

# Betere temperatuurverdeling door regelbare gevelverwarming

Ir. J.B. Campen

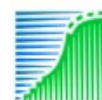
Report 132

## Onderzoek in het kader van het Convenant Glastuinbouw en Milieu

Uitgevoerd door:



In opdracht van:



landbouw, natuur en  
voedselkwaliteit

## Colophon

Title	Betere temperatuurverdeling door regelbare gevelverwarming
Author(s)	J.B. campen
A&F number	132
ISBN-number	ISBN 90-6754-768-9
Date of publication	Maart 2004
Confidentiality	Nee
Project code.	PT 11456, A&F: 630.54743.01

Agrotechnology & Food Innovations B.V.  
P.O. Box 17  
NL-6700 AA Wageningen  
Tel: +31 (0)317 475 024  
E-mail: [info.agrotechnologyandfood@wur.nl](mailto:info.agrotechnologyandfood@wur.nl)  
Internet: [www.agrotechnologyandfood.wur.nl](http://www.agrotechnologyandfood.wur.nl)

© Agrotechnology & Food Innovations B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

*All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.*



The quality management system of Agrotechnology & Food Innovations B.V. is certified by SGS International Certification Services EESV according to ISO 9001:2000.

## Tuinders samenvatting

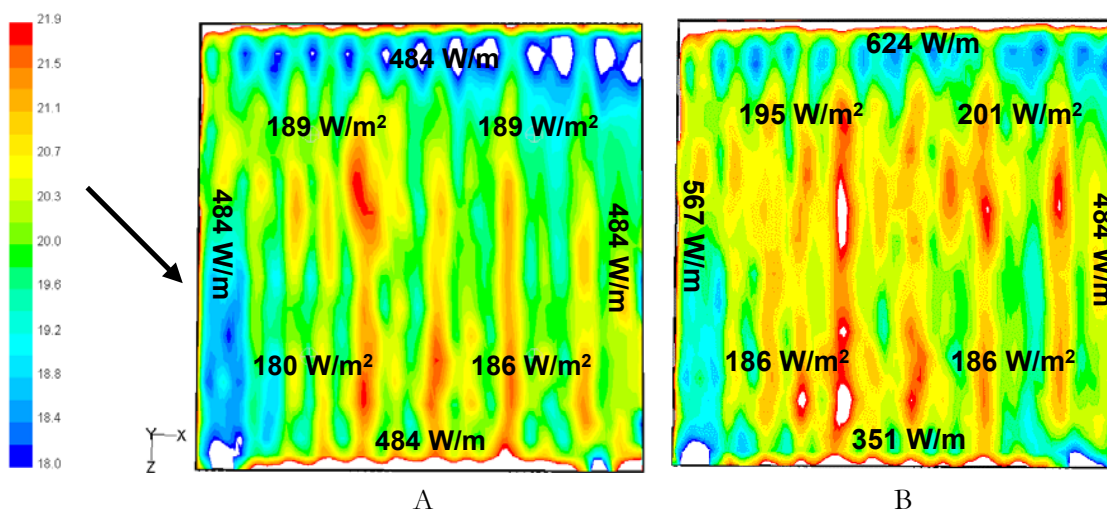
### Gelijkmatig klimaat door regelbare gevelverwarming

#### Inleiding

Het oplossen van horizontale temperatuurverschillen is al jarenlang een probleem waar veel ondernemers mee worstelen. De invloed van de windrichting wordt vaak aangevoerd als belangrijke oorzaak waardoor het onmogelijk zou zijn deze problemen op een afdoende manier op te lossen. Het resultaat van het onderzoek door A&F toont aan dat toepassing van een regelbaar gevel een afdoende oplossing biedt die tevens economische voordelen biedt.

Temperatuurverschillen in de kas ontstaan door variatie in de warmteafgifte van het verwarmingssysteem of door lekventilatie. Aan de gevel wordt het warmteverlies naar de omgeving mede bepaald door de windrichting en snelheid. Temperatuurverschillen in de kas zorgen voor nadelige effecten op de groei, kwaliteit, ontstaan van ziektes en daarmee op de productie.

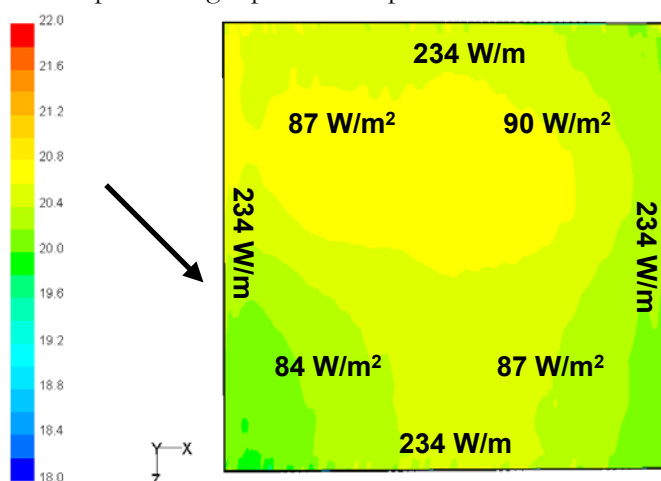
Toepassen van een regelbaar gevelverwarmingsnet kan een groot deel van de temperatuurverschillen oplossen. Met een regelbare gevelverwarming kan de lokale temperatuur aan de gevel worden geregeld op basis van een extra meetbox in de buurt van de gevel.



Figuur 1 Temperatuurverdeling in de kas op een hoogte van 2 meter bij een windrichting diagonaal op de kas met een snelheid van 5 m/s en een buitentemperatuur van 0°C waarbij de gevelverwarming niet regelbaar is (A) en wel regelbaar (B).

In Figuur 1 is de temperatuur op een hoogte van 2 meter in de gehele kas te zien zonder een regelbaar gevelverwarmingsnet (A) en met een regelbaar gevelverwarmingsnet (B). De kleuren geven de temperatuur aan volgens de range aan de linkerkant. In de witte gebieden valt de temperatuur buiten de range van 18 tot 22°C en is er sprake van een grote afwijking. Door toepassing van een regelbaar gevelverwarmingsnet worden de gebieden waar de temperatuur buiten de range valt aanmerkelijk minder. Temperatuurverschillen van meer dan 2°C komen voor

bij buitenomstandigheden waarbij het verlies naar de omgeving meer dan  $150 \text{ W/m}^2$ . In de praktijk komt dit neer op  $150 \text{ m}^3$  gas per hectare per uur.



Figuur 2 Temperatuurverdeling bij toepassing van een scherm en gevelschem

Uit het onderzoek kwam naar voren dat schermen in combinatie met een gevelschem een zeer gelijkmatige temperatuurverdeling geeft. Dit is te zien in Figuur 2. Voor deze situatie is een regelbaar gevelverwarmingsnet dan ook absoluut overbodig. Naast een aanzienlijke hoeveelheid energiebesparing zorgt een scherm dus ook voor een beter klimaat in de kas wat ten goede komt aan de productie.

#### Economisch perspectief

Een gelijkmatiger temperatuurverdeling geeft een gelijkmatigere groei. In een eerder onderzoek is aangetoond dat temperatuurverschillen van 2 tot 3 K de productie met 2 EURO/ $\text{m}^2$  negatief kunnen beïnvloeden. Verder kan een aanzienlijke winst op het energieverbruik worden gehaald door toepassing van temperatuur integratie, verlaging van de minimumbuis en verhoging van het setpoint voor de relatieve luchtvochtigheid. Deze aanpassingen kunnen met meer zekerheid worden gedaan bij een gelijkmatiger temperatuurverdeling in de kas. De individuele maatregelen leiden tot een energiebesparing tussen de 1 en 7%. Met een combinatie van de maatregelen is een energiebesparing van 20% mogelijk.

#### Conclusies

Tuinders die geen scherm gebruiken en regelmatig een gasverbruik hebben van meer dan  $150 \text{ m}^3$  per hectare per uur en nu voorzichtig omgaan met de bandbreedte bij temperatuur integratie en het RV-setpoint, zullen voordeel hebben van regelbare gevelverwarmingsnetten.

- De verkleining van de temperatuurverschillen nabij de gevel heeft tot gevolg dat de bandbreedte voor temperatuur integratie kan worden vergroot, de minimumbuis kan worden verlaagd en dat het setpoint voor de relatieve luchtvochtigheid kan worden verhoogd. Deze maatregelen geven een individuele besparing tussen de 1 en 7%. Al deze maatregelen gelijktijdig toepassen kan tot een besparing van meer dan 20% leiden.
- Voor tuinders die schermen gebruiken verdient het aanbeveling om gebruik te maken van een gevelschem, om koude gebieden nabij de gevel te voorkomen

- Lokale temperatuurverschillen van meer dan 2 graden ten opzichte van het setpoint worden nabij de gevel pas waargenomen bij een warmteverlies naar de omgeving van  $150 \text{ W/m}^2$ , wat overeenkomt met een gasverbruik van ongeveer  $150 \text{ m}^3$  per uur per hectare. Het warmteverlies wordt bepaald door het temperatuurverschil met de omgeving en de windsnelheid.

# Inhoud

<b>Tuinders samenvatting</b>	<b>3</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>2 Onderzoeksopzet</b>	<b>9</b>
2.1 Beschrijving computational fluid dynamics	9
2.1.1 Continuïteitsvergelijking	9
2.1.2 Navier-Stokes vergelijking	10
2.1.3 Energievergelijking	10
2.2 Model opzet	11
2.3 Randvoorwaarden	13
2.4 Aanpassingsmogelijkheden verwarmingsnet	14
<b>3 Resultaten</b>	<b>15</b>
3.1 Berekeningen van de temperatuurverdeling in de nacht	15
3.2 Berekeningen van de temperatuurverdeling gedurende de dag	22
3.3 Gebruik van scherm	24
3.4 Gevelschermen in plaats van gevelverwarmingsnet regelen	26
3.5 Temperatuurverdeling bij ventilatie	27
3.6 Invloed van de omgeving	29
3.7 Kosten voor de regeling	29
3.8 Economisch perspectief	30
<b>4 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>32</b>
<b>Literatuur</b>	<b>34</b>

## 1 Inleiding

Uit het rapport “Ontwikkeling en introduceren van een methodiek ter oplossing van klimaatverschillen in kassen” (L. Nijs en G.A. van de Berg, 1998) blijkt dat de belangrijkste oorzaken van horizontale temperatuurverschillen in kassen liggen in een onevenwichtige warmte-afgifte door het verwarmingssysteem, met name bij verdeellicingen (langs gevels). Gedeeltelijke isolatie daarvan kan een deel van de problemen oplossen maar zeker niet de problemen die ontstaan door wisselende warmtevraag langs de gevels (windrichting, zonbelasting, schermgebruik).

Volgens vooraanstaande tuinders biedt een goede temperatuurverdeling langs de gevels van kassen de mogelijkheid om het kasklimaat ‘scherper’ te regelen. Ook in het onderzoek naar de effecten van temperatuurintegratie in combinatie met schermen (Van de Braak et al., 2002) hebben de betrokken gewascommissies aangegeven dat een goede temperatuurverdeling cruciaal is om verdere invoering van temperatuurintegratie te bereiken.

Aangezien niet-regelbare gevelverwarmingsnetten bij wisselende buitenomstandigheden (met name windrichting en -snelheid) en bij gebruik van een energiescherm óf te veel óf te weinig verwarming leveren zal een regelbaar gevelverwarmingsnet leiden tot een evenwichtiger temperatuurverdeling en daarmee tot energiezuiniger kasklimaatinstellingen.

Met name de perspectieven voor temperatuurintegratie worden groter naarmate tuinders met meer vertrouwen op een uniforme verdeling de kas kunnen verwarmen.

Sommige tuinders gebruiken reeds regelbare netten. Veel tuinders hebben handbediende kranen op het gevelverwarmingsnet, maar er zijn ook veel tuinders waarbij het verwarmingsvermogen langs de gevels niet onafhankelijk van het algemene verwarmingsvermogen kan worden geregeld. De overweging of er al dan niet gebruik moet worden gemaakt van een regelbaar net, wordt nu veelal gebaseerd op een intuïtieve afweging van de kosten en opbrengsten die daarmee gepaard gaan.

Een regelbaar gevelverwarmingsnet kan in nieuwbouw worden meegenomen, maar ook in bestaande kassen worden aangebracht. Indien de helft van de bedrijven door het regelbare gevelverwarmingsnet de stooktemperatuur 1°C kan laten zakken zou dit sectorbreed tot een energiebesparing van 2 tot 4% leiden.

In opdracht van het Productschap Tuinbouw (PT nr 11456) en het Ministerie van LNV en gefinancierd door het Productschap Tuinbouw heeft Agrotechnology and Food Innovations bv in het kader van het Convenant Glastuinbouw en Milieu een onderzoek uitgevoerd met als doelstellingen:

- Bepaling van de mate waarin een regelbaar gevelverwarmingsnet horizontale temperatuurverschillen kan verminderen.
- Vaststellen van het besparingspotentieel van een regelbaar gevelverwarmingsnet.
- Berekening van het financieel voordeel, rekening houdend met de kosten voor een regelbaar gevelverwarmingsnet (een extra klep, pomp, meetbox, software en extra arbeid).

- Vaststellen van het bedrijfseconomisch voordeel onder praktijkomstandigheden.  
De resultaten van dit onderzoek zijn van belang voor alle tuinders die gebruik maken van buisverwarmingssystemen.



## 2 Onderzoeksopzet

Het onderzoek poogt antwoord te geven op de vraag of een regelbaar gevelverwarmingsnet horizontale temperatuurverschillen kan verminderen. Daartoe is eerst onderzocht hoe groot de horizontale temperatuurverschillen nabij de gevel in een conventionele kas zijn en bij welke buitenweersomstandigheden dit voorkomt.

Vervolgens wordt, bij de aanwezigheid van temperatuurverschillen nabij de gevel, de mogelijkheid middels een regelbaar gevelverwarmingsnet deze verschillen te verkleinen onderzocht.

Het onderzoek wordt uitgevoerd met een simulatiemodel dat luchtstroming en temperatuur in een kas kan berekenen. Het model is in verschillende onderzoeken gebruikt, waarbij naar voren kwam dat het model de werkelijkheid goed weergeeft (Campen, 2002, Campen en Bot, 2002, 2003).

### 2.1 Beschrijving computational fluid dynamics

De rekenmethode waarmee het simulatiemodel wordt gemaakt voor de ruimtelijke verdeling van het klimaat in de kas heet computational fluid dynamics (CFD). Het hierbij gebruikte rekenpakket is Fluent (Fluent, 1998). De basis van een CFD-rekenpakket is dat de beschrijvende vergelijkingen (stelsel partiële differentiaalvergelijkingen) discreet (numeriek) worden opgelost. Dat gebeurt door het hele gebied, waarin de stroming en de warmteoverdracht (eventueel ook stofoverdracht) plaatsvindt, op te delen in een eindig, maar wel groot aantal cellen van goed gekozen afmetingen en voor elk van deze cellen de impuls-, energie- en massabalans te berekenen. Deze methode wordt daarom ook wel de eindige volume elementen methode genoemd (*Finite Volume Method*). De afmetingen van een cel moeten hierbij zodanig gekozen worden dat de toestandsgrootheden (snelheid, temperatuur, etc.) van de cel nauwkeurig genoeg kunnen worden uitgedrukt met behulp van de eerste twee termen van de Taylorreeks (Versteeg en Malalasekera, 1995).

De eerder genoemde balansen die de basis vormen van CFD worden ook de behoudswetten genoemd:

1. Behoud van massa, ook continuïteitsvergelijking genoemd
2. Behoud van impuls (ook bekend als de tweede wet van Newton: kracht is massa maal versnelling)
3. Behoud van energie, ofwel de energievergelijking
4. Bij stofoverdracht: behoud van massa van de beschouwde component b.v. waterdamp of CO<sub>2</sub> (in dit project niet gebruikt)

#### 2.1.1 Continuïteitsvergelijking

De massabalans voor een element wordt als volgt gedefinieerd: De toename van de massa in een volume element is gelijk aan de netto massastroom naar het element. De partiële differentiaalvergelijking die dit beschrijft als functie van plaats en tijd is de continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Voor een incompressibel medium ( $\rho$  is constant), zoals in ons geval, kan dit worden vereenvoudigd tot:

$$\text{div } \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

### 2.1.2 Navier-Stokes vergelijking

Volgens de impulsbalans (tweede wet van Newton) is de toename van de impuls op een stromingsdeeltje gelijk aan de som van de krachten (kracht is toevoer van impuls) op dat deeltje. Bij die krachten wordt onderscheid gemaakt tussen krachten die op het oppervlak van het deeltje werken, zoals druk en viskeuze krachten en krachten die op het hele deeltje werken, zoals zwaartekracht, centrifugaalkracht en corioliskracht. Deze krachten worden ook wel lichaamskrachten genoemd.

De totale impulsbalans wordt ook wel de Navier-Stokes vergelijking genoemd:

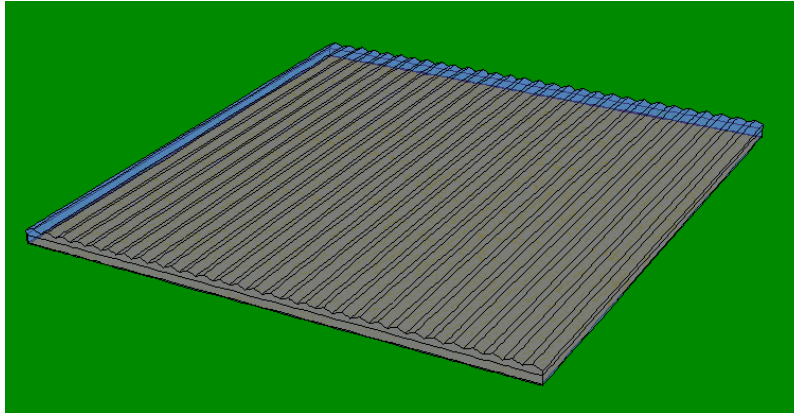
$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \nu \left( \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (3)$$

Merk op dat  $u_i$  een vector is met drie componenten. De vergelijking kan dus worden geschreven voor de x, y en z component en beschrijft de toestandsgrootheid  $u_i$  als functie van plaats en tijd. Turbulentie kan ook worden berekend met deze vergelijking. De opdeling in cellen in gebieden in het model waar turbulentie optreedt moet dan echter heel fijnmazig worden. Dit verhoogt de rekestijd enorm. Daarom wordt voor de bijdrage van de turbulentie aan het impuls- en warmtetransport in het rekenpakket aparte modellen geformuleerd. Het meest bekende model is het standaard k- $\epsilon$  model, waarin de door eventuele turbulentie veroorzaakte conversie van mechanische naar thermische energie wordt berekend.

### 2.1.3 Energievergelijking

De temperatuur van een element wordt bepaald door de temperatuur van de omliggende elementen via geleiding. Daarnaast wordt de temperatuur beïnvloed door de temperatuur van de vloeistof die het element in en uit stroomt. Door wrijving ten gevolge van de luchtstroming kan de temperatuur ook veranderen. Ten slotte is er nog de eventuele aanwezigheid van een warmtebron in het element. Deze verschillende factoren bepalen de temperatuur van het element en daarmee de hoeveelheid aanwezige energie. De energievergelijking is gelijkvormig aan vgl 2 waarbij  $\rho u_i$  (concentratie van impuls) vervangen kan worden door  $\rho C_p T$  (concentratie van energie) en de drukgradient (bronterm voor impuls) wordt vervangen door de bronterm voor energie. De vectorvergelijking wordt dan een scalarvergelijking voor de toestandsgrootheid temperatuur T als functie van plaats en tijd.

## 2.2 Model opzet



Figuur 3 Een tekening van het model zoals dat in Fluent is gemodelleerd

Figuur 3 laat een schets van een representatieve kas zien zoals die in het model is opgenomen. De afmetingen van het kasmodel zijn 200 bij 200 meter met een goothoogte van 4 meter. In de kas bevindt zich een gewas met een hoogte van 3 meter en de eigenschappen van tomaat. De onderste meter van het gewas is open. De emissiecoëfficiënt van het glas is op 0.86 gesteld en de warmtegeleidingcoëfficiënt op  $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , waarbij het glas 4 mm dik is. De gemiddelde temperatuur in de kas wordt op  $20^\circ\text{C}$  gehouden. Een halve meter onder de goot is een scherm geplaatst. Het aantal volumes, waarin het totale volume van de kas en de omgeving wordt opgedeeld, bedraagt 119758. Omdat de warmteoverdracht nauwkeurig moet worden bepaald nabij het kasdek en de gevels zijn de volumes in en dicht bij de kas kleiner dan verder van de kas af.

De aan de kas toegevoerde warmte wordt direct aan de lucht afgegeven nabij de vloer en langs de gevels. De warmteafgifte wordt zo ingesteld, dat de gemiddelde temperatuur in de kas  $20^\circ\text{C}$  wordt. Langs de gevels wordt de warmtetoevoer bepaald door het aantal verwarmingsbuizen, dat hier geplaatst is. Er zijn 4 gelijke verwarmingsgroepen opgenomen voor kasvakken van  $100 \times 100 \text{ m}$  welke worden geregeld door 4 meetpunten, die zich in het midden van de vakken bevinden op een hoogte van 3 meter.



Figuur 4 Foto van een Venlo-kas met gevelverwarming

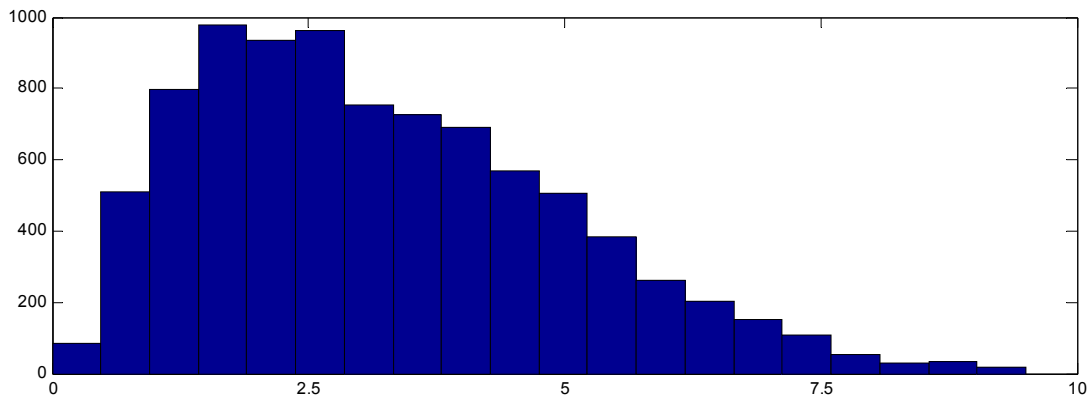
In een kas met een kap van 3.2 meter liggen er gemiddeld 4 verwarmingsbuizen met een diameter van 51 mm. In het algemeen worden 4 buizen met een diameter van 51 mm langs de gevel geplaatst. De verwarmingscapaciteit langs de gevels is in het model gelijkgesteld aan het vermogen dat de vier buizen kunnen afgeven aan de lucht. In het model kan het aantal verwarmingsbuizen worden geselecteerd. Voor de situatie dat het gevelverwarmingsnet niet geregeld wordt, loopt de temperatuur van het gevelverwarmingsnet mee met de temperatuur van het ondernet en daarmee het afgegeven vermogen. Als het gevelverwarmingsnet wel geregeld is dan wordt het afgegeven vermogen aangepast zodat de temperatuur nabij de gevel gelijk wordt aan de setpoint temperatuur.

Het kasmodel is volledig luchtdicht. Dit komt niet overeen met een kas in de praktijk waar altijd wat lek aanwezig is. Een nieuwe kas waarbij de rubbers in de ramen nog nieuw zijn heeft een minimale lekventilatie. Het model is daarom het beste te vergelijken met een pas gebouwde kas. Ondanks dat de berekening naar een stabiele oplossing zoekt (geen verandering in de tijd) zal de oplossing fluctueren. Een constante oplossing bestaat ook niet in de realiteit. Het is te vergelijken met een kaars die brandt in een kamer waar verder geen luchtbewegingen zijn. De vlam van de kaars blijft niet kaarsrecht omhoog staan maar wiebelt een beetje heen en weer. Deze fluctuaties in de tijd worden berekend door het eerder genoemde turbulentie model.

Een berekening met het model voordat een stabiele oplossing wordt gevonden duurt ongeveer 5 uur. Na een aanpassing van bijvoorbeeld de verwarmingscapaciteit om de temperatuur in de kas op 20°C te krijgen, duurt het een uur voor de berekening weer stabiel is.

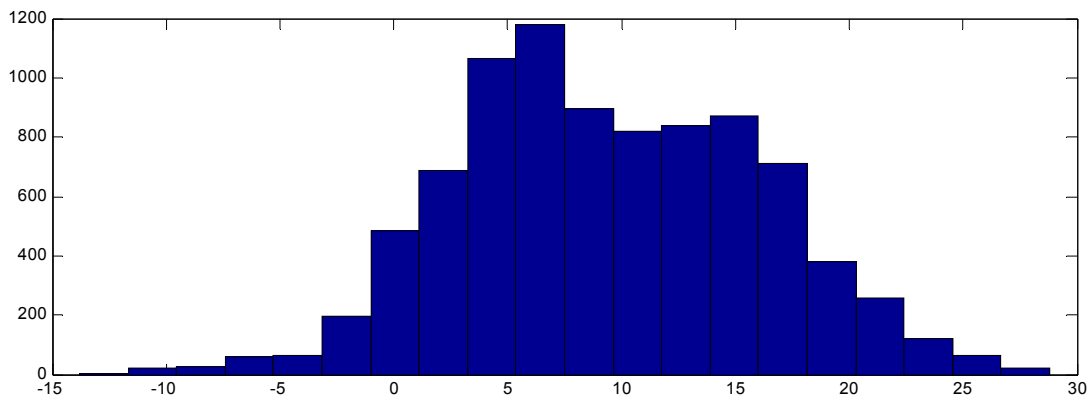
### 2.3 Randvoorwaarden

Het model berekent de ruimtelijke verdeling van het klimaat (luchtsnelheid en kasluchttemperatuur) in de kas op een bepaald tijdstip. Voor dit tijdstip moeten de omgevingscondities (c.q. de weergegevens van dat moment) worden gedefinieerd. Deze kunnen voor een gemiddeld jaar op basis van het referentiejaar (sel-jaar) voor de Nederlandse glastuinbouw (Breuer & Van de Braak, 1989) worden bepaald. De omgevingscondities moeten dan wel zo gekozen worden dat het op dat moment van belang is een regelbaar gevelverwarmingsnet te hebben.



Figuur 5 Histogram van de uurlijkse gemiddelde windsnelheid uit het SEL-jaar

In Figuur 5 is een histogram te zien van de uurlijkse gemiddelden van de windsnelheden uit het SEL-jaar. Het grootste deel van de tijd is de windsnelheid rond de 1 à 2  $\text{ms}^{-1}$ , vandaar dat ook voor deze snelheden is gekozen als uitgangspunt in de berekeningen. Om inzicht te krijgen in wat er bij hogere windsnelheden gebeurt met de temperatuurverdeling in de kas is ook gerekend met een windsnelheid van 5  $\text{ms}^{-1}$ .



Figuur 6 Histogram van de uurlijkse gemiddelde buitentemperatuur uit het SEL-jaar in  $^{\circ}\text{C}$

Figuur 6 laat een histogram zien van de uurlijkse gemiddelde buitentemperatuur in het SEL-jaar. Op basis van deze data is voor buitentemperaturen van 0 en 10  $^{\circ}\text{C}$  gekozen. Bij hogere buitentemperaturen zullen de horizontale temperatuurverschillen minder groot zijn.

In Tabel 1 zijn de verschillende randvoorwaarden zoals deze zijn toegepast in bij de berekeningen weergegeven.

Tabel 1 Toegepaste waarden van de randcondities in de CFD berekeningen

randvoorwaarde	waarde	eenheid
buitentemperatuur	0 / 10	oC
windsnelheid	1 / 2 / 5	ms-1
windrichting	Z / ZW / W	-
zon-instraling	0 / 200	Wm-2

Omdat de kas symmetrisch is in het vlak parallel aan de nokrichting volstaat het met de aangegeven windrichtingen berekeningen te doen.

Voor de hemeltemperatuur, die ook in het model moet worden ingevoerd, wordt een temperatuur 10 K lager dan de temperatuur van de buitenlucht aangehouden. De dag- en nachtsituatie wordt middels de zonnestraling vergeleken. Het vermogen dat door de zon wordt geleverd, wordt via het gewas aan de lucht afgegeven. Dit is een goede representatie van de werkelijkheid. Het vermogen dat door de verschillende groepen van het verwarmingsysteem wordt afgegeven, wordt zo ingesteld dat de temperatuur op de verschillende meetboxen 20°C is. De temperatuurverdeling in de kas zal door het sluiten van een scherm beïnvloed worden, daarom worden ook bij schermgebruik berekeningen uitgevoerd. De kentallen van het energiescherm (SLS10 Ultra Plus) die van belang zijn voor de berekening zijn gebruikt (dikte scherm:  $2.5 \cdot 10^{-4}$ , epsilon boven en onder: 0.5). Het scherm is luchtdicht, omdat in CFD-modellen van grote ruimten, modellering van lokale lekken tot onacceptabel lange rekentijden leidt. In de praktijk is een scherm zonder open structuur ook luchtdicht. Kieren aan de randen van het scherm zorgen voor een minimale luchtuitwisseling om het scherm maar zal het vergelijk met de berekening niet beïnvloeden.

#### 2.4 Aanpassingsmogelijkheden verwarmingsnet

Middels regelkleppen is het mogelijk de temperatuur van het gevelverwarmingsnet te beïnvloeden. Als de buizen niet als aanvoer dienen voor het ondernet of andere delen van de gevelverwarming kan het gehele net worden geregeld. Indien de zijgevel ook als aanvoer dient zal in elk geval één buis van het gevelverwarmingsnet zonder regelklep uitgevoerd moeten worden. De overige buizen kunnen dan wel worden geregeld.

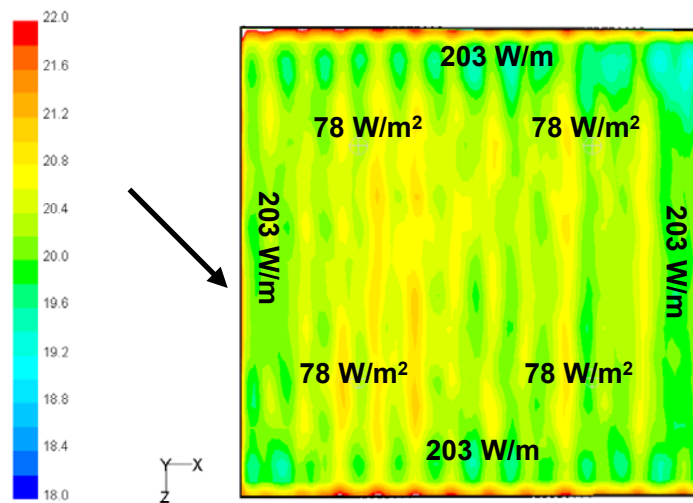
Het regelen van het gevelverwarmingsnet zal gebeuren op basis van temperatuursensoren in de buurt van de gevel. Dit net regelen op basis van een centrale meetbox in een compartiment zal niet voldoende zijn. Dit zal ook een extra investering met zich meebrengen.

Invloed van de wind op de temperatuurverdeling in de kas wordt in het onderzoek meegenomen. De invloed van de windrichting en snelheid zullen naar aanleiding van dit onderzoek mogelijk in de klimaatregeling moeten worden opgenomen.

### 3 Resultaten

De temperatuurverdelingen worden altijd in een range van 18 tot 22°C weergegeven op een hoogte van 2 meter in de kas. De variatie in temperatuur een meter boven en onder dit vlak verschilt maar marginaal ( $<0.1^{\circ}\text{C}$ ) en geeft daarmee de temperatuur rond het gewas goed weer. Als de temperatuur buiten deze range valt is daardoor in de figuren meteen duidelijk te zien waar zich de problemen voordoen. Overigens kan een lokaal temperatuurverschil van  $2^{\circ}\text{C}$  onder de ingestelde kasluchttemperatuur, bij de toepassing van temperatuurintegratie soms al teveel zijn omdat dit tot productieverlies leidt. Het afgegeven vermogen van het ondernet wordt per vierkante meter kasoppervlak weergegeven, van de gevelverwarming per meter gevel.

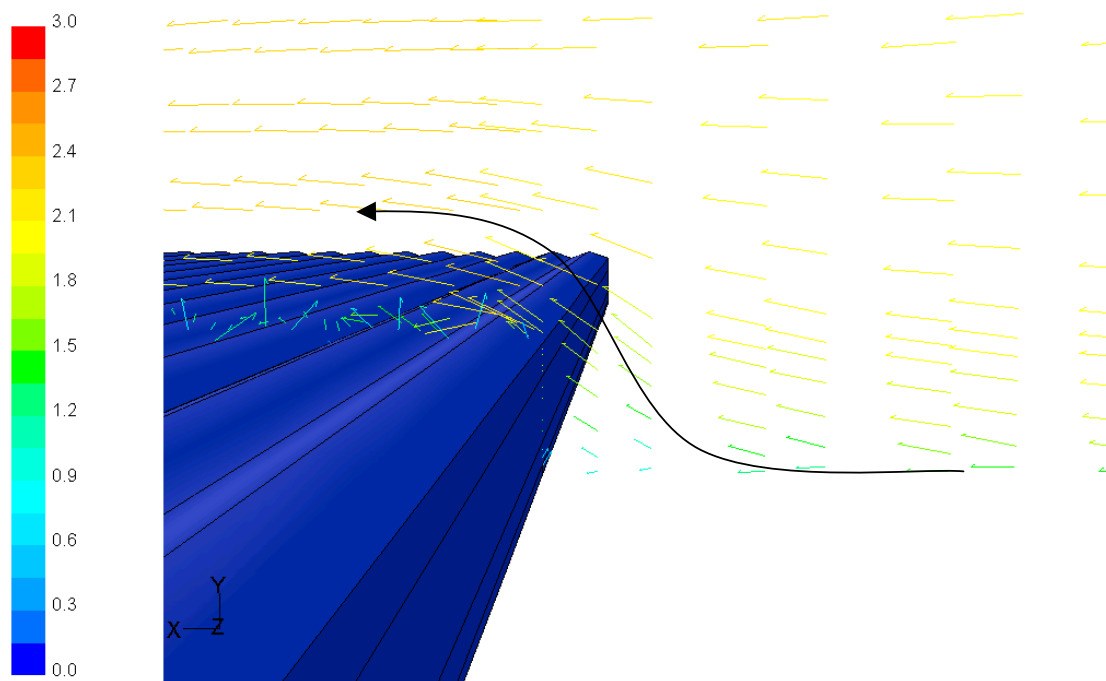
#### 3.1 Berekeningen van de temperatuurverdeling in de nacht



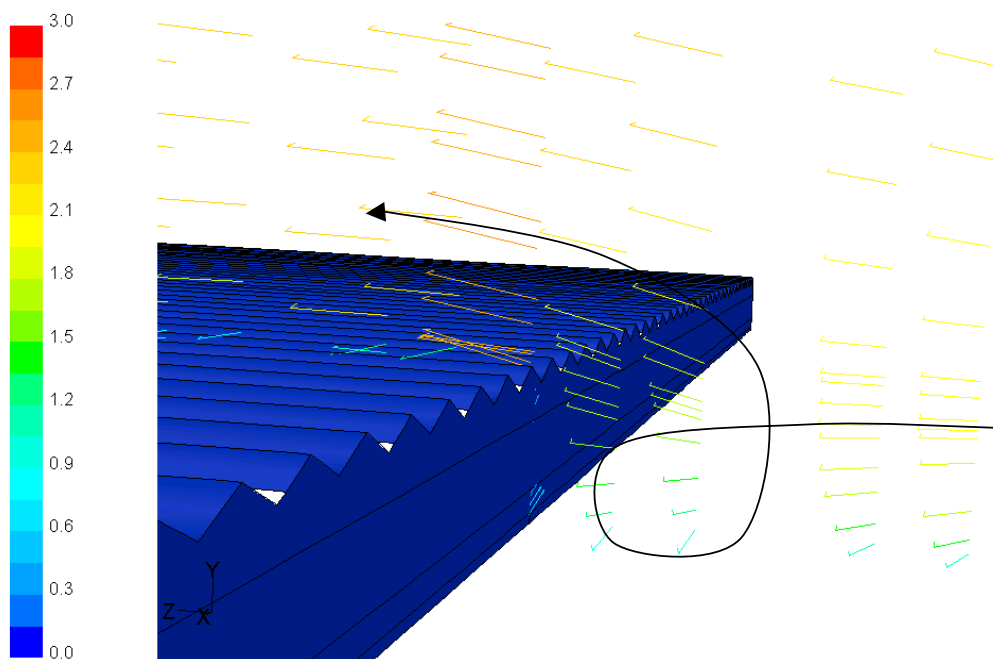
Figuur 7 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $1 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een buitentemperatuur van  $10^{\circ}\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $0^{\circ}\text{C}$  in de nacht

Figuur 7 laat een temperatuurverdeling in de kas zien bij een buitentemperatuur van  $10^{\circ}\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $0^{\circ}\text{C}$  bij een windsnelheid van  $1 \text{ m/s}$  diagonaal op de kas. De kleuren geven de temperaturen weer volgens de schaal aan de linkerkzijde. De berekening laat de situatie zien van een kas waarbij 4 ondernetgroepen een gelijke hoeveelheid warmte afgeven van  $78 \text{ W/m}^2$  en aan de gevels wordt  $203 \text{ W/m}$  afgegeven. Langs de gevel loopt het vermogen mee met het vermogen dat door het ondernet wordt afgegeven (dus niet apart geregeld), zoals dat beschreven is in paragraaf 2.2. Dit gevelvermogen wordt weergegeven t.o.v. de lengte van de gevel. De windsnelheid is  $1 \text{ ms}^{-1}$  en de windrichting is diagonaal op de kas. De temperatuurverdeling is vrij egaal, verschillen van  $1^{\circ}\text{C}$  zijn niet te voorkomen in zo'n grote ruimte. Langs de gevels loodrecht op de goot is de temperatuur iets hoger dan in de rest van de kas. In eerste instantie zou men dit niet verwachten omdat het oppervlak van deze gevel groter is dan van de gevels parallel aan de goot. De reden voor de hogere temperatuur is dat de hoogte van de gevels zorgt voor een grotere recirculatie aan de buitenzijde van deze gevels. Hierdoor blijft relatief warme lucht (opgewarmd door de gevel) bij de gevel circuleren, waardoor de warmteverliezen minder worden. Dit is in Figuur 8 en Figuur 9 geïllustreerd. Hieruit mag

overigens niet worden geconcludeerd dat de kopgevel ook in de overheersende windrichting moet worden geplaatst. Dit geeft weliswaar de laagste warmteverliezen maar kan ongunstig zijn voor de lichtsom in de kas.

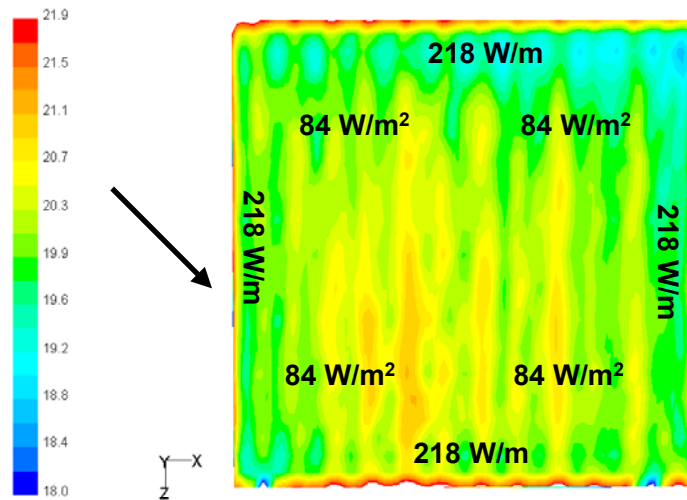


Figuur 8 Snelheidsvectoren in m/s aan de zijgevel



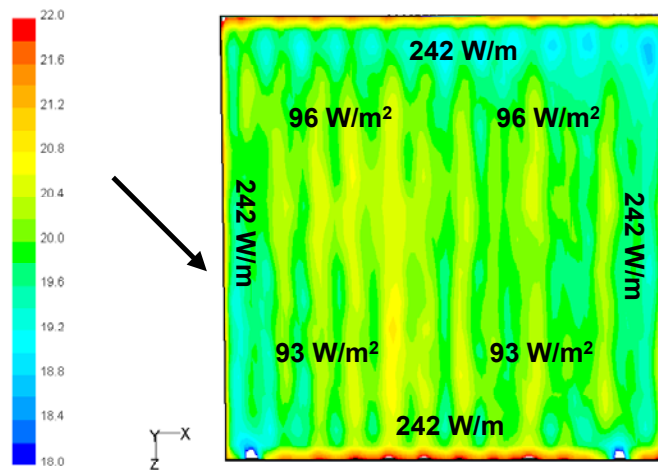
Figuur 9 Snelheidsvectoren in m/s aan de kopgevel van de kas met een recirculatie





Figuur 10 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $2 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $10^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $0^\circ\text{C}$  in de nacht

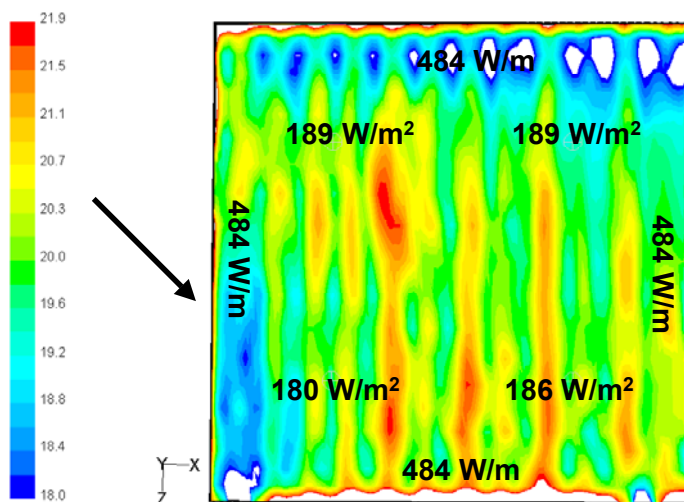
De temperatuurverschillen bij een windsnelheid van  $2 \text{ ms}^{-1}$  (Figuur 10) zijn iets groter dan bij  $1 \text{ ms}^{-1}$ . Aan de noordgevel (z-richting) is de temperatuur ten gevolge van de gevelverwarming boven de  $22^\circ\text{C}$ . Voor beide windsnelheden ontstaat er een koude plek in de zuidoost hoek van de kas (rechtsboven in figuur). De afkoeling door wervelingen rond de kas is hier groter dan elders. Toch blijven de temperatuurverschillen nog net in de range van  $2^\circ\text{C}$  rond de ingestelde kasluchttemperatuur.



Figuur 11 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $10^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $0^\circ\text{C}$  in de nacht

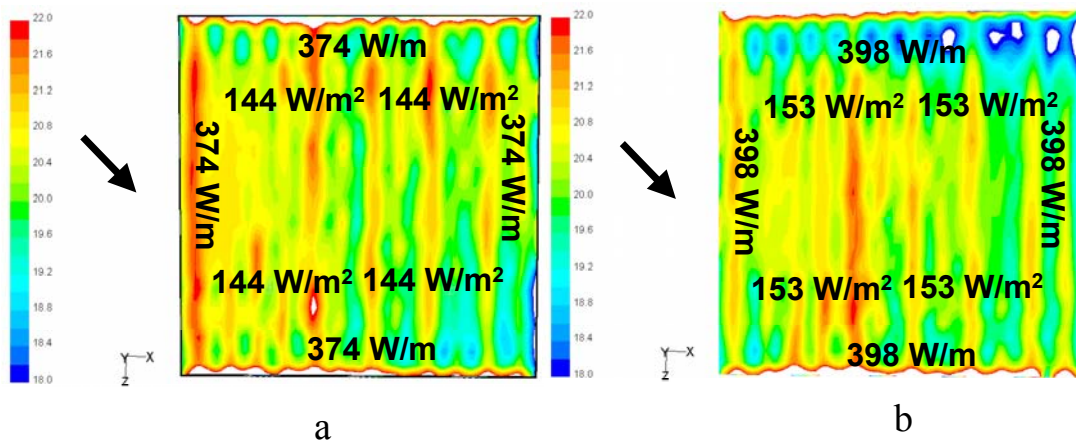
In Figuur 11 is de temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5 \text{ ms}^{-1}$  te zien. De horizontale temperatuurverschillen zijn acceptabel. Langs de noord gevel (onderaan in figuur) is de temperatuur ten gevolge van de gevelverwarming iets hoger.

Uit Figuur 7, Figuur 10 en Figuur 11 is wel duidelijk te zien dat de warmteafgifte aan de gevels een grotere invloed krijgt op de temperatuurverdeling in de kas naarmate de windsnelheid toeneemt. Temperatuur bij de meetpunten midden in de vier verwarmingscompartimenten is voor alle berekeningen steeds 20°C.



Figuur 12 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $0^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $-10^\circ\text{C}$  in de nacht

De invloed van de buitentemperatuur en de hemeltemperatuur op de temperatuurverdeling in de kas is duidelijk te zien als Figuur 11 en Figuur 12 met elkaar worden vergeleken. De verhouding tussen het afgegeven vermogen van het ondernet en het gevelverwarmingsnet is in beide situaties gelijk. In de zuidoost hoek van de kas daalt de temperatuur onder de  $18^\circ\text{C}$ ,  $17.1^\circ\text{C}$  om precies te zijn. Aan de noord gevel stijgt de temperatuur boven de  $22^\circ\text{C}$ ,  $22.6^\circ\text{C}$  om precies te zijn. Deze situatie zou met een regelbaar gevelverwarmingsnet te voorkomen zijn door het afgegeven vermogen aan de gevel te vergroten. Omdat een windsnelheid van  $5 \text{ ms}^{-1}$  minder vaak voorkomt is deze berekening ook uitgevoerd voor een windsnelheid van  $1$  en  $2 \text{ ms}^{-1}$ .

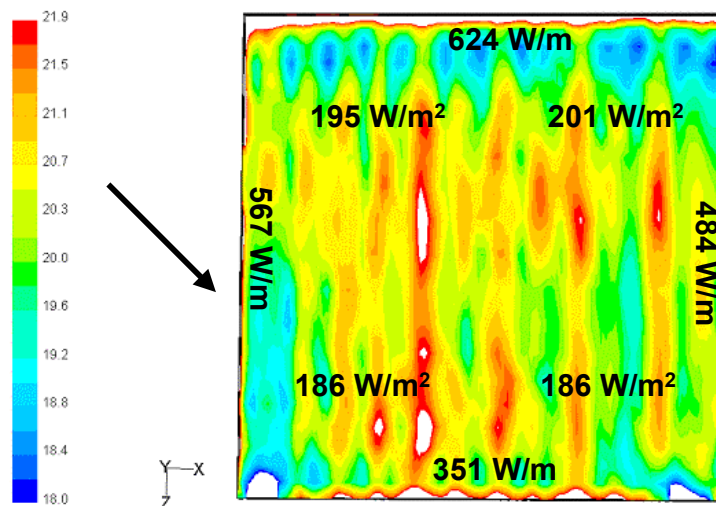


Figuur 13 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $1 \text{ ms}^{-1}$  (a) en  $2 \text{ ms}^{-1}$  (b) diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  in de nacht

Voor de lagere windsnelheden is de noodzaak voor een geregeld gevelverwarmingsnet minder dan voor de  $5 \text{ ms}^{-1}$  situatie, echter bij  $2 \text{ ms}^{-1}$  zijn er lokale temperatuurgebieden te zien die onder de  $18^\circ\text{C}$  komen.

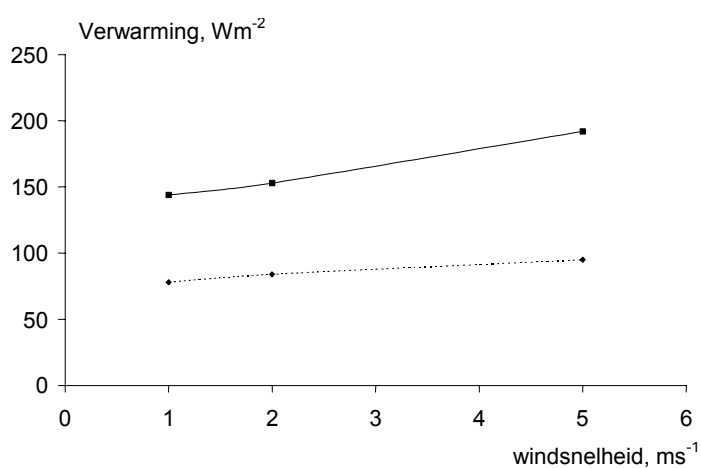
Een buitentemperatuur lager dan  $0^\circ\text{C}$  en een windsnelheid hoger dan  $1 \text{ ms}^{-1}$  komt 375 uur per jaar voor, hoger dan  $2 \text{ ms}^{-1}$  komt 195 uur per jaar voor, hoger dan  $5 \text{ ms}^{-1}$  komt maar 5 uur per jaar voor.

In Figuur 14 is de temperatuurverdeling te zien voor de situatie van  $5 \text{ ms}^{-1}$  als het gevelverwarmingsnet regelbaar is.



Figuur 14 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  na aanpassing van de gevelverwarming in de nacht

Aan de zuid- en westzijde is de warmteafgifte aan de kasgevel verhoogd. De warmteafgifte aan de noordzijde is verlaagd (voor deze situatie is dus sprake van een regelbaar gevelverwarmingsnet). De warmteafgifte van het ondernet is aanpast zodat er de luchttemperatuur bij de meetboxen weer 20°C is. De temperatuur in de zuidoost hoek van de kas blijft nu boven de 18°C. Vergroting van de warmteafgifte aan de zuidzijde heeft wel tot gevolg dat het gebied waar de temperatuur boven de 22°C uitkomt wordt vergroot. Aan de noordgevel is het gebied met een temperatuur hoger dan 22°C kleiner geworden. De betere menging van de lucht in de kas zorgt ervoor, dat er meer verwarming nodig is om de temperatuur bij de meetboxen op 20°C te houden. Het extra vermogen nodig om de horizontale temperatuurverschillen te verkleinen blijkt minder dan een 0.1% van het totale gasverbruik te zijn en heeft dus geen effect op het piekverbruik.



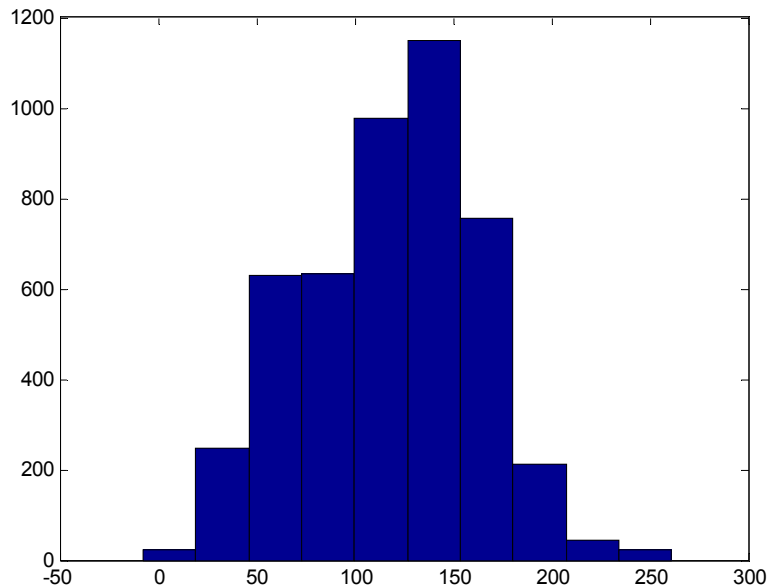
Figuur 15 Het warmteverlies van de kas als functie van de windsnelheid voor windrichting diagonaal op de kas in de nacht. ---, buitentemperatuur 10 °C; —, buitentemperatuur 0 °C

Figuur 15 laat de invloed van de windsnelheid op het warmteverlies van de kas zien. De lineaire relatie tussen de windsnelheid en de warmteafgifte komt goed overeen met de theorie over gedwongen convectie.

Op basis van Figuur 15 kan de relatie tussen de temperatuur en windsnelheid met de warmteafgifte worden gevonden, als aangenomen wordt dat de hemeltemperatuur 10 K lager is dan de omgevingstemperatuur.

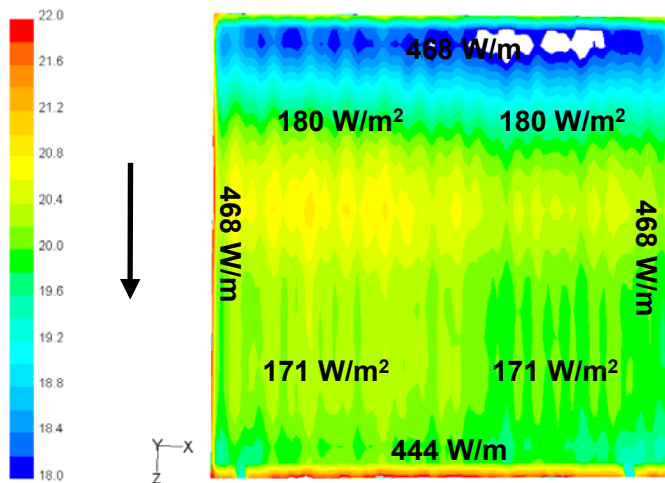
$$\text{warmteafgifte} = 7.5 (20 - T_{\text{buiten}}) + 7.5 \text{ windsnelheid} \quad (4)$$

Als deze vergelijking wordt toegepast op de data uit het SEL-jaar voor de uren dat de zonnestraling kleiner is dan 10 W/m<sup>2</sup>K dan kan het aantal uren met een bepaald warmteverlies worden berekend.



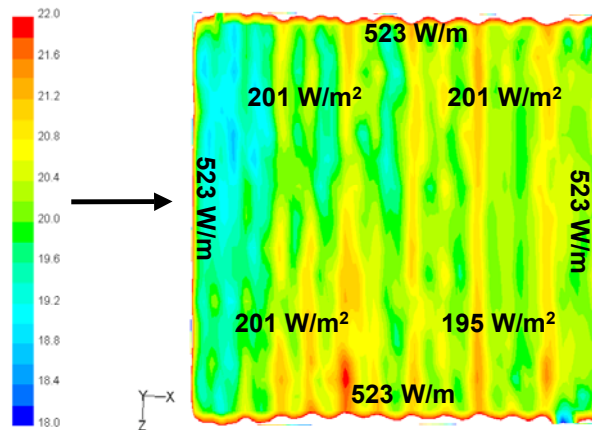
Figuur 16 Aantal uren per jaar als functie van de warmteoverdracht in  $W/m^2$

Een warmteverlies van ongeveer  $150 W/m^2$  dat overeenkomt met de situatie met een omgevingstemperatuur van  $0^\circ C$  en een windsnelheid tussen de 1 en 2 m/s komt een groot deel van het jaar voor. In deze periode zal een regelbaar gevelverwarmingsnet van belang zijn. Bovenstaande berekeningen zijn allemaal op basis van een windrichting diagonaal op de kas. Als de windrichting parallel en loodrecht op de nokrichting van de kas wordt gezet ontstaan de temperatuurverdelingen zoals weergegeven in Figuur 17 en Figuur 18.



Figuur 17 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5\text{ ms}^{-1}$  parallel aan de nokrichting bij een omgevingstemperatuur van  $0^\circ C$  en een hemeltemperatuur van  $-10^\circ C$

De gevel waar de wind vandaan komt heeft het grootste warmteverlies. Dit is volgens verwachting. Met een geregeld gevelverwarmingsnet kan het koude gebied worden verkleind.



Figuur 18 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van 5 ms<sup>-1</sup> loodrecht aan de nokrichting bij een omgevingstemperatuur van 0 oC en een hemeltemperatuur van -10 oC

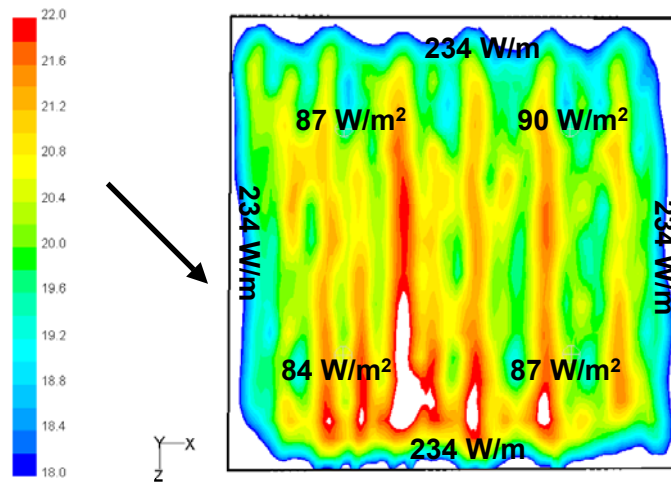
De kas waarbij de windrichting loodrecht op de nokrichting staat heeft een grotere warmteafgifte dan wanneer de windrichting parallel aan de nokrichting staan. Dit komt door de turbulentie die extra wordt opgewekt als de wind loodrecht over de kas stroomt. Turbulentie zorgt voor een hogere warmteoverdracht. De situatie zoals weergegeven in Figuur 18 is hierdoor minder extreem dan in Figuur 17. Bij deze windrichting zal een regelbaar gevelverwarmingsnet dus minder nut hebben.

### Conclusie

Een regelbaar gevelverwarmingsnet kan temperatuurverschillen gedurende de nacht bij de gevel verkleinen. Een regelbaar gevelverwarmingsnet is vooral van belang bij lagere buitentemperaturen en windsnelheden boven de 2 ms<sup>-1</sup> waarbij de temperatuurverschillen in de kas groter worden dan 2 K. Deze situatie treedt op als de warmteafgifte in de kas boven de 150 W/m<sup>2</sup> komt, hetgeen ongeveer 1000 uur per jaar voorkomt.

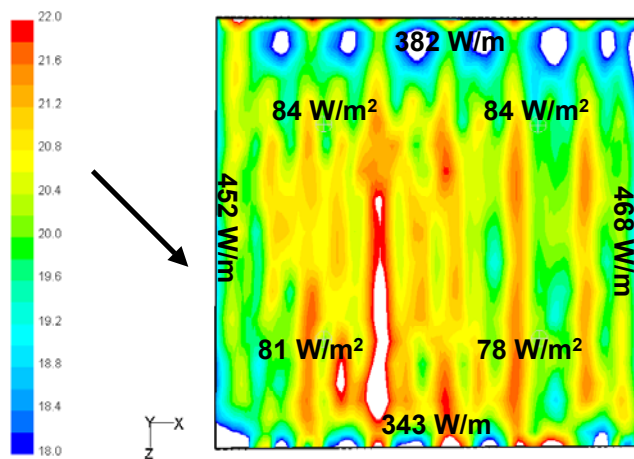
### 3.2 Berekeningen van de temperatuurverdeling gedurende de dag

Voor de dagsituatie wordt aangenomen dat de zon-instraling 200 Wm<sup>-2</sup> in de kas is. Deze warmte wordt volledig door het gewas geabsorbeerd waarbij 50% wordt omgezet in latente warmte (waterdamp) en 50% in voelbare warmte.



Figuur 19 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  waarbij er  $100 \text{ Wm}^{-2}$  aan voelbare warmte t.g.v. de zon aan het gewas wordt toegevoerd

De zon-instraling heeft grote gevolgen voor de temperatuurverdeling in de kas. Het verwarmingssysteem hoeft minder warmte aan de kas toe te voeren, hetgeen er bij de huidige regeling toe leidt, dat ook het gevelverwarmingsnet minder warmte gaat afgeven. Gevolg is dat de temperatuur aan de gevel daalt, zoals te zien is in Figuur 19 met berekeningsresultaten bij een ongeregeld gevelverwarmingsnet. Aan de zuidzijde (bovenste deel) daalt de temperatuur aan de gevel tot  $15.5^\circ\text{C}$ . In Figuur 20 is het gevelverwarmingsnet regelbaar gemaakt.



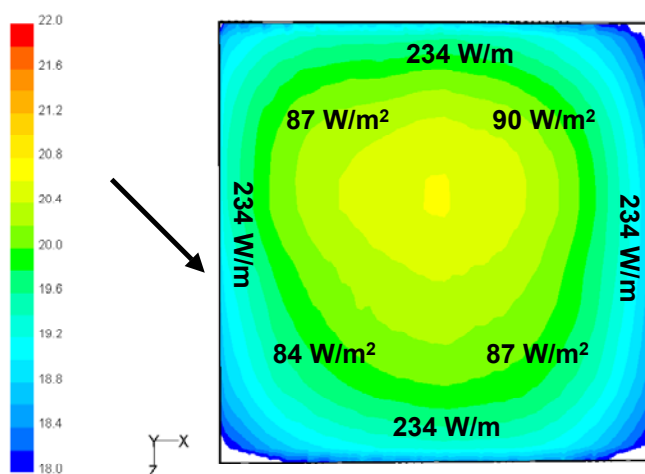
Figuur 20 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  waarbij er  $100 \text{ Wm}^{-2}$  aan voelbare warmte aan het gewas wordt toegevoerd waarbij het gevelverwarmingsnet geregeld kan worden

De temperatuurverdeling is gelijkmatiger door het gebruik van een regelbaar gevelverwarmingsnet (Figuur 20). De minimale temperatuur is  $16.5^\circ\text{C}$  geworden een verbetering van  $1^\circ\text{C}$  ten opzichte van de oude situatie. Door het vermogen aan de gevel verder te vergroten,

zal de minimale temperatuur uiteraard verder afnemen maar daardoor zal het gebied met een hogere temperatuur aan de gevel groter worden. Overigens komt de situatie waarbij de buitentemperatuur lager is dan  $0^{\circ}\text{C}$ , de windsnelheid  $5\text{ ms}^{-1}$  en de globale straling  $200\text{ Wm}^{-2}$  in het algemeen niet vaak voor. Temperatuur onder de  $0^{\circ}\text{C}$  met een zon-instraling van meer dan  $200\text{ Wm}^{-2}$  komt 10 uur voor, van meer dan  $100\text{ Wm}^{-2}$  komt 28 uur voor. In de praktijk moet er ook vrijwel altijd geventileerd worden als de zon-instraling substantieel wordt, deze situatie wordt in paragraaf 3.5 beschreven.

### 3.3 Gebruik van scherm

Het effect van een scherm op de temperatuurverdeling in de kas is berekend. Figuur 21 laat de situatie zien waarbij het scherm op een hoogte van 4 meter in de kas gesloten is. In deze situatie is er geen gevelschem aanwezig. Het gevelverwarmingsnet loopt mee met het ondernet zoals in de conventionele kas.

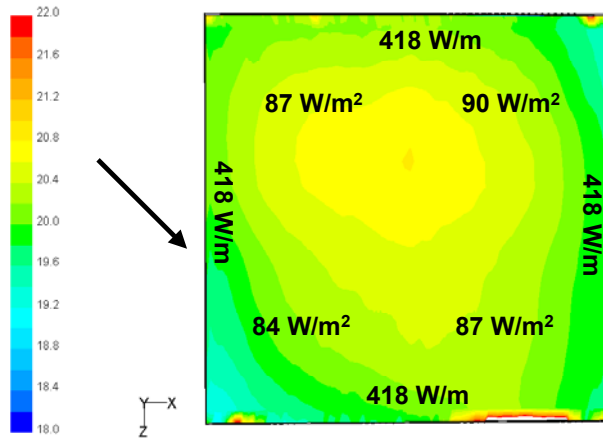


Figuur 21 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5\text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $0^{\circ}\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $-10^{\circ}\text{C}$  bij gebruik van een scherm zonder gevelschem

De temperatuurverdeling in de kas is veel gelijkmatiger door de aanwezigheid van het scherm. De onregelmatigheden veroorzaakt door de vorm van het dek worden verminderd door het scherm. Het scherm heeft tot gevolg dat minder dan de helft van het verwarmingsvermogen nodig is om de kas op  $20^{\circ}\text{C}$  te houden. Dit komt goed overeen met de theorie over isolatie door schermen en met ervaringen uit de praktijk met een scherm.

Als er geen gevelschem aanwezig is zal de gevelverwarming meer warmte moeten afstaan om het temperatuurverschil in de kas richting de gevels te verkleinen.

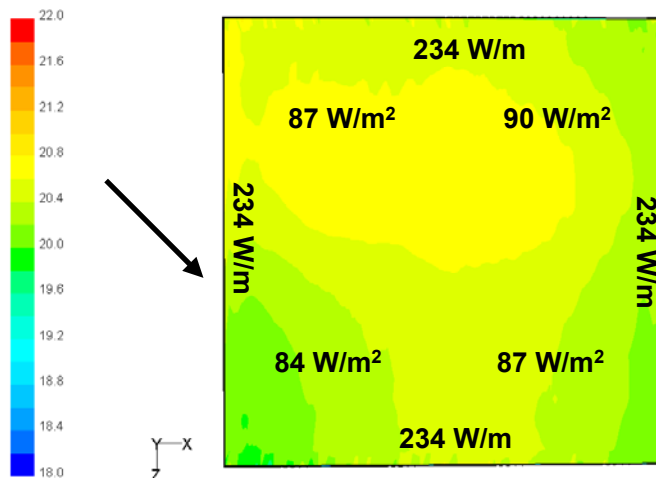




Figuur 22 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  bij gebruik van een scherm zonder gevelschem waarbij met het regelbare gevelverwarmingsnet de temperatuurgradiënt wordt gecompenseerd

In Figuur 22 is het temperatuurverschil richting de gevels gecompenseerd met de regelbare gevelverwarming. De verwarmingscapaciteit van de gevelverwarmingsnetten moet bijna worden verdubbeld om het temperatuurverschil te verkleinen binnen de range van  $2^\circ\text{C}$ .

In de praktijk wordt bij het installeren van een scherm ook meestal een gevelschem geïnstalleerd. In Figuur 23 is de situatie te zien als er ook een gevelschem aanwezig is voor de situatie met een ongeregeld gevelverwarmingsnet.



Figuur 23 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  bij gebruik van een scherm met gevelschem

Als er een gevelschem aanwezig is, worden de temperatuurverschillen onder het scherm minimaal (minder dan  $1^\circ\text{C}$ ). De temperatuurverschillen zijn zelfs kleiner dan bij een regelbaar gevelverwarmingsnet. Het positieve effect van een scherm op horizontale temperatuurverschillen

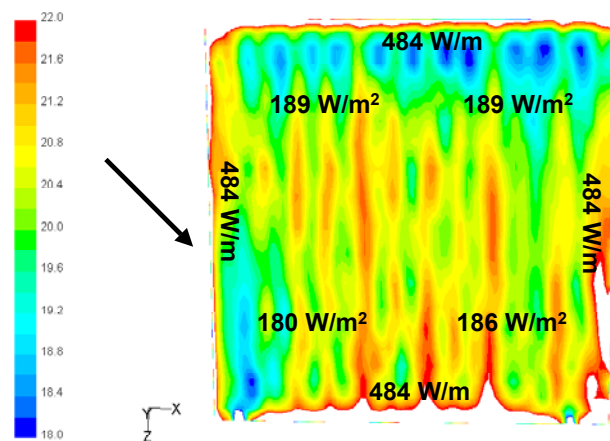
is al eerder uit onderzoek naar voren gekomen (Bakker en Holsteijn, 1989). Een regelbaar gevelverwarmingsnet is voor deze situatie dus absoluut niet van belang.

### Conclusie

Voor de situaties waarbij het scherm in combinatie met een gevelschem gesloten is, is een regelbaar gevelverwarmingsnet overbodig.

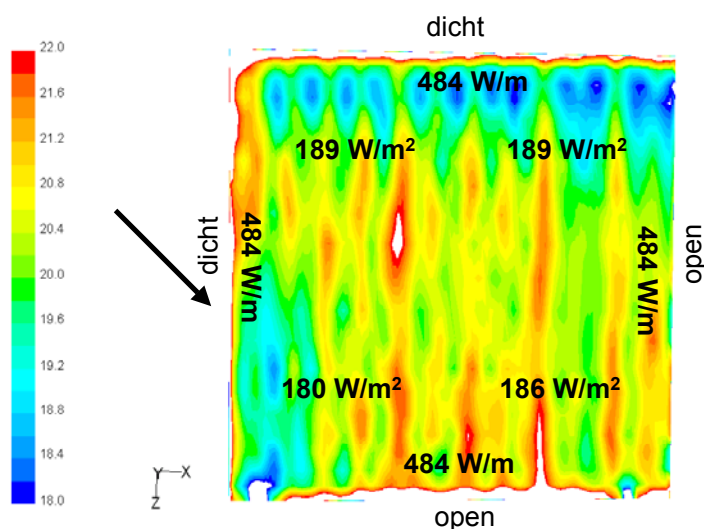
### 3.4 Gevelschermen in plaats van gevelverwarmingsnet regelen

Uit bovenstaande berekeningen komt duidelijk naar voren dat gebruik van schermen een positieve invloed heeft op de temperatuurverdeling in de kas. Energetisch is het beter om in plaats van een regelbaar gevelverwarmingsnet het gevelschem te gebruiken om temperatuurverschillen te voorkomen. Hoewel buiten de scope van dit project vallend, is wegens de recente ontwikkeling van Hortimax Roll-logic® en de resultaten uit de vorige paragraaf een additionele berekening uitgevoerd om het effect van een regelbaar gevelschem zonder bovenscherm te bepalen. De investering van meetboxen en de aansluiting op de klimaatcomputer blijft zoals bij een regelbaar gevelverwarmingsnet. In plaats van investering in kleppen komt een investering in gevelschermen.



Figuur 24 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $5 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  waarbij een gevelschem met een hoogte van 2 meter wordt toegepast

In Figuur 24 is het resultaat te zien als het gevelschem wordt gebruikt om de gevelverliezen te verminderen. Het gevelschem wordt niet rondom gebruikt omdat de temperatuur langs de gevel dan te hoog wordt. De temperatuurgebieden onder de  $18^\circ\text{C}$  welke nog te zien waren in de oorspronkelijke situatie (Figuur 12), zijn verdwenen. Wel is het gebied met een te hoge temperatuur groter geworden. Als temperatuurverschillen met het gevelschem moeten worden opgelost, zal dus wel een regelbaar gevelschem nodig zijn. Als de schermen langs de gevels onafhankelijk van elkaar geregeld kunnen worden, wordt de temperatuurverdeling zoals in Figuur 25 is weergegeven.



Figuur 25 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van 5 m/s diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van 0 °C en een hemeltemperatuur van –10 °C waarbij een gevelschem met een hoogte van 2 meter wordt toegepast op de zuidzijde en de westzijde

De te hoge temperatuur langs de noordzijde en oostzijde is nu minder dan in Figuur 24. In het geval van hoge lokale temperaturen heeft een regelbaar gevelverwarmingsnet (Figuur 14) een voordeel ten opzichte van een regelbaar gevelschem gezien het feit dat de temperatuur van het gevelverwarmingsnet kan worden verlaagd.

### Conclusie

Een regelbaar gevelschem in combinatie met de conventionele niet regelbare gevelverwarming is minder goed regelbaar dan de situatie met een regelbaar gevelverwarmingsnet. Gebieden met een hoge temperatuur kunnen niet worden voorkomen. Een regelbaar gevelschem heeft wel het voordeel dat er minder energie wordt gebruikt dan bij een regelbaar gevelverwarmingsnet.

### 3.5 Temperatuurverdeling bij ventilatie

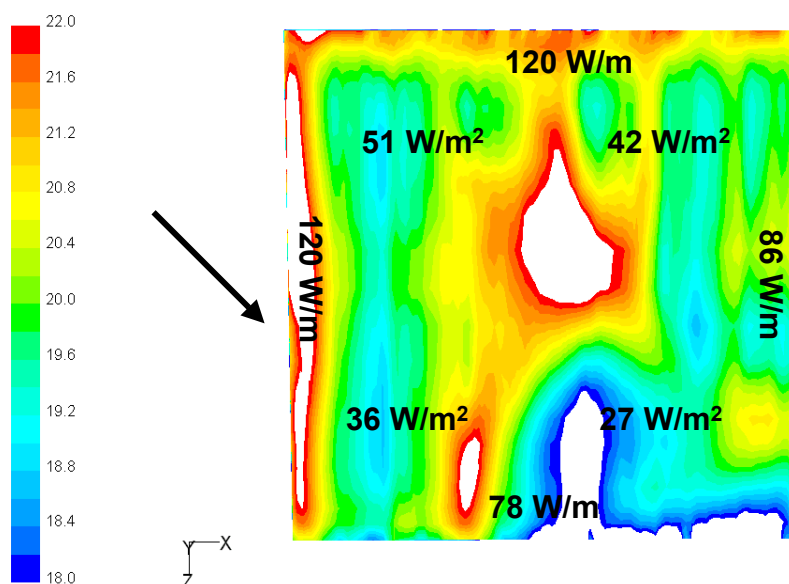
Bij temperatuurintegratie is het niet alleen van belang dat de temperatuur goed verdeeld is als de temperatuur onder de ingestelde gemiddelde temperatuur daalt, maar ook als deze daarboven komt. Als bijvoorbeeld aan de gevel de temperatuur lokaal maar 1°C hoger is dan de gemiddelde ingestelde temperatuur en in de rest van de kas 2°C, dan wordt de temperatuursom over de integratieperiode op deze locatie te laag. Dit kan gevolgen hebben voor de productie. Om deze reden is er ook gekeken naar de temperatuurverdeling bij ventilatie.

In het model zijn voor deze berekeningen de ramen als gaten in het dek gemodelleerd. Het opnemen van de geometrie van de ramen in het model maakt het model te complex. De computercapaciteit is niet voldoende om deze details te kunnen berekenen. De veronderstelling is, dat het eenvoudige model zonder de details van het raam een goed beeld kan geven van de klimaatverdeling in de kas tijdens ventilatie. Van het totale dekoppervlak kan 6.25% worden

geopend. Verkleining van het raamoppervlak kan niet vanwege beperkingen aan het simulatie model.

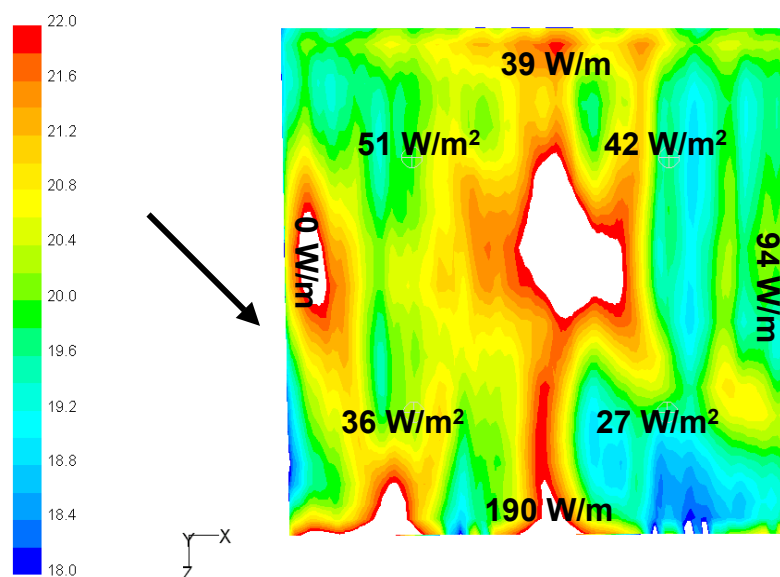
Een berekening met ventilatie geeft een minder stabiele oplossing dan zonder. Een kleine verandering in de verwarmingcapaciteit kan ervoor zorgen dat de temperatuurverdeling drastisch verandert. Deze berekeningen nemen dan ook veel tijd in beslag.

Onderstaande berekening is uitgevoerd voor de situatie met een zon-instraling van  $100 \text{ W/m}^2$ , een buitentemperatuur van  $15^\circ\text{C}$  en een windsnelheid van  $1 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas. Voor deze waarden is gekozen omdat deze situatie regelmatig voorkomt en in deze situatie de kas nog steeds verwarmd moet worden.



Figuur 26 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $1 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $15^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $5^\circ\text{C}$  en een zonneinstraling van  $100 \text{ W/m}^2$ .

De temperatuurverdeling met een ongeregeld gevelverwarmingsnet (Figuur 26) komt overeen met waarnemingen in de praktijk. De hoge temperaturen bevinden zich aan de zijde van de kas waar de wind vandaan komt en de koude lucht bevindt zich aan de andere zijde van de kas. De gemiddelde luchtstroming is in de kas ook tegengesteld aan de windrichting. De temperatuurverschillen zijn groot in vergelijking tot de praktijk. De reden voor deze afwijking is de grote raamopening. In de praktijk wordt het raam in mindere mate geopend om het vocht uit de kas te krijgen. De ventilatievoud is  $2.8 \text{ h}^{-1}$  bij deze windsnelheid wat goed overeenkomt met de theorie.



Figuur 27 Temperatuurverdeling bij een windsnelheid van  $1 \text{ ms}^{-1}$  diagonaal op de kas bij een omgevingstemperatuur van  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  en een hemeltemperatuur van  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  en een zonneinstraling van  $100 \text{ Wm}^{-2}$  waarbij het gevelverwarmingsnet is aangepast.

Met een regelbaar gevelverwarmingsnet (Figuur 27) wordt het lokale koude gebied en het warme gebied langs de gevel kleiner. Een regelbaar gevelverwarmingsnet heeft dus een positieve invloed op het klimaat bij ventilatie met de kantekening dat de ventilatie in de praktijk minder groot is dan in deze berekening.

### 3.6 Invloed van de omgeving

In de praktijk komt het niet voor dat een kas in een vlak veld staat zonder andere kassen, gebouwen of bomen in de buurt. Obstakels voor de wind hebben een grote invloed op de warmteoverdracht aan de gevels. Als een deel van de gevel vrij in de wind staat en het andere deel wordt afgeschermd door een rij struiken bijvoorbeeld dan moet de gevelverwarming hierop worden aangepast. Deze aanpassingen worden meestal al gedaan op het moment dat de kas wordt gebouwd (Esmeijer, 2000). Verwarmingsbuizen die bijvoorbeeld langs het ketelhuis lopen worden geïsoleerd. Een regelbaar gevelverwarmingsnet hoeft voor vaste obstakels rond de kas dus geen toegevoegde waarde te hebben.

### 3.7 Kosten voor de regeling

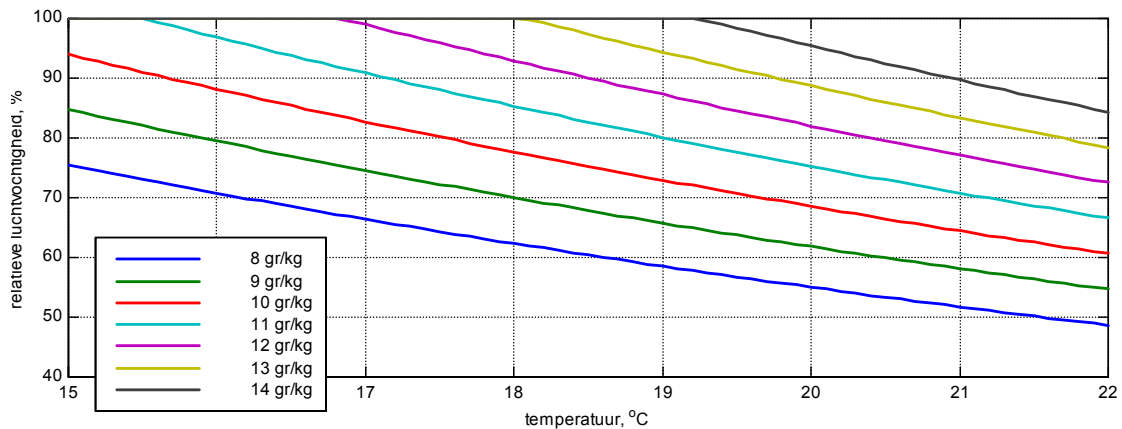
Voor een goede regeling zullen meetboxen langs de gevels geplaatst moeten worden. Het plaatsen van een meetbox kost circa 2000 Euro. Het installeren van een klep in de verwarming en de aansluiting op de computer zal ook zo'n prijs met zich meebrengen. De overall kosten worden geschat op 10 000 Euro/ha.

De aanvoer van het ondernet kan plaatsvinden via het pad of via de gevel. In het geval van de gevel kan de warmteafgifte niet tot nul worden gereduceerd. Het gevelverwarmingsnet is daardoor minder regelbaar.

Over de kosten van het installeren van een regelbaar gevelschem is onvoldoende bekend.

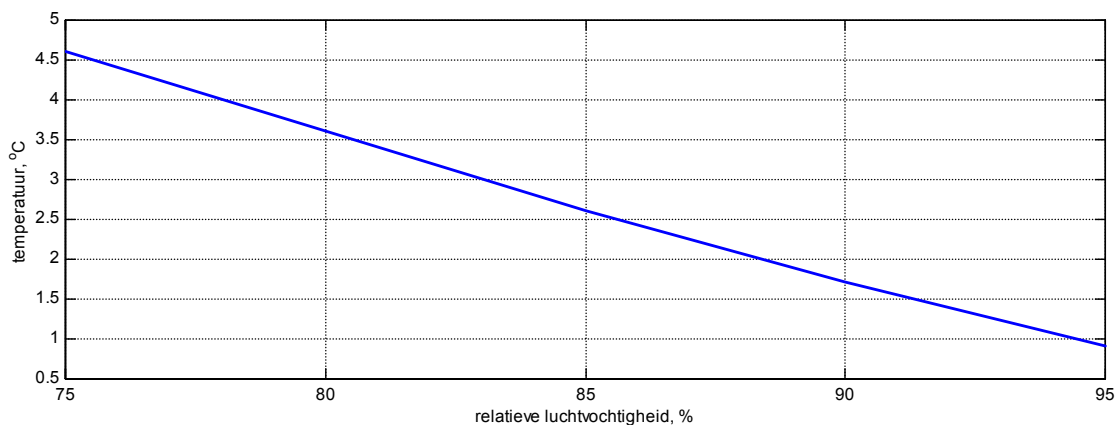
### 3.8 Economisch perspectief

Een vermindering van de horizontale temperatuurverdeling geeft de mogelijkheid tot een verhoging van het setpoint van de relatieve luchtvochtigheid zonder dat er condensatie optreedt. Daarnaast kan de range bij temperatuurintegratie ruimer worden gekozen zonder dat de temperatuur lokaal te ver daalt. In onderstaande figuur is de relatie tussen de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid voor verschillende vochniveaus in de lucht te zien.



Figuur 28 De relatieve luchtvochtigheid als functie van de temperatuur voor lucht met verschillende vochniveaus

Kaslucht van 20 graden en een luchtvochtigheid van 85% bevat ongeveer 12.5 gr/kg vocht. Als de luchttemperatuur daalt onder de 17.5 graden zal condensatie optreden. Onderstaande figuur is afgeleid van Figuur 28 en laat de relatie zien tussen de temperatuur minus de dauwpuntstemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid.



Figuur 29 Het temperatuurverschil tussen het dauwpuntstemperatuur en de kasluchttemperatuur als functie van de relatieve luchtvochtigheid

Een verlaging van hoging van de lokale temperatuurverschillen met een graad een graad heeft tot gevolg dat de relatieve luchtvochtigheid 5% hoger mag zijn.

De effecten van verkleining van de veiligheidsmarges is in onderstaande tabel weergegeven. De berekeningen zijn uitgevoerd met KASPRO voor tomaat die op een standaardwijze wordt geteeld op basis van het SEL jaar.

Tabel 2 Het jaarlijkse gasverbruik tengevolge van een verandering in de klimaatinstellingen voor tomaat

Maatregel	Gasverbruik (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
Normaal (Geen Temp. Integr., RV:85%, minimum buis: 40°C)	46.7
Temperatuur integratie band van 1 graden	45.6 (-2.4%)
Temperatuur integratie band van 2 graden	45.0 (-3.6%)
Temperatuur integratie band van 3 graden	44.6 (-4.5%)
Zonder minimumbuis	43.4 (-7.1%)
Maximum relatieve luchtvochtigheid 90%	44.0 (-5.8%)
Combinatie (TI:3, zonder minimumbuis, RV:90%)	35.5 (-24.0%)

Uit de paragrafen 3.1 t/m 3.5 blijkt dat de temperatuurverschillen in de kas onder kritische omstandigheden met minimaal 1°C kunnen worden verlaagd. Als gevolg hiervan kan de bandbreedte bij temperatuurintegratie met minimaal 1°C worden vergroot, het RV setpoint met 5% verhoogd en de minimumbuis achterwege worden gelaten.

Vergroting van de bandbreedte bij temperatuur integratie met 1°C geeft een besparing van 0.9% tot 2.4%. Verhoging van het setpoint voor de relatieve luchtvochtigheid zorgt voor een besparing van 5.8%. Een minimumbuis wordt ingezet om de luchtstroming in de kas te verhogen en daarmee lokale temperatuurverschillen in de kas te verkleinen. Door het gebruik van de minimumbuis te verminderen kan een aanzienlijke energiebesparing (7.1%) worden verwezenlijkt. Door een combinatie van de verschillende klimaatinstellingen kan 24% gas worden bespaard, wat neerkomt op een besparing van Euro 1.79 per m<sup>2</sup>. Voor een kas van 4 ha komt die neer op een besparing van 71600 Euro. De terugverdientijd voor het regelbaar maken van de gevelnetten (paragraaf 3.7) is circa 1 jaar.

De relatieve energiebesparing bij een combinatie van de verschillende maatregelen ligt hoger dan de optelling van de besparing van de verschillende maatregelen. Dit komt omdat als de maatregelen individueel worden ingezet deze belemmerd worden door de andere factoren. Zo zal een minimumbuis de temperatuur integratie beïnvloeden in de zin dat de temperatuur niet ver genoeg kan dalen.

Tenslotte is er nog het effect van horizontale temperatuurverschillen op de productie.

Horizontale temperatuurverschillen in de kas geeft aanleiding tot ziektes. Een studie van Bakker en Holsteijn (1989) laat zien dat de aanwezigheid van temperatuurverschillen in de kas gevolgen heeft op de productie. Zij concludeerden dat temperatuurverschillen van 2 tot 3 K meer dan 2 Euro/m<sup>2</sup> aan productie kunnen kosten.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

Het rapport laat zien dat een regelbaar gevelverwarmingsnet zorgt voor een betere horizontale temperatuurverdeling in de kas.

- Lokale temperatuurverschillen van meer dan 2 graden kosten productie. Bij toepassing van temperatuur integratie kunnen grote temperatuurverschillen ernstige gevolgen hebben voor de productie.
- Zonder een regelbaar gevelverwarmingsnet zijn lokale temperatuurverschillen van meer dan 2 graden ten opzichte van het setpoint worden nabij de gevel pas waargenomen bij een warmteverlies naar de omgeving van  $150 \text{ W/m}^2$ , wat overeenkomt met een gasverbruik van ongeveer  $150 \text{ m}^3$  per uur per hectare. Het warmteverlies wordt bepaald door het temperatuurverschil met de omgeving en de windsnelheid.
- Met een regelbaar gevelverwarmingsnet is het mogelijk de temperatuurverschillen met 1 graad te verkleinen.
- De verkleining van de temperatuurverschillen nabij de gevel heeft tot gevolg dat de bandbreedte voor temperatuur integratie kan worden vergroot, de minimumbuis kan worden verlaagd en dat het setpoint voor de relatieve luchtvochtigheid kan worden verhoogd. Deze maatregelen geven een individuele besparing tussen de 1 en 7%. Al deze maatregelen gelijktijdig toepassen kan tot een besparing van meer dan 20% leiden.
- Als het setpoint van de relatieve luchtvochtigheid wordt verhoogd, de minimumbuis wordt verlaagd en temperatuur integratie wordt toegepast dan kan een regelbaar gevelverwarmingsnet binnen een jaar worden terugverdiend.
- Een kas waarbij de aanvoer van het ondernet verloopt via het pad is de toepassing van een regelbare gevelverwarmingsnet eenvoudiger als wanneer de aanvoer verloopt via de gevelverwarming.
- De temperatuurverschillen nabij de gevel zijn groter dan in de rest van de kas. Meetboxen nabij de gevel zullen het gevelverwarmingsnet moeten regelen.
- De windrichting is van invloed op de temperatuurverdeling in de kas.
- Een kas met een scherm en een gevelscherm heeft minimale horizontale temperatuurverschillen. De temperatuurverdeling is optimaal in deze situatie. In dat geval is de noodzaak voor een regelbare gevelverwarmingsnet dan ook nihil.
- Voor tuinders die schermen gebruiken verdient het aanbeveling om gebruik te maken van een gevelscherm, om koude gebieden nabij de gevel te voorkomen
- In plaats van het verwarmingsnet regelbaar maken, kan ook een regelbaar gevelscherm worden gebruikt. Dit heeft als voordeel dat er minder energie nodig is om een lokale temperatuurdaling te compenseren. Echter de investering en het onderhoud van een regelbaar gevelscherm zullen waarschijnlijk (niet in de scope van dit onderzoek) hoger zijn dan een regelbaar gevelverwarmingsnet. en een gebied met een hoge temperatuur kan niet worden gecompenseerd.
- Het verdient aanbeveling het systeem in een praktijk experiment te toetsen.



**Overall conclusie**

Tuinders die geen schermen gebruiken en regelmatig een gasverbruik hebben van meer dan 150 m<sup>3</sup> per uur per hectare en voorzichtig omgaan met de bandbreedte bij temperatuur integratie en het RV-setpoint, verdient het aanbeveling om gebruik te gaan maken van regelbare gevelverwarmingsnetten.

## Literatuur

- Bakker J C; Holsteijn G P A van (1989). Horizontal temperature distribution in heated glasshouses: causes and effects. *Acta Horticulturae*, **245**, 226-231
- Breuer J J G; van de Braak N J (1989). Reference year for Dutch greenhouses. *Acta Horticulturae*, **248**, 101-108
- Campen J B; Bot G P A (2002). Dehumidification in Greenhouses by Condensation on Finned Pipes. *Biosystems Engineering* 82(2), 177-185
- Campen J.B. (2002). Greenhouse characteristics and climatic conditions using 3D CFD calculations. ISHS congress submitted for *acta horticulturae*.
- Campen J B; Bot G P A (2003). Determination of Greenhouse Specific Aspects in Ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 84(1) 67-77 doi; 10.1016/S1537-5110(02)00221-0.
- Esmeijer M; Tuin R; Meer M van der (2000). Het oplossen van horizontale temperatuurverschillen op siergewasbedrijven. Rapport 262, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk
- Fluent 5 User's Guide (1998). Fluent Incorporated. Lebanon (USA)
- Nijs L, Van de Berg G A, 1998. Ontwikkeling en introduceren van een methodiek ter oplossing van klimaatverschillen in kassen, ISSN 1385-3015;147
- Swinkels G.L.A.M.; Huijs J.P.G.; de Zwart H.F. (2000). Standaard teelten Nota P 2000-85.
- Van de Braak N J, Campen J B, Kempkes F L K, De Zwart H F, 2002. Effecten combinatie temperatuurintegratie en energieschermen. IMAG Rapport P2002-59, Wageningen
- Versteeg HK; Malalasekera W (1995). An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method. Harlow: Longman ISBN: 0-582-21884-5