



Kasvihuoneen jäähdytyksellä parempaan ilmastoon ja satoon

Liisa Särkkä, Eeva-Maria Luomala, Tiina Hovi-Pekkanen,
Timo Kaukoranta, Risto Tahvonen, Jukka Huttunen
ja Miia Alinikula



Maa- ja elintarviketalous 122
102 s.

Kasvihuoneen jäähdytyksellä parempaan ilmastoon ja satoon

Liisa Särkkä, Eeva-Maria Luomala, Tiina Hovi-Pekkanen,
Timo Kaukoranta, Risto Tahvonen, Jukka Huttunen
ja Miia Alinikula

ISBN 978-952-487-171-6 (Painettu)
ISBN 978-952-487-172-3 (Verkkajulkaisu)
ISSN 1458-5073 (Painettu)
ISSN 1458-5081 (Verkkajulkaisu)
www.mtt.fi/met/pdf/met122.pdf

Copyright
MTT

Liisa Särkkä, Eeva-Maria Luomala, Tiina Hovi-Pekkanen, Timo Kaukoranta,
Risto Tahvonen, Jukka Huttunen
ja Miia Alinikula

Julkaisija ja kustantaja
MTT, 31600 Jokioinen

Jakelu ja myynti

MTT, Tietohallinto, 31600 Jokioinen
Puhelin (03) 4188 2327, telekopio (03) 4188 2339
sähköposti julkaisut@mtt.fi

Julkaisuvuosi
2008

Kannen kuvat

Liisa Särkkä ja Jukka Huttunen, kuvankäsittely Outi Mäkilä

Painopaikka

Tampereen yliopistopaino – Juvenes Print Oy

Kasvihuoneen jäähdytyksellä parempaan ilmastoon ja satoon

Liisa Särkkä¹⁾, Eeva-Maria Luomala¹⁾, Tiina Hovi-Pekkanen¹⁾, Timo Kaukoranta¹⁾,
Risto Tahvonen¹⁾, Jukka Huttunen²⁾ ja Miia Alinikula³⁾

¹⁾ MTT (Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus), Kasvintuotannon tutkimus
Toivonlinnantie 518, 21500 Piikkiö, etunimi.sukunimi@mtt.fi

²⁾ Biolan Oy, PL 2, 27501 Kauttua, jukka.huttunen@dnainternet.net

³⁾ Turun Yliopisto, Biologian laitos, Kasvifysiologia ja molekyylibiologia, 20014 Turun
yliopisto, etunimi.sukunimi@utu.fi

Tiivistelmä

Valo-olot ovat kesällä kasvien kasvun kannalta parhaat. Silti ympärivuotisen kasvihuonetuotannon satotaso on kesäaikana alhaisempi kuin muina vuodenaikoina. Tuotannon tehokkuutta rajoittaa kasvihuoneiden viilentäminen tuuletusluukkuja avaamalla, jolloin ilmaston hallinta kasvihuoneessa ei ole enää mahdollista. Samalla kasvutekijät heikentyvät. Tämä oli lähtökohtana suljetun kasvihuoneen tutkimukselle.

Hankkeen biologisen osan tavoitteena oli kehittää ja selvittää kasvihuonekasvien tuotantotekniikkaa suljetussa kasvihuoneessa, jossa lämpötila, kosteus, hiilidioksidi ja tekovalo olivat samanaikaisesti hallinnassa. Hankkeen teknisen osan tavoitteena oli kehittää kasvihuoneen normaaliin säätöautomaatiikkaan liitettävä jäähdytystekniikka, joka kustannustehokkaasti mahdollistaisi viljelyn suljetussa kasvihuoneessa suurimman osan vuotta. Hankkeen tekninen osa toteutettiin erillisenä kehityshankkeena, jonka toteutuksesta vastasi Biolan Oy. Se myös rakensi hankkeessa käytetyt kasvihuoneilman jäähdytyslaitteet.

Uuden jäähdytystekniikan avulla kasvihuoneet voitiin pitää ilmastollisesti suljettuina muutamaa kuuminta hellekauden iltapäivää lukuun ottamatta. Siten hiilidioksidipitoisuus pysyi koehuoneessa korkeana ja ilman kosteutta voitiin hallita verrattuna perinteiseen luukkutuuletuksella toimivaan huoneeseen.

Viljelykokeita tehtiin kasvihuonekurkulla, tomaatilla ja leikkoruusulla. Tuosten mukaan myös Suomen olosuhteissa kasvihuoneen jäähdytyksestä on hyötyä. Kesäkasvustoilla kurkun sadonlisä suljetussa huoneessa oli 24 ja 40 % eri vuosina. Tomaatin kesäsato lisääntyi ja ruusun sadon laatu parani. Kurkulla välivalotus, jossa osa tekovaloista on asennettu kasvuston alaosaan, lisäsi sadon määrää.

Fotosynteesimittaukset osoittivat kasvien hyötyvän lisääntyneestä hiilidioksidipitoisuudesta. Suljetussa kasvihuoneessa kasvien rakenne oli erilainen kuin perinteisessä kasvihuoneessa.

Tutkimuksen aikana Biolan Oy kehitti jäähdytyslaitteistosta uuden version, jonka energiatehokkuuskerroin on noussut 10–15:stä yli 30:een. Kurkulla tehtyjen laskelmien mukaan menetelmä nykyisessä versiossa voi olla kannattava. Jäähdytykseen tarvittava veden määrä on noin 50 % kasvien haihduttamasta veden määrästä kesäkuukausina.

Lisäksi tutkimus osoitti, että kasvihuoneolosuhteiden optimointi ei ole vielä valmis. Kasvihuoneen viljelyolosuhteiden parantaminen edellyttää jäähdytyslaitteistoa. Myös hiilidioksidipitoisuuden optimointia sekä lämpötilaa, tekovaloa, kastelua ja lannoitusta on tutkittava lisää. Samoin energian talteenottoa pitäisi tutkia ja kehittää.

Avainsanat: fotosynteesi, kannattavuus, kasvihuoneet, ilmastointi, ilmanvaihto, jäähdytys, kasvihuonekurkku, ruusut, sato, suljettu kasvihuone, tomaatti, viljelytekniikka, valotus

Closed greenhouse improves climate and yield

Liisa Särkkä¹⁾, Eeva-Maria Luomala¹⁾, Tiina Hovi-Pekkanen¹⁾, Timo Kaukoranta¹⁾, Risto Tahvonen¹⁾, Jukka Huttunen²⁾ and Miia Alinikula³⁾

¹⁾ MTT Agrifood Research Finland, Plant Production Research, Toivonlinnantie 518, FI-21500 Piikkiö, Finland, firstname.lastname@mtt.fi

²⁾ Biolan Oy, P.O.Box 2, FI- 27501 Kauttua, Finland, jukka.huttunen@dnainternet.net

³⁾ University of Turku, Department of Biology, Plant physiology and molecular biology, FI-20014 University of Turku, Finland, firstname.lastname@utu.fi

Abstract

Despite the good light environment for plants, year-round greenhouse production suffers from lower yields in summer than during the other times of the year. Production efficiency is limited by cooling the greenhouses with roof vents, thus preventing the CO₂ fertilisation. Climate control is not sufficiently efficient which decreases growth factors. This was the basis for the research of closed greenhouse.

In the biological part of this research plant production was studied in the closed greenhouse where temperature, air humidity, carbon dioxide and artificial lighting were simultaneously controlled. In the technical part of this research a cooling system that can be installed to the traditional climate control system and which economically efficiently permits greenhouse production in closed environment was developed.

The new cooling system allowed the roof vents to be closed most of the time. Therefore carbon dioxide concentration could be kept high compared to the traditional roof vent climate control. Air humidity could also be controlled with cooling device.

Plant production research was made with cucumber, tomato and cut roses. Even in Finland, greenhouse cooling improved both yield quantity and quality. With cucumber, the yield increase was 24 % in summer 2005 and 40 % in 2006 compared to the traditional climate control. Interlighting also improved cucumber yield. Summer yield of tomato and quality of rose yield were also improved. Photosynthesis measurements showed that plants benefited from high carbon dioxide concentration. In the closed greenhouse environment plant structure was different from the control.

A new version of the cooling system was developed which further improved the energy efficiency coefficient from 10-15 to over 30. According to production costs for cucumber the cooling system was economically sound. In

summer, the amount of water needed for cooling was about 50% of the amount that plants transpired.

In addition, the research results showed that the optimization of the greenhouse climate is not yet ready. Thanks to the cooling system it is now possible to find out the most beneficial e.g. carbon dioxide concentrations, air temperatures, air humidity, artificial lighting, irrigation and nutrition for optimal plant production. An important aspect to be studied is also energy recovery.

Key words: closed greenhouse, cucumber, cut rose, greenhouse cooling, photosynthesis, plant production, production costs, tomato, interlighting

Alkusanat

Ympärivuotisen kasvihuonetuotannon tehokkuuden heikoksi kohdaksi on osoittautunut valoisa ja lämmin kesäkausi, koska kasvihuoneen ilmasto-oloja ei ole voitu nykytekniikalla järjestää kasveilla edullisimmaksi. Tuotannon tehokkuutta rajoittava tekijä on kasvihuoneiden tuuletuksesta johtuva kasvutekijöiden heikentyminen ja erityisesti kesäaikoina korkeista lämpötiloista aiheutuvat kasvuhäiriöt ja kasvun estyminen. Nykyaikaisessa ympärivuotisessa kasvihuonetuotannossa saadaan huonommat sadot kuin valotettaessa syksyllä, talvella ja keväällä. Tämä oli lähtökohtana suljetun kasvihuoneen tutkimukselle yhdessä yritysten kanssa.

Tutkimuksissa käytetyt jäähdytysjärjestelmät rakensi Biolan Oy DI Esko Huhta-Koiviston ja FM Jukka Huttusen suunnitelmien pohjalta. Järjestelmien soveltamisesta koetoimintaan vastasi prof. Risto Tahvonen. Myöhemmin Biolan Oy kehitti FM Markku Haukiojan johdolla avoimeen pisaraverhoon perustuvan laitteiston (Novarbo). Teknisen tutkimuksen osarahoittajana oli Tekes. Biolan Oy toimitti MTT Piikkiön kasvihuoneisiin jäähdytyslaitteistojen prototyypit.

Jäähdytetyissä huoneissa suoritettiin viljelytutkimuksia, kasvifysiologisia mittauksia ja mallintamista suljetun kasvihuoneen olosuhteissa kurkulla, tomaatilla ja leikkoruusulla vuosina 2005-2007. Lisäksi laskettiin Novabro jäähdytysmenetelmään perustuen ja käytännön olosuhteissa mitattujen arvojen perusteella viljelyn kannattavuus kurkulla.

Biologisista tutkimuksista vastasivat erikoistutkija Liisa Särkkä sekä tutkijat Eeva-Maria Luomala ja Tiina Hovi-Pekkanen. Mallinnuksesta ja kannattavuuslaskelmista vastasi vanhempi tutkija Timo Kaukoranta. Jäähdytyslaitteiston toimivuudesta vastasi vanhempi tutkija Juha Näkkilä ja Biolan Oy. Teknisenä henkilökuntana toimivat tutkimusmestarit Päivi Tuomola, Matti Muraanen ja Elvi Hellsten sekä tutkimusavustaja Henrik Merivuori. Gradu-työn tekijöinä olivat Miia Alinikula Turun yliopistosta ja Harri Kähönen Helsingin yliopistosta.

Biologisen tutkimuksen rahoittajina olivat Maa- ja metsätalousministeriön Maatilatalouden kehittämisrahasto ja MTT. Yhteistyökumppaneina olivat Huiskula Oy, Kekkilä Oy, Philips Oy sekä Kauppapuutarhaliitto Ry. Haluamme kiittää kaikkia mukana olleita ja erityisesti biometrikko Lauri Jauhiaista MTT Menetelmäpalveluista aineiston tilastolliseen käsittelyyn liittyvästä neuvonnasta. Kiitämme myös tutkimuksen ohjausryhmää: ylitarkastaja Seija Ahonen MMM, konsulentti Tom Murmann Kauppapuutarhaliitto Ry, prof. Pirjo Peltonen-Sainio MTT ja FM Markku Haukioja Biolan Oy.

Piikkiössä 14.3.2008 Tekijät

Sisällysluettelo

1	Tekninen kehitys kohti suljettua kasvihuonetta	11
1.1	Miksi suljettu ja jäähdytetty kasvihuone?	11
1.2	Kasvihuoneen jäähdytys perinteisin ja uusien menetelmin.....	11
1.3	Suomalainen sovellus kasvihuoneen jäähdyttämiseksi	12
1.4	Suljetun kasvihuoneen vaikutukset tulevaisuuden kasvihuonetuotantoon.....	14
2	Jäähdytyslaitteiston kuvaus MTT:n kasvihuoneissa	16
3	Kurkusta reilu sadonlisä jäähdytetyssä kasvihuoneessa.....	18
3.1	Aineisto ja menetelmät	18
3.1.1	Viljely.....	18
3.1.2	Koejärjestely.....	19
3.1.3	Sato- ja kasvustohavainnot.....	19
3.1.4	Fotosynteesimittaukset	20
3.1.5	Typpimääritykset lehdistä	21
3.2	Tulokset ja tulosten tarkastelu	22
3.2.1	Ilmasto-olosuhteet	22
3.2.2	Sadon määrä kasvoi ja laatu parani	23
3.2.3	Kasvit kasvoivat pidemmiksi ja tuottivat suuremman lehtipinta-alan	24
3.2.4	Lehden koostumuksessakin tapahtui muutoksia	26
3.2.5	Lehtien fotosynteesikyky ei muuttunut	28
3.2.6	Suurin osa kasvun lisäyksestä johtui korkeammasta CO ₂ -pitoisuudesta.....	29
3.2.7	Biomassan jakautuminen muuttui	31
3.2.8	Sadontuoton rajoja ei vielä saavutettu.....	32
4	Kurkun välivalotuskokeet eri vuodenaikoina.....	33
4.1	Aineisto ja menetelmät	33
4.1.1	Valotus	33
4.2	Tulokset.....	34
4.2.1	Talvi-kevätkasvusto 2006.....	34

4.2.2	Kesäkasvusto 2006.....	34
4.2.3	Syys-talvikasvusto 2006-2007	36
4.2.4	Syys-talvikasvustojen 2005-2006 ja 2006-2007 vertailu	36
4.3	Tulosten tarkastelu	38
5	Suljetun kasvihuoneen kannattavuus kurkun tuotannossa kesäkaudella käytettäessä <i>Novarbo</i> -jäähdytysjärjestelmää.....	39
5.1	Menetelmät.....	39
5.1.1	Lämmön ja kosteuden poisto.....	39
5.1.2	Kurkkujen kasvu	40
5.2	Tulokset.....	41
5.3	Tulosten tarkastelu	43
6	Kasvihuoneen jäähdytys lisäsi tomaatin satoa kesällä	45
6.1	Aineisto ja menetelmät.....	45
6.1.1	Viljely.....	45
6.1.2	Sato- ja kasvustohavainnot.....	47
6.1.3	Fotosynteesi- ja fluoresenssimittaukset ylävalokoe-jäsenistä	47
6.1.4	Ravinnemääritykset ylävalokoejäsenien lehtinäytteistä.....	48
6.2	Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	49
6.2.1	Ilmasto-olosuhteet	49
6.2.2	Sato ja laatuluokitus	49
6.2.3	Biomassan tuotanto	50
6.2.4	Kasvin rakenne.....	50
6.2.5	Lehtien fotosynteesi	56
6.2.6	Lehtien ravinnepitoisuudet.....	64
6.2.7	Valotustavan vaikutus satoon ja kasvuun.....	67
7	Suljetun kasvihuoneen ruususadosta parempi laatu	68
7.1	Aineisto ja menetelmät.....	68
7.1.1	Viljely.....	68
7.1.2	Olosuhteet	69
7.1.3	Koejärjestely	70

7.1.4	Sato- ja kasvustohavainnot.....	71
7.1.5	Fotosynteesimittaukset	71
7.1.6	Maljakkokestävyshavainnot	72
7.2	Tulokset.....	73
7.2.1	Olosuhteiden hallinta ja jäähdytyskoneiston käyttö	73
7.2.2	Sadon lukumäärässä erot pienet, mutta laatu parani	77
7.2.3	Korkeampi ilman hiilidioksidipitoisuus kiihdyttää fotosynteesinopeutta.....	81
7.2.4	Ruusun fotosynteesimittaukset kertoivat lehtien sopeutumisesta vuodenaikojen erilaiseen säteilytasoon	87
7.2.5	Kukkaverson rakenne muuttui.....	88
7.2.6	Maljakkokestävyteen ei vaikutusta.....	90
7.2.7	Kukkaverson kehitysaika nopeutuu korkeassa lämpötilassa ..	90
7.2.8	Suljetussa kasvihuoneessa sadonkorjuutavan vertailu	93
7.2.9	El Toro-lajikkeen havainnot.....	93
7.3	Tulosten tarkastelu	96
7.3.1	Sadon määrä ja laatu.....	96
7.3.2	Kasvien rakenne ja fotosynteesi	97
7.3.3	Maljakkokestävyys.....	97
7.3.4	Sadonkorjuutapa suljetussa kasvihuoneessa.....	97
8	Yhteenveto	98
9	Kirjallisuus	100
10	Hankkeen julkaisut.....	101

1 Tekninen kehitys kohti suljettua kasvi-huonetta

1.1 Miksi suljettu ja jäähdytetty kasvihuone?

Kun tekovaloon perustuva ympärivuotinen kasvihuonekasvien tuotantotekniikka kehittyi nykyiselle Suomessa käytettävälle asteelle, törmättiin ”kasvun paradoksiin”. Kesällä, jolloin on valaistuksen puolesta parhaat viljelyolot, saatiin laadullisesti ja määrällisesti huonompaa satoa kuin keväällä, syksyllä ja talvella. Tämä tulos johtui voimakkaasta tuuletuksesta, jolloin kasvihuoneen ilman hiilidioksidipitoisuutta ei voida pitää valaistukseen nähden edullisella tasolla ja ajoittain lämpötila on liian korkea kasvien häiriöttömälle kasvulle. Tekovalojen käyttö on myös lisännyt tuetuksen tarvetta, jolloin hiilidioksidin kannalta osittain tai kokonaan epäedullinen aika on huhtikuusta lokakuun alkuun. Jos suljetun kasvihuoneen jäähdytys voidaan tehdä taloudellisesti, on satotasojen nousun arvioitu olevan todella merkittävää ja kasvinsuojeluun liittyvät ongelmat merkittävästi pienemmät perinteiseen kasvihuoneeseen verrattuna.

1.2 Kasvihuoneen jäähdytys perinteisin ja uusin menetelmin

Kasvihuoneilman lämpötilan pitäminen halutulla tasolla nykyaikaisessa kasvihuoneessa perustuu kasvien veden haihdutukseen, tuuletusluukkujen käyttöön, veden lisäämiseen ilmaan esimerkiksi korkeapainesumuilla suhteellisen kosteuden hallitsemiseksi ja varjostusverhojen käyttöön, kun säteilytasot nousevat liian korkeiksi, $>700-800 \text{ W m}^{-2}$. Näiden kasvihuoneen perustointojen lisäksi on kasvihuoneviljelyn kärkimaissa kehitetty erilaisia menetelmiä jäähdytykseen niin perinteiseen kuin suljettuun kasvihuoneeseen.

Avoimen kasvihuoneen tunnetuin jäähdytystekniikka luukkutuuletuksen jälkeen on märkäseinäjähdytys, jossa kasvihuoneeseen puhalletaan ulkoilmaa märän, huokoisen seinän läpi, jolloin ilma jäähtyy ulkoilmaa kylmemmäksi. Tästä perustekniikasta on kehitetty monia erilaisia versioita, joissa mm. tiivistetään kasvien haihduttamaa vettä uudelleen kierrätettäväksi. Näitä tekniikoita ei ole sovellettu Suomessa käytännön tasolle. Märkäseinäjähdytys ei täytä suljetun kasvihuoneen vaatimusta, koska ilman hiilidioksidia ei voida taloudellisesti hallita.

Täysin suljettujen kasvihuoneiden teknisiä ratkaisuja on esitelty vain muutamia. Espanjalaisten, saksalaisten ja hollantilaisten yhteishanke, Watergy-projekti, on selvittänyt jäähdytystornin käyttöä kasvihuoneen jäähdytykseen.

Tässä menetelmässä kasvihuoneen kuuma ja kostea ilma nousee kasvihuoneen yläpuolelle jäädytystorniin, josta jäähtynyt ilma raskaampana palaa takaisin kasvihuoneeseen. Menetelmää käytettäessä kasvihuoneen lämpötila asettuu kesäaikana 30-40 °C:n välille, jolloin menetelmä soveltuu vain trooppisten kasvien kasvatukseen. Hollannissa (Gesloten Kas) on suljetun kasvihuoneen jäädytystä tehty kylmän pohjaveden avulla. Jäädytyksessä käytetty lämmennyt pohjavesi palautetaan takaisin pohjavedeksi noin 100 m syvyisiin vesikerrostumiin (aquifer). Menetelmä vaatii suuria vesimääriä ja pienten lämpötilaerojen takia laajoja tuuletuskanavia, jolloin perustekniikka on kallis ja energiatehokkuudeltaan sekä yleissovelluksena vaikeasti toteutettava.

1.3 Suomalainen sovellus kasvihuoneen jäädyttämiseksi

Tässä tutkimushankkeessa tutkimuskasvihuone jäädytettiin kierrättämällä kasvihuoneilma jäädytystornin kautta takaisin kasvihuoneeseen (Kuva 2). Jäädytystornissa oli putoavia vesipisaroita, joihin kasvihuoneilman energia siirtyi johtumalla ja vesihöyryn tiivistymisenä. Lämmennyt vesi siirtyi jäädytystornista samanlaiseen haihdutustorniin, jossa kasvihuoneesta tullut energia siirrettiin ulkoilmaan. Tämän jäädytystekniikan energiatehokkuusluku oli kesäaikana 10-15.

Edellä kuvattu jäädytystekniikka asennettiin vuosien 2005-2007 kokeita varten osaksi kokonaisvaltaista Itumic-säätöjärjestelmää, jonka avulla voitiin tehdä mm. seuraavat asetukset ja mittaukset: lämpötila ja CO₂, luukkujen ja verhojen asennot, suhteellinen kosteus, putkistojen lämpötilat, maan kosteus ja lämpötila, kastelun ja lannoituksen perusmittaukset. Jäädytyskokeiden tavoitteiden johdosta olosuhteiden säätöjärjestykset olivat seuraavat: lämpötilan alentaminen ensisijaisesti jäähykoneen eri tehoilla, toissijaisesti verhoilla ja tuuletuksella, ilman suhteellisen kosteuden nosto korkeapainesumuilla ja alentaminen jäädytyskoneella, hiilidioksidipitoisuuden säätö valaistuksen ja luukkujen asentojen perusteella. Jotta koekasvihuoneiden toimintaa voitiin arvioida ja mallittaa niin tuotannon kuin taloudenkin kannalta, tehtiin lisäksi seuraavat mittaukset kasvatus ja talousmallien pohjaksi: jäädytystehon mittaaminen jäädytyskoneen meno- ja paluuviesien lämpötilojen perusteella sekä kasvihuoneen energiankulutus lämmitysputkien meno- ja paluuviesien lämpötilojen mittauksen avulla. Kasvihuoneen lämpötaseisiin tarvittiin perusmittausten lisäksi katteiden lämpötilat ja verhojen yläpuolinen lämpötila, jäädytyksen ja kosteuden toimintaa varten veden kulutus sekä kierrätysilman siisäntuloilman lämpötila ja kosteus.



Kuva 1. Avoimessa pisaraverhossa vesipisarat laskeutuvat kapeana seinämänä erikoissuuttimista alhaalla olevaan kerääjäkouruun, josta vesi siirtyy ulos jäähdytettäväksi. Pisaraverho aiheuttaa ilman tehokkaan kiertämisen kasvihuoneessa, mikä tasoittaa lämpötilan laajalle alueelle. Tämän jäähdytystekniikan energiatehokkuuskerroin vaihtelee olosuhteista riippuen 30:stä 100:aan ollen keskimäärin 50, jolloin jäähdytystekniikan muuttuvat kustannukset ovat erittäin pienet. Nettovedenkulutus on keskikesällä noin 100 litraa kasvihuoneliölle kuukaudessa. Kasvit kuluttavat kasteluna vastaavana aikana 200 litraa. Kuva Härkälän puutarha Oy:stä. (kuvaaja: Jukka Huttunen)

Kasvihuoneen jäähdytystarve on maksimissaan 600 W m^{-2} . Tämän energian poistamiseksi keskikokoisesta kasvihuoneesta, kun kasvihuoneen lämpötilatavoite on $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suhteellinen kosteus 80 %, tarvitaan liikuteltavaa ilmaa vähintään noin $300\,000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 2000 m^2 . Vastaavasti vettä on liikuteltava noin $500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 2000 m^2 . Näiden laskelmien ja koekasvihuoneista saatujen kokemusten perusteella on ymmärrettävää, ettei jäähdytyslaitteen protomallia pyritty kehittämään pidemmälle, vaan päädyttiin avoimeen pisaraverhoon (Kuva 1), jossa ei tarvita voimakkaita tuulettimia ja jonka energiatehokkuuskerroin on keskimäärin 50. Ylhäältä alaspäin laskeutuva pisaraverho saa kasvihuoneen ilman tasaiseen kierto- ja kiertoliikkeeseen, jolloin jäähdytystekniikassa jäävät kokonaan pois huoneilmaa kierrättävät puhaltimet. Tästä aiheutuu merkittäviä säästöjä energiankulutuksessa ja jäähdytyksen tehostumisessa,

jolloin energiatehokkuus on yllättävän korkea keskimääräisenäkin lukuna verrattuna esimerkiksi lämpöpumppuihin.

Edellä kuvatulla teknisellä toteutuksella kasvihuoneen jäähdytys saadaan toteutettua kuumanaikin aikana tehokkaasti ja taloudellisesti, mutta myös ilman kosteuden alentaminen saadaan toteutettua erittäin edullisesti verrattuna perinteiseen kasvihuoneautomaatiikan säätöohjelmiin eli varjostusverhojen, lämmityksen ja tuuletuksen yhdistelmiin, joissa kosteuden mukana ulkoilmaan tuulettuu lämpöä. Jäähdytykseen tarvittava vedenkulutus pisaraverhojäähdytyksessä on laskettu olevan keskikesällä noin $100 \text{ l m}^{-2} \text{ kk}^{-1}$, mikä on noin 50 % kasvien samanaikaisesti kuluttamasta vedestä. Pisaraverhojäähdytyksen avulla on myös mahdollista hallita kasvihuoneen ilman kosteus ja oikea hiilidioksiditaso.

1.4 Suljetun kasvihuoneen vaikutukset tulevaisuuden kasvihuonetuotantoon

Jos suljetusta kasvihuoneesta, jossa jäähdytys tehdään taloudellisesti kuuminaikin vuodenaikoina, tulee käytännön sovellus laajassakin tuotannossa, on tällä tuotantotekniikalla kauaskantoiset seuraukset koko kasvihuoneelinkeinoon niin täällä Suomessa kuin muissakin maissa. Merkittävin vaikutus on suora taloudellinen ja markkinallinen merkitys voimakkaasti kohoavista sadoista. Kesäkuukausien satomäärät tulevat kohoamaan kasvista riippuen 30-50 %. Tällä hetkellä parhaimmat ympärivuotiset kurkkuviljelmät saavat vuodessa satoa $150\text{-}180 \text{ kg m}^{-2} \text{ v}^{-1}$. Tulevaisuuden kurkkuviljelmien sadot olisivat tämän mukaan $200\text{-}250 \text{ kg m}^{-2} \text{ v}^{-1}$, josta pääosa valmistuu kesäaikana. Vastaavia sadonlisiä olisi odotettavissa salaattilla, ruusulla ja mahdollisesti tomaatilla. Suomalaiseen kasvihuonetuotantoon tämä merkitsee sitä, että nykyiset kasvihuonepinta-alat tulevat pienenemään merkittävästi, jos tuotanto on tarkoitettu vain kotimaan markkinoille. Mikäli nykyiset kasvihuonepinta-alat säilyvät, mutta uudistuvat uusimmalle tekniikalle, tuotteita on mahdollista viedä merkittäviä määriä esimerkiksi Ruotsiin ja Pietariin. Jo tällä hetkellä meidän viljelijähintamme ovat eurooppalaista tasoa, mutta meidän tuotantomme on suunnattu vain kotimaiseen kulutukseen, jolloin viennin aloittaminen satunnaisilla ylimääräerillä ei ole käytännössä mahdollista.

Suljettu kasvihuonetekniikka merkitsee tulevaisuuden viljelytekniikassa uusia mahdollisuuksia ja haasteita niin tutkimukselle kuin kasvihuonetuotantoa tukevalle teollisuudelle. Merkittävin tulevaisuuden haaste on kasvihuoneiden tuottaman ylimääräisen energian hyödyntäminen. Valotuskalustosta ja aurin-gosta tuleva liika energia poistetaan kasvihuoneesta veden avulla. Energian talteenotto ja käyttäminen edelleen joko samojen kasvihuoneiden tai kasvihuoneiden lämmitykseen yöaikana, on merkittävä tekninen haaste ja jopa uuden viljely- ja tuotantotekniikan kehittämiskohde seuraavan 10 vuoden

aikana. Tänä aikana on odotettavissa merkittävä energian hinnan ja energia-lähteiden muutos.

Suljettu kasvihuonetekniikka tulee muuttamaan ja mahdollistamaan monia viljelytekniisiä asioita. Jo nyt toteutetun tutkimushankkeen yhteydessä on ilmennyt, että ainakin seuraavat kohteet tulevat vaatimaan uutta perus- ja soveltavaa tutkimusta kasvihuonekasvien kasvatuksessa: hiilidioksiditasot ja hiilidioksidin tuotantotapa korkeissa säteilytasoissa ja eri lämpötiloissa eri kasveilla ja lajikkeilla edellyttävät selvityksiä eriasteisina porraskokeina, joihin on yhdistetty myös taloudelliset laskelmat. Kun satotasoissa ollaan siirtymässä uudelle suuruusluokalle, joudutaan mitä ilmeisimmin kasvien ravinteiden ottoa ja tuotteiden laatuksymyksiä tarkastelemaan kokonaan uudestaan. Nämä tutkimukset ovat jo alustavasti käynnistyneet. Tekovalon optimaaliset tasot voivat muuttua muiden kasvutekijöiden parantuessa.

Suljettu kasvihuonetekniikka luo kasvinsuojelulle aivan uuden pohjan. Täydellinen ilman kosteuden ja lämpötilan hallinta antaa kasvien lehdistöön iskeytyvien tautien torjuntaan uuden ulottuvuuden. Tuholaisten torjuntapaine muuttuu, koska tuholaisten liikkuminen ulkoa suljettuun kasvihuoneeseen vaikeutuu merkittävästi, jolloin esimerkiksi biologinen tuholaistorjunta voi muuttua intensiivisyydeltään aivan uudenlaiseksi.

2 Jäähdytyslaitteiston kuvaus MTT:n kasvi- huoneissa

Kasvihuoneen jäähdytys toteutettiin avoimeen vesi-ilma kontaktiin perustuvalla lauhdutin/haihdutin-järjestelmällä (Pat.hak. PCT 2006/058959). Koe-laitteiston suunnittelusta ja rakentamisesta vastasi Biolan Oy.

Järjestelmässä kasvihuoneen lämmin ja kostea ilma puhalletaan lauhdutin-kammioon, jossa sen annetaan kohdata kylmä vesisuihku, jonka lämpötila on ilman kastepistettä alhaisempi. Lämpö siirtyy luonnollisesti johtumalla lämpimästä ilmasta kylmempään veteen ja ilman kosteus kondensoituu eli lauh-tuu kylmään veteen. Suihkussa jäähtynyt ja kuivunut ilma palautetaan kasvi-huoneeseen muovitunnelia pitkin tasaisesti kasvuston yläosaan. Ilma jäähtyy kierroksen aikana tyypillisesti 2,5 astetta ja sen kosteussisältö alenee noin 1 g m^{-3} .

Energia siirtyy suihkuvaan veteen, jonka lämpötila nousee noin 2 astetta. Lämmennyt vesi suihkutetaan lauhdutinkammiota vastaavaan haihduttimeen. Haihdutin on sisäilmasta erotettu kammio, jossa vesisuihkuun puhalletaan ulkoilmaa. Osa lämpimästä vedestä haihtuu kuivaan ulkoilmaan ja näin vesi jäähtyy. Jäähtynyt vesi palautetaan takaisin kiertoon lauhduttimeen. Ulkoilma poistuu haihduttimesta takaisin ulos kostuneena. Kasvihuoneen lämpötila ja kosteus pysyvät haluttuina ja kasvihuone voidaan pitää suljettuna, mikä mah-dollistaa jatkuvan hiilidioksidilannoituksen. Järjestelmä kuluttaa energiaa sekä veden pumpaamiseen että ilman puhaltamiseen. Koelaitteiston pump-pujen moottoritehot olivat yhteensä 1,1 kW ja puhaltimien 5,4 kW. Lisäksi haihdutin kuluttaa vettä: lisättävän vedentarve vastaa normaalia kastelutarvet-ta. Järjestelmän prototyyppi-luonteesta johtuen tätä ei voitu käytännössä to-dentaa. Em. mittaustulokset on saatu 8-10.6.2005 MTT Piikkiön kurkkuhuo-neessa, jolloin laitteella päästiin noin 65 kW jäähdytystehoon, tehokerroin oli siten 10. Keväällä ja talvella kylmän tehokerroin on 15-20.

Järjestelmät liitettiin kasvihuoneautomaatiikkaan (ITU-MS10), joka käynnisti laitteiston sekä ilman lämpötilan että maksimikosteuden mukaan. Sääto toimi portaattomasti asetusten mukaisesti. Automaatiikka tallensi halutut mittaus- ja säätöparametrit. Kuvissa 2 ja 3 ovat koehuoneiden jäähdytyslaitteistot.



Kuva 2. Tutkimuskasvihuoneen jäähdytyksessä käytetty laitteisto imi kasvihuoneesta lämpöisen ilman jäähdytystorniin ja palautti jäähtyneen ilman takaisin kasvihuoneeseen. Lämmennyt vesi kierrätettiin haihdutustorniin, jossa kasvihuoneesta kerätty energia siirtyi ulkoilmaan. Jäähdytetty ilma puhallettiin kasvustoon sen yläpuolella olevan muovitunnelin kautta. Kuva MTT Piikkiön kurkkukoehuoneesta. (kuvaaja: Jukka Huttunen)



Kuva 3. Ruusuhuoneen jäähdytyslaitteisto MTT Piikkiössä. Seinässä oleva tuuletin puhalsi lämmenneen ilman jäähdytyskoneeseen. (kuvaaja: Jukka Huttunen)

3 Kurkusta reilu sadonlisä jäähdytetyssä kasvihuoneessa

Kesäkuukausien korkeat lämpötilat laskevat Suomessa kasvihuonekurkun satotaset jopa alle talvikuukausien sadon. Kesällä kasvihuoneen lämpötilan säätely varjostusverhoin ja tuuletusluukkuja avaamalla on epäedullista, sillä molemmilla keinoilla vähennetään jotakin kasvun kannalta tärkeää tekijää: varjostamalla valoa ja tuulettamalla hiilidioksidia (CO₂). Kasvihuoneen lämpötilan ja kosteuden hallintaan etsittiin apua jäähdytystekniikasta. Kurkkua kasvatettiin tutkimushuoneissa viitenä perättäisenä kasvustona kevästä 2005 loppuvuoteen 2006 asti. Jäähdytyksen käytön kannalta erityinen mielenkiinto kohdistui kesäkasvustoihin 2005 ja 2006, joiden tuloksia tarkastellaan tässä.

Tutkimuksen tarkoitus

Kesäkasvustojen aikana haluttiin ensinnäkin testata, kuinka hyvin jäähdytyslaitteistolla voidaan hellejaksojen aikana hallita kasvihuoneen lämpötilaa ja kosteutta, ja kuinka paljon tarvitaan lisäksi perinteisiä ilmastohallintamenetelmiä. Suuren mielenkiinnon kohteena oli tietysti sato ja sadon laatu. Kesäkasvustojen aikana tutkittiin myös tarkemmin, tapahtuiko kasvin kasvussa ja fysiologiassa muutoksia, ja mikä merkitys näillä oli sadontuoton kannalta.

3.1 Aineisto ja menetelmät

3.1.1 Viljely

Kurkkua (*Cucumis sativus* L. cv Cumuli) kasvatettiin kahdessa 130 m²:n kasvihuoneosastossa, joista toisen ilmasto säädettiin luukkutuuletuksen ja sumutuksen avulla (kontrollihuone) ja toisen näiden lisäksi jäähdytyslaitteiston avulla (suljettu tai jäähdytetty kasvihuone). Molemmissa huoneissa olivat lisäksi käytössä varjostusverhot tarpeen mukaan.

Kasvit viljeltiin yksittäisriveissä alaslaskutekniikalla istutustiheyden ollessa 2.3 tainta neliometrillä. Viljelyajat olivat 7.6. – 13.8.2005 ja 9.5. – 29.8.2006. Kasvualustana oli turvelevy (Vihanneslevy, Kekkilä, Suomi) ja kasvit kastelulannoitettiin viljelmäkohtaisen ohjeen mukaisesti (Superex kurkkulannos, Kekkilä, Suomi; kalkkisalpietari, Liva Calcinit, Yara, Norja; Magnesiumnitraatti, SQM Europe, Belgia) tensiometrejä apuna käyttäen. Kasteluveden kulutus tallennettiin automatiikalla ja ylikastelun määrää seurattiin kahdesta lohkoista arkipäivisin.

Tavoitelämpötila oli kummassakin osastossa päivällä 22 °C ja yöllä 20 °C. Jäähdytysosastossa jäähdytyslaitteisto kytkeytyi päälle lämpötilan noustessa yli 26 °C ja luukkutuuletus otettiin lämpötilan hallinnan avuksi, jos lämpötila

kohosi yli 30 °C:een. Jäähdytysosastossa luukkujen annettiin avautua korkeintaan 28 %. Kontrolliosastossa tuuletettiin, mikäli lämpötila nousi yli 26 °C, eikä luukkujen avautumisastetta rajoitettu. Jäähdytyslaitteistoa käytettiin tarvittaessa ilman kosteuden säätöön pienillä tehoilla myös alle 26 °C:een lämpötiloissa. Ilman suhteellinen kosteus oli päivällä vähintään 75 % ja yöllä 70 %. CO₂-lannoituksen tavoitetaso valojakson aikana oli 1000 ppm, kun luukut olivat auki korkeintaan 30 %. Molemmissa huoneissa käytettiin sumutusta ja varjostusverhoja tarpeen mukaan.

Valaisimet (400 W, SON-T Green Power, Philips, Alankomaat) oli asennettu kasvuston latvan yläpuolelle 3.5 m:n korkeudelle käytävän pinnasta ja asennusteho kummassakin osastossa oli n. 170 W m⁻², joka antoi noin 217 μmol m⁻² s⁻¹ tyhjässä kasvihuoneessa 80 cm:n korkeudella. Tekovalojakson pituus oli 20 h vrk⁻¹ (klo 04-24), jonka aikana valot olivat päällä, jos kasvihuoneen ulkopuolella oli globaalisäteilyä alle 150 W m⁻² (kesä 2005) tai alle 250 W m⁻² (kesä 2006). Kokonaissäteilyanturina oli CM 6B pyranometer, joka mittaa valoa 305-2800 nm:n aallonpituusalueella (Kipp & Zonen, Hollanti). Anturi on asennettu kasvihuoneen säätöautomaattiin.

3.1.2 Koejärjestely

Koejärjestelynä oli satunnaistettujen täydellisten lohkojen koe. Koska käytössä oli vain kaksi kasvihuonetta, lohko oli ns. pesiytynyt käsittelyyn. Kesällä 2005 kasvihuoneosastoissa oli kuusi lohkoa, kahdeksan kasvia kussakin lohkoissa. Lohkojen välissä oli neljä suojataimea. Osastojen neljä reunimmaista ja kaksi keskimmäistä riviä olivat myös suojataimia. Kesällä 2006 kasvihuoneosastoissa oli viisi viiden kasvin lohkoa. Yksi taimi lohkojen välissä sekä osastojen neljä reunimmaista riviä ja neljä tainta rivin kummassakin päässä olivat suojataimia.

3.1.3 Sato- ja kasvustohavainnot

Satoa korjattiin kolmesti viikosti 12 viikon ajan (2005) tai kuudesti viikossa 14 viikon ajan (2006). Ensimmäinen ja toinen luokka lajiteltiin EU säädösten mukaisesti (Virallinen lehti L 150 16.6.1988, s. 21). Hoitotöiden yhteydessä poistettavien huonojen hedelmien lukumäärä kirjattiin ylös ja nämä luokiteltiin kauppakelvottomiin.

Hedelmien kuiva-ainepitoisuus määritettiin viljelyn aikana kahdesta neljään kertaa mittaamalla kustakin koeruudusta kolmen tai neljän hedelmän tuore- ja kuivapaino.

Kolmasti kesällä 2006 kasvustosta mitattiin yksittäisten lehtien pituus ja leveys kasvin latvasta alkaen lehteen 24 asti. Aiemmin luodun kaavan avulla

laskettiin yksittäisten lehtien pinta-ala. Lisäksi lehtien kokonaislukumäärä kasvissa laskettiin.

Kasvustojen raivauksen yhteydessä kunkin koeruudun 3-4 kasvista laskettiin lehtien, lehtiarprien ja kasviin jäävien pienten hedelmien lukumäärä. Lisäksi mitattiin varren pituus ja lehtipinta-ala sekä lehtien, lehtiruotien, varren ja pienten hedelmien tuore- ja kuivapaino. Kuivapainojen perusteella laskettiin kasvin satoindeksi, joka kertoo, kuinka suuri osuus kasvin maanpäällisestä kuiva-aineesta kohdentui hedelmiin. Kunkin viljelyn päätteeksi myös juuriston terveys, runsaus ja tasaisuus arvioitiin silmämääräisesti.

3.1.4 Fotosynteesimittaukset

Kasvuston ylempien lehtien kaasunvaihtoa mitattiin kasvihuoneessa kesällä 2006 viikoilla 28-30. Mittaukset tehtiin kannettavalla fotosynteesimittarilla (LI-6400, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA), johon oli liitetty fluoresenssin mittauskvyvetti (6400-40 Leaf Chamber Fluorometer, LI-COR Inc.). Lehti sijoitettiin mittauskvyvetin sisään, ja lehdestä 2 cm²:n laajuisen alueen kaasunvaihtoa mitattiin (Kuva 4). Mitattavan lehdenkohdan saama PAR-säteily ja CO₂-pitoisuus pystytään säätämään halutulle tasolle sekä lämpötila ja ilman kosteus pystytään pitämään tasaisina jäähdytys-elementin ja ilman virtausnopeuden säädön avulla. Laite mittaa lehtikvyvettiin menevän ja sieltä ulos tulevan ilman CO₂-pitoisuuden ja kosteuden, ilman virtausnopeuden, lehdenpinnan ja ilman lämpötilan, PAR-säteilyn ja klorofyllin fluoresenssin. Mitattujen arvojen perusteella laite laskee mm. fotosynteesinopeuden, haihdunnan, ilmarakojen johtokyvyn eli ilmarakokonduktanssin ja fluoresenssiparametreja.

Mittaukset tehtiin kasvihuoneissa kasvavista, kasvissa kiinni olevista lehdistä. Yleensä mitattava lehti oli viidenneksi tai kuudenneksi ylin latvasta lukien (lehtien laskeminen aloitettiin ylimmästä lehdestä, jonka lehtilapa oli yli 10 cm pitkä). Kummastakin osastosta tehtiin 4 - 5 rinnakkaista mittausta, kukin mittaus eri lohkoista.

Mittauksen aluksi mittaushohta pimennettiin 15 min ajan, jonka jälkeen mitattiin pimeään sopeutuneen lehden fluoresenssia. Tämän jälkeen annettiin 10 min fotosynteesille saturoivaa valoa (PAR-säteily = 800 μmol m⁻² s⁻¹), jonka jälkeen mitattiin fotosynteesin vaste CO₂-pitoisuudelle asteittain muuttamalla CO₂-pitoisuutta ja mittaamalla fotosynteesiä kussakin pitoisuudessa tasoittumisen jälkeen.

Seuraavaksi mitattiin fotosynteesin vaste PAR-säteilylle valotasoa asteittain laskemalla ja mittaamalla fotosynteesiä kussakin valotasossa tasoittumisen jälkeen. Valovaste mitattiin CO₂-pitoisuuden ollessa 400 ppm ja 1000 ppm.



Kuva 4. Fotosynteesimittari työssään. Kurkun lehti on sijoitettu mittauskyvetin leukojen väliin. Mittauskyvetin valaistusta, ilman CO₂-pitoisuutta, kosteutta ja lämpötilaa voidaan säätää. Mittauspää sisältää myös kaksi infrapuna-analysointia, jotka mittaavat kyvetiin sisään menevän ja sieltä ulos tulevan ilman CO₂-pitoisuuden ja kosteuden. Etualalla vihreä mittariyksikkö, joka sisältää mm. ilman virtausta säätelevän pumpun. (kuvaaja: Eeva-Maria Luomala)

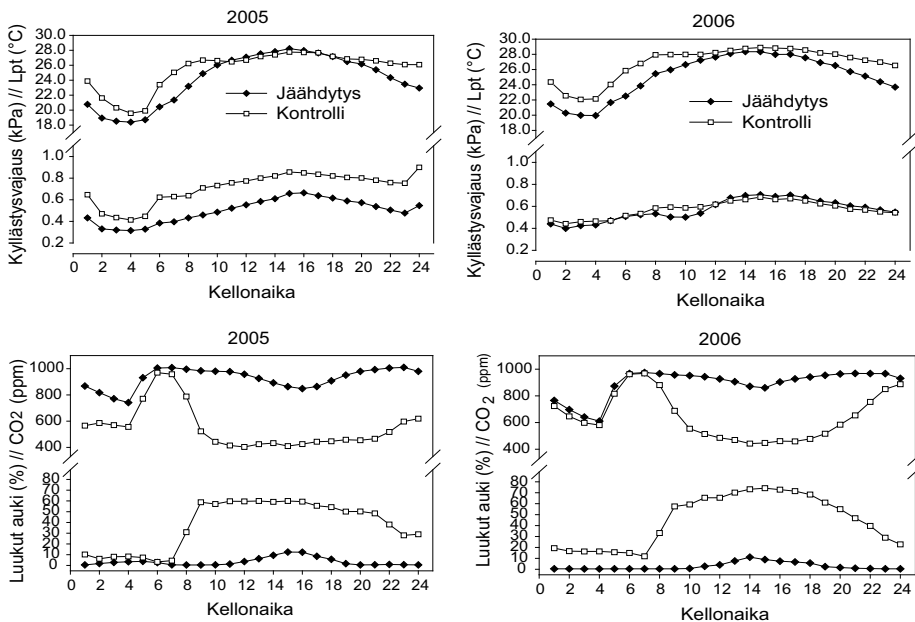
3.1.5 Typpimääritykset lehdistä

Viikolla 27 kasvustosta kerättiin lehtinäytteitä hiili- ja typpipitoisuuden määrittämistä varten. Lehtiä kerättiin kolmesta neljään kappaletta ylälehdistä (lehdet 3.-6.), keskimmaisista (lehdet 13.-16.) ja alalehdistä (lehdet 21.-). Kunkin lehtikerroksen lehdet yhdistettiin yhdeksi näytteeksi, ja näytteen tuorepaino ja pinta-ala (LI-3100; LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) mitattiin. Kuivaamisen jälkeen (70 °C:ssa 5 pv) näytteen kuivapaino punnittiin ja näytteestä analysoitiin hiili- ja typpipitoisuus (Leco-määritys). Kummastakin osastosta kerättiin yksi näyte/lohko eli viisi rinnakkaista näytettä.

3.2 Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.2.1 Ilmasto-olosuhteet

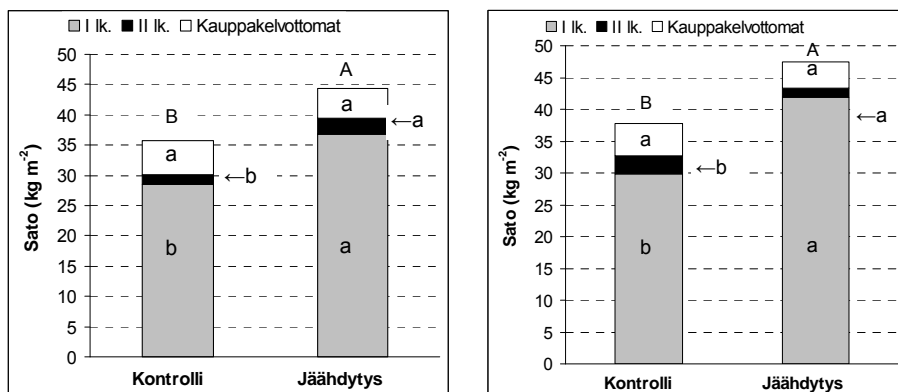
Jäähdytyslaitteisto osoittautui tehokkaaksi kasvihuoneen ilmastonsäätelyssä (Kuva 5). Ilman lämpötilat olivat jäähdytetyssä huoneessa tasaisemmat ja vain hieman matalammat kuin kontrollihuoneessa. Kuukausittainen ero huoneiden keskilämpötiloissa kesällä 2006 oli 0.6 – 1.8 °C. Kesä 2006 oli helteisempi kuin kesä 2005, mikä näkyy heinä-elokuun keskilämpötiloissa. Molemmissa huoneissa ilman kosteus pysyi hyvänä eikä huoneiden välillä ollut suurta eroa etenkin kesällä 2006. Jäähdytyksen ansiosta luokkuja avattiin jäähdytetyssä huoneessa vain vähän. Suurin ero jäähdytetyssä ja kontrollihuoneen ilmastoissa olikin CO₂-pitoisuudessa, joka vähäisen luokkutuuletuksen ansiosta pysyi jäähdytetyssä huoneessa korkeampana kuin kontrollihuoneessa. Esim. kesän 2006 helteisimpänä kuukautena heinäkuussa keskimääräinen CO₂-pitoisuus klo 8-19 välisenä aikana putosi kontrollihuoneessa alle 500 ppm:n, kun se jäähdytetyssä osastossa pysyi yli 900 ppm:ssa.



Kuva 5. Ilmasto-olosuhteet jäähdytetyssä ja kontrollikasvihuoneessa heinä-elokuun aikana vuonna 2005 ja 2006. Yläkuvissa keskimääräinen veden höyrynpaineen kyllästysvajaus (kPa) ja ilman lämpötila (°C), alakuvissa vasemman tuuletusluokun aukioloaste (%) ja ilman hiilidioksidipitoisuus (ppm).

3.2.2 Sadon määrä kasvoi ja laatu parani

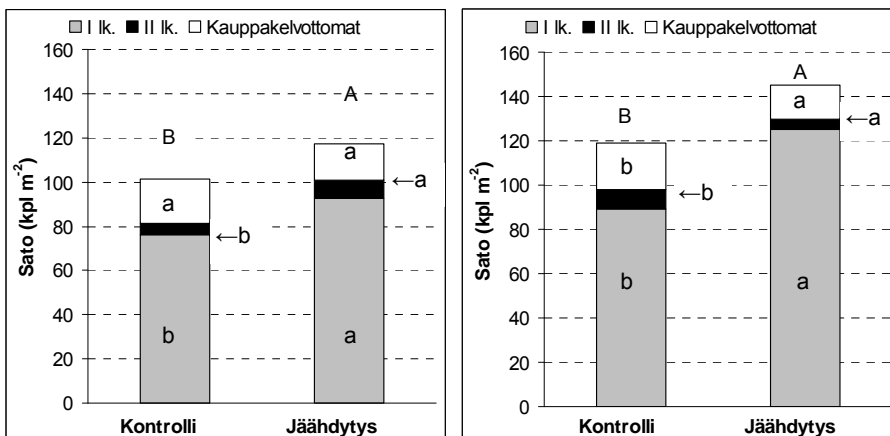
Kasvihuoneen ilmastonhallintatekniikan käyttö lisäsi kurkun satoa kesällä 2005 ja 2006. Kokonaissatoa (kg m^{-2}) saatiin kumpanakin kesänä jäähdetytystä huoneesta noin 25 % enemmän kuin kontrollihuoneesta (Kuva 6). I luokan sato kasvoi jäähdetyksen ansiosta 29 % (2005) ja 41 % (2006). Määrän kasvun lisäksi myös sadon laatu parani erityisesti vuonna 2006, jolloin I luokan osuus kokonaissadosta nousi kontrollin 79 %:sta jäähdetytyn huoneen 88 %:iin. Tämä johtui pääasiassa käyristyneiden kurkkujen osuuden vähene- misestä.



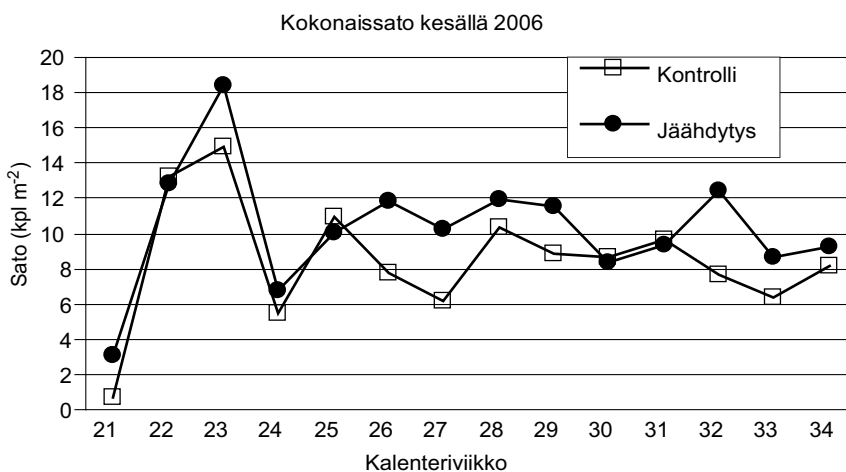
Kuva 6. Kurkun kilomääräinen sato ja laatuluokitus jäähdetyssä ja kontrolli-kasvihuoneessa kesällä 2005 (vasen) ja 2006 (oikea). Eri kirjain kertoo tilastollisen eron ($P < 0.05$) erikseen kussakin laatuluokassa, kokonaissadon vertailu isoilla kirjaimilla.

Kappalemääräisesti tarkasteltuna I luokan satoa saatiin jäähdetytystä huoneesta 22 % (2005) ja 41 % (2006) enemmän kuin kontrollihuoneesta (Kuva 7). Jäähdytyksen käytöllä saatiin siis varsin tuntuva lisä kasvihuoneen hedelmien tuottoon, joka jo kontrollihuoneessa oli hyvää tasoa (2.7 kg m^{-2} viikossa kesällä 2006).

Sadontuoton jaksottaisuutta ei kuitenkaan saatu ilmastonhallintatekniikallaan kokonaan tasoitettua, sillä jäähdetyssäkin huoneessa satohuippuja seurasi satotason lasku noin kolmen viikon jaksoissa (Kuva 8).



Kuva 7. Kurkun kappalemääräinen sato ja laatuluokitus jäähdytetyssä ja kontrollikasvihuoneessa kesällä 2005 (vasen) ja 2006 (oikea). Eri kirjain kertoo tilastollisen eron ($P < 0.05$) erikseen kussakin laatuluokassa, kokonaissaton vertailu isoilla kirjaimilla.



Kuva 8. Kurkun viikkosadot kesällä 2006.

3.2.3 Kasvit kasvoivat pidemmiksi ja tuottivat suuremman lehtipinta-alan

Kasvien kasvua ja rakennetta tutkittiin kasvatuksen kuluessa ja loppuraivauksen yhteydessä. Kasvuston rakenne olikin erilainen jäähdytetyssä huoneessa kontrollihuoneen kasvustoon verrattuna (Taulukko 1).

Jäähdytetyssä huoneessa kasvien varret ja nivelvälit kasvoivat pidemmiksi kuin kontrollihuoneen kasveissa. Nivelvälien pitenemisen vuoksi jäähdytetyn

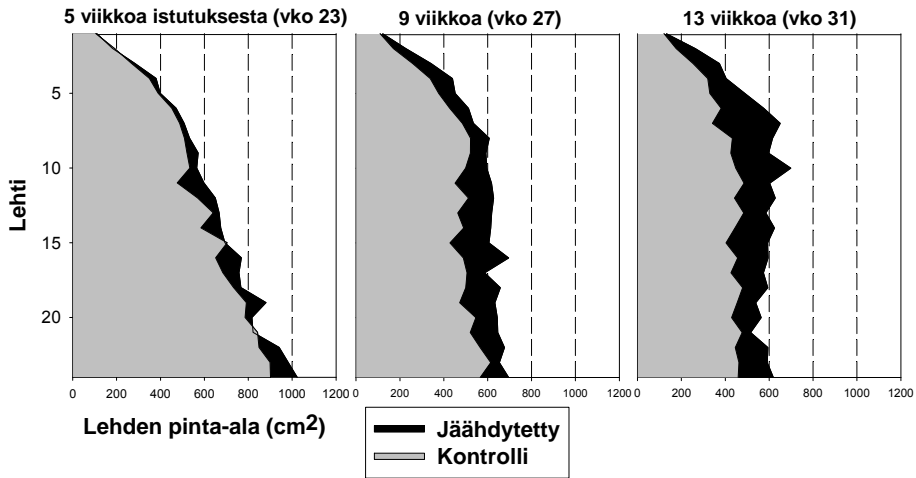
huoneen kasveissa oli koko kasvatusjakson aikana lehtiä vähemmän. Lehtien lukumäärän väheneminen kompensoitui kuitenkin sillä, että yksittäisen lehden pinta-ala oli suurempi kuin kontrollihuoneen kasveissa. Tämän seurauksena kasvin kokonaislehtipinta-ala kasvatuksen päättyessä oli jäädytetyn huoneen kasveissa suurempi kuin kontrollihuoneen kasveissa. Laajempi lehtien kokonaispinta-ala näkyi myös kasvien vedenkäytössä, joka oli suurempi jäädytetyssä huoneessa (2.30 l vrk⁻¹) kuin kontrollihuoneessa (2.04 l vrk⁻¹).

Taulukko 1. Kurkkukasvien rakenne kesällä 2005 ja 2006 jäädytetyssä ja kontrollikasvihuoneessa. n.s. = ei tilastollisesti merkitsevää eroa, * = ero on 95 %:n todennäköisyydellä merkitsevää, ** = ero on 99 %:n todennäköisyydellä merkitsevää ja *** = ero on 99,9 %:n todennäköisyydellä merkitsevää.

	2005		2006		
	Kontrolli	Jäädytys	Kontrolli	Jäädytys	
Varren pituus (m)	9,6	9,2 n.s.	10,8	11,9	*
Lehtiä/kasvi	110	100 ***	126	123	*
Nivelväli (cm)	8,7	9,3 *	8,7	9,7	**
Lehden pinta-ala (cm ²)	461	555 n.s.	437	540	*

Lehtien koon kehitys käy ilmi kuvasta 9. Lehdet olivat suurimmillaan, kun kasvusto oli nuori (5 viikkoa istutuksesta), ja kasvin sivuprofiili oli pyramidimainen. Tässä vaiheessa kontrolli- ja jäädytetyn huoneen kasveilla ei vielä ollut suuria eroja. Kuukauden kuluttua tästä (9 viikkoa istutuksesta) sekä kasvatuksen lopulla (13 viikkoa istutuksesta) jäädytetyn huoneen kasvien lehdet olivat jo selkeästi isompia kuin kontrollihuoneen kasvien. Kasvatuksen lopulla havaittiin myös, että jäädytetyssä huoneessa ylälehtien pinta-ala kasvoi suhteessa muita lehtiä enemmän.

Lehtipinta-alan kasvu on edullista kasvin hiilensidonnan kannalta, sillä isompi yhteyttävä pinta-ala mahdollistaa luonnollisesti suuremman kokonaisnettofotosynteesin. Tämän lisäksi ylälehtien osuuden kasvun voi olettaa olevan kasvun kannalta eduksi, sillä ylälehdet yhteyttävät yleensä alalehtiä paremmin, pääasiassa saamansa paremman valaistuksen ansiosta. Alalehdetkin toki ovat kasvihuoneen korkuisessa kurkkukasvustossa hyväkuntoisia ja yhteyttävät vilkkaasti, mikäli vain saavat tarpeeksi valoa. Tämä puolustaa välivalaistuksen käyttöä kasvihuoneissa.

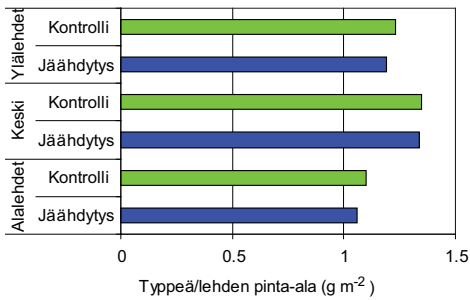
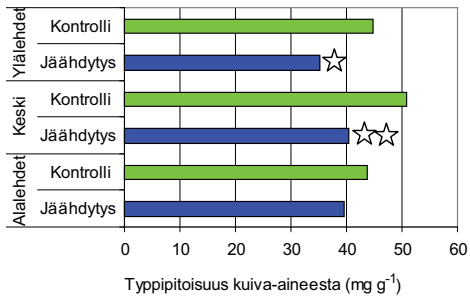
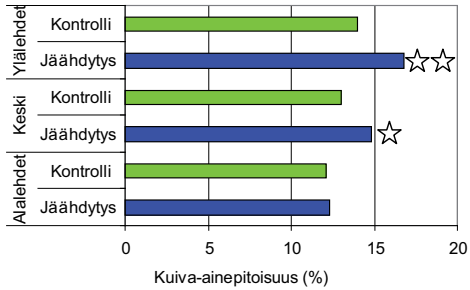
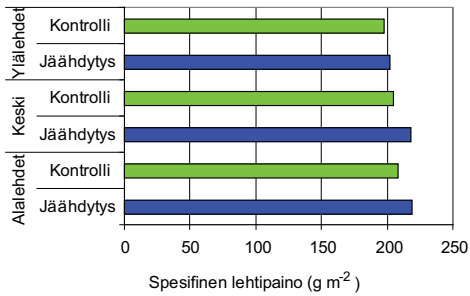


Kuva 9. Kurkun lehtien pinta-ala kasvuston latvasta (lehti 1) kasvuston tyveen asti (lehti 24) jäähdytetyssä ja kontrollikasvihuoneessa kesällä 2006.

3.2.4 Lehden koostumuksessakin tapahtui muutoksia

Lehtien rakenteen ja koostumuksen tutkimiseksi latvuston ylä-, keski- ja alalehdistä kerättiin lehtinäytteitä viikolla 27 (9 viikkoa istutuksesta). Lehden paksuudesta ja tiheydestä kertova spesifinen lehtipaino (g tuorepainoa/m² lehteä) ei juurikaan muuttunut, mutta sen sijaan jäähdytetyn huoneen lehtien kuiva-ainepitoisuus oli suurempi kuin kontrollihuoneen kasvien (Kuva 10).

Jäähdytetyn huoneen lehtien typpipitoisuus kuiva-aineessa oli selkeästi pienempi kuin kontrollihuoneen kasvien lehtien (Kuva 10). Lehtien typpipitoisuuden lasku on melko yleistä korkeassa CO₂-pitoisuudessa kasvaneilla kasveilla, vaikka ravinteita olisikin riittävästi saatavilla, ja saattaa johtua muutoksista typenkäytössä kasvin sisällä. Yhteytyksen kannalta tärkeämpää on kuitenkin typpipitoisuus lehden pinta-alaa kuin kuiva-ainesta kohti. Suurin osa kasvin sisältämistä proteiineista ja samalla tyyppistä on sitoutunut fotosynteesissä toimiviin proteiineihin. Lehden fotosynteesikyky ja typpipitoisuus pinta-alaa kohti yleensä korreloivat keskenään, joten mitä suurempi lehden sisältämä typpimäärä pinta-alaa kohti on, sen parempi fotosynteesikykykin on.

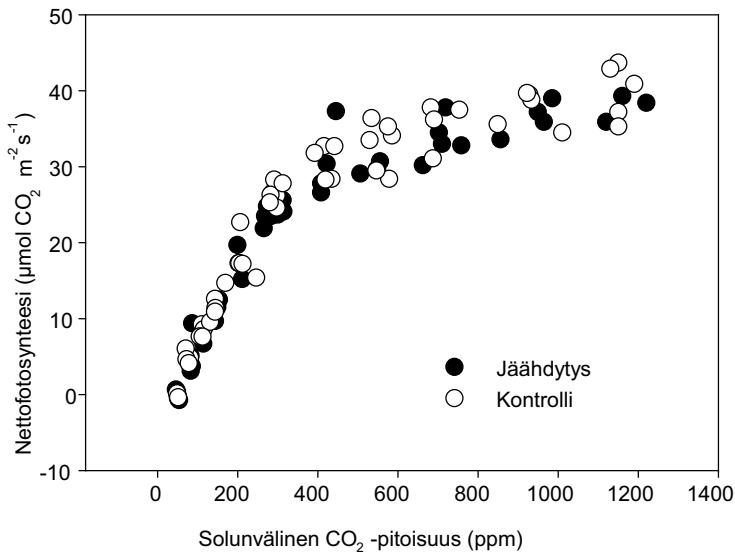


Kuva 10. Kurkun lehtien spesifinen lehtipaino, kuiva-ainepitoisuus, typpipitoisuus kuiva-ainetta ja lehden pinta-alaa kohti viikolla 27 vuonna 2006. Tähdet kertovat tilastollisen merkitsevyyden: * = ero on tilastollisesti merkitsevä 95 %:n todennäköisyydellä, ** = ero on tilastollisesti merkitsevä 99 %:n todennäköisyydellä.

Kun typpipitoisuus laskettiin pinta-alaa kohti, havaittiin että typpipitoisuus ei juurikaan muuttunut kasvihuoneen ilmastohallintatekniikan vuoksi (Kuva 10). Typpipitoisuuden muuttumattomuus pinta-alaa kohti antaisi olettaa, että lehtien fotosynteesikyky oli samanlainen jäähdytetystä ja kontrollihuoneessa.

3.2.5 Lehtien fotosynteesikyky ei muuttunut

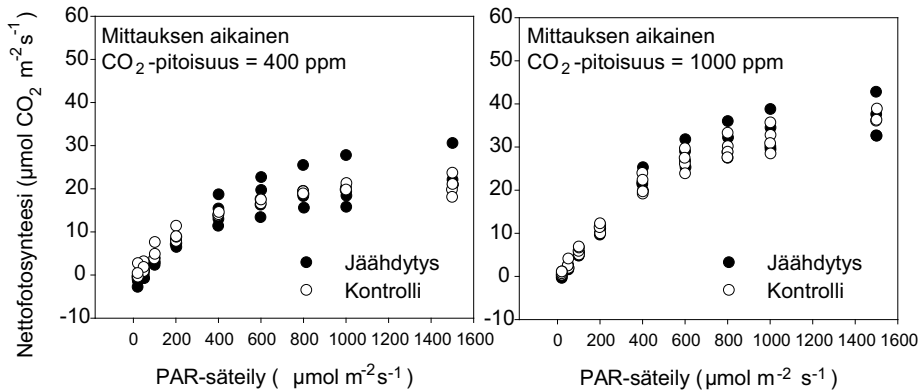
Kuten jo lehtien typpimääritykset antoivat olettaa, kasvihuoneen ilmastohallintateknikka ei vaikuttanut kurkun ylimpien lehtien fotosynteesikykyyn. Nettofotosynteesin vaste CO_2 -pitoisuudelle oli samanlainen kontrolli- ja jäähdytetyssä huoneessa (Kuva 11). Ilman CO_2 -pitoisuus rajoittaa kasvien fotosynteesinopeutta CO_2 :a sitovan Rubisco-entsyymin ominaisuuksien vuoksi. Kun CO_2 -pitoisuutta nostetaan nolasta lähtien, fotosynteesinopeus kasvaa lineaarisesti, kuten kuvan 10 käyrän alkuosasta huomataan. Nettofotosynteesi alkoi kurkulla saturoitua soluvälien CO_2 -pitoisuuden saavuttaessa n. 400 ppm, mikä vastasi ulkoisessa pitoisuudessa n. 550 ppm:aa. Tämän jälkeen CO_2 pitoisuuden noston vaikutus fotosynteesinopeuteen oli pienempi verrattuna alkukäyrän jyrkkään nousuun (Kuva 11). Kontrolli- ja jäähdytetyn huoneen samankaltaisesta CO_2 -vasteesta voidaan päätellä, että molempien huoneiden kasvit yhteyttivät samalla nopeudella, kun ilman CO_2 -pitoisuus oli sama.



Kuva 11. Kurkun ylälehtien fotosynteesin vaste CO_2 -pitoisuudelle.

Nettofotosynteesin vasteessa PAR-säteilylle ei myöskään ollut eroja huoneiden välillä (Kuva 12). Tällöin kontrolli- ja jäähdytetyn huoneen kasvit yhteyttivät samalla nopeudella, kun valaistus oli sama. Valovaste mitattiin kahdessa eri CO_2 -pitoisuudessa, 400 ja 1000 ppm:ssa. Kuumana kesäpäivänä tuuletusluukkujen ollessa auki kontrollihuoneen CO_2 -pitoisuus laski lähelle 400 ppm:aa, kun taas jäähdytetyssä huoneessa luukkujen avaamisen tarve oli

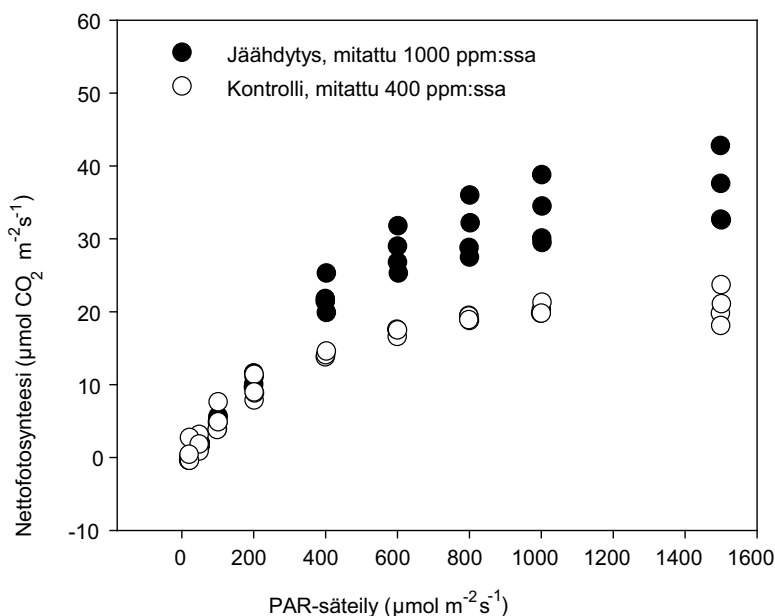
jäähdytyksen ansiosta pieni ja CO₂-pitoisuus pystyttiin pitämään korkeana. Jäähdytetyssä huoneessa nettofotosynteesi oli korkeamman CO₂-pitoisuuden vuoksi vilkkaampaa. Tätä havainnollistaa kontrollihuoneen 400 ppm:ssa ja jäähdytetyn huoneen 1000 ppm:ssa mitatun valovastekäyrän vertailu (Kuva 13).



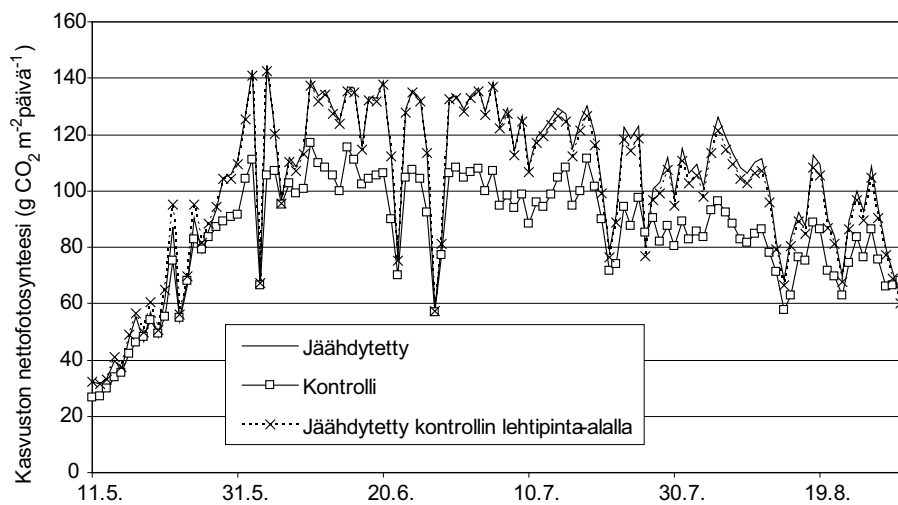
Kuva 12. Kurkku ylälehtien fotosynteesin vaste PAR-säteilylle (400-700 nm aallonpituusalue), kun CO₂-pitoisuus on 400 ppm (vasemmalla) tai 1000 ppm (oikealla).

3.2.6 Suurin osa kasvun lisäyksestä johtui korkeammasta CO₂-pitoisuudesta

Kuinka paljon sitten jäähdytetyn huoneen kasvien suurempi lehtipinta-ala lisäsi kasvua? Entä mikä merkitys oli jäähdytetyn huoneen korkeammalla CO₂-pitoisuudella suoraan fotosynteesin nopeuden nostajana? Näihin kysymyksiin haettiin vastauksia luomalla matemaattinen malli kasvuston hiilensidonnan nopeudesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Malliin syötetään olosuhdetietoja, kuten esim. ilman CO₂-pitoisuus ja kasvuston yläosaan saapuvan säteilyn määrä, sekä tietoja kasvin ominaisuuksista, kuten lehtipinta-ala kasvin eri korkeuksissa ja fotosynteesin vaste CO₂:lle ja valolle. Mallin avulla pystytään siten laskemaan, kuinka paljon eri lehtikerrokset yhteyttävät tietyissä olosuhteissa, ja summaamaan, kuinka paljon kasvusto yhteyttää hiiltä kasvihuone-m²:ä kohti päivässä.



Kuva 13. Kurkun ylälehtien fotosynteesin vaste PAR-säteilylle (400-700 nm aallonpituusalue) kontrollihuoneen kasvissa 400 ppm:n CO_2 -pitoisuudessa ja jäähdytetyn huoneen kasvissa 1000 ppm:ssa mitattuna.



Kuva 14. Kurkkukasvuston päivittäinen hiilensidonta eli nettofotosynteesi kasvumallin avulla laskettuna.

Kun malliin sitten syötettiin jäähdytetyn huoneen ja kontrollihuoneen olosuhteet ja lehtipinta-alat erikseen, huomattiin, että jäähdytetyn huoneen kasvit sitoivat huomattavasti enemmän hiiltä korkeamman CO_2 -pitoisuuden ansiosta (Kuva 14). Lehtipinta-alan vaikutuksen selville saamiseksi jäähdytetyn huo-

neen olosuhteet syötettiin malliin yhdessä *kontrollihuoneen* lehtipinta-alojen kanssa. Yllätykseksi huomattiin, että kasvien hiilensidonta ei juuri eronnut suuremman lehtipinta-alan sitomasta hiilestä (Kuva 14). Mallin perusteella voidaankin siis sanoa, että korkeampi CO₂-pitoisuus lisäsi jäähdetytyn huoneen kasvien yhteytystä (ja kasvua) 20-25 %, kun taas laajemmalla lehtipinta-alalla oli hyvin pieni merkitys kasvun kannalta. Korkeampi CO₂-pitoisuus selittää siis suurimman osan kasvun ja sadon lisäyksestä jäähdetyssä kasvi-huoneessa tavanomaiseen verrattuna, mutta mikä selittää lopun sadonlisän?

3.2.7 Biomassan jakautuminen muuttui

Jäähdetytyn huoneen paremmalle sadolle löydettiin korkeamman CO₂-pitoisuuden lisäksi selittäviä tekijöitä, kun tutkittiin yhteytetyin hiilen eli biomassan jakautumista kasvin eri osiin. Satoindeksi kertoo, kuinka suuri osa kasvin maanpäällisten osien biomassasta kohdentui hedelmiin ja kuinka paljon taas varteen ja lehtiin (Taulukko 2). Satoindeksi oli molempina kesinä korkeampi jäähdetyssä huoneessa kuin kontrollihuoneessa. Jäähdetytyn huoneen kasvit siis kasvoivat enemmän, mutta tämän lisäksi ne käyttivät suuremman osan kasvustaan sadontuottoon kuin kontrollihuoneen kasvit.

Taulukko 2. Kurkun hedelmien kehittyminen nivelväleihin sekä satoindeksi eli maanpäällisten osien biomassan kohdentuminen hedelmiin kesällä 2005 ja 2006 jäähdetyssä ja kontrollikasvihuoneessa.

	2005		2006	
	Kontrolli	Jäähdytys	Kontrolli	Jäähdytys
Satohedelmiä/nivelvälit	50 %	65 %	48 %	63 %
Satoindeksi	64 %	67 %	62 %	67 %

Osa kurkun hedelmän aluista abortoituu tavallisesti noin 10 päivän kuluessa kukkimisesta, ja osa joudutaan poistamaan huonoina. Kerätyn sadon ja nivelvälien lukumäärän perusteella pystyttiin laskemaan, kuinka suuri osa hedelmän aluista kehittyi korjuukypsäksi hedelmäksi (Taulukko 2). Kontrollissa noin joka toinen hedelmän aluista kasvoi satohedelmäksi asti. Jo kasvatuksen kuluessa oli havaittu, että jäähdetyssä huoneessa tapahtui vähemmän abortoitumista ja alkuja jouduttiin poistamaan vähemmän kuin kontrollihuoneessa, mutta yllättävää oli suuri ero kontrolliin nähden: jäähdetyssä huoneessa noin 2/3 aluista kehittyi korjuukypsäksi. Abortoitumisen vähentymiseen vaikuttivat jäähdetytyn huoneen tasaisempi lämpötila, erityisesti äärimmäisten lämpöhuippujen poistaminen, sekä myös kasvien paremmat hiilihydraattiva-

rannot, sillä tarjolla olevien yhteytystuotteiden määrä vaikuttaa hedelmien alkujen kehittymiseen. Jäähdytetyn huoneen korkeampi CO₂-pitoisuus vaikutti siis kasvuun välittömästi nostamalla fotosynteesinopeutta, mutta myös välillisesti paremman yhteytystuotetarjonnan kautta (vähemmän abortoitumista) ja muuttamalla kasvin morfologiaa ja kasvutapaa (laajempi lehtipinta-ala).

3.2.8 Sadontuoton rajoja ei vielä saavutettu

Jäähdytetyssäkin huoneessa noin kolmannes hedelmän aluista kuitenkin abortoitui, eikä sadon jaksottaisuuttakaan kasvatuksen aikana saatu tasoitettua (Kuva 8). Nämä seikat osoittavat, että sadontuoton rajoja ei vielä saavutettu, ja herättää pohdinnan, että miten kurkun kasvuolosuhteita voitaisiin vielä parantaa? Käytössä olleet valotasot olivat melko matalat (asennusteho 170 W m⁻²), eikä myöskään ole takeita siitä, että kasvatuksissa käytetyt tavoitelämpötilat olisivat olleet optimaaliset. Kasvatusten kuluessa heräsi myös epäily siitä, että nykyisin käytössä olevat kasvualustat ja ravinneseokset eivät välttämättä olekaan optimaaliset, kun kasvunopeus on paljon suurempaa kasvi-huoneen jäähdytystä käytettäessä. Jäähdytyksen käyttöönotto Suomen olosuhteissa mitä todennäköisimmin lisää kurkusta saatavia satoja, mutta vaatii edelleen tutkimusta kasvun optimioloista ja viljelyolosuhteiden hienosäädöstä.

4 Kurkun välivalotuskokeet eri vuodenaikoina

Kurkun valotus on muuttunut viime vuosien aikana. Yhä enemmän valotuskalustoa asennetaan kurkkukasvuston keskellä valottamaan kurkun alempia lehtiä nk. välivalotusta. Lamppujen sijoittelu sekä kasvuston yläpuolelle että keskellä tasoittaa myös kasvuston saamaa lamppuista lähtöisin olevaa lämpösäteilyä. Suljetun kasvihuoneen oloissa tutkittiin myös välivalotusta.

Tutkimuskysymykset:

Parantaako välivalotus kurkun sadon määrää ja laatua eri vuodenaikoina verrattuna tavanomaiseen ylävalotukseen?

Parantaako välivalotus sadon määrää ja laatua suljetussa, jäähdetytyssä, kasvihuoneessa verrattuna perinteiseen ilmastohallintahuoneeseen?

4.1 Aineisto ja menetelmät

Kurkkulajike oli 'Cumuli' tai 'Aviance'(syys-talvikasvusto 2005-2006). Kurkut viljeltiin yksirivisinä.

Jäähdytyskokeissa, joissa oli mukana eri valotustavat oli kolme kasvustoa: talvi-kevät 2006, kesä 2006 ja syys-talvi 2006-2007. Vain valotuskokeessa verrataan syys-talvikasvustoja vuosina 2005-2006 ja 2006-2007.

4.1.1 Valotus

Tekovalojakson pituus oli 20 tuntia vuorokaudessa (klo 04-24). Asennusteho oli 170 W m⁻². Tavanomaisessa valotuksessa (ylävalot) kaikki valaisimet oli asennettu kasvuston latvan yläpuolelle käytävälle 3,5 metrin korkeudelle käytävän pinnasta. Ylävalokoejäsenen kurkkurivin molemmilla puolilla oli 400 W:n polttimot. Valot olivat päällä, kun ulkona globaalisäteily oli alle 150 W m⁻² (talvi-kevät- ja kesäkasvusto) tai 250 W m⁻² (syys-talvikasvusto 2006). Polttimoina oli syys-talvi 2005-, talvi-kevät- ja kesäkasvustoissa SON-T Greenpower (Philips) ja syys-talvikasvustossa 2006 NAV-T (Osram).

Välivalokoejäsenessä puolestaan 69 % asennustehosta tuli ylävaloista ja 31 % välivaloista. Kurkkurivin toisella puolella oli ylä+välivalotus ja toisella puolella pelkkä ylävalotus. Välivalorivin kaikki polttimot olivat 250 W ja ylävalorivin 400 W. Välivalojen kalusteet olivat keväällä ja kesällä 1,3 metrin korkeudella maasta ja syksyllä viljelyn alussa 0,7 metrin korkeudella. Välivalot paloivat koko valotusjakson paitsi kesällä olivat pois päältä klo 10-16 välisen ajan. Ylävalorivin polttimot olivat päällä kuten ylävalokoejäsenen-

sä. Polttimoina oli syys-talvi 2005-, talvi-kevät- ja kesäkasvustoissa SON-T Pia (Philips) ja syys-talvikasvustossa 2006 NAV-T (Osram).

Muu aineisto ja menetelmät on kuvattu kurkkukokeiden alussa ja osittain tulosten yhteydessä.

4.2 Tulokset

Yhteenveto jäähdytyskokeiden tuloksista, joissa oli mukana eri valotustavat, on Taulukossa 3. Näistä kolmesta kasvustosta tulee yhteensä noin yksi viljelyvuosi. Yhteenlaskettuja satoviikkoja oli 36. Jakson kokonaissadoksi saatiin yli sata kiloa neliömetriltä kaikilta koejäseniltä. Jäähdytetyn huoneen välivalotuksesta saatiin eniten ensimmäisen luokan satoa kiloina neliömetriltä. Kontrollissa välivalokoejäsen antoi suuremman ja painavamman sadon kuin ylävalotus.

4.2.1 Talvi-kevätkasvusto 2006

Viljelyaika oli 20. helmikuuta – 24. huhtikuuta 2006. Sadonkorjuu alkoi viikolla 10 ja lopetettiin viikolla 16. Satoviikkoja kertyi 7. Jäähdytyksellä ei ollut vaikutusta satotuloksiin. Jäähdytyskone laitettiin päälle vasta maaliskuun loppupuolella, joten merkittäviä satoeroja ei ehtinyt tulla ennen kokeen lopettamista. Välivalotuksella saatiin kokonaissatoa noin 3 kg ja 1. luokan satoa 2,5-4,5 kg neliömetriltä enemmän kuin ylävaloilla (Taulukko 3). Hedelmien määrässä oli jonkin verran eroja. Välivalokoejäsenestä poistettiin vähemmän abortoituneita kurkunalkuja kuin ylävalokoejäsenestä.

4.2.2 Kesäkasvusto 2006

Viljelyaika oli 9. toukokuuta – 29. elokuuta. Sadonkorjuuviikot olivat 21-34. Satoviikkoja kertyi 14. Kesäkasvuston jäähdytyskokeen tuloksista on kerrottu erikseen. Tässä käsitellään vain eri valotustapojen vaikutusta eri olosuhteissa. Valotustavalla ei ollut merkitystä 1. luokan sadon painoon (Taulukko 3). Kokonaiskilosatoa ja hedelmiä saatiin kontrollihuoneessa enemmän välivaloista kuin ylävaloista. Jäähdytysolosuhteissa valotustavalla ei ollut merkitystä.

Taulukko 3. Kurkun eri valotustapojen satotulokset ja tilastollinen merkitsevyys suljetussa kasvihuoneessa (jäähdytys) ja kontrollihuoneessa eri vuodenaikoina. Tilastollinen merkitsevyys: * , ** ja *** todennäköisyydellä 95 % , 99 % ja 99,9 % , ns ei merkitsevä.

Kasvusto	sato/m ²	Jäähdytys		Kontrolli		Tilastollinen merkitsevyys		Eri valotus samassa osastossa		Sama valotus eri osastoissa	
		ylävalo	ylä+välivalo	ylävalo	ylä+välivalo	valo	osasto	jäähdytys	kontrolli	ylävalo	ylä+välivalo
Talvi-kevät	1 lk kg	18,5	23	21	23,5	***	ns	***	*	ns	ns
20.2.-24.4.06	kokonaissato kg	22,5	25	22	25	***	ns	**	**	ns	ns
sadonkorjuu vko 10-16	1 lk kpl	56	67	62	66	**	ns	**	ns	ns	ns
satoviikot 7 kpl	kokonaissato kpl	72	73	66	70,5	*	*	ns	**	**	ns
Kesä	1 lk kg	42	42	30	33	ns	***	ns	ns	***	***
9.5.-29.8.06	kokonaissato kg	47,5	49	38	42	**	***	ns	**	***	***
sadonkorjuu vko 21-34	1 lk kpl	125	124	89	98	ns	***	ns	*	***	***
satoviikot 14 kpl	kokonaissato kpl	145	149	119	132	***	***	ns	***	***	***
Syys-talvi	1 lk kg	37,5	38,5	36	38	ns	ns	ns	ns	ns	ns
14.9.06-15.1.07	kokonaissato kg	42	44	41	43	*	ns	ns	ns	ns	ns
sadonkorjuu vko 40-2	1 lk kpl	110	110	111	108	ns	ns	ns	ns	ns	ns
satoviikot 15 kpl	kokonaissato kpl	126	130	131	127	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Koko jakso yhteensä	1 lk kg	98	103,5	87	94,5	*	**	ns	*	**	**
satoviikot 36 kpl	kokonaissato kg	112	118	101	110	***	***	*	**	***	**
	1 lk kpl	291	301	262	272	ns	***	ns	ns	**	**
	kokonaissato kpl	343	352	316	329,5	*	***	ns	*	***	***

valo*osasto- yhdysvaikutus ei tilastollista merkitsevyyttä

4.2.3 Syys-talvikasvusto 2006-2007

Viljelyaika oli 14. syyskuuta 2006 – 15. tammikuuta 2007. Sadonkorjuuvii-
kot olivat 40-2. Satoviikkoja kertyi 15. Valostavalla ja jäädytyksellä ei ollut
merkitystä koko jakson satomääriin ja painoihin (Taulukko 3). Jäädytyskone
sammutettiin 15. marraskuuta. Kahden ensimmäisen sadonkorjuuviikon aika-
na jäädytyshuoneesta saatiin enemmän satoa kuin kontrollihuoneesta. Jääh-
dytystarve väheni talvea kohti ja olosuhteet tasoittuivat huoneiden välillä.

Välivalokoejäsenen hedelmien, varren ja lehtien kuivapainot olivat korke-
ammat kuin ylävaloissa kasvaneilla kasveilla. Hedelmien korkeammat kuiva-
painot voivat vaikuttaa myönteisesti hedelmien kestävyys (Taulukko 4).

Taulukko 4. Kurkun syys–talvikasvuston 2006–2007 hedelmän kuivapainot.

	Jäädytys		Kontrolli	
	Ylävalo	Ylä+välivalo	Ylävalo	Ylä+välivalo
Kuivapaino, g	4,8	6,9	4,5	6,1

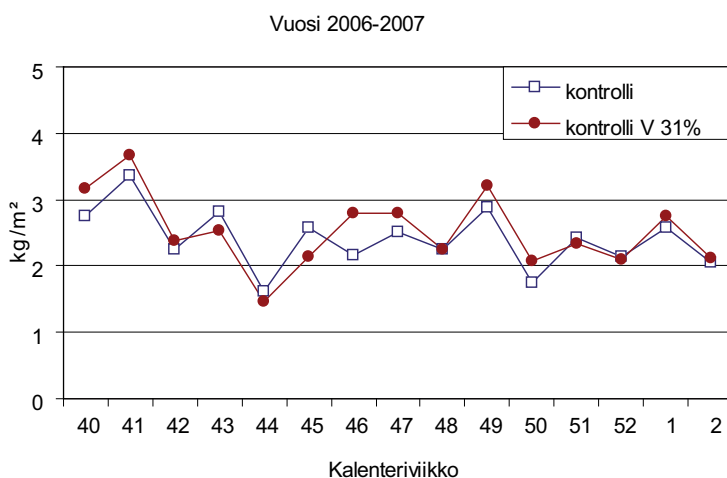
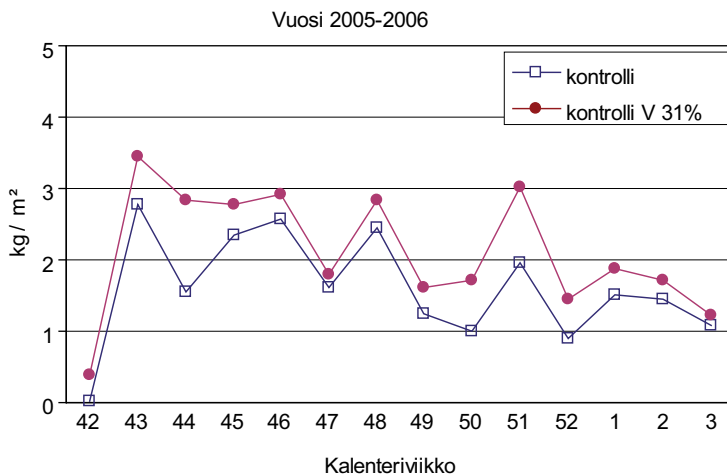
4.2.4 Syys-talvikasvustojen 2005-2006 ja 2006-2007 vertailu

Viljelyajasta johtuen vuonna 2005 sato alkoi kaksi viikkoa myöhemmin kuin
vuonna 2006. Vuonna 2005-2006 välivalotuksesta saatiin koko viljelyn ajan
enemmän satoa kuin ylävaloista (Kuva 15). Vuonna 2006-2007 valotustavoil-
la ei ollut eroja. Molemmissa valotustavoissa molempina vuosina 5 satovii-
kon jälkeen tapahtui sadon notkahdus. Vuonna 2005 lokakuun kokonaissäteily
oli suurempi kuin vuonna 2006 ja se näkyy ensimmäisten viikkojen sato-
käyrissä (Kuva 15).

Vuonna 2005 loppuvuodesta ja alkuvuodesta 2006 ylävalon satotulos oli
selvästi alhaisempi kuin seuraavana vuonna samaan aikaan. Globaalisäteily-
sä ei tähän aikaan ollut suuria eroja vuosien välillä (Taulukko 5).

Taulukko 5. Globaalisäteily MTT Piikkiössä Ilmatieteen laitoksen mittausten
mukaan.

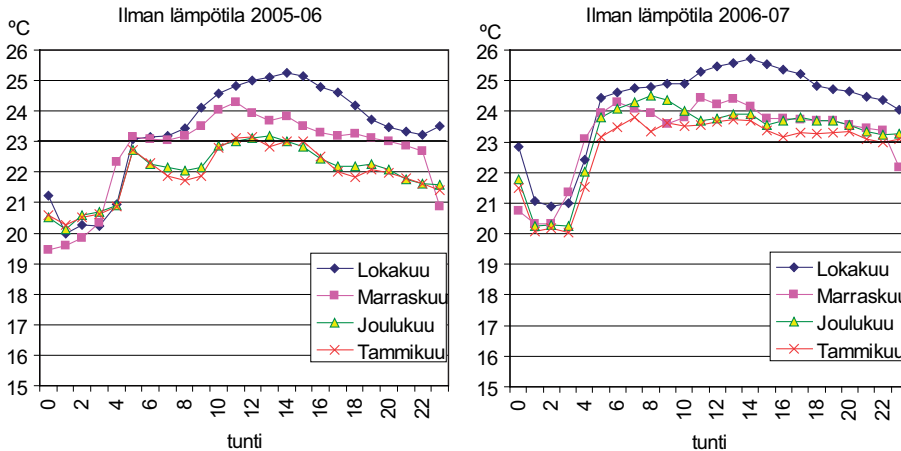
Vuosi	Kuukausi, MJ/m ²		
	Lokakuu	Marraskuu	Joulukuu
2005	141	35	15
2006	95	37	13



Kuva 15. Kahden kurkkukasvuston kilosadot neliometriä kohden tavanomaisessa valotuksessa (kontrolli) ja välivalotuksessa (kontrolli V 31 %) kahtena eri talvena. Lajike oli vuonna 2005–2006 'Aviance' ja vuonna 2006–2007 'Cumuli'.

Hiilidioksidipitoisuudessa ja tekovalotuksessa ei myöskään ollut merkittäviä eroja vuosien välillä. Suurin ero oli kasvihuoneen lämpötiloissa erityisesti joulukuussa ja tammikuussa (Kuva 16). Vuonna 2005-2006 lämpötilat olivat selvästi alhaisemmat kuin vuonna 2006-2007.

Välivalojen vuonna 2005-2006 kasvustoa lämmittävä vaikutus on voinut olla merkittävä. Se, että vuonna 2006-2007 välivaloista ei saatu ylävaloja parempaa satoa voi johtua ylipäänsä liian alhaisesta valotehosta koko kokeessa kun lämpötila ei ollut rajoittava tekijä.



Kuva 16. Syys–talvikasvustojen kasvihuoneen ilman lämpötilat vuosina 2005–2006 ja 2006–2007 vuorokauden tuntien keskiarvoina.

4.3 Tulosten tarkastelu

Välivalotus paransi kurkun sadon määrää ja laatua talvella ja keväällä sekä jäähdytetyssä että kontrollihuoneessa. Kesällä välivalot antoivat paremman sadon kontrollihuoneessa. Kesällä suljetussa kasvihuoneessa välivalotuksesta ei ollut hyötyä. Syys-talvikasvusto ei juurikaan hyötynyt jäähdytyksestä, koska viilennystarve oli tässä vaiheessa vähäinen.

Syys-talvikasvustossa oli vuosien välillä ero välivalotuksen hyödystä. Kasvihuoneen lämpötilalla ja välivalotuksen lamppujen lämpösäteilyllä saattoi olla tähän vaikutusta. Aikaisempien mittaustulosten mukaan valotusolosuhteissamme ilman lämpötila oli 0,8 °C korkeampi välivalojen läheisyydessä kuin ilman lämpötila (Hovi-Pekkanen & Tahvonen 2007). Lisäksi syys-talvikasvustossa 2005-2006 mitattiin lehtien ja hedelmien lämpötilaa, jotka olivat noin 0,6 °C korkeampia kuin tavanomaisessa valotuksessa. Vaikka sadon määrässä ei vuonna 2006-2007 saatu valotustapojen välille eroja, välivalotus paransi yksittäisen hedelmän laatua (kuivapaino), mikä voi pidentää varastokestävyyttä ja kauppakelpoisuusaikaa.

Kaiken kaikkiaan kokeissamme oli nykyisiin valotustasoihin nähden vaatimaton valotuksen asennusteho, jolla voi olla suurikin merkitys sadon muodostukseen eri valotustavoilla. Sähköverkkomme ei valitettavasti kestänyt tehokkaampaa valotusta.

5 Suljetun kasvihuoneen kannattavuus kurkun tuotannossa kesäkaudella käytettäessä *Novarbo*-jäähdytysjärjestelmää

Esitämme arvion suljetun kasvihuoneen mahdollistavan *Novarbo*-jäähdytysjärjestelmän (Biolan Oy) vuoden 2007 kehitysversion käyttökustannuksista ja vertaamme niiden suuruusluokkaa odotettavissa olevaan suljetun huoneen tuottoon. Suljettua huonetta verrataan huoneeseen, jossa lämpötilaa ja kosteutta rajoitetaan tuulettamalla ja sumuttamalla. Jäähdytys- ja kosteudenpoistotarpeen laskemiseksi tarvitaan fysikaalinen malli kasvihuoneesta ja sen kasvustosta. Kasvuston sadontuoton laskemiseksi tarvitaan malli kasvuston vasteesta lämpötilaan, kosteuteen, säteilyyn ja hiilidioksidipitoisuuteen. Kumpaankin malliin sisältyy epävarmuutta, joten tulosta on pidettävä vain tuottomahdollisuuden suuruusluokan arviona, jota voi käyttää pohjana keskustelulle investoinnin kannattavuudesta. Tavoitteena on rajata vertailu niin, että voidaan käyttää yksinkertaisia malleja, mikä mahdollistaa viljelijöiden ja neuvojen kriittisen arvion kustannuksista ja hyödyistä.

Arvio jäähdytyksen kustannuksista perustuu *Novarbo*-järjestelmän vuoden 2007 kehitysvaiheen energiatehokkuuteen. *Novarbo*-järjestelmässä suihkutaan kasvihuoneessa ylhäältä alas vesiverho, joka jäähdyttää ilmaa konvektiivisesti (ilmasta johtuu kylmempään veteen lämpöä) ja tiivistää vettä ilmasta poistaen latenttia lämpöä (haihtumisen sitoma / tiivistymisen vapauttama lämpö). Lämmennyt vesi johdetaan ulos, jossa se jäähdytetään uudelleen haihduttamalla pakotetusti osa vedestä. Arvio jäähdytyksen vaikutuksesta kurkun satoon perustuu Piikkiössä 2005-2006 tehtyihin kokeisiin ja teoreettiseen tietoon lämpötilan, kosteuden, säteilyn ja hiilidioksidipitoisuuden vaikutuksesta kurkun kasvuun ja satoon. Piikkiön kokeissa ei käytetty *Novarbo*-järjestelmää, vaan koehuoneeseen johdettiin jäähdytettyä ja kuivattua ilmaa.

5.1 Menetelmät

5.1.1 Lämmön ja kosteuden poisto

Lämmön ja kosteuden poisto huoneesta katteen kautta ja luukuista laskettiin mallilla, jossa auringon kokonaissäteily, kasvuvalojen säteily, ulkolämpötila ja tuulen nopeus ulkona muodostivat pakotteen (julkaisematon).

Mallin lämmön- ja kosteudenvaihtoparametrit kalibroitiin niin, että tuuletustarve vastasi Piikkiön koekasvihuoneen tuuletustarvetta 2005-2006. Koekasvihuone oli lasikatteinen ja kennolevyseinäinen yksittäishuone.

Kasvihuoneen lämpötila pidettiin 20 ja 28 °C välillä, suhteellinen kosteus tuuletetussa huoneessa 65-70 % ja suljetussa huoneessa 80-85 %.

Vuorokauden säteilysumma teoreettisessa kasvihuoneessa (läpäisevyys 0.75) laskettiin erikseen jaksoille, jolloin CO₂-pitoisuus oli korkea (1000 ppm) ja matala (400 ppm). Alhaista pitoisuutta käytettiin teoreettisessa tuuletetussa huoneessa, kun laskettu luukkukulma ylitti 30 %. Vuorokautinen jäähdytys teoreettisessa suljetussa huoneessa laskettiin summaamalla jäähdytysjärjestelmän suoraan poistama sensitiivinen lämpö ja sumutuksen sitoma latentti lämpö. Jäähdytysjärjestelmän keskitehokkuudeksi oletetaan 50 joulea jäähdytystä per joule kulutettua sähköä. Tehokkuusarvo perustuu teoreettiseen jäähdytysjärjestelmän, kasvihuoneen ja säätöjärjestelmän malliin (julkaisematon) sekä kaupallisessa huoneessa tehtyihin havaintoihin (Huttunen 2007, suullinen tieto).

5.1.2 Kurkkujen kasvu

Kurkkujen tuorepainon oletetaan kertyvän 30 % nopeammin jokaisella aikavälillä, jolloin ilman hiilidioksidipitoisuus (CO₂) on korkealla tasolla (1000 ppm) verrattuna matalaan tasoon (400 ppm). CO₂-vaikutus pohjautuu Nederhoffin ja Vegterin (1994) havaitsemaan noin 30 % eroon kurkkukasvuston yhteyttämisessä matalalla ja korkealla CO₂-tasolla sekä Piikkiön kokeissa Luomalan ym. (2008) havaitsemaan lehtien vasteeseen CO₂:lle.

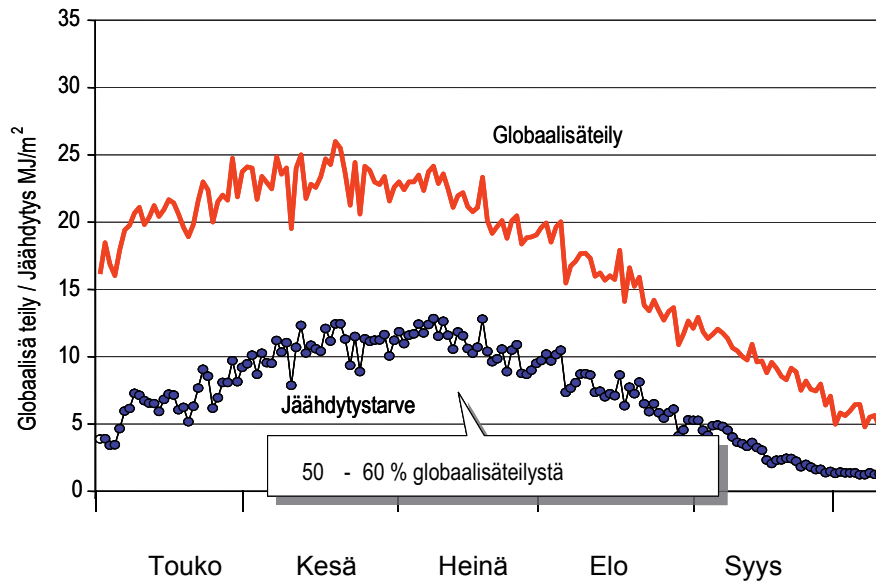
Keskeinen tarkastelun raja on, että ilman lämpötila ja kosteus oletetaan pidettäväksi kasveille kohtuullisella tasolla sekä tuuletetussa että suljetussa huoneessa. Jos säteily ja CO₂-pitoisuus ovat korkeita, lämpötila voi vaihdella laajasti 25-30 °C alueella ilman suurta vaikutusta kasvuun. Jos perinteisessä huoneessa lämpötilaa ja kosteutta ei voida säätää sumutuksella, varjostuksella ja tuuletuksella sopivaksi, mallin arvio huoneen sulkemisen vaikutuksesta satoon on liian pieni. Lähtökohtaisesti malli siis antaa *alarajan* huoneen sulkemisesta saavutettavasta hyödystä. Kun lämpötila, kosteus ja CO₂ voidaan säätää sopivaksi, kasvuston tuotto riippuu Suomen oloissa lähes suoraan kasvuston sieppaaman säteilyn määrästä. Hedelmien kasvu arvioidaan siis vain yhden parametrin perusteella: säteilyn käytön tehokkuus (RUE). Empiirinen, lineaarinen malli hedelmien vuorokauden kasvusta (G) on

$$G = R * T * RUE * C$$

Kaavassa R on vuorokauden globaalisäteily (MJ), T katteen läpäisevyys (0.75), RUE säteilyn käytön tehokkuus (g MJ⁻¹), C on CO₂-pitoisuuden vaikutus. Matalassa pitoisuudessa (400 ppm), C on 1. Korkeassa pitoisuudessa (1000 ppm) se on 1.3. Kohtuullisen matala RUE-arvo on 17 g MJ⁻¹.

5.2 Tulokset

Suomen ilmastossa 50-60 % vuorokauden kokonaissäteilyn tuomasta lämmöstä täytyy kesällä poistaa kasvihuoneesta (Kuva 17). Loppu kuluu pääasiassa kasvuston haihduntaan. Päivällä katteen ja alustan kautta poistuu suhteellisesti pieni osuus lämmöstä. Tuuletetussa huoneessa noin puolet vuorokauden säteilysummasta voidaan hyödyntää korkean CO₂-pitoisuuden oloissa, suljetussa huoneessa koko säteilysumma.



Kuva 17. Päivittäinen suljetun huoneen jäähdytystarve Lounais-Suomen rannikolla. Simulointituloksen keskiarvo 1997–2006.

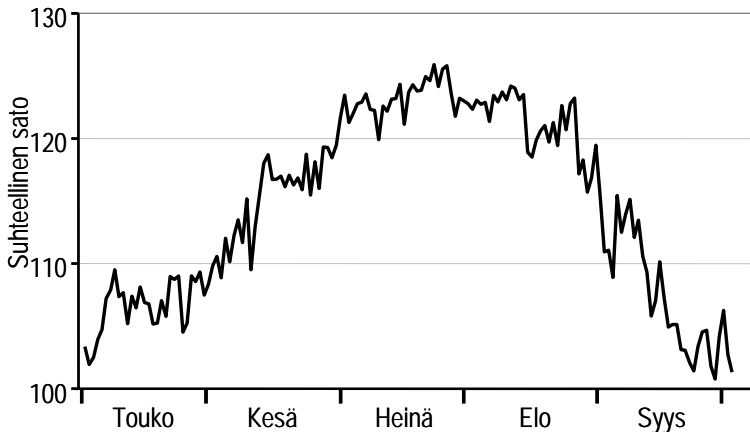
Suljetun huoneen vaatiman jäähdytyksen energiakustannus lasketaan kuukausittaisesta jäähdytystarpeesta ja jäähdytysjärjestelmän energiatehokkuudesta (Kuva 18). Energiakustannus on noin 9-13 senttiä per m² kuukaudessa, jos sähkön hinta on 6 c kWh⁻¹. Jos sähkön hinta on 10 c kWh⁻¹, välitön kustannus on 14-22 senttiä per m² kuukaudessa. Sisälle pumpattava viileä vesi jäähdytetään ulkona haihduttamalla. Yhden vesigramman haihduttaminen kuluttaa lämpöä noin 2.4 kJ, mistä voidaan arvioida, että kesällä kasvihuoneesta poistetun lämmön poistamiseksi vedestä on haihdutettava luokkaa 200 l vettä kuukaudessa per m² huonetta. Keväällä ja syksyllä viileässä ilmassa vähemmän.

	Ilmasto	Jäähdytys tarve kWh/m ²	Kulutettu energia kWh/m ²	Sähkön hinta	Energia kust. 6c €/m ²	Energia kust. 10c €/m ²
		Hyötysuhde			0,10	0,17
Kesä		83	1,67		0,10	0,17
Heinä		87	1,73		0,10	0,17
Elo		58	1,16		0,07	0,12

1:50

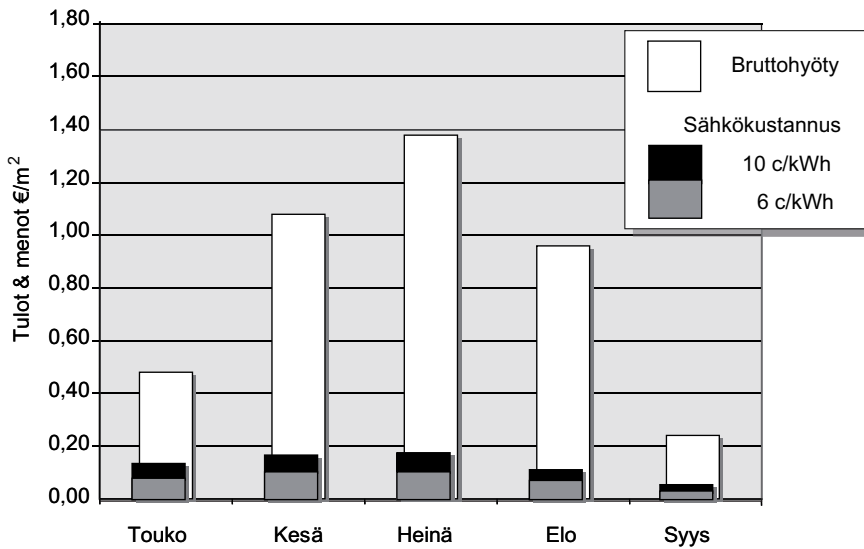
Kuva 18. Keskimääräinen kuukausittainen jäähdytystarve, energian kulutus jäähdytykseen ja energiakustannus, jos sähkö maksaa 6 tai 10 c kWh⁻¹. Keskiarvo 1997–2006

Suljetussa huoneessa kasvit kasvavat koko ajan korkeassa CO₂-pitoisuudessa. Tuuletetussa huoneessa välillä korkeassa, välillä matalassa. Suljetussa huoneessa kertyy teoriassa tämän vuoksi 10-25 % enemmän satoa kuin tuuletetussa huoneessa (Kuva 19).



Kuva 19. Päiväsato jäähdytetyssä kasvihuoneessa suhteessa tuuletettuun huoneeseen suoran CO₂-vaikutuksen seurauksena. Simulointitulokset Lounais-Suomen rannikolla. Keskiarvo 1997–2006.

Kuvassa 20 vertaillaan kuukausittain odotettua suljetun huoneen vaatimaa energiakustannusta ja suljetusta huoneesta saatavaa sadonlisäyksen arvoa yhdellä kurkun tuottajahinnalla ja kahdella sähkön hinnalla aurinkoisella rannikkoalueella. Odotettu bruttohyöty peittää keskimäärin monin verroin välittömät energiakustannukset.



Kuva 20. Kuukausittain sähkökustannus (6 tai 10 c kWh⁻¹) ja bruttohyöty jäähdytyksestä (60 c kg⁻¹ tuottajahinta) € m⁻² Lounais-Suomen rannikolla huomioiden pelkkä CO₂-vaikutus. Keskiarvo 1997–2006.

5.3 Tulosten tarkastelu

Suomen ilmastossa suljetun huoneen pelkkä välitön CO₂-vaikutus lisää teoreettisesti satoa 10-25 % kesä-elokuussa verrattuna huoneeseen, jonka lämpötila ja kosteus säädetään tuulettamalla. Pelkän välittömän CO₂-vaikutuksen käyttö kuitenkin aliarvioi suljetun huoneen kokonaisvaikutuksen. Särkkä ym. (2006) ja Luomala ym. (2007) havaitsivat Piikkiön kokeissa, että jäähdytys lisäsi kokonaissatoa kesä-elokuussa 25 % ja ensimmäisen luokan satoa 41 %. Kokeissa käytettiin aamuisin ja iltaisin valotusta, joka itse asiassa pienensi suljetun ja tuuletetun huoneen välistä satoeroa. Todennäköinen syy jäähdytyksen suurempaan vaikutukseen kokeissa oli suljetussa huoneessa saavutettu suurempi lehtialaindeksi (lehtiä m² per m² alustaa), vähäisempi kurkun alkujen kuoleminen ja korkeampi satoindeksi. Suurempi lehtiala sieppaa enemmän valoa ja suurempi kasvavien kurkkujen määrä lisää yhteyttämistuotteiden ohjautumista hedelmiin (Marcelis 1993).

On huomattava, että Piikkiön koekasvihuoneessa tuuletetun ja sumutetun huoneen lämpötila pystyttiin pitämään lähes samana kuin suljetun huoneen lämpötila ja tuuletetun huoneen suhteellinen kosteus sumutuksen vuoksi oli hyvä.

Suljetun huoneen jäädytyksessä tarvittavan energian kustannus on luokkaa 10-20 % sadon lisäyksen arvosta, jos kurkun tuottajahinta on 60 c kg⁻¹ ja sähkön hinta 6-10 c kWh⁻¹. Koska suljetussa huoneessa kasvustosta haihtuva vesi otetaan talteen, suunnilleen puolet ulkona haihdutettavasta vedestä saadaan kasvihuoneesta. Vesikustannus on yleensä siis kertaluokkaa pienempi kuin energiakustannus. Lisäkustannus suljetussa huoneessa on suurempi CO₂-kulutus, jos kasvihuoneen kate ei ole tiivis tai verrattavassa tuuletetussa huoneessa käytetään hyvin säästeliäästi hiilidioksidia.

Erikoistapaus on valotuksen käyttö suljetussa huoneessa yöllä ja pilvisinä jaksoina. Suomessa kaupallisen viljelmän sähkön kulutus valotukseen voi olla kesällä luokkaa 1-2 kWh m⁻². Jos 50 % vuorokauden kokonaissäteilystä poistetaan jäädytyksellä, jonka vuorokautinen tehokkuus on 50 J J⁻¹, tarvitaan jäädytykseen luokkaa 0.05-0.15 kWh m⁻². Jäädytysjärjestelmän tarvitsema sähkö on vain pieni osa valotuksen kuluttamasta sähköstä, mutta huoneen sulkeminen päivällä ja korkean CO₂-pitoisuuden ylläpito nostaa markkinakelpoista satoa laskelmien ja kokeiden mukaan luokkaa 20-25 % ja ensimmäisen luokan satoa enemmän. Jos valotusta käytetään auringon säteilyn ollessa alhainen ja jäädytystä päivällä säteilyn ollessa voimakas, jäädytykseen käytetty lisäenergia ei paradoksaalisesti heikennä huoneen kokonaisenergiatehokkuutta. Hyvin säädetyn huoneen kokonaisenergiatehokkuuden pitäisi parantua ja tuotteen yksikkökustannuksen alentua.

Johtopäätös on, että Suomen ilmastossa *Novarbo*-jäädytysjärjestelmä nykyisessä kehitysvaiheessaan on potentiaalisesti kannattava menetelmä suljetun tai lähes suljetun kasvihuoneen toteuttamiseen kurkun viljelyä varten, jos viljelmälle on saatavissa kohtuuhintaista jäädytysvettä. Kannattavuus on melko herkkä kurkun tuottajahinnalle, mutta ei sähkön hinnalle. Tuottajahinnan puolittuminen puolittaa bruttohyödyn tolpat kuvassa 20. Sähkön hinnan kaksinkertaistuminen nostaa kustannustolpat kaksinkertaiseksi. Tässä *Novarbo*-jäädytysjärjestelmän vuoden 2007 version käyttöä on tarkasteltu jatkuvasti suljetun huoneen toteuttamisessa. Lopullisesti kannattavuuden ratkaisee investoinnin kustannus, jolloin jäädytysjärjestelmän osat mitoitetaan ja jäädytyksen säätö valitaan viljelyn strategian ja hiilidioksidin tuottotavan mukaan.

6 Kasvihuoneen jäähdytys lisäsi tomaatin satoa kesällä

Vuonna 2007 tutkittiin ilmasto-olosuhteiden hallintatekniikan ja valotustavan vaikutusta tomaatin (*Lycopersicon esculentum* Mill. 'Encore') kasvuun ja satoon. Vaikutusten selvittämiseksi tomaattikasvustot viljeltiin kahdessa kasvihuoneosastossa, jossa toisen ilmastoja hallittiin perinteisen luokkutuuletuksen ja sumutuksen avulla ja toisen jäähdytyslaitteiston avulla. Molemmissa huoneissa käytettiin myös kahta valotustapaa: tavanomaisia kasvuston päälle asennettuja valaisimia ja kasvuston väliin asennettuja välivaloja.

6.1 Aineisto ja menetelmät

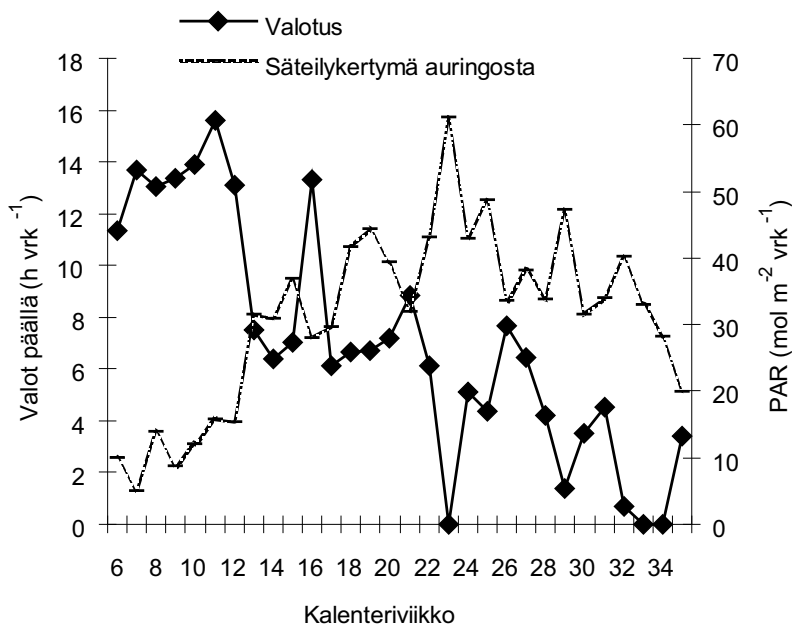
6.1.1 Viljely

Siemenet kylvettiin 22.12.2006 ja istutettiin 2.2.2007 turvelevyihin (Vihanneslevy, Kekkilä, Suomi), jotka olivat kouruissa n. 40 cm:n korkeudella käytävän pinnasta. Taimet viljeltiin alaslaskutekniikalla paririveissä istutustiheydellä 2.4 tainta neliometrillä. Alaslasku tehtiin siirtämällä taimia kasvurivissä eteenpäin ja rivin päädyssä paririvin toiseen puoliskoon. Viljelyaika istutuksesta raivaukseen (viikko 36, 7.9.2007) oli 218 vuorokautta eli 31 viikkoa. Kukin koejäsen jaettiin kuuteen viiden kasvin lohkoksi. Vähintään viisi tainta lohkojen välissä sekä huoneiden reunimmaisat paririvit olivat suojataimia.

Ilmasto-olosuhteiden sekä kastelun ja lannoituksen säätämisen helpottamiseksi kasvun rehevyyttä seurattiin viikoittain mittaamalla varren paksuus ylimmän kukkatertun kohdalta sekä varren pituus kasvupisteestä ylimpään kukkaterttuun. Tavoitelämpötila oli päivällä kummassakin huoneessa 18-22 °C. Jäähdytetyssä huoneessa jäähdytyslaitteisto kytkeytyi päälle lämpötilan noustessa yli 24 °C:een ja luokkutuuletus (luukut auki maksimissaan 15 %) otettiin lämpötilan hallinnan avuksi, jos lämpötila kohosi yli 26 °C:een. Kontrollihuoneessa sen sijaan tuuletettiin, mikäli lämpötila nousi yli 24 °C:een, eikä luukkujen avautumisastetta rajoitettu. Hiilidioksidipitoisuuden tavoitetaso valojakson aikana oli 800 ppm luukkujen ollessa auki korkeintaan 30 %.

Kasvit kastelulannoitettiin viljelmäkohtaisen ohjeen mukaisesti (Superex tomaattilannos, Kekkilä, Suomi; kalkkisalpietari, Liva Calcinit, Yara, Norja; Magnesiumnitraatti, SQM Europe, Belgia) käyttäen apuna tensiometrejä. Kasteluveden kulutus tallennettiin automatiikalla ja ylikastelun määrää seurattiin kahdesta lohkoksi arkipäivisin. Koko viljelykauden aikana kasteluvettä kului kummassakin huoneessa keskimäärin 3.8 l m⁻² vrk⁻¹, josta ylikastelua oli keskimäärin 15 %.

Kummassakin huoneessa tutkittiin myös kahta valotustapaa. Tavanomaisessa valotuksessa kaikki valaisimet oli asennettu perinteisesti kasvuston latvan yläpuolelle 3.5 metrin korkeudelle. Välivalo-koejäsenessä puolestaan 69 % asennustehosta tuli ylävaloista ja 31 % paririvin väliin 1.3 metrin korkeudelle asennetuista välivaloista. Valaisimissa käytettiin pääasiassa 400 W suurpainenatrium-polttimoja (SON-T Green Power, Philips, Alankomaat), paitsi välivalo-rivissä, jossa sekä ylä- että välivalaisimissa oli 250 W polttimot (SON-T Pia, Philips, Alankomaat). Välivalot oli asennettu pystysuoraan ja niissä käytettiin heijastimia, jotka levittivät säteilyä kasvirivin suunnassa ja vähensivät säteilyn määrää polttimon kohdalla. Asennusteho oli 170 W m^{-2} ja tekovalojakson pituus $12\text{-}18 \text{ h d}^{-1}$, paitsi 7.-27.8., jolloin valoja ei poltettu lainkaan korkean ulkolämpötilan vuoksi (Kuva 21). Ylä- ja välivaloja ohjattiin samalla tavalla; valot sammuivat, kun kasvihuoneen ulkopuolella oli globaalisäteilyä $200\text{-}600 \text{ W m}^{-2}$ (sivu 17). Käytännössä valot paloivat koko viljelykauden aikana keskimäärin 7 h d^{-1} . Vaihtelu oli kuitenkin suurta; esim. viikolla 11 valot olivat päällä 15.6 h d^{-1} , kun taas aurinkoisilla kesäviikoilla valoja ei poltettu lainkaan. Yhteyttämisen kannalta aktiivisen luonnonvalon kertymän viikkokeskiarvo vaihteli 4.9 ja $48.8 \text{ mol m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$ välillä (Kuva 21).



Kuva 21. Tekovalojen vuorokautinen päälläoloaika ja yhteyttämisen kannalta aktiivisen PAR-säteilyn kertymä kasvihuoneen ulkopuolella viljelyn aikana.

6.1.2 Sato- ja kasvustohavainnot

Kasvuston rakenteen, kukkaterttujen kehitysnopeuden ja biomassan tuotannon selvittämiseksi kasvustosta havainnoitiin varren pituuskasvu edellisestä mittauskerrasta, uusien lehtien ja terttujen lukumäärä sekä tertuissa olevien kukka-aiheiden, avonaisten kukkien ja kehittyvien hedelmien lukumäärä joka toinen viikko. Mittaukset tehtiin pääasiassa viiden kasvin koeruudun kolmesta keskimmäisestä kasvista. Lehtipinta-ala, kasvissa olevien lehtien lukumäärä sekä lehtinäytteiden kerääminen tuore- ja kuivapainomittauksiin tehtiin viljelyn aikana neljästi (viikoilla 14, 21, 29 ja 36). Tuore- ja kuivapainojen perusteella laskettiin lehtien kuiva-ainepitoisuus. Hedelmien kuiva-ainepitoisuuden määrittämistä varten näytteet kerättiin viikoilla 16, 23, 30 ja 35. Kasvuston raivauksen yhteydessä mitattiin lisäksi varren kokonaispituus sekä varren ja tertturankojen tuore- ja kuivapainot. Kuivapainojen perusteella laskettiin kasvin satoindeksi, joka kertoo, kuinka suuri osuus kasvin maanpäällisestä kuiva-aineesta kohdentui hedelmiin.

Satoa kerättiin kolmesti viikossa 23 viikon ajan. Ensimmäinen ja toinen luokka lajiteltiin EU-säädösten mukaisesti (Virallinen lehti L 95 15.4.2000, s. 24) ja lisäksi sadosta lajiteltiin erikseen epämuotoiset, latvamätaiset, haljenneet ja muut hedelmät, jotka yhdessä muodostivat kauppakelvottomaluokan. Tarkempaa sadon analysointia varten satojakso jaettiin kevät – (kalenteriviikot 13-22) ja kesäkauteen (viikot 23-35).

Sato- ja kasvutulokset analysoitiin täydellisesti satunnaistettujen lohkojen kokeen mallilla käyttäen SAS Mixed-proseduuria (versio 9.1, SAS Institute, USA). Koska käytössä oli vain kaksi kasvihuonetta, lohko oli pesiytynyt käsittelyyn.

6.1.3 Fotosynteesi- ja fluoresenssimittaukset ylävalokoejäsenistä

Tomaatin lehtien kaasunvaihtoa ja klorofyllin fluoresenssia mitattiin molempien huoneiden ylävalokoejäsenistä viikosta 24 alkaen. Mittaukset tehtiin kannettavalla fotosynteesimittarilla (LI-6400, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA), johon oli liitetty fluoresenssin mittauskyvetti (6400-40 Leaf Chamber Fluorometer, LI-COR Inc.). Lehti sijoitettiin mittauskyvetin sisään, ja lehdestä 2 cm²:n laajuisen alueen kaasunvaihtoa ja klorofyllin fluoresenssia mitattiin (ks. Kuva 4). Klorofyllin eli lehtivihreän fluoresenssin mittauksella saadaan tietoa lehden kunnosta. Mitattavan lehdenkohdan saama PAR-säteily ja CO₂-pitoisuus pystytään säätämään halutulle tasolle sekä lämpötila ja ilman kosteus pystytään pitämään tasaisina jäähdytys-elementin ja ilman virtausnopeuden säädön avulla. Laite mittaa lehtikyvettiin menevän ja sieltä ulos tulevan ilman CO₂-pitoisuuden ja kosteuden, ilman virtausnopeuden, lehdenpinnan ja ilman lämpötilan, PAR-säteilyn ja klorofyllin fluoresenssin. Mitattujen arvojen perusteella laite laskee mm. fotosynteesinopeuden, haihdunnan, ilmarakojen johtokyvyn eli ilmarakokonduktanssin ja fluoresenssiparametreja.

Mittauksia tehtiin lehdistä, jotka oli merkitty nauhalla kasvumittausten yhteydessä. Näin pystyttiin seuraamaan lehden kehitystä ja mittaamaan lehteä halutussa asemassa kasvissa. Jos merkityn lehden käyttäminen ei ollut mahdollista, mitattiin välittömästi merkittyä lehteä ylempänä tai alempana olevaa lehteä. Nettofotosynteesin vastetta CO₂-pitoisuudelle ja PAR-säteilylle mitattiin kolmena sarjana, joissa kussakin mitattiin tietynä viikkona puhjenneiden lehtien fotosynteesiä kolmessa eri asemassa latvustossa: ylälehtiä mitattiin noin kahden viikon kuluttua lehden muodostumisesta, jolloin lehti oli 4. - 7. latvasta, keskimmäisiä lehtiä tästä noin kolmen viikon kuluttua (12. - 14. lehti), ja alalehtiä taas tästä noin kolmen viikon kuluttua (22. - 24. lehti) (Taulukko 6).

Taulukko 6. Tomaatin lehtien fotosynteesimittausten aikataulu.

	Mittausviikko			
	Lehdet muodostuneet viikolla	Ylälehdet	Kesk. lehdet	Alalehdet
		4.-7. latvasta	12.-14. latvasta	22.-24. latvasta
Lehtisarja 1	22	24	27	30
Lehtisarja 2	24	26	29	32
Lehtisarja 3	26	28	31	34

Mittauksen aluksi mittauskohta pimennettiin 20 min ajan, jonka jälkeen mitattiin pimeään sopeutuneen lehden fluoresenssia. Tämän jälkeen annettiin 15 min fotosynteesille saturoivaa valoa (PAR-säteily = 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), jonka jälkeen mitattiin fotosynteesin vaste PAR-säteilylle valotasoa asteittain laskemalla ja mittaamalla fotosynteesiä kussakin valotasossa tasoittumisen jälkeen. Valovaste mitattiin CO₂-pitoisuuden ollessa 400 ppm ja 800 ppm. Viimeiseksi mitattiin fotosynteesin vaste CO₂-pitoisuudelle saturoivassa valotasossa (800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) muuttamalla asteittain CO₂-pitoisuutta ja mittaamalla fotosynteesiä kussakin pitoisuudessa tasoittumisen jälkeen.

6.1.4 Ravinnemääritykset ylävalokoejäsenien lehtinäytteistä

Viikoilla 21, 29 ja 36 kerättiin molempien huoneiden ylävalokoejäsenistä lehtinäytteitä, joista mitattiin tuorepaino, pinta-ala (LI-3100; LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA), pituus, leveys ja kuivapaino (kuivattu 70°C:ssa 7 pv). Ylälehdistä 4, 5, ja 6 yhdistettiin viisi kuivattua lehteä/lehtiasema, ja keskimmäisistä lehdistä 12, 14 ja 16 sekä alalehdistä 20, 22 ja 24 kolme kuivattua lehteä/lehtiasema. Lehdistä määritettiin hiili- ja typpipitoisuus ja C/N-suhde (Leco-määritys) sekä Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Mn, Fe, S ja Na -pitoisuudet (ICP-määritys).

6.2 Tulokset ja tulosten tarkastelu

6.2.1 Ilmasto-olosuhteet

Kasvihuoneen ilmastohallinta onnistui jäähdytyslaitteiston avulla hyvin. Luukkutuuletusta käytettiin kesäaikana hieman myös jäähdytetyssä huoneessa, mutta maltillinen luukkujen avaaminen (maksimi 15 %) yhdessä jäähdytyslaitteiston kanssa riitti pitämään mm. lämpötilan samalla tasolla kontrollihuoneen kanssa. Ilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet olivatkin koko viljelyn ajan lähes samanlaiset ilmastohallinta-tekniikasta riippumatta (Kuvat 22, 23 ja 24). Lämpötila oli korkeimmillaan helmi-maaliskuussa keskimäärin 24 °C ja kesä-elokuun aikana keskimäärin 26.5 °C. Sen sijaan hiilidioksidipitoisuudessa ja tuuletuksen määrässä oli huoneiden välillä selvä ero vuodenajasta riippuen. Helmi-maaliskuun aikana tuuletusta ei tarvittu juuri lainkaan kummassakaan huoneessa ja hiilidioksidipitoisuus pysyi lähellä tavoitetasoa (Kuva 22). Kesään päin mentäessä jäähdytyksen tarve lisääntyi ja tuuletusluukut olivatkin auki kontrollihuoneessa huomattavasti jäähdytettyä huonetta enemmän ja näin myös ilman hiilidioksidipitoisuus kontrollissa laski (Kuva 23). Esimerkiksi kesä-elokuun aikana hiilidioksidipitoisuus oli kontrollissa kello 8 ja 22 välisenä aikana keskimäärin 510 ppm ja jäähdytetyssä huoneessa keskimäärin 715 ppm (Kuva 24).

6.2.2 Sato ja laatuluokitus

Kasvihuoneen ilmastohallinta jäähdytyslaitteiston avulla paransi tomaatin satoa. Satokausi jakaantui kuitenkin selvästi kahteen osaan. Keväällä (maalitoukokuu) satoa korjattiin kummassakin huoneessa yhtä paljon, kun taas kesäkauden (kesä-elokuu) sato oli jäähdytetyssä huoneessa suurempi (Kuva 25, Taulukko 7). Tarkasteltaessa koko viljelykauden satoa olosuhteiden hallinta-tekniikalla ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta tavanomaisessa valotuksessa, vaikkakin esim. kokonaissatoa, jossa on mukana raivauksen yhteydessä korjatut vihreät hedelmät, saatiin jäähdytetyssä huoneessa 44.2 kg m⁻² ja kontrollihuoneessa 40.3 kg m⁻². Sen sijaan välivalo-koejäsenillä jäähdytetyssä huoneessa saatiin enemmän satoa kuin kontrollissa; mm. 1. luokan sadon paino oli 14 % suurempi (Kuva 25, Taulukko 7).

Koko viljelykauden aikana ensimmäisen luokan osuus kokonaissadon painosta oli jäähdytetyssä huoneessa keskimäärin 91 % ja kontrollihuoneessa 90 %. Osuus kokonaissadon kappaleista oli vastaavasti 87 ja 86 %. Sekä kokonaissadon että 1. luokan hedelmät olivat jäähdytetyssä huoneessa keskimäärin 5 g painavampia kuin kontrollissa ($P < 0,05$).

Kesäkauden aikana kasvihuoneen jäähdytys paransi selvästi tomaatin kilo- ja kappalemääräistä satoa (Kuva 25, Taulukko 7); sekä kokonaissato että 1. ja 2.

luokan sato lisääntyi. Esimerkiksi 1. luokan sadon paino ja kappalemäärä oli jäähtyöksessä 18 ja 9 % kontrollia suurempi. Sen sijaan kauppakelvottoman sadon kokonaismäärään tai mm. latvamätäisten hedelmien määrään olosuhteiden hallinta-tekniikalla ei ollut vaikutusta. Jäähtytetyssä huoneessa hedelmät olivat myös suurempia; 1. luokan hedelmät painoivat jäähtytetyssä huoneessa keskimäärin 93 g ja kontrollissa 86 g.

6.2.3 Biomassan tuotanto

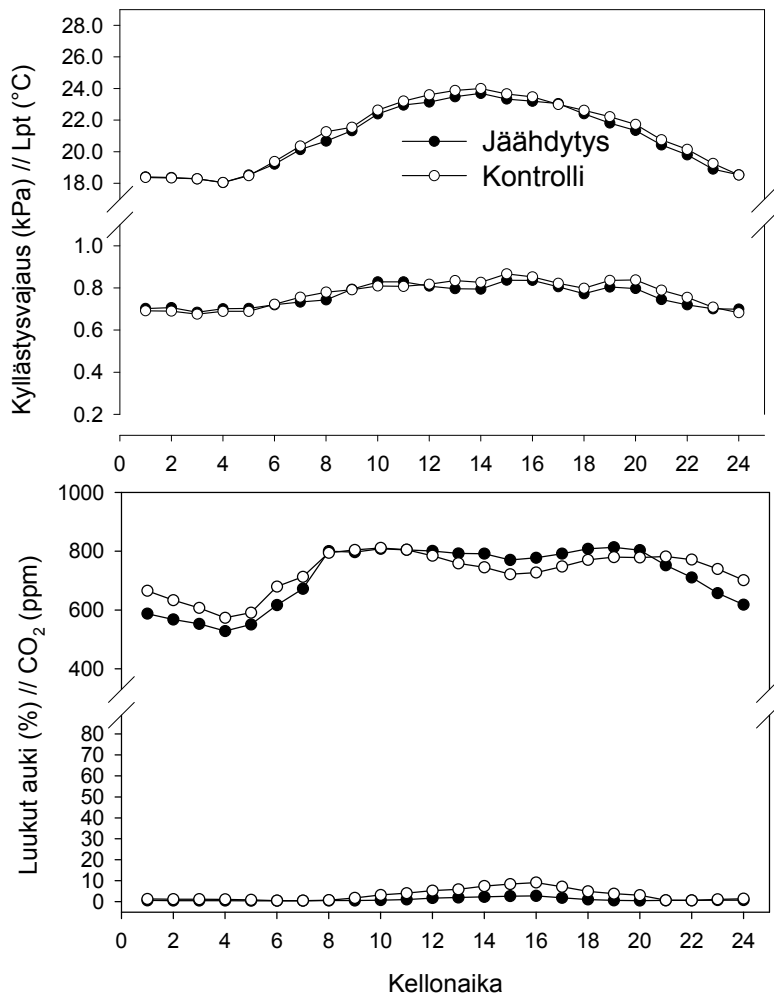
Kasvihuoneen jäähtytys lisäsi tilastollisesti merkitsevästi sekä hedelmien että kasvin maanpäällisten osien kokonaiskuivapainoa kontrolliin verrattuna (Kuva 26). Myös lehtien tuore- ja kuivapaino lisääntyi jäähtytetyssä huoneessa, kun taas varsien sekä tertturankojen paino pysyi samana kontrolliin verrattuna. Kummassakin huoneessa keskimäärin 66 % maanpäällisten osien kuiva-aineen tuotannosta kohdentui hedelmiin (satoindeksi).

Kasvihuoneen jäähtytyksellä ei ollut vaikutusta kasvin eri osien kuiva-ainepitoisuuksiin. Kasvuston raivauksen yhteydessä mitattu kuiva-ainepitoisuus oli varsilla 15 % ja tertturangoilla 20 %. Hedelmän kuiva-ainepitoisuus sen sijaan oli keskimäärin 5 % ja lehtien 13 % kummassakin huoneessa koko viljelyn ajan.

6.2.4 Kasvin rakenne

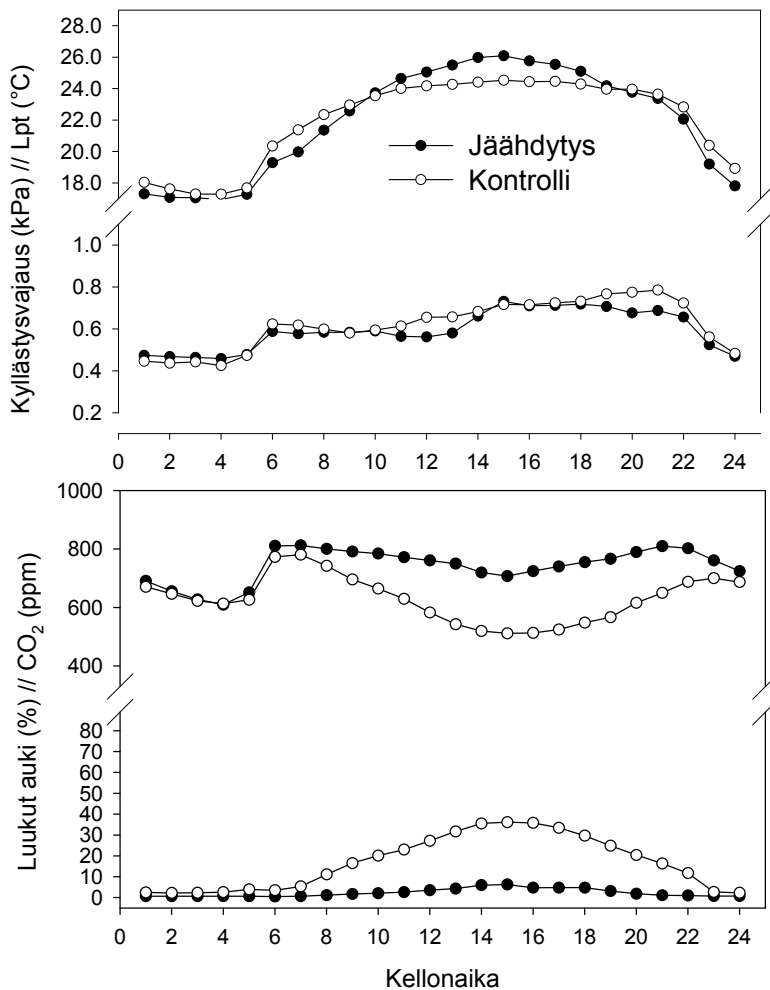
Olosuhteiden hallinta-tekniikka ei vaikuttanut tomaatin varren pituuskasvuun, terttujen kehitykseen eikä kehittyvien lehtien ja terttujen lukumäärään. Kasvu oli tasaista koko viljelyn ajan; kasviin kehittyi keskimäärin kolme lehteä ja yksi kukkaterttu viikossa eli koko viljelyn aikana noin 106 lehteä ja 30 kukkaterttua. Viljelyn alun suurempia kukka-aiheiden lukumääriä lukuun ottamatta kasveissa oli kukka-aiheita viikkojen 13 ja 35 välisenä aikana 5-10 kpl (ka 7,6). Avonaisten kukkien lukumäärä kasvissa vaihteli koko viljelyn aikana 3 ja 6 välillä ollen keskimäärin 4,5. Käytännössä kasveissa oli noin 25 lehteä. Kasvit olivat raivatessa noin 8.6 m pitkiä.

Helmi-maaliskuu



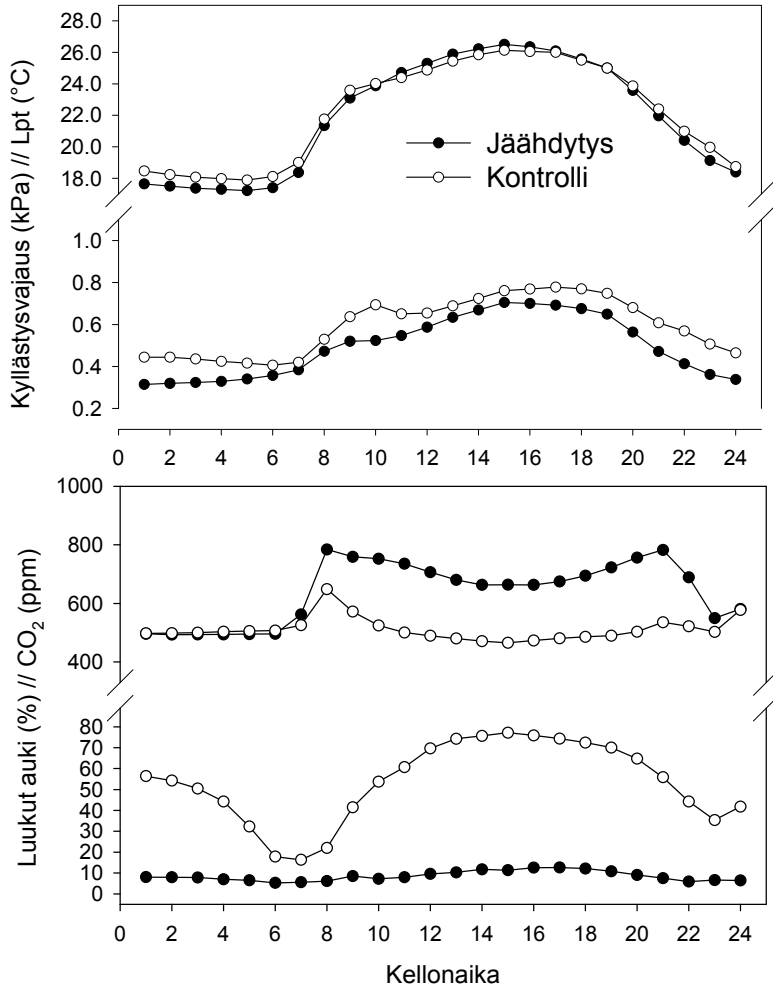
Kuva 22. Ilmasto-olosuhteet jäähdytetyssä ja kontrollikasvihuoneessa helmi-maaliskuun aikana vuonna 2007. Yläkuvassa keskimääräinen veden höyrin-paineen kyllästysvajaus (kPa) ja ilman lämpötila (°C), alakuvassa vasemman tuuletusluukun aukioloaste (%) ja ilman hiilidioksidipitoisuus (ppm).

Huhti-toukokuu

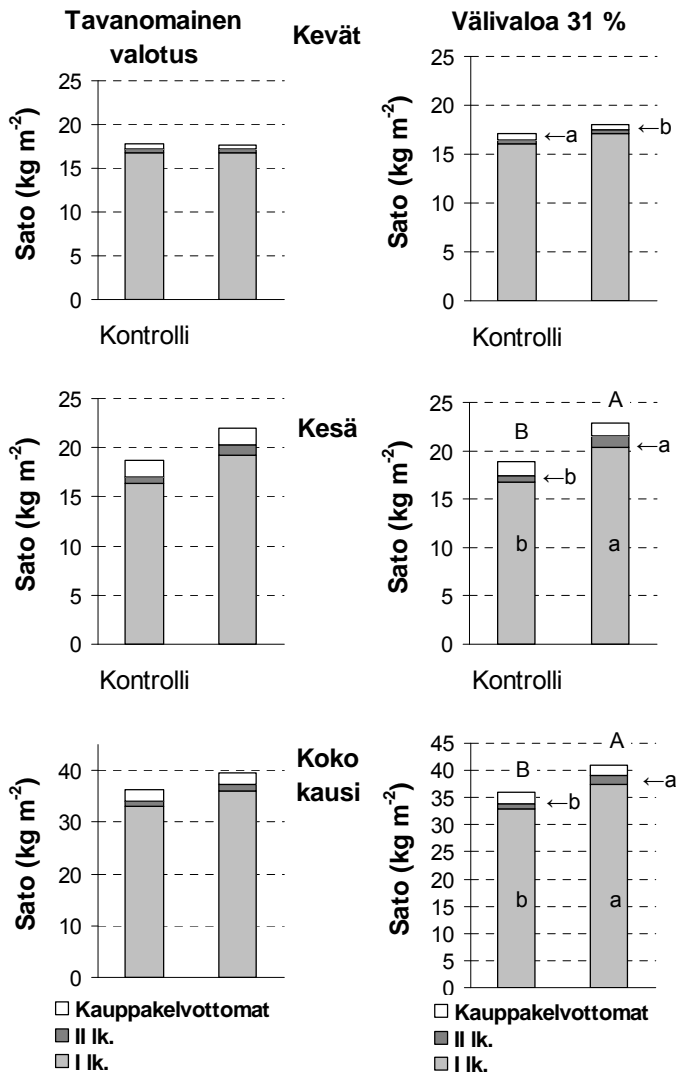


Kuva 23. Ilmasto-olosuhteet jäähdytetyssä ja kontrollikasvihuoneessa huhti-toukokuun aikana vuonna 2007. Yläkuvassa keskimääräinen veden höyrynpaineen kyllästysvajaus (kPa) ja ilman lämpötila (°C), alakuvassa vasemman tuuletusluukun aukioloaste (%) ja ilman hiilidioksidipitoisuus (ppm).

Kesä-elokuu



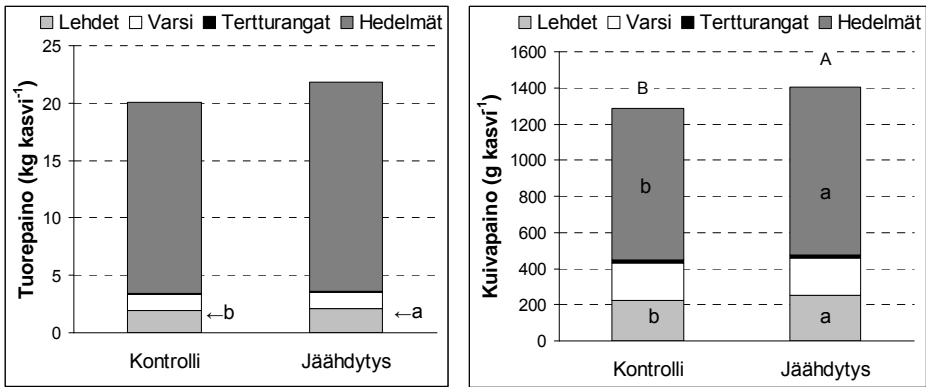
Kuva 24. Ilmasto-olosuhteet jäähdytetyssä ja kontrollikasvihuoneessa kesä-elokuun aikana vuonna 2007. Yläkuvassa keskimääräinen veden höyrynpaineen kyllästysvajaus (kPa) ja ilman lämpötila (° C), alakuvassa vasemman tuuletusluukun aukioloaste (%) ja ilman hiilidioksidipitoisuus (ppm).



Kuva 25. Olosuhteiden hallintatekniikan vaikutus tomaatin sadon painoon ja laatuluokitukseen valotustavoilla tavanomainen ja välivaloa 31 %. Kevätsato korjattiin kalenteriviikoilla 13–22 ja kesäsato viikoilla 23–35. Eri kirjain valotustavan sisällä kertoo tilastollisen eron ($P < 0.05$) kussakin laatuluokassa erikseen, isot kirjaimet kokonaissatoa.

Taulukko 7. Olosuhteiden hallintatekniikan vaikutus tomaattisadon kappaleisiin ja laatuluokitukseen valotustavoilla tavanomainen ja välivaloa 31 %. Eri kirjain valotustavan sisällä kertoo tilastollisen eron ($P < 0.05$) kussakin laatu-luokassa erikseen.

	Tavanomainen valotus (kpl m ⁻²)		Välivaloa 31 % (kpl m ⁻²)	
	Kontrolli	Jäähdytys	Kontrolli	Jäähdytys
Kevät				
I-luokka	196	192	192	196
II-luokka	5	4	5	5
Kauppakelvottomat	16	13	14	11
Kokonaissato	217	210	211	212
Kesä				
I-luokka	190 b	208 a	197 b	219 a
II-luokka	8 b	12 a	9 b	13 a
Kauppakelvottomat	39	36	37	33
Kokonaissato	237 b	255 a	243 b	265 a
Koko kausi				
I-luokka	386	400	389 b	415 a
II-luokka	12	16	14 b	18 a
Kauppakelvottomat	55	49	51	44
Kokonaissato	454	465	454	478

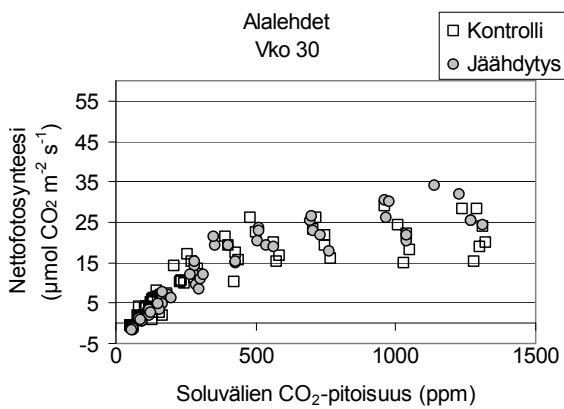
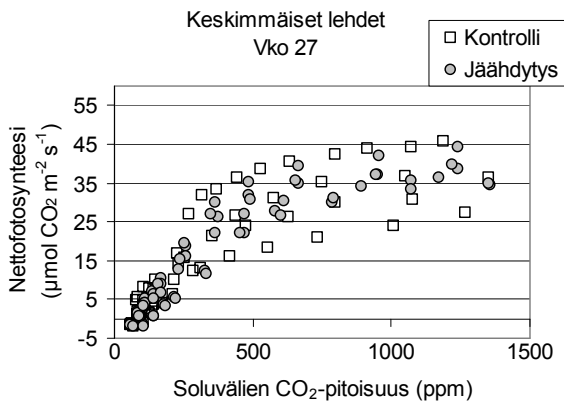
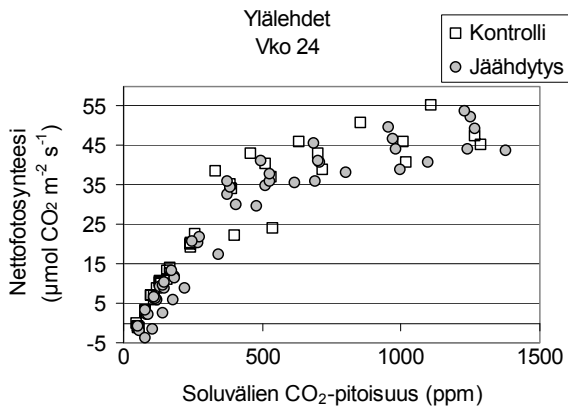


Kuva 26. Ilmasto-olosuhteiden hallintatekniikan vaikutus kasvin maanpäällisten osien kokonaistuore- ja kuivapainon jakaantumiseen tavanomaisessa valotuksessa, n = 18. Eri kirjain kertoo tilastollisen eron ($P < 0.05$) kussakin laatuluokassa erikseen, isot kirjaimet kokonaissadossa.

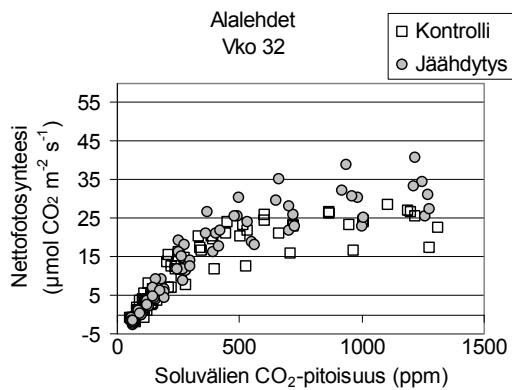
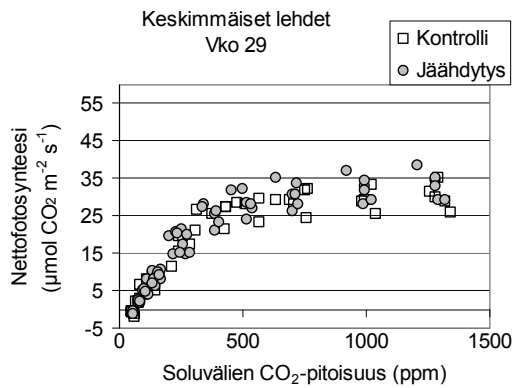
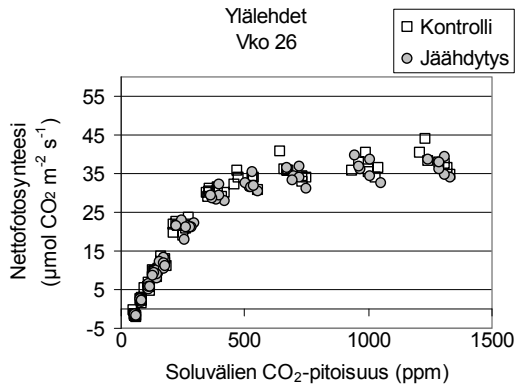
6.2.5 Lehtien fotosynteesi

Tomaatinlehtien fotosynteesiä mitattiin molempien huoneiden ylävalokoejäsenistä kesän kuluessa kolmena sarjana, joissa kussakin mitattiin tietynä viikkona puhjenneiden lehtien fotosynteesiä, kun nämä olivat ylälehtiä, keskellä kasvustoa ja viimein alalehtiä (Taulukko 6). Kussakin sarjassa ylälehtien fotosynteesikyky oli parhain ja alalehtien matalin. Tämä havaitaan fotosynteesin vasteesta CO_2 -pitoisuudelle (Kuvat 27, 28 ja 29) ja valolle (Kuvat 30, 31 ja 32), ja johtuu lehtien saaman säteilyn voimakkuuseroista. Alalehdet olivat kyllä hyväkuntoisia, mutta olivat sopeutuneet samaansa matalaan valotasoon. Fotosynteesitasot pysyivät kussakin lehtiasemassa tasaisina koko mittausjakson ajan, ja kasvuston hyvästä kunnosta kertoivat myös fluoresenssimittausten tulokset.

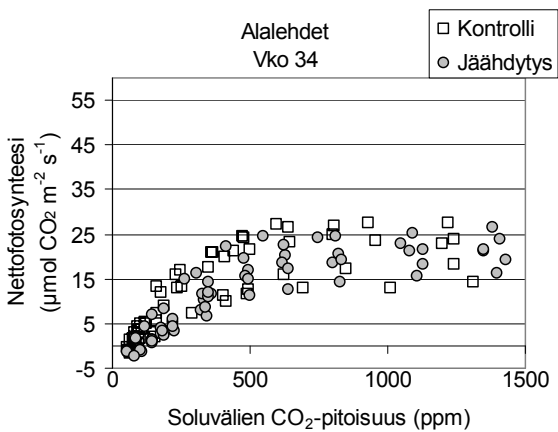
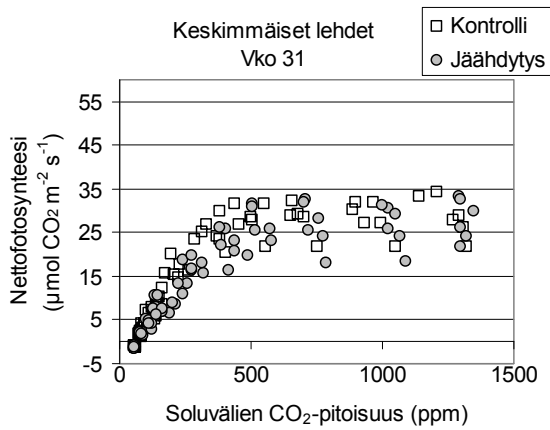
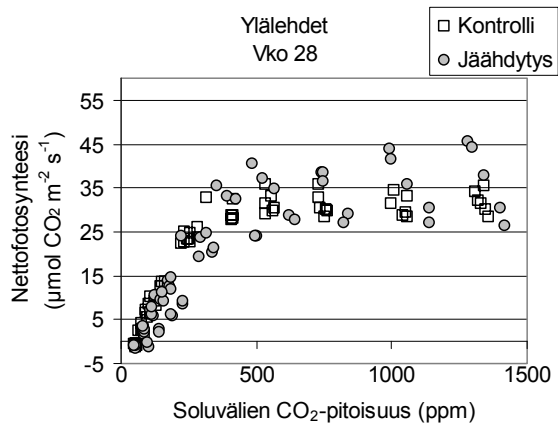
Kasvihuoneen ilmastonhallintatekniikan käyttö ei juurikaan vaikuttanut kahden ensimmäisen lehtisarjan fotosynteesikykyyn. Nettofotosynteesin vaste CO_2 -pitoisuudelle (Kuvat 27, 28 ja 29) tai PAR-säteilylle (Kuvat 30, 31 ja 32) oli samanlainen kontrolli- ja jäähdytetyssä huoneessa. Sen sijaan kolmannen sarjan lehdissä on havaittavissa fotosynteesikykyyn laskua jäähdytetyssä huoneessa. Tämä ilmenee CO_2 -vastekäyrän hieman matalampana alkuosana kuin kontrollikasveissa (Kuva 29).



Kuva 27. Tomaatin fotosynteesin vaste CO_2 -pitoisuudelle ensimmäisen mitaussarjan lehdissä.



Kuva 28. Tomaatin fotosynteesin vaste CO_2 -pitoisuudelle toisen mittaussarjan lehdistä.

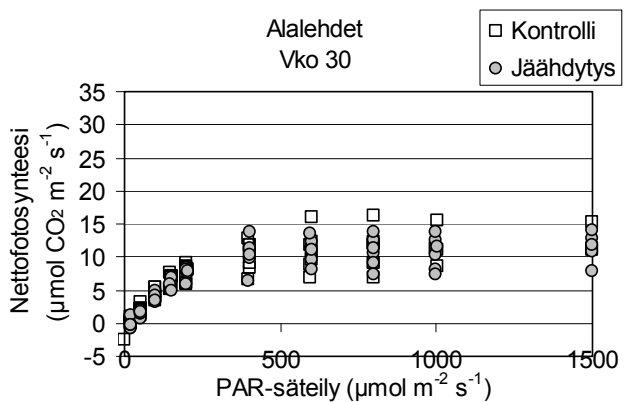
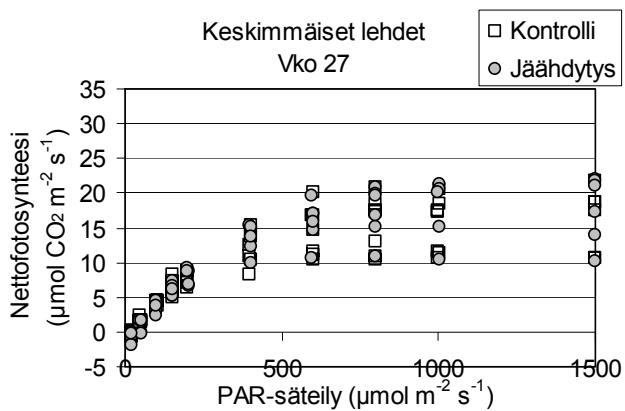
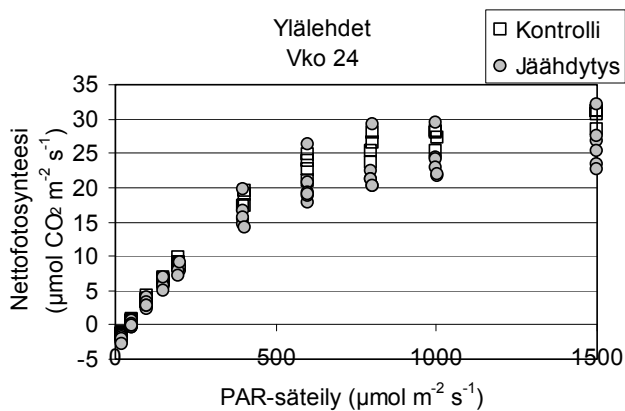


Kuva 29. Tomaatin fotosynteesin vaste CO_2 -pitoisuudelle kolmannen mittausarjan lehdissä.

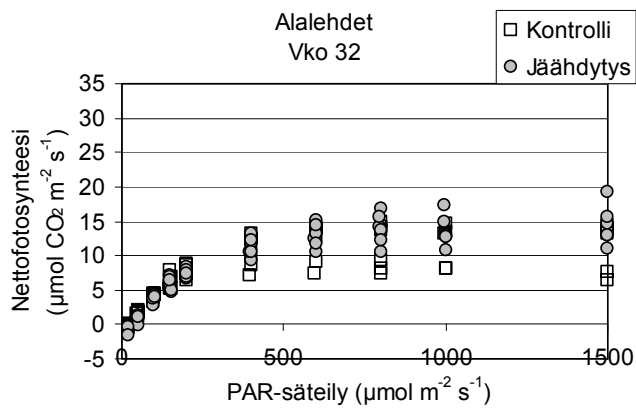
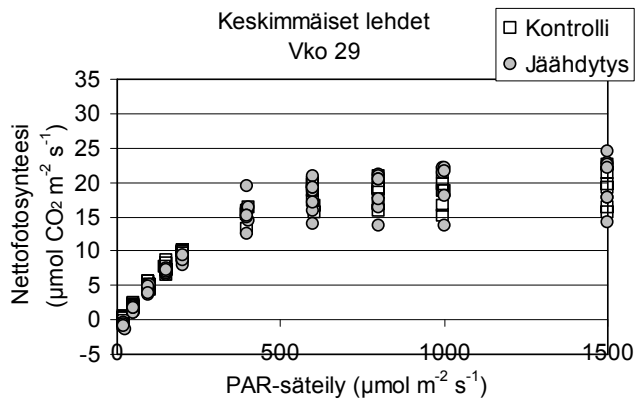
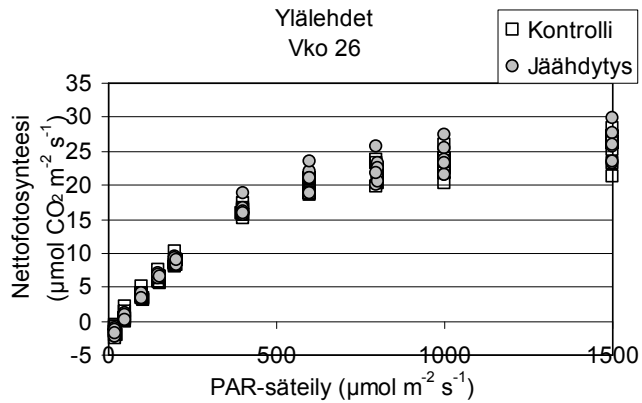
CO₂-vastekäyrät sovitettiin fysiologiseen malliin, jolloin käyrän alkuosasta saadaan fotosynteesissä CO₂:a sitovan Rubisco-entsyymin (eli proteiinin) aktiivisuudesta kertova luku. Kolmannen lehtisarjan kaikissa lehtiasemissa Rubiscon aktiivisuudesta kertova luku oli jäädytetyn huoneen kasveissa alempi kuin kontrollihuoneen kasveissa (Taulukko 8). Tämä kertoo kasvin sopeutumisesta jäädytetyn huoneen korkeampaan CO₂-pitoisuuteen. Rubisco-proteiinin määrä oli todennäköisesti pienempi kuin kontrollikasveissa.

Rubisco-proteiinin väheneminen on suhteellisen yleinen sopeumareaktio korkeammassa CO₂-pitoisuudessa kasvaneilla kasveilla, ja kuvastaa muutoksia kasvin typenkäytössä: kallista tyyppiä ei kannata investoida liikaa hiilen sidonnassa toimivaan proteiiniin, jos CO₂-pitoisuus on niin korkea, ettei se enää rajoita fotosynteesinopeutta.

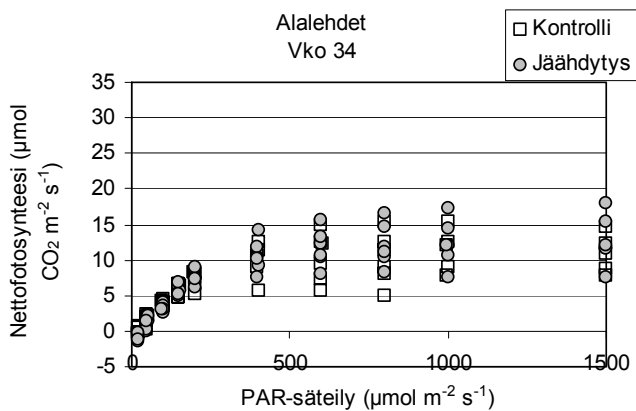
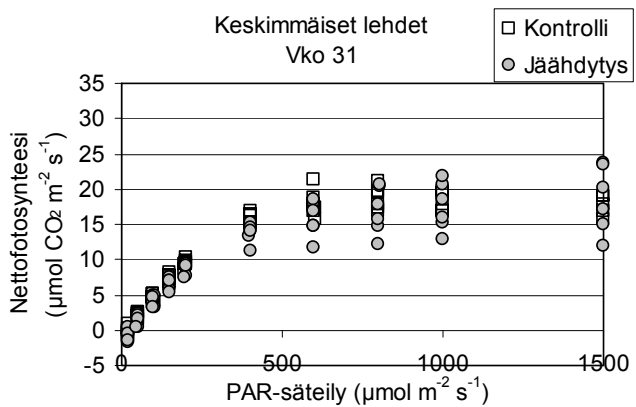
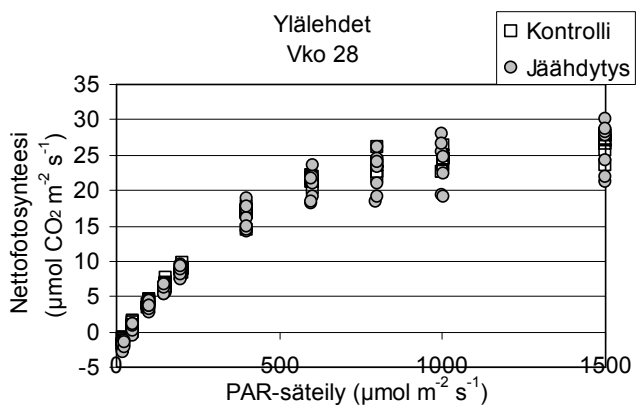
Kolmannen lehtisarjan sopeumareaktiosta huolimatta fotosynteesitasot jäädytetyssä huoneessa olivat korkeammat kuin kontrollissa. Tämä ilmenee kuvasta 33, jossa verrataan kontrollikasvien 400 ppm:n CO₂-pitoisuudessa ja jäädytetyn huoneen 800 ppm:ssa mitattuja valovastekäyriä. Käyrien tasoerosta nähdään, että jäädytetyn huoneen korkeammassa CO₂-pitoisuudessa fotosynteesi on korkeammalla tasolla kuin kontrollissa. Kolmannen sarjan lehdissä kontrollin ja jäädytyksen ero oli kuitenkin pienempi, mikä johtuu lehtien sopeutumisesta korkeampaan CO₂-pitoisuuteen. Jäädytetyn huoneen kasvit siis yhteyttivät enemmän korkeamman CO₂-pitoisuuden ansiosta, mutta ero pieneni loppukesää kohti.



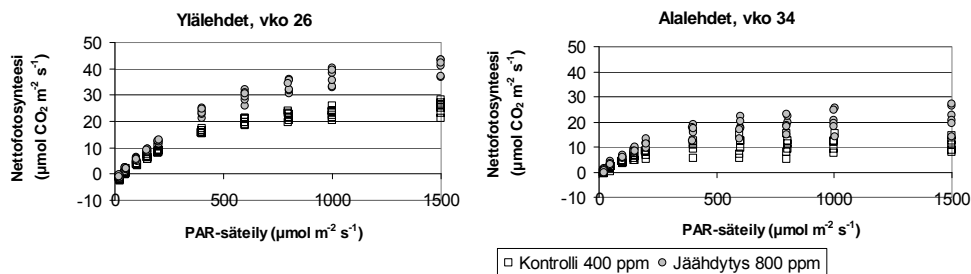
Kuva 30. Tomaatin fotosynteesin vaste PAR-säteilylle (400-700 nm:n aallonpituusalue) ensimmäisen mittaussarjan lehdissä.



Kuva 31. Tomaatin fotosynteesin vaste PAR-säteilylle toisen mittausarjan lehdeissä.



Kuva 32. Tomaatin fotosynteesin vaste PAR-säteilylle kolmannen mittaussarjan lehdissä.



Kuva 33. Tomaatin fotosynteesin vaste PAR-säteilylle. Kontrollikasvien vaste mitattiin 400 ppm:n CO₂-pitoisuudessa ja jäähdytetyn huoneen kasvien 800 ppm:ssa.

6.2.6 Lehtien ravinnepitoisuudet

Lehden typpipitoisuus (N) eri tavoin ilmaistuna (kuivapainoa, tuorepainoa tai lehden pinta-alaa kohti) oli tavallisesti hieman korkeampi ylälehdissä kuin keskimmaisissa tai alalehdissä (Taulukko 9). Kasvihuoneen jäähdytys aiheutti ylälehtien N-pitoisuuden laskua viikoilla 21 ja 29 kuiva- tai tuorepainoa kohti laskettuna, mutta ei lehden pinta-alaa kohti laskettuna. Viikon 29 N-pitoisuuden lasku jäähdytetyn huoneen ylälehdissä saattaa hieman selittää fotosynteesikapasiteetin laskua kolmannen mittaussarjan lehdissä. Yllättävää kuitenkin oli, etteivät N-pitoisuudet olleet kasvatuksen lopulla viikolla 36 alemmat jäähdytetyssä huoneessa, vaikka fotosynteesikyvyn alenemista kontrolliin verrattuna oli havaittavissa.

Kasvihuoneen jäähdytys laski myös useiden muiden ravinteiden pitoisuuksia viikolla 21 (S, Ca, Mg, Fe ja Zn) ja viikolla 29 (S, Mg, Fe, Mn, Cu ja Zn), mutta nosti pitoisuuksia viikolla 36 (P, S, Ca, Fe, Cu ja Zn) (Taulukko 10). Kaasunvaihtomittaukset osoittivat, että kolmannen mittaussarjan lehdissä ilmarakojen johtokyky eli ilmarakokonduktanssi ja haihdutusnopeus olivat hieman suurempia jäähdytetyssä huoneessa kuin kontrollissa. Suurempi haihdunta saattaisi selittää joidenkin ravinteiden, kuten kalsiumin, korkeampia pitoisuuksia lisääntyneen haihduntavirtauksen ansiosta. Kasvatuksen viimeisen kuukauden aikana (viikot 32 -26) jäähdytetyn ja kontrollihuoneen kasvit käyttivät kuitenkin saman määrän vettä vuorokaudessa kastelu- ja valumäärien perusteella laskettuna.

Taulukko 8. Fotosynteesissä CO₂:a sitovan Rubisco-entsyymin maksimaalinen aktiivisuus (V_{cmax}) CO₂-vastekäyriä mallinnettuna. n = 4-7.

	Viikko	Lehtiasema		V _{cmax}	
				Keskiarvo	Keskihajonta
Lehtisarja 1	24	Ylä	Kontrolli	109	16
			Jäähdytys	99	13
	27	Keski	Kontrolli	80	25
			Jäähdytys	80	12
	30	Ala	Kontrolli	53	21
			Jäähdytys	59	8
Lehtisarja 2	26	Ylä	Kontrolli	106	12
			Jäähdytys	103	8
	29	Keski	Kontrolli	90	33
			Jäähdytys	93	17
	32	Ala	Kontrolli	68	13
			Jäähdytys	71	22
Lehtisarja 3	28	Ylä	Kontrolli	115	16
			Jäähdytys	95	18
	31	Keski	Kontrolli	90	11
			Jäähdytys	80	28
	34	Ala	Kontrolli	80	34
			Jäähdytys	51	12

Taulukko 9. Tomaatin lehtien hiilipitoisuus (%), typpipitoisuus (%), kuivapainoa, tuorepainoa ja lehden pinta-alaa kohti) sekä hiili/typpi-, fosfori/typpi- ja kalsium/typpi-suhde. n = 3.

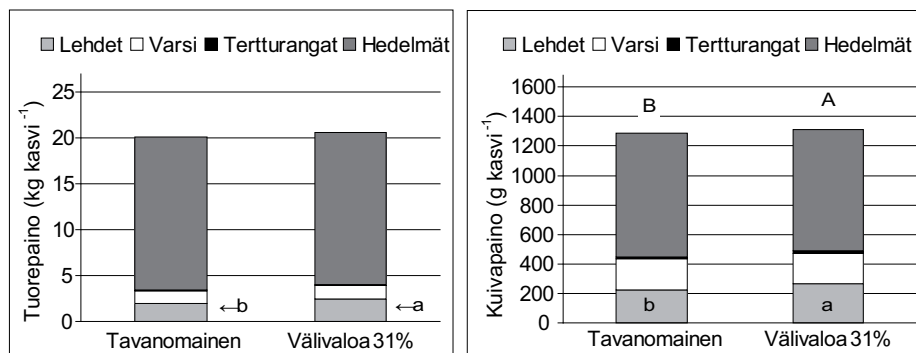
Viikko	Lehtiasema	Huone	C	N	N	N	N	C/N	P/N	Ca/N
			%	%	mg g ⁻¹ kp	mg g ⁻¹ tp	g m ⁻²			
21	Ylä	Kontrolli	41	3,6	36	5,0	2,5	11,4	12	31
		Jäähdytys	41	2,9	29	4,7	2,3	14,0	15	31
	Keski	Kontrolli	38	3,5	35	4,3	2,3	10,9	13	85
		Jäähdytys	38	3,1	31	4,0	2,4	12,3	15	90
	Ala	Kontrolli	35	3,5	35	4,0	1,9	10,2	16	123
		Jäähdytys	36	3,3	33	3,9	2,0	10,7	18	115
29	Ylä	Kontrolli	41	4,1	41	4,5	1,9	10,1	11	34
		Jäähdytys	41	3,4	34	4,0	1,9	12,0	13	35
	Keski	Kontrolli	38	3,0	30	3,8	1,6	12,6	14	114
		Jäähdytys	37	2,9	29	3,4	1,7	12,7	17	100
	Ala	Kontrolli	36	3,1	31	3,7	1,7	11,6	17	123
		Jäähdytys	35	3,0	30	3,6	1,8	11,7	20	138
36	Ylä	Kontrolli	40	3,4	34	4,4	2,0	11,8	15	32
		Jäähdytys	40	3,3	33	4,5	2,0	12,0	17	35
	Keski	Kontrolli	38	3,1	31	3,9	1,5	12,1	13	81
		Jäähdytys	37	3,2	32	3,9	1,6	11,6	16	92
	Ala	Kontrolli	37	3,0	30	3,8	1,7	12,4	14	129
		Jäähdytys	35	3,0	30	3,9	1,9	11,5	20	152

6.2.7 Valotustavan vaikutus satoon ja kasvuun

Valotustapa vaikutti vain vähän tomaatin kasvuun ja kehitykseen. Varren pituuskasvu, terttujen kehitys sekä kehittyvien lehtien ja terttujen lukumäärän lisääntyminen oli tasaista koko viljelyn ajan kummassakin huoneessa. Välivalojen käyttö lisäsi kuitenkin tilastollisesti merkitsevästi lehtien tuore- ja kuivapainoa sekä maanpäällisten osien kokonaiskuivapainoa sekä kontrollissa (Kuva 34) että jäädytetyssä huoneessa. Sen sijaan sadon tuore- ja kuivapainoon valotustavalla ei ollut vaikutusta. Täten satoindeksi jäi välivalolla alhaisemmaksi kuin tavanomaisella valotuksella; esim. kontrollihuoneessa välivalolla 63 % ja tavanomaisella valotuksella 65 % maanpäällisten osien kuiva-aineen tuotannosta kohdentui hedelmiin ($P < 0,05$ %). Kasvin lehtien, tertturankojen ja varsien kuiva-ainepitoisuudet olivat välivalossa keskimäärin yhden prosenttiyksikön tavanomaista valotusta alhaisemmat. Hedelmän kuiva-ainepitoisuus sen sijaan oli keskimäärin 5 % kummassakin valotustavassa koko viljelyn ajan.

Valotustapa ei vaikuttanut tilastollisesti merkitsevästi tomaatin satoon; sekä kevät- ja kesäsato että koko viljelykauden sato oli sama kummassakin huoneessa. Valotustavalla ei ollut vaikutusta myöskään 1. luokan osuuteen kokonaissadon painosta tai kappaleista eikä hedelmän painoon.

Ero valotustapojen välillä pienenee maaliskuun lopulta alkaen. Esimerkiksi vuorokausia, jolloin valot olivat päällä alle 4 h, oli kesäkuussa 17 kpl, heinäkuussa 16 kpl ja elokuussa peräti 26 kpl. Tämän vuoksi valotustapojen välille ei ollut odotettavissakaan suurta eroa. Jäädytetyssä huoneessa on kuitenkin pieni ero valotustapojen välillä, joten kenties korkeampi hiilidioksidipitoisuus antaa mahdollisuuden hyötyä välivalosta. Tämän vuoksi myös useammat erot kontrolli- ja jäädytysosaston välillä tulivat ilmi välivalossa.



Kuva 34. Valotustavan vaikutus kasvin maanpäällisten osien kokonaistuore- ja kuivapainon jakaantumiseen kontrolliosastossa, n = 18. Eri kirjain kertoo tilastollisen eron ($P < 0,05$), isot kirjaimet kokonaissadossa.

7 Suljetun kasvihuoneen ruususadosta parempi laatu

Monivuotinen leikkoruusu kärsii auringonpaisteen vallitessa usein liian korkeasta kasvihuoneen lämpötilasta ja liian alhaisesta ilman suhteellisesta kosteudesta luukkujen ollessa auki. Korkea lämpötila ja alhainen ilman kosteus vaikuttavat erityisesti ruusun sadon laadun heikkenemiseen. Alhaisessa ilman kosteudessa ilma-erot voivat sulkeutua ja silloin haihdutus ja fotosynteesi vaikeutuvat (Jarvis & Morison 1981). Alhaisessa ilman kosteudessa uusien silmujen puhkeaminen hidastuu, mikä heijastuu sadon määrän alenemisena. Tuuletusluukkujen avautuessa hiilidioksidilannoitus lopetetaan. Kiivaan kasvun vaiheessa huoneen hiilidioksidipitoisuus voi tällöin laskea jopa alle normaalin ulkoilman, jolloin fotosynteesi heikkenee ja sitä kautta myös kasvu. Jäähdytystekniikan avulla haettiin vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

Tutkimuskysymykset

Parantaako viljely suljetun kasvihuoneen olosuhteissa ruusun sadon määrää ja laatua verrattuna perinteisessä ilmastohallinnassa viljeltyyn ruusuun?

Onko kasvin rakenne parempi ja fotosynteesi tehokkaampaa suljetun kasvihuoneen olosuhteissa kuin perinteisessä ilmastohallinnassa viljellyissä ruusuissa?

Paraneeko suljetussa kasvihuoneessa viljeltyjen kukkien maljakkokestävyys verrattuna perinteisessä ilmastohallintaolosuhteissa kasvaneisiin kukkiin?

Vaikuttaako sadonkorjuutapa suljetussa kasvihuoneessa Happy Hour-lajikkeen sadon määrään ja laatuun?

7.1 Aineisto ja menetelmät

7.1.1 Viljely

Ruusuja viljeltiin kahdessa noin 100 m²:n kasvihuoneosastossa. Toiseen osastoista oli asennettu jäähdytyslaitteisto (suljettu kasvihuone) ja toisessa oli perinteinen ilmastohallintajärjestelmä (kontrolli).

Ruusulajikkeena oli isokukkainen, tummanpunainen 'Happy Hour'. Seuranassa oli pieni puolisuurikukkainen, punainen 'El Toro'. Kasvit istutettiin 31. tammikuuta 2006, 9,7 kasvia/netto-m². Koe lopetettiin 19. lokakuuta 2007. Kasvualustana oli kivivilla (Grodan Master 1000x240x75). Kasvualustat olivat viljelykouruissa ja kourut 60 cm maanpinnasta.

Kasvit taitettiin viljelyn alussa kaksi kertaa: 14.2.2006 ja 13-14.3.2006. Kasvit leikattiin pari koukkua alas päin (20-25 cm kasvualustasta) 14.2.2007 kontrolli ja 27.2.2007 jäähdytyshuone.

Ruusuja viljeltiin siten, että jokaisessa kasviyksilössä pyrittiin pitämään 1-3 taitettua lehtevää versoa koko viljelyajan.

Sato alkoi 12. huhtikuuta 2006. Kokeen aikana Happy Hour-lajikkeesta saatiin 15 satokertaa ja El Toro-lajikkeesta 16. Kontrolliosastossa sato kerättiin jaksoittain. Jäähdytysosastossa sadonkorjuutapoja oli kaksi: jaksottainen ja jatkuva.

7.1.2 Olosuhteet

Lämpötila, tuuletus, jäähdytys ja ilman kosteus

Toteutuneet lämpötilat näkyvät kuvista 35 ja 37. Yölämpötila talvella oli 18,8-20,5 °C. Jäähdytyskone käynnistyi noin 0,3-2,0 °C:ta aikaisemmin kuin kontrollissa oli asetettu tuuletuslämpötila. Heinäkuussa kontrollin tuuletuslämpötilan asetusarvo oli 26 °C. Jäähdytyskone käynnistyi 25,5 °C:ssa ja sammui 25,0-25,4 °C:ssa. Suljetun kasvihuoneen luukut alkoivat avautua jos ilman lämpötila nousi yli 28 °C:een. Yölämpötilan asetusarvo oli 20 °C ja jäähdytyskone käynnistyi jos lämpötila oli 22,5 °C.

Kesällä kosteuden poiston raja-arvona oli suljetussa kasvihuoneessa 89 % ja kontrollissa 85 %. Jos kosteus nousi korkeammaksi jäähdytyskone käynnistyi ja kontrollin tuuletusluukut avautuivat. Jos kosteus oli alhaisempi kuin keskimäärin 63 % suurpainesumut kosteuttivat huoneita.

Suljetun kasvihuoneen tuuletusluukkujen avautuminen rajoitettiin 15 %:iin 6.7.2006 alkaen.

Talvella 2006-2007, kun jäähdytyskone ei ollut käytössä (marraskuu 2006 – maaliskuun loppu 2007), suljetun kasvihuoneen ilman lämpötilaa nostettiin kontrollia korkeammaksi, jotta huoneiden väliset satoajat lähentyisivät toisiinsa.

Hiilidioksidipitoisuus

Hiilidioksidia annosteltiin puhtaana kaasuna (Aga Oy) 20 tuntia vuorokaudessa klo 02-22.

Vuonna 2006: asetusarvo oli 800 ppm, kun luukut olivat auki alle 30 %. Syöttö väheni jo 20 %:ssa. Jäähdytysosastossa luukut saivat avautua vain 15 % 6. heinäkuuta alkaen.

Vuonna 2007: asetusrarvo huhtikuusta alkaen oli 600 ppm, kun globaalisäteily oli ulkona alle 400 W m⁻² ja 800 ppm, kun globaalisäteily oli yli 400 W m⁻².

Valotus

Tekovaloa annettiin 20 tuntia vuorokaudessa klo 04-22, kun globaalisäteily oli alle 200 W m⁻² tai 400 W m⁻² keväällä vuonna 2007 sen aikaa kun aurinko oli niin alhaalla, että kasvihuone varjosti koe-osastoja. Kokonaissäteilyanturina oli CM 6B pyranometer, joka mittaa valoa 305-2800 nm:n aallonpituusalueella (Kipp & Zonen, Hollanti). Anturi on asennettu kasvihuoneen säätöautomaatiikkaan.

Valotuskalustoa oli asennustehona mitattuna 144 W m⁻² matala-asennuskalusteina. Kasvualustasta 60 cm:n korkeudella ja 105 cm kalusteen alareunasta alaspäin mitattiin keskimäärin 240 μmol m⁻² s⁻¹ (LI-COR LI-190 SA kvanttianturi, USA). Tekovalon lähteinä olivat NAV Super 4Y 400 W (Osram) suurpainenaatriumlamput.

Kastelu ja lannoitus

Kastelu ja lannoitus tapahtui tippukasteluna. Kasvualustan johtokykyä oli noin 1,5 mS cm⁻¹ ja pH 5-6.5. Lannoitteina käytettiin Kekkilä Oy:n viljelmäkohtaista Superex moniravinnelannoitetta, typpihappoa, CaN-jauhetta ja MgN-jauhetta.

7.1.3 Koejärjestely

Koejärjestelynä oli satunnaistettujen täydellisten lohkojen koe. Koska jäähdettyjä huoneita ja kontrollihuoneita oli yksi kumpaakin, lohkot olivat nk. pesiytyneet käsittelyyn. Lohkoja oli 6 ja kasveja yhdessä lohkoissa 10. Kasvit oli istutettu paririveihin. Lohkojen välissä oli aina 2 suojatainta/rivi. Lohko käsitti paririvin molemmat puolet, yhdessä rivissä oli siten viisi kasvia lohko kohti. Tuloksissa on verrattu suljetun kasvihuoneen jaksoittaista sadonkorjuutapaa kontrollihuoneen vastaavaan sadonkorjuutapaan.

Suljetun kasvihuoneen jatkuvasatoista kasvustoa on erikseen verrattu saman huoneen jaksoittaissatoiseen koejäseneseen. El Toro-lajikkeen satotulokset ovat suuntaa antavia, koska vain 15 yksilöstä kerättiin satotulokset.

7.1.4 Sato- ja kasvustohavainnot

Satoa kerättiin lohkoittain jokaisena arkipäivänä satojakson aikana. Kokonaissato laskettiin ja punnittiin. Sato lajiteltiin pituusluokkiin 10 cm:n välein ja kappaleet laskettiin. Sadosta laskettiin Amadeus-lajikkeen tukkuhintojen mukaan saadut eurot pituusluokittain. Lähteenä käytettiin Puutarha&kauppa-lehteä. Hinnat laskettiin todellisen satojakson aikaisista keskimääräisistä hinnoista. 30-39 cm:n pituusluokkaan käytettiin nippuruusujen hintoja.

Kukkaversojen tuore- ja kuivapainopunnituksia varten jokaisesta lohkoista kerättiin kahdesta numeroidusta kasvista kukkaversot erikseen (12 kasvia/koejäsen). Kukkaversosta punnittiin varsi, lehdet ja kukka. Lehdistä mitattiin pinta-ala planimetrillä (LI-COR LI 3100 Area Meter). Kuivapainoa varten kasvinosat kuivattiin kuivatusuunissa 80 °C:ssa 10 vuorokautta.

Kukkaverson kehitystä vuorokausissa seurattiin 10-12 silmusta/ koejäsen 1 cm:n pituisesta silmusta ensin noin 5 mm:n paksuiseen nuppuun (hernenuppu) ja edelleen sadonkorjuuseen asti.

7.1.5 Fotosynteesimittaukset

Ruusun lehtien fotosynteesiä mitattiin kahdesti kesällä 2006, kerran talvella alkuvuodesta 2007 sekä keväällä ja loppukesällä 2007. Mittaukset tehtiin kasvihuoneissa kasvavista, kasvissa kiinni olevista lehdistä. Mittauksiin valittiin kukkavarsia, jotka edustivat huoneen vallitsevaa kukkavarren korkeutta, ja joiden nupun terälehdet olivat korkeintaan hieman ylhäältä avautuneet. Mittaukset tehtiin yleensä tällaisen kukkavarren ylimmän 3-lehdykkäisen lehden päätylehdykstä.

Mittaukset tehtiin kannettavalla fotosynteesimittarilla (LI-6400, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA), johon oli liitetty fluoresenssin mittauskvetti (6400-40 Leaf Chamber Fluorometer, LI-COR Inc.) (ks. kurkulla kuva 4). Lehti sijoitettiin mittauskvettiin sisään, ja lehdestä 2 cm²:n laajuisen alueen kaasunvaihtoa ja klorofyllin fluoresenssiä mitattiin. Klorofyllin eli lehtivihreän fluoresenssin mittauksella saadaan tietoa lehden kunnosta. Mitattavan lehdenkohdan saama PAR-säteily ja CO₂-pitoisuus pystytään säätämään halutulle tasolle sekä lämpötila ja ilman kosteus pystytään pitämään tasaisina jäähdytys-elementin ja ilman virtausnopeuden säädön avulla. Laite mittaa lehtikyvetiin menevän ja sieltä ulos tulevan ilman CO₂-pitoisuuden ja kosteuden, ilman virtausnopeuden, lehdenpinnan ja ilman lämpötilan, PAR-säteilyn ja klorofyllin fluoresenssin. Mitattujen arvojen perusteella laite laskee mm. fotosynteesinopeuden, haihdunnan, ilmarakojen johtokyvyn eli ilmarakokonduktanssin ja fluoresenssiparametreja.

Mittauksen aluksi mittauskohta pimennettiin 15 min ajan, jonka jälkeen mitattiin pimeään sopeutuneen lehden fluoresenssia. Tämän jälkeen annettiin 10 min fotosynteesille saturoivaa valoa (PAR-säteily = $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), jonka jälkeen mitattiin fotosynteesin vaste PAR-säteilylle valotasoa asteittain lasquemalla ja mittaamalla fotosynteesiä kussakin valotasossa tasoittumisen jälkeen. Valovaste mitattiin CO₂-pitoisuuden ollessa 400 ppm ja 800 ppm. Viimeiseksi mitattiin fotosynteesin vaste CO₂-pitoisuudelle saturoivassa valotasossa (PAR-säteily = $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) asteittain muuttamalla CO₂-pitoisuutta ja mittaamalla fotosynteesiä kussakin pitoisuudessa tasoittumisen jälkeen.

Kummassakin huoneessa tehtiin 5-9 rinnakkaista mittausta, kukin mittaus eri lohkoista. Koska kontrollihuoneen ja jäähdytyshuoneen satojaksot olivat eri vaiheessa ja mittaukset haluttiin tehdä samassa nupun ja kukkavarren kehitysvaiheessa, jouduttiin kontrollihuoneen ja jäähdytetyn huoneen kasveja mittaamaan eri viikoilla. Mittaukset tehtiin vuonna 2006 viikoilla 30 - 31 (kontrolli), 32 (jäähdytys), 36 (kontrolli) ja 37 (jäähdytys) ja vuonna 2007 viikoilla 6 (talvimittaus, vain kontrolli), 17 (kontrolli), 20 (jäähdytys), 33 (kontrolli) ja 35 (jäähdytys).

7.1.6 Maljakkokestävyyshavainnot

Maljakkokestävyyttä mitattiin vuorokausissa maljakkokoehuoneessa. Saman satojakson aikana kerättiin kaksi kertaa satunnaisesti 15 kukkaversoa ionisoituun veteen. Tulokset ovat siten 30 kukkaverson keskiarvoja. Korjuun jälkeen kukkaversoja pidettiin yön yli kylmiössä +4 °C, jonka jälkeen siirrettiin maljakkokoehuoneeseen ionisoituun veteen yksi kukkaverso/maljakkko. Kukkavarret leikattiin samanpituisiksi. Pituus oli kesällä 40-45 cm ja muuna aikana 50 cm. Vedenkulutusta päivittäin seurattiin kahtena maljakkokoejaksona. Vedenkulutus koko maljakkovaiheen aikana mitattiin. Vettä lisättiin tarvittaessa. Kukkaverso poistettiin kun kukka nuokahti tai vanheni. Poiston syy ja kesto vuorokausissa kirjattiin ylös. Lisäksi laskettiin kukkaverson lehdet ja lehdykät ja osasta lehdistä mitattiin lehtipinta-ala. Maljakkohuoneen ilman lämpötila oli 20-21 °C, kesällä jopa hetkellisesti 27 °C, ilman suhteellinen kosteus oli 30-60 %, talvella noin 20 % ja tekovaloa annettiin 12 tuntia/vrk $24,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Philips Fluorescent TLO 36 W/827 loisteputkilla. Huoneessa oli sähköpatteri ja koneellinen tuuletus.

7.2 Tulokset

7.2.1 Olosuhteiden hallinta ja jäähdytyskoneiston käyttö

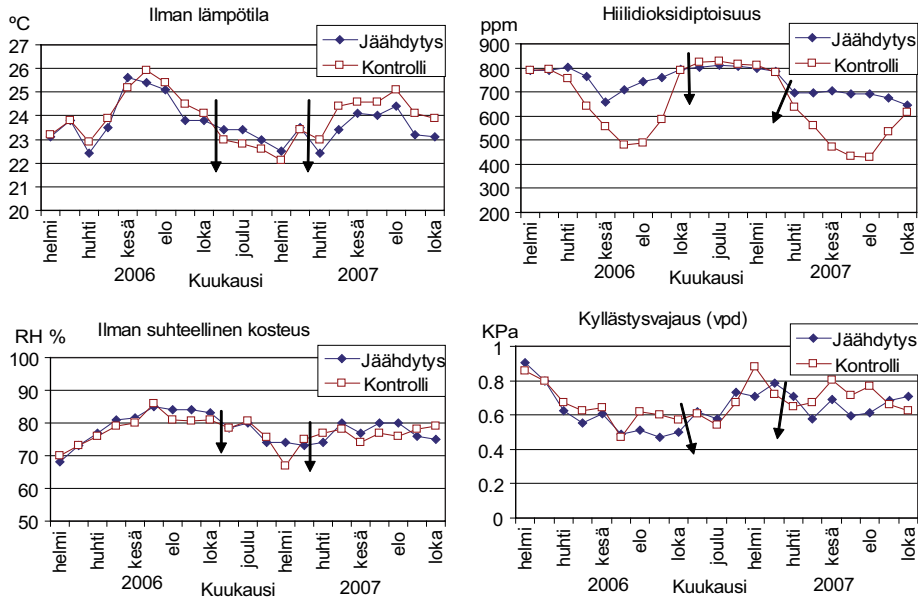
Jäähdytyskoneisto otettiin käyttöön maaliskuussa 2006. Käyttöönotto ei sujunut hankaluuksitta. Prototyyppejä piti säätää ja kesäkuussa havaittiin, että jäähdytysteho ei ole riittävä. Muutosten jälkeen kesäkuun lopussa jäähdytyskoneisto alkoi toimia toivotulla tavalla. Kevään ilmastomittauksista näkee selvästi, että suljetussa kasvihuoneessa olosuhteet eivät juuri poikenneet kontrollista. Kesäkuussa riittämättömän jäähdytystehon vallitessa tuuletusluukut avautuivat ja ilman lämpötila oli kontrollia korkeampi.

Jäähdytyslaitteisto sammutettiin marraskuussa 2006. Jäähdytyslaitteiston korkeiden tehojen tarve loppui lokakuun alussa. Vähitellen kone kävi vain kosteuden poiston takia. Jäähdytyskone laitettiin vuonna 2007 päälle maaliskuun lopussa. Huhtikuussa jäähdytyskone kävi pienillä tehoilla, mutta toukuussa tehon tarve jäähdytyksessä kasvoi.

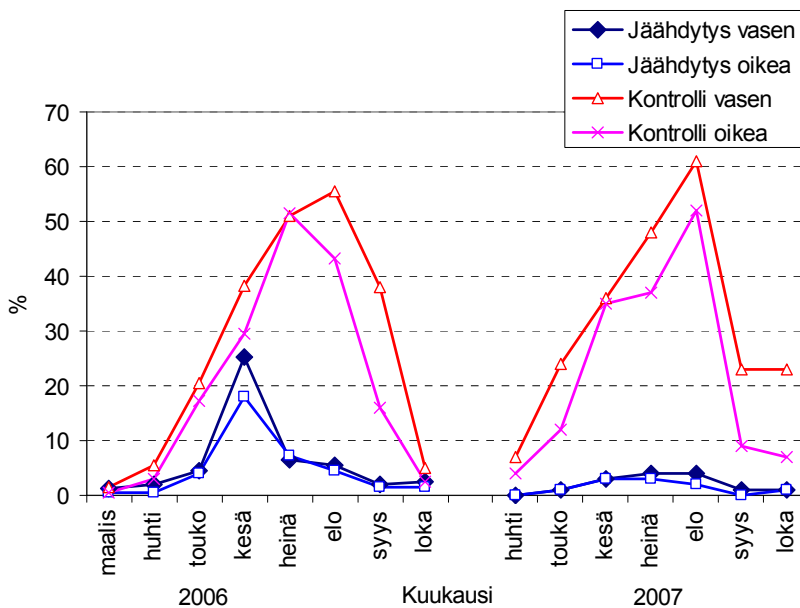
Kuvasta 35 näkee hyvin kuinka suljetun kasvihuoneen keskimääräinen vuorokautinen ilman lämpötila on alhaisempi kuin kontrollin sen jälkeen kun jäähdytyskone kone toimi halutulla tavalla. Talvella suljetun huoneen lämpötilan korkeampi asetusarvo näkyy selvästi.

Ilman hiilidioksidipitoisuus oli suljetussa kasvihuoneessa myös selvästi kontrollia korkeampi. Kontrollihuoneen hiilidioksidipitoisuus ei kuitenkaan laskenut alle ulkoilman pitoisuuden kuin hyvin lyhyitä aikoja päivissä. Esim. heinäkuun tuntikeskiarvoissa liikutaan keskipäivälläkin 400 ppm:n tuntumassa (Kuva 37). Kontrollihuoneen toisen kokeen turvealustoista vapautunut hiilidioksidi on voinut vaikuttaa mitattuun pitoisuuteen.

Suurin tuuletustarve kontrollissa oli kesäkuukausina (Kuva 36). Ilman suhteellisessa kosteudessa erot olivat pienet (Kuva 35). Suljetussa kasvihuoneessa oli hieman kosteampaa asetusarvojen mukaan. Kontrollissa ilman kosteus oli koko viljelyn ajan sopiva, mikä oli tärkeää kasvien hyvinvoinnille. Kesällä suurpainesumut pystyivät hyvin ylläpitämään riittävää kosteutta.

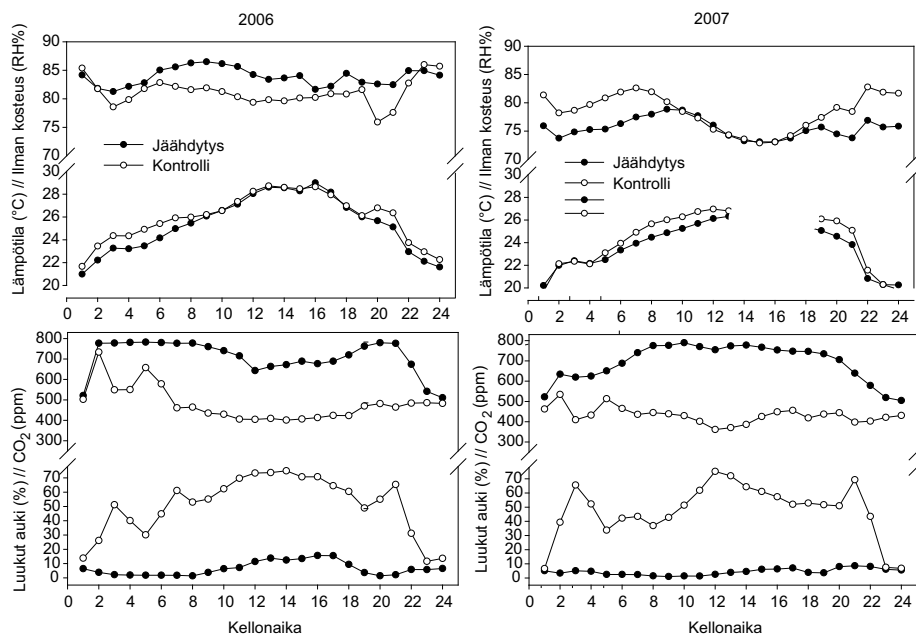


Kuva 35. Kasvihuoneiden olosuhteet vuorokausien keskiarvoina eri kuukausina. Nuolien välisenä aikana talvella ei jäähdytystä.



Kuva 36. Luukkujen aukioloaste vuorokauden keskiarvoina eri kuukausina vuosina 2006 ja 2007.

Heinäkuiden 2006 ja 2007 olosuhteiden eron näkee kuvista 37. Heinäkuu 2006 oli paljon helteisempi kuin vuonna 2007. Jäähdytetyssä huoneessa luukut avautuivat keskipäivän kuumimpina tunteina jonkin verran. Hiilidioksidin asetusravojen erot vuosien välillä näkyvät selvästi käyrien muodoissa.



Kuva 37. Ruusun koehuoneiden olosuhteet heinäkuussa 2006 ja 2007 vuorokauden tuntien keskiarvoina.

Suljetun kasvihuoneen kasveja kasteltiin enemmän kuin kontrollia (Taulukko 11). Vedenkulutus oli kuitenkin vuonna 2006 ja alkuvuonna 2007 hieman vähäisempää jäähdytetyssä huoneessa kuin kontrollissa. Tällöin myös ylikasteluprosentti nousi jäähdytetyssä huoneessa kontrollia korkeammaksi (Taulukko 11). Kesällä 2007 suljetun kasvihuoneen kasvit käyttivät enemmän vettä kuin kontrollissa. Molempina kesinä jäähdytetyn huoneen kasvit kuluttivat enemmän tyypeä kuin kontrollin kasvit. Kivivillassa pH:n pitäminen riittävän korkeana tuotti välillä vaikeuksia.

Taulukko 11. Ruusukasvustojen kastelu, kasvien vedenkulutus ja ylikasteluprosentti sekä valumaveden nitraattipitoisuus (NO₃-N), johtokyky (mS/cm) ja happamuus (pH) keskiarvoina eri vuosina ja kuukausijaksoina.

Koejäsen	2006			2007		
	Helmi- huhtikuu	Touko- elokuu	Syys- joulukuu	Tammi- huhtikuu	Elokuu	Syys- lokakuu
Kastelu litraa / kasvi / vrk						
Jäähdytys	0,59	0,91	0,81	0,58	0,80	0,65
Kontrolli	0,58	0,87	0,78	0,58	0,75	0,68
Vedenkulutus l /kasvi / vrk						
Jäähdytys	0,22	0,30	0,38	0,31	0,43	0,38
Kontrolli	0,21	0,45	0,42	0,37	0,40	0,38
Ylikasteluprosentti / kasvi / vrk						
Jäähdytys	62	61	52	47	46	41
Kontrolli	62	48	46	38	46	43
NO ₃ -N ml / g valumavedessä						
Jäähdytys	183	117	162	200	154	154
Kontrolli	182	166	178	196	180	161
mS / cm valumavedessä						
Jäähdytys	1,6	1,2	1,7	1,8	1,6	1,7
Kontrolli	1,5	1,4	1,8	1,8	1,7	1,6
pH valumavedessä						
Jäähdytys	5,7	5,1	4,4	4,7	5,3	4,7
Kontrolli	5,7	4,9	5,1	5,5	5,6	4,9

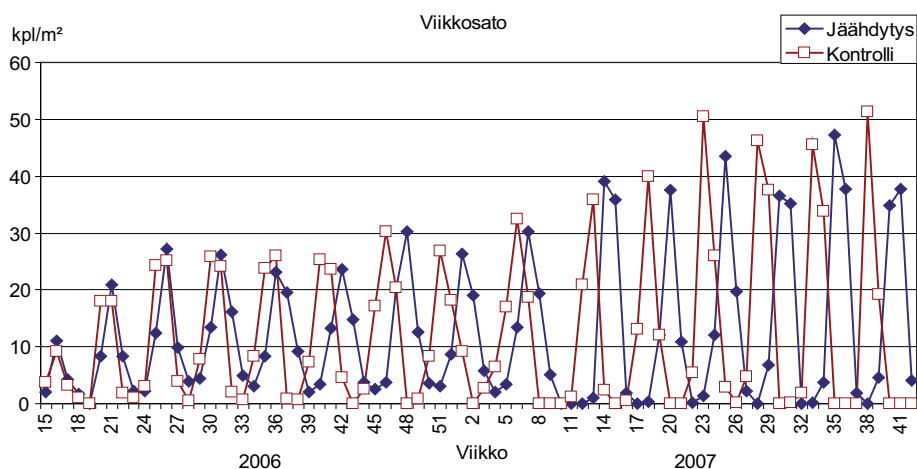
7.2.2 Sadon lukumäärässä erot pienet, mutta laatu parani

Suljetussa kasvihuoneessa oli keskimäärin viileämpää kuin kontrollissa ja se näkyy satoaikojen pituudessa heinäkuusta 2006 lähtien (Kuva 38). Jäähdytyksessä kukkaversot kehittivät hitaammin ja satoaika venyi pidemmäksi kuin kontrollissa. Talvella jäähdytyshuoneen korkeampi lämpötila ei riittävästi nopeuttanut sadon muodostumista ja vuonna 2007 satojaksot olivat koko ajan selvästi eri rytmissä.

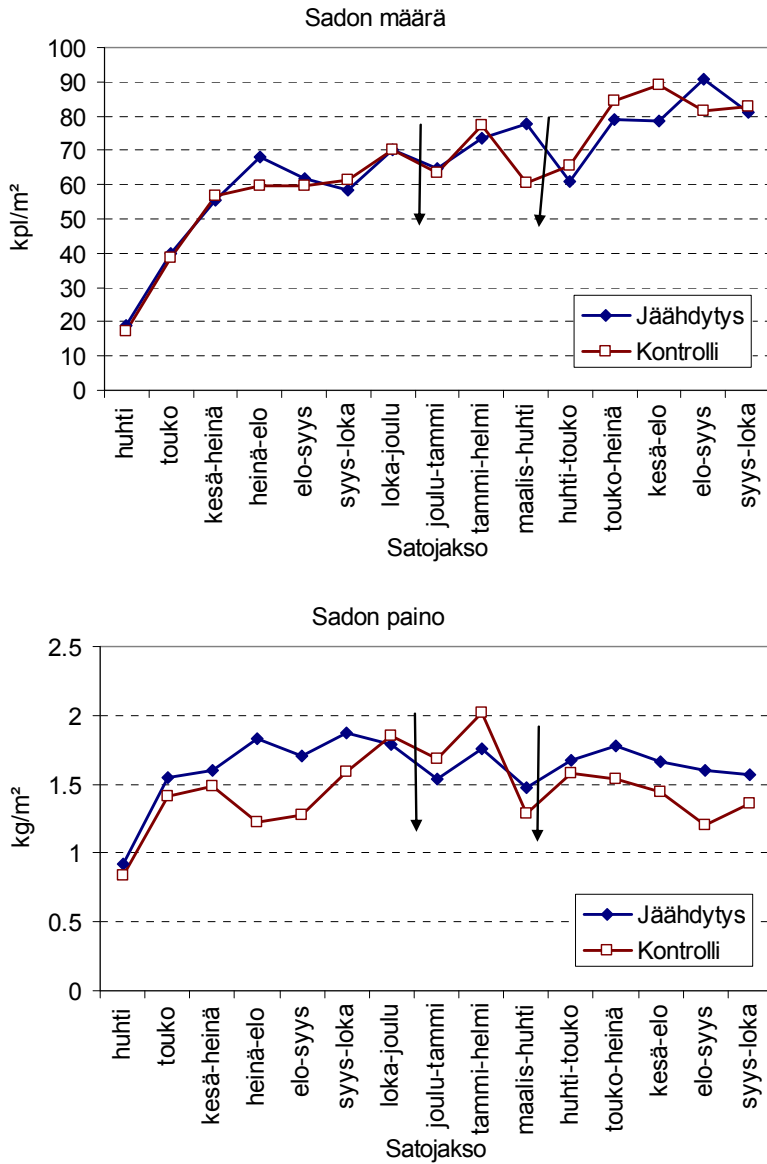
Ruusun kokonaissato (12 satokertaa), kun talvikauden kolme satokertaa jätettiin pois, oli suljetusta huoneesta ja kontrollista kummastakin 765 kpl m². Kappalesadoissa ei ollut merkittäviä eroja satokertojen välillä suljetun ja kontrollihuoneen välillä (Kuva 39). Talvijakson sadot (3 kpl) olivat suljetusta huoneesta 216 kpl m² ja kontrollista 201 kpl m². Korkeampi lämpötila nopeuttaa silmujen puhkeamista.

Sato kiloina oli suljetussa kasvihuoneessa painavampi kuin kontrollissa (Kuva 39). Kokonaissadon painot olivat jäähdytyksestä 19.7 kg m² ja kontrollista 16.6 kg m². Talvella sadon painot olivat suljetussa huoneesta 4.6 kg m² ja kontrollissa 5.2 kg m². Talvikuukausien tuloksiin voi olla syynä suljetun huoneen korkeampi lämpötila kuin kontrollihuoneessa.

Suljetussa kasvihuoneessa kukkavarret kasvoivat pidemmiksi kuin kontrollissa (Taulukko 12). Kun kokonaissadosta laskettiin laatuokittain tukkuhinat, suljetusta kasvihuoneesta saatiin suurempi tuotto kuin kontrollista (Taulukko 13). Suljetusta kasvihuoneesta kertyi eniten euroja yli 50 cm:n pituisista kukkaversoista kun taas kontrollissa eniten 40-49 cm:n kukkaversoista. Satokerroissa oli vuodenaikaisia eroja (Taulukko 13).



Kuva 38. Ruusun sato kpl m² viikoittain eri koejäsenillä vuosina 2006 ja 2007.



Kuva 39. Ruusun sato kappaleina (kpl m^{-2}) ja kiloina (kg m^{-2}) satojaksoittain koko koeajalta. Nuolien välisenä aikana talvella ei jäähdytystä.

Taulukko 12. Ruusun sato pituusluokittain koko viljelyajalta (harmaa alue mukana) ja jäähdytysajalta kpl m².

Vuosi	Satokuukausi	Jäähdytys, kpl/m ²						Summa
		Pituusluokat, cm						
		≥ 80	70-79	60-69	50-59	40-49	30-39	
2006	Huhti	0,0	0,2	1,3	7,6	9,5	0,3	18,9
	Touko	0,0	1,8	14,6	17,9	5,5	0,0	39,8
	Kesä-heinä	0,0	0,8	12,3	26,8	14,9	1,3	56,1
	Heinä-elo	0,0	1,3	14,2	34,1	15,4	2,9	67,9
	Syys	0,0	2,7	16,8	26,5	13,1	2,4	61,6
	Syys-loka	1,3	11,2	30,1	14,1	3,7	0,0	60,3
	Marras-joulu	0,2	7,4	22,5	28,0	11,3	0,8	70,1
	Joulu-tammi	0,6	7,1	22,3	25,5	8,6	0,5	64,7
2007	Tammi-helmi	0,8	8,9	25,4	22,8	13,7	2,1	73,7
	Huhti	0,2	1,0	7,4	39,0	25,1	5,3	77,9
	Touko	2,3	9,4	17,3	20,9	9,4	1,8	60,9
	Kesä	0,0	1,5	16,3	32,8	21,3	6,9	78,8
	Heinä-elo	0,2	2,3	13,6	35,1	22,6	4,8	78,5
	Elo-syys	0,0	0,6	7,3	26,3	40,4	15,8	90,4
	Syys-loka	0,0	1,9	13,3	29,4	27,2	9,4	81,2
	Summa	5,5	58,0	234,6	386,8	241,6	54,4	980,9
Jäähdytys- ajan summa		3,9	41,1	179,5	299,5	194,3	46,4	764,6

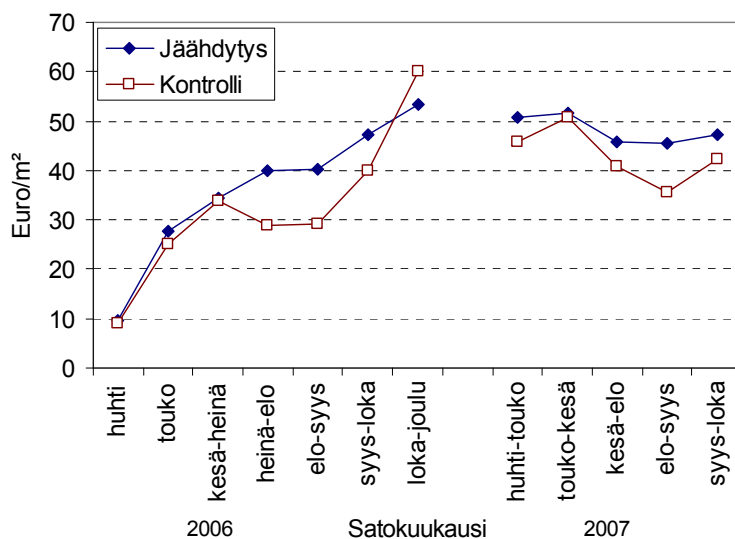
Vuosi	Satokuukausi	Kontrolli, kpl/m ²						Summa
		Pituusluokat, cm						
		≥ 80	70-79	60-69	50-59	40-49	30-39	
2006	Huhti	0,0	0,0	1,3	11,0	4,7	0,2	17,1
	Touko	0,0	0,0	8,4	19,4	10,3	0,3	38,4
	Kesä-heinä	0,0	0,5	8,2	28,1	17,9	1,9	56,7
	Heinä-elo	0,0	0,0	0,8	15,0	36,1	7,6	59,5
	Elo-syys	0,0	0,0	1,6	15,4	33,0	9,2	59,2
	Syys-loka	0,0	1,1	12,4	31,4	14,7	1,8	61,4
	Loka-Marras	0,5	5,8	26,8	24,3	11,0	1,3	69,7
	Joulu	0,5	8,2	25,9	20,0	7,3	1,6	63,5
2007	Tammi-helmi	1,3	14,9	31,0	19,9	10,0	0,3	77,4
	Maalis	0,0	0,5	11,6	28,1	17,9	2,1	60,3
	Huhti-touko	0,5	6,3	15,2	21,3	12,9	9,5	65,8
	Touko-kesä	0,0	0,0	3,1	26,0	43,8	11,6	84,5
	Kesä-heinä	0,0	0,0	3,1	16,3	47,7	21,7	88,8
	Elo	0,0	0,0	0,5	13,4	45,9	21,7	81,5
	Syys	0,0	0,2	4,9	25,1	33,3	19,1	82,5
	Summa	2,7	37,5	154,9	314,7	346,6	110,0	966,4
Jäähdytys- ajan summa		1,0	13,9	86,3	246,6	311,4	105,9	765,1

Taulukko 13. Happy Hour -lajikkeen sadosta saatu rahallinen tuotto laskettuna Amadeus-lajikkeen tukkuhintojen mukaan koko viljelyajalta (harmaa alue mukana) sekä jäähdytyslaitteiston käyttö- ja vaikutusaikana. Hintatiedot: Puutarha&kauppa 2006–2007.

		Jäähdytys, euro/m ²				
		Pituusluokat, cm				
Vuosi	Satokuukausi	≥ 60	50-59	40-49	30-39	Summa
2006	Huhti	0,9	4,2	4,3	0,1	9,5
	Touko	13,1	11,7	3,0	0,0	27,8
	Kesä-heinä	9,5	16,8	7,8	0,4	34,5
	Heinä-elo	11,3	20,5	7,3	0,8	39,8
	Syys	15,6	17,2	6,5	0,8	40,3
	Syys-loka	36,1	9,1	1,9	0,0	47,1
	Marras-joulu	29,3	20,3	6,8	0,3	56,6
2007	Joulu-tammi	30,4	19,4	4,7	0,2	54,6
	Tammi-helmi	38,1	19,6	7,8	0,7	66,2
	Huhti	7,3	27,3	13,8	1,1	49,4
	Touko	27,5	16,7	6,1	0,5	50,8
	Kesä	15,9	23,6	10,0	2,1	51,6
	Heinä-elo	13,1	21,1	10,4	1,1	45,7
	Elo-syys	5,5	15,8	20,2	4,1	45,6
Syys-loka	11,6	18,5	14,4	2,8	47,3	
	Summa	265,2	261,7	125,0	14,9	666,9
	Jäähdytys- ajan summa	189,5	195,4	98,7	13,0	496,6

		Kontrolli, euro/m ²				
		Pituusluokat, cm				
Vuosi	Satokuukausi	≥ 60	50-59	40-49	30-39	Summa
2006	Huhti	0,9	6,0	2,1	0,0	9,1
	Touko	6,7	12,6	5,7	0,1	25,1
	Kesä-heinä	6,3	17,6	9,4	0,6	34,0
	Heinä-elo	0,6	9,0	17,1	2,1	28,8
	Elo-syys	1,3	9,6	15,7	2,8	29,3
	Syys-loka	11,5	20,4	7,4	0,6	39,9
	Loka-Marras	31,5	17,0	6,0	0,4	54,9
	Joulu	32,9	14,0	4,4	0,5	51,8
2007	Tammi-helmi	51,2	17,1	5,7	0,1	74,1
	Maalis	10,3	19,7	9,9	0,4	40,3
	Huhti-touko	19,8	16,0	7,8	2,3	45,9
	Touko-kesä	2,8	18,2	26,3	3,5	50,8
	Kesä-heinä	2,2	9,8	23,8	5,0	40,8
	Elo	0,4	8,0	23,0	4,3	35,7
	Syys	3,8	15,6	17,3	5,7	42,4
	Summa	182,1	210,6	181,5	28,6	602,9
	Jäähdytys- ajan summa	87,7	159,8	161,5	27,6	436,6

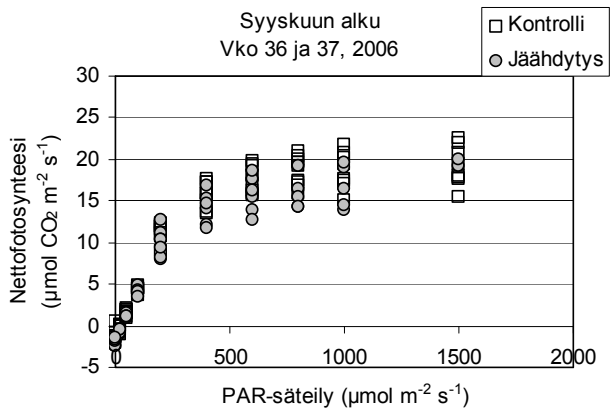
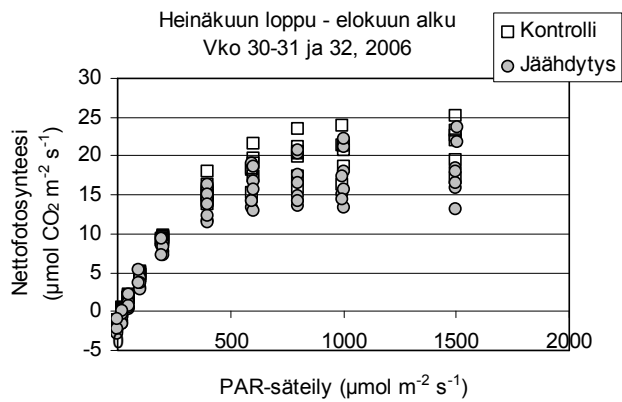
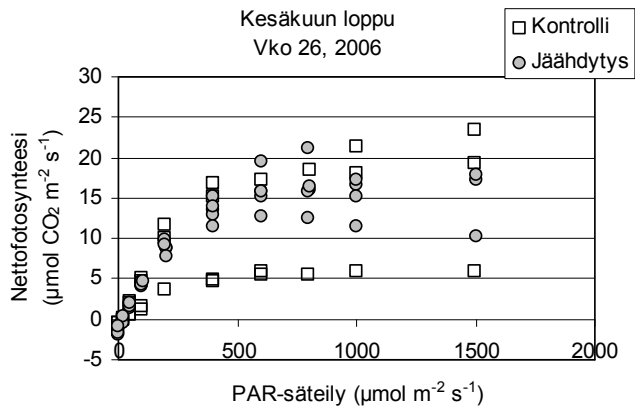
Kokonaistuotossa satokerroittain suurin ero kasvihuoneiden välillä oli molempina koevuosina loppukesällä ja alkusyksyllä (Kuva 40).



Kuva 40. Sadosta saatu kokonaistuotto Amadeus-lajikkeen tukkuhintojen mukaan, jotka on kerätty Puutarha&kauppa-lehdestä vuosina 2006-2007.

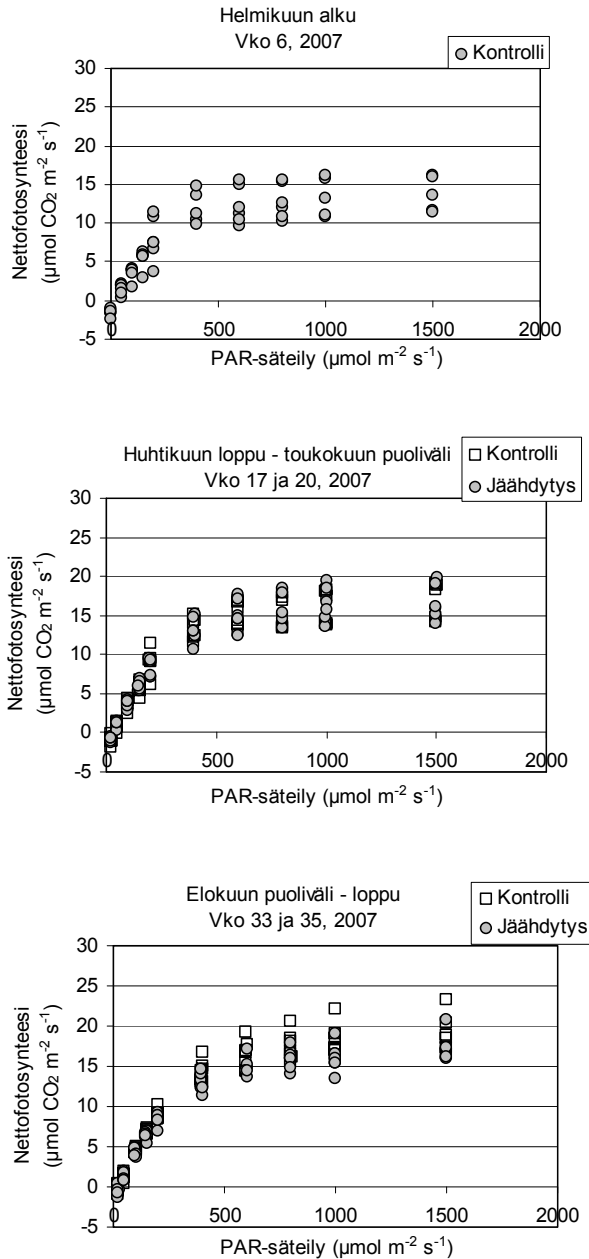
7.2.3 Korkeampi ilman hiilidioksidipitoisuus kiihdyttää fotosynteesinopeutta

Kasvihuoneen ilmastohallintatekniikan käyttö ei juurikaan vaikuttanut ruusun ylälehtien fotosynteesisiin ominaisuuksiin. Fotosynteesin vaste PAR-säteilylle oli samankaltainen molemmissa huoneissa kunakin mittausajankohdanta (Kuva 41 ja 42). Fotosynteesin valovastekäyrän suora alkuosa kuvaa tilannetta, jossa valo yksinomaan rajoittaa fotosynteesinopeutta. Käyrän taipumiskohdasta taas nähdään, missä valotasossa fotosynteesi saturoituu, jolloin valotason nosto ei enää nopeuta fotosynteesiä. Käyrän tasainen yläosa taas kuvaa valosaturoitunutta maksimaalista nettofotosynteesiä. Missään näissä ei havaittu suurta eroa kontrollihuoneen ja jäähdytetyn huoneen kasvien välillä. Tämä merkitsee sitä, että kontrollihuoneen ja jäähdytetyn huoneen kasvit yhteyttivät samalla nopeudella ollessaan samanlaisessa valaistuksessa.

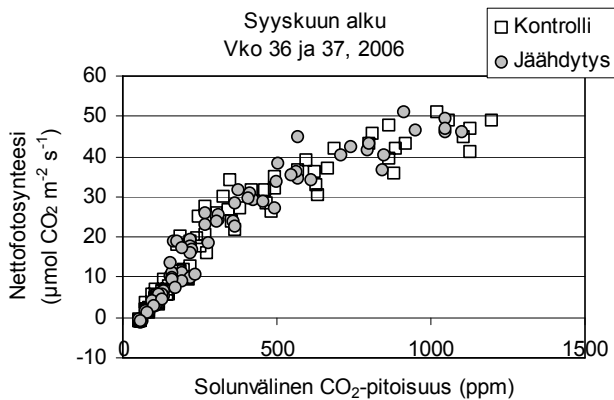
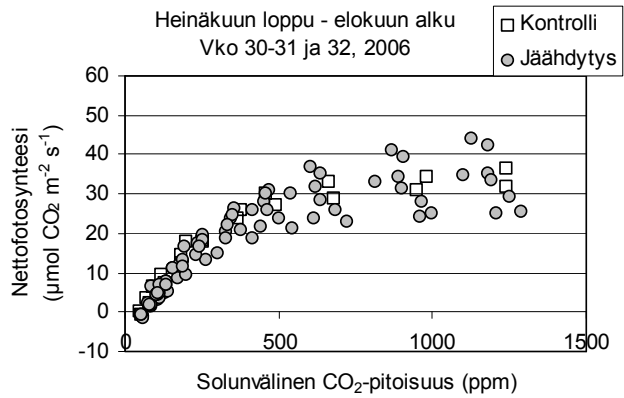
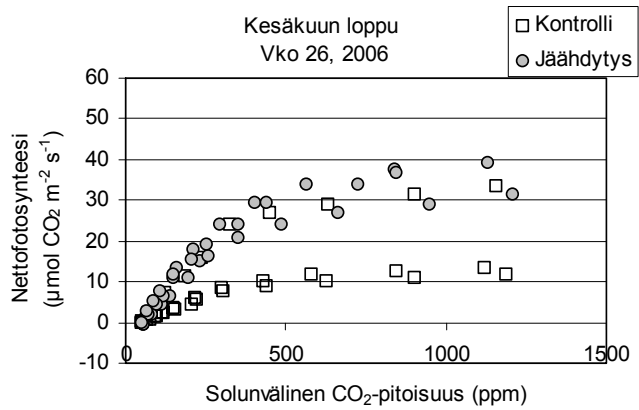


Kuva 41. Ruusun ylälehtien fotosynteesin vaste PAR-säteilylle (400-700 nm:n aallonpituusalue) kontrolli- ja jäähdytetyssä kasvihuoneessa vuonna 2006.

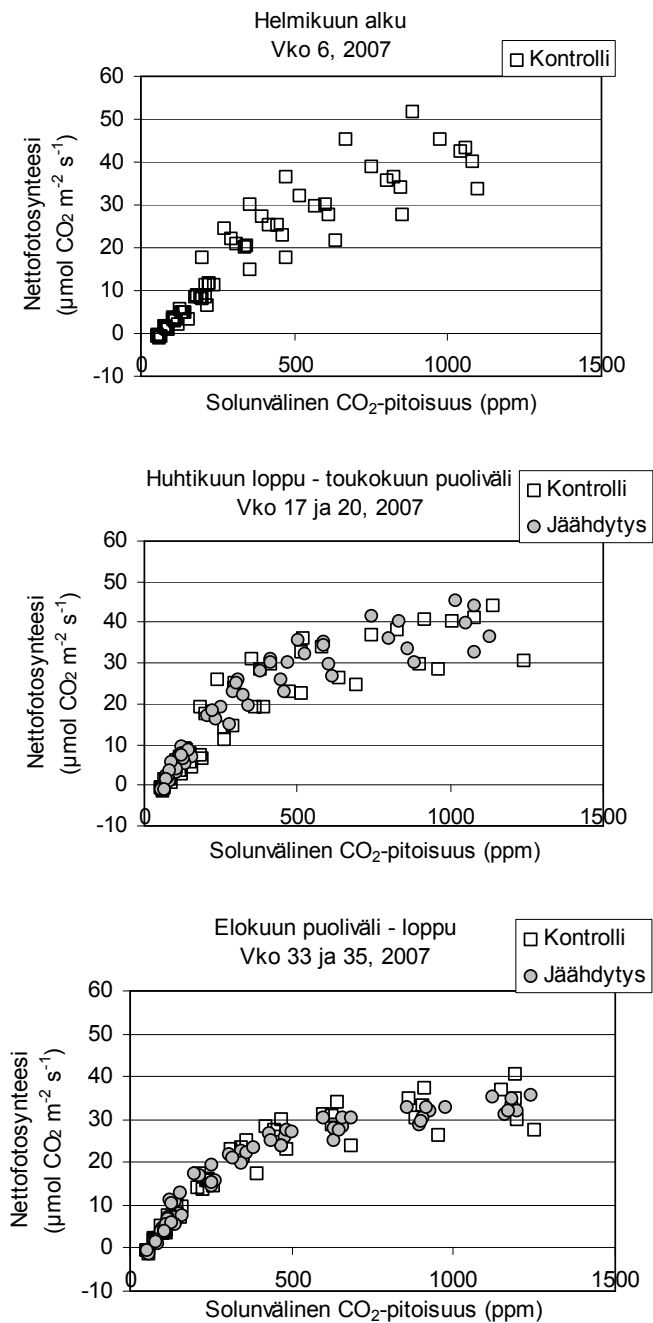
Myös fotosynteesin vaste ilman CO₂-pitoisuudelle (Kuva 43 ja 44) oli samankaltainen jäähdytys- ja kontrollihuoneen kasveissa kunakin mittausjaksona huolimatta satojakson ja mittauksen eriaikaisuudesta.



Kuva 42. Ruusun ylälehtien fotosynteesin vaste PAR-säteilylle kontrolli- ja jäähdytetyssä kasvihuoneessa vuonna 2007. Helmikuussa mitattiin vain kontrollikasveja.



Kuva 43. Ruusun ylälehtien fotosynteesin vaste CO_2 -pitoisuudelle kontrolli- ja jäähdytetyssä kasvihuoneessa vuonna 2006.



Kuva 44. Ruusun ylälehtien fotosynteesin vaste CO₂-pitoisuudelle kontrolli- ja jäähdytetyssä kasvihuoneessa vuonna 2007.

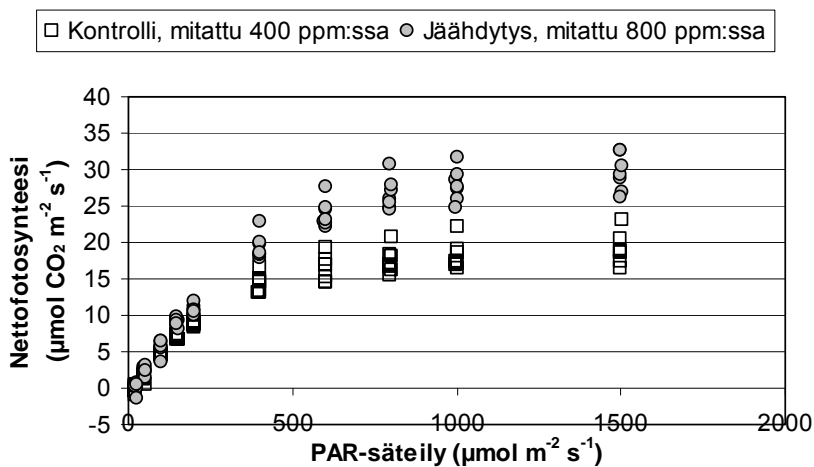
Samalla periaatteella kuin valovastekäyrässä, niin myös CO₂-vastekäyrän suora alkuosa kuvaa tilannetta, jossa CO₂ rajoittaa fotosynteesinopeutta, käyrän taipumiskohta taas kertoo fotosynteesin CO₂-saturaatiokohdan ja käyrän tasainen yläosa maksimaalisen CO₂-saturoituneen nettofotosynteesin. Näisäkään ei ollut suuria eroja kontrollihuoneen ja jäähdytetyn huoneen kasvien välillä. Tämä puolestaan merkitsee sitä, että kontrollihuoneen ja jäähdytetyn huoneen kasvit yhteyttivät samalla nopeudella ollessaan samanlaisessa CO₂-pitoisuudessa. Jäähdytetyn ja kontrollihuoneen kasvien välillä ei havaittu suuria eroja ilmarakokonduktanssissa, haihdunnassa eikä fotosynteesikoneiston toiminnasta ja lehden yleisestä kunnosta kertovissa fluoresenssiparametreissa (Taulukko 14).

Taulukko 14. Ruusun ylälehtien fotosynteesi, ilmarakokonduktanssi, transpiraatio, ei-fotokemiallinen fluoresenssin vaimeneminen (NPQ), PSII:n kvantitisaalis (Fv'/Fm') ja elektroninsiirtonopeus (ETR), kun PAR-säteilyä oli 800 μmol m⁻² s⁻¹ ja CO₂-pitoisuus oli 400 ppm. PSII:n maksimaalinen kvanttitehokkuus (Fv/Fm) on mitattu pimeään 15 min sopeutuneesta lehdestä. n = 6–9.

2006		Foto-synteesi	Ilmarako-kondukt.	Trans-piraatio	Fv/Fm	NPQ	Fv'/Fm'	ETR
Vko	Huone	μmol m ⁻² s ⁻¹	mol m ⁻² s ⁻¹	mmol m ⁻² s ⁻¹				μmol m ⁻² s ⁻¹
30	Kontrolli	20	0,28	2,7	0,78	1,2	0,56	125
	Jäähdytys	17	0,24	2,5	0,78	1,3	0,53	119
36	Kontrolli	19	0,37	2,9	0,78	1,3	0,53	112
	Jäähdytys	16	0,34	2,0	0,77	1,4	0,51	112
2007								
6	Kontrolli	13	0,22	1,8	0,77	1,2	0,52	71
17	Kontrolli	15	0,28	2,8	0,75	1,1	0,52	106
	Jäähdytys	16	0,24	2,3	0,78	1,4	0,52	110
33	Kontrolli	17	0,32	3,0	0,80	1,3	0,55	127
	Jäähdytys	16	0,34	2,5	0,79	1,3	0,53	121

Jäähdytyksen ansiosta luokkutuuletuksen tarve oli vähäinen ja jäähdytetyssä huoneessa CO₂-pitoisuus pysyikin molempina kasvukausina korkeampana kuin kontrollihuoneessa. Kontrollihuoneessa CO₂-pitoisuus laski kesäkuukausina selvästi alle fotosynteesin saturaatiotason. Koska jäähdytetyssä huoneessa CO₂-pitoisuudet olivat korkeammat, myös nettofotosynteesitasot olivat korkeammat kuin kontrollihuoneen kasveissa. Tämä nähdään kuvasta 45, jossa verrataan kontrollikasvin 400 ppm:n CO₂-pitoisuudessa ja jäähdytetyn huoneen kasvin 800 ppm:ssa mitattua fotosynteesin valovastekäyrää. Korkeamman CO₂-pitoisuuden ansiosta jäähdytetyn huoneen kasvit pystyivät siis yhteyttämään tehokkaammin ja saivat näin tuotettua enemmän hiiliyhdisteitä, mikä näkyy kasvun lisääntymisenä.

Vko 33 ja 35, 2007



Kuva 45. Ruusun ylälehtien fotosynteesin vaste PAR-säteilylle elokuun lopulla vuonna 2007. Kontrollihuoneen kasvin fotosynteesiä mitattiin CO₂-pitoisuuden ollessa 400 ppm, ja jäähdytetyn huoneen kasvia mitattiin 800 ppm:ssa.

7.2.4 Ruusun fotosynteesimittaukset kertoivat lehtien sopeutumisesta vuodenaikojen erilaiseen säteilytasoon

Kontrollihuoneen kasvien fotosynteesiä mitattiin myös talvella, helmikuussa 2007. Lehtien sopeutuminen talven matalaan säteilytasoon näkyi matalampana valovastekäyränä kuin kesällä (Kuvat 41 ja 42). Myös käyrän lineaarinen alkuosa eli fotosynteesin kvanttitehokkuus (sidottu CO₂/sidottu valokvantti) oli matalampi kuin kesäoloissa.

Lehtien sopeutumisesta talvioloihin kertovat myös fluoresenssimittauksissa havaittu kesäaikaa huomattavasti pienempi fotosynteesikoneiston elektronin-

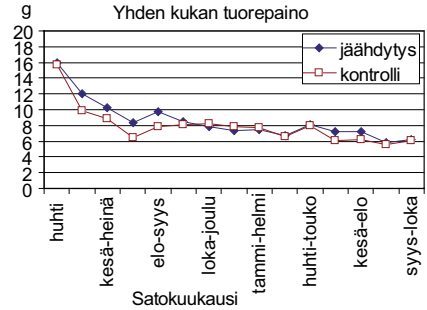
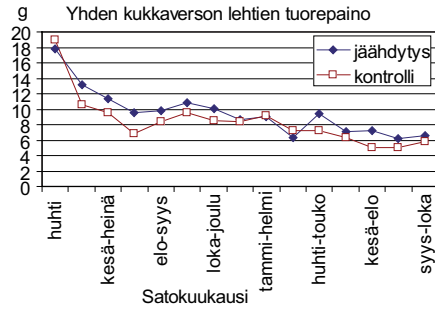
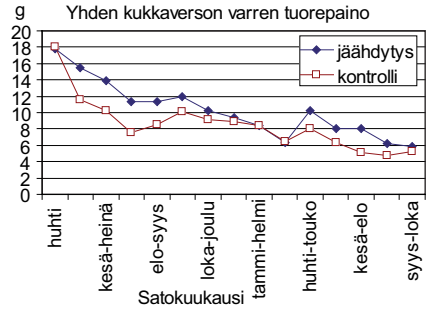
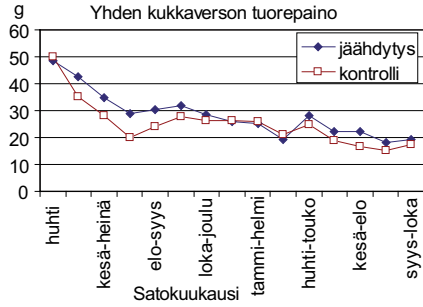
siirtonopeus (ETR, Taulukko 14) ja CO₂-vastekäyrän loivempi lineaarinen alkuosa. CO₂-vastekäyrän lineaarinen alkuosa kuvastaa hiilidioksidia lehdesä sitovan Rubisco-entsyymin määrää. Talvella myös ilmarakokonduktanssi ja haihdutus olivat alimmillaan (Taulukko 14), ja kasviyksilöiden välinen vaihtelu oli suurempaa kuin kesällä.

Lehdet sopeutuvat matalaan valotasoon yleensä siis lisäämällä valonsidon-
nassa tarvittavan lehtivihreän määrää ja vähentämällä vastaavasti CO₂-
sidonnassa tarvittavan Rubisco-entsyymin määrää, sillä kasvin ei kannata
käyttää kalliita rakennusaineita (proteiineja) ylenmäärin sellaisiin fotosyntee-
sin entsyymeihin, joiden lisäys ei nosta fotosynteesinopeutta. Matalaan va-
laistukseen sopeutumisen seurauksena maksimaalinen nettofotosynteesitaso
laskee, kuten tässäkin havaittiin kesän ja talven tilannetta vertailemalla. Var-
jossa kasvavat lehdet saattavat myös vanhentua aiemmin ja nopeammin kuin
hyvässä valossa kasvavat lehdet. Kasvihuoneen valaistus kannattaakin pitää
kunnossa. Myös CO₂-lannoitus lisää kasvua jo melko alhaisilla säteilytasoi-
lla, kuten kuvasta 45 havaitaan.

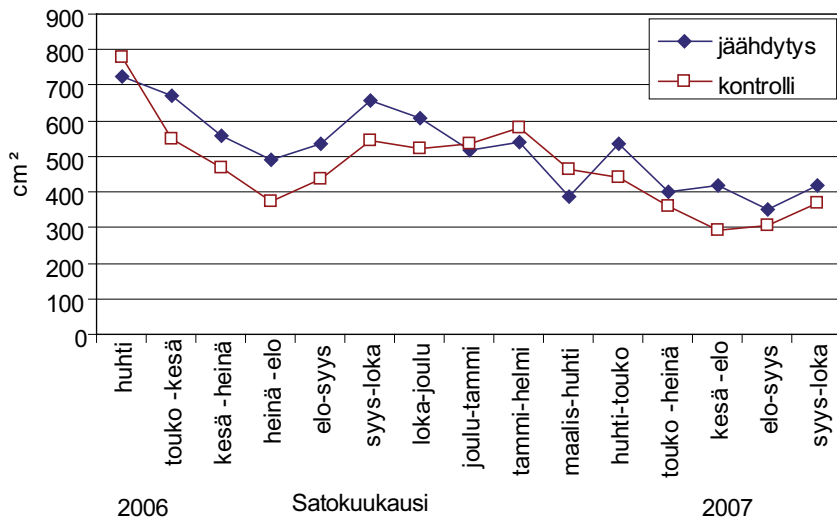
7.2.5 Kukkaverson rakenne muuttui

Suljetussa kasvihuoneessa kukkaverson koko oli tuore- ja kuivapainomittauk-
sissa suurempi kuin kontrollissa (Kuva 46 ja Taulukko 15). Lehtipinta-alat
olivat suuremmat (Kuva 47), lehtien lukumäärä hieman suurempi ja kukka-
varret pidempiä suljetussa huoneessa kuin kontrollissa. Lehtien lukumäärä oli
kevällä ja kesällä noin 8 kpl/kukkaverso ja talvella 9 kpl. Lehtien lukumäärä
oli vuonna 2006 noin 0,5 ja vuonna 2007 noin 0,8 lehteä enemmän jäähdy-
tyksen aikana suljetussa huoneessa kuin kontrollissa. Kuiva-ainepitoisuudet
olivat keskiarvona lähes samat tai hieman korkeammat jäähdytetyssä hu-
oneessa kuin kontrollissa, mikä osoittaa että kukkaverson kookkaampi rakenne
ei johtunut löysemmästä kasvusta kuin kontrollissa (Taulukko 15).

Vaikka kukkaverso oli kookkaampi jäähdytetyssä huoneessa kuin kontrollis-
sa, niin sen sisäinen rakenne oli käsittelyissä erilainen. Suljetussa huoneessa
kukkaverson kuivapainosta varren osuus oli hieman suurempi ja kukan osuus
hieman pienempi kuin kontrollissa jokaisena jäähdytysajan satojaksona. Leh-
tien osuudet puolestaan vaihtelivat koejäsenten välillä eri satojaksoissa.



Kuva 46. Yhden kukkaverson tuorepainot eri satokuukausina vuosina 2006–2007.



Kuva 47. Yhden kukkaverson lehtipinta-ala eri satokuukausina. Luvut ovat koejäsenittäin 12 kasvin satoversojen keskiarvoja.

Taulukko 15. Kukkaverson eri osien keskimääräiset tuore- ja kuivapainot (g) sekä kuiva-ainepitoisuus (%) jäähdytyskaudella eri koejäsenissä.

	Tuorepaino, g		Kuivapaino, g		Kuiva-ainepitoisuus %	
	Jäähdytys	Kontrolli	Jäähdytys	Kontrolli	Jäähdytys	Kontrolli
Varsi	10,88	8,73	2,89	2,30	26,5	26,3
Lehdet	9,92	8,49	2,81	2,32	28,3	27,3
Kukka	8,92	8,10	1,56	1,39	17,5	17,2

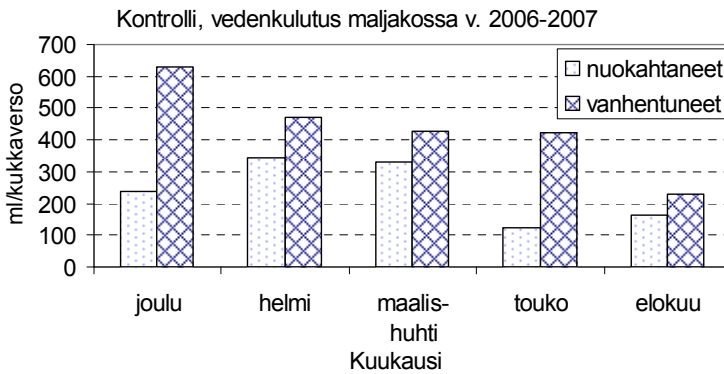
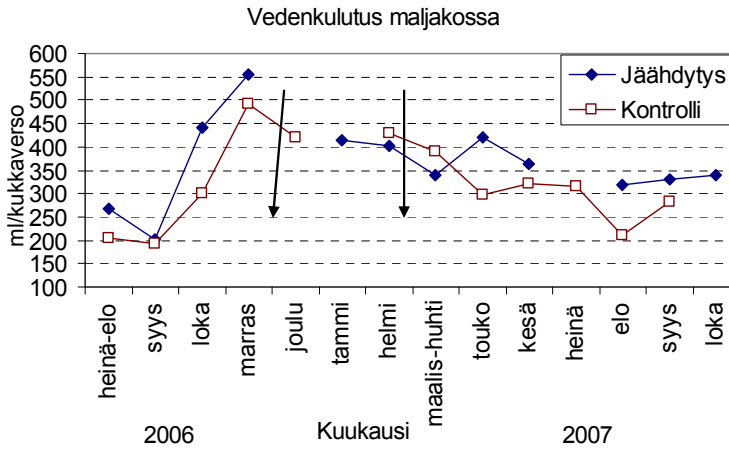
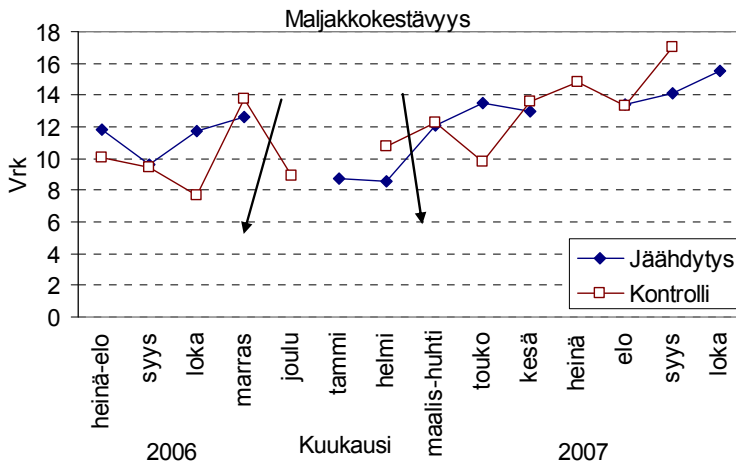
7.2.6 Maljakkokestävyys ei vaikutusta

Maljakkokestävyyksissä ei ollut selvää eroa käsittelyjen välillä. Keskimääräinen kestävyys jäähdytyskaudella oli suljetussa huoneessa 12,8 vrk ja kontrollissa 12,2 vrk. Kestävyys kuitenkin vaihteli satojaksosta toiseen (Kuva 48). Vedenkulutus maljakossa oli suurempaa suljetun kasvihuoneen kukkaversoilla, joilla oli myös suurempi lehtikoko kuin kontrollissa (Kuva 48). Kulutettu veden määrä ei korreloinut kestävyiden kanssa. Marraskuusta 2006 lähtien suljetun kasvihuoneen kukkaversot kuluttivat vettä maljakossa keskimäärin $1,6 \pm 0,2$ ml cm² lehtipinta-alaa kohden ja kontrollista $1,4 \pm 0,2$ ml cm². Nuokahtaneet kukat kuluttivat vähemmän vettä kuin vanhentuneet kukat. Talvella hyvin kestäneet kukkaversot kuluttivat enemmän vettä kuin keväällä ja kesällä (Kuva 48). Kukkaversojen lehtipinta-alat maljakossa olivat talvella suuremmat kuin kesällä, mikä selittää veden suurempaa kulutusta.

Kun kukkaverso laitetaan maljakkoon, se imee aluksi enemmän vettä kuin muutaman maljakossa vietetyn vuorokauden jälkeen (kuva 49). Kukan nuokahdus tapahtuu useimmiten juuri tässä voimakkaan imun vaiheessa kun veden virtaus johtojänteessä estyy tai on riittämätön.

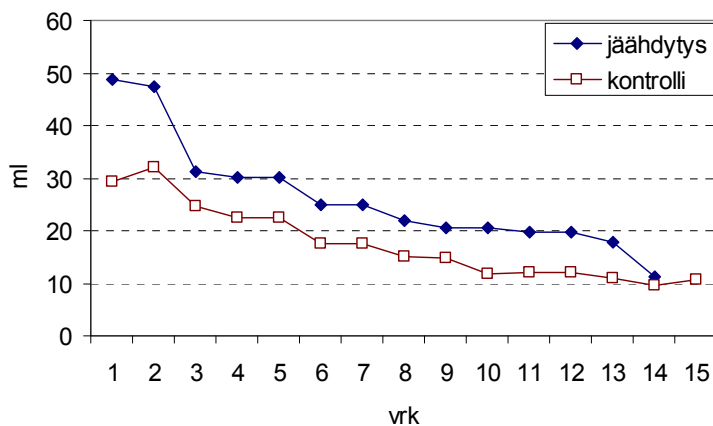
7.2.7 Kukkaverson kehitysaika nopeutuu korkeassa lämpötilassa

Kukkaverson kehittyminen silmusta korjuukypsäksi on hyvin riippuvainen ilman lämpötilasta. Korkeammassa lämpötilassa kontrollissa verso kehittyi nopeammin kuin jäähdytetyssä huoneessa (Kuva 50).

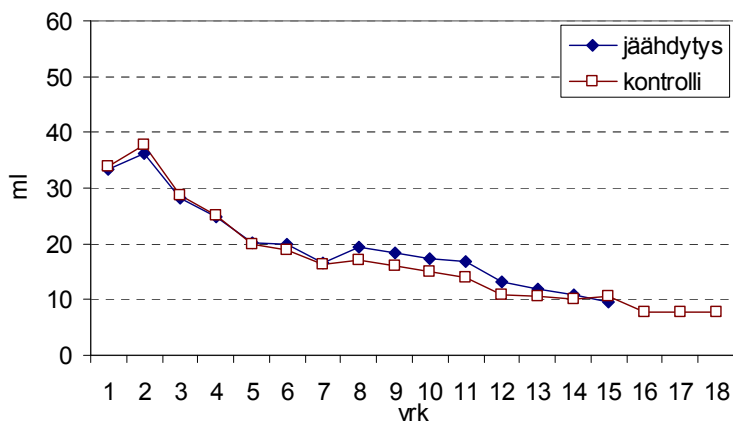


Kuva 48. Ruusun kukkaverson keskimääräinen maljakkokestävyys vuoro-
kausina ja yhden kukan keskimääräinen vedenkulutus (ml) maljakossa eri
kuukausina. Nuolien välisenä aikana talvella jäähdytys ei käytössä.

Vedenkulutus maljakossa heinä-elokuu 2006



Vedenkulutus maljakossa, syyskuu 2006



Kuva 49. Ruusun yhden kukkaverson keskimääräinen vedenkulutus (ml) kesällä ja syksyllä eri koejäsenillä.

Suljetussa huoneessa kehitysaika hernenupusta korjuuseen oli kaikkein tasaisin noin 14-15 vuorokautta. Kontrollissa vastaavasti kehitysaika vaihteli enemmän. Kuitenkin 1 cm:n versosta hernenuppuun vaihtelua oli kummassakin koejäsenessä hieman enemmän kuin hernenupusta korjuuseen (Kuva 50). Tämä kehitysvaihe olisi siten herkempi lämpötilaan. Vuorokausien lämpötilavaihtelut verson kehityksen aikana vaikuttavat paljon kehitysnopeuteen (Kuva 51).

Heinäkuussa 2006 suljetussa kasvihuoneessa oli ilman lämpötilan keskiarvo hieman alhaisempi kuin kontrollissa (Kuva 52). Korkeammassa lämpötilassa kukkaverso kehittyi nopeammin ja jäi lyhyemmäksi kuin alhaisemmassa lämpötilassa. Ero käsittelyjen välillä näkyi selvästi verson pituuskasvuvaiheessa (Kuva 52). Pituuskasvu lähes loppui sen jälkeen kun versoon oli kehittynyt nuppu.

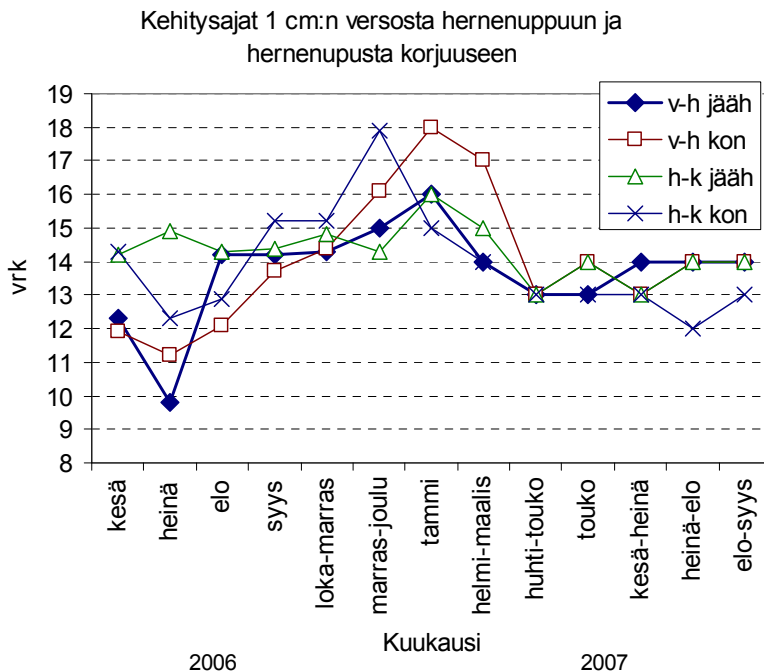
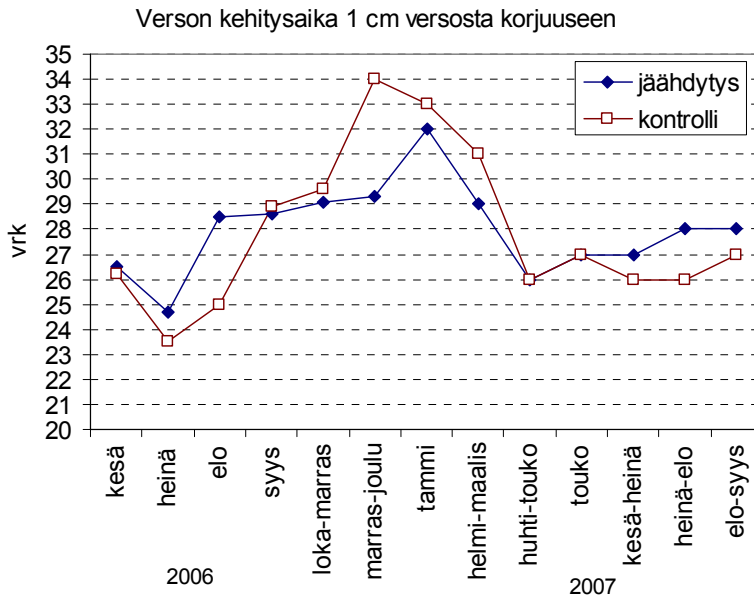
Talvella jäähdytyskauden ulkopuolella kehitysaika piteni selvästi kontrollissa, jossa lämpötilaa pidettiin suljettua huonetta alhaisemmalla tasolla (Kuva 50).

7.2.8 Suljetussa kasvihuoneessa sadonkorjuutavan vertailu

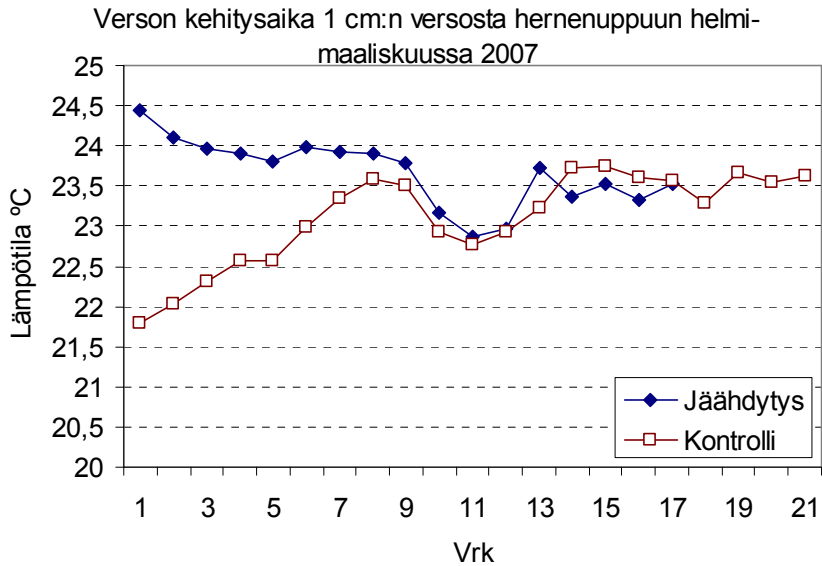
Jäähdytetyssä kasvihuoneessa Happy Hour-lajikkeella toteutettiin jaksottais-sadonkorjuun lisäksi jatkuvaa sadonkorjuutapaa. Se ei onnistunut kovin hyvin, koska satoa oli vaikea saada jatkuvaksi. Tällä sadonkorjuutavalla sadon määrä jäi alhaisemmaksi kuin jaksottaissadossa, mutta laatu parani. Sadon painossa ei ollut eroja, mutta kukkaversojen pituus kasvoi verrattuna jaksottaissatoon (Taulukko 16).

7.2.9 El Toro-lajikkeen havainnot

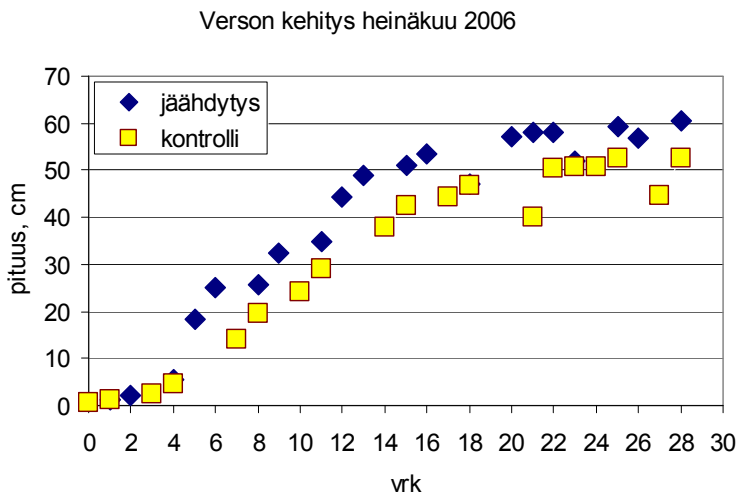
El Toro-lajikkeella havaintotaimia oli vain 15 kpl. Niiden perusteella kontrollihuoneesta saatiin koko viljelyjaksolta enemmän satoa (1194 kpl m^{-2} , 27 kg m^{-2}) kuin suljetusta huoneesta (1002 kpl m^{-2} , 24 kg m^{-2}). Jäähdytetystä huoneesta saatiin kuitenkin selvästi pidempiä kukkaversoja kuin kontrollista. Talvella 'El Toro' oli selvästi satoisampi ja kukkaversot pidempiä viileämmässä kontrollihuoneessa kuin lämpimämmässä suljetussa huoneessa. 'El Toro' teki paljon sokeita versoja toisena viljelyvuotena. El Toro-lajikkeen kehitysnopeus oli Happy Hour-lajiketta nopeampi. Siksi siitä ehdittiin kokeen aikana saamaan yksi satokerta enemmän kuin Happy Hour-lajikkeesta. El Toro-lajikkeen maljakkokestävyys oli erinomainen.



Kuva 50. Verson kehitysaika 1 cm:n versosta korjuuseen ja kehitysaika 1 cm:n versosta hernenuppuun (v–h) sekä hernenupusta korjuuseen (h–k) eri kuukausina ja vuosina.



Kuva 51. Ilman lämpötilan vaikutus ruusuwerson kehitysaikaan. Lämpötilan keskiarvo jäähdytyksessä 23,7 °C ja kontrollissa 23,1 °C.



Kuva 52. Verson kehityskaari silmusta korjuuseen. Kuvassa keskiarvo 10–12 yksilöstä/koejäsen. Lämpötilan keskiarvo jäähdytyksessä 25,4 °C ja kontrollissa 25,9 °C.

Taulukko 16. Jäähdytetyssä huoneessa jaksottais- ja jatkuvasta sadonkorjuutavasta kerättyjen ruusun kukkaversojen pituus pituusluokittain. Mukana 15 satokertaa.

Verson pituus cm	Kukkaversot kpl/m ²	
	Jaksottainen	Jatkuva
≥ 80	6	11
70–79	59	83
60–69	235	256
50–59	388	343
40–49	238	189
30–39	55	48
Summa	981	930

7.3 Tulosten tarkastelu

7.3.1 Sadon määrä ja laatu

Kokeissamme ruususadon määrä ei kasvanut suljetussa huoneessa verrattuna perinteiseen ilmastonhallintahuoneeseen (kontrolli). Mahdollisesti suljetussa huoneessa käyttämämme lämpötilan asetusarvot olivat Happy Hour-lajikkelle liian alhaiset, koska tämä lajike on nk. korkeaa lämpötilaa suosiva lajike. Suurin ero huoneiden välisissä olosuhteissa oli hiilidioksidipitoisuudessa. Kontrollihuoneen kasvit kasvoivat myös varsin hyvissä olosuhteissa, koska kuumimpinakin kesäpäivinä ilman kosteus pysyi hyvänä suurpainesumutuksen ansiosta. Tällä voi olla merkitystä koetuloksiin. Korkeampi hiilidioksidipitoisuus suljetussa huoneessa ei tässä kokeessa lisännyt sadon määrää. Silmuja puhkesi molemmissa osastoissa yhtä paljon ja sokeiden versojen määrä oli hyvin pieni molemmissa osastoissa. Hollantilaisissa suljetun kasvihuoneen kokeissa ruusun satomäärät ovat olleet korkeammat kuin perinteisessä ilmastonhallintahuoneessa (Medena 2007).

Suljetun huoneen korkeammassa hiilidioksidipitoisuudessa ja vähän alhaisemmassa lämpötilassa kuin kontrollissa sadon paino ja laatu parani. Kukka-versoista tuli myös pidempiä. Sadosta lasketun rahallisen tuoton mukaan paremmasta laadusta sai paremman tuoton.

Hieman alhaisempi huoneen lämpötila suljetussa huoneessa hidasti kukkaversojen kehitystä ja pideni satojaksoa. Pidemmällä jaksolla sadonkorjuu voi sopia hyvinkin puutarhan myyntistrategiaan.

7.3.2 Kasvien rakenne ja fotosynteesi

Kukkaversoista tuli kookkaampia suljetussa huoneessa kuin kontrollissa. Kukan koko kasvoi, lehdistä tuli suurempia ja varresta painavampia ja pidempiä. Koska kuiva-ainepitoisuuksissa ei ollut eroja huoneiden välillä, kookkaampi kukkaverso oli yhtä hyvälaatuinen kuin kontrollin pienempi kukkaverso.

Kasvin lehdet yhteyttivät enemmän korkeammassa hiilidioksidipitoisuudessa suljetussa huoneessa kuin kontrollissa. Suurempi saavutettu energiamäärä käytettiin kukkaversojen koon kasvattamiseen suljetussa huoneessa. Tehokkaampi fotosynteesinopeus ei siten vaikuttanut silmujen puhkeamismäärään ja versojen abortoitumiseen. Talvella ruusun lehdet olivat sopeutuneet alhaiseen valotasoon. Kuitenkin jo reilun 100:n $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ valotehossa korkeammassa hiilidioksidipitoisuudessa fotosynteesitehokkuus parani.

7.3.3 Maljakkokestävyys

Viljelyolosuhteilla ei ollut merkitystä maljakkokestävyyteen. Vedenkulutus oli talvella ja suljetun kasvihuoneen kukkaversoilla suurempaa kuin kontrollissa. Sen selittää suurempi lehtikoko. Kukkaversojen samansuuruiset kuiva-ainepitoisuudet voivat olla yksi selitys kestävyyserojen vähyyteen koejäsenien välillä.

7.3.4 Sadonkorjuutapa suljetussa kasvihuoneessa

Meillä oli vaikeuksia saada Happy Hour-lajike jatkuvasatoiseksi. Satomäärä jäi jatkuvassa sadonkorjuussa alhaisemmaksi kuin jaksottaisessa korjuussa. Jatkuvan sadonkorjuun kasvien vähäisempi satomäärä kompensoitui pidemmillä kukkaversoilla kuin jaksottaisessa korjuutavassa.

8 Yhteenveto

Tämä loppuraportti liittyy tutkimushankkeeseen 'Suljetun kasvihuonejärjestelmän kehittäminen ja kasvien tuotantotehokkuus korkeissa säteilytasoissa'. Hanke oli kaksiosainen: tekninen ja biologinen. Teknisessä osassa suunniteltiin ja rakennettiin jäähdytyslaitteisto ja biologisessa osassa tehtiin kasvitutkimukset.

Jäähdytyslaitteiston prototyypit asennettiin MTT Piikkiön kasvihuoneisiin. Laitteisto toimi seuraavasti. Kasvihuoneilmaa kierrätettiin jäähdytystornin kautta takaisin kasvihuoneeseen. Jäähdytystornissa ilmassa oleva energia siirtyi johtumalla ja vesihöyryn tiivistymisenä putoaviin vesipisaroihin. Veteen siirretty energia siirrettiin edelleen samalla tekniikalla toisessa tornissa ulkoilmaan. Lopulliseksi jäähdytysversioksi kehitettiin hankkeen kuluessa menetelmä, jossa kasvihuoneen ilman lämpöenergia siirrettiin veteen pisaraseinässä, jolloin energiatehokkuusluku nousi noin 10:stä 50:een. Suljetun kasvihuoneen taloudellisen jäähdytyksen merkitystä tuotantotekniikkaan tulevaisuudessa on myös arvioitu. Jäähdytysjärjestelmäkehityksestä ja toteutuksesta vastasi Biolan Oy.

Uuden jäähdytystekniikan avulla kasvihuoneet voitiin pitää ilmastollisesti suljettuina muutamaa kuuminta hellekauden iltapäivää lukuun ottamatta. Sen seurauksena hiilidioksidipitoisuus pysyi koehuoneessa korkeana verrattuna perinteiseen luukkutuuletuksella toimivaan huoneeseen, jossa hiilidioksidin syöttö lopetettiin luukkujen avautuessa yli 30%. Laitteistolla pystyttiin myös hallitsemaan ilman kosteutta.

Viljelykokeita tehtiin kasvihuonekurkulla, tomaatilla ja leikkoruusulla. Alustavia kokeita tehtiin myös salaatilla. Tomaatilla ja osassa kurkkukokeita tutkittiin myös välivalotuksen vaikutusta perinteiseen ylävalotukseen verrattuna suljetun kasvihuoneen olosuhteissa.

Kurkulla kesäaikaan saatiin vuonna 2005 24 %:n sadonlisä ja helteisenä kesänä 2006 40 %:n sadonlisä jäähdytetystä kasvihuoneesta verrattuna perinteiseen luukkutuuletushuoneeseen (kontrolli). Kasvifysiologiset mittaukset osoittivat, että kasvien rakenne oli jäähdytetyssä, suljetussa, huoneessa erilainen kuin kontrollissa. Suljetun huoneen korkeammassa hiilidioksidipitoisuudessa kasvien lehdet yhteyttivät enemmän ja yhteyttämistuotteet kerääntyivät hedelmiin. Matemaattinen malli osoitti, että suurin osa saadusta sadonlisästä johtui nimenomaan korkeasta hiilidioksidipitoisuudesta.

Kurkulla eri valotustavoilla oli merkitystä sadon määrään. Välivalotus paransi kurkun sadon määrää ja laatua talvella ja keväällä sekä jäähdytetyssä että kontrollihuoneessa. Kesällä välivalot antoivat paremman sadon kontrollihuoneessa. Kesällä suljetussa kasvihuoneessa välivalotuksesta ei ollut hyötyä.

Syys-talvikasvusto ei juurikaan hyötynyt jäädytyksestä, koska viilennystarve oli tässä vaiheessa vähäinen.

Tomaatilla kesäkauden sato oli jäädytysosastossa suurempi kuin kontrollissa. Keväällä ei ollut eroja sadon määrässä huoneiden välillä. Tomaatin lehdistä mitatuista fotosynteesinopeuksista voitiin havaita, että lehdet olivat sopeutuneet viljelyn loppuvaiheessa korkeaan hiilidioksidipitoisuuteen. Suljetun kasvihuoneen kasvit yhteyttivät enemmän kuin kontrollissa, mutta ero pieni ni loppukesää kohti. Valotustapa ei vaikuttanut sadon määrään eikä laatuun.

Monivuotisella leikkoruusulla koeaika oli vajaat kaksi vuotta. Sinä aikana sadon laatu ja paino parani selvästi suljetussa huoneessa verrattuna kontrolliin, mutta sadon kappalemäärissä ei ollut eroja. Suljetusta huoneesta saatiin kookkaampia kukkaversoja kuin kontrollista. Tukkuhintojen mukaan jäädytetystä huoneesta saatiin neliometriä kohden yli 50 euroa enemmän tuottoa kuin kontrollista koko viljelyaikana. Viljelytavalla ei ollut merkitystä maljakkokestävyyyteen. Lehdet yhteyttivät enemmän korkeammassa hiilidioksidipitoisuudessa.

Tutkimustulosten perusteella voitiin todentaa, että myös Suomen olosuhteissa kasvihuoneen jäädytys parantaa kasvien sadon määrää ja laatua. Lisäksi tutkimus osoitti, että kasvihuoneolosuhteiden optimointi ei ole vielä valmis. Jäädytyslaitteiston olemassaolo on edellytyksenä kasvihuoneen viljelyolosuhteiden parantamiselle nykyisestä. Tutkimusta tarvitaan niin optimaalisten hiilidioksidipitoisuuksien kuin lämpötilan, tekovalon, kastelun sekä lannoituksen suhteen. Tärkeä seikka energian käytössä on sen talteenotto, mitä pitäisi myös tutkia ja kehittää.

Suomi on suljetun kasvihuonetekniikan tutkimuksessa kärkimaita maailmassa, mikä on näkynyt alan kongresseissa ja tiedotusvälineissä niin meillä kuin muissa maissa. Uudesta tekniikasta on mahdollisesti kehittymässä Suomelle merkittävä teknologinen innovaatio koko Euroopan kasvihuoneutuotannolle, sillä tämä tekniikka on soveltumassa niin pohjoiseen kuin eteläänkin.

9 Kirjallisuus

- Hovi-Pekkanen, T. & Tahvonen, R. 2007. Effects of interlighting on yield and external fruit quality in year-round cultivated cucumber. *Scientia Horticulturae*, Painossa. doi:10.1016/j.scienta.2007.11.010
- Jarvis ,P. G. & Morison, J.I.L. 1981. The control of transpiration and photosynthesis by stomata. Teoksessa: Jarvis, P. G. & Mansfield, T.A. (eds.). *Stomatal physiology*. Society for Experimental Biology. Seminar Series 8. Cambridge: Cambridge University Press. s. 247–279.
- Luomala, E.M., Kaukoranta, T. & Särkkä, L.E. 2008. Altered canopy profile and biomass allocation in cucumber grown in a closed greenhouse at elevated CO₂. *Käsikirjoitus*.
- Luomala, E.M., Särkkä, L.E. & Kaukoranta, T. 2007. Increased cucumber production by greenhouse cooling. *GreenSys 2007*. Napoli, Italia, 4–6 Lokakuu 2007. *Acta Horticulturae*. *Käsikirjoitus*.
- Marcelis, L.F.M. 1993. Fruit growth and biomass allocation to the fruits in cucumber. 1. Effect of fruit load and temperature. *Scientia Horticulturae* 54: 107–123.
- Medema, D. 2007. Koelen roos verhoogt productie en kwaliteit. *Vakblad voor de Bloemisterij* 51/52: 56–57.
- Nederhoff, E.M. & Vegter, J.G., 1994. Photosynthesis of stands of tomato, cucumber and sweet pepper measured in greenhouses under various CO₂ concentrations. *Annals of Botany* 73: 353–361.
- Puutarha & kauppa 2006, nro:t 6–52 ja 2007 nro:t 1–20. *Kukkien tukkuhinnat*.
- Särkkä, L.E., Hovi-Pekkanen, T., Kaukoranta, T., Tahvonen, R. & Huttunen, J. 2006. Greenhouse cooling in summer in Finland – Preliminary results of climate control and plant response. *Acta Horticulturae* 719: 439–445.

10 Hankkeen julkaisut

- Kaukoranta, T. & Huttunen, J. 200x. Economic gain for cucumber production from greenhouse cooling. *Acta Horticulturae*. Painossa.
- Kaukoranta, T. & Huttunen, J. 2007. Economic gain for cucumber production from greenhouse cooling. Teoksessa: ISHS GreenSys2007 : High technology of greenhouse system management, October 4–6, 2007, Naples, Italy, Book of Abstracts. s. 58–59.
- Luomala, E-M, Särkkä, L.E. & Kaukoranta, T. 200x. Altered plant structure and greater yield of cucumber grown at elevated CO₂ in a semi-closed greenhouse. *Acta Horticulturae*. Painossa.
- Särkkä, L.E., Hovi-Pekkanen, T., Kaukoranta, T., Tahvonen, R. & Huttunen, J. 2006. Greenhouse cooling in summer in Finland – preliminary results of climate control and plant response. *Acta Horticulturae* 719: 439–445.
- Särkkä, L., Hovi-Pekkanen, T., Kaukoranta, T., Tahvonen, R. & Huttunen, J. 2007a. Kasvihuoneen jäähdytys kesällä - ensimmäiset tulokset. Teoksessa: Karhu, S. (toim. ed.). Sadonkorjuu - Tutkittua puutarhatuotantoa 2003–2005 Harvest - Horticultural research results 2003–2005. MTT:n selvityksiä 139. Jokioinen: MTT. s. 16–17. Saatavissa internetistä: <http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts139.pdf>
- Särkkä, L., Hovi-Pekkanen, T., Kaukoranta, T., Tahvonen, R. & Huttunen, J. 2007b. Greenhouse cooling in summer - preliminary results. Teoksessa: Karhu, S. (toim. ed.). Sadonkorjuu – Tutkittua puutarhatuotantoa 2003–2005 : Harvest - Horticultural research results 2003–2005. MTT:n selvityksiä 139. Jokioinen: MTT. s. 66–67. Saatavissa internetissä: <http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts139.pdf>
- Särkkä, L.E., Hovi-Pekkanen, T., Tahvonen, R. & Huttunen, J. 2006. Greenhouse cooling in summer in Finland – preliminary results of climate control and plant response. *Int. Symp. on Greenhouse Cooling*. Abstr. s. 67.
- Särkkä, L., Hovi-Pekkanen, T. & Tahvonen, R. 2006. Tästäkö ratkaisu kasvihuoneen ilmaston hallintaan? *Puutarha & kauppa* 10(6): 26–27.
- Särkkä, L.E., Luomala, E-M. & Kaukoranta, T. 2007. Increased cucumber production by greenhouse cooling. Teoksessa: ISHS GreenSys2007: High technology for greenhouse system management, October 4–6, 2007, Naples, Italy, Book of Abstracts. kustannuspaikkakunta: kustantaja? s. 137–138.

Käsikirjoitukset

Luomala, E-M., Särkkä, L.E. & Kaukoranta, T. Altered canopy profile and biomass allocation in cucumber grown in a closed greenhouse at elevated CO₂.

Luomala, E-M., Alinikula, M., Särkkä, L.E. & Hovi-Pekkanen, T. Alterations in photosynthetic capacity and foliar nutrient concentrations of tomato plants grown in a closed greenhouse at elevated CO₂.

Gradu-työt

Alinikula, M. 200x. Tomaatin lehtien fotosynteettiset ominaisuudet ja ravinnepitoisuudet suljetun kasvihuoneen korkeassa CO₂-pitoisuudessa.

Kähönen, H. 200x. Kasvualustan jäähtymisen merkitys kurkun satoon ja kasvuun.

Muiden kirjoittamat lehtiartikkelit

Arkesteijn, M. 2007. Ervaringen met (semi)gesloten kassen in Finland en Frankrijk. Nederland loopt voorop met ge conditioneerd telen. Onder Glas 12: 54–55.

Haavisto, P. 2007. Jäähdytetty kasvihuone nostaa kesän kurkkusatoja. Koe-lypsy 1: 4–5.

Pizzarro, V. 2006. Alldeles för varmt. Hortica 22(6): 10–11.

Puutarhasanomat 2007. Markkinoille kaksi ratkaisua: Suljettu huone nostaa satoa jopa kolmanneksen. Puutarha-Sanomat 7: 12–13.

