

Naturgasbaserad infravärme i växthus

Fas II

Systemoptimering

©Svenskt Gastekniskt Center – Januari 2004



Mikael Näslund, Lunds Tekniska Högskola
Hartmut K. Schüssler, Sveriges Lantbruksuniversitet, Alnarp
Sven-Åke Ljungberg, Högskolan i Gävle

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat e.dyl. i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC:s hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verkssamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare:

Svenska Gasföreningen, Sydkraft Gas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Sydkraft Gas AB
Öresundskraft AB
Göteborg Energi AB
AB Fortum Värme samägt med Stockholms stad
Nova Naturgas AB
Amgas Industrigassystem AB
UBA – Uno Borgstrand AB
AB Kjell-Ingvars
Olsson & Wahlqvist Service AB
Statens Energimyndighet

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

Sammanfattning

Växthus har en hög energianvändning och energikostnaden är en stor del av produktionskostnaden för odlaren. Infravärme (IR) har i industrilokaler och liknande visat sig minska uppvärmningsbehovet. IR har studerats i samma syfte i växthus. Speciell vikt har lagts på att också studera plantornas tillväxt och kvalitet.

Mätningar av temperaturerna i växthusen har visat att nettouppvärmningsbehovet minskade med strax över 10% för det IR-värmda huset i jämförelse med konventionellt värmda växthus. En besparing på 15–20% torde vara möjlig med mindre ändringar. Mätningar av temperaturer på valda platser i växthuset och termografering visade på temperaturskillnader mellan olika punkter på växthusborden i det IR-värmda växthuset. Upprepad termografering utförd under likartade utstrålningsförhållanden visar att produktionsborden i växthuset med IR-strålare har variationer i strålningstemperatur och strålningstemperaturmönster förorsakad av inhomogen strålningsvärme från de gasdrivna brännarna och mediarören. Dessa variationer i strålningsvärme ger i sin tur upphov till variationer i växtbetingelser och tillväxtförlopp hos sticklingar och saluplantor. Resultatet från termografi- och tillväxtstudierna på plantmaterialet indikerar att relativa luftfuktigheten är en viktig faktor för att omfördela strålningsvärmen och säkerställa ett optimalt mikroklimat vid användning av IR-strålare i växthus.

Dessa skillnader kan reduceras om växthusets planlösning tillåter placering så att IR-strålarnas strålningsbilder delvis överlappar varandra. Även val av brännareffekt, luftöverskott och strålningsrörets utformning inverkar. Det diskuteras hur en god utformning erhålles.

Noggranna studier av sticklingars rotutveckling visade på skillnader orsakade av plantornas placering i förhållande till undervärmerören. Skillnaderna utjämnades när plantorna efter omplantering odlades vidare till färdigvara. Ett växtslag visade sig bli kompaktare och därmed få förhöjd kvalitet då IR-värme användes.

Summary

The energy use is high in greenhouses and the cost of energy is a substantial part of the plant production cost. Infrared heating (IR) has been shown to decrease the heating demand in industrial facilities and similar buildings. IR was studied with the same purpose for greenhouses. Special emphasis has also been put on the plant growth and quality.

Temperature measurements showed a slightly more than 10% decrease in net heating demand compared to the reference houses in the same facility. A saving of 10–15% should be possible with some improvements. Temperature measurements at a few selected points in the infrared heated greenhouse and thermography showed differences. Repeated thermography during similar radiation conditions showed that the production tables in the infrared heated house had differences in radiation temperature and distribution caused by inhomogeneous radiation from the radiating tubes. These radiation variations cause differences in conditions and growth for cuttings and plants in later stage of growth. The thermography study also indicates that the humidity is an important factor for redistributing the radiation and ensure an optimal micro climate when infrared heaters are used in greenhouses.

These differences can be reduced if the greenhouse floor layout allows radiating tubes to be located in order to make adjacent radiation fields partly overlapping. Also, burner input, excess air ratio and radiation tube and reflector design are influential for the performance. Good design criteria are discussed.

Careful studies of the root development also showed differences caused by the plant location with regard to the heating tubes. The differences were reduced after repotting and further growth. One cultivation even turned out to be more compact and thus of higher quality when infrared heating was used.

Innehåll

Sammanfattning	1
Summary	2
Beteckningar	6
1 Inledning	8
1.1 Resultat från fas I	8
1.2 Inriktning på projektfas II	8
1.3 Genomförande	9
1.3.1 Projektadministration	9
1.4 Anläggningsbeskrivning	9
2 Energianvändning under fas II	13
2.1 Gasförbrukning	13
2.2 Inomhusklimat	14
2.2.1 Egenskaper över en längre period	14
2.2.2 Lokala temperaturer på borden	19
3 Termografering	28
3.1 Introduktion	28
3.2 Fältstudier och metodik	29
3.3 Termografiresultat	31
3.3.1 Mätserie 1. Växthus med plantor och IR-strålare	32
3.3.2 Mätserie 2–4. IR-växthus och referensväxthus med vatten- baserat värmesystem – utan plantor	34
3.4 Slutsatser av termograferingen	36
4 Växtaspekter	38
4.1 Målsättning för den biologiska odlingsprocessen	38
4.1.1 Växtslag och odlingsperiod	38

4.1.2	IR-anläggningen ur biologisk synvinkel	39
4.2	Växternas utveckling i jämförelse med konventionell uppvärmning .	39
4.3	Mätningar och bedömningar	40
4.4	Resultat för olika växtslag	42
4.4.1	<i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' – julstjärna, sticklingar 1	42
4.4.2	<i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. ex Klotzsch 'Winter Rose' – Färdigvara	43
4.4.3	<i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. Ex Klotzsch 'Sonora', julstjärna – sticklingar	44
4.4.4	<i>Pelargonium x hortorum</i> L.H. Bailey 'Grand Prix' – sticklingar	50
4.4.5	<i>Argyranthemum frutescens</i> (L.) Sch.Bib. 'Dana', margerit – Färdigvara	55
5	Förbättringsmöjligheter på infrasystemet	58
5.1	Infrastrålarna	58
5.1.1	Modell för strålningsrörets temperatur	59
5.1.2	Beräkningar av temperatur och IR-strålning	61
5.1.3	Sammanfattande ord om infrastrålarnas egenskaper	63
5.2	Växternas värmeöverföring	64
5.2.1	Bladtemperatur	64
5.3	Sammanfattande ord	69
5.4	Jämförelse med annan anläggning: Kloer Gartenbau, Dorsten	70
5.5	Möjligheter till höjd verkningsgrad	72
6	Slutsatser och rekommendationer	74
6.1	Energianvändning och inomhusklimat	74
6.2	Tillväxtresultat	75
6.3	Den goda installationen	75
A	Tillväxtresultat	79
A.1	Julstjärna, <i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' – sticklingar 1	80
A.2	Julstjärna, <i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. ex Klotzsch 'Winter Rose' – färdigvara	81
A.3	Julstjärna, <i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' – sticklingar	82
A.4	Julstjärna, <i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' Produktion av färdigvara i en period med låg utomhustemperatur	84
A.5	Pelargon, <i>Pelargonium x hortorum</i> L.H. Bailey 'Grand Prix' – Sticklingar, omgång 1	85

A.6	Pelargon, <i>Pelargonium x hortorum</i> L.H. Bailey 'Grand Prix' – Stick- lingar, omgång 2, sticklingar	87
A.7	Margerit, <i>Argyranthemum frutescens</i> (L.) Sch.Bib. 'Dana' – färdigvara	92

Beteckningar

A	Area, m^2
c_p	Värmekapacitivitet, kJ/kg K
D	Diameter, m
g	Tyngdaccelerationen, $9,81 \text{ m/s}^2$
h	Värmeöverföringskoefficient, $\text{W/m}^2 \text{ K}$
p_{H_2O}	Vattenångans partialtryck, Pa
$\dot{Q}$	Värmeeffekt, W
r	Transportmotstånd, s/m
r	Radie, m
T	Temperatur, K
x	Längdkoordinat, m

Grekiska symboler

β	Volymutvidgning för luft, $1/\text{K}$
γ	Psykrometrisk koefficient, Pa/K
δ	Lutning för vattenångans mättnadstryck, Pa/K
ϵ	Emissionsfaktor, $-$
Θ	Temperatur, $^\circ\text{C}$

λ	Värmeledning, W/m K
ν	Kinematisk viskositet, m^2/s
ρ	Densitet, kg/m^3
Φ	Nettostrålning, W/m^2
ϕ	Relativ fuktighet, $-$

Index

<i>avg</i>	Avgaser
<i>e</i>	Bladets utsida
<i>film</i>	Film intill bladets yta
<i>i</i>	Bladet
<i>in</i>	Insida
<i>konv</i>	Konvektion
<i>luft</i>	Luften i växthuset
<i>mtrl</i>	Strålningsrörets material
<i>omg</i>	Omgivning
<i>s</i>	Strålning
<i>ut</i>	Utsida

Exponenter

$\star$ Mättat tillstånd
 h Värme

Dimensionslösa tal

Gr Grashof-talet, –

Nu Nusselt-talet, –

Pr Prandtl-talet, –

Ra Rayleigh-talet, –

Re Reynoldstalet, –

Kapitel 1

Inledning

1.1 Resultat från fas I

I korthet innebar projektets första fas att följande slutsatser kunde dras [1].

- Infravärmesystemet behövde justeras några gånger i början av driftperioden.
- Någon definitiv slutsats om lägre energianvändning kunde inte dras. Infravärme ger inte högre energianvändning i växthus jämfört med konventionellt system. Lägre lufttemperatur observerades också i det infravärmda huset.
- Växtresultaten var goda. Sticklingar är känsliga under rotbildningen. Skillnader kunde observeras, men när plantorna var färdiga för försäljning hade dessa skillnader försvunnit.

1.2 Inriktning på projektfas II

Samma mätningar och iakttagelser som under den inledande fas I gjordes under fas II. Växternas tillväxt studerades och kvalitetsbedömdes. Mätdata avseende utomhus- och inomhusklimat samlades in. Dessa mätdata hämtades från de datorer som sköter regleringen av växthusen. Data samlades in med 1 respektive 2 minuters intervall.

1.3 Genomförande

Liksom i fas I har regelbundna besök vid AB Kjell-Ingvars växthus i Sunnanå gjorts av Hartmut K. Schüssler och Mikael Näslund för insamling av data över växterna respektive energianvändningen. Dessutom har termografering gjorts av Sven-Åke Ljungberg i både infrahuset och referenshusen. De har också svarat för motsvarande avsnitt i rapporten. Termograferingsresultat har också presenterats vid en konferens i USA [2]. I april 2002 besöktes infravärmda växthus i Tyskland och besöket beskrevs samtidigt med en projektbeskrivning i Gasnytt [3]. Projektresultaten har även presenterats vid "World Gas Conference" [4] och en förkortad version av detta bidrag i Gasnytt [5].

1.3.1 Projektadministration

En referensgrupp har under projektets gång diskuterat genomförande och preliminära resultat. Utöver rapportens författare har i denna grupp ingått Owe Jönsson (SGC), Lennart Johnsen (AB Kjell-Ingvars), Staffan Ivarsson (Sydgas/Sydskraft Gas), Pieter Kronqvist (Sydkraft), Johan Peterson (Amgas), Åke Möller (UBA) och Arne Wahlkvist (Ohlsson och Wahlkvist). Projektet omfattar tiden 1 oktober 2000–31 december 2001. Personalen vid AB Kjell-Ingvars tackas för den hjälp de bistått oss med under projektets genomförande.

1.4 Anläggningsbeskrivning

AB Kjell-Ingvars växthus i Sunnanå ses i figur 1.1. Anläggningen har byggts ut successivt och omfattar idag ca 18000 m². I hus 1 används infravärmesystemet. Hus 2–9 värms med två traditionella gaspannor och hus 10 värms med en ny panna med avgaskondensor.

Infravärmesystemet består av infrastrålare både över och under växthusborden. Undervärme används vid rotning av sticklingar för att öka substrattemperaturen. Ovanvärmen används efter att rötterna bildats. Båda systemen används inte samtidigt.

I studien ingår ett mindre växthus (285 m²) uppvärmt med gasdrivna IR-strålare och ett större referensväxthus uppvärmt med ett konventionellt vattenbaserat radiator system. Växthuset med gas-IR-strålare har två rader av bord för produktion av plantor, en rad där borden har en plastyta och en rad med bord med aluminiumyta. Referensväxthuset har ett stort antal rader med produktionsbord varav en rad närmast en yttervägg valdes som referensobjekt. Borden i referensväxthuset har en yta av plåt.



Figur 1.1: Skiss av AB Kjell-Ingvars växthus. Endast växthusen och värmepannornas placering är markerade

Växthuset med gas-IR-strålare värms upp av sex gasdrivna IR-strålningsrör med reflektorer, varav två är monterade över och fyra under de två produktionsborden. Strålningsrören monterade under borden, vänstra bilden i figur 1.2, används för att ge värme till substratet under en tidig fas av sticklingarnas rotutveckling. Strålningsrören monterade ovanför produktionsborden, högra bilden i figur 1.2, ger värme till plantornas ovanjordiska del tills de är saludugliga som vuxna individer.

Referensväxthuset har ett varmvattenbaserat system med strålningsrör monterat under produktionsborden, vid yttervägg och i taket ovan borden. Både växthuset med gas-IR-strålare och referensväxthuset har en datorstyrd klimatanläggning som styr dels klimatvävar för tak och ytterväggar samt temperatur och luftfuktighet, utifrån av operatören fastställda parametervärden.

Den huvudsakliga skillnaden i kontrollstrategi mellan växthuset uppvärmt med gasdrivna IR-strålare och det konventionellt uppvärmda referensväxthuset är att lufttemperaturen i gas-IR-växthuset inte används som parameter för reglering av värmen i stället används bladtemperaturen hos plantorna som reglerparameter. Denna typ av reglerförfarande kräver att värmefördelningen är jämnt fördelad över plantbeståndet för optimal och jämn tillväxt.



Figur 1.2: Översta bilden visar gasdriven IR-strålare (brännare och strålningsrör) under produktionsborden, och den undre bilden visar strålningsrören över produktionsborden.

Kapitel 2

Energianvändning under fas II

Data för gasanvändning och inomhusklimat i de olika växthusen finns för år 2001, med undantag för någon enstaka vecka och dagar. Detta ger en bättre grund för jämförelser än i fas I då ett datorhaveri förstörde merparten av insamlade data.

2.1 Gasförbrukning

En första grov jämförelse av uppvärmningssystemen kan göras med hjälp av gasförbrukningen under en längre period. För tiden 7 november 2000 till 18 januari 2002 ges gasförbrukningen för den gamla panncentralen, den nya kondenserande pannan och infrasytemet. Gasförbrukningen är också angiven för den växthusyta som varje uppvärmningssystem svarar för.

Tabell 2.1: Energianvändning för perioden 7 november 2000–18 januari 2002

Anläggning	Uppvärmad yta (m ²)	Gasförbrukning	
		(MWh)	(kWh/m ²)
IR	285	164	573
Panncentral	11 703	7 575	647
Kond. panna	6 710	3 253	485

Med tanke på att infravärmesystemet inte är optimerat så får siffrorna behandlas försiktigt. En optimering av infrasytemet och de dimensioneringskriterier som bör användas beskrivs i kapitel 5.

Tabellen visar att de nybyggda växthusen som värms med den kondenserande pannan är effektivast. Den del av växthusen som värms med de äldre icke-kondenserande pannorna kräver 34% mer energi. Huset med infravärme hamnar mitt emellan dessa två värden. Jämförelsen har dock inte tagit hänsyn till pannornas verkningsgrad, reglersystemets prestanda och växthusen termiska kvalitet som isoleringsgrad och antal luftomsättningar. Även förhållandet mellan golvyta och väggyta mot utomhusluften skiljer och där har huset med infravärme mest ytteryta i förhållande till golvytan.

Under fas II var brännarna i infravärmarna justerade till ett läge nära minimieffekten. Detta i kombination med att avgasfläkten arbetar med konstant flöde orsakade ett alltför stort luftöverskott med tillhörande hög avgasförlust. Det beräknas att en injustering till rekommenderad inställning skulle reducera gasförbrukningen med 10%. I fas I kunde inomhusklimatet endast analyseras i begränsad omfattning men det framgick tydligt att användning av infravärme innebar en möjlig sänkning av lufttemperaturen i växthuset.

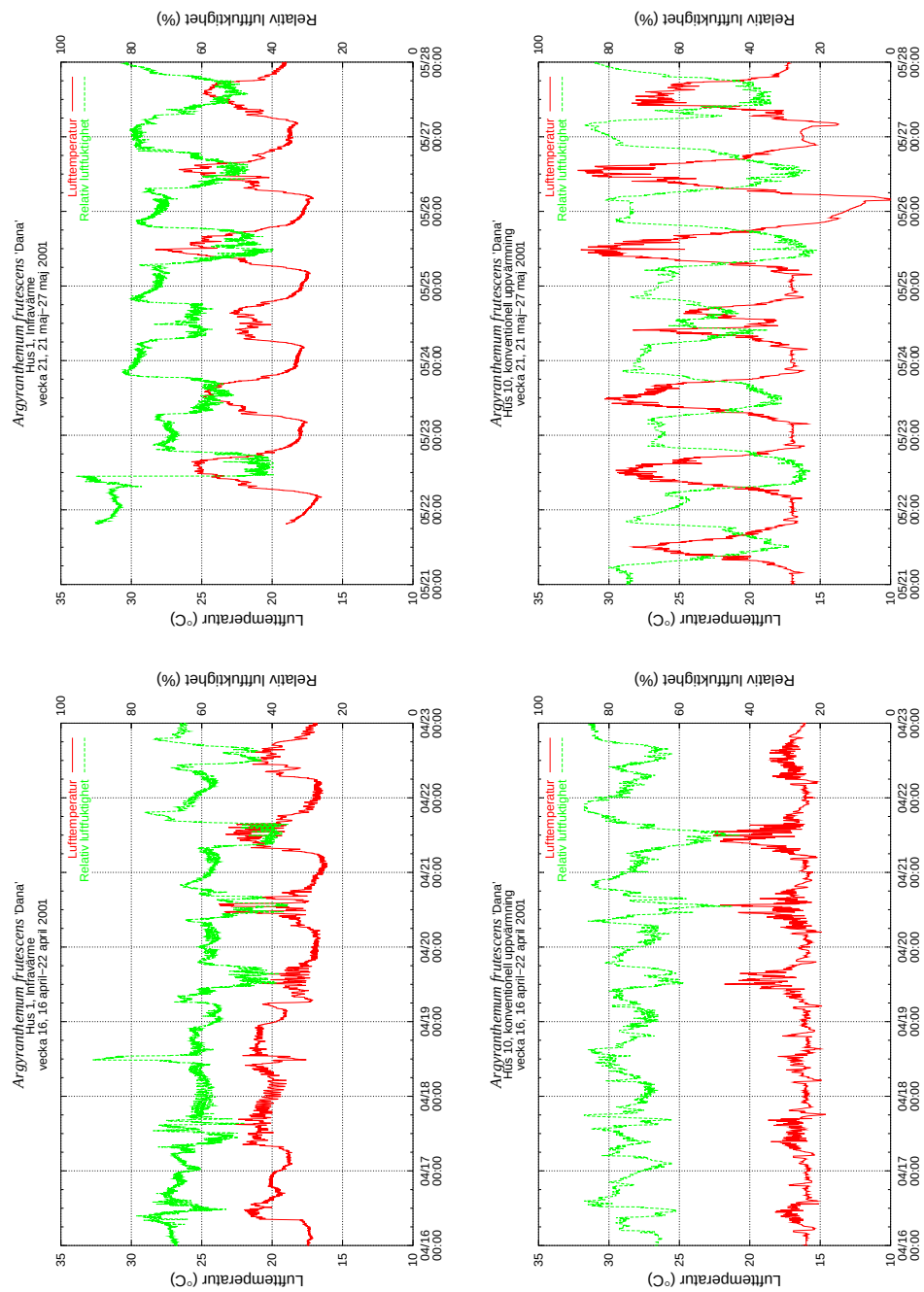
2.2 Inomhusklimat

I fas I framgick att lufttemperaturen i växthuset kunde sänkas med hjälp av infravärme. När undervärme användes var skillnaden minst i jämförelse med konventionell uppvärmning, och uppgick till 0,5–0,8°C medan temperaturen var 1,8–2,0°C lägre för några valda dagar när ovanvärme användes. Att infravärme ger ett annorlunda inomhusklimat än med konventionell värme i växthus illustreras i figur 2.1. De fyra diagrammen visar inomhustemperatur och luftfuktighet i IR-huset under två veckor av odlingen av margeriten *Argyranthemum frutescens* (L.) Sch.Bib. 'Dana', se vidare s. 55. En odling av julstjärnor visar skillnaderna vid varm och kall väderlek. Detta ses i figur 2.2 med det aktuella klimatet redovisat i figur 2.3. Solinstrålningen är betydligt större i september, vilket tydligt ses som betydligt större dygnsvariationer än under december.

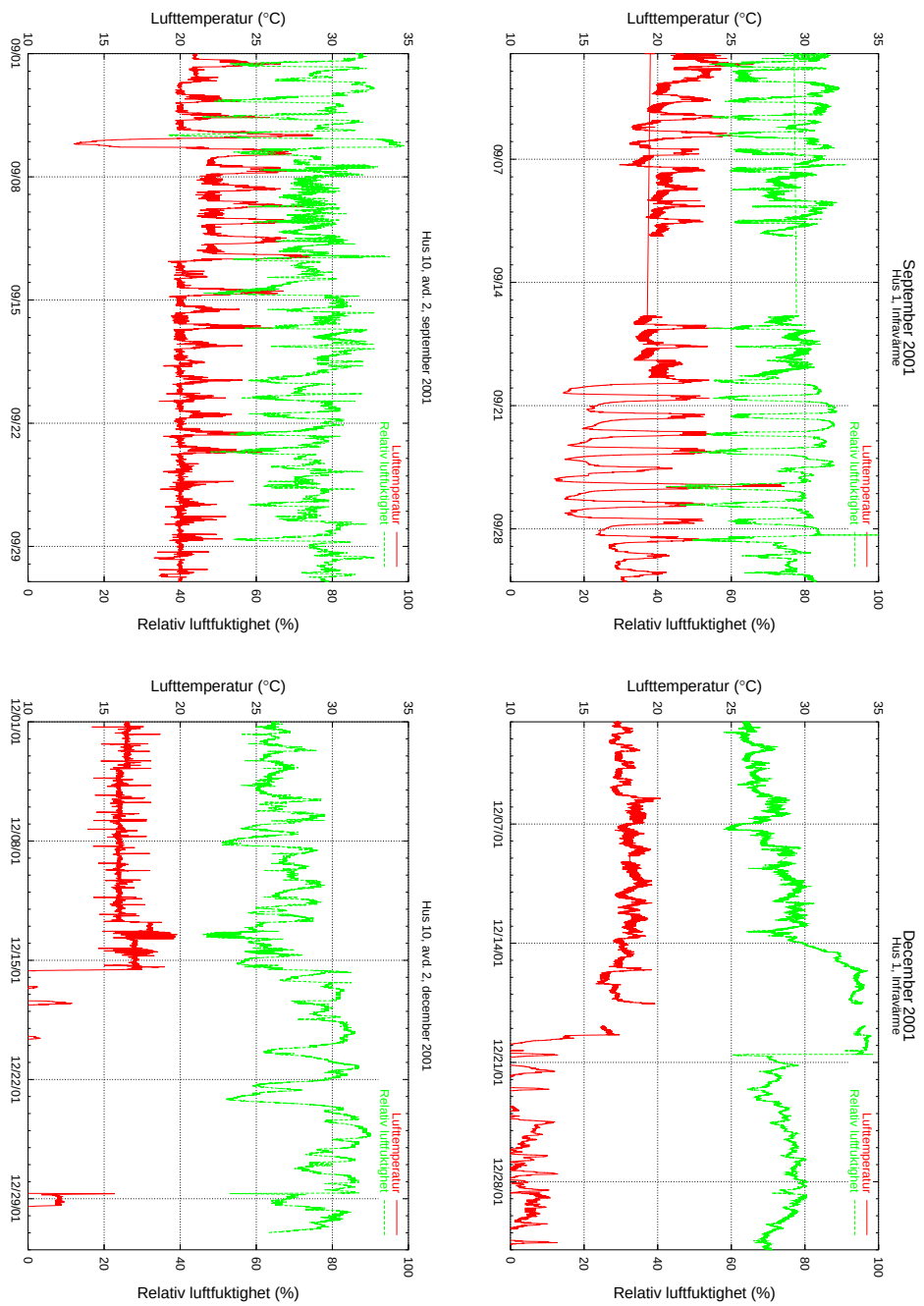
2.2.1 Egenskaper över en längre period

Uppvärmning av växthusen sker även när det inte odlas plantor. Värmesystemet är i drift under hela året och därför blir en studie av en längre tidsperiod intressant då tidskonstanterna för infravärmen och det konventionella värmesystemet är helt olika. Energin Q för att värma växthusen är:

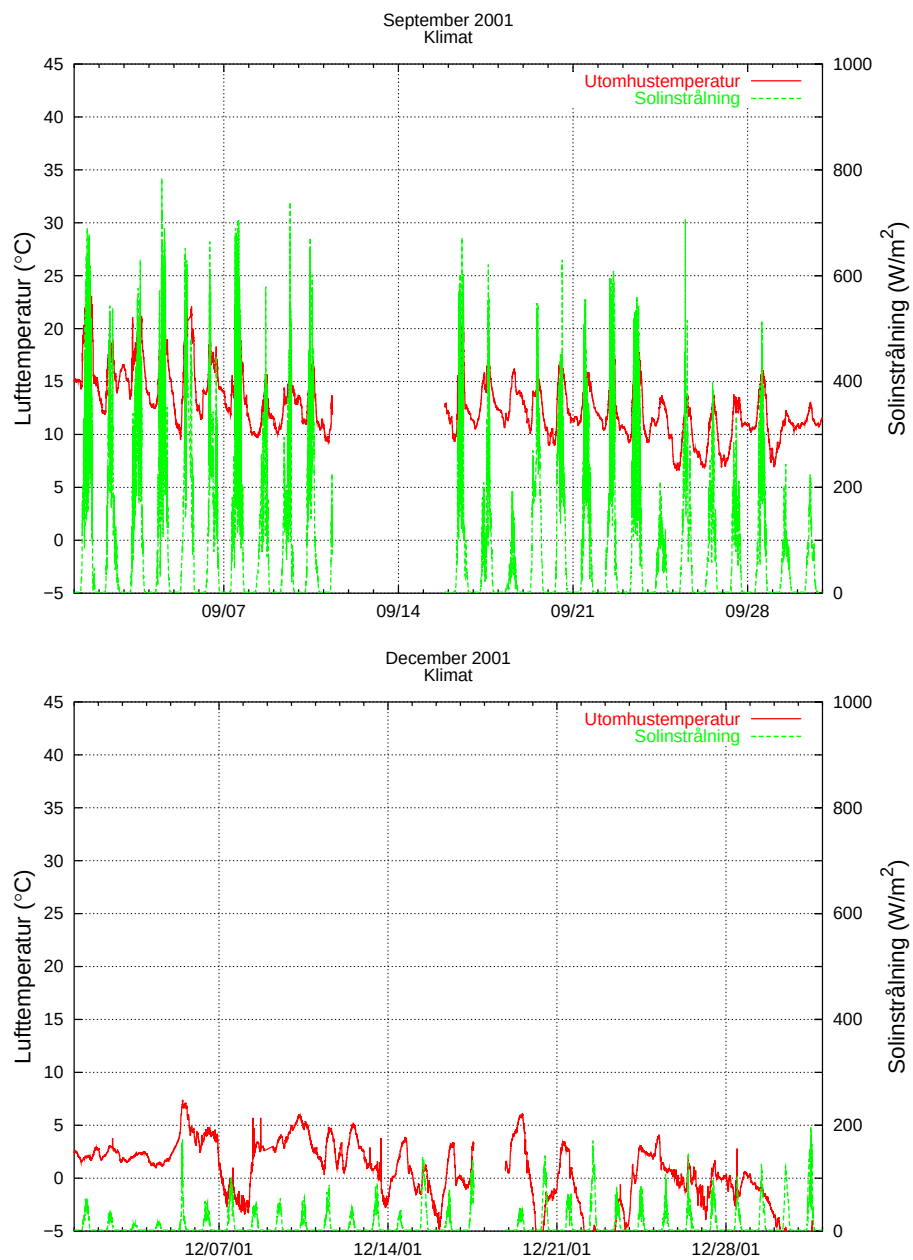
$$Q = t h A \Delta T \quad (2.1)$$



Figur 2.1: Lufttemperatur och luftfuktighet i IR-huset och referenshus under två veckor vid odling av *Argyranthemum frutescens* (L.) Sch.Bib. 'Dana'



Figur 2.2: Lufttemperatur och luftfuktighet i IR-huset och referenshus under september och december 2001 då julstjärnor odlades



Figur 2.3: Klimat för september och december 2001, de månader som omfattas i figurerna 2.1 och 2.2

där t är tidsintervallet för mätningarna h värmegenomgångstalet mot omgivningen och A ytan mot mark och ytterluft.

Jämförelsen gör att vi kan anta att solinstrålningen är lika för de olika växthusen. Även tiden för gardiner kan antas vara konstant. En osäkerhet är dock luftomsättningen i växthusen. Det korta tidsintervallet innebär att växthusens tidskonstant betraktas som mycket liten i jämförelse med andra byggnader.

Vidare antas att verkningsgraden för värmegenereringen är konstant oavsett värmelast. Detta är sannolikt fallet för infravärmen men inte för det konventionella värmesystemet. Pannorna har konstant temperatur och således konstant strålnings- och konvektionförlust. Brännarna är modulerande, vilket innebär lägre avgasförlust vid låglast. Data för pannornas dellastverkningsgrader finns inte tillgängliga varför för-
enklningen görs att de har konstant verkningsgrad oavsett värmelast.

Genom att beräkna summan av skillnaderna mellan insamlade inomhus- och utomhustemperaturer under en längre tidsperiod får vi ett mått på nettouppvärmningsbehovet. För ungefär 10 månader under 2001 har dessa mätdata analyserats. De har samlats in med det befintliga styr- och reglersystemet som används i IR-huset och de växthus som värms med de konventionella pannorna i panncentralen, hus 2–9 i figur 1.1. Data samlades in med två minuters intervall. Resultatet sammanfattas i tabell 2.2. I tabellen har resultaten för de konventionellt värmda husen ställts i relation till det IR-värmda huset.

Tabell 2.2: Nettouppvärmningsbehov för några av de konventionellt värmda växthusen i relation till IR-huset

1 (IR)	Växthus							
	2	3	4	5	6	7	8	9
1,000	1,172	1,092	1,112	1,164	0,991	1,274	1,020	1,122

Medelvärde för de konventionellt värmda växthusen är 1,118, dvs 11,8% högre uppvärmningsbehov. Detta värde kan säkert ökas med hjälp av några åtgärder. Om enbart övervärme användes skulle den genomsnittliga lufttemperaturen sjunka i IR-huset. Vidare kan strålningsintensiteten eventuellt ökas något, vilket också skulle ge en sänkt temperatur. Sammantaget uppskattas att nettouppvärmningsbehovet skulle kunna minska med 15–20% om enbart övervärme används.

2.2.2 Lokala temperaturer på borden

Hittills har endast en lufttemperatur använts för växthusens klimatbestämning. Infravärmen är inte jämnt fördelad över växthusborden och därför studerades de lokala temperaturerna med två metoder. Dels mättes lufttemperaturer på 10 platser på växthusborden under två utsträckta tidsperioder, dels användes termografering för att få bilder och information om temperaturfördelningen över större ytor. Termografresultaten redovisas separat i kapitel 3 med början på s. 28. Här redovisas mätresultaten från de olika punkter där lokala temperaturmätningar gjordes. I figur 2.4 visas var temperaturgivarna placerades på växthusborden i det IR-värmda växthuset och bilden i figur 4.8 på s. 53 visar också placeringen. Strålningsrören för under- respektive ovanvärme, med strömningsriktningar för avgaserna, är också utmärkta.

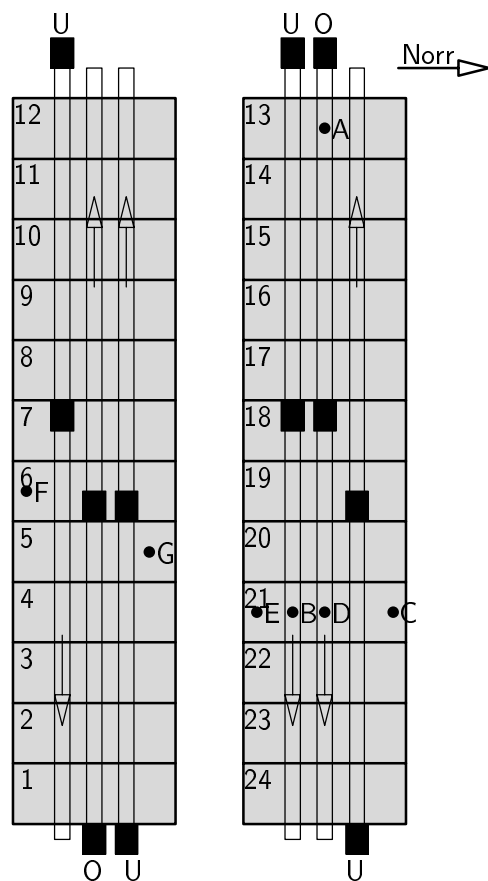
Figurerna 2.5–2.10 visar de lokala temperaturer som registrerats vid mätningarna i det infravärmda växthuset och referensväxthuset. De fyra första, figurerna 2.5–2.8, visar mätresultaten i IR-huset och referenshus 10. De tre diagrammen i varje figur visar förloppet med olika olika detaljeringsgrad. Det översta visar en drygt två veckor lång tidsperiod. Ur denna period har valts en 24-timmarsperiod som visas till vänster av de två nedre diagrammen och ur denna period har i sin tur en tvåtimmarsperiod tidigt på morgonen valts så att solinstrålningen inte har ett märkbart inflytande. Figurerna 2.9 och 2.10 visar temperaturerna vinkelrätt mot strålningsröret på ett bord respektive längs med strålningsröret. I de sex figurerna betecknar A–J de punkter som är markerade i figur 2.4. Beteckningarna H, I och J i figurerna för det konventionellt värmda växthuset avser 30 cm från östra bordskanten, 30 cm från västra bordskanten respektive mitt på bordet.

Övergången från undervärme till övervärme i början av de två mätperioderna ses tydligt i figur 2.5. Det periodiska förloppet i det IR-värmda växthuset återspeglar infrastrålarnas on/off-drift. Detta syns tydligast i det nedre vänstra diagrammet som visar förloppet under ett helt dygn. En temperaturtopp som uppkommer under dygnets ljusa timmar beror på solinstrålningen och gäller således både för det infravärmda växthuset och referenshuset. Det nedre högra diagrammet i figurerna för infravärme och konventionell värme visar att den konventionella värmen ger mindre skillnader mellan olika bordsplatser än vad är fallet med infravärme. En lägre lufttemperatur vid infravärme ses tydligt vid en jämförelse mellan figurerna 2.7 och 2.8. Vi observerar att de lokala temperaturerna i infrahuset som mest skiljer ungefär 2°C, en betydligt större skillnad än vad som kan observeras för det konventionellt värmda växthuset.

Figurerna 2.9 och 2.10 studeras i syfte att utreda om temperaturskillnaderna vinkelrätt mot strålningsrörets riktning är större eller mindre än längs med strålningsröret. Samma data som i figur 2.5 har här delats upp i de två figurerna. Figurerna indikerar att temperaturskillnaderna längs med strålningsröret är större, figur 2.10, än vinkelrätt

mot strålningsröret, figur 2.9. Strålningsrörets ytemperatur och därmed strålnings-effekten sjunker i avgasernas strömningsriktning och hur denna skillnad påverkas av utformning och brännareffekt studeras i avsnitt 5.1 på s. 58.

Temperaturmätningarna visar att skillnaderna mellan olika platser i ett växthus är större med infravärme än med konventionell uppvärmning. Tillsammans med termografiresultaten, som beskrivs i nästa kapitel, ger de lokala temperaturerna möjligheter till en diskussion om samband mellan det lokala klimatet på olika platser i växthuset och tillväxtresultaten.

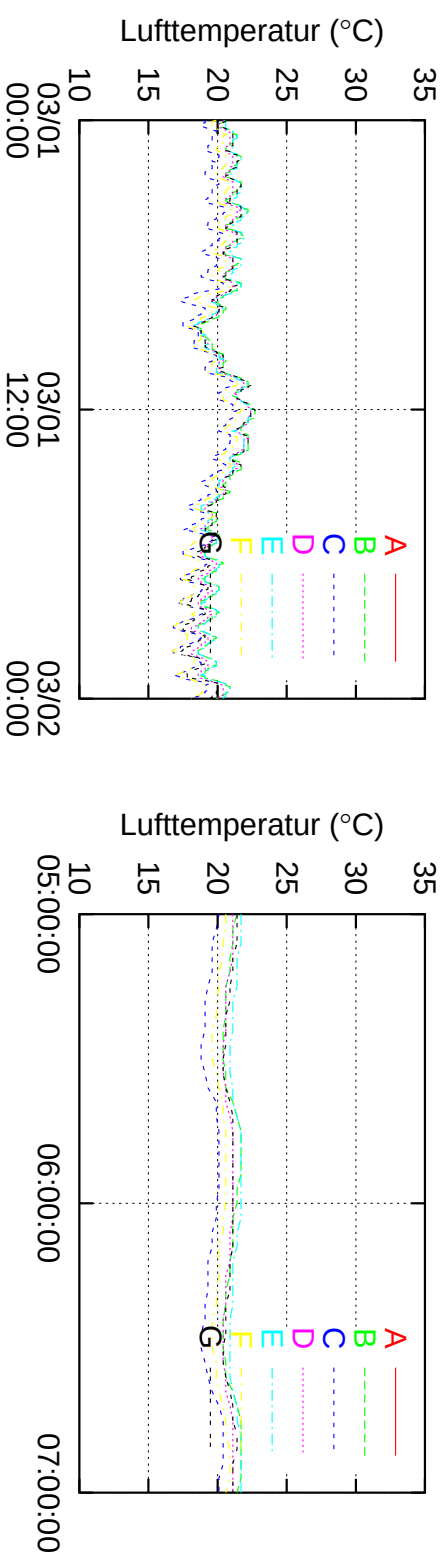
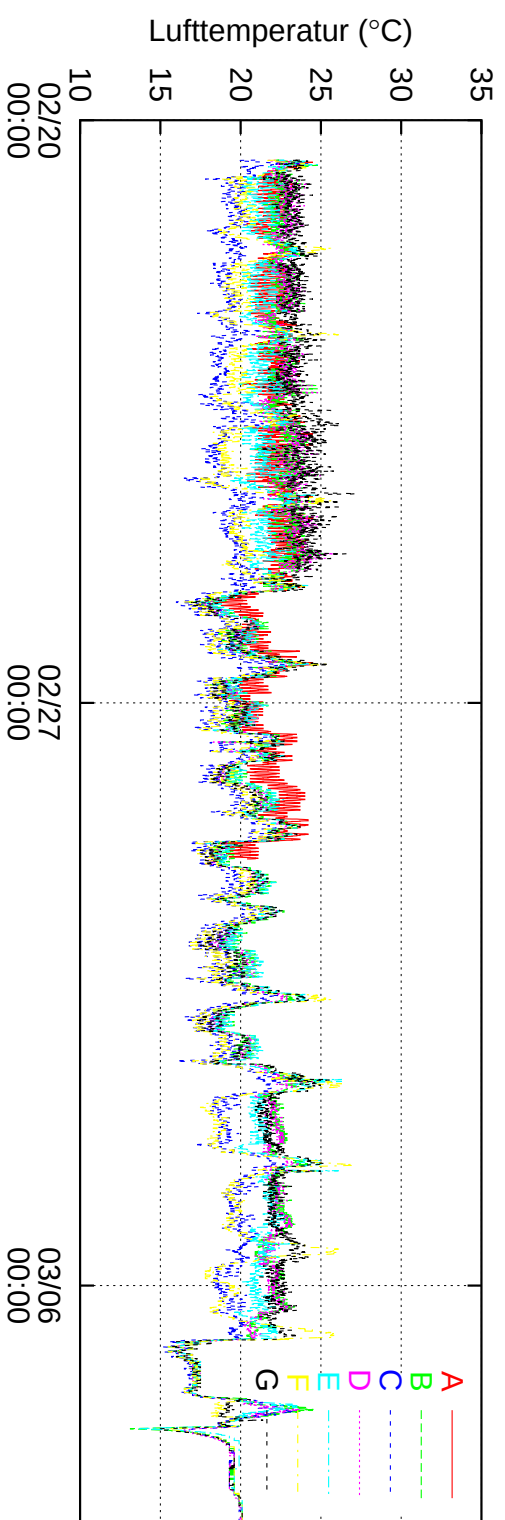


- A – Bord 13, rakt under övervärmern
- B – Bord 21, rakt över undervärmen, Led 2
- C – Bord 21, 30 cm från norra kanten, Led 4
- D – Bord 21, rakt under övervärmern, Led 3
- E – Bord 21, 30 cm från södra kanten, Led 1
- F – Bord 6, 30 cm från södra kanten
- G – Bord 5, vid IR-bladtemperaturgivaren

O – Ovanvärme
U – Undervärme

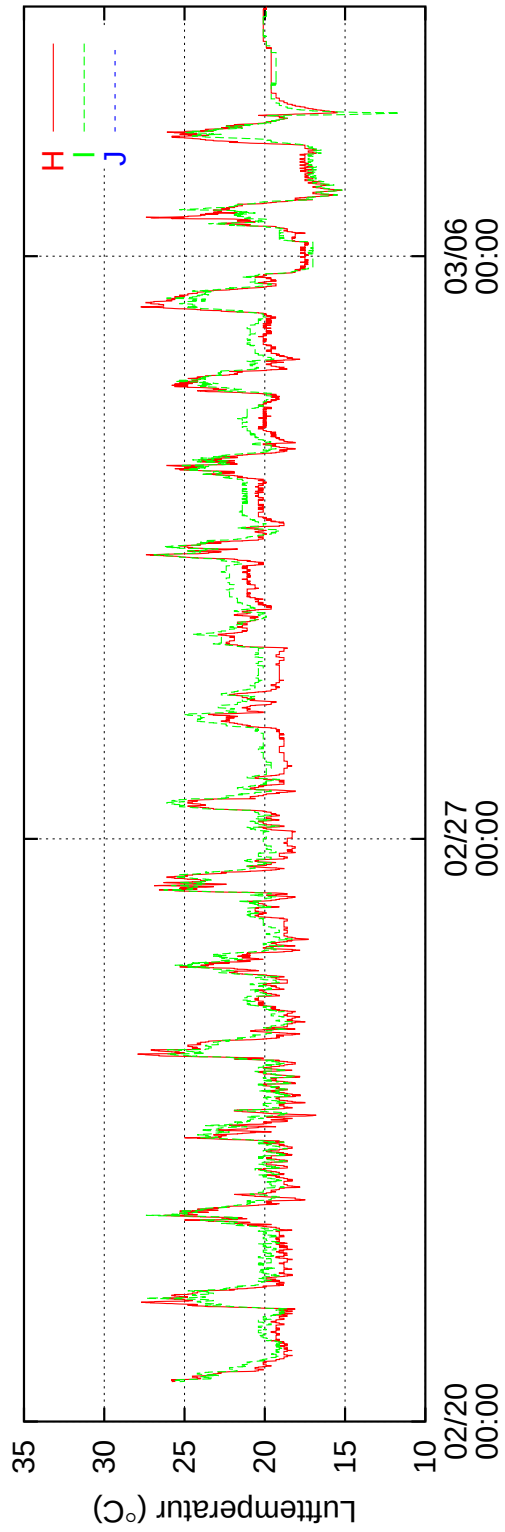
Figur 2.4: Placering av givare vid mätning av lokala temperaturer i IR-växthuset. Brännarnas placering är markerade med svarta fyrkanter. Jämför även med försöksledens placering i figur A.8 på s. 87.

IR-uppvärmning, 20 februari–9 mars 2001

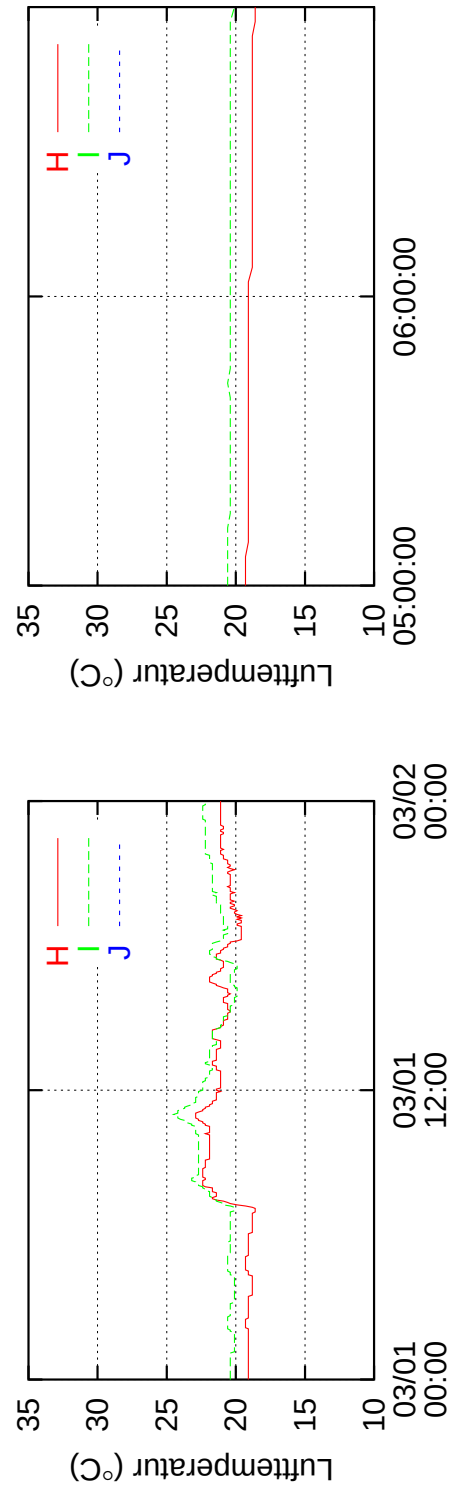


Figur 2.5: Lokala temperaturer på borden i det infravärmda växthuset 20 februari–9 mars 2001

Konventionell uppvärmning, 20 februari–9 mars 2001

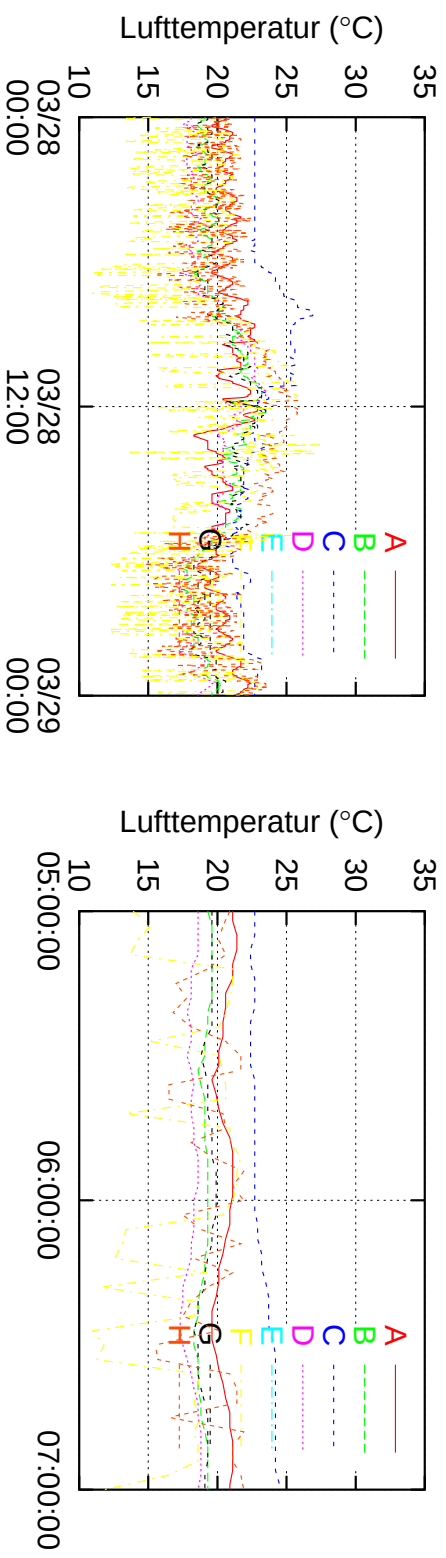
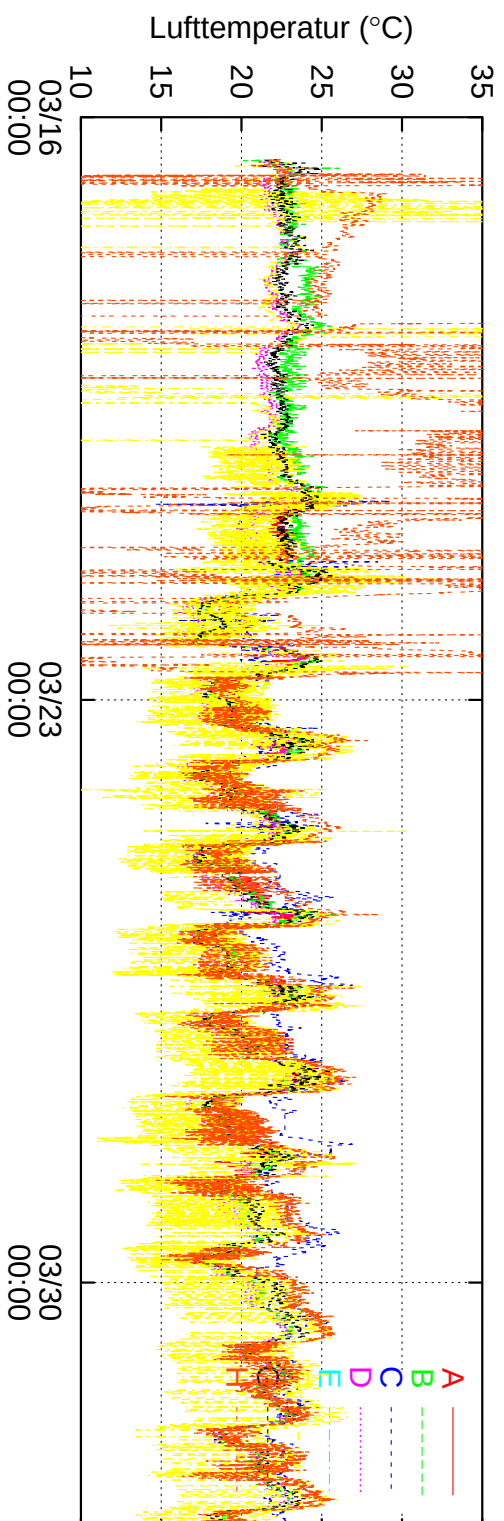


23



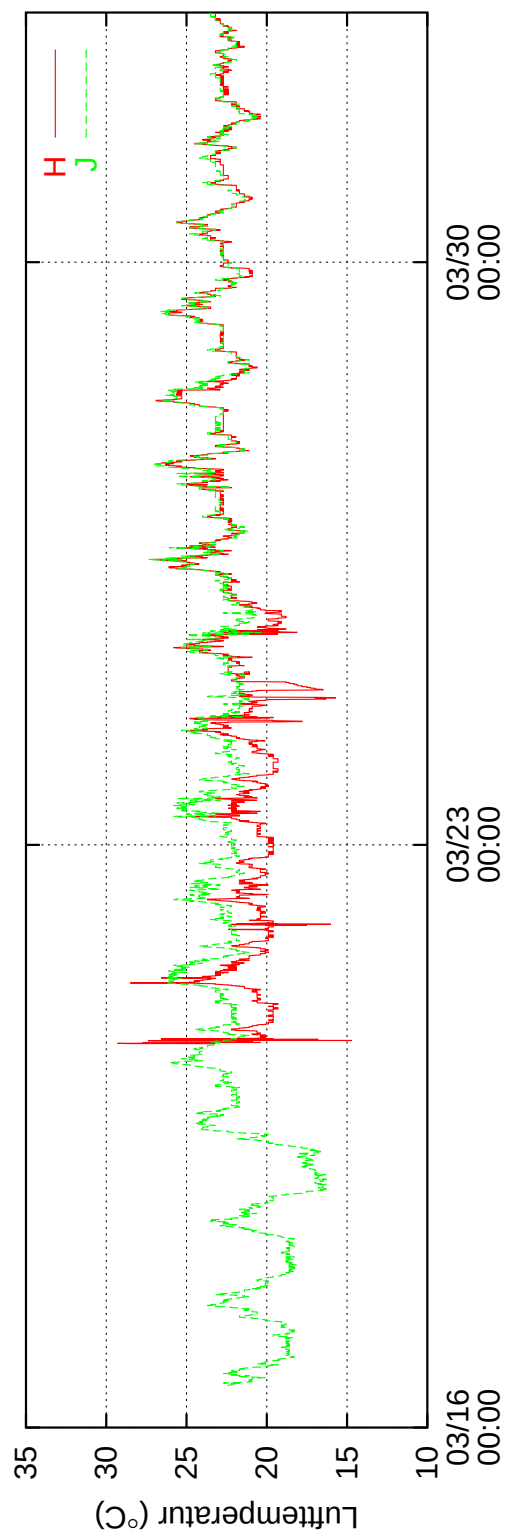
Figur 2.6: Lokala temperaturer på borden i det konventionellt värmda referenshuset 20 februari–9 mars 2001

IR-uppvärmning, 16 mars–2 april 2001

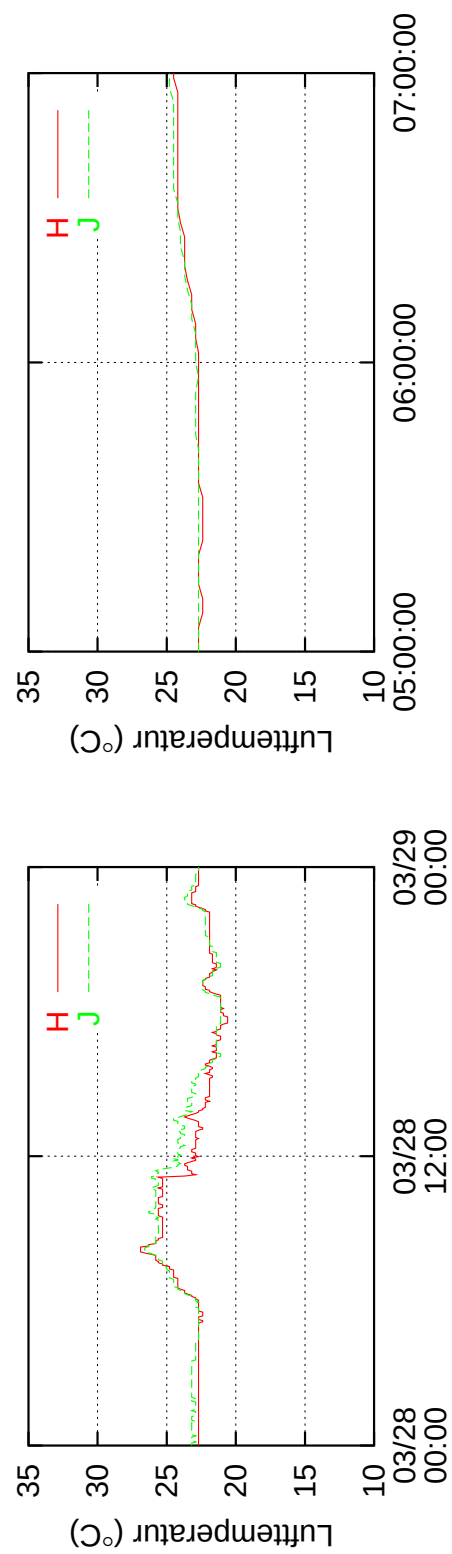


Figur 2.7: Lokala temperaturer på borden i det infravärmda växthuset 16 mars–2 april 2001

Konventionell uppvärmning, 16 mars–2 april 2001

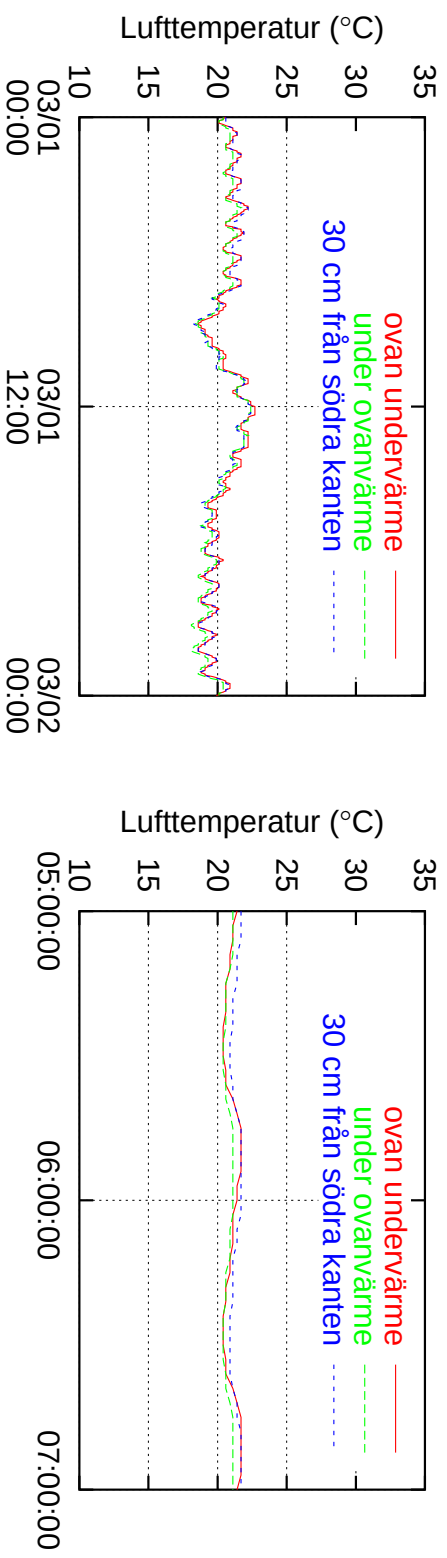
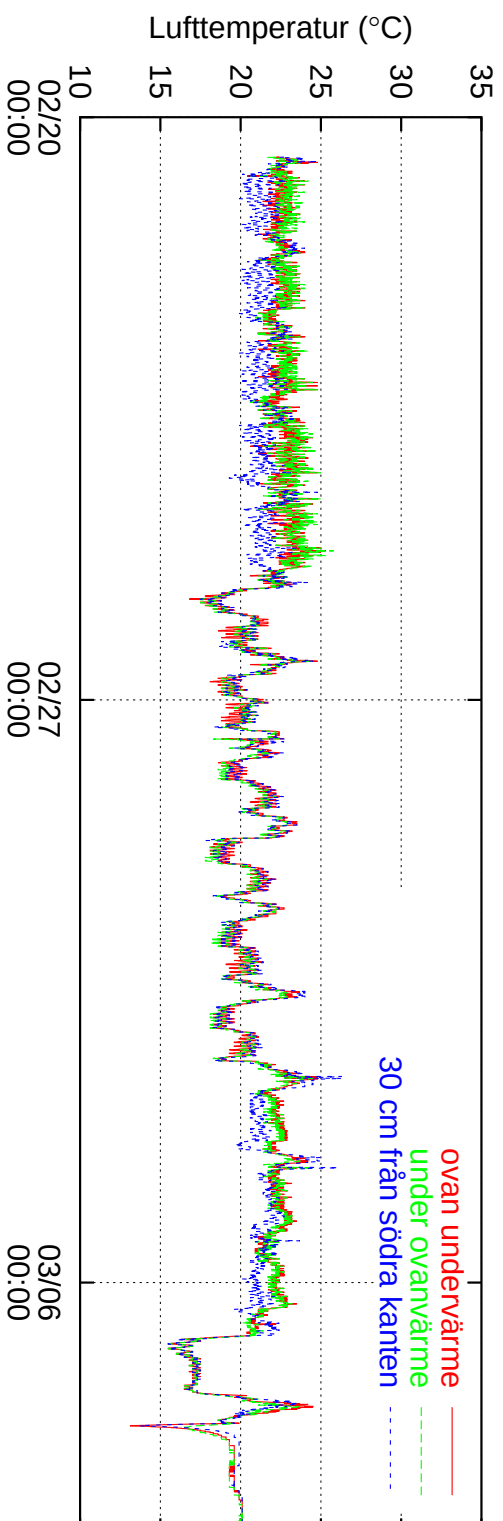


25



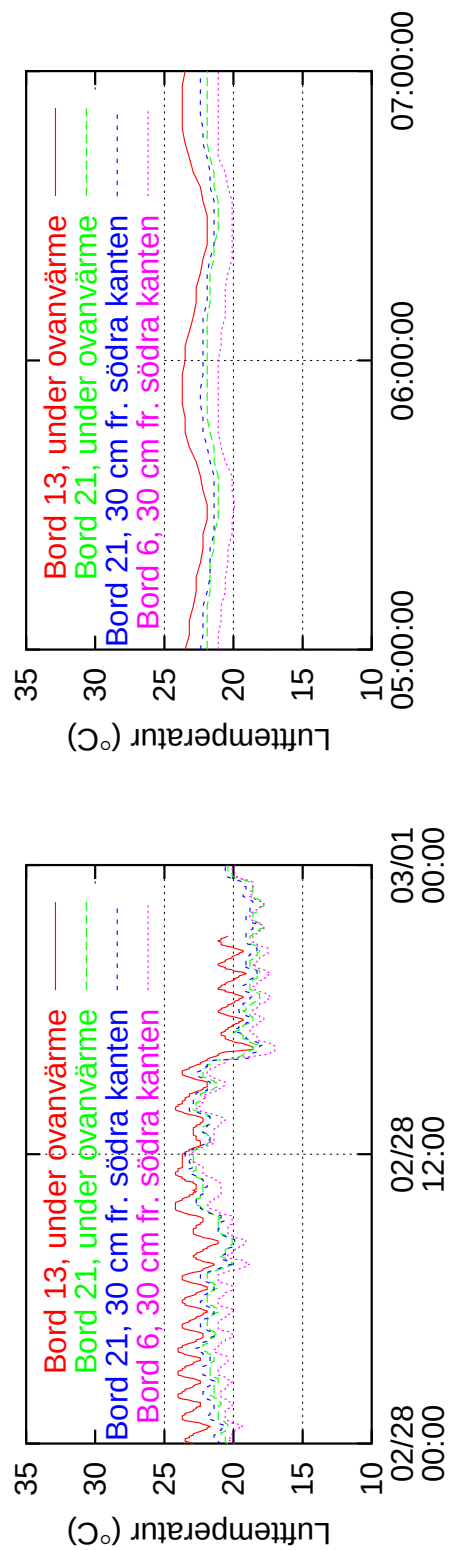
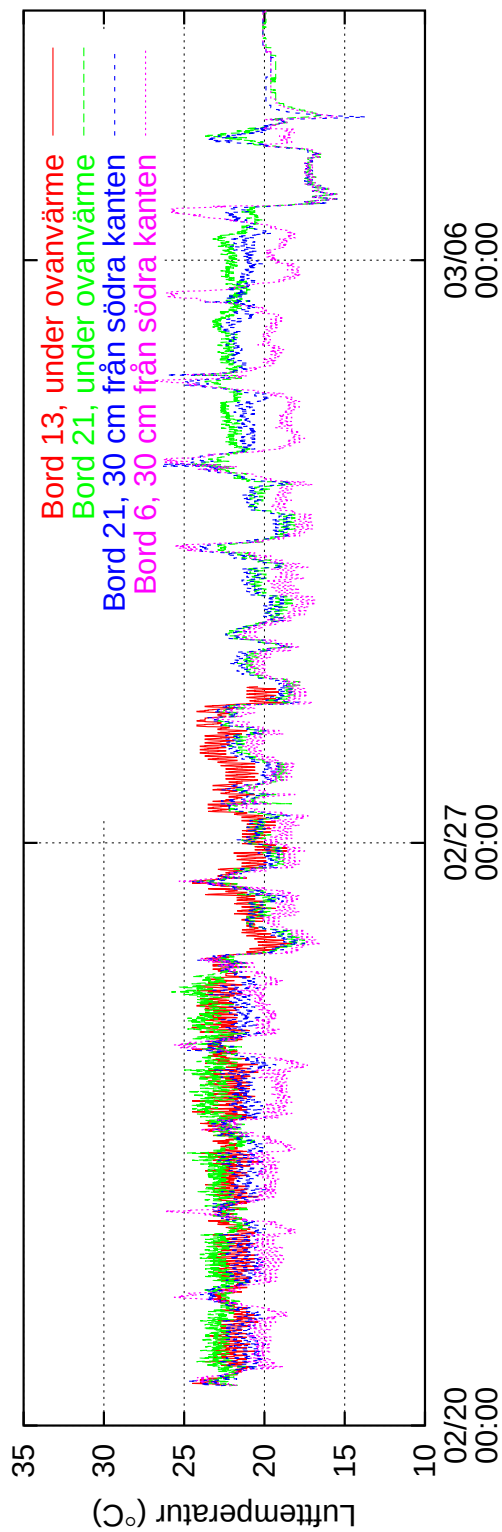
Figur 2.8: Lokala temperaturer på borden i det konventionellt värmda referenshuset 16 mars–2 april 2001

IR-uppvärmning, 20 februari–9 mars 2001, Bord 13



Figur 2.9: Lokala temperaturer på Bord 13 som illustrerar temperaturskillnader vinkelrätt mot strålningsrörets riktning

IR-uppvärmning, 20 februari–9 mars 2001



Figur 2.10: Lokala temperaturer på borden i det infravärmda växthuset och som illustrerar temperaturskillnader längs med strålningsröret

Kapitel 3

Termografering

3.1 Introduktion

Energianvändningen för ett växthus är normalt $>500 \text{ kWh/m}^2$ uppvärmd yta jämfört med ca 150 kWh/m^2 för en normaliserad byggnad, se till exempel tabell 2.1. Statusbestämning av energirelaterade tillstånd hos en byggnad kan med fördel utföras med hjälp av termografi, s.k. byggtermografi. Termografering för statusbestämning av energitillståndet hos ett växthus är normalt inte intressant ur byggnadsteknisk synvinkel, men väl för kartläggning av funktionen hos energisystem och för kartläggning av oönskade luftläckage genom otätheter i konstruktionen.

Målsättningen med huvudprojektet är att kartlägga användbarhet och begränsningar av gasdrivna IR-strålare för uppvärmning och reglering av energiflöden i växthus för att säkerställa en temperatur och ett mikroklimat anpassat till produktion av plantor i växthusmiljö. I likhet med byggnader för produktion av elektronik, rymdteknik, läkemedel eller kemisk tekniskproduktion ställer växtodling i växthus höga krav på god reglering av mikroklimatet och toleransen för svängningar i operativ temperatur och relativ luftfuktighet är mycket låg.

Som framgår av tidigare kapitel har försöksanläggningen två av varandra oberoende gasdrivna IR-strålare, bestående av brännare och strålningsrör med justerbara reflektorer. Ett av system är placerat ovanför produktionsborden, och ett under produktionsborden, se figur 2.4. Värmeanläggningen är utformad så att brännare och strålningsrör placerat under borden i första hand används vid produktion av sticklingar (undervärme), och strålningsgivarna placerade ovanför borden används främst vid produktion av färdigplantor (övervärme). Vid behov kan båda systemen samköras.

De gasdrivna IR-strålarna regleras med hjälp av ett reglersystem som mäter bladtemperaturen hos plantorna.

Under projektets första etapp utfördes en analys och utvärdering av tillväxten hos sticklingar och färdigplantor. Det konstaterades att det fanns oacceptabla variationer i utvecklingen av rotsystemen hos sticklingarna och i tillväxten hos färdigplantorna i växthuset med IR-strålare. Selektiv mätning av ytemperatur indikerade att systemet med gasdrivna IR-strålare gav upphov till avvikelser i temperaturfördelningen för delar av produktionsborden. Beslut togs att projektet skulle kompletteras med en termografistudie för att kartlägga avvikelser i relativ strålningstemperatur och strålningstemperaturmönster för brännare, strålningsrör och reflektorer ovan och under bord, samt för produktionsbord med och utan plantor. Parallellt skulle utföras termografering för kartläggning och statusbestämning av funktionen av uppvärmningssystemet och tillväxtprocessen hos plantor i ett referensväxthus med vattenbaserat värmesystem.

3.2 Fältstudier och metodik

Fjärranalys eller Remote Sensing är samlingsnamnet på en rad olika tekniker som används för såväl civila som militära tillämpningar. Remote Sensing eller Fjärranalys inbegriper att man använder en teknik som registrerar, mäter eller avbilder egenskaper och tillstånd hos ett objekt på avstånd, utan att vidröra objektet. Termografering eller infraröd teknik ingår som en av många mät- och avbildningstekniker inom modern fjärranalysteknik. Andra kända tekniker inom modern fjärranalys är till exempel laser, radar, mikrovågsteknik, fotografisk teknik. Systemen kan vara handburna, mobila, flygburna eller satellitburna. Termografi har i likhet med flera andra fjärranalystekniker sitt ursprung i militär spaningsteknik.

Infraröd termografi registrerar antalet fotoner med hjälp av en detektor känslig inom kort eller långvågig infraröd strålning. Informationen omvandlas elektroniskt till en bild antingen på en inbyggd eller separat monitor. Bilderna kan lagras analogt och/eller digitalt och kan presenteras som enskilda bilder eller som en sekvens av bilder. Den typen av IR-system som använts i projektet kallas populärt värmekamera. Det finns också icke bildgenererande IR-teknik, typ "pointers" som ger korrigerade mätvärden i form av temperaturangivelser presenterade på en displayenhet.

Observera att en värmekamera mäter vare sig värme eller temperatur utan registrerar antalet fotoner (fotonräknare) och att informationen omvandlad till en strålningsbild kan vidareförädlas till en värmebild genom att man korrigerar för bland annat ytmaterials förmåga att absorbera, reflektera och emittera energi. I de fall

man inte känner ytmaterialets energirelaterade egenskaper används begreppet relativ strålningstemperatur respektive relativ strålningstemperaturmönster. Känner man ytegenskaperna hos objektet, till exempel det aktuella ytmaterialets emissionsfaktor, så kan man omvandla relativ strålningstemperatur till verklig temperatur. Moderna värmekameror har mjukvaruprogram som medger att man i realtid kan korrigera för emissionsfaktorn. För många tillämpningar är det fullt tillräckligt att arbeta med relativa temperaturangivelser, förutsatt att man avgränsar mätning, analys och tolkning till att omfatta objekt och ytor med samma eller likartade absorptions- och emissions-egenskaper.

Vid termografering av plantor och vegetation med blad med olika klorofyll, färg och ytegenskaper är det inte helt enkelt att mäta och fastställa emissionsfaktorn för hela bestånd. Genom att utföra kompletterande yttemperaturmätning för ett representativt urval av relevanta ytor (bladtemperatur, etc.) så kan man via värmekamerans mjukvaruprogram bakvägen söka emissionsfaktorn för det aktuella ytmaterialet genom att reglera emissionsfaktorn tills kameran anger samma yttemperatur som fältmätvärdet. På så sätt kan man mäta verklig yttemperatur även hos växter. Mätförfarandet och omvandling till verklig strålningstemperatur kan utföras antingen i fält eller i bildlaboratorium, förutsatt att man har erforderliga kompletterande fältmätdata.

Under perioden november 2000–december 2001 har infraröd termografering utförts vid fyra olika mättillfällen i syfte att kartlägga variationer och avvikelser i relativ strålningstemperatur och strålningstemperaturmönster för brännare, strålningsrör och reflektorer ovan och under bord, samt för produktionsbord med och utan plantor. Mätningarna har utförts under likartade väder- och utstrålningsförhållanden för IR- respektive referensväxthuset.

Målsättningen med termograferingen var att med utgångspunkt från värmebildsdata utvärdera funktionen hos de gasdrivna IR-strålarna och deras mediarör, kartlägga temperaturmönstret hos produktionsborden, och jämföra informationen från värmebildsdata med växtbeteendet hos sticklingar och plantor.

En optimal tillväxt hos sticklingar och plantor kräver stabil och homogen strålningstemperatur under, på och över produktionsborden, och avvikelser i strålningstemperatur påverkar tillväxtprocessen hos plantorna och ger en inhomogen tillväxt. Arbetshypotesen inom termografistudien är att infraröd termografi kan användas för statusbestämning av värmedistributionen i växthus med gasdrivna IR-strålare. Vidare att informationen från värmebildsdata kan användas som indata för att förbättra konstruktionen och för kalibrering av funktionen hos gasdrivna IR-strålare, och för att få kunskap om samspelet mellan energifördelning, relativ luftfuktighet och tillväxtprocessen hos plantorna i växthus.

Termografering har utförts med en FLIR-AGEMA THV 1000 långvågs IR-system (8–14 μm) monterad på tvåhjulig kärra, och en handburen FLIR THV 570 långvågs IR-kamera (7,5–13 μm).

THV 1000-systemet var placerad i en fast position riktad mot produktionsborden för översiktlig och kontinuerlig registrering av hela uppvärmnings- och avsningsförloppet med brännarna på respektive avslagna. Varje mätperiod varade 2–3 timmar och värmekameran lagrade analoga värmebildsdata på videoband under hela mätserien. Parallellt lagrades digitala värmebildsdata på hårddisk för ett urval speciellt intressanta temperaturtillstånd. Mätserien startade på en referensnivå med gas-IR-strålarna avstängda, och temperaturutvecklingen hos produktionsborden följdes upp till att systemet nått optimalt operativ temperatur för att därefter registrera avsningsförloppet tillbaks till 0-temperaturnivån, med IR-strålarna avstängda. Parallellt utfördes handburen termografering med THV 570-systemet för detaljerad kartläggning av strålningstemperaturmönstret hos gas-IR-brännarna och deras värmedistributionsrör, och för ett urval produktionsbord. Samma mätprocedur utfördes för referensväxthuset. Analys och tolkning av värmebildsdata utfördes med hjälp av ett datorbaserat bildanalyssystem.

Före, under och efter termograferingen utfördes kompletterande ytemperaturmätning med termistorgivare för 17 speciellt utvalda delytor på produktionsborden. Vid termografering med plantor på produktionsborden uppmättes bladtemperaturen med en FLIR AGEMA infraröd Thermopoint 64 thermometer, en s.k. IR-pistol. Resultatet från yt- och bladtemperaturmätningen användes som referens och kontrolltemperatur vid tolkning och analys av värmebildsdata.

Termografering med THV 1000 för kontinuerlig kartläggning av temperaturfördelningen hos produktionsborden inkluderar sammanlagt ca 30 timmars registrering med 25 analoga bilder/sekund. Vidare finns ca 100 digitalt lagrade THV 1000-bilder för ett urval speciellt intressanta temperaturtillstånd. Registrering med THV 570-systemet för kartläggning av strålningstemperatur och temperaturmönster hos brännaren och mediarör och delytor hos produktionsbord inkluderar mer än 100 digitala bilder.

3.3 Termografiresultat

Resultaten som redvisas i denna rapport representerar ett urval värmebildsdata och kompletterande fältmätdata från de olika registreringsstillfällena. Första mätserien, avsnitt 3.3.1 inkluderar registrering av strålningstemperatur och strålningstemperaturmönster från produktionsbord med halvfärdiga plantor som odlats i växthuset med

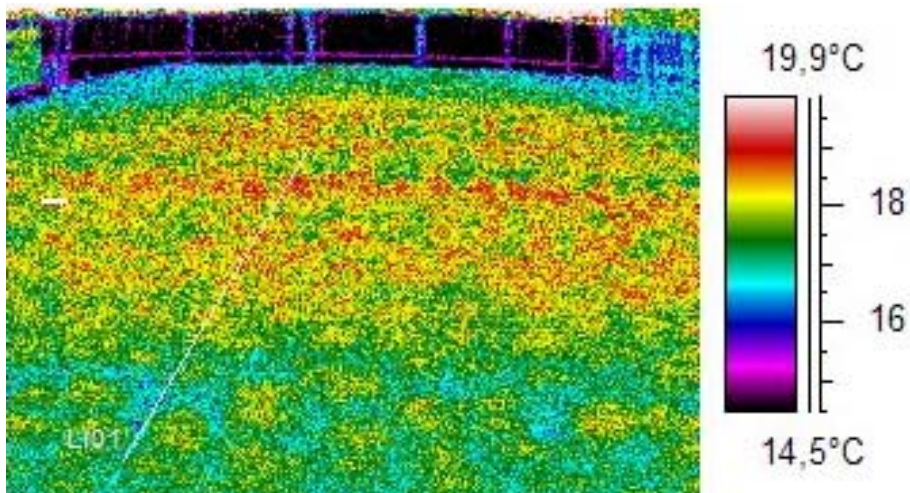
gasdrivna IR-strålare monterade ovan borden (övervärme). Syftet med mätningen var att studera spridningsmönstret av energi och plantornas växtbeteende vid uppvärmning med strålningsvärme från gasdrivna IR-strålare.

Mätserie 2–4 genomfördes med samma mätprocedur som i första mätserien för produktionsbord med och utan plantor, för växthuset med gasdrivna IR-strålare och för referensväxthuset med vattenburet radiatorsystem. Syftet var att kartlägga och studera energifördelning och strålningstemperaturmönster på produktionsborden. Detta gjordes då de gasdrivna IR-strålarna respektive de vattenburna radiatorsystemen med värme påslagen över produktionsytorna, under, samt både med över- och undervärme igång samtidigt. Mätningar gjordes också både med och utan växter och tillskott av luftfuktighet från plantor och luftfuktighetssystem. Utvärdering av resultaten från termografistudien utfördes tillsammans med övriga experter i projektgruppen.

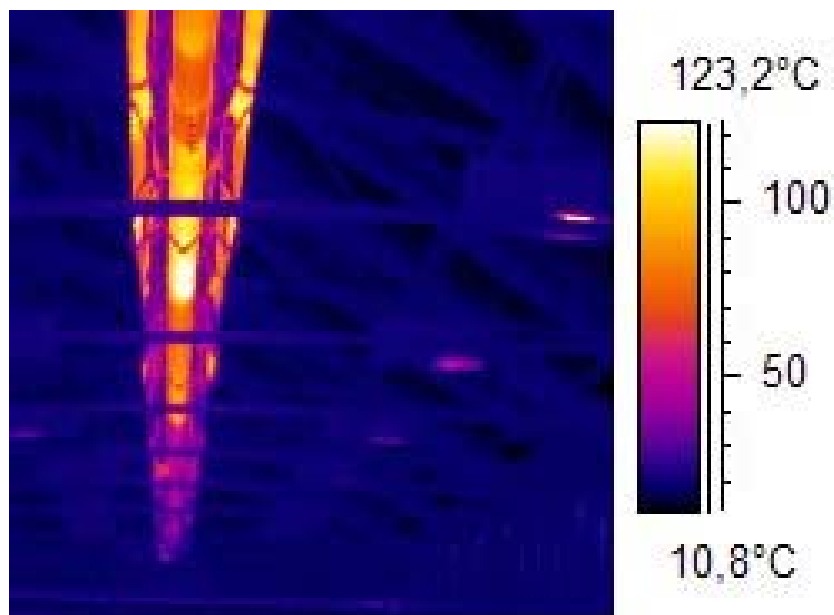
3.3.1 Mätserie 1. Växthus med plantor och IR-strålare

Mätningen utfördes den 22 oktober 2000 på bord med plantor. Den övre värmebilden i figur 3.1 visar variationer i strålningstemperatur och i strålningstemperaturmönster för produktionsborden med halvstora plantor och indikerar skillnader i energifördelning utmed produktionsytorna. Högsta strålningstemperaturen, 19,8°C, återfinns i den centrala delen av värmebilden, medan lägsta strålningstemperaturen, 15,7°C, finns i främre respektive bortre delen av värmebilden. Detta ger den största temperaturskillnaden på bordet, $\Delta T = 4,3^\circ\text{C}$. Den övre värmebilden i figur 3.1 indikerar att det gasdrivna IR-strålarsystemet inte ger en homogen fördelning av energi till produktionsborden.

Den nedre värmebilden i figur 3.1 visar strålningstemperaturmönstret hos en av gasbrännarna, strålningsrör och reflektor, placerad ovanför produktionsborden. Strålningstemperaturen i värmebilden varierar från maximum 123,2°C till minimum 10,8°C vilket ger ett $\Delta T > 100^\circ\text{C}$ för delar av det gasdrivna IR-systemet. Informationen i denna värmebild i figur 3.1, bekräftar att gas-IR-systemet inte ger en jämn energifördelning till plantorna på produktionsborden indikerat i den övre värmebilden, figur 3.1. Om det automatiska system som säkerställer relativa fuktigheten i växthuset varit ur funktion eller fungerat bristfälligt skulle sannolikt stora delar av plantbeståndet i figur 3.1 torkat ut och dött som en följd av den höga värmeavgivningen från den gasdrivna IR-strålaren, redovisad i värmebilden till höger i figur 3.1. Informationen från värmebilderna i figur 3.1 indikerar att den höga relativa fuktigheten i växthuset effektivt absorberar och omfördelar energin från gas-IR-strålarna och fungerar som en värmesköld för övertemperatur från lokala värmekällor. Fenomenet är väl känt inom brandförsvaret där man använder en värmesköld av



(a) Variationer i strålningstemperatur och strålningstemperaturmönster hos plantor på produktionsbordet



(b) Värmebild över infrastrålar. Den högsta temperaturen motsvarar brännarens placering

Figur 3.1: Värmebilder över produktionsbord och infrastrålar, se även tabell 3.1

mikroskopiskt små vattenpartiklar som skydd när man arbetar med släckningsarbeten av öppen eld.

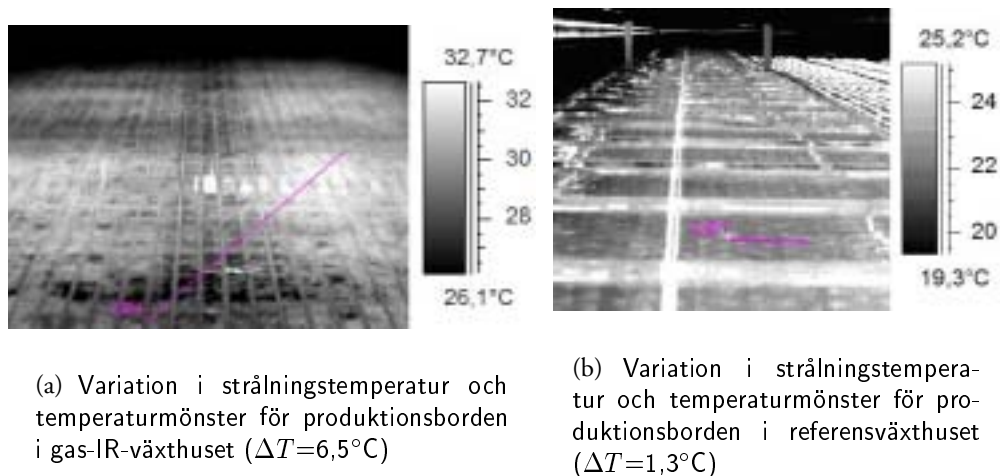
3.3.2 Mätserie 2–4. IR-växthus och referensväxthus med vattenbaserat värmesystem – utan plantor

En jämförande registrering med termografi utfördes för växthuset med gasdrivna IR-strålare respektive referensväxthuset med vattenbaserat värmesystem, utan plantor på produktionsborden den 10 januari 2001. Värmeflöden och tidcykler för värmedistributionen var samma som vid termografering med plantor i produktion. I båda växthusen användes övervärme från de gasdrivna respektive vattenburna strålningsrören monterade över produktionsborden. I likhet med mätserie 1 utfördes kompletterande mätning av yttemperaturen hos produktionsborden med termistorgivare och en IR-pointer, för ett urval ytor, under uppvärmnings-, stabiliserings- och avsvlningsförloppet.

Värmebilderna i figur 3.2 är tagna i växthuset med gasdrivna IR-strålare och i referensväxthuset. Bilderna ger en likartad variation i strålningstemperatur och strålningstemperaturmönstret som den vänstra bilden i figur 3.1, mätserie 1. Men variationen i strålningstemperaturmönstret är mycket lättare att urskilja i den vänstra bilden i figur 3.2 beroende på att det inte finns några plantor på produktionsborden. Den relativa yttemperaturen i värmebilden till vänster i figur 3.2 varierar från maximalt 32,7°C i den centrala delen av bilden till minimum 26,2°C i främre respektive borte partiet av värmebilden, med $\Delta T=6,5^{\circ}\text{C}$. I likhet med värmebilden i figur 3.1 indikerar variationerna i strålningstemperatur och temperaturmönstret i värmebilden till vänster i figur 3.2 att det aktuella systemet med gas-IR-strålare ger en ojämn värmefördelning till produktionsborden.

Produktionsborden i referensväxthuset med vattenbaserat värmedistributionssystem är tillverkade i aluminium med en fiberduk och har en ljusgrå matt ytfärg vilket gör att man vid termografering inte behöver korrigera för emissionsfaktorn. Värmebilden till höger i figur 3.2 visar små variationer i strålningstemperatur och i strålningstemperaturmönster med undantag för i kantområden av bilden. Strålningstemperaturen varierar från maximum 23,3°C för ett större område av produktionsborden till ett minimum av 22,0°C, med ett $\Delta T=1,3^{\circ}\text{C}$, vilket indikerar att referensväxthuset med vattenbaserat värmedistributionssystem ger en enhetlig fördelning av energi från strålningskällan till produktionsborden.

Värmebilderna från mätserie 3 och 4 uppvisar något lägre variationer i strålningstemperatur jämfört med mätserie 1 och 2 p.g.a. att gas-IR-brännarna kalibrerats och att vinkeln på reflektorerna justerats för att ge en effektivare och jämnare energifördel-



Figur 3.2: Värmebilder över tomma produktionsbord i gas-IR-växthuset och referensväxthuset

ning. Referensväxthuset kördes enligt tidigare förprogrammerade flöden. Mätserie 3 och 4 redovisas inte separat i rapporten eftersom resultatet bekräftar tidigare resultat och tillför inte ny information av intresse för att jämföra och utvärdera skillnaderna mellan gas-IR-växthuset och referensväxthuset.

Kompletterande yttemperaturmätningar hos produktionsborden för gas-IR-växthuset och för referensväxthuset bekräftar att gas-IR-växthuset ger betydligt större variationer i energifördelningen till produktionsborden än i fallet för referensväxthuset. Tabell 3.1 visar resultat från mätningar av yttemperatur hos produktionsborden i gas-IR-växthuset jämfört med yttemperaturmätningar hos produktionsborden i referensväxthuset, båda med övervärme. De högsta och lägsta yttemperaturer som uppmättes för produktionsborden i gas-IR-växthuset är $29,4^{\circ}\text{C}$ respektive $18,4^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T=11^{\circ}\text{C}$), jämfört med $21,1^{\circ}\text{C}$ och $17,6^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T=2,5^{\circ}\text{C}$) för referensväxthuset. Liknande mätningar har gjorts för gas-IR-växthuset och för referensväxthuset med enbart undervärme och resultat har blivit likartat det som redovisat i tabell 3.1.

Som tidigare redovisats är strålningstemperaturen från de gasdrivna IR-strålarna mycket hög i värmebilderna från termograferingen, $\Delta T > 100^{\circ}\text{C}$ (figur 3.1) jämfört med verklig yttemperaturen som uppmätts med termistorgivare, se tabell 3.1. Uppenbarligen absorberas och omfördelas strålningsvärmens effektivt av den höga luftfuktigheten i växthuset. Denna iakttagelse implicerar att relativa fuktigheten är en viktig faktor att beakta när man använder gasdrivna IR-strålare för produktion av plantor i växthus.

Resultaten från fältmätningarna redovisade i tabell 3.1 bekräftar att produktionsborden i växthuset med gasdrivna IR-strålare har en ojämnare temperaturfördelning

Tabell 3.1: Resultat från ytemperaturmätning av verklig temperatur hos produktionsbord för IR-växthuset, och referensväxthuset

Bord	IR-uppvärmt växthus		Referensväxthus		
	Tid:	Tid:	Tid:	Tid:	Tid:
	11:00	12:25	14:25	12:00	15:15
	Brännare av	Brännare på	Värme på	Värme av	Värme på
	°C	°C	under	°C	°C
			°C		
1	13,4	22,3	20,6	11,4	25,5
2	13,5	24,6	21,1	11,2	25,9
3	13,5	26,6	21,0	11,2	25,7
4	13,6	26,9	20,4	10,9	25,2
5	13,4	28,9	20,9	10,6	24,3
6	13,4	29,0	20,8	10,5	23,6
7	13,2	29,4	20,1	10,3	24,3
8	13,1	27,8	20,2	10,1	24,0
9	13,1	25,5	20,1	10,0	23,3
10	13,0	23,9	20,1	*	*
11	12,7	22,3	19,4		
12	13,9	19,8	18,6		
13	13,9	21,1	18,6		
14	13,4	19,6	17,6		
15	13,8	19,6	19,5		
16	13,8	21,5	19,3		
17	13,2	18,4	19,0		

* – Små temperaturskillnader, därav avslutade kolumner

än referensväxthuset med konventionellt vattenbaserat värmesystem, indikerat i värmebilderna från olika registreringstillfällen.

3.4 Slutsatser av termograferingen

Slutsatserna i denna del av rapporten avgränsas till en utvärdering av funktionen hos de aktuella gasdrivna IR-strålarna och vilken strålningstemperaturfördelning som de ger till produktionsborden i gas-IR-växthuset jämfört med referensväxthuset med vattenbaserat värmesystem. Vidare redovisas slutsatser om termografins användbarhet

som hjälpmedel vid kartläggning och analys av energirelaterade tillstånd i växthus samt vid konstruktion av uppvärmningssystem för växthus.

- Upprepad termografering utförd under likartade utstrålningsförhållanden visar att produktionsborden i växthuset med gasdrivna IR-strålare har variationer i strålningstemperatur och strålningstemperaturmönster förorsakad av inhomogen strålningsvärme från de gasdrivna brännarna och mediasören. Dessa variationer i strålningsvärme ger i sin tur upphov till variationer i växtbetingelser och tillväxtförlopp hos sticklingar och saluplantor.
- Resultatet från termografistudien indikerar att relativa luftfuktigheten är en viktig faktor för att omfördela strålningsvärmerna och säkerställa ett optimalt mikroklimat vid användning av gasdrivna IR-strålare i växthus.
- Termografi kan med fördel användas för att kartlägga temperaturavvikelser hos värmeproducerande system och mediasystem i växthus.
- Termografi kan också användas som ett hjälpmedel vid kalibrering av värmesystem, för att utvärdera dess funktion, och för att indikera avvikelser i tillväxtprocessen hos plantor.
- Information från infraröd termografi bör kunna användas för test av gasdrivna IR-system under konstruktion, och för att bekräfta dess operativa funktion vid installation.
- Infraröd termografi kan användas som ett redskap vid forskning och utvärdering av tillväxtprocessen hos plantor under olika energi och mikroklimatiska tillstånd i växthus.

Kapitel 4

Växtaspekter

4.1 Målsättning för den biologiska odlingsprocessen

Målsättningen för den biologiska odlingsprocessen i projektets fas II var att samla ytterligare erfarenheter av sticklingars rotbildning och småplantors tillväxt och att jämföra effekten av gasbaserad IR-värme med gasbaserad vattenburen värme.

4.1.1 Växtslag och odlingsperiod

Försöksperioden med växtmaterial påbörjades i slutet av juli 2000 och pågick till december 2001. Undersökningen var en fortsättning på den första fasen av projektet som utfördes under 1999–2000. Växtslagen som undersöktes i fas II var julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Klotzsch, 'Winter Rose' och 'Sonora', pelargon, *Pelargonium x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix', och buskmargerit, *Argyranthemum frutescens* (L.) Sch.Bip. 'Dana'. Sticklingar av dessa växtslag producerades som småplantor i både IR-växthuset och växthus med konventionell vattenburen uppvärmning. När småplantorna var saludugliga, d.v.s. planteringsmogna flyttades de till SLU's växthus i Alnarp, Institutionen för trädgårdsvetenskap där de planterades i lämplig krukstorlek och substrat för vidare observation och bedömning som blommande färdigvara. Dessutom odlades *Euphorbia pulcherrima* 'Winter Rose' och 'Sonora', samt *Argyranthemum frutescens* 'Dana' som färdigvara fram till begynnande blomning både i IR-växthuset och referensväxthuset med konventionell vattenburen värme. Sammanlagt följdes utvecklingen hos 7 växtomgångar under fas II.

4.1.2 IR-anläggningen ur biologisk synvinkel

För att gynna rotutvecklingen hos sticklingar är det viktigt att temperaturen de första dagarna efter stickning är högre i substratet än på bladen. Under den första perioden är sticklingarna känsliga för uttorkning eftersom de saknar rötter som kan ta upp vatten. Uttorkning motverkas genom att sticklingarna duschas eller dimmas uppifrån med jämna mellanrum tills dess de har fått rötter. Så skedde i både IR- och det konventionella växthuset med gasdriven vattenburen värme. Strålning från övervärmen fick därför inte förekomma under rotningsperioden. Om bladtemperaturen blir för hög innan rotutvecklingen har skett förlorar sticklingarna för mycket vatten som inte kan ersättas av några rötter. Sticklingen riskerar då att torka ut. För att uppnå den önskade högre substrattemperatur kördes anläggningen från första dagen sticklingarna hade stuckits fram till att rotbildningen hade skett endast med de under bordsskivorna placerade IR-strålarna. Substrattemperaturgivarna var placerade i ”ebb och flodbordsskivornas” fördjupningar, så att de nåddes tidigt av strålningsvärmen. Driftintervallerna av bordsvärmen var därmed kortare vilket resulterade i en jämnare substrattemperatur. Erfarenheten under projektets inledningsskede fas I, då temperaturgivarna placerats i sticklingssubstratet (Jiffy 7) och förde med sig en alldeles för hög substrattemperatur kunde därmed undvikas. Vid produktion av färdigvara värmdes plantorna i IR-växthuset endast med övervärmen, reglerad via bladtemperaturen.

4.2 Växternas utveckling i jämförelse med konventionell uppvärmning

Som under fas I var plantorna i ytterkanterna i regel något senare i sin utveckling, mest beroende av en lägre temperatur (kallras från växthusets ståndsida eller otillräcklig värmefördelning), men även förorsakad av ett sämre ljusutbyte. IR-givaren som mäter och reglerar bladtemperaturen hade under fas I flyttats närmare övervärmeröret mot bordets mitt, eftersom bladtemperaturen annars kunde bli allt för hög mitt under övervärmeröret. Samtidigt hade reflektorerna höjts över röret så att värmen från strålningsrören nådde längre ut till bordskanterna. Dylika kanteffekter i rotutveckling och tillväxt kunde hos vissa växtslag även iakttagas i referenshus 10 med vattenburen värme.

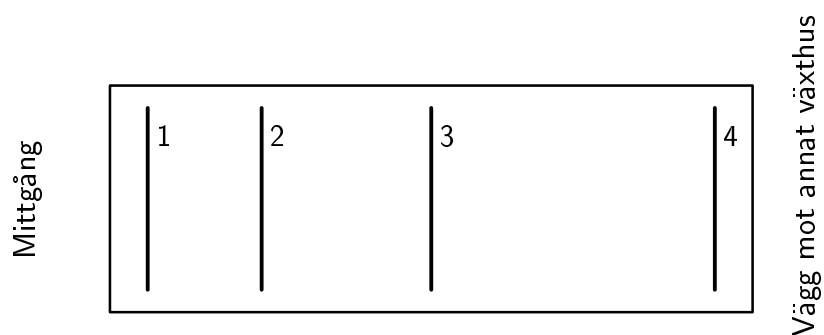
4.3 Mätningar och bedömningar

För fortsatt observation och bedömning av plantmaterialet fördes 20 plantor per försöksled till SLU Alnarp, Institutionen för trädgårdsvetenskaps växthus. Plantorna togs dels från referenshuset med konventionell vattenburen värme där sticklingsutvecklingen oftast var jämn över hela bordskivan, dels från fyra olika bordsplaceringar i det med IR-värmda växthuset. Dessa bordsplaceringar överensstämmer väl med placeringen av de temperaturgivare som användes för mätning av lokala temperaturer. I redovisningen av tillväxtresultaten är listan av försöksled (Bilaga A) även försedd med den beteckning som användes vid redovisningen av de lokala temperaturerna, se s. 21. När ojämnheter, så kallade kanteffekter i plantornas habitus¹ upptäcktes på referenshusets bord mättes dessa plantor särskilt. Detta för att få en god dokumentation på plantornas utveckling. Detta beroende på hur långt ifrån IR- eller värmeledningsrören plantorna var situerade, se figur 4.1. Intressanta parametrar som synlig rotmängd och volym grönmassa eller sticklingens längd bedömdes strax innan de rotade sticklingarna planterades i 11 till 12 cm krukor med Hasselfors Blomjord + Leca. Den fortsatta odlingen skedde vid en lägsta nattemperatur av 18°C med 2°C dagtillägg i enkelglashus utan skugga. Ingen ytterligare retardering förekom. När plantorna var saludugliga som färdigvara, bedömdes dessa ytterligare en gång med bland annat hänsyn till planthöjd, plantbredd, antal skott, helhetsintryck d.v.s. prydnadsvärde.

I vissa fall har mätplantor tagits från tre olika bordsplaceringar i referenshuset. Dessa har då fått försökslednummer 5, 6 och 7 motsvarande. Om så har varit fallet anges detta i beskrivningen för varje odlingsomgång.

¹Växtens helhetsintryck

Bordsskiva i växthus 1 ($5,34 \times 1,80\text{m}$)



Försöksled 1–4: uppvärmning med gasdriven infravärme

1. 30 cm från södra bordskanten mot mittgången av huset
 2. mitt över södra IR-värmaren för undervärmen
 3. mitt emellan IR-värmaren för undervärmen och rakt under IR-övervärmertuben
 4. 30 cm från norra kanten, mot glasvägg till angränsande växthus
5. Referenshus med vattenburen värme

Figur 4.1: Placering på bordsskivan av plantmaterial, som togs ut för bedömning och mätning från IR-huset

4.4 Resultat för olika växtslag

Resultaten redovisas för varje sticklingsomgång och växtslag för sig i de följande avsnitten.

4.4.1 *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotsch 'Sonora' – julstjärna, sticklingar 1

Kjell-Ingvars odlar stora mängder julstjärnor, bland annat *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotsch 'Sonora'.

Försöksdata:

IR-växthus 1, Referenshus 8

Sticklingsförökning: v. 30, 28 juli 2000 i Jiffy 7

Begynnande rotutveckling: v. 32, 10 augusti 2000

Salufärdiga sticklingar: v. 34, 21 augusti 2000

Plantering i 11 cm krukor: v. 34, 23 augusti 2000, i SLUs växthus i Alnarp, växthus 4 avd. 4, 18°C

Salufärdigt stadium: v. 49, 4–10 december 2000

Slutbedömning av färdigvara: v. 50, 11 december 2000

Under rotningsfasen besöktes förökningsväxthusen vid 5 olika tillfällen. Vid dessa besök mättes blad- och substrattemperaturen med en Raytek infraröd termometer. Mätvärdena varierade mellan 20,3 och 25,5°C. Värdena från ett av dessa besök finns i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Blad- och substrattemperaturer för julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotsch 'Sonora', 22 augusti 2000 kl 09.45

	Temperatur °C				
	Led 1	Led 2	Led 3	Led 4	Led 5
Blad	22,4	22,4	21,8	21,4	22,4
Substrat	21,5	21,5	21,8	20,3	22,6

Mätningar och bedömningar

När sticklingsplantorna var tillräckligt utvecklade för plantering bedömdes antalet synliga rötter utanpå Jiffy 7 visuellt och noterades med siffrorna 0–9, där 9 motsvarade god rotutveckling. I samband med detta mättes även sticklingens längd i mm. Vid salufärdigt stadium mättes planthöjden från krukkanten till cyathiernas² högsta punkt. Plantbredden mättes dels där plantan var bredast, dels där den var smalast. Samlingen av röda högblad i plantans topp mättes där själva ”stjärnans” diameter var störst. Antalet ”stjärnbärande” sidoskott räknades per planta. Helhetsintrycket bedömdes med betygen 0–9, där 9 motsvarar högsta kvalitet eller prydnadsvärde.

Tillväxtresultat: *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora'

Försöksled 4 motsvarar plantor som stod 30 cm från bordets norra kant. Dessa plantor var senare med sin rotutveckling p.g.a. lägre blad- och substrattemperatur. Två veckor efter planteringen var skillnaderna i tillväxt dock utjämnade och kvaliteten var av samma höga klass som plantorna från övriga led. Härmed fanns det inte någon skillnad mellan plantorna som rotades i ett växthus med gasdriven IR-värme eller gasdriven vattenburen uppvärmning. Tillväxtresultaten för plantorna i IR-huset och referenshuset finns i figur A.1.

4.4.2 *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch 'Winter Rose' – Färdigvara

En ny julstjärnesort som odlas hos Kjell-Ingvars är *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch 'Winter Rose'.

Försöksdata: IR-växthus 1, Referenshus 2

Sticklingsförokning v. 33, 16 augusti 2000 i 6 cm plastkrukor, för produktion av färdigvara.

Plantorna odlades från sticklingsstadiet till salufärdiga blommande plantor i IR-växthuset 1 och referenshus 2.

Slutbedömning av färdigvara: v. 48, 1 december 2000.

Samtliga plantor har efter rotutvecklingen bevattnats med ebb- och flodsystem.

²Blomställning

Tillväxtresultat: *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch 'Winter Rose'

Det fanns kanteffekter i båda husen, huvudsakligen förorsakade av ojämnheter i temperatur och tillgång på ljus (kanteffekter). Kanteffekter i Infrahuset har reducerats sedan reflektorerna på övervärmerören har höjts. Plantorna i försöksled 4 och 7 är betydligt mindre, så även i höjd och bredd. De är dessutom senare i utveckling vilket framgår av figur 4.2. Frånsett förseningen kan detta inte anses som någon nackdel i detta sammanhang, eftersom man eftersträvar korta kompakta plantor i en liten 6 cm kruka. Proportionen mellan krukstorlek och planta är i led 4 och 7 bättre än i övriga led. Plantorna från referenshuset 2 gjorde ett något friskare intryck än de från IR-växthus 1. Flera plantor i detta hus hade av okänd anledning tappat 1–2 gröna blad. Den snabbaste utvecklingen skedde i försöksled 2 och 6. Plantornas hållbarhet observerades under fyra veckor efter salufärdigt stadium i SLUs växthus i Alnarp. Någon skillnad i hållbarhet av cyathier och bractéer³ kunde inte iakttas. Fotografi av *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch 'Winter 'Rose' ses i figur 4.2 och tillväxtresultaten visas i figur A.2.



Figur 4.2: *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch 'Winter 'Rose'. Led 1–4 odlades i IR-huset, led 5–7 odlades i referenshuset. (Foto: H.K. Schüssler)

4.4.3 *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora', julstjärna – sticklingar

IR-växthus 1, Referenshus 10

Sticklingsförokning v. 31, 3 augusti 2001 i Jiffy 7

³Färgade högblad

Rotutveckling: v. 34, 23 augusti 2001

Första bedömning och mätning: v. 34, 24 augusti 2001, då småplantorna är saludugliga.

Plantering: v. 35, 30 augusti 2001, en planta per 12 cm kruka, därefter fortsatt odling i SLUs växthus i Alnarp.

Slutbedömning vid salufärdigt stadium: v. 50, 10 december 2001

Tillväxtresultat: *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' – sticklingar 2

Bladtemperaturen som mättes med handburen Raytek IR-termometer vid besöken låg i IR-växthuset oftast 2–3°C lägre än i referensväxthuset. Eftersom det skedde en intensivare dimmning med bevattningsdysorna i IR-växthuset kan antas att bladtemperaturen var lägre av denna anledning. Båda växthusen var starkt skuggade mot solinstrålning under rotningsperioden. Under de tre augustiveckorna rotutvecklingen pågick har IR-strålarna förmodligen inte varit i drift så ofta. Den lägre temperaturen förde med sig en senare rotutveckling. Rötterna blev synliga på subtratkrukans (Jiffy 7) yta 4–5 dygn senare i IR-växthuset. Dessutom hade dessa plantor ett mindre antal rotspetsar vid försäljningstillfället av de rotade sticklingarna. Som så ofta tidigare i detta projekt, visade det sig även vid denna odlingsomgång, att plantorna med den något senare rotutvecklingen växte snart ifatt övriga när de väl var omplanterade i salukrukan och odlades vidare vid 20°C och en luftningstemperatur av 21°C. Som framgår av figurerna A.3 och A.4 har de ursprungliga skillnaderna i småplantstadiet utjämnats när plantorna nådde salufärdigt stadium. Bractéerna började visa färg den 17 oktober och anthesis⁴ av de första cyathierna skedde den 5 december. Samtliga plantor från alla sju led nådde en synnerligen god salukvalitet, detta utan att det användes några kemiska tillväxtretarderande medel, se fotografiet i figur 4.3.

***Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' – Produktion av färdigvara i en period med låg utomhustemperatur**

IR-växthus 1, Referensväxthus 10

Sticklingarna stacks direkt i 6 cm salukrutor v. 36, den 4 september 2001, i syfte att producera miniatyrjulstjärnor. Sticklingarnas rotutveckling skedde inte i de båda ”försöksväxthusen”, utan i växthus fyra. Sticklingarna belystes med SON-T lampor under veckorna 38–40 i tre timmar per dygn. Belysningstiderna låg mellan kl. 06.00–07.30 samt kl. 17.00–18.30, eftersträvad lufttemperatur var 22°C. Först sju veckor

⁴Tid då första blomman är utslagen.



Figur 4.3: *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora', planta 1–4 har under rotningsfasen stått i IR-växthuset och planta 5–6 i referenshuset. Som färdigvara är skillnaderna obetydliga. (Foto: H.K. Schüssler)

senare, v. 43, den 24 oktober 2001, fördelades plantorna på de två växthusen i syfte att jämföra tillväxten. Växthus 1 med infrauppvärmning och växthus 10 med konventionell vattenburen uppvärmning. Perioden då plantorna odlades vidare i växthus 1 och 10 skiljer sig på så vis från tidigare färdigvaruomgångar att utomhustemperaturen under dessa veckor låg under 10°C. Veckorna 45–50 kunde utomhustemperaturen under flera timmar ligga under noll grader. På grund av den låga utomhustemperaturen startade brännarna i växthus etts övervärmerör oftare. Färdigvara av julstjärnor dimmas eller duschas inte, därför var luftfuktigheten mycket lägre än om man rotar sticklingar. När utomhustemperaturen sjönk under 0°C sjönk luftfuktigheten i växthusen ytterligare. Plantorna nåddes därmed mera direkt av infrastrålarna. Plantor som stod mellan gasbrännarna mittunder övervärmeröret utsattes därmed mera för den oscillerande värmestrålningen än de som befann sig direkt under brännarna. Under odlingsperioden eftersträvade man en bladtemperatur av 19°C. Vid kontrollmätning med en handburen Raytek IR-termometer visade sig att bladtemperaturen i infraväxthuset kunde variera fem grader. Kallast var bladen i norra kanten av växthuset.

Man skall även ta med i beaktande att temperaturen delvis har påverkats av belysningen med SON-T lamporna. Lamporna var tända sju och en halv timme dagligen vid mulen väderlek under hela odlingsperioden mellan kl. 07.00–10.00 och kl. 12.30–17.00. Utgående ifrån att skillnaderna i plantutveckling hade blivit ännu större om plantorna hade varit obelysta. Vecka 48 den 27 november 2001 gjordes en bedömning av julstjärnornas plantutveckling i infraväxthus 1.

Tillväxtresultat – *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora'

Plantorna som var *senast* i sin utveckling återfanns på följande bord i fallande skala:

Bord rad söder: bord nr 1, 12, 4, 5 och 6.

Bord rad norr: bord nr 13, 24, 16, 17, 18 och 19

Plantorna som var *tidigast* i sin utveckling återfanns på följande bord i fallande skala:

Bord rad söder: bord nr 2, 7, 8, 9, 10 och 11

Bord rad norr: bord nr 14, 15, 20 och 21

En jämförelse med figur 2.4 på s. 21 visar ett tydligt samband mellan de tidigast och senast utvecklade plantorna och strålningsintensiteten från strålningsröret för ovanvärme.

Ojämnheter i plantbeståndet gör att försäljningstidpunkten infaller på flera dagar. Detta måste ses som en nackdel, eftersom växthuset då inte kan tömmas på samma gång förorsakar detta onödigt extraarbete. Detta ses tydligt i figur 4.4 som kan jämföras med temperaturfördelningen på termografbilden i figur 3.1 på s. 33. Utrustningen för termograferingen ses i figur 4.5.



Figur 4.4: *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' utveckling den 10 december, 7 veckor efter odlingens start är huvuddelen saludugliga. Ojämnheter i utvecklingen över bordsytan syns tydligt. Utvecklingen sker snabbast under och mellan övervärmehöjarna. I förgrunden syns kameran för termograferingen. (Foto: H.K. Schüssler)



Figur 4.5: Utrustning för termografering av växtbeståndet. (Foto: H.K. Schüssler)

Mätningar och bedömningar av de enskilda leden enligt tidigare mönster utfördes v. 50, den 10 december 2001, se figur 4.6. Plantorna från referenshuset var väsentligt senare i utveckling än de från det IR-uppvärmda växthuset. Detta hade sin orsak i att temperaturen i växthus 10 har varit lägre i slutet av kulturen, eftersom huvuddelen av färdigvaran krävde en lägre temperatur inför leverans. Plantorna i försöksled 2 som stod mittunder övervärmeröret utvecklades snabbast och hade de största braktéerna

vilket i sin tur medförde en större ”stjärndiameter” och därmed ett högre helhetsintryck. Planthöjd och plantbredd skilde däremot obetydligt mellan försöksleden.



Figur 4.6: *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' julstjärnor från vänster till höger som har utvecklats i sju veckor under IR-rör, Led 1 mot mittgången, Led 2 mitt under övervärmeröret, Led 3 mot norra glasväggen. Led 4 har utvecklats i referenshuset med konventionell vattenburen värme. (Foto: H.K. Schüssler)

4.4.4 Pelargonium x hortorum L.H. Bailey 'Grand Prix' – sticklingar

Pelargonen *Pelargonium x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix' studerades under två odlingstillfällen, här kallade omgång 1 respektive 2.

Sticklingsplantor – Omgång 1

IR-växthus 1, Referenshus 10

Sticklingsföroökning v. 7, 16 februari 2001 i Jiffy 7, sticklingsmaterialet kom från Kenya.

Behandling med tillväxtreglerande medel (Cycocel): v. 9, 27 februari 2001 kl. 15.30–16.30.

Första bedömning och mätning: v. 10, 6 mars 2001, då småplantorna var saludugliga. Plantering v. 10, 7 mars 2001, en planta per 12 cm kruka, vidareodling i SLUs växthus i Alnarp.

Slutbedömning av färdigvara: v. 20, 20 maj 2001.

Temperaturinställningarna i samband med sticklingsföroökningen: Substrattemperatur 22°C, luftning vid 24°C. Den 3 mars började man med uppvärmning via övervärmerören, önskad bladtemperatur 21°C. Sticklingarna hölls fuktiga med dimmdysor i båda husen, 15 sekunder med 20 minuters intervall. Belysning med assimilationsljus, SON-T kl. 23.00–17.00 i båda växthusen.

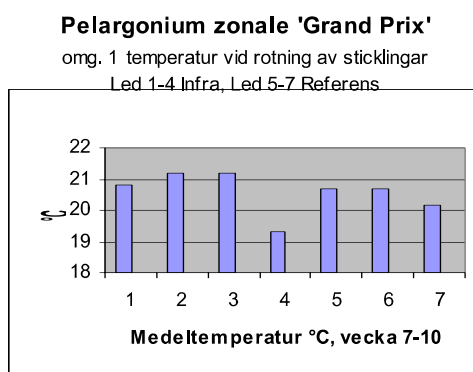
Efter plantering i 12 cm krukor odlades plantorna vidare i SLUs växthus vid en natttemperatur av 18°C, luftning vid 20°C utan skuggväv och vid naturlig dagslängd utan tilläggsbelysning. Blomstjälkar toppades bort fram till den 20 april. Den 20 maj hade samtliga plantor 3–6 knopp- och blomstjälkar ovanför bladnivån och plantorna ansågs ha nått saludugligt stadium.

Samtliga småplantor var klara för leverans den 6 mars 2001. Vid detta tillfälle togs 20 plantor från vardera försöksled för bedömning och vidare observation i SLUs växthus.

Tillväxtresultat: Pelargonium x hortorum L.H. Bailey 'Grand Prix' – Omgång 1

Som framgår av stapeldiagrammen, figurerna A.6 och A.7 så var rotutvecklingen hos plantorna i led 4 väsentligt senare än övriga led, vilket indikerade en lägre temperatur vid bordens ytterkant. Så skedde även med plantorna från referenshusets östra kant, dock inte i samma utsträckning. Den misstänkt lägre temperaturen bekräftades

via utplacerade Escort dataloggrar se figur 4.7. Jämför denna figur med diagrammet över synliga rötter i figur A.6 på s. 85. Den något senare rotutveckling hos sticklingarna i led 4 till trots, utvecklades plantorna utmärkt efter planteringen. Samtliga plantor blev saludugliga och nådde en hög handelskvalitet. Då plantorna inte hade skuggats alls sedan de planterades i slutkrukan höll de sig kompakta utan ytterligare behandling med retarderande medel. Väl synliga bladzoner (mörkgröna ringar) förhöjde plantkvaliteten ytterligare tack vare den goda ljustillgången.



Figur 4.7: Medeltemperatur insamlad under rottningsperioden vecka 7–10 från Escort dataloggrar utplacerade på platser som motsvarar sticklingarnas placering på bordsyrtorna. *Pelargonium x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix', omgång 1

Omgång 2

IR-växthus 1, Referenshus 10

Sticklingsföroknning: v. 11, 16 mars 2001 i Jiffy 7. Sticklingsmaterialet kom från Kenya.

Behandling med tillväxtreglerande medel (Cycocel): 29 mars 2001 kl 14.00–15.00.

Första bedömning och mätning: v. 14, 6 april 2001, då småplantorna var saludugliga.

Plantering: v. 14, 6 april 2001, en planta per 12 cm kruka, vidareodling i SLUs växthus i Alnarp.

Slutbedömning v. 21, 25 maj 2001 då färdigvaran var saluduglig.

Temperaturinställningar i samband med sticklingsföroknningen: Substrattemperatur 23°C, bladtemperatur 22°C och luftningstemperatur 24°C fram till den 31 mars då den önskade substrattemperaturen sänktes till 21,5°C. Den 2 april stängdes undervärmen i hus 1 av och uppvärmningen skedde med övervärmerören. Den eftersträlvade bladtemperatur var då 21°C. Sticklingarna belystes med SON-T lampor i

båda växthusen. Fördelning av temperaturen över bordsytorna under rotningsperioden av *Pelargonium x hortorum* 'Grand Prix' omgång 2.

Temperaturen och luftfuktigheten mättes även med 10 st. Escort Junior datalogger som mätte temperaturen var tredje minut. Som en kontroll mättes fördelningen av temperaturen på bladen, bordsskivan och själva loggern vid 6 olika tillfällen med en handburen Raytek IR-termometer. Dessa mätpunkters placering återfinns också i figur 2.4 och mätningar från dessa platser är också redovisade i figurerna 2.5–2.10. Figur 4.8 visar hur dessa mätgivare placerades på växthusbordet.

Mätningarna utfördes den 16 mars kl. 13.30 och 15.30, den 23 mars kl. 16, den 27 mars kl. 11, den 29 mars kl. 16 och den 2 april kl. 14. Det var förvånande att se temperaturens relativa jämnhet vid de olika mättillfällen. Anledningen till detta kan antas bero på vattenmängden som fanns i substrat, växtmassan och fiberduk på bordet samt svävande som ånga i växthusluften. Det framgår dock en klar tendens att mätpunkt 4 i infraväxthusets norra bordskant har varit svalast. Detta avspeglade sig ofta i olika växtkulturers något senare rotutveckling. I tabellerna A.1–A.6 redovisas mätvärdena.

Tillväxtresultat: *Pelargonium x hortorum* 'Grand Prix' omgång 2

Den 6 april togs 20 plantor från vardera växthus 1 med IR-uppvärmning och växthus 10 med konventionell vattenburen värme för mätning, bedömning och vidareodling i SLUs växthus i Alnarp. Tyvärr kunde inte försöksplanen med observationerna från de olika placeringarna på bordsskivan följas vid denna omgång, enskilda plantor ur dessa stråk hade sålts dagen innan. Därför fick vi nöja oss med att ta ut ett gener-alprov från vardera växthus fördelad över hela bordsytan. Efter plantering i 12 cm krukor odlades plantorna vidare vid en nattemperatur av 18°C, luftning vid 20°C utan skuggväv. Blomstjälkar toppades bort fram till den 7 maj 2001. Den 14 maj började de första plantorna bli saludugliga. Den 25 maj hade samtliga plantor 3–6 knopp- och blomstjälkar ovanför bladnivån och plantorna ansågs ha nått saludugligt stadium, vid detta stadiet slutbedömdes plantorna som handelsvara. Som framgår av figur A.8 på s. 87 var skillnaderna i tillväxt obetydliga redan som rotade sticklingar. Eventuella skillnader låg helt inom felmarginalen. Slutprodukten nådde en mycket hög kvalitet. Plantorna var precis som i omgång 1 blomrika och välproportionerade, vilket sammantaget gav ett högt prydnadsvärde och därmed ett högt helhetsintryck. Figur 4.9 visar sticklar från IR-huset och referenshuset strax före plantering.



Figur 4.8: *Pelargonium x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix'. Placering av Escortloggrarna E, B, D och C enligt figur 2.4 på s. 21. (Foto: H.K. Schüssler)



Figur 4.9: Sticklingar från referenshus (vänster) och IR-hus (höger) strax före plantering (Foto: H.K. Schüssler)

4.4.5 *Argyranthemum frutescens* (L.) Sch.Bib. 'Dana', margerit – Färdigvara

Studie av produktion av färdigvara gjordes med margeriten *Argyranthemum frutescens* (L.) Sch.Bib. 'Dana'.

IR-växthus 1, Referensväxthus 10

Plantering: v. 16, 18 april 2001, 2 cm pluggplantor i 9 cm krukor, en planta per kruka, se figur 4.10.

I båda växthusen belystes plantorna med SON-T lampor kl. 04.00–23.59.

Mätningar och bedömningar utfördes v. 21, 25 maj 2001 när plantorna hade nått salufärdigt stadium.

I IR-växthuset eftersträvades en bladtemperatur av 17°C och en luftningstemperatur av 18°C. Lufttemperaturen i referenshuset ställdes en grad lägre då dagtemperaturen vid ökad instrålning utifrån lätt blev förhöjd. Den 26 april sänktes börvärdet av bladtemperaturen från 17 till 16°C för att undvika för kraftig sträckningstillväxt. Under kulturens gång uppmättes bladtemperaturen vid några tillfällen. Härvid visade sig referensväxthuset hålla 0,5–2°C högre temperatur på dagen. Med en utomhus-temperatur av omkring 18°C dagtid fick man finna sig i att bladtemperaturen vid solinstrålning kunde gå upp till över 25°C.

Tillväxtresultat: *Argyranthemum frutescens* (L.) Sch.Bib. 'Dana'

Två veckor efter planteringen var rötterna i krukjorden mycket välutvecklade i båda växthusen. I referenshuset var några plantor en eller två cm större redan då. Som framgår av figur A.10 fortsatte de att växa förbi plantorna från IR-växthuset både på höjden och på bredden. Den kraftiga tillväxten var en nackdel och försämrade kvaliteten. För att hejda sträckningstillväxten sprutades plantorna i referensväxthuset med tillväxtreglerande medel (Topflor). Detta behövde inte göras i IR-växthuset. Trots att blomningen var något tidigare i referensväxthuset, särskild i bordskanterna, så blev blomningen rikligare i IR-växthuset vid bedömningstillfället. Förutom detta var IR-plantorna mera välproportionerade och kompakta, vilket ökade helhetsintrycket d.v.s. prydnadsvärdet något. Figur 4.11 visar fotografier av plantorna i IR-huset och referenshuset. Huskonstruktionens inverkan på skuggor på plantorna ses tydligt.



Figur 4.10: *Argyranthemum frutescens* (L.) Sch.Bib. 'Dana' Ellegaards pluggplantor 2 cm planteras i 9 cm plastkruka (Foto: H.K. Schüssler)



Figur 4.11: *Argyanthemum frutescens* (L.) Sch.Bib. 'Dana'. Bilderna illustrerar huskonstruktionens skuggverkan på plantbeståndet. IR-huset visas i den övre biden och referenshuset i den undre. (Foto: H.K. Schüssler)

Kapitel 5

Förbättringsmöjligheter på infrasystemet

Infravärmesystemet har nu varit i drift sedan sensommaren 1999. Efter en del justeringar har infravärmen fungerat i stort sett väl. Fas I omfattade i första hand erfarenhetssamling av tekniken. Enligt leverantören Systema så är tomatodlingar den vanligaste tillämpningen för infravärme. Det är inte säkert att de dimensioneringskriterier som använts för installationen i projektet eller andra traditionella dimensioneringskriterier är de allra bästa. Detta kapitel inriktas på att försöka koppla samman teknik, värmeöverföring och ekonomi så att den bästa systemlösningen kan eftersträvas.

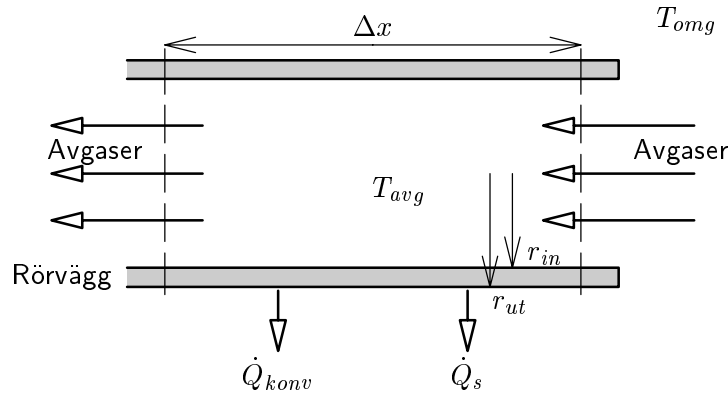
5.1 Infrastrålarna

Vi såg i kapitlet om termograferingen att temperaturskillnader förekom mellan olika platser på växtborden. Till stora delar beror detta på att strålningsrörens temperatur sjunker på grund av värmeavgivningen och att strålningsfördelningen tvärs strålningsrörets riktning inte är optimal. I denna studie av infrastrålarna visas vad som påverkar strålningsrörets yttemperatur och därmed ett sätt att förbättra jämnheten av värmestrålningen.

5.1.1 Modell för strålningsrörets temperatur

I detta avsnitt studeras rörtemperaturen och strålningsintensiteten längs med röret. Strålningsfördelningen tvärs denna riktning är mest beroende av reflektorutformning och höjden mellan växthusbord och strålningsrör. Modellen beskriver temperaturförloppet i stationärt tillstånd och utan reflektor, det vill säga ett horisontellt fritt hängande rör. Röret delas in i ett flertal element med längden Δx , där temperaturer och energi till omgivningen beräknas. Den bortförda energin ger avgasernas temperatur till nästa element.

Ansatsen är förenklad. I verkligheten är den effektivt strålande ytan endast knappt 90% på grund av reflektorn [6]. Inte heller betraktas mer än en brännare i rörsträckan. Då temperaturen fallit till en given nivå i strålningsröret placeras en ny brännare som dels höjer temperaturen till ungefär samma nivå som vid den föregående brännaren, dels ökar avgasflödet. För denna analys är det fullt tillräckligt att betrakta en brännare och efterföljande strålningsrör. En utförligare modell visas i [6].



Figur 5.1: Utgångspunkt för modell av strålningsrör

Värmeeffekten som transporteras från avgaserna till strålningsröret $\dot{Q}_{in}$, genom strålningsröret $\dot{Q}_{mtrl}$ och från strålningsröret till omgivningen $\dot{Q}_{ut}$ är lika vid stationärt tillstånd. Ekvationerna 5.1–5.3 beskriver detta. Använda beteckningar visas i figur 5.1.

$$\dot{Q}_{in} = h_{in} (T_{mtrl} - T_{avg}) A_{in} \quad (5.1)$$

$$\dot{Q}_{mtrl} = 2 \pi \lambda_{mtrl} \Delta x \frac{T_{ut} - T_{in}}{\ln(r_{ut}/r_{in})} \quad (5.2)$$

$$\dot{Q}_{ut} = h_{ut} (T_{ut} - T_{omg}) A_{ut} \quad (5.3)$$

Strömningen i rörets insida antas vara turbulent och de traditionella sambanden för värmeöverföringen i detta fall används då, ekvationerna 5.4–5.5.

$$\text{Nu} = 0,023 \text{ Re}^{0,8} \text{ Pr}^{0,3} \quad (5.4)$$

$$h_{in} = \frac{\text{Nu} \lambda_{avg}}{D_{in}} \quad (5.5)$$

Värmeöverföringen på rörets utsida består av strålningsvärme och konvektiv värme. Strålningseffekten $\dot{Q}_s$ beskrivs enligt

$$\dot{Q}_s = A \epsilon 5,67 \cdot 10^{-8} (T_{mtrl}^4 - T_{omg}^4) \quad (5.6)$$

och den konvektiva värmeöverföringen $\dot{Q}_{konv}$ antas vara fri konvektion och beskrivs enligt

$$\dot{Q}_{konv} = h_{ut} A_{ut} (T_{mtrl} - T_{omg}) \quad (5.7)$$

där h_{ut} bestäms i analogi med ekvation 5.5 och Nusselttalet Nu

$$\text{Nu} = 0,60 + \left(\frac{0,387 \text{ Ra}^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{\text{Pr}}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2 \quad (5.8)$$

med Rayleightalet Ra

$$\text{Ra} = \frac{g \beta (T_s - T_{omg}) D_{ut}^3}{\nu \alpha} \quad (5.9)$$

Värmeöverföringen på strålningsrörets släta insida kan förbättras på olika sätt. Ett exempel är att liksom i värmepannor installera turbulatorer, spiralformade insatser. Dessa skapar ett roterande flöde (swirl) och sekundär strömning i röret, vilket förbättrar värmeöverföringen. Detta följs dock av ett ökat tryckfall, som kräver ett större fläktarbete. I handböcker och tidskriftsartiklar [7–9] ges samband för den ökade värmeöverföringen vid användning av sådana insatser. Värmeöverföringen på rörets insida kan fördubblas på detta sätt och effekten på en infrastrålnare blir en snabbare avkylning av avgaserna.

5.1.2 Beräkningar av temperatur och IR-strålning

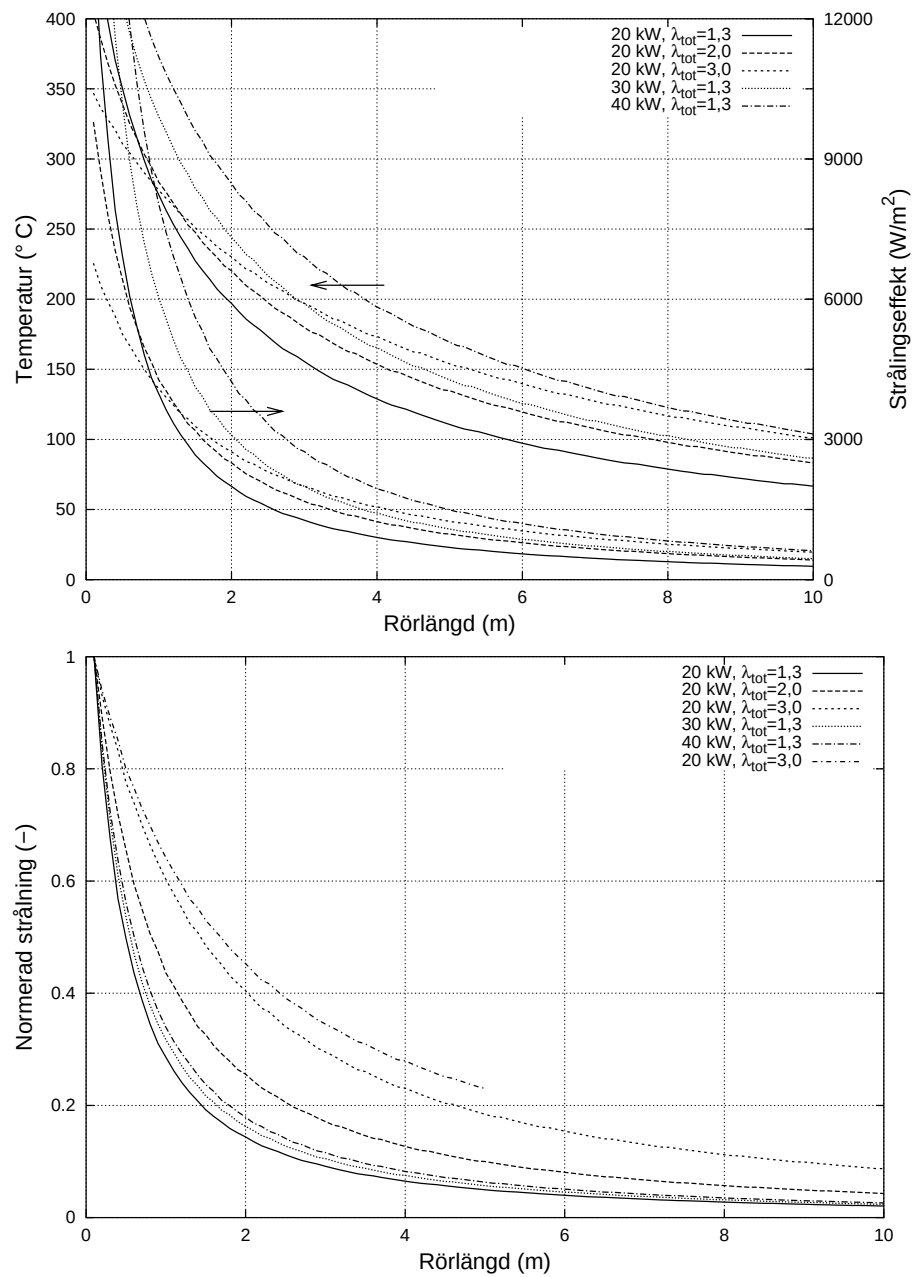
Beräkningarna avser att visa hur olika kombinationer av brännareffekt, rördimensioner och luftflöden påverkar värmeöverföringen från infrastrålare. De faktorer som framför allt ger en jämn strålningsfördelning längs med strålningsröret söks.

Beräkningar är gjorda för ett strålningsrör med 10 meters längd. Diametern har varierats mellan 100 mm och 150 mm. Brännareffekten i beräkningarna har varit 20, 30 och 40 kW. Förbränningen sker med ett luftöverskott på 30% och avgaserna som strömmar i strålningsröret kan sedan spädas ut med rumstempererad luft till ett totalt lufttal på 2,0 eller 3,0 i strålningsröret.

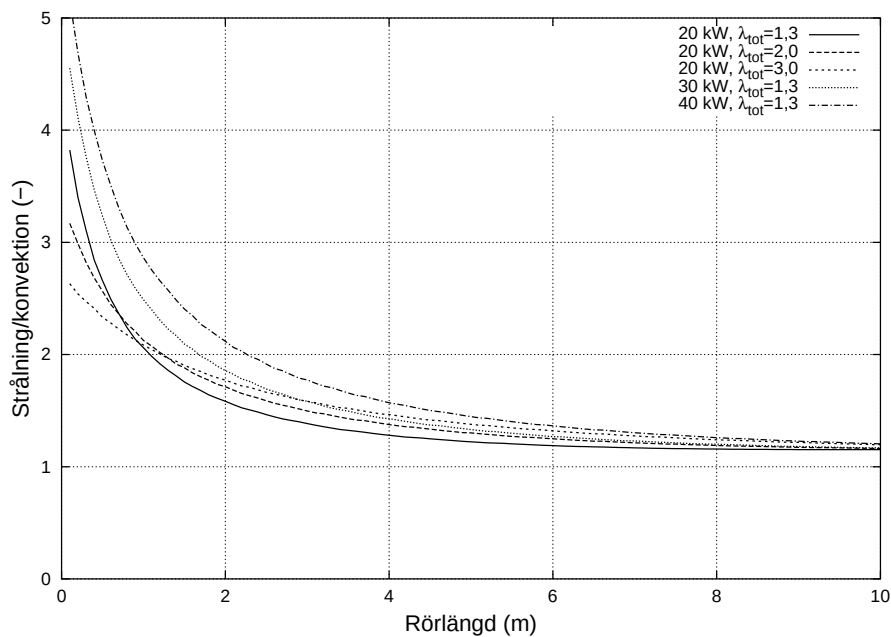
Avgasernas inloppstemperatur i strålningsröret sätts lika med den teoretiska flamtemperaturen för naturgas med en sammansättning som dagens svenska och det luftöverskott som förbränningen antas ske med. Utspädningsluft kan också specificeras i det program som skapats ur modellen, vilket ger ett totalt lufttal för avgaserna som strömmar i strålningsröret.

Det övre diagrammet i figur 5.2 visar strålningsrörets ytemperatur och utstrålad värmeeffekt längs med strålningsröret. Vi ser en snabbt sjunkande temperatur och strålningsintensitet, ett temperaturförlopp som mildras genom användande av utspädningsluft, men till priset av högre utloppstemperatur och något lägre verkningsgrad. Temperaturerna nära brännaren är troligen överskattade på grund av att ingen värmeledning längs röret ingår i modellen. De högsta temperaturerna är i praktiken lägre. Den beräknade strålningseffekten avser effekten per ytenhet strålningsrör. Strålningsintensiteten mot växthusborden blir förhållandet mellan bordsbredden och strålarens omkrets. I det nedre diagrammet visas strålningsintensiteten som andel av den maximala strålningsintensiteten, det vill säga vid brännaren. Linjen som stannar vid 5 meters rörlängd visar effekten av att strålningsröret böjs 180° och går parallellt med strålningsrörets första del. Kallare delar av röret är således intill varma delar och resultatet blir att strålningssumman från intilliggande rör ger en flackare kurva.

I figur 5.3 visas förhållandet mellan strålning och konvektion. Bäst utbyte fås med högre brännareffekt då rördiametern är konstant. Diagrammet visar att den överförda strålningsenergin är i storleksordningen 1/3–1/2 av den totalt överförda energin från strålningsröret. Det är också intressant att i framtiden studera effekten av värmeisolering på reflektorns baksida. I växthus sitter reflektorerna nära det dåligt isolerade taket och nära de öppningsbara luckorna.



Figur 5.2: Strålningsrörets ytemperatur och strålningseffekt från infrastrålare med 150 mm diameter (överst) samt strålningen längs med röret för den aktuella konfigurationen (nederst)



Figur 5.3: Förhållande mellan strålning och konvektion längs strålningsröret

5.1.3 Sammanfattande ord om infrastrålarnas egenskaper

Beräkningarna har visat hur infrastrålarnas utformning påverkar strålningsbilden längs med strålningsröret. Vid dimensionering av infravärmesystemet får man ta hänsyn till brännare, rördiameter och andra fasta dimensioner som leverantören erbjuder.

- Ytemperaturen och den utstrålade värmeeffekten sjunker med avståndet från brännaren.
- Jämnare förlopp fås med utspädningsluft och högre brännareffekt, men till priset av sänkt verkningsgrad för en given konfiguration av brännare och strålningsrör.
- En större andel av värmen från infrastrålaren överförs i form av önskad strålning då brännareffekten ökar, och att denna andel minskar då utspädningsluft används.

5.2 Växternas värmeöverföring

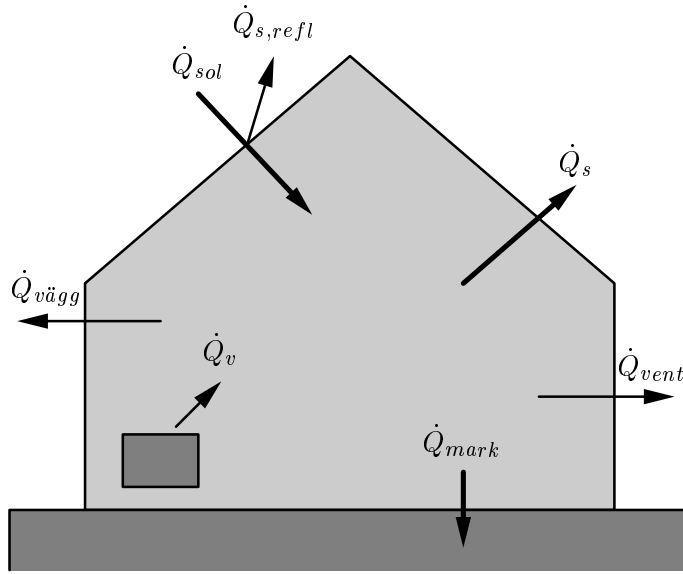
Växthus har en termiskt lätt konstruktion som medför att mikroklimatet påverkas snabbt vid förändringar i väder och utstrålningsförhållanden. Det är därför viktigt att ett växthus utrustas med ett flexibelt värmesystem som snabbt korregerar för växlingar i utomhustemperatur och vindförhållanden och som säkerställer en stabil inomhustemperatur och mikroklimat för plantorna. Uppvärmning av växthus är energikrävande och kostsam vilket motiverar en energiteknisk lösning som både minskar energikostnaderna och samtidigt medger flexibilitet i funktion, användning och vid tillfällig avstängning av verksamheten.

Likheter mellan en traditionell byggnad med normal isolering är att växthuset skall fungera som klimatskärm för skydd mot väder och vind och för att säkerställa en temperatur och ett inomhusklimat lämpad för den specifika verksamheten. Olika verksamheterna ställer olika krav på inomhus- och vistelseklimat, toleransgränser för avvikelser i temperatur, relativ luftfuktighet, tryckförhållanden etc. Skillnaderna i konstruktion och funktion hos ett växthus och en traditionell byggnad ligger främst i att växthuset också skall ge maximal tillgång till dagsljus i form av direkt eller diffus solinstrålning som en del i uppbyggnaden av ett mikroklimat lämpligt för växtodling. Stora ytor med ett material som släpper igenom dagsljus medför normalt en hög energianvändning som delvis täcks av solinstrålningen.

Ett växthus är en komplex anläggning när det gäller energitransporterna, speciellt i jämförelse med andra byggnader. En detaljerad modell och datorprogram som inkluderar många av växthusets komponenter och funktioner är beskrivet i [10]. Figur 5.4 visar schematiskt de energi- och massflöden som förekommer i växthus. Uppvärmningssystemet tillför värmeeffekten $\dot{Q}_v$ och solinstrålningen $\dot{Q}_{sol}$ kompletterar denna. En del av solinstrålningen reflekteras i växthusets glasytor $\dot{Q}_{s,refl}$. Värmeförlusterna till omgivningen är till marken $\dot{Q}_{mark}$, genom växthusets väggar $\dot{Q}_{vägg}$, som en följd av ventilation och luftomsättningar $\dot{Q}_{vent}$ och slutligen som värmestrålning från plantorna genom glasväggar och -tak till en kallare omgivning $\dot{Q}_s$.

5.2.1 Bladtemperatur

Bladtemperaturen är central för denna teknik. Vid konventionella uppvärmningssystem i växthus antar man att skillnaden mellan blad- och lufttemperaturen är approximativt konstant. Lufttemperaturen antas oftast vara ca 0,5°C högre än bladtemperaturen och kan då fungera väl som mätsignal till reglersystemet. Infravärmen styrs efter bladtemperaturen och det är därför av intresse att närmare klarlägga om vi kan



Figur 5.4: Värme- och energiflöden i ett växthus

beräkna skillnaden mellan blad- och lufttemperatur vid infravärme, och hur denna skillnad påverkas av olika faktorer.

Det finns ett flertal modeller över växters utbyte av energi med omgivningen. Här passar en termodynamisk modell väl. Ekvation 5.10 kan härledas ur en värmebalans kring ett blad och ger i detta utseende bladtemperaturens T_{blad} beroende av bland annat nettostrålningen Φ till bladet. Uttrycket är hämtat ur [11] och [12]. För infravärme i växthus är den tillämplig endast för ovanvärme. De ingående faktorerna beskrivs i ekvationerna 5.11–5.16.

$$T_{blad} = T_{luft} + \frac{\Phi \frac{r_i^h + r_e^h}{\rho_{luft} c_p} - \frac{1}{\gamma} (p_{blad}^* - p_{H_2O})}{1 + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{r_i^h}{r_e^h}} \quad (5.10)$$

Ekvationen visar att med en ökande specifik strålningseffekt Φ ($W/m_{blad\ yta}^2$) ökar temperaturskillnaden mellan blad och luft. Till skillnad från exempelvis lokaluppvärmning så förändras den värmda ytan som följd av växternas tillväxt. Ekvation 5.10 pekar då på att temperaturskillnaden skulle minska under växternas tillväxt; lufttemperaturen ökar under växtperioden. Värmekapacitiveteten c_p för luften intill bladet beräknas enligt

$$c_p = 1,005 + \frac{0,622 p_{film}^*}{p - p_{film}^*} \quad (5.11)$$

$$p_{film}^* = 10^{10,2501483 - \frac{1759,8083}{\Theta_{film} + 235,7262}} \quad (5.12)$$

där Θ_{film} är filmtemperaturen, medelvärde av lufttemperaturen och bladtemperaturen. Vattenångans mättnadstryck vid bladtemperaturen p_{blad}^* och partialtrycket i växthusluften p_{H_2O} bestäms enligt

$$p_{blad}^* = 10^{10,2501483 - \frac{1759,8083}{\Theta_{blad} + 235,7262}} \quad (5.13)$$

$$p_{H_2O} = \phi 10^{10,2501483 - \frac{1759,8083}{\Theta_{luft} + 235,7262}} \quad (5.14)$$

där ϕ är luftens relativa fuktighet.

$$\frac{\delta}{\gamma} = 0,732 + 0,1838 \Theta_{film} + 0,0026 \Theta_{film}^2 \quad (5.15)$$

$$\gamma = 65,5517 + 0,04218 T_{film}^{1,171} \quad (5.16)$$

Bladets materialegenskaper beskrivs med r_i^h och r_e^h . Dessa kan jämföras med värmeledningsförmågan (r_i^h) och värmeövergångstalet på ytan (r_e^h). Det senare kan således beräknas på likartat sätt som i vanliga värmeöverföringsproblem. Nusselttalet Nu beräknas enligt

$$Nu = \frac{\rho_{luft} c_p l_{blad}}{\lambda_{luft} r_e^h} \quad (5.17)$$

och Reynoldstalet Re som

$$Re = \frac{u_a \lambda_{blad}}{\nu_{luft}} \quad (5.18)$$

samt Grashoftalet Gr som

$$Gr = \frac{g \beta_{luft} l_{blad}^3}{\nu_{luft}^2} (T_{blad} - T_{luft}) \quad (5.19)$$

där l_{blad} är en karakteristisk längd för bladet.

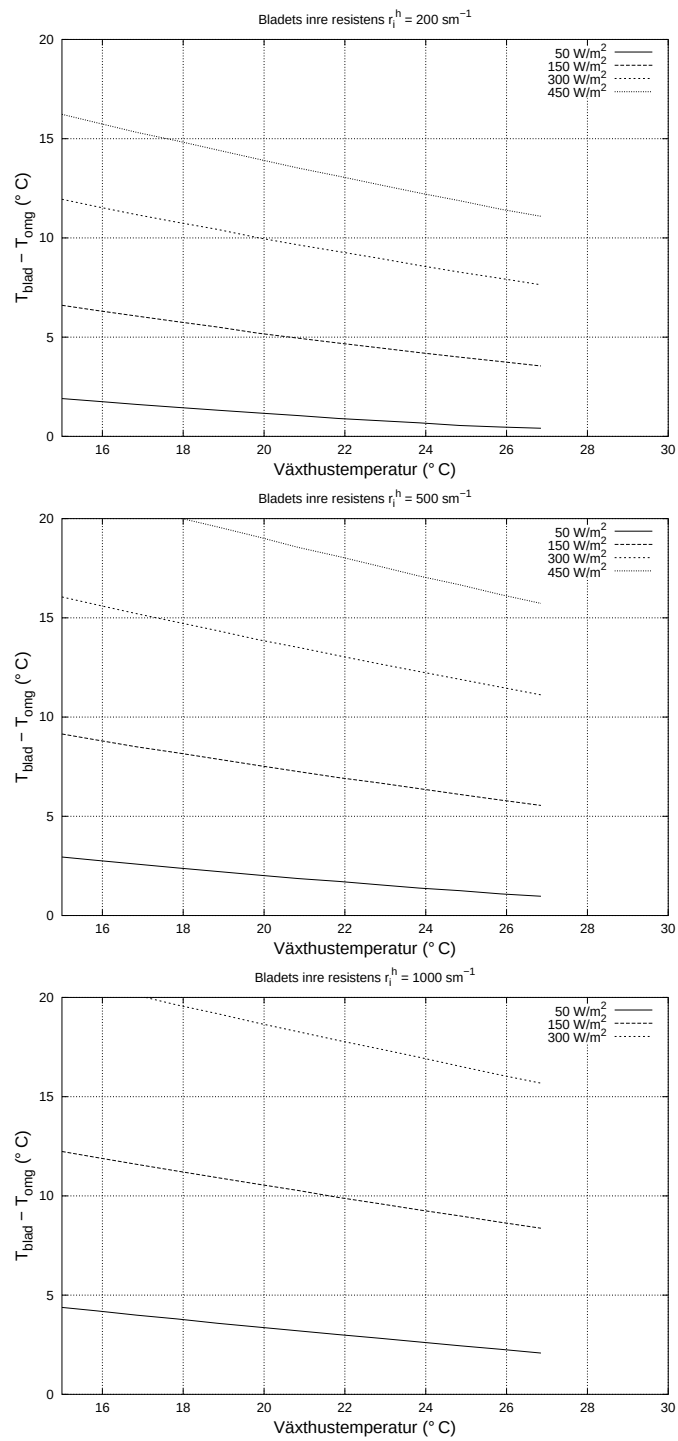
Slutligen kan sambandet för Nusselttalet Nu (ekvation 5.17) användas, vilket tillsammans med ekvationerna 5.18–5.19 ger r_e^h .

$$Nu = 0,37 (Gr + 6,92 Re^2)^{0,25} \quad (5.20)$$

Den inre värmetransporten representerad av r_i^h är beroende av fler parametrar och svårare att bestämma. Parametrarna är enligt en modell [12] ljusinstrålningen, bladtemperaturen, CO_2 -koncentrationen i växthusluften samt ångtrycksskillnaden mellan blad och luft. Det är således faktorer i fotosyntesen som bestämmer storleken på r_i^h och denna blir då beroende på av vilken planta som odlas. Enheter för de olika parametrarna finns på s. 6.

I figur 5.5 visas beräkningar av skillnaden mellan luft- och bladtemperaturer vid olika strålningsintensiteter och bladets inre motstånd r_i^h . För alla beräkningar gäller att luften är stillastående kring bladet. Den karakteristiska längden för bladet är vald till 5 cm. Växthusluftens relativa fuktighet har litet inflytande på resultatet och en variation mellan 50% och 80% påverkar resultatet med mindre än $0,2^\circ C$. Linjerna för 150 W/m^2 och 300 W/m^2 synes vara nära de dimensioneringskriterier ($200\text{--}300 \text{ W/m}^2$) som brukar användas vid dimensionering av värmesystem i växthus. Dock avges inte all energi från infrastrålarna som värmestrålning. Figur 5.3 visar att $1/3\text{--}1/2$ av totalt överförd energi är strålningsenergi. Med hänsyn till den injusterade brännareffekten för ovanvärmarna och växthusets yta så är kurvan för 50 W/m^2 en mer korrekt kurva att studera. Den temperaturskillnad på omkring $2^\circ C$ som observerats då ovanvärmarna varit i drift är i samma storleksordning.

I det översta diagrammet framgår det att vid en strålningseffekt på 150 W/m^2 och en lufttemperatur på $20^\circ C$ i växthuset så är bladtemperaturen ungefär $25^\circ C$. Diagrammen visar i övrigt att högre strålningsintensitet ökar temperaturskillnaden mellan blad och luft samt att samma effekt fås av ett högre inre motstånd i bladet. En förbättrad värmeövergång på bladets yta minskar temperaturskillnaden. Påpekas bör också att värdena gäller nettostrålningen till bladets yta. Är nettostrålningen negativ kommer även temperaturskillnaden att bli negativ; bladet är varmare än omgivningsluften. Negativ nettostrålning kan uppstå då bladets yta avger värmestrålning mot kallare ytor, till exempel omgivningen utanför växthuset. Gardiner som dras för nattetid förhindrar till stor del detta.



Figur 5.5: Skillnad mellan luft- och bladtemperatur vid olika nettostrålning och 60% relativ fuktighet

5.3 Sammanfattande ord

Genom att studera modeller över bladens värmeutbyte med omgivningen kan man sluta sig till att strålningsvärme ger möjlighet till en sänkt lufttemperatur med bibehållen bladtemperatur. En modell som beskriver värmeöverföringen från infrastrålaren visar hur rörets ytemperatur och därmed även strålning och konvektion förändras av brännareffekt och luftöverskott.

Med specifikationerna (växthusyta, brännareffekt och -inställningar) hos den studerade installationen vid AB Kjell-Ingvars har uppmätta värden rimlig överensstämmelse med resultat från modellerna för bladens och infrastrålarnas värmeöverföring. En högre brännareffekt skulle förbättra strålningsutbytet och ge förutsättningar för sänkt lufttemperatur och ytterligare energibesparing. Dock skulle man då snabbt överdimensionera anläggningen och få korta drifttider för brännarna. I fas I av projektet justerades brännareffekten ned för att undvika korta drifttider. Sådana sattes i samband med en mindre god reglering av inomhusklimatet, bland annat avseende öppningen av takluckorna. För de lågväxande växtslag som odlats under projektperioden har de traditionella dimensioneringskriterierna för uppvärmningssystem i svenska växthus visat sig ge goda resultat.

Infrastrålarna har använts enbart till relativt lågväxande plantor och det är inte klart i vilken mån inomhustemperaturen kan sänkas vid odling av växter med stor total bladyta. Detta pekar också på att anpassning till olika växtslag med markant olika totala bladytor kan vara svårt. Detta har inte studerats närmare.

Vidare har inte effekterna studerats närmare om man försöker öka strålningsutbytet genom olika åtgärder. Ett exempel är värmeisolerade reflektorer som idag finns tillgängliga från vissa tillverkare. Växthusborden är desamma som vid konventionell uppvärmning och det har inte gjorts några bedömningar om hur, och i vilken mån, förändringar kan göras för att anpassas till denna form av växthusuppvärmning. Dessa två punkter kan vara lämpliga att studera i eventuella framtida arbeten.

5.4 Jämförelse med annan anläggning: Kloer Gartenbau, Dorsten

Tanken på infravärme hos AB Kjell-Ingvars väcktes av en liknande anläggning hos Kloer Gartenbau i Dorsten i norra Ruhrområdet. Anläggningen besöktes i slutet av april 2002. I detta avsnitt jämförs anläggningen med den studerade hos AB Kjell-Ingvars.

Kloer har växthus på totalt 24 000 m². Infravärmesystemet värmer 10 000 m² som togs i bruk 1999. Dessa växthus är klädda med dubbel plastfolie. Resterande 14 000 m² är glastäckta. Den senare delen värms med ett konventionellt vattenburet värmesystem. Två pannor om vardera 1 860 kW och avgaskondensor används. En ackumulatortank på 180 m³ möjliggör drift av pannorna dagtid så att CO₂-gödsling med avgaserna kan göras. Med hjälp av en dieseldriven kraftvärmeanläggning (220 kW_{el}) produceras el till belysning. I figur 5.6 visas överst en flygbild av Kloers anläggning med den strålningsvärmda delen markerad. Den undre bilden i figuren visar interiören i växthusen med infrastrålare.

Vi kan se i den undre bilden en öppen planlösning och tillsammans med den övre bilden är det tydligt att den totala bredden och längden är av samma storleksordning. Detta är gynnsamt för en god placering av infrastrålarna. Den totala ytan är 10 062 m² (111,8 × 90 m) och jämfört med den begränsade ytan på ca 300 m² i provhuset hos AB Kjell-Ingvars ger det en möjlighet till en bättre placering av infrastrålarna. På det nedre fotografiet framgår att växthusen har rullbord och smala gångar mellan dem. Strålningsrören hänger rakt ovanför dessa gångar. Strålningsrören hänger i parallella rader med första brännaren intill mittgången. Varje infrastrålar har tre brännare med en total effekt på 78 kW. Strålningsrörets längd är 42 m. Fyra strålningsrör är sammankopplade till ett gemensamt avgassystem. Antalet uttag i växthusets tak och väggar hålls lågt genom att förbränningsluften hämtas i växthuset. Infrastrålarens höjd över golvet är ca 5,5 meter och knappt 5 meter ovanför växthusborden. Man räknar med att strålningsbilden har en bredd motsvarande dubbla höjden mellan infrastrålar och växthusbord. Detta är en tumregel som även förekommer hos andra tillverkare än den aktuella hos Kloer. Strålningsintensiteten i kanterna blir dock låg och man har därför placerat strålarna så att värmestrålningen från två parallella strålar överlappar varandra och därför ger en totalt jämnare strålningsintensitet mot plantorna. Ungefär 5–10% av vardera kant överlappas.

I växthuset hos AB Kjell-Ingvars är de två infrastrålarna för övervärmningen placerade i växthusets längdriktning och över varsin rad av växthusbord. De är inte heller lika högt placerade utan befinner sig direkt under en del tvärgående stag. Spridningen av strålningen är därför inte så god och reflektorerna flyttades under projektets första



Figur 5.6: Översiktsbilder från Kloer Gartenbau. Överst ses ett flygfoto av hela anläggningen med den IR-värmda delen inom en röd ram och underst ses ett fotografi från denna del med en infrastrålare markerad

fas så att spridningen förbättrades. Strålarna är placerade så att strålningsbilderna inte överlappar varandra. Kanteffekter som följd av detta har upptäckts. Kanteffekter har man också observerat hos Kloer, men då endast intill växthusets ytterväggar där ingen överlappning och förstärkning av strålningsintensiteten finns. Det hade varit möjligt att placera infrastrålarna i provhuset hos AB Kjell-Ingvars på samma sätt som hos Kloer, men detta hade krävt fler strålningsrör och medfört en dyrare installation. Vi kan således sluta oss till att en god och kostnadseffektiv installation kan kräva en viss minimiyta på växthuset.

Man har hos Kloer observerat att bladtemperaturen är omkring 1°C högre än lufttemperaturen. Detta är av samma storleksordning som mätningarna visar i provhuset i detta projekt. Styrningen av infrastrålarna skiljer. Hos Kloer mäts temperaturen av en pt1000-givare placerad ca 30 cm ovanför växthusborden. Denna mäter då lufttemperaturen och effekten av absorberad värmestrålning från infrastrålaren. Hos AB Kjell-Ingvars mäts bladtemperaturen direkt med infrarödteknik. Här mäts yttemperaturen hos ett utvalt blad. Mätprinciperna är således olika och båda är känsliga för placeringen av givaren eftersom mätsignalen är beroende på den lokala strålningsintensiteten. Hos Kloer har man behövt ändra givarens placering för att undvika inflytandet av strålningsbildernas överlappning och intilliggande strålningsbrännarens funktion.

Innehavaren Johannes Kloer har goda erfarenheter av anläggningen i jämförelse med ett konventionellt system har han känslan av att man inte sparar mer än några få procent energi. Största fördelarna är systemets snabba svar på växlingar i väderleken och lägre installationskostnader. Kostnaden för systemet var 33 DM/m^2 exklusive gasledningar och installationsarbete. Det senare gjordes av sex anställda under två dagar.

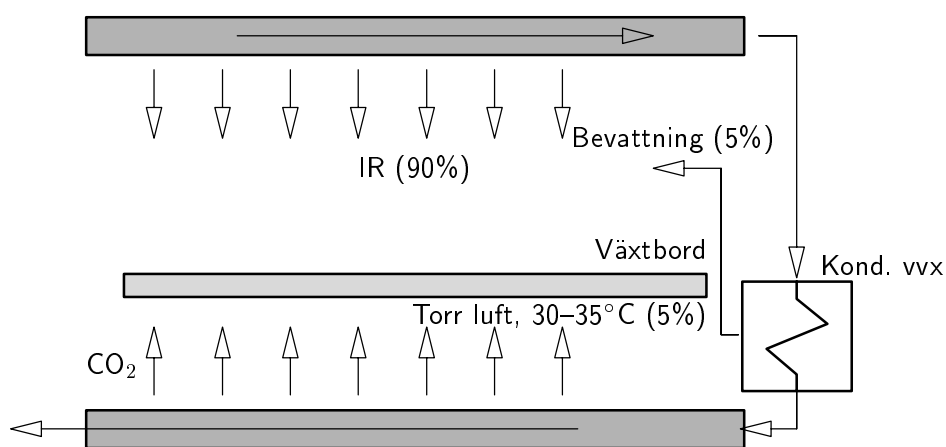
5.5 Möjligheter till höjd verkningsgrad

För att få en användbar strålningsintensitet även i slutet av strålningsröret krävs avgastemperaturer som ger en avgasförlust på omkring 10%. Ett sänkt luftöverskott är inget bra sätt att minska avgasförlusten då detta påverkar strålningsbilderna. En höjd verkningsgrad får i stället sökas i möjligheterna att utnyttja avgaserna när de lämnat strålningsröret.

Förvärmning av vatten för dimmning och vanlig bevattning kan vara en väg att höja verkningsgraden. Vattnets låga temperatur ger goda möjligheter för avgaskondensering även vid ett högt luftöverskott. Det är dock komplicerat att utnyttja avgasvärmen från flera strålningsrör.

Kondensering av vattenånga ”torkar” avgaserna. Uppskattningsvis blir avgastemperaturen omkring 30°C efter en kondenserande värmeväxlare. Om förbränningen skett utan alltför höga NO_x -halter kan avgaserna sändas ut i växthuset för CO_2 -gödning. Man bör dock tänka på att fuktinnehållet i dessa avgaser är högre än i växthusets övriga luft.

I figur 5.7 visas hur ett sådant system kan realiseras. Fördelningen av bränslets energiinnehåll anges i figuren. Någon utredning av kostnader och verkningsgradsökning (ekonomisk vinst) har inte gjorts.



Figur 5.7: Möjlig lösning för utnyttjande av avgasvärme efter infrastrålare

Kapitel 6

Slutsatser och rekommendationer

6.1 Energianvändning och inomhusklimat

Denna projektfas har liksom den inledande fasen visat att infravärme i växthus sänker energianvändningen tack vare en sänkt inomhustemperatur. Störst blir den möjliga temperatursänkningen och energibesparingen då övervärme används. Temperatursänkningen kan då uppgå till 2°C. Genom att studera mätvärden på inomhustemperaturen i huset med infravärme och intilliggande växthus med konventionell uppvärmning kunde en besparing av nettouppvärmningen på strax över 10% beräknas. Detta värde kan bli större om enbart plantor odlas som medger att endast övervärme utnyttjas i växthusen. Sannolikt skulle infravärme då kunna innebära en besparing på 15–20% avseende nettouppvärmningsbehovet.

Infravärme innebär att det finns en risk för temperaturskillnader i växthuset. Både genom lokala mätningar av lufttemperaturen på valda platser i IR-huset och i konventionellt värmda referenshus och genom termografering kunde detta bekräftas och värden erhållas.

De slutsatser som termografin gav kan sammanfattas i följande punkter:

- Upprepad termografering utförd under likartade utstrålningsförhållanden visar att produktionsborden i växthuset med gasdrivna IR-strålare har variationer i strålningstemperatur och strålningstemperaturmönster förorsakad av inhomogen strålningsvärme från de gasdrivna brännarna och mediarören. Dessa variationer i strålningsvärme ger i sin tur upphov till variationer i växtbetingelser och tillväxtförlopp hos sticklingar och saluplantor.

- Resultatet från termografistudien indikerar att relativa luftfuktigheten är en viktig faktor för att omfördela strålningsvärmen och säkerställa ett optimalt mikroklimat vid användning gasdrivna IR-strålare i växthus.
- Termografi kan med fördel användas för att kartlägga temperaturavvikelser hos värmeproducerande system och hos mediasystem i växthus.
- Termografi kan också användas som ett hjälpmedel vid kalibrering och utvärdering av energisystem i växthus, och för att indikera avvikelser i tillväxtprocessen hos plantor.
- Information från infraröd termografi bör kunna användas för test av gasdrivna IR-system under konstruktion, och för att bekräfta dess operativa funktion vid installation.
- Infraröd termografi kan också användas som ett redskap vid forskning och utvärdering av tillväxtprocessen hos plantor under olika energi och mikroklimatiska tillstånd i växthus.

6.2 Tillväxtresultat

Som under fas I var plantorna i ytterkanterna i regel något senare i sin utveckling, mest beroende av en lägre temperatur (kallras från växthusets ståndsida eller otillräcklig värmefördelning), men även förorsakad av ett sämre ljusutbyte. IR-givaren som mäter och reglerar bladtemperaturen hade under fas I flyttats närmare övervärmeröret mot bordets mitt, eftersom bladtemperaturen annars kunde bli allt för hög mitt under övervärmeröret. Samtidigt hade reflektorerna höjts över röret så att värmen från strålningsrören nådde längre ut till bordskanterna. Dylåka kanteffekter i rotutveckling och tillväxt kunde hos vissa växtslag även iakttagas i referenshus 10 med vattenburen värme.

6.3 Den goda installationen

Det är tydligt att en jämn temperatur på växthusborden är viktigt även om mycket av de tillväxtskillnader som kunnat observeras under projektiden utjämnas fram till tidpunkten då plantorna blivit salufärdiga till konsumenten. Både IR-systemets dimensionering och växthusets planlösning inverkar på möjligheten till denna önskade temperaturjämnhet. Vid installation av ett infravärmessystem kan följande rekommendationer ges för att nå en god funktion. Växthuset bör ha en öppen planlösning

med stort avstånd mellan väggarna så att flera infrastrålare kan placeras parallellt. Detta var inte möjligt i provhuset med IR-strålare varför observerade skillnader torde bli mindre i ett större växthus.

- Placeringen av infrastrålarna bör göras så att strålningsfälten från intilliggande strålare överlappar varandra. Detta minskar variationerna i strålningsintensitet. Ungefär 5% av strålningsfältet bör överlappas av en annan strålare.
- För att minimera skillnader i strålningsintensitet och därtill hörande temperaturskillnader på växthusborden kan U-formade strålningsrör användas och att parallellt placerade strålningsrör har omväxlande riktning.
- Minimering av antalet nödvändiga hål i växthusets tak och väggar görs genom att strålningsrören placeras så att avgaserna kan samlas i ett gemensamt avgassystem för två eller flera strålningsrör. Används växthusets luft till förbränningen begränsas uttag i tak och väggar till avgaskanalerna.
- Infravärmesystemet kan dimensioneras efter en total brännareffekt motsvarande en specifik värmeeffekt på 200–300 W/m². Detta är samma kriterium som används för konventionella uppvärmningssystem. Högre specifik effekt har inte studerats.
- Strålarna bör placeras så högt som möjligt i växthuset. Inga redovisade erfarenheter tyder på att placering av strålningsrör ovanför en del av växthuskonstruktionens metalldelar orsakar överhettning av dessa delar.

Projektet har visat att det går att erhålla goda växtresultat med infravärme och med en energibesparing som följd. En besparing på drygt 10% av nettouppvärmningsbehovet kunde bestämmas utifrån mätdata. Det finns troligen en potential på 15–20% besparing av nettoenergiebehovet i jämförelse med konventionell uppvärmning av växthus. Denna besparing blir dock mindre om kondensationspannor används i stället.

De ekonomiska argumenten för infravärme i växthus är dels den nyss nämnda energibesparingen tack vare sänkt lufttemperatur, dels besparingar som följd av minskade distributionsförluster och stillestånds- och strålningsförluster från värmepannan i konventionella värmesystem. Dessa besparingar är inte lätta att kvantifiera i detta skede. Installationskostnaden för det aktuella systemet kan inte konkurrera med ett konventionellt värmesystem. Betydligt högre kostnader har vid andra tillfällen också offererats i jämförelse med konventionella system. Det har då handlat om dubbla system innehållande både över- och undervärme, och om man skall följa studiens resultat är övervärme det bästa alternativet, och att infravärme då används efter plantornas rotutveckling. De offererade systemen är betydligt dyrare

än de som föreslås i denna rapport, men ytterligare kostnadssänkningar torde vara möjliga. Vid besöket på växthus i Tyskland med infravärme framkom att lägre installationskostnader var ett argument för teknikvalet. Till installationskostnaderna hör också ledningsdragning för förbränningsluft och avgaser. Växthusets storlek, längd och bredd, ger olika förutsättningar för detta. En god utformning kan exempelvis fås då strålningsrören kan placeras parallellt med överlappande strålningsfält. Flera strålningsrör kan då kopplas samman avseende avgastransporten med färre hål genom växthusets väggar.

En annan fördel med infravärme är flexibiliteten. Man kan enkelt stänga av infravärmen för ett enskilt växthus då inga plantor odlas, och en utbyggnad blir också förhållandevis enkel. Infravärme kan vara ett bra alternativ om redan befintliga pannor utnyttjas nära maximal kapacitet. Resonemanget är likartat det som kan föras för industriinstallationer då man jämför ett centralt ång- eller hetvattenbaserat värmedistributionssystem och decentraliserad gasanvändning.

Litteraturförteckning

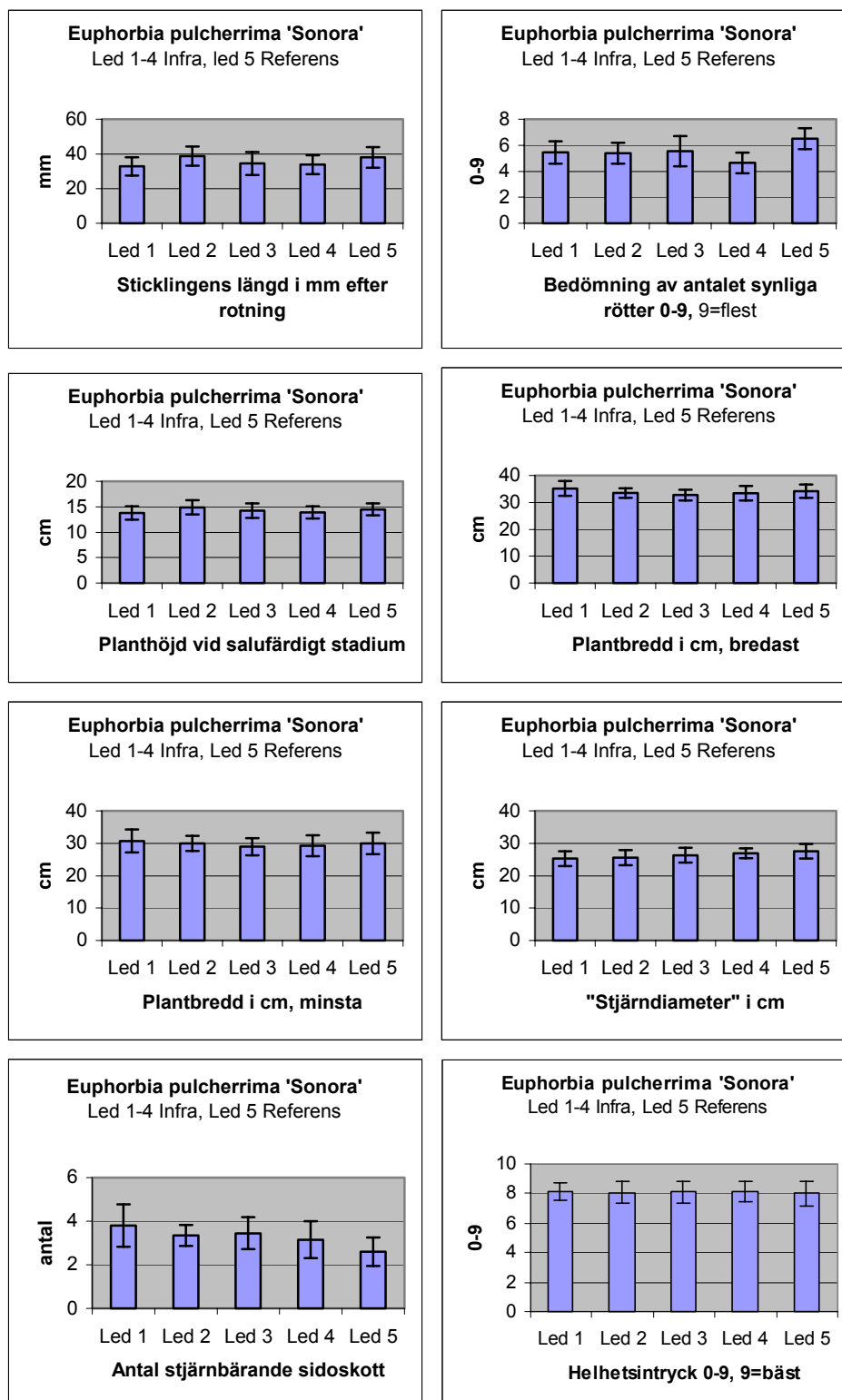
- [1] Näslund, M. och H.K. Schüssler, *Naturgasbaserad infravärme jämförd med naturgasbaserad vattenburen värme i växthus. Rotning av sticklingar och produktion av färdigvara*, Svenskt Gastekniskt Center Rapport 127, januari 2002
- [2] Ljungberg, S.-Å. och O. Jönsson, *Infrared Thermography – A tool to map temperature anomalies of plants in a greenhouse heated by gas fired infrared heaters*, Thermosense XXIV, SPIE Vol 4710
- [3] Jönsson, O., *Naturgasen ger växthuset en egen sol*, Gasnytt, nr 3 2002
- [4] Näslund, M., Schüssler, H.K., Ljungberg, S.-Å. och O. Jönsson, *Gas based infrared radiant heating in greenhouses. Aspects of energy use and plant development*, 22nd World Gas Conference, Tokyo, 1–5 juni 2003
- [5] Näslund, M., *Gasinfra fungerar bra i växthus!*, Gasnytt, nr 4, 2003
- [6] Klaubert, M. och R. Numrich, *Simulation von erdgasbefeuernten Deckenstrahlungsheizungen*, Gaswärme Int., **47**(1998), Nr 2, pp. 99–103
- [7] *Heat Exchanger Design Handbook. 2. Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Hemisphere Publ. Comp., 1983
- [8] Hong, S.W. och A.E. Bergles, *Augmentation of Laminar Flow Heat Transfer in Tubes by Means of Twisted-Tape Inserts*, J. Heat Transfer, **98**(1976), pp. 251–256
- [9] Lopina, R.F. och A.E. Bergles, *Heat Transfer och Pressure Drop in Tape-Generated Swirl Flow of Single Phase Water*, J. Heat Transfer, **91**(1969), pp. 434–442
- [10] Kimball, B.A., *Modular Energy Balance Program Including Subroutines for Greenhouses and Other Latent Heat Devices*, US Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, PB86-216108, maj 1986
- [11] Hedlund, H., *Temperature Distribution and Plant Responses of Birch (Betula pendula Roth.) at Constant Growth*, Diss., Sveriges Lantbruksuniversitet, Alnarp, 1999
- [12] Stanghellini, C., *Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management*, Diss., Landbouwniversiteit te Wageningen, Nederländerna, 1987

Bilaga A

Tillväxtresultat

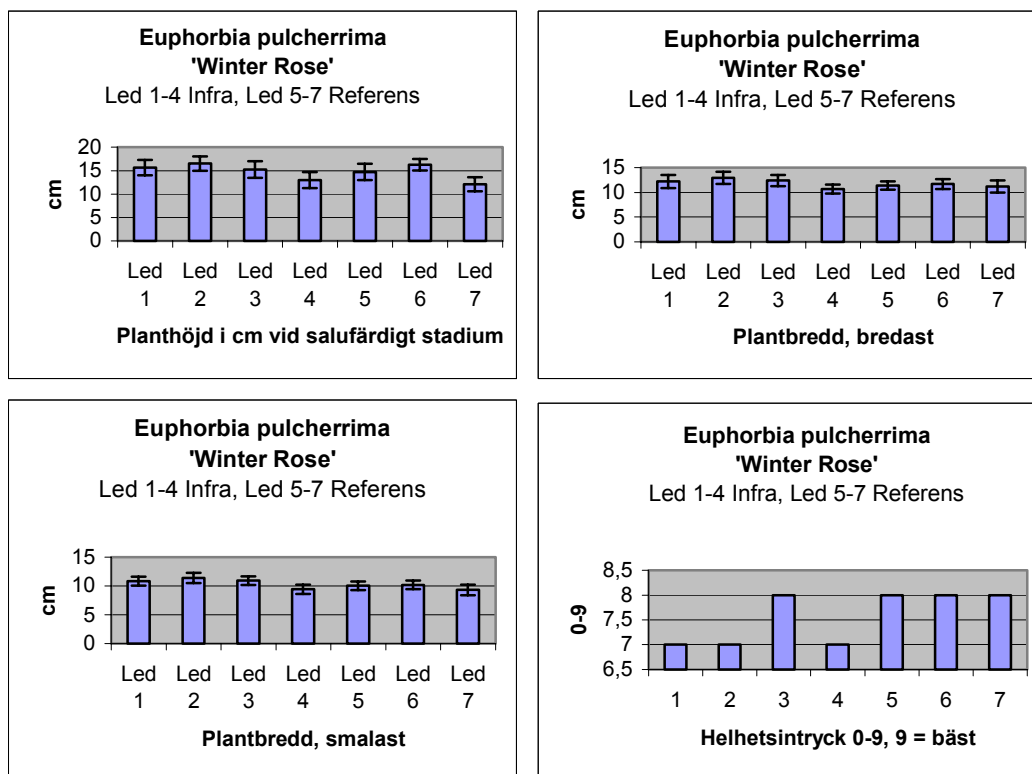
I denna bilagedel presenteras mätresultat om växternas tillväxt och kvalitet. I redovisningen av tillväxtresultaten är listan av försöksled i denna bilaga även försedd med den beteckning som användes vid redovisningen av de lokala temperaturerna, se s. 21. Den beteckningen är angiven inom parentes i listorna över försöksled och i kolumnen Pos. i tabellerna.

A.1 Julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' – sticklingar 1



Figur A.1: Tillväxtresultat för julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora'.

A.2 Julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch 'Winter Rose' - färdigvara

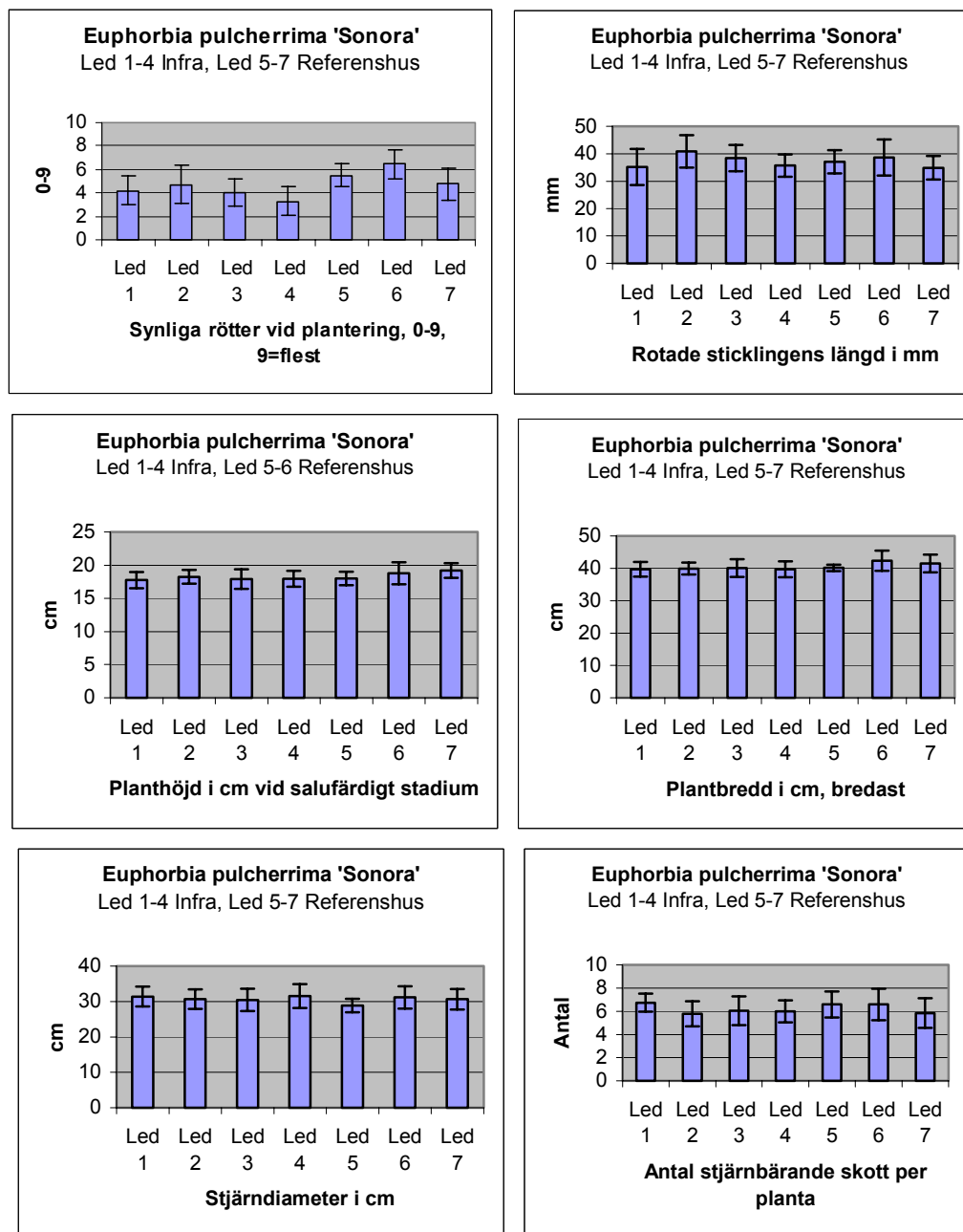


Figur A.2: Tillväxtresultat för julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch 'Winter Rose'. Led 1-4 odlades i IR-huset, led 5-7 odlades i referenshuset.

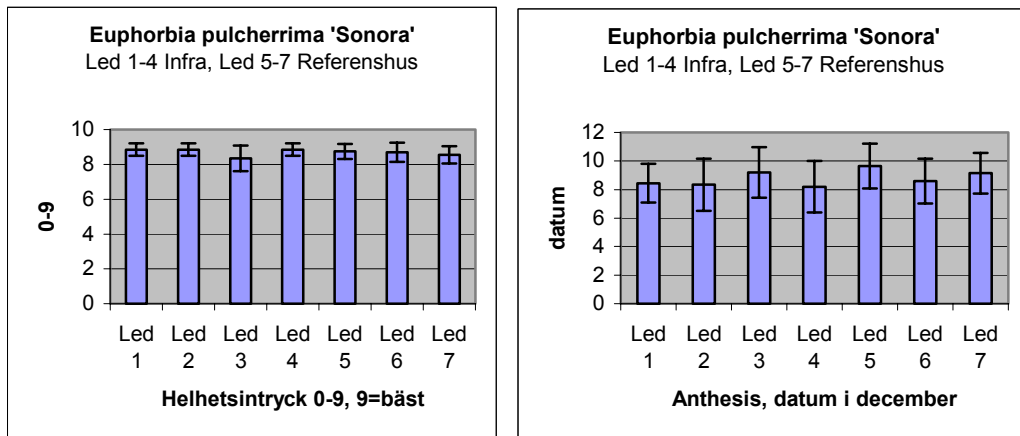
Försöksled:

1. Infrahuset, 30 cm från södra bordskanten (E)
2. Infrahuset, mitt över undervärmeröret (B)
3. Infrahuset, mitt under övervärmeröret (A, D)
4. Infrahuset, 30 cm från norra bordskanten (C)
5. Referenshuset 2, 30 cm från norra bordskanten
6. Referenshuset 2, bordets mitt
7. Referenshuset 2, 30 cm från södra bordskanten

A.3 Julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' - sticklingar



Figur A.3: Tillväxtresultat för julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora'.

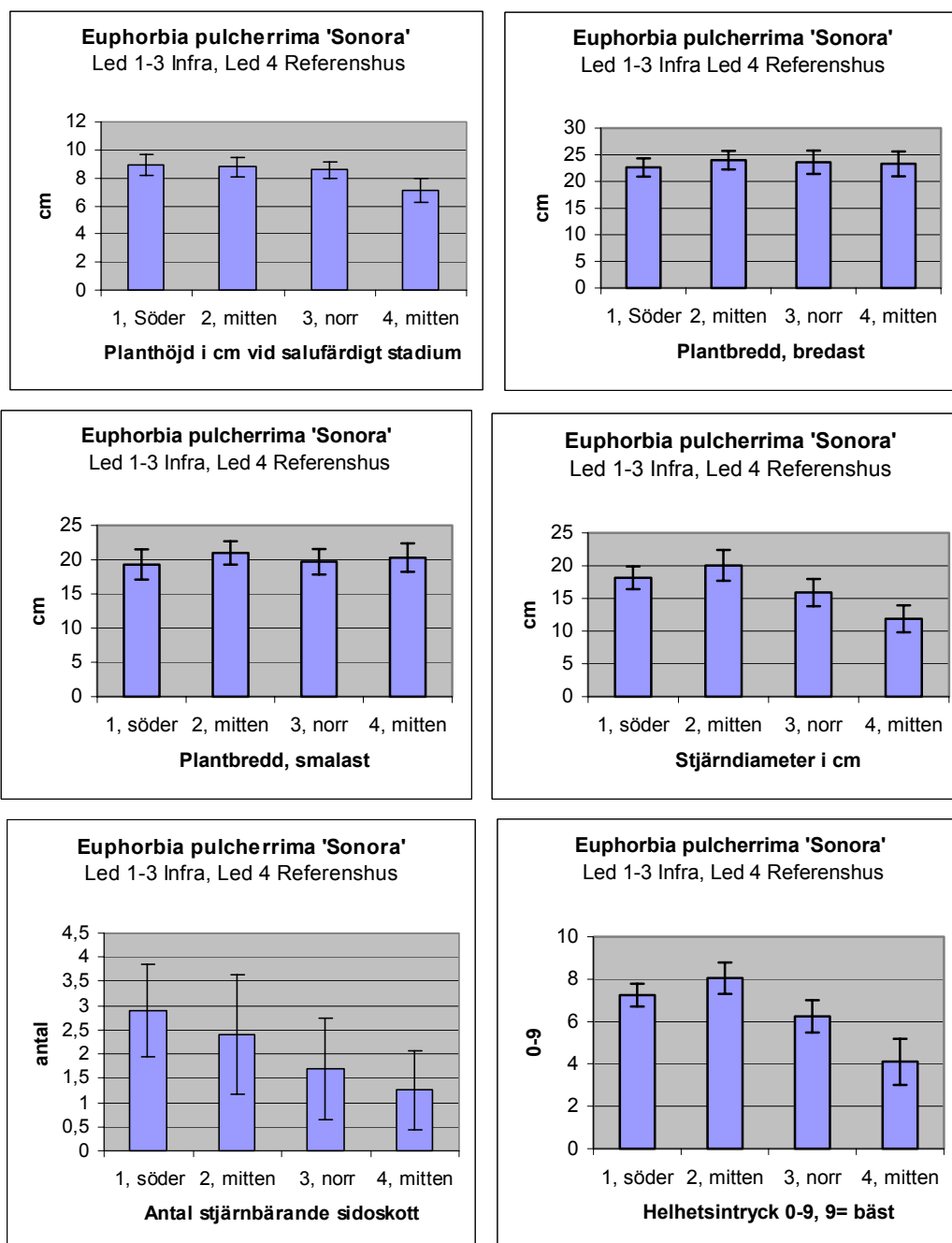


Figur A.4: Tillväxtresultat för julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' (forts.).

Försöksled:

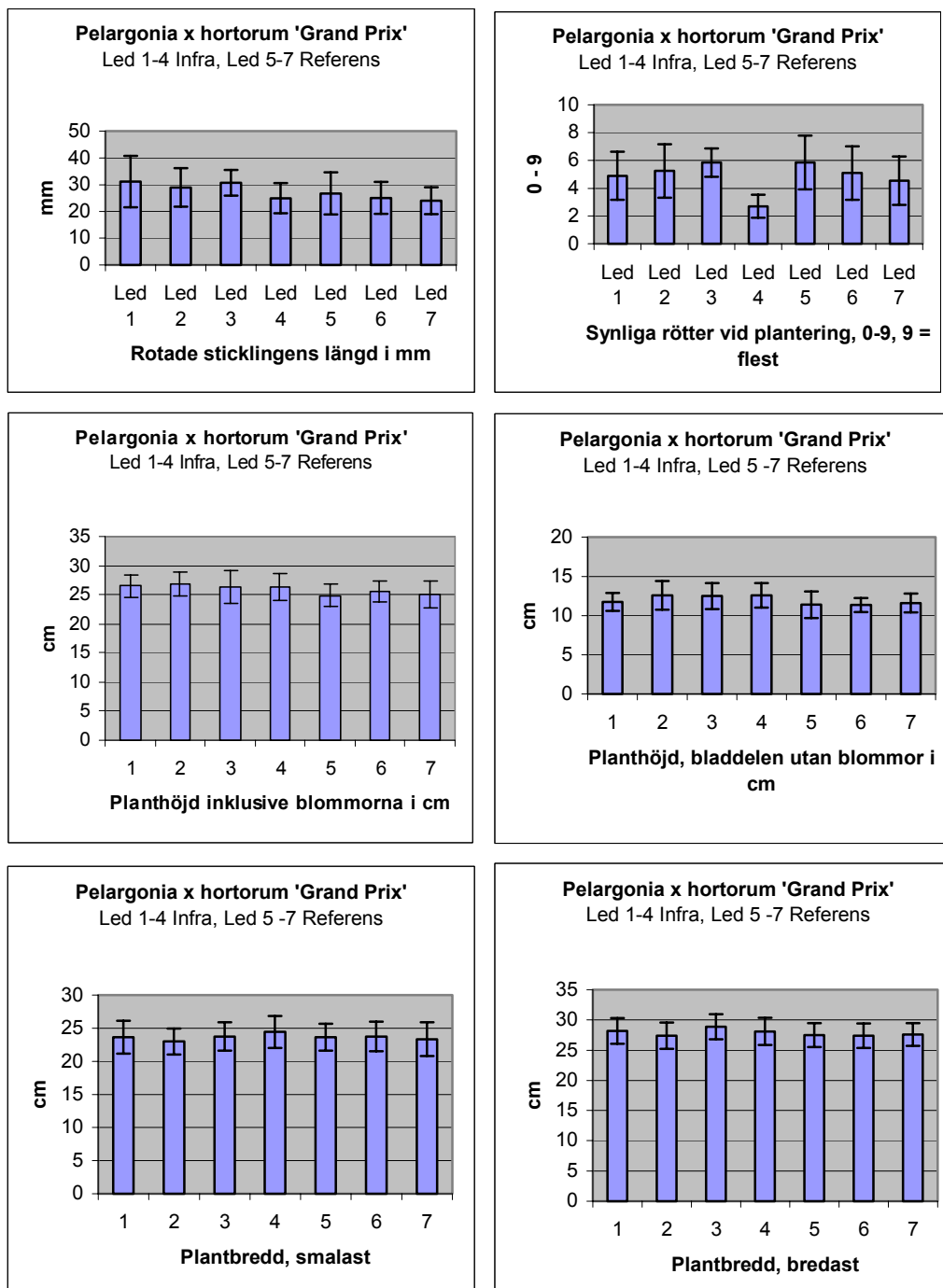
1. Infrahuset, 30 cm från södra bordskanten (E)
2. Infrahuset, mitt över undervärmeröret (B)
3. Infrahuset, mitt under övervärmeröret (D)
4. Infrahuset, 30 cm från norra bordskanten (C)
5. Referenshuset 2, 30 cm från norra bordskanten
6. Referenshuset 2, bordets mitt
7. Referenshuset 2, 30 cm från södra bordskanten

A.4 Julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora' – Produktion av färdigvara i en period med låg utomhustemperatur

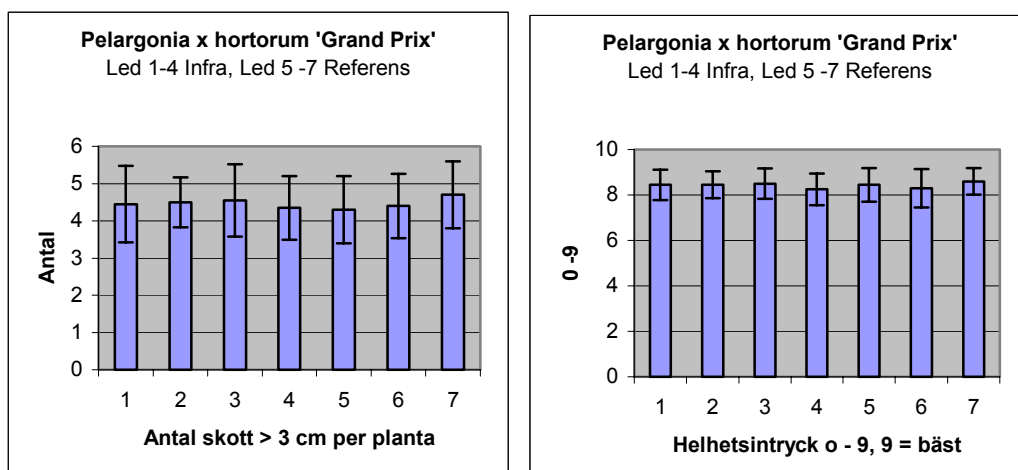


Figur A.5: Tillväxtresultat för julstjärna, *Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzsch 'Sonora'.

A.5 Pelargon, *Pelargonium x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix' – sticklingar, omgång 1



Figur A.6: Tillväxtresultat för pelargon, *Pelargonium x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix', omgång 1.

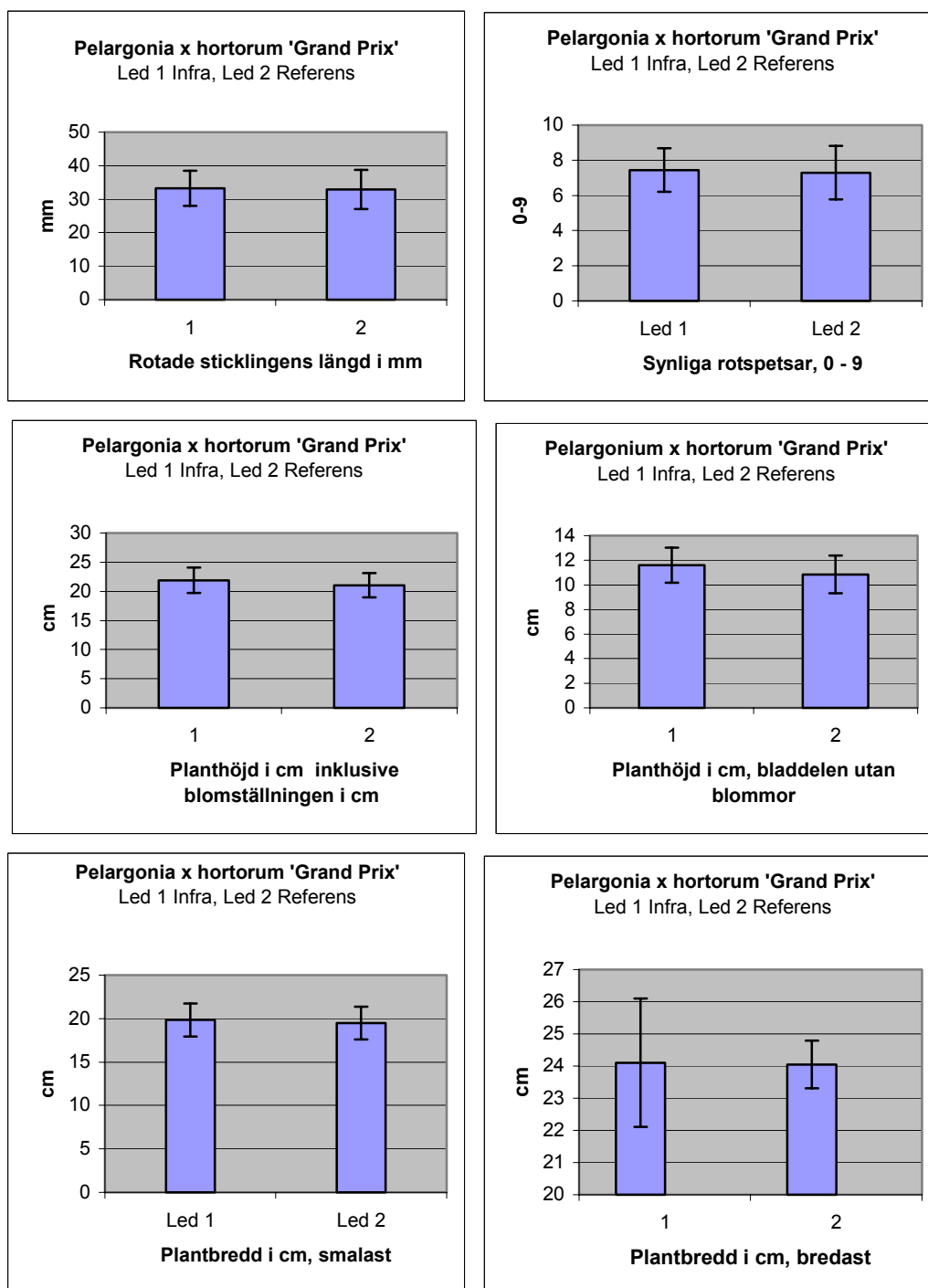


Figur A.7: Tillväxtresultat för pelargon, *Pelargonium x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix', omgång 1 (forts.).

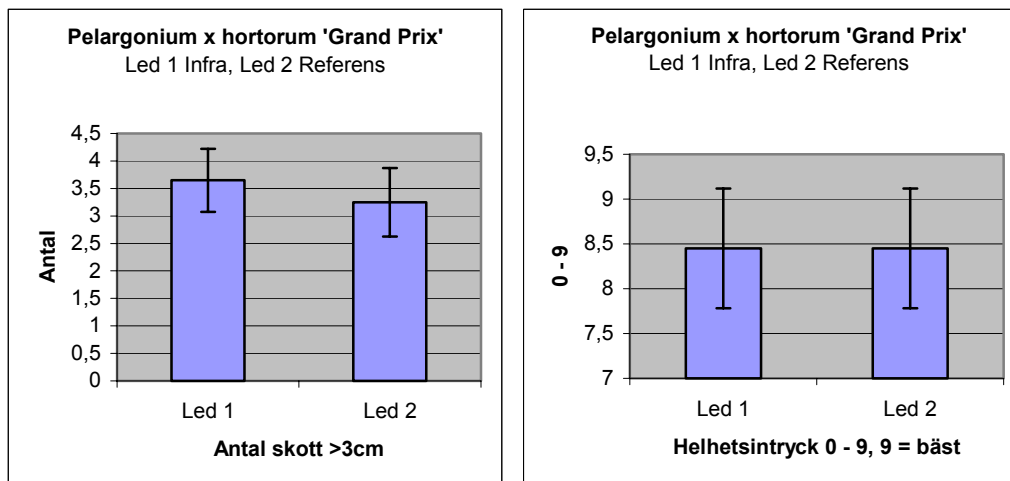
Försöksled:

1. Infrahuset, 30 cm från södra bordskanten (E)
2. Infrahuset, mitt över undervärmeröret (B)
3. Infrahuset, mitt under övervärmeröret (D)
4. Infrahuset, 30 cm från norra bordskanten (C)
5. Referenshuset 10, 30 cm från västra bordskanten
6. Referenshuset 10, bordets mitt
7. Referenshuset 10, 30 cm från östra bordskanten

A.6 Pelargon, *Pelargonium x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix' – sticklingar, omgång 2



Figur A.8: Tillväxtresultat för pelargon, *Pelargonium x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix', omgång 2.



Figur A.9: Tillväxtresultat för pelargon, *Pelargonium x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix', omgång 2 (forts.).

Mätpunkter:

1. Infrahuset 1, bord 21, på bordet 30 cm från södra kanten (E)
2. Infrahuset 1, bord 21, på bordet rakt över ett av undervärmerören (B)
3. Infrahuset 1, bord 21, på bordet rakt under övervärmeröret (D)
4. Infrahuset 1, bord 21, på bordet 30 cm från norra kanten (C)
5. Infrahuset 1, bord 5, vid IR-temperaturgivaren (G)
6. Infrahuset 1, bord 6, på bordet 30 cm från södra kanten (F)
7. Infrahuset 1, bord 13, på bordet rakt under övervärmern (A)
8. Referenshuset 10, rörliga bord, 30 cm från västra kanten
9. Referenshuset 10, rörliga bord, mitt på bordet
10. Referenshuset 10, rörliga bord, 30 cm från östra kanten

*Kunde inte mätas eftersom bordsmitten inte kunde nås vissa tider när rullborden inte gick att sära.

Tabell A.1: Temperaturer för *Pelargon x hortorum* L.H. Bailey 'Grand Prix'. Mät punkt
16 mars 2001 kl 13.30

	Pos.	Uppmätt temperatur (°C)		
		Blad	Bordskiva	Logger
1	E	23,1	23,9	23,1
2	B	23,2	24,6	23,2
3	D	22,1	23,0	22,5
4	C	19,8	22,0	21,4
5	G	22,3	23,0	22,3
6	F	21,4	22,1	21,7
7	A	22,7	23,0	22,6
8		22,3	23,1	22,9
9		*	*	*
10		21,7	22,1	21,7

Tabell A.2: 16 mars 2001 kl 15.30

	Pos.	Uppmätt temperatur (°C)		
		Blad	Bordskiva	Logger
1	E	23,0	23,0	22,7
2	B	23,0	23,0	23,6
3	D	22,4	22,3	21,8
4	C	20,0	20,3	20,3
5	G	22,2	22,4	22,5
6	F	21,6	21,8	21,4
7	A	20,1	20,6	21,1
8		20,6	21,3	21,4
9		*	*	*
10		21,9	22,4	22,3

Tabell A.3: 23 mars 2001 kl 16 (två skuggvävar fördragna)

	Pos.	Uppmätt temperatur (°C)		
		Blad	Bordskiva	Logger
1	E	20,4	21,1	20,5
2	B	21,0	21,8	21,5
3	D	20,9	21,5	20,6
4	C	19,2	20,6	18,4
5	G	21,6	22,2	21,7
6	F	21,5	21,2	20,7
7	A	21,1	21,6	21,2
8		21,8	22,3	21,7
9		*	*	*
10		22,3	22,1	21,9

Tabell A.4: 27 mars 2001 kl 11 (uttemperatur 1°C, soligt)

	Pos.	Uppmätt temperatur (°C)		
		Blad	Bordskiva	Logger
1	E	22,8	22,4	22,6
2	B	22,9	22,9	22,9
3	D	22,2	22,5	22,7
4	C	22,0	21,0	23,3
5	G	22,6	22,9	22,9
6	F	21,9	22,1	22,1
7	A	22,1	22,4	22,9
8		23,8	23,0	22,1
9		*	*	*
10		23,0	23,5	21,9

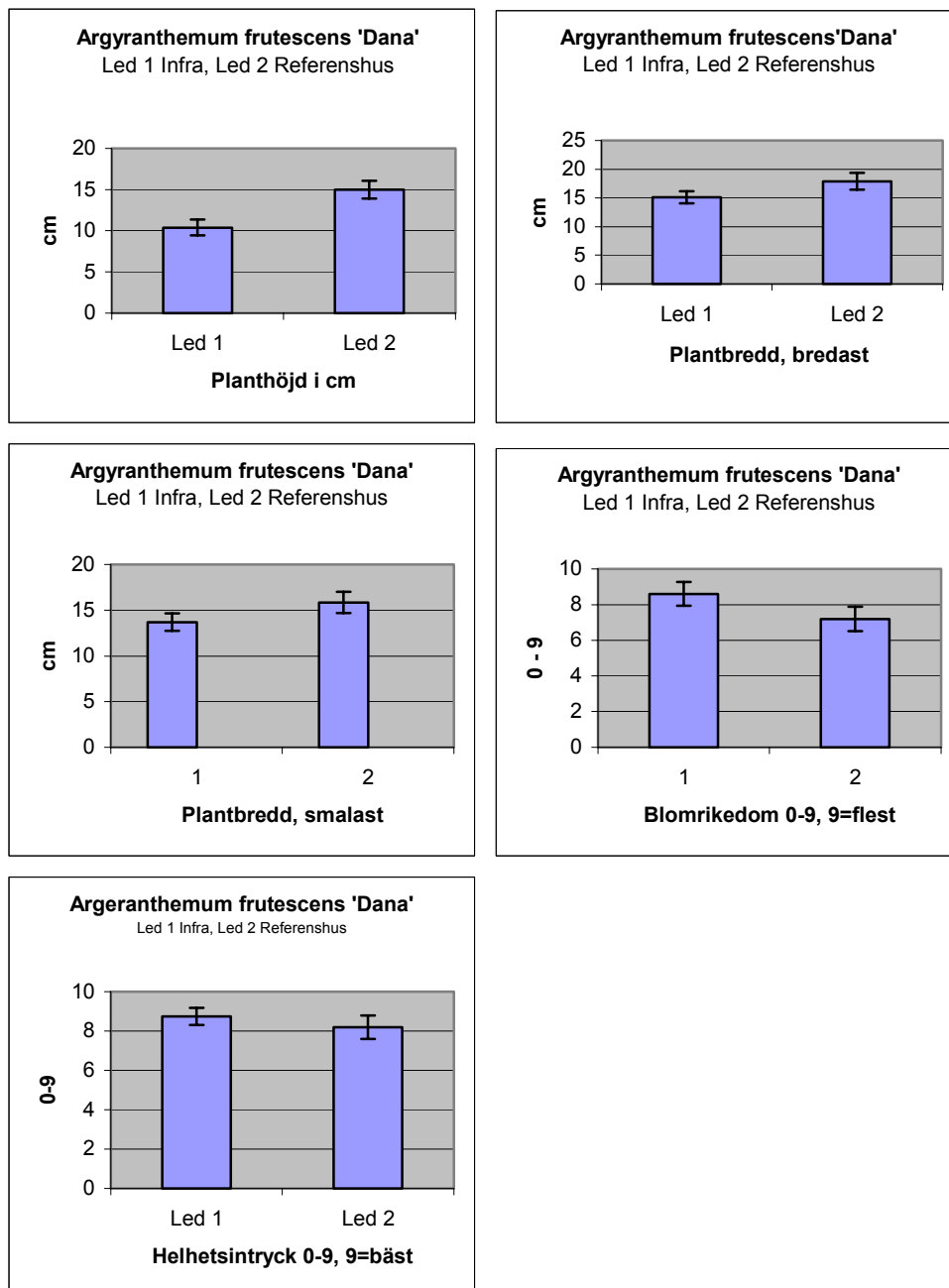
Tabell A.5: 29 mars 2001 kl 16 (soligt)

Pos.		Uppmätt temperatur (°C)		
		Blad	Bordskiva	Logger
1	E	19,8	20,4	19,3
2	B	21,4	20,0	20,8
3	D	19,7	19,8	19,8
4	C	20,3	17,7	19,8
5	G	23,0	20,7	20,3
6	F	22,4	21,9	21,1
7	A	20,2	19,6	19,4
8		21,2	21,6	21,4
9		*	*	*
10		21,8	21,9	21,4

Tabell A.6: 2 april 2001 kl 14, (utetemperatur 7°C, soligt, skuggvävarna fördragna)

Pos.		Uppmätt temperatur (°C)		
		Blad	Bordskiva	Logger
1	E	23,1	22,3	23,7
2	B	23,5	22,8	23,6
3	D	21,9	21,7	22,9
4	C	21,2	20,3	21,8
5	G	21,3	21,3	22,9
6	F	21,7	20,7	22,3
7	A	22,9	21,9	23,3
8		22,1	21,6	22,9
9		22,1	21,3	22,9
10		22,1	21,2	22,0

A.7 Margerit, *Argyranthemum frutescens* (L.) Sch.Bib. 'Dana' - färdigvara



Figur A.10: Tillväxtresultat för *Argyranthemum frutescens* (L.) Sch.Bib. 'Dana'.



SE-205 09 MALMÖ • TEL 040-24 43 10 • FAX 040-24 43 14
www.sgc.se • info@sgc.se
