

Luonnonvarakeskus ja Helsingin yliopisto

Kvantamisteknologioista ratkaisuja kasvihuonetuotannon haasteisiin

Loppuraportti



Alexey Shapiguzov, Satu Engström, Tuomo Laine, Juha Näkkilä, Titta Kotilainen (Luonnonvarakeskus)
Sylvain Poque, Saijaliisa Kangasjärvi, Paula Elomaa, Kristiina Himanen (Helsingin yliopisto)

Sisällys

1.	Hankkeen lähtökohdista	3
1.2.	Kasvihuonetuotanto muuttuvien energiamarkkinoiden keskellä.....	3
1.2.	Fotosynteesin tutkiminen tuotantoympäristöissä	5
2.	Hankkeen tavoitteet	6
2.1.	Hankesuunnitelman neljä päätavoitetta.....	6
2.2.	Tavoitteiden tarkentaminen loppuvuodesta 2023	6
3.	Hankkeen toteuttajat ja yhteistyökumppanit	7
3.1.	Hankekumppanit ja roolit	7
3.2.	Teollisuus- ja asiantuntijayhteistyö	7
4.	Aineisto ja menetelmät HY NaPPI	7
4.1.	Kasvimateriaali ja yleiset kasvatusolosuhteet	7
4.2.	Koeolosuhteet.....	7
4.3.	Valotuskäsittelyt	8
4.4.	Kuvantaminen ja taimien fenotyyppitysdatan kerääminen	8
4.5.	Datan analysointi ja hallinta	9
5.	Tulokset HY NaPPI.....	9
5.1.	Kuvantamismenetelmien kehittäminen	9
5.2.	Sähkönhintaperusteisen valotuksen vaikutus	10
5.3.	Kaukopunaisen valon vaikutus	10
6.	Aineisto ja menetelmät Luke Piikkiö.....	11
6.1.	Sähkön hintaperusteinen valotuskäsittely ja kuvantaminen	11
6.2.	Kaukopunaisen valon käyttö kurkun ja tomaatin taimilla, HPS-LED vertailu ja kuvantaminen	12
7.	Tulokset Luke Piikkiö.....	13
8.	Mittauksia ja tuloksia tuotantokasvihuoneilta.....	14
8.1.	Fotosynteesin vuodenaikaisvaihtelut	14
8.2.	Fotosynteesin ja ilmarakojen toiminnan jatkuva seuranta	14
9.	Muut täydentävät tutkimukset.....	16
10.	Hankkeen tuottamia julkaisuja.....	16
10.1.	Pro gradu -tutkielmat ja harjoitteluraportit	16
10.2.	Tieteelliset julkaisut	16
10.3.	Muut julkaisut	17

10.4. Esitelmät, posterit ja työpajat	17
10.5. Datan ja raporttien jakaminen	17
11. Hankkeen tulosten merkittävyys ja sovellettavuus	17
11.1 Tulosten tieteellinen merkittävyys.....	17
11.2 Tulosten soveltaminen kasvihuonetuotannossa.....	18

1. Hankkeen lähtökohdista

1.2. Kasvihuonetuotanto muuttuvien energiamarkkinoiden keskellä

Kasvihuonevihannesten kotimaisuusaste kokonaiskulutuksesta on tomaattien osalta noin 60 %, kurkkujen ja lehtivihannesten osalta lähes 100 %. Ympäri vuotisen tuotannon luoma markkina-asema ja kuluttajien luottamus kotimaiseen tuotteeseen mahdollistavat merkittävän taloudellisen volyymin paikallisesti ja valtakunnallisesti.

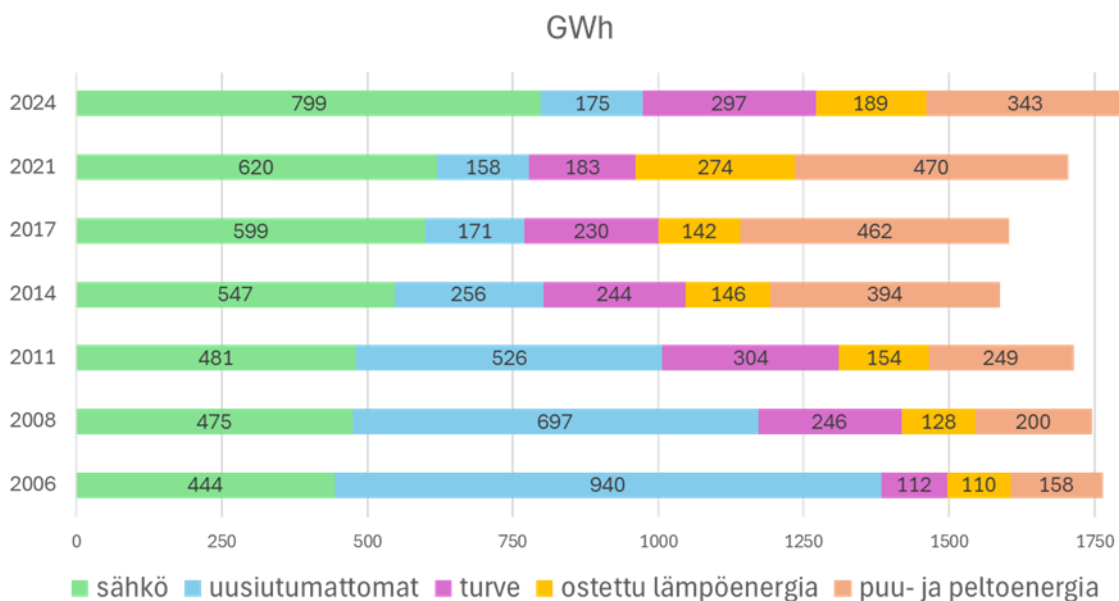
Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC) julkaisemien raporttien mukaan ilmastonmuutoksen hillitseminen ja Pariisin sopimuksen tavoitteiden saavuttaminen on mahdollista vain, jos maankäyttöön, elintarvikejärjestelmiin ja kulutustottumuksiin tehdään suuria muutoksia. Uudet kansalliset ravitsemussuosittuksetkin suosittelivat entistä kasvispainotteisempaa ruokavaliota, joka hyödyttää ihmisten ja ympäristön hyvinvointia. Kasviksia (vihanneksia, marjoja ja hedelmiä) tulisi käyttää päivittäin monipuolisesti vähintään 500–800 grammaa. Ruokajärjestelmän ja kulutustottumusten muuttaminen tarkoittaa, että vihannesten ja marjojen kulutus lisääntyy, joten niiden tuotantoedellytyksiin ja kannattavuuteen on kiinnitettävä huomiota ja tuotantoa on kehitettävä edelleen kestävämmäksi, dataohjautuvammaksi ja automatisoidummaksi.

Vaikka kasvihuonetuotannon hiilijalanjälki on lähes puolittunut kasvihuonetomaattien ja -kurkkujen osalta vuodesta 2004 lähtien biopolttoaineiden käytön ja uusiutuvan sähköntuotannon ansiosta, kokonaisenergiankulutus on kasvanut 8,8 % tomaattien osalta ja 115 % kurkkujen osalta lisävalotuksen käytön lisääntymisen vuoksi. Samaan aikaan satotasot ovat nousseet, tomaattien osalta 33 % ja kurkkujen osalta 134 %.

Vuonna 2021 kasvihuoneyritykset käyttivät 620 GWh (gigawattituntia) sähköä. Kasvua edelliseen tilastovuoteen 2017 verrattuna oli 20 GWh (+ 3,5 %). Vuonna 2024 sähköä käytettiin 799 GWh, eli edelliseen tilastovuoteen 2021 verrattuna kasvua oli jo 29 % (Kuva 1). Tätä selittää erityisesti sähkökattiloiden lisääntynyt käyttö kasvihuoneiden lämpöenergian tuotannossa.

Lämmityksen siirtyessä sähköisiin ratkaisuihin ja valotuksen siirtyessä HPS-valaisimista LED-valaisimiin sähkömarkkinoiden rooli kasvaa (<https://www.luke.fi/fi/tilastot/puutarhatilastot/puutarhatilastot-2024-kasvihuoneyritysten-energiankulutus>). LED-valaisimiin siirtyminen vaatii uusia kasvihuoneilmaston hallintaratkaisuja, mutta se tarjoaa myös uusia mahdollisuuksia valospektrin ja valaistusstrategioiden optimointiin.

Lokakuusta 2025 lähtien sähkön hinnat Nord Poolin päivänsisäisessä markkinassa on asetettu 15 minuutin välein, mikä on entisestään lisännyt optimaalisten energiankäyttöstrategioiden ajallista vaihtelua.



Kuva 1.

Kasvihuoneyritysten energiankulutus. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puutarhatilastot/puutarhatilastot-2024-kasvihuoneyritysten-energiankulutus>

Tässä hankkeessa lähestyttiin kasvihuonetuotannon kannattavuutta sekä energian kulutuksen että tuottavuuden kannalta tarkastelemalla erityisesti valotusolosuhteita. Oikein toteutettu kasvihuonevalotus sekä säästää energiaa että edistää kasvien kasvua ja sadon muodostusta.

Kesällä 2022 päättyneessä Luken toteuttamassa Digitomkku-hankkeessa kerättiin valotusdataa närpiöläisistä tomaattikasvihuoneista. Yhdessä kasvihuoneessa oli vielä vuonna 2020 suurpainenatrium-valaisimet (HPS) ja vuonna 2021 sinne vaihdettiin LED-valaisimet. Tästä kasvihuoneesta saadun datan perusteella havaittiin, että kasvien saama valon määrä ja laatu muuttuu huomattavasti eri vuodenaikoina riippuen käytettävissä olevista valaisimista. Valon määrä- ja laatuprofiililla on Suomen olosuhteissa suuri merkitys, sillä pimeimpään aikaan marras-tammikuussa kasvien saamasta valosta yli 90 % on tekovaloa.

Valaisinten toimittajat lupailevat säästöjä sähkönkulutuksessa, koska LED-valaisimet muuntavat sähköä valoksi tehokkaammin. LED-valaisimet tuottavat kuitenkin vähemmän lämpösäteilyä. Miten energiankäyttö valotuksen ja lämmityksen välillä muuttuu ja kuinka paljon energiaa säästyykään? Hollantilaisen Wageningenin yliopiston tutkijat (Katzin ym. 2021) tekivät kasvihuonemallinnusohjelma GreenLightin avulla simulaatioita eri puolille maailmaa (yhteensä 15 eri paikkakuntaa). Lähtöoletuksena HPS-valaisimien fotonitehokkuus oli 1,8 $\mu\text{mol/J}$ ja LED-valaisimien 3,0 $\mu\text{mol/J}$. Taulukossa 1 on esitetty mallinnustulokset Amsterdamista Hollannista sekä neljältä paikkakunnalta, jotka ovat jotakuinkin lähellä samoja leveyspiirejä meihin verrattuna (Helsinki 60.18°, Närpiö 62.47°, Rovaniemi 66.55°).

Taulukko 1. Muutokset energiankulutuksessa mallinnusten mukaan valotusmuodon vaihtuessa.

Paikkakunta	HPS energiapanos MJ/m ² /vuosi (%)		LED energiapanos MJ/m ² /vuosi (%)		Säästynyt energia MJ/m ² /vuosi (%)
	lämmitys	valotus	lämmitys	valotus	
Amsterdam, Hollanti (52.30°)	831 (36)	1459 (64)	1040 (54)	875 (46)	375 (16)
Pietari, Venäjä (59.97°)	1007 (40)	1524 (60)	1214 (57)	915 (43)	402 (16)
Anchorage, USA (61.22°)	923 (37)	1592 (63)	1147 (55)	955 (45)	413 (16)
Arkangeli, Venäjä (64.53°)	1381 (48)	1511 (52)	1567 (63)	907 (37)	418 (14)
Kiiruna, Ruotsi (67.82°)	1739 (51)	1656 (49)	1929 (66)	994 (34)	472 (14)

Kaikissa skenaarioissa LED-valotus siis vähensi valaistuksen, mutta lisäsi lämmityksen energiantarvetta. Mallinnetuissa tapauksissa energian kokonaissästö siirryttäessä LED-valaisimiin vaihteli 10-25 prosentin välillä, riippuen kuinka suuri osuus energiasta, 40-80 %, kulutettiin valotukseen ennen valotusmuodon vaihtoa. Valotustekniikan siirtymän kiireellisyyttä korostaa Euroopan komission jo helmikuun 2027 jälkeen voimaan astuva elohopeaa sisältävien HPS-valasinten käyttörajoitus (direktiivi 2022/275/EU).

Luonnonvarakeskuksen Digitomkku-hankkeessa (2022-2024) saatiin myös viitteitä siitä, että muissa maissa kehitetyt ja testatut LED-valojen aallonpituusprofiilit eivät välttämättä tuota parhaita tuloksia Suomessa. LED-valot, joiden spektri ei ole optimaalinen, eivät välttämättä tuota parasta mahdollista satotulosta. Valon laatu ja intensiteetti vaikuttavat voimakkaasti kasvien kehitykseen, stressinsietokykyyn, satoon ja hedelmien laatuun.

Wageningenin yliopiston tutkijat tekivät yhteistyössä LED-valaisimia kehittävän ja tuottavan Fluence Bioengineeringin kanssa 20 viikkoa (lokakuu 2019-maaliskuu 2020) kestäneen tomaattikokeen lajikkeilla 'Merlice' ja 'Brioso' ja neljällä eri valospektrillä (<https://doi.org/10.1080/14620316.2022.2147101>). Spektreissä punaisen valon osuus oli 38, 63, 81 tai 95 % ja tämän vaihtelun ohessa muuttui myös sinisen ja vihreän valon osuus. Sato per kWh kasvoi punaisen valon osuuden kasvaessa molemmilla lajikkeilla: LED-valaisimilla, joissa on suurempi osuus 660 nm punaista valoa tuottavia LED-diodeja, on suurempi ns. fotonitehokkuus $\mu\text{mol/J}$. Kummallakaan lajikkeella muutokset valon laadussa eivät vaikuttaneet varren pituuteen, lehtien pinta-alaan tai kuiva-aineen jakautumiseen. Mutta Merlice-lajikkeella punaisen osuuden kasvattaminen 38 prosentista 95 prosenttiin vähensi hedelmien satoa 13 %, kasvin kokonaiskuivapainoa 7,1 % ja hedelmien kuivapainoa 9,5 %. Brioso-lajikkeella vastaavia muutoksia ei havaittu. Tämä tulos on hyvä muistutus siitä, että valaisimia ja spektrejä ei voi suoraviivaisesti laittaa paremmuusjärjestykseen pelkän ilmoitetun fotonitehokkuuden perusteella, sillä sato ja sen laatu eivät välttämättä kulje käsi kädessä valaisinten fotonitehokkuuden kanssa.

1.2. Fotosynteesin tutkiminen tuotantoympäristöissä

Huolimatta valosta riippuvaisen fotosynteesin selkeästä ja todistetusta merkityksestä tuotannolle, kasvihuoneessa kasvatettujen tomaattien ja kurkkujen fotosynteesiä tunnetaan puutteellisesti.

Perustutkimus on tuottanut lukuisia uusia menetelmiä ja keinoja kasvien fotosynteesin mittaukseen. Mutta kasvien fotosynteesin ja fysiologian mittauksia ei juuri tehdä tuotantokasvihuoneissa, tai mittaukset ovat hyvin rajallisia. Yksi syy tähän on ollut kasvien monitoroimiseen sopivan teknologian soveltamisen puuttuminen käytännön olosuhteissa.

Fotosynteesilaitteisto ei myöskään ole ainoastaan kasvien energia-aineenvaihdunnan perusta, vaan se on myös keskeinen tekijä kasvien sopeutumisessa erilaisiin stressitekijöihin. Monet kasvipatogeenit, kuten virukset, bakteerit ja sienet, kohdistavat ”hyökkäyksensä” fotosynteesilaitteistoon (Serrano ym. 2016; Shapiguzov ym. 2012; Bhattacharyya ym. 2017). Näin ollen fotosynteesin tutkimustekniikoiden kehittäminen tarjoaa uusia keinoja myös kasvitautilien tutkimiseen.

Tässä hankkeessa sovelsimme kuvantamisteknologioita tutkiaksemme kasvien fotosynteesin toimintaa kasvihuonetuotanto-olosuhteissa. Käytimme kuvantamiseen perustuvia teknologioita, jotka mahdollistavat kasvien monipuolisen tarkastelun kasvilajista ja kehitysvaiheesta riippumatta.

2. Hankkeen tavoitteet

Alkuperäiset KuKa-hankkeen tavoitteet keskittyivät Suomen kasvihuonesektorin taloudellisten haasteiden ratkaisemiseen hyödyntämällä kuvantamisteknologioita valotuksen optimointiin.

2.1. Hankesuunnitelman neljä päätavoitetta

1. Valon käytön optimointi: Selvittää, miten erilaiset valospektrit ja -intensiteetit vaikuttavat kasvien kasvuun, satoon ja laatuun, ja määrittää ”energiaviisaat” protokollat, jotka vähentävät sähkönkulutusta tuottavuuden säilyessä.
2. Kuvantamisiagnostiikan kehittäminen: Hyödyntää teknologioita kuten klorofyllifluoresenssia, lämpökamerakuvantamista ja RGB-kameroita sekä luoda menetelmiä kasvien suorituskyvyn ja stressin reaaliaikaiseen mittaamiseen.
3. Datanhallinta: Luoda standardoidut FAIR-periaatteiden (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) mukaiset datanhallintakäytännöt ja avoimen tieteen alustat, jotka tukevat datan jakamista sidosryhmien kesken ja mahdollistavat tulevat tekoälymallinnukset ja IoT-sovellukset kasvihuoneissa.
4. Sidosryhmäviestintä: Varmistaa aktiivinen vuorovaikutus kasvihuonetuottajien kanssa mittauskampanjoiden, sidosryhmätapaamisten, ammattilehtijulkaisujen (esim. Puutarha & Kauppa -lehti) ja politiikkalähtöisen viestinnän kautta.

2.2. Tavoitteiden tarkentaminen loppuvuodesta 2023

Teimme pieniä tarkennuksia hankkeen tavoitteisiin Närpiön kasvihuonetuottajien kanssa käytyjen keskustelujen pohjalta. Sähkön hinnan vaihtelu nousi keskeisimmäksi huolenaiheeksi. Tämän vuoksi tutkimuksen painopistettä tarkennettiin kehittämään valaistusprotokollia – kuten jaetun yön aikatauluja ja portaittain muuttuvia valointensiteettejä – jotka perustuvat suoraan Nord Poolin sähkönhintadataan ja testaavat kasvien suorituskykyä, kun valotusta siirretään edullisille ajanjaksoille.

3. Hankkeen toteuttajat ja yhteistyökumppanit

3.1. Hankekumppanit ja roolit

Hanke toteutettiin tutkimuslaitosten, teknologiatoimittajien ja puutarhatuotantoalan yhteistyönä:

- Luonnonvarakeskus (Luke): Hankkeen koordinointi, kasvihuonekokeet Piikkiön tutkimusasemalla ja mittaukset tuotantokasvihuoneissa.
- Helsingin yliopisto (HY) / Kansallinen kasvien fenotyypausinfrastruktuuri (NaPPI): Kokeet tomaatin ja kurkun taimilla, FAIR-periaatteiden mukainen datanhallinta.
- Photon Systems Instruments (PSI): Suurten aineistojen fenotyypausalusta (PlantScreen-järjestelmät), yhteistyötä fluoresenssiprotokollien optimoinneissa.
- INRAE: Yhteistyö PHIS-tietokannan kehittämisessä ESFRI EMPHASIS -viitekehyksen puitteissa.
- SCADS (Esa Palmujoki): Tutkijoiden ja kaupallisten kasvihuoneiden välinen viestintä.

3.2. Teollisuus- ja asiantuntijayhteistyö

Hankkeen ohjausryhmään kuului edustajia maa- ja metsätalousministeriöstä, Kauppapuutarhaliitosta, ruotsinkielisestä tuottajajärjestöstä (ÖSP) sekä Basf Oy:sta. Yhteistyö kasvihuoneviljelijöiden kanssa oli tuloksellista ja hankkeen menetelmiä on testattu ja tuloksia on jo otettu käyttöön (Agrifutura Oy, Gulin Ab, Handelsträdgård Ab, Martin Sigg Ab, Siggarden Ab).

4. Aineisto ja menetelmät HY NaPPI

4.1. Kasvimateriaali ja yleiset kasvatusolosuhteet

Kaikissa NaPPI-kokeissa kasvatettiin kaupallisia F1-hybridi-siemeniä (*Solanum lycopersicum* 'Encore' ja *Cucumis sativus* 'Imea') kontrolloiduissa ympäristöolosuhteissa kasvatuskammioissa, joissa lämpötila, ilmankosteus ja valo-olosuhteet (valojakso ja valon laatu) säädettiin tarkasti. Lukessa edellä mainittuja kasvilajeja kasvatettiin avoimissa kasvihuoneolosuhteissa joko pimennysverhojen kanssa tai ilman, kokeen tavoitteista riippuen.

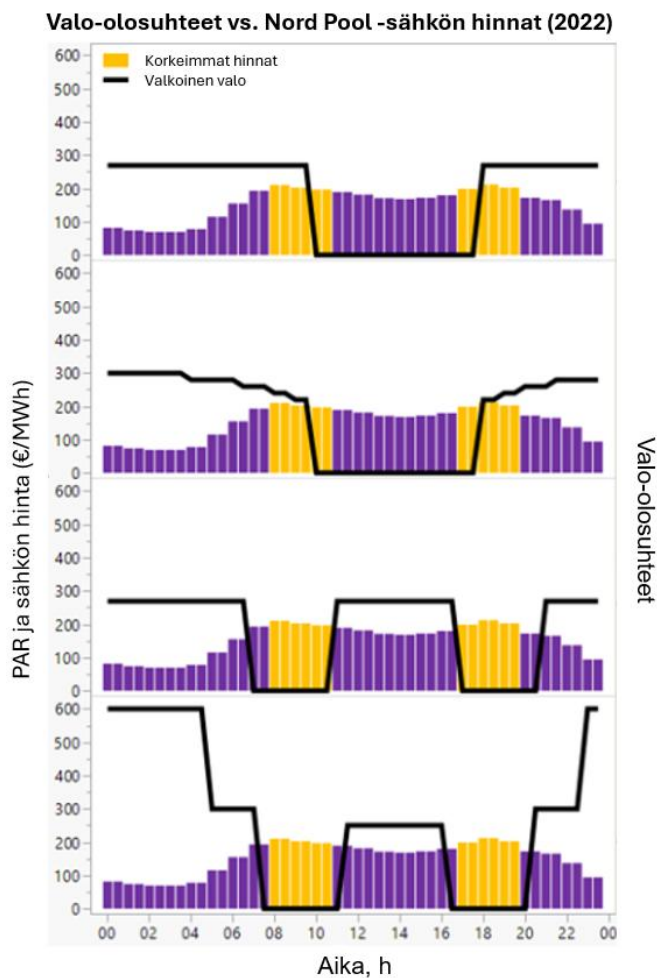
4.2. Koeolosuhteet

Taimivaiheen kokeet toteutettiin pääasiassa pienemmässä NaPPI PlantScreen™ Compact -järjestelmällä. Taimet kasvatettiin ensin kasvatuskammiossa, joissa on ohjelmoitavat LED-valaisimet, joilla voitiin toteuttaa tarkasti säädelyjä valokäsittelyjä. Joissakin kokeissa varhaisen vaiheen kuvantamisen jälkeen valikoituja kasveja siirrettiin isompaan NaPPI PlantScreen™ Modular -järjestelmään kasvihuoneeseen, mikä mahdollisti pitkäaikaisen seurannan tuotanto-olosuhteita muistuttavissa olosuhteissa.

Luke Piikkiön ja Närpiön tuotantokasvihuoneissa kuvantaminen tehtiin Mobile Plant Phenotyping Platform -järjestelmällä (Photon Systems Instruments, Drasov, Tšekki; SMO, Belgia) sekä PI-450-infrapunakameralla (Optris, Saksa). Yksikanavaiset klorofyllifluoresenssimittaukset suoritettiin käsikäyttöisellä FluorPen FP 100-MAX-D -laitteella (Photon Systems Instruments, Drasov, Tšekki).

4.3. Valotuskäsittelyt

Käytimme erilaisia valotusprotokollia tutkiaksemme, miten sähkönkulutukseen liittyviä kustannuksia voisi vähentää kasvien kasvua heikentämättä: tasainen rytmi (kontrolli), , portaittainen valotuksen lisäys ja lasku auringonnousun ja -laskun jäljittelemiseksi, kahteen osaan jaettu yö sähkön huippuhintojen välttämiseksi sekä päivittäisen valoannoksen (daily light integral, DLI) lisääminen (Kuva 2). Jokainen em. valotusohjelma testattiin myös lisätyn kaukovalopunaisten valon kanssa (noin 10 % valkoisen valon määrästä) kasvin morfologisten muutosten arvioimiseksi. Taimien kasvua ja fysiologisia vasteita seurattiin kuvantamisella (RGB-kamera, klorofyllifluoresenssi).



Kuva 2. Taimille sovelletut valaistusohjelmat suhteessa Nord Poolin keskimääräisiin vuorokausisähkönhintoihin (vuosi 2022). Pylväät esittävät sähkön hintaa, ja keltaiset pylväät kuvaavat ajanjaksoja, jolloin sähkön hinta oli keskimäärin korkeimmillaan. Musta viiva esittää valon intensiteettiä ajan suhteena. Paneelit (ylhäältä alas) näyttävät tasaisen vuorokausrytmin, portaittainen valotuksen, kahteen osaan jaettu yön valotuksen sekä valoannoksen lisäämisen ohjelmat. Kaukovalopunaista valoa lisättiin kaikkiin käsittelyihin erillisissä kokeissa.

4.4. Kuvantaminen ja taimien fenotyypitysdatan kerääminen

Kaikissa NaPPI-kokeissa fenotyypiset ominaisuudet tallennettiin RGB-kuvantamisella, joka tuotti standardoidut, ylhäältä päin otetut väri- ja morfologiamittaukset ja mahdollisti latvusalan kasvudynamiikan määrittämisen. Klorofyllifluorometriaa (PAM) käytettiin fotosynteesin suorituskyvyn kvantifointiin vakiintuneiden protokollien mukaisesti: 1)

Fluorescence Quenching (FCQ) kvanttituoton, ei-fotokemiallisen sammumisen ja fluoresenssin laskusuhteiden määrittämiseksi sekä 2) Light Curves (LC) elektroninsiirtokulkujen arvioimiseksi vaihtelevissa valon intensiteeteissä. Luken Mobile Plant Phenotyping Platform -alustalla tehtiin lisäksi RGB-, lämpö- ja klorofyllifluorometrinen (PAM ja OJIP) kuvantamista.

Kunkin kokeen lopussa tehtiin manuaalisia päätemittauksia, mukaan lukien näytteenotto tuore- ja kuivapainon määrittämiseksi sekä kokonaislehtialan mittaus lehtiala-analysaattoreilla.

4.5. Datan analysointi ja hallinta

NaPPI-kokeen kuvadata analysoitiin alustan integroiduilla analyysityökaluilla, kuten MorphoAnalyzerilla ja PlantScreen Data Analyzerilla (PSI, Tšekki), ja analyysiä täydennettiin omilla Python-skripteillä piirteiden erottelun tarkentamiseksi. Kaikkien aineistojen käsittelyssä noudatettiin FAIR-periaatteita.

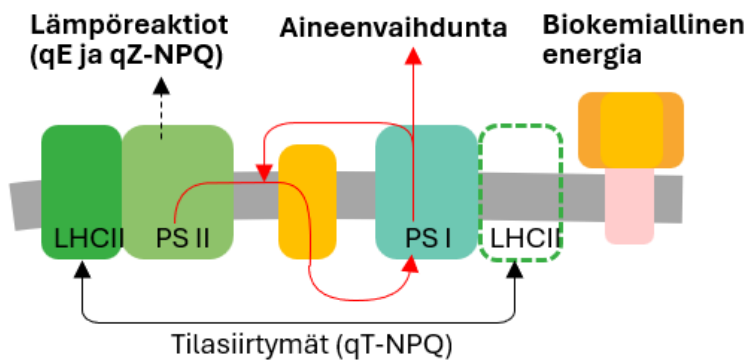
Ensimmäisessä vaiheessa tomaatin morfologiset aineistot tuotiin PHIS-järjestelmään omien Python-skriptien tukemana, jotka kehitettiin helpottamaan datan siirtoa ja muotoilua. Tavoitteena oli parantaa datan läpinäkyvyyttä, toistettavuutta ja pitkäaikaista hyödynnettävyyttä.

5. Tulokset HY NaPPI

5.1. Kuvantamismenetelmien kehittäminen

Vuosina 2024–2025 kehitimme useita uusia kuvantamisprotokollia, pääasiassa klorofyllifluorometrian pohjalta, fotosynteesin tutkimukseen. Yksi näistä protokollista, ns. State Transition Quenching Relaxation (STQR), mahdollistaa NPQ:n (ei-valokemiallinen sammuminen), tilasiirtymien, elektroninsiirtokulun ja muiden fotosynteettisten parametrien kvantifioinnin 30 minuutin kuvantamisprotokollassa (Kuva 3). STQR-protokollan soveltaminen sekä viljelykasveihin että mallikasvi Arabidopsikseen paljasti selviä vuorokausivaihteluita useimmissa mitatuissa parametreissa. Tämä havainto vahvistettiin raportointijakson aikana, ja se tulee vaikuttamaan tulevien fenotyypausprotokollien suunnitteluun.

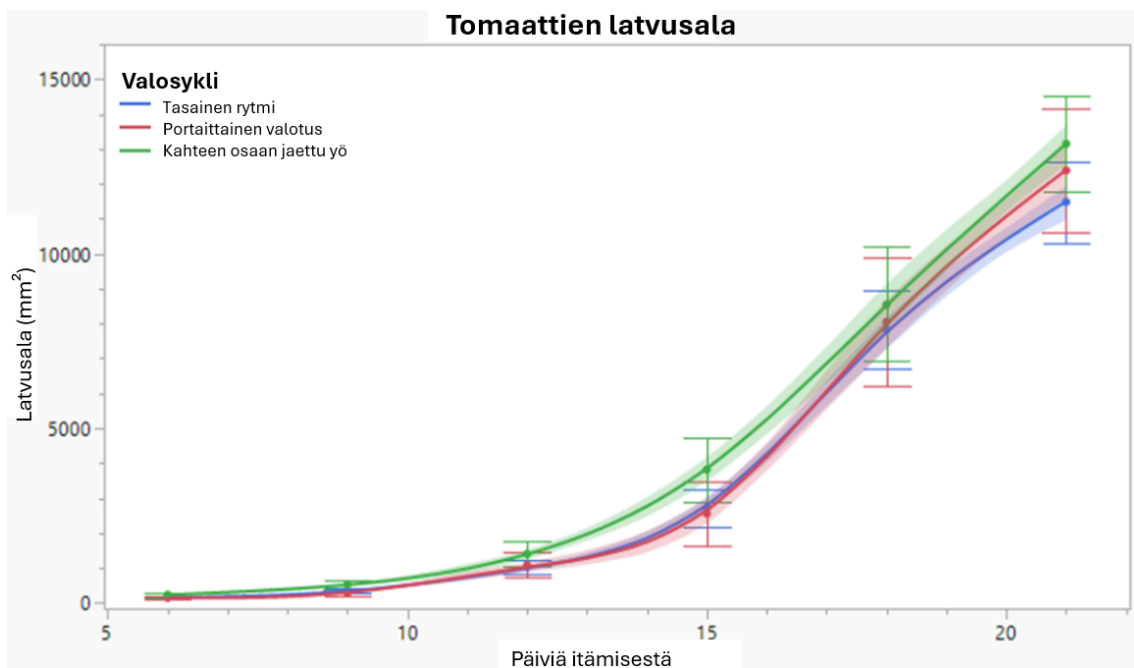
Merkittävä etu NaPPI-järjestelmässä on että siihen voidaan ohjelmoida automaattisia mittauksia, mikä mahdollistaa esimerkiksi seurannan kahden tunnin välein koko vuorokauden ajan. Tämä ei ole mahdollista Luken Mobile Plant Phenotyping Platform -järjestelmässä, jossa kasvimateriaali on vietävä kuvantamisasemalle manuaalisesti.



Kuva 3. Havainnekuva fotosynteettisen laitteiston monista säätelyprosesseista.

5.2. Sähköhintaperusteisen valotuksen vaikutus

Keskityimme energiatehokkaiden valaistusstrategioiden testaamiseen suomalaisia kasvihuonetuottajia varten. Tavoitteena oli vähentää sähkönkäyttökustannuksia samalla, kun tomaatti- ja kurkkukasvustojen kasvu säilytetään ennallaan tai sitä parannetaan. Kokeet osoittivat, että vaihtelevat valotusaikataulut, jotka ajoitettiin edullisempien sähköhintojen aikaan, eivät heikentäneet taimien kehitystä. Tulokset viittaavat siihen, että valotusta voidaan siirtää halvemmille tunneille ilman, että tuottavuus kärsii (Kuva 4).



Kuva 4. Tomaattitaimien latvusalan (mm^2) kehitys mitattuna ajan funktiona kolmessa valotuskäsittelyssä: tasainen rytmi (sininen), portaittainen valotus (punainen) ja kahteen osaan jaettu yö (vihreä). Viivat esittävät käsittelyjen keskimääräisen latvusalan, ja virhepalkit kuvaavat keskihajontaa.

5.3. Kaukopunaisen valon vaikutus

Kaukopunaisen (FR) valon lisääminen vaihtelevissa valotusrytmeissä edisti voimakkaasti tomaattitaimien kasvua. Kaukopunaisen lisääminen nopeutti kasvua merkittävästi, kasvattaen tomaattien latvusala noin 27 % ja biomassaa jopa 46 %. Valomäärän kasvattaminen korkealla valointensiteeteillä lisäsi myös kasvua, mutta hyödyt jäivät pienemmiksi ja vaativat huomattavasti enemmän energiaa kuin kaukopunaisen valon käyttö. Nämä tulokset osoittavat,

että kaukopunalisäys on kustannustehokkaampi kasvunedistämistästrategia kuin pelkkä kokonaisvalomäärän lisääminen.

Analyysit osoittivat, että kaukopunakäsittely vähensi ei-fotokemiallisen sammumisen (NPQ) dynamiikkaa, mikä viittaa sekä muutoksiin fotoprotektiivisessa säätelyssä että mahdollisesti parantuneeseen energiankäytön tehokkuuteen. Klorofyllifluoresenssianalyysit tukivat näitä havaintoja. Vaihtelevat valotusohjelmat, kuten kahteen osaan jaettu yö, ylläpitivät korkeaa fotosynteesitehokkuutta ja tuottivat matalampia NPQ-arvoja kuin kontrollikäsittely, mikä viittaa vähäisempään riippuvuuteen lämpöön perustuvasta fotoprotektiosta. Kaukopunalisäyksen vaikutukset puolestaan viittasivat kasvien tehokkaampaan valon hyödyntämiseen ja parempaan valostressin hallintaan.

6. Aineisto ja menetelmät Luke Piikkiö

6.1. Sähkön hintaperusteinen valotuskäsittely ja kuvantaminen

Edellä kuvattujen Helsingin yliopiston tiloissa Viikissä tehtyjen kokeiden lisäksi ja vaihtelevan valotusrytmin ja kaukopunaisen valon vaikutuksia tutkittiin kasvihuoneolosuhteissa Luken tutkimusasemalla Piikkiössä. Ensimmäinen koe, joka toteutettiin joulukuussa 2023, keskittyi hintaperusteiseen valotukseen kurkulla. Vertasimme kahta valotusrytmiä (Taulukko 2).

Taulukko 2. Jatkuva ja hintaperusteinen valotusrytmi kurkkukokeessa Piikkiössä.

Valotuskäsittely	Valotuksen alku klo	Valotuksen loppu klo	Valotuksen kesto tunteina	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	Valosumma (DLI)
Jatkuva	22:00	18:00	20	357	25,7
Hintaperusteinen	23:00	05:00	6	485	10,5
	05:00	08:00	3	357	3,9
	08:00	10:00	2	0	0
	10:00	13:00	3	255	2,8
	13:00	15:00	2	281	2
	15:00	18:00	3	255	2,8
	18:00	20:00	2	0	0
	20:00	23:00	3	357	3,9
					yht. 25,7

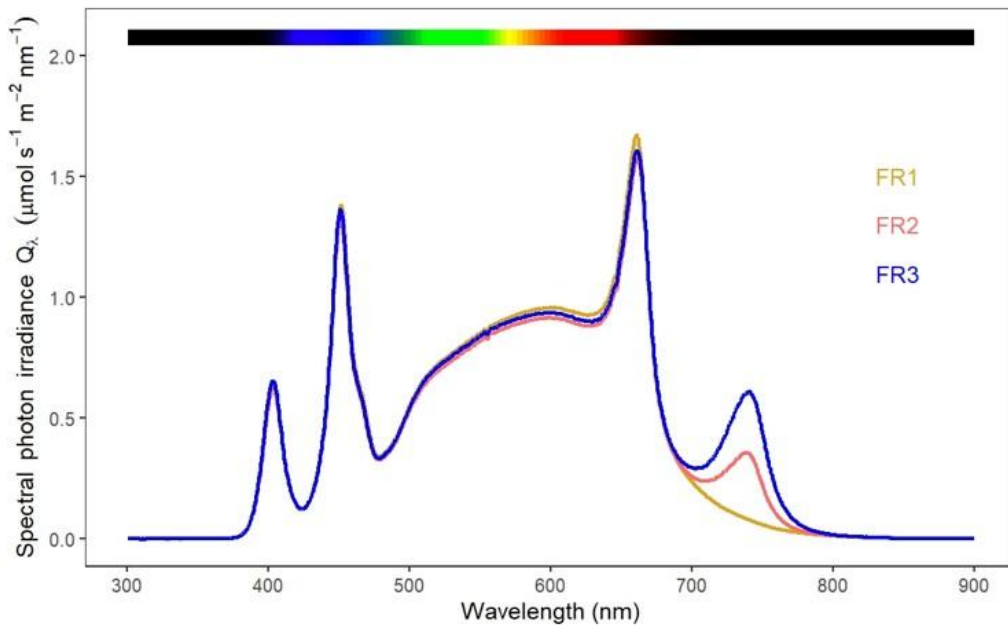
Toteutimme kurkkujen kasvatuksen vaakasuuntaisena, mikä mahdollisti eri-ikäisten lehtien kuvantamisen Luken Mobile Plant Phenotyping Platform -järjestelmän avulla sekä sivusuunnassa että ylhäältä alaspäin (Kuva 5).



Kuva 5. Vasemmanpuoleisessa kuvassa näkyy Luken Mobile Plant Phenotyping Platform -järjestelmän käyttö kurkkukasvin kuvantamisessa sivusuunnasta. Oikeanpuoleisessa kuvassa laitetta ollaan siirtämässä kurkkukasvin ylitse, kuvantaminen tehtiin siis ylhäältä alaspäin.

6.2. Kaukopunaisen valon käyttö kurkun ja tomaatin taimilla, HPS-LED vertailu ja kuvantaminen

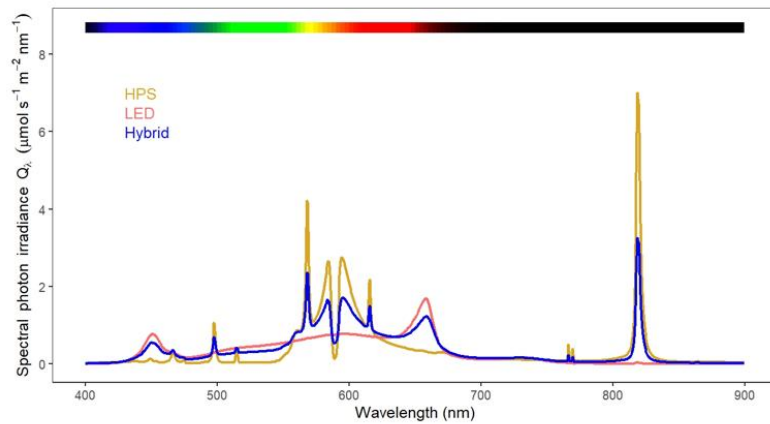
Lokakuussa 2024 tutkimme kolmen eri kaukopunatason (Kuva 6) vaikutusta kurkkujen taimikasvatuskokeessa. Vastaava koe toteutettiin tomaatintaimilla joulukuussa 2024. Kuvantamisessa käytimme em. STQR-protokollaa.



Kuva 6. Kolme valokäsittelyä, joissa oli muuten samanlainen spektri, mutta kaukopunaisen määrä vaihteli. Kaukopunaista oli kokonaissäteilymäärästä (350-900 nm) 3,3 % (FR1); 7,3 % (FR2); 10,9 % (FR3).

Toisessa kokeessa, joka tehtiin lokakuussa 2024, vertailtiin LED-, hybridi- (LED + HPS) ja HPS-valotusta kurkkutaimilla (Kuva 7). Valomäärä oli kaikissa käsittelyissä sama. Mittauksiin

sisältyivät STQR-kuvantaminen sekä OJIP-fluoresenssiparametrit, jotka mitattiin sekä aamulla että illalla.



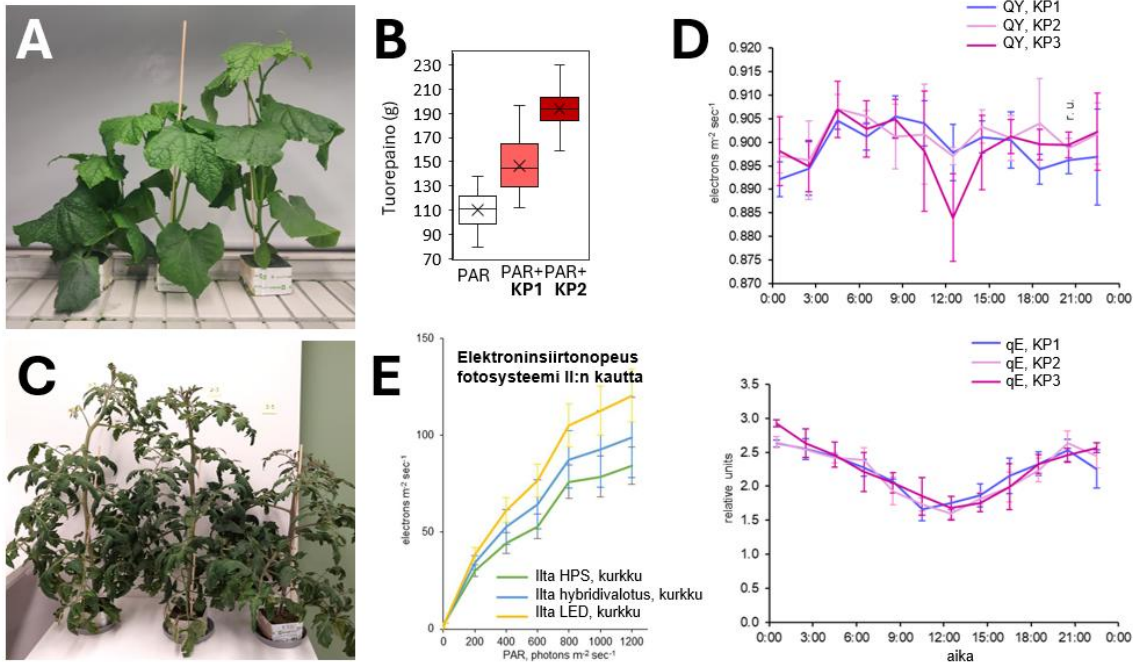
Kuva 7. Vasemmanpuoleisessa kuvassa tomaatintaimia HPS-LED hybridivalotetussa osastossa. Oikeanpuoleisessa kuvassa näkyvät HPS, LED ja hybridivalotuksen spektrit.

7. Tulokset Luke Piikkiö

Kurkun satokokeessa poikkeamia fotosynteesiparametreissa havaittiin ainoastaan kaikkein nuorimmissa lehdistä hintaperusteisen valotuksen aikana ja erot hävisivät lehtien vanhetessa. Kasvussa, sadontuotossa tai hedelmien laadussa ei havaittu eroja.

Tulokset kaukopunaisen valon vaikutuksista kurkun taimilla: Kaukopunaisen valon osuuden kasvaessa kurkuntaimien kasvu lisääntyi. Enemmän kaukopunaista saaneet kasvit olivat pidempiä, niillä oli pidemmät nivelvälit ja ne kehittivät suuremman lehtialan (Kuva 8A,B). Tomaatintaimien kasvuvasteet olivat jonkin verran pienempiä kurkuntaimiin verrattuna, mutta silti selvästi havaittavissa (Kuva 8C). Toukokuussa 2025 tehdyssä lisäkokeessa arvioimme, muuttaako kaukopunavalo fotosynteesin vuorokausidynamiikkaa kurkkutaimissa ja lituruohomallikasveissa. Kaukopunaisella valolla ei havaittu vaikutuksia vuorokausidynamiikkaan (Kuva 8D). Tämä viittaa siihen, että kaukopunaisen valon kasvua edistävät vaikutukset eivät liity fotosynteesiin, vaan muutoksiin kasvin morfologiassa, jotka liittyvät fotoreseptoreiden kautta välittyviin muutoksiin säteilyn laadussa.

HPS-LED-hybridivalotuskokeessa havaittiin selviä eroja sekä kurkuntaimien kasvussa että fotosynteesissä suorituskyvyssä havaittiin eri valonlähteiden välillä. Tomaatin taimilla tehty vastaava koe vahvisti samat trendit (Kuva 8E). Näin ollen valotusmuotojen todettiin vaikuttavan fotosynteesiin toimintoihin.



Kuva 8. Eri valotusstrategioiden vaikutukset kurkun ja tomaatin taimien kasvuun ja fotosynteesiin. Kaukopunainen vaikuttaa merkittävästi kurkuntaimien kasvuun (A, B), ja myös tomaatin taimiin, mutta vähemmän kurkkuun verrattuna (C). Emme havainneet kaukopunalisävalon vaikutuksia fotosynteesisten toimintojen vuorokaudenaikaseen vaihteluun kurkulla (D), kun taas HPS-, LED- tai hybridivalotus vaikutti fotosynteesin toimintaan (E).

8. Mittauksia ja tuloksia tuotantokasvihuoneilta

8.1. Fotosynteesin vuodenaikaisvaihtelut

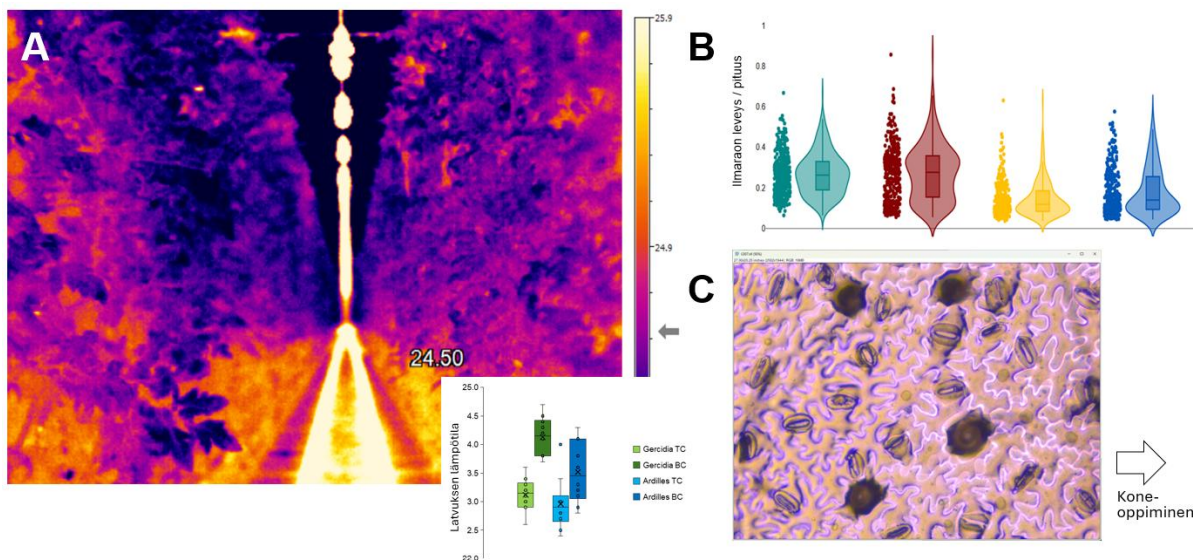
Edellä esitetyt tulokset osoittivat, miten valon määrä ja laatu voivat vaikuttaa fotosynteesiin. Tuotantokasvihuoneissa olosuhteet vaihtelevat vuodenaikojen mukaan, joten toteutimme mittauskampanjoita tuotantokasvihuoneissa vuosina 2023–2025. Havaitsimme selviä vuodenaikaisvaihteluita, fotosynteesin tehokkuus oli korkeimmillaan huhtikuussa, matalampi lokakuussa ja voimakkaasti heikentynyt joulukuussa. Tämä vaihtelu vastasi läheisesti luonnonvalon määrän kausittaista vaihtelua. Huomionarvoista on, että talviaikainen heikentyminen oli voimakkainta täysin LED-valaistuisissa kasvihuoneissa.

Parhailaan tutkimme tämän ”fotosynteesin talvimasennuksen” molekulaarista perustaa yhteistyössä Turun yliopiston ja Hämeen ammattikorkeakoulun Lepaan yksikön kanssa. Oletamme, että tämän ilmiön taustalla olevien fysiologisten ja molekyyli-tason mekanismien ymmärtäminen mahdollistaa valotusprotokollien kehittämistä edelleen, jotta kasvit yhteyttäisivät tehokkaammin myös talvikuukausina. Ensimmäisten tulosten odotetaan valmistuvan kesällä 2026.

8.2 Fotosynteesin ja ilmarakojen toiminnan jatkuva seuranta

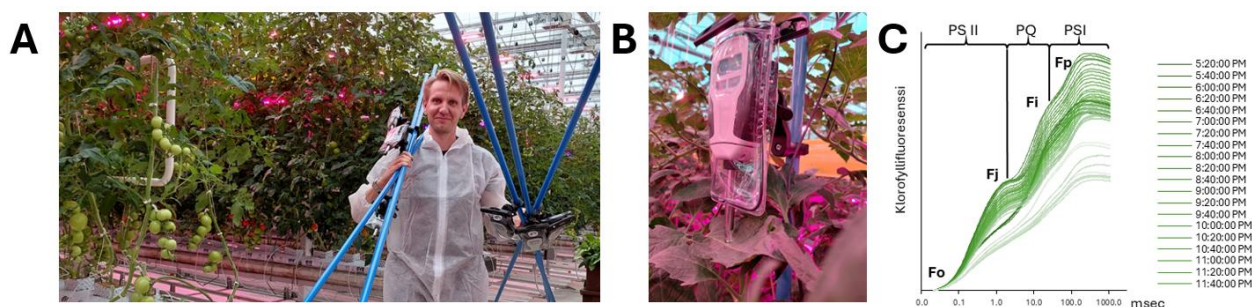
Kasvihuonetuottajat etsivät yhä enemmän uusia työkaluja kasvien suorituskyvyn ja stressin seurantaan vaihtelevissa olosuhteissa. KuKa-hankkeessa hyödynsimme

kuvantamismenetelmiä kasvien vasteiden mittaamiseksi. Ilmarakojen toimintaa arvioitiin lämpökuvantamisen sekä ilmarakojäljennösten mikroskooppianalyysin avulla (Kuva 9). Nämä menetelmät mahdollistivat kasvuston lämpötilagradienttien ja ilmarakojen avautumisen seurannan. Jatkossa tavoitteenamme on näiden kokemusten ja tulosten perusteella kehittää nopeampia ja automatisoidumpaa kuvantamisanalyysiketjuja, mukaan lukien koneoppimiseen perustuvat lähestymistavat.



Kuva 9. Ilmarakojen kuvantaminen tomaatilla tuotantokasvihuoneessa. (A) Lämpökuvantaminen mahdollistaa ilmarakojen toiminnan ja kasvuston lämpötilagradienttien mittaamisen. (B, C) Ilmarakojäljennösten mikroskooppikuvantaminen mahdollistaa ilmarakojen avautumisen arvioinnin.

Reaaliaikaisia mittauksia varten kehitimme valoadaptoituun tilaan perustuvan, valopulssilla indusoitua klorofyllifluorometriaa. Tämä menetelmä mahdollistaa fotosynteesikoneiston nopean (1–3 s) fysiologisen “sormenjäljen” määrittämisen. Yhteistyössä HAMK Lepaan kanssa toteutimme lokakuussa ja joulukuussa 2025 kahden viikon yhtäjaksoiset fotosynteesin seurannat heidän tomaattikasvihuoneellaan (Kuva 10). Menetelmän avulla erotetaan ja analysoidaan kymmeniä fysiologisia parametreja, ja koneoppimiseen perustuvia lähestymistapoja käytetään tunnistamaan yhteyksiä ilmastodatan kanssa. Alustavat tulokset ovat lupaavia ja viittaavat siihen, että menetelmä voisi tulevaisuudessa tukea kasvien vasteisiin perustuvaa kasvihuoneilmaston ja valotuksen säätöä älykkäissä kasvihuonejärjestelmissä.



Kuva 10. Fotosynteesin jatkuvatoiminen seuranta tuotantokasvihuoneessa valoadaptoituun tilaan perustuvilla valopulssifluorometreillä. Laitteet asennettiin tomaatin latvuston yläosaan (A, B). Kuvassa esitetään niillä saadut klorofyllifluoresenssi profiilit (C).

9. Muut täydentävät tutkimukset

Yhteistyössä Helsingin yliopiston Puu- ja metsäbiologian huippuyksikön kanssa sovelsimme translationaalisen tutkimuksen lähestymistapaa kaukopunaiseen valoon liittyvien kasvureaktioiden molekyylitason ymmärtämiseksi. Tutkimme kaukopunaisen säteilyn vaikutuksia eri *Arabidopsis thaliana* -mutanttilinjoilla, joista puuttui tiettyjä fotosynteettisiä toimintoja, fotoreseptoreita tai tärkkelysmetabolian komponentteja, ja vertasimme näitä vasteita viljelykasveilla havaittuihin reaktioihin.

Vuonna 2025 tärkkelysmetabolian mutanttilinjat fenotypoiitiin NaPPI-järjestelmässä 12 h valo / 12 h pimeä -rytmissä. Kasvukäyriä seurattiin koko kokeen ajan ja kasveja kuvannettiin kokeen loppuvaiheessa neljän päivän ajan jatkuvatoimisesti STQR-protokollalla. Näiden kokeiden tuottamat aineistot ovat parhaillaan analysoitavana, ja niiden odotetaan tuovan lisätietoa yhteyksistä hiilihydraattimetabolian, energiatasapainon ja kaukopunaiseen valoon liittyvään kasvun säätelyn välillä.

10. Hankkeen tuottamia julkaisuja

KuKa-hankkeessa tehty tutkimus on tuottanut useita akateemisia opinnäytetöitä, tieteellisiä artikkeleita ja ammattijulkaisuja, jotka on suunnattu sekä tiedeyhteisölle että kasvihuonetuottajille.

10.1. Pro gradu -tutkielmat ja harjoitteluraportit

- Fischer, A. (2024): *The effects of fluctuating light, far-red radiation, and increased Daily Light Integral on Solanum lycopersicum 'Encore'*. Master's thesis, University of Helsinki.
- Ud Din, G. N. (2025): *Analysis of Tomato Seedling Growth and Physiology Under Fluctuating Light Conditions Using Chlorophyll Fluorometry*. Master's thesis, University of Helsinki / University of Padova.
- Ud Din, G. N. (2024): *Internship Report: High-throughput phenotyping of tomato plants under various light regimes*. University of Helsinki.
- Weiss, J. (2023): *Collecting phenotypic data of cucumber plants grown in a split night*. Internship report, University of Helsinki.
- Shahid, I. (2025): *Visible Light Imaging and Chlorophyll Fluorometry-Based Analysis of Growth and Physiology in Cucumber Seedlings and Arabidopsis Starch Mutants* Master's thesis, University of Helsinki / University of Padova.
- Dijksterhuis, Y. (2025): *Investigation of the Effect of Supplemental Far-Red Light on Dynamics of Light Reactions of Photosynthesis using High Throughput Chlorophyll Fluorometry*. Master's thesis, University of Helsinki / Wageningen University & Research, Netherlands.

10.2. Tieteelliset julkaisut

- Engström, S., et al.: KuKa-hankkeen keskeiset tulokset kokoava tieteellinen artikkeli on parhaillaan valmisteilla.
- Fischer, A., et al., (lähetetty julkaistavaksi Physiologia Plantarum -sarjaan): "The effects of long-term far-red light application on tomato shoot and fruit growth, morphology, and photosynthetic capacity". Katsausartikkeli, joka kokoaa yhteen kaukopunavalolla käsitellyillä tomaateilla tehtyjen tutkimusten tulokset.
- Fischer, A., et al., (valmisteilla): *The effects of fluctuating light, far-red radiation, and increased Daily Light Integral on Solanum lycopersicum 'Encore' growth and physiology*.

- Mäkinen, A., et al. (2024): An article detailing light treatments based on electricity price fluctuations for lettuce and kale was published in *Physiologia Plantarum* (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ppl.70405>).

10.3. Muut julkaisut

- Kotilainen ym. 2025. Kuvantamistekniikoilla tietoa yhteyttämisestä. *Puutarha & Kauppa* (7/2025).
- Em. vastaavia julkaisuja suunniteltu julkaistavaksi *Puutarha & Kauppa* sekä *Trädgårdsnytt*-lehdissä vuoden 2026 aikana.

10.4. Esitelmät, posterit ja työpajat

- Hanketta ja sen tutkimusmenetelmiä esiteltiin Luken kahden tutkijan toimesta International Society for Horticultural Science yhdistyksen GreenSys2025 – International Symposium on Advanced Technologies and Management for Sustainable Greenhouse Systems” Almeriassa Espanjassa kesäkuussa 2025 järjestetyn konferenssin posterisessiossa. (Matkojen rahoitus muista hankkeista.)
- Hanketta ja sen kasvibiologiaan liittyviä tutkimusmenetelmiä ja ensimmäisiä tuloksia esiteltiin Luken tutkijan toimesta ”Plants and algae in the frequency domain” työpajassa Český Krumlovissa Tsekeissä elokuussa 2025. Työpaja oli osa EU-rahoitteista ” Dynamic regulation of photosynthesis in light-acclimated organisms - DREAM” -hanketta. Tästä työpajasta saatiin paljon hyödyllistä palautetta ja uusia ideoita kasvien vasteiden mittaumenetelmiin liittyen. (Matkan rahoitus muista hankkeista.)
- Luken kaksi tutkijaa vierailivat Yhdysvalloissa 15.-22.11.2025. Vierailukohteina olivat Ohio State University (Columbus, Ohio), NC State University (Raleigh, Pohjois-Carolina) ja CEAg World conference (Durham, Pohjois-Carolina). (Matkojen rahoitus muista hankkeista.)
- Anna Fischer, posterisitys, Finnish Plant Science Days toukokuussa 2025 ja Maatoustieteen päivillä tammikuussa 2026.
- Kaksipäiväinen fenomiikkadatan hallintaa (PHIS) käsittelevä työpaja järjestettiin vuonna 2023, ja sen tallenteet julkaistiin avoimesti NaPPI-verkkosivustolla.

10.5. Datan ja raporttien jakaminen

Makera-rahoituksen vaatimusten mukaisesti loppuraportti ja kaikki keskeiset projektijulkaisut toimitetaan rahoituspäätöksessä määritellyille tahoille. Lisäksi digitaalisen datanhallinnan toimet ovat käynnissä, jotta Kuka-hankkeen RGB- ja fysiologiset aineistot saadaan muiden käyttäjien saataville avoimen PHIS-tietokannan (Phenomics Information System) kautta.

11. Hankkeen tulosten merkittävyys ja sovellettavuus

11.1 Tulosten tieteellinen merkittävyys

KuKa-hankkeen tutkimukset tarjoavat selkeää tieteellistä lisäarvoa ja uutta genotyyppikohtaista tietoa suomalaisessa tuotannossa käytetyistä lajikkeista ja osoittaa vaihtelevien valojaksojen, kaukopunaisen valon ja valosumman yhteisvaikutukset. Menetelmälliset edistysaskeleet, erityisesti STQR-klorofyllifluoresenssiprotokollan käyttöönotto, tarjoavat paremman ajallisen resoluution fotosynteesidynamiikan tutkimiseen. Tulokset tukevat myös käynnissä olevia kansainvälisiä keskusteluja valonkäytön tehokkuudesta ja PAR-määritelmän (400-700 nm) mahdollisesta laajentamisesta 750 nm asti.

Tulokset ovat merkityksellisiä myös muualla, erityisesti lisävalotuksesta riippuvaisilla pohjoisilla alueilla. NaPPI:n FAIR-yhteensopiva tietojen julkaiseminen PHIS-järjestelmän

kautta parantaa kansainvälisten tietojen saatavuutta ja on jo vaikuttanut ulkoisiin fenotyypaushankkeisiin. Yhteistyö eurooppalaisten verkostojen (esim. EGI-ACE, NordPlant, NordForsk Upscale) kanssa johti siihen, että muut maat, kuten Norjan PheNO-verkosto, ottivat käyttöön NaPPI:n tietokehykset.

Hanke on tukenut myös useita akateemisia opinnäytetöitä. Tulevaisuudessa tutkimuksessa tulisi priorisoida pitkäaikaisten valovasteiden mekanistiset tutkimukset, optimoidut ja edullisemmat valotuksen sovellusstrategiat, sekä edistyneiden kuvantamismenetelmien tutkiminen stressin ja patogeenien varhaiseen havaitsemisessa.

11.2 Tulosten soveltaminen kasvihuonetuotannossa

KuKa-hankkeen tulokset tarjoavat suoraan hyödynnettävää tietoa suomalaisen kasvihuonetuotannon käyttöön. Vaihtelevat valotusaikataulut, jotka on ajoitettu edullisemman sähkön hinnan ajankohdille, eivät vaikuttaneet negatiivisesti tomaatin ja kurkuntaimien kasvuun. Myös kaukopunavalon lisäys osoittautui erittäin tehokkaaksi menetelmäksi taimien varhaisen kehityksen nopeuttamiseen, tarjoten kustannustehokkaan vaihtoehdon tavanomaisen valon intensiteetin kasvattamiselle. Luken yhteistyö kaupallisten viljelijöiden kanssa osoittaa, että projektin tuloksia hyödynnetään jo käytännössä. Kehitetyt mittausmenetelmät ja -protokollat ovat olleet pohjana ja niiden kehittämistä jatketaan Business Finlandin rahoittamassa (2025-2027) ”Kasvihuonetuotanto ja joustavat energiajärjestelmät” -hankkeessa, jota Luke toteuttaa VTT:n kanssa.

Viljelykäytäntöjen lisäksi hankkeen tulokset tarjoavat laajempia mahdollisuuksia innovaatioille ja alan kehitykselle. Uudet kuvantamis- ja stressinhavaitsemismenetelmät luovat pohjaa tuleville täsmäviljelyn tuotteille ja digitaalisille palveluille.

Tulevaisuudessa odotetaan, että sovellukset laajenevat myös tekoälypohjaiseen satoennustamiseen, IoT-pohjaiseen kasvihuoneiden hallintaan sekä tautien varhaiseen havaitsemiseen. Näin ollen projektin vaikutukset hyödyttävät tuottajia, kuluttajia, tutkijoita ja päätöksentekijöitä sekä tukevat energiatehokkaan kasvihuonetuotannon kehittämistä Suomessa.