	44	56
DZ_P3	44	58
DZ_P6	45	61
DZ_P9	45	59
TI_B3	43	54
TI_B6	41	56
TI_B9	41	53

4.2.7 Assimilatenbalans

De assimilatenbalans van een gewas is de verhouding tussen het totale aanbod van assimilaten en de totale vraag naar assimilaten. Het aanbod wordt verzorgd door de assimilatie in de groene delen van de plant, en de vraag is afkomstig van zowel de vruchten als de vegetatieve delen. Vrijwel altijd is de vraag hoger dan het aanbod, zodat de balans kleiner is dan 1.

$$\text{Assimilatenbalans} = \text{Aanbod van assimilaten} / \text{Vraag naar assimilaten}$$

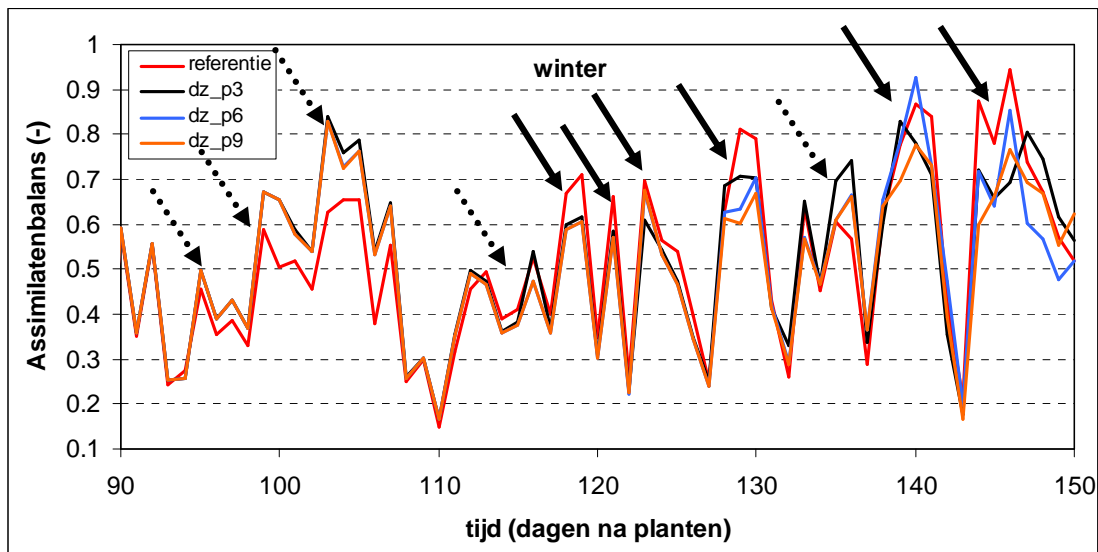
Zowel aanbod van als vraag naar assimilaten worden uitgedrukt in $\text{g CH}_2\text{O m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Een hoger aanbod van assimilaten wordt gerealiseerd door een hogere straling of een hogere CO₂ concentratie, wat onder de gangbare kasomstandigheden de meest bepalende factoren zijn voor de fotosynthese. Temperatuur heeft een veel kleiner effect. Het aanbod van assimilaten is op de korte termijn moeilijk de beïnvloeden omdat om verschillende redenen het toepassen van schermen, assimilatiebelichting en CO₂ dosering afvallen (Elings et al., 2006). De vraag naar assimilaten wordt gedomineerd door de vraag van de vruchten. Dit is sterk door de temperatuur en de plantbelasting bepaald, waarbij een hogere temperatuur of plantbelasting voor een hogere vraag zorgt. De plantbelasting kan niet op de korte termijn worden beïnvloed, maar de luchttemperatuur in de kas wel.

De vraag naar assimilaten staat in de definitie van de assimilatenbalans 'onder de streep'. Om de assimilatenbalans te verlagen, moet daarom de temperatuur worden verhoogd, en moet omgekeerd de temperatuur worden verlaagd om de assimilatenbalans te verhogen. In het project 'Flexibele Meerdaagse Temperatuurinstelling op basis van de assimilatenbalans van het gewas' (Elings et al., 2006) is modelmatig aangetoond dat het rustiger laten verlopen van de assimilatenbalans door met behulp van temperatuursturing de pieken in het verloop van de assimilatenbalans te dempen, leidt tot energiebesparing of productiestijging, of een combinatie van deze twee.

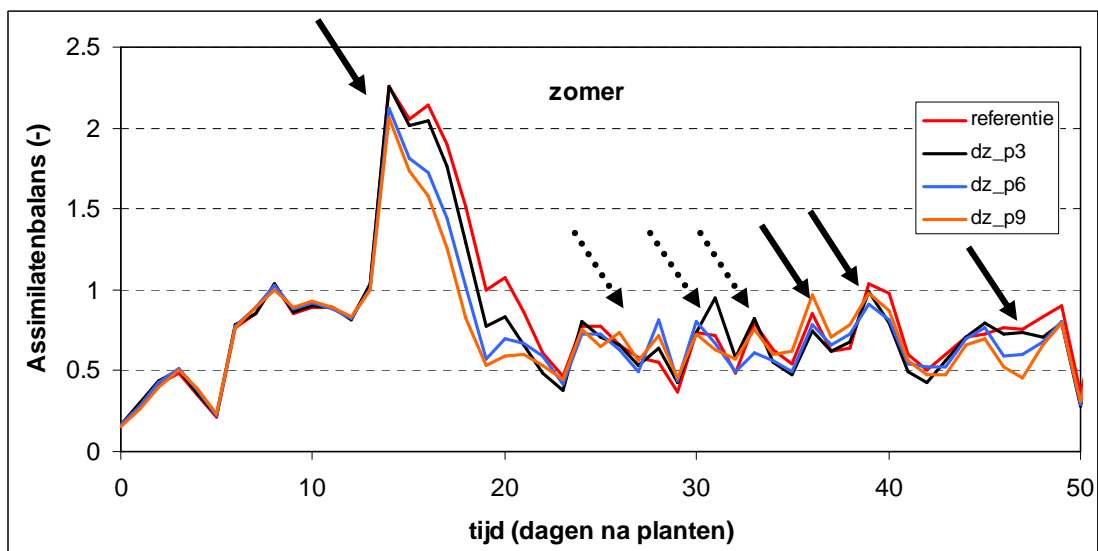
Assimilatenbalans en dode zone

Ook het toepassen van een bredere dode zone lijkt mogelijkheden te bieden om de assimilatenbalans rustiger te laten verlopen. In het hier gerapporteerde project is een bredere dode zone gerealiseerd door de ventilatielijn te verhogen, zodat overdag een verhoogde temperatuur werd toegestaan, resulterende in een hogere etmaaltemperatuur. Dit trad in de winterteelt pas na ongeveer 110 dagen na planten op. Op dit moment had de LAI al de maximale waarde bereikt, zodat deze niet door de temperatuurverschillen werd beïnvloed. In Figuur 22 is te zien dat de hogere temperaturen bij toepassing van een bredere dode zone met name in het tweede gedeelte van de winterteelt inderdaad tot een periodieke verlaging van de pieken in de assimilatenbalans (dus tot stabilisatie) leidde. Hier tegenover staan een aantal korte perioden waarin juist het tegenovergestelde effect optrad. Met name de hogere assimilatenbalans rond 105 dagen na planten springt er uit, omdat ook op dit moment sprake was van een hogere temperatuur ten opzichte van de referentie, zodat een daling van de assimilatenbalans zou worden verwacht. Echter, de plantbelasting lag in deze periode bij de dodezone-behandelingen lager dan bij de referentieteelt, zodat de sinksterkte bij de dodezone-behandelingen relatief laag was en daarmee de assimilatenbalans relatief hoog.

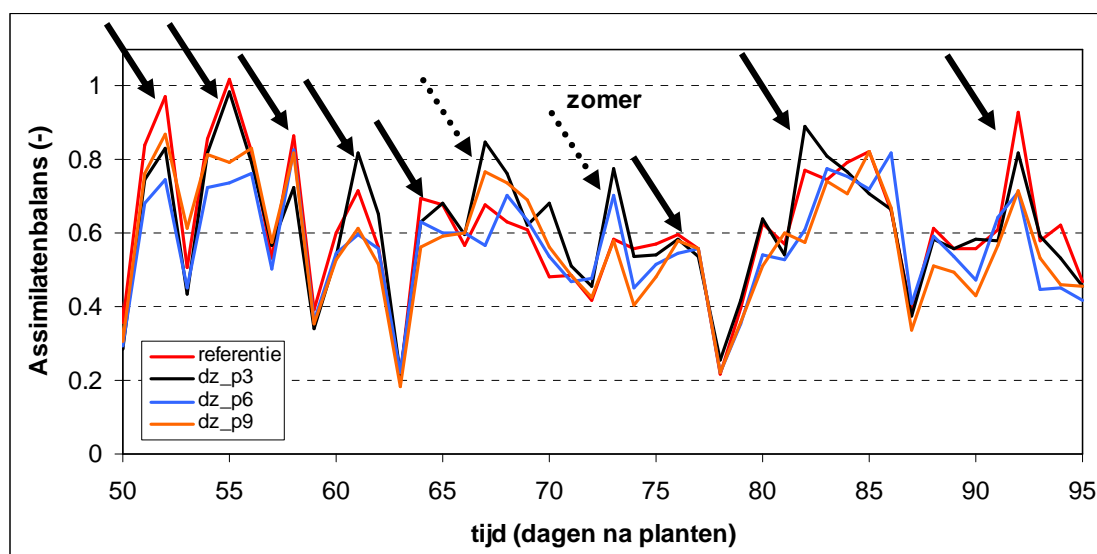


Figuur 22 Het verloop van de assimilatenbalans voor de referentieteelt en de drie scenario's met verschillende dode zone in de winter. De gegevens zijn weergegeven vanaf 90 dagen na planten, aangezien daarvoor geen verschillen zijn berekend. Een ononderbroken pijl geeft aan wanneer de assimilatenbalans in alle of de meeste scenario's werd gestabiliseerd, en een onderbroken pijl geeft aan wanneer de assimilatenbalans in alle of de meeste scenario's juist minder stabiel werd.

In de zomerteelt wordt een relatief lage assimilatenbalans afgewisseld met een relatief hoge (Figuur 23 en Figuur 24), al is het aantal perioden met een lagere assimilatenbalans groter. Ook hier zien we dat het verhogen van de ventilatielijn, leidend tot temperatuursverhoging, in veel gevallen lagere pieken in de assimilatenbalans geeft. Afwijkingen in dit patroon zijn, net als in de winterteelt, geassocieerd met golfbewegingen in de plantbelasting, die voor fluctuatie in de assimilatiebalans zorgen.



Figuur 23 Het verloop van de assimilatenbalans voor de referentieteelt en de drie scenario's met verschillende dode zone in de zomer tot 50 dagen na planten. Een ononderbroken pijl geeft aan wanneer de assimilatenbalans in alle of de meeste scenario's werd gestabiliseerd, en een onderbroken pijl geeft aan wanneer de assimilatenbalans in alle of de meeste scenario's juist minder stabiel werd.



Figuur 24 Het verloop van de assimilatenbalans voor de referentieteel en de drie scenario's met verschillende dode zone in de zomer vanaf 50 dagen na planten. Een ononderbroken pijl geeft aan wanneer de assimilatenbalans in alle of de meeste scenario's werd gestabiliseerd, en een onderbroken pijl geeft aan wanneer de assimilatenbalans in alle of de meeste scenario's juist minder stabiel werd.

Assimilatenbalans en temperatuurintegratie

In het geval van temperatuurintegratie werd de nachttemperatuur dusdanig aangepast op basis van een verandering in de dagtemperatuur, dat de etmaaltemperatuur ongewijzigd bleef. Dit is het principe van temperatuurintegratie. Omdat de etmaaltemperatuur ongewijzigd bleef, waren de veranderingen in de assimilatenbalans ten opzichte van de referentieteel zeer beperkt.

Conclusie

Toepassen van een bredere dode zone door het verhogen van de stooklijn zorgt voor een lichte verhoging van de etmaaltemperatuur. Dit leidt in veel gevallen tot een verlaging van de pieken in de assimilatenbalans, dus tot stabilisatie. Als de plantbelasting van de dodezone-behandeling echter relatief laag is, blijft de assimilatenbalans relatief hoog, omdat dit zwaarder kan wegen dan de hogere temperatuur.

De productiewinst was beperkt (zie Tabel 8). In het 'Meerdaagse TemperatuurInstellingen' onderzoek werd het energieverbruik gebufferd over drie dagen. Het lijkt aannemelijk dat de energetische uitruilmogelijkheden die dit geeft, tot energiebesparing leidt. Het zou dus het overwegen waard zijn om ook een dodezone-regeling een tijdschors van meerdere dagen te geven.

4.2.8 Gasbenuttingsefficiëntie

In Tabel 11 worden de totale versooft, het totale gasverbruik en de gasbenuttingsefficiëntie over het geheel van de winter- en zomerteel vergeleken. In de referentiecasi wordt gedurende de twee teelten samen 65,8 kg verse vruchten per m² kas geoogst. Omdat dit 28,6 m³ gas per m² kas kost, is de gasbenuttingsefficiëntie gelijk aan 2,30 kg m⁻³.

Het toepassen van een dode zone leidt tot productieverbetering, terwijl het gasverbruik afneemt. De gasbenuttingsefficiëntie stijgt dan ook tot 2,57 kg m⁻³ voor DZ_P9. Ondanks de hoge gasbenuttigsefficiëntie wordt in geen van de cases met dode zone de doelstelling van 10% energiebesparing gehaald.

Het toepassen van temperatuurintegratie leidt tot productieverlaging en tot een lager gasverbruik, maar de combinatie van deze twee betekent ten opzichte van de referentie een stijging van de gasbenuttingsefficiëntie. Deze stijgt tot 2,60 kg m⁻³ voor TI_B9. Bij toepassing van temperatuurintegratie

met een bandbreedte van 6 of 9°C wordt de doelstelling van 10% energiebesparing ruimschoots gehaald.

Tabel 11 Totale versoogst, totaal gasverbruik, en gasbenuttingsefficiëntie, gedurende de winter- en zomerteelt voor de referentie en de zes cases.

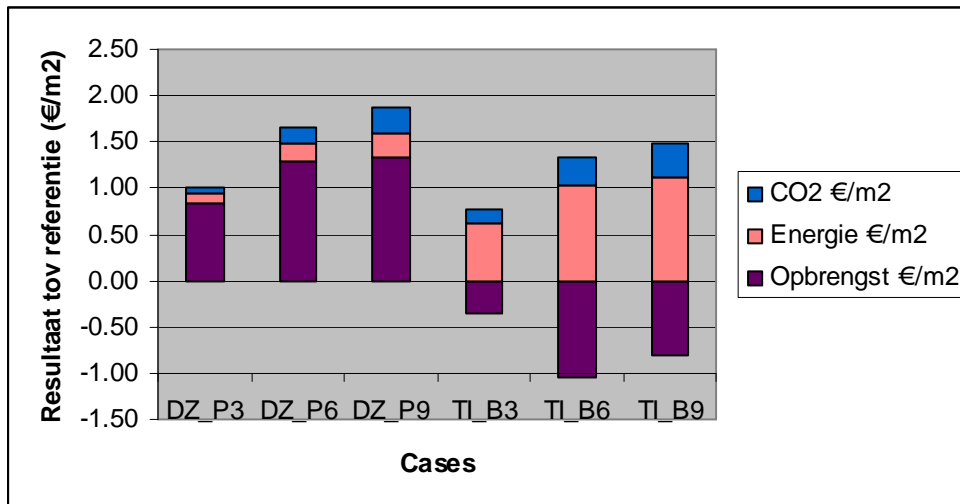
Case	Totale versoogst winter + zomer (kg m ²)	Gasverbruik (m ³ m ²)	Gasbenuttings-efficiëntie (kg m ⁻³)
Referentie	65,8	28,6	2,30
DZ_P3	69,0	28,1	2,46
DZ_P6	70,9	27,8	2,55
DZ_P9	70,8	27,6	2,57
TI_B3	64,3	26,1	2,46
TI_B6	61,8	24,5	2,52
TI_B9	62,5	24,1	2,60

4.2.9 Economische evaluatie

Uitgaande van de berekende versoogst, de benodigde hoeveelheid gas (zie Tabel 11) en de benodigde hoeveelheid zuivere CO₂ (zie Tabel 6) laat Tabel 12 zien welke case de hoogste winst behaalt. De prijs van productieverschil ten opzichte van de referentie is hierbij gesteld op 0,57 €/kg in de winter en 0,42 €/kg in de zomer. Hier worden de kosten van arbeid (0,15 €/kg), fust (0,025 €/kg) en afzet (2,5% van de omzet) van afgetrokken. De prijs van aardgas is gesteld op 0,25 €/m³ en de prijs van zuivere CO₂ op 0,10 €/kg.

Tabel 12 Bedrijfseconomisch resultaat ten opzichte van de referentie op basis van verschillen in productie, gasverbruik en verbruik van zuivere CO₂ (bij gelijkblijvende arbeidsproductiviteit)

	Versoogst winter kg m ²	Versoogst zomer kg m ²	Gasverbruik m ³ m ²	CO ₂ kg m ²	Opbrengst € m ²	Gas € m ²	CO ₂ € m ²	Totaal € m ²
Referentie	26,7	39,0	28,6	5,8	tov ref.	tov ref.	tov ref.	tov ref.
DZ_P3	27,1	41,9	28,1	5,3	0,83	0,13	0,05	1,00
DZ_P6	27,2	43,7	27,8	4,1	1,29	0,20	0,17	1,66
DZ_P9	27,7	43,1	27,6	3,0	1,34	0,25	0,28	1,87
TI_B3	26,4	38,0	26,1	4,3	-0,35	0,63	0,15	0,43
TI_B6	25,8	36,0	24,5	2,7	-1,04	1,03	0,31	0,29
TI_B9	26,3	36,2	24,1	2,2	-0,81	1,13	0,36	0,68



Figuur 25 Opbouw van het bedrijfseconomisch resultaat ten opzichte van de referentie op basis van verschillen in productie, gasverbruik en verbruik van zuivere CO₂.

Opvallend is dat de optelsom van de extra opbrengst en de besparingen op aardgas en CO₂ bij alle cases leidt tot een hoger bedrijfsresultaat dan de referentie. Het hoogste resultaat wordt behaald als een dode zone van 9°C wordt aangehouden zonder temperatuurintegratie (DZ_P9). Met temperatuurintegratie wordt weliswaar de hoogste energiebesparing gerealiseerd, maar deze wordt voor een groot deel tenietgedaan door de verlaagde opbrengst uit de lagere productie.

4.2.10 Samenvatting

In Tabel 13 wordt een overzicht gegeven van de rekenresultaten, waarbij geen onderscheid naar de vormen van dode zone en temperatuurintegratie wordt gemaakt:

Tabel 13 Samenvatting van effecten van toepassen van dode zone en temperatuurintegratie

	Totale groei	Drogestofgroei vruchten	Versgroei vruchten	Gasverbruik	Gasbenuttings-efficiëntie
Winter- dode zone	0	0	+	-	+
Zomer – dode zone	+	+	+		
Winter - temperatuurintegratie	-	-	-	-	+
Zomer - temperatuurintegratie	-	-	-		

- Het toepassen van de dode zone is aantrekkelijk om zowel in de winter- als in de zomerteelt toe te passen. Alleen in de zomerteelt neemt de drogestofgroei van het gewas en de vruchten toe. Maar doordat het drogestofgehalte van de komkommervrucht daalt door de temperatuurverlaging in de winter, neemt ook in de winter de versproductie toe.
- Vanuit het oogpunt van productie is het toepassen van temperatuurintegratie niet aantrekkelijk, omdat het resulteert in een afnemende versproductie.
- Bij het toepassen van een dode zone en bij het toepassen van temperatuurintegratie neemt het gasverbruik af. Bij toepassing van een dode zone is de afname 2 tot ca. 4% en bij toepassing van temperatuurintegratie is dit 9 tot 16% in de beschouwde periode.
- Bij het toepassen van een dode zone en bij het toepassen van temperatuurintegratie neemt de gasbenuttingsefficiëntie toe.

4.3 Reacties van komkommertelers

Tijdens een presentatie aan zeven komkommertelers zijn de resultaten uit dit onderzoek voorgelegd. Ondanks het hoge resultaat (1,5 tot 2 €/m².jaar) dat een verhoogde ventilatietemperatuur kan opleveren waren de telers niet enthousiast over de methode. De belangrijkste bezwaren waren het arbeidsklimaat en het teeltklimaat.

- Op zeer warme dagen is het moeilijk om het personeel te motiveren om oogst- en gewashandelingen uit te voeren. Een verhoogde ingestelde ventilatietemperatuur zal leiden tot meer dagen met een hoge kastemperatuur en een hogere luchtvochtigheid. Dit zal de motivatie van het personeel en ook de arbeidsproductiviteit verlagen. Dit is ook in onderzoek aangetoond (Hendrix, 1993). Bij hoge temperaturen en luchtvochtigheden wordt de benodigde tijd voor arbeidshandelingen verhoogd met een klimaatfactor zoals weergegeven in bijlage 3. In Tabel 14 is een schatting gegeven van de extra arbeidskosten die de verschillende cases met zich meebrengen. Hieruit blijkt, dat de verbetering van het bedrijfsresultaat van case met 9°C dode zone zonder compensatie (DZ_P9) voor een groot deel teniet wordt gedaan door de extra arbeidskosten. Rekening houdend met de arbeidskosten wordt het bedrijfsresultaat het hoogst bij de case met 6°C dode zone zonder compensatie (DZ_P6)
- De telers beweren dat de komkommerplant stilstaat bij een kastemperatuur van 30°C en geen CO₂ meer opneemt. Dit is voor hen een van de redenen om te schermen. De planttemperatuur wordt dan lager en daardoor wordt volgens de telers de plant actiever dan zonder schermen. Voor zover bekend is nooit onderzoek gedaan naar de processen die bij een hoge instraling en hoge kasluchttemperatuur beperkend zijn voor de gewasgroei. Het is mogelijk dat bij een sterke instraling de wateraanvoer de verdamping van de bovenste bladeren niet kan bijhouden, waardoor de huidmondjes zich sluiten om uitdroging te voorkomen. De planttemperatuur zou hierdoor hoog op kunnen lopen. Verder zal bij een hoge planttemperatuur de ademhaling hoog zijn, waardoor de netto fotosynthesesnelheid lager wordt. Of en in welke mate dit optreedt, is niet bekend. Om aan deze bezwaren tegemoet te komen kan worden onderzocht of en boven welke kastemperatuur de komkommerplant een verminderde netto fotosynthese heeft. Ook kan worden gekeken of de verhoogde ventilatietemperatuur alleen hoeft te worden toegepast in de afdelingen waar geen arbeidshandelingen plaatsvinden.

In de vakliteratuur (Boonekamp, 2006) is als bezwaar tegen het verhogen van de ventilatietemperatuur genoemd, dat het mogelijk een verminderde kwaliteit van de vruchten en een slechter uithoudingsvermogen van het komkommergewas zou geven. Ook zou bij een lage plantbelasting bij een hoge temperatuur en een hoge luchtvochtigheid, een hoge worteldruk ontstaan die de plant niet meer in de vruchten kwijt kan, zodat guttatie zou ontstaan.

Tabel 14- Schatting van de extra benodigde arbeid en kosten veroorzaakt door werkklimaatomstandigheden bij 7 cases en de invloed hiervan op het bedrijfseconomisch resultaat.

Case	Extra uren (uur/jaar)	Extra arbeid (%)	Extra kosten (€/m ² .jaar)	Bedrijfseconomisch resultaat (excl. extra arbeid) (€/m ² .jaar)	Bedrijfseconomisch resultaat (incl. extra arbeid) (€/m ² .jaar)
referentie	59	1,3%	0,22		
DZ_P3	138	3,1%	0,50	1,00	0,71
DZ_P6	242	5,5%	0,88	1,66	1,00
DZ_P9	430	9,8%	1,56	1,87	0,52
TI_B3	110	2,5%	0,40	0,43	0,24
TI_B6	169	3,8%	0,62	0,29	-0,11
TI_B9	268	6,1%	0,98	0,68	-0,08

4.4 Perspectieven bij andere gewassen

Aan de hand van gesprekken met gewasonderzoekers is gekeken of de teelstrategie met een verhoogde ventilatietemperatuur, waarbij de etmaaltemperatuur al of niet wordt gecompenseerd, ook mogelijk is voor andere gewassen.

4.4.1 Tomaat

Wat betreft groei-omstandigheden wijkt tomaat niet veel af van komkommer. Een belangrijk verschil is dat bij tomaat geen teeltwisseling nodig is. Hierdoor heeft tomaat niet het voordeel van een snellere gewasontwikkeling in mei, zoals berekend voor het jonge komkommengewas, omdat het tomatengewas dan al volgroeid is. Anderzijds kan het gewas in mei wel een hogere productie realiseren door een hoger CO₂-niveau in de maand april, terwijl het komkommengewas begin mei juist wordt gesloopt. Verder leidt een hogere etmaaltemperatuur tot een snellere afrijping van de vruchten en in mindere mate tot een hogere ontwikkelingssnelheid. Dit heeft invloed op het vrucht- en trosgewicht. Tomatentelers zullen dan ook iets minder stengels per m² aan moeten houden om bij een hogere etmaaltemperatuur voldoende vruchtgewicht te realiseren. Uiteraard is compensatie door een lagere nachttemperatuur ook een mogelijke maatregel.
Perspectieven verhoogde ventilatietemperatuur: ongeveer even hoog als bij komkommer

4.4.2 Paprika

Bij paprika wordt al minder geventileerd dan bij komkommer en tomaat. Deels heeft dat te maken met de lagere verdamping in het paprikagewas, zodat er minder vocht hoeft te worden afgevoerd. De vrucht van de paprika is hol en warmt sneller op dan een komkommer of een tomaat. Dit geeft als voordeel dat er minder kans is op natslag van de vruchten, zodat de kastemperatuur bij paprika sneller mag oplopen dan bij komkommer of tomaat. Het zogenaamde “vochtsparen”, waarbij op het einde van de dag de luchtramen eerder sluiten en in de avond snel wordt afgelucht, is bij paprika al een veel toegepaste methode om het CO₂-verlies te beperken. Wel is er voor sommige rassen een risico voor kopscheuren in de vruchten als de temperatuur en de luchtvochtigheid te ver op lopen (Boonekamp, 2006).

De etmaaltemperatuur is bij paprika het belangrijkste stuurmiddel om de assimilatenbalans tussen source (de aanmaak van assimilaten) en sink (het verbruik van assimilaten) in evenwicht te houden en een zo regelmatig mogelijke zetting te verkrijgen. De verwachting is dat de etmaaltemperatuur in de toekomst meer afhankelijk van de actuele plantbelasting geregeld gaat worden. In periodes met een lage plantbelasting kan een hogere temperatuur winst opleveren. Het gewas heeft dan weinig assimilaten nodig en een hogere CO₂-concentratie kan dan meer assimilaten opleveren. Omdat de plant dan relatief weinig assimilaten nodig heeft, kan een hogere etmaaltemperatuur de productie afvlakken en zullen periodes met lage productie niveau korter zijn. Als er meer assimilaten beschikbaar zijn door de hogere temperatuur overdag, kan de assimilatenbalans afhankelijk van de plantbelasting gestuurd worden door variatie in nachttemperatuur. Een verhoogde ventilatietemperatuur kan in periodes met zware plantbelasting alleen worden toegepast als de verhoogde dagtemperatuur gecompenseerd kan worden met een lagere nachttemperatuur. Dit geeft dan wel weer een groter verschil tussen de dag en nachttemperatuur (DIF), wat een generatieve sturing geeft op het gewas.

Verder heeft een paprikagewas in de zomer en het najaar een hoge LAI, en de onderste bladlagen verbruiken meer assimilaten dan ze produceren. Telers laten ze in de regel zitten omdat verwijderen te veel arbeid kost. Temperatuurverhoging kan leiden tot hogere onderhoudskosten, en productieverlies.

Perspectieven verhoogde ventilatietemperatuur: hier liggen kansen om productieverhoging te realiseren in combinatie met een beslissingsondersteunend model voor sturing in de zetting.

4.4.3 Aubergine

De door telers gehanteerde dagtemperatuur bij Aubergine is al hoger dan komkommer en er wordt lang gewacht met ventileren. De etmaaltemperatuur moet in de zomer minimaal 22°C zijn. Verder zijn nachttemperaturen van minimaal 15°C nodig om voldoende zetting te verkrijgen. Verwacht wordt dan ook dat het moeilijk wordt om de ventilatietemperatuur nog verder te verhogen en CO₂ langer in de kas te houden. Er is wel een tendens om minder te stoken in verband met de hoge energieprijzen van de laatste tijd. De telers moeten er dan wel op worden geattendeerd dat zij niet ook ver gaan zakken met de ventilatietemperatuur. De winst kan behaald worden door een grotere bandbreedte tussen ventilatie- en verwarmingstemperatuur. De temperatuur mag behoorlijk oplopen zonder dat het productie hoeft te kosten.

Wel moet worden gelet op de luchtvochtigheid in verband met gutteren van de bloemen, wat Mucor in de hand kan werken.

Perspectieven verhoogde ventilatietemperatuur: hoewel de bovengrens van de kastemperatuur voor aubergine onbekend is, lijkt er minder ruimte beschikbaar dan bij komkommer, maar nog steeds mogelijkheden aanwezig.

4.4.4 Roos

Bij roos wordt gestuurd om een bepaalde etmaaltemperatuur te verkrijgen op basis van de hoeveelheid fotosynthese. Zo wordt bij veel licht en veel CO₂ een hogere etmaaltemperatuur getolereerd. Dit is bedoeld om de assimilatenbalans in evenwicht te houden. Bij een hogere teelttemperatuur ontwikkelen zich meer scheuten zodat ook meer takken worden geproduceerd. Als er echter onvoldoende assimilaten beschikbaar zijn, krijgen deze takken een laag gewicht en hiermee een lage prijs. Een verhoging van de ventilatietemperatuur is daarom alleen wenselijk als de hiermee verhoogde dagtemperatuur kan worden gecompenseerd door een lagere nachttemperatuur. In de perioden dat een bedrijf nog ruimte heeft om de nachttemperatuur te verlagen is het mogelijk om overdag minder te ventileren.

Perspectieven verhoogde ventilatietemperatuur: gering

4.4.5 Chryasant

Het compenseren van een verhoogde dagtemperatuur met een lagere nachttemperatuur is bij chryasant minder goed mogelijk dan bij komkommer doordat tijdens de korte-dag-fase (± 2 wkn na planten tot de oogst) gedurende ± 13 uur moet worden verduisterd. Met een scherm is het lastig om een lage nachttemperatuur te realiseren. Er wordt in ieder geval niet verwacht dat een lagere nachttemperatuur tot veel energiebesparing zal leiden. Bovendien kan een te lage nachttemperatuur leiden tot vertraging van de reactietijd (bloeivertraging).

Het verhogen van de dagtemperatuur bij een gelijkblijvende of lagere nachttemperatuur geeft meer strekkingsgroei, waardoor een hoger verbruik van groeiremmers nodig kan zijn. De behoefte aan groeiremmers is sterk cultivar-afhankelijk.

Mogelijk dat tijdens de eerste twee weken van de teelt (lange-dag-fase) met een hoge etmaaltemperatuur een snellere gewasontwikkeling kan worden bereikt. Hierdoor zal een hogere ventilatietemperatuur leiden tot zowel meer fotosynthese als een snelle gewasontwikkeling. Om het gewas in de lange-dag-fase een andere behandeling te geven dan de gewassen in de korte-dag-fase moeten er wel maatregelen worden genomen om deze vakken afzonderlijke klimaatsturingen te geven.

Perspectieven verhoogde ventilatietemperatuur: alleen in lange-dag-fase

4.4.6 Kalanchoë

Kalanchoë is deels een CAM-plant en deels een C3-plant. Dit houdt in dat in sommige gewasstadia de plant in de ochtend de huidmondjes sluit en de 's nachts opgenomen CO₂ gebruikt om volgens een minder efficiënt CAM-mechanisme te fotosynthesiseren. Pas als deze CO₂ verbruikt is, gaat de plant over op het efficiëntere C3-mechanisme. Door welke omstandigheden de omschakeling van CAM naar C3 en andersom wordt veroorzaakt is echter nog niet helemaal bekend. Voordat onderzoek wordt gedaan naar het verhogen van de ventilatietemperatuur om zo meer CO₂ in de kas te houden verdient het daarom aanbeveling om eerst het CAM-C3-omschakelingsmechanisme te onderzoeken.

Verder geldt voor Kalanchoë net als bij chryasant dat een hoge dagtemperatuur leidt tot meer strekking, wat niet altijd gewenst is. Bij een gemiddelde dagtemperatuur boven de 25°C treedt ook bloeivertraging op. Een verhoogde ventilatietemperatuur zal bij de groene potplanten minder snel tot complicaties leiden dan bij bloeiende potplanten. Door het ontbreken van bloemen of vruchten kan daar namelijk geen sprake zijn van een verstoorde assimilatenbalans.

Perspectieven verhoogde ventilatietemperatuur: gering

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Discussie

5.1.1 Temperatuurintegratie

De strategie voor temperatuurintegratie die in dit onderzoek is gekozen, leidt volgens de berekeningen tot energiebesparing, maar ook tot een lagere productie. Dit is vooral veroorzaakt door meer ventilatie overdag. Betwijfeld wordt daarom of het wel zinvol is om een hogere ventilatietemperatuur op de ene dag te compenseren door meer ventilatie op de andere dag. Als de compensatie zou plaatsvinden door bijvoorbeeld alleen 's nachts meer te ventileren zou temperatuurintegratie tot energiebesparing kunnen leiden zonder dat dit ten koste gaat van de productie.

5.1.2 Reacties telers

De resultaten zijn positief voor het hanteren van een hogere dode zone. Toch zijn telers terughoudend in het toepassen van een hogere ventilatietemperatuur. Mogelijk komen in de praktijk plantreacties bij hoge kastemperaturen voor welke nog niet in modellen zijn verwerkt. Ook is het mogelijk dat telers de plantreacties minder objectief inschatten. Deze verschillen in inzicht nodigen uit tot meer discussie tussen telers en onderzoekers.

Het veranderde werkklimaat heeft volgens de gebruikte rekenmethode veel invloed op de arbeidsproductiviteit en hiermee ook op het bedrijfsresultaat. Het arbeidsklimaat blijkt daarmee tijdens de opzet van dit onderzoeksproject een onderschatte factor geweest te zijn.

5.1.3 Verantwoording groeimodel en cases

Het gebruikte groeimodel (INTKAM) voor komkommer is gemaakt op basis van fysiologische experimenten aan deelprocessen, die grotendeels zijn verantwoord in het proefschrift van Leo Marcelis (Marcelis, 1994). Het model bleek vervolgens goed experimentele en praktijksituaties na te kunnen rekenen (Marcelis en Gijzen, 1998). Ook recente teelten kunnen met de juiste parameterisatie goed worden nagerekend (Elings et al., 2006 en Raaphorst et al. 2006). Op grond van deze feiten wordt het model met vertrouwen in huidige studies gebruikt. Het is echter goed om het functioneren van het groeimodel tegen het licht te houden bij teeltomstandigheden die in de nieuwste kassen kunnen voorkomen, zoals de combinatie van hoog licht en hoog CO₂.

Verskillende situaties / scenario's geven verschillende uitkomsten. Ze zullen allemaal een acceptabele fout hebben, en de onderlinge verhoudingen zullen goed worden gesimuleerd. Verder moet worden benadrukt dat in dit onderzoek kleine verschillen zijn berekend, die in praktijkproeven zonder veel echte herhalingen, noch statistisch significant kunnen worden bevestigd, noch kunnen worden weerlegd. Met andere woorden: verschillen die in de praktijk niet of moeilijk waarneembaar zijn, kunnen wel degelijk bestaan.

Het groeimodel houdt rekening met vele factoren, zoals het verloop van de maximale fotosynthese over de dag of over het seizoen. De cases in dit onderzoek zijn echter eenvoudig gehouden om de toepasbaarheid in de praktijk te vergroten en de belangrijkste factor (temperatuur en CO₂) te beïnvloeden. Het onderzoek biedt dan ook geen optimaal teeltconcept door in te spelen op alle factoren, maar geeft een richting aan waarin de huidige teeltstrategieën zich zouden moeten bewegen om dichterbij dat optimale teeltconcept te komen.

5.1.4 Verschillen en meerwaarde ten opzichte van meerdaagse temperatuurinstelling

Er zit een gradueel verloop in de drie temperatuurtechnieken om de energie-efficiëntie te verbeteren: dode zone, temperatuurintegratie en meerdaagse temperatuur instelling (MTI).

1. Bij het toepassen van de dode zone wordt de temperatuur passief geregeld door de ventilatie- en stooklijnen uit elkaar te trekken. Een eventueel temperatuuroverschot wordt pas gecorrigeerd als de ventilatielijn wordt overschreden, en een eventueel temperatuurtekort wordt pas gecorrigeerd als de stooklijn wordt overschreden. Er is in deze aanpak weinig aandacht voor de plant.
2. Temperatuurintegratie heeft primair als doel om vanuit energetisch oogpunt de dagtemperatuur met de straling mee te laten fluctueren, en de nachttemperatuur dusdanig te sturen dat de 3-daagse temperatuursom gelijk blijft. In dit laatste komt de aandacht voor de plant naar voren, die op de langere termijn gebaat is bij een zelfde temperatuursom.
3. 'Meerdaagse temperatuur instelling op basis van de assimilatenbalans' duikt diep in de fysiologie van de plant, en streeft naar het stabiliseren van plantprocessen over een langere tijd. Er wordt geprobeerd om de verhouding tussen aanbod van en vraag naar assimilaten zo weinig mogelijk te laten fluctueren. Dit resulteert, net als bij temperatuurintegratie, in een dagtemperatuur die met de straling mee fluctueert. Maar het cruciale verschil is dat er nu expliciet vanuit de plant wordt gedacht. Een tweede grote verschil met temperatuurintegratie is de optimalisatie: het verloop van de dag- en nachttemperatuur wordt verder geoptimaliseerd door energiekosten en de mate waarin de assimilatenbalans werd bereikt, tegen elkaar af te wegen.

Een bredere dode zone leidde tot een hogere gemiddelde seizoenstemperatuur (dit was de centrale onderzoeksvraag), terwijl temperatuurintegratie dit nauwelijks deed. MTI kan dusdanig worden ingezet dat er meer speelruimte wordt gecreëerd ten aanzien van de temperatuurwijziging, rekening houdend met energiebesparing en/of productiestijging. De mate waarin dit gebeurt, is afhankelijk van de vraag of er wordt gekozen voor productieverbetering of gasbesparing, of een combinatie van de twee. Het is mogelijk om bij eenzelfde gasverbruik een hogere productie te realiseren, of bij eenzelfde productie bij een lager gasverbruik. Een sterk hogere temperatuur zal tot een nog hogere productie leiden, maar ook tot een hoger energieverbruik.

Het toepassen van een dode zone, of temperatuurintegratie resulteren alle drie in een betere gasbenuttingsefficiëntie ten opzichte van de referentie. Dode zone en temperatuurintegratie zijn eenvoudiger, maar bieden minder flexibiliteit in teeltstrategie.

5.2 Conclusies

5.2.1 Invloed productie

Een hogere etmaaltemperatuur geeft tot op zekere hoogte een snellere gewasontwikkeling (meer bladeren en meer vruchten) en een hogere onderhoudsademhaling. Verder is bij minder ventilatie een hogere CO₂-concentratie mogelijk zodat ook de fotosynthese hoger wordt. Toepassing van een verhoogde ventilatietemperatuur zonder temperatuurintegratie leidt voor de winterkommerteelt (december-mei) nauwelijks tot veranderingen in het kasklimaat en daardoor tot nauwelijks meer productie. In de zomerteelt (mei-augustus) is voor de case met 6°C verhoogde ventilatietemperatuur wel een lichte stijging berekend voor de lichtonderschepping (516 → 521 MJ/m²), het aantal vruchten (56→61) en voor het percentage drogestof dat naar de vruchten gaat (66,9% → 68,5%). De uiteindelijke productie in de zomerteelt stijgt dan ook bij een met 6°C verhoogde ventilatietemperatuur (39,0 → 43,7 kg/m²). Bij een 9°C verhoogde ventilatietemperatuur worden de positieve effecten op de productie deels tenietgedaan door onder andere de verhoogde onderhoudsademhaling. Ook blijkt de bruto fotosynthese voor deze strategie lager uit te vallen.

Toepassing van driedaagse temperatuurintegratie geeft weliswaar energiebesparing, maar door de lagere

CO₂-concentratie ook een lagere productie. De overige factoren hebben bij driedaagse temperatuurintegratie weinig invloed op de gewasgroei en productie.

5.2.2 Invloed energiebesparing en bedrijfsresultaat

Bij komkommer is in het voorjaar en de zomer door een verhoogde ventilatietemperatuur tot 0.5 m³/m² besparing op het gasverbruik te behalen. De benodigde hoeveelheid te doseren zuivere CO₂ neemt hierbij 2,8 kg/m² af en de gemiddelde CO₂-concentratie ligt hoger dan bij de referentie. Samen met de snellere gewasontwikkeling door de hogere etmaaltemperatuur leidt dit tot een 6% hogere productie bij een lager verbruik van aardgas en CO₂, wat leidt tot een verbetering van het bedrijfsresultaat met bijna € 2,- per m² per jaar.

Als de verhoogde dagtemperatuur wordt gecompenseerd door minder stoken en meer ventileren, leidt dit tot een hogere energiebesparing tot 4,5 m³/m².jaar. Ook wordt hiermee de hoeveelheid nuttig in te zetten zuivere CO₂-dosering tot 3,6 kg/m² lager dan de referentie. De productie wordt echter door deze teeltstrategie lager dan die van de referentiecasse, zodanig dat het bedrijfsresultaat weliswaar beter is dan de referentie, maar minder goed dan de teeltstrategie zonder compensatie.

5.2.3 Benauwd klimaat

In de praktijk bestaat nog veel weerstand tegen een teeltstrategie met een verhoogde ventilatietemperatuur. De voornaamste bezwaren liggen in de vrees voor een door de hoge temperaturen tijdelijk minder productief of langdurig uitgeput of zwak gewas en vrucht. Bovendien zijn de benauwde arbeidsomstandigheden een belangrijk argument om eerder te ventileren. Door de slechte werkomstandigheden kan een dode zone van 9°C zelfs leiden tot dermate hoge arbeidskosten dat de opbrengsten uit productieverhoging en energiebesparing grotendeels teniet worden gedaan.

5.2.4 Perspectieven andere gewassen

Naast komkommer kunnen ook andere vruchtgroentegewassen een hogere productie met een lager energieverbruik realiseren door een hogere ventilatietemperatuur aan te houden. Bij aubergine wordt het al veel toegepast, maar ook bij paprika en tomaat liggen nog mogelijkheden, mits rekening wordt gehouden met de assimilatenbalans in het gewas en vochtproblemen worden voorkomen.

Bij veel siergewassen zijn de mogelijkheden beperkt wanneer de kwaliteit van de bloem vermindert bij een hoge temperatuur. In eerste instantie liggen er kansen bij groenblijvende gewassen of vegetatieve gewasstadia in de sierteelt, zoals bij groene potplanten en de lange-dag-periode van chrysant.

5.3 Aanbevelingen

5.3.1 Aanbevolen klimaatinstellingen

Als geen arbeidshandelingen hoeven te worden verricht mag bij komkommer de ventilatietemperatuur oplopen tot 6 à 9°C boven een stooktemperatuur van ±20°C. Hierbij moet wel worden geventileerd wanneer de vruchten dreigen nat te slaan. Als wel arbeidshandelingen moeten worden verricht moet juist meer aandacht worden besteed aan de arbeidsomstandigheden en eerder worden geventileerd.

Om energie te besparen kan de verhoogde dagtemperatuur in de nacht met temperatuurintegratie worden gecompenseerd. De temperatuurintegratie mag echter niet overdag leiden tot meer ventilatie.

5.3.2 Knelpunten

Aangezien een verhoogde ventilatietemperatuur ten opzichte van de huidige referentie bij komkommer kan

leiden tot een beter bedrijfsresultaat, moeten de door de telers genoemde belangrijkste bezwaren hiertegen worden weggenomen. Daarom verdient het aanbeveling om te achterhalen onder welke voorwaarden het gewas bij hoge ventilatietemperaturen in de praktijk goed blijft functioneren en de resultaten hiervan goed te communiceren naar de telers. De resultaten van dit praktijkonderzoek kunnen bovendien worden gebruikt om de gewasgroeimodellen en de arbeidsklimaatnormen nogmaals te valideren. Ook kan gezocht worden naar regelingen die de ventilatietemperatuur per afdeling verlagen op het moment dat daar oogst- of gewashandelingen plaatsvinden.

5.3.3 Andere gewassen

In dit onderzoek is gerekend met een winterteelt en een zomerteelt met komkommer, waarbij begin mei een teeltwisseling heeft plaatsgevonden. Uit de resultaten blijkt dat een verhoogde ventilatietemperatuur voordelig is voor komkommer. Mogelijk is voor tomaat een vergelijkbaar resultaat te behalen. Door de teeltwisseling bij komkommer is het voordeel van de hogere CO₂-concentratie in april en begin mei minder groot dan bij een gewas als tomaat dat kan worden doorgeteeld. Anderzijds zal het voordeel van een versnelde plantopbouw van het jonge komkommernewas in mei niet gelden bij tomaat. Om te weten of deze en mogelijk andere effecten per saldo voor tomaat aanleiding geven om een verhoogde ventilatietemperatuur te adviseren, zal dit nader moeten worden onderzocht.

Ook voor de lange-dag-fase bij chrysant liggen mogelijkheden om de ventilatietemperatuur te verhogen. Deze mogelijkheden zouden nader kunnen worden bekeken.

Literatuur

- Ayari, O., M. Dorais en A. Gosselin, 2000. Daily variations of photosynthetic efficiency of greenhouse tomato plants during winter and spring. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 125: 235-241.
- Bodlaender, K.B.A., M van de Waart en J. Marinus, 1985. Effects of drought on water use, photosynthesis and transpiration of potatoes. 2. Drought, photosynthesis and transpiration. Proceedings international seminar Wageningen.
- Boogaard H.A.G.M. van de en A. Elings, 2003. In eindverslag "Hydrion-line: On-line monitor- en besturingssysteem voor proceswater in een gesloten teeltsysteem in de glastuinbouw"
- Boonekamp, Gerard, 2006. Wie slim vocht spaart kan veel kilo's oogsten. *Weekblad Groenten en Fruit*, week 24.
- Chaumont, M., J.F. Morot-Gaudry en C.H. Foyer, 1994. Seasonal and diurnal changes in photosynthesis and carbon partitioning in *Vitis vinifera* leaves in vines with and without fruit. *Journal of Experimental Botany* 45: 1235-1243
- De Koning, A. N. M., 1994. Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. PhD dissertation Wageningen Agricultural University, Wageningen, 240pp
- Dieleman, J.A., E. Meinen, A. Elings, D. Uenk, J.J. Uittien, A.G.M. Broekhuijsen, P.H.B. de Visser en L.F.M. Marcelis, 2003. Effecten van langdurig hoog CO₂ op groei en fotosynthese bij paprika. Eindrapport van het project 'Efficiënt gebruik van CO₂'. Nota 274, *Plant Research International*, 32 pp
- Dieleman, J.A. en H.F. de Zwart, 2004. Besturen van CO₂ en temperatuur op basis van fotosynthese en energie. Nota 323, *Plant Research International*, 47 pp
- Dieleman, A. en F. Kempkes, 2005. Schermen in de tomatenteelt: mogelijkheden en beperkingen. Nota 359. *Plant Research International*, 84 pp
- Dueck, T., K. Grashoff, J. Steenhuizen, D. Uenk, G. Broekhuijsen, E. Meinen en L. Marcelis, 2005. Bladplukken bij paprika: Fase 2. Metingen van de bladactiviteit. Nota 346, *Plant Research International*, 24 pp.
- Dueck et al., 2006. Eindrapport van het project "Optimaliseren van de energie-efficiëntie van belichting".
- Elings, A., F. de Zwart, J. Janse, F. Buwalda, L. Marcelis, 2006. Flexibele meerdaagse temperatuurinstelling op basis van de assimilatenbalans van het gewas. Nota 383, *Plant Research International*, 68 p.
- Farquhar, G.D., S. von Caemmerer en J.A. Berry, 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of a C₃ species. *Planta* 149: 78-90.
- Farquhar, G.D. en S. von Caemmerer, 1982. Modelling of photosynthetic response to environmental conditions. In: *Physiological Plant Ecology II, Water Relations and Carbon Assimilation*, Eds. O.L Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond en H. Ziegler. Springer-Verlag, p.549-587.
- Hand, D.W., G. Clark, M.A. Hannah, J.H.M. Thornley en J. Warren Wilson, 1992. Measuring the canopy net photosynthesis of glasshouse crops. *Journal of Experimental Botany* 43: 375-381
- Hand, D.W., J. Warren Wilson en B. Acock, 1993. Effects of light and CO₂ on net photosynthesis rates of stands of aubergine and *Amaranthus*. *Annals of Botany* 71: 209-216
- Heuvelink, E., 1989. Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants. *Scientia Horticulturae* 38: 11-22.
- Heuvelink, E., 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Proefschrift Landbouwniversiteit Wageningen: 45-61.
- Hendrix, A.T.M., 1993. Mens en gewas vragen verschillend klimaat. Brochure Luchtvochtigheid,

- Informatiereeks 104. Proefstation voor Tuinbouw onder Glas. Naaldwijk: 70-71.
- Ito, T., 1971. Photosynthetic activity of vegetable plants and its horticultural significance. II. The time course of photosynthesis in tomato plants as influenced by some external and internal factors, especially by water and starch contents in the leaf. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 40: 41-47
- Long, S.P., 1991. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentration: has its importance been underestimated? *Plant Cell and Environment* 14: 729-739.
- Marcelis, L.F.M., 1994. Fruit growth and dry matter partitioning in cucumber. Proefschrift Wageningen Agricultural University, Wageningen, 173 p.
- Marcelis, L.F.M. en H. Gijzen, 1998. Evaluation under commercial conditions of a model of prediction of the yield and quality of cucumber fruits. *Scientia Horticultura* 76: 171-181
- Marcelis, L., G. Broekhuijsen, E. Meinen, L. Nijs & M. Raaphorst, 2004. Lichtregel in de tuinbouw. *PRI nota* 305, 82 p.
- Marissen, N., A. Elings, J. Snel, M. Warmenhoven, E. Meinen, P. Dijkhuis, D. Kouwenhoven, P. Schrama en D. Uenk., 2005. Energiebesparing mobiele belichting roos. PPO rapport, 56 pp.
- Nederhoff, E., 1987. CO₂ doseren: wanneer, hoelang en hoeveel? *Weekblad groenten en fruit* 31: 32-35.
- Nederhoff, E.M. en J.G. Vegter, 1994. Photosynthesis of stands of tomato, cucumber and sweet pepper measured in greenhouses under various CO₂-concentrations. *Annals of Botany* 73: 353-361
- Powles, S.B. en S.W. Thorne, 1981. Effect of high-light treatments in inducing photoinhibition of photosynthesis in intact leaves of low-light grown *Phaseolus vulgaris* and *Lactuca microcarpa*. *Planta* 152: 471-477.
- Raaphorst, M., F. Kempkes, E. Heuvelink, R. Kaarsemaker, M. Bakker, 2006. Teeltconcept voor de geconditioneerde kas. *Praktijkonderzoek Plant en Omgeving*, Naaldwijk, 34 p.
- Vara Prasad, P.V., Allen, L.H., Boote, K.J., 2005. Crop response to elevated carbon dioxide and interaction with temperature: grain legumes. *Journal of Crop Improvement* 13: 113-155.

Bijlage 1 Referentie komkommer

Kas

Bij de referentiecaser is uitgegaan van een kas van 4. ha met een goothoogte van 5 meter. De traliemaat is 8 meter (2 kappen van 4 meter) en de pootafstand is 4.5 meter.

Het verwarmingssysteem is een standaard systeem voor de intensieve glasgroenteteelt en bestaat uit vijf 51 mm buizen per kap in het ondernet en half zo veel 28 mm buizen in het bovennet. Het bovennet fungeert als condensornet, maar ook als secundair net wanneer een groot verwarmingsvermogen noodzakelijk is. De buistemperaturen zijn begrensd op 60 °C voor zowel het onder- als het boven-net.

De kas is uitgerust met een rookgas-verdeelsysteem voor de CO₂-dosering waarmee maximaal 180 kg CO₂ per ha per uur kan worden toegediend.

De ketel heeft een aansluitcapaciteit van 120 m³/(ha uur) en er is een warmte-opslag buffer met een waterinhoud van 120 m³/ha. Indien de buffer vol is, wordt de CO₂-dosering vanuit de verwarmingsketel vervangen door zuivere CO₂-dosering. Hiervoor is gekozen om eventuele verschillen in productie niet veroorzaakt te laten worden door verschillen in CO₂. Dit kan er wel toe leiden dat er, ook in de referentie teelt, meer CO₂ gedoseerd gaat worden dan gebruikelijk in de praktijk.

Gewas- en teeltgegevens

Een moderne komkommertuinder plant in de regel 3 keer per jaar. Gangbare plantweken, en daarom toegepast in dit project, zijn week 50 (14 dec), week 18 (1 mei) en week 31 (1 augustus). De teeltwisseling in het voorjaar vindt plaats door tussenplantingen, waardoor de kas eigenlijk niet leeg komt te staan. De herfstteelt wordt 5 november geruimd.

Kasklimaat

Komkommers worden warm geteeld. In onderstaande tabel worden de temperatuursetpoints weergegeven. Er wordt met 2 dagdelen gewerkt. De dagtemperatuur is 1 uur na zonsopkomst en de nachttemperatuur is 1 uur na zonsondergang bereikt. Er wordt met een opstookhelling van 1°C per uur gewerkt.

datum ingang setpoint	dagtemperatuur	nachttemperatuur
14/12	21	20
01/02	20	18.5
01/05	22	21
22/05	21	18.5
29/05	20	17
01/08	22	21
22/08	21	18.5
29/08	20.5	17.5
05/11	5	5

In de koude periode van het jaar (vanaf eind september) staat de ventilatielijn ver boven de stooklijn (5 tot 6°C hoger). Er wordt daarom weinig warmte afgelucht, zodat op heldere dagen hoge etmaaltemperaturen kunnen worden behaald. Op 1 februari wordt dit terug gebracht tot 3 °C

Vanaf half april wordt de etmaaltemperatuur gedrukt door in die periode de ventilatielijn slechts 1 °C boven de stooklijn te leggen. Deze temperaturen zijn dag en nacht gelijk.

Er wordt geen minimum buistemperatuur gebruikt. De vochtregeling geschiedt met de luchtramen en indien de ruimtetemperatuur door deze ventilatie onder de setpointtemperatuur verwarmen komt, wordt er pas bijgestookt.

Er wordt ingegrepen op de luchtvochtigheid wanneer de kaslucht boven de 87% RV komt. De regelactie is beperkt, met name als het buiten koud is, namelijk 1% raamopening per % overschrijding van de RV wanneer het buiten kouder dan 5 °C is. Als het buiten warmer dan 10 °C is wordt het raam met 2% per %

overschrijding op de RV geopend.

Het setpoint voor de CO₂-concentratie in de kas is 650 ppm in de periode van 14 december tot 1 april en in de rest van het jaar (behoudens tijdens de teeltwisselingen) 750 ppm. Overigens zullen deze concentraties niet gehaald worden wanneer er serieus op temperatuur gelucht moet worden.

Er wordt een transparant beweegbaar scherm type SLS 10 ultra plus gebruikt tussen 15 oktober en 1 mei. In het koudste deel van het jaar (vanaf 14 december tot half januari) wordt dit scherm alleen geopend bij hoge stralingsniveaus (meer dan 100 W/m²) en/of buitentemperaturen boven 10°C. Vanaf 15 januari is dit 8 °C. Op 1 februari wordt het stralingscriterium verlaagd tot 40 W/m² en op 15 februari wordt de buitentemperatuur verlaagd naar 7 °C. Vanaf 15 maart gaat het scherm open als het licht is (10 W/m²) vanaf een buitentemperatuur van 6 °C. Dit wordt nog één keer verlaagd tot 5 °C op 15 april. Wanneer de RV minder dan 0.5% onder het setpoint komt wordt het scherm op een vochtier van 4% getrokken en bij blijvend te hoge RV wordt het scherm na een half uur geheel geopend. In de gevel is een beweegbaar gevelscherm geplaatst, dat gelijktijdig met het horizontale scherm geopend en gesloten wordt.

Er wordt in de referentiecasse geen temperatuurintegratie toegepast. Daarnaast wordt er ook geen gebruik gemaakt van minimumraamstanden.

Buitenklimaat

Voor de straling, buitentemperatuur en overige van belangzijnde buitenklimaatfactoren, wordt gebruik gemaakt van het SELjaar, dat representatieve klimaatgegevens voor Nederland bevat en dat de variatie in klimaateigenschappen tussen dagen en tussen uren heeft gehandhaafd.

Bijlage 2 Komkommerprijzen

In de carbonomic module wordt rekening gehouden met de prijsontwikkeling van het product en de extra kosten van arbeid, fust en veiling/afzet die ontstaan bij een toename van de productie. Hierbij wordt rekening gehouden met een faseverschuiving van een aantal weken. Immers CO₂ die vandaag gedoseerd wordt heeft effect op de toekomstige productie.

arbeid: 0,17 Euro per kg extra productie

fust: 0,025 Euro per kg extra productie

veiling: 2,75 % van de omzet

periode	prijs [euro/kg]
1	2,033
2	1,488
3	0,960
4	0,552
5	0,431
6	0,379
7	0,395
8	0,490
9	0,868
10	0,542
11	0,510
12	0,639
13	0,643

(Bron: S.C. van Woerden (red) (2005) Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw, Praktijkonderzoek Plant en Omgeving, Naaldwijk)

Bijlage 3 Arbeidsomstandigheden

Tabel 1 - Klimaatfactor op de benodigde inspanning voor arbeidshandelingen. (Hendrix, 1993)

RV (in %)	Temperatuur in °C							
	24	26	28	30	32	34	36	38
22					1,03	1,07	1,10	1,17
27				1,03	1,03	1,10	1,17	1,23
32				1,03	1,07	1,13	1,20	1,30
37			1,03	1,03	1,10	1,17	1,27	1,40
40			1,03	1,07	1,13	1,20	1,33	1,50
45			1,03	1,10	1,17	1,27	1,45	1,70
50			1,07	1,10	1,17	1,33	1,60	2,00
55		1,03	1,10	1,13	1,20	1,40	1,75	>2
60		1,03	1,10	1,17	1,23	1,50	2,00	>2
65		1,03	1,10	1,17	1,30	1,60	>2	>2
72		1,07	1,13	1,23	1,40	2,00	>2	>2
80	1,03	1,10	1,17	1,33	1,65	>2	>2	>2
90	1,07	1,17	1,27	1,50	2,00	>2	>2	>2

Door het aantal uren dat iedere combinatie van temperatuur en RV voorkomt, te vermenigvuldigen met de bijbehorende klimaatfactor voor arbeid in tabel 1, ontstaat tabel 2, waarin is berekend hoeveel uren per jaar (4400 uur arbeid per jaar mogelijk van zonop tot zononder) extra zou moeten besteden aan dezelfde arbeidshandelingen in verband met de klimaatomstandigheden. Als de warmste momenten kunnen worden ontweken door bijvoorbeeld een tropenrooster in te voeren kan de berekende extra arbeid lager uitvallen. Aan de andere kant moeten bij komkommer de meeste arbeidshandelingen juist worden verricht tijdens warme perioden.

Tabel 2- Aantal uren dat een combinatie van een bepaalde RV en kasttemperatuur voorkomt bij 7 cases.

T	RV (%)	32	37	40	45	50	55	60	65	72	80	90
24°C	referentie										269	103
	DZ_P3										160	180
	DZ_P6										162	172
	DZ_P9										161	168
	TI_B3										141	141
	TI_B6										121	127
	TI_B9										119	127
26°C	referentie						38	50	80	131	74	5
	DZ_P3						2	15	22	56	200	97
	DZ_P6								6	26	112	115
	DZ_P9								2	26	115	100
	TI_B3						16	11	24	53	152	72
	TI_B6						7	5	11	36	75	90
	TI_B9						8	10	16	31	77	69
28°C	referentie			5	14	20	11	20	26	21	5	
	DZ_P3				6	17	27	29	76	153	113	4
	DZ_P6						1	5	10	25	117	81
	DZ_P9							3	5	22	96	60
	TI_B3			2	6	17	18	21	57	123	88	3
	TI_B6			2	2	1	1	6	8	30	72	60
	TI_B9			2	2	1		7	8	25	61	53
30°C	referentie			6	8	16	3	7	4	5	1	
	DZ_P3			18	28	22	11	16	17	24	3	
	DZ_P6			1	2	9	22	16	40	136	152	21
	DZ_P9						2	2	9	33	71	67
	TI_B3			14	19	15	8	14	14	24	3	
	TI_B6			3	2	5	11	11	17	92	103	9
	TI_B9			3	2	1		6	8	32	49	45
32°C	referentie			2		1	5	3	5			
	DZ_P3			3	3	1	5	3	5			
	DZ_P6		7	19	25	19	8	13	25	31	7	
	DZ_P9				1	1	3	8	20	25	174	30
	TI_B3			2	1	1	5	3	5			
	TI_B6		3	10	20	12	6	8	17	27	6	
	TI_B9			2		1	6	5	17	7	98	18
34°C	referentie											
	DZ_P3											
	DZ_P6		1									
	DZ_P9	3	6	15	15	17	13	12	25	74		
	TI_B3											
	TI_B6		1									
	TI_B9		2	11	13	7	7	3	12	40		
36°C	referentie											
	DZ_P3											
	DZ_P6											
	DZ_P9		2	7				1				
	TI_B3											
	TI_B6											
	TI_B9		2	3				1				

Uitgaande van loonkosten van € 16,- per uur en 1,0 uur benodigde arbeid per m² per jaar en 4400 mogelijke arbeidsuren per jaar, zijn in de laatste kolom in tabel 3 de extra arbeidskosten per m² per jaar geschat. Deze schatting geldt als een indicatie. Voor een meer nauwkeurige berekening van de extra arbeidskosten in verband met klimaatomstandigheden is een intensiever arbeidsstudie nodig.

Tabel 3- Schatting van de extra benodigde arbeid en kosten veroorzaakt door werkklimaatomstandigheden bij 7 cases en de invloed hiervan op het bedrijfseconomisch resultaat.

Case	Extra uren (uur/jaar)	Extra arbeid (%)	Extra kosten (€/m ² .jaar)	Bedrijfseconomisch resultaat (excl. extra arbeid) (€/m ² .jaar)	Bedrijfseconomisch resultaat (incl. extra arbeid) (€/m ² .jaar)
referentie	59	1,3%	0,22		
DZ_P3	138	3,1%	0,50	1	0,71
DZ_P6	242	5,5%	0,88	1,66	1,00
DZ_P9	430	9,8%	1,56	1,87	0,52
TI_B3	110	2,5%	0,40	0,43	0,24
TI_B6	169	3,8%	0,62	0,29	-0,11
TI_B9	268	6,1%	0,98	0,68	-0,08