

**ERI VÄRISTEN LED-VALOJEN HYÖDYNTÄMINEN
KASVINJALOSTUKSESSA**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö
Mustiala, Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma

Kevät, 2018

Esko Saha

Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma
Mustiala

Tekijä	Esko Saha	Vuosi 2018
Työn nimi	Eri väristen LED-valojen hyödyntäminen kasvinjalostuksessa	
Työn ohjaaja	Heikki Pietilä	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia eri sävyisten LED-kasvatusvalojen vaikutuksia ohran kasvuun ja kehitykseen perinteisen suurpainenatriumvalaistuksen lisänä. Kasvun mittaamisessa käytettiin kokeilumielessä Easy Leaf Area -älypuhelinsovellusta. Työn toimeksiantaja on Boreal Kasvinjalostus Oy.

Opinnäytetyön tietoperustaosuus on jaettu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa kerrotaan yleisiä asioita Boreal Kasvinjalostus Oy:stä sekä eri jalostusohjelmista. Osiossa kerrotaan myös kasvihuonekasvatuksen merkityksestä jalostustoiminnassa. Toisessa osassa kerrotaan valon merkityksestä kasveille. Siinä paneudutaan yhteyttämisprosessiin sekä PAR-säteilyyn ja valojaksoisuuteen. Kolmannessa osassa paneudutaan suurpainenatrium- ja LED-valaistuksen tekniikkaan sekä käyttöön kasvihuonekasvatuksessa. Tutkimusosiossa käsitellään opinnäytetyötä varten tehtyä valaistuskoetta ja kokeessa tehtyjä mittauksia. Koe järjestettiin Boreal Kasvinjalostus Oy:n kasvihuoneella keväällä 2018.

Valaistuskokeesta saatujen tulosten pohjalta voidaan sanoa, että yleisesti LED-lisävalotuksella on nopeuttava vaikutus kasvin kasvuun ja kehitykseen. Eri väristen LED-kasvatusvalojen vaikutusten erot eivät kuitenkaan ole selkeitä. Valkoinen LED-lisävalotus tuotti suuremman hehtolitrapainon sadolle ja punainen LED-lisävalotus tuotti suuremman sadon ja tuhannen jyvän painon.

Avainsanat LED-valot, suurpainenatriumvalot, hybridivalotus, kasvinjalostus

Sivut 36 sivua, joista liitteitä 3 sivua

Degree Programme in Agricultural and Rural Industries
Mustiala

Author	Esko Saha	Year 2018
Subject	Different colored LED lights in plant breeding	
Supervisors	Heikki Pietilä	

ABSTRACT

The goal of this thesis was to examine the effects of different colored LED growing lights on the growth and development of barley as addition to traditional high-pressure sodium lighting. To measure the growth, we used Easy Leaf Area smartphone application as experiment. This thesis is done for Boreal Plant Breeding Ltd.

This Thesis's theoretical section is divided into three parts. The first part is about general information of Boreal Plant Breeding Ltd and its different plant breeding programs. In this part the importance of greenhouse cultivation on plant breeding is also introduced. The second part is about the importance of light on plants. Photosynthesis, photosynthetically active radiation and photoperiodism are also looked into. The third part is about the technology of high pressure sodium lights and LED lights and the usage of these lights on greenhouse cultivation. The experimental part of the thesis covers the lighting test and measurements. The test was organized in the greenhouse of Boreal Plant Breeding Ltd late winter 2018.

Based on the results of the lighting test, it can be noticed that generally LED growing lights have an accelerating effect on a plant's growth and development. The differences between these two different colored LED-lights aren't that clear. The white LED light produced higher hectoliter weight on plants and the red LED light produced higher yield and weight of 1000 seeds.

Keywords LED lights, high pressure sodium lights, hybrid lightning, plant breeding

Pages 36 pages including appendices 3 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	BOREAL KASVINJALOSTUS OY	1
2.1	Jalostusohjelmat.....	2
2.2	Kasvihuonekasvatuksen merkitys jalostukselle.....	3
3	VALON MERKITYS KASVEILLE.....	3
3.1	Yhteyttäminen ja valoreaktiot.....	3
3.1.1	PAR.....	4
3.1.2	DLI.....	6
3.2	Fotoperiodismi.....	6
4	KASVIHUONEIDEN VALAISTUS	6
4.1	Suurpainenatriumvalot.....	7
4.1.1	Tekniikka ja rakenne	7
4.1.2	Käyttö kasvihuonevalaistuksessa.....	8
4.2	LED-valot.....	9
4.2.1	Tekniikka ja rakenne	9
4.2.2	Käyttö tavanomaisessa kasvihuonetuotannossa.....	10
5	KOKEEN TOTEUTUS.....	11
5.1	Koejärjestelyt.....	12
5.1.1	Valaistuskäsittelyt.....	12
5.1.2	Yleiset kasvuolosuhteet	13
5.2	Koemateriaalin hoito	14
5.2.1	Kylvö.....	14
5.2.2	Kasvatuksen aikaiset hoitotoimenpiteet	15
5.3	Kasvunseuranta ja mittaukset	15
5.3.1	Easy Leaf Area	15
5.3.2	Biomassaseuranta ja muut mittaukset.....	17
6	TULOSTEN ESITTELY JA ANALYSOINTI.....	18
6.1	Pinta-alamittaukset	18
6.2	Easy Leaf Area vs. Image J	23
6.3	Versot, tähkä- ja jyväluku ja sadon laatu.....	24
6.4	Biomassaseuranta	28
7	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	30
	LÄHTEET	32

Liitteet

Liite 1 Kasvatuskoppien lämpötilat

1 JOHDANTO

LED-valaisimien sähkönkulutuksen hyötysuhde ja valon tuotto ovat kymmenen vuoden kehityksen jälkeen lopultakin sillä tasolla, että ne voivat vähitellen alkaa syrjäyttää kasvihuonekasvatuksessa pitkään hallinneen kaasupurkausvalaistuksen. Hidasta kehitystä LED-valaisimissa tapahtuu edelleen ja Euroopassa, Pohjois-Amerikassa sekä Aasiassa on monia alan yrityksiä. Suomen markkinoille ei kuitenkaan ole vielä montaa LED-valaisimia tarjoavaa yritystä rantautunut. (Kaukoranta, Jokinen, Näkkilä & Särkkä 2017, 3.)

Perinteisillä kaasupurkausvalaisimilla, kuten suurpainenatriumvalaisimilla, valon spektriä rajoittaa lähinnä valaisimen ominaisuudet. LED-valaisimien tuottaman valon spektri voidaan muokata tietyn kasvin tarpeiden mukaiseksi, joten tekniikka ei ole enää rajoittava tekijä, vaan lähinnä tietämys taloudellisesti parhaiten toimivista ratkaisuista. (Kaukoranta ym. 2017, 3.) Vihannesten, kuten tomaatin ja kurkun, kasvihuonekasvatuksessa LED-valaistuksesta on jo jonkin verran kokemuksia, ja esimerkiksi tomaatin kasvatuksessa siitä on todettu olevan hyötyä sadonmäärän lisääntymisessä (Kaukoranta ym. 2017, 20). LED-valaistukseen investoiminen on kaikesta huolimatta vielä kallista, joten kaikki lisätieto ja kokemukset aiheesta ovat hyväksi.

Toimeksiantaja tälle opinnäytetyölle on Boreal Kasvinjalostus Oy. Työn tavoitteena on selvittää eri väristen eli eri aallonpituuksisten LED-valaisimien vaikutuksia ohran kasvuun ja kehitykseen perinteisen suurpainenatriumvalaistuksen lisänä. Kasvunseurannassa apuna käytetään kokeilumielessä Easy Leaf Area -sovellusta, jolla voitaisiin mahdollisesti korvata biomassamäärityksiä ainakin osittain. Opinnäytetyötä varten suunniteltu valaistuskoe toteutettiin keväällä 2018 Borealin A-kasvihuoneella.

2 BOREAL KASVINJALOSTUS OY

Boreal Kasvinjalostus Oy on vuonna 1994 perustettu suomalainen, pääasiassa valtio-omisteinen, kasvinjalostukseen erikoistunut yritys. Boreal sai syntynsä, kun MTT:n ja Hankkijan kasvinjalostusorganisaatiot yhdistettiin. Yrityksen toimitusjohtaja on Markku Äijälä. (Boreal n.d.)

Boreal Kasvinjalostus Oy:n toimitilat sijaitsevat Kanta-Hämeessä Jokioisilla. Siellä suoritetaan risteytykset, laboratorio- ja kasvihuonetyöt, biotekniset työt ja suuri osa koetoiminnasta. Lajikkeita testataan kuitenkin ympäri Suomea, jotta voidaan varmistaa soveltavuudet eri viljelyvyöhykkeille. (Boreal n.d.)

2.1 Jalostusohjelmat

Borealin jalostusohjelmiin kuuluvat viljat, öljy- ja palkokasvit sekä nurmikasvit. Tavoitteena on kehittää lajikkeita, jotka soveltuvat pohjoisiin olosuhteisiimme ja pystyvät tuottamaan suuria ja laadukkaita satoja. Lajikkeita kehitetään niin rehuntuotantoon, kuin myös elintarviketuotantoon ja muihin teollisuuden tarpeisiin. Tautien ja tuholaisten kesto sekä alhainen lakoprosentti ovat tärkeitä ominaisuuksia Suomen vaihteleviin kasvuolosuhteisiin. Uusien lajikkeiden jalostaminen on pitkä prosessi ja lajista riippuen uuden lajikkeen markkinoille saaminen kestää 10-15 vuotta. (Boreal n.d.)

Monitahoisen ohran jalostuksessa tavoitellaan viljelyvarmoja lajikkeita, joilla on hyvä jyväkoko sekä tärkkelyspitoisuus. Kaksitahoista ohraa jalostetaan niin panimoteollisuudelle kuin myös rehuksi. Tärkeitä ominaisuuksia ovat muun muassa suuri jyväkoko, korkea tärkkelys- ja uutepitoisuus sekä alhainen valkuaispitoisuus. (Boreal n.d.)

Kauran jalostuksen kulmakivinä ovat satoisuus ja lujakortisuus. Kauran laatu tarkkailtaessa tärkeitä ominaisuuksia ovat ohut kuori, iso jyvä, korkea hehtolitraino, sekä korkea valkuais- ja rasvapitoisuus. Vehnän jalostuksessa pääpainona on myllylaatuisen materiaalin tuottaminen. Leivont ominaisuuksien lisäksi panostetaan hyviin satoihin ja tautien keston. Rukiin jalostuksessa tavoitellaan hyvää talvenkestävyyttä sekä lyhyttä ja vahvaa kortta. Populaatorukiiden lisäksi Boreal jalostaa synteettisiä lajikkeita sekä markkinoi maahantuomiaan hybridirukiita. (Boreal n.d.)

Borealin öljykasvien jalostuksessa panostetaan pääasiassa kevätrypsiin. Niiden ominaisuuksissa painotetaan satovarmuutta, korkeaa öljypitoisuutta sekä lujaa vartta. Synteettisten lajikkeiden jalostuksen myötä sato- ja varren lujuus on parantunut. Borealin kevät- ja syysrapsin edustuslajikkeiden soveltuvuus pohjoisiin olosuhteisiin on tarkkaan testattu. (Boreal n.d.)

Herneen jalostuksella tuotetaan lajikkeita niin ruoka- kuin rehukäyttöönkin. Ruokahernelajikkeiksi valitaan hyvät keitto-ominaisuudet omaavia vihreäsiemenisiä lajikkeita. Satoisuus ja alhainen lakoprosentti sekä rehuherneellä korkea valkuaispitoisuus ovat tärkeitä ominaisuuksia. Suomen valkuaisomavaraisuuden parantaminen on erittäin tärkeää, jotta tuontisoijan käyttöä pystyttäisiin hillitsemään. Tässä asiassa härkäpavun jalostuksella on tärkeä rooli. (Boreal n.d.)

Nurmikasvien jalostuksessa tärkeimpiä ovat timotei, nurminata, ruokanata sekä puna-apila. Lajikkeiden tärkeitä ominaisuuksia ovat hyvä talvenkestävyys, satoisuus sekä sadon laatu. Rehukäytössä sulavuus on tärkeässä osassa ja satoisuuteen vaikuttaa jälkikasvukyky. (Boreal n.d.)

2.2 Kasvihuonekasvatuksen merkitys jalostukselle

Kasvinjalostuksessa kasvihuonekasvatuksella on suuri merkitys. Kasvihuoneessa materiaalia pystytään tuottamaan ympäri vuoden, joten risteytysten jälkeen seuraavien sukupolvien tuottaminen on nopeampaa ja kenttäkoetointia saadaan nopeammin aloitettua. Kasvihuoneissa pystytään luomaan kasveille optimaaliset olosuhteet, jolloin esimerkiksi DH-menettelmän vaatimat siemenmäärät saadaan tuotettua varmemmin. Tällöin linjarivivaiheessa valinnat voidaan tehdä suuremmalla varmuudella. Lämpöä, valoa ja veden sekä ravinteiden saantia on helppo hallita ja olosuhteiden dataa saadaan tallennettua muistiin. Kasvitautilien ja tuholaisten torjunta steriileissä olosuhteissa on myös helpompaa. Myös kasvien kehityksen seuranta on vaivattomampaa kasvihuoneella. (Hyövelä 2018.)

3 VALON MERKITYS KASVEILLE

Valo on sähkömagneettista aaltoliikettä, josta ihminen pystyy aistimaan vain pienen osan, eli näkyvän valon osan. Yhteyttämisessä hyväksikäytävissä oleva valon aallonpituus on 400-700 nanometriä (nm). Fotoni toimii sähkömagneettisen energian välittäjänä, joka vaihtelee säteilyn taajuuden mukaisesti. Fotoni voi siirtää energiansa atomille törmätessään siihen, aiheuttaen näin atomin virittymisen. Näiden atomien eli niin sanottujen valoreseptorien virittyminen on yhteyttämisestä perusta. Reseptorit sijaitsevat kasvin viherhiukkasissa eli klorofylleissä. (Järvinen ym. 2016, 54.)

Valo on yksi merkittävistä tekijöistä kasvin yhteyttämisetehoon lämpötilan ja vedensaannin ohella. Yhteyttämisestä kannalta tärkeän hiilidioksidin saanti lakkaa, mikäli kasvi kärsii kuivuudesta tai valon puutteesta. (Fagerstedt, Linden, Santanen & Väinölä 2008, 84.) Valon voimakkuus, suunta, aallonpituus ja valotuntien määrä ovat tekijöitä, joiden vaihtelut vaikuttavat kasvin yhteyttämisnopeuteen, kasvuun ja sadontuottoon sekä muotoutumiseen (Järvinen ym. 2016, 56).

3.1 Yhteyttäminen ja valoreaktiot

Yhteyttäminen eli fotosynteesi on prosessi, jossa sidotaan ilmakehän hiilidioksidia (CO₂) auringon energiaa apuna käyttäen hiilihydraateiksi. Prosessin ohessa vesi hajoaa hapeksi, jota muut eliöt käyttävät hengitysreaktioissaan. Vain kasvit pystyvät sitomaan auringon energiaa orgaanisiin yhdisteisiin kemialliseksi energiaksi. Yhteyttämisestä kokonaisreaktioyhtälö on seuraavanlainen:



Kun yhteyttämistuotteita hajotetaan, vapautuu niihin sitoutunut energia soluhengityksessä, jossa hapen läsnä ollessa hiilihydraatit hajoavat takaisin hiilidioksidiksi. (Fagerstedt ym. 2008, 79-80.)

Fotosynteesissä viherhiukkasissa tapahtuvat tapahtumat voidaan jakaa valoreaktioihin ja pimeäreaktioihin. Valoreaktiot ovat sähkökemiallisia reaktioita, joissa viherhiukkasen kalvoihin kiinnittyneet pigmentit imevät eli absorboivat auringon energiaa ja muuttavat sitä kemialliseksi energiaksi. Pimeäreaktiot taas ovat biokemiallisia reaktioita, joissa ilmakehän hiilidioksidi sidotaan orgaaniseksi yhdisteiksi viherhiukkasen kalvojen välisessä tilassa eli stroomassa. Fotosynteesin hiilidioksidin sitomisreaktiossa valoenergia sitoutuu adensiinitrifosfaattiin (ATP) sekä nikotiiniamidiadeniininukleotidifosfaattiin (NADPH₂). (Fagerstedt ym. 2008, 80.)

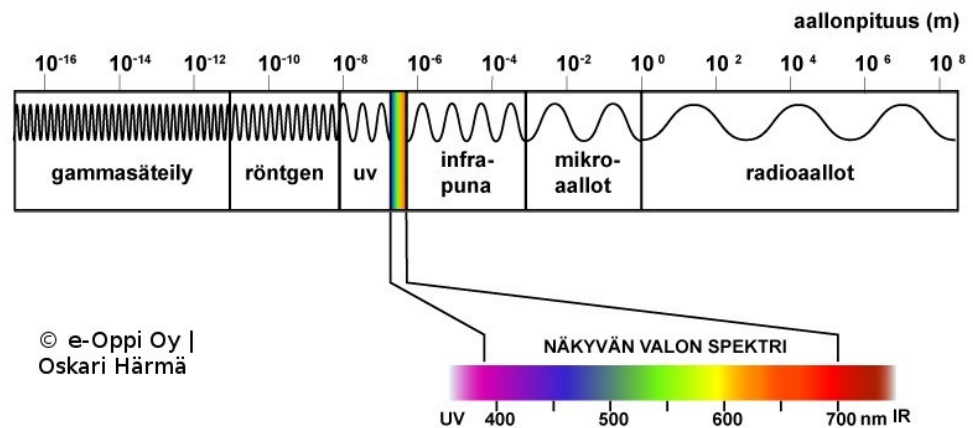
Viherhiukkaseen sisältyy kaksi reaktiokeskusta, fotosysteemi 1 (PS 1) ja fotosysteemi 2 (PS 2). Niiden välille syntyy elektroninsiirtoketju, kun karotenoidi ja klorofylli-b luovuttavat riittävästi energiaa klorofylli-a:lle ja se pystyy luovuttamaan elektroninsa elektroniketjulle. Lopulta elektroni kulkee elektroninsiirtäjien kautta nikotiiniamidi-adeniininukleotidifosfaatille (NADP⁺), joka pelkistyy NADPH₂:ksi. PS 2 luovuttaa korvaavan elektronin PS 1:lle ja saa itselleen korvaavan vedeltä, jota hajotetaan hapeksi ja veteyioneiksi (H⁺) eli protoneiksi. Tämän reaktion tuloksena siis syntyy yhteyttämässä vapautuva happi. Vapautuneet protonit siirtyvät graanojen lumeeniin ja aiheuttavat nopean happamoitumisen stroomaan nähden. Adesosiinifosfaatti syntyy, kun väkevyysero on tarpeeksi suuri ja pyrkii taas tasaantumaa ja aiheuttaa elektronien purkautumisen kalvoilla sijaitsevien kanavien kautta stroomaan. Valon sisältämä energia siirtyy valoreaktiossa elektroninsiirtoketjun avulla lyhytaikaisina energialähteinä toimiville ATP:lle ja NADPH₂:lle. (Fagerstedt ym. 2008, 83.)

Yhteyttämisen pimeäreaktiot ovat lämpötilasta riippuvia. Ribuloosibisfosfaattikarboksyylaasi (RuBisco) sitoo hiilidioksidia orgaaniseen hiilirunkoon, josta sokereita valmistetaan pimeäreaktiossa. Kierrossa ensimmäisenä syntyy 3-hiilinen yhdiste, jonka takia useimpia kasveja, muun muassa viljoja, kutsutaan C3-kasveiksi. C4-kasvit, kuten maissi, taas ovat kehittäneet uuden reaktiosarjan, jossa aluksi sidotaan fosfoenolipalorypalehappoon (PEP) hiilidioksidia 4-hiiliseksi yhdisteeksi, joka siirtyy RuBiscoa sisältäviin soluihin. Näin tekemällä saavutetaan suuri hiilidioksidipitoisuus, jossa RuBisco toimii tehokkaasti ja täten yhteyttäminen on tehokkaampaa kuin C3-kasveilla. (Fagerstedt ym. 2008, 84.)

3.1.1 PAR

Fotosynteettisesti aktiivinen säteily (photosynthetically active radiation) eli PAR-säteily on valon sellainen aallonpituusalue, jota kasvit pystyvät hyödyntämään yhteyttämässä. PAR-säteilyn aallonpituusalue vaihtelee välillä 400-700 nanometriä (kuva 1). Tältä vaihteluväliltä kasvit hyödyntävät parhaiten sinistä ja punaista valoa. (Järvinen ym. 2016, 56.) PAR-

säteilynvoimakkuuden mittaamisessa käytetään suurena fotosynteesissä käyttökelpoisten fotonien virtaa per neliometri (photosynthetic photon flux density) eli PPF, jonka yksikkönä on $\mu\text{mol/s/m}^2$ (Kaukoranta ym. 2017, 6). PAR-säteilyä voidaan mitata siihen tarkoitetulla mittarilla. Valon määrän kasvattamisella on suora vaikutus yhteyttämisen nopeuteen, tiettyyn pisteeseen asti. Tällöin puhutaan valon kyllästyspisteestä, joka tarkoittaa sitä, että valon lisääminen ei enää vaikuta yhteyttämisen nopeuteen. (Järvinen ym. 2016, 60, 64.)



Kuva 1. Valon aallonpituudet (Oskari Härmä n.d.).

Kasvien kehittymiseen vaikuttavat myöskin valon aallonpituuskaistojen väliset suhteet, kuten punaisen (600-700 nm) ja sinisen (400-500 nm) sekä punaisen ja kaukopunaisen (710-850 nm). Infrapunasäteily lähinnä lämmittää kasvia, mutta osittain vaikuttaa myös kehitykseen. (Kaukoranta ym. 2017, 6.)

LED-valon käyttö kasvin yhteyttämässä on hieman parempaa, jos valaisin tuottaa enemmän punaista kuin sinistä valoa tai muita aallonpituuksia. Nykypäivän punaiset LED-valot ovat myös parempia muuntamaan sähköä valoksi kuin siniset LED-valot. Sininen valo on erityisen tärkeää viljelykasveja valotettaessa, sillä se vaikuttaa kasvin väriin ja makuun. Vihreä valo (500-600 nm) ei ole yhteyttämisen kannalta niin tärkeä kuin punainen ja sininen, mutta se läpäisee paremmin lehtiä ja näin pystyy vaikuttamaan varjossa olevien lehtien yhteyttämiseen. (Kaukoranta ym. 2017, 41, 44.)

Taulukko 1. Auringon ja tyypillisen valaisimen kokonaissäteilyn energiasta UV-, PAR- ja infrapunasäteilyn osuus (Kaukoranta ym. 2017, 6).

	UV%	PAR%	IR%	Sitoutuu yhteyttämässä %	Säteilystä lämmöksi %
Aurinko	4	49	47	3	97
HPS	0	30-40	50-70	3	97
LED	0	80-95	5-20	5	95

3.1.2 DLI

DLI eli Daily Light Integral kuvaa yhteyttämässä aktiivisen säteilyn eli PAR-säteilyn summaa 24 tunnin aikana mooleina. DLI:n yksikkö on mol/m². (Kaukoranta ym. 2017, 7.)

3.2 Fotoperiodismi

Fotoperiodismilla tarkoitetaan päivänpituuden vaikutusta kasvien kehittymiseen ja kukintaan. Fotoperiodismin kannalta kasvit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: lyhyenpäivänkasvit (short day plants, SPD), pitkänpäivänkasvit (long day plants, LPD) sekä päiväneutraalit kasvit. Päivänpituuden vaihtuminen ilmaisee kasveille vuodenaikojen muuttumista. Valojakson pituus vaikuttaa kasvissa muun muassa kukkimiseen, mukuloiden muodostumiseen, lehtien varisemiseen, lepotilaan ja itämiseen. (Järvinen ym. 2016, 60.) Päiväneutraaleilla kasveilla päivänpituus ei vaikuta kukintainduktioon lainkaan, vaan ne kukkivat tietyn kehityspisteen ohitettuaan (Koivunen 2003, 42).

Pimeän jakson pituus on ratkaisevassa roolissa fotoperiodismissa. Tämä johtuu fytochromin virittymisestä. Kun fytochromi on virittynyt pimeässä riittävän pitkään, syntyy kukintainduktio, jossa fytochromi lähettää kukintasiignaalin ja kukka-aiheiden kehittyminen alkaa. Jos pimeäjakso ei ole riittävän pitkä, fytochromin virittyminen alkaa taas alusta. (Järvinen ym. 2016, 60.) Päivänpituusvaatimus voi olla ehdoton tai ehdollinen, jolloin kukinta voidaan mahdollistaa esimerkiksi lämpötilaa säätämällä. Päivänpituusvaatimus on lajikohtainen. (Koivunen 2003,42.)

4 KASVIHUONEIDEN VALAISTUS

Kasvien valotus kasvihuoneissa alkoi yleistyä 1970-luvulla tehokkaiden suurpainenatriumlamppujen tultua markkinoille. Tätä aikaisemmin vähävaloisina aikoina keinovalotusta käytettiin päivän pidentämiseen. 1980-luvun jälkeen keinovalotus on ollut selvässä kasvussa ja ympärivuotinen kasvihuonekasvatus on alkanut. Kasvuun on vaikuttanut myös valotuskalusteiden hintojen laskeminen. Keinovalon käytön yleistymisen tavoitteina on ollut valon intensiteetin lisääminen, jolloin päivänpituus on kasvanut ja viljelyaika lyhentynyt. Valotuksella tavoitellaan myös sadon lisääntymistä ja sadon valmistumisen ajoitusta sopivaksi. (Koivunen 2003, 181,182.)

Valaisimien asennusta suunniteltaessa käytetään yleisesti yksikkönä asennustehoa watteina neliometriä kohti (asennus W/m²). Tällöin kasvihuoneeseen asennettavien valaisimien määrä kerrotaan lampun teholla (W) ja näiden tulo jaetaan huoneen lattiapinta-alalla. (Koivunen 2003, 185.) Va-

Ion määrää mitattaessa käytetään yksikköä luks (lx). Se kuvastaa ihmissilmän herkkyyttä valolle. Valovirran yksikkö on lumen (lm). Valaistusvoimakkuutta lasketaan kaavalla: $lx=lm/m^2$. (Järvinen, Karjalainen & Vuollet 2016, 109.)

4.1 Suurpainenatriumvalot

Suurpainenatriumlamppu (High pressure sodium, HPS, kuva 2) on kehitetty 1960-luvun alussa. Lamppujen tehoalue on käytännössä 35-1000W, mutta tehokkaampiakin löytyy. Polttoain pidentämisen sekä valotehokkuuden parantamisen rinnalla kehitettiin kompaktimman kokoisia yksiköitä sekä elohopealamput korvaavia ja paremmat väriominaisuudet omaavia lamppeja. Suurpainenatriumlamppuja käytetään pääasiassa teollisuudessa, ulkoalueiden valaisemisessa ja kasvihuoneissa kasvien valotuksessa. (Halonen & Lehtovaara 1992, 236, 257).

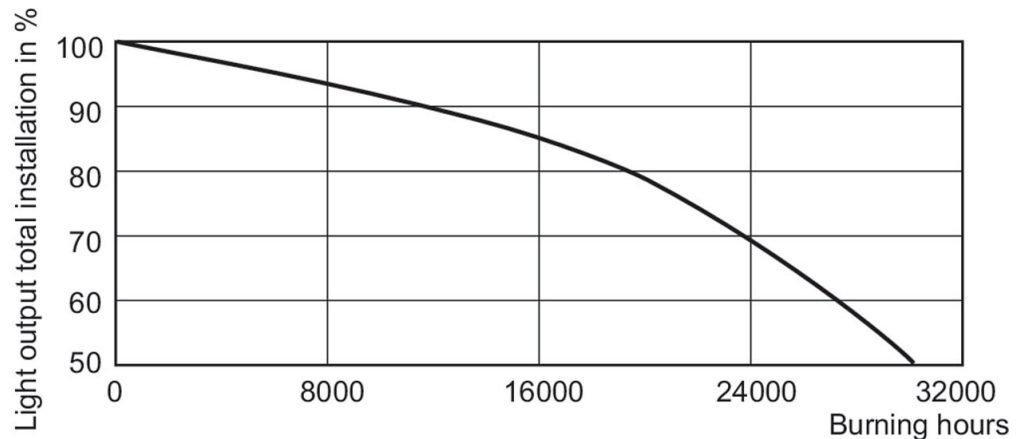


Kuva 2. Suurpainenatriumvalaisin

4.1.1 Tekniikka ja rakenne

Suurpainenatriumlamppu koostuu kierrekannasta, ulkokuvusta ja sen sisäpuolella olevista getteristä, sisäänvientijohtimesta, laajenemisyksiköstä, purkausputkesta ja tukijousista. Lampun ominaisuudet määräytyvät pitkälti purkausputken rakenteen, mittojen ja materiaalin mukaan. Purkausputken materiaalina yleisimmin käytetään sintrattua monikiteistä alumiinioksidia. Suurpainenatriumlampun sisältämä kaasu koostuu natriumin lisäksi elohopeasta ja ksenonista. Lisäaineiden avulla purkausputkesta pystytään tekemään kompaktin kokoinen. Sytytys elektrodin materiaali on tavallisesti volframia. Kovalasisen ulkokuvun tehtävänä on suojata purkausputkea ulkoiselta rasitukselta. Kuvun sisällä on tyhjiö, jota ylläpidetään gettereiden avulla. Niiden tarkoitus on sitoa itseensä palamisen aikana syntyvät kaasut, kuten happi. (Halonen & Lehtovaara 1992, 236-239.)

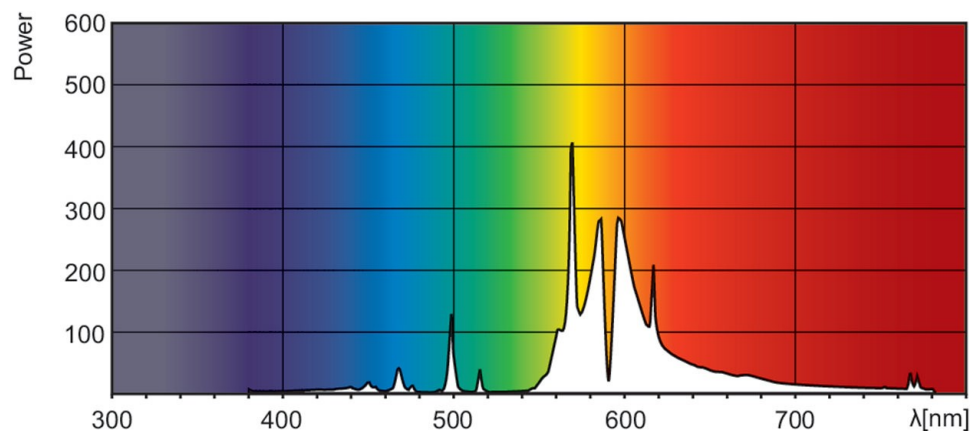
Natriumin ja elohopean alhaisen höyrynpaineen vuoksi syttymistä helpottamaan lisätään sekaan usein ksenonia. Syttyykseen valaisimissa käytetään normaalisti elektronista sytytintä, jolla luodaan usean kilovoltin jännite. Sytytyksen jälkeen syttymiskaasu ionisoituu ensimmäisenä, joten valon väri eroaa aluksi täysin lopullisesta. Suurpainenatriumlampun valotehokkuus ja valon väriominaisuudet riippuvat natriumhöyrynpaineesta, purkausputken koosta ja materiaalista sekä ulkokuvun materiaalista. (Halonen & Lehtovaara 1992, 241-246.)



Kuva 3. HPS-lampun käyttöikä ja valotehon heikentyminen (Philips n.d.).

4.1.2 Käyttö kasvihuonevalaistuksessa

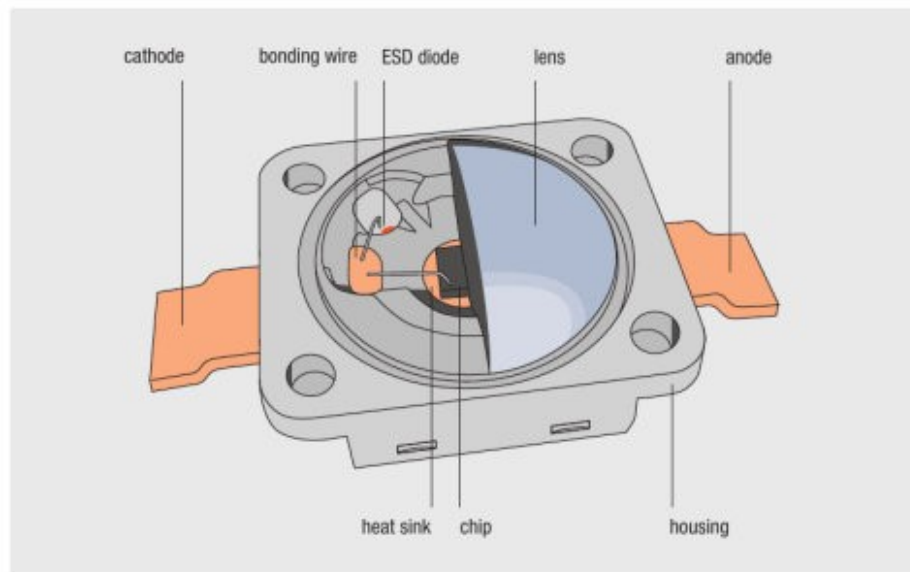
Suurpainenatriumlamput ovat käytännössä hallinneet kasvihuoneiden keinovalaistusta 1970-luvulta asti. Sen tuottamasta säteilystä noin 30 % on kasveille yhteyttämässä hyödynnettävissä. Loput säteilystä on suureksi osaksi infrapunasäteilyä. Suurpainenatriumlampun valon spektri (kuva 4) sisältää suhteessa liikaa keltaista, punaista ja vihreää valoa, mutta sinistä valoa lamppu ei juurikaan tuota. (Koivunen 2003, 183.)



Kuva 4. HPS-lampun valon spektri (Philips n.d.).

4.2 LED-valot

LED (Light Emitting Diode) on puolijohdekomponentti, jonka kehittäminen alkoi jo 1900-luvun alussa. Ensimmäisen näkyvää valoa tuottavan punaisen LED-lampun kehitti Nick Holonyak Jr. kuitenkin vasta 1960-luvulla. Seuraavaksi kehitettiin keltainen ja vihreä LED-lamppu. Pitkän kehitystyön tuloksena vuonna 1993 Shuji Nakamura onnistui valmistamaan ensimmäiset sinistä valoa tuottavat LED-valot. Valkoinen LED luotiin sinisen pohjalta lisäämällä siihen fosforia. (Rantanen 2006.) Tänä päivänä LED-valoja voidaan käyttää melkein missä vain: Ajoneuvovalaistuksessa, ulkovalaistuksessa, sisävalaistuksessa ja kasvivalaistuksessa.



Kuva 5. LED-lampun rakenne (Ledvance n.d.).

4.2.1 Tekniikka ja rakenne

LED-lamppu on valoa lähettävä diodi. Se on kaksiosainen kide, joka koostuu n- ja p-tyyppin puolijohdeista. N-tyyppin puolijohde eli katodi sisältää seostamalla luotuja ylimääräisiä elektroneja ja P-tyyppin puolijohdeessa eli anodissa on seostamalla aikaan saatu aukkoja, joista elektroni puuttuu. Puolijohdeiden välistä kosketuspintaa kutsutaan rajakerrokseksi. Kun diodiin syötetään sähkövirtaa, elektronit siirtyvät katodilta anodille ja täyttävät tyhjiä aukkoja. Seostuksesta johtuen rajakerros alkaa tuottaa valoa, kun elektronit täyttävät aukot. (Rantanen 2006.)

Kasvatusvalona käytettävän LED-valaisimen (kuva 6) komponentteja ovat diodit, heijastimet ja linssit, virtalähde, lämpönielu, mahdollinen tuuletin sekä valaisinrunko. LED-valojen ominaisuuksiin kuuluu myös himmentäminen, mikäli virtalähde on oikeanlainen. Himmentämisen tavoitteena on hetkellisen valonvoimakkuuden säätäminen ja siten kasveille optimaalisen

päivittäisen valosumman löytäminen. LED-valojen luvataan kestävän jopa 25000 tuntia ennen kuin valoteho alenee alle 90 prosentin. (Kaukoranta ym. 2017, 12.)



Kuva 6. Valkoista valoa tuottava LED-valaisin.

4.2.2 Käyttö tavanomaisessa kasvihuonetuotannossa

Kasvihuonetuotannossa LED-valoja käytetään pääasiassa täsmävalotuksessa tai hybrivalotuksessa. Täsmävalotuksessa LED-valoja käytetään välivaloina kasvihuoneessa, jossa ei ole käytössä muuta valotusta. Välivalotuksessa valaisimet eivät aiheuta varjostusta kasvustoon. Valoa annetaan alhaisella asennusteholla oikeaan aikaan tai oikeaan kohtaan kasvustoon. Hybrivalotuksesta puhutaan silloin kun suurpainenatriumlamppujen lisäksi käytetään LED-valaistusta. Tätä kautta investointikustannukset ovat pienemmät ja valon spektriä pystytään optimoimaan halutulle kasville sopivammaksi. (Järvinen ym. 2016, 113-114.)

Kotimaisessa kasvihuonetuotannossa LED-valotuksesta on kokemuksia pääasiassa tomaatilla. Kurkulla, salaattilla ja yrteillä kokemukset ovat tutkimuksien tasolla. Tomaatinviljelyssä välivalotuksella on saatu aikaan 15-20 prosentin sadonlisäys vuodessa. Tämä osittain perustuu siihen, että välivalotuksella saadaan lisättyä kasvutiheyttä. Välivalotuksen havaittuna ominaisuutena on myös se, että kasvustot pysyvät kuivempina, jolloin harmaahomeen esiintyvyys on vähäisempää. (Kaukoranta ym. 2017, 20.)

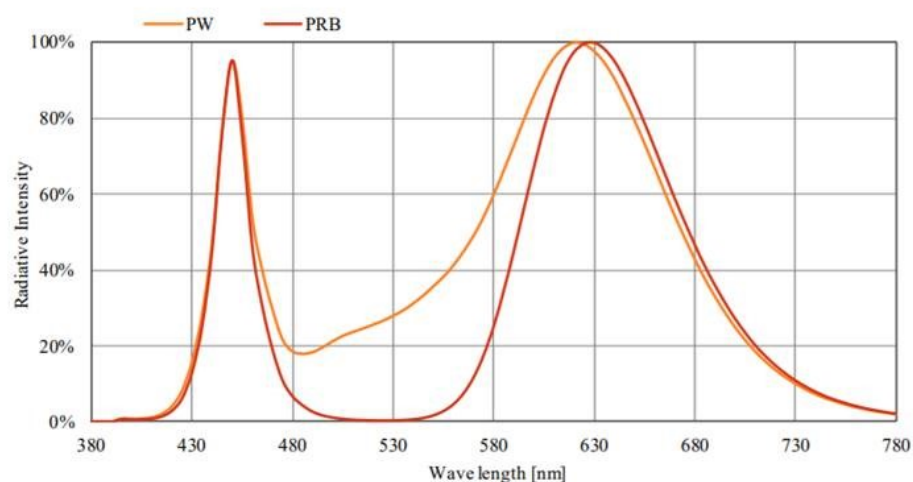
Kurkunviljelyssä ei pystytä suoraan käyttämään samoja käytäntöjä kuin tomaatilla. Kurkun suuret lehdet pysäyttävät valonsäteilyn tehokkaasti ja varjostavat alempia lehtiä. Välivalotuksessa vihreällä valolla on siis suuri merkitys, koska sen säteily pystyy tunkeutumaan paremmin lehtien läpi. (Kaukoranta ym. 2017, 21.)

Salaatin valotuksen tutkiminen on huomattavasti halvempaa kuin kurkun tai tomaatin, joten siihen on viime vuosina panostettu erityisesti. Tutkimuksissa pääpaino on kasvien laadun parantamisessa erilaisia LED-valon spektrejä hyödyntämällä. Eri spektreillä voidaan vaikuttaa muun muassa siihen, miten paljon ravitsemuksellisesti hyödyllisiä tai haitallisia aineita kasvi sisältää. Vaikutuksia on myös kasvien väriin, muotoon ja kestävyyteen. (Kaukoranta ym. 2017, 24.)

4-2. Optical Characteristics

Spectrum : PW , PRB

T_j=85°C If=1620mA



Kuva 7. Opinnäytetyötä varten tehdyssä kokeessa käytettyjen LED-valaisimien valon spektrit. PW tarkoittaa valkoista LED-valoa ja PRB punaista LED-valoa. (Toivola 2018.)

5 KOKEEN TOTEUTUS

Borealilla on aikaisemmin tehty kaksi LED-valaistukseen liittyvää koetta, joilla on saatu positiivisia tuloksia. Tässä työssä käsiteltävän kokeen tarkoituksena oli selvittää, onko eri värisillä eli eri aallonpituuksisilla LED-valoilla vaikutusta ohran kasvuun ja kehitykseen sekä sadontuottoon jo olemassa olevan suurpainenatriumvalaistuksen lisänä. Koetta varten otettiin käyttöön yksi A-kasvihuoneen osastoista. Koe suoritettiin kevättalvella 2018, joka oli loistava ajankohta, koska luonnonvalon määrä oli silloin vähäistä.

Havainnot ja mittauksia koemateriaaleista tehtiin kahdesti viikossa, maanantaisin ja torstaisin, seitsemän viikon ajan.

5.1 Koejärjestelyt

5.1.1 Valaistuskäsittelyt

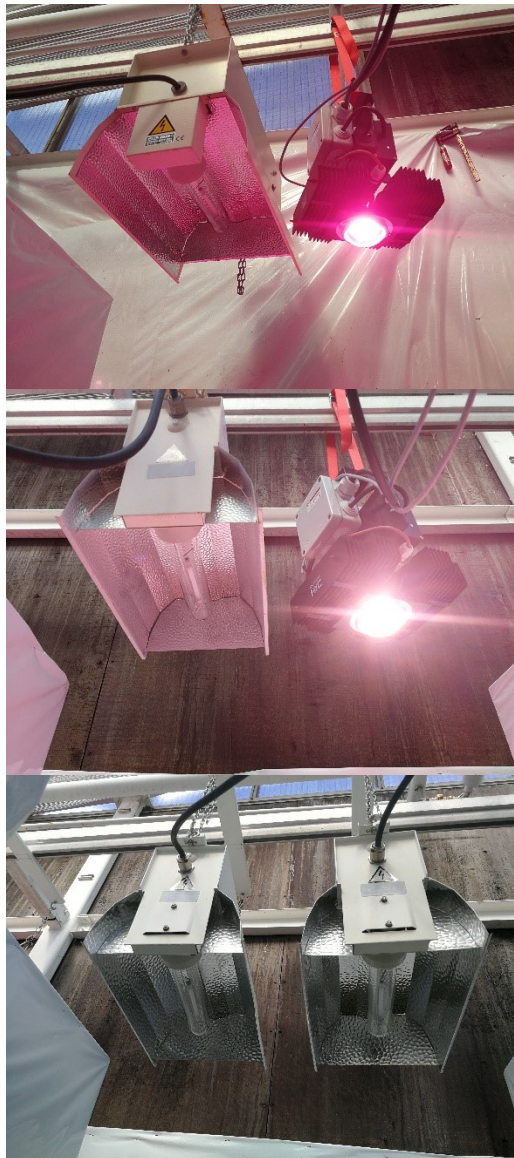
Kokeen valmistelut aloitettiin joulukuun 2017 lopussa. Kasvihuoneen kasvatuspöytä jaettiin kuuteen koppiin, joihin koemateriaali sijoitettaisiin kasvamaan (kuva 8). Väliseinät olivat puurunkoiset ja ne oli päällystetty valkoisella muovilla. Seinien korkeus oli 160 senttimetriä, eli tarpeeksi korkeat ettei valo pääsisi heijastumaan viereisiin koppeihin. Koppien etuseinänä toimi muovinen verho, jota pystyttiin kiskolla siirtämään.



Kuva 8. Kasvatuspöytä jaettuna kuuteen koppiin.

Koppien valotus toteutettiin siten, että kahteen ensimmäiseen tuli pelkkä HPS-valotus. Seuraaviin kahteen asennettiin HPS-valaisimen lisäksi valkoista valoa tuottavat LED-valaisimet. Loppuihin kahteen asennettiin HPS-valaisimen lisäksi punaista valoa tuottavat LED-valaisimet. Valaisimet olivat noin 150 cm korkeudella kasvatuspöydän päältä mitattuna. HPS-lamput olivat Philipsin 400-wattisia MASTER CG T GreenPower -kasvatuslamppuja. LED-valaisimet puolestaan olivat Helle Oy:ltä kokeiluun tulleita 280 wattisia kasvatusvaloja. Helle Oy markkinoi ainoastaan näitä kahta LED-valaisin tyyppiä. LED-valoille asennettiin oma logiikkaohjaus, joka hoiti säädöt itsenäisesti. Valotusta ohjattiin siten, että jokaisessa

kopissa suurpainenatriumvalot olivat päällä aamukuudesta iltakymmeneen. Yön ne olivat sammutettuina. LED-valot puolestaan olivat päällä myös aamukuudesta iltakymmeneen, mutta HPS-lamppujen sammuttua LED-valot paloivat vielä kaksi tuntia täydellä teholla. Tämän jälkeen LED-valot himmenivät puoleen tehoon seuraavaksi neljäksi tunniksi. Sitten LED-valojen teho nostettiin takaisin täysille ja ne paloivat vielä kaksi tuntia täydellä teholla yksinään ennen HPS-lamppujen syttymistä. Näin tekemällä yritettiin vaikuttaa PAR-säteilyn päivittäiseen summaan.



Kuva 9. Ylimmässä kuvassa HPS+punainen LED, keskimmaisessä HPS+valkoinen LED ja alimmassa kuvassa pelkkä HPS-valaistus.

5.1.2 Yleiset kasvuolosuhteet

Kasvihuoneen osastossa lämpöä tuottaa lämpöpatterit sekä kasvatusvalot itsessään. Lämpötilaa säädellään termostaatin takana olevilla jäähdytinpu-

halmilla. Osaston maksimi lämpötilaksi asetettiin kokeen alussa 11. tammikuuta 26 astetta. 19. tammikuuta lämpötila laskettiin 20 asteeseen. Kasvatuskoppien lämpötiloja seurattiin lämpötila-antureilla, joita oli asetettu jokaiseen koppiin yksi. Anturit mittasivat lämpötiloja noin kolmen tunnin välein ja tallensivat ne muistiinsa. Liitteessä 1. on esitetty lämpötila-antureiden tallentama data. Koppien lämpötilat kasvun aikana olivat loppupeleissä melko tasaiset. Kopeissa 5 ja 6 lämpötilat olivat aavistuksen alhaisemmat luultavasti siksi, että ne olivat lähimpänä kylmää ulkoseinää. Yöllä lämpötilat eivät laskeneet missään kopissa alle 11 asteen, vaikka ulkona oli välillä kovakin pakkaneen.

Taulukko 2. Kasvatuskoppien lämpötilatietoja.

	Koppi 1	Koppi 2	Koppi 3	Koppi 4	Koppi 5	Koppi 6
Alin	12	13,5	13,5	12,5	12	11,5
Ylin	26,5	30	26,5	25,5	25,5	24,5
Keskiarvo	18,16	19,44	19,27	18,89	18,41	17,54

5.2 Koemateriaalin hoito

5.2.1 Kylvö

Kasvatuskoppeihin sijoitettu materiaali kylvettiin 11.1.2018. Lajikkeeksi valittiin monitahoinen Vertti-ohra, joka oli käsitelty Baytan-peittausaineella. Alkuun koe suunniteltiin toteutettavaksi kauralla, mutta ajatuksesta luovuttiin, koska koetoimintapäällikkö Mika Hyövelän mukaan kauralla on tapana kasvaa hyvin korkeaksi kasvihuoneolosuhteissa. Tämä olisi vaikeuttanut tulevia mittauksia ja ruukkujen siirtelyä. Lisäksi kasvustot olisi pitänyt tukea erittäin hyvin.

Materiaali kylvettiin muovisiin ruukkuihin, yksi siemen per ruukku. Kylvösyvyys oli noin kolme senttimetriä. Ruukut oli täytetty Kekkilän Taimiseos mullalla. Mullan raaka-aineina olivat vaalea rahkaturve, hiekka sekä hietasavi. Koppeihin tulevaa materiaalia kylvettiin yhteensä 72 ruukkua, 12 jokaista koppiä kohti. Lisäksi kylvettiin 12.1.2018 167 ruukkua, jotka laitettiin viereiselle kasvatuspöydälle kasvamaan kasvihuoneen tavanomaiseen ilmastoon. Kaikki koppeihin tulleet ruukut merkittiin muovisäleellä, jotta havainnointeja tehtäessä ruukun tunnistaminen olisi helppoa, eivätkä ne pääsisi sekoittumaan keskenään.



Kuva 10. Vertti-ohraa kylvettiin yksi siemen per ruukku ja ruukkuja laitettiin 12 per koppi.

5.2.2 Kasvatuksen aikaiset hoitotoimenpiteet

Ruukkujen kastelu suoritettiin aluksi muutaman viikon ajan letkulla suihkuttamalla vettä ruukkujen päälle. Juurten kehittyttyä riittävästi otettiin käyttöön altakastelu. Altakastelu toimii siten, että vesi nousee kasvatuspöydälle ja kasvit imevät vettä itseensä ruukun pohjan reikien kautta. Altakastelu suoritettiin kahdesti viikossa ja jos ruukut vaikuttivat kuivilta, niin niitä kasteltiin letkulla lisäksi. Lannoitus aloitettiin myös samaan aikaan kun siirryttiin altakasteluun. Lannoitteena käytettiin Kekkilän Superex Taimi NPK-lannoitetta (19-2-20), joka oli sekoitettu kasteluveteen noin 3 kg lannoitetta 30 litraa vettä kohden. Lannoitus lopetettiin 26.2.2018.

Tavanomaisesti kasvava verrokkimateriaali alkoi lakoutua 25.1. joten ne päätettiin tukea pystyyn bambukeppejä apuna käyttäen. Kopeissa olevalla materiaalilla ei vielä tässä vaiheessa oltu havaittu lakoutumisen oireita, mutta 29.1.2018 nekin päätettiin tukea.

5.3 Kasvunseuranta ja mittaukset

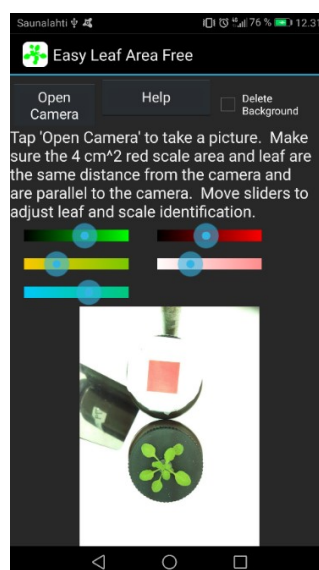
5.3.1 Easy Leaf Area

Easy Leaf Area on Yhdysvalloissa Kalifornian yliopiston tutkijoiden kehittämä aluksi tietokoneelle suunniteltu ohjelma, jolla voidaan määrittää digitaalisesta kuvasta kasvin lehtien pinta-ala. Ohjelman suunnittelijoiden mukaan he kehittivät sovelluksen, koska perinteiset mittausmenetelmät ovat joko hitaita tai ne vahingoittavat kasvustoa. (Ag Professional 2014.) Sovelluksen älypuhelinversio julkaistiin vuoden 2015 alussa. Sovelluksella

pystytään määrittämään kasvin lehtiala helposti esimerkiksi kenttäolosuhteissa.

Borealilla aiemmissa LED-valotukseen liittyvissä kokeissa kasvustojen ja kasvun havaintoja ja mittauksia on tehty joko biomassan määrää mittaamalla tai lehtien kokoa mittaamalla. Biomassanäytteen otto kuitenkin vaingoittaa kasvia ja lehtien kokojen mittaaminenkin on työlästä. Tästä johdetaan haluttiin kokeilla kasvunseurannassa jotain uutta menetelmää ja lopulta päädyttiin Easy Leaf Area-sovelluksen käyttöön, koska se oli helppokäyttöisen oloinen ja lataaminen onnistui helposti puhelimen sovelluskau-pasta.

Sovelluksen käyttö tapahtuu siten, että valitun kasvin lehti asetetaan valkoiselle mahdollisimman puhtaalle ja tasaiselle alustalle. Sovellus käynnistetään puhelimesta ja sen kautta avataan kamera. Kuvaan pitää saada koko kasvi sekä punainen neljän neliösenttimetrin (4 cm^2) paperinpala, jonka mukaan sovellus laskee lehtien koon. Lehden ja punaisen paperinpalan pitäisi olla samalla tasolla, jotta mittaus olisi mahdollisimman tarkka. Kun kuva on otettu, se tallentuu laitteen muistiin ja sitten aukeaa kuvan 11 mukainen näkymä. Punaisen ja valkoisen palkin arvoa muuttamalla valitaan kuvasta punainen paperi mahdollisimman tarkasti näkyviin. Punaista väriä ei saa näkyä muussa kohtaa kuvaa tai mittaustulos ei ole tarkka. Tämän jälkeen vasemmanpuoleisien palkkien arvoja muuttamalla valitaan kuvasta kasvin lehdet. Lehdet muuttuvat kirkkaan vihreiksi, kun säädöt ovat kohdallaan. Sitten sovellus ilmoittaa kuvasta laskemansa lehtien pinta-alan. Kun pinta-alatieto on otettu ylös, voidaan kamera taas avata ja ottaa uusi kuva seuraavasta kasvista. Tällöin edelliset käytetyt asetukset ovat edelleen sovelluksen muistissa ja teoriassa niiden pitäisi olla kohdallaan, mutta käytäntö on osoittanut ajoittain muuta. Kun sovellus suljetaan ja käynnistetään uudelleen, kaikki säädöt täytyy tehdä uudelleen.



Kuva 11. Kuvakaappaus puhelimen näytöltä Easy Leaf Area-sovelluksesta.

5.3.2 Biomassaseuranta ja muut mittaukset

LED-koppeihin tulleen materiaalin lisäksi kylvetystä tavanomaisesti kasvihuoneen olosuhteissa kasvaneesta materiaalista tehtiin biomassaseuranta (kuva 12). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että LED-koppien havaintojen ja mittausten yhteydessä myös tavanomaisesti kasvavista kasveista kymmenestä otettiin lehtien pinta-alat Easy Leaf Area-sovelluksella sekä ne samat kymmenen kasvia punnittiin ja tämän jälkeen ne laitettiin kuivatuskaappiin pariksi päiväksi. Kasvien kuivuttua ne punnittiin uudelleen. Tällä toimenpiteellä oli tarkoitus yrittää selvittää pinta-ala mittauksen ja biomassan määrän kasvun suhdetta vertailemalla Easy Leaf Area-sovelluksen tarkkuutta ja tulosten oikeellisuutta.



Kuva 12. Kasvihuoneessa tavanomaisesti kasvavaa materiaalia 22.1.2018.

Jokaisen kopin keskimmäiseltä riviltä jokaisesta ruukusta laskettiin myös versojen määrät. Samalla laskettiin keskimääräiset jyväluvut koppikohtaisesti. Yksittäisten versojen lehtien pinta-aloja päätettiin myös mitata. Tämä toteutettiin myös jokaisen kopin keskirivin ruukuista. Näistä ruukuista valittiin jokaisesta yksi verso, josta otettiin kaksi ylintä lehteä mitattavaksi. Pinta-alat mitattiin Easy Leaf Area-sovelluksella. Saatuja arvoja haluttiin vertailla jotenkin ja päädyttiin käyttämään tietokoneelle asennettavaa ohjelmaa Image J. Ohjelman pinta-alamittaus on periaatteessa samantapainen kuin Easy Leaf Areassa ja se on myös melko helppokäyttöinen. Image J-ohjelmassa käytettiin niitä samoja kuvia, mitkä Easy Leaf Areaan kautta otettiin, jotta saatavat tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia.

LED-koppien kasvustojen tuleennuttua sato korjattiin 5.4.2018. Tässä vaiheessa HPS-kopit eivät olleet vielä täysin tuleentuneita. Koppien keskimääräiset rivit korjattiin jokainen ruukku erikseen omaan pussiin ja koppikohtaisesti loput ruukut korjattiin yhteen pussiin. 12.4.2018 myös HPS-koppien materiaalit korjattiin samalla tavalla kuin LED-koppien. Sadonkorjuun jälkeen annettiin sadon kuivua muutaman päivän ajan kuivatuskaapissa. Sitten sato puitiin Kurt Pelz -puimakoneella ja sato punnittiin. Tämän jälkeen määritettiin hehtolitrapainot ja tuhannen jyvän painot.

6 TULOSTEN ESITTELY JA ANALYSOINTI

Kokeessa tehtyjen mittausten tuloksista tutkitaan eri sävyisten LED-valaisimien vaikutuksia ohran kasvuun ja kehitykseen. Tuloksia esitetään kasvien lehtien pinta-alamittauksista ja niissä käytetyn ohjelman tarkkuudesta, satokomponenteista ja sadosta sekä biomassan määrän kehityksestä. Saatujen tulosten tarkastelussa ja havainnollistamisessa käytettiin hyödyksi Excel-taulukkolaskentaohjelmaa.

Alkuun mainittakoon, että kasvustojen kehitymisajoissa oli huomattavia eroja. Koppimateriaalien kylvöpäivä oli siis 11. tammikuuta ja tavanomaisesti kasvavan 12. tammikuuta. Hybridivalaistuskoppien materiaali alkoi tulla tähkälle 12. helmikuuta, eli noin kuukauden päästä kylvöstä. Suurpainenaatriumkopeissa ensimmäisiä tähkiä havaittiin 19. helmikuuta ja tavanomaisesti kasvavassa materiaalissa 9. maaliskuuta. Sadonkorjuu hybridivalaistukopeille suoritettiin 5. huhtikuuta ja HPS-kopeille 12. huhtikuuta. Tällöin tavanomaisesti kasvava materiaali ei ollut alkanut vielä juurikaan tuleentua, eli kasvustot olivat melkein kokonaan vihreät.

6.1 Pinta-alamittaukset

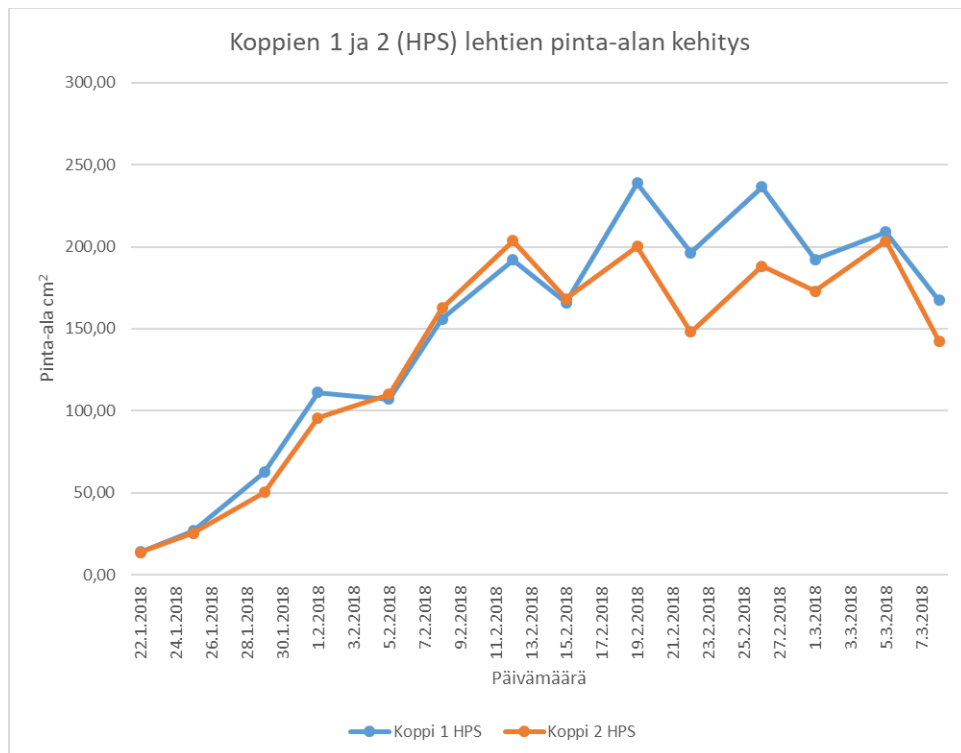


Kuva 13. Vasemmalta oikealle HPS, HPS+valkoinen LED, HPS+punainen LED. Kuvat otettu 22. tammikuuta, jolloin aloitettiin pinta-alamittausten tekeminen.

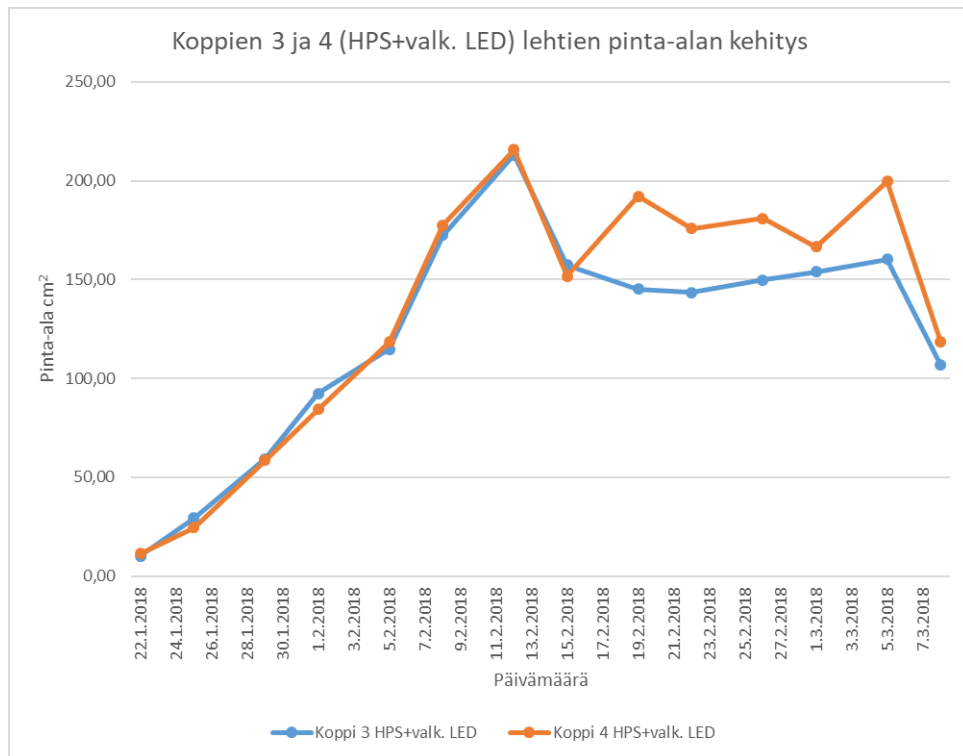
Kuvissa 14-16 on graafisesti esitetty Vertti-ohran lehtien pinta-alan kasvua. Pinta-alamittausten tekeminen aloitettiin 22. tammikuuta ja kuvasta 13 voidaan havaita, että LED-koppien materiaali oli hieman ryhdikkäämpää kuin pelkän HPS-valotuksen kopissa. Mittauksia oli alun perin tarkoitus tehdä kymmenen viikon ajan. 14. kuvauskerralla 8. maaliskuuta todettiin, ettei kasvua enää tapahdu ja että tähkät vaikuttavat mittaustuloksiin negatiivisesti, koska ylhäältä päin kuvattaessa tähkät estivät lehtien näkymisen osittain.

Kuvaajista 14-16 voidaan todeta, että samat valaistuskäsittelyt saaneiden kasvien lehtien pinta-alojen kasvu on ollut melko samanlaista. Kun valaistuskäsittelyitä ruvetaan vertailemaan ristiin, huomataan että suurimmaksi pinta-ala on kasvanut kasvatuskopissa 1, jossa oli pelkkä HPS-valaistus. Jokaisessa kasvatuskopissa kasvun kehitys on ollut melko tasaisesti nousevaa

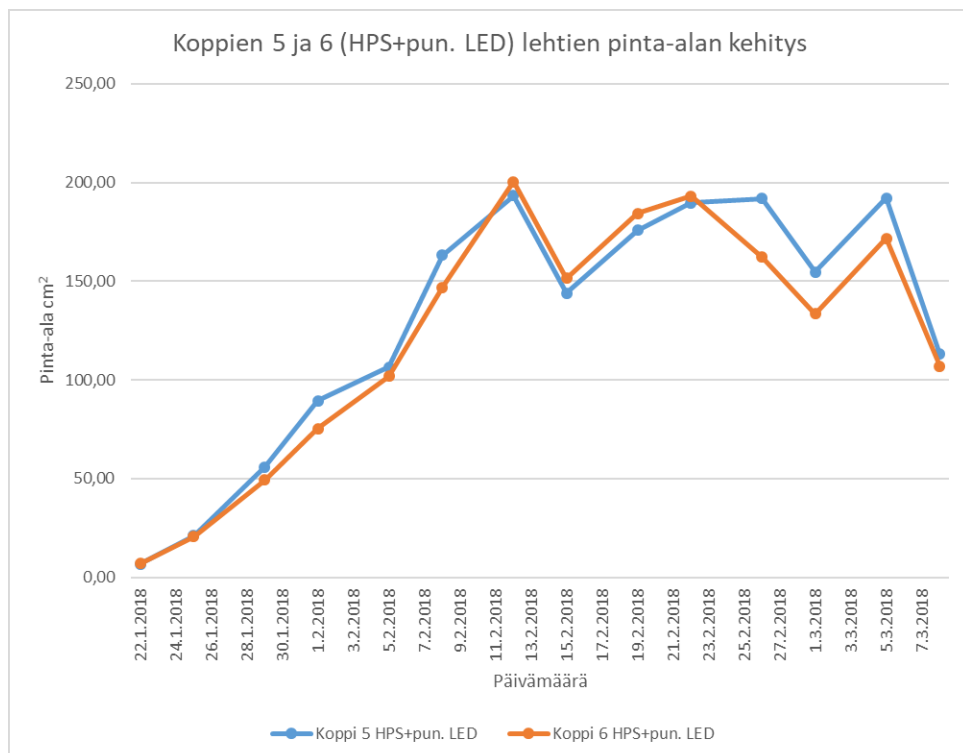
alussa, mutta 13.2 jälkeen arvot ovat alkaneet vaihdella melko rajusti. Pinta-alojen vaihtelun syynä on suurella varmuudella pinta-alamittauksia tehtäessä tapahtunut suunnitteluvirhe. Kameraa jouduttiin tietysti väliajoin nostamaan korkeammalle kasvien kasvaessa. Näin ollen oletettiin, että kun kameraa nostetaan tulos ei muutu, koska punaista skaalauspaperia nostettiin aina yhtä paljon kuin kameraakin, joten niiden välinen etäisyys oli aina sama. Kuvan 14 kuvaajan mukaan kasvatuskopeissa, joissa oli HPS valaistuksen lisäksi valkoiset LED-valaisimet, pinta-alojen kasvu on ollut hieman nopeampaa kuin muissa kopeissa.



Kuva 14. Kasvatuskoppien 1 ja 2 lehtien pinta-alan kehitys.



Kuva 15. Kasvatuskoppien 3 ja 4 lehtien pinta-alan kehitys.

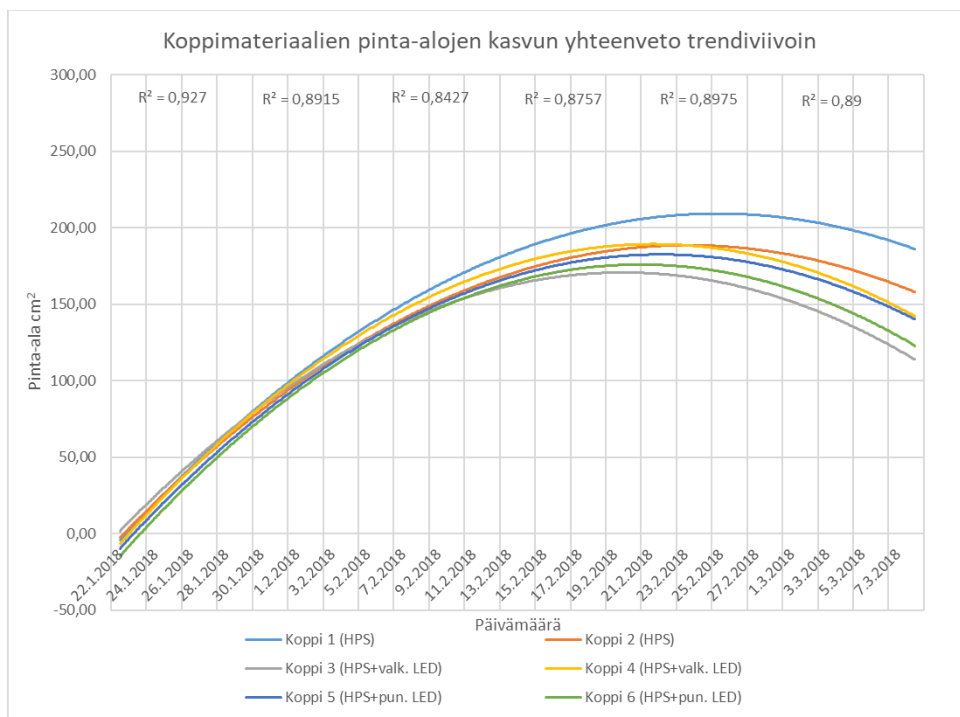


Kuva 16. Kasvatuskoppien 5 ja 6 lehtien pinta-alan kehitys.

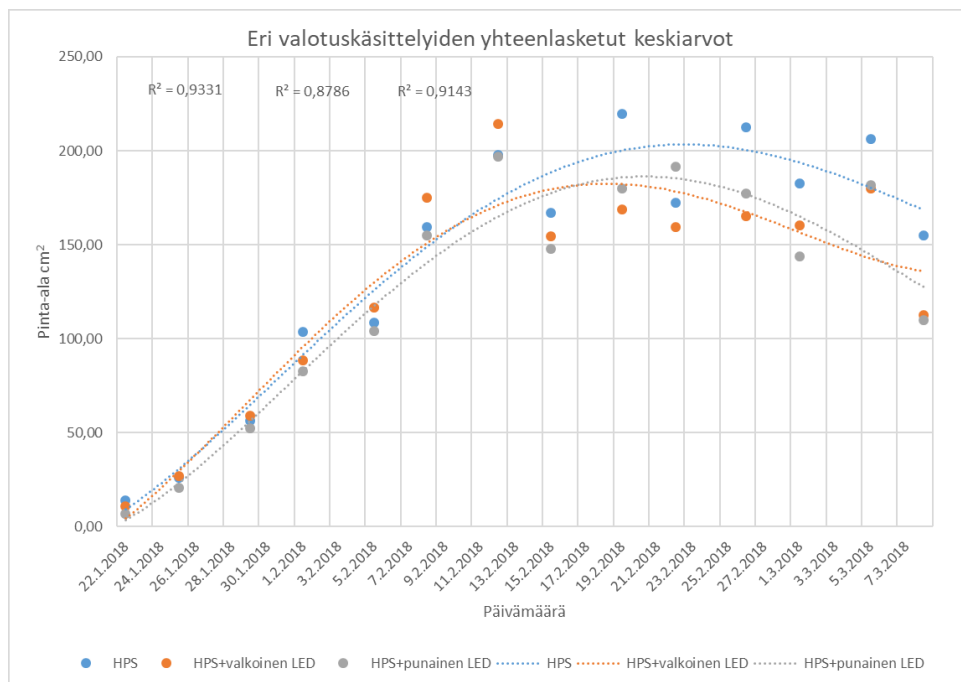
Kuvassa 17 on graafisesti esitetty kaikkien kasvatuskopeissa olleiden materiaalien pinta-alojen kehittymiset toisen asteen polynomisin trendivii-

voin. Tässä kaaviossa trendiviiva osoittaa pinta-alan mittaustulosten kasvun kehittymisen keskiarvoisesti. Kaavion yläreunassa on jokaiselle trendiviivalle oma selitysaste (R^2), joka ilmaisee kuinka hyvin mittaustulokset osuvat viivalle. Mitä lähempänä lukua 1 selitysaste on, niin sitä parempi tulos on. Selitysasteet ovat samassa järjestyksessä kuin kuvan alareunassa olevat kuvaajien tunnisteet.

Kaaviosta voidaan havaita, että keskimäärin pinta-alan kasvaminen on ollut hyvinkin tasaista kokeen alkupuoliskolla. Kasvatuskopin 1 materiaalit ovat tämänkin kuvaajan mukaan lopulta kehittäneet suurimman lehtipinta-alan. Selitysasteenkin ollessa 0,927, voidaan todeta, että kopin 1 trendiviiva on melko tarkka. Koppien silmämääräisen havainnoinninkin mukaan kasvatuskopeissa 1 ja 2 oli biomassan tuotto voimakkaampaa kuin hybridivalaistuilla kopeilla. HPS-koppien materiaalit tuottivat versoja enemmän ja siitä johtuen lehtipinta-ala on suurempi.



Kuva 17. Kasvatuskoppien kasvien lehtien pinta-alojen kasvun yhteenveto trendiviivoin.



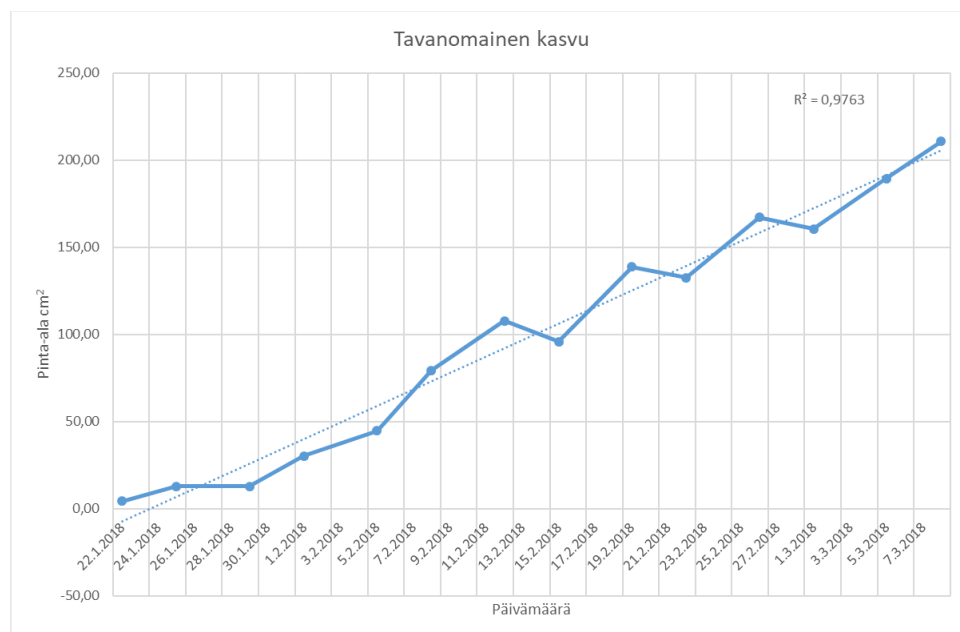
Kuva 18. Kaavion kuvaajat ilmaisevat eri valotuskäsittelyn saaneiden kasvien pinta-alan kehityksen. Kaaviossa on arvopisteet sekä niistä johdetut trendiviivat.

Kun tarkastellaan kuvan 18 kaaviota, voidaan huomata, ettei suurta eroa kehityksessä ole edelleenkään kokeen alkupuoliskolla. Kasvatuskopeissa, joissa oli HPS-valotus sekä HPS+valkoinen LED-valotus, alkukehitys on kulkenut melkein käsi kädessä, mutta kuitenkin jälkimmäisen kehitys on ollut aavistuksen verran nopeampaa. Näin ollen kasvatuskopeissa, joissa hybridivalotuksen osana oli punainen LED, havaitaan kasvun olleen keskimäärin hieman muita hitaampaa. Selitysasteiden arvot ovat aika hyvät, vaikka arvojen vaihtelu näyttää melko rajulta trendiviivaan peilattuna.

Kuvan 18 kaaviosta nähdään, että päivämäärän 12.2. kohdalta hybridivalaistuskoppien käyrien kasvu hiipuu. Tämä voi osittain selittyä myös sillä, että tällöin havaittiin ensimmäisten versojen olevan tulossa tähkälle. X-akselin arvon 17.2. kohdalla hybridivalaistuskoppien käyrät leikkaavat toisensa. Tästä voitaisiin päätellä, että valkoisesta LED-valotuksesta olisi hyötyä kasvun nopeuttamisessa alkuvaiheesta noin tähkälle tuloon asti, mutta kasvin tähkälle tulon jälkeen punaisesta LED-valotuksesta olisikin enemmän hyötyä. Kuvaa 7 tutkimalla havaitaan, että kokeessa käytettyjen LED-valojen spektreistä valkoisessa LED-valossa on suhteessa enemmän sinistä (400-500nm) ja punaista (600-700nm) väriä seassa, joiden tiedetään olevan kasveille helpommin käyttökelpoisempaa yhteyttämisessä.

Kasvihuoneen osastossa tavanomaisissa olosuhteissa kasvaneen vertailumateriaalin pinta-alan kehitys on tuloksia tarkasteltaessa ollut paljon suoriivaisempaa kuin kasvatuskoppimateriaaleilla, kuten kuvasta 19 käy ilmi. Mittaustapa oli täysin samanlainen kuin koppimateriaaleilla, mutta

silti tässä kuvaajassa ei esiinny niin suuria vaihteluita kuin aiemmissa kaavioissa. Kun verrataan tätä kuvaajaa kuvien 14-16 kuvaajiin, nähdään, että esimerkiksi 12.2. tehdyn mittauksen kohdalla lehtien pinta-alassa oltiin noin 100 cm² jäljessä. Tästä voitaisiin päätellä, että LED-valotuksella olisi nopeuttava vaikutus ohran kasvuun, mutta koska myös HPS-valotus koipeissa ohran kasvu on ollut koko lailla yhtä intensiivistä, eivät nämä tulokset riitä kertomaan mitään tarpeeksi vakuuttavasti.



Kuva 19. Kasvihuoneessa tavanomaisesti kasvaneen vertailumateriaalin keskiarvoinen pinta-alan kehitys.

6.2 Easy Leaf Area vs. Image J

Kun vertaillaan taulukoiden 3 ja 4 Easy Leaf Area -sovelluksen antamia pinta-aloja tietokoneella käytettävän Image J-ohjelman tuloksiin, huomataan, että Easy Leaf Areal tulokset ovat järjestään hieman pienempiä. Vertailussa käytettiin samoja kuvia molemmissa ohjelmissa, joten sen puolesta virhettä ei pitäisi tulla. Pinta-alojen eroavaisuus johtuu todennäköisesti siitä, että puhelimella käytettävän Easy Leaf Areal säätäminen oli hieman työläämpää, koska näyttö oli melko pieni ja säätömahdollisuudet rajalliset. Image J-ohjelma puolestaan oli käyttäjäystävällisemmän oloinen, koska ensinnäkin tietokoneessa näyttö on huomattavasti isompi. Toisekseen kuvansäätömahdollisuuksia oli enemmän ja silti ohjelma oli helppokäyttöinen, kun alkuun pääsi. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö Easy Leaf Areal tuloksia voitaisi kuitenkin pitää suuntaa antavina. Image J-ohjelmalla lehdistä pystyttiin myös melko tarkkaan erottamaan fysiologisen laikun aiheuttamat jäljet, joten tällä ohjelmalla voidaan periaatteessa mitata yhteyttävän osan pinta-alaa myös.

Taulukko 3. Taulukossa on esitetty kasvatuskoppien ruukkujen keskiriiveiltä valittujen kasvien lippulehtien pinta-alojen keskiarvoja.

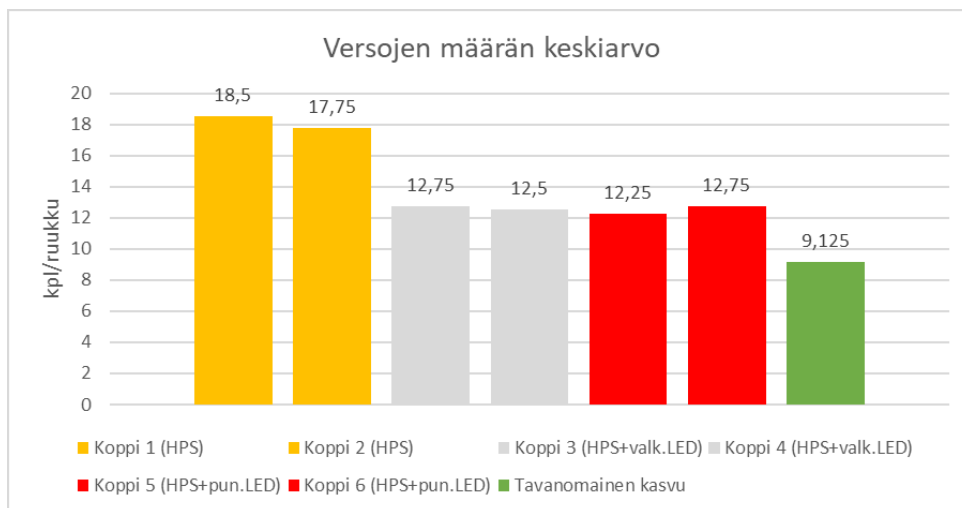
Lippulehtien keskipinta-ala cm ²		
	Easy Leaf Area	Image J
Kasvi 5	2,72	4,84
Kasvi 6	4,37	6,25
Kasvi 7	7,09	8,96
Kasvi 8	5,08	6,24

Taulukko 4. Taulukossa on esitetty kasvatuskoppien ruukkujen keskiriiveiltä valittujen kasvien toiseksi ylimmän lehden pinta-alojen keskiarvoja.

Toiseksi ylimmän lehden keskipinta-ala cm ²		
	Easy Leaf Area	Image J
Kasvi 5	9,82	11,36
Kasvi 6	13,30	14,28
Kasvi 7	16,64	16,69
Kasvi 8	13,48	12,02

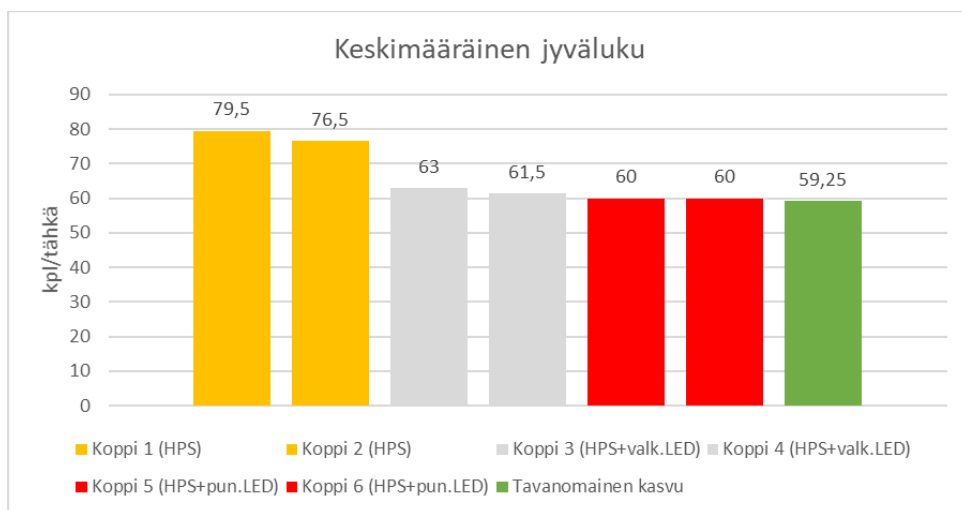
6.3 Versot, tähkä- ja jyväluku ja sadon laatu

Versojen lukumäärää tarkasteltaessa kuvasta 20 havaitaan selkeää ero HPS-koppien ja hybrivalaistuskoppien sekä tavanomaisen kasvun kesken. Palkkien keskiarvot on laskettu jokaisen kopin keskiriivien ruukuista ja vapaassa kasvussa valittiin sattumanvaraisesti kymmenen ruukkua, joista laskettiin keskiarvot. Versomäärä on huomattavasti suurempi kuin tavallisessa peltoviljelyssä voidaan saavuttaa. Tämä johtuu siitä, että kun jokaiseen ruukkuun kylvettiin vain yksi siemen, niin sillä on tilaa tuottaa enemmän versoja, koska kovaa kilpailua elintilasta ei ole. Tästä voidaan päätellä, että versojen tuottamiseen ei LED-lisävalotus tuo mitään lisäarvoa. HPS-koppien suurempi versomäärä selittyy todennäköisesti sillä, että näihin koppeihin laitettiin kaksi HPS-valaisinta, jotta asennusteho saataisiin lähelle hybridikoppien tehoa, jolloin todennäköisimmin lämpösäteilyn suuri määrä on vaikuttanut versomiseen positiivisesti.



Kuva 20. Kasvatuskoppien keskirivien ruukuista lasketut versojen määrät. Kopit 1-6 vasemmalta oikealle.

Silmämääräisesti tähkiä tutkiessa voitiin jo havaita, että HPS-koppien tähkät olivat keskimäärin kookkaampia kuin hybridivalaistuskopeissa. Tämä oli mielenkiintoinen havainto, koska lannoitus oli kuitenkin täysin samanlainen kaikkien materiaalien osalta. Kun jyvälukuja alettiin laskea niin myös nämä tulokset (kuva 21) osoittavat, että HPS-kopeissa oli keskimäärin huomattavasti suurempi jyväluku tähkiä kohden. Tämäkin todennäköisesti selittyy suuremmalla lämpösäteilyllä.



Kuva 21. Kasvatuskoppien keskirivien ruukuista laskettu keskimääräinen jyväluku. Kopit 1-6 vasemmalta oikealle.

Kun kasvatuskoppien sato oli tuleentunut, suoritettiin sadonkorjuu, jonka yhteydessä oli kätevää laskea koppikohtainen tähkien määrä. Saadut tulokset on koottu taulukkoon 5. Siitä huomataan koppien 1 ja 2 tähkien määrän olevan suurempi kuin muiden koppien. Kasvihuonekasvatuksessa yleiseksi ongelmaksi ohralle on muodostunut se, että tähkistä jää osittain jyvät tyhjiksi. Tähän asiaan ei ole keksitty syytä, eikä sen paremmin ratkai-

suukaan, mutta tässä tapauksessa LED-valotuksesta näyttäisi olevan jonkinlainen hyöty. Varsinkin punaisella LED-lisävalolla olleissa kopeissa osittain tyhjen tähkien määrä oli hyvinkin pieni tai niitä ei ollut ollenkaan.

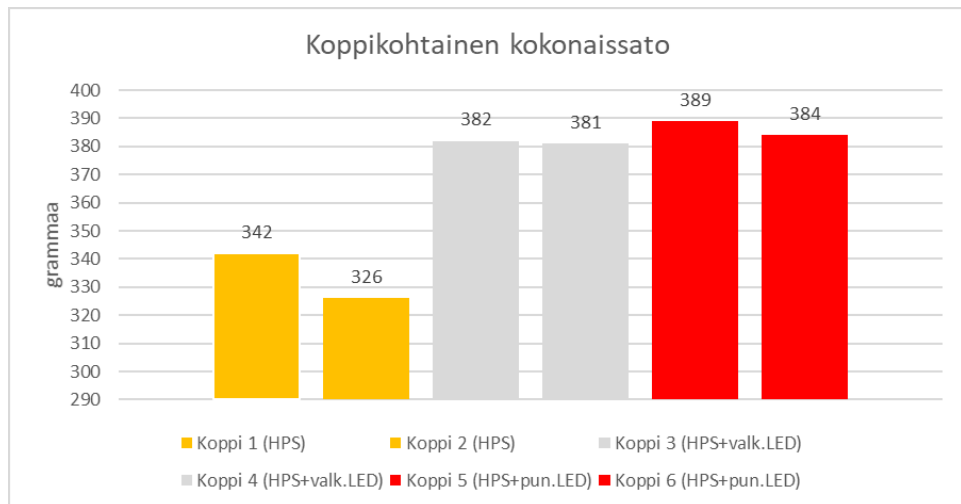
Taulukko 5. Taulukossa on esitetty kasvatuskoppi kohtainen tähkien määrä sekä osittain tyhjäksi jääneiden tähkien määrä ja näiden prosenttiosuus koko määrästä.

	Tähkien määrä	Osittain tyhjät	%
Koppi 1	173	29	16,8
Koppi 2	135	20	14,8
Koppi 3	134	14	10,4
Koppi 4	129	11	8,5
Koppi 5	119	5	4,2
Koppi 6	128	0	0

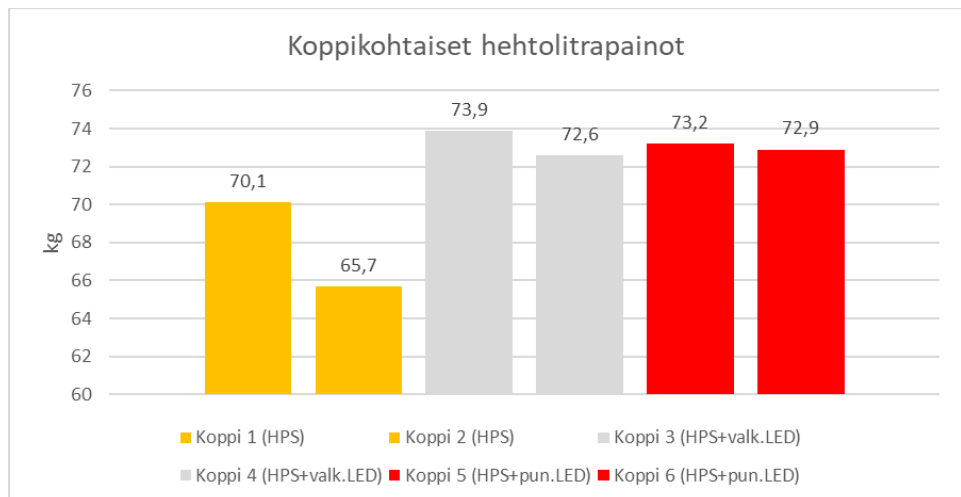


Kuva 22. Kuvassa vajaasti täyttynyt ohran tähkä.

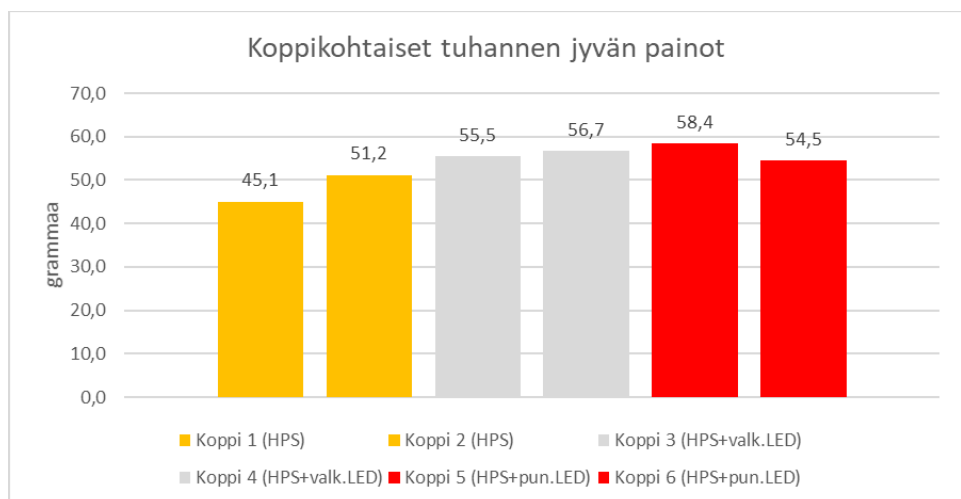
Siitä huolimatta, että kopeissa 1 ja 2 versojen ja tähkien määrä oli suurempi kuin muissa, niin kokonaissato (kuva 23) oli silti huomattavasti pienempi. Tähkissä olleiden tyhjen jyvien määrä oli siis aika merkittävä. Sapon laatuun hybridivalaistus vaikutti myös selkeästi. Kuvan 25 mukaan hehtolitrapainoissa oli noin kolmen kilogramman ero suurpainenatrium- ja hybridivalaistuskoppien välillä. HLP on aavistuksen suurempi valkoisen LED-lisävalotuksen kopeissa kuin punaisen LED-lisävalotuksen kopeissa. Tuhannen jyvän painot olivat myös hybridivalaistuskopeissa suuremmat kuin suurpainenatriumvalaistuskopeissa. Keskimäärin kuitenkin suuremmat TJP:t oli punaisen LED-lisävalotuksen kopeissa. Borealin virallisten kokeiden mukaan Vertti-ohran HLP on 65,4 kg ja TJP on 43 g, eli joka tapauksessa tässä kokeessa saadut tulokset ovat huomattavasti suurempia.



Kuva 23. Kuvassa esitetty koppikohtaiset kokonaissadot.



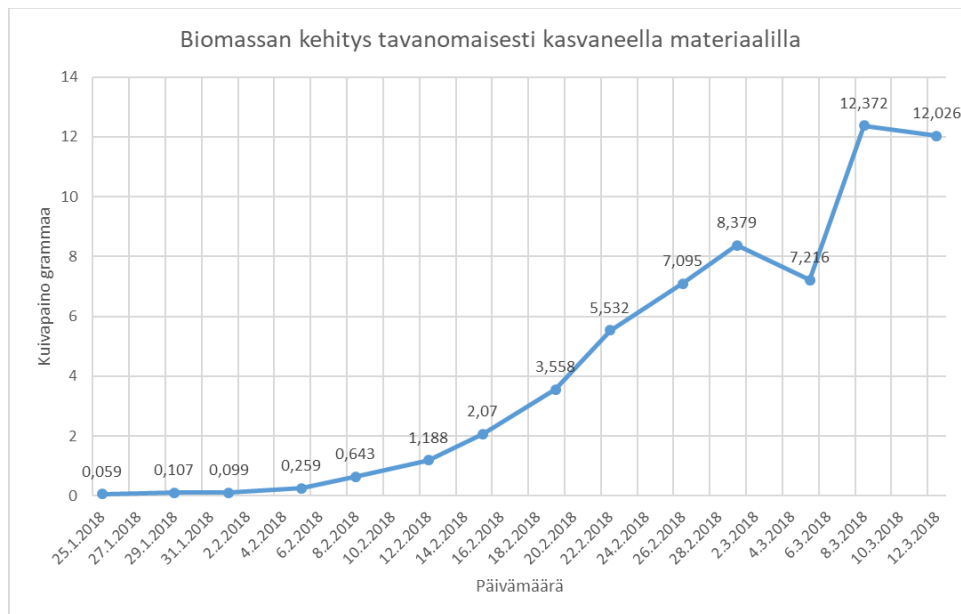
Kuva 24. Kuvassa esitetty koppikohtaiset hehtolitrapiinot.



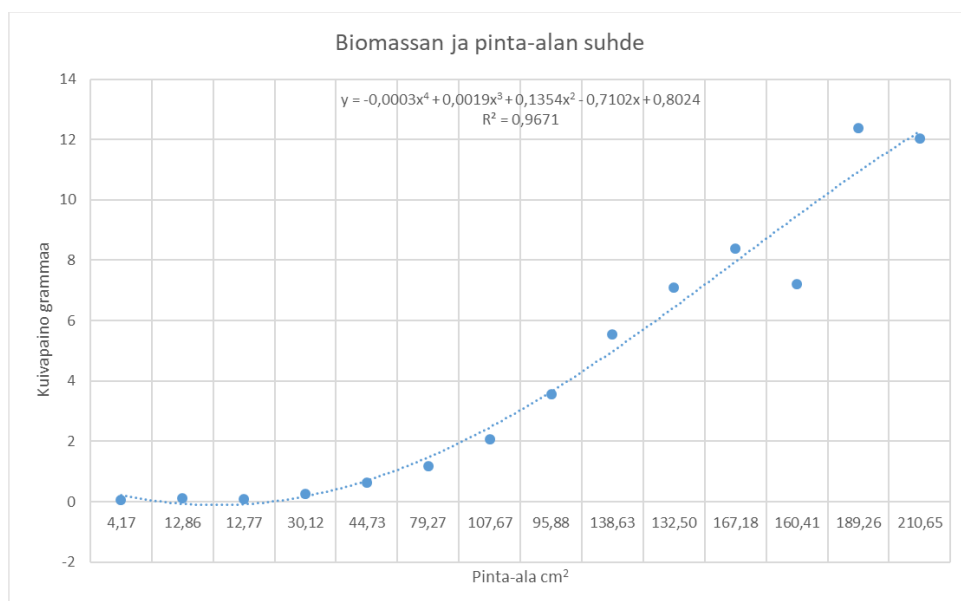
Kuva 25. Kuvassa esitetty koppikohtaiset tuhannen jyvän painot.

6.4 Biomassaseuranta

Tavanomaisesti kasvaneen materiaalin biomassan kehityksestä otettiin tuloksia pinta-alamittausten yhteydessä. Periaatteessa kuvan 26 kaaviossa oleva käyrä on varsin hyvän näköinen lukuun ottamatta loppuvaiheen notkahdusta. Notkahdus voi johtua joko punnitusvirheestä tai sitten sen keran näyte on ollut jostain syystä kauemmin kuivauskaapissa kuin muut näytteet. Käyrä kuvaa varsin hyvin biomassan kasvua, koska käytännössäkin kasvissa on aluksi vähän biomassaa ja sen kasvu on hitaampaa, kun lehtimäärä on pieni ja korsi lyhyt. Kun kasvi kasvaa, se tuottaa sivuversoja, korsi vahvistuu ja lehtien määrä kasvaa, joten biomassan kasvu on silloin suurempaa ja nopeampaa.



Kuva 26. Kaaviossa on esitetty biomassan kehitys havainnointijaksolla.



Kuva 27. Kaaviossa kuvattu biomassan ja pinta-alan suhde.

Kuvan 27 kaavioon on x-akselille vaihdettu päivämäärien tilalle niitä vastaavat mitatut lehtien pinta-alat. Kun arvopisteille tehtiin neljännen asteen polynominen trendiviiva, saatiin luotua kaava, jonka avulla periaatteessa pystyttäisiin laskemaan kasvatuskoppimateriaaleille biomassat lehtien pinta-alojen perusteella:

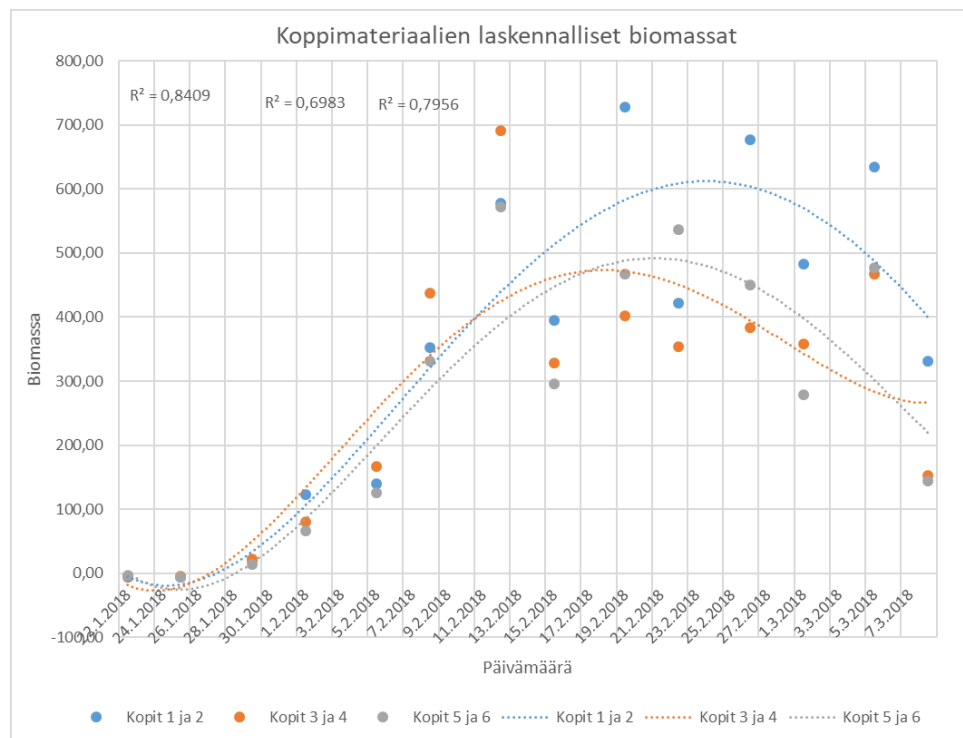
$$y = -0,003x^4 + 0,0019x^3 + 0,1354x^2 - 0,7102x + 0,8024$$

Taulukko 6. Taulukoissa on kasvatuskoppien kasvien lehtien pinta-alojen keskiarvot ja niiden kautta yllä olevalla kaavalla lasketut biomassat.

Keskiarvot Koppi 1 ja 2			Keskiarvot Koppi 3 ja 4			Keskiarvot Koppi 5 ja 6		
Pvm	Pinta-ala	Biomassa	Pvm	Pinta-ala	Biomassa	Pvm	Pinta-ala	Biomassa
22.1.2018	13,80	-5,51	22.1.2018	10,85	-4,75	22.1.2018	6,94	-3,24
25.1.2018	26,11	-5,24	25.1.2018	26,96	-5,02	25.1.2018	20,87	-6,03
29.1.2018	56,38	19,03	29.1.2018	58,88	22,55	29.1.2018	52,51	14,06
1.2.2018	103,46	123,58	1.2.2018	88,37	81,21	1.2.2018	82,46	66,89
5.2.2018	108,60	139,91	5.2.2018	116,53	167,00	5.2.2018	104,18	125,79
8.2.2018	159,33	353,07	8.2.2018	174,91	437,48	8.2.2018	155,04	331,41
12.2.2018	197,86	578,08	12.2.2018	214,44	691,62	12.2.2018	196,92	571,89
15.2.2018	167,15	394,34	15.2.2018	154,52	328,82	15.2.2018	147,74	296,07
19.2.2018	219,44	727,87	19.2.2018	168,59	402,16	19.2.2018	180,14	467,82
22.2.2018	172,21	422,23	22.2.2018	159,60	354,45	22.2.2018	191,46	536,89
26.2.2018	212,30	676,42	26.2.2018	165,29	384,33	26.2.2018	177,07	449,91
1.3.2018	182,61	482,52	1.3.2018	160,25	357,82	1.3.2018	143,99	278,68
5.3.2018	206,22	634,07	5.3.2018	179,97	466,80	5.3.2018	181,83	477,81
8.3.2018	154,91	330,74	8.3.2018	112,54	153,09	8.3.2018	109,98	144,46

Taulukossa 6 on laskettu Excel-tilaukkolaskentaohjelmalla kasvatuskoppissa olleiden Vertti-ohra kasvustojen lehtien pinta-alojen avulla niille suuntaa antavat biomassat. Laskentakaavana käytettiin aikaisemmin esitettyä funktiota. Saaduista laskennallisista biomassoista johdettiin kuvan 28 mukainen kaavio. Jokaista valotuskäsittelytapaa kohti on yksi käyrä. Selitysasteita tutkittaessa voidaan heti sanoa, että trendiviivat eivät ole parhaat mahdolliset, mutta menettelevät. Huonomman kertoimen aiheuttavat suuret heitot arvopisteiden välillä.

Kuvaajista voidaan havaita, että edelleen sama trendi jatkuu eli HPS-koppien (kopit 1 ja 2) laskennallinen biomassa on myös lopuksi suurempi kuin muiden koppien, aivan kuten pinta-alojakin tutkittaessa. Valkoisella LED-lisävalotuksella olleiden koppien (kopit 3 ja 4) käyrä käyttäytyy tässä kuvaajassa samanlaisesti kuin kuvan 18 kuvaajassa. Laskennallisesti valkoinen LED näyttäisi tuottavan nopeamman biomassan kasvun ohralle. Aivan kuten se näytti nopeuttavan lehtien pinta-alan kasvuakin.



Kuva 28. Kaaviossa kuvattuna kasvatuskoppien materiaalien laskennalliset biomassan kehitykset.

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli selvittää eri väristen LED-kasvatusvalojen vaikutuksia Vertti-ohran kasvuun ja kehitykseen. Saatujen tulosten perusteella voitaisiin sanoa, että yleisesti LED-lisävalotuksesta on hyötyä kasvuun ja kehitykseen sekä sadon laatuun. Eri väristen LED-valojen vaikutusten erot eivät kuitenkaan ole niin selkeitä ja vaatisivat uusia kokeita.

Hybridivalaistuskoppien materiaalit tulivat tähkälle ja kasvustot olivat tuleentuneet noin viikkoa ennen suurpainenatriumkoppien materiaaleja. Hybridivalaistuskoppien kesken silmämääräisesti voitiin havaita, että punaisella LED-lisävalolla olleet kasvustot olivat hieman edellä kehityksessä tuleentumisvaiheessa. Erityisesti risteytysmateriaalien kasvatuksessa nopeasta kasvusta on suuri hyöty, koska tällöin pystytään kasvihuoneen kasvatuskiertoa parantamaan (Hyövelä 2018). DH-tuotannon jälkeläisiä, eli uusia linjoja tuotettaessa kasvun nopeuttamisesta on myös hyötyä, koska perinteisesti ne kylvetään kasvihuoneessa syksyllä. Näin ollen korjuu on keväällä, mutta yleensä valmistuminen on venynyt, jolloin linjojen pellolle kylvöä on edeltänyt valtava kiire korjuiden kanssa. (Hyövelä 2018.)

Pinta-alamittausten perusteella valkoiset LED-valot vaikuttavat ohran kasvuun enemmän ennen tähkälle tuloa ja punaiset LED-valot tähkälle tulon

jälkeen. Myös kasvustohavaintojen mukaan tähkälle tulo alkoi ensimmäisenä valkoisen LED-valotuksen kopeissa. Esimerkiksi vehnän SSD-tuotannossa ensimmäisten sukupolvien tuottaminen perustuu siihen, että niiden halutaan kehittyvän tähkälle asti mahdollisimman nopeasti (Hyövelä 2018). Tähkälle tulon jälkeen tähkät korjataan ja laitetaan kuivumaan, jolloin tuleentumista nopeutetaan. Täten uusien sukupolvien tuotantoa saadaan nopeutettua linjarivivaiheeseen asti. (Hyövelä 2018.)

Sadon määrässä ja laadussa tulivat esiin selkeimmät erot perinteisen ja hybridivalotuksen välillä. Hybridivalotuksella saatiin aikaan suurempi sato, hehtolitraino sekä tuhannen jyvän paino. Punaisella LED-lisävalotuksella kokonaissato ja tuhannen jyvän paino olivat suurimmat, kun taas valkoisella LED-lisävalotuksella hehtolitraino oli suurin. Iso jyväsato on tärkeässä roolissa kasvihuonekasvatuksessa. Risteytysmateriaalien tuotannossa iso siemensato nopeuttaa sukupolvien tuottoa, koska valintojen tekemiseen on enemmän vaihtoehtoja (Hyövelä 2018). DH-tuotannossa emokasvien siemenmäärä on aina rajallinen. Tällöin siemensadon kasvattamisella saadaan jälkeläisten määrää kasvatettua. (Hyövelä 2018.)

Jos koe uusittaisiin, niin muutamia asioita tehtäisiin varmasti toisin. Ensinnäkin kahden ensimmäisen kasvatuskopin suurpainenatriumvalotus saattoi olla liian intensiivinen kahdella valaisimella. Koetta voisi yrittää uudelleen siten, että näistä kopeista otettaisiin toiset valaisimet pois. Toiseen pinta-alamittauksessa olisi pitänyt kamera asettaa tietylle korkeudelle ja kuvata kasvit korkeutta muuttamatta koko kokeen ajan. Näin ollen pinta-alojen vaihtelut kuvauskertojen välillä olisivat todennäköisesti olleet vähäisemmät ja loogisemmat. Täten kasvin loppuvaiheen kasvusta saatettiin selkeämpi kuva eri valotuskäsittelyillä.

Easy Leaf Area-sovelluksen sopivuus tähän käyttötarkoitukseen on huono. Ohjelma antaa paljon tarkempia tuloksia, kun kuvataan yhtä lehteä kerrallaan. Kokonaisen kasvin lehtien pinta-alan mittaustulosta ei voi pitää oikeana, koska ylimmät lehdet peittävät alempia lehtiä ja muutenkaan lehdet eivät ole kuvaamisen kannalta koskaan parhaassa asennossa. Kasvin tähkälle tulo vaikuttaa mittaustulokseen negatiivisesti.

Viljoille sopivan valon spektrin tutkimiseen täytyisi vielä panostaa, koska tässä kokeessa käytetyt LED-valaisimetkin ovat pääasiassa tarkoitettu vihannesviljelyyn. Tämän kokeen tulosten perusteella voidaan sanoa, että näiden LED-kasvatusvalojen väreillä on ominaisuuksia, joita molempia voidaan hyödyntää eri jalostusmenetelmissä.

LÄHTEET

Ag Professional (2014). Easy Leaf Area software calculates leaf area from digital images. *Ag professional.com* 8/2014. Haettu 27.3.2018

<https://www.agprofessional.com/article/easy-leaf-area-software-calculates-leaf-area-digital-images>

Boreal (n.d), Yritys. Haettu 2.2.2018

<http://www.boreal.fi/yritys/>

Boreal (n.d), Jalostusohjelmat. Haettu 2.2.2018

<http://www.boreal.fi/jalostustoiminta/jalostusohjelmat/>

Fagerstedt, K., Linden, L., Santanen, A. & Väinölä, A. (2008). *Kasvioppi: Siemenestä satoon*. Helsinki: Edita Prima Oy

Halonen, L. & Lehtovaara, J. (1992). *Valaistustekniikka*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy

Hyövelä, M. Haastattelu 26.4.2018

Hyövelä, M. Kasvihuonekasvatuksen merkitys. Sähköpostiviesti tekijälle 20.4.2018.

Härmä, O. (n.d), Valon aallonpituudet. Haettu 13.3.2018

<https://peda.net/kouvola/perusopetus/koulut/myllykoskenyhteiskoulu/oppiaineet/fysiikka/markun-fysiikka2/markun-7-luokat/vka/valon-ominaisuuksia/va3>

Järvinen, M., Karjalainen, K., Vuollet, A. (2016). *Kasvihuoneviljely: Tuotantotekniikan perusteet*. Helsinki: Opetushallitus

Kaukoranta, T., Jokinen, K., Näkkilä, J. & Särkkä, L. (2017). *LED-valotusta kasvihuoneeseen: Tutkimustuloksia ja kokemuksia 2016*. Helsinki: Luonnonvarakeskus

Koivunen, T. (2003). *Tehokkaasti kasvihuoneessa*. 3. painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy

Ledvance (n.d), LED-lampun rakenne. Haettu 26.3.2018

<https://www.ledvance.fi/tuotteet/tuotetiedot/led-perustiedot/led-perustietoa/index.jsp>

Philips (n.d), HPS-lampun käyttöikä ja valotehon heikentyminen. Haettu 23.3.2018

http://www.lighting.philips.fi/prof/perinteiset-lamput-ja-loisteputket/kaasupurkauslamput-hid/hid-horticulture/horti/928158709227_EU/product#

Philips (n.d), HPS-lampun valon spektri. Haettu 23.3.2018

http://www.lighting.philips.fi/prof/perinteiset-lamput-ja-loisteputket/kaasupurkauslamput-hid/hid-horticulture/horti/928158709227_EU/product#

Rantanen, K. (2006). Palkitut ledit syntyvät sisulla ja tuurilla. *Tiede-lehti* 6/2006. Haettu 26.3.2018

https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/palkitut_ledit_syntyivat_sisulla_ja_tuurilla

Toivola, J. (2018). Helle Top LED. Sähköpostiviesti tekijälle 9.4.2018.

Kasvatuskoppien lämpötilat

