

Relatie tussen toenemende kashoogte en het energieverbruik in de glastuinbouw

J.B. Campen
J. Bontsema
M. Ruijs

Rapport nr.



landbouw, natuur en
voedselkwaliteit

Productschap



Tuinbouw

Voor een bloeiende zaak

© 2007 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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

Exemplaren van dit rapport kunnen bij de (eerste) auteur worden besteld. Bij toezending wordt een factuur toegevoegd; de kosten (incl. verzend- en administratiekosten) bedragen € 50 per exemplaar.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 00
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Tuinder's samenvatting

Nieuwbouwkassen worden gemiddeld elk jaar zo'n 10 cm hoger (Staalduinen, 2005). Volgens Staalduinen is een poothoogte van 5 tot 5.5 m gebruikelijk, maar bij tomaat en komkommer lijkt 6 m of meer de nieuwe standaard. Zelfs hoogten van 7 m worden genoemd, hoogte lijkt alleen te worden beperkt door vergunningverlening. Ook bestaande kassen worden opgehoogd (Arkesteijn, 2006). Het toenemende gebruik van groeilicht en (meerdere) schermen lijkt de voornaamste reden voor de toenemende hoogte van kassen. Voor een optimale benutting van het licht en een goede verspreiding van het licht moeten de lampen niet te dicht bij het gewas hangen (Spaargaren, 2000). Een afstand van minimaal 2 meter wordt geadviseerd (Philips, 1993). Door toepassing van schermen verklein je de kasruimte en dus bufferruimte, om dit te pareren moet de kas hoger zijn. Belichten en schermen vergt een ruime afstand tussen lampen en scherm in verband met brandgevaar, dus een verhoging van de kas. Ook bij het geconditioneerd telen is er de wens tot een groter buffer boven het gewas en daardoor een grotere kashoogte. Dit geldt voor de systemen waar lucht wordt geconditioneerd met luchtbehandelingkasten maar ook voor de systemen waar met verneveling wordt gewerkt. Om natslag van het gewas te voorkomen moet de vernevelinstallatie hoog genoeg boven het gewas worden geplaatst.

Naast deze technische redenen worden ook andere voordelen toegekend aan een hogere kas. Een hogere zou zorgen voor een stabielere klimaat en een kleinere temperatuur gradiënt in de verticale richting. Recent verscheen er nog een interview (Visser, 2006) met tuinder Pieter van Gog die zijn nieuwe kas 12 meter hoog wil bouwen. Pieter beweert dat er in een hoge kas een opgaande luchtstroom van warme lucht ontstaat die zorgt voor de afkoeling. Verder beweert hij dat elke extra meter dat de kas hoger wordt, het CO₂ met 50 dpm stijgt bij het gewas. Deze beweringen zijn niet op metingen of berekeningen gebaseerd.

Een hogere kas heeft ook een aantal nadelen. De kasconstructie moet zwaarder worden uitgevoerd om de windlasten te kunnen opvangen. Een zwaardere constructie zorgt voor lichtverlies. Daarnaast is het geveloppervlak van een hogere kas groter wat zorgt voor meer energieverlies door de gevel. Een ander nadeel kan zijn dat verhoging van de kas leidt tot een slechtere horizontale temperatuurverdeling. Slechte horizontale temperatuurverdeling is een bron van zorg voor tuinders (van Os et al., 2006).

Wageningen UR Glastuinbouw heeft in opdracht van het ministerie van LNV en Productschap Tuinbouw de effecten van het verhogen van de kas op het energieverbruik en het klimaat in de kas berekend. De resultaten van deze studie worden gegeven door een waardeoordeel aan verschillende stellingen te geven.

Een hogere kas zorgt voor meer energieverbruik

Waar. De toename is gerelateerd aan de relatieve toename van het geveloppervlak maar ook nemen de verliezen door het dek toe. Bij een verhoging van 4 meter naar 8 meter neemt het energieverbruik met 10% toe naar 12 meter zelfs met meer dan 15%. Dit effect is te verminderen door gevelisolatie en het gebruik van schermen. Een hoge kas met een energiescherm en de

bijbehorende gevelschermen heeft nagenoeg hetzelfde energieverbruik als een lage kas met een energiescherm en gevelschermen.

Hoge kassen houden CO₂ meer in de kas

Niet waar. CO₂ is weliswaar een zwaar gas maar in de lucht mengt dit gas zich op waardoor de concentratie wordt bepaald door de luchtstroom in de kas. Daar waar de lucht de kas binnenkomt, is de CO₂ concentratie laag en waar hij de kas weer verlaat is de concentratie hoog. Ten gevolge hiervan vliegt de CO₂ in een hoge kas net zo eenvoudig het raam uit als in een lage kas.

“The sky is the limit” voor de hoogte van de kas

Niet waar. De energieverliezen via de gevels en het dek zullen te groot worden als de kassen hoger worden. Daarnaast zal de constructie van de kas ook te zwaar worden wat tot lichtverlies leidt en te hoge investeringskosten. Tenslotte zal het maatschappelijk niet verantwoord zijn zeer hoge kassen te bouwen.

Hoge kassen ventileren beter.

Waar. De lucht heeft in een hoge kas meer ruimte om te bewegen waardoor de luchtstroming door de kas van luchtraam naar luchtraam beter gaat. Met minder raamopening kan er daardoor bij een hoge kas even veel worden geventileerd als bij een lage kas.

Er is minder ventilatie nodig voor de koeling van de kas.

Niet waar. De gedachte dat in een hoge kas de warmte bovenin gaat zitten en dat daarmee bij dezelfde ventilatievoud meer warmte wordt afgevoerd door het grotere temperatuurverschil tussen de buitenlucht en de kaslucht is niet juist. In de kas ontstaat een horizontale temperatuurgradiënt en nauwelijks een verticale temperatuurgradiënt welke voor dit principe nodig zou zijn. Daarnaast wordt de warmte van de zon voor het grootste gedeelte afgegeven bij het gewas en niet bovenin de kas.

Hogere kas zorgt voor een stabiel en homogener klimaat

Niet waar. Er is geen verschil in stabiliteit voor het klimaat voor een hoge of een lage kas. De temperatuurverdeling in de kas wordt voor een groot deel door toeval bepaald en is daarmee ook zeer onstabiel. Temperatuurverschillen zijn zowel bij de hoge als de lage kas aanwezig en worden bepaald door het temperatuurverschil tussen de buitenlucht en de kaslucht (Campen and Gelder, 2007). De luchtcirculaties in de hoge kas zijn groter waardoor de temperatuurgradiënt kleiner is maar het verschil tussen de maximum- en minimumtemperatuur is vrijwel onafhankelijk van de kashoogte.

Een hogere kas is beter voor bij de toepassing van schermen, belichting en verneveling

Waar. De extra ruimte in de kas zorgt voor een beter klimaat bij gebruik van deze verschillende technische installaties. Deze reden is ook de voornaamste reden waarom tuinders een hogere kas willen.

Kortom een aantal beweringen welke over een hogere kas worden gedaan zijn niet juist. Een hogere kas is zeker nuttig indien schermen en/of belichting en/of verneveling worden toegepast waarbij het energiescherm en gevelscherm ervoor moet zorgen dat het energieverbruik niet drastisch toeneemt. De meerwaarde van extreem hoge kassen (> 8 meter) lijkt er niet te zijn.

Inhoudsopgave

Tuinder's samenvatting	3
1 Inleiding	7
1.1 Doelstelling	7
2 Relatie kashoogte en energieverbruik op komkommer- en paprikabedrijven	8
2.1 Energieverbruik en kashoogte bij komkommer	8
2.2 Energieverbruik en kashoogte bij paprika	8
2.3 Discussie	9
3 Methoden	10
4 Resultaten	11
4.1 Invloed kashoogte op energiegebruik	11
4.2 Invloed kashoogte op kasklimaat	20
4.3 Belichting	27
4.4 Bevochtiging	29
5 Conclusies en discussie	31
Literatuur	33

1 Inleiding

Nieuwbouwkassen worden gemiddeld elk jaar zo'n 10 cm hoger (Staalduinen, 2005). Volgens (Staalduinen, 2005) is een poothoogte van 5 tot 5.5 m gebruikelijk, maar bij tomaat en komkommer lijkt 6 m of meer de nieuwe standaard. Zelfs hoogten van 7 m worden genoemd, hoogte lijkt alleen te worden beperkt door vergunningverlening. Ook bestaande kassen worden opgehoogd (Arkesteijn, 2006). Het toenemend gebruik van groeilicht en (meerdere) schermen lijkt de voornaamste reden voor de toenemende hoogte van kassen. Voor een optimale benutting van het licht en een goede verspreiding van het licht moeten de lampen niet te dichtbij het gewas hangen (Spaargaren, 2000). Een afstand van minimaal 2 meter wordt geadviseerd (Philips, 1993). Toepassing van schermen verkleint je kasruimte en dus bufferruimte, om dit te pareren moet de kas hoger zijn. Belichten en schermen vergt een ruime afstand tussen lampen en scherm in verband met brandgevaar, dus een grote kashoogte. Daarnaast worden redenen genoemd als dubbele teeltlagen en multifunctioneel ruimtegebruik. Ook een stabiel klimaat en een kleinere temperatuur gradiënt in de verticale richting worden als een voordeel genoemd. Ook bij het geconditioneerd telen (voor het koelen van de kop van het gewas) is er de wens tot een groter buffer boven het gewas en daardoor een grotere kashoogte. Een hogere kas heeft een groter geveloppervlak en zal daardoor meer energie door de gevel verliezen dan een gemiddelde kas. Een ander nadeel kan zijn dat verhoging van de kas leidt tot een slechtere horizontale temperatuurverdeling. Slechte horizontale temperatuurverdeling is een bron van zorg voor tuinders (van Os et al., 2006). Recent verscheen er nog een interview (Visser, 2006) met tuinder Pieter van Gog die zijn nieuwe kas 12 meter hoog wil bouwen. Pieter beweert dat er in een hoge kas een opgaande luchtstroom van warme lucht ontstaat die zorgt voor de afkoeling. Verder beweert hij dat elke extra meter dat de kas hoger wordt, het CO₂ met 50 dpm stijgt bij het gewas. De vraag is wat de relatie is tussen toenemende kashoogte en (toenemend) energieverbruik. Daarnaast wordt verwacht dat toenemende hoogte een negatieve invloed heeft op de homogeniteit van het klimaat (temperatuur), vooral in de horizontale richting.

1.1 Doelstelling

Dit project beoogt een antwoord te geven op de vraag wat de invloed is van toenemende kashoogte op het energieverbruik in de glastuinbouw en op de homogeniteit van de kastemperatuur.

Technische en teeltkundige doelstellingen

Het project geeft het verband tussen kashoogte en inhomogeniteit van het klimaat in de kas, afhankelijk van type gewas of gewashoogte.

Energiedoelstellingen

Het project geeft het verband tussen kashoogte en energieverlies. Bepaling van een mogelijk omslagpunt m.b.t. de hoogte.

2 Relatie kashoogte en energieverbruik op komkommer- en paprikabedrijven

In het kader van het project is op basis van cijfers uit het BedrijvenInformatieNet van het LEI (BIN) nagegaan of een relatie kan worden gevonden tussen het energieverbruik en de kashoogte.

De kashoogte is in het BIN vastgelegd als de nokhoogte en de poothoogte. Het totale energieverbruik is uitgedrukt in gigajoule per eenheid kasoppervlak.

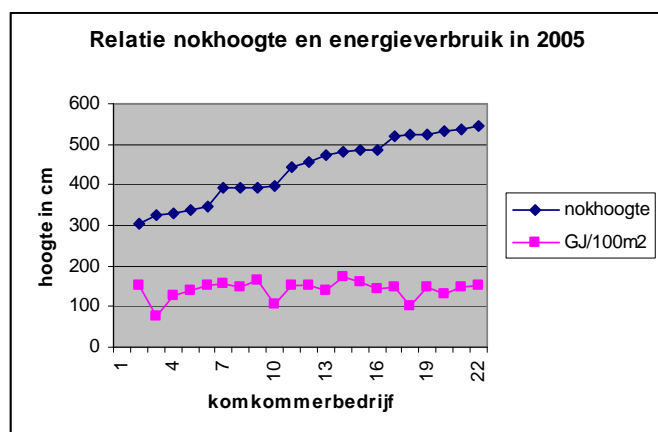
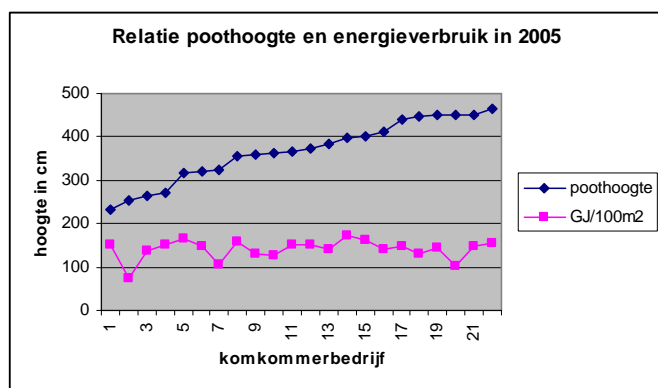
De exercitie is uitgevoerd voor de komkommer- en paprikabedrijven in het jaar 2005.

De bedrijven binnen een bedrijfstype kunnen tot op zekere hoogte als vergelijkbaar worden gezien uit oogpunt van energievoorziening, energiebesparende maatregelen en klimaatregiem

In onderstaande figuren is de relatie weergegeven tussen enerzijds de nokhoogte en de poothoogte en anderzijds het energieverbruik.

2.1 Energieverbruik en kashoogte bij komkommer

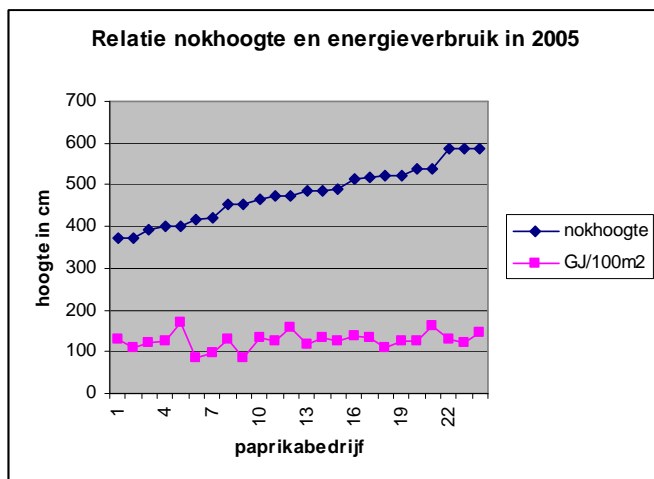
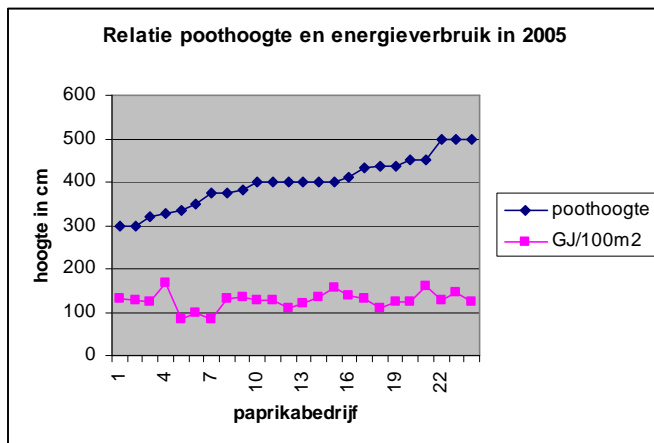
De waarnemingen hebben betrekking op 22 komkommerbedrijven.



Uit bovenstaande figuren blijkt dat het energieverbruik (GJ/100m²) geen verband lijkt te houden met een toenemende nokhoogte of poothoogte. Dit terwijl de poothoogte bijna verdubbeld.

2.2 Energieverbruik en kashoogte bij paprika

De waarnemingen hebben betrekking op 24 paprikabedrijven.



Bij paprika wordt net zoals bij komkommer nauwelijks of geen verband gevonden tussen enerzijds de pothoogte en de nokhoogte en anderzijds het energieverbruik.

2.3 Discussie

Het bovenstaande wil niet zeggen dat er geen causaal verband zou kunnen bestaan tussen kashoogte en energieverbruik. De grotere kashoogtes komen eerder bij kassen voor van jongere leeftijd, die zeer waarschijnlijk minder lekverliezen hebben. Daarnaast zijn de nieuwe kassen vaak groter qua oppervlak waardoor de invloed van de hogere gevel wordt gecompenseerd. In hoeverre de isolatiegraad van energieschermen en de omvang van de warmtebuffers een rol spelen is op basis van deze cijfers niet aan te geven.

3 Methoden

Het klimaat in de kas wordt met computational fluid dynamics (CFD) gesimuleerd. Dit is een rekenmethode waarmee de luchtstroming en de temperatuurverschillen in een ruimte kunnen worden bepaald op basis van de ingegeven randvoorwaarden. Er zijn reeds verschillende projecten uitgevoerd waarbij gebruik wordt gemaakt van deze techniek (bv. Betere temperatuurverdeling door regelbare gevelverwarming PT11456 te downloaden op www.tuinbouw.nl).

De computational fluid dynamics (CFD) berekeningen zijn twee dimensionaal uitgevoerd. Dit houdt in de kas oneindig lang wordt beschouwd in de richting van de nok. Een drie dimensionaal model maken van de kas is niet haalbaar omdat deze berekeningen teveel tijd kosten. De vragen die moeten worden beantwoord kunnen even goed met twee dimensionale berekeningen worden beantwoord als drie dimensionale. De breedte van de kas in het model is 200 m.

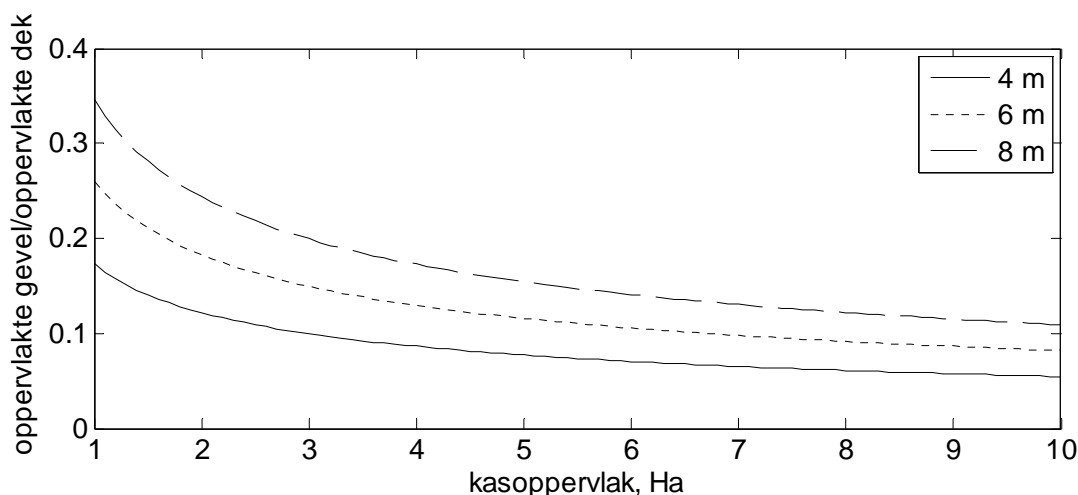
Het effect van de kashoogte op het energieverbruik wordt bepaald door een berekening met een lage kas met een goothoogte van 4 m, een hoge kas met een goothoogte van 8 m, en een extreem hoge kas met een goothoogte van 12 m waarbij dezelfde randvoorwaarden worden gebruikt. Er wordt uitgegaan van een omgevingstemperatuur van 5°C en -5°C en de gemiddelde temperatuur van de lucht rond het gewas wordt op 20°C gehouden. De gevels zijn hierbij volledig geïsoleerd. In praktijk wordt het warmteverlies door de gevels gecompenseerd door een gevelschem of gevelverwarming. Het extra warmteverlies van de gevels bij de hogere kas kan worden afgeleid uit het geveloppervlak t.o.v. het dekoppervlak. Voor de lente en herfst situatie wordt uitgegaan van een buitentemperatuur van 15°C en een globale straling van 200 W m². Voor de zomersituatie, waarin wordt gekeken naar het effect van bevochtiging op het klimaat, wordt met een buitentemperatuur van 20°C gerekend. De weerstand van het gewas en de kasconstructie in de kas zijn in het model meegenomen. De weerstand van het gewas is vergelijkbaar met die van een tomatengewas welke op hangende goten wordt geteeld.

Voor de berekeningen wordt een windprofiel ingegeven waarbij de windsnelheid op een hoogte van 10 m 4 ms⁻¹ is.

4 Resultaten

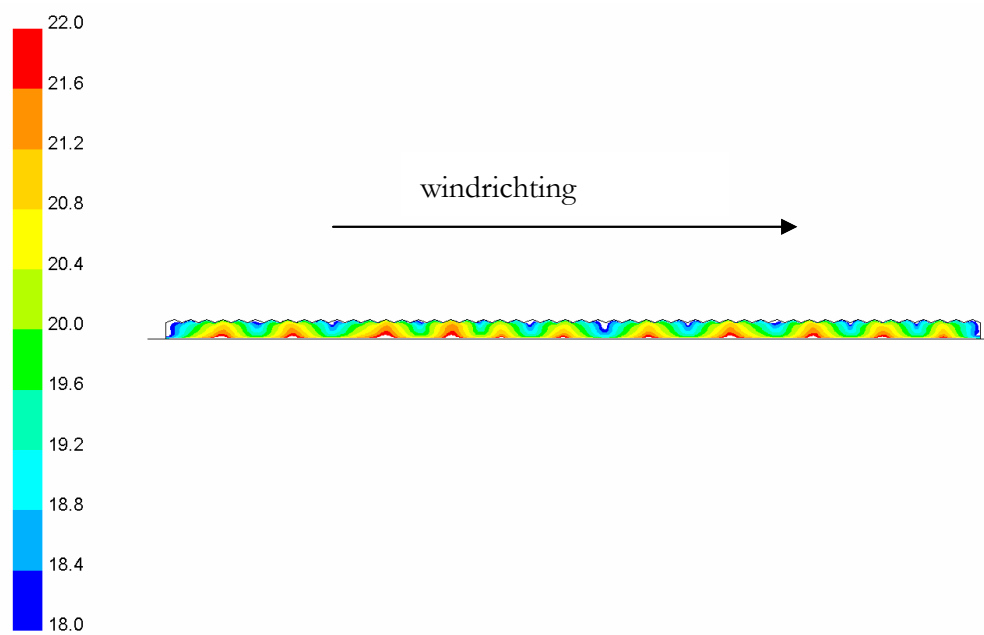
De resultaten van de CFD berekeningen worden grafisch weergegeven. De schaalverdeling voor de CFD berekeningen bevindt zich aan de linkerkant van het figuur. Waardes die zich niet in deze schaal bevinden worden niet weergegeven, indien de waarde hoger is dan in de schaal weergegeven dan wordt dit gebied begrensd door een rood gebied en bij lagere waardes door een blauw gebied.

4.1 Invloed kashoogte op energiegebruik



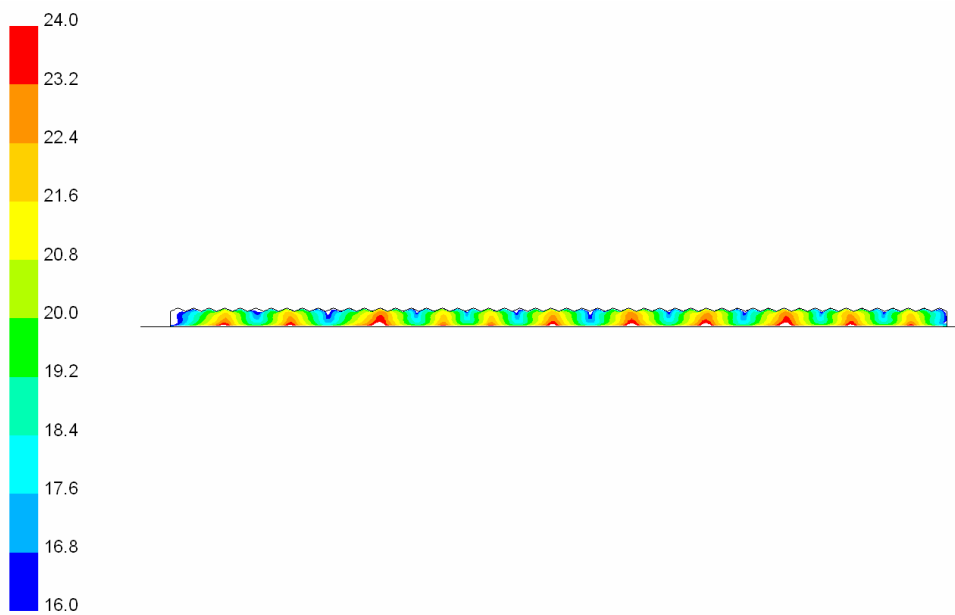
Figuur 1 Relatie tussen het oppervlak van de gevel tot het kasdek als functie van het totale kasoppervlak voor verschillende goothoogtes uitgaande van een vierkante kas met een dekhelling van 22 graden

Bovenstaand figuur laat de relatie tussen de verhouding geveloppervlak en dek ten opzicht van het kasoppervlak. De invloed van de gevel op het totale buitenoppervlak neemt af naarmate de kas groter wordt. Bij een kas van 10 hectare met een goothoogte van 6 m vormt het geveloppervlak minder dan 8% van het totale buitenoppervlak. Nieuwe glastuinbouw bedrijven zijn vaak groter dan 3 Ha. (Anonymous, 2005). Het geveloppervlak is ook bij grote kas nog een aanzienlijk deel van het totale buitenoppervlak en dit wordt evenredig groter met de goothoogte. Een kas met een goothoogte van 8 meter heeft dubbel zoveel warmteverlies aan de gevel als een kas met een goothoogte van 4 met hetzelfde kasoppervlak. Vaak worden gevels beter geïsoleerd dan het kasdek. De gevel aan de noordzijde van de kas wordt vaak extra geïsoleerd aangezien hier geen direct zonlicht doorkomt. De extra verwarmingsbehoefte aan de gevel wordt in de praktijk gecompenseerd door meer verwarmingsbuizen.



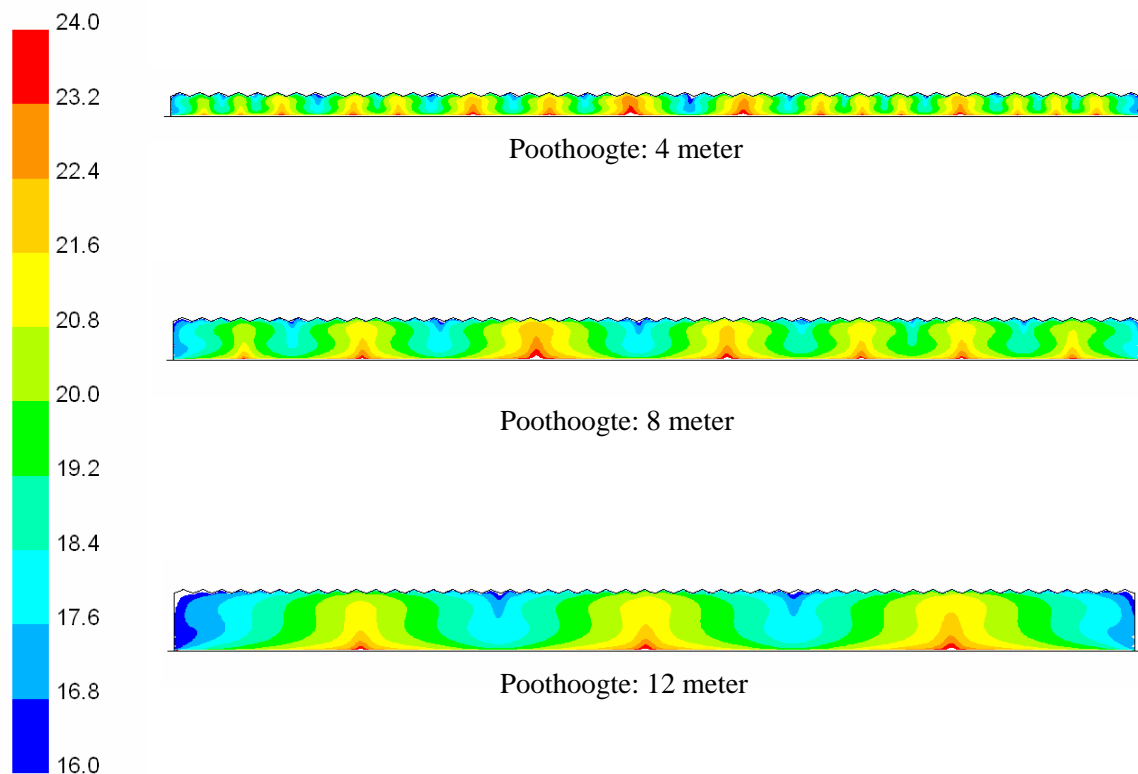
Figuur 2 Temperatuurprofiel bij een kas met een goothoogte van 4 m bij windsnelheid van 4 m s^{-1} loodrecht op de goot en een buitentemperatuur van 5°C .

Bovenstaand figuur laat het temperatuurprofiel zien in een verticaal vlak in de kas. Het temperatuurprofiel wordt bepaald door luchtcirculaties in de kas. Warme lucht stijgt op, verliest warmte aan het kasdek en komt op een andere plek weer naar beneden. De warme en koude plekken in de kas zoals in de figuur aangegeven ontstaan toevallig. Als de berekening wordt herhaald met een kleine verandering van bijvoorbeeld de luchtsnelheid op een bepaalde positie, zullen deze plekken zich op andere plaatsen in de kas bevinden. In de tijd verandert dit temperatuurprofiel continu zodat de gemiddelde temperatuur over lange tijd over de kas niet veel verschilt. Het warmteverlies door het dek bij de gegeven condities is voor een kashoogte van 4 m 55 Wm^{-2} .



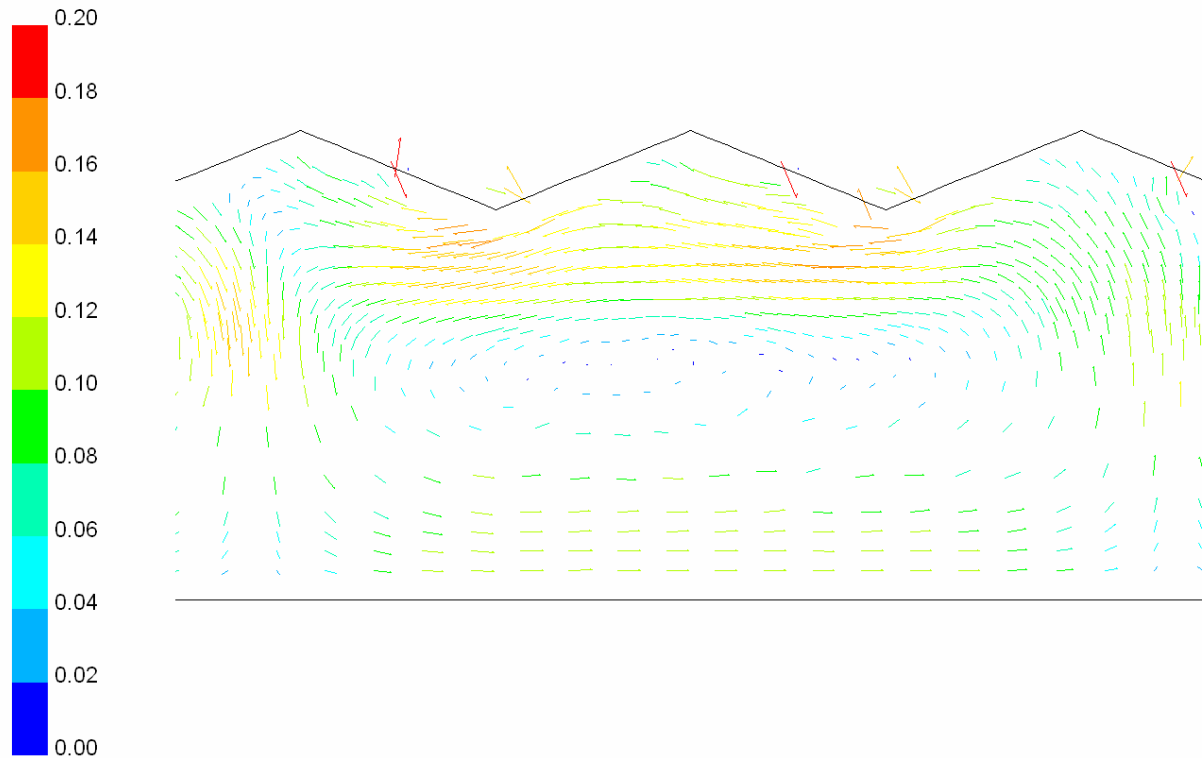
Figuur 3 Temperatuurprofiel bij een kas met een goothoogte van 4 m bij windsnelheid van 4 m s^{-1} loodrecht op de goot en een buitentemperatuur van -10°C .

Indien de buitentemperatuur verder daalt, nemen de temperatuurverschillen in de kas toe zoals in bovenstaande figuur te zien is waarbij de temperatuurschaal is aangepast.



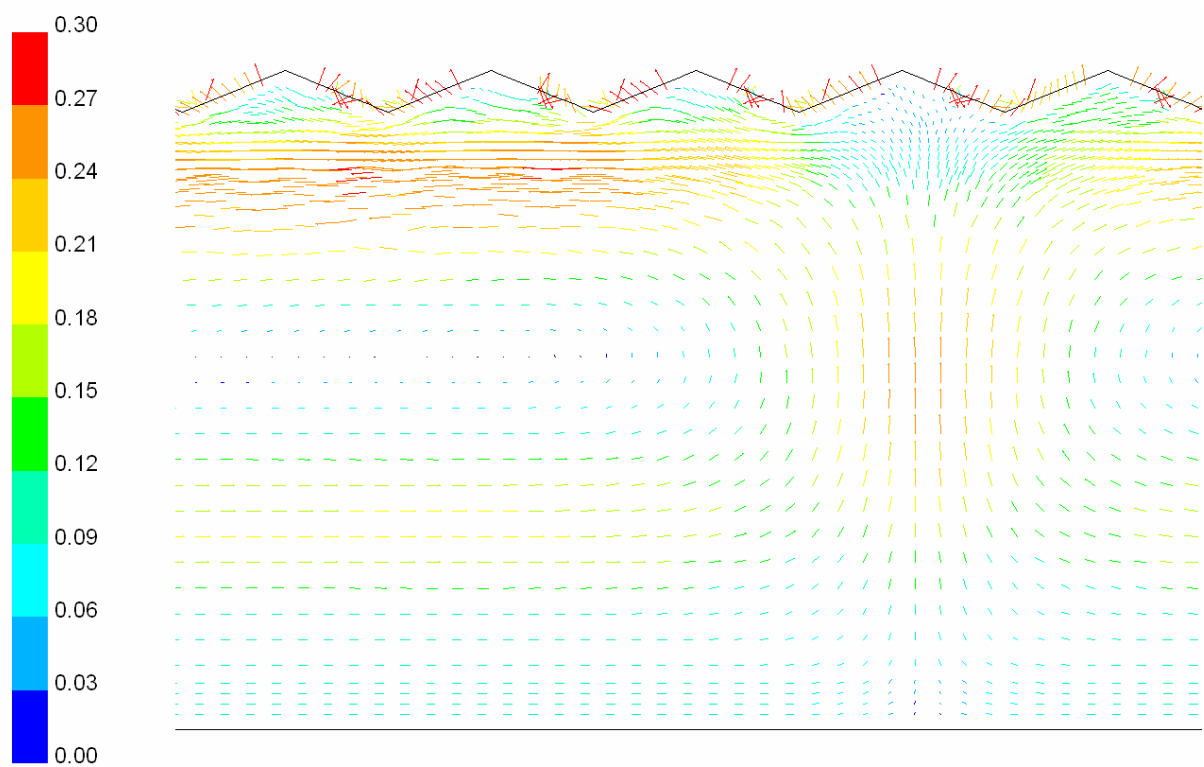
Figuur 4 Temperatuurverdeling voor drie verschillende poothoogtes bij een buitentemperatuur van -5°C en een windsnelheid van 4ms^{-1}

Bij een hogere kas kunnen de luchtcirculaties groter worden omdat er meer ruimte is. Dit is duidelijk te zien in bovenstaande figuur. Dit effect en het feit dat de windsnelheid toeneemt met de hoogte zorgen ervoor dat de hoge kassen meer energie gebruiken. De 8 meter hoge kas verbruikt ongeveer 10% meer energie dan de lage kas en de 12 meter hoge kas verbruikt meer dan 15% meer dan de 4 meter hoge kas.



Figuur 5 Snelheidsvectoren in een kas met een goothoogte van 4 meter met een buitentemperatuur van -5°C en 4 ms^{-1} windsnelheid

Bovenstaande figuur laat de snelheidsvectoren zien in de lage kas. De luchtsnelheid nabij het dek is ongeveer 15 cm/s.

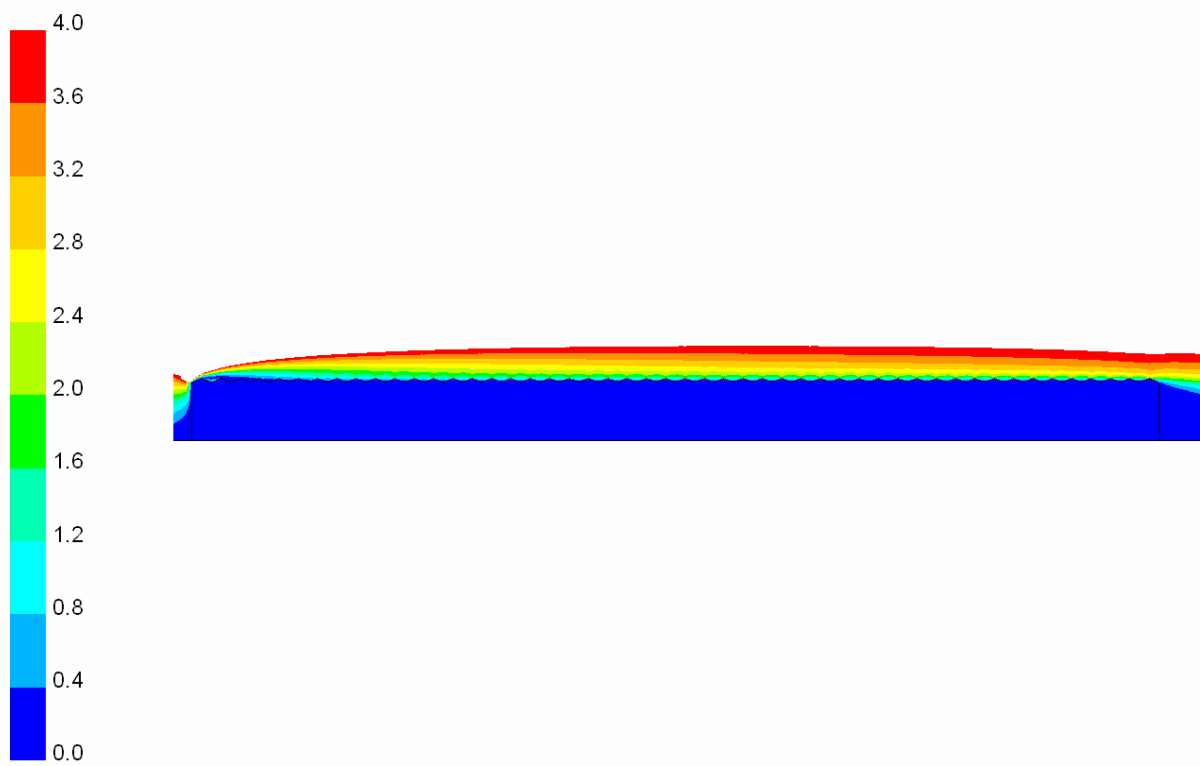


Figuur 6 Snelheidsvectoren in een kas met een goothoogte van 12 meter met een buitentemperatuur van -5°C en 4 ms^{-1} windsnelheid

Voor een kas met een goothoogte van 12 m is de luchtsnelheid nabij het dek meer dan 25 cm/s . Een hogere luchtsnelheid zorgt ervoor dat de warmteoverdracht aan het dek ook groter is waardoor een hoge kas meer warmteverlies heeft.

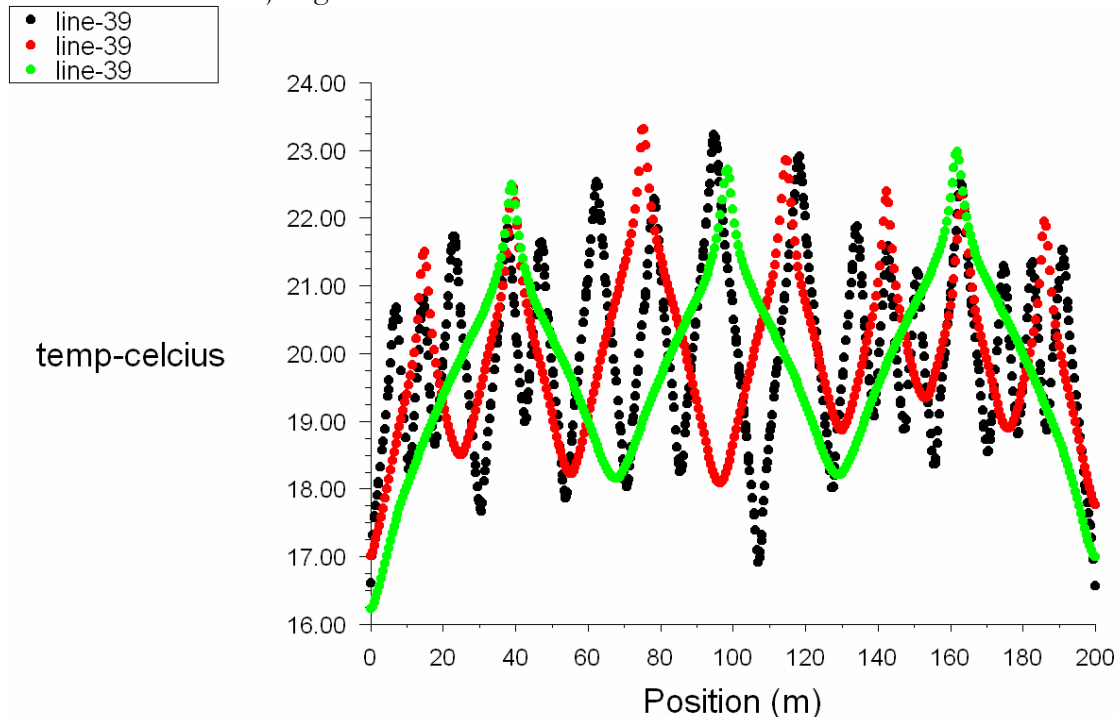


Figuur 7 Luchtsnelheid rond de kas met een poothoogte van 4 meter bij een windsnelheid van 4 m s^{-1}



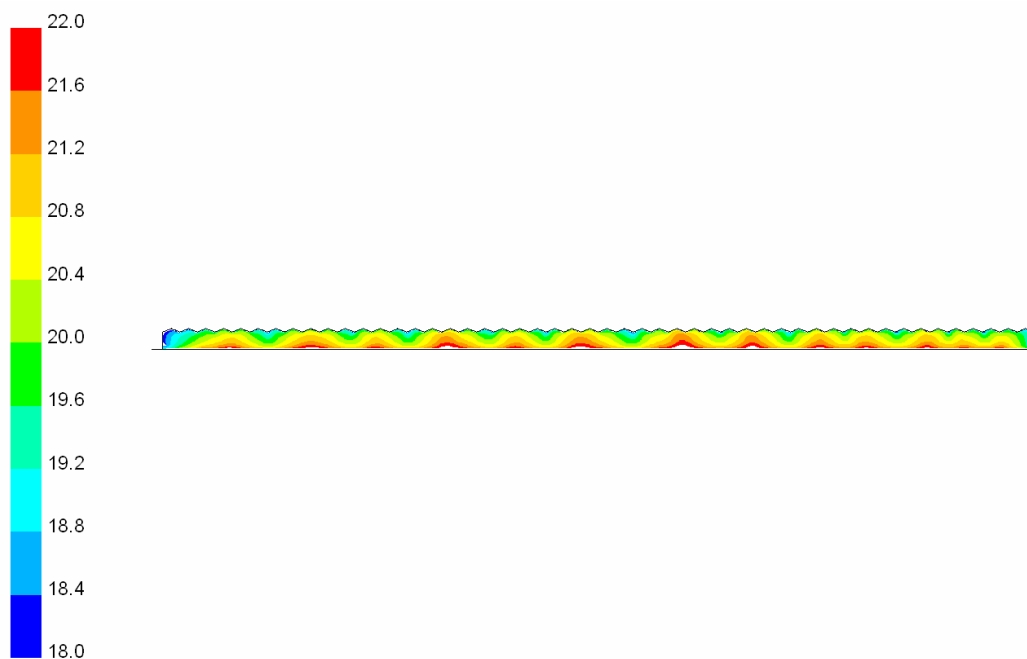
Figuur 8 Luchtsnelheid rond de kas met een poothoogte van 12 meter bij een windsnelheid van 4 m s^{-1}

Bovenstaande figuren laten de windsnelheid rond de kas zien. De schaal van de windsnelheid is begrensd op 4 ms^{-1} . De grenslaag is bij de hoge kas minder groot als bij de lage. De luchtsnelheid neemt dus sneller toe vanaf het dek omhoog als de kas hoger is. Dit zorgt voor meer warmteoverdracht bij hogere kassen.

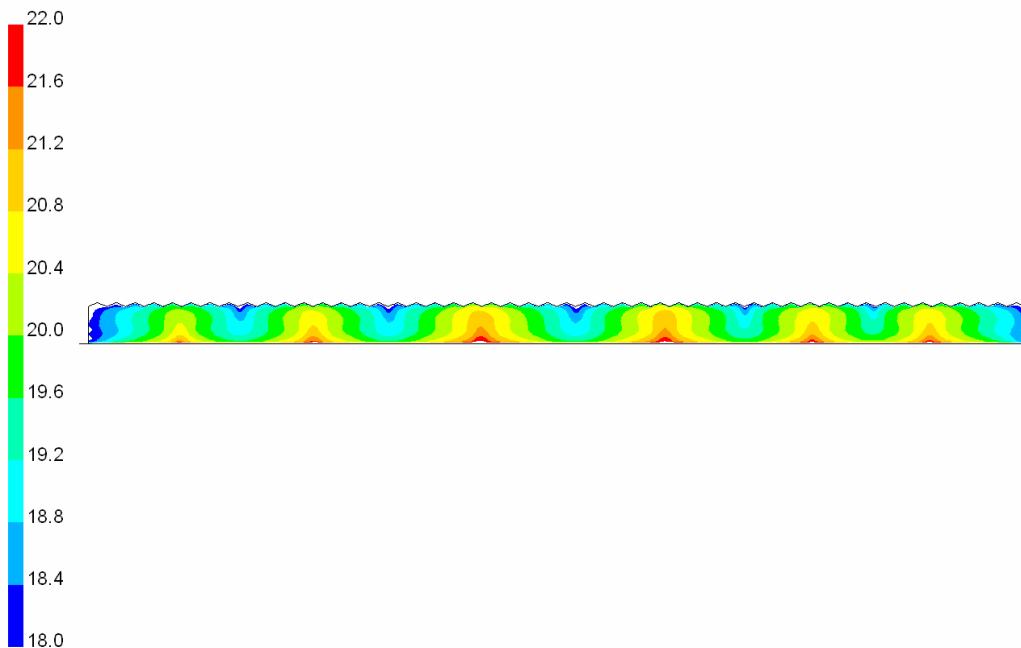


Figuur 9 Temperatuur op een hoogte van 2 meter in de kas met een goothoogte van 4 m (zwart), 8 m (rood) en 12 m (groen) bij een buitentemperatuur van -5°C

Bovenstaande figuur laat het temperatuurverloop op een hoogte van 2 meter in de kas zien. De temperatuurverschillen voor de kashoogtes zijn nagenoeg gelijk op gewasniveau. De fluctuaties zijn alleen minder voor de hoge kas en daarmee zijn de gradiënten minder groot.



Figuur 10 Temperatuurprofiel bij een kas met een goothoogte van 4 m bij windsnelheid van 4 m s^{-1} loodrecht op de goot en een buitentemperatuur van 5°C in een kas waarbij er geen gewas aanwezig is.

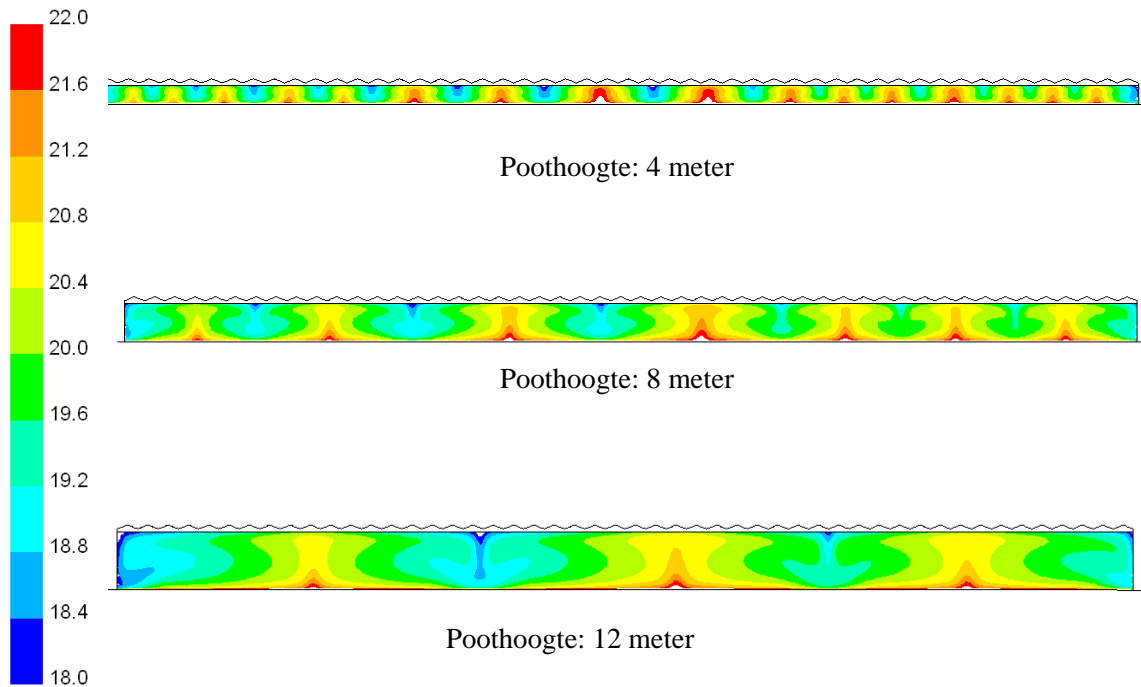


Figuur 11 Temperatuurprofiel bij een kas met een goothoogte van 8 m bij windsnelheid van 4 m s^{-1} loodrecht op de goot en een buitentemperatuur van 5°C in een kas waarbij er geen gewas aanwezig is.

De recirculaties worden niet groter en de temperatuurverschillen blijven in dezelfde orde van grootte als er geen gewas of een klein gewas in de kas staat. Bij een groot gewas is de warmteoverdracht kleiner dan een klein gewas. De luchtsnelheid in de kas wordt geremd door het gewas waardoor de warmteoverdracht kleiner wordt. Dit effect is groter bij een lage kas als een

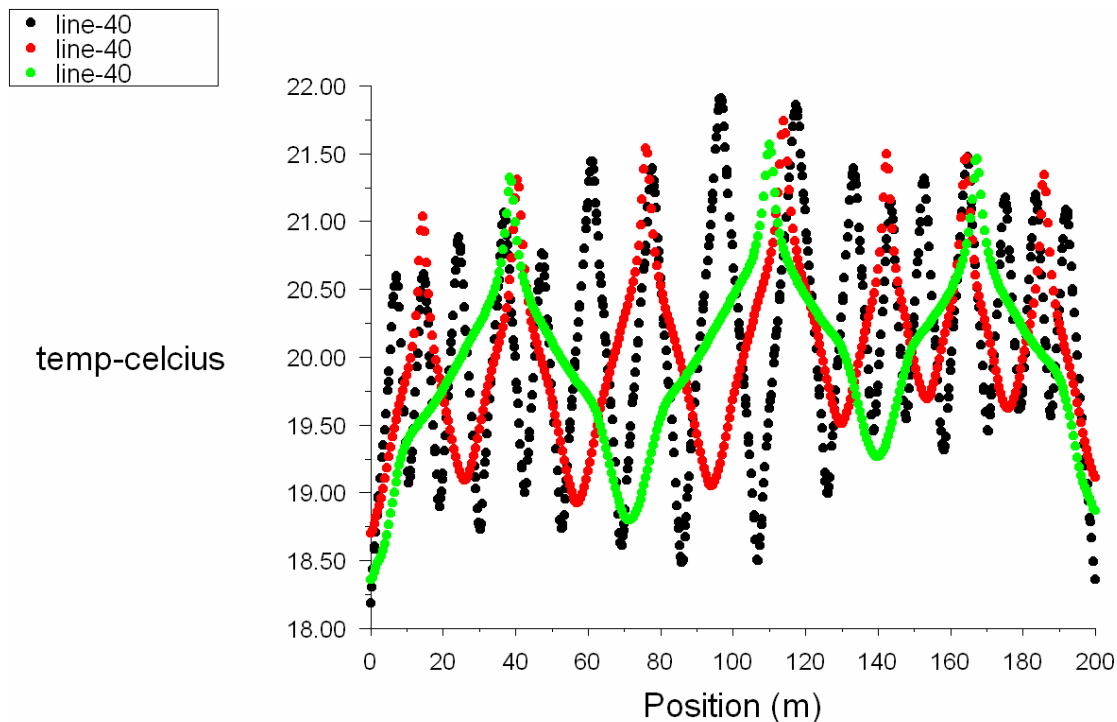
hoge kas door de relatieve invloed van het gewas. Bij een lage kas is de invloed maximaal 5% en bij een hoge kas (12 meter poothoogte) maximaal 2.5%.

Vaak wordt er bij lage buitentemperaturen een energiescherm gebruikt om het energieverbruik te verminderen. Een energiescherm heeft ook een positief effect op het temperatuurprofiel in de kas zoals uit onderstaande figuur is op te maken.



Figuur 12 Temperatuurprofiel bij een kas met een goothoogte van 4m bij windsnelheid van 4 m s^{-1} loodrecht op de goot met een scherm nabij de tralie en een buitentemperatuur van -5°C

Door het energiescherm blijven de temperatuurverschillen ter hoogte van het gewas veel geringer als wanneer er geen scherm wordt gebruikt. Het energieverbruik daalt door toepassing van een volledig gesloten scherm met meer dan 60%. Energieverbruik is voor de verschillende poothoogtes gelijk als er een energiescherm wordt gebruikt. De warmteoverdracht tussen het scherm en het dek heeft de grootste weerstand en bepaald daardoor het energieverlies van de kas. Deze warmteoverdracht is nagenoeg gelijk voor de verschillende poothoogtes aangezien de ruimte tussen het scherm en het dek gelijk is.



Figuur 13 Temperatuur op een hoogte van 2 meter in de kas met een goothoogte van 4 m (zwart), 8 m (rood) en 12 m (groen) bij gebruik van een energiescherm

Het verschil tussen de maximum- en minimumtemperatuur in de kas is iets kleiner bij een hoge kas, door het gebruik van het scherm is het verschil ongeveer 50% kleiner geworden.

Plaatsing van het scherm op dezelfde hoogte als bij een lage kas heeft geen positief effect op de temperatuurverdeling, door de grote ruimte boven het scherm ontstaan hier nu ook luchtcirculaties. Dit zal in de praktijk ook niet gebeuren omdat bij een hoge kas ook gekozen wordt voor een hoge teelt. Er moet wel meer lucht worden verwarmd als het scherm hoger in de kas hangt maar dit is minimaal omdat de warmtecapaciteit van de lucht zeer gering is namelijk $1200 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$, wat in het niet valt bij de energie die nodig is om de kas op temperatuur te houden.

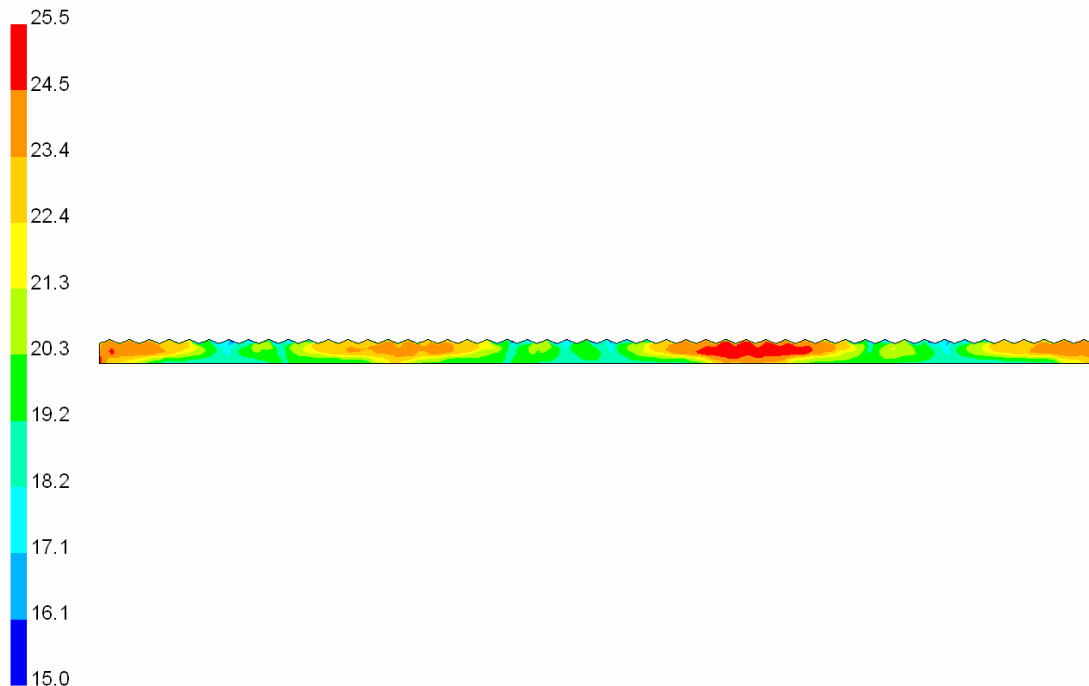
Conclusie

Een hogere kas heeft een groter energieverlies door het dek en door de gevels. De luchtcirculaties zijn groter in een hoge kas maar het verschil tussen de maximale en minimale luchttemperatuur is gelijk. Een scherm zorgt ervoor dat de temperatuurverschillen bij het gewas kleiner worden en het energieverbruik met meer dan 60% afneemt. Bij gebruik van een scherm is het energieverbruik voor lage en hoge kassen nagenoeg gelijk.

4.2 Invloed kashoogte op kasklimaat

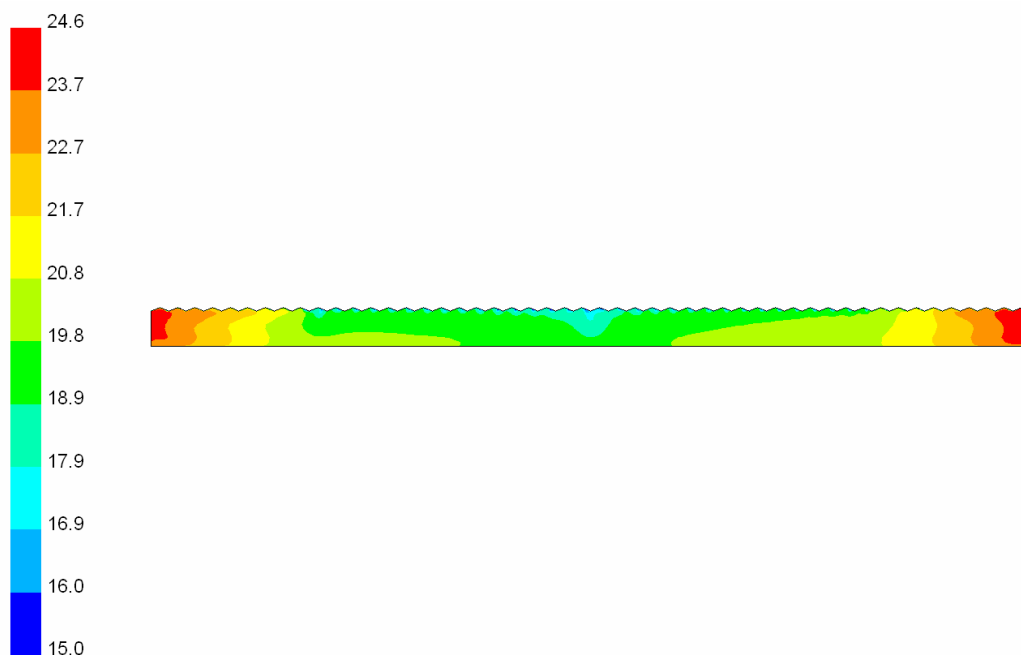
Een belangrijke reden om de kas te verhogen voor tuinders is dat er daardoor een stabielere klimaat wordt gerealiseerd. De hoeveelheid lucht wordt groter zodat variaties in de hoeveelheid ventilatie meer worden uitgevlakt. De ramen worden hierdoor minder vaak aangestuurd en mogelijk ook de verwarming. Deze reden is overigens gebaseerd op gevoel en niet op een gedegen onderzoek.

De temperatuurverschillen in de kas tijdens het ventileren zijn afhankelijk van de verschiltemperatuur tussen de buitenlucht en de kaslucht. De kasluchttemperatuur wordt bepaald door de warmteproductie in de kas, door zonne-instraling of de verwarming. De koudste temperatuur in de kas is gelijk aan de temperatuur van de buitenlucht waar deze de kas instroomt. Deze lucht mengt snel op met de kaslucht. Daar waar de lucht de kas weer verlaat worden de warmste temperaturen gemeten. De hoeveelheid ventilatie hangt ook af van het temperatuurverschil tussen de kaslucht en de buitenlucht en de wind. Bij windsnelheden boven de 2 m/s is de drijvende kracht van de wind dominant voor de ventilatie.



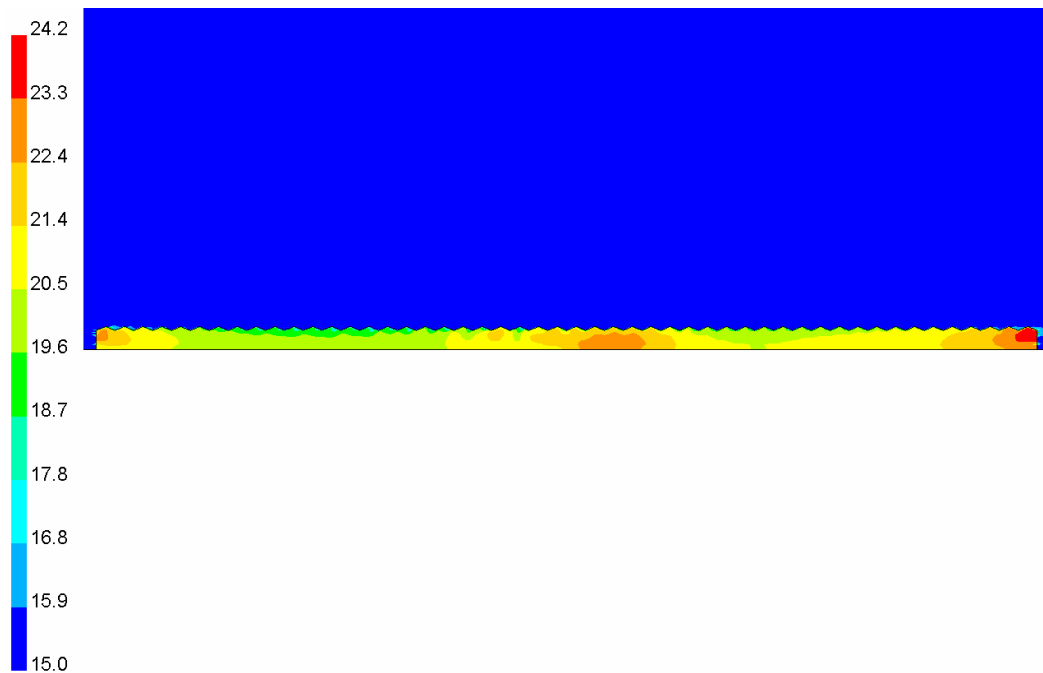
Figuur 14 Temperatuurprofiel in de kas met een goothoogte van 4 m als de ramen zijn geopend voor 2.5% en een buitentemperatuur van 15°C bij een globale straling van 200 W/m² voor een windstille situatie

Bovenstaande figuur laat het temperatuurprofiel in een kas zien voor de situatie, dat het windstil is. Duidelijk is te zien dat de buitenlucht op verschillende plekken de kas in- en uitstroomt.



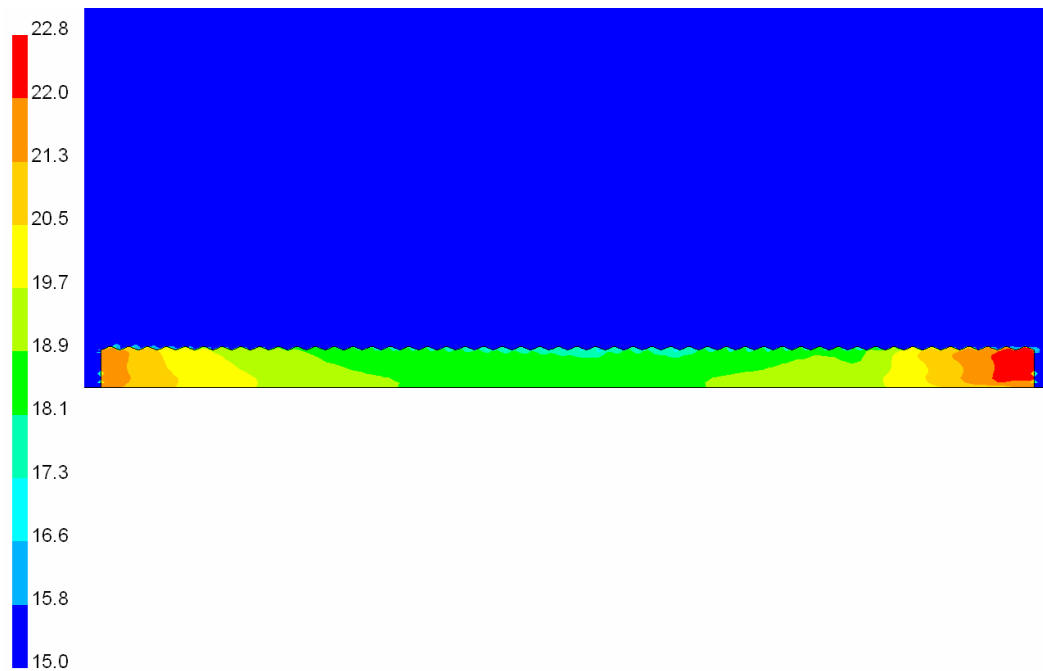
Figuur 15 Temperatuurprofiel in de kas met een goothoogte van 8 m als de ramen zijn geopend voor 2.5% en een buitentemperatuur van 15°C bij een globale straling van 200 W/m² voor een windstille situatie

In een hoge kas kan de lucht eenvoudiger stromen. Dit is duidelijk te zien uit bovenstaande figuren. Bij de lage kas komt de koude buitenlucht op meer plekken de kas binnen als bij een hogere kas. De raamopening is voor beide kashoogtes gelijk. In de lage kas komen hogere temperaturen voor als in de hoge kas. In de lage kas is de gemiddelde luchttemperatuur op gewasniveau 21.7 °C terwijl deze in de hoge kas op 20.6 °C ligt. De hoge kas ventileert beter bij een zelfde raamopening.



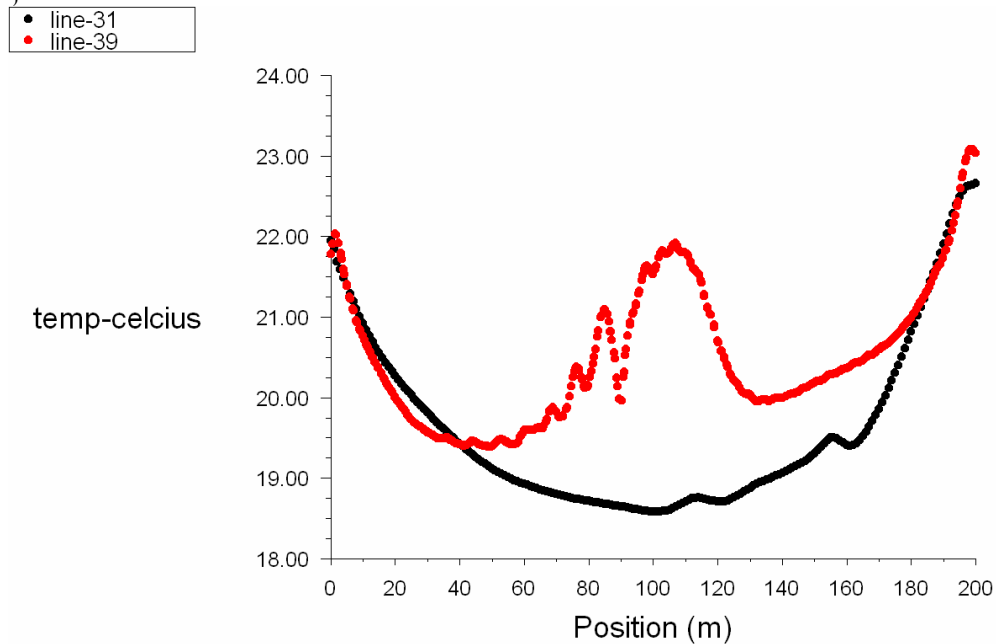
Figuur 16 Temperatuurprofiel bij een instraling van $40\text{W}/\text{m}^2$ en een buitentemperatuur van 15°C bij een goothoogte van 4 m waarbij de ramen aan de windzijde meer gesloten zijn dan aan de loefzijde bij een windsnelheid van 4 m/s

Bovenstaande figuur laat het temperatuurprofiel in een lage kas zien bij een windsnelheid van 4m/s . De 200 meter lange kas wordt als twee afdelingen geregeld zoals dat ook in de praktijk gebeurt over deze afstand. Gevolg is dat ramen aan de kant waar de wind vandaan komt minder ver openstaan dan aan de andere zijde van de kas. De temperatuur in het midden van de twee afdelingen is vrijwel gelijk door deze maatregel. De ventilatievoud is 13 h^{-1} voor deze berekening.



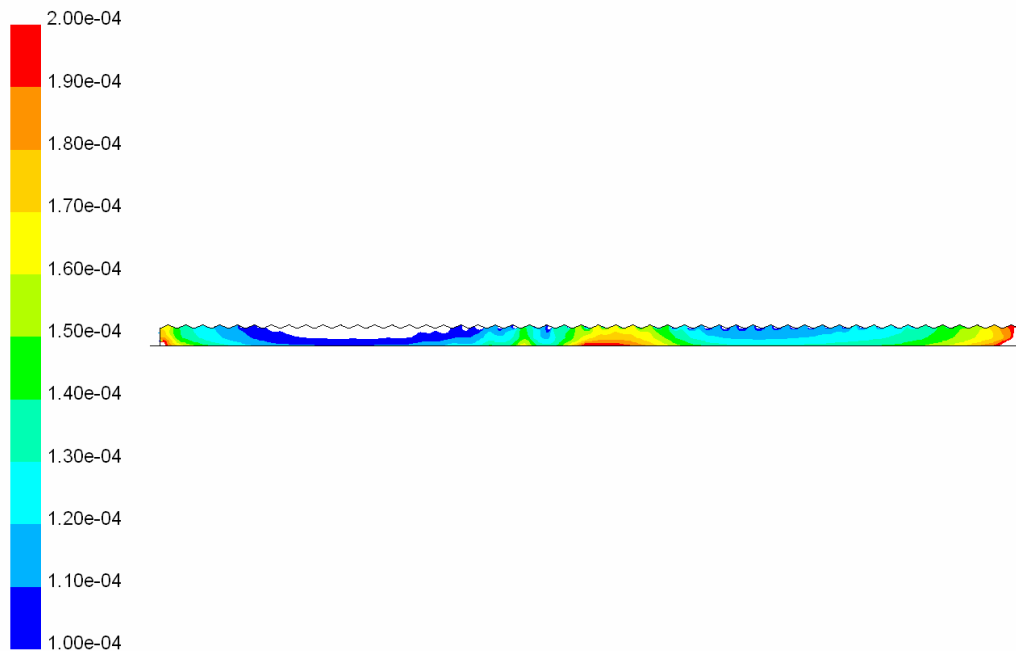
Figuur 17 Temperatuurprofiel bij een instraling van $40\text{W}/\text{m}^2$ en een buitentemperatuur van 15°C bij een goothoogte van 8 m waarbij de ramen aan de windzijde meer gesloten zijn dan aan de loefzijde

Bovenstaande figuur laat de temperatuurverdeling in de kas waarbij de ramen openstaan. 1.3% van het dek is open in dit geval. De ramen staan bij de lage kas 75% meer open als bij de hoge kas, toch is de ventilatievoud voor de hoge kas nog groter als bij de lage kas namelijk 19.7 h^{-1} . Een hoge kas ventileert dus beter als een lage kas. Dit komt overeen met de waarnemingen in de praktijk.



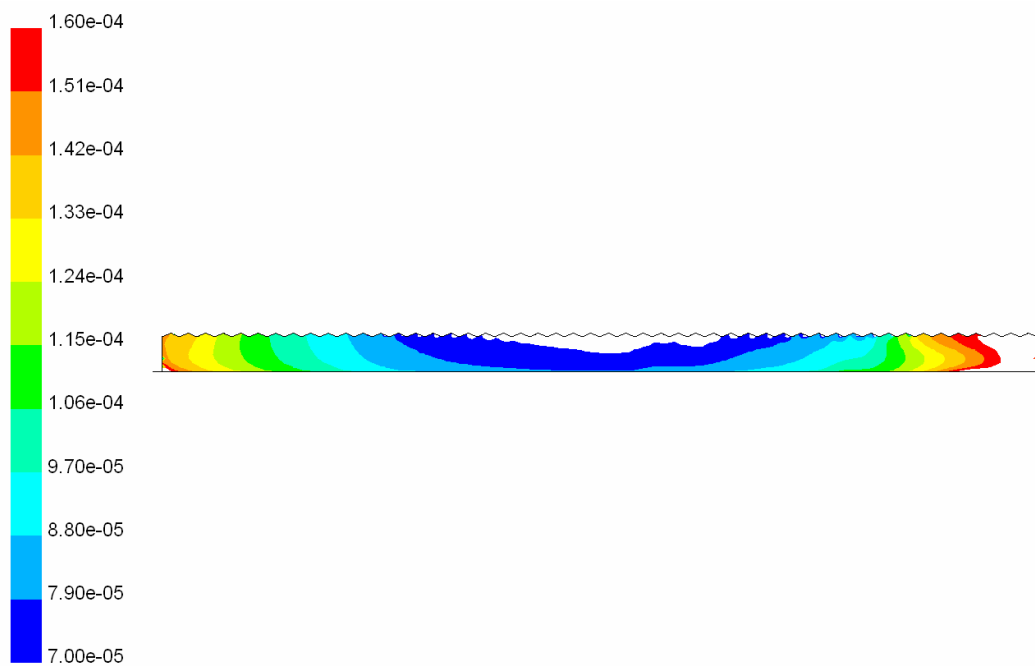
Figuur 18 Temperatuur op een hoogte van 2 meter in de kas voor een goothoogte van 4 m (rood) en 8 m (zwart)

Voor een duidelijk vergelijking is de luchttemperatuur op een hoogte van 2 meter in de kas voor beide situaties uitgezet. Het verschil tussen de maximum- en minimumtemperatuur is groter bij een hoge kas als een lage kas.

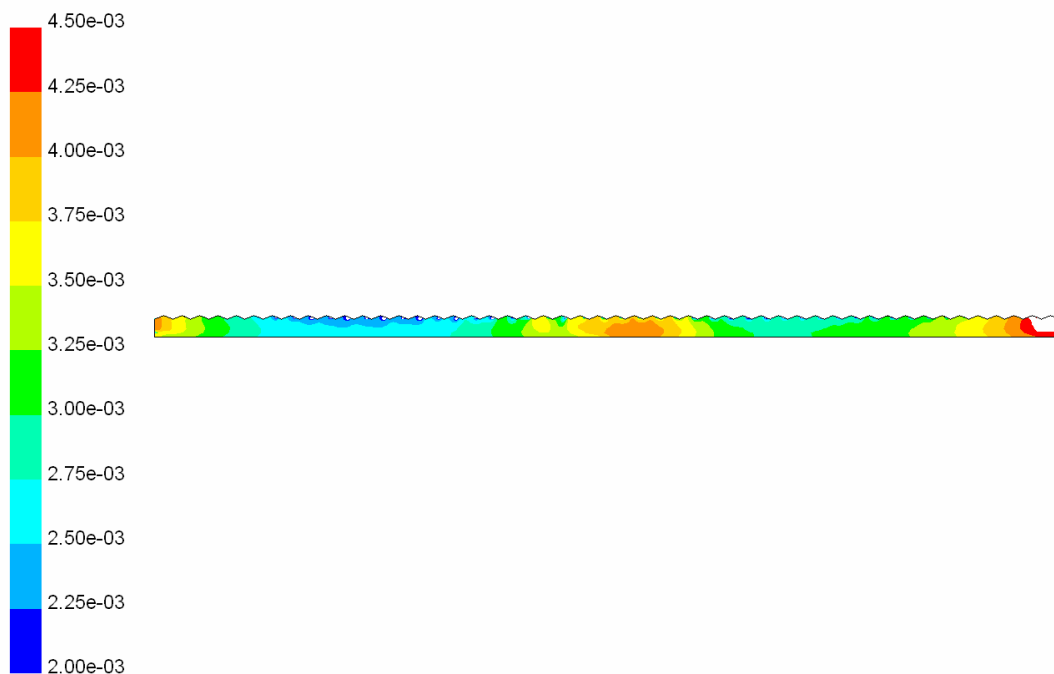


Figuur 19 CO₂ verdeling in een lage kas waarbij het dek voor 2.2% open is bij een windsnelheid van 4 m/s

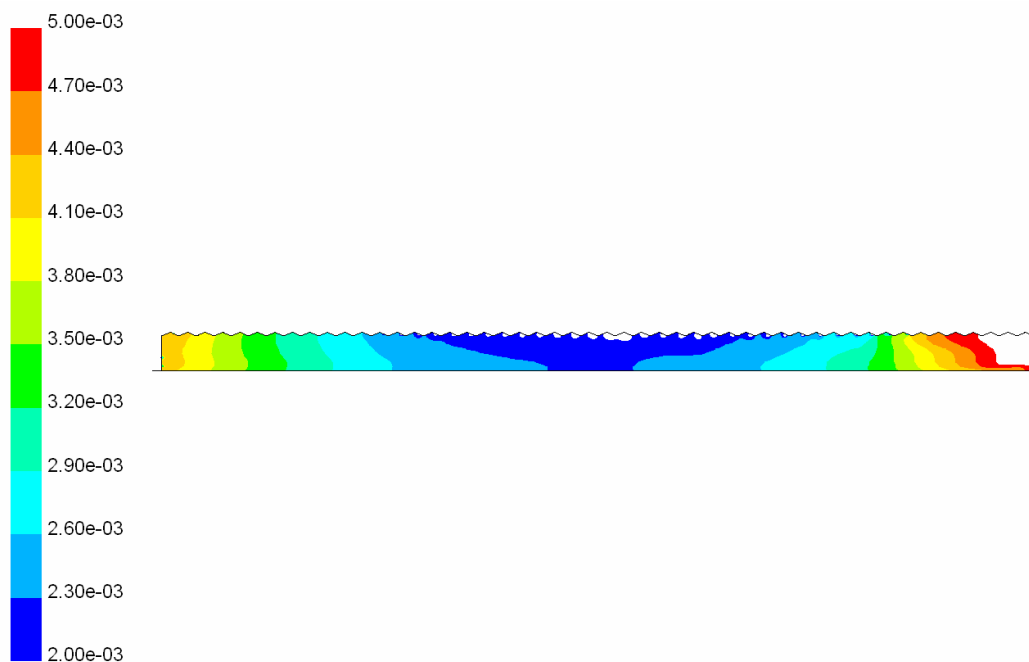
Bovenstaande figuur laat de CO₂ verdeling in de lage kas zien. De gemiddelde CO₂ verhoging op gewasniveau is 129 ppm, bij een dosering van 36 kg .h⁻¹. De dosering vindt onderin de kas plaats gelijk aan de praktijk. De hoogste CO₂ niveaus worden gemeten op de plaatsen waar het ook het warmste is in de kas. CO₂ is een relatief zwaar gas ten opzichte van lucht maar de diffusie zorgt ervoor dat het gas zich toch gelijkmatig in de lucht verdeelt. De laagste CO₂ concentraties worden gemeten op de plekken waar de buitenlucht de kas instroomt en de hoogste concentratie waar de lucht de kas weer verlaat. De CO₂ verdeling zoals weergegeven in de figuur is een moment opname. De luchtstroming in de kas verandert voortdurend door kleine verstoringen zoals een verandering van de windrichting of windsnelheid. De gemiddelde concentratie over een langere periode zal daardoor veel minder verschillen.



Figuur 20 CO₂ verdeling in een hoge kas waarbij het dek voor 1.3% open is
 De gemiddelde CO₂ verhoging in de hoge kas is 100 ppm. Dit niveau is lager als bij de lage kas aangezien de ventilatievoud groter is. Het CO₂ niveau nabij het gewas is niet veel hoger dan in de rest van de kas. Op basis van de twee bovenstaande figuren is de veronderstelling dat een hoge kas ervoor zorgt dat de CO₂ meer in de kas blijft niet waar. In beide gevallen is het CO₂ niveau nabij het gewas 2% hoger als in de rest van de kas.



Figuur 21 De verhoging van de absolute luchtvochtigheid in de kas door het gewas in kg/m³ in de lage kas



Figuur 22 De verhoging van de absolute luchtvochtigheid in de kas door het gewas in kg/m³ in de hoge kas

Bovenstaande figuur laat de verhoging van het absolute luchtvochtigheidsniveau in de kas zien ten gevolge van de verdamping van het gewas. De verdeling verschilt maar weinig van de temperatuurverdeling en CO₂ verdeling in de kas.

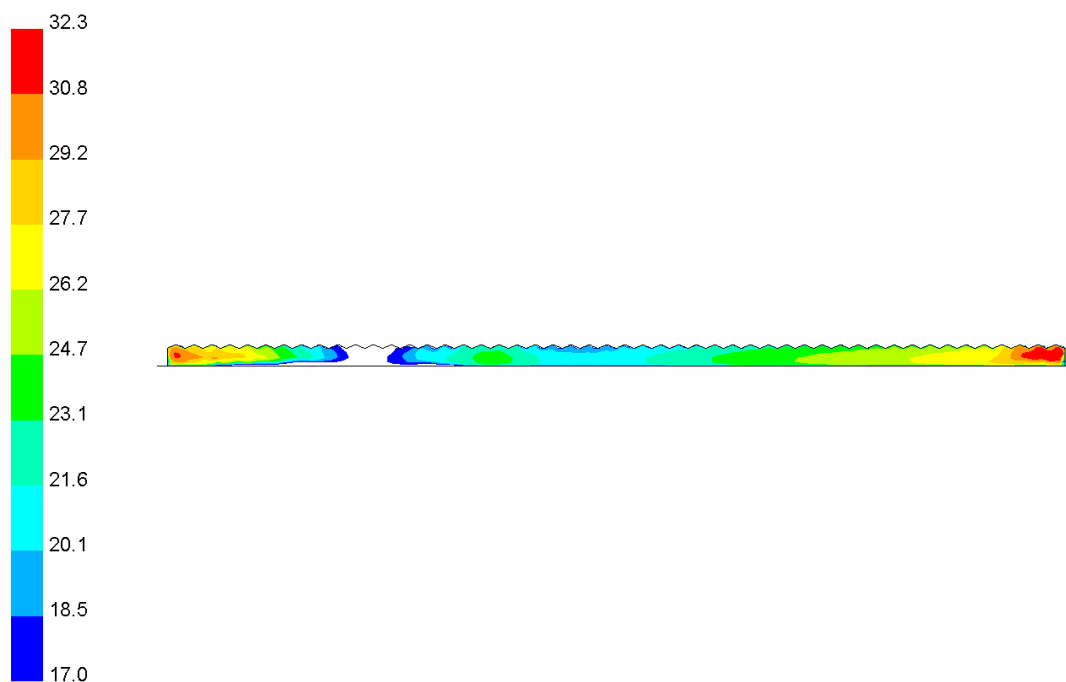
Conclusie

- Een hoge kas ventileert beter als een lage kas bij dezelfde raamopening.
- CO₂ blijft niet meer in de kas bij een hoge kas.
- De verdeling van vocht en CO₂ wordt bepaald door de luchtstroming in de kas en is daarom als er met buitenlucht wordt geventileerd niet overal gelijk in de kas.

4.3 Belichting

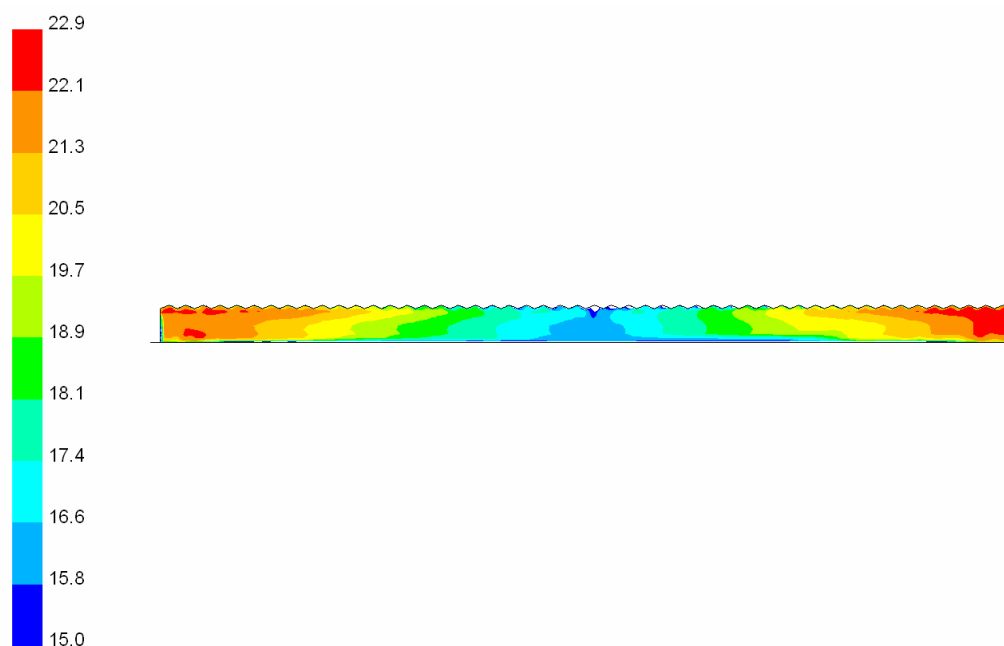
De hoogte van de kas is bij belichting enerzijds van belang om een goede verdeling van het licht over de planten te krijgen en anderzijds is de veronderstelling dat de warmteproductie van de lampen eenvoudiger kan worden afgevoerd bij een hogere kas. De veronderstelling is dat de warmte die de lampen produceren omhoog stijgt en dat de temperatuur van de lucht bovenin de kas hoger wordt dan onderin de kas en dat dit effect sterker is bij een hoge kas.

Voor de warmteproductie bij belichting wordt ervan uitgegaan dat 30% via het gewas in de lucht komt en de rest in de nabijheid van de lampen. De buitentemperatuur in deze berekening is op 10°C gesteld.



Figuur 23 Temperatuurverdeling in een 4 meter hoge kas waarbij 100 W m^{-2} belichting wordt toegepast en een windsnelheid van 4 ms^{-1}

De belichting geeft in de lage kas aanleiding tot een behoorlijke temperatuurgradiënt. Het dek is hierbij voor 2.7% open zodat de gemiddelde kasluchttemperatuur 20°C bedraagt. Een warmtebelasting van 100 W m^{-2} komt overeen met een belichtingsterkte van ongeveer 15000 lux wat hoog is. Deze gradiënten zijn in een recent project ook waargenomen (Rijssel and Marissen, 2006a) en (Rijssel and Marissen, 2006b). In dat project is op verschillende plaatsen in de kas de luchttemperatuur gemeten waarbij er verschillen van meer dan 8 K zijn gemeten in het horizontale vlak. De veronderstelling dat de warmte van de lampen direct bij de ramen kan worden weg geventileerd is volgens deze berekening niet juist. Ten gevolge van de belichting ontstaat een horizontale temperatuurgradiënt. De verticale temperatuurgradiënt is niet aanwezig.



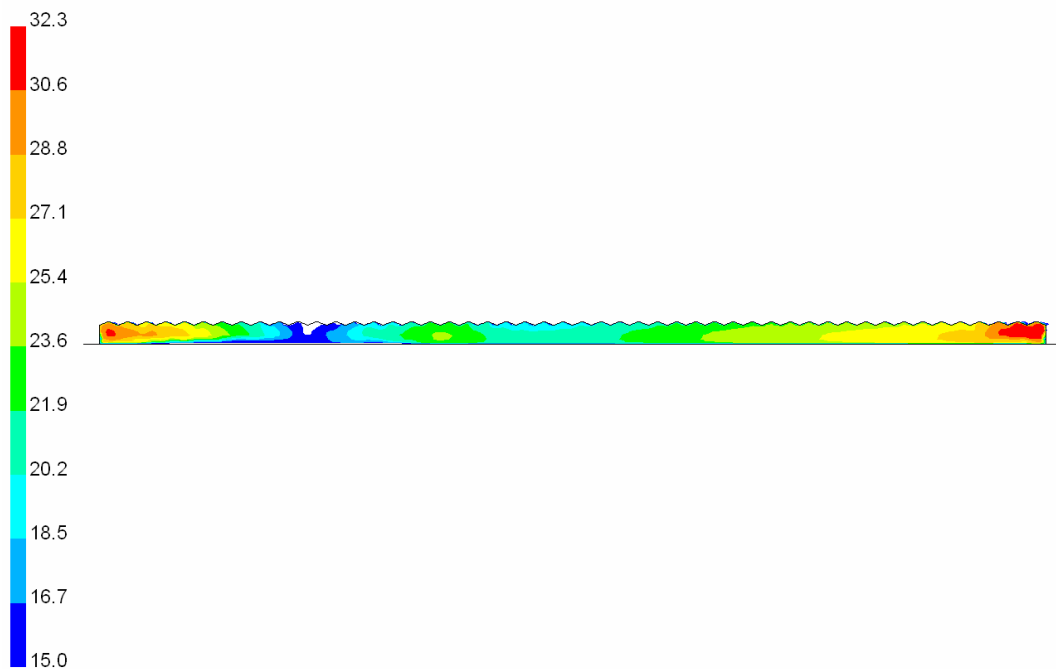
Figuur 24 Temperatuurverdeling in een 8 meter hoge kas waarbij 100 W m^{-2} belichting wordt toegepast bij een windsnelheid van 4 ms^{-1}

Ook bij de hoge kas zijn aanzienlijke temperatuurverschillen aanwezig zij het minder groot als bij een lage kas. Het dek is in bovenstaande situatie maar voor 0.6% geopend. De gemiddelde luchttemperatuur op gewas niveau is voor beide situatie 20°C . Voor de hoge kas is er wel een verticale temperatuurgradiënt waarneembaar waarbij de warme lucht zich bovenin de kas bevindt. De horizontale gradiënt is echter vele malen groter.

Kortom indien belichting wordt toegepast heeft een hoge kas voordeel ten opzichte van een lage kas aangezien de maximale en minimale temperatuur in de kas verder uit elkaar liggen dan in de lage kas.

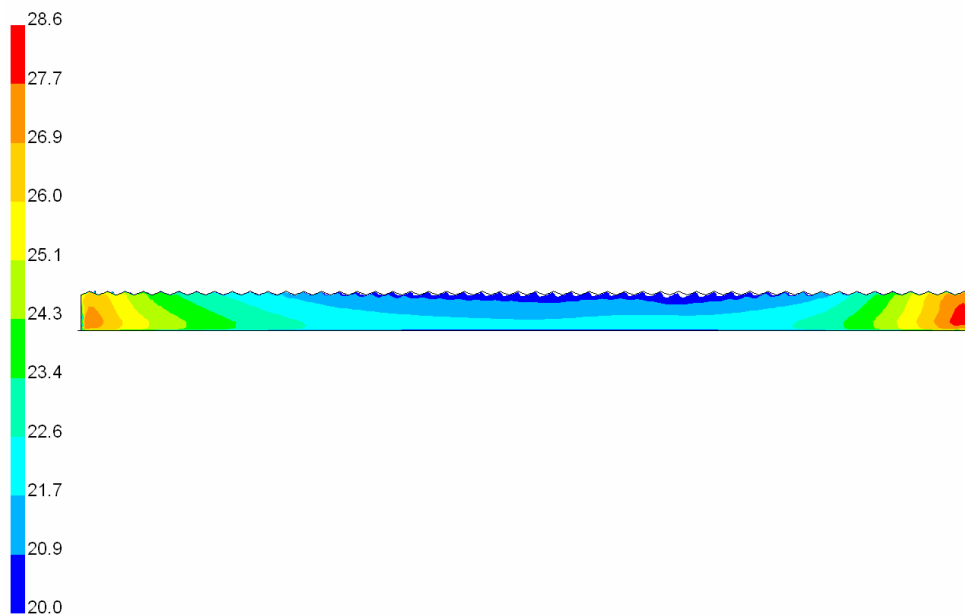
4.4 Bevochtiging

Bij geconditioneerd telen wordt regelmatig verneveling toegepast voor koeling. Het verdampen van water heeft toch gevolg dat er warmte aan de lucht wordt onttrokken en de concentratie waterdamp in de lucht toeneemt. In het model zijn deze twee factoren meegenomen. Voor de berekening is uitgegaan van een buitentemperatuur van 20°C en 600 W m^{-2} straling.



Figuur 25 Temperatuurverdeling in een 4 meter hoge kas waarbij 50 W m^{-2} koeling door verneveling wordt toegepast bij een windsnelheid van 4 ms^{-1}

De gemiddelde kasluchttemperatuur wordt 23.9°C .



Figuur 26 Temperatuurverdeling in een 8 meter hoge kas waarbij 50 W m^{-2} koeling door verneveling wordt toegepast bij een windsnelheid van 4 ms^{-1}

De gemiddelde kasluchttemperatuur wordt 21.6°C bij dezelfde raamopening als bij de 4 meter hoge kas. Het temperatuurprofiel in de kas is veel beter als bij een lage kas. Bij het gebruik van verneveling heeft een hoge kas dus duidelijk voordeel ten opzichte van een lage kas.

5 Conclusies en discussie

Extra ruimte voor de installatie van schermen, verneveling en belichting is de voornaamste reden voor tuinders om een hoge kas te bouwen. Uit de berekeningen komt naar voren dat het klimaat, bij toepassing van deze installaties, ook baat heeft bij de extra ruimte. Een ander belangrijk aspect wat naar voren komt bij de verhoging van de kas is de toename van de ventilatiecapaciteit. Een hoge kas ventileert beter als een lage bij een zelfde raamopening.

Echter verhogen van de kas heeft een hoger energieverbruik tot gevolg. De windsnelheid rond de kas neemt toe naarmate de kashoogte toeneemt waardoor de warmteoverdracht toeneemt. Dit energieverlies kan worden beperkt door de gevels extra te isoleren en een energiescherm toe te passen. De mate waarin het gevelverlies bijdraagt aan het totale energiegebruik hangt af van de grootte van de kas. Moderne hoge kassen zijn beter geïsoleerd dan oude lage kassen en zijn groter waardoor het energieverlies niet tot uitdrukking komt in het gemeten gasverbruik in relatie tot de kashoogte.

Feiten en mythen

Er worden veel beweringen gedaan over het verhogen van de kas. Naar aanleiding van deze studie kan een waarde oordeel over deze beweringen worden gegeven.

Een hogere kas zorgt voor meer energieverbruik

Waar. De toename is gerelateerd aan de relatieve toename van het geveloppervlak maar ook nemen de verliezen door het dek toe. Bij een verhoging van 4 meter naar 8 meter neemt het energieverbruik met 10% toe naar 12 meter zelfs met meer dan 15%. Dit effect is te verminderen door gevelisolatie en het gebruik van schermen. Een hoge kas met een energiescherm en de bijbehorende gevelschermen heeft nagenoeg hetzelfde energieverbruik als een lage kas met een energiescherm en gevelschermen.

Hoge kassen houden CO₂ meer in de kas

Niet waar. CO₂ is weliswaar een zwaar gas maar in de lucht mengt dit gas zich op waardoor de concentratie wordt bepaald door de luchtstroom in de kas. Daar waar de lucht de kas binnenkomt, is de CO₂ concentratie laag en waar hij de kas weer verlaat is de concentratie hoog. Ten gevolge hiervan vliegt de CO₂ in een hoge kas net zo eenvoudig het raam uit als in een lage kas.

Hoge kassen ventileren beter.

Waar. De lucht heeft in een hoge kas meer ruimte om te bewegen waardoor de luchtstroming door de kas van luchtraam naar luchtraam beter gaat. Met minder raamopening kan er daardoor bij een hoge kas even veel worden geventileerd als bij een lage kas.

Er is minder ventilatie nodig voor de koeling van de kas.

Niet waar. De gedachte dat in een hoge kas de warmte bovenin gaat zitten en dat daarmee bij dezelfde ventilatievoud meer warmte wordt afgevoerd door het grotere temperatuurverschil tussen de buitenlucht en de kaslucht is niet juist. In de kas ontstaat een horizontale temperatuurgradiënt en nauwelijks een verticale temperatuurgradiënt welke voor dit principe nodig zou zijn. Daarnaast wordt de warmte van de zon voor het grootste gedeelte afgegeven bij het gewas en niet bovenin de kas.

Hogere kas zorgt voor een stabiel en homogeen klimaat

Niet waar. Er is geen verschil in stabiliteit voor het klimaat voor een hoge of een lage kas. De temperatuurverdeling in de kas wordt voor een groot deel door toeval bepaald en is daarmee ook zeer onstabiel. Temperatuurverschillen zijn zowel bij de hoge als de lage kas aanwezig en worden bepaald door het temperatuurverschil tussen de buitenlucht en de kaslucht (Campen and Gelder, 2007). De luchtcirculaties in de hoge kas zijn groter waardoor de temperatuurgradiënt kleiner is maar het verschil tussen de maximum- en minimumtemperatuur is vrijwel onafhankelijk van de kashoogte.

“The sky is the limit” voor de hoogte van de kas

Niet waar. De energieverliezen via de gevels en het dek zullen te groot worden als de kassen hoger worden. Daarnaast zal de constructie van de kas ook te zwaar worden wat tot lichtverlies leidt en te hoge investeringskosten. Tenslotte zal het maatschappelijk niet verantwoord zijn zeer hoge kassen te bouwen.

Kortom een aantal beweringen welke over een hogere kas worden gedaan zijn niet juist. Een hogere kas is zeker nuttig indien schermen en/of belichting en/of verneveling worden toegepast waarbij het energiescherm en gevelscherm ervoor moet zorgen dat het energieverbruik niet drastisch toeneemt. De meerwaarde van extreem hoge kassen (> 8 meter) lijkt er niet te zijn.

Literatuur

- Anonymous. 2005. Land- en tuinbouws cijfers 2005 LEI, Den Haag.
- Arkesteijn, M. 2006. ' Een groot bedrijf door de hoogte aan te passen' : ophogen kas voorkomt kapitaalvernietiging. *Onder glas* 3:24-25.
- Campen, J.B., and A.d. Gelder. 2007. Horizontale variatie 131. *Plant Research International*, Wageningen.
- Philips. 1993. Philips Licht: Applicatie informatie Kunstlicht in de tuinbouw, Eindhoven.
- Rijssel, E.v., and N. Marissen. 2006a. Schermtoepassing bij belichte teelten : Eindrapport met samenvattingen van de fasen 1,2 en 3. *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving*, Wageningen.
- Rijssel, E.v., and N. Marissen. 2006b. Schermtoepassing bij belichte teelten: Resultaten van fase 3. PPO, Wageningen.
- Spaargaren, J.J. 2000. Belichting van tuinbouwgewassen Hortilux Schröder, Monster.
- Staalduinen, J.v. 2005. Hoog, hoger, hoogst.. : poothoogte stijgt gemiddeld 10 cm per jaar. *Onder Glas* 2:16-17.
- van Os, E.A., M.A. Bruins, and B.A.J. van Tuijl. 2006. Meting van ruimtelijke verdeling van temperatuur en RV met behulp van draadloze minisensoren (Smart Dust). *Plant Research International*, Wageningen.
- Visser, P. 2006. Terug naar de eenvoud. *Groenten en Fruit* 49:18-19.