

LED-valaistuksen tehokkuus kasvihuonekurkun viljelyssä

LED-belysningens effektivitet vid odling av gurka i växthus

Liisa Särkkä, Kari Jokinen, Timo Kaukoranta, Daniel Sjöholm ja Kristian Blomqvist



LED-valaistuksen tehokkuus kasvihuone- kurkun viljelyssä

Liisa Särkkä, Kari Jokinen, Timo Kaukoranta, Daniel Sjöholm ja Kristian Blomqvist

ISBN: 978-952-487-585-1

ISSN 1798-6419

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-585-1>

www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti173.pdf

Copyright: MTT

Kirjoittajat: Liisa Särkkä, Kari Jokinen, Timo Kaukoranta, Daniel Sjöholm, Kristian Blomqvist

Julkaisija ja kustantaja: MTT Jokioinen

Julkaisuvuosi: 2014

Kannen kuva: Tutkimuskasvihuoneet, Kari Jokinen

LED-valaistuksen tehokkuus kasvihuonekurkun viljelyssä

Liisa Särkkä¹⁾, Kari Jokinen¹⁾, Timo Kaukoranta²⁾, Daniel Sjöholm³⁾ ja Kristian Blomkvist³⁾

¹⁾ MTT Kasvintuotannon tutkimus, puutarhatuotanto, Toivonlinnantie 518, 21500 Piikkiö

²⁾ MTT Kasvintuotannon tutkimus, puutarhatuotanto, Tietotie, 31600 Jokioinen

³⁾ Yrkeshögskolan Novia, forskning och utveckling, Bomullgränd 3, 65200 Vasa

Tiivistelmä

LED-valaistuksen soveltuvuudesta ja energian kulutuksesta ei ole korkeilla kasvustoilla aikaisemmin tehty kokeita. Tässä hankkeessa vertasimme LED-valaisinten soveltuvuutta kasvihuonekurkun valotukseen kun kontrollina oli HPS (suurpainenaatrium)-valaisin. Kasvihuonekurkulla käytetään yleisesti ylävalojen lisäksi välivaloja, jotka asennetaan kasvuston puoliväliin valaisemaan alempia lehtikerroksia. Tutkimuksessa olivat ylä- ja välivaloina molemmat edellä mainitut valaisintyypit ja lisäksi mukana oli nk. hybridiratkaisu, jossa ylävalona oli HPS ja välivalona LED. LED-valona oli Valoya-yrityksen AP 67 valaisin ja HPS-valona Philipsin 400 W:n polttimot ylävalona ja 250 W:n polttimot välivalona. LED-ylävalon asennusteho oli 128 W/m² ja välivalon 64 W/m². HPS:n ylävalon asennusteho oli 180 W/m² ja välivalon 56 W/m². Viljelykokeita tehtiin kaksi, joista toinen oli talvella ja toinen kesällä. Koejäsenet oli sijoitettu eri viljelyhuoneisiin. Molemmissa kokeissa valotustunnit olivat samansuuruiset eri koejäsenissä. Kesällä valotettiin vähemmän kuin talvella johtuen suuresta luonnonvalon määrästä.

Talvilviljelyssä hybridihuoneessa (HPS+LED) viljellyn kurkun kilosato oli suurin (24kg/kasvi) ja LED (LED+LED) huoneen sato pienin (18 kg/kasvi). HPS huoneen sato oli 21 kg/kasvi. HPS (HPS+HPS) huoneen ja hybridihuoneen kurkkujen kappalemäärät olivat samat. Kesällä satomäärissä ei ollut eroja eri huoneiden välillä.

LED huoneen kasvit olivat talvella pidempiä ja niissä oli vähemmän lehtiä kuin muissa huoneissa. LED huoneen kasvien lehtien koko oli suurin. Hybridihuoneen fotosynteesitehokkuus oli välivalon kohdalla muita huoneita parempi. HPS-ylävalon alla kasvaneiden kasvien ylälehtien lämpötila oli korkeampi kuin LED-valojen alla kasvaneiden kasvien. Lämpösäteily HPS-valaisimesta kohotti kasvien lämpötilaa, mikä edisti lehtien kehitysnopeutta ja kukka-aiheiden muodostumista. HPS välivalon läheisyydessä kurkunlehtien lämpötila oli 2-3 °C korkeampi kuin LED-valon läheisyydessä. Liian korkea lämpötila saattaa olla haitallinen kasvien kehityksen kannalta (mm. yhteyttämistehokkuus).

LED huoneen sähkönkulutus oli 20-25 % muita huoneita pienempi kurkkukiloa kohti. Toisaalta LED-huoneessa käytettiin talvella huomattavasti enemmän lämmitystä kurkkukiloa kohti kuin muissa huoneissa, koska LED-huoneessa sato oli keskitalvella alhainen. Alhaisen sadon syy oli mahdollisesti LED-huoneen matala asennusteho. Hybridihuone kulutti talvella sähköä 10 % vähemmän kurkkukiloa kohti kuin HPS huone ja kesällä suunnilleen yhtä paljon.

Tämän tutkimuksen perusteella hybridiratkaisu kurkun valotuksessa osoittautui tehokkaaksi valotusratkaisuksi ympärivuotisessa kurkun viljelyssä. Kokeessa käytetty LED-valaisin ei ollut riittävän tehokas ylävaloksi. Valotuksen ja lämmityksen käytön tulokset eri valaistustavoissa mahdollistavat vaihtoehtoisten valaistustapojen muuttuvien kustannusten ja mahdollisten investointikustannusten vertailun.

Avainsanat:

Energia, kasvihuonetuotanto, kustannus, kurkku, LED, sato, valotus.

Efficiency of LED lighting in greenhouse cucumber production

Liisa Särkkä¹⁾, Kari Jokinen¹⁾, Timo Kaukoranta²⁾, Daniel Sjöholm³⁾ ja Kristian Blomkvist³⁾

¹⁾ MTT Plant Production Research, Horticulture, Toivonlinnantie 518, 21500 Piikkiö, Finland

²⁾ MTT Plant Production Research, Horticulture, Tietotie, 31600 Jokioinen, Finland

³⁾ University of Applied Science Novia, research and development, Bomullgränd 3, 65200 Vasa, Finland

Abstract

A limited amount of data is available for the applicability and energy efficiency of LED lighting in high-wire greenhouse production. In the present study we compared the performance of LED luminaires with the traditional HPS (high pressure sodium) lamps in a year-around cucumber production. In addition to top lighting, the experimental setup included interlighting in order to improve the lighting conditions at lower level of the canopy.

Two independent experiments were conducted in winter and summer. Lighting treatments (top + interlighting) located in separate greenhouse compartments were: HPS+HPS, HPS+LED and LED+LED. LED luminaires (AP 67) were provided by Valoya Ltd. HPS bulbs were from Philips Ltd (400 W at the top and 250 W as interlighting). Installation powers applied for the top and interlighting were: LED 128 W/m² and 64 W/m², and HPS 180 W/m² and 56 W/m². Duration of daily supplementary lighting was depended on daily solar radiation and was equal in all compartments.

In the winter experiment first class cucumber yield was higher (24 kg/plant) under HPS+LED lighting than under HPS+HPS (21 kg/plant) and LED+LED (18 kg/plant) lighting. The differences between the treatments were statistically significant. The highest fruit number per plant was in HPS+HPS and in HPS+LED. In the summer, no statistically significant yield differences were found.

In the winter, plants in the LED+LED compartment were taller and had a lower number of leaves than plants in the other compartments. The rate of photosynthesis measured at the level of the interlights was highest in the HPS+LED compartment. Infrared radiation from the HPS lights warmed plant surfaces. The HPS lighting raised leaf temperatures 2 to 3 °C on the upper part of the canopy and at the level of interlights as compared to the LED lighting. This may have enhanced leaf and fruit formation rate and enhanced transport of assimilates to the fruits. Yet, leaf temperatures at the interlight height may have been higher than optimal for net photosynthesis.

Electricity consumption (kWh/kg fruit) was 20 to 25 % lower in the LED+LED compartment than in the other compartments. However, in LED+LED fruit growth was low in mid-winter and heating needed to be increased to compensate for low heat output from the LED lighting. These factors resulted in significantly higher heat consumption (kWh/kg fruit) in LED+LED than in the other compartments. In summer electricity consumptions in HPS+LED did not differ from consumption in HPS+HPS but in winter the electricity consumption was 10 % lower in HPS+LED.

The overall results of this study suggest that the HPS+LED lighting is an efficient lighting approach in the year-around high-wire cucumber production in Scandinavian conditions. It can be an alternative to the current HPS+HPS lighting. Pure LED+LED lighting could not perform as well as the other alternatives, mainly probably because total light output from the tested lighting could not drive optimal development and sufficient photosynthesis.

The obtained data on lighting and heating in the three tested lighting systems allows calculation of direct energy costs and thus estimation of possible cost of investment.

Keywords:

Cost, Cucumber, Energy, Greenhouse production, LED, Supplementary lighting, Yield.

Alkusanat

Kasvihuoneissa tekovalojen käyttö on Suomen oloissa välttämätöntä, jotta kasveja voidaan viljellä tehokkaasti. Viljelytekniikan ansiosta kotimaisia kasviksia saadaan ympäri vuoden, mikä takaa myös tuottajille ja työntekijöille säännöllisen tulon.

Tämä tutkimus on osa suurempaa hanketta ”VäxthusLED 2012-2014”, jossa yhteistyökumppaneina olivat MTT ja ammattikorkeakoulu Novia Vaasan yksikkö. MTT:n tehtävänä oli kurkun ja Novian tehtävänä tomaatin LED-valotuksen käyttökelpoisuus- ja kannattavuustutkimus.

VäxthusLED 2012-2014 tutkimushanketta koordinoi ammattikorkeakoulu Novian Vaasan yksikkö. Päärahoittajana oli Pohjanmaan Liitto, jonka kautta saimme EAKR-rahoituksen. Lisäksi hanketta rahoittivat Närpiön kaupunki, Vaasanseudun Kehitys Oy, Österbottens Svenska Producentförbund r.f.sekä MTT ja Novia. Kiitämme kaikkia rahoittajia ja ohjausryhmän jäseniä hyvästä yhteistyöstä.

Haluamme erityisesti kiittää professori Carl-Otto Ottosenia ja assistentti Helle Kjærsgaard Sørensenia Århusin yliopistosta kurkun fotosynteesi- ja klorofyllimittauksista talvella 2014 ja Valoya-yritystä spektrometrin lainaamisesta sekä vanhempi tutkija Juha Näkkilää ja tutkimusmestareita Elvi Hellsteniä ja Päivi Tuomolaa sekä muita avustavia henkilöitä MTT:ssa kasvustojen hoidosta ja tulosten keruusta. Lisäksi kiitämme vanhempi tutkija Eeva-Maria Tuhkasta kesän fotosynteesimittausten avustuksesta MTT:ssa.

Projektipäällikkö Kristian Blomqvist (Novia) oli hankkeen koordinaattori. Tutkija Daniel Sjöholmin (Novia) vastuulla oli tomaatin tutkimuksen käytännön toteutus. Daniel Sjöholm avusti myös kurkun mittauksissa ja tarkasti raportin ruotsinkielisen. Erikoistutkijoiden Liisa Särkän ja Kari Jokisen sekä vanhempi tutkija Timo Kaukorannan vastuulla oli MTT:n tutkimuksen toteutus.

Kaarinassa 10.12.2014

Tekijät

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	7
1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet.....	7
2 Aineisto ja menetelmät.....	9
2.1 Kesäajan viljelytutkimus.....	9
2.1.1 Koejärjestely ja viljelyaika.....	9
2.1.2 Tekovalotus.....	9
2.1.3 Kasvihuoneen olosuhdemittaukset.....	11
2.1.4 Sadon määrä ja laatu.....	11
2.1.5 Kasvustohavainnot.....	11
2.1.6 Hedelmien makutesti.....	12
2.1.7 Kesän fotosynteesimittaukset.....	12
2.1.8 Energian kulutuslaskelmat.....	12
2.2 Talviajan viljelytutkimus.....	13
2.2.1 Koejärjestely ja viljelyaika.....	13
2.2.2 Tekovalotus.....	13
2.2.3 Kasvihuoneen olosuhdemittaukset.....	15
2.2.4 Sadon määrä ja laatu.....	16
2.2.5 Kasvustohavainnot.....	16
2.2.6 Hedelmien makutesti.....	16
2.2.7 Talven klorofylli- ja fotosynteesimittaukset.....	16
2.2.8 Energian kulutuslaskelmat.....	16
3 Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	17
3.1 Kesäajan viljelytutkimus.....	17
3.1.1 Kesällä saadun sadon määrä ja laatu.....	17
3.1.2 Kesäkasvuston koko ja ulkonäkö.....	19
3.1.3 Kesäkurkun hedelmien makutesti.....	21
3.1.4 Kesäkurkun lehtien fotosynteesimittaukset.....	22
3.1.5 Kesäviljelyssä kasvihuoneiden olosuhteet.....	23
3.1.6 Kesäviljelyn kastelu- ja valumaveden määrä.....	25
3.2 Talviajan viljelytutkimus.....	29
3.2.1 Talvella viljellyn kurkun sadon määrä ja laatu.....	29
3.2.2 Talvikasvuston koko ja ulkonäkö.....	30
3.2.3 Talvikurkun hedelmien makutesti.....	32
3.2.4 Talvikurkun lehtien, kasvuston ja hedelmien lämpötila.....	32
3.2.5 Kasvuston spektrimittaukset.....	36
3.2.6 Talvikurkun lehtien klorofyllipitoisuus.....	37
3.2.7 Talvikurkun lehtien fotosynteesitehokkuus.....	37
3.2.8 Talviviljelyssä kasvihuoneiden olosuhteet.....	38
3.2.9 Talviviljelyn kastelu- ja valumaveden määrät.....	40
3.3 Kesä- ja talviviljelyn energiankäyttö sekä kustannus.....	44
3.3.1 Koevalintojen vaikutuksia energiakustannuksiin.....	47
3.4 Johtopäätökset.....	48
3.4.1 Valotustapojen biologiset vaikutukset.....	48
3.4.2 Energian käytön tehokkuus, valotustapojen energiankulutus ja herkkyys energian hinnalle.....	49
4 Yhteenveto.....	51
Liitteet.....	52

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

LED-valojen tekninen kehitys on hyvin nopeaa. Markkinoilla on useita eri valmistajien LED-valoja, jotka on tarkoitettu kasvihuonekasvien viljelyyn, ja joiden tekniset ominaisuudet (mm. spektrin koostumus, valaisimen valaistusteho ja valon katealue) poikkeavat paljon toisistaan. Tällä hetkellä LED-valojen tehokkuus on todennettu matalien kasvien, kuten salaatin ja koristekasvien viljelyssä, joissa käytetään alhaista valotustehoa.

Korkeilla kasveilla, kuten kurkulla ja tomaatilla, jossa valotustehon tarve on moninkertainen salaattiin verrattuna, LED-valoja ei ole aikaisemmin Suomessa testattu täydellisissä koeolosuhteissa. Kurkun ja tomaatin valotus on vaativaa, koska kasvit kasvavat korkeiksi, vähintään 3 metrin korkeuteen kasvualustasta ja kasvun tasapaino verson ja hedelmien välillä täytyy ylläpitää erilaisissa valo-oloissa. Perinteisesti kasvustoja on valotettu suurpainenatrium (HPS)-ylävaloilla. Valaisimet on asennettu korkealle kasvuston yläpuolelle, jotta valotus on tasaista koko pinta-alalle, eikä lämpösäteily vioita kasveja. Ylävalon teho ei kuitenkaan riitä valaisemaan kasvien alaosia, jolloin kehittyvät hedelmät kärsivät valon puutteesta niukan luonnonvalon aikaan. Kasvuston puoliväliin voidaan kuitenkin asentaa välivaloja, jolloin koko kasvuston valo-olot paranevat. Kun HPS-valoa käytetään välivalona, pitää lamppujen etäisyyden kasveista olla riittävän suuri, jotta niiden lämpösäteily ei vahingoita lehtiä.

HPS-ylä- ja välivalot voidaan korvata erityyppisillä LED-valoilla. Ongelmana korkeiden kasvustojen valotuksessa on toistaiseksi ollut se, että LED-valojen valoteho on ollut liian pieni ylävalona käytettäessä. Jos LED-valojen teho riittää, parhaiden LED-valojen etuna on periaatteessa parempi energiatehokkuus ja valon laadun (spektri) tarkempi säätelymahdollisuus verrattuna HPS-valoihin.

LED-valoihin vaihdettaessa myös valaisimista tulevan lämmön jakautuminen kasvihuoneessa muuttuu. Kesäoloissa LED alentaa lehtien lämpötilaa ja vähentää kasvihuoneen lämpökuormaa ja tuuletustarvetta. Vaikka asennusteholtaan (W/m^2) samansuuruiset HPS- ja LED-valot tuottavat huoneeseen käytännössä suunnilleen yhtä paljon lämpöä, HPS-valaisimien lämmöstä suurempi osa tulee pintaan kohdistettuna säteilylämpönä. LED-valaistukseen vaihdettaessa valaistuksen tuottaman lämmön kokonaismäärän ja sen jakautumisen erilaisuus voi olla merkityksellistä. HPS-valotettuihin kasvihuoneisiin ei aina ole edes suunniteltu niin suurta lämmityskapasiteettia, että se riittäisi, jos LED-valojen asennusteho (W/m^2) on alhaisempi kuin HPS-valojen asennusteho.

Valolähteitä, joiden valon spektri on samanlainen, voidaan verrata mittaamalla niiden tuottaman fotosynteesistä aktiivisen säteilyn (PAR) määrää. Joskus myös HPS- ja LED-valoja verrataan niiden kuluttaman sähkön ja tuottaman PAR'in perusteella (W/m^2 per $\mu mol/m^2s = J$ per μmol). Erityyppisten valaisimien spektri on kuitenkin erilainen, joten tämä vertailu ei osoita riittävän hyvin valaisimien tehokkuutta kasvien kasvatuksessa. Spektristä johtuvat erot voivat olla merkittäviä etenkin keskitalvella ja viljelyjakson pilvisinä päivinä, jolloin auringon valo ei täydennä valaisimien tuottamaa valon spektriä. Korkeilla kasveilla valaisimien vertailua mutkistaa vielä valaisimista lehtiin ja hedelmiin tulevan lämmön – suoraan säteilynä tai ilman kautta johtuneena – erilainen määrä.

Kurkun ja tomaatin kasvatuksessa käytettävien valaisimien tehokkuuden mittaamiseen ei ole tällä hetkellä muuta luotettavaa tapaa kuin verrata sadon tuottoa hyvin kontrolloidussa kokeessa.

1. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia yhden LED-valaisintyyppin käyttökelpoisuus kurkun viljelyssä verrattuna HPS-valaisimeen. Tutkimuksen valaistusratkaisu perustui sekä ylä- että välivalon käyttöön (HPS+HPS, HPS+LED ja LED+LED). Tutkimuksissa viljeltiin kurkkua runsaan luonnonvalon aikana kesällä ja niukan luonnonvalon aikana talvella.

2. Satotuloksista sähkön ja lämmön käytöstä laskettiin valotustapojen muuttuvat kustannukset eri vuodenaikoina. Muuttuvien kustannusten pohjalta voi arvioida, paljonko LED-valaisimien investointikustannus saa olla, jotta niillä voi korvata HPS-valaisimet.
3. Valomittausten ja kasvuston lämpötilan mittauksista saadaan tietoa, joka selittää valaisinten vaikutusta kasvuun ja kasvien kehitykseen. Kasvihuoneen laitteiden ja olosuhteiden mittaukset näyttävät valaisinten vaikutuksen lämmityksen ja tuuletuksen tarpeeseen.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Kesäajan viljelytutkimus

2.1.1 Koejärjestely ja viljelyaika

Kokeen koejäsenet olivat seuraavat:

1. LED ylävalo + LED välivalo
2. HPS ylävalo + LED välivalo, nk. hybridi
3. HPS ylävalo + HPS välivalo

Jokainen koejäsen oli omassa kasvihuoneosastossaan, jonka pinta-ala oli 50 m².

Kurkkulajike oli 'Annica'. Kasvualustana oli Kekkilän vihanneslevy Kekkilän Solo kasvatusaltaassa. Kurkun siemenet kylvettiin Grodanin kivivillakuutioihin (6,5 G). Istutuksen jälkeen taimitiheys oli 3.5.-18.6. välisenä aikana 3,9 tainta/m² ja destruktiivisten havaintojen jälkeen 18.6. jälkeen se oli 3,4 kpl/m². Biologinen tuholaistorjunta oli käytössä. Kasvitauteja ei ollut. Kasveja lannoitettiin Kekkilän kurkulle tehtyjen ohjeiden mukaan automaattisesti tippukastelun mukana. Lannoitteina käytettiin vesiliukoisia lannoitteita MgN, NKS ja kurkun Superex.

Aikataulu:

Kylvö 12.4.2013 (vk 15)

Istutus 3.5.2013 (vk 18)

Sadonkorjuu alkoi 24.5.2013 (vk 21)

Satoviikkojen lukumäärä oli 11 (täysiä satoviikkoja oli 9)

Viljelyn lopetus 29.7.2013 (vk 31)

2.1.2 Tekovalotus

Valotuksessa käytettiin ylävaloina Philipsin SON-T Green Power 400 W ja välivaloina Philipsin SON-T Pia 250 W ja LED-valoina sekä ylä- että välivaloina Valoyan AP67. LED-valojen sähkötehoksi ilmoitettiin 190 W. Lämpövaikutuksen pitäisi laskennallisesti olla LED+LED- huoneessa 40 % alhaisempi kuin HPS+HPS- huoneessa. Taulukossa 1 on valojen lasketut asennustehot W/m² koko huoneessa ja erikseen koeriveissä. Koerivit olivat keskellä huonetta ja saivat enemmän valoa kuin reunarivit. Säteily määrän µmol/m²s-mittaukset tehtiin PAR-valoanturilla (LI-COR quantum sensor LI-190 SA, LI-COR Inc., USA).

Taulukko 1. Valojen laskennalliset asennustehot W/m² koko huoneessa ja koeriveissä erikseen.

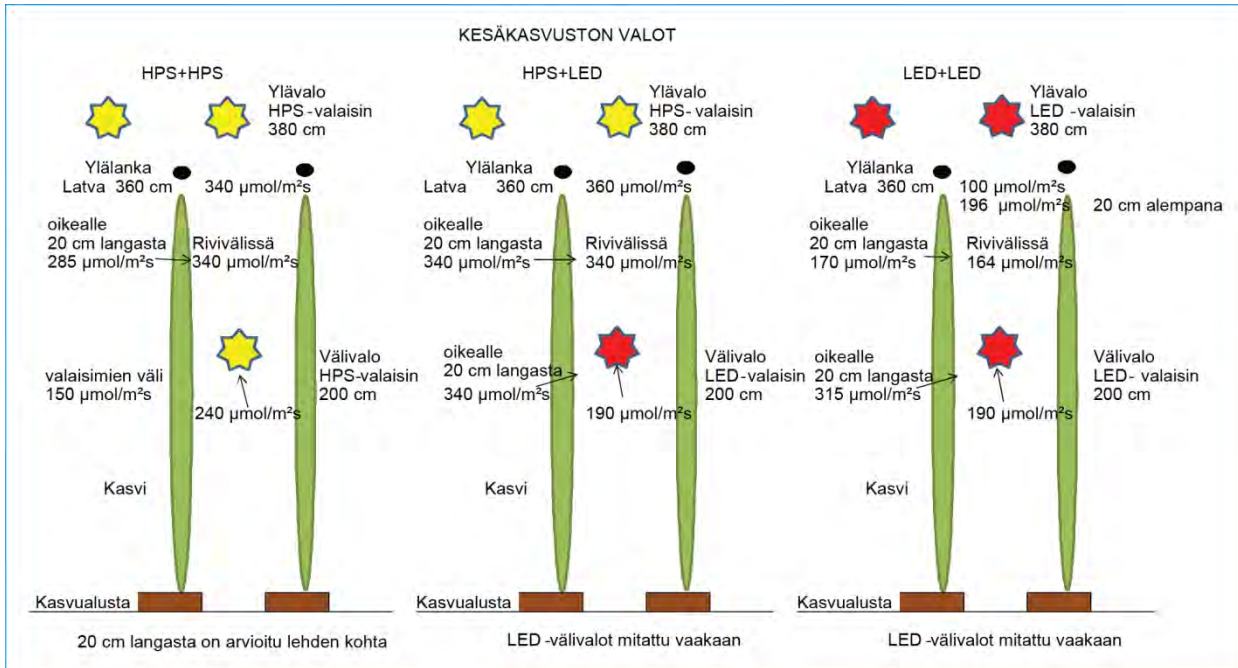
Tabell 1. Belysningens beräknade installeringsseffekt W/m² i hela huset och i försöksrader skilt för sig.

Koejäsen	Koko huone		Koerivit	
	Ylävalo	Välivalo	Ylävalo	Välivalo
LED+LED	91,2	45,6	128	64
HPS+LED	160	45,6	180	64
HPS+HPS	160	40	180	56

Valokalusteet olivat istutuksen jälkeen lähellä taimia ja niitä nostettiin kasvien kasvaessa. Lopullinen HPS ylävalojen asennuskorkeus oli 395 cm ja LED ylävalojen 380 cm (Liite). Välivalojen asennuskorkeus oli 200 cm lattiasta. Kuvassa 1 on PAR-säteily määrän mittaukset µmol/m²s eri korkeuksilla. Välivalot oli asennettu joka toiseen kasviriiviin. LED-välivalot oli asennettu siten, että ne valottivat molempia kasviriivin puolia samalla kohdalla kasvustoa (Liite). Kasvuston korkeus lattiasta oli täyskorkeassa kasvustossa korkeimmillaan noin 360 cm. Kasvien viljelykourut olivat lattialla, etäisyys kasvin tyvestä lattiaan oli noin 40 cm.

Valotusaika oli 20 h/d klo 03-23. Välivalotus aloitettiin 9.5.2013 ja ylävalotus 10.5.2013 klo 8-23. Ylävalotusaikaa lisättiin seuraavana päivänä klo 03-23 ja välivalojen täysimittainen valotus aloitettiin 13.5. Sä-

teilyrajana ylävalojen sammumiselle oli ulkona mitattu kokonaissäteily 300 W/m^2 ja välivalojen sammumiselle oli säteilyrajana 900 W/m^2 . Tämä korkea lukema laitettiin sen takia, että välivalot paloivat koko ajan. Kokonaissäteily mitattiin CM 6B pyranometrilla, joka mittaa valoa 305-2800 nm:n aallonpituusalueella (Kipp & Zonen, Hollanti). Kesäkuun hellejakson aikana valot sammutettiin. Heinäkuussa ylävalot sammutettiin ja välivalon säteilyraja oli 300 W/m^2 , kun ulkoilman lämpötila nousi yli $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ja 10.-25.7. välisen ajan yli $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Taulukossa 2 on valotustuntien määrät viljelyn aikana.



Kuva 1. Kaavakuviot valomittauksista täysimittaisen kasvuston eri korkeuksilla lattiasta. Kuvassa on kolme eri huonetta, joissa eri valokombinaatiot. Keltaiset tähdet kuvaavat HPS-valaisimia ja punaiset LED-valaisimia. Välivaloista saatu säteily mitattiin vaakasuuntaan ja ylävaloista pystysuuntaan.

Figur 1. Ljumsätningar utfördes i växtbeståndet vid olika höjder från golvet. Figuren visar tre olika växthusavdelningar med olika belysningskombinationer. Gula stjärnor föreställer HPS-lampor och röda LED-lampor. Strålningen från mellanbelysningen mättes i vågrät riktning och strålningen från toppbelysningen mättes i lodrätt riktning.

Taulukko 2. Valotustuntien lukumäärä kokeen aikana viikkosummina ja yhteensä koko kokeen aikana erikseen ylä- ja välivaloilla. Lihavoitu teksti kuvaa valolähdettä.

Tabell 2. Antalet belysningstimmar under försökstiden som veckosummor och sammanlagt under hela försökstiden skilt med mellan- och toppbelysning. Fet text indikerar ljuskällan.

Viikko-numero	Ylävalot tunti/vk			Välivalot tunti/vk		
	LED+LED	HPS+LED	HPS+HPS	LED+LED	HPS+LED	HPS+HPS
19	58	55	58	58	0	58
20	83	83	83	139	131	139
21	103	102	102	139	138	139
22	72	72	72	89	89	89
23	5	5	5	61	61	61
24	86	86	86	137	137	137
25	58	58	58	119	119	119
26	0	0	0	85	85	85
27	40	40	40	102	102	102
28	23	23	23	92	92	92
29	59	60	60	123	123	123
30	41	41	41	107	107	107
31	0	0	0	19	19	19
yhteensä	627	624	627	1270	1204	1270

2.1.3 Kasvihuoneen olosuhdemittaukset

Kasvihuoneautomaattikka ItuCAG MS 100 rekisteröi ulkoilman ja kasvihuoneiden olosuhteet: lämpötilat huoneessa ja putkissa, ilman suhteellinen kosteus, ilman hiilidioksidipitoisuus, luukkujen avautumisaste, verhojen asennot. Päivälämpötilan tavoite oli 20-21 °C, yölämpötilan tavoite oli 19-20 °C, tuuletusasetus oli 23-24 °C. Hiilidioksidin tavoitetaso valotuksen aikaan oli 1000 ppm. Kun luukut olivat auki yli 15 %, pitoisuus laskettiin 450 ppm:ään. Hiilidioksidin syöttö lopetettiin, kun luukut avautuivat yli 30 % 3.7. saakka. Sen jälkeen hiilidioksidia syötettiin aina, kun tuuletusluukut olivat auki alle 95 %. Tämä muutos tehtiin, koska huoneen hiilidioksidipitoisuus oli alle ulkoilman pitoisuuden.

Lämpötilat kasvustossa ylävalojen korkeudella sekä ylä- ja välivalojen puolivälin korkeudella mitattiin kahdesta kohdasta kasvustoa varjostetuilla termistoriantureilla (Delta-T Devices ST1), joiden arvot tallennettiin loggeriin (Delta-T Devices DL2) viiden minuutin välein. Anturit kalibroitiin suhteessa yhden osaston tuuletettuun psykrometriin (Itumic). Vertailumittaus kasvatuksen aikana osoitti, että termistoreiden tuottama lämpötila poikkesi huoneiden psykrometriin antamasta lämpötilasta korkeintaan 0.5 °C. Termistoreiden tulos on kvalitatiivinen, joka osoittaa huoneiden valotuskerroksen lämpötilaeron vertikaalieron suuruusluokkaa.

Kasvihuoneissa oli Huurre Oy:n jäähdytyslaitteisto. Laitteet oli asennettu kasvustojen yläpuolelle ja yhdestä laitteesta lähti 2 rei'itettyä muovisukkaa jakamaan puhallusilma tasaisesti koko kasvuston yläpuolelle. Laitteisto käynnistettiin 3. heinäkuuta (vk 27) ja oli käytössä kokeen loppuun asti. Asetusarvot olivat sellaiset, että käytännössä laitteet vain lisäsivät ilman kiertoa, eivät jäähdyttäneet. Heti seuraavana päivänä havaittiin, että ilman kierron paraneminen lisäsi kasvien haihdutusta ja kastelua lisättiin.

2.1.4 Sadon määrä ja laatu

Kurkun sato kerättiin kolme kertaa viikossa, maanantaina, keskiviikkona ja perjantaina. Hedelmät lajiteltiin ja punnittiin. Sadon määrää ei käsitelty tilastollisesti, koska keskiarvojen erot olivat pienet. Tuloksissa on esitetty keskiarvon keskivirhe (SE), josta näkee, miten suurta on kokonaissatojen hajonta eri koejäsenten välillä.

Satokelpoisten hedelmien prosentuaalinen osuus laskettiin siten, että satokelpoisten hedelmien lukumäärä jaettiin lehtien lukumäärällä. Kasvin lehtien lukumäärää laskettaessa vähennettiin kasvin 6 ensimmäistä lehteä, joista satoa ei kerätty. Vastaavasti vähennettiin niiden lehtien lukumäärää, joiden lehtihankoihin ei vielä ollut kehittynyt hedelmiä kokeen lopussa.

Satoindeksi laskettiin maan päällisten kasvinosien kuivapainoista.

2.1.5 Kasvustohavainnot

Kasvien kastelu oli automaattista tippukasteluna. Ylikastelueden määrän ja valumaveden ravinteiden mittausta varten vesi kerättiin talteen päivittäin. Myös kastelueden määrä rekisteröitiin. Valumavedestä mitattiin nitraattityppi, kalsium ja kalium sekä pH ja johtokyky. Nitraattityppimittari oli BX343 (Horiba, Japani), kaliummittari oli B-731 (Horiba, Japani), kalsiummittari oli B-751 (Horiba, Japani), pH-mittari oli pH-95 (Niewkoop, Hollanti) ja johtokykymittari oli EC-93 (Niewkoop, Hollanti). Mitatuista arvoista laskettiin tuloksissa esitetyt lukemat.

Kokeen aikana tehtiin kasvustohavainnot seuraavasti: lehtipinta-ala mitattiin kaikista kasvin lehdistä ja lehtien tuore- ja kuivapainot punnittiin kaksi kertaa, hedelmien tuore- ja kuivapaino punnittiin kolme kertaa. Lehtipinta-ala mitattiin lehtiplanimetrillä LI-3100 Area meter (LI-COR Inc., USA). Viljelyn lopussa havainnoitiin lehtipinta-ala, varren pituus, lehtien lukumäärä, tuore- ja kuivapainot erikseen varsista, lehtiruodeista ja lehtilavoista. Tilastollinen tarkastelu tehtiin SAS-ohjelmistolla 9.2 MIXED-proseduurilla käyttäen hierarkkista asetelmaa.

Spesifinen lehtipaino SLW (g/m²) mitattiin kolmena eri ajankohtana 3-6 kasvusta. Tuloksissa käytettiin kasvien lehtipinta-alamittaustietoja ja lehtien tuorepainoja.

Vedenkäytön tehokkuutta mitattiin vertaamalla sadonkorjuusta alkaen yhden kasvin kuluttamaa vesimäärää kasvin tuottamaa kurkkukiloa (1.lk) kohden.

2.1.6 Hedelmien makutesti

Hedelmien makutesti tehtiin yhden kerran, raatina toimi MTT Piikkiön henkilökunta. Kurkun hedelmien makutesti tehtiin kesäkuun 26. päivänä. Aamulla kurkut kerättiin ja jäädytettiin kylmiössä. Jokaisesta kurkusta leikattiin keskeltä kurkkua 1 cm:n kokoisia paloja isoihin lasimaljoihin 10 minuuttia ennen makutestin alkua. Sokkotestiä varten HPS+HPS-käsittely esiintyi kaksi kertaa. Lasimaljat oli numeroitu 1-4. Jokainen henkilö (21 kpl) sai kaavakkeen, johon piti arvioida eri maljoissa olleiden kurkkuviipaleiden makua.

Arvosteluasteikko oli seuraavanlainen:

- 1 = surkea maku, saatan viedä jopa kauppaan takaisin, *urysell smak*
- 2 = heikonpuoleinen maku, menettelee, *ganska dålig smak*
- 3 = keskimääräinen maku, perustavaraa, *medelmåttlig smak*
- 4 = hyvä maku, ostan niitä ensi kerrallakin, *bra smak*
- 5 = erittäin maukas, näitä haluan ehdottomasti ostaa kaupasta aina, *ytterst smaklig*

2.1.7 Kesän fotosynteesimittaukset

Kurkun lehtien fotosynteesi mitattiin viikoilla 23 ja 24 fotosynteesimittarilla (LI-6400, LI-COR Inc., USA.), jossa oli läpinäkyvä 6400-08 Clear-Bottom mittauskyyvetti (LI-COR Inc., USA).

Mittaukset tehtiin LED+LED ja HPS+HPS huoneissa. Yhteyttämistehokkuutta mitattiin täysikasvuisista LED- ja HPS-välivalojen valokeilassa kasvavista lehdistä. Mitattava lehti laitettiin kyvetin sisään ja laite mittasi lehden kaasujen vaihtoa 6 cm^2 : n alalta. Lisäksi mitattiin lehden leveys ja pituus. Hiilidioksiditasona mittauksissa käytettiin 800 ppm. LED huoneessa mitattiin yhteyttämistehokkuutta myös ilman tekovaloja. Luonnonvalomittaus simuloi tilannetta, jossa valot oli sammutettu ja tuuletusluukut olivat auki. Tällöin kasvihuoneen hiilidioksidipitoisuus oli 400 ppm.

LED-valojen etäisyys mittauskyyvettiin oli 0-20 cm ja HPS-valoon 20 cm. Mittaukset tehtiin aina valolähteen alapuolella. HPS-valolähdettä lähempänä ei voitu mitata, koska lampuista säteilyt lämpö oli korkea.

2.1.8 Energian kulutuslaskelmat

Ylä- ja välivalojen käyttämä sähköenergia laskettiin valojen asennustehosta kasvihuoneosastoa kohti ja valojen käyttöajasta, jonka säätöjärjestelmä tallensi neljän minuutin välein. Lämmitysputkistosta kasvihuoneosastoon siirtyvä lämpöenergia arvioitiin suoraan riippuvaisena lämmönsiirtokertoimesta, putkiston pinta-alasta, ala- ja yläputkiston massavirtauksen nopeudesta sekä osaston lämpötilan ja lämmitysputkiston tuloveden lämpötilaerosta, jonka säätöjärjestelmä tallensi neljän minuutin välein. Massavirtaus mitattiin kasvihuoneosastojen lämmitysveden pumppujen säädön jälkeen magneettisella mittarilla. Lämpöenergian arviointi ei ole absoluuttisesti tarkka, mutta osoittaa kasvihuoneosastojen suhteelliset erot.

Sähkön ja lämmön käytöt summattiin koekauden ajalta. LED-valojen tehona käytettiin niiden nimellisteho. HPS-valojen käyttämän tehon oletettiin olevan 10 % suurempi kuin niiden nimellistehon. Tehon ja valotusajan perusteella saatiin käytetty sähköenergia. Se jaettiin koekauden kertyneellä sadolla, jotta saatiin sähkön ja lämmön käyttö kurkkukiloa kohti. Energian käytöstä koeosastojen sisällä oli vain yksi havainto, mutta sato vaihteli kasvihuoneosaston sisällä lohkoista toiseen, mikä tuotti vaihtelun energian käyttöön kurkkukiloa kohti kussakin kasvihuoneosastossa.

Energian kulutuksen erojen poikkeavuus valotustapojen välillä laskettiin SAS-ohjelmiston 9.2 MIXED-proseduurilla käyttäen hierarkkista asetelmaa, jossa lohkot olivat kasvihuoneosastojen sisällä.

2.2 Talviaijan viljelytutkimus

2.2.1 Koejärjestely ja viljelyaika

Kokeen koejäsenet olivat seuraavat:

1. LED ylävalo + LED välivalo
2. HPS ylävalo + LED välivalo, nk. hybridi
3. HPS ylävalo + HPS välivalo

Jokainen koejäsen oli omassa kasvihuoneosastossaan, jonka pinta-ala oli 50 m². Koejäsenet olivat samat kuin kesällä.

Kurkkulajikkeena oli 'Toploader'. Siemenet kylvettiin kivivillakuutioihin 25.10.2013. Istutus tehtiin samanlaisiin kasvualustoihin kuin kesällä 19.11.2013. Istutustiheys oli 2,6 kasvia/m² viikolle 5 saakka, jonka jälkeen taimitiheys oli 2,2 kpl/m². Taimitiheys oli siten selvästi väljempi kuin kesällä. Tuholaisten ennakktorjuntana käytettiin biologisia torjuntaeliöitä. Kastelu ja lannoitus tehtiin Kekkilän kurkulle tehtyjen ohjeiden mukaan automaattisesti tippukastelun mukana. Lannoitteina käytettiin vesiliukoisia lannoitteita MgN, NKS ja kurkun viljelmäkohtainen Superex.

Aikataulu:

Kylvö 25.10.2013 (vk 43)

Istutus 19.11.2013 (vk 47)

Sadonkorjuu alkoi 9.12.2013 (vk 50)

Satoviikkojen lukumäärä oli 15 (14 täyttä satoviikkoa)

Viljelyn lopetus 18.3.2014 (vk 12)

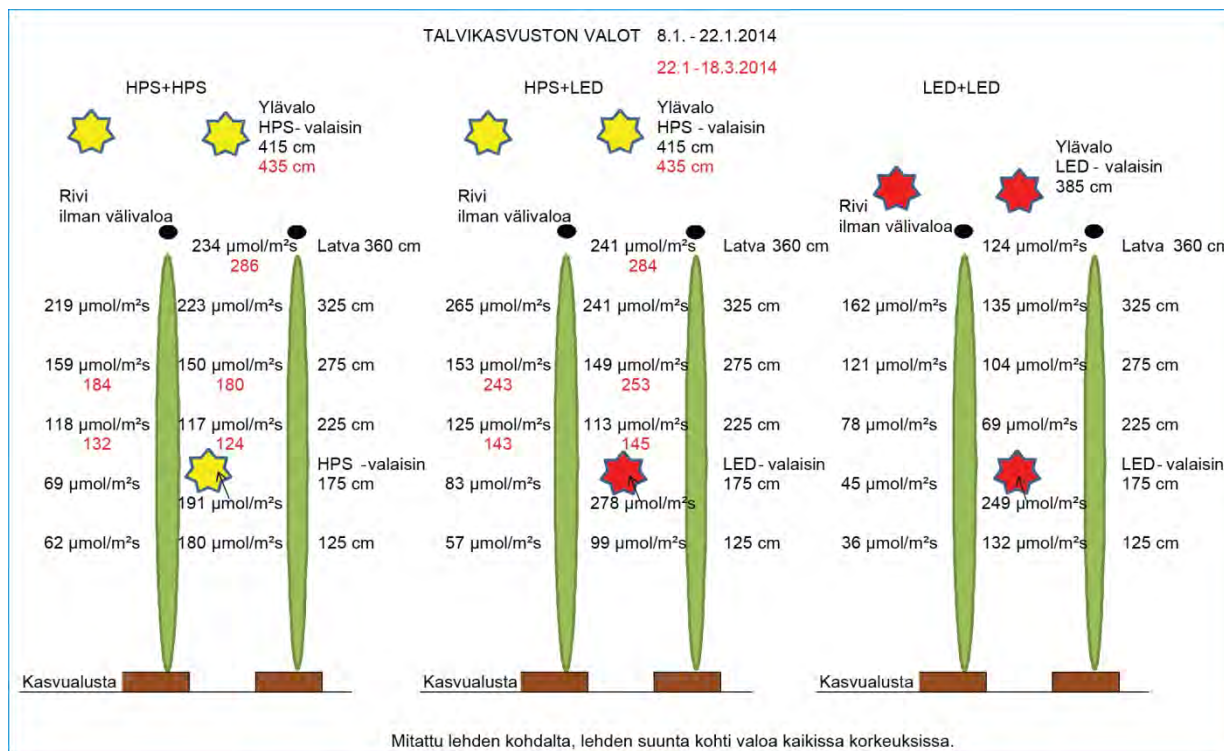
2.2.2 Tekovalotus

Kasvien kasvaessa valotuskaluston korkeutta säädettiin siten, että kasvit saivat parhaan mahdollisen tekovalotuksen. Taulukossa 3 on esitettyä valaisinten etäisyydet lattiasta ja valomäärät latvan tasolla. Kuvassa 2 on kasvustossa mitattuja säteilymääriä eri korkeuksilla sekä välivalokäytävän puolella että välivalotoman käytävän puolella. Punaisella fontilla merkityt mittaukset tehtiin HPS-valojen noston jälkeen. HPS-valojen viimeisen noston jälkeen 22.1.2014 valokeilat menivät enemmän ristiin toistensa kanssa kuin aikaisemmin ja siksi PAR-säteilymäärä ylävalojen alla kasvoi keskimäärin 25 %. Valoja nostettiin lämpövaikutuksen vähentämiseksi. Kuva 3 kuvaa hyvin tilanteen ylävalojen ja välivalojen PAR-säteilymääristä, jotka kurkkukasvit saivat. LED-ylävaloista saatiin paljon vähemmän PAR-säteilyä kuin HPS-ylävaloista. Välivalojen säteilymäärissä erot olivat pienemmät. Valomittausten mukaan HPS+LED-huoneessa kasvit saivat enemmän PAR-säteilyä kuin muissa huoneissa. Valotusaika oli 20 h/d klo 03-23 alkaen heti istutuksen jälkeen 19.11.2013. Viikoittaiset valotustuntien lukumäärät kokeen aikana ovat taulukossa 4. Säteilymäärän $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ -mittaukset tehtiin PAR-valoanturilla (LI-COR quantum sensor LI-190 SA, LI-COR Inc., USA).

Taulukko 3. Valaisinten etäisyydet lattiasta ja kasvin latvan korkeudella mitattu PAR-säteilyn määrä eri koejäsenillä. Kasvin tyvi oli 40 cm lattian yläpuolella.

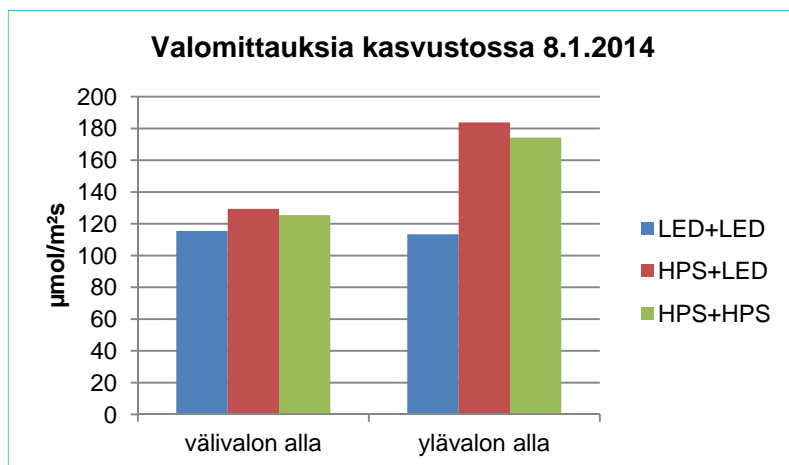
Tabell 3. Lampans avstånd från golvet och uppmätt PAR-strålning vid växternas topp. Växtens bas fanns 40 cm ovanför golvet.

Pvm	Koejäsen	Valaisimen etäisyys		PAR-säteily
		Ylävalon alareuna, cm	Välivalon puoliväli, cm	latvan korkeudella, $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$
25.marraskuu	LED+LED	230	125	190
	HPS+LED	293	125	310
	HPS+HPS	293	125	258
27.marraskuu	LED+LED	230	125	171
	HPS+LED	293	125	275
	HPS+HPS	293	125	270
2. joulukuu	LED+LED	385	175	124
	HPS+LED	385	175	-
	HPS+HPS	385	175	-
8. tammikuu	LED+LED	385	175	124
	HPS+LED	415	175	241
	HPS+HPS	415	175	234
22. tammikuu	LED+LED	385	175	124
	HPS+LED	435	175	280
	HPS+HPS	435	175	286



Kuva 2. Kasvustossa mitatut PAR-säteilymäärät eri korkeuksilla lattiasta kahtena eri ajankohtana eri koejäsenissä. Mittaukset tehtiin valoanturi lehden kohdalla ja suunnattuna valoon siten kuin lehti oli asemoitunut. Mittauksia tehtiin sekä välivalorivissä että viereisessä rivissä, jossa ei ollut välivaloa. 8.1.-22.1. välisen ajan HPS-ylävalovalaisimet olivat alempana (mustat mittaluvut) kuin 22.1. lähtien (punaiset mittaluvut ilman $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ -merkintää). HPS-valaisin on merkitty keltaisella tähdellä ja LED-valaisin punaisella tähdellä.

Figur 2. Uppmätt PAR-strålning i växtligheten på olika höjder från golvet under två olika tidpunkter. Mätningarna gjordes så att ljussensorn placerades vid bladet och vinklades enligt bladet i riktning mot lampen. Mätningarna gjordes både vid mellanbelysningsraden och vid raden bredvid, dvs. utan mellanbelysning. Under tiden 8.1–22.1 var HPS-toppbelysningslamporna lägre (svarta mätvärden) än den 22.1 (röda mätvärden utan enheten $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$). HPS-lamporna markeras med en gul stjärna och LED-lamporna med en röd stjärna.



Kuva 3. Ylä- ja välivalojen vaikutuspiirissä kasvaneiden kurkunlehtien saamat PAR säteilymäärät.
Figur 3. Mängden PAR-strålning som gurkbladen fick under topp- respektive mellanbelysning.

Talukko 4. Ylä- ja välivalojen käyttötunnit kokeen aikana tunti/vk eri valotuksissa.

Tabell 4. Topp- och mellanbelysningstimmar under försökstiden (timme/vecka) i olika belysningar.

Viikko- numero	Ylävalotunnit tunti/vk			Välivalotunnit tunti/vk		
	LED+LED	HPS+LED	HPS+HPS	LED+LED	HPS+LED	HPS+HPS
47	116	116	116	93	93	93
48	140	140	140	140	139	139
49	140	140	140	139	139	139
50	120	120	120	119	119	119
51	140	140	140	140	139	139
52	140	140	140	140	139	139
1	140	140	140	140	139	139
2	140	140	140	140	139	139
3	140	140	140	139	139	139
4	140	140	140	140	139	139
5	140	140	140	139	139	139
6	140	140	140	139	139	139
7	140	140	139	139	139	139
8	138	138	138	139	138	138
9	137	137	137	139	138	138
10	131	131	131	140	139	139
11	131	131	131	139	139	139
12	49	49	49	60	60	60
Yhteensä	2362	2362	2361	2363	2358	2358

2.2.3 Kasvihuoneen olosuhdemittaukset

Koska koehuoneet olivat samat kuin kesällä, tiedot löytyvät kesäkasvuston kohdalta. Hiilidioksidin annostelutaso oli 1000 ppm. Huoneiden lämpötilojen asetusarvot ovat taulukossa 5. Tekovalojen lämpövaikutus oli erilainen eri huoneissa ja siksi putkilämpötiloja piti muuttaa useaan kertaan kokeen aikana, jotta huoneiden lämpötilat olisivat olleet mahdollisimman samat. Päivisin käytettiin tarvittaessa suurpainesumuja kosteuden lisäämiseksi. Öisin käytettiin verhoja ulossäteilyn estämiseksi. Tällä tavoin voitiin tasata huoneen kosteutta eikä kasvustoissa esiintynyt härmää.

Lämpötilat kasvustossa välivalojen korkeudella sekä ylä- ja välivalojen puolivälin korkeudella mitattiin kahdesta kohdasta kasvustoa varjostetuilla termistoriantureilla kuten kesäkokeessa.

Taulukko 5. Kasvihuoneiden lämpötilojen asetusarvot.

Tabell 5. Börvärden för temperatur i växthusen.

Päivämäärä	Lämpötilat °C		
	Yö	Päivä	Tuuletus
19.11.2013	21	23	25
22.11.2013	21	24	26
12.12.2013	19	24	26
23.12.2013	18	24	26

2.2.4 Sadon määrä ja laatu

Sato kerättiin ja lajiteltiin samoin kuin kesällä. Satotulokset analysoitiin tilastollisesti SAS 9.2 ohjelmistolla proseduurilla MIXED käyttäen hierarkkista asetelmaa ja parittaiset vertailut tehtiin Tukeyn testillä.

2.2.5 Kasvustohavainnot

Kasvustohavainnot tehtiin samalla tavoin kuin kesällä.

Lehtien lämpötiloja mitattiin viikolla 51 ja hedelmien lämpötiloja viikolla 5 infrapunamittarilla Microscanner D501+ Ni-306 anturi (Exergen Corp., USA). Lehtien lämpöprofiilia mitattiin viikolla 2 infrapunakameralla FLIR PM 695.

Kasvustojen spektrianalyysit tehtiin viikolla 2 spektrometrillä Jaz (Ocean Optics). Valon spektrimuutokset mitattiin neljästä eri paikasta: 1. välivalon kohdalta suoraan lehden yläpinnalta, 2. välivalon kohdalta suoraan lehden alapinnalta, 3. välivalon alapuoleiselta lehden pinnalta ja 4. välivalon yläpuoleiselta lehden pinnalta. Kukin mittausarvo oli 3-5 mittauksen keskiarvo.

2.2.6 Hedelmien makutesti

Makutesti tehtiin samoin kuin kesällä muuten paitsi HPS+LED-koejäsen esiintyi kaksi kertaa.

2.2.7 Talven klorofylli- ja fotosynteesimittaukset

Fotosynteesi- ja klorofyllimittaukset tehtiin viikolla 3. Lehtien nettofotosynteesiä mitattiin välivalon korkeudella sijainneista lehdistä välivalorivin puolella. Klorofyllipitoisuuden mittauslaite oli SPAD 502 (Spectrum Technologies, Inc., USA) ja fotosynteesinopeuden mittauslaite oli CIRAS-2 (PP Systems, Inc., USA).

2.2.8 Energian kulutuslaskelmat

Laskemat tehtiin samoin kuin kesäkoikeessa.

3 Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1 Kesäajan viljelytutkimus

3.1.1 Kesällä saadun sadon määrä ja laatu

Kesäviljelyssä valotusratkaisu ei vaikuttanut merkittävästi kurkkusadon määrään eikä hedelmän laatuun (Taulukko 6).

Taulukko 6. Koko viljelyjakson, 11 satoviikon aikana saatu sato eri valotuksissa kiloa ja kappaleita kasvia kohden sekä keskiarvon keskivirhe (SE).

Tabell 6. Skörden under elva skördeveckor i kilogram per planta och antal per planta med medelfel (SE) under hela produktionstiden.

Koejäsen	1.luokan sato kg/kasvi	1. lk SE	Kokonaissato kg/kasvi	Koko sato SE	1.luokan sato kpl/kasvi	1.lk SE	Kokonaissato kpl/kasvi	Koko sato SE
LED+LED	9,0	0,35	10,0	0,39	26,9	0,87	32,1	0,98
HPS+LED	8,4	0,26	9,7	0,27	25,3	0,74	31,5	0,72
HPS+HPS	8,6	0,23	10,0	0,20	25,8	0,64	32,2	0,57

Valotustapa ei myöskään vaikuttanut satokelpoisten hedelmien kehittymiseen (satohedelmä/lehti) eikä kasvin satoindeksiin (Taulukko 7). Satoindeksi kuvaa sitä, miten paljon kasvin maanpäällisten osien biomassasta kohdentui hedelmiin.

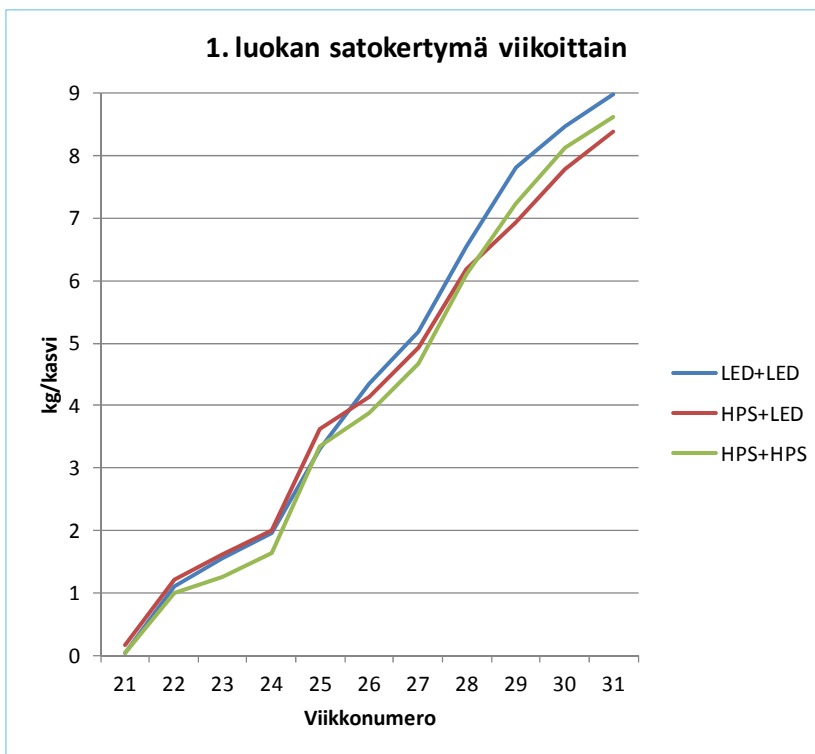
Taulukko 7. Satohedelmien kehittyminen suhteessa lehtien lukumäärään sekä satoindeksi eri valotuksissa.

Tabell 7. Antalet plockade frukter i förhållande till antalet blad samt skördeindex i olika belysningar.

Koejäsen	Satohedelmä/lehti	Satoindeksi
LED+LED	41 %	56 %
HPS+LED	40 %	55 %
HPS+HPS	41 %	56 %

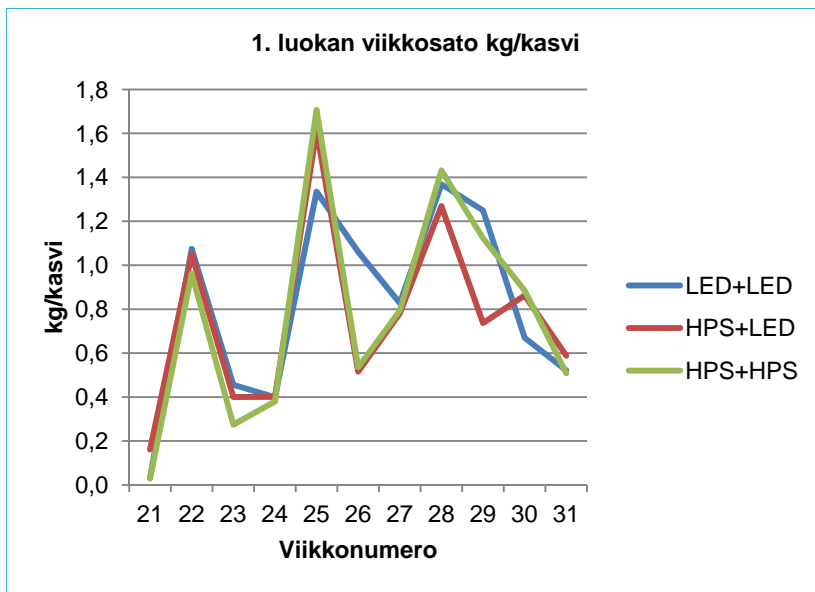
Kuvassa 4 on esitetty viljelyn aikana sadon määrän (kg/kasvi) lisääntyminen kumulatiivisesti ja kuvassa 5 sadot viikoittain. Tulokset osoittivat, että sadon muodostus vaihteli viljelyviikkojen aikana. Kun valotus oli käytössä viljelyn alkuvaiheissa, oli LED välivalohuoneissa satotaso suurempi kuin HPS välivalohuoneissa. Tätä selittää LED huoneissa ollut korkeampi hiilidioksidipitoisuus, koska tuuletusluukkuja voitiin pitää kiinni kauemmin kuin HPS huoneissa. HPS huoneissa lamput säteilytettiin lämpöä nosti ilman lämpötilaa tuuletusrajan yläpuolelle aikaisemmin kuin LED huoneissa.

Koko koejakson keskimääräinen hedelmän paino oli 331-335 g. Valaistusratkaisu ei yksiselitteisesti vaikuttanut ensimmäisen luokan kurkkujen painoon viljelyjakson aikana (Kuva 6). Tosin kokeen puolenvälin jälkeen LED+LED huoneen kurkut olivat painavimpia ja HPS+HPS kurkut keveimpiä. Piikkikärkisiä kurkkuja kehittyi viikoilla 28 ja 29, ja LED+LED huoneesta niitä tuli vähiten.



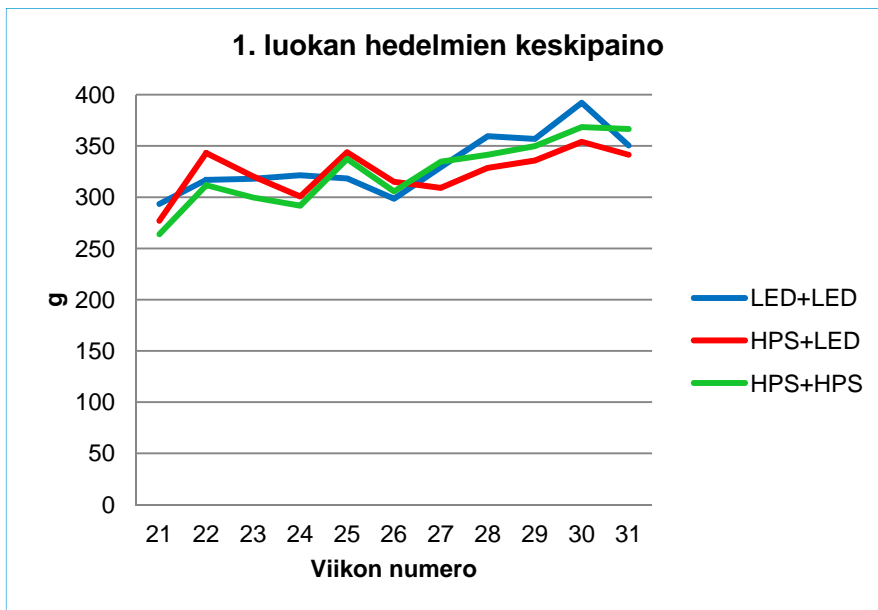
Kuva 4. Kumulatiivinen 1. luokan sadon määrä kg/kasvi viljelyviikkojen aikana eri valotuksissa.

Figur 4. Den kumulativa skördemängden av första klass i kg/växt under skördeveckorna i olika belysningar.



Kuva 5. 1. luokan viikkosadot kg/kasvi eri valotuksissa.

Figur 5. Veckoskörd av första klass i kg/växt i olika belysningar.

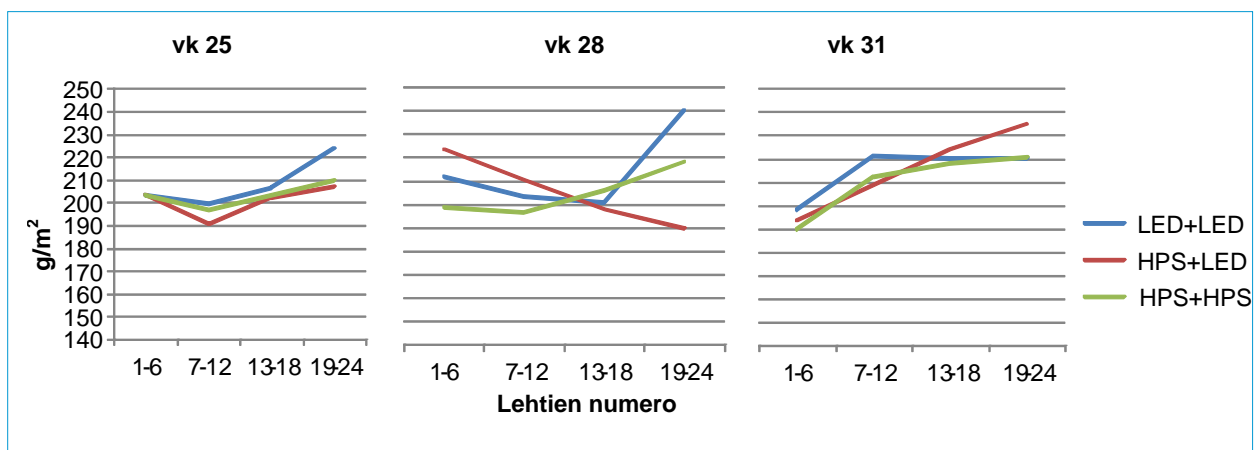


Kuva 6. Hedelmien keskipaino satoviikkojen aikana eri koejäsenissä.

Figur 6. Frukternas medelvikt under skördeveckorna i olika belysningar.

3.1.2 Kesäkasvuston koko ja ulkonäkö

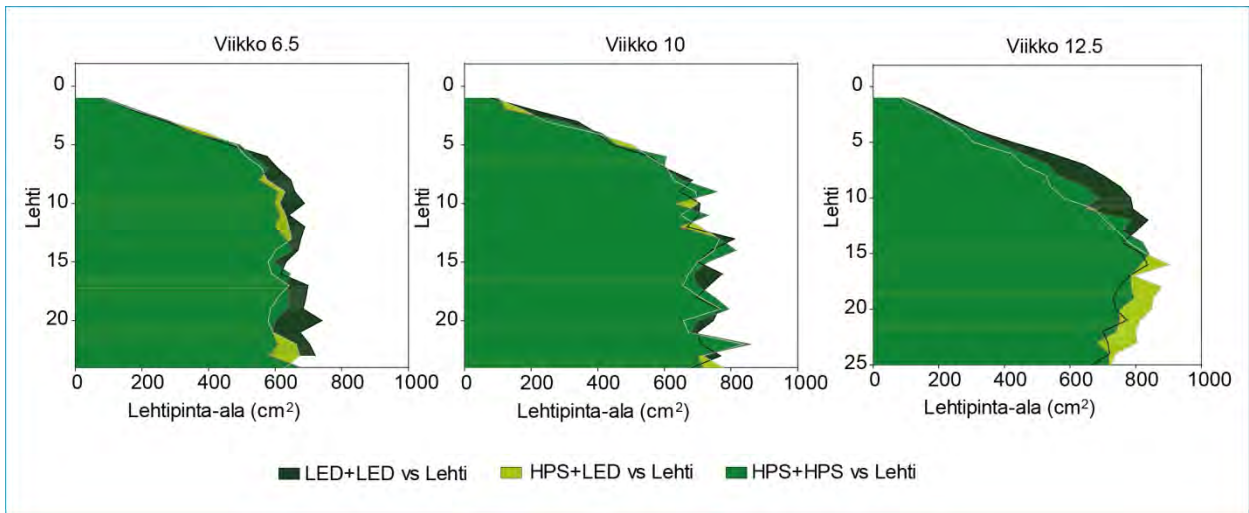
Spesifinen lehtipaino (SLW) kuvaa lehden paksuutta ja tiheyttä. Ison SLW:n voi olettaa tehostavan yhteyttämistä. Nuorena kasvustossa LED+LED- huoneen kasvien alalehdet olivat hyötäneet kasvun alussa LED-valoista (Kuva 7). Heinäkuun mittauksista ei voi vetää selvää johtopäätöstä, koska lyhyen ajan sisällä mitatut SLW:t eivät olleet samansuuntaiset.



Kuva 7. Eri valotuksissa kasvaneiden kasvien spesifinen lehtipaino SLW (g/m^2) neljässä eri lehtivöyhykkeessä kolmena eri ajankohtana laskettuna tuorepainoa kohti.

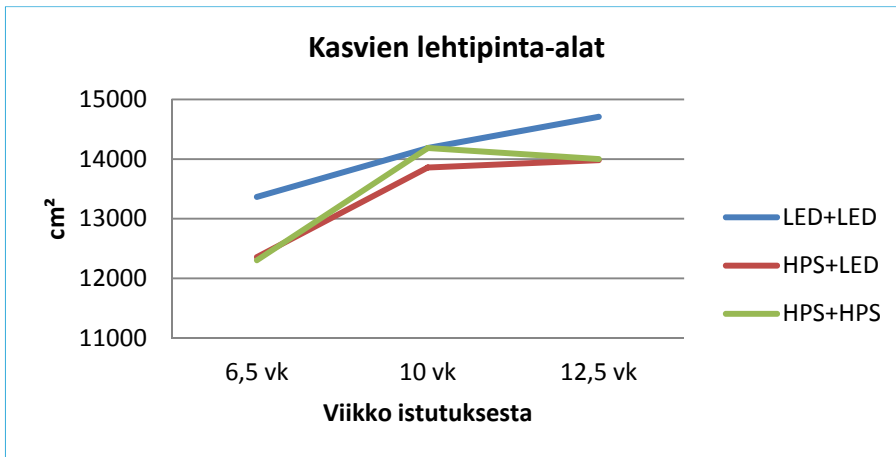
Figur 7. Den specifika bladvikten SLW (g/m^2) hos växter vid fyra olika växthöjder, i de olika belysningarna och beräknade vid tre olika tidpunkter.

Kasvuston ulkonäkö vaihteli kasvuston iän ja jonkin verran valotuksen mukaan (Kuva 8). Keskimäärin LED+LED-huoneessa kasvaneiden lehtien kokonaislehtipinta-ala oli suurin (Kuva 9). Vaikka viljelyn loppuvaiheessa tekovalotus oli vähäistä, oli LED+LED huoneessa kasvin latvaosan lehtien pinta-ala muita suurempi. Vertaa talvikasvuston profiiliin sivulla 31.



Kuva 8. Kasvustojen iän vaikutus rakenteeseen viljelyn aikana. Lehdet on numeroitu latvasta alaspäin.

Figur 8. Växtbeståndets ålder påverkar plantans utseende under olika tider av produktion. Bladen är numrerade från toppen till basen.



Kuva 9. Kasvuston kokonaislehtipinta-alat eri valotuksissa kolmena eri ajankohtana.

Figur 9. Växtbeståndets totala bladareal vid tre olika tidpunkter efter planteringen.

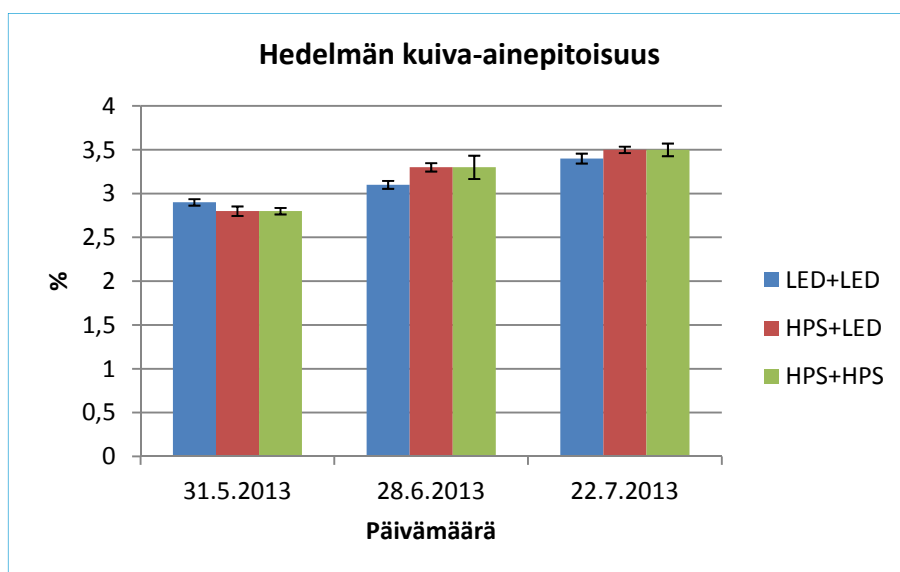
Kesäkasvustossa eri tekovalovaihtoehdot eivät juurikaan vaikuttaneet kasvuston vegetatiiviseen rakenteeseen (Taulukko 8).

Taulukko 8. Kokeen lopussa tehtyjä kasvustohavaintoja eri valotuksissa. Sama aakkonen kuvaa, että tilastollista eroa ei ollut koejäsenten välillä. Ilman aakkosia olevia havaintoja ei testattu.

Tabell 8. I slutet av försöket gjorda observationer i växtbeståndet vid olika belysningar. Samma bokstav betyder att ingen statistisk avvikelse förekommer. I de observationer där bokstav saknas gjordes inget test.

Koejäsen	Varren pituus, m	Varren kuiva-aine, %	Nivelvälin pituus, cm	Lehdet, kpl	Kasvin kuivapaino, g
LED+LED	10.0 a	6.4	10.8	93	242
HPS+LED	9.9 a	6.6	10.4	95	246
HPS+HPS	9.7 a	6.6	10.3	94	239

Kaikkien hedelmien kuiva-ainepitoisuus kohosi kesän aikana, mutta erot eri koejäsenten välillä olivat pieniä (Kuva 10). Viljelyjakson aikana LED+LED-valossa kasvaneiden hedelmien keskimääräinen kuiva-ainepitoisuus (3.1 %) oli hiukan pienempi kuin muissa käsittelyissä (3.2 %).

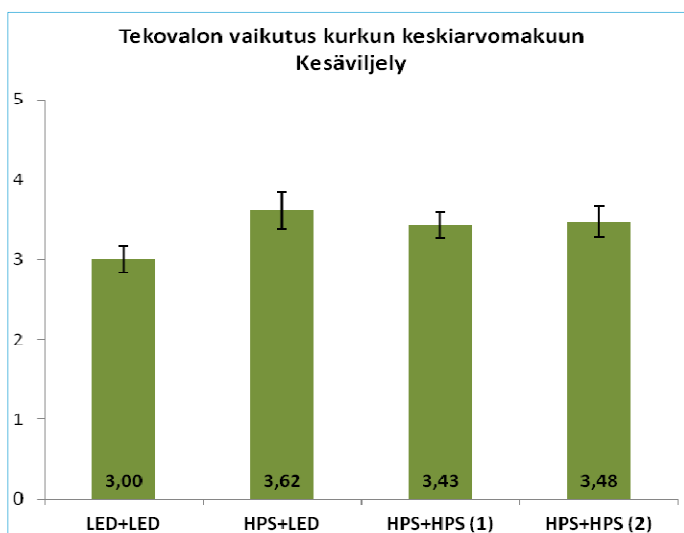


Kuva 10. Hedelmien kuiva-ainepitoisuudet prosentteina eri ajankohtina kesän aikana eri valotuksissa sekä SE. Luku on 12 kurkun keskiarvo.

Figur 10. Frukstens torrsubstanshalt som procent vid olika tillfällen under sommaren samt SE.

3.1.3 Kesäkurkun hedelmien makutesti

Tekovalolla oli merkitystä kesäkurkun laatuun (Kuva 11). Keskiarvomaultaan parhaimpia kurkkuja olivat HPS+LED-kurkut (3,62) ja heikoimpia LED+LED kurkut (3,00). Testissä olleet kaksi toisistaan riippumatonta HPS+HPS-kurkkukoejäsentä todettiin keskiarvomaultaan hyvin samanlaisiksi (3,43 ja 3,48). Tämän perusteella voidaan päätellä, että LED+LED huoneen kurkut eivät olleet aivan yhtä maukkaita kuin muissa huoneissa kasvaneet kurkut.

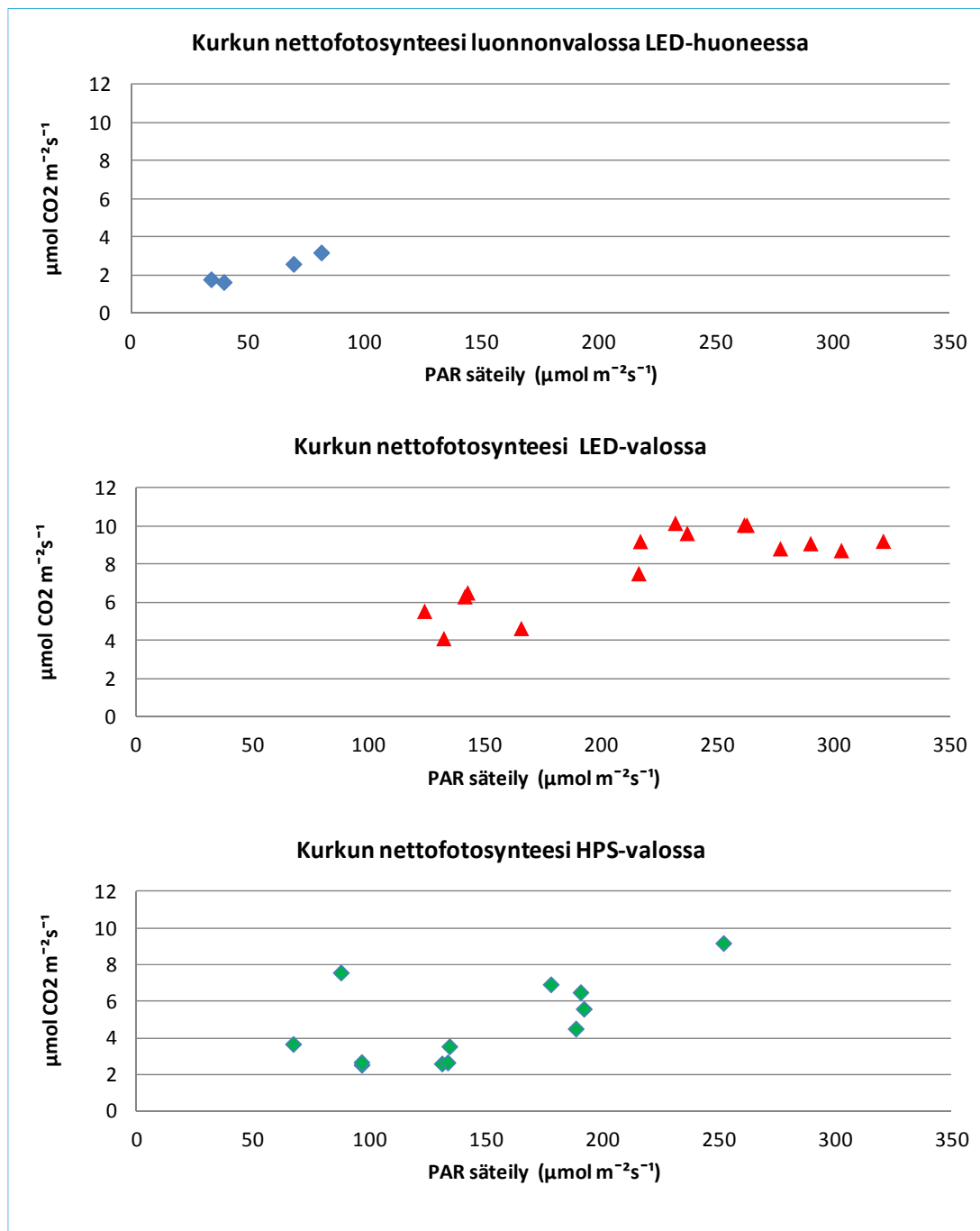


Kuva 11. Valokäsittelyn vaikutus kurkun makuun kesäviljelyssä. Koodien selostukset tekstissä sivu 12. Kuvassa keskiarvot ja SE.

Figur 11. Gurksmaktest. Bedömningsskalan finns i texten i sidan 12. I figuren medeltal och SE.

3.1.4 Kesäkurkun lehtien fotosynteesimittaukset

Kurkkukasvuston sisällä oli hyvin vähän luonnonvaloa (Kuva 12). Sen ja alhaisen hiidioksidipitoisuuden (400 ppm) takia lehtien yhteyttämistehokkuus luonnonvalossa oli hyvin alhainen. LED-välivaloissa yhteyttäminen näyttäisi olevan jonkin verran tehokkaampaa kuin HPS-välivaloissa valotason ollessa matala ($150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$).

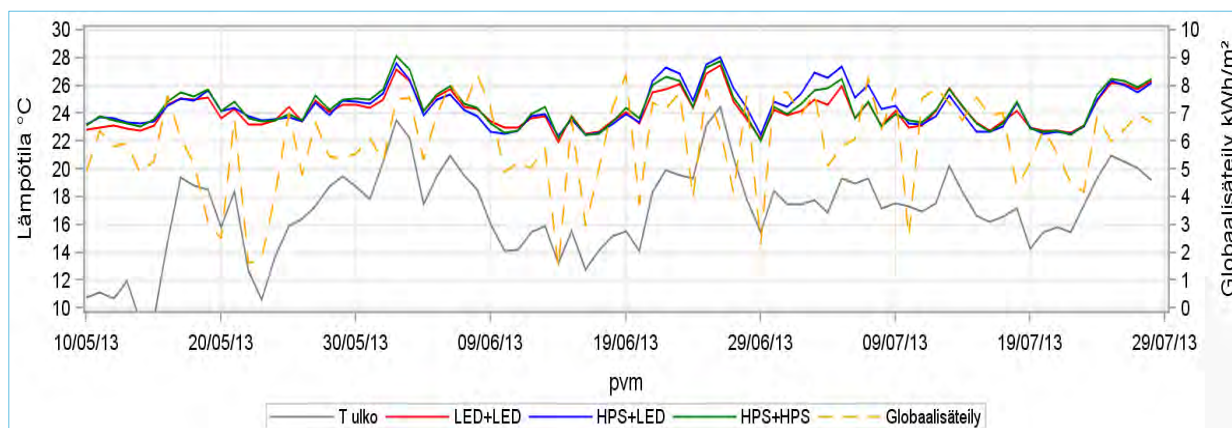


Kuva 12. Kurkun lehtien nettofotosynteesimittaukset eri valolähteiden alla kasvaneissa lehdistä ja luonnonvalossa kesäkuussa. Luonnonvalossa hiidioksidipitoisuutena oli 400 ppm ja valotuksen aikana 800 ppm.

Figur 12. Nettofotosyntesmätningar i gurkblad vid olika belysningar och i naturligt ljus i juni. I naturligt ljus var koldioxidhalten 400 ppm och i konstbelysning 800 ppm.

3.1.5 Kesäviljelyssä kasvihuoneiden olosuhteet

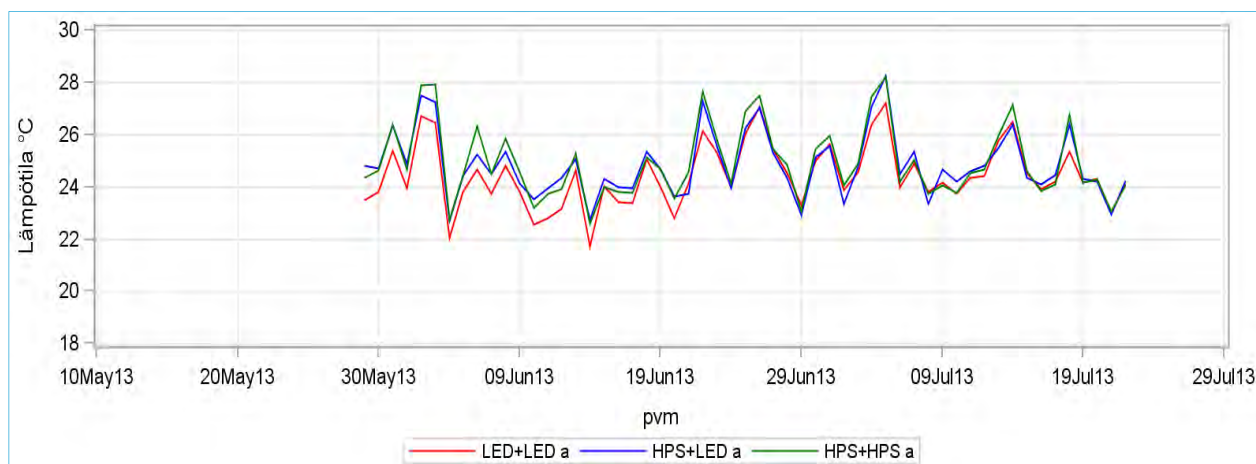
Kesäkokeen aikana vuorokauden keskilämpötila oli tuuletetulla lämpötila-anturilla 1.5 metrin korkeudella mitattuna kaikissa osastoissa lähes sama (Kuva 13).



Kuva 13. Vuorokauden keskilämpötila koehuoneissa ja ulkona sekä globaalisäteily.

Figur 13. Dygnsmellantemperatur i försökshusen och utomhus samt globalstrålning.

LED+LED-huone oli aamupäivällä vähän viileämpi kuin muut huoneet ja lämpötilaero kasvuston yläosan ja keskiosan välillä oli suurempi (Kuva 14). Iltapäivällä, auringon säteilyn määrittäessä lämpötilan, eroa huoneiden välillä ei ollut.



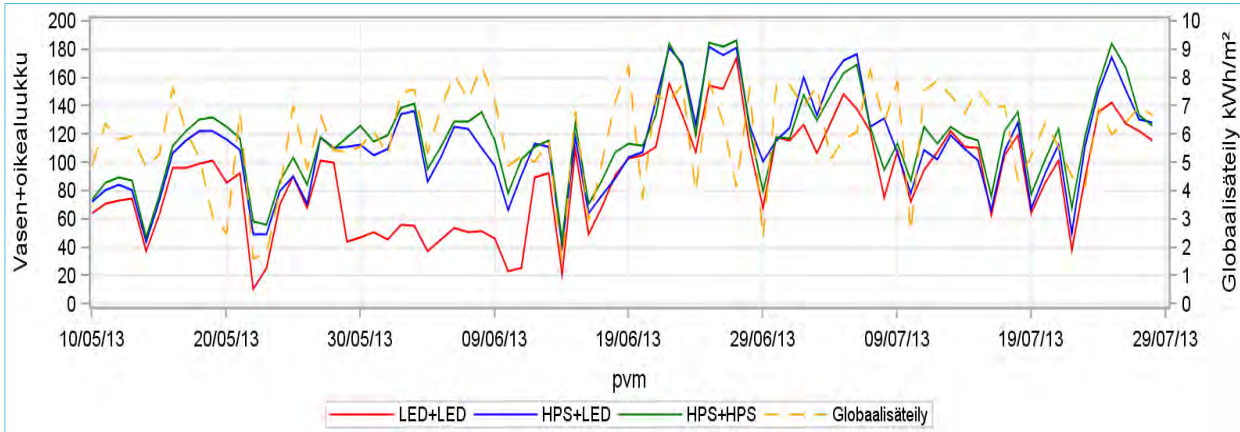
Kuva 14. Lämpötilan keskiarvo klo 6 – 13 koehuoneissa välivalojen korkeudella.

Figur 14. Temperaturens medelvärde kl 6-13 i försökshusen i höjd med mellanbelysningen.

LED-valaisimien pienempi lämmöntuotto verrattuna HPS-valaisimiin aiheutti pienemmän tuuletuksen (Kuva 15) ja suuremman lämmityksen LED+LED kasvihuoneosastossa (Kuva 16). Käytetyillä tuuletuksen säätöarvoilla HPS+HPS huoneessa CO₂-syöttöä rajoitettiin useammin ja CO₂-pitoisuus jäi alemmaksi kuin LED-valotetuissa huoneissa (Kuva 17). Ero oli suurin keväällä, jolloin huoneeseen tulevasta kokonaislämpöenergiasta suurempi osa tulee valotuksesta verrattuna kesään. Kesäkuussa ero oli vielä aamupäivällä näkyvässä kun aamun valotus vaikutti lämpötilaan (Kuva 18). CO₂-hävikin arvioitiin kuitenkin olleen suurin HPS+LED kasvihuoneosastossa, jossa tuuletusluukkujen asento oli pisimpään täysin suljetun ja CO₂-syötön lopettavan asennon välillä (Kuva 19). LED+LED huoneessa CO₂-hävikki oli lievästi suurempi kuin HPS+HPS kasvihuoneosastossa.

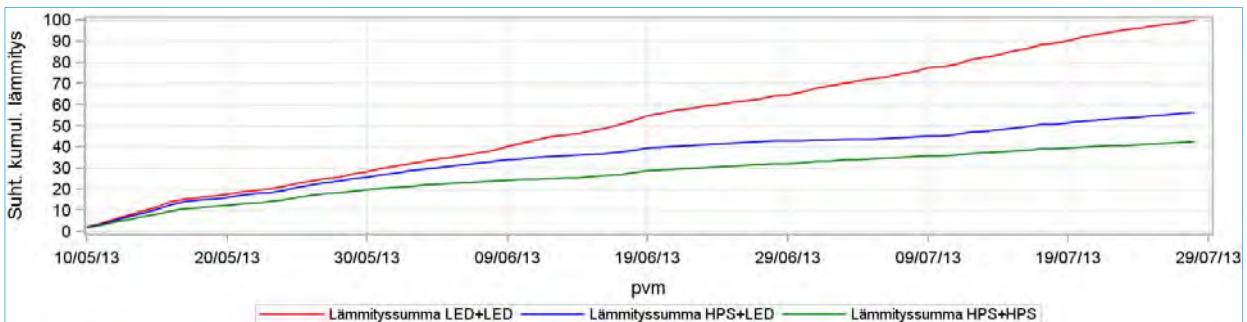
Ilmanvaihtoa luukkujen tuuletuksessa ei voida laskea tarkasti, mutta sen suuruusluokka voidaan arvioida. Kun sisä- ja ulkoilman lämpötilaero on suuri, puoleksi avoinna olevista kattoluukuista kasvihuoneen ilma

voi vaihtua noin kerran 5 – 10 minuutissa. Sisäilman CO₂-pitoisuuden ollessa 800 ppm ja ulkoilman 380 ppm, kuuden metrin korkuisesta huoneesta poistuu hiilidioksidia noin 30 – 60 g/m²/h. Esim. vuorokauden 10 tunnissa noin 300 – 600 g/m²/h, jonka kustannus on noin 6 – 12 c/m². HPS+LED kasvihuoneosaston kolmannesta suurempi CO₂-hävikki voi siis maksaa päivässä muutaman sentin neliölle ja kolmen kuu-kauden viljelyjaksolla muutaman euron neliölle. Hävikkien suuruus oli seuraus valituista CO₂-syötön ja tuuletuksen säädöistä.



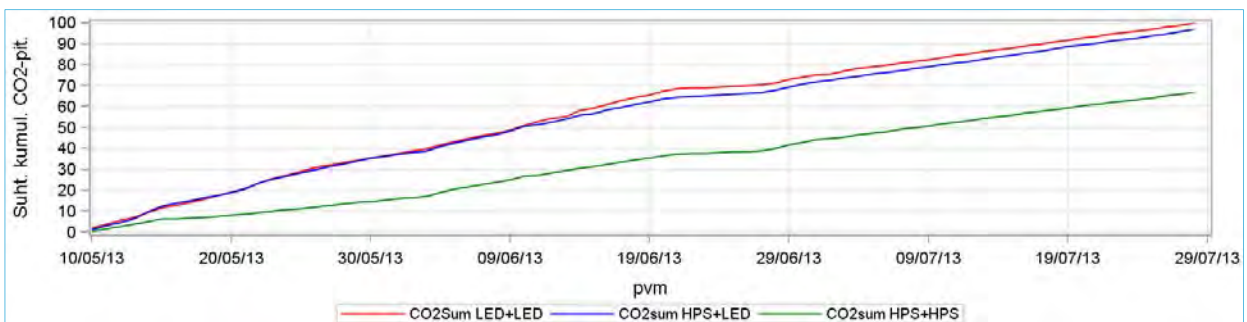
Kuva 15. Päivittäinen tuuletusluukkujen yhteenlaskettu keskimääräinen asento koehuoneissa ja globaalisäteily. Asentojen yhteenlaskettu maksimi on 200.

Figur 15. Ventilationsluckornas sammanlagda medelposition per dygn i försökshuset och globalstrålning. Om båda luckorna var helt öppna var procenttalet 200.



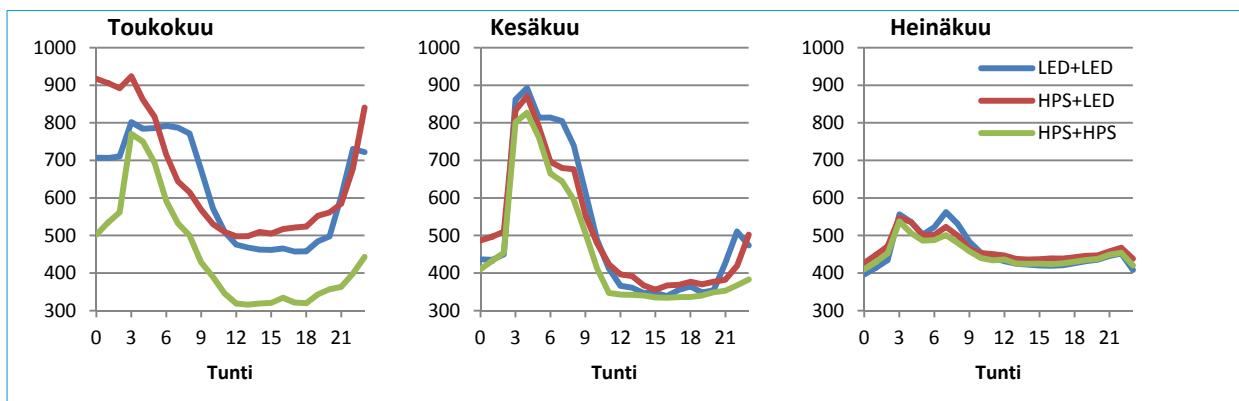
Kuva 16. Suhteellinen kumulatiivinen lämmityssumma suhteessa. Suurin lämmityssumma huoneessa LED+LED vastaa 100 %.

Figur 16. Den relativa kumulativa uppvärmningssumman. Den största uppvärmningssumman i LED+LED-huset motsvarar 100 %.



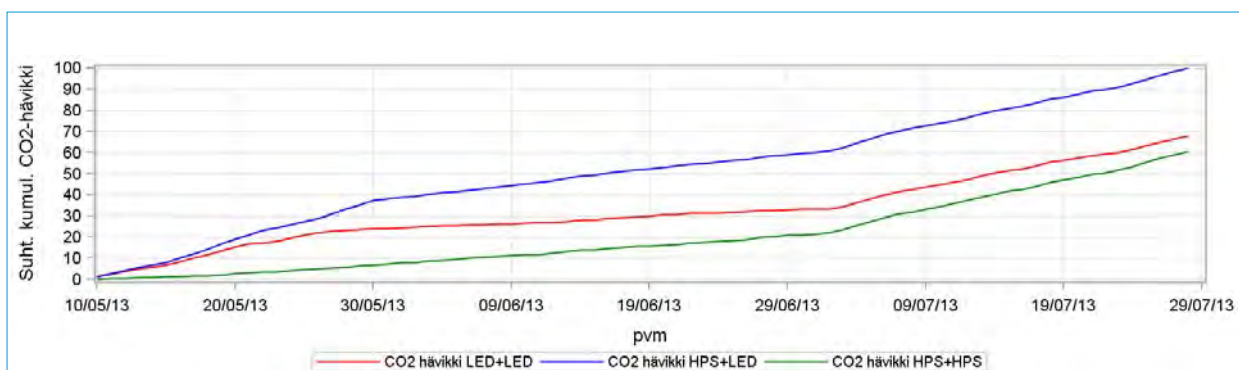
Kuva 17. Kumulatiivinen CO₂-pitoisuus huoneissa suhteessa HPS+HPS huoneeseen. Suurin pitoisuus LED+LED huoneessa vastaa 100 %.

Figur 17. Den relativa kumulativa CO₂-halten i husen i förhållande till HPS+HPS-rummet. Den högsta nivån i LED+LED-rummet motsvarar 100 %.



Kuva 18. Tunnin keskimääräinen hiilidioksidipitoisuus (ppm) koekuukausina.

Figur18. Den genomsnittliga koldioxidnivån (ppm) under en timme under försöksmånaderna.

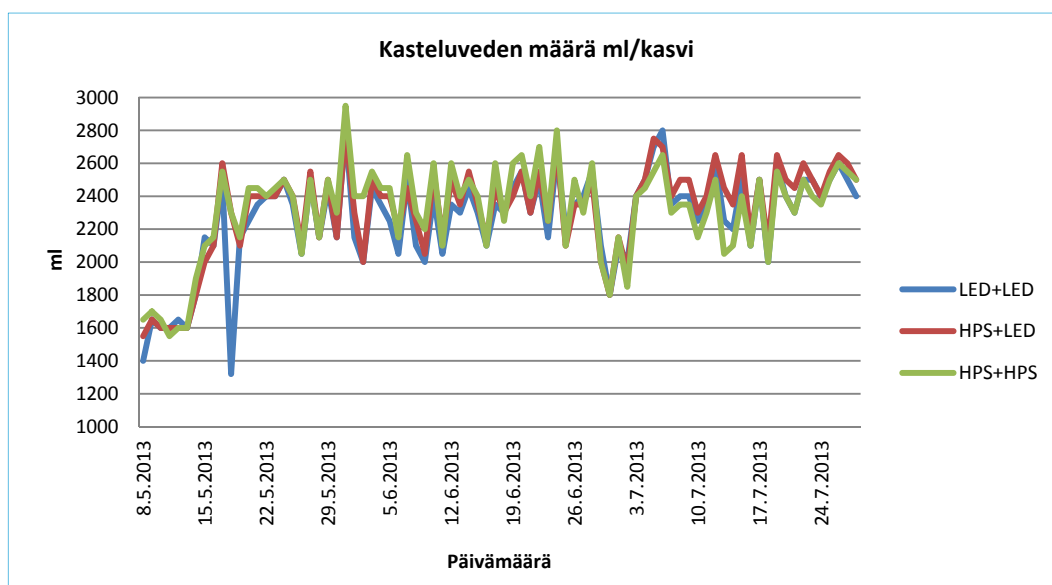


Kuva 19. Kumulatiivinen CO₂-hävikki suhteessa HPS+HPS huoneeseen.

Figur 19. Den kumulativa CO₂-förlusten jämfört med HPS+HPS huset

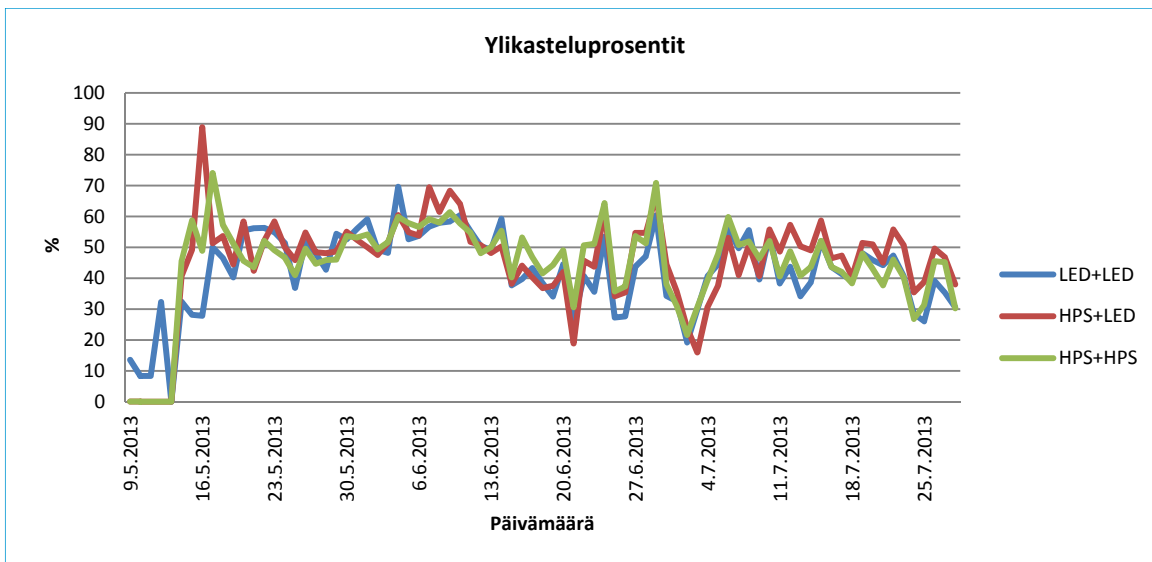
3.1.6 Kesäviljelyn kastelu- ja valumaveden määrä

Koko viljelyn aikana kasveja ylikasteltiin keskimäärin 42 % LED+LED huoneessa, 45 % HPS+LED huoneessa ja 44 % HPS+HPS huoneessa. Kuvissa 20, 21 ja 22 on kasteluveden määrä, ylikasteluprosentti ja yhden kasvin todellinen vedenkulutus päivässä.



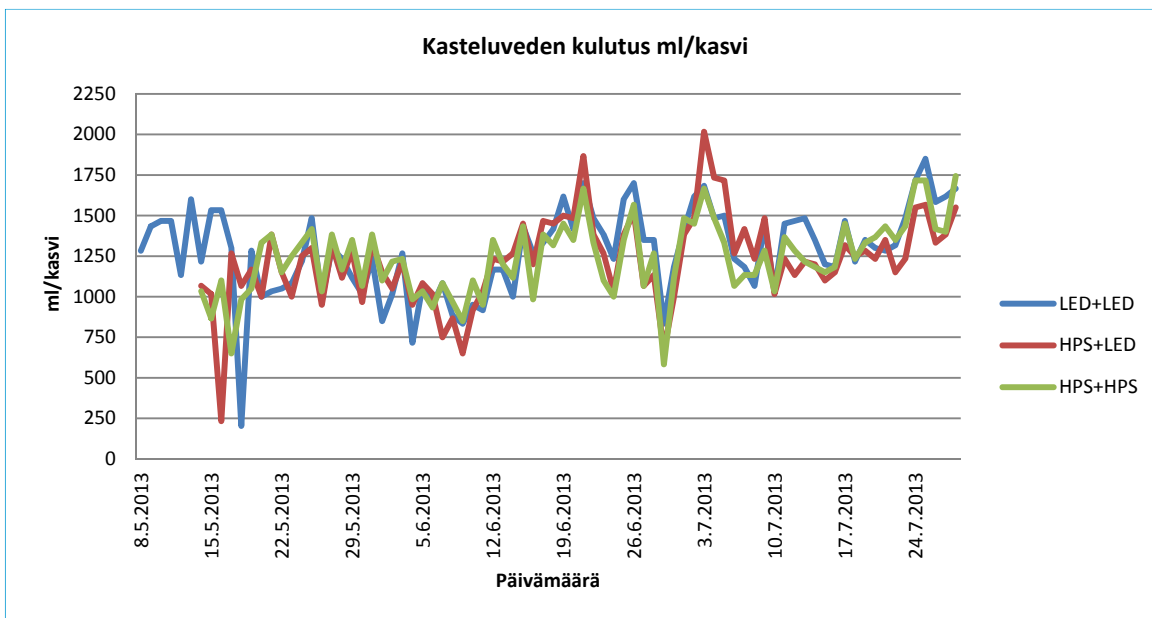
Kuva 20. Eri valotuksissa kasvaneiden kurkkukasvien keskimääräinen päivittäinen kasteluveden määrä millilitroissa kasvia kohden.

Figur 20. Den genomsnittliga mängden av bevattningsvatten ml/växt under en dag i olika belysningar.



Kuva 21. Valumavedestä ja kastelusta laskettu ylikasteluprosentti viljelyn aikana eri valotuksissa.

Figur 21. Från överrinring och bevattning beräknad överbevattningsprocent för de olika belysningarna.



Kuva 22. Yhden kasvin päivittäin kuluttaman veden määrä millilitroissa.

Figur 22. En växts dagliga vattenförbrukning (ml/dygn).

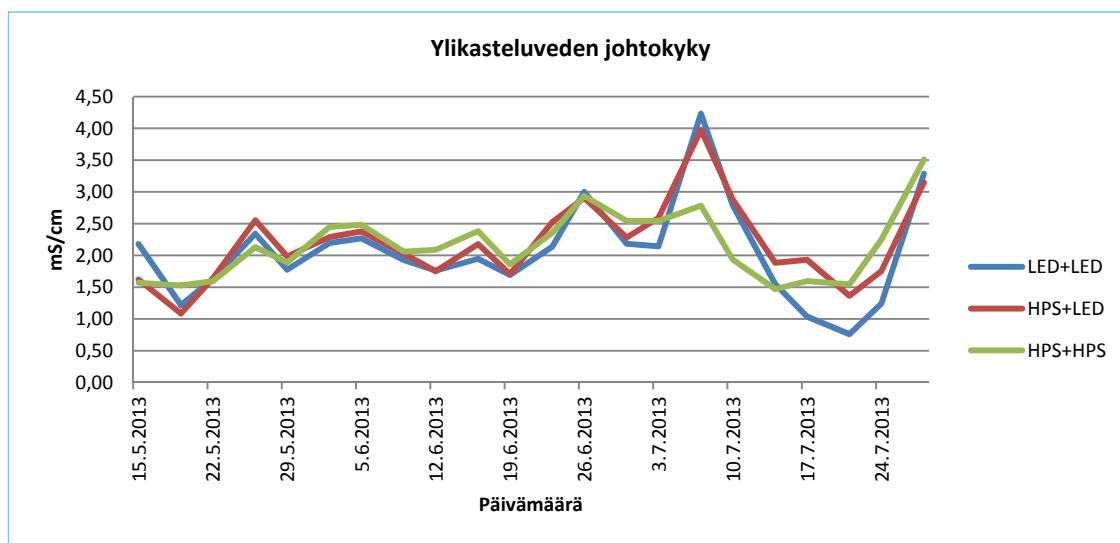
HPS+LED huoneessa vedenkäytön tehokkuus oli hiukan heikompi kuin muissa huoneissa (Taulukko 9).

Talukko 9. Yhden 1. lk:n kurkkukiloon käytetty veden määrä satokaudella kesäviljelyssä.

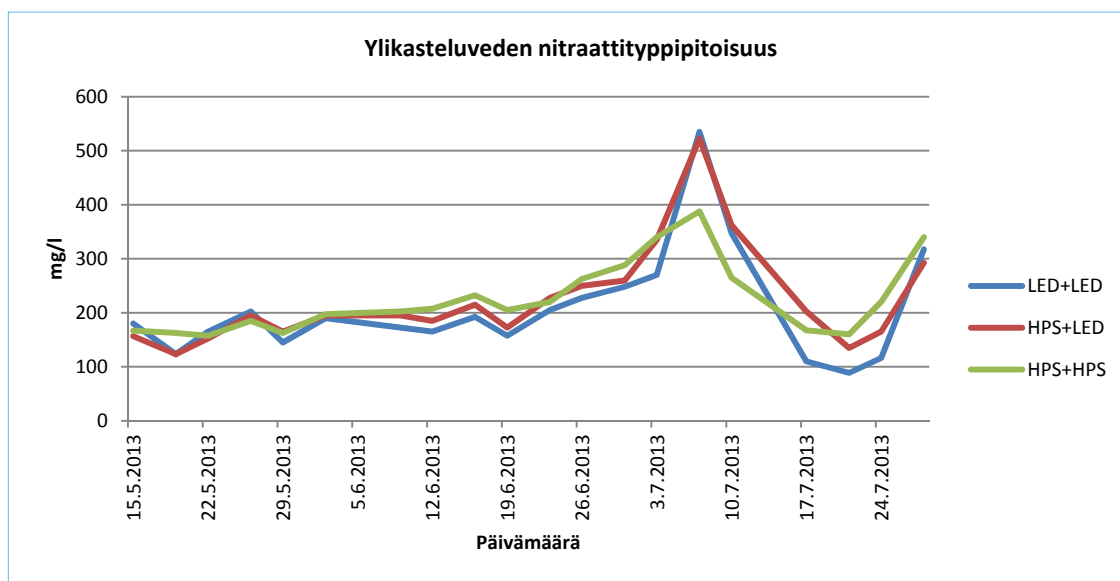
Tabell 9. Vattenmängd som använts för ett kilogram gurka av första klass under skördeperioden på sommaren.

Koejäsen	l/kg
LED+LED	9.5
HPS+LED	9.9
HPS+HPS	9.6

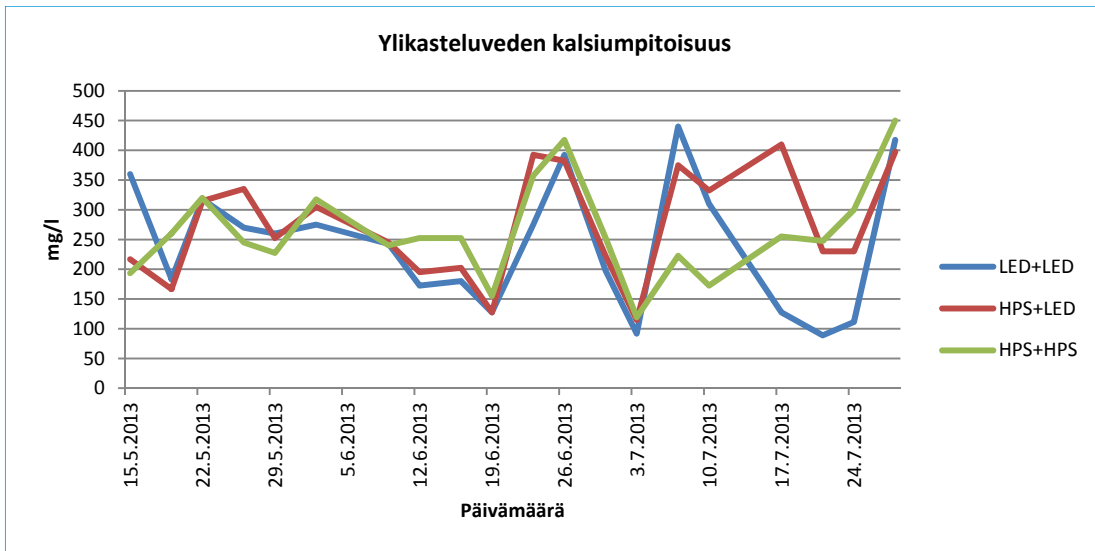
Kasteluveden pH:ta säädeltiin siten, että ylivalumasta mitattu pH pysyi tasaisesti noin 6:ssa. Ylikasteluveden johtokykykymittaukset ovat kuvassa 23. Ylikasteluvdestä mitatut ravinteet ovat kuvissa 24, 25 ja 26. Tarvittaessa lannoitereseptejä hienosäädettiin. Ravinnetitoisuusmittaukset osoittavat, että viimeisinä satoviikkoina LED+LED huoneen kasvien ravinteiden kulutus, erityisesti kalsiumin, nousi nopeasti runsaan satomäärän takia.



Kuva 23. Ylikasteluvdestä viljelyn aikana –mitattu johtokyky (mS/cm) eri valotuksissa.
Figur 23. Ledningstal (mS/cm) uppmätt i överbevattningvattnet i de olika belysningarna.

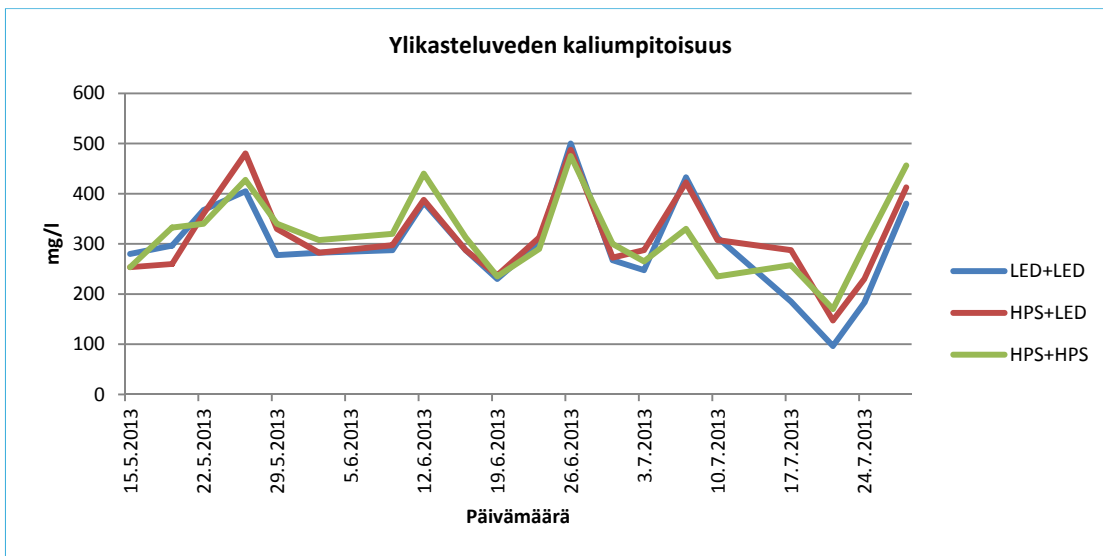


Kuva 24. Ylikasteluvdestä viljelyn aikana mitatut nitraattityypen määrät mg/l eri valotuksissa.
Figur 24. Mängden nitratkväve (mg/l) uppmätt i överbevattningvattnet i de olika belysningarna.



Kuva 25. Ylikasteluvdestä viljelyn aikana mitatut kalsiumpitoisuudet mg/l eri valotuksissa.

Figur 25. Mängden kalcium (mg/l) uppmätt i överbevattningsvattnet i de olika belysningarna.



Kuva 26. Ylikasteluvdestä viljelyn aikana mitatut kaliumpitoisuudet mg/l eri valotuksissa.

Figur 26. Mängden kalium (mg/l) uppmätt i överbevattningsvattnet i de olika belysningarna.

3.2 Talviajan viljelytutkimus

3.2.1 Talvella viljellyn kurkun sadon määrä ja laatu

HPS+LED huoneen kurkkusato (kg/kasvi) oli suurin ja LED+LED huoneen pienin (Taulukko 10). Kappalemääräisesti saatiin yhtä paljon hedelmiä HPS+LED ja HPS+HPS huoneista, mutta hybridihuoneen kurkut olivat painavampia. Yksittäisinä viljelyviikkoina HPS+LED huoneen kurkut tuottivat yleensä eniten satoa ja LED-LED huoneen kurkut vähiten (Kuva 27 ja 28).

Taulukko 10. Koko viljelyjakson, 15 satoviikon aikana, saatu 1 lk:n sato ja kokonaissato kiloina ja kappaleina kasvia kohden sekä yhden hedelmän keskipaino eri valotuskäsittelyissä. Eri aakokset osoittavat parametreittäin tilastollisen eron eri valotuskäsittelyissä.

Tabell 10. Första klassens skörd och total skörd under hela skördeperioden, 15 veckor, som kg och antal per växt, samt en frukts medelvikt i gram. De olika bokstäverna visar den statistiska skillnaden mellan olika belysningar.

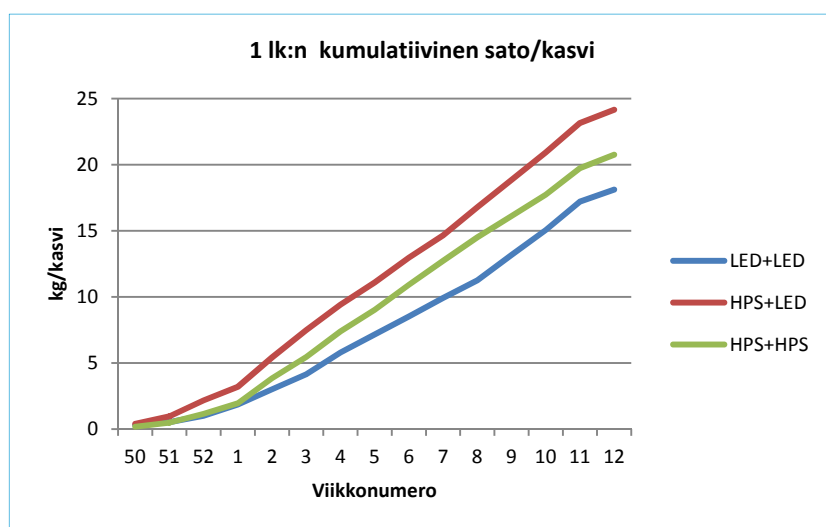
Koejäsen	1 lk sato, kg	Sadot yhtä kasvia kohden			Yhden hedelmän paino, g
		Kokonaissato, kg	1 lk sato, kpl	Kokonaissato, kpl	
LED+LED	18 a	21 a	59 a	76 a	306 a
HPS+LED	24 b	28 b	76 b	90 b	319 b
HPS+HPS	21 c	26 c	70 b	90 b	297 c

LED+LED huoneessa kehittyi satokelpoisia hedelmiä suhteellisesti vähiten (satohedelmä/lehti) ja kasvien satoindeksi oli pienin (Taulukko 11).

Taulukko 11. Satona korjattujen hedelmien kehittyminen suhteessa lehtien lukumäärään sekä satoindeksi eri valotuksissa.

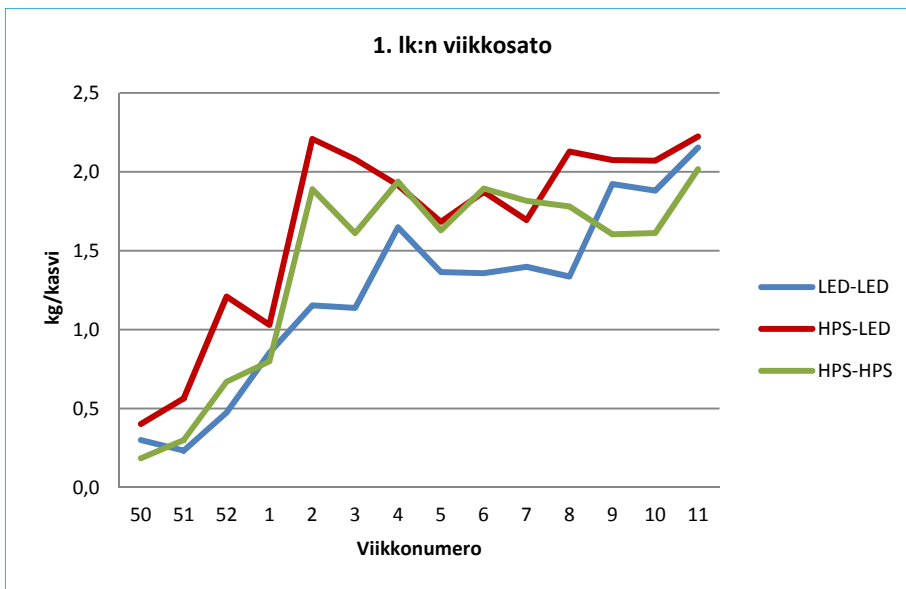
Tabell 11. Antal skördedukliga frukt jämfört med antal blad i procent samt skördeindex.

Koejäsen	Satohedelmä/lehti	Satoindeksi
LED+LED	69 %	60 %
HPS+LED	74 %	65 %
HPS+HPS	74 %	63 %



Kuva 27. 1 lk:n kumulatiivinen viikkosato kg/kasvi eri valotuksissa.

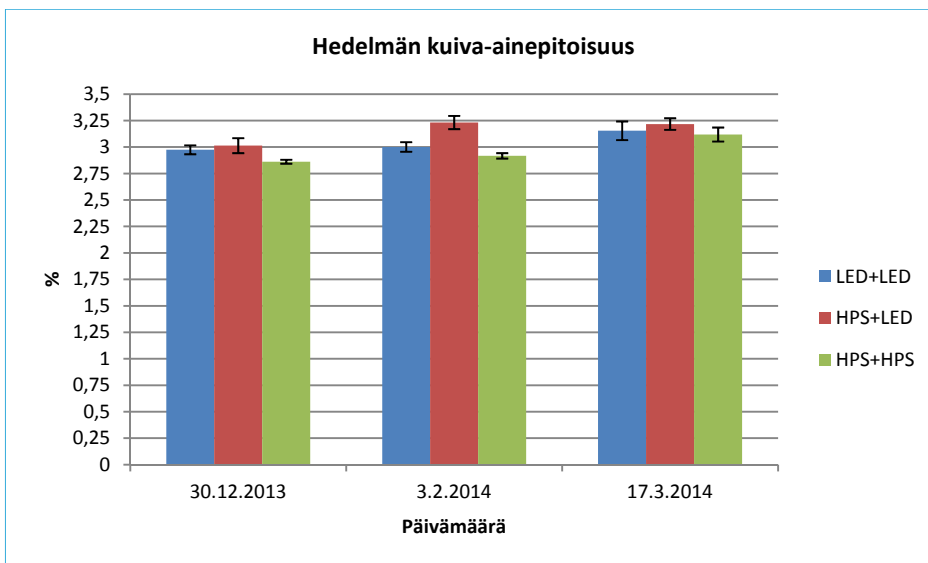
Figur 27. Första klassens kumulativa veckoskörd kg/växt i olika belysningar.



Kuva 28. 1 lk:n viikkosadot kiloina kasvia kohden eri valotuskäsittelyissä. Vajaa viikko 12 on jätetty pois.

Figur 28. Första klassens veckoskörd kg/växt i olika belysningar. Vecka 12 uteslöts pga. att den var ofullständig.

Hedelmien kuiva-ainepitoisuus oli pienin HPS+HPS huoneessa kaikkina mittauskertoina (Kuva 29). Ero kuitenkin tasoittui satokauden loppupuolella, jolloin luonnonvalon määrä oli talvea suurempi. LED-välivalolla yhdessä HPS ylävalon kanssa saattoi olla myönteinen vaikutus kurkun kuiva-ainepitoisuuteen.

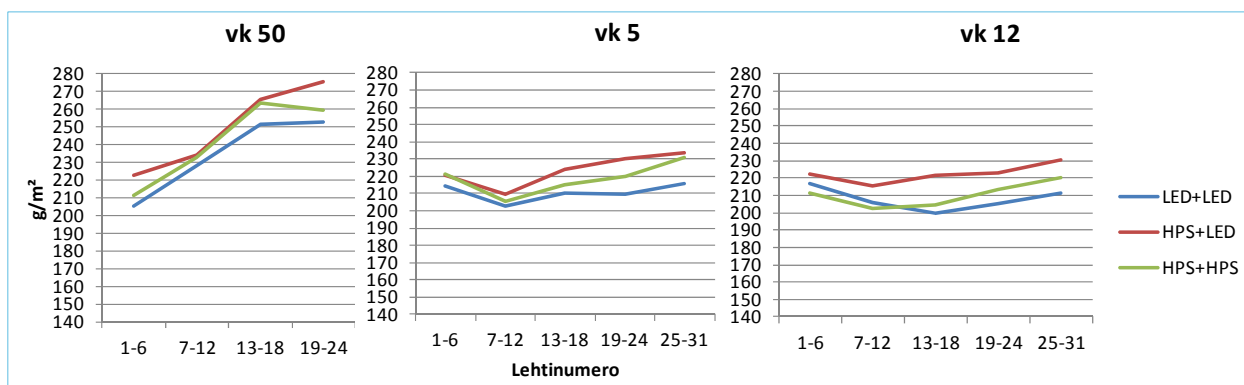


Kuva 29. Hedelmien kuiva-ainepitoisuudet eri valotuksissa ja eri ajankohtina.

Figur 29. Fruktens torrsubstanshalt (%) i olika belysningar och omgångar.

3.2.2 Talvikasvuston koko ja ulkonäkö

Spesifiset lehtipainot (SLW) olivat talvella erilaiset kuin kesällä. HPS+LED kasvien SLW oli koko viljelyn ajan yleensä suurin ja LED+LED kasvien pienin (Kuva 30).



Kuva 30. Spesifinen lehtipaino g/m^2 kolmena eri ajankohtana. Lehtinumeroit laskettiin latvasta alkaen.
Figur 30. Den specifika bladvikten g/m^2 i tre omgångar. Bladnumren beräknades från toppen till basen.

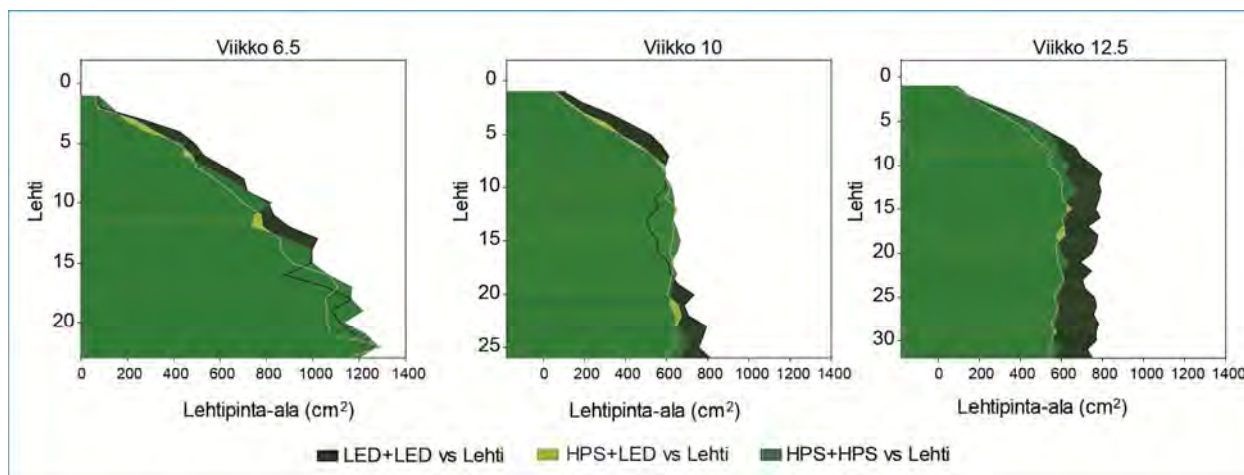
Valotus vaikutti merkittävästi lehtien kokoon ja kasvuston rakenteeseen (Kuva 31). Erityisesti LED+LED huoneen kasvien lehtien pinta-ala oli paljon suurempi kuin muissa huoneissa. On todennäköistä, että LED+LED kasvien isot lehdet varjostivat toisiaan, jolloin koko kasvuston saama valo pieneni. Vaikka kasvien lehtien koot pienenevät kasvuston ikääntyessä, olivat LED+LED huoneen kasvien lehdet muita kookkaampia.

LED+LED-käsittelyssä kurkkukasvin varsi oli pisin, lehtien lukumäärä pienin, varren kuiva-ainepitoisuus pienin ja nivelvälin pituus suurin (Taulukko 12). Kun ylävalo oli HPS, välivalotyyppejä ei juurikaan vaikuttanut kasvin em. ominaisuuksiin.

Taulukko 12. Kurkkukasveista tehtyjä mittauksia kokeen lopussa eri valotuskäsittelyissä. Eri aakkoset kuvaavat tilastollista eroavuutta käsittelyjen välillä kussakin parametrissa erikseen.

Tabell 12. I slutet av försöket gjordes olika mätningar på gurkväxterna. Olika bokstäver betyder att det finns statistisk skillnad mellan olika behandlingar och mellan varje parameter sinsemellan.

Koejäsen	Varren pituus, m	Varren kuiva-aine, %	Nivelväli, cm	Lehdet, kpl	Kasvin kuivapaino, g
LED+LED	12.8 a	9.1 a	10.2 a	126 a	444
HPS+LED	12.0 b	9.8 b	8.7 b	138 b	459
HPS+HPS	12.1 b	10.0 b	8.8 b	137 b	446

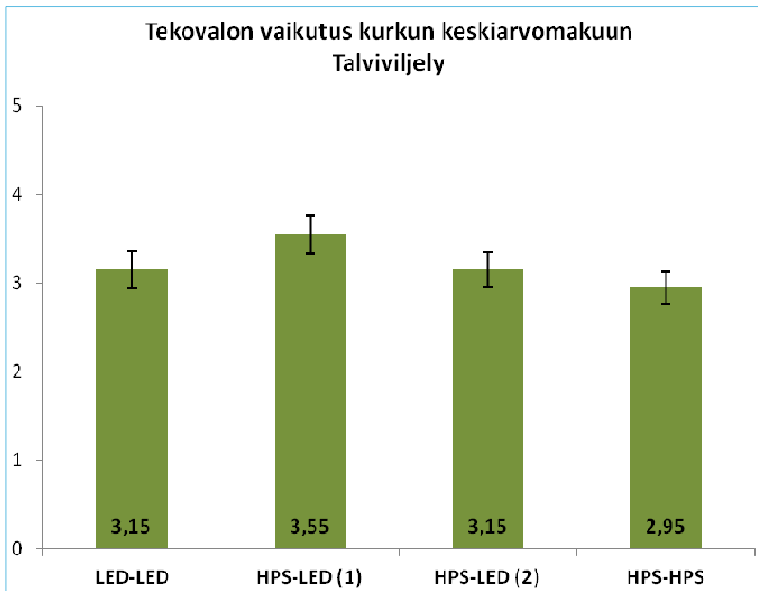


Kuva 31. Kasvuston profiilikuvat eri viljelyviikkoina.

Figur 31. Profiler av växtbestånden för olika odlingsveckor.

3.2.3 Talvikurkun hedelmien makutesti

Heikoimman makuarvosanan saivat keskimäärin HPS+HPS-kurkut (2,95) ja parhaimman HPS+LED-ykköskurkut (3,55) (Kuva 32). Makujakaumatulokset eivät kuitenkaan yksiselitteisesti osoittaneet, että HPS+HPS-valotus johtaisi kurkun heikompaan makuun muihin valokäsittelyihin verrattuna. Yksittäisen valokäsittelyn suuresta sisäisestä makuvaihtelusta ja/tai tunnistamisen vaikeudesta oli myös osoituksena HPS+LED (1) ja HPS+LED (2) keskinäiset numeeriset eroavuudet maun suhteen. Myös valtaosa (74 %) raatilaisista totesi, että käsittelyiden välillä ei ollut selvästi havaittavia makueroja. Siten johtopäätös on, että kokeen kolmella erilaisella tekovalotuksella ei ollut toisistaan poikkeavaa ja/tai selvästi erotettavaa vaikutusta talviviljellyn kurkun makuun.



Kuva 32. Valokäsittelyjen vaikutus hedelmien makuun talvella. Kuvassa keskiarvot ja SE.

Figur 32. Ljusbehandlingarnas inverkan på fruktens smak i vinter. I figuren är medeltal och SE.

3.2.4 Talvikurkun lehtien, kasvuston ja hedelmien lämpötila

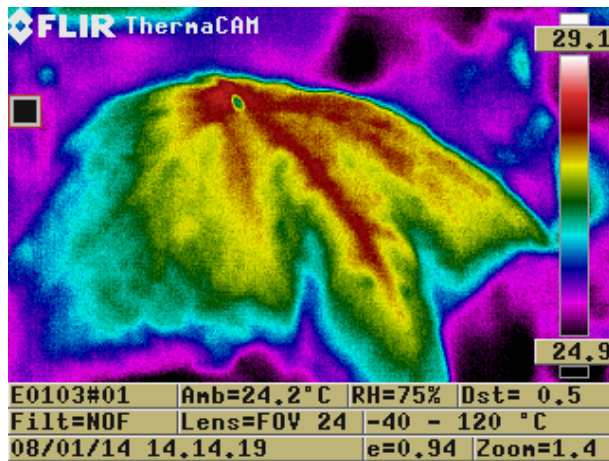
Kurkun lehtien lämpötilamittauksista näkee, että LED ja HPS välivalot lämmittivät lehtiä eri tavoin (Taulukko 13). LED-valotus lämmitti vähemmän kuin HPS-valo. Infrapunakameramittaukset olivat samansuuntaisia. Käsittelystä riippumatta oli lehden keskiosassa 3-4 astetta korkeampi lämpötila kuin lehden reuna-alueella. Kuvassa 33 on välivalojen kohdalta mitatut lehdet.

Kasvuston lämpötilaa kuvattiin myös kasvirivistä, jossa ei ollut välivaloa. HPS ylävalona lämmitti myös välivalotonta kasvuston puolta enemmän kuin LED-valo (Kuva 34). Tämä osoittaa sen, että kasvustoa on LED-valotuksessa lämmitettävä enemmän kuin HPS-valotuksessa. Kun kasvuston ylävalona oli HPS-valo (HPS+HPS- ja HPS+LED-käsittely), oli kurkkukasvuston ylälehtien lämpötila 3-4 astetta korkeampi kuin yksinomaan LED-valotusta (LED+LED) saaneiden lehtien lämpötila (Kuva 35). Jos LED-lampun teho olisi ollut sama kuin HPS:n, niin lämpö määräkin olisi ollut lähes sama. LED-valaisimen lämpö ei säteile yhtä laajalle kuin HPS:n. LED-valon lämpö johtuu enemmän kuin säteilee ympäristöön. Siten ei voida arvioida lehden todellista lämpötilaa jos valaisimena olisi tehokas LED-valaisin.

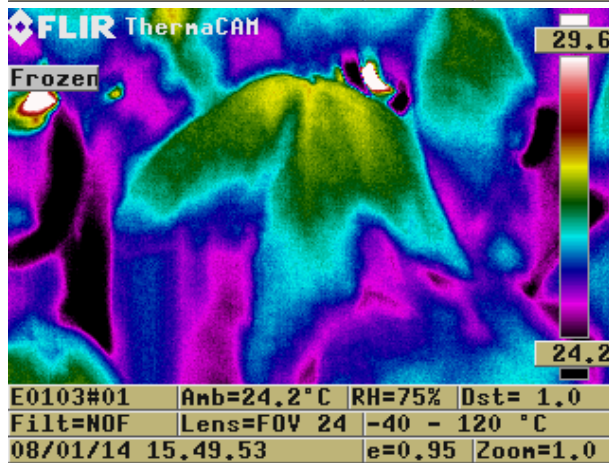
Taulukko 13. Lehden lämpötilamittauksia noin viidennestä lehdestä latvasta alaspäin välivalon korkeudella välivalon kohdalla välivalorivissä ja viereisessä rivissä, jossa ei ollut välivaloa. Lehden etäisyys valaisimeen välivalorivissä oli 22 cm LED-valoista ja 30 cm HPS-valoista. Mittaukset tehtiin 4.12.2013. Kasvusto ei ollut vielä täysimittainen.

Tabell 13. Bladtemperaturen uppmättes på ungefär det femte bladet från toppen neråt på mellanbelysningens höjd i lampraden och i raden utan mellanbelysning. Bladets avstånd från LED-lampan var 22 cm och från HPS-lampan 30 cm. Mätningarna gjordes 4.12.2013 och växtbeståndet hade inte ännu uppnått full längd.

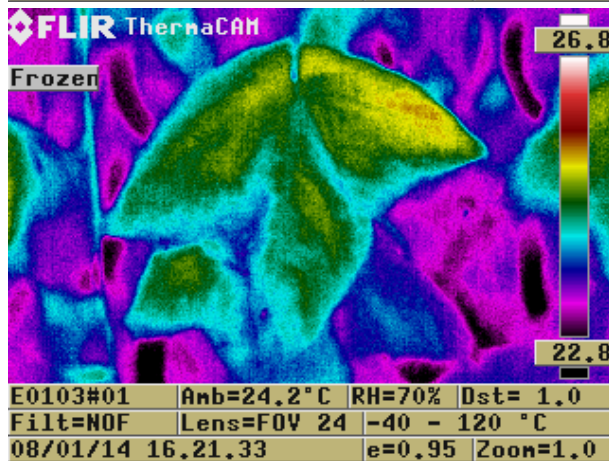
Koejäsen	Lehden lämpötila °C		
	Välivalorivi valokohta	Välivalojen välissä	Ei välivalorivi
LED+LED	24.3	-	22.7
HPS+LED	26.5	-	25.5
HPS+HPS	28.1	27.0	26.2



HPS+HPS välivalossa



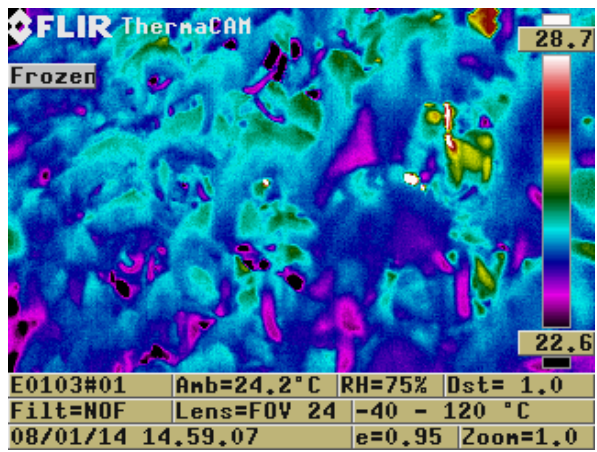
HPS+LED välivalossa



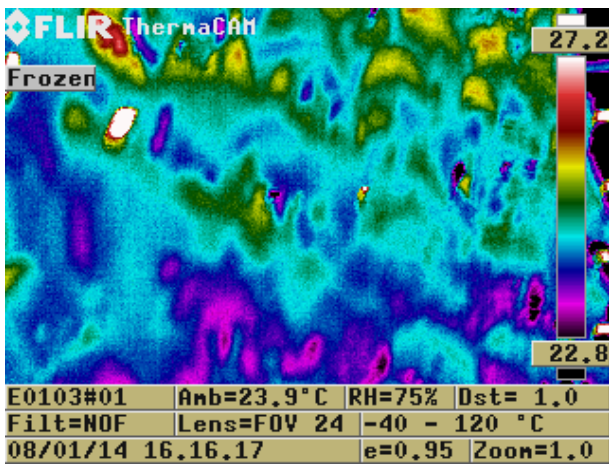
LED+LED välivalossa

Kuva 33. Välivalojen kohdalta mitatut lehden lämpötilat eri valotuksissa. Lihavoitu teksti kertoo välivalon.

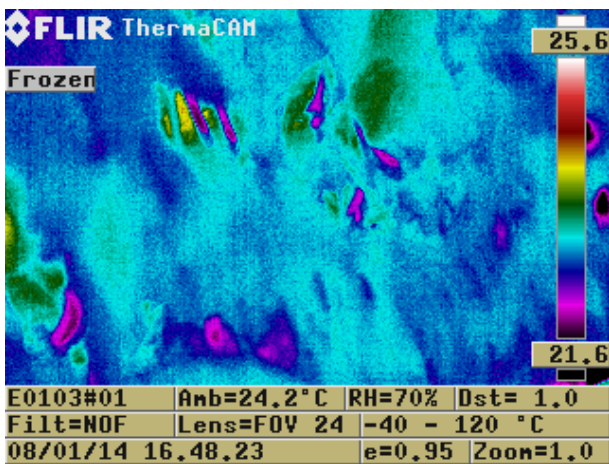
Figur 33. Bladens temperatur uppmättes vid mellanbelysningen i olika belysningsförhållanden. Fet text anger mellanbelysningen.



HPS+HPS kasvusto



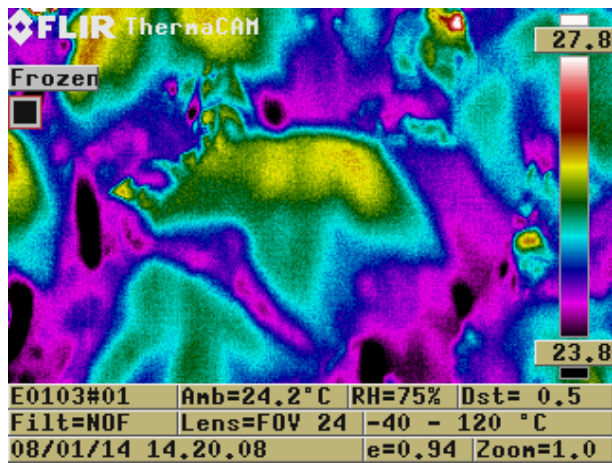
HPS+LED kasvusto



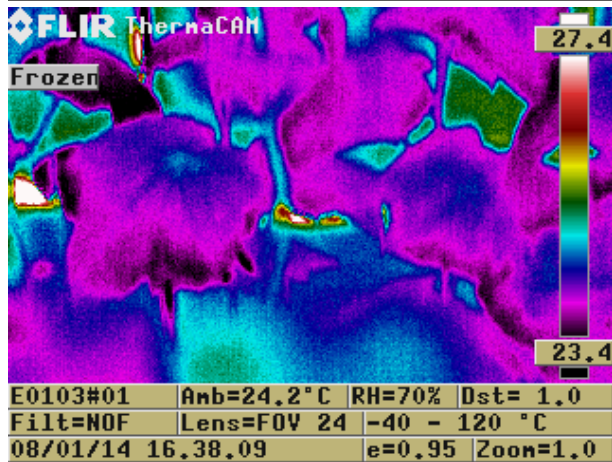
LED+LED kasvusto

Kuva 34. Välivalottoman kasvirivin lämpötilakuva eri valotuskäsittelyissä.

Figur 34. Växtlighetens temperatur i raden utan mellanbelysning vid olika ljusbehandlingar.



HPS+HPS valotus

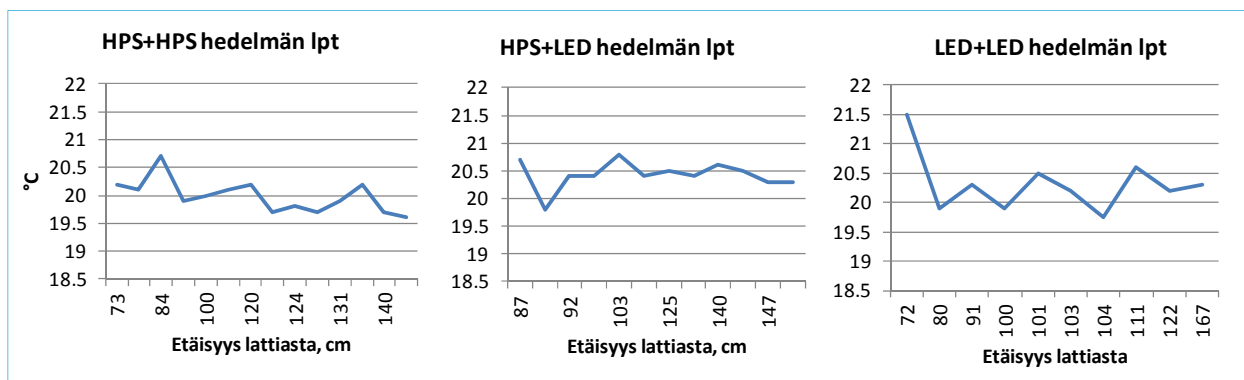


LED+LED valotus

Kuva 35. Ylälehtien lämpötila, kun ylävalona on HPS tai LED-valo.

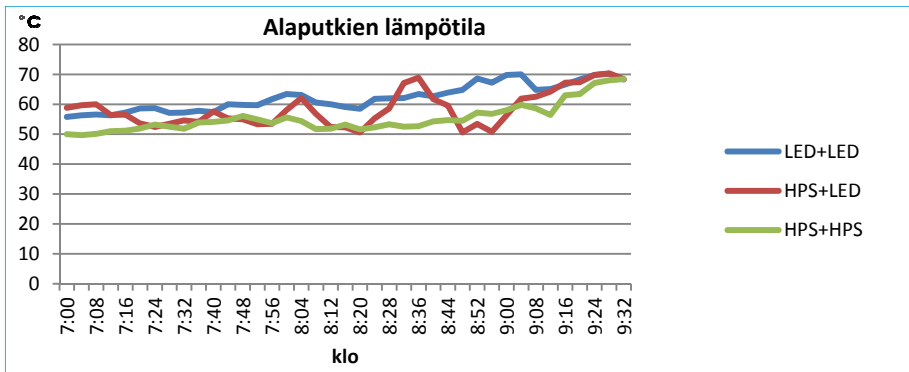
Figur 35. Toppladens temperatur när toppbelysning är HPS- eller LED-belysning.

Hedelmien lämpötilaa kasvustossa mitattiin viikolla 2 välivalottoman käytävän puolelta. Mittauskohta oli hedelmän keskikohta ja hedelmiä mitattiin eri korkeuksilla lattiasta klo 8-9. Kuva 36 osoittaa, että alhaisimmat lämpötilat mitattiin HPS+HPS huoneesta ja korkeimmat HPS+LED huoneesta. Kuvassa 37 on alaputkien lämpötilat, osoittaen, että HPS+HPS huoneessa alaputkien lämpötila oli yön jälkeen muita huoneita alhaisempi. Alhainen lämpötila hidastaa kurkun kehittymistä.



Kuva 36. Hedelmien lämpötilamittaukset viikolla 2 eri etäisyyksillä maasta.

Figur 36. Frukten temperatur under vecka 2 på olika avstånd (höjder) från golvet.

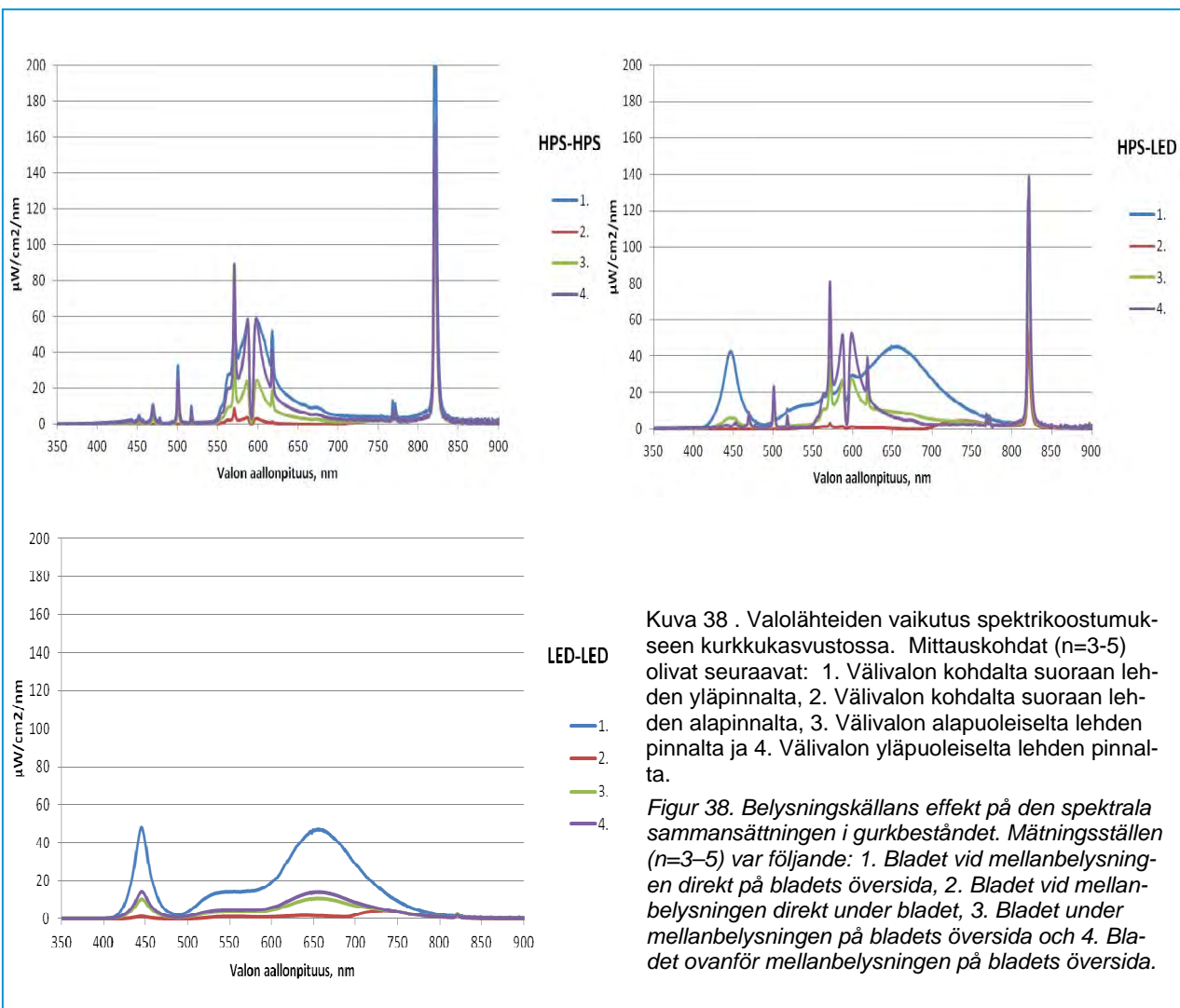


Kuva 37. Alaputkien lämpötilat ennen hedelmien lämpötilan mittausta ja mittauksen aikana.

Figur 37. De nedre värmerörens temperatur vid växtunderlaget före och under mätning av fruktens temperatur.

3.2.5 Kasvuston spektrimittaukset

Kaikkien valolähteiden PAR-alueen valo absorboitui lähes kokonaan lehteen (Kuva 38). Sen sijaan osa HPS:n infrapunaisesta valosta kulkeutui myös lehden läpi. Mikäli valolähteenä oli yksinomaan LED-valotus (LED+LED), vaimeni PAR-alueen valo voimakkaammin välivalon ylä- ja alapuolisessa lehtikerroksessa kuin valolähteen ollessa joko yksinomaan HPS- tai hybridiratkaisu (HPS+LED). Vaikka hybridiratkaisussa oli HPS-valo ylävalona, tuli PAR-säteilyä välivalokerrokseen asti täydentäen LED-välivalotusta ja sen tuottamaa laajaa spektrialuetta ja toisaalta tarkasti kohdistettua valoa. Välivalon läheisyydessä oleva lehtikerros tuottaa yhteyttämistuotteita kehittyville hedelmille ja niukka valo LED+LED ratkaisussa todennäköisesti heikensi fotosynteesiä muihin ratkaisuihin verrattuna.

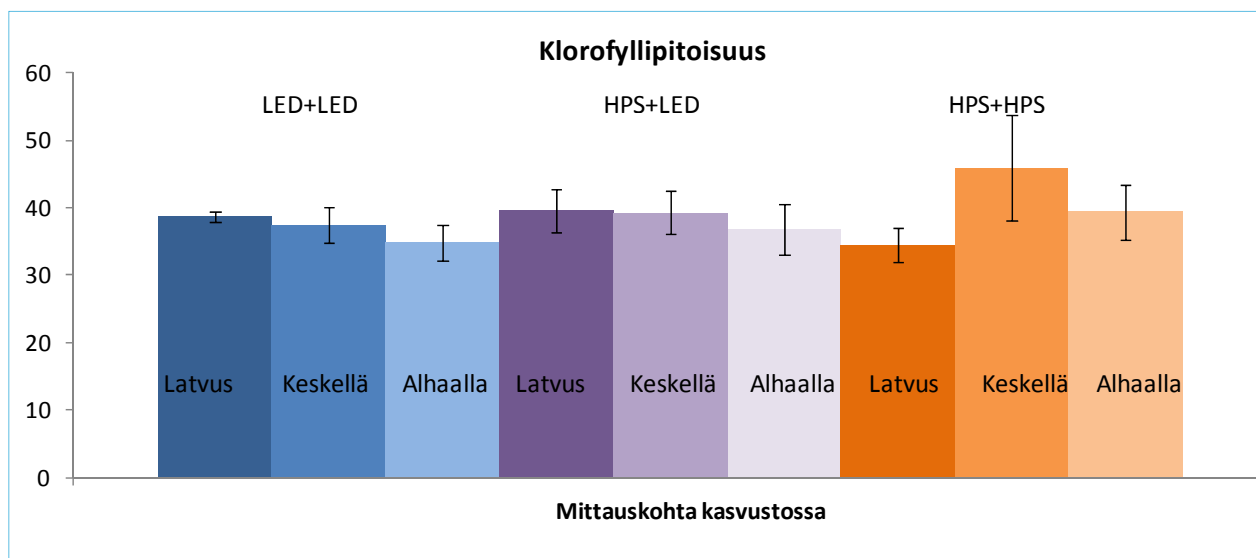


Kuva 38 . Valolähteiden vaikutus spektrikoostumukseen kurkkukasvustossa. Mittauskohdat ($n=3-5$) olivat seuraavat: 1. Välivalon kohdalta suoraan lehden yläpinnalta, 2. Välivalon kohdalta suoraan lehden alapinnalta, 3. Välivalon alapuoleiselta lehden pinnalta ja 4. Välivalon yläpuoleiselta lehden pinnalta.

Figur 38. Belysningskällans effekt på den spektrala sammansättningen i gurkbeståndet. Mätningstillägen ($n=3-5$) var följande: 1. Bladet vid mellanbelysningen direkt på bladets översida, 2. Bladet vid mellanbelysningen direkt under bladet, 3. Bladet under mellanbelysningen på bladets översida och 4. Bladet ovanför mellanbelysningen på bladets översida.

3.2.6 Talvikurkun lehtien klorofyllipitoisuus

Kasvuston eri korkeuksilla mitatuissa klorofyllipitoisuudessa oli pieniä eroja (Kuva 39).



Kuva 39. Klorofyllipitoisuus lehdissä kasvuston eri korkeuksilla eri valotuksissa tammikuussa.

Figur 39. Bladens klorofyllhalt vid olika höjder på plantan i olika belysningar. Mätningarna gjordes i januari.

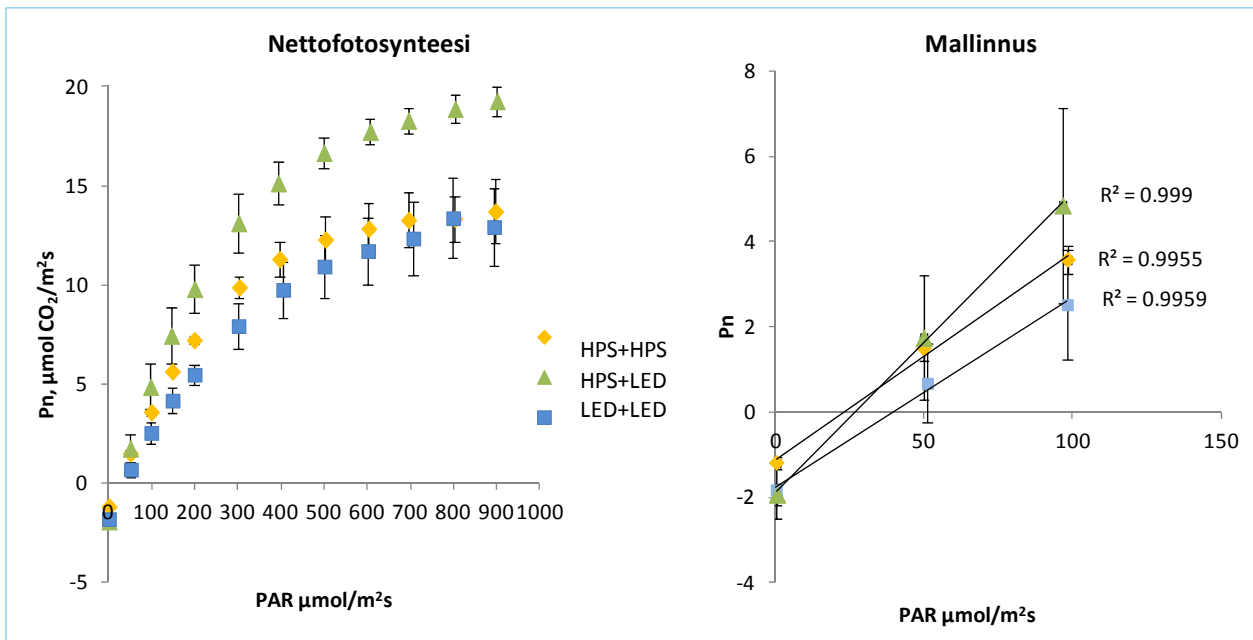
3.2.7 Talvikurkun lehtien fotosynteesitehokkuus

Lehtien fotosynteesimittauksissa tammikuussa suurin nettofotosynteesitehokkuus näytti olevan HPS+LED huoneessa ja pienin LED+LED huoneessa (Kuva 40). Mittausten välillä oli etenkin LED+LED huoneessa varsin runsas sisäinen hajonta eikä valotusratkaisujen välillä ollut tilastollisesti merkitseviä eroja.

Nettofotosynteesi lisääntyi valomäärän kasvaessa kaikissa huoneissa. Valomäärän kasvaessa yli 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$:n nettofotosynteesi ei enää kasvanut lineaarisesti. Noin 500-600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$:ssa lehtien nettofotosynteesi saavutti saturaatiopisteen LED+LED ja HPS+HPS huoneissa. Tällöin fotosynteesiä ei juurikaan enää tapahtunut vaikka valomäärää lisättiin. Sitä vastoin HPS+LED huoneessa saturaatiopiste saavutettiin 700-800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$:ssa osoittaen, että nämä lehdet kykenevät yhteyttämään korkeammassa valossa kuin muissa huoneissa kehittyneet lehdet.

Kun valomäärä oli niukka, kasvien yhteyttäminen pieniä. Erittäin niukassa valossa saavutettiin valon kompensatiopiste, jolloin yhteyttäminen oli yhtä suuri kuin hengitys. LED+LED huoneessa valon kompensatiopiste saavutettiin korkeammassa valomäärässä (noin 40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$:ssa) kuin muissa huoneissa. Tämä osoitti, että pelkästään LED+LED valotuksessa kehittyneet lehdet ovat fysiologisesti erilaisia kuin kahdessa muussa huoneessa kehittyneet lehdet.

Fotosynteesimittaukset tukevat ajatusmallia, että kasvit käyttävät laajasti eri valon aallonpituuksia yhteyttämiseen. HPS ylävalon tuottama vihreä ja oranssi valo tunkeutuivat kasvuston alaosiin (kuva 38) ja väli-valolehdet käyttivät myös näitä aallonpituuksia yhteyttämiseen ja yhteyttämiskoneiston ylläpitämiseen vaikka välivalona oli LED.

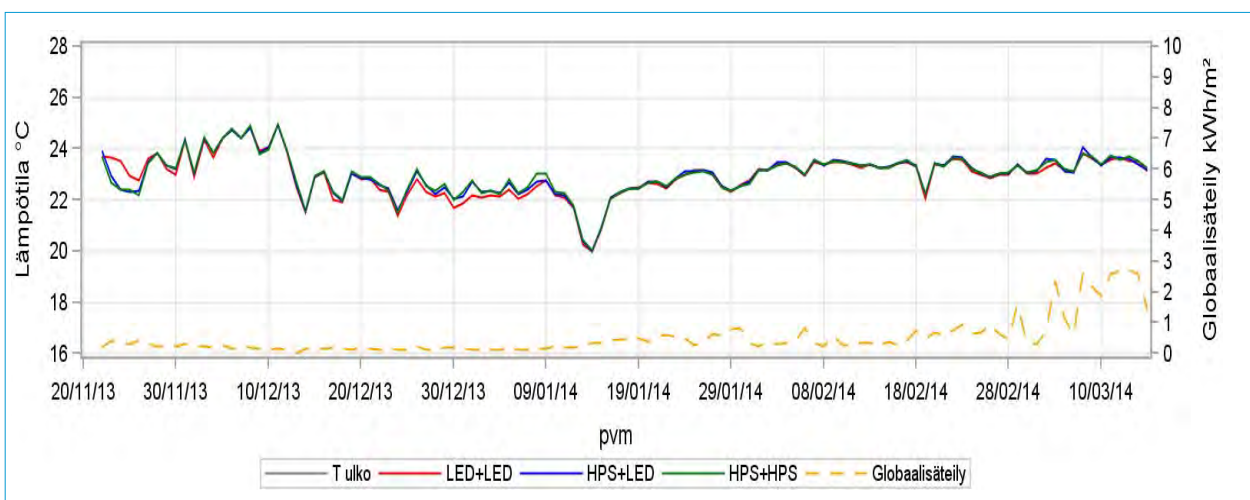


Kuva 40. Kurkun lehtien nettofotosynteesinopeus (Pn) ja SE eri valotuksissa ja valomäärissä (PAR) sekä mittaustulosten perusteella tehty mallinnus.

Figur 40. Gurkbladens nettofotosynteshastighet (Pn) med SE och strålningsmängder (PAR) vid olika lampor samt modeller baserade på mätresultat.

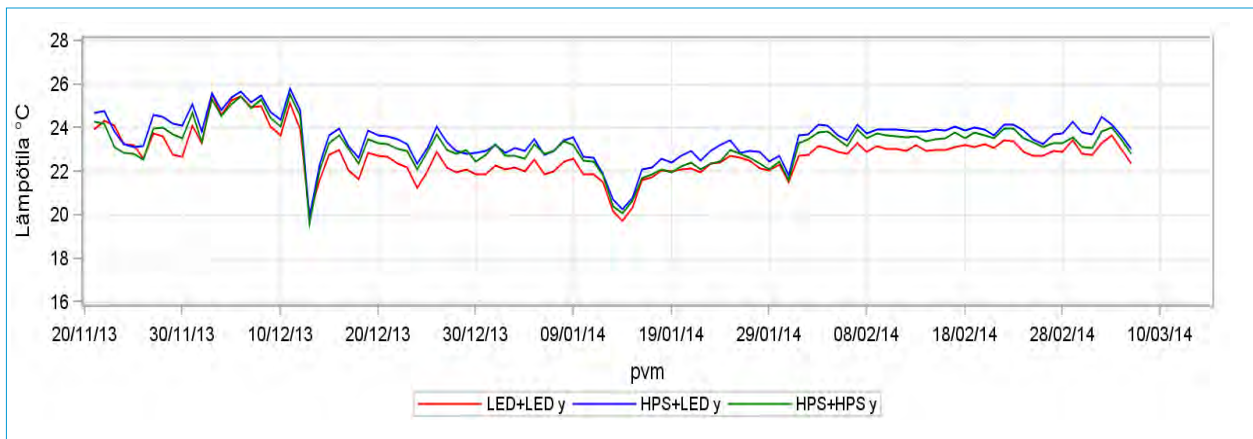
3.2.8 Talviviljelyssä kasvihuoneiden olosuhteet

Talvella psykrometrin mittaama lämpötila oli sama kaikissa kasvihuoneosastoissa (Kuva 41), mutta kasvuston yläosassa, ylä- ja välivalojen puolivälissä LED+LED huoneessa oli vähän viileämpää kuin muissa huoneissa (Kuva 42). Välivalojen korkeudella ero on syksyllä havaittavissa, mutta ei enää talvella (Kuva 43). Hiilidioksidipitoisuus oli kaikissa osastoissa sama. Tuuletus oli olematonta ennen maaliskuuta (Kuva 44). Maaliskuussa LED+LED huoneessa tuuletus näytti nousevan lyhyen aikaa korkeammaksi kuin HPS+LED, mikä johtui suuremmaksi nousevasta kosteudesta LED+LED huoneessa verrattuna HPS+LED huoneeseen.



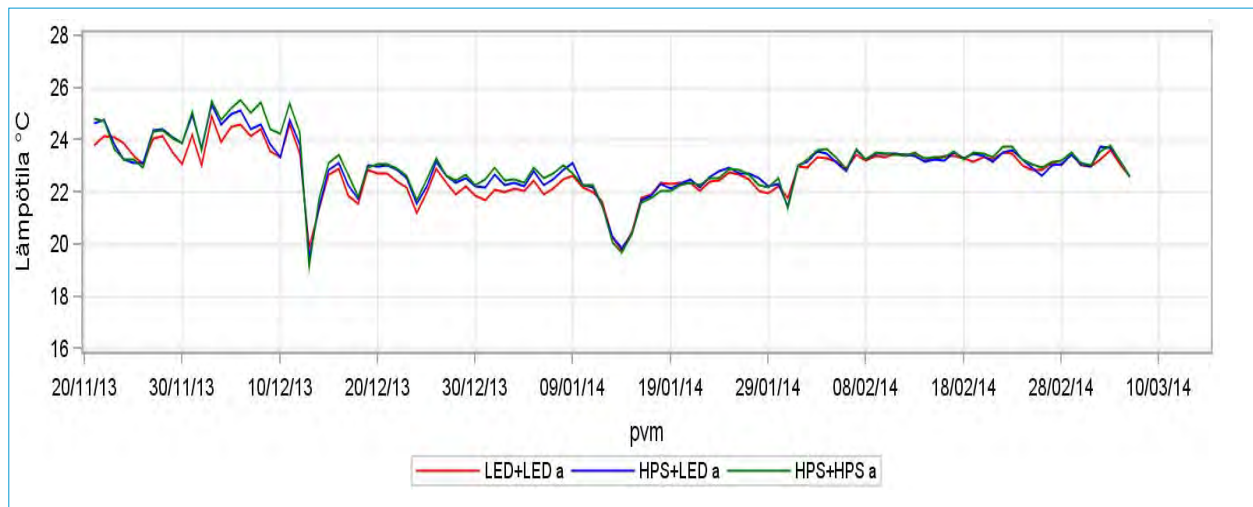
Kuva 41. Psykrometrin mittaama vuorokauden keskilämpötila sekä globaalisäteily ulkona.

Figur 41. Dygnsmedeltemperatur mätt av psykrometer och globalstrålning utomhus.



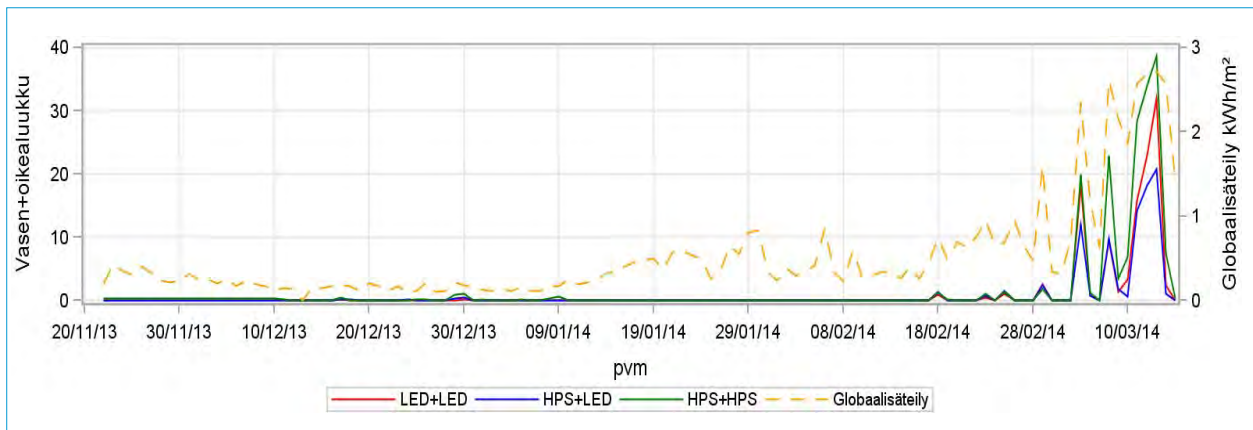
Kuva 42. Vuorokauden keskilämpötila ylä- ja välivalojen puolivälin korkeudella.

Figur 42. Dygnsmedeltemperatur på höjden mellan topp- och mellanbelysning.



Kuva 43. Vuorokauden keskilämpötila välivalojen korkeudella.

Figur 43. Dygnsmedeltemperatur på mellanbelysningens höjd.

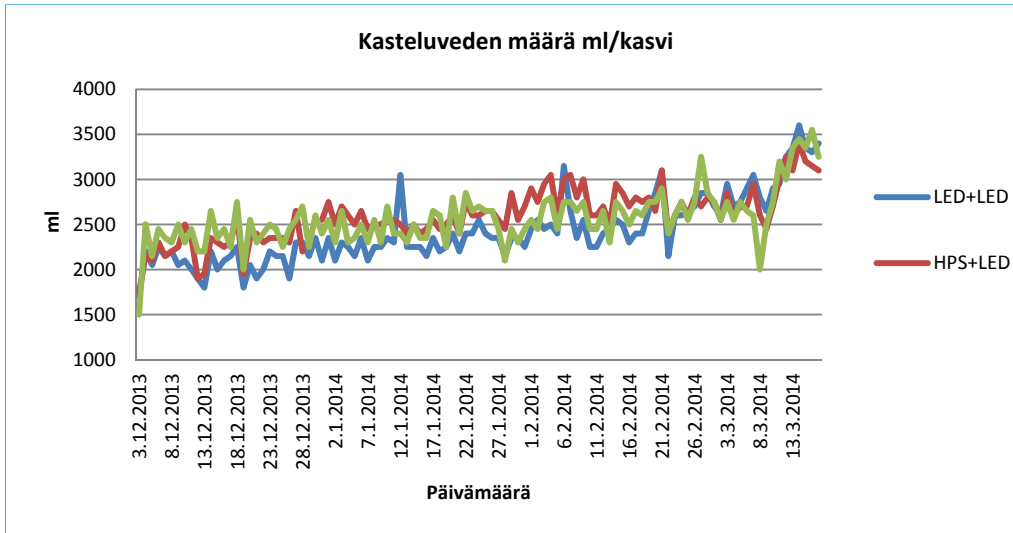


Kuva 44. Päivittäinen tuuletusluukkujen yhteenlaskettu keskimääräinen asento koehuoneissa ja globaalisäteily. Asentojen yhteenlaskettu maksimi on 200.

Figur 44. Ventilationsluckornas sammanlagda medelposition per dygn i försöksrummen och globalstrålning. Om båda luckorna var helt öppna var procenttalet 200.

3.2.9 Talviviljelyn kastelu- ja valumaveden määrät

Kasteluveden määrä, ylikasteluprosentti ja yhden kasvin todellinen vedenkulutus päivässä on esitetty kuvissa 45, 46 ja 47. Todellinen vedenkulutus laskettiin valumaveden ja kasteluveden määrien erotuksena. HPS+LED valotuksessa kasvien vedenkulutus oli suurimman osan viljelyaikaa runsainta. Taulukossa 14 on keskimääräinen ylikasteluprosentti joulukuussa ja tammi-maaliskuussa eri koejäsenillä. Kasveja kasteltiin varsin runsaasti kulutusta enemmän.



Kuva 45. Kasteluveden määrä ml/kasvi eri valotuskoejäsenissä kokeen aikana.

Figur 45. Mängden bevattningsvatten ml/växt i olika belysningar under försökstiden.



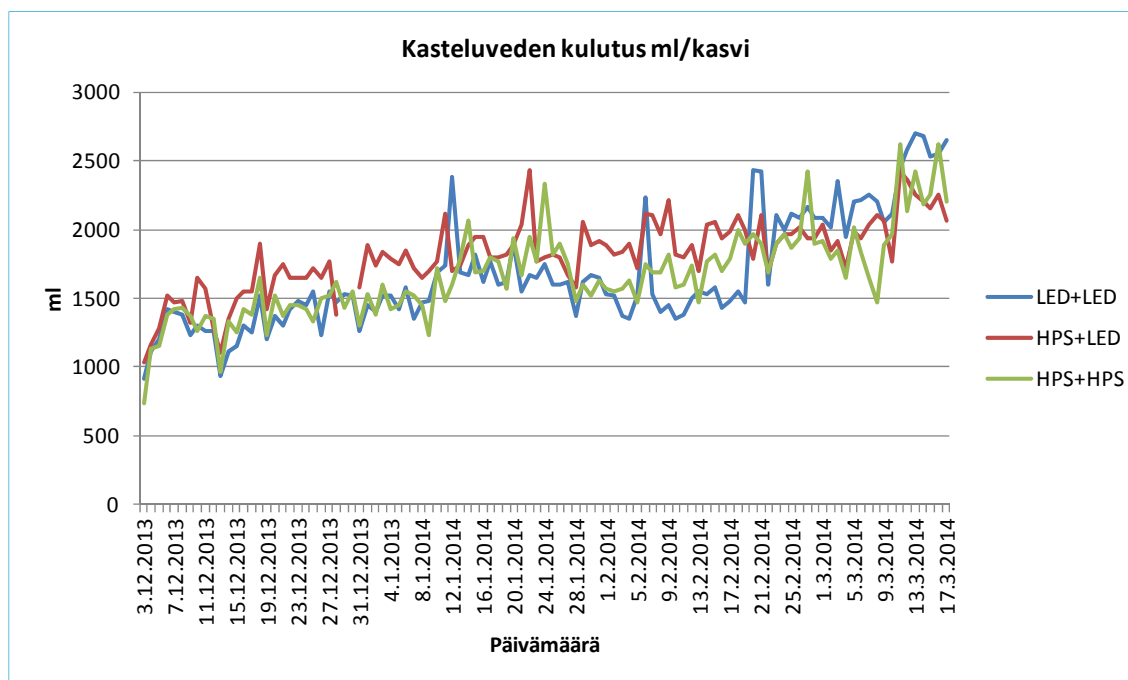
Kuva 46. Valumavedestä laskettu ylikasteluprosentti viljelyn aikana eri valotuksissa.

Figur 46. Överbvattningsprocenten beräknad från överrinningsvattnet under försökstiden. Beräkningarna gjordes i olika belysningar.

Taulukko 14. Keskimääräiset ylikasteluprosentit kahtena eri ajanjaksona eri valotuksissa.

Tabell 14. Genomsnittliga överbevattningsprocenter under två olika tidsperioder i olika belysningar.

Koejäsen	Ylikasteluprosentti	
	3.12.-10.1.	11.1.-17.3.
LED+LED	36	29
HPS+LED	33	29
HPS+HPS	42	32



Kuva 47. Yhden kasvin päivittäin kuluttaman veden määrä millilitroissa.

Figur 47. Förbrukad vattenmängd per växt under en dag (ml/växt).

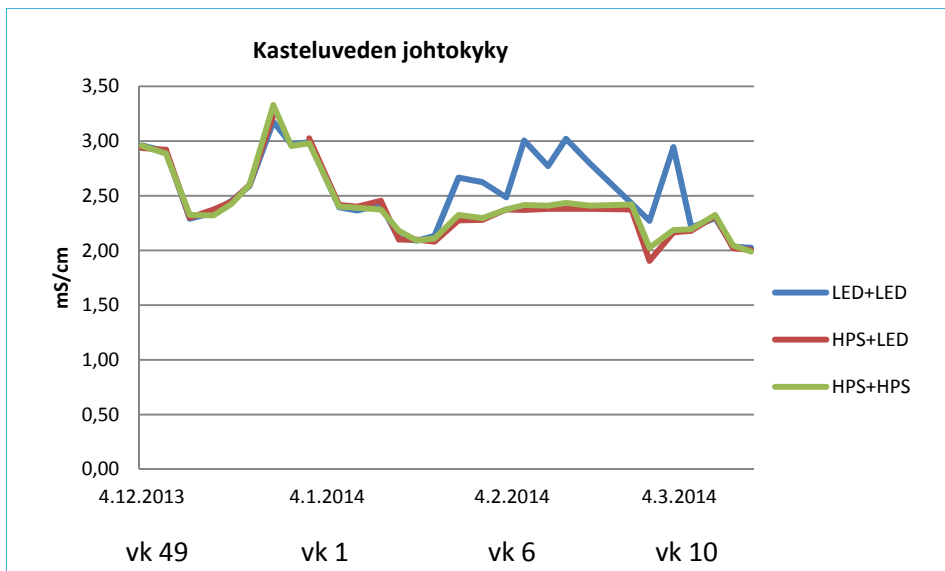
Vedenkäytön tehokkuus sadonkorjuun alusta kasvin tuottamaa 1. lk:n kurkkukiloa kohden on taulukossa 15). HPS+LED huoneen kurkkukasvustossa yhden kilon tuottamiseen kului vähiten ja LED+LED huoneessa eniten vettä.

Talukko 15. Yhden 1. lk:n kurkkukiloon käytetty veden määrä sadonkorjuun ajalla talviviljelyssä.

Tabell 15. Vattenmängd som använts för ett kilogram gurka av första klass under vinterskördeperioden.

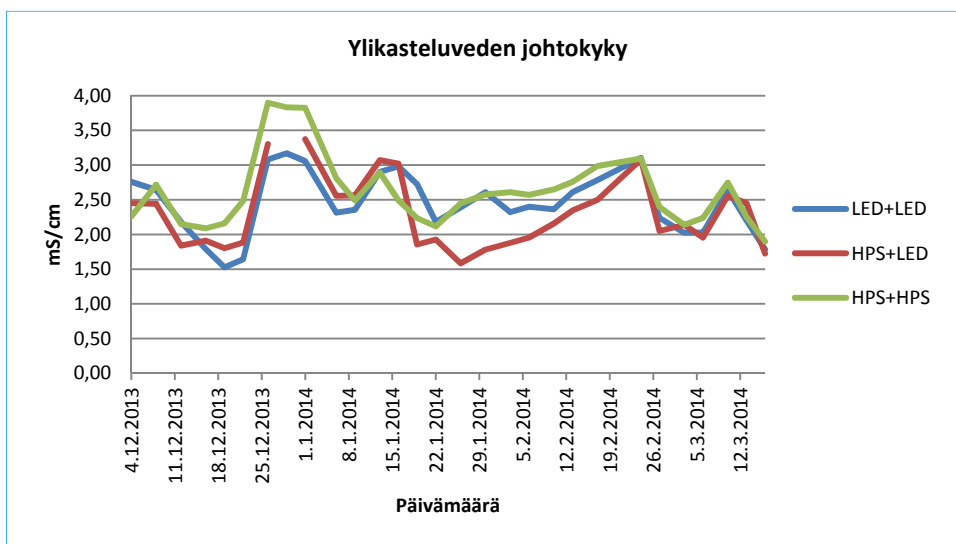
Koejäsen	l/kg
LED+LED	9.3
HPS+LED	7.5
HPS+HPS	8.1

Kasteluveden pH:na pidettiin lukua 6. Kuvassa 48 on kasteluveden johtokyky eri valotuksissa. Ylikastelussa pH pysyi varsin hyvin noin 6:ssa, paitsi kokeen loppuvaiheessa HPS+LED huoneen ylivalumassa pH laski helmikuun puolesta välistä lähtien lähelle pH 5 kokeen loppuajaksi. Ylikasteluveden johtokyky-mittaukset ovat kuvassa 49.



Kuva 48. Kasteluveden johtokykymittaukset.

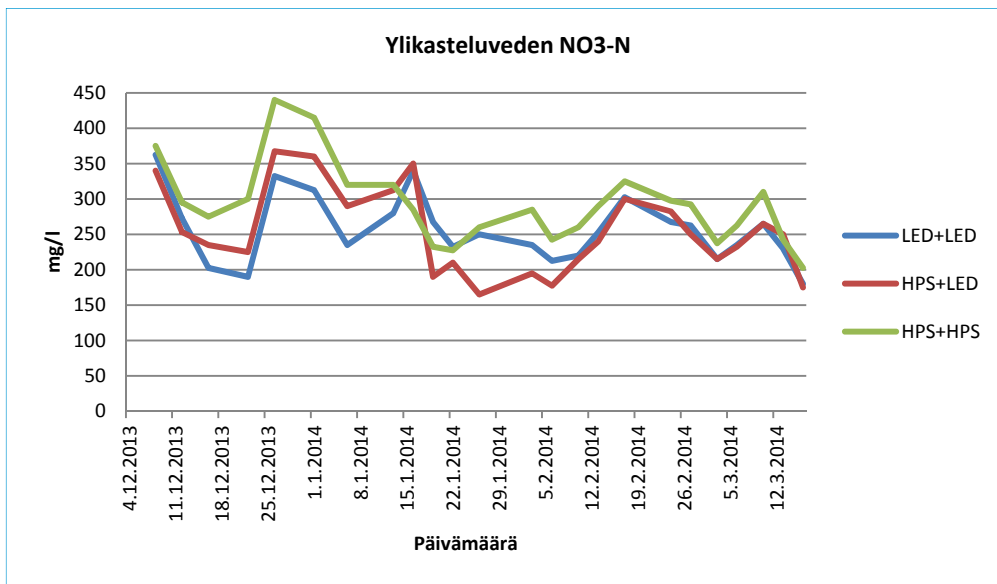
Figur 48. Bevattningsvattnets ledningstalsmätningar.



Kuva 49. Ylikasteluvedestä mitattu johtokyky mS/cm eri valotuksissa.

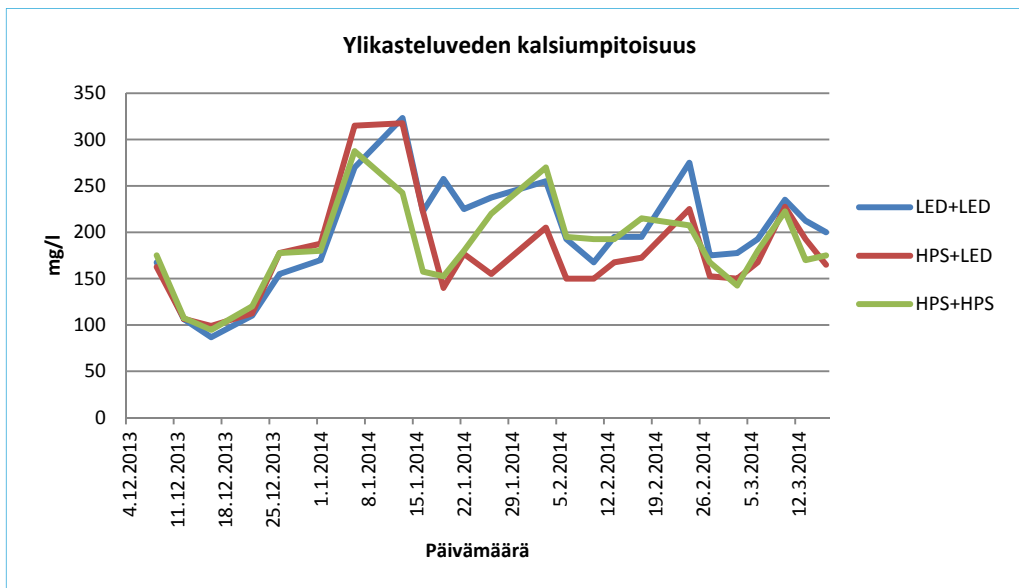
Figur 49. Uppmätt ledningstal (mS/cm) i överbevattningsvattnet i olika belysningar.

Ylikasteluvedestä mitatut ravinnelukemat ovat kuvissa 50, 51 ja 52. Tarvittaessa lannoitereseptiä hienosäädettiin. HPS+LED huoneen alhaiseen millisiemens-lukemaan tammi-helmikuussa liitettiin alhaisen nitraattitypen lisäksi alhaiset kalsium- ja kaliumpitoisuudet. LED-valossa nitraatin ja kaliumin kulutus näytti olevan ylipäänsä suurempaa kuin HPS huoneessa.



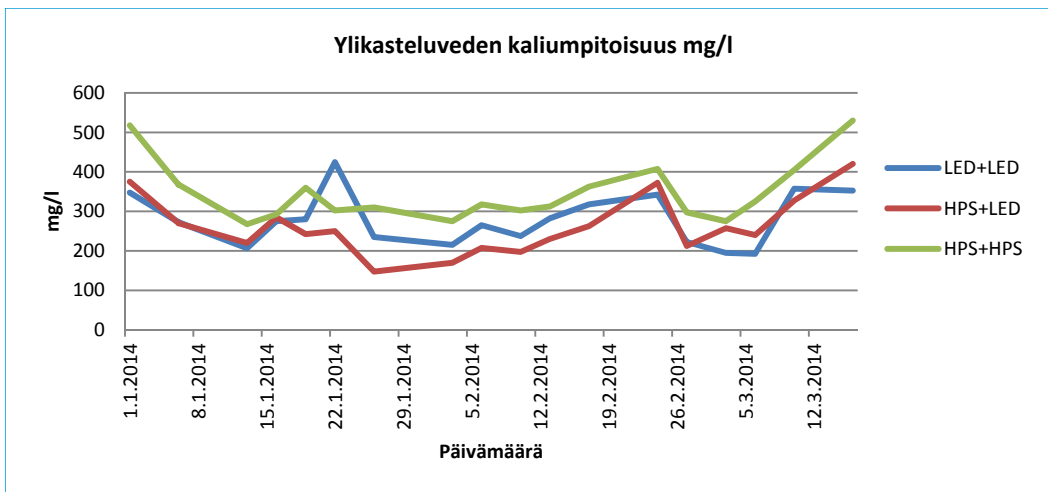
Kuva 50. Ylikasteluvdestä mitattu nitraattitypen määrä mg/l eri valotuksissa.

Figur 50. Mängden nitratkväve (mg/l) uppmätt i överbevattningsvattnet i de olika belysningarna.



Kuva 51. Ylikasteluvdestä mitattu kalsiumpitoisuus mg/l eri valotuksissa.

Figur 51. Mängden kalcium (mg/l) uppmätt i överbevattningsvattnet i de olika belysningarna.



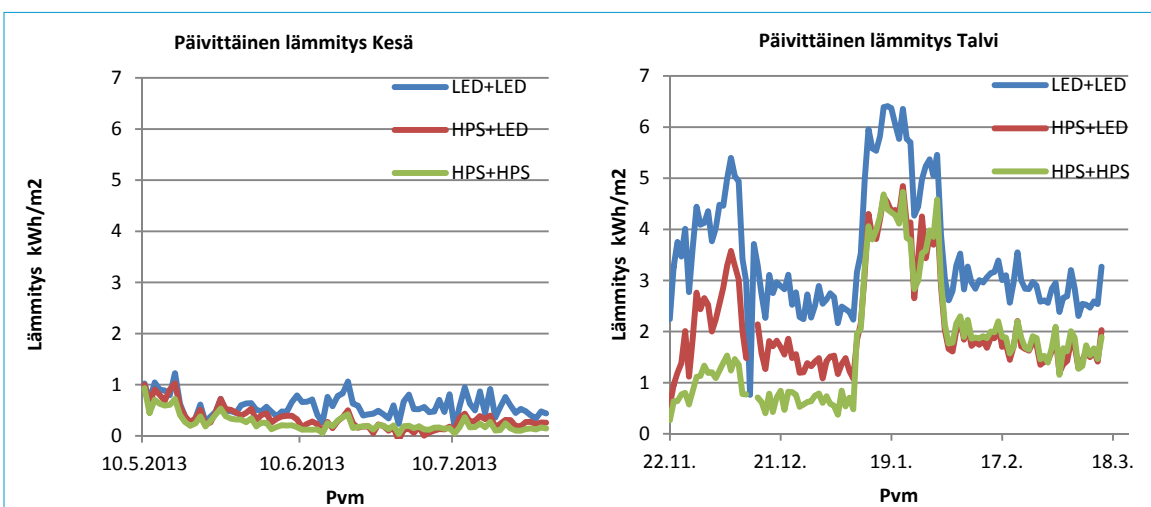
Kuva 52. Ylikasteluvdestä mitattu kaliumpitoisuus mg/l eri valotuksissa.

Figur 52. Mängden kalium (mg/l) uppmätt i överbevattningsvattnet i de olika belysningarna.

3.3 Kesä- ja talviviljelyn energiankäyttö sekä kustannus

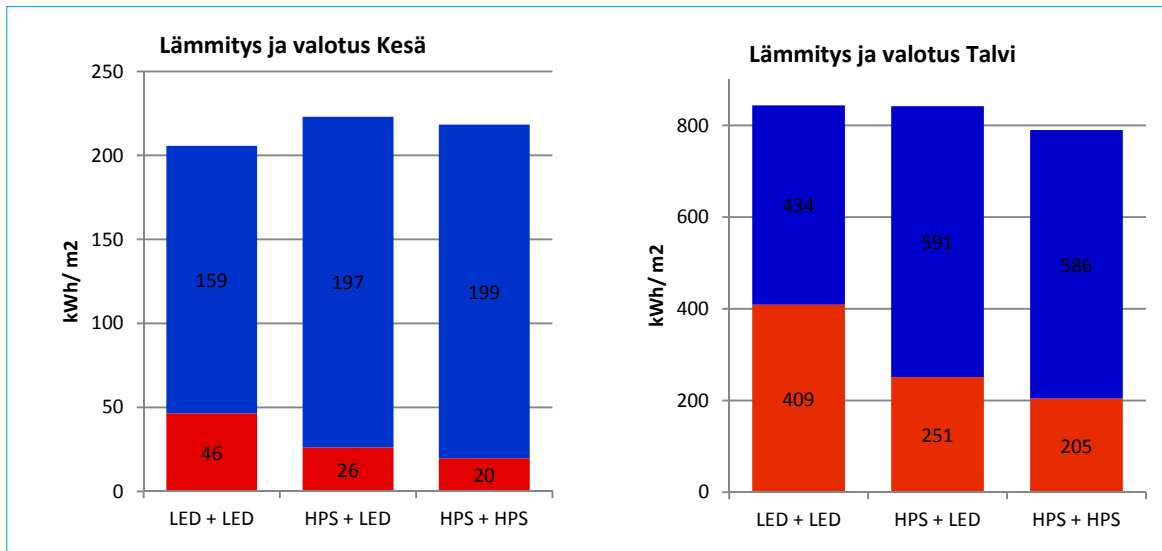
Arvioitu päivittäinen lämmitys oli suurempaa LED+LED huoneissa kesällä ja talvella kuin muissa huoneissa (Kuva 53). Kuvassa suuret jaksolliset vaihtelut osoittavat lauhan ja kylmän säätöihin vaihtumisen talvella. Kokeiden koko ajalle summattuna lämmitys oli kesällä ja talvella LED+LED huoneessa huomattavasti suurempi kuin muissa osastoissa (Kuva 54). Pääsyy oli epäilemättä valaistuksen vähäisempi lämmön tuotto, mutta suurempaa lämmitystä voi selittää osittain myös säädön erilaisuus. Kun LED-välivaloista tuli vähemmän lämpöä kuin HPS-välivaloista kasvuston alaosaan kasvaville hedelmille, puuttuvaa lämpöä tuotettiin lisäämällä lämmitystä alaputkistolla. Koska vain hyvin pieni osa valojen tuottamasta säteilystä käytetään yhteyttämisessä ja kasvustosta ylöspäin heijastuvaa ja kateen alhaalta ylöspäin läpäisevää säteilyä on hyvin vähän, vähintään 95 % osastoihin tuodusta sähköenergiasta voi katsoa muuttuneen kasvustoon ja rakenteisiin imeytyessään ensivaiheessa lämmöksi. Lämpö- ja sähköenergia voidaan siis summata kuvaamaan huoneen kokonaislämmitystä kuvassa 54.

Huoneiden sähkön käyttö valotukseen oli HPS+HPS ja HPS+LED huoneissa samansuuruinen, koska kokonaisvalotuksen asennusteho oli lähes sama. LED+LED huoneessa asennusteho oli alempi, joten sähkön käyttökin pinta-alaa kohti oli vähäisempää. LED+LED huoneessa käytettiin sähköä pinta-alaa kohti kesällä 20 % ja talvella 25 % vähemmän kuin HPS+HPS huoneessa (Kuva 54). Kesällä ero oli pienempi, koska ylävaloja käytettiin kesällä vähemmän.



Kuva 53. Laskettu päivittäinen lämmitys kWh/m² kesä- ja talvikokeessa.

Figur 53. Den beräknade dagliga uppvärmningen kWh/m² i sommar- och vinterförsöket.



Kuva 54. Laskettu kokonaislämmitys (punainen) ja -valotus kWh/m² kokeen aikana kesä- ja talvikokeessa koehuoneissa LED+LED, HPS+LED, HPS+HPS.

Figur 54. Den beräknade totaluppvärmningen (röd) och -belysningen i kWh/m² (blå) vid sommar- och vinterförsöket i försökshuset LED+LED, HPS+LED, HPS+HPS.

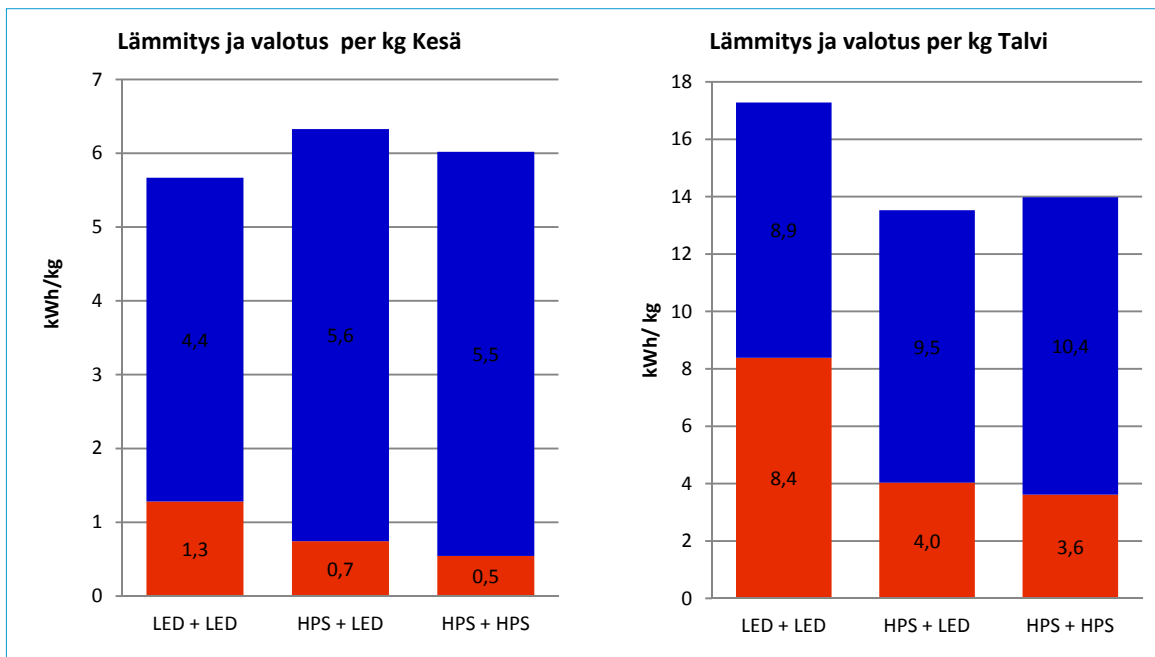
Talvella HPS+LED huoneen hyvä sato nosti sen tehokkaimmaksi (Kuva 55) ja niukasti muuttuvilta energiakustannuksiltaan halvimmaksi valituilla energian hinnoilla (Kuva 56). Sähkön kulutus (kWh/kg), joka on esitetty kuvassa 55, oli huoneissa LED+LED ja HPS+LED merkitsevästi alempi kuin HPS+HPS huoneessa (Taulukko 16).

Kesäkokeessa HPS+LED ei ollut tehokkaampi kuin HPS+HPS. LED+LED huoneessa sähkön käyttö tuotettua kurkkukiloa kohti oli noin 20 % alempi kuin HPS+HPS huoneessa (Kuva 55). LED+LED poikkeaa merkitsevästi huoneissa HPS+LED ja HPS+HPS (Taulukko 16). Kesällä lämmitys oli korkeampi LED+LED huoneessa kuin muissa huoneissa (Kuva 55), mutta alhaisen kokonaislämmityksen vuoksi se ei vaikuttanut oleellisesti kokonaisenergiakustannukseen (Kuva 56). Talvella lämpöä käytettiin kuitenkin LED+LED huoneessa merkittävästi enemmän tuotettua kiloa kohti kuin muissa osastoissa. Syynä olivat huomattavasti suurempi lämmitys lämpöputkistolla LED+LED huoneessa ja 15 % alhaisempi sato LED+LED huoneessa verrattuna HPS+HPS huoneeseen.

Kesällä LED+LED huoneeseen tuotu kokonaisenergiamäärä oli pienempi, mikä heijastui myös huoneiden tuuletukseen ja CO₂-pitoisuuteen (Kuva 57 ja 58). Talvella kaikkien huoneiden tuuletus oli samanlainen, kunnes auringon säteily lisääntyi maaliskuussa. LED+LED huoneen HPS+LED huonetta suurempi tuuletus maaliskuussa johtui lievästi suuremmasta tarpeesta alentaa kosteutta. Absoluuttisesti tuuletus maaliskuussakin oli kuitenkin vielä vähäistä.

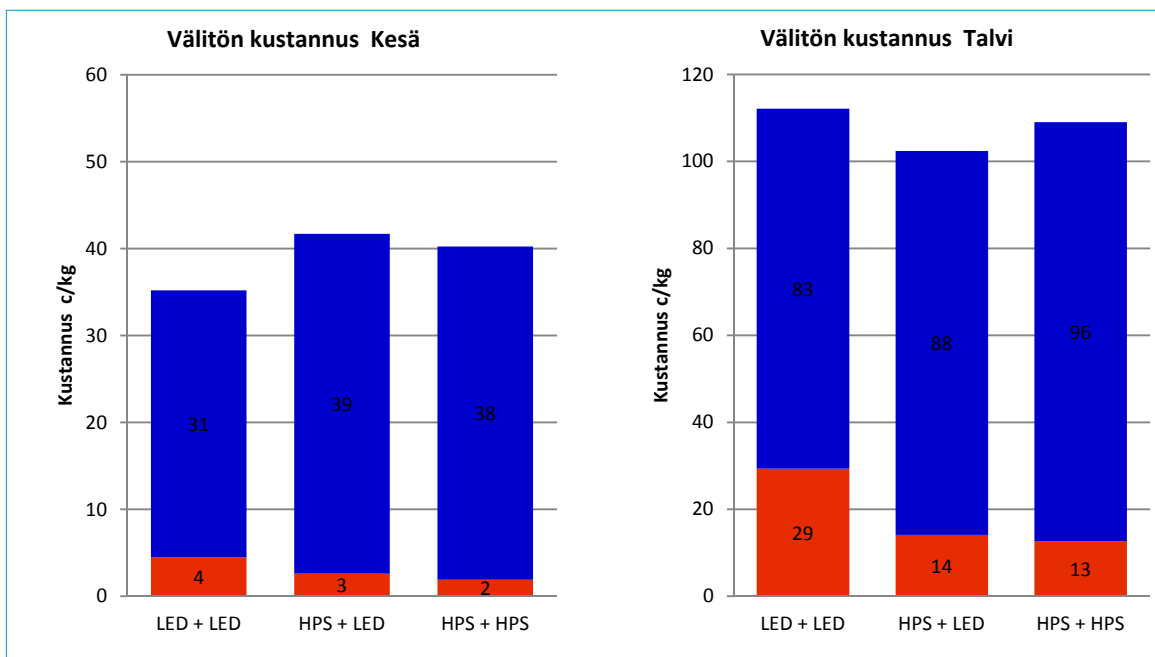
Sähkön ja lämmön käytön muuttuvaa kustannusta on kiinnostavaa arvioida suurin piirtein käyttämällä tämän hetken (2014) energian hintoja. Kohtuullisen edullista sähköä (7 c/kWh yöllä, 10 c/kWh päivällä) ja kallista lämpöä (3.5 c/kWh) käyttäen sähkön käytön muuttuva kustannus oli kesällä 9 c/kg alempi LED+LED huoneessa kuin HPS+LED ja HPS+HPS huoneissa (Kuva 56). Kesällä lämmityksen käyttö oli vähäistä, joten lämmityksen kustannusero jäi pieneksi. Talvella sähkön kustannus oli LED+LED huoneessa huomattavasti alempi kuin HPS+HPS huoneessa. Ero oli 23 c/kg. Alin energian kokonaiskustannus oli talvella kuitenkin HPS+LED huoneessa.

Energian yksikkökustannusten kohtuullinen muuttuminen ei muuta huoneiden järjestystä. Vaikka lämpöenergian muuttuva kustannus olisi alhaisempikin, esim. 2,5 c/kWh, lämmityksen ja valotuksen muuttuvien kustannusten summa olisi silti edelleen ollut talvioloissa alhaisin HPS+LED huoneessa ja suunnilleen sama LED+LED ja HPS+HPS huoneissa. Korkeammalla sähkön hinnalla, esim. 13 c/kWh, HPS+LED olisi edelleen pysynyt talvella alhaisimpana energian muuttuvilta kustannuksiltaan.



Kuva 55. Lämmön (punainen) ja sähkön (sininen) käyttö kurkkukiloa kohti (kWh/kg) kesä- ja talvikokeessa koehuoneissa LED+LED, HPS+LED, HPS+HPS.

Figur 55. Den använda värmen (röd) och elen (blå) per ett kilogram gurka (kWh/kg) vid sommar- och vinterförsöket i olika ljusbehandlingar LED+LED, HPS+LED, HPS+HPS.



Kuva 56. Lämmityksen ja valotuksen välitön kustannus kurkkukiloa kohti arvioidun lämmityksen ja valotuksen mukaan. Lämmön hinta 3,5 c/kWh, sähkön hinta 7 c/kWh yöllä, 10 c/kWh päivällä, keskimäärin 9,3 c/kWh.

Figur 56. Uppvärmningens och belysningens direkta kostnad per kilogram gurka efter uppskattning av uppvärmning och belysning. Värmepris 3,5 c/kWh, elpris 7 c/kWh på natten, 10 c/kWh på dagen, i genomsnitt 9,3 c/kWh.

Taulukko 16. Koeosastojen sähkön käytön (kWh/kg) keskiarvojen parivertailu. Korjattu P on Tukey-korjattu (SAS Proc Mixed) todennäköisyys sille, että vertailuparin keskiarvot ovat samoja. Tähdellä merkittyjen keskiarvot eivät todennäköisesti poikkea toisistaan.

Tabell 16. Parvis jämförelse av elanvändningens (kWh/kg) medelvärden. Korjattu P är Tukey-justerade (SAS Proc Mixed), sannolikhet för att medelvärden av ett par är likadant. De medelvärden som markerats med asterisk innebär att de sannolikt inte skiljer sig.

Vertailupari	Korjattu P	
	Kesä	Talvi
LED+LED vs HPS+LED	<0,0001	0,1857*
LED+LED vs HPS+HPS	<0,0001	0,0005
HPS+LED vs HPS+HPS	0,8134*	0,0310

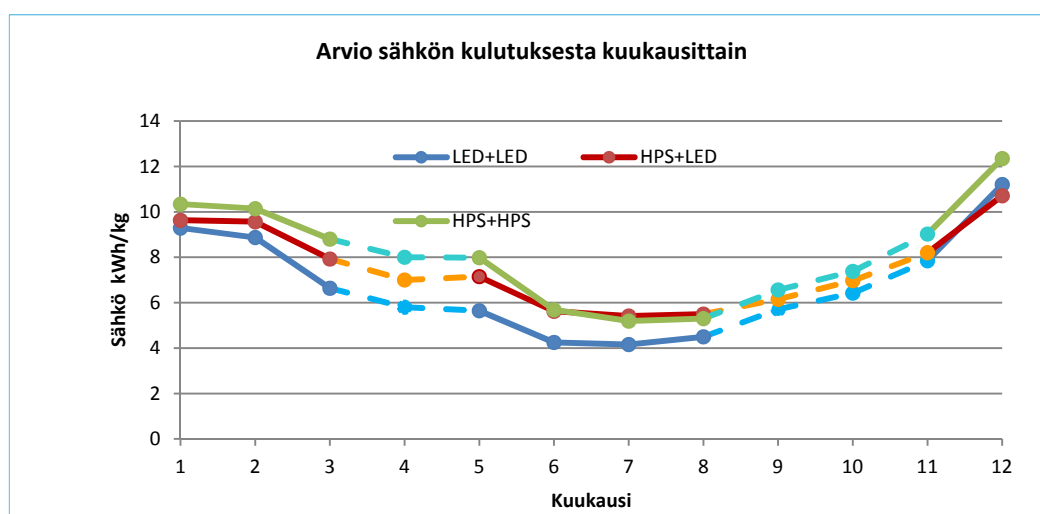
3.3.1 Koevalintojen vaikutuksia energiakustannuksiin

Koetuloksista karkea arvio vuotuisesta sähkön kulutuksesta

Piikkiön kokeet kattoivat sadontuoton ajat vain joulukuusta maaliskuun puoliväliin ja toukokuun lopusta elokuun alkuun. Oleellisin puute kokeellisessa tiedossa on syyskauden kasvun ja energian kulutuksen puuttuminen. HPS+HPS huoneen energian kulutus ja sadon tuotto on melko hyvin tunnettua aikaisempien kokeiden perusteella. Spekulaatiivisella tasolla oletetaan, että LED+LED ja HPS+LED huoneiden energian käytön tehokkuus suhteessa HPS+HPS-valotukseen säilyy keväällä samanlaisena kuin kokeissa maaliskuussa havaittiin. Syksyllä se voisi liukua heinäkuussa havaitusta kohti joulukuun tilannetta. Tällä tavoin yhdistäen saadaan kuvan 57 kaltainen arvio. Jos joulutammikuun sato olisi marraskuussa 2,5 ja helmikuussa 3 ja helmi-marraskuussa 3,5 kg/m² viikossa, vuotuinen sadoilla painotettu sähkön keskimääräinen kulutus olisi 6,3, 7,3 ja 7,9 kWh/kg LED+LED, HPS+LED ja HPS+HPS huoneissa. LED+LED huoneen vuotuinen sähkön muuttuva kustannus olisi karkeasti 20 €/m² ja HPS+LED huoneessa 10 €/m² alempi kuin HPS+HPS huoneessa. Energian kokonaiskustannuksessa LED+LED huone ei kuitenkaan olisi parempi kuin HPS+HPS, jos sato ja lämmitys olisi talvella havaitun kaltainen.

Lämmön tarve kokeissa vähän blokkihuonetta suurempi

Kun arvioidaan koetulosten validiutta tuotantokasvihuoneessa, on syytä huomata, että koehuoneessa ei ollut lämpöverhoa ja ulkoseinän ala suhteessa tilavuuteen oli suurempi kuin blokkihuoneessa, joten koehuoneen lämmönkulutus oli suurempi kuin blokkihuoneen, jossa on erilliset lämpöverhot. Blokkihuoneessa, jossa on erilliset lämpöverhot, lämmön tarve olisi talvella voinut olla noin 20 % alempi kuin koekasvihuoneessa. Kesällä lämmitystarpeessa ei olisi ollut eroa.



Kuva 57. Havaittu sähkön kulutus kWh/kg kurkkua kohti kokeissa (kiinteä viiva) ja karkea arvio kulutuksesta vuoden muina aikoina (katkoviiva).

Figur 57. Den observerade elförbrukningen i kWh/kg gurka i försöken (heldragen linje) och en grov uppskattning av förbrukningen under övriga tider av året (streckad linje).

'Hypoteesi korkeamman LED+LED asennustehon vaikutuksesta talvella

LED+LED huoneen alhainen sato talvella saattoi osittain johtua käytetystä melko alhaisesta valotuksen asennustehosta. Sillä valotustasolla, jota talvella käytettiin, valotuksen voimakkuuden lisääminen LED+LED huoneessa olisi todennäköisesti nostanut satoa lähes 1:1 suhteessa. Jos LED+LED huoneessa asennusteho olisi ollut 128+64 W/m² sijasta 166+64 W/m², eli 20 % korkeampi kuin kokeessa, sato olisi voinut olla vähintään 15 % korkeampi (Taulukko 17). Lisäksi oletetaan, että sähkön ja lämmön kokonaiskulutus LED+LED huoneessa olisi sama kuin HPS+HPS huoneessa eli lämmön tarve kasvatuksessa on LED+LED huoneessa sama kuin HPS+HPS huoneessa.

Käytetyn kaltaisen LED+LED-valotuksen kokonaistehon nostaminenkaan ei luultavasti laskisi sitä muuttuvilta kustannuksiltaan halvemmaksi kuin HPS+LED. Realistisesti korkeampi sähkön hintakaan (13 c/kg) ja alempi lämmön hinta (2,5 c/kg) ei näytä tekevän eroa näiden valotustapojen välille (Taulukko 17). Eri valotusmuotojen kustannusten suhteet muuttuvat oleellisesti vasta kun keskitalven huono kasvu puhtaalla LED-valaistuksella voidaan korjata.

Taulukko 17. Muuttuvat energiakustannukset talvikokeessa ja hypoteettisessa huoneessa, jossa LED+LED-valotuksen asennusteho on 166+64 W/m² kokeessa käytetyn 128+64 W/m² sijasta. Sähkön hinta 9,3 tai 13 c/kWh. Lämmön hinta 2,5 tai 3,5 c/kWh.

Tabell 17. De rörliga energikostnaderna i vinterförsöket och i ett teoretiskt växthus, där installationseffekten av LED-LED är 166+64 W/m² i stället för 128+64 W/m². Elpriset 9,3 eller 13 c/kWh. Värmepriset 2,5 eller 3,5 c/kWh.

		LED+LED			HPS+LED			HPS+HPS		
		Valo	Lämpö	Yht.	Valo	Lämpö	Yht.	Valo	Lämpö	Yht.
Asennusteho	W/m ²	128+64			180+64			180+56		
Koetulos	kWh/kg	8.9	8.4		9.5	4		10.4	3.6	
9,3 + 3,5 c/kWh	c/kg	83	29	112	88	14	102	96	13	109
Asennusteho	W/m ²	166+64			180+64			180+56		
Hypoteesi	kWh/kg	9.3	4.8		9.5	4		10.4	3.6	
9,3 + 3,5 c/kWh	c/kg	86	17	103	88	14	102	96	13	109
9,3 + 2,5 c/kWh	c/kg	86	12	98	88	10	98	96	9	105
13 + 3,5 c/kWh	c/kg	121	17	138	123	14	137	135	13	148
13 + 2,5 c/kWh	c/kg	121	12	133	123	10	133	135	9	144

3.4 Johtopäätökset

3.4.1 Valotustapojen biologiset vaikutukset

- Sadon määrän kehittyminen oli selvästi yhteydessä valon määrään ja laatuun sekä alaputkien lämpösäteilyyn. HPS ylävalona ja LED välivalona (HPS+LED) valaisi koko kasvustoa tehokkaammin kuin pelkkä HPS- tai LED-valotus. Talvikasvustossa HPS+LED valoyhdistelmällä saatiin suurin kilosatomäärä. Erityisesti korjuukelpoisten hedelmien lukumäärä lehtiä kohden oli talvella LED+LED valotuksessa muita pienempi. Tämä osoitti, että hedelmien abortoituminen LED+LED valotuksessa lisääntyi muihin valotusratkaisuihin verrattuna. Kesäkasvuston satotasoina ei ollut merkittäviä eroja eri valotuksien välillä.

- Talvella sadon laadussa oli nähtävissä, että LED välivalotuksella kurkkujen kuiva-ainepitoisuus oli hieman korkeampi kuin HPS välivalotuksessa. Tällä voi olla myönteinen vaikutus hedelmän kestävyteen. Myös HPS valotuksessa alalämpöputkien säteilemä lämpö oli kehittyville kurkuille tärkeä laadun parantaja.
- Valotuksen vaikutus hedelmän makuun ei ollut yksiselitteinen erojen ollessa marginaalisia.
- Lehtien nettofotosynteesitehokkuus oli suurin HPS+LED valotuksessa ja kasvusto todennäköisesti kykeni hyödyntämään vertikaalisesti molempien lampputyypin aallonpituusalueita tehokkaammin kuin muissa valotusratkaisuissa. On myös huomattava, että kokeen käytössä olleella LED+LED ratkaisulla ei kyetty valottamaan kasveja yhtä intensiivisesti ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) kuin muilla vaihtoehdoilla. LED+LED ratkaisun matalamman valon intensiteetin vuoksi kurkun lehdet kehittyivät fysiologisesti nk. varjolehtien kaltaisiksi. Tällöin niiden kyky yhteyttää valon intensiteetin lisääntyessä on matalampi, mitä tämän tutkimuksen fotosynteesimittausten valovastetulokset myös osoittivat.
- Sekä talvella että kesällä valotus vaikutti kasvuston rakenteeseen. Erityisesti talvella, jolloin on niukasti luonnonvaloa, LED+LED valotuksessa kehittyneen kasvuston rakenne poikkesi muista valokäsittelyistä. LED+LED valotuksessa lehtien pinta-ala oli suurempi, lehtien lukumäärä pienempi ja varsi pidempi, mitkä kaikki ovat seurausta kasvin reagoinnista niukkaan valomäärään. Myös LED+LED valotuksessa kasvin vedenkäytön tehokkuus talviviljelyssä oli muita pienempi, mikä osoittaa, että suuri lehtipinta-ala haihdutti suhteellisesti enemmän vettä tuotettuun satoon verrattuna.
- Kasvustoon tulevan valon lisäksi valotusratkaisu vaikutti lehtien aineenvaihduntaan ja kasvuston lämpötilouteen joko negatiivisesti tai positiivisesti. Sekä valon spektri- että lämpötilamittaukset osoittivat, että HPS-valo vaikutti eri tavoin kuin LED-valo. Tämä johtuu ensisijaisesti siitä, että HPS-valo lähettää yhteyttämisen kannalta tärkeän PAR-valon lisäksi pintoja lämmittävää infrapunavaloa. Kun HPS oli ylävalona, oli kasvuston yläosien lehtien lämpötila korkeampi kuin ylävalon ollessa LED. Mittausten mukaan osa infrapunasäteilystä tunkeutui lehden lävitse, jolloin säteily lämmitti myös kasvuston sisäosia. Erityisesti talvella, jolloin kasvihuoneen yläosa on viileä, on todennäköistä, että lehtien lämpötilan kohoaminen HPS-valon vaikutuksesta vaikutti positiivisesti lehden aineenvaihduntaan LED ylävaloisiin verrattuna. Mikäli HPS oli sekä väli- että ylävalona, saattoi kasvuston lämpötila nousta kuitenkin liian korkeaksi, jolloin lehtien fotosynteesin reagoitokyky lisääntyvään valomäärään oli häiriintynyt kuten mittaustulokset osoittavat.
- Tämän tutkimuksen biologiset tulokset osoittivat, että kokeessa käytetty hybridiratkaisu (HPS+LED) ja erityisesti talviviljelyssä oli sekä kasvuston rakenteen, kasvin fysiologisen toimivuuden että sadon tuoton kannalta perustellumpi ratkaisu kuin HPS+HPS tai LED+LED vaihtoehto.

3.4.2 Energian käytön tehokkuus, valotustapojen energiankulutus ja herkkyys energian hinnalle

- LED+LED tarvitsi sekä kesällä että talvella 20 – 25 % vähemmän sähköä kurkkukilon tuottamiseen kuin HPS+HPS. HPS+LED kulutti talvella 10 % vähemmän sähköä kiloa kohti kuin HPS+HPS, mutta kesällä HPS+LED oli samaa tasoa kuin HPS+HPS. HPS+LED-valotuksen HPS+HPS-valotusta alemmaa sähkönkäyttöä ei tarvinnut kompensoida lisäämällä lämmitystä talvella.
- LED+LED-valotuksen pienempää lämmöntuottoa sitä vastoin täytyi korvata nostamalla lämmitystä. Tämä yhdistettynä muita huoneita alempaan satoon johti huomattavan korkeaan lämmitykseen sato-kiloa kohti LED+LED-valotuksessa talvella. Kesällä LED+LED-valotuksen alla kasvu oli hyvä ja alemmaa lämmön tuottoa ei tarvinnut kompensoida paljon lämmityksellä. Päivällä alempi lämmöntuotto mahdollisti jopa vähäisemmän tuuletuksen ja siten korkeamman CO₂-pitoisuuden ylläpidon LED+LED-valotuksessa.
- Käyttäen tämän hetken energian hintoja (esim. sähkö 9,3 c/kg, lämpö 3,5 c/kg) ja talvikokeen mukaisia satoja, HPS+LED-valotuksen yhteenlaskettu sähkökustannus oli talvella noin 8 c/kg alempi kuin HPS+HPS-valotuksessa. Lievästi suurempi lämmitys HPS+LED huoneessa ei muuta tulosta oleellisesti. LED+LED-valotuksen muuttuvat energiakustannukset olivat suuremmat kuin muissa valotusta-

voissa. Kesällä LED+LED-valotuksen alempi sähkön käyttö johti noin 7 c/kg alempaan sähkötalvikukseseen LED+LED-valotuksessa kuin muissa valotustavoissa.

- Kesällä energian hinnan muutokset eivät oleellisesti muuttaisi valotustapojen kustannusten eroja. Talvella sähkön käytön erot ovat suurempia ja valaisimien lämmön tuoton vähentäminen nostaa enemmän lämmitystä, joten sähkön ja lämmön hintasuhteella on suurempi merkitys. Jos sadot valotustavoissa olisivat talvikokeen mukaisia, sähkö kohtuullisesti kalliimpaa (13 c/kg) ja lämpö melko halpaa (2,5 c/kg), LED+LED- ja HPS+LED-valotusten muuttuvat kustannukset tulevat suunnilleen samoiksi. Näillä valinnoilla HPS+HPS-valotuksen kustannukset ovat noin 10 c/kg korkeammat kuin muissa valotustavoissa.
- LED+LED-valotusta käytettäessä talvisatoa voisi teoriassa nostaa käyttämällä korkeampaa LED-valojen asennustehoa. Tällöin LED+LED- ja HPS+LED-valotuksen sähkön ja lämmön yhteenlasketut muuttuvat kustannukset voisivat olla suunnilleen samansuuruisia, vaikka sähkön ja lämmön hintasuhteet vaihtelisivat.

4 Yhteenveto

Tämän tutkimuksen perusteella käytössä ollut LED-valoa voidaan suositella kurkun välivaloksi biologisen tuloksen perusteella, kun ylävalona on HPS-valo. Kokeen LED-valo oli liian tehoton ylävaloksi. LED-valojen tehot kasvavat vuosittain, joten energiatehojen yltäessä HPS-valojen tasolle, näitä valaisimia voi harkita HPS-ylävalon korvaajaksi. On kuitenkin muistettava, että HPS-valojen infapunasta tuleva lämpö on kasveille tärkeä. Kun valolähteeksi valitaan LED, kasvit eivät saa enää merkittävää määrää lämpösäteilyä. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että HPS-valojen lämpösäteilyllä on huomattavia sekä negatiivisia että positiivisia vaikutuksia kasvien kasvuun ja kehitykseen.

Kun LED-valoilla korvattiin HPS-valoja niin, että vaikuttava valomäärä pysyi samana tai oli alempi kuin HPS-valotuksessa, väheni lämmöntuoton kokonaismäärä valotuksesta. Tämä ja keskitalven heikko sato puhtaassa LED-valotuksessa johtivat talvella huomattavaan lämmitystarpeen lisääntymiseen kurkkukiloa kohti. Toisaalta kesällä vähempi lämpö LED-valoista mahdollisesti alhaisemman tuuletuksen ja korkeamman CO₂-pitoisuuden.

Kokeissa käytetyn kaltainen puhdas LED-valotus ei ollut muuttuvilta kustannuksiltaan alempi kuin muut valotustavat, koska keskitalven sato jäi heikoksi ja lämmitystä täytyi lisätä. Kun HPS-välivalo korvattiin LED-valolla, muuttuvat kustannukset – olettaen nykyinen melko edullinen sähkön hinta – olivat talvella samaa luokkaa ja kesällä alemmat kuin perinteisessä HPS-valotuksessa. Ero oli kuitenkin melko pieni korvausinvestoinnin näkökulmasta.

Liitteet

Kuvattu 22.11.2013 (Liisa Särkkä) (istutus 19.11.2013)



HPS+HPS

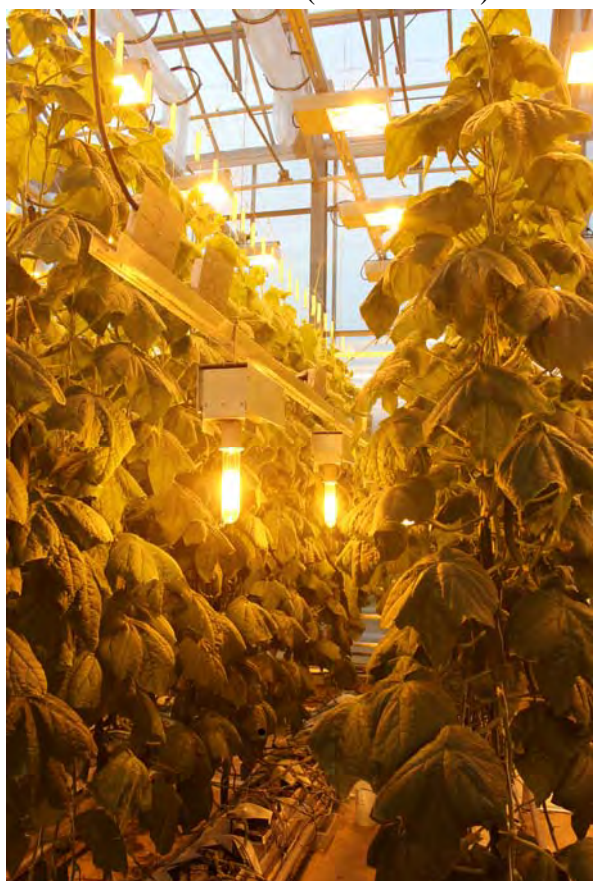


HPS+LED



LED+LED

Valokuvattu 13.6.2013 (Kari Jokinen)



HPS+HPS



HPS+LED



LED+LED

MTT TEKEE TIETEESTÄ ELINVOIMAA

MTT RAPORTTI 173

www.mtt.fi/julkaisut

MTT Raportti -verkkojulkaisusarjassa julkaistaan maatalous- ja elintarviketutkimusta sekä maatalouden ympäristötutkimusta käsitteleviä tutkimusraportteja. Lukijoille tarjotaan tietoa MTT:n kaikilta tutkimusaloilta eli biologiasta, teknologiasta ja taloudesta.

MTT, 31600 Jokioinen.



