



Jaakko Arra

Valaistus- ja sähkötekhninen investointiselvitys kasvihuoneviljelyyn

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

5.6.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Jaakko Arra
Otsikko:	Valaistus- ja sähkötekniinen investointiselvitys kasvihuoneviljelyyn
Sivumäärä:	138 sivua + 7 liitettä
Aika:	5.6.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat:	Ohjaava opettaja Tapio Kallasjoki Tekstinohjaus Pasi Lankinen

Insinöörityön tavoitteena oli vertailla eri valaistusteknisiä investointiratkaisuja Kauppapuutarha Verso Oy:n noin 3 100 neliömetrin viljelykäytössä oleviin kasvihuonetiloihin, joista lähes puoliin on tarkoitus uusia kasvatusvalaistus ja käyttää niitä jatkossa pääasiassa lehtisalaatin viljelemiseen. Eri tarjousvaihtoehtojen vertailussa käytettiin Motivan Valtti-laskuria elinkaarikustannusten selvittämiseen.

Valaisintoimittaja Schetelig Oy:ltä on saatu kaksi eri valaisinmäärän sisältävää tarjousvaihtoehtoa. Työssä selvitettiin elinkaarikustannusten lisäksi muun muassa tarjousten valaisimista saatavan fotosynteesiaktiivisen fotonivuon riittävyttä ja spektrijakauman soveltuvuutta kasvinviljelyyn, sekä kerättiin tietoa näiden vaikutuksista fotosynteesiin. Molemmat tarjoukset ovat yhdistelmävalaistusratkaisuja eli ne sisältävät sekä LED- että suurpainenatrium (HPS) valaisimia.

Joidenkin jäljelle jäävien valaisinten lähettämästä valon määrästä on otettu yleistämiskelpoisia mittauksia PAR-mittarilla (Fotosynteesiaktiivinen säteily), jotta niidenkin uusimistarpeesta saadaan tietoa. Lisäksi työssä on pohdittu pää- ja ryhmäkeskusten suojausta, ryhmäjohtojen riittävyttä ja sähköliittymän kapasiteettia, sekä investoinnin hintaa alku- ja energiakustannusten osalta. Kasvien suhtautuminen valoon on keskeinen tekijä kasvihuonevalaistuksen onnistumisen kannalta ja julkaisussa käsitellään myös kasveihin ja kasvinviljelyyn sekä valoon liittyvää tietoa. Koska kyseessä on sähkö- ja automaatiotekniikan opinnäytetyö ja Kauppapuutarha Verso Oy:n kasvihuonetilojen lähes täysautomaattinen toiminta edustaa alan huippua, kerrotaan raportissa jonkin verran myös niiden toiminnasta.

Työssä tarkoituksena ja työtehtävänä on sekä selvittää odotettavissa olevia elinkaari- ja investointikustannuksia että aiotun valaistuksen soveltuvuutta käyttötarkoitukseensa. Valtti-laskurin avulla selviää työssä paljon odotettavissa olevista energiakustannuksista, lisäksi myös työn sähköasennuksiin ja kasvinviljelyyn liittyvät tutkimukset helpottavat investoinnin toteuttamiskelpoisuuden ja lopputuloksen arvioinnissa.

Avainsanat: Kasvihuonevalaistus, sähkö- ja automaatiotekniikka, valaistuksen elinkaarikustannuslaskenta, fotosynteesi, kasvihuoneviljely, yhdistyvä väriensekoittuminen

Abstract

Author: Jaakko Arra
Title: Investment assessment for greenhouse lighting and appliances
Number of Pages: 138 pages + 7 appendices
Date: 5 June 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and automation engineering
Professional Major: Power electrics
Instructors: Tapio Kallasjoki, Directing teacher
Pasi Lankinen, Language maintenance

The subject of the thesis was to compare different investment possibilities for greenhouse lighting. The purpose was for the upcoming growlight renovation of Kauppapuutarha Verso Oy, which is planning to replace the growlights for nearly half of the 3 100 m² growing spaces in their greenhouse facility. The spaces will proposedly mainly be used for the cultivation of different kinds of lettuce and leaf vegetables. Differing offers have been received from a lighting supplier Schtelig Oy. The previous and expected life cycle costs have been calculated for ten years using the publicly available Motiva Valtti-calculator, which provides a standardized directivized method for determining possible lighting expenditures.

Both the offers are a combination of similar HPS- and LED-lights, but the quantity of luminaires included is different. Along with calculating the costs and revising plant response to light stimulus, measurements of the remaining HPS-lighting in the facility were also conducted using a PAR-sensor (Photosynthetically active radiation) to determine their effectiveness and the photosynthetic photon flux density attained by the plants.

Also the need for replacing existing overload- and short-circuit protection and the wiring in the facility were revised in a preliminary manner to determine some of the possible costs. Because the greenhouse automation system at Kauppapuutarha Verso Oy:s growing facilities is top grade, some of its performance and operations were also reviewed. The mentioned studies have been documented and are presented here.

In addition studies about the function of the proposed HPS- and LED-lighting as well as of photosynthesis and phytology were made. Some recent and groundbreaking scientific research and findings were uncovered about the way plants interact with light. The research and calculations conducted present a clear view regarding different aspects of the investment.

Keywords: Photosynthesis, Electrical- and automation engineering, Greenhouse lighting, Life cycle costing

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	11
2	Taustatietoja Kauppapuutarha Verso Oy:stä ja Vehmaan Versosta	12
3	Yleisiä valaistustekniikkaan liittyviä käsitteitä	15
3.1	Valo	15
3.2	Valotehofunktio $V(\lambda)$, ihmisen silmän suhteellinen herkkyys	17
3.2.1	Valovoima I	18
3.2.2	Valovirta Φ	19
3.2.3	Valaistusvoimakkuus E	19
3.2.4	Valotehokkuus	20
3.3	Additiivinen väriensekoittuminen	20
3.4	Väriämpötila $T_c(K)$	22
3.5	Yleinen värinistöindeksi R_a	22
3.6	Lasituksen valonläpäisykerroin	23
4	Suurpainenatriumvalaisinten toiminta ja käyttö	23
4.1	Yleistä	23
4.2	Rakenne ja toiminta	24
4.3	Täytösaineet	26
4.4	Valontuotto ja väriominaisuudet	27
4.5	Lamppujen ikääntyminen	30
5	Led-valaisinten toimintaperiaate ja käyttö	31
5.1	LED-valaisimista yleisesti	31
5.2	Rakenne ja toiminta	31
5.2.1	p-n-junktio	32
5.2.2	Seostaminen	33
5.2.3	Spontaani emissio	35
5.2.4	Lamppujen ikääntyminen	35
6	Kasvien valontarve	36
6.1	PAR – Fotosynteesiaktiivinen säteily	36

6.1.1	McCree-tutkimukset	37
6.1.2	Kuinka kokeiden jälkeen kävi	37
6.1.3	UV- ja infrapunäsäteily	39
6.2	PPF ja PPFD – Fotosynteesiaktiivinen fotonivuo ja sen tiheys	40
6.3	DLI – Päivittäinen fotonimäärä	41
6.4	PPE – Fotosynteesiaktiivinen fotonitehokkuus	42
6.5	YPF – Fotonivuon hyötysuhde	42
6.6	Auringonvalon vaikutus	43
6.7	Laskelmat työn kannalta	44
6.8	Kasvien vuorokausirytmii	45
6.8.1	Kasvit pimeässä ja fotosynteesin induktio	46
6.8.2	Vuorokausirytmien säätely	46
7	Kasvatusvalaistuksen tarvitsema teho, valontuotto ja spektri	47
7.1	Fotosynteesiin hyödynnettävä valo	47
7.2	Uudempaa tutkimustietoa kasvien hyödyntämästä valosta	48
7.3	Nettofotosynteesin laskentakaava	49
7.4	Sähköteho	51
7.5	Valaisinten tuottama lämpö	52
8	Kasvihuonetilat sekä niiden sähkö- ja automaatiotekniikka	53
8.1	Kasvatustilat	53
8.2	Sähkötekniikka	54
8.3	Kasvihuoneautomaatio	57
9	Uusittava ja jäljelle jäävä valaistus	62
10	Suunnitteilla olevat sähkötekniset muutokset	64
10.1	Tarjous 1	66
10.2	Tarjous 2	66
10.3	Gavita GAN Electronic 1 kW / 400 V suurpainenaatrium-valaisimet	67
10.4	Philips LED Toplight GP Compact 520 wattia	69
11	Asennussuunnitelmien toteuttamisen vaatimukset	71
11.1	Standardin erityisvaatimukset kasvihuonekohteille	71
11.2	Valaisinten tarvitsema virta	72
11.3	Tarjous 1, valaisinten asentamisen edellytykset	73

11.4	Tehonkulutus, tarjous 1	74
11.5	Tarjous 2, valaisinten asentamisen edellytykset	75
11.6	Tehonkulutus, tarjous 2	75
11.7	Tarvittavat valaisinryhmät	75
12	Keskuksia syöttävät kaapelit, ryhmäjohtot ja sulakesuojaus	76
12.1	Pääsulakkeita kuormittava virta	77
12.2	Kuormittavan virran ja tarvittavan kapasiteetin kasvu	78
12.3	Pääkeskus ja pääsulakkeet	79
12.4	Ryhmäkeskus 1 ja ryhmäkeskus 2	80
12.4.1	RK2	80
12.4.2	RK2:n syöttävä kaapeli	81
12.5	Pääkeskusta syöttävät kaapelit	83
12.6	Valaisinryhmät ja ryhmäjohtojen kuormitettavuus	84
12.7	Ratkaisu	85
12.8	Sulakkeiden toiminta	86
13	PAR-fotonivuon fotonimäärän mittaus	87
13.1	Mittausalueen valaisimet	89
13.2	Mittaustapa	90
13.2.1	Mittari	92
13.2.2	Mittaussuunnitelma	93
13.2.3	Mittauksen yhteydessä huomioitavia asioita	94
13.2.4	Heijastussuhde ρ	96
13.2.5	Luminanssi L	97
13.3	Mittaustulokset	98
13.4	Päivänvalon mittaus	99
13.5	Johtopäätökset mittaustuloksista	102
14	Yksilöllistä taulukkotietoa kasvien tarvitsemasta valosta	103
15	Motivan Valtti-laskuri ja elinkaarikustannuslaskenta	105
16	Valojen keskimääräisen vuotuisen käyttöajan määrittäminen	106
16.1	Laskentamenetelmä	106
16.2	Laskentamenetelmän soveltuvuus	108
16.3	Vuotuisen käyttötuntiaikalaskennan tulokset	109
16.4	Laskennan virhelähteet ja ero automaation ohjausperusteisiin	110

16.5 Virhelähteen painotus ja automaation raja-arvojen vaikutus	112
17 Muut elinkaarikustannuslaskennassa tarvittavat tiedot	113
17.1 Investointikustannukset	113
17.2 Valaisinten tiedot	114
17.3 Sähkön hintatiedot	114
17.4 Huoltokustannukset	115
18 Elinkaarikustannuslaskennan tulokset	116
18.1 Vanha korvattava valaistus	116
18.2 Tarjouksen 1 elinkaarikustannuslaskenta	118
18.3 Tarjouksen 2 elinkaarikustannuslaskenta	120
18.4 Johtopäätökset elinkaarikustannuslaskelmasta	121
18.5 Elinkaarikustannuslaskelmat ja sähkön hintakehitys	122
18.6 Johtopäätöksiä sähkön hintakehityksestä	124
19 Loistehon kompensoimisesta mahdollisesti koituvat hyödyt	125
19.1 Tehokertoimen vaikutus	126
19.2 Johtopäätökset kompensoimisen kannattavuudesta	126
20 Valaistuksen himmentämisen mahdolliset hyödyt	127
20.1 Himmennystapa	127
20.2 Himmentämisen edut	128
20.3 Tarve käyttää himmennystä	130
21 Johtopäätöksiä valaisintarjouksista	131
21.1 Energiankulutus	133
21.2 HPS-heijastinosa	135
21.3 RoHS-direktiivi	135
22 Yhteenveto	137
Lähteet	139

Liitteet

Liite 1: Caruna Oy:n vastaussähköposti liittymän korotuskyselyyn. Kuvissa myös Priva-automaatiosäädin, sekä taimi- ja kukkaistutuksia.

Liite 2: Mittaukseen osallistuneen valaisinmallin komponentteja, sekä Gavitan suurpainenatriumvalaisimen arvokilpi.

Liite 3: ITU-releyksikköjä, joita yhä käytetään luukkujen ja verhojen käsisäätöön, sekä Priva-automaation anturilaatikko osastolla B.

Liite 4: Rakenteilla oleva toinen kiertovesiallas, sekä lämmitysjärjestelmän pienempiä pumppuja.

Liite 5: Kasvihuonetilojen luukku- ja verhomootteita. Kuvissa myös muuta infrastruktuuria, kuten lämmitysjärjestelmän yläputket.

Liite 6: Kauppapuutarha Verso Oy:n kukkaviljelmiä keväisellä osastolla C, sekä B-osaston vesiallas.

Liite 7: Tulasi-kasveja viljelyksessä Hare Krishna -temppeleillä Helsingissä, kuvissa on selkeästi havaittavissa valaistuksen yhdistyvä väriensekoittuminen

Lyhenteet

- ATP: *Adenosiini-trifosfaatti*. Eläville organismeille välttämätön fosfaattiyhdiste, toinen fotosynteesin valoreaktioiden lopputuotteista.
- DLI: *Päivittäinen fotosynteesiaktiivisten fotonien kertymä neliometriä kohden* (Daily Light Intergral). DLI:tä voidaan käyttää vertailtaessa, kuinka paljon kasvit päivittäisestä valontarpeestaan ovat saaneet.
- HPS: *Suurpaineinen natriumpurkauslamppu* (High Pressure Sodium). Kasvihuoneviljelyssä paljon käytetty lamppumalli.
- LED: *Valoa lähettävä diodi* (Light emitting diode). Nykyisin paljon käytössä oleva ja energiatehokas valonlähdetyyppi,
- LHC: *Kasvien fotosynteesikoneiston valoa keräävät antennikompleksit* (Light-harvesting complex). Kasvien valoreaktiokomplekseissa esiintyviä ja fotosynteesin valoreaktioihin osallistuvia rakenteita.
- NADPH: *Nikotiiniamidiadeniini-dinukleotidifosfaatti*. Eläville organismeille välttämätön korkeaenerginen vedynkuljettaja. Fotosynteesin valoreaktioiden lopputuote ATP:n ohella.
- PAR: *Fotosynteesiaktiivinen säteily* (Photosynthetically active radiation). Arvio kasvien hyödyntämän säteilyn aallonpituusalueesta.
- PFD: *Fotonivuon tiheys* (Photon flux density). Muunkin kuin fotosynteesiaktiivisen säteilyn fotonivuon tiheys.
- PPE: *Fotosynteesiaktiivinen fotonihyötysuhde* (Photosynthetic Photon Efficiency). Valonlähteen sähköteho suhteessa sen lähettämiin fotosynteesiaktiivisen aallonpituusalueen fotoneihin.

- PPF: *Fotosynteesiaktiivisten fotonien vuo* (Photosynthetic Photon Flux). Valonlähteen kokonaisuudessaan sekunnissa lähettämien fotosynteesiaktiivisten fotonien määrä.
- PPFD: *Fotosynteesiaktiivisten fotonien vuon tiheys* (Photosynthetic Photon Flux Density). Pinnan sekunnissa vastaanottama fotosynteesiaktiivisten fotonien määrä.
- Rubisco: *Ribuloosi-1,5-bisfosfaattikarboksylaasientsyymi*. RuBP:n katalyytti karboksylaatiossa ja fotosynteesin hiilensidonnassa.
- RuBP: *Ribuloosi-1,5-bisfosfaatti*. Hiilidioksidin pääasiallinen vastaanottajamolekyylä kasvien hiilensidontakierrossa.
- YPF: *Fotonivuon nettohyötysuhde* (Yield Photon Flux). Kasvien suhteellinen fotosynteesiaktiivisuus suhteessa vastaanotettuihin fotoneihin.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä vertaillaan erilaisen valaistustekniikan ja valon määrän vaikutusta kasvinviljelyssä, erityisesti elinkaarikustannusten ja lehtisalaatin viljelyn näkökulmista. Työssä lasketaan elinkaarikustannuksia kahdesta Verso Oy:n salaatinviljelytarkoitukseen saamasta valaisintarjouksesta ja vanhasta kasvatusvalaistuksesta käyttäen verkosta löytyvää Motivan Valtti -laskuria.

Kauppapuutarha Verso Oy:n kasvihuonekiinteistön tilat ovat noin 4 000 m² suuriset, mistä kutakuinkin 3 500 m² on kasvatuskäytössä. Kasvihuoneosasto, jossa valaistus uusitaan, on kasvatustilojen huonepinta-alasta lähes puolet eli 1504 neliometriä.

Edelleen kasvatuskäyttöön jäävien suurpainenatrium-valaisinten (HPS) kasvatusalueelle säteilemästä valosta mitataan PAR-mittarilla (Photosynthetically active radiation) eli fotosynteesiaktiivista säteilyä mittaavalla mittarilla arvoja, jotta myös niiden uusimistarpeesta saadaan tietoa. Lisäksi työssä selvitetään tarvetta muun laitteiston, kuten esimerkiksi keskusten suojauksen ja johdotusten uusimiseen, sekä kerätään tieteellistä tietoa valaistuksen vaikutuksesta kasvien kasvuun ja fotosynteesiin.

Raportissa esitetään myös hieman tietoa kiinteistössä käytössä olevasta edistyneestä kasvihuoneautomaatiikasta ja muusta automaatiotekniikasta. Kohteen kasvihuoneautomaation on valmistanut Priva Automation Oy, joka on alan markkinajohtaja ja monipuolisimpia kyseisen tekniikan edelläkävijöitä. Kohdekiinteistössä on käytössä valmistajan eri vaihtoehtoista kaikkein laajimmat ominaisuudet tarjoava Connex-järjestelmä, jolla kasvihuone voidaan ohjelmoida lähes täysautomaattiseksi.

Vanhimmat investoinnissa korvattavat valaisimet olivat vuodelta -92 ja suuren sähkönkulutuksen lisäksi niiden muovinen liitäntälaitetekotelo oli ehtinyt haurastumaan ja myös aiheutuvan paloturvallisuusriskin vuoksi ne on poistettu käytöstä ja täytyisi korvata. Tätä varten on saatu kaksi tarjousta HPS- ja LED-yhdistelmävalaistuksesta, joka on erityisesti suunniteltu kasvihuoneviljelyyn.

Työn tavoite on tuottaa Verso Oy:lle investointipäätöstä helpottavaa tietoa tarjottujen valaisinten soveltuvuudesta ja niiden elinkaarikustannuksista sekä tarpeesta vanhentuneen tekniikan uusimiseen.

Työn tarkoituksena on tuottaa aiheesta myös insinööriyöraportti, josta käsitteisiin perehtymätönkin henkilö voisi ymmärtää aiheeseen liittyviä perusasioita ja josta voisi saada tieteellisen tasoista tietoa. Työn ohessa tehdyt tutkimukset ja Valtti-laskurin elinkaarikustannuslaskelma tuottivatkin aiheesta paljon selkeämmän kuvan, kuten työraportissa pyritään myös tuomaan ilmi.

2 Taustatietoja Kauppapuutarha Verso Oy:stä ja Vehmaan Versosta

Kauppapuutarha Verso Oy:n toiminta sijaitsee uudella Vehmaan Versoksi nimetyllä ja kestäväään kehitykseen pyrkivällä noin 35 hehtaarin kokoisella yritysalueella, jonka kunnallistekniikan ja rakennuskannan ekotehokkuuteen panostava rakentaminen alkoi vuonna 2012 [1]. Verso Oy:n tuotevalikoimaan kuuluu esimerkiksi korkealaatuisia kevät- ja kesäkukkia, joulutähtiä, amarylliseja, krysanteemeja sekä ampeleita ja yritys on toiminut vuodesta 2013.

Tuotannossa on tavallisesti myös joitakin erikoisuuksia kuten vanhanajanpelargoneja ja prinsessaliljoja. Kukkavalikoimaan kuuluvat myös esimerkiksi pelargoniat, hortensia, miljoonakello, marketta, daalia, lumihietale ja neilikka. Viljeltyjä vihanneksia ovat esimerkiksi Paksoi, Hakurei-nauris, erilaiset salaattit, kirsikkatomaatti ja kurkku, sekä marjoja luomupensasmustikka ja mansikka. Yrityksen työllistämänä eli pidempiaikaisesti palkkaamana oli vuonna 2021 neljä henkilöä ja toiminta sekä tuotteet ovat hiilinegatiivisia [2].

Kasvatettavat vihannekset, kukat ja muut tuotteet kuitenkin vaihtelevat jonkin verran myös kausittain. Kuvassa 1 on Kauppapuutarha Verso Oy:n salaatti-istutuksista, jotka ovat hieman kuten ne, joita tämän työn elinkaarikustannuslaskelmiin liittyvällä valaistuksella on tarkoitus viljellä. [2.]



Kuva 1. Erilaisia salaatteja kasvihuoneviljelyksessä Kauppapuutarha Verso Oy:n tiloissa, osa suurpainenatriumvalaisimista on päällä ja tuottaa salaateille valon ohella lisälämpöä.

Vehmaan Verson yritysalue on noin puolen tunnin ajomatkan päässä Turusta ja sen itä laidalla kulkeva rautatie mahdollistaa tehokkaan logistiikan raskasta kuljetuskapasiteettia tarvitseville yrityksille. Alueella toimii myös Gasum Oy, joka tuottaa biokaasua biohajoavista raaka-aineista. Biokaasu on uusiutuva ja Suomessa nopeasti yleistynyt energianlähde, jota voidaan käyttää hyväksi muun muassa puhtaammassa liikenteessä, sekä lämmön- ja sähköntuotannossa. Siitä jalostetaan sähköä ja lämpöä, ja sen raaka-aineena voidaan käyttää muun muassa märkälietettä, lantaa sekä elintarviketeollisuuden sivuvirtoja. [1.]

Biokaasun lisäksi syntyviä kierrätysravinteita voivat hyödyntää esimerkiksi lannoite- ja metsäteollisuuden yritykset. Lisäksi biokaasun sivutuotteena syntyvä hiilidioksidi on arvokas voimavara puutarha-alan yrityksille. Johtuen Gasum Oy:n tuottamasta biokaasusta uuden yritysalueen yritysten energiahuolto

voidaan järjestää kokonaisuudessaan tehokkaasti ja tavallista alhaisemmillä kustannuksilla. Näin alueen yrityksille tarjoutuu mahdollisuus saada käyttöönsä ekologista energiaa, jonka hinta pysyy jokseenkin vakaana. [1.] Kuvassa 2 on viereisen osoitteen Gasum Oy:n rakennuksia sekä Kauppapuutarha Verso Oy:n kasvihuonetilojen vieressä sijaitseva muuntajayksikkö.



Kuva 2. Ulkona noin 15 metrin päässä kasvihuonekiinteistöstä sijaitseva ABB Oy:n 20 kV:n muuntajayksikkö, oikealla Gasum Oy:n rakennuksia.

Hyödyntämällä Gasum Oy:n hukkalämpöä Kauppapuutarha Verso Oy kuluttaa merkittävässä määrin vähemmän uusiutumattomia energianlähteitä taikka paljon päästöjä tuottavaa energiaa, kuin jollakin muulla tavoin lämmitetty kasvihuone Suomessa. Biokaasun tarjoama ekologisen energian saatavuus yhdessä Vehmaan Verson yritysalueen muiden menestystekijöiden kanssa synnyttää monia mahdollisuuksia yritysten kasvulle ja kehitykselle. [1.]

3 Yleisiä valaistustekniikkaan liittyviä käsitteitä

3.1 Valo

Valo on sähkömagneettista säteilyä, joka on aallonpituudeltaan ihmissilmän aistittavissa (aallonpituus λ = noin 400–700 nanometriä). Valo koostuu valokvanteista eli fotoneista, valolla ja säteilyllä on siis toisaalta sekä hiukkasen että aallon ominaisuuksia. Sähkömagneettinen säteily koostuu fotonien lisäksi tiettyyn suuntaan etenevästä magneettikentästä ja siihen nähden kohtisuorassa olevasta, samaan suuntaan etenevästä sähkökentästä, jotka värähtelevät lähes saman vaiheisesti. [3.]

Yleisestikin muuttuva sähkökenttä pyrkii aina indusoimaan sille vastakkaisuuntaisen muuttuvan magneettikentän. Koska valo on sekä hiukkasmainen, että aaltomainen energianmuoto, on sen toiminnassa paljon ominaisuuksia, joista yhä edelleen selviää uudenlaista tietoa. Niinpä valon luonnetta selitetään nykyisin sekä aalto- että kvanttiteorioilla. Valon liikettä väliaineessa kuvastaa paremmin sen aaltoliiketeoria, kun taas valonlähteiden ja valoa vastaanottavien kohteiden tapauksessa tarvitaan enemmän kvanttiteoriaa. [3.]

Valon ominaisuuksia ovat intensiteetti eli kirkkaus, väri eli aallonpituus tai taajuus, absorptio ja emissio, sekä polariteetti eli värähtelykulma. Valon aaltoliikkeen liittyviä ilmiöitä ovat esimerkiksi interferenssi, diffraktio, dispersio, polarisaatio, sekä taittuminen ja heijastuminen. [3; 4.]

Sähkömagneettisen säteilyn myös hiukkasmaisen luonteen vuoksi säteilyvuon tai valovuon teho yksikköpinta-alaa kohti on siihen sekunnissa osuvien fotonin energioiden summa. Muita sen hiukkasmaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi kvanttuminen ja lomittuminen. [3; 4.] Valossa ja muussa sähkömagneettisessa säteilyssä fotonin energia on riippuvainen sen aallonpituudesta tai vastaavasti taajuudesta.

Kyseistä suhdetta voidaan kuvastaa seuraavalla yhtälöllä eli Planckin kaavalla 1:

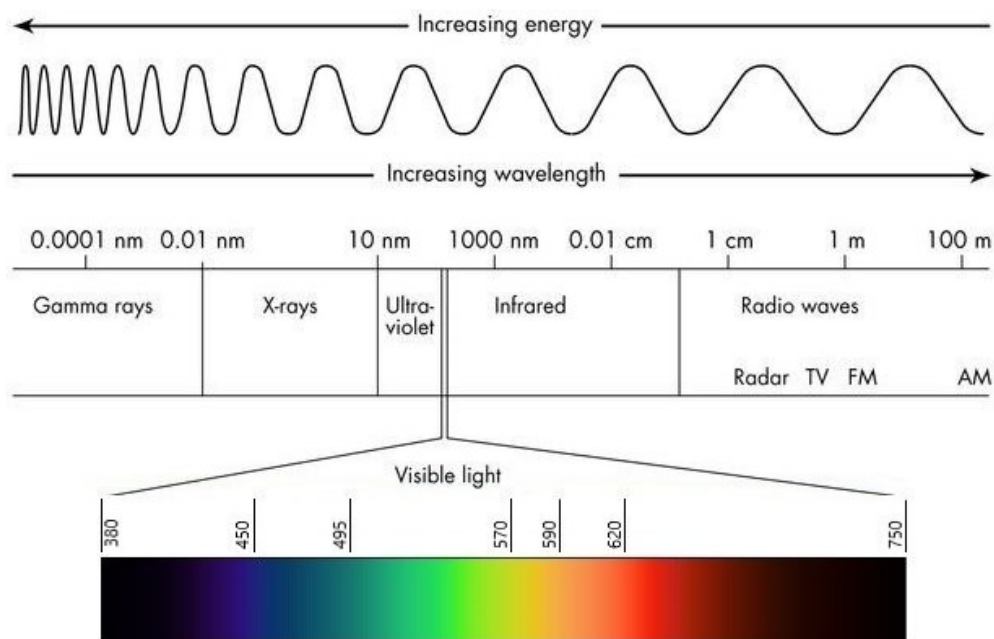
$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

jossa E on fotonin energia, c on valon nopeus tyhjiössä, h on Planckin vakio, f on fotonin taajuus ja λ on fotonin aallonpituus, joka ilmoitetaan tavallisesti nanometreissä [3].

Valon nopeus tyhjiössä $c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

Planckin vakio $h = 6,62606975 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$

Planckin kaava havainnollistaa sekä säteilyn taajuuden ja aallonpituuden käänteistä riippuvuutta toisistaan, että fotonien energian riippuvuutta säteilyn taajudesta. Kuva 3 osoittaa näkyvän valon aallonpituusalueen sijoittumisen muihin säteilyn muotoihin verrattuna, kuten lyhytaaltoiseen säteilyyn tai pitkäaaltoisiin radioaaltoihin verrattuna.



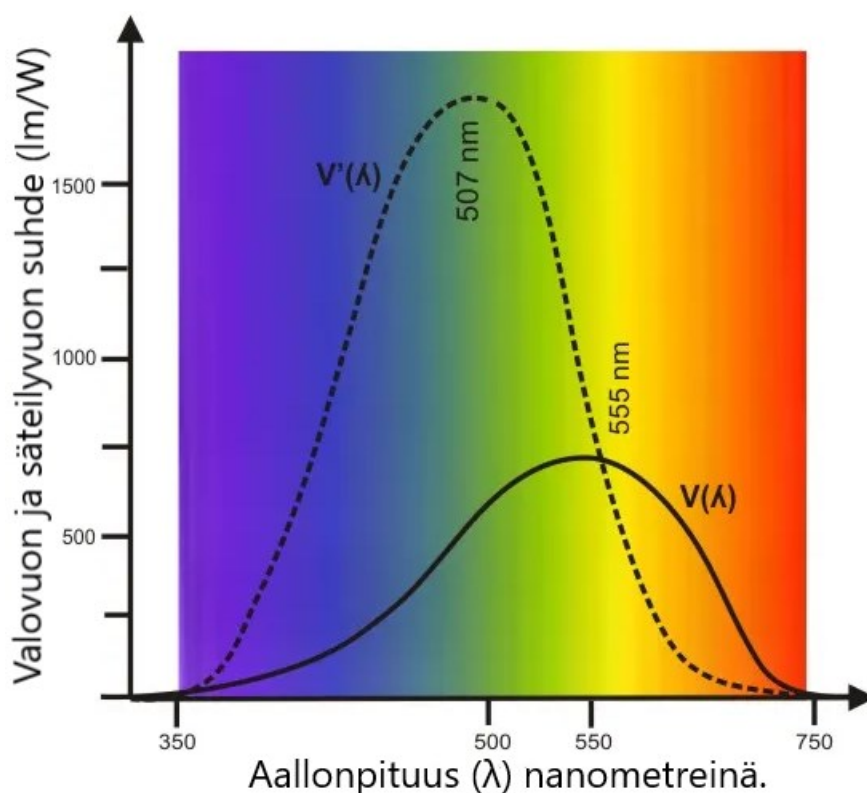
Kuva 3. Näkyvän valon aallonpituusalue ja siihen liittyvät värigradientit määritetynä uudella entistä tarkemmalla menetelmällä (2008) [5; 6]. Tehokkaasti aistittavaa valoa oleva noin 300 nm:n levyinen kaistale on oikeasti hieman isompi osa 10–1000 nm:n aallonpituusalueetta, kuin mitä kuva antaa ymmärtää.

Fotonit yleensä hajaantuvat edetessään kauemmas valonlähteestä, sillä niitä emittoituu tavallisesti valonlähteistä moneen muuhunkin suuntaan kuin aivan

kohtisuoraan, minkä seurauksena valon määrä kauempana on pienempi. Jos valonsäde on muodoltaan keilamainen, on valon määrä keilan keskiosassa tavallisesti suurempi. [4.] Valokvantti tai fotoni absorboituessaan katoaa ja luovuttaa energiansa vastaanottavalle elektronille, joka vastaanottaessaan fotonin energian virittyy ja siitä tulee fotoelektroni eli eksitoni [7].

3.2 Valotehofunktio $V(\lambda)$, ihmisen silmän suhteellinen herkkyys

Vuonna 1924 CIE (International Commission on Illumination) määritteli valotehofunktion $V(\lambda)$ fotooppiselle näölle ja vuonna 1951 $V'(\lambda)$ skotooppiselle näölle eli hämäränäölle ja $V(\lambda)$ on perusteena valovirran ja valovoiman määritelmälle. Valotehofunktiot kertovat kuinka hyvin ihmisen silmä jonkin tietyn aallonpituuden valoa kykenee aistimaan, ja ne perustuvat mittaustuloksiin neljästä eri koikeesta, joissa on tutkittu ihmisen silmän valosta riippuvaisia herkkyksiä. [3.]



Kuva 4. Kuvaajasta selviää tappisoluihin ja päivänäköön liittyvä valotehofunktio $V(\lambda)$ sekä sauvasoluihin ja hämäränäköön liittyvä $V'(\lambda)$ tietyn aallonpituuden monokromaattisessa valossa. Vasemmalla pystyasteikossa on valovuon ja säteilyvuon suhde [8].

Kuvan 4 perusteella ihmissilmän sauvasolut kykenevät aistimaan matalilla valon määrillä jopa 2,5 kertaa tappisoluja herkemmin valoa. Kaikkein herkin ihmisen päivänäkö $V(\lambda)$ on noin 555 nanometrin aallonpituuden valolle, jolloin säteilyvuon ja valovuon suhde on noin 683 luumenia wattia kohden. Muiden aallonpituuksien säteilytehojen näkyvyydestä voidaan suurimmalla suhteellisella herkkyydellä ja mittauksiin perustuvan valotehofunktion avulla saada vertailukelpoinen luku. Siispä kun säteilytehoa painotetaan funktion $V(\lambda)$ mukaisesti ja huomioidaan mitatun säteilyn aallonpituudet (λ), voidaan näin laskea kuinka tehokkaasti mitattu säteily on ihmisen silmän aistittavissa. [8.]

LED-valaistus kasvihuoneisiin suunnitellaan nykyisin yhä useammin myös ihmisen näkökykyä ajatellen, sillä monet kasvattajat eivät enää pidä pelkästään esimerkiksi sinisenpunaista LED-valaistusta optimaalisena kasvien fotosynteesin kannalta kuten ennen. Ihmisenkin kannalta sopivampi valaistus kasvihuoneissa parantaa esimerkiksi työturvallisuutta sekä auttaa työskentelemään tarkemmin ja paremmin esimerkiksi salaateista huonoja lehtiä karsittaessa.

3.2.1 Valovoima I

Valovoima kuvaa valonlähteestä määrättyyn suuntaan säteilevän valon voimakkuutta eli intensiteettiä, kirkkautta. Valovoiman on fysiikan perussuure, jonka SI-yksikkö on kandela (cd) ja joka on käytännössä luumen steradiaania eli avaruuskulman yksikköä kohden (lm/sr). Valovoima voidaan laskea kaavalla 2:

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (2)$$

jossa Φ on valovirta ja ω on yksittäisen valonlähteen ja valaistun pinta-alan välisen valokeilaa kuvaavan kartion avaruuskulma [3].

Yksi kandela on nykyisin määritelmänsä mukaan valonlähteen tiettyyn suuntaan lähettämä säteilyteho, joka on 1/683 wattia steradiaania kohden silloin kun valo on monokromaattinen $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ taajuuksinen. Valovoiman avulla on

johdettu muut valaistustekniset suureet kuten valovirta, valaistusvoimakkuus tai luminanssi. [3.]

3.2.2 Valovirta Φ

Valovirta ilmaisee valonlähteen säteilyn laskennallisen kyvyn aiheuttaa ihmiselle valoistimus eli yksikkö kertoo kuinka paljon näkyvää valoa valonlähde lähettää kokonaisuudessaan. Tämä on mahdollista siksi, että valovirtaa mitattaessa valon aallonpituuksia säteilyssä verrataan ihmisen silmän suhteellisiin silmänherkkyyksilukuihin eli valotehofunktioon $V(\lambda)$, kyseessä on siis tietyillä aallonpituuksilla painotettu säteilyteho. [3.]

Mittari mittaa säteilyä näkyvän valon alueelta ja spektrin mitta-alueella painotetaan tietyjä aallonpituuksia, jolloin ne saavat mittauksen yhteydessä suuremman arvon, kuin silmän kannalta vähemmän näkyvät aallonpituudet. Valovirran yksikkönä on käytössä lumen (lm). Yksi lumen on määritelmällisesti valon säteilyteho, jonka valovoimaltaan yhden kandelan valonlähde säteilee yhden steradianin avaruuskulmaan. Lähetetty valo osuu metrin päässä olevan kartion pohjalle, joka on pinta-alaltaan yhden neliömetrin kokoinen. [3.]

3.2.3 Valaistusvoimakkuus E

Valaistusvoimakkuus on pinnalle saapuvan valovirran suhde sen pinta-alaan, se siis kuvaa pinnan luumeneissa vastaanottamaa valotehoa. Yhden lumenin valovirta yhtä neliötä kohden vastaa yhden luksin (lx) valaistusvoimakkuutta. Valaistusvoimakkuus voidaan laskea yhtälöllä 3:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (3)$$

Yhtälössä Φ on valovirta ja A pinta-ala, valaistusvoimakkuudesta E käytetään yksikköä luxi. [3.]

Valaistusvoimakkuus siis kuvastaa pinnan vastaanottamaa valovirtaa, valovoima tarkoittaa tietyn suuntaista valovirtaa, ja valovirta kuvastaa valonlähteen kokonaisuudessaan lähettämää säteilytehoa valotehofunktion mukaisesti painotettuna [3]. Valaistusvoimakkuus ei kuitenkaan sovellu erityisen hyvin kasvien hyödyntämään valoa tai säteilyä määritettäessä, koska niiden hyödyntämä spektri painottuu aallonpituuksiltaan eri tavoin kuin ihmisen silmän herkkyys [7]. Kasvien fotosynteesitoiminnan kannalta on kuvaavampaa, jos käytetään osin samantapaisia fotosynteesiaktiiviseen säteilyyn ja fotonivuohon tai fotonien määrään liittyviä yksiköitä, jotka esitellään luvussa 6.

3.2.4 Valotehokkuus

Valotehokkuus on suure, joka kuvaa kuinka hyvin lamppu tai valaisin toimii valon tuottamisessa. Valotehokkuuden yksikkö on lumenia sähköistä wattia kohden eli lm/W . Kyseessä on siis säteilyn valovirran suhde syötettyyn sähkötehoon eli hyötysuhde. [3.] Valotehokkuus voidaan ilmoittaa joko lampulle tai valaisimelle. Ensimmäisessä tapauksessa arvo tarkoittaa, paljonko lamppu kokonaisuudessaan tuottaa näkyvää valoa suhteessa kulutettuun sähkötehoon, ja jälkimmäisessä tapauksessa valotehokkuus ilmaisee, paljonko valaisin suhteessa sen sähkönkulutukseen säteilee näkyvää valoa ympäristöönsä [3].

Valaisimen valotehokkuus riippuu lampun tai vastaavan valonlähteen kuten diodin toimintatavasta. Yleisesti valotehokkuus pyritään kehittämään mahdollisimman hyväksi, mutta koska myös valonlähteiden väriominaisuudet, kesto, valmistuskustannukset, ekologisuus ja muut ominaisuudet tulee ottaa huomioon, on rinnakkain käytössä monenlaista tekniikkaa. [3; 4.]

3.3 Additiivinen väriensekoittuminen

Additiivisella väriensekoittumisella tarkoitetaan fysikaalista ilmiötä, jossa useiden eriväristen valojen yhteisvaikutuksena voidaan muodostaa valkoisen väristä valoa. Väripigmenttejä ja ainevärejä kuten maaleja useampia sekoittaessa voi

syntyä teoriassa mustaa väriä, kun yhdistetään keltaisen sekä syaanin ja magentan sävyt, eli ne sekoittuvat yhdistettäessä substraktiivisesti.

Valon tapauksessa väriensekoittuminen on additiivista eli jos yhdistetään vähintään kolmea sopivan värinsävyyn valoa, jotka sijaitsevat vastakkaisella puolella väriavaruutta kuten esimerkiksi punainen, vihreä ja sininen, niin lopputuloksena muodostuu valkoisen väristä valoa [9]. Suurpainenaatrium ja LED-valaistuksen yhdistyvistä väriensekoittumisesta on nähtävissä kuvassa 5 esimerkki.



Kuva 5. Tulasi eli pyhäbasilika kasveja Hare Krishna -temppelillä, ISKCON Helsinki. Kasvien yhdistelmävalaistuksen valo on spektriltään niille sopivampi kuin muutoin ja valo myös näyttää jonkin verran valkoisemmalta yhdistyvän väriensekoittumisen vuoksi.

Auringon säteily ja sen spektri sisältää runsaissa määrin fotoneja kaikilla näkyvän valon aallonpituuksilla, joten yhdistyvä väriensekoittuminen on erittäin voimakasta ja tuloksena on hyvin valkoisen näköinen valo [9]. Auringonvalon spektrijakauma avaruudessa sisältää eniten fotoneja keltavihreällä noin 583 nm:n aallonpituudella ja maan pinnalla valon pidemmät aallonpituudet kuten punainen sisältävät enemmän [10]. Johtuen viritystilojen osittaisesta purkautumisesta esimerkiksi lämpönä ja luminesenssin myötä sekä tavasta, jolla virittyneet fotoelektronit eli eksitonit osallistuvat fotosynteesin valoreaktioihin, on valossa energiaa olennaisempaa fotosynteesin kannalta juuri sen sisältämien fotonien määrä [7; 10].

3.4 Väriämpötila $T_c(K)$

Väriämpötilalla tarkoitetaan sitä täydellisen säteilijän eli ”mustan kappaleen” lämpötilaa, jossa sen lähettämä valo on värisävyltään ja kylläisyydeltään samanlaista kuin kyseessä olevan valonlähteen. Väriämpötilan yksikkö on siten sama kuin lämpötilan yksikkö kelvin (K).

Määritelmä pätee tarkasti vain sellaisille valonlähteille, jotka ovat täydellisiä säteilijöitä ja joiden väripiste sijaitsee siten Planckin käyrällä. Valonlähteille, jotka eivät ole täydellisiä säteilijöitä (kuten loiste- ja purkauslamput), mutta joiden väripiste sijaitsee silti Planckin käyrällä tai sen lähellä, määritetään käyrän perusteella lähin eli ekvivalenttinen väriämpötila. [3.]

3.5 Yleinen värintoistoindeksi R_a

Värintoistoindeksi kuvastaa kuinka luonnollisen värisiltä esineet näyttävät valaistuksessa keskimäärin, mikä riippuu pääasiassa säteilyn spektrikoostumuksesta. Kun valoa heijastuu ovat siinä näkyvät värisävyt päinvastaisia kuin ne, joita pinta parhaiten absorboi. CIE:n yleinen värintoistoindeksi R_a on kahdeksan suositetun värinäytteen erikoisindeksien (R_i) aritmeettinen keskiarvo. Hehku- ja halogeenilamppujen yleinen värintoistoindeksi on lähes 100. [3, s. 153.]

R_a -luku ei pysty yksin kuvaamaan kaikkia valonlähteen värintoisto-ominaisuuksia, mutta sen muodostavat R_i -erikoisindeksit eli yksittäisiä aallonpituuksia kuvaavat indeksit kykenevät kuvaamaan muutoksia spektrin eri osakomponenteissa. R_a -indeksi ei ole siten absoluuttinen mitta valaisimen värintoistokyvylle, vaan sen ilmoittamat erot ovat suhteellisia ja perustuvat useiden aallonpituuksien painotettuun yhteistehoon [3].

3.6 Lasituksen valonläpäisykerroin

Lasituksen läpäisykerroimet kasvihuoneissa ovat välillä 77–92 % käytetystä materiaalista riippuen. Tämä merkitsee, että loppu valo joko heijastuu lasituksen pinnasta takaisin kasvihuoneen ulkopuolelle tai absorboituu lasitusmateriaaliin lämpönä. Tavallisesti auringonvalo on kasvihuoneiden kasvatusalueilla voi olla kuitenkin noin 55 % tai jopa vain puolet siitä mitä ulkona, mikä johtuu lasituksen heijastavuuden ja absorption lisäksi varjonmuodostuksesta. [11; 12.]

4 Suurpainenatriumvalaisinten toiminta ja käyttö

4.1 Yleistä

Natriumhöyryssä tapahtuvan kaasupurkauksen soveltuminen valaistustarkoitukseen havaittiin 1920-luvun alussa ja noin kymmenen vuotta myöhemmin markkinoille tulivat ensimmäiset matalaan täytöskaasun paineeseen perustuvat natriumpurkauslamput. Aiempaa kokemusta samantapaisesta tekniikasta oli syntynyt pien- ja suurpaineisten elohopealamppujen kehittämisen kautta. [3, s.235–236.]

Kuitenkin vasta 1960-luvun alussa kehitettiin ensimmäiset suurpaineiset natriumpurkauslamput (HPS, High Pressure Sodium), tämän mahdollisti muun muassa kehitelty kestävämpi alumiinioksidista (Al_2O_3) valmistettu purkausputki ja pienempi elektrodirakenne [3]. Natriumpurkauslamppujen valon spektri keskittyy pääasiassa keltaisille ja punaisille aallonpituuksille ja se sisältää muita värisävyjä suhteellisen vähän, suurpaineisissa lamppuissa väriominaisuudet ovat

kuitenkin jonkin verran paremmat. Yleisväriseävy suurpaineisilla natriumpurkauslampuilla on keltavalkoinen ja ekvivalenttinen värilämpötila tavallisesti noin 2 000–2 100 K. [4, s. 63.]

Lamppu, liitäntälaitte ja valaisin muodostavat dynaamisen kokonaisuuden, jonka yhteistoiminta on monimutkainen. Järjestelmä on herkkä ulkoisille muutoksille ja muutenkin sen ominaisuudet elinkaaren aikana vaihtelevat usean tekijän vuoksi, kuten laitteelle ominainen resistiivisyyden kasvu ja esimerkiksi lampun kylmäpisteessä sijaitsevan amalgaamin seossuhteen muuttuminen. [3, s. 249; 4, s. 59, 63.]

4.2 Rakenne ja toiminta

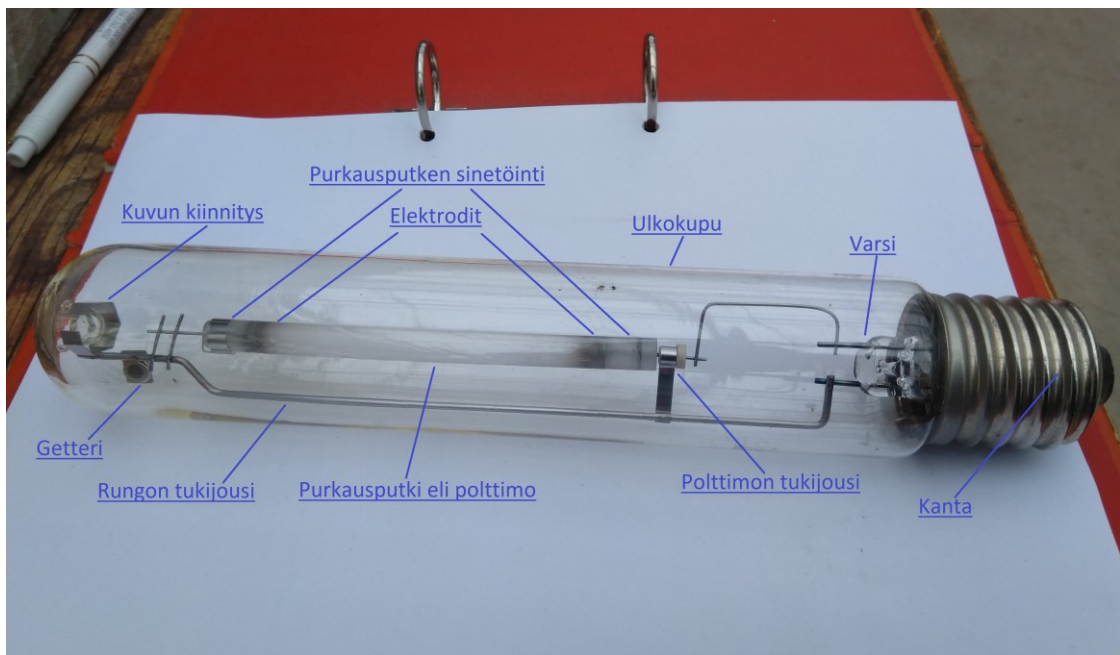
Suurpainenatriumlampun rakenne sisältää eristyslevyn, kierrekannan, ulkoku-
vun, elektrodit, sisäänvientijohtimen, laajenemisyksikön, purkausputken, jousite-
tun tukirakenteen ja getterit. Lampun purkausputkessa eli polttimossa on nat-
riummetallia (Na) ja kun elektrodit johtavat polttimon läpi riittävän virtatiheyden
tapahtuu kaasun läpilyönti eli purkaus, jolloin höyrystyvän natriumin paine kas-
vaa sopivaksi (useimmissa tarkoituksissa noin 30–35 kPa) ja se alkaa tehok-
kaasti lähettämään koko näkyvän spektrin kattavaa valoa [4, s.60].

Kun siis polttimossa olevat kaasut tulevat jännitteen kasvaessa johtaviksi, syttyy
purkauksen johdosta elektrodien välille purkausputkeen valokaari. Johtuen
osaksi lamppujen purkausputken pienestä koosta suurpaineisissa purkauksissa
sekä virtatiheys, että tehotiheys ovat suuria. Putken seinämän lämpötila on noin
1 500 K ja kaasun lämpötila purkauksen yhteydessä voi olla noin 4 000 K, kun
kyseessä on tavallinen 400 W suurpainenatriumlamppu. [3.]

Ulkokuvun sisältämä tyhjiö auttaa polttimoa lämpenemään riittävästi ja kupu
suojaa lampun osia myös ulkoisilta häiriötekijöiltä sekä rasitukselta, getterien
tehtävä on ylläpitää tyhjiöolosuhteita sitomalla lampun palaessa vapautuvia
kaasuja, erityisesti happea. Valotehokkuus lampuilla perustuu suurelta osin niin
kutsuttuun resonanssisäteilyilmiöön, jossa tietyn aallonpituuden säteily

vaikutuksesta virittyneet atomit tai molekyylit alkavat lähettää saman aallonpituuden säteilyä ja joka on yksi fluoresenssi-ilmiön ilmenemismuodoista [3; 13].

Valotehokkuus riippuu keskeisesti purkausputkessa olevan natriumhöyryn paineesta ja esimerkiksi purkausputken mitoista. Kuitenkin siihen vaikuttavat myös monet muut asiat kuten lampun muu rakenne, käytetyt puskurikaasut ja käyttöolosuhteet. Rakenteen ja laitteen toimintatavan vuoksi virta ja jännite kasvaisi hallitsemattomasti, joten se tarvitsee myös virranrajoittimen eli kuristimen (joko magneettinen induktanssi tai elektroninen), jotta laite ei laukaise sulakesuojasta tai vaihtoehtoisesti syty jopa palamaan. Tämä johtuu siitä, että elektrodi-
napojen välinen valokaari muodostaa oikosulun. [3.] Kuvasta 6 käy ilmi suurpainenatriumpurkauslampun tarkempi rakenne.



Kuva 6. Varsin tavallisen mallinen 400 watin suurpainenatriumpurkauslamppu, sekä sen eri rakenneosia viittein kuvattuna. Lamppu on luultavasti unkarilaista alkuperää.

Virranrajoittimesta aiheutuu kuitenkin se, että induktiivisen loistehon osuus kulu-
tetusta tehosta kasvaa. Koska induktiivinen loisteho aiheuttaa haasteita sähkön-
jakelun kannalta ja siitä laskutetaan nykyisin raskaasti, jos sen osuus näennäis-
tehosta on hyvin suuri, on sitä yleensä tarpeen kompensoida kapasitanssilla eli

tässä tapauksessa kondensaattorilla, joita voi olla joko paikallisesti valaisimen liitäntälaitteissa tai keskitettynä paristona. Uudempien suurpainenatrium-valaisinten tehokerroin on tavallisesti niiden elektronisen virranrajoittimen ja mahdollisen paikallisen kompensoinnin vuoksi kuitenkin hyvä, joten niistä ei aiheudu syöttävälle verkolle kovinkaan suurta loistehon kuormaa. [3; 4.]

Useimmat suurpainenatriumlamput tarvitsevat syttyäkseen ulkoisen sytytinlaitteen, sillä syttymiseen tarvittava jännitepiikki on vähintään kaasun läpilyöntijännitteen suuruinen, tavallisesti vähintään 2,5 kV. Tämä riippuu kuitenkin myös siitä mitä sytytinkaasuja lampussa käytetään. Koska natriumin ja elohopean paine huoneenlämpötilassa on alhainen, on lampussa tarpeen aina käyttää lisäksi jalokaasuja. [3.]

4.3 Täytösaineet

Lamppu sisältää natriumin (Na) lisäksi elohopeaa (Hg) sekä jalokaasuja syttymisjännitteen alentamiseksi, kuten ksenonia (Xe), tai argonin (Ar) ja neonin (Ne) seosta, joiden avulla sitä saadaan vieläkin alemmaksi. Jos sytytinkaasuna käytetään argon-neon-seosta ja sen tarvitsemaa polttimon ympärille sijoitettua kapasitiivisesti vaikuttavaa ulkoelektrodia niin etuna on, että lamppuja voidaan käyttää samoilla liitäntälaitteilla kuin elohopealamppuja, mutta valontuoton kannalta on parempi, jos sytytinkaasuna käytetään ksenonia [3].

Eri kaasunpaineen käyttötilanteessa saavat puskurikaasut ovat lampun toiminnan kannalta välttämättömät. Muut täytöskaasut, pääasiassa elohopea, muodostavat natriumin kanssa amalgaamia eli tiivistynyttä seosta tai pinttymää, joka kertyy lampun niin kutsuttuun kylmäpisteeseen [3].

Nopean höyrystyvyytensä vuoksi elohopean tarkoituksen suurpainenatriumpurkauslampussa on kasvattaa polttimon palamisjännitettä ja siten tehoa niin, että lampun tarvitsema virta pienenee (silti noin 30–40 % suurempi kuin vastaavan tehoisen elohopealampan). On olemassa myös malleja, joissa ei käytetä elohopeaa ja joiden polttojännite on matalampi. [3; 4.]

Monet lampun ominaisuuksista ovat kytköksissä kylmäpisteessä sijaitsevan amalgaamin lämpötilaan, määrään ja koostumukseen, erityisesti koska täytöskaasun paine vaihtelee amalgaamin koostumuksen ja lämpötilan funktiona, lampun amalgaamin lämpötila taas riippuu voimakkaasti muun muassa elektrodien rakenteesta ja jonkin verran myös kulumasta. Amalgaamia alkaa höyrystyä, kun purkausputki lämpenee, tällöin vastaavasti lampun ominaisuudet lampun sytyttämisen jälkeen muuttuvat. Esimerkiksi spektrijakaumassa tapahtuu lämpenemisen myötä voimakkaita muutoksia. [3.]

Parhaan toiminnan takaamiseksi amalgaamin sopiva lämpötila on 615...750 astetta °C, arvo riippuu lähinnä seossuhteesta ja purkausputken mitoista. Täytöskaasun paineen ja koostumuksen lisäksi täytöskaasuilla on muitakin vaikutuksia valotehokkuuteen, jos päätetään käytetään raskaampia kaasuja tai jos esimerkiksi nostetaan syttymiskaasun painetta, lampun polttoikää voidaan parantaa. [3.]

4.4 Valontuotto ja väriominaisuudet

Kaikkien suurpaineisten natriumpurkauslamppujen värispektri ja värintoisto ovat paremmat kuin pienipaineisilla. Yleisesti pienipaineisilla natriumpurkauslamppuilla on toisaalta parempi hyötysuhde eli valotehokkuus kuin vastaavan tehoisella suurpaineisella. [3.] Vakiomallisten ja -väristen suurpainenatriumlamppujen 100–1000 W:n malleissa valotehokkuus on välillä 100–130 lm/W. Supermalleilla, joissa purkausputken paine on korkeampi, valotehokkuus voi olla 150 lm/W ilman virranrajoittimen häviöitä. [4.]

Toisaalta kasvien kannalta valonlähteen soveltuvuutta kuvastaa paremmin PPF-arvo eli fotosynteesiaktiivisen fotonivuo, joka voi olla esimerkiksi noin 2 100 $\mu\text{mol/s}$ kuten tässä työssä käsiteltävän 1 000 W:n valaisinmallin tapauksessa. PPF-arvosta kerrotaan lisää luvussa 6.2 ja valaisintarjouksista luvussa 10.

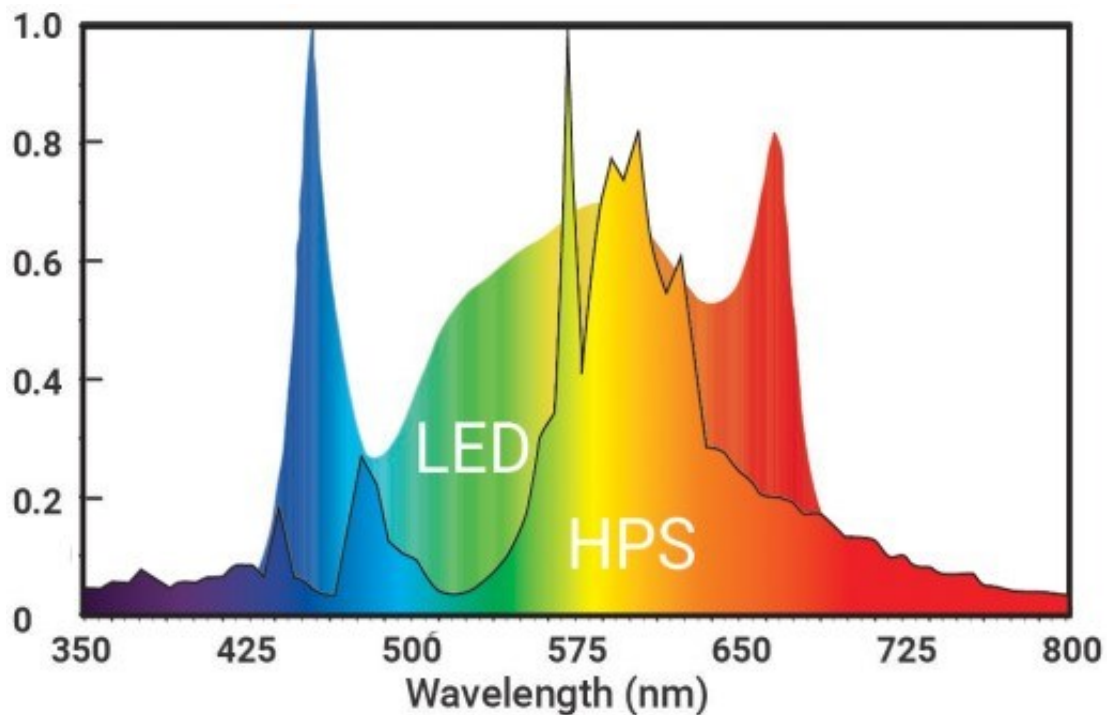
Purkausputkessa olevan valoa tuottavan aineen höyrynpaine on keskeinen parametri purkausputken valontuoton kannalta, eniten natriumhöyry säteilee valoa noin 10 kPa paineessa. Kuitenkin kun myös valon väriominaisuudet riippuvat keskeisesti höyrynpaineesta käytännössä ei ole kannattavaa maksimoida vain valotehokkuutta. Muut valotehokkuuden ja valon väriominaisuuksien kannalta keskeisimmät seikat ovat purkausputken materiaali ja mitat sekä ulkokuvun rakenne. Myös esimerkiksi purkausputken ja ulkokuvun valonläpäisykyky, elektrodihäviöt sekä johtumisesta aiheutuvat lämpöhäviöt vaikuttavat lampun valotehokkuuteen. Suurpaineisen natriumpurkauslampun valotehokkuus on kuitenkin nykyisin tavanomaisessa käytössä olevista valaisimista yksi parhaista ja jää huonommaksi lähinnä vain LED:iin verratessa. [3, s. 246–247.]

Säteilyn spektrijakauma on kasvien kannalta kohtalaisen otollinen, esimerkiksi koska se on jossakin määrin kromaattinen eli sisältää kaikkia näkyvän valon alueen aallonpituuksia. Toisaalta sinisten ja vihreiden aallonpituuksien tuotto on varsin heikko ja valo tästä syystä pääosin keltavalkoista sekä osaksi punertavaa, niinpä lopputuloksessa on myös selvää vivahdetta oranssista. [3; 4.]

Suurpainenatriumlamput lähettävät kaikkein eniten resonanssisäteilyä keltaisella 589 nm:n aallonpituudella, sillä niiden toiminta-arvot kuten kaasun paine ja putken seinämän lämpötila on optimoitu siten. Värispektri sisältää kuitenkin jonkin verran kaikkia näkyvän valon aallonpituuksia, keltaisen lisäksi eniten punaista. [4.]

Vaikka suur- ja pienipaineiset natriumpurkauslamput perustuvat käytännössä samaan ilmiöön, kun kaasun painetta nostetaan myös natriumin resonanssivivojen 589,0 nm ja 589,6 nm itseabsorbtio kasvaa voimakkaasti eli samassa lämpötilassa olevat atomit absorboivat toistensa säteilyä, mikä alentaa valontuottoa. Pienipaineisessa natriumpurkauslampussa ne aiheuttavat 85 % säteilystä. Niihin verrattuna suurpaineisissa lampuissa spektriviivat ovat laajentuneet koko näkyvän valon alueen olennaisimmalle osalle, koska purkausputken reunoilla kylmemmässä plasmassa on runsaasti perustilassa olevia atomeja, jotka tässä tapauksessa absorboivat keskellä syntyvää resonanssisäteilyä. [3.]

Resonanssisäteilyn lisäksi valontuotto perustuu natriumin emissiospektriviivoihin 568,8 nm:n, 615,4 nm:n ja 616,1 nm:n aallonpituuksilla, sekä elohopean emissiospektriviivoihin aallonpituuksilla 540...580 nm. Elohopea tuottaa säteilyä myös spektrin punaisella alueella, kellanvihreän alueen säteily tulee osin ksenonin vaikutuksesta. [3.] Vertailu täyden spektrin valkoisten LED-kasvatusvalojen ja vakiomallisten suurpainenatriumpurkauslamppujen lähettämien valon aallonpituuksien välillä on nähtävissä kuvassa 7.



Kuva 7. Vertailu loisteaineita sisältävästä valkoisen täyden spektrin LED-valaistuksen ja tavallisen HPS-valaistuksen tuottamasta värispektristä, vasemmalla suhteellisen säteilyenergian lukema ja vaaka-akselilla aallonpituus nanometreinä [14].

Lamppujen yleinen värintoistoindeksi R_a on noin 20–35, eli ne toistavat varsin huonosti luonnollisia värejä valaisu ympäristössään, poikkeuksena löytyy vähemmän valotehokkaita värikorjattuja malleja ns. valkoisia suurpainenatriumlamppuja, jotka voivat olla 70 tai jopa 80 R_a -indeksiltään ja joiden värilämpötila on korkeampi [3]. Kuitenkaan voimakkaasti värikorjattuja malleja ei kasvihuoneviljelyssä tavallisesti käytetä [15].

4.5 Lamppujen ikääntyminen

Purkausputken ja ulkokuvun valonläpäisykyvyn huonontuminen ovat pääasiallisia syitä valovirran alenemaan ja myös natriumhävikki laskee lampun valotehokkuutta, tällöin säteilyn spektrijakauma siirtyy enemmän punaiselle alueelle. Lampun eliniän aikana amalgaamin lämpötilalla on taipumus kasvaa, mikä muuttaa toisaalta valoa valkoisemmaksi. Koska lampun polttoajan aikana lampujännitteellä on tapana kasvaa resistanssin ja impedanssin nousun vuoksi laitteen sähköteho käyttöönoton jälkeen tavallisesti hieman nousee, mikä jonkin verran kompensoi elinkaaren aikaista valovirranalenemaa. [3, s.248.]

Käyttöikä suurpainenatriumlampuilla on pitkäikä, vakiolampuilla noin 12 000–24 000 tuntia ja värikorjatuilla malleilla yleensä selkeästi vähemmän [3; 4].

Valovirranalenema vanhemman mallisella 250 W:n suurpainenatriumlampulla voi olla esimerkiksi 12 000 käyttötunnin kohdalla 20 % ja 15 000 käyttötunnin kohdalla 40 % [4].

Kuitenkin lamppujen nimellispolttotun kohdalla se on tavallisesti vain noin 10 %, mikä tarkoittaa melko korkeaa valovirran pysyvyyttä elinkaaren aikana. Jos lampun valovirranalenema on 10 % sen nimellispolttotun eli lampulle ilmoitetun eliniän kohdalla, sen L-kerroin on silloin 90 %. [3.]

250 W:n suurpainenatriumpurkauslamppujen kuolleisuus 9000 käyttötunnin kohdalla voi olla noin 20 % ja 15 000 tunnin kohdalla noin 40 %. Jos myös samalle 250 W:n lampulle ilmoitettu elinikä eli nimellinen polttoikä on 9000 tuntia, sen C-kerroin eli kyseisten lamppujen kuolleisuuskerroin elinkaaren lopussa on 20 %. [3; 4.]

Usein valmistajat eivät LED-valaisinten yhteydessä julkaise tarkempaa tietoa C-kertoimesta tai lamppujen kuolleisuudesta, suurpainenatriumlampuille valmistajat usein kertovat joitakin tietoja. Valtti-laskurin oletusarvona tarjoama kaksi prosenttia on varsinkin suurpainenatriumin tapauksessa aivan liian matala ja luultavasti sama koskee myös LED-valaisimia.

5 Led-valaisinten toimintaperiaate ja käyttö

5.1 LED-valaisimista yleisesti

LED-valaisimet (Light Emitting Diode) perustuvat puolijohteista valmistettuihin valoa lähettäviin diodeihin. LED-valaisinten etuja ovat muun muassa pitkä käyttöikä ja vähäinen sähkönkulutus. Erilaisten diodien valo on tavallisesti lähes monokromaattista eli valon spektri on erittäin kapea ja sisältää usein vain yhtä väriä, väriominaisuuksia voidaan kuitenkin parantaa käyttämällä diodien valmistuksessa väriä muuttavia aineita, sekoittamalla eri värisiä diodeja, sekä esimerkiksi käyttämällä heijasteaineita, jotka muuttavat valoa kromaattisemmaksi. [16.]

Eryteisesti kun ledit suunnitellaan kasvihuonekäyttöä varten lähettämiltään aallonpituuksilta sopiviksi ja jos niitä lisäksi käytetään muun valaistuksen tukena, voidaan valaistuksesta saada hyvin energiatehokasta ja spektrijakaumaltaan jokseenkin sopivaa, sekä tehokasta tuotetun valon määrän kannalta. Kuitenkin valmistamisessa käytettävät materiaalit, erityisesti puolijohteet, saattavat olla kalliita, ja siksi LED-valaisinten hinta on edelleen verraten korkea. LED-valaisinten käytön ennakoidaan silti lisääntyvän tulevaisuudessa muun muassa kiristyvien energiamääräysten vuoksi ja esimerkiksi kasvihuonekäytössä niillä on muutenkin ilmeisiä etuja, kuten muussakin paljon valoa tarvitsevassa ja energiaa kuluttavassa käytössä. Voi olla, että puolijohteiden hinta ajan kanssa myös laskee jonkin verran ja ledeistä tulee nykyistä halvempia. [16.]

5.2 Rakenne ja toiminta

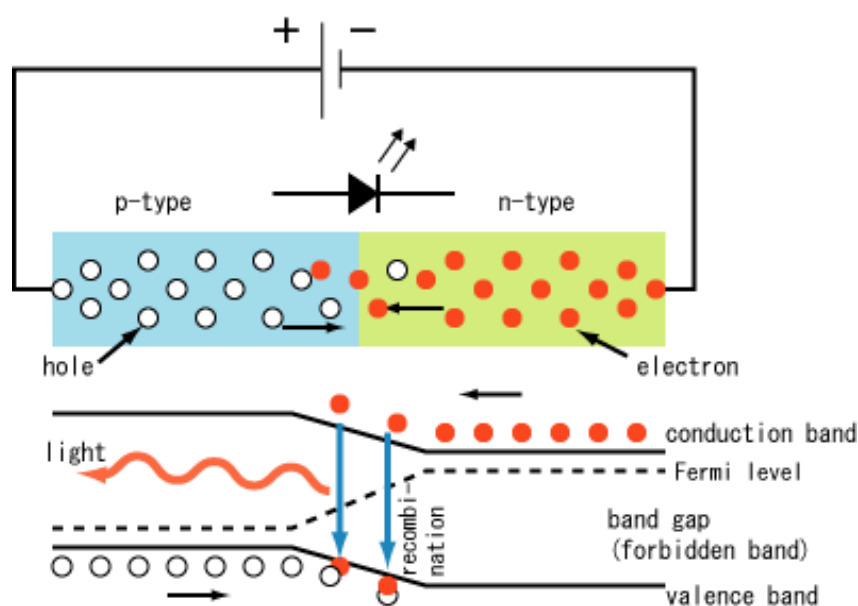
Käytännössä LED-valaisin tai lamppu koostuu joko yhdestä tai useammasta diodista, jos niitä on vain yksi, se on tavallisesti suurikokoinen. Kasvihuonevalaistuksessa kuitenkin useimmiten käytetään useiden LED-diodien muodostamaa valokennoa tai valolistaa, jonka tarvittava laitteisto kuten muuntaja, virransyöttö ja muu on laitteessa sisäänrakennettuna. Esimerkiksi Euroopassa myytävät Philips Toplight-ledit kykenevät tunnistamaan 230 V:n tai 400 V:n jännitteen

ja sopeutuvat toimimaan jännitetason mukaan. Led-kennojen kytkeminen pyritään usein tekemään helpoksi pistotulpan avulla. [17.]

LED-valaisimista ei synny juurikaan käynnistysvirtapiikkiä, sillä niiden syttymisjännite on verraten matala ja toisaalta myös niiden tehokertoimesta saadaan tavallisesti korkea, joten aiheutuva loistehon osuus on pieni. Toisin kuin monet muut vaihtovirtaverkkoon kytkettävät laitteet, LED-valaisimet tarvitsevat toimiakseen tasavirtaa, sillä diodi toimii vain yhden suuntaisella virralla eikä piirin napaisuus niin ollen voi kääntyä. Siispä LED-valaisimet tarvitsevat myös tasavirtamuuntajan, joka on yleensä kaupallisissa malleissa muiden liitäntälaitteiden kanssa sisäänrakennettuna. [17.]

5.2.1 p-n-junktio

Diodi sisältää puolijohdeista koostuvan p-n-junktiorakenteen, kuten esitetään kuvassa 8. Diodi lähettää näkyvää valoa, kun elektronien virta ylittää sen puolijohdeista koostuvan rakenteen muodostaman elektrokemiallisen potentiaalieron eli eron fermitasossa, joka aiheuttaa johtavan vyöhykkeen ja valenssin vyöhykkeen välisen vyöhyke-eron kuvassa eli kielletyn vyöhykkeen [18, s.12; 19].



Kuva 8: p-n-junktiorakenteen toiminta ja elektronien sekä elektroniaukkojen uudelleenjärjestyminen kielletyn vyöhykkeen ylittämisen jälkeen [20].

Kvanttifysiikassa eri tilojen kielletyllä luokittelulla tarkoitetaan usein sitä, että jokin alkeishiukkanen ei voi siirtyä elektronin siirtymän, fotonin emission ja luminesenssin avulla kvanttifysikaalisilta ominaisuuksiltaan matalaenergisempään tilaan. Tämä johtuu siitä, että hiukkasen omien ominaisuuksien vuoksi kuten kvantittuneisuus ja ”spin”, sekä olosuhteiden eli ympäristön hiukkasten ja kvanttifysiikan ilmiöiden vuoksi nuo tilat ovat sille kiellettyjä. Asiaan liittyy niin sanottu Paulin kielto sääntö, jonka mukaan yhden molekyylin kahdella elektronilla kaikki neljä kvanttinumeroa eivät voi olla samat [21, s. 476].

LED-valaisinten tapauksessa fotonin spontaani emissio tapahtuu, kun kielletty vyöhyke ja sen sisältämä elektrokemiallinen potentiaaliero eli ero fermitasossa ylitetään ja elektronit järjestyessään toisella puolella junktiorakennetta saavat matalaenergisemmän tilan. Kun elektronit siis uudelleenjärjestyvät eli rekombinoituvat toisella puolella rakennetta, seuraa fotonin emissio, jossa purkautuu niiden olosuhteisiin nähden liian korkea energiataso. [16; 18]

Toisaalta elektroniaukot vastaavasti p-douppauksen puolella diodirakennetta fysiikan ja kvanttifysiikan sääntöjen mukaisesti uudelleenjärjestyvät. Kun elektronit ja elektroniaukot uudelleenjärjestyvät, on elektronien luovutettava energiaa säteilyinä ja lämpönä, koska energiataso aukkojen puolella rakennetta on matalampi. [16; 18.]

5.2.2 Seostaminen

Eri puolijohdeiden seostamista kutsutaan douppaamiseksi, prosessissa monimutkaisin järjestelyin lisätään tarkka ja pieni määrä erilaisia aineita puolijohdeaineeseen. Tällöin saadaan tuotetuksi tietynlainen puolijohderakenne p-n-junktiota varten, jolla on tarvittavat elektrokemialliset ja kvanttifysikaaliset ominaisuudet junktio kannalta. Douppanttien valmistaminen saa aikaan materiaalissa joko elektronien vajauksen (P) tai ylijäämän (N). [16; 22.]

Tämä yhdistelmä kykenee lähettämään valoa tietyllä monokromaattisella taajuuudella, jonka määrittelee Planckin laki douppanttien elektronien valenssitason

energiaeroon perustuen silloin kun junktio polaroituu suorasti virran ylittäessä sen. Tällä perusteella LED-sirun eli juktion rakenne ja koostumus määrittää emissiossa syntyvän valon värisävyn. [16.]

Diodeissa kun p- ja n-tyyppin rakenteet valmistettaessa yhdistetään, syntyy rajapintaan niin kutsuttu tyhjennysalue, koska varaukset jakautuvat rakenteessa tiettyjen sääntöjen mukaan. Tällöin syntyy rajapinnalle sähkökenttä, johon kutsuvaa jännitettä kutsutaan kynnysjännitteeksi. Kynnysjännite voi olla esimerkiksi 0,7 V n-tyyppin piidiodilla tai 0,3 V p-tyyppin germaniumdiodilla, p-tyyppin puolijohdeessa virtaa kuljettavan elektroniaukot ja n-tyyppin puolijohdeessa elektronit, joilla ajatellaan olevan vastakkainen varaus. [22, s.114.]

Virta kulkee diodin läpi anodista (positiivisesta) katodiin (negatiiviseen). Jos anodi on p-tyyppin puolijohde ja se on kytkettynä katodiin, sähkökenttä työntää varauksenkuljettajat rajapinnalle, jolloin diodi on päästösunnassa ja sähkövirta kulkee diodissa. Jos taas aukkoja virtanaan käyttävä p-tyyppin johde on negatiivinen nähden n-puoliskoon, sähkövirta ei pääse kulkemaan, ja diodi on silloin estosuuntainen. [22, s.115.]

Joitakin yleisimmin käytettäviä LED-puolijohdeaineita UV-ledeille, siniselle ja vihreälle ovat AlInGaN-systeemin mukaiset puolijohderakenteet, eli joiden elektrokemialliset ominaisuudet perustuvat pääasiassa alumiinin (Al), indiumin (In), galliumin (Ga) sekä nitridin (N) seostamiseen [23].

Keltaiselle, oranssille ja punaiselle käytetään yleisimmin AlInGaP-systeemin mukaisia puolijohderakenteita eli alumiinista, indiumusta, galliumista ja fosforista (P) valmistettuja [23].

Seostamisessa ja juktiorakenteiden valmistamisessa käytetään esimerkiksi alumiininitridiä (AlN) ja indiumnitridiä (InN) sekä galliumfosfidia (GaP). Usein käytetään eri värisiä fosforiloisteaineita diodin ulkopinnalla, jotta lähes monokromaattisista sinisistä LED-diodeista saadaan tehtyä valkoisia täyden spektrin diodeja. [16; 23.]

5.2.3 Spontaani emissio

Kyseisen p-n-junktion toiminta perustuu spontaaniin emissioon, joka on stimuloitua emissioon lisäksi toinen tapa, jolla luminesenssia voi syntyä. Prosessissa valon emittoiva atomi, molekyyli, nanokide tai nukleoni palaa alempaan energiatilaan ja siitä irtoaa fotoni. Jos emissio ja virittyneisyyden laukeaminen tapahtuu itsestään ilman ulkopuolista vaikutusta, on kyseessä spontaani emissio, joka voi tapahtua mihin vain suuntaan. [7; 22.]

Myös moni luonnonilmiö sekä muu tekninen sovellus kuin LED-valonlähteet, kuten loisteputket, plasmanäytöt, laserit, vanhojen televisioiden katodisädeputket sekä plasmanäytöt hyödyntävät spontaania emissiota. Laser emittoi ensin spontaanisti ja vaihtaa myöhemmin stimuloituun emissioon. [7; 22.]

5.2.4 Lamppujen ikääntyminen

LED-valaisimet ovat kohtalaisen pitkäikäisiä, niille luvataan usein useiden kymmenien tuhansien tuntien käyttöaikoja ja vain pientä valovirranalenemaa, nykyisin niiden kuolleisuus suhteessa käyttöaikaan on myös melko alhainen. LED-valaisin voi käytöstä riippuen kestää jopa kymmeniä vuosia, minkä aikana se kuluttaa vain vähän sähköä. Tarjouksissa esitetyn LED-valaisimen ennakoitu elinikä on 36 000 h – L95, mikä tarkoittaa, että sen nimellisen käyttöiän lopussa 36 000 h jälkeen tulisi tuottaa vielä noin 95 % alkuperäisestä valovirrasta [17].

LED-valaisinten markkinoille tulon jälkeen valaistusalalla on tapahtunut mittavia muutoksia ja monet valmistajat ovat lopettaneet tai muuttaneet toimintapaansa, osaksi koska tuotto-odotukset ovat ledien pitkäikäisyyden vuoksi mataltuneet. Esimerkiksi pitkäikäisimpiin valaisin- ja lamppuvalmistajiin kuuluva Philips on vuodesta 2016 keskittynyt enemmän terveydenhuoltoon, ja itsenäisestä Philips Lighting N.V:stä tuli vuonna 2018 nimeltään Signify N.V. Samana vuonna GE, Osram ja Cree ovat päättäneet vetäytyä yhä enemmän valaisintuotinnastaan [24.]

6 Kasvien valontarve

Fotosynteesiprosessilla on yleisesti lajeittain ja tilanteittain vaihteleva tyydytynneisyystaso eli saturaatio, minkä jälkeen lisävalo tuo huomattavasti vähäisempää hyötyä. Lisäksi on myös tietty säteilytaso, jonka kohdalla kasvilla alkaa fotoinhibitio eli se madaltaa fotosynteesin tasoaan merkittävästi siitä mitä valon määrältä voisi odottaa, jolloin hyötysuhde laskee dramaattisesti ja kasvin suojamekanismit alkavat tällöin toimia, jotta se voi välttää pahimmat liian säteilyn vaikutukset [7].

6.1 PAR – Fotosynteesiaktiivinen säteily

Fotosynteesin kannalta tarpeellisinta sähkömagneettista säteilyä ovat valon punaiset ja siniset värisävyt, hieman vähemmän yhteyttämiseen voidaan käyttää valkoista, keltaista tai vihreää valoa, sekä jonkin verran ultraviolettisäteilyä. Punainen ja sininen värisävy sijaitsevat vastakkaisissa päädyissä näkyvän valon spektriä ja niiden fotonin energiaero on siten mahdollisimman suuri. Tämä ei tutkimusten mukaan kuitenkaan ratkaise kasvin fotosynteesiherkkyyttä kyseisten aallonpituuksien suhteen, vaan fotosynteesin kannalta aktiivisimmat alueet sijaitsevat eri päädyissä hyödynnettävää spektriä punaisen ja sinisen valon värisävyn alueilla. [7; 25.]

Punaisten aallonpituuksien valolla on taipumusta lisätä kasvin pituuskasvua, kun taas siniset aallonpituudet yleisesti saavat ne kasvamaan enemmän leveysuunnassa. Valon eri aallonpituuksilla ja spektrillä on tutkimusten mukaan monta muutakin vaikutusta niiden fysiologiaan ja kasvien fotosynteesiprosesseihin. On myös todettu, että ne absorboivat lähes kaiken valon näkyvän valon aallonpituuksilta, ja kaikilla näkyvän valon värisävyillä on jonkinlainen fotosynteesiprosesseja ajava vaikutus. [25; 26.]

6.1.1 McCree-tutkimukset

Keith McCree aloitti 1970-luvun alkupuolella joukon tieteellisiä kokeita kahdella-kymmenellä kahdella eri kasvilajilla, mistä saatiin tietoa niiden kyvystä hyödyntää valoa. Kokeissa mitattiin kolmea eri parametria, fotosynteesissä käytettävien kvanttien hyötysuhdetta, fotosynteesiaktiivisuutta ja absorptanssia. Fotosynteesin kvanttien hyötysuhde eli kvanttitehokkuus (quantum yield tai quantum efficiency Φ) tai kvanttien nettohyöty on määritelmän mukaan synnitetyn hapen (O_2) tai vastaanotetun hiilidioksidin (CO_2) määrä suhteessa absorboituihin valokvantteihin tilanteessa, jossa ei ole yhteyttämisprosessin hyötysuhdetta heikentävää fotorespiraatiota. [25.]

Fysiologisessa mielessä kvanttien hyötysuhde Φ on suurin fotosynteesin hyötysuhde, joka voidaan mitata tutkimalla kasveja heikossa valaistuksessa ja jonka selvittämiseen on käytetty infrapuna-kaasuanalyysiä. Näin on voitu tutkimalla kasvien fotosynteesin aktiivisuutta niiden korkeimman hyötysuhteen olosuhteissa sekä mittaamalla niiden hyödyntämän fotonivuon tiheyttä (PFD – Photon flux density) selvittää teoreettinen korkein hyötysuhde, joka kasvilla voi minkäkin tutkitun aallonpituuden valossa olla. [25.]

6.1.2 Kuinka kokeiden jälkeen kävi

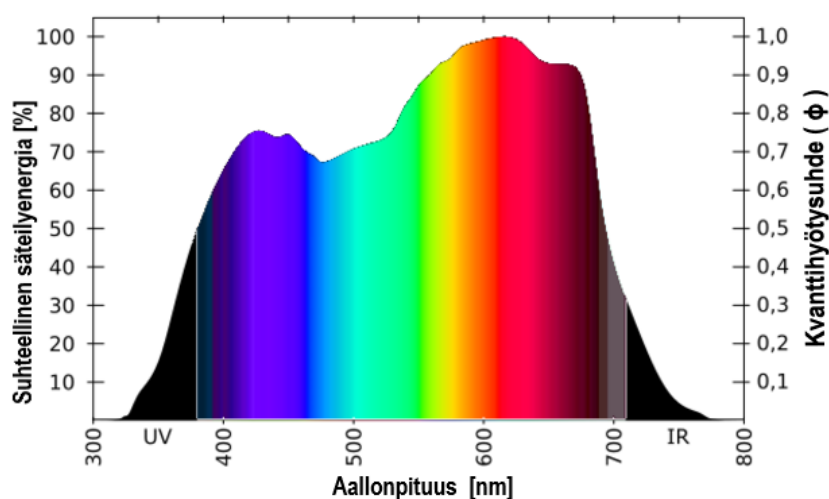
McCreen tutkimustuloksista saatiin siten tietoa kasvien ja niiden fotosynteesin herkkyydestä eri aallonpituuksien valolle, joka on pitkään ollut perusteena jatko-tutkimuksille kasvitieteissä. Lisäksi syntyi niin kutsuttu McCree-käyrä tai YPF-käyrä (Yield Photon Flux) eli fotonivuon hyötysuhteen ilmaiseva käyrä, joka käytännössä kuvaa yleistä kasvien ja niiden fotosynteesipigmenttien, pääasiassa klorofyllien, suhteellista fotosynteesivastetta eri aallonpituuksille monokromaattisessa ja vähäisessä valossa [26].

Fotosynteesiaktiivisten fotonien aallonpituusalueen eli PAR-alueen (engl. Photosynthetically active radiation) on tohtori McCreen tutkimusten perusteella määritelty olevan välillä 400–700 nm, ja kyseistä aallonpituusaluetta käytetään

edelleen kasvien fotosynteesiaktiivisen säteilyn, sekä sen fotonivuon ja vuon tiheyden määritelmässä ja mittalaitteissa [25; 26].

Aallonpituudesta riippuen kokeissa käytetyt kasvien saaman fotosynteesiaktiivisen säteilyn arvot olivat kuitenkin jopa 50 kertaa pienempiä, kuin on sopiva valon määrä paljon valoa vaativille viljelyskasveille ja yhteyttämistoiminta oli siten paljon matalammalla tasolla, kuin mitä hyvä kasvu edellyttää. Siten suhteellisen kvanttitehokkuuden ja siihen perustuvan fotosynteesiherkkyyden käyttäminen valaistuksen sopivien aallonpituuksien määrittämiseen ei ole täysin ideaalista [25].

Kasvien yhteyttämisen kannalta olennaisia parametrejä ovat valon sisältämien fotonien määrä, sekä valon spektrijakauma eli valon sisältämien fotonien aallonpituus. Fotonien aallonpituus määrittää suurelta osin kasvin pigmenttien absorptioherkkyyden kyseessä olevalle valolle ja valon eri värisävyillä on kasveihin myös muita vaikutuksia. [7.] Kuvassa 9 on nähtävissä YPF-käyrä, josta selviää Keith McCreen tutkimustuloksiin perustuva kasvien suhteellinen keskimääräinen fotosynteesiherkkyys PAR-alueen eri aallonpituuksien heikossa monokromaattisessa valossa.



Kuva 9. PAR-alue 400–700 nm ja McCree-käyrä eli YPF-käyrä. Oikealla y-akselilla kasvien fotosynteesipigmenttien keskimääräinen suhteellinen kvanttihuötysuhde, vasemmalla vastaava säteilyteho ja vaaka-akselilla valon aallonpituus nanometreinä [28].

Parhaiten kasvit absorboivat punaisten ja sinisten aallonpituuksien valokvantteja, kuitenkin myös spektrijakauman monipuolisuus ja laajuus on otettava huomioon, kun määritetään kasveille sopivaa valaistusta. Kaikkein herkimmät aallonpituusalueet absorptioon ja fotosynteesiaktiivisuuden kannalta ovat noin 400–450 nm:n ja 600–670 nm:n aallonpituusalueilla. Kuitenkin kyseessä on vain suhteellinen herkkyyslukema, eikä se kerro koko totuutta kasvien hyödyntämästä valosta. [10; 27.] Erityisesti kasvatusvalaistusta vastaavilla valon määrillä myös vihreän värinsävyn valosta absorboituu lähes kaikki [26].

6.1.3 UV- ja infrapunasäteily

UV-A säteilyn aallonpituusalue on noin 315–380 nm ja UV-B aallonpituusalue 280–315 nm, ne ovat siten virallisen PAR-alueen ulkopuolella [26]. Kuitenkin on tutkittu, että erityisesti UV-A ja UV-B valojen yhdistelmä lisää kasvien kokonaisfotosynteesin määrää. Vaikka erityisesti muovisissa kasvihuoneissa on myös vaarana haitallinen liika UV-säteily, UV-valo voi kuitenkin tehdä esimerkiksi koristekasveista kauniimpia ja mikä tärkeämpää sen on todettu torjuvan myös kasvitauteja. [15; 29.]

Yli 700 nm:n aallonpituuksien kaukopunaisilla värinsävyyillä ja myös lähi-infrapunalla eli yli 750 nm:n säteilyllä on toisaalta merkittävä vaikutus kaukopunaisen fytokromiin, joka vastaa esimerkiksi kasvin luonnollisesta vuorokausirytmistä [7]. On tutkittu, että vihreät kasvit voivat aktiivisesti hyödyntää valoa yhteyttämiseen jopa 720 nm asti, jos niiden fotosynteesiä aktivoi samanaikaisesti aallonpituudeltaan 680 nm valo [27]. Lisäksi esimerkiksi kurkkujen satoisuus on voinut parantua jopa 24 %, kun valaistuksen spektrissä on lisätty kaukopunaista valoa [26].

UV- ja infrapunasäteilyllä on siten monia kasvun kannalta hyödyllisiä ominaisuuksia. UV-säteilyllä on myös tärkeä vaikutus esimerkiksi trikomioiden eli karvojen muodostumiseen sekä solukon laatuun, toisaalta infrapunasäteily nostaa solukonesteen ja samalla itse kasvin lämpötilaa. [15; 29.] Kaukopunaisen valon aallonpituusalue on 700–750 nm, mikä on oikeastaan samalla myös lähi-IR-

aluetta [15]. Muuta kuin kaukopunaista lähi-infrapunasäteilyä klorofyllipigmenttimolekyyleistä absorboi kuitenkin pääasiassa vain bakteriklorofylli ja joidenkin syanobakteerien klorofyllit d- ja f, lisäksi harvinaisemmista klorofyllin muodoista tunnetaan levissä esiintyvä klorofylli c ja keltalevien klorofylli e [7].

6.2 PPF ja PPFD – Fotosynteesiaktiivinen fotonivuo ja sen tiheys

Aiemmin kasvihuonevalaistusta mitattiin lukseina tai luumeneina, mutta koska näissä yksiköissä mitatut arvot painottuvat ihmisen silmän herkkyyden perusteella eivätkä ne myöskään perustu fotonien määrään vaan säteilytehoon, niistä ei saa kovin aitoa kuvaa kasvien kyvystä hyödyntää valoa. PAR tarkoittaa siis fotosynteesiaktiivista säteilyä ja sen tehokasta aallonpituusalueetta 400–700 nm [26.]

Määrittely perustuu samantapaiseen tiettyjä valon aallonpituuksia painottavaan herkkyyssävykseen kuin ihmisen silmänherkkyyssävykseen eli kasvien tapauksessa McCreen alkuperäiseen YPF-käyrään, mutta PAR-mittauksessa ei painoteta aallonpituuksia tai mitata säteilytehoa, vaan ainoastaan kyseisen aallonpituusalueen fotonien määrää. Luumen-mittaus antaa vain vähäisen painoarvon monille valon aallonpituuksille, kuten punaiset ja siniset värinsävyt, jotka ovat kuitenkin kasvin fotosynteesin kannalta erittäin sopivia. [25; 26.]

Fotosynteesiaktiivisten fotonien vuo PPF (Photosynthetic Photon Flux), jonka yksikkö on $\mu\text{mol/s}$ eli mikromoolillista fotoneita sekuntia kohden, tarkoittaa jonkin valonlähteen sekunnissa lähettämien yhteyttämiskelpoisten eli PAR-alueen fotonien määrää. Vastaavasti kuin PPF, joka kertoo lähetettyjen fotonien määrän, yksikkö PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density) eli fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheys on neliometriä kohden vastaanotettujen fotosynteesiaktiivisten fotonien määrä sekunnissa, $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$. [26].

PPFD voidaan laskea valmiiksi PAR-säteilystä (400–700 nm) mitatulle säteilyteholle tarkempaa spektrikoostumusta tuntematta kaavalla 4.

$$PPFD = \frac{P\lambda}{N_A hc} \quad (4)$$

PPFD on fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheys $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, P on säteilyteho, λ on fotonien aallonpituus, N_A on Avogadron vakio ($6,0221367 \times 10^{23} \text{ mol}$), h on Planckin vakio ja c on valon nopeus tyhjiössä [10].

PPFD-arvoa käytetään paljon määrittäessä, kuinka voimakas jonkin kasvatusalueen valaistus on. Sen avulla voidaan myös vertailla keskenään sekä auringonvalon, että kasvatusvalaistuksen fotosynteesiaktiivista fotonimäärää, kuten tässä työssä on tehty [26].

6.3 DLI – Päivittäinen fotonimäärä

Kasvien päivittäistä valontarvetta voidaan kuvastaa arvolla Daily Light Integral, joka kertoo fotoaktiivisten fotonien päivittäisen kertymän tietyllä alueella, ja sen yksikkö on $\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$ eli moolia neliömetrillä päivässä. DLI voidaan laskea kasvatusvalaistukselle kertomalla fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheys (PPFD) päivittäisellä valotusajalla [26]. Tätä kuvastaa kaava 5, josta voidaan laskea kasvien päivässä saama valon määrää eli DLI seuraavasti:

$$DLI = \left(\frac{\text{Valaistut tunnit} \times PPFD \times 3\,600}{1\,000\,000} \right) \quad (5)$$

PPFD:n eli fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheyden yksikkö on $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ja DLI on päivittäinen fotoninsaanti $\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$.

Tässä työssä on PAR-mittarilla mitattu fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheyttä viljelyalueella. DLI-arvo on käytännöllinen tapa määrittäessä, kuinka paljon kasvit ovat päivittäisestä valontarpeestaan saaneet, ja se voidaan laskea myös kasvatusvalaistukselle sen tuottaman valon määrän perusteella [26].

6.4 PPE – Fotosynteesiaktiivinen fotonitehokkuus

PPE (Photosynthetic Photon Efficiency), tarkoittaa fotosynteesiaktiivisten fotonien hyötysuhdetta ja se kuvastaa lähetettyjen fotosynteesiaktiivisten fotonien määrän suhteessa valaisimen tai lampun tehoon. Yksikkö on mikromoolia sähköistä sähköistä wattia kohden $\mu\text{mol}/\text{W}$ tai per joule $\mu\text{mol}/\text{J}$ [26].

Suure PPE on hieman samantapainen kuin valotehokkuus on ihmisen silmän aistimalle valolle. Kuitenkin valotehokkuus määritellään säteilytehon ja silmän herkkyyden, eikä sopivan aallonpituusalueen fotonimäärän perusteella [26]. Esimerkiksi tämän työn elinkaarilaskentaan osallistuneella Philipsin Toplight LED-valaisimella, joka on nimellisestä teholtaan 520 W, on himmentämättömässä käytössä noin 3,5 $\mu\text{mol}/\text{J}$ hyötysuhde PPE, ja vastaavasti sille ilmoitetaan 1800 $\mu\text{mol}/\text{s}$ PPF-valontuottokykyä [17].

6.5 YPF – Fotonivuon hyötysuhde

YPF (Yield Photon Flux), fotonivuon hyötysuhde tai fotonivuotehokkuus, perustuu Keith McCreen tutkimustuloksiin. YPF aallonpituusalue on laajempi 360 nm–760 nm kuin PAR-alue 400–700 nm ja YPF-käyrässä valon aallonpituudet painottuvat kasvin fotosynteesivasteen mukaan. Tulokset voidaan myös ekstrapoloida kullekin viljelykasville niiden yksilöllisen herkkyyssäyrän mukaan. Jos myös valaistuksen tarkka spektri on tiedossa, on mahdollista painotuskertoimia käyttämällä saada PPF-arvosta laskettua sitä vastaava YPF-arvo. [26.]

Sen avulla voidaan määritellä myös erilliset käyrät kasvien fotosynteesiherkkyydelle sekä säteilytehon perusteella, että toisaalta fotonien määrän mukaan painotettuna, joka on kasvien fotosynteesin kannalta kuvaavampi tapa. YPF-lukeman avulla voidaan saada kasvilajin yksilöllistä spektristä riippuvaista fotosynteesiaktiivisuutta ja -vastetta paremmin kuvaavaa tietoa, kuin mitä on useiden kasvilajien tietoihin perustuva suhteellinen kvanttihyötysuhde (ϕ). [25; 26.]

6.6 Auringonvalon vaikutus

Kasvien saama DLI ja sen perusteena oleva fotonimäärä voidaan teoriassa laskea auringonvalolle myös sen kaikki aallonpituudet sisältävän säteilyn tehosta, koska säteilyn spektrikoostumus ja sitä vastaava kerroin on tiedossa. Auringonvalosta jopa 48 % voi olla PAR-säteilyä, joten auringon saapuvan säteilytehon ja sen fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheyden suhde on silloin laskennallisesti:

$$PPFD = \frac{P}{2,02} \quad (6)$$

Kaavassa PPFD on fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheys $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. P on säteilyteho kaikesta auringosta saapuvasta säteilystä mitattuna W/m^2 eli wateissa neliometriä kohden [30].

Arvo on kuitenkin globaalista vaakasuuntaisesta PPFD-säteilystä päiväntasajalla puolenpäivän aikaan, joka sinänsä voi olla noin $2,2220 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ jos 45 % on PAR-säteilyä, ja niinpä ne eivät huomioi auringon korkeuskulmaa [10].

Koska pilvien aiheuttama hajaantuminen ja absorptio eroaa merkittävästi IR- ja PAR-aallonpituuksilla, kertoimet ovat likiarvoja ja oikeat mittaustulokset ilmaisevat PAR-säteilylle kerrointa 0,27–0,48 säätilasta ja auringon korkeuskulmasta riippuen. Siispä toisinaan vain 27 % auringon säteilystä on PAR-säteilyä, jolloin PPFD on $1,23 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ jokaista kaikesta säteilytehosta mitattua neliometrikohtaista wattia kohden [10]. Tai jos auringosta saapuvaa säteilytehoa mitataan valmiiksi PAR-säteilytehona muttei fotonien määrää, niin mitatun säteilytehon ja fotoaktiivisen fotonivuon tiheyden suhde on silloin kaavan 7 mukainen:

$$PPFD = \frac{P}{4,56} \quad (7)$$

P on alueelle saapuva PAR-säteilyteho W/m^2 ja PPFD on PAR-säteilyn fotonivuon tiheyden arvo $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, joka kertoo sekunnissa saapuvien fotoaktiivisten fotonien määrän neliometriä kohden sekunnissa [30].

Usein kuten tässäkin työkohteessa automatiikka kuitenkin tallentaa tiedot auringon päivittäisestä säteilytasosta säteilysummana, josta DLI voidaan laskea kaavalla 8:

$$DLI = \left(\frac{E}{100} \right) 2,15 \times \text{Lasituksenläpäisykerroin} \quad (8)$$

jossa E on solarimetrin kaikesta auringon säteilytehosta mittaama päivittäinen säteilysumma yksiköissä J/cm², ja DLI kertoo laskennallisen arvion siitä kuinka paljon kasvien päivittäisestä valontarpeesta on saatu [31].

Tämän työn yhteydessä on käytetty kaavaa 8 eri valaistusvaihtoehtojen sekä aiemman valaistuksen tarvittavien käyttötuntien määrittämiseen. Käyttötunnit tuli määrittää elinkaarikustannuslaskentaa varten, jonka tuloksia käsitellään myöhemmin kappaleessa 18.

6.7 Laskelmat työn kannalta

Tässä työssä valaistuksen tarvittavien käyttötuntiaikojen määrittämiseen käytetty DLI-laskuri ei huomioi auringon korkeuskulmaa, vaikka säteilytehon lisäksi sillä on merkittävä vaikutus säteilyn koostumukseen ja spektrijakaumaan [10]. Laskuri laski auringonvalosta saatavan DLI:n ainoastaan säteilymäärän perusteella käyttäen kaavaa 8, eikä säteilyn tarkemman paikoittaisen koostumuksen perusteella [26].

Kun auringon korkeuskulma on matala, on spektrijakaumassa enemmän pidempiaaltoista säteilyä, kuten punaisen ja kaukopunaisen värisävyjä, samoin varjoissa olosuhteissa on usein runsaammin pidempiaaltoista säteilyä ja varjoisten olojen kasvit monesti suosivat niitä enemmän [10; 26]. Tavallisesti kasvihuoneissa käytettävät solarimetrit kuitenkin mittaavat auringosta saatavaa säteilyenergiaa mitä käytetään perusteena valojen ohjaukselle, kuten Kauppapuutarha Verso Oy:n kasvihuone-tiloissa [32]. Kohteen kasvihuonehuoneautomaatio säättää valaistusta maksimivalotusajan ja solarimetrin mittaaman säteilytehon

perusteella ja siihen on ohjelmoitu on tietty vähimmäisraja auringon säteilyteholle, jolloin lamput syttyvät tai sammuvat.

Säteilyenergian kokonaismäärä ei kuitenkaan kerro, kuinka hyvin valo kasveille soveltuu. Niinpä jotta voidaan paremmin vertailla valoa erilaisista valonlähteistä, tulee käyttää mittayksiköjä, jotka kuvastavat fotonien määrää PAR-aallonpituuksilla. Tämänkaltaisia suureita ja yksiköjä ovat DLI, PPE, PPF ja PPFD. Kuten aiemmin on mainittu, jos myös säteilyn spektri tunnetaan, voidaan fotoniäärän perusteella ekstrapoloimalla laskea valon määrää vastaavat YPF-arvot, joissa otetaan huomioon kasvilajin yksilöllinen tai niiden keskimääräinen fotosynteesivaste eri aallonpituuksille. [25; 26.]

6.8 Kasvien vuorokausirytm

Käytännössä kasvien tarvitsema valotusaika ja valon määrä kuitenkin vaihtelevat riippuen lajista ja niistä tuloksista, joita viljelmästä yritetään saada. Esimerkiksi tropiikin kasvit saattavat tarvita jopa 40 DLI, kun taas kukkien liian pitkä valotusaika voisi saada ne kasvamaan vähemmän kauniiksi taikka sopusuhtaisiksi. [15; 26.]

Hankittavia valaisimia suunnitellaan käytettäväksi lehtisalaatin kasvattamiseen, jolle usein suositellaan 20-tuntista päivittäistä valotusaikaa eli fotoperiodia ja DLI:n suositellaan olevan vähintään 15 päivittäin [32].

Valottoman ajanjakson kasvit käyttävät lepäämiseen, tällöin niiden yhteyttämis-toiminta vähenee ja pimeässä ei tapahdu fotosynteesiä käytännössä lainkaan. Kuitenkin fotosynteesin aktiivisuus pienemmällä valon määrällä on tavallisesti lähes suoraan verrannollinen valon määrään, kuten luvussa 7.3 perustellaan [7; 10].

6.8.1 Kasvit pimeässä ja fotosynteesin induktio

Pimeässä kasvit käyttävät energianaan pääasiassa tärkkelysvarastoista niilakoon vapautuvaa sukroosia. Fytokromi-pigmenttimolekyylit reagoivat punaisen aallonpituuden valoon, jota on tavallisesti enemmän iltaisin ja auringon laskeutumisessa ja niillä on vaikutusta esimerkiksi kasvien hormonitoimintaan ja vuorokausirytmiiin. [7.]

Kun kasvit alkavat saada pimeässä-olon jälkeen valoa, kestää muutamia minuutteja ennen kuin yhteyttämistoiminta käynnistyy ja suurin mahdollinen hiilensidontanopeuden saavuttamiseen voi mennä jopa kymmeniä minuutteja. Tätä kutsutaan fotosynteesin induktioksi ja ilmiö johtuu siitä, että kasvin fotosynteesin hiilensidontareaktioiden tarvitsemat rubisco-karboksyylaasi ja sen karboksyloima RuBP eli ribuloosi-1,5-bisfosfaatti ovat riippuvaisia valoreaktioista ja niiden lopputuotteiden ATP:n (Adenosiini-trifosfaatin) ja NADPH:n (Nikotiiniamiidadieniini-di-nukleotidifosfaatin) vaikutuksesta. [7.]

6.8.2 Vuorokausirytmien säätely

Tutkimuksissa on selvinnyt, että kasvilla on myös monia muita tapoja vuorokausirytmensä säätelyyn. Esimerkiksi korkeat sokeritasot lyhentävät sitä ja niillä on vaikutusta kasvien vuorokausirytmiiä säätelviin geeneihin (GIGANTEA). Toisaalta etyleenikaasu, jota kasvi muutenkin käyttää monenlaiseen viestintään ja toimintansa säätelyyn, ja jolla on vaikutus esimerkiksi kasvin solujen ikääntymiseen, vaikuttaa myös vuorokausirytmiiä säätelviin geeneihin. Sekä korkeat sokeritasot, että suurempi määrä etyleeniä voivat lyhentää vuorokausirytmiiä, mutta korkea sokeritaso myös ehkäisee etyleenin vaikutusta geeneihin. [33.]

Vuorokausirytmii on edelleen kytköksissä muihin pidempien aikavälien rytmeihin, kuten vuodenaikojen kiertoon ja joiden kaltaisten pitkäaikaisten ikääntymisprosessien säätelyyn voimakkaasti vaikuttaa etyleeni. Niinpä on luultavaa, että häiriöt vuorokausirytmiiissä vaikuttavat myös muihin kasvin pitkäaikaisempiin

sykleihin. Mike Haydonin [33] mukaan säätelämällä näitä tekijöitä voisimme hienosäätää tuotantonopeuksia viljelysten tuottavuuden lisäämiseksi sekä parantaa kasvien ja hedelmien säilyvyyttä.

7 Kasvatusvalaistuksen tarvitsema teho, valontuotto ja spektri

Lähetettyjen ja kasvatusalueelle säteilevien fotonien lisäksi myös valon spektrijakauma on otettava huomioon kasveille soveltuvaa valaistusta ja niiden valontarvetta määritettäessä, sillä eri aallonpituuksien valo vaikuttaa kasveihin eri tavoin. Toisin sanoen valon määrän lisäksi myös mahdollisimman laaja ja monipuolinen valon aallonpituuskoostumus on otettava huomioon, kun arvioidaan kuinka paljon kasvit valosta hyötyvät [25; 26].

Käytännössä kasvatusvalaistuksesta saatava valon määrä harvoin vastaa auringonvalon tasoa, jonka PPFD-arvo voi olla suorassa auringonpaisteessa jopa yli 2 250 mikromoolia fotosynteesiaktiivisia fotoneja neliötä kohden sekuntissa. Tavallinen kasvatusvalaistuksen tuottama valon määrä vaihtelee noin välillä 70–300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Tarvittava valon määrä riippuu kuitenkin viljeltävästä kasvilajista ja jotkin lajit tarvitsevat kerralla enemmän valoa, kun taas toiset voivat pärjätä paremmin vähemmän kirkkaassa valossa. Tai ne voivat suosia erimittaista valotusaikaa eli fotoperiodia [10; 26].

7.1 Fotosynteesiin hyödynnettävä valo

Ei ole välttämättä vieläkään täysin selvää, miten ja kuinka paljon kasvit valon eri aallonpituuksia fotosynteesitoiminnassaan hyödyntävät [7; 10; 25]. Monien tutkijoiden mielestä näkyvän valon keskiosalla spektrikaistaa sijaitsevalla vihreällä valolla ja muilla sen lähellä sijaitsevilla aallonpituuksilla ei ole juurikaan vaikutusta kasvien fotosynteesiin.

Jotkut pitävät sopivana, mutta kuitenkin jonkin verran optimistisena, fotosynteesiin hyödynnettävän valon määrän määrittämiseksi esimerkiksi nettofotosynteesin laskemista varten kavaa 9.

$$I_{pur} \approx 0,668 \times \int_{425}^{500} I_{\lambda} d\lambda + 0,819 \times \int_{640}^{700} I_{\lambda} d\lambda \quad (9)$$

Kaavassa on summalaskettu aallonpituuden λ suhteen integroidut aallonpituuskaistojen 425-500 nm ja 640-700 nm PPFD-säteilytehot. I_{pur} on photosynthetically useable irradiance eli laskentatavan tuottama arvio fotosynteesikelpoisesta säteilystä.

Integroiduilla aallonpituuskaistoilla on niiden suhteellista keskimääräistä kvanttihyötysuhdetta ϕ vastaava kerroin. Kerroin 0,668 on 425-500 nm:n aallonpituuskaistan keskimääräinen kvanttihyötysuhde ja kerroin 0,819 on 640-700 nm:n aallonpituuksien, määritettynä McCreen useiden kasvilajien fotosynteesivasteeseen liittyvien tutkimustulosten perusteella [10].

Jos kaavalla määritetään fotosynteesikelpoista osuutta auringonvalon tavanomaisesta spektrikoostumuksesta PAR-alueella, saadaan tulokseksi 34,6 %, jonka perusteella suurilla tehoilla auringonvalon PAR-säteilystä enimmillään noin 770 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ voisi koostua fotosynteesikelpoisista fotoneista. Tutkijoiden mukaan metsän, tiheän viljelmän, korallitöyrään, leväkukinnon, syaanobakteerien tuotantolammikon tai levämaton ei kukaan tulisi käyttää enempää kuin 30–40 % tilannekohtaisesta PPFD-säteilystä, eikä kaava ole heidän mielestään kohtuuton arvio kokonaisnettofotosynteesin mallintamiseksi minkään happifotoautotrofyhteisön tapauksessa olettaen, että säteilytaso on korkea ja ne käyttävät klorofylli A:ta ydinfotosynteesipigmenttinään [10].

7.2 Uudempaa tutkimustietoa kasvien hyödyntämisestä valosta

Kuitenkin on olemassa myös uudempia LED-valaistukseen perustuvia tutkimuksia, joiden perusteella edellinen vuoden 2010 julkaisussa mainittu kaava 9 vaikuttaa selkeästi vanhentuneelta. Esimerkiksi tänä vuonna 2022 julkaistun tutkimuksen mukaan LED-valaistuksella on ollut kasvien kasvuun ja terveyteen kaikkein paras vaikutus useilla eri mittareilla mitattuna, kun spektrissä on ollut sinistä, punaista ja vihreää lediä, suhteissa 15 %, 35 % ja 50 %. Tutkimuksessa oli tosin käytetty hyvin pientä vain 40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPFD-arvoa, mutta jopa puolet vihreää valon värisävyä sisältävä valaistus oli silti selviytynyt voittajaksi kymmenestä testatusta hyvin erivärisestä valaistuksesta,

ja testauksessa oli luultavasti kohtalaisen vähäisessäkin valossa viihtyvä vesikrassi [34]. Lisäksi $40 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ voi kyllä olla juuri ja juuri riittävä riittävä valon määrä viljelyskäytössä joillekin kasvilajeille [26].

Arvioinnissa käytetyt mittapuut olivat pääasiassa glukosinolaattien, fenolisten yhdisteiden ja fotosynteesipigmenttien tuotanto, sekä eristetyn biomassan antioksidanttiset ominaisuudet. Vertailtavana oli laaja määrä erivärisiä LED-kokoonpanoja ja odotus oli, että sini-punaiset ledit tuottaisivat parhaan tuloksen [34]. Ilmeisesti vihreän absorptioon vaikuttaa kuitenkin voimakkaasti vallitseva säteilytaso ja -teho [34]. Toisaalta yksi syy kasvien kirkkaanvihreään väriin on heijastavuuden lisäksi tehokas punaisen absorptio, koska punainen on vastakkaisella puolella väriavaruutta [9; 26].

Lisäksi on saatu viitteitä siitä, että kasvien fotosynteesin kvanttihyötysuhde on varsinkin vihreillä, mutta myös punaisilla ja sinisillä valon värisävyillä huomattavasti parempi kuin kaavan 9 esittäneet tutkijat ovat arvelleet. Uudemman käsityksen mukaan kasvit voivat hyödyntää punaisesta ja sinisestä valosta lähes täydet 100 %, kun taas vihreän värisestä valosta ne tavallisesti hyödyntävät vain 90 % [7].

7.3 Nettofotosynteesin laskentakaava

Kasvatuspiireissä yleisesti arvioidaan, että tiettyyn rajaan asti 10 %:n lisäys kasvien saamassa valon määrässä tarkoittaa noin 10 %:n lisäystä niiden kasvunopeuteen. Niinpä ammattimaisessa kasvihuoneviljelyssä, jossa on otettava huomioon monia muitakin yrityskuluja kuin vain sähkönkulutus, tehokkaampi enemmän valoa tuottava kasvatusvalaistus voi lisätä yrityksen tuottoisuutta paljonkin. Kasvien mahdollisesta yhteyttämiskyvystä suhteessa valon määrään on kuitenkin olemassa myös tarkempia laskelmia, jollainen esitetään edellä.

Suhdetta C_3 -kasveihin kuuluvalle yksittäiselle fotosynteesisolujen kerrokselle optimaalisen PPF:n, todellisen PPF:n, nettofotosynteesin ja maksimifotosynteesin välillä voidaan pyrkiä mallintamaan yhtälöllä 10.

$$P_g = P_{max} \times \frac{I}{I_{opt}} e^{1-I/I_{opt}} \quad (10)$$

P_g on laskennallinen nettofotosynteesin määrä elektronien siirtonopeutena (ETR, Electron transport rate), mitattuna joko O_2 tuotannosta tai CO_2 sitomisesta.

P_{max} on edellisessä kaavassa maksiminettofotosynteesi, I on säteilytason PPF-arvo, I_{opt} on maksimifotosynteesin PPF-säteilytaso ennen prosessin tyydyttymistä ja e on neperin luku [10].

Kaavan tuloksena on laskettu, että jopa 50 % maksimifotosynteesistä on mahdollista kun $0,234120 \times I_{opt}$, ja fotosynteesi inhibitoituu 50 %, kun säteilytaso on $2,6734 \times I_{opt}$. Nuo suhdeluvut perustuvat kuitenkin määrittämisessä käytetyn kasvilajin yksilölliseen valontarpeeseen ja esimerkiksi oletusarvona optimaaliselle PPF-tasolle on ollut kohtalaisen korkea $700 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, jolloin C_3 -vaskulaarikasvien fotosynteesiprosessi yleensä tyydyttyy. [10.]

Tästä voi syntyä jonkin verran virhettä kaavan suhdelukuja soveltaessa erityisesti, jos kyseessä on jokin vähemmän valoa tarvitseva tai äärimmäisen paljon tarvitseva kasvi, vaikka luvut ovatkin jossain määrin yleistettävissä myös muille C_3 -tyypin kasveille, joita on lajeista yli 90 % jo jatka tuottavat hiilensidontakiertonsa lopputuotteena kolmihiihisen yhdisteen [7].

I_{opt} tarkoittaa prosessin kannalta sopivaa säteilytasoa eli saturaatiotasoa. Saturaatiotaso tarkoittaa sekä maksimaalista valon määrää, että vastaavaa hyötysuhdetta jonka kohdalla fotosynteesiprosessi lopulla tyydyttyy ja aktiivisuuden kasvu suhteessa PPF-säteilymäärän kasvuun pienenee erittäin paljon. [10.]

Kaavan mukaisesti erityisesti pienillä valon määrillä fotosynteesiaktiivisuuden kasvu on lähes suoraan verrannollista valon määrään, mutta kun valon määrä on yli 23 % optimaalisesta ja nettofotosynteesi tuolloin puolet teoreettisesta maksimista, aktiivisuuden kasvu alkaa viimeistään hidastumaan. Niinpä kaavan 10 perusteella jopa verraten pienehköillä valon määrillä on mahdollista saavuttaa jopa puolet maksimifotosynteesistä. Vaikka aktiivisuuden kasvu tämän jälkeen hidastuu kyseessä ei kuitenkaan ole saturaatiotaso, vaan saturaatiotaso tarkoittaa optimaalista hyötysuhdetta korkeammilla säteilytasoilla eli I_{opt} . [10.]

Kaavan 10 perusteella säteilytason ollessa korkea ja noin $2,6734 \times I_{opt}$, eli yli saturaatiotason, on prosessin hyötysuhde fotoinhibition vuoksi laskenut jo merkittävästi eli noin 50 %. Inhibitoituminen eli estyminen tarkoittaa sitä, että soveltuvasta säteilystä vain pienehkö osuus voidaan hyödyntää kasvin fotosynteesiprosesseihin. [10.]

Kaavaa voitaisiin luullakseni soveltaa varsin helposti riittävän tiheän salaattikasvuston tapauksessa, sillä tässä tapauksessa eri kasvuston tasojen integroiminen niiden sijaintisyvyyden perusteella fotosynteesimateriaalissa sekä arvojen korjaaminen kasvuston tiheyden ja valonläpäisevyyden mukaisella vaimennusaikavakiolla ei ole tarpeen [10]. Toisaalta lehtisalaatin optimaalinen säteilytaso tehokkaassakin viljelyssä on paljon alle $700 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, mistä syntyisi jonkin verran virhettä arvioon ja laskelmaan [26].

7.4 Sähköteho

Kasvien fotosynteesin kannalta kaikkein tärkein parametri on valosta saatavien yhteyttämiseen soveltuvien eli sopivan aallonpituuden omaavien fotonien määrä. Pelkästään kulutettu sähköteho ei ole niin keskeinen tekijä, paitsi kun huomioidaan valaisimen fotosynteesiaktiivinen fotonihyötysuhde eli PPE, joka ilmaisee lähetettyjen yhteyttämiseen soveltuvien fotonien määrän suhteessa kulutettuun sähkötehoon [26].

Kuitenkin Suomessa ja muissa viileissä maissa kasvihuoneiden valaistuksen hukateho voidaan usein hyödyntää kasvien lämmittämiseen. Spektri- ja kaumaan liittyvien seikkojen sekä hinnan lisäksi tämä on jopa tavanomainen syy, miksi lämpöä tuottavaa valaistusta kuten suurpainenatriumlamppuja edelleen suositaan ja vähemmän kuluttavaan LED-valaistukseen siirtymistä Suomen ilmasto-olosuhteissa hieman viivytellään. [15; 32.]

7.5 Valaisinten tuottama lämpö

Kasvit voivat saada lämpöä valaistuksesta neljällä tapaa; näkyvän valon alueen säteilyn absorptio, infrapunasäteily sekä infrapunasäteilyn ja lampun rakenteen lämmittämän ilman konvektiot. Suomen olosuhteissa voi kylmänä vuodenaikana kasvihuoneen energiantarpeesta ja kulutuksesta huomattavasti yli puolet syntyä lämmityksestä. Kasvit tarvitsevat sopivan lämpötilan kasvaakseen hyvin ja erilaisilla lämmitystavoilla on niiden kannalta erilaisia hyötyjä, esimerkiksi kasvatusalustan lämmittäminen tehostaa kuivumista ja infrapunasäteily on tasaisempi ja vähemmän kasvia kuivattava lämmitystapa, kuin jos luotetaan ilman kiertoon ja lämmön konvektioon. [15; 32.]

Kasvihuoneen lasitus ei ole erityisen hyvä lämmöneriste, vaikka eristävyys tosin riippuu myös materiaalista, esimerkiksi on olemassa eristeistä kasvihuoneisiin tarkoitettua lasitusta. Kasvihuoneiden lasitus myös päästää huomattavan osan kasvatusvalaistuksen valosta ulospäin, jolloin lämpöä ja valoa pääsee karkaamaan, ellei ole mahdollisuutta sulkea verhoja. Kohdekiinteistön tiloissa on kuitenkin talven pakkasia pakkasverhot, sekä varjoverhot ja pimennysverhot, joiden sulkemisen automatiikka voi käynnistää. [32.]

Oikeasta lämpötasapainosta huolehtiminen on kasvien kannalta tärkeää eikä myöskään liika lämpö ole niille hyvästä vaan tietyn rajan jälkeen niiden fotosynteesi pysähtyy kokonaan ja ne kuivuvat [7; 15]. Niinpä kasvihuoneessa on lämmön sopivaa säätelyä varten hyvin tärkeää mitata myös lämpötilaa ja esimerkiksi ilman virtaamaa. [15; 32.]

Koska mekaanista tehoa ei ole, kaikki valaisinten kuluttama pätöteho muuttuu lämmöksi joko tehohäviöiden tai valon kautta, ja erityisesti matalan valotehokkuuden valaisimissa lämpö on suurelta osin lähtöisin juuri teho- ja virtahäviöistä. [3; 4.] Virtahäviöt johtuvat siitä, että sähköinen resistanssi on hieman kitkan tapainen suure eivätkä elektronit suuriresistanssisessa johtimessa voi liikkua vapaasti, ja siksi niiden sisältämä energia hajaantuu ympäristöön. [18; 21.] Käytännössä tämä tarkoittaa valaistuksessa sitä, että kaikki sähköenergia ei muutu säteilyenergiaksi tai näkyväksi valoksi, vaan osa tehosta häviää juuri lamppujen ja kaapelien lämpenemisen myötä. [3; 4.]

8 Kasvihuonetilat sekä niiden sähkö- ja automaatiotekniikka

Kasvihuoneen valaistusinvestoinnissa on tarkoitus korvata aiempia suurpaineenatrium-valaisimia. Vanhimmat asennukset olivat vuodelta -92, joten vanhentuneen tekniikan tehottomuuden sekä käyttöiän päättymisen vuoksi uusintatarve lampuilla oli ilmeinen. Vanha valaistus on purettu pois uuden asennuksen tieltä sekä koska niiden muoviset liitäntälaitetekotelot olivat haurastuneet ja hajoilivat, mistä johtuen ne muodostivat paloturvallisuusriskin.

8.1 Kasvatustilat

Kiinteistön erilliset kasvatushuoneet ovat tyypiltään Viemose-Drigoba-merkkisiä blokkihuoneita ja niitä on kolme, osastot A ja B muodostavat yhden kokonaisen huoneen. Kasvatushuoneessa eli osastolla C, jossa valoja uusitaan, on yhteensä 75 kasvatuspöytää kolmessa rivistössä, joilla on kullakin kolme 18 valaisimista valaisinriviä.

Kaikkiaan kiinteistössä on kolme erillistä kasvatushuonetta, joissa yhteensä 220 pääasiassa Viemose-Drigoba-merkkistä noin 16 m² kokoista ja sivuttaiseen suuntaan 35–40 cm liikuteltavaa kasvatuspöytää. Lyhyemmät pöydät ovat 1,83 m x 8,2 m ja pidemmät 1,83 m x 10,2 m, korkeus maanpinnasta vaihtelee ja on noin 80 cm. Pöytien seasta löytyi myös jokunen Stål & Plast -merkkinen.

Pöydistä ja niiden toiminnasta on kuvia liitteessä 6 ja taulukossa 1 esitetään eri osastojen koot, pöytämäärät ja aiemmat valaisinmäärät.

Taulukko 1. Kasvatusosastojen koot, aiempien valaisinasennusten määrät, pöytämäärät, valaistuksen asennusteho ja neliömetrikohtainen asennusteho.

Osasto	Pinta-ala	Asennus-teho	Pinta-alan suhteen	Valaisin-määrä kpl	Pöytä-määrä kpl
Osasto A	443 m²	31,2 kW	110 W/m²	122	50
Osasto B	344 m²	48,8 kW	91,0 W/m²	78	26
Osasto C	1504 m²	98,4 kW	65,4 W/m²	162	79
Osasto D	792 m²	56,8 kW	71,7 W/m²	142	43

Pöytien alla on lämmityskaapeli, minkä lisäksi pöydät hoitavat osan kasvien automaattisesta kastelusta, kun niihin pumpataan vettä altpäin. Pääosan lämmitystarpeesta hoitaa kuitenkin Gasum Oy:ltä tuleva ylimääräinen lämmin käyttövesi, jota voidaan ohjata kiertämään laitoksen lämmitysputkistossa. Kasvihuoneen kastelujärjestelmään kuuluu myös roikkuvia kastelupuikkoja, joita laite-taan ruukkuamppeleihin.

8.2 Sähkötekniikka

Kiinteistön sähkötekniikka sisältää sekä automaatiojärjestelmän käyttämät uudempaa tekniikkaa olevat pää- ja ryhmäkeskukset, jotka ovat kohteen ulkopuolella konttisäiliössä eli pihakeskuksessa, että sisätiloista löytyvää vanhempaa suomalaista ITU- ja Gistele-merkkistä sähkö- ja kasvihuonetekniikkaa, joka on edelleen osaksi käytössä järjestelmien käsisäätöä varten. Liitteen 3 kuvissa näkyvät vanhempaa tekniikkaa olevat suomalaisvalmisteiset ITU-säätimet, sekä Priva automaatiojärjestelmän anturilaatikko, joka mittaa esimerkiksi lämpötilaa ja ilmankosteutta.

Kiinteistön pääasiallisesta sulake- ylivirtasuojauksesta huolehtivat pää- ja ryhmäkeskukset PK sekä RK1 ja RK2 löytyvät kiinteistön ulkopuolelta konttisäiliöstä niin kutsutusta pihakeskuksesta, läheltä ABB:n 20 kV:n muuntajayksikköä. Osastot A ja B ovat ryhmäkeskuksen 1 syöttämiä ja osastot C ja D ovat ryhmäkeskuksen 2 syöttämiä. Lisäksi keskushierarkiassa pirstaloidut osakeskukset RK6 ja kuvassa 10 näkyvä RK98, jotka ovat vanhempaa tekniikkaa ja sijaitsevat kohdekiinteistön sisällä, ovat käytössä vain automatiikan ohittamiseksi verhojen sekä luukkujen käsiohjausta varten.



Kuva 10. Turkulaisen Gistele Oy:n valmistama alakeskus RK98, jota voidaan käyttää luukkujen ja verhojen käsiohjaukseen.

Pihakeskuksesta löytyy monipuolinen vuonna 2013 asennettu VE-30-96 Carlo Gavazzi-tehoanalysaattori. Kuitenkin laitoksen kyseinen tehoanalysaattori on pimennyt kokonaan eikä päällisen tarkastelun perusteella edes ota virtaa, vaikka onkin säännöllisesti aiemmin näyttänyt lukemia mittaritaulussaan ja ollut siis toiminnassa. Tehoanalysaattorin toiminta tulee hoitaa kuntoon, mutta ongelman

uutuuden vuoksi ratkaisutapa on vielä epäselvä. Kuvassa 11 on pihakeskuksen kennosto, jonka keskellä on tehoanalysaattorin LCD-näyttö.

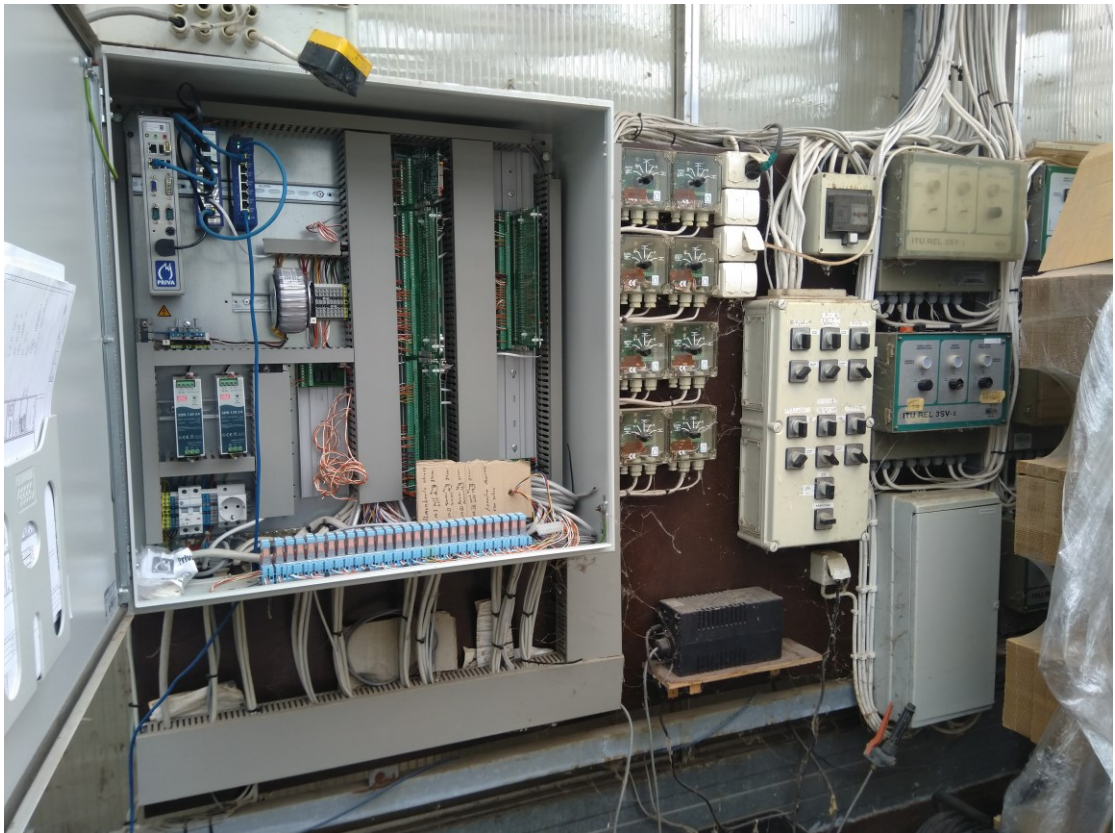


Kuva 11. Pihakeskuksessa sijaitseva kennosto, jossa on nykyinen PK sekä RK1 ja RK2.

Kymmenen RK2:n valaistusryhmistä on tällä hetkellä kokonaan käytössä uusittavan kasvihuoneosaston C valaistusta varten, niillä on johdonsuojakatkaisijana 16 A:n vikavirtasuojaja ja ne ovat 3-asentoisen kontaktorilähdön takana, eli niitä ohjaavassa kytkimessä on sekä manuaalinen, että automaattinen säätömahdollisuus. Lisäksi ryhmäkeskuksessa 2 on ryhmäjohtoille kaksi 63 A:n varapaikkaa ja paljon 25 A:n varapaikkoja, joista yksi voidaan ottaa 16 A:n sulakkeella käyttöön ilman suurempia järjestelyjä ja RK2:n syötön sulaketta kasvattamatta. Sulakesuojauksen riittävyttä investoinnin yhteydessä on pohdittu tarkemmin luvussa 12. Keskuksia syöttävät kaapelit, ryhmäjohdot ja sulakesuojaus.

8.3 Kasvihuoneautomaatio

Käytössä oleva Priva Connex -automaatiojärjestelmä on erittäin monipuolinen ja sillä voidaan järjestää kasvihuoneen toiminta käytännössä lähes täysautomaattiseksi. Kuitenkin monet kasvinviljelyyn liittyvät prosessit kuten kukkien kastelu voivat toimia paremmin, jos niitä ohjailee ihminen suoraan [32]. Kuvassa 12 on Connex-järjestelmän automaatiokeskus ja sen oikealla puolella ITU-säätimiä.



Kuva 12. Automaatiojärjestelmän automaatiokeskus vasemmalla luukku avoinna. Oikealla ITU-järjestelmän säätimiä ja releyksiköitä.

Priva Office Direct Client -käyttöliittymän kautta automatiikka voidaan ohjelmoida ajamaan monenlaisia prosesseja ja suorittamaan monenlaisia tehtäviä, lisäksi sitä kautta saadaan paljon tilastoitua tietoa kasvihuoneen ja laitteiston toiminnasta. Tähän sisältyvät esimerkiksi tuuletuksen ja lämmityksen ohjaukseen liittyvät tiedot, tiedot auringosta saatavasta säteilytasosta, ilman

kosteustasapainosta, hiilidioksidipitoisuudesta, veden happamuudesta ja ravinnepitoisuudesta, kastelun toteutumisesta ja säätilasta, sekä verhojen (pimennys- varjo- ja pakkasverhot) ohjauksesta.

Kasvihuoneautomaatiikassa käytetään yleisesti radiometristä säteilyenergiamittaria ja säteilyintegraattoria eli solarimetriä kokonaissäteilyenergian määrittämiseksi, näin voidaan esimerkiksi kasvihuoneen saaman säteilysumman $J = Ws$ perusteella säädellä kastelua ja valaistusta [15]. Myös tämän työn elinkaarikustannuslaskennassa on hyödynnetty päivittäistä säteilysummaa useamman vuoden ajanjaksolta valojen käyttötarpeen ja laskelmissa tarvittavan vuosittaisen käyttötuntiajan määrittämiseksi. Tämä oli tarpeen, koska järjestelmän tiedoissa ei ole tallennettuna tarkkoja aikoja valojen käytöstä, nyt ominaisuus kuitenkin on käytössä.

Automaatiojärjestelmä hoitaa valaistuksen säätelyä ja sillä ohjataan myös verhomootteita, joita kasvihuoneen verhoille kuten pakkas- pimennys- ja varjoverhoille on. Valaistuksen ohjaus tapahtuu auringonvalosta mitatun säteilytehon ja ajastuksen perusteella. Kun mitattu säteilytaso on jonkin aikaa alle tai yli $150 W/m^2$ eli wattia neliömetrillä, ohjataan valot vastaavasti päälle tai pois. Toisaalta auringon säteilyteho kasvihuoneen ulkopuolella on silloin suurempi, koska automaatiojärjestelmä käyttää ohjauksessa myös lasituksenläpäisykerrointa 70 %. Tällä hetkellä 20 tuntia valoa tarvitseville kasveille lepoaika on asetettu kello 00.00–04.00. [32.]

Kasvien kastelu on pääasiassa järjestelmän ohjauksessa ja ajastinperusteinen, kesäaikaan toinen kastelukerta tehdään auringosta saatavan valon määrän lasiessa. Kukkien kastelun automaatiikka suorittaa kuitenkin ihmisen erillisestä käskystä ja se toimii siis puoli-automaattisesti. Liitteessä 4 on kuvattuna pienempiä lämmityspumppuja ja rakenteilla oleva toinen kiertovesiallas.

Kun lämmitys ei ole päällä, kierrättää pumppu kasvihuoneosastojen erillisissä lämmityspiireissä vain haaleaa kylmän runkolinjan vettä. Kun kolmitieventtiili aukaisee kuuman runkolinjan, virtaa putkiin Gasum Oy:ltä tulevaa ylimääräistä

kuumaa käyttövettä. Kuuman runkolinjan vesi lämmityspiirin kierrettyään palautuu kylmään runkolinjaan. Ala- ja yläputkista muodostuvia piirejä pumppuineen on yhteensä yhdeksän, joista yksi on suuremman puoleisen taajuusmuuttajan syöttämä ja hallin lämmitystä varten, kuvassa 13 näkyy seinällä oleva lämmityspiirin putkisto.



Kuva 13. Kuvan lasitetun seinän edessä ovat lämmityspiirin yläputket, ja niiden takana on kasassa olevia pimennysverhoja sekä osasto C.

Suomessa ja muissa kylmemmänpuoleisissa maissa on suuri etu, mikäli kasvien ja kasvihuoneen lämmittämiseen voidaan käyttää paljon energiaa, kuten tässä tapauksessa biokaasulaitoksen ylimääräisen lämpimän käyttöveden ansiosta on mahdollista. Muutoin kasvihuoneen lämmityskustannukset olisivat varsin kookkaat ja yrityksen kannattava toiminta luultavammin erittäin hankalaa, tai ainakin myytävät kasvikset ja tuotteet voisivat olla paljon kalliimpia silloin.

Kun venttiili aukaistaan, putkien veden lämpötilan muutoksen ΔT kasvu ja kasvunopeus on suoraan verrannollinen kuumen käyttöveden virtaamaan, joka riippuu venttiilin aukeamasta ja aukaisemisnopeudesta, sekä kääntäen verrannollinen ilman lämmitysputkia jäähdyttävään vaikutukseen, joka on kuitenkin mitätön Gasum Oy:ltä tulevan suuren lämmitystehon vuoksi.

Siispä kun venttiili ohjataan aukeamaan hidastetusti tai vain jonkin verran, voidaan piirissä kulkevan lämmitystehon kasvua säätää niin etteivät kasvit häiriinny. Tämä on niille eduksi erityisesti talven pakkasilla ja muina kylminä aikoina. Gasumilta tulevan hukkalämmön lämmitystehoa mitataan virtausmittaukseen perustuen, kuvassa 14 näkyvät kylmän ja kuumen runkolinjan putket sekä niiden virtausmittari.



Kuva 14. Grundfos-merkkinen virtausmittari, joka mittaa Gasum Oy:n biokaasulaitokselta tulevan ja palaavan lämmitysveden virtaamaa ja lämpöä.

Virtausmittarista saadaan myös lämpötilan mittauksen ansiosta tietoa lämmityspiirien tehonkulutuksesta. Viereisellä seinällä on pieni lämmitystehoa

ilmaiseva näyttö joka ei näy kuvassa. Korkeammalla virtausmittarin yläpuolella on runkolinjojen putkissa kookas suodatinosa. Lämmityksen säädöstä kasvien kannalta mahdollisimman sopiviin syötettyihin parametreihin huolehtii automaatiojärjestelmä kuvan 15 kolmitieventtiilin avulla.



Kuva 15. Lämmityspotkiston toimintaa säätelevä kolmitieventtiili ja yksi lämmityspotkiston pienemmistä pumpuista, joka on teholtaan noin 500 wattia.

Ulkona tapahtuva raakaveden otto toimii automatiikan pinnankorkeuden ohjauksella, eli kun automatiikka huomaa veden laskeneen 20 cm raakaveden altaassa, käynnistyy pumppu ja siirtää ulkoa vettä. Automaatiojärjestelmä vahtii myös liitteen 6 kiertovesialtaan vedensyöttöä osastolla B, muttei ohjaa sitä mitenkään vaan paluuvesi siirtyy painovoimaisesti. Osastolle D on rakenteilla myös uusi kiertovesiallas, joka mahdollistaa entistä paremman veden säästämisen ja suodattamisen, kun sitä voidaan kierrättää kahdessa eri altaassa, liitteissä 4 ja 5 näkyy uusi rakenteilla oleva vesiallas osastolla D.

Riittävä tuuletus ja ilmanvaihto kasvihuoneissa on tärkeä ominaisuus, jotta ympäristön kosteustasapaino pysyy kasveille sopivana. Jos ilma kasvihuoneessa seisoo ja on vailla riittävää tuuletusta, eivät niiden multa ja juuret sekä kasvu- alusta kuivu riittävästi. Liika mullan ja kasvatusalustan kosteus taas ei ole kasveille hyväksi vaan esimerkiksi homeita muodostuu silloin helpommin, mutta myös juurten toiminta voi tällöin heikentyä. Liitteessä 1 on kuva Priva Connex -järjestelmän automaattiosäätimestä, joka ohjaa tuuletusta, mutta on myös otettu käyttöön lannoiteseoksen sekoittamisessa, sekä mittaa siitä happamuutta ja ravinnepitoisuutta. Mahdollisuus avata kasvihuoneen kattoluukut automatisoidusti osaltaan parantaa tuuletusmahdollisuuksia, liitteessä 5 on lisäksi kuvat luukku- moottoreista, verhomootoreista sekä lämmitysjärjestelmän yläputkista.

9 Uusittava ja jäljelle jäävä valaistus

Investoinnissa korvattavat valaisimet ovat suurpainenatriumvalaisimia. Aiempia kasvatusvaloja oli 162 kappaletta teholtaan 600 W:n valaisimia, malli oli saksalaisvalmisteinen Poot. Valaisimet uusitaan kiinteistön kaikkein suurimpaan osastoon eli C, jonka pinta-ala on noin 1504,0 m² ja kasvatuspinta-ala noin 1350 m². Huoneen mitat ovat noin 30 kertaa 50 metriä.

Korvattavat vuoden -92 saksalaiset 600 W:n ja 230 voltin Poot-suurpainenatriumvalaisimet on poistettu vaarantuneen rakenteensa vuoksi käytöstä, joten aiemman valaistuksen toiminnasta ei voitu tämän työn mittausosiossa kerätä tietoa. Tarkempi mittaustieto olisi kuitenkin tuonut vain hyvin vähäistä lisäarvoa ja johtuen tavasta millä valaistuksen sopivaa päivittäistä ja vuotuista käyttötuntiaikaa selvitettiin elinkaarikustannuslaskelmaa varten, mittaus olisi antanut vanhoista elinkaarikustannuksista todellisemman kuvan siinä tapauksessa, jos valo- loja olisi tosiasiassa ohjattu juuri laskennassa käytetyllä tavalla.

Tarkkaa laskentatapaa aiemmista käyttötunneista ei kuitenkaan voitu käyttää koska automatiikka ei ollut tallentanut tosiasiallisia käyttötuntiaikoja, joten so- piva vuotuinen käyttötuntiaika piti selvittää laskemalla säteilysummista. Lasken- taa varten tosin tarvittiin tietoa valaisinten tuottaman valon määrästä, mutta

johtuen laskentatavan eroavaisuudesta tulosta ei olisi tarkemmilla tiedoillakaan voitu pitää aivan samanlaisena kuin oikeat käyttötunnit ovat olleet. Korvattavien Poot-valaisimien tuottamasta keskimääräisestä valon määrästä kasvatusalueella oli ennestään riittävän tarkkaa käsitys mittausten ja arvioiden perusteella, jotta sopiva vuotuinen käyttötuntiaika vanhan valaistuksen elinkaarikustannusten laskentaa varten voitiin riittävällä tarkkuudella selvittää.

Muutoin kiinteistön yhä kasvatuskäytössä olevat valaisimet ovat vaihtelevan merkkisiä 400 W:n suurpainenatrium-valaisimia ja loppuissa kolmessa osastossa niitä on 122 + 78 + 142 kappaletta, joista 201 kappaletta eli osastojen A ja B kasvatusvalaisimet ovat Hel-lightejä. Loput ovat tuntemattoman valmistajan vastaavan tehoisia valaisimia, jollainen on kuvassa 16.



Kuva 16. Osaston D tuntemattoman valmistajan 400 W:n suurpainenatrium-valaisimet, päädyn tarrassa lukee malli: 265 NA 400L.

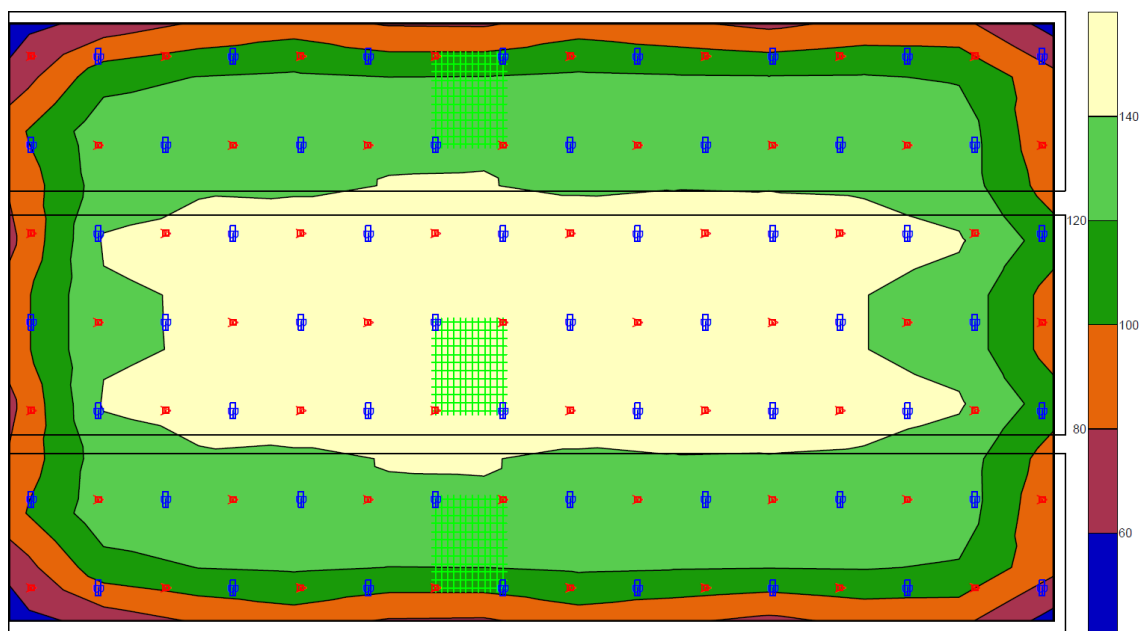
Korvattavien ja edelleen kiinteistöstä löytyvien HPS-valaisinten loistehon kompensointi on hoidettu yksittäisillä valaisinkohtaisilla kondensaattoreilla, joista

huolimatta kiinteistön sähkönkulutukseen kuuluu toisinaan myös pieni osuus loistehoamaksua. Kompensointi ei poista induktiivisen loistehon osuutta kiinteistön sähkönsiirtokustannuksista kokonaan. Kuitenkaan liittymä ei saa olla pysyvästi kapasitiivisella loisteholla eli ylikompensointiin ei voida alkaa, joten sopivaa kompensoinnin tasoa käsitellään luvussa 19.

10 Suunnitteilla olevat sähkötekniiset muutokset

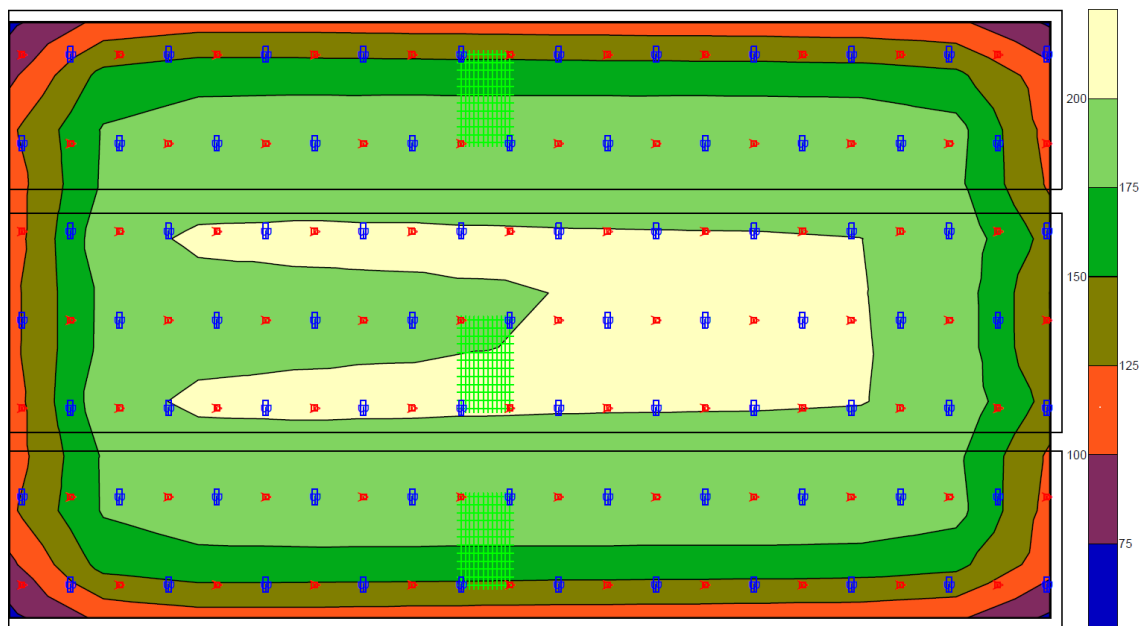
Verso Oy on saanut Schtelig Oy:ltä kaksi eri valaisinmäärän sisältävää tarjousvaihtoehtoa LED- ja HPS-yhdistelmävalaistuksesta kasvinviljelyyn. Tarjoukset sisältävät Gavita Nordic:in tekemät valaistuslaskennat asennusten kasvatusaluelle tuottaman keskimääräisen PPF:n eli fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheyden määrittämiseksi.

Kuvat 17 ja 18 ovat valaistuslaskentaohjelman tuottamia ja ensimmäinen on pienemmän valaisinmäärän sisältävälle tarjoukselle. Laskenta on tehty Calculux Indoor 5.0b -ohjelmalla.



Kuva 17. Tarjouksen 1 valaisimille suoritettu valaistuslaskenta. Arvot ovat PPF-arvoja eli kuvastavat fotosynteesiaktiivisten fotonien vuota, joka on yksiköltään $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. [32.]

Kuvassa 18 on suuremman valaisinmäärän sisältävän tarjouksen valaistuslaskenta, huomaa kuvien eri indeksit. Kuvien 17 ja 18 kirkkaanvihreät ruudut kuvastavat aluetta, jolta laskentaohjelma on laskennassa arvot määrittänyt ja joiden perusteella on laskettu keskimääräiset valon määrät huoneessa.



Kuva 18. Tarjouksen 2 valaisimille suoritettu valaistuslaskenta, arvot ovat PPF-arvoja eli kuvastavat fotosynteesiaktiivisten fotonien vuota, yksiköltään $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Kuvissa 17 ja 18 on eri indeksit.

Valotehokkuus ja kasvatuskäytössä fotosynteesiaktiivinen fotonitehokkuus PPE ovat olennaisia ominaisuuksia eri valaistusvaihtoehtoja vertailtaessa, mutta tulisi ottaa muitakin tekijöitä huomioon ennen kuin tekniikkaan investoidaan.

Valotehokkuuden lisäksi huomioon tulisi ottaa myös esimerkiksi asennuksen sähköteho, hankinta- ja asennuskustannukset, käyttökustannukset eli muun muassa käyttötunnit ja sähkön hinta sekä valaistuksen valontuotto ja spektriominaisuudet kasvien ja ihmisen näkökulmasta. Investoinnissa voi olla suotavaa huomioida myös huoltokustannukset, tilojen valaisintiheys- ja jakauma, valaisinten kestävyys ja takuu, valaisinten ja tilojen varjonmuodostus, varaosien saatavuus sekä asiakaspalvelu.

10.1 Tarjous 1

Tarjous 1 sisältää 56 + 56 kappaletta Philipsin Signify Toplight 520 W:n Green-Power DR/B LED-valaisimia ja Gavitan 1 000 W:n GAN-electronic suurpainenatriumvalaisimia. Laskettu keskimääräinen fotosynteesiaktiivinen fotonivuon tiheys kasvatusalueella valaisinasennuksella on 119–146 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Pienempi arvo on koko huoneen keskimääräinen valon määrä ja jälkimmäinen kirkkaimman keskialueen keskimääräinen valon määrä eli korkeimmat arvot, jotka kyseisillä valaisimilla ja valaisintihydellä voidaan saavuttaa. Seuraavassa on luettelo investoinnille tarjouksessa ilmoitetuista hinnoista:

Hinta yht. 49 900 € ilman alv. %.

- LED-valaisimet 35 000 €
- HPS-valaisimet 10 150 €
- Asennuskiskot 2 300 €
- Valmiskaapelit 2 450 €

Luetelmasta käy ilmi mahdollisen investoinnin alkukustannuksia valaisintyyppin ja asennustarvikkeen mukaan. Tarjouksen 1 alkuinvestointi on hinnaltaan huomattavan paljon pienempi kuin tarjouksella 2, mutta toisaalta myös tarjouksen valaisinmäärä olisi vain noin kaksi kolmannesta siitä mitä aiemmassa asennuksessa. Kuitenkin suuremman valon määrän vuoksi fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheyden kasvatusalueella luvataan olevan kirkkaammassa osassa huonetta jopa yli kaksinkertainen aiempaan 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ verrattuna.

10.2 Tarjous 2

Tarjous 2 sisältää 77 + 77 kappaletta Philipsin Signify Toplight 520 W:n GP DR/B LED-valaisimia ja Gavitan 1000 W:n GAN-suurpainenatriumvalaisimia. Laskettu keskimääräinen fotosynteesiaktiivinen fotonivuon tiheys kasvatusalueella valaisinasennuksella on 177–201 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Pienempi arvo on koko huoneen keskimääräinen valon määrä ja jälkimmäinen kirkkaimman keskialueen keskimääräinen valon määrä eli korkeimmat arvot, jotka kyseisillä valaisimilla ja

valaisintihedellä voidaan saavuttaa. Seuraavassa on luettelo investoinnille tarjouksessa ilmoitetuista hinnoista, kaikki hinnat ilman arvonlisäveroprosenttia:

Hinta yht. 67 400 € ilman alv. %.

- LED-valaisimet 47 900 €
- HPS-valaisimet 13 900 €
- Asennuskiskot 2 300 €
- Valmiskaapelit 3 300 €

10.3 Gavita GAN Electronic 1 kW / 400 V suurpainenatrium-valaisimet

Valaisinpaketeissa on eriävä määrä valaisimia, mutta muuten tekniikka on samanlaista. Molemmat tarjoukset sisältävät Gavita GAN-suurpainenatriumvalaisimia ja niiden kanssa yhteensopivia Philipsin suurpainenatriumlamppuja, joille valmistajat ilmoittavat seuraavia arvoja ja tietoja:

Gavita GAN Electronic 1 kW / 400 V suurpainenatrium-valaisimet

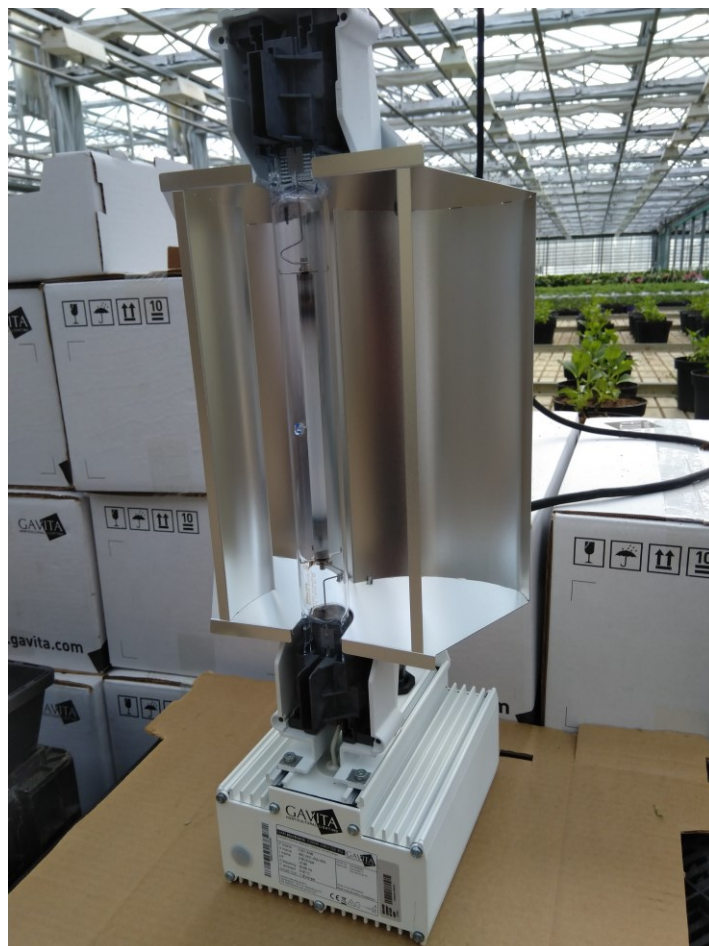
- Ilmoitettu kokonaistehontarve 1031 W (+-3 %) ja 2,6 A
- Syöttöjännite 400 voltia AC +-10 %
- Syttymisjännite 3,5 kV
- $\cos(\varphi)$ noin 0,98
- Taajuus 50–60 Hz
- Harmoniset yliaallot < 10 %
- EcomaxMiro-heijastin
- Ripustuskoukut 45x50 mm:n kiskoille (c-profiili, pituus 6 mm + jatko-palat)
- Arvokilvessä ilmoitetut liitäntälaitteiden häviötehot ovat 31 W, datalehtien ja internetin mukaan työn laskennoissa käytetty 50 W. [35.]

Sis. Philips MASTER GreenPower Plus 1000 W EL/5X6CT lampun

- Energiankulutus tuhannelle tunnille 1116 kWh / 1000 h
- Ilmoitettu PPF-valontuotto eli fotosynteesiaktiivinen fotonivuo 2100 $\mu\text{mol/s}$
- Nimellinen laskennallinen valovirta 143 000 luumenia (lm)

- Vastaava värilämpötila 2 000 K
- Yleinen värintoistoindeksi $R_a = 38$
- Käyttöaika kunnes 10 % lampuista pimenee, 10,000 h
- Eloonjäämisprosentti 15,000 h jälkeen, < 60 %
- PPF-pysyvyyskerroin eli fotosynteesiaktiivisen fotonivuon pysyvyyskerroin, 95 % 10,000 h kohdalla
- Pisin syttymisaika 300 s
- Uudelleensyttymisaika 5 min (min/max)
- Paino 0,111 kg, sisältää 42,0 mg elohopeaa (Hg). [36.]

Kyseiset Gavitan GAN -valaisimet ovat sähköteholtaan kohtalaisen tehokasta suurpainenatrium-valaistustekniikkaa. Kuvassa 25 on uusi Gavitan HPS-valaisin, rakenteeseen kuuluu kaksikantainen lamppu.



Kuva 19. Käyttämätön Gavitan 1 000 W:n suurpainenatriumvalaisin, jossa on kaksikantainen Philips-lamppu. Liitäntälaitteet ovat sisäänrakennettuina.

Gavitan suurpainenatrium-valaisimet on suunniteltu myös kasvinviljelyä ajatellen, sekä erityisesti alustavan asennussuunnitelman mukaiseen ristikkäiseen valaisutapaan, jossa valaisimia on huoneen katossa symmetrisesti asennettuna useita.

Valaisinpaketti sisältää myös PRO W 150DE -heijastinosan, joka on Miro-alumiinia. Heijastinosan heijastaman valokeilan leveys on sama kuin LED-valaisimilla eli 150 astetta. PPE eli fotosynteesiaktiivinen fotonitehokkuus lamputta on noin $2,1 \mu\text{mol}/\text{J}$ eli mikromoolillista fotoneja kutakin joulea kohden. Liitteessä 4 on tarkempi kuva laitteen arvokilvestä.

10.4 Philips LED Toplight GP Compact 520 wattia

Philipsin Toplight valaisimet kuluttavat muiden LED-valaisinten tavoin huomattavasti vähemmän sähköä kuin suurpainenatriumvalaistus, sillä niiden PPE-hyötysuhde on paljon parempi. Seuraavassa luetelmassa on valmistajan Philips Toplight valaisimille ilmoittamia arvoja ja tietoja:

Philips Toplight Compact DR/B GreenPower LED-valaisimet

- Jännite 200–400 V
- Ilmoitettu PPF valontuotto noin $1800 \mu\text{mol}/\text{s}$, sähköteho 520 W
- PPE-hyötysuhde, $3,5 \mu\text{mol}/\text{J}$, $3,8 \mu\text{mol}/\text{J}$ jos himmennetty 50 %
- $\cos(\varphi)$ noin 0,98
- Leveä valokeila 150°
- Himmennysalue 10–100 %
- Ei käynnistysvirtapiikkiä
- Taajuus 50–60 Hz
- Harmoniset yliaallot $< 15 \%$
- L-kerroin L95, 36 000 h
- Kotelointi IP66
- GPL ripustuskoukut 45x50 mm:n kiskoille
- GPL naarasliittimet virransyötölle
- Valoa heijastava valkoinen pinta

Kyseiset lamput edustavat markkinoiden parhaimmistoa kasvinviljelyyn soveltuvissa LED-valaisimissa ja niiden PPF-valontuotto on lähes yhtä suuri kuin suurpainenatriumien, vain 300 $\mu\text{mol/s}$ pienempi. Kuvassa 20 on nähtävissä Philipsin Toplight Compact -valaisimen ulkomuoto.



Kuva 20. Philipsin Toplight GreenPower Compact LED -valaisin, jolla on sinipunaisia ledejä sisältävä kennosto ja valkoinen valoa heijastava pinta [17].

DR/B (Deep Red/Blue) LED -valaisimet tuottavat lähes pelkästään syvänpunaisen ja sinisen väristä valoa, näistä sininen erityisesti täydentää hyvin suurpainenatriumvalaistuksen spektriä ja parantaa väriominaisuuksia kasvien kannalta, minkä lisäksi valaistus yhdistyvän eli additiivisen väriensekoittumisilmiön vuoksi kokonaisuudessaan myös näyttää luonnollisemmalta ja valo valkoisemmalta.

Myös syvänpunaiset tai kaukopunaiset valon värinsävyt ovat kasvien fotosynteesiprosessien hyvän toiminnan kannalta erittäin hyödyllisiä ja suurpainenatriumpurkauslamput eivät tuota niitä kovinkaan paljon [14; 27]. Philips Toplight LED -valaisimet onkin suunniteltu erityisesti kasvihuonevalaistukseen ja tämänkaltaista yhdistelmävalaistusta varten [17].

11 Asennussuunnitelmien toteuttamisen vaatimukset

11.1 Standardin erityisvaatimukset kasvihuonekohteille

Laki määrittelee tietyt vaatimukset pienjänniteasennuksille, jotka käyvät ilmi SFS 6000 -standardista, ja kasvihuoneille on omia erityisvaatimuksia. Kasvihuoneet kuuluvat erityisvaatimustensa puolesta ryhmään maa- ja puutarhatalouden tilat, joiden erityisvaatimukset käyvät ilmi SFS 6000 -standardin osasta 7–705 Erikoistilojen ja täydentävät vaatimukset [37, s.60].

Kasvihuoneiden valaisinryhmissä ja palosuojauksessa tulee standardin 705.411.1 mukaan olla syötön automaattisessa poiskytkennässä uudenlainen riittävän nopea vikavirtasuojaus [37].

Standardin 705.410.3.5 mukaan perussuojaus esteillä ja sijoittamalla kosketusetäisyyden ulkopuolelle tiloissa on kielletty [37].

Standardin 705.410.36 perusteella SFS 6000-4-41:n liitteessä 41C määriteltyjen suojausmenetelmien käyttö on kielletty, eli eristävä ympäristö, maadoittamaton paikallinen potentiaalintasaus ja sähköinen erotus syöttämään useampaa kuin yhtä kulutuslaitetta [37].

Standardin 705.514.5.3 Tunnistaminen ja Piirustukset mukaan seuraavat dokumentit pitäisi valmistella ja antaa asennuksen haltijalle; pohjapiirros, josta käy ilmi kaikkien sähkölaitteiden sijainti, kaikkien upotettujen kaapelien reitit, pääkaavio ja potentiaalintasauksen kaavio, josta selviää potentiaalintasausliitännöjen sijainnit [37].

Standardissa 705.537.2 määritellään lain vaatimus, että kukin asennus tai asennuksen osa on voitava erottaa yhdellä erotuslaitteella SFS 6000-5-53 mukaisesti [37].

Standardin 705.411.4.3 mukaan, kun asennusta syötetään TN-järjestelmästä, asennuksessa on käytettävä erillistä nolla- ja suojajohdinta liittymispisteeltä lähtien [37].

Standardin 705.55.1 mukaan pistorasioiden maa- ja puutarhatalouden tiloissa tulee olla -SFS-EN 60309-1 ja 60309-2 mukaisia tai kansallisten standardien edellyttäen, että mitoitusvirta ei ylitä 16 A [37].

Standardi 705.559 määrittelee valaisinten ja valaisinasennusten vaatimukset, siinä ei kuitenkaan ole kovinkaan paljon erityistä kasvihuoneiden kannalta vaan enemmän maa- ja puutarhatalouden muiden alojen kannalta. Valaisinten on oltava SFS-EN-60598 mukaisia, tai kansallisten standardien jos niiden ryhmäjohton virta ei ylitä 16 A, ja ne on asennettava paikkoihin, joista on riittävän suuri etäisyys palavista materiaaleista ottaen huomioon tavaroiden säilytyksen ja muunlaiset vaaraa aiheuttavat työprosessit tiloissa. Turvaetäisyydet on annettu valmistajan asennusohjeissa. Viitataan myös SFS 6000-4-42:n lukuun 422. [37, s.65]

Myös standardissa SFS 6000-1-2 Osa 8–802: Täydentävät vaatimukset, Sähköasennusten muutos ja laajennustyöt on paljon tämänkaltaista kohdetta koskevia erityisvaatimuksia [37, s.261]. Nämä ovat vain osa kohdetta koskevista lain erikoisvaatimuksista, jotka määritellään tarkemmin SFS 6000-standardin osassa 1–1 Pienjännitesähköasennukset osat 1–6 ja osassa 1–2 Erikoistilojen ja täydentävät vaatimukset osat 7–8 [37; 38].

11.2 Valaisinten tarvitsema virta

Gavitan HPS-valaisinten toimintajännite, jota jännitemuuntajalla syötetään, on 400 volttia ja Philipsin LED-valaisinten on 230 volttia, ja ne on lisäksi tarkoitus asentaa eri ryhmiin, joten niiden kuluttamat virrat on laskettava erikseen.

Nimellisesti teholtaan 1050 W ja jännitteeltään 400 V HPS-valaisimen kuluttama virta tehokertoimella $\cos(\varphi) = 0,98$ on noin 2,68 A.

Lampun painotetun energiankulutuksen kanssa laskettuna (1116 kWh / 1000 h) virrankulutus on 2,97 A [36], mutta koska se ei kuulu varsinaiseen asennustehoon lampun energiankulutusta ei tavallisesti huomioida asennuskapasiteettia tai sopivaa suojalaitteiden mitoitusvirtaa määritettäessä, toisin kuin liitäntälaittehäviöt [39].

Teholtaan 520-wattisen LED-valaisimen 230 voltilla tarvitsema virta tehokertoimella $\cos(\varphi) = 0,98$ on noin 2,31 ampeeria.

Yksi kolmevaiheisella MMJ 5x2,5S-kaapelilla liitetty 16 A:n ryhmä kykenee 230 voltilla syöttämään virtaa yhteensä 48 A, tai yksivaiheisella 400 voltin jännitteellä 27,6 A [21].

Niinpä saadaan, että 16 A:n ryhmään mahtuu HPS-valaisimia sen ryhmäjohton ylikuormitussuojan mitoitusvirran perusteella 10,3 kpl eli kymmenen, ja uusia LED-valaisimia mahtuu 20,8 kpl eli kaksikymmentä. Tällöin kaikkien suurempitehoisen tarjouksen 2 valaisinten asentamiseen tarvitaan kaksitoista valaisinryhmää.

LED-valaisimia olisi myös mahdollista kytkytellä jonkin verran yhteen syöttöön (inter-connected) [17], mutta se ei ole näillä näkymin kovin tarpeellista eikä valaistuksen ryhmäjohtoissa tavallisesti noudateta muille ryhmäjohtoille sähköurakointiohjeissa määriteltyä viidentoista syöttävän pisteen rajaa [39]. Tavanomaisten kohteiden valaisinasennusten lainmukaiset vaatimukset löytyvät standardista SFS-standardista 6000 Valaistus ja valaistusasennukset 705.559 [38].

11.3 Tarjous 1, valaisinten asentamisen edellytykset

Tarjouksen 1 tapauksessa kokonaisasennusteho laskee, eivätkä valaisimet aiheuta aiempaa enempää lisävaatimuksia suojalaitteistolle tai ryhmäjohtoille esimerkiksi niiden sytytysvirran tai tehokertoimen vuoksi. Tästä johtuen asennus voidaan toteuttaa kokonaan nykyisten keskusten suojauksen puitteissa, sekä nykyisin osastolla C olevilla ryhmäjohtoilla ja pistorasioilla. Valaisinmäärä

yhteensä 112 kappaletta ja samaten myös valaisintiheys eli pitoisuus pinta-alan suhteen on paljon pienempi kuin vanhan asennuksen yhteydessä, jossa oli 162 kappaletta valaisimia.

11.4 Tehonkulutus, tarjous 1

Tarjouksen 1 valaistuksen nimellinen asennusteho olisi 88 kW liitännäisväivien kanssa ja HPS-lampun tuhannen tunnin painotetun energiankulutuksen (1116 kW / 1000 h) kanssa laskettuna pätöteho olisi 94,4 kW [36].

Vanha nimellinen asennusteho 162 kappaleelle 600-wattisia lampuja oli 97,2 kW, mutta oletettujen 10 %:n liitännäisväivien kanssa laskettuna 107 kW ja lampun tuhannen tunnin painotetun energiankulutuksen kanssa jopa 120 kW, kun käytössä oli Osram Plantastar-lampuja, joiden painotettu energiankulutus on 680 kWh / 1000 h [40]. Aiemman Poot-valaistuksen liitännäisväivöistä ei ole tarkkaa tietoa, mutta vastaavanlaisilla magneettisen virranrajoittimen omaavilla malleilla se on yleisesti 10–20 %:n välillä [3]. Jos aiemmat liitännäisväivöt olivat vielä enemmän, niin ero tehonkulutuksessa verrattuna tarjoukseen 1 on vieläkin suurempi. Tarkempia tietoja tarjouksen 1 energiankulutuksesta löytyy kappaleesta 18. Elinkaarikustannuslaskelman tulokset.

Uusien suurpainenatriumvalaisinten elektronisen virranrajoittimen vuoksi loistehon osuus näennäistehosta asennuksen yhteydessä pienenee ja sen osuus sähkölaskusta luultavasti poistuisi kokonaan, mikä pätee myös tarjouksen kaksi tapauksessa. GAN-valaisimille mainitaan datalehdessä 1 kW:n mallille jopa $0,99 < \cos \varphi$ tehokerrointa [35].

Tarjouksen yksi tapauksessa energiankulutus muutoin pienenesi merkittävästi nykyisestä, aiemmat loistehomaksut ovat yritykselle sähkönsiirtokustannuksista varsin mitätön osa eli enimmilläänkin joitakin kympejä tai prosenttia tai parin luokkaa. Kiinteistön nykyisessä loistehotilanteessa kompensoimisesta olisi pitkällä aikavälillä voinut kuitenkin koitua hieman säästöä, mitä on käsitelty luvussa 19.

11.5 Tarjous 2, valaisinten asentamisen edellytykset

Vanha valaistus oli nimelliseltä asennusteholtaan 97,2 kW ja tarjouksen 2 nimellinen asennusteho on 121 kW. Siten tarjouksen 2 tapauksessa asennusteho ja tehonkulutus nousee jonkin verran aiemmasta, jos kaikki valaisimet asennetaan. Kaikki valaisimet vaatisivat niiden virran perusteella laskien vähintään kaksitoista valaisinryhmää, jos erilaiset valaisimet asennetaan eri ryhmiin.

11.6 Tehonkulutus, tarjous 2

Tarjouksen 2 tehonkulutus liitännälaitteiden sekä lamppujen tuhannen tunnin painotetun tehonkulutuksen kanssa laskettuna on jopa 130 kW, kun HPS-valaisimen liitännälaitteiden ovat datalehden ilmoittama 50 W ja sen lampun painotettu energiankulutus tuhannelle tunnille on 1116 kWh / 1000 h [36]. Tässä kappaleessa on laskettu valaistukselta odotettavissa oleva energiankulutus ja pätötehonkulutus näillä arvoilla.

Vaikka nimellinen asennusteho nousee 97,2 kW:sta 121 kW:iin eli jopa 23,8 kW, ei se liitännälaitteiden kanssa laskettuna nouse välttämättä kuin 14 kW ja myös lampun tehonkulutuksen parametreillä laskettuna 10 kW. Tämä luonnollisestikin tarkoittaa, ettei tarjouksen 2 uusi valaistus välttämättä tuota mittaavaa lisäystä valaistuksen energiakustannuksiin, sen lisäksi, ettei virrankulutus välttämättä kuormittaisi suojausta erittäin paljoa nykyistä enempää.

11.7 Tarvittavat valaisinryhmät

Jos erilaiset valaisimet asennetaan eri ryhmiin, valaisinten laskennallisesti kuluttaman virran perusteella 77 kappaleelle tarjottuja HPS-valaisimia tarvitaan kahdeksan valaistusryhmää ja 77 kappaleelle LED-valaisimia neljä ryhmää. Kaikille valaisimille tarvitaan siten kaksitoista ryhmää.

Yhteentoista valaisinryhmään, jotka nykytilanteessa helposti saataisiin käyttöön, voidaan asentaa siten esimerkiksi 70 HPS-valaisinta ja 77 LED-valaisinta, tai

jos kymmeneen kuten ryhmiä tällä hetkellä on, niin 70 HPS-valaisinta ja 60 LED-valaisinta. Ylikuormitussuojauksen suojaaman piirin virran suositellaan tavallisesti olevan enintään 90 % sulakkeen nimellisvirrasta, mutta valaisinasennuksissa suositusta harvemmin noudatetaan eikä se ole niiden tapauksessa kovin tärkeä. Niinpä tämä laskelma on olettaen, että ryhmät pyritään asentamaan mitoitusvirran rajoissa mahdollisimman täyteen [38; 39].

12 Keskuksia syöttävät kaapelit, ryhmäjohtot ja sulakesuojaus

Kiinteistön pääkeskuksessa on mahdollisuus kasvattaa sulaketta jopa 3x(3x250) ampeeriin asti ja sulakesuojaus ryhmäkeskusten nousujohdoille voidaan teoriassa kasvattaa jopa 400 ampeeriin, mistä syystä nykyisten keskusten vaihtaminen suunniteltujen asennusten yhteydessä ei ole tarpeen. Nykyiset pääsulakkeet ovat kuitenkin vain 3x(3x100) A:n kahvasulakkeita, jotka ovat laitoksen aiemman huipputehon kannalta juuri ja juuri riittävät. Koska laitoksen kokonaisteho on jo nyt toisinaan yli sen mitä sulakesuojauksen tulisi nimellisesti kestää, on syytä olettaa, ettei se asennustehon enää kasvaessa tule toimimaan vaan suojellakseen kaapeleita ylikuormitussuoja laukeaa.

Oikeastaan siirtoverkkoyhtiö Caruna Oy:n mukaan liittymisoikeuden kapasiteettia täytyy nykyisessäkin tilanteessa hetkittäisen ylittymisen vuoksi nostaa nykyisestä sähkönsiirtosopimuksen 2x(3x160) A:n rajasta seuraavaan 2x(3x200) A:n liittymisoikeuteen. Tämä maksaa Carunan arvion mukaan noin 8 400 € arvonnäköisäveron kanssa, mikä on paljon vähemmän kuin aiemmin ennakoitu liittymismaksun suuruus 13 320 € veroineen, joka oli Carunan hinnaston mukainen luku [41]. Kuitenkin kyseinen sulakekoon valinnasta riippuva liittymismaksu tulisi oletettavasti maksettavaksi vielä Caruna Oy:ltä liittymisoikeuden kasvattamiseen liittyvän arvion lisäksi.

Tämän vuoksi liittymisoikeuden kasvattaminen ei kuitenkaan sinänsä tuo tarjoukseen 2 lisäkustannusta, kun sitä täytyy tilanteessa kuitenkin kasvattaa, mutta keskusten suojausten uusiminen tuo. Asia selvisi sähköpostilla vasta muutamia päiviä ennen tämän raportin jättämistä tekstiinhjaukseen ja siten

asiasta ei työn puitteissa ehtinyt esittämään perusteellisempaa tarkkaan harkittua analyysiä. Liittymän korotuskyselyyn jakeluverkkoyhtiö Caruna Oy:ltä työn loppuvaiheessa saatu vastaussähköposti on nähtävissä liitteessä 1.

Kun suuremman liittymisoikeuden vuoksi joka tapauksessa saadaan suurempi kapasiteetti käyttöön pääsulakkeille, ei pelkkä keskuksia syöttävien johtojen kasvattaminen, sekä RK2:n ja PK:n kahvasulakkeiden vaihtaminen luultavasti ole kovin suuri kustannus verrattuna muihin investointikustannuksiin. Kyllä siitä silti joitakin tuhansia euroja hintaa melko luultavasti voisi tulla, mikä olisi huomioitava tarjouksen 2 kustannusten tapauksessa. Työssä on hieman myös laskettu sitä kuinka suuri virta pääsulakkeita tarjouksen 2 tapauksessa voisi kuormittaa.

12.1 Pääsulakkeita kuormittava virta

Pää- ja ryhmäkeskuksia suojaavat gG-tyyppin sulakkeet kykenevät katkaisemaan sekä huolehtimaan ylivirtasuojauksesta, että vikatilanteessa toimimaan oikosulkusuojauksena [42]. Pääsulakkeita kuormittava vaihevirta voidaan laskea vaihtovirtatehon kaavalla 11 seuraavasti:

$$I = \frac{P}{3U_L \cos(\varphi)} \quad (11)$$

I on kuormittava virta, P on kulutettu pätöteho, U_L on vaihevirta ja $\cos(\varphi)$ on tehokerroin [21, s.211].

Siten kun pätötehon kulutus on 231 kW ja loisteho on ollut samanaikaisesti 43 kvar eli tehokerroin $\cos(\varphi)$ on 0,983, pääsulakkeita ja pääkeskusta syöttävää kolmea johdinta kuormittaa kutakin noin 341 A:n virta. Pääsulakkeiden nimellisvirta ja mitoitusvirta on yhteensä vain 300 A yhtä vaihetta kohden.

12.2 Kuormittavan virran ja tarvittavan kapasiteetin kasvu

Liitântälaittehäviiöiden kanssa laskien (mutta ilman lampun painotettua energiankulutusta) vaihekohtainen tai sulake/kaapelikohtainen virta on tarjouksen 2 valaistukselle 174 A, ja lampun painotetun energiankulutuksen kanssa 188 A. Vanhan valaistuksen käyttämä nimellinen virta voidaan siten myös laskea edellisen kaavan 11 avulla:

$$\frac{162 \text{ kappaletta} \times 600 \text{ W}}{3 \times 230\text{V} \times 0,983} = 143 \text{ A} \quad (11)$$

jossa $\cos(\varphi) = 0,983$, kuten aiemmin mainittiin lasketun Caruna+ tietojen kertoman korkeimman tehonkulutuksen ja silloisen loistehon perusteella kyseisen laitoksen tuolloiseksi yleiseksi tehokertoimeksi.

Niinpä osaston C vanhan valaistuksen kuluttama virta on samalla kaavalla laskettuna 143 A. Jos lisäksi oletetaan magneettisella virranrajoittimella varustetuille suurpainenatriumvalaisimille tavanomaiset liitântälaittehäviiöt 10 % [3], kuten muissakin laskelmissa liitântälaittehäviiöt on otettu huomioon ja siten tämän vertailun kannalta reilua on, niin aiemman valaistuksen kuluttama virta on ollut jopa noin 158 A. Kun lisäksi huomioidaan vielä lamppujen painotettu energiankulutus, niin silloin virta vaihetta kohden olisi 177 A.

Tarjouksen 2 kuluttama virta olisi 230 voltin syöttävällä jännitteellä laskelmien mukaan 179 A kaikilla parametreilla laskettuna ja 192 A huomioiden lampun painotetun energiankulutuksen [36]. Laskelmien tuloksena saadaan, että tarjouksen 2 uusi valaistus voi kuormittaa suojausta vaihetta kohden noin 15–21 ampeeria nykyistä vähemmän laskentatavasta riippuen, kaikilla tehonkulutuksen parametreilla 15 ampeeria. Todennäköisesti noin 21 ampeeria, missä on asianmukaisesti molempien asennusten liitântälaittehäviiöt otettu huomioon, muttei kummankaan lamppumallin painotettua energiankulutusta, jota ei mitoitusvirtaa laskiessa huomioida kuulukaan [39].

Asennuksia ei ole tapana suorittaa kaikilla häviöillä laskettuna vaan nimellisen virrankulutuksen perusteella (mihin liitännälaittehäviöt kuuluvat), ja millä tavoin myös laskin kuinka monta valaisinta eri ryhmiin mahtuu [39]. Tällöin pääsulakkeita kuormittaisi uuden asennuksen yhteydessä yhtä vaihetta kohden jopa 359 A:n virta.

12.3 Pääkeskus ja pääsulakkeet

Nykyiset 3x(3x100) A:n pääsulakkeet kestävät mitoitusvirtansa perusteella 230 voltilla vain noin 207 kW:n kuormitusta, ja kuitenkin laitoksen pätötehohuippu on korkeimmillaan Caruna+-palvelun tietojen mukaan ollut jopa 231 kW (8.12.2021). Aiempi valaistuksen asennusteho oli 234 kW (ilman liitännälaittehäviöitä) ja tarjouksen 2 kanssa se olisi 254 kW (ilman liitännälaittehäviöitä).

Standardissa SFS-EN 269-2-1 määritellään, että 100 A:n gG -kahvasulakkeiden on kestävä vähintään tunti niiden alemman toimintarajavirran eli sulamisrajavirran mukaista virtaa, joka on 1,25 kertaa nimellisvirta ja ne laukeavat varmasti, jos niitä kuormitetaan kaksi tuntia niiden ylemmällä sulamisrajavirralla, joka on 1,6 kertaa nimellisvirta. [43, s.263.]

Toisin sanoen tarjotussa tehokkaammassa vaihtoehdossakin pääsulakkeiden ja RK2:n syöttö kestää kuormitusta alempaan toimintarajavirtaan asti ainakin tunnin ilman että suojaus laukeaa, mutta pitkien päällä-oloaikojen yhteydessä mahdollisuus suojauksen laukeamiseen kasvaa. Lisäksi asennuksen nimellisen virrankulutuksen tulisi kuitenkin olla pienempi kuin sen syöttöä suojaavan sulakkeen mitoitusvirta, muuten on vaara johtojen ylikuormittumisesta ja tulipalosta. Asiasta säädetään SFS 6000-4-43 -standardin kohdassa 433.1 Ylikuormitus-suojaus [38, s.116]. Tästäkin syystä on tehokkaamman tarjouksen tapauksessa tarpeen kasvattaa kaapeloinnin ja sulakkeiden kokoa, jos sitä pidetään päällä samanaikaisesti laitoksen muun tehon kanssa.

Liittymäoikeus on nykyisin vain 2x(3x160) A, mikä on siirtoverkkoyhtiö Caruna Oy:n mukaan alle sallitun, kun kasvinviljelylaitokselle on aiemmin mitattu 231

kW huipputehoa. Siten liittymisoikeuden kasvattaminen kokoon 2x(3x200) A on investoinnista riippumatta välttämätöntä laitoksen aiemman kulutuksen vuoksi, (mikä maksaa Carunan arvion mukaan 8 400 €, sis. alv 24 %) ja kyseinen liittymisoikeus riittäisi seuraavalle sulakekoolle 3x(3x125) [41].

12.4 Ryhmäkeskus 1 ja ryhmäkeskus 2

Ryhmäkeskus 1 on osastojen A ja B ryhmäkeskus ja ryhmäkeskus 2 osastojen C ja D. Erityisesti koska ryhmäkeskuksen 1 puolella on muutenkin paljon käyttämätöntä tehokapasiteettia, ei tässä työssä ollut tarpeen pohtia sen uusimista juuri millään tavoin.

Nykyisten valaisinasennusten teho RK1:n eli osastojen A ja B puolella on 200 kappaleelle 400 W:n suurpainenatriumvalaisimia nimellisesti vain noin 88 kW. Oletettujen 10 % liitäntälaittehäviöiden kanssa laskettuna kutakin vaihetta kuormittava virta on vain noin 130 A. RK1:n puolella kiinteistöä on siten paljon käyttämätöntä tehokapasiteettia suojausten osalta sekä vararyhmiä ryhmäjohtoille, mutta valaistusta ei kuitenkaan pyritä tai ole suunniteltu asennettavaksi sinne.

Keskuksen kahvasulakesuojausten nimellisvirta ja suurin mitoitusvirta on nykyisin 250 A. On tämän työn selvitysten perusteella hyvinkin mahdollista, että tarjouksen 2 tapauksessa osa valaisimista olisi taloudellisesti kuitenkin järkevää asentaa osastojen A tai B puolelle.

12.4.1 RK2

Tehokkaamman tarjouksen 2 tapauksessa myös sulakesuojausta RK2:n syötössä täytyisi kasvattaa, jotta kapasiteetti on riittävä ja useampia sen vararyhmistä voidaan ottaa käyttöön nykyisten kymmenen valaistukselle tarkoitetun ryhmän lisäksi, joita osaston C sähkönsyötöstä löytyy. Tämä johtuu siitä, että nykyisillä keskusta syöttävillä johdoilla suojauksena olevien 250 A:n gG-kahvasulakkeiden mitoitusvirta-alue on vain 10...250 A, ja kuten mainittua mitoitusvirtaa suurempitehoinen asennus on määräysten mukaan kielletty.

Kun nykyisellään RK2:n sulakesuojauksen puitteissa on asennettuna vasta 228 A:n kapasiteetin edestä ryhmiä, niin yksi vararyhmistä voidaan ottaa ilman muita järjestelyjä käyttöön 16 A:n sulakkeella ainakin siinä tapauksessa, jos pääsulakkeita liittymäoikeuden mukana nostetaan. Jos tarjous kaksi asennetaan kuitenkin kokonaan RK2:n puolelle kiinteistöä, sen syöttämän valaistuksen asennusteho olisi 177,8 kW ja laskennallinen tehonkulutus voisi olla jopa 198 kW. Virta olisi silloin noin 268 A liitännälaitteiden kanssa laskien. Tämä tarkoittaa, että tarjouksen 2 tapauksessa RK2:n nykyistä 250 A:n sulakesuojausta olisi nostettava seuraavaan sulakekokoon eli 315 ampeeriin.

Kuitenkin kun laitoksen pääsulakkeiden kokoa luultavasti nostetaan liittymäoikeuden väistämättömän nousun myötä suurempaa liittymisoikeutta vastaavaan suurimpaan sallittuun 3x(3x125) A:n kokoon, ei tehokkaampi tarjous 2 tuottaisi tässä ongelmia.

Koska sulakkeiden virta-aikakäyrän mukaiset laukeamisajat ovat muussa tapauksessa hyvin lähellä toisiaan, tulisi tässä tilanteessa huomioida myös aika-selektiivisyyden toteutuminen sulakkeita valitessa, jotta sulakesuojauksen riittävän nopea ja selektiivinen toiminta voidaan varmistaa. 3x(3x125) A:n sulakkeet eivät voi olla ryhmäkeskuksen 315 A:n sulakkeen kanssa virtaselektiiviset, koska virtaselektiivisyydeltä vaadittava 1,25-kertaisen virran raja suuremman suojalaitteen suhteen ei päde [42].

Kyseisen sulakemallin tulisi olla virtaselektiivinen nimellisvirraltaan 1,25-kertaisen kanssa, jos kyseessä ovat saman valmistajan sulakkeet, mutta eri sarjan sulakkeilla raja on 1:1,6. Koska sulakkeet eivät olisi virtaselektiiviset, on tarpeen niitä valitessa huolehtia aikaselektiivisyyden toteutumisesta ja verrata niiden virta-aika-käyriä sekä syötön automaattisia poiskatkaisuaikoja [42].

12.4.2 RK2:n syöttävä kaapeli

Ryhmäkeskusta 2 syöttävä alumiinijohtiminen AMCMK 4x185/57AN 0,6/1 kV:n kaapeli, joka on PVC-eristetty, kestää SFS 6000 -taulukon B52.11 mukaan

tavalla E eli ilma-asennuksena 70 °C lämpötilassa vain 280 A:n jatkuvaa kuormitusvirtaa [38, s.262]. Sulakesuojausta olisi tarpeen nostaa gG-kahvasulakkeiden seuraavaan kokoon 315 A, jotta kaikki tarjouksen 2 valaisimet voitaisiin asentaa RK2:n puolelle. Niinpä myös syöttävän johdon kokoa olisi kasvatettava.

Toisaalta johdon suurimman kuormitettavuuden arvon on oltava jonkin verran suurempi, kuin sulakkeiden nimellisvirta. Syöttävältä kaapelilta vaadittava pienin jatkuvan kuormitettavuuden arvo ilman korjauskertoimia voidaan laskea seuraavasta kaavasta 12:

$$I_Z = \frac{k \times I_N}{1,45} \quad (12)$$

Kaavasta saadaan sulakkeen nimellisvirran I_N perusteella kaapelilta vaadittava jatkuva kuormitettavuus ilman korjauskertoimia eli I_Z . Kerroin k on isompien gG-sulakkeiden tapauksessa 1,6, ylemmän sulamisrajavirran sekä nimellisen virrankeston suhde [43, s.137].

Suurin johdolle sallittu jatkuva kuormitettavuus on tarpeen selvittää, jotta suojalaitteen mitoitus on oikea. Toisaalta tässä yhteydessä pätee myös kaava 13:

$$I_N \times k = I_2 \quad (13)$$

Jossa I_2 on virta, joka varmistaa suojalaitteen toimimisen sille määritellyssä tavanomaisessa toiminta-ajassa [38, s. 116].

Kertomalla kaavasta 12 saatu johdon kuormitettavuus asennustavan, ympäristön lämpötilan, vierekkäin asennettujen johtimien ja mahdollisten eristeläpivientien mukaisilla korjauskertoimilla, saadaan tarvittava oikea jatkuvan kuormitettavuuden arvo, joka syöttävältä johdolta vaaditaan [43; 44].

Käytännössä pääkeskus ja ryhmäkeskus kaksi sijaitsevat aivan vierekkäin piha-keskuksessa ja kaapeli on kohtalaisen lyhyt, asennustapa on vapaasti ilmassa ja korjauskerroin yhdelle virtapiirille sekä yhdelle monijohtimiselle kaapelille on 1,0. Laskemalla nykyisen johdon jatkuvan kuormitettavuuden arvolla 280 A ja korjauskertoimella 1,0, kaapeli on juuri riittävä vain 253 A:n tai käytännössä 250

A:n sulakkeelle. Mikäli kuormitus ja sulakkeen nimellisvirta on tätä suurempi voi johto ylikuormittua ja saattaa sulaa [38].

Niinpä kun seuraavan kaapelikoon AMCMK 4x240/72AN 0,6/1kV:n jatkuva kuormitettavuus on SFS 6000 -standardin taulukon B52.11 mukaan 330 A, sille voisi samaa laskentatapaa käyttäen laittaa korjauskertoimilla 1,0 nimellisvirraltaan 300 A:n kahvasulakkeen, jos sellaisia olisi. Saman taulukon perusteella seuraavan koon 315 A:n kahvasulakkeille tarvitaan siten 4x300 mm²:n kokoista vastaavan tyyppistä kaapelia, joka kestää ilma-asennuksena E jatkuvaa kuormitusvirtaa 381 A [38, s.262]. Prysmian-kaapelin datalehden mukaan 4x240 mm²:n koko voisi kuitenkin kestää 350 A:n jatkuvaa kuormitusvirtaa, eli 317 A:n tai käytännössä 315 A:n kahvasulakkeen [45].

Sulakkeen muutaman sadan euron hinnan lisäksi hintaa tulisi siten myös ryhmäkeskus kahta syöttävän kaapelin vaihtamisesta koon tai kaksi paksummaksi, mikäli valaistuksen kuormitusta RK2:n puolelle kiinteistöä eli osastoille C tai D yli yhden 16 A:n valaisinryhmän verran lisätään.

Lisäksi suojausta toteutettaessa olisi laskettava suurin luovallinen johdonpituus, joka riippuu nousukeskusta syöttävän verkon impedanssista eli impedanssista ennen johdonsuojalaitetta ja suojauksen riittävän nopean toiminta-ajan mahdollistavan oikosulkuvirran suuruudesta. Sama suoja voi toimia sekä oikosulkusuojana, että ylikuormitussuojana, mutta vikatilanteessa sen on tietenkin kyettävä toimimaan myös hyvin nopeilla poiskytkentäajoilla. [43; 44.] Tarkemmin määriteltynä suojauksen vaatimukset löytyvät SFS 6000 -standardista Pienjänniteasennukset osa 1–1 ja Yleisvaatimukset osat 1-6 kohta 4-43:2017 ja määräykset kaapelien kuormitettavuudesta kohdasta 5-52:2017 [38].

12.5 Pääkeskusta syöttävät kaapelit

Pääkeskusta muuntajalta syöttävät nousujohdot ovat kolme AXMK 4x185S/AN 0,6/1 kV:n kaapelia, jotka kestävät kaapelin datalehden mukaan niiden maa-asennuksessa eli asennustavalla D jatkuvaa kuormitusvirtaa ilman

korjauskertoimia lämpötilassa 65 °C kukin 330 A. Kaavalla 12 laskien saadaan, että korjauskertoimella 1,0 on nykyisen 3x(3x100) A:n pääsulakesuojauksen kultakin kaapelilta tarvitsema jatkuvan kuormitusvirran arvo noin 330 A, eli kaapelit ovat juuri riittävät nykyisille pääsulakkeille. [46.]

On syytä olettaa niiden olevan asennettuna erikseen, sillä muuten niiden korjauskerroin olisi huomoinpi ja jatkuva kuormitettavuus olisi liian pieni. Suomessa maan lämpötila harvoin nousee ollenkaan yli 20 °C, joten siksi lämpötilan korjauskerroin maa-asennukselle on SFS 600–1–1-käsikirjan Pienjännitesähköasennukset taulukon B.52.15 perusteella vähintään 1,0. [38, s.266]

Kaapelimallin seuraavalle 4x240 mm²:n koolle on 65 °C luvattu jatkuvan kuormitusvirran kestoisuutta 375 A ja kaikkein suurimmalle AXMK 4x300S/AN 0,6/1kV:n kaapelikoolle valmistaja lupaa 430 A [46].

Tällöin jotta pääsulakkeet voidaan vaihtaa seuraavaan kokoon 3x(3x125) A olisi syöttävät kaapelit vaihdettava kaikkein suurimpaan AXMK 4x300 mm²:n kaapelikokoon, sillä samoin asennettuna ja kaavalla 12 laskien tarvittava jatkuvan kuormitettavuuden arvo kaapelille on sulakkeilla vähintään 413 ampeeria. Tarvittavan kuormitettavuuden määrittämisessä käytettiin isompien gG-kahvasulakkeiden tavallisia arvoja, kuten ylemmän sulamisrajavirran ja nimellisen virrankeston suhde [42; 44].

Vaikka kaapelien uusimisesta voi luultavasti syntyä verraten kookaskin asennuskustannus, ne eivät kuitenkaan ole kovin pitkiä ja ABB:n 20 kV:n pihamuuntaja sijaitsee aivan lähellä pihakeskusta. Korkeintaan ehkä 15 metrin päässä kuten kasvihuonekiinteistökin.

12.6 Valaisinryhmät ja ryhmäjohtojen kuormitettavuus

Pääosin vanhoja ryhmäjohtoista voidaan hyödyntää uuden asennuksen yhteydessä ja valaistus on tarkoitus asentaa pääosin valmiisiin pistorasioihin. Valmiiksi asennetut kaapelit ovat kolmevaiheista MMJ 5x2,5S tyyppiä ja

ryhmäjohtojen mitoitusvirraltaan enintään 16 A:n sulakesuojaus riittää joko kymmenelle kappaleelle tarjottuja Gavitan HPS-valaisimia, tai vaihtoehtoisesti 20 kappaleelle Philipsin LED-valaisimia jokaista ryhmää kohden. Tarjouksen 1 tapauksessa valaisimet sopivat helposti ennestään käytössä olleisiin kymmeneen valaistukselle tarkoitettuun ryhmään.

Jotta tarjousvaihtoehto 2 voidaan asentaa osastolle C niin, että suurpainenatrium ja LED-valaisimet saadaan eri ryhmiin, tarvitaan ryhmien ja sulakkeiden mitoitusvirran sekä valaisinten virroilla laskettuna 12 kappaletta 16 A:n valaisinryhmiä, joten on tarpeen lisätä kaksi ryhmää ja kapasiteettia täytyy siten kasvat-
taa 32 A. Vaihtoehtoisesti uusi asennus voidaan toteuttaa niin, että erilaiset valaisimet ovat samoissa ryhmissä. Tällöin niitä ei voitaisi ohjailla erikseen, mutta toisaalta silloin myös asennuskustannusten hinta erityisesti tarjouksen 2 tapauksessa laskisi, kun ryhmäkeskukseen 2 ei mahdollisesti tarvitse johdottaa niin monia uusia valaisinryhmiä.

HPS-valaisinten kytkemisessä samaan ryhmään tuottaa suuren tehonkulutuksen lisäksi haasteita niiden käynnistysvirtapiikki. Laitteen arvokilven mukaan sytytysjännite on 3,5 kV ja siten sytytysvirta voi olla jopa yli 30 ampeeria. Laitteen nimellinen virrankulutus on 2,65 A eli sytytysvirta voi olla lyhyen hetken yli yksitoistakertainen. [35.] Kuitenkin koska suojauksen kahvasulakkeiden tulee kestää virtaa vähintään 1,25-kertaisella nimellisvirralla eli alemmalla sulamisrajavirralla, ei ole syytä olettaa lyhyiden sytytysvirtapiikkien aiheuttavan juurikaan ongelmaa ainakaan, jos kaikkia valoja ei kytketä päälle aivan samanaikaisesti [42].

12.7 Ratkaisu

Tarjoukseen 2 sisältyville 77 HPS-valaisimelle riittäisi kahdeksan RK2:n valaisinryhmää nykyisistä kymmenestä käytössä olevasta ryhmästä ja samalle määrälle LED-valaisimia tarvitaan neljä 16 A:n ryhmää. Jotta kaikki valaisimet voidaan asentaa osastolle C, tarvitaan siten kaksi uutta vararyhmää 16 A:n suojauksella.

Tässä tapauksessa olisi kuitenkin tarpeen kasvattaa RK2:ta syöttävän kaapelin sekä PK:ta syöttävien kaapelien kokoja, jotta niiden sulakesuojaukset voidaan nostaa seuraavaan kahvasulakkeiden kokoon 315 A ja 3x(3x125) A. Nykyinen asennettu RK2 kaapeli kestää vain 269 A jatkuvaa kuormitusvirtaa vaihetta kohden ja pääkeskuksen kaapelit kestävät vain 330 A kukin.

Siten tarjouksen 2 kokonaan osastolle C asentamisen kannalta pääkeskuksen kaapelit tulisi vaihtaa mallin kaikkein suurimpaan kaapelikokoon eli kaksi kokoa paksumpaan kaapeliin ja RK2:ta syöttävä kaapeli tulisi vaihtaa yhtä kokoa paksumpaan saman tyyppiseen kaapeliin, jotta sulakesuojausten kapasiteettia voidaan nostaa.

12.8 Sulakkeiden toiminta

Sulakesuojauksen ensisijainen tehtävä vikatilanteessa on suojella johtoja ja estää niitä sulamasta ja toisaalta myös suojata laitteita. Kuitenkin myös nykyaikainen nopeatoiminen vikavirtasuojaja on siinä hyvä ominaisuus, koska vikavirtasuojaja ehkäisee tehokkaasti sähköiskuja ja sähköiskut että tulipalot aiheuttavat hengenlähdön vaaraa. [43; 44.]

Niinpä johtoa ja sulakkeita vaihdettaessa on tarpeen tarkistaa pienimmät ja suurimmat oikosulkuvirtojen arvot keskusten ja ryhmäjohtojen kohdalla virtapiiriä, jotta sulakesuojauksen oikea ja riittävän nopean toiminta voidaan varmistaa. Johdon impedanssin muutos ja myös mahdollinen pituuden muutos vaikuttaa laskennalliseen oikosulkuvirtaan, ja sulakkeen toiminta- ja lämpenemiskäyrien eli virta-aikakäyrän soveltuvuus riippuu impedanssien lisäksi suojattavan kohteen ja piirin suurimpien ja pienimpien oikosulkuvirtojen arvoista. [43; 44.]

Alimmalla toimintarajavirralla tarkoitetaan sitä virtaa, jolla sulake voi laueta kuormitettaessa tunnin ajan. Ylempi toimintarajavirta on pienin virta, jolla kuormitettaessa minuutin ajan sulake voi laueta ja se laukeaa varmasti, mikäli sitä kuormitetaan kyseisellä virralla sulaketyypistä riippuvaisen ajan, joka on tavallisesti välillä 1–3 tuntia. [43, s.137]

Isompikokoiset gG-typin kahvasulakkeet laukeava varmasti vasta kuormitettaessa vähintään kahden tunnin ajan noin 1,6-kertaisella virralla niiden nimellisvirtaan I_N nähden, mutta jos tällöin niitä syöttävä johto on yli sen jatkuvan kuormitettavuuden arvon ei suojaus välttämättä pitkien päällä olojen yhteydessä suoja sitä ylikuumentumiselta. Siispä jos johto ja sulakesuojaus on esimerkiksi tunnin tai useamman tunnin ajan ylikuormitettuna virralla, joka on jonkin verran yli sulakkeen nimellisen, voi tilanne olla jossakin määrin vaarallinen. Tämän vuoksi asennuksissa on tärkeää noudattaa niitä syöttävien sulakkeiden sallittua mitoitusvirtaa ja johdoille sallittua jatkuvan kuormitettavuuden virtaa. [43; 44.]

Tarkemmat ohjeet sulakkeen valintaan ja esimerkiksi virta-aikakäyrien tulkitsemiseen voi löytää luvat tarvitsevasta tai maksullisesta ST-kortista 53.14, Ohjeet perinteisten sulakkeiden valinnasta ja käytöstä, alle 1000 V:n sähköjärjestelmät [47].

RK2:n sulaketta valittaessa tulisi huolehtia sen aikaselektiivisyydestä PK:n sulakkeen suhteen, mistä syystä on myös tarpeen tarkistaa keskusten pienimpien ja suurimpien oikosulkuvirtojen arvot sekä verrata niitä sulakkeiden teknisissä tiedoissa ilmoitettuihin virta-aikakäyrien lukemiin. Syötön automaattisen poiskytkennän toteutumiselta vaaditut ajat on määritelty tarkemmin standardeissa SFS 6000 Pienjänniteasennukset osa 1–2 ja 411.3.2.1–411.3.2.5 Suojausmenetelmät, Suojaus sähköiskulta. [38, s. 74–77.]

13 PAR-fotonivuon fotonimäärän mittaus

Työssä suoritettun fotosynteesiaktiivisen säteilyalueen PPFD-mittauksen (fotosynteesiaktiivinen fotonivuon tiheys) mittauksen tarkoituksena oli antaa tietoa jäljelle jäävien valojen uusimistarpeesta sekä fotosynteesiaktiivisesta fotonitehokkuudesta. Myös luonnonvalon olosuhteista kasvihuoneessa ja lasituksen valonläpäisykyvystä saatiin jonkin verran tietoa. Mittausalueeksi valittiin kasvihuoneen jäljelle jäävää tavanomaista valaisutapaa edustava kohta kasvatushuoneesta.

Työssä mitattiin valoja noin 151 m² kasvatuspinta-alalta ja 27 valaisimen kohdalta, joista yksi oli mittauksia suorittaessa pimeänä. Käytännössä mittausalue kattoi kymmenen Viemose-Drigoba-kasvatuspöytää, jotka ovat mitoiltaan 1,83 m x 8,2 m. Kuvassa 21 oikealla on nähtävissä mittausalue valaisimineen, vasemmalta tulee hieman mittauksia häiritsevää valoa, kuitenkin käytännössä mitaton määrä kuten myöhemmin perustellaan.



Kuva 21. Vasemmalla on nähtävissä päivänvalon vaikutus, ja oikealla mittausalue kasvatuspöytineen. Kuvan osastot A ja B muodostavat yhden kokonaisuuden ja ovat käytännössä yhtä huonetta.

Koska kohde on kooltaan niin laaja ja osastojen valaistuksessa vain vähän vaihtelua sekä kasvit toisaalta herkkiä vaurioitumaan tietokoneen ja mittausanturin sekä niiden välisen johdon kanssa työskennellessä, ei PAR-fotonivuon mittaaminen koko kasvinviljelyyn käytetyllä alueella olisi ollut järkevää. Lisäksi luonnonvalon vaikutuksen poisrajaamiseksi tarvittiin mittauksilanteessa erityisjärjestelyjä eli kasvihuoneen pimennysverhojen sulkemista.

13.1 Mittausalueen valaisimet

Mittausalueen valaisimet ovat kuvan 22 mukaisia suomalaisvalmisteisia 400 watin ja 230 voltin Hel-light suurpainenatrium-valaisimia, joista osa on vuodelta -98 ja joissa on käytössä monien eri valmistajien lamppuja. Liitteessä 4 on kuvia valaisimen sisältämistä liitännälaitteista ja kuvassa 22 varsinaisesta valaisinasennuksesta. Kyseisiä valaisimia valmisti aikanaan Inter Graydon Oy Lohjan valaisintehtaallaan [48].



Kuva 22. Mittausalueen valaisimet olivat kaikki 400 watin Hel-light-suurpainenatriumvalaisimia, joissa oli käytössä eri valmistajien lamppuja.

Valaisinten asennuskorkeus on 2,6 metriä ja etäisyys kasvatuspöydistä 1,8 metriä. Hel-lightit ovat tyypillistä suurpainenatrium-valaistustekniikkaa, niiden rakenteeseen kuuluu lampun, rungon ja heijastinosan lisäksi virranrajoitin eli kuristin, kondensaattori induktiivisen loistehon kompensoimista varten, sekä elektroninen sytytin.

Mittausalueella oli käytössä Osramin Vialux-lamppuja, Philipsin GP-lamppuja, unkarilaisia Lucaluxeja, tuntemattomia ilmeisesti toisen unkarilaisen valmistajan lamppuja sekä Radium RNP-T:tä.

Valitun mittausalueen kasvatusvalaistus on tekniikaltaan lähes samanlaista, kuin on tällä hetkellä kauttaaltaan käytössä kohdekiinteistön kasvinviljelyosastoissa, käytännössä neliömetrikohtainen asennusteho on mitatulla osastolla nykyisistä pienin. Koska valaistus ja sen neliömetrikohtainen asennusteho on pääosin lähes yhtenevää, voidaan mitatut tulokset jossakin määrin yleistää jäljelle jäävää kasvatusvalaistusta vastaaviksi. Tässä raportissa esitellään laskettujen keskiarvojen lisäksi myös arvot kullekin mittausruudulle.

13.2 Mittaustapa

Haluttaessa mitata kasveille käyttökelpoisen säteilyn määrää käytetään kvanttimittareita ja tavallisesti tähän tarkoitukseen soveltuu parhaiten PAR-mittari. Mittausyksikkö on mikromooli (μmol) eli hiukkasmäärän yksikkö ja mittari tunnistaa vain tiettyjen kasvia hyödyttävien aallonpituuksien valokvantteja. Tavallinen valaistuksen mittaus luumeneina tai lukseina painottuu ihmisen silmänherkkyysalueen perusteella eikä se siksi anna todellista kuvaa kasvien fotosynteesiin käyttämästä säteilystä. [15; 26.]

Mittauksessa tulee huomioida, että anturin valo-osan päälle tulee mahdollisimman vähän varjonmuodostusta, esimerkiksi myös mittaajan pitää varoa olemasta valon edessä. Koska mittausalueella oli kasvamassa erikokoisia kasveja, huomattiin mittausta suoritettaessa riittävän varjonmuodostuksen estämisen pelkästään kasveja siirtelemällä olevan lähes mahdotonta tai ainakin niitä olisi vaurioitunut paljon. Käytännössä ympäröivän kasvuston varjonmuodostuksen poisrajaaminen edellytti useamman salaattikennoston siirtämistä.

Koska ei ollut kovinkaan mahdollista liikkua mittausalueella ahtaissa pöytävälleissä kalliin ja lainassa olevan mittausanturin, muistiinpanovälineiden ja kannettavan tietokoneen kanssa, samalla arvoja kirjaten ja kasveja siirrellen,

jouduttiin tässä mittauksessa arvoja mittaamaan hieman korkeammalta kasvien yläpuolelta, noin 10–12 cm ylempää. Tästä syystä anturin vakauttakaan ei valittavasti voinut yhtä hyvin varmistaa. Arvot tässä kohtaa olivat kuitenkin käytännössä muuten lähes samoja, kuin jos ne olisi kasveja siirtelemällä mitattu aivan kasvatustason korkeudelta ja korkeintaan noin kaksi $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ / enemmän. Kuva 23 osoittaa ongelmat, joita kasvien synnyttämä varjonmuodostus aiheutti mittaamisen kannalta.



Kuva 23. Kuvassa väärä mittaustapa, ellei haluta mitata valon määrää kasvien alaosan korkeudella ja niiden alemmilla lehdillä. Kasvusto aiheuttaa varjonmuodostusta ja arvot ovat noin 10–15 μmol vähemmän kuin valaisimista saatava todellinen valon määrä. Näytöllä lukee arvo 55,1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Kasvien keskeltä mitattuna arvot olisivat olleet varjonmuodostuksen vuoksi paljon todellista matalampia eli noin 5–15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ / kohdan kasvustosta riippuen, kuten kuvasta 23 voidaan päätellä. Kuitenkaan työssä mitattuja arvoja ei välttämättä täten voida pitää täysin vertailukelpoisena aineistona anturin ja valaistuksen toiminnasta, koska mittaustapa on ollut hieman epätarkka (anturia

on pidetty kädessä ja on mitattu hieman korkeammalta) ja mittauksen arvot ovat siten suuntaa-antavia. Epätarkasta mittaustavasta on voinut syntyä virhettä mittaustulokseen arviolta noin $\pm 1 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ anturin epävakauudesta ja $\pm 1-2 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ mittauskorkeudesta.

Vaikka anturiosa sisältää vesivaa'an, joka helpottaa suorassa pitämistä, tulisi mahdollisimman tarkkoja mittaustuloksia varten sen mieluummin olla vakaalla alustalla. Tämän mittauksen tapauksessa kasvihuonevalaistuksen keskimääräisen PAR-fotonivuon tiheyden määrittämiseksi mitatut arvot antoivat kuitenkin riittävän tarkasti kuvaa nykyisen valaistuksen tilanteesta ja valon määrästä kasvatusalueella.

Muutoin mittaus suoritettiin SVS:n (Suomen Valoteknillinen Seura ry:n) ja Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry:n julkaisun Valaistuksen laskenta, mittaukset ja huolto (1996) sekä sitä edeltäneen SVS ry:n julkaisun Valaistuksen mittaaminen ja arvosteleminen (1978) perusteella, jotka ovat aiheeseen liittyvää Helsingin seudun yleisessä kirjastovalikoimassa olevaa ohjeistusta [49].

13.2.1 Mittari

Mittauksessa käytetty mittari on merkiltään ja malliltaan Apogee SG-520 usb, jonka voi kytkeä tietokoneeseen joko reaaliaikaisen mittaustiedon tarkastelua varten tai datankeräysominaisuutta käyttäen. Datankeräystä voi käyttää myös ilman tietokonetta, jos saatavilla on 5 V DC USB-pistoke.

Mittari ilmoittaa tuloksen mikromooleina neliömetrillä sekunnissa, eli PPFD - Photosynthetic flux density. [50.] Tässä mittauksessa on kerätty reaaliaikaista anturin tietokoneelle välittämää mittaustietoa, joka on mittaussuunnitelman mukaisesti taulukoitu mittauspöytäkirjaan.

13.2.2 Mittaussuunnitelma

Ohjeiden mukainen pienin tarvittavien mittauspisteiden määrä valaisualueen ruudukkomittauksessa ja määritettäessä huoneen keskimääräistä säteilytehoa tai valon määrää saadaan, kun ensin lasketaan huonekerroin k_r yhtälöllä 14:

$$k_r = \frac{(l \times b)}{(h_m \times (l + b))} \quad (14)$$

l ja b ovat huoneen pituus ja leveys ja h_m valaistuksen asennuskorkeus mittaustasoon nähden [49, s. 127].

Niinpä kasvatushuoneessa, jonka koko on noin 16 x 48 metriä ja jossa valaisimet ovat 2,6 metrin asennuskorkeudessa, huonekerroin k_r on 4,423, kuten voidaan päätellä taulukosta 2.

Taulukko 2. Huonekerroimet ja mittauspisteet.

Huonekerroin	Mittauspisteiden lukumäärä
$k_r < 1$	4
$1 \leq k_r < 2$	9
$2 \leq k_r < 3$	16
$3 \leq k_r$	25

Koska huonekerroin oli yli kolme, tulisi mittauksia kyseisessä huoneessa ottaa vähintään 25 mittausruudun keskeltä [49, s. 128]. Myös mittausruutujen koon olisi oltava sivujensa pituudelta 0,5 m – 2,0 m huoneen koosta riippuen, joten kyseiselle 18,3 m x 8,2 m alueelle tarvitaan oikeasti ohjeiden mukaan 50 mittauspistettä. Kuitenkin mittauksessa on valittu ruudukon ja mittausalueen kooksi 18,3 m x 8,0 m, jolloin riittää vain 40 mittauspistettä ja kuitenkin voidaan mitata lähes koko kasvatuspöydän alue päätyjen 15 cm lukuun ottamatta.

Valitulla mittaustavalla saatiin selville keskiarvo laajalta monen kasvatuspöydän alueelta sekä erilaisissa valaistusolosuhteissa, kuten mittaustulokset osoittavasta kuvasta 25 selviää. Esimerkiksi mittausalueella olleen pimenneen valaisimen kohdalla, käytävän lähellä valaistun alueen reunalla, sekä lähellä valoa heijastavaa verhoseinää.

13.2.3 Mittauksen yhteydessä huomioitavia asioita

Suurpainenatrium-lamppujen tapauksessa valaistuksen on suositeltavaa olla päällä vähintään puoli tuntia ennen mittausten suorittamista, jotta niiden lämpötila ja spektri sekä teho ja jännite ehtivät tasoittua. Ennen mittausta on syytä tarkistaa verkkojännite ja ympäristön lämpötila sekä kirjata ne mittauspöytäkirjaan, koska myös niillä on vaikutusta mittaustulokseen. Verkkojännitteen suuruus vaikuttaa lamppujen valovirtaan. Varsinkin silloin kun mittauksia suoritetaan laitoksen tavallisen käyttöajan ulkopuolella, voi sähköverkon jännite poiketa tavallisesta käyttötilanteesta ja se tulee tarkistaa. Lisäksi myös ympäristön lämpötila vaikuttaa hieman lampuista saatavaan valovirtaan. [49.]

Tarkat tiedot valaisimista ja lamppujen merkistä tai mallista on syytä kirjata. Johtuen kyseisen kasvihuonelaitoksen verkkoanalysointorin pimenemisestä ja sopivan mittauslaitteiston puutteesta, ei tämän mittauksen yhteydessä voitu verkkojännitettä tarkistaa. Kuitenkin verkkojännitteen vaihtelun vaikutus valaisinten kuluttamaan tehoon on tavallisesti hyvin vähäinen.

Mismo Oy:n 8.1.2014 kohdekiinteistössä Fluke 1653 V1.17/1.11-mittarilla suoritettujen valaistusryhmien vaiheimpedanssien ja vaihevirtojen mittauksen perusteella [32] verkkojännite vaihtelee välillä 229,08-231,44 V eli sen suhteellinen vaikutus mittaustulokseen on vain noin +/- 0,62 %. Kuitenkin koska 10 %:n käyttöjännitteen nosto voi nostaa suurpainenatriumlampun polttojännitettä 20 %, on vaikutus valovirtaan oikeammin +/- 1,24 % [4, s.63].

Mittausanturin kalibrointi ja eheys on suositeltavaa tarkistaa ja sen tulisi antaa rauhassa sopeutua ympäristön olosuhteisiin kuten lämpötilaan, kunnes

mittausarvot tasoittuvat, mihin kuluu useimmiten muutamia minutteja. Mittauksessa kannattaa huolehtia siitä, että anturi on kohtisuorassa mittaustulosta otettaessa, mitä usein kuten tässäkin tapauksessa helpottaa mittausanturiin yhdistetty vesivaaka. [49.]

Lisäksi on tarpeen määrittää mittausaluetta ympäröivien valoa heijastavien pintojen heijastuskertoimet, jos niistä heijastuu valoa takaisin päin mittausalueelle. Kuvassa 23 mitataan verhoseinästä heijastuvan valon määrää. Myös mahdollinen päivänvalon ja muun mittaustarkkuutta häiritsevän valaistuksen vaikutus tulee mitata ja kirjata.



Kuva 24. Näin voidaan mitata seinän tai pinnan heijastamaa valoa, tässä tapauksessa kasvihuoneen pimennysverhojen heijastavuutta. Mittauksessa anturi seuraavaksi käännetään ja mitataan seinää kohti saapuvaa valoa.

Tämän mittauksen tapauksessa heijastavia pintoja mittausalueen ympäristössä oli vain kasvihuoneen pimennysverhoa oleva takaseinä, sekä samasta materiaalista koostuva kattoverho. Kattoverhon heijastusominaisuudet ovat siten teoriassa samat kuin takaseinän, kuitenkin sama materiaali voi saada eri valaistusolosuhteissa erilaisen heijastuskertoimen. Tässä mittauksessa kattoverhon heijastuskerroin on oletettu samaksi kuin takaseinän johtuen samanlaisesta materiaalista ja käytetystä valaistuksesta. Vaikka katon tarkempi olosuhteiden mukainen heijastuskerroin ja siitä heijastuvan valon määrä voitaisiin mitata, se olisi melko turhaa.

Käytännössä on mahdotonta määrittää tarkkaan paljonko katto heijastaa valoa takaisin mittausalueen tasolle. Heijastuvaa valoa lamppujen yläpuolelta mitattuna on paljon enemmän kuin yli kaksi metriä alempana mittausalueella. Toisaalta mittausalueelta ja kasvatusalueelta katon heijastamaa valoa ei voida mitata koska lamput ja valaisimet ovat välissä ja sotkisivat mittauksen.

13.2.4 Heijastussuhde ρ

Heijastussuhteella tarkoitetaan pinnasta heijastuneen valovirran suhdetta sille saapuvaan valovirtaan. Pinnan heijastumissuhde riippuu esimerkiksi tulevan valon suunnasta, hajotusasteesta ja valon spektrikoostumuksesta, joten sama pinta voi saada erilaisia arvoja valaistuksesta riippuen.

Heijastussuhde voidaan selvittää mittaamalla, jos valaistus on tasainen eikä varjonmuodostusta ole paljon, sekä pinta tasaisesti heijastava. Kun mitataan erikseen sekä valaistuksen lähettämä että pinnan heijastama valaistusvoimakkuus anturi toisinpäin kääntämällä, saadaan heijastussuhde kaavasta 15:

$$\rho = \frac{E_{\rho}}{E} \quad (15)$$

Heijastussuhteen yhtälössä E on pinnalle saapuva valaistusvoimakkuus ja E_{ρ} on pinnan heijastama valaistusvoimakkuus [49, s.143].

Tulos on kuitenkin suuntaa antava, eikä tällä tavoin saada aivan tarkkaa tai tieteellisesti vertailukelpoista tulosta pinnan oikeista heijastusominaisuuksista ilman hyvin tarkkoja koejärjestelyjä. Pinnan heijastavuuteen liittyy myös luminanssi eli pintakirkkaus, ja luminanssin arvot vaihtelevat esimerkiksi riippuen valaistuksesta, valon tulokulmasta ja seinän tai heijastavan pinnan materiaalista [3; 4].

13.2.5 Luminanssi L

Luminanssi kuvaa pinnan johonkin suuntaan heijastaman valon voimakkuutta eli pinnan kirkkautta, joka on tavallisesti suhteessa valaistusvoimakkuuteen ja valon tulokulmaan. Luminanssin yksikkö on kandela neliömetriä kohden (cd/m^2). Luminanssin määräsuuntainen arvo voidaan laskea jakamalla kyseisen suuntainen eli heijastuva valovoima heijastavan pinnan suhteen kohtisuoran projektion eli normaalin ja luminanssin määräsuunnan välisen kulman α kosinifunktion ja tuon pinnan pinta-alan tulolla. Tätä voi kuvastaa yhtälö 16:

$$L = \frac{I_\alpha}{A \cos \alpha} \quad (16)$$

L on luminanssi, A on heijastavan pinnan pinta-ala, I_α on valovoima ja α on pinnan kohtisuoran projektion ja valon tulokulman välinen kulma. Jos valon tulosuunta on kohtisuorassa heijastavaan pintaan, kaava supistuu muotoon $L = I/A$.

Kyseessä on luminanssin yleisestä kaavasta supistettu lauseke. [49, s.23.]

Suuntaheijastavan pinnan eli peilimäisen pinnan luminanssia voidaan kuvastaa yhtälön 17 mukaisesti:

$$L = \rho L_V \quad (17)$$

ρ on heijastuskerroin ja L_V on pinnalle saapuva luminanssi tai valovirta [3, s. 72].

Toisaalta hajaheijastavan ja Lambertin lakia noudattavan pinnan luminanssi kaikkiin suuntiin voidaan jokseenkin määrittää seuraavasti kaavalla 18:

$$L = \frac{\rho E}{\pi sr} \quad (18)$$

jossa ρ on heijastuskerroin, E on saapuva valaistusvoimakkuus ja sr on avaruuskulmaa tarkoittava steradiaani [3, s. 72].

Työssä mitattu seinäverho on hajaheijastavaa materiaalia ja kyseisestä mittausalueen viereisestä seinästä määritettiin virallisten mittausohjeiden mukaisesti heijastuskerroin [49]. Tällä tavoin myös heijastavan seinän vaikutuksesta mitaustulokseen saatiin dokumentoituja arvot.

13.3 Mittaustulokset

Mittausalue mittausruutujen arvoineen on kuvattuna kuvassa 25, joka on osa kiinteistön tasopiirustusta. Alueella on 27 kappaletta teholtaan 400 watin HPS-valaisimia, joista yhden lamppu kuitenkin oli palanut. Kuvassa on esitetty myös pimenneen valaisimen ja heijastavan seinäverhon sijainti.



Kuva 25. PAR-mittauksen mittausalue tasokuvaan piirrettynä, mittausruudut ovat kooltaan 2,0 metriä kertaa 1,83 metriä ja kussakin ruudussa lukee siitä mitattu PPF-arvo.

Alue sijaitsee aivan sisäänkäynnin läheisyydessä osastolla A. Lisäksi aivan lähitöllä sijaitsevat myös vanhemmat pääasiallisesta käytöstä poistetut ryhmäkeskukset ja keskushierarkian pirstaloitunut osakeskukset, Gasum Oy:ltä tulevan energian virtausmittaus, ja Connex-automaatiokeskus sekä automaattiosäädin.

Taulukossa 3 on mittaustuloksista laskettuja keskimääräisiä PPFD-arvoja sekä kasvihuoneen lämpötila.

Taulukko 3. Mittaustuloksia mittausalueen eri kohteista.

<i>Mittauksen tai laskennan kohde</i>	Tulokset
<i>Koko mittausalueen PPFD-keskiarvo</i>	61,025 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
<i>Ehjän puolen PPFD-keskiarvo</i>	67,05 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
<i>Päivänvalon vaikutus</i>	0,0–0,3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
<i>Ympäristön lämpötila</i>	18,0 celsius
<i>Seinäverhon heijastuskerroin</i>	0,43639
<i>Heijastuskerroin lämmitysputkien kohdalla, eli suurin osa seinästä.</i>	0,27147

Käytännössä taulukosta 3 käy ilmi keskimääräinen valon määrä koko mitatulla alueella, ehjän puolen valaistuksen eli seinäverhoa lähemmän puolen keskimääräinen valon määrä, sekä päivänvalon vähäinen tai käytännössä olematon mittaustuloksia häiritsevä vaikutus. Myös seinän heijastuskerrointen määrittämiseksi otettujen useamman mittauksen keskimääräiset tulokset on kirjattu.

13.4 Päivänvalon mittaus

Työssä otettiin myös muutama mittaus päivänvalon määrästä sisällä kasvihuoneessa eri olosuhteissa, esimerkiksi kirkkaalla säällä, sekä verrattiin myös ulkoa saatavaa arvoa sisältä mitattuun. Mittaustapa oli melko epävirallinen, eikä arvoja kirjattu mittauspöytäkirjaan vaan dokumentaatio mittaustuloksista rajoittui

vain muutamiin kuviin. Kuvissa 26 ja 27 on päivänvalonmittaus sisällä kasvihuoneessa hieman erilaisissa valaistusolosuhteissa.



Kuva 26. Apogee-anturipää ja sen käyttöliittymä päivänvalon mittauksessa kasvihuoneen sisällä. Näytöllä lukee arvo 262,2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Kuitenkin säätilasta riippuen, eli jos ei ole kuitenkaan kovin pilvistä ja auringonvaloa en edes jonkin verran, PPFD-arvot sisällä kasvihuoneessa ovat noin välillä 100–1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, kun taas ulkona ne vaihtelevat mitattujen tulosten perusteella noin välillä 200–2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Auringonvalon PPFD-säteily kasvihuoneen ulkopuolella voi olla korkeimmillaan noin välillä 2200–2300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ [10].

Suomessa auringon säteilyn spektrikoostumus on auringon korkeuskulman vuoksi hyvin erilainen kuin lähempänä päiväntasaajaa ja se sisältää suhteessa huomattavasti enemmän pidempiaaltoista säteilyä, kuten punaisen ja

kaukopunaisen värisävyjä, sekä IR-säteilyä [10]. Kuva 26 on otettu kohtalaisen kirkkaana päivänä ja kuvien 27 ja 28 ottamisen aikaan sää oli huomattavasti pilvisempi.



Kuva 27. Apogee PAR-PPFD -mittari joka mittaa fotonivun tiheyttä, hieman hämäämmissä oloissa kasvihuoneen sisällä. Näytöllä lukee arvo 106,3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Kuvassa 28 on päivänvalonmittaus kasvihuoneen ulkopuolella, jossa valon määrä on merkittävästi suurempi. Ulkona sää on melko pilvinen ja auringonvalon fotosynteesiaktiivisten fotonien määrä kevättalviseksi päiväksi matala.

Lisäksi mittaustulokseen vaikuttaa myös ympäristö, kuten viereinen kasvihuone, metsikkö ja muut säteilyä absorboivat suurempikokoiset kohteet. Kasvihuoneissa huomattava osa kasvatusvalaistuksen valosta voi päästä karkaamaan lasituksen kautta eikä absorboidukaan kasveihin tai lämpönä ympäristöön, jos ei ole mahdollisuutta sulkea verhoja [32].



Kuva 28. Päivänvalonmittaus samalla säällä ulkona, tosin luultavasti hieman liian lähellä varjoa muodostavia ja mittausta häiritseviä kohteita. Näytöllä lukee arvo 194,7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Edellisen kahden samalla säällä otetun mittauksen suhteeksi tuli sattumoisin juuri kasvihuoneille usein mainittu tavallinen keskimääräinen valonläpäisykyky 55 % [12]. Tällä hetkellä Priva käyttää valaistuksen ohjauksessa lasituksenläpäisykerrointa 70 % [32].

13.5 Johtopäätökset mittaustuloksista

Mittauksen tuloksesta voidaan laskea kaavalla 11, että keskimääräinen ehjän valaistuksen tuottama 20 tunnin DLI on noin 4,86. Tämä on vain noin kolmasosa siitä 15 DLI:stä, jota salaatile suositellaan [26; 32].

Samoin kyseisen arvon perusteena oleva keskimääräinen noin 67 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ on varsin matala PPFD-arvo, vaikka voikin riittää joillekin himmeämmästä

pitäville kasveille ja on kutakuinkin mitä kyseisenlaiselta valaistukselta voi odottaa [26]. Niinpä voidaan päätellä, että nykyinen 400 W:n kasvatusvalaistus on tuotetun valon määrän kannalta kohtalaisen heikko, eikä sillä ole mahdollista saada kuin harvojen kasvilajien suositeltua päivittäistä valontarvetta täyteen.

Tulos oli jokseenkin mitä mittaukselta odotettiin ja aiempien tietojen mukaan investoinnissa korvattavalla 600-wattisella valaistuksella saatiin harvemman valaisintiheyden vuoksi lähes samanlaisen fotonivuon tiheyden kasvatusalueella [32]. Myös päivänvalonmittaus tuotti kutakuinkin juuri sellaisen tuloksen, kuin osattiin odottaakin.

14 Yksilöllistä taulukkotietoa kasvien tarvitsemasta valosta

Kasvihuoneessa vegetatiiviseen kasvuun suositellaan tehokkaassa viljelyssä sisätiloissa vihreille ja lehteville kasveille sekä yrteille vähintään jopa 17 DLI:tä päivässä eli $\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$ fotoneja. Kukkiville kasveille esimerkiksi tomaatin ja paprikan tapauksessa suositellaan kasvihuoneissa vähintään 20–40 DLI:tä päivittäin. Sisäkasvatuksessa muutoin suositellaan mikrovihreille päivittäisen fotoninsaannin olevan vähintään 6–12 DLI, vegetatiiviseen kasvuun lehteville vihreille kasveille sekä yrteille 12–17 DLI ja kukkiville istutuksille 15–40 DLI. [26.]

Työssä on valaistuksen tarvittavien käyttöaikojen määrittämistä varten lehtisalaatille tavoitearvoksi annettu 15 DLI, joka on sekin kohtalaisen korkea arvo, mikäli kokonaan kasvatusvalaistuksen tuottama [32]. Taulukossa 4 esitellään joillekin yleisemmille kasveille suositeltuja kasvatusalueen fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheyden PPF:n arvoja [26].

Taulukosta 4 käy jossain määrin ilmi, että tarjouksen 1 keskimääräisen fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheyden PPF-arvo, jonka keskimääräinen taso laskelmien mukaan vaihtelisi huoneessa välillä 119–146 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, olisi jopa liian tiheä fotonivuo monille kukille, sillä monet ruukkukukat tarvitsevat suurin piirtein saman verran valoa kuin krysanteemit ja ruusut. Orkideat tarvitsevat koristekukiksi poikkeuksellisen paljon valoa. Toisaalta tarjousta 1 varten laskettu PPF-

arvo on juuri ja juuri riittävä joidenkin vihannesten tehokkaaseen viljelyyn. Tarjoukselle 2 laskettu huoneen keskimääräinen PPFD-arvo 177–201 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ sen sijaan riittäisi helposti vihannesten tehokkaaseen kasvattamiseen, mutta olisi suurimmalle osalle kukkia aivan liian korkea [26].

Taulukko 4. Valon määriä fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheydessä (PPFD), joita eri kasveille kasvihuoneviljelyssä suositellaan [26].

Kasvilaji	Vähin suotuisa PPFD	Tavanomainen PPFD	Korkein suotuisa PPFD
Tomaatti	170 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	270 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
Kurkku	120 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
Paprika	120 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
Krysanteemit (ruukuissa)	40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
Ruusut (ruukuissa)	40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	120 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
Orkideat (ruukuissa)	80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	160 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$

Käytännössä tarjouksen 1 kasvatusvalaistuksesta saadaan kahdenkymmenen tunnin fotoperiodin eli päivittäisen valotusajan aikana alemmalla luvulla eli koko huoneen keskiarvolla laskettuna noin 8,67 DLI:tä ja tarjouksen 2 kasvatusvalaistuksesta 12,75 DLI:tä.

Edellä mainitut luvut tarkoittavat, etteivät tarjousten suunnitelmat valaisinasennoista pimeänä vuodenaikana aivan yllä siihen valon määrään, jota lehtisalaatille ja lehteville vihreille kasveille sekä yrteille tehokkaaseen viljelyyn suositellaan, eli 15–17 DLI [26; 32]. Tämä on aiempaa paljon suuremmasta yli kaksinkertaisesta kasveille tuotetusta valon määrästä huolimatta. Aiempi kasvatusvalaistus tuotti noin 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ keskimääräisen fotosynteesiaktiivisen fotonivuon tiheyden kasvatusalueella [32].

15 Motivan Valtti-laskuri ja elinkaarikustannuslaskenta

Valtti-elinkaarikustannuslaskuri on kehitetty valaistushankinnan elinkaarikustannusten vertailuun, laskentaa varten tarvitaan esimerkiksi tarjoustietoja tai alustavia hintatietoja aiotusta valaistusratkaisusta. Laskuri huomioi ja laskee muun muassa investointi-, energia-, huolto- ja kunnossapitokustannukset. Valtti-laskuri on hankintadirektiivin mukainen laskentatyökalu elinkaarikustannuslaskentaan ja se on internetissä avoimesti saatavilla, sekä kehitetty yhteistyönä alan yritysten, hankkijoiden ja asiantuntijoiden kanssa. [51.]

Kyseessä on Excel-pohjainen työkalu ja sitä hyödynnettiin kahden eritehoisen tarjouksen elinkaarikustannusten, sekä vanhan asennuksen elinkaarikustannusten selvittämiseen. Laskurissa on mahdollisuus myös pikalaskentaan sekä erillinen laskentakaavake sisä- ja ulkovalaistukselle, työssä käytetty laskentatapa on kuitenkin pidempi laskenta sisävalaistukselle.

Hankintadirektiivin eli 26.2.2014 säädetyin direktiivin (2014-/23–25/EU) mukaisuus tarkoittaa sitä, että Valtti-laskuri on erityisesti kehitetty puolueettomaksi välineeksi sellaisiin tarkoituksiin kuten julkishankintoihin tai yrityshankintoihin, joiden laskelmissa ja kustannusarvioissa tarvitaan tavallista enemmän läpinäkyvyyttä. Vuodesta 2015 oli kehitteillä myös Valtti 2 -laskuri, josta on kuitenkin sittemmin luovuttu eikä sellaista ole näillä näkymin tulossa. [52.]

Asennuksen käyttökustannuksia laskettaessa laskuri huomioi energiankulutuksesta syntyvät kulut sekä lamppujen huolto- ja vaihtokustannukset. Lisäksi laskuri laskee investointikustannusten loppusumman joko asennuskustannusten kanssa tai pelkistä valaisimista.

Laskurista löytyy oletusarvoina monia tietoja laskennan helpottamiseksi, esimerkiksi arvio vuotuisesta energian hinnannoususta, vuotuisesta huoltokustannusten hinnannoususta, ohjaustavasta riippuva käyttöaikakerroin, tavanomainen hyväksyttävä valovirranalenema valaisimen elinkaaren lopussa, sekä kertoimet L ja C eli osuus alkuperäisestä valovirrasta tai kuolleista valonlähteistä elinkaaren lopussa. Ohjelmaan voidaan syöttää myös laskentakorko, kuten

tuottovaatimus, lainakorko tai yleinen korkokanta ja laskuri laskee tulevat kustannukset niiden nykyarvossa.

Lisäksi laskentaohjelman taulukkoon voidaan kirjoittaa monia sellaisia arvoja esimerkiksi valaisimista, jotka eivät vaikuta laskentaan, mutta jotka voivat kuitenkin olla olennaista tietoa, kun kustannuslaskelmat esitetään. Valtti-ohjelman laskentataulukko voidaan syöttää esimerkiksi valaisinten yleinen värinointindeksi R_a ja niiden värilämpötila, tai valaisinten sellaisia huoltokertoimen osakertoimia, joita Valtti ei käytä mutta jotka voivat olla tarpeellista tietoa muussa valaistuslaskennassa. [51.]

16 Valojen keskimääräisen vuotuisen käyttöajan määrittäminen

Valojen vuotuinen käyttötuntiaika on olennainen parametri elinkaarikustannuslaskennan kannalta. Koska automaatiojärjestelmä ei ollut tallentanut tietoja valaistuksen ohjauksesta oli tarpeen määrittää jollakin toisella tapaa kuinka paljon valaistus on vuosittain päällä.

Kasvien päivittäisen lisävalontarpeen määrittämisessä käytettiin automaatiojärjestelmän mittaamia ja taulukoimia päivittäisiä säteilysummia viiden vuoden ajalta väliltä 2016–2021. Koska lähdemateriaalia auringon säteilytasoista oli laskelmaa varten useamman vuoden ajalta, ilmastollisen vaihtelun vaikutus valojen keskimääräisten tarvittavien vuotuisen käyttötuntien määrittämiseen säteilysummista oli kohtalaisen vähäinen. Vuoden 2017 elo-syyskuulta puuttui tiedot päivittäisestä säteilysummasta noin kolmen viikon ajalta, joten kyseisen vuoden päivittäisiä säteilysummia ei voitu laskelmissa käyttää.

16.1 Laskentamenetelmä

Päivittäisestä säteilysummasta, jonka yksikkö on J/cm^2 , määritettiin kasvien valontarpeesta kertova DLI-arvo kaavalla 8 (ks. s.44). Kunakin päivänä päivänvalosta saatavan DLI:n määrittämisessä käytettiin myös automaatiojärjestelmän ohjaukseen syötettyä kasvihuoneen lasituksenläpäisykerrointa 70 %,

Kun lisäksi eri tarjousvaihtoehtojen ja vanhan valaistuksen PPF_D-valotasosta on toisaalta mahdollista laskea kaavalla 5 (ks. s.41) sen tuottama DLI, niin voitiin valaistuksen sopiva ja myös kohtalaisen tarkasti todellista vastaava käyttötuntiaika määrittää sen perusteella, kuinka monta tuntia kasvit vuoden aikana tarvitsevat lisävalaistusta. Esimerkiksi kukille suositellaan usein tavallisesti vain 16 tunnin valotusaikaa, jotta ne kasvavat sopusuhtaisiksi [32].

Kun myös uusille tarjotuille valaisimille helposti kyettiin määrittämään niistä annetuissa tarjouksissa esitetyn valaistuslaskennan tuloksena saadusta keskimääräisestä valon määrästä kasvatusalueella sitä vastaava DLI, voitiin valaistuslaskennan arvioimalla valon määrällä vastaava tarvittava käyttötuntiaika siten helposti määrittää.

Menetelmä ei kuitenkaan huomionnut auringon korkeuskulmaa, jonka vuoksi säteilysummasta laskurilla saatu DLI oli luultavasti korkeampi kuin oikeasti. Laskuri laski DLI:n kaavalla 8 (ks. s.44), ja tämänkaltaiset säteilytehoa hyödyntävät kaavat ja laskurit usein olettavat, että auringon säteilytehosta lähes puolet on PAR-säteilyä, vaikka tosiasiallisesti Suomessa auringon matalan korkeuskulman vuoksi pidemmät valon spektrialueen ulkopuolella olevat aallonpituudet painottuvat spektrijakaumassa enemmän, jolloin PAR-säteilyä saattaa olla vain noin 27 % [10]. Niinpä tarvittava vuotuinen käyttöaika kyseisen DLI:n saavuttamiseksi olisi todellisuudessa luultavasti huomattavasti korkeampi, riippuen siitä kuinka paljon on laskentaa eli valojen tarkempaa ohjailua vaatineiden päivien keskimääräinen auringonsäteilyn PAR-osuus.

Käytännössä valaistukselta tarvittavien käyttötuntien määrittämistä varten oli tarpeen laskea yhteensä muutamia tuhansia Excel-ruutuja kunkin päivän säteilysummasta saatavaa DLI:tä, tavoite-DLI:n ja auringosta saadun DLI:n erotusta, sekä tarvittavaa tuntimäärää tavoitteesta puuttuvan DLI:n saavuttamiseksi. Eri-laisten valaistusratkaisujen sopivia käyttötunteja laskettiin siis sen perusteella, minkälainen on niistä saatava valon määrä kasvatusalueella.

16.2 Laskentamenetelmän soveltuvuus

Pelkästään tilastoitujen käyttötuntien perusteella olisi ollut myös epätarkkaa määrittää uudelle valaistukselle sopivaa käyttöaika. Tämä johtuu esimerkiksi siitä, että silloin kun vanha valaistus on ollut pisimmän sallitun aikaa päällä, olisi tilastosta käytännössä mahdotonta tietää tarkasti, kuinka paljon on sopiva lyhyempi käyttöaika. Valaistus käyttää ohjauksessaan tällä hetkellä samoja automaatiojärjestelmän mittaamia säteilyarvoja kuin elinkaarikustannuslaskelmaa varten määritetyn vuotuisen käyttötuntiajan laskemisessa on käytetty, mutta valaistuksen ohjaus perustuu hetkittäiseen mitattuun säteilytehoon eikä päivittäiseen säteilysummaan.

Nykyisillä valaistuksen ohjaamiseen käytetyillä asetuksilla, kun auringonvalosta ulkona mitattu säteilyteho on ollut jonkin aikaa yli tai asetusarvon, valot vastavasti joko sammuvat tai syttyvät. Viivästyksen nykyisillä asetuksilla valaistuksen syttymiseen asetusarvon ylittymisen tai alittumisen jälkeen kestää tavallisesti noin kuusi minuuttia, jotta kytkemisiä tapahtuu vain vähän. Ohjaus toimii myös kelloperusteisesti, aikaohjelman asetusarvojen mukaisesti kasveilla on lepoaika, jona valoja ei pidetä päällä auringonvalon puutteesta huolimatta.

Koska automatiikan ohjauksessaan käyttämät parametrit eivät suoraan liity auringonvalosta ja sähkövalaistuksesta saatavaan DLI-arvoon ja fotonimäärän mittaukseen tai laskelmiin niistä, kuten valaistuksen käyttöajan määrittämiseksi tässä käytetty laskentatapa, ei tuloksia muutenkaan voida pitää aivan samanlaisina kuin valaistuksen oikea käyttöaika on ollut. Tavallaan tämä laskentamenetelmän eroavaisuus automaatiojärjestelmän ohjaustapaan ei ole uuden valaistuksen tuntimäärän määrittämisessä ongelma, mutta vanhan valaistuksen kuluttaman energian laskemisessa se on. Uudelle valaistukselle voidaan työssä laskettujen käyttötuntien perusteella ilman laskennallista ongelmaa yrittää ohjelmoida uutta käyttöaika ja tällöin se melko tarkasti vastaisi salaatile asetettua tavoitetta 15 DLI, mutta aiempien kustannusten laskemisessa oikeat käyttötunnit olisivat luonnollisestikin paremmat.

Automaatio painottaa ohjauksessa enemmän tasaisen pitkää valotusaikaa eikä huomioi ohjauksessaan runsaita auringon säteilytehoja. Tältä osin laskentapa pyrkii antamaan systemaattisesti lyhyemmän valotusajan, kuin vanhalla valaistuksella on oikeasti ollut. Laskentaan syntyvä eroavaisuus korostuu sellaisina päivinä, kun auringon säteily on ollut runsasta ja automaatiojärjestelmä huomioi siitä toiminnassaan vain pienen osan. Koska kuitenkin laskennassa käytetyt arvot ovat muutenkin aivan erilaiset, kuin joita automaatiojärjestelmä käyttää, ei ole mahdollista määrittää ilman tietoa todellisista käyttötunneista onko laskennan tulos lopulta pidempi vai lyhyempi kuin nykyisen ohjauksen mukainen vuotuinen käyttötuntiaika.

Laskentamenetelmä soveltuu silti erinomaisesti valaistuksen tarvitseman vuosittaisen käyttöajan tarkasteluun ja määrittämiseen. Jonkin verran laskettua valon käyttöaikaa lyhentävää systemaattista virhettä on kompensoinut se, että laskennassa laskettiin päivittäinen lisävalon tarve koko vuodelle ja myös niille muutamille kesän päivälle, jolloin auringonvaloa on vain vähän. Oikeasti valot ovat harvoin kesällä päällä lainkaan, koska niiden sytyttäminen kesäkuukausina on tarpeetonta ja sähkön tehomaksujen vuoksi varsin kallista [32].

16.3 Vuotuisen käyttötuntiaikalaskennan tulokset

Laskennan tuloksena saatiin kultakin kasvatusvalaistukselta tarvittava käyttöaika, jotta voidaan auringonvalon kanssa kasvatusvalaistusta yhdistettäessä päästä mahdollisimman lähelle 15 DLI:tä. Viiden vuoden käyttötunneista laskettiin keskiarvo ja lasketut keskimääräiset tarvittava vuotuiset käyttötuntiajat ovat taulukossa 5.

Taulukko 5. Valaistuksen keskimääräisten vuotuisen käyttötuntien laskennan tulokset.

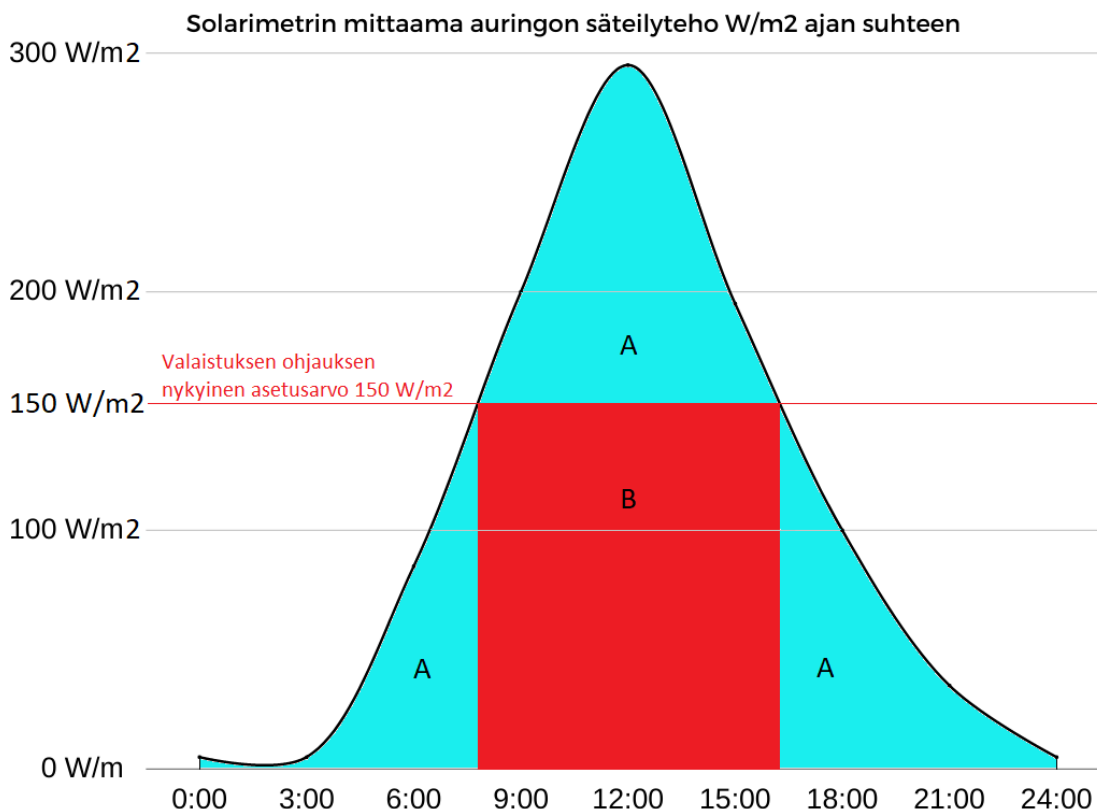
Vanha valaistus	Tarjous 1	Tarjous 2
4372 tuntia vuodessa	4161 tuntia vuodessa	3880 tuntia vuodessa

Lasketuista valaistuksen vuotuisista käyttöajoista huomataan, että tarjouksen 2 valaistus tarvitsee vastaavan DLI:n tuottamiseksi huomattavasti lyhyemmän valotusajan eli fotoperiodin. Aiempi valaistus taas oli valon määrältään niin heikko, että pienikin vaje päivittäisessä auringonvalonsaannissa tarkoitti tarvetta useamman tunnin päällä-oloon.

16.4 Laskennan virhelähteet ja ero automaation ohjausperusteisiin

Koska vanhan valaistuksen energiakustannusten määrittämisessä on useita virhelähteitä, joiden suuruus ja vaikutus vaihtelee, on niitä mahdollisesti syytä tarkastella, jotta saadaan parempi kuva laskelman soveltuvuudesta ja toimintata- vasta. Käyttötuntien laskentatapa aiheuttaa kasvatusvalaistukselta tarvittavan käyttöajan määrittämiseen epätarkkuutta jo siksikin, koska automatiikka käyttää ohjauksessaan hetkellisarvoja. Virhe tästä eroavaisuudesta on luonteeltaan systemaattista ja käytännössä tarkoittaa sitä, että automaation käyttämät parametrit eivät huomioi ohjauksessaan säteilytehoja ajalta, jolloin lamput ovat sammutettuina tai sytytettyinä, kun taas auringonvalosta kokonaisuudessaan saatavan DLI:n laskeminen ja tarvittavan lisävalaistuksen määrittäminen sitä kautta huomioi. Nykyisin automaation valo-ohjaus toimii vain sen perusteella ylittääkö tai alitetaanko mittauksessa tietty säteilytehon asetusarvo.

Käyttötuntien laskennan systemaattisen virheen suuruus on laskentatapaa käytettäessä suoraan verrannollinen sellaiseen auringon säteilytehon ja sitä vastaavan kertymän suuruuteen, jota automaatio ei toiminnassaan huomioi, ja sen suhteeseen päivän kokonaiskertymään. Tähän osuuteen säteilystä kuuluu automaation valo-ohjauksen asetusarvon ylittävä osuus päivittäisestä auringon säteilykertymästä sekä osuus, joka saadaan ennen valojen sytyttämistä ja sen jälkeen, kun ne sammutetaan, eli kuvan 29 mukaisesti alueet A.



Kuva 29. Kuva havainnollistaa laskentatavan ja automaatio-ohjauksen eroavaisuutta käyttötuntien määrittämisessä mahdollisesti laskentaan syntyvää virhettä. Virheen suuruus riippuu jossakin määrin alueiden A ja alueen B suhteesta. Silloin kun alueiden A suhteellinen koko kasvaa, korostuu ero laskentatavassa luultavasti entisestään.

Nykyisellään automaation asetusarvo valojen syyttämiseksi on $150 W/m^2$ teho ulkoa auringon säteilystä mitattuna ja valo-ohjauksen käyttämä lasituksenläpäisykerroin on 70 %. Kuvan alueen B aikaväli aikajanalla kuvastaa sitä aikaa, kun valaisimet ovat olleet riittävän auringosta tulevan säteilyn vuoksi pois päältä. Oikeastaan kyseinen ”virhe” saattaa kasvaessaan myös korjata lukemaa, koska ei tiedetä tarkalleen, minkälainen on käytetystä laskentatavasta syntyvä eroavaisuus laskentaan eli antaako se todellista lyhyempää käyttöaikaa vai pidempää. Jos laskennalla on tapana antaa todellista lyhyempää käyttöaikaa, syntyy eroa laskentaan vähemmän silloin kun alueiden A ja B erotus on suuri. Jos laskettava käyttöaika on laskentavan vuoksi jo lähtökohtaisesti todellista pidempi, syntyy eroa laskentaan vielä enemmän, kun alueiden A suhteellinen koko kasvaa alueeseen B verrattuna.

16.5 Virhelähteen painotus ja automaation raja-arvojen vaikutus

Kun laskenta painottuu niihin päiviin, jolloin valaistus on tarvinnut tarkempaa ohjailua ja säteilytehon raja-arvot ovat alittuneet ja valot on ohjattu päälle, ja nämä ovat toisaalta pääasiassa matalamman luonnonvalon päiviä, ei mainittu systemaattinen virhe laskentatavassa ole tästä syystä niin suuri. Työssä käytettyjen Priva-automaatiojärjestelmän viiden vuoden säteilysummatilastojen perusteella oli ilmeistä, että säteilytehon huippu ja keskimääräinen säteilyteho sekä siitä riippuva säteilykertymä olivat valo-ohjauksen laskentaa tarvinneina päivinä yleensä hyvin matalia.

Kuten kuva 29 havainnollistaa, käsiteltävän virheen tai käänteisesti korjauksen suuruus riippuu automaation valo-ohjausta varten annetun auringon säteilytehon asetusarvon ylittävästä säteilysummasta sekä säteilysummasta aikana, jolloin valot ovat sytytettyinä eli alueet A, sekä niiden suhteesta kokonaissäteilykertymään kunakin mitattuna päivänä. Ja mihin on syynä, että DLI-laskenta ottaa kyseiset säteilyarvot laskentatavassaan huomioon ja automatiikan valo-ohjaus ei huomioi niitä.

Toisaalta on erittäin haastavaa ja työlästä määrittää tarkemmin, kuinka suuri aiemmin käsitelty virhe yleisesti on ja mikä on sen osuus virhelähteiden kokonaismäärästä. Koska käyttötuntien ajoitus ja määrä laskennassa eroavat todellisista, syntyy muutoksia joidenkin päivien kohdalla ylitetäänkö tai alitetaan raja-arvoa eli tarvitseeko valaistusta sytyttää tai sammuttaa lainkaan. Tällöin virhe joka tapauksessa pienenee, koska laskennan ja todellisen ohjauksen eroavaisuus ei voi kasvaa yli raja-arvon, eli 0 tunnin tai 20 tunnin. Pisimmän ja lyhimmän valotusajan raja-arvojen lähellä virheen mahdollisuus vähenee ja sen koko pienenee. Kun valaistuksen ohjaus tai laskentatapa saa jommankumman kyseisistä arvoista, on laskennan tulos tarkempi. Jos sama raja-arvo saavutetaan sekä ohjauksessa että laskennassa, tulos on luonnollisestikin sama ja laskennan virhe niiden päivien osalta 0 %.

17 Muut elinkaarikustannuslaskennassa tarvittavat tiedot

17.1 Investointikustannukset

Tiedot investointikustannuksista saatiin pääasiassa Schteling Oy:n esittämistä tarjouksista, kiinteistön omistajan tiedoista sekä sähkö- ja jakeluverkkoyhtiöiltä. Asennuskustannusten tarkka määrittäminen ei ollut mahdollista ilman urakoitsijan hintatietoja, tarkempaa suunnitelmaa asennuksen toteutustavasta ja asianmukaista ohjelmistoa asennussuunnitelman tietojen käsittelemistä varten. Asennuskustannukset muodostavat välttämättömän osan investoinnin kiinteähintaisista alkukustannuksista, joka voi olla kookaskin, mutta tässä tapauksessa niiden merkitys investointivaihtoehtojen vertailussa ja elinkaarikustannuslaskelman hyödyllisyyden kannalta on vähäinen.

Valaisinten asennuskustannukset eivät eroa tarjotuissa vaihtoehdoissa paljon toisistaan, vaan käytännössä kyse on vain 42 kappaleen asentamisesta ja kytkemisestä tavallisella Schuko-pistotulpalla. Tämä saattaisi arvioiden mukaan tarkoittaa ehkä jopa puolta tuntia asennustyötä valaisinta kohden, eli 21 työtuntia ja mikä voisi olla noin 800 €. Suurempi ero tarjosten asennuskustannuksiin aiheutuu muutamien kahvasulakkeiden (PK ja RK2) vaihtamisesta ja parin uutena järjestettävän valaisinryhmän johdottamisesta ryhmäkeskukseen, sekä ryhmäkeskusta ja pääkeskusta syöttävien kaapelin vaihtamisesta.

Carunalta 5.6.2022 tulleen sähköpostin mukaan kiinteistön liittymisoikeuden kooka täytyy ylittymisen vuoksi joka tapauksessa kasvattaa, kuitenkin tarjouksen 2 tapauksessa muita kuluja on silti luultavasti erillinen Caruna Oy:n 13 230 €:n liittymismaksu pääsulakekoon kasvattamisesta (sis. alv 24%). Muutoin ilman liittymismaksua investoinnin asennus- ja sivukustannukset on nykyisin arvioitu jopa 15 000 €:n suuruisiksi, koska on tarpeen uusia kalliita automaatiokortteja.

Kokonaisuudessaan arvelisin kuitenkin eroa kahden tarjousvaihtoehdon välille syntyvän melko paljon, jos valaisimet asennetaan kaikki osastolle C, koska jos PK- ja RK2-sulakkeiden kapasiteettia nostetaan pitäisi silloin uusia jopa neljä kaapelia, joista suurin osa kulkee maan sisällä ja jotka kaikki ovat varsin paksua

4x185 mm²:n kaapelia. Niinpä asennuskustannusten ero tarjouksissa on luultavasti monia tuhansia jo keskustenkin kapasiteetin kasvattamisen vuoksi, vaikka alkujaan arvioin niissä ehkä olevan eroa kaikkiaan vain 3 000–4 000 €.

17.2 Valaisinten tiedot

Valmistajien datalehdistä, kiinteistönhoitajan dokumentaatioista sekä laitteen arvokilvestä saatiin valaisinten tarvittavia tietoja, kuten liitäntälaitteiden häviöteho, lampujen eliniät, sekä muita tietoja esimerkiksi valovirranalenemasta lampujen elinkaaren aikana. Uuden LED- ja HPS-yhdistelmävalaistuksen PPF-arvot saatiin tarjousten yhteydessä esitetystä valaistuslaskennoista. Valaisinten ja lampujen valovirranalenemaan ja käyttöikänsä liittyviä arvoja selvisi niiden datalehdistä tai käyttöohjeista. [17; 35.]

Korvattavalle 600 W:n valaistukselle on käytössä ollessaan arvioitu ja mitattu keskimäärin noin 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF-arvoja kasvatusalueella, mikä vastaa kahdenkymmenen tunnin valotusajalla noin viittä DLI-yksikköä. Niinpä automaatiojärjestelmän tallentamia päivittäisiä säteilysummia voitiin käyttää vanhan valaistuksen käyttötuntien arvioimiseen ja laskemiseen, vaikka tarkkaa tietoa oikeista käyttötunneista ei ollut tallentunut. Vanhan 600 W:n valaistuksen nelikohtainen asennusteho oli lähes sama, kuin jäljelle jäävällä 400 W:n suurpainenaatriumvalaistuksella [32].

17.3 Sähkön hintatiedot

Tarvittavat tiedot liittymästä ja tehonkulutuksesta voitiin helposti selvittää sähkökuluttajille suunnatusta Caruna+-palvelusta, jossa on mahdollista antaa yrityksen toimesta edustusosoikeudet tietojen katsomista varten. Myös muut sähkökulutuksen tiedot selviävät kyseisestä verkkopalvelusta hyvin, koko ajalta vuodesta 2013 jolloin liittymä on perustettu. Sähkön kulutussopimuksen hinnoista saatiin tietoa Vaasan Sähkö Oy:ltä tulleista kulutuslaskuista, työssä käytettyjen tietojen tapauksessa 1.10.2021. Laskelmassa käytetyt Caruna siirtoverkkoyhtiön hinnat ovat 3.9.2021 laskusta.

Nykyinen sähkön siirtohinta on 3,15 senttiä/kWh, perusmaksu 52,20 € ja kuukauden huipputehon mukaan määräytyvä tehomaksu 3,20 €/kW (ilman alv 24 %). Arvonlisäveroton loistehomaksu on 6,89 €/kvar ilmaisosan ylittävälle määrälle, mistä toisinaan aiheutuu joitakin kymppinä jakeluverkkoyhtiöltä tulevaan sähkölaskuun [53]. Vaasan Sähkön kulutuslaskussa 1.10.2021 ilmoitetut hinnat olivat 3,07 snt/kWh ja 2 €/kk perusmaksu, ilman alv 24 % [54].

Kulutussopimuksen uusista hinnoista ei ehditty työn puitteissa saada tietoa mihin oli osaksi syynä hieman viivästynyt vastaus Carunalta kyselyyn kulutuksen tuntijakaumasta sekä liittymäoikeuden kasvattamisesta. Carunan vastaus sähköliittymän korotuskyselyyn selviää liitteestä 1.

Yrityksen käyttöpaikalla suoritettava toiminta määrittää kohteen veroluokan. Veroluokan 2 eli halvemman veroluokan piiriin kuuluvat harjoittavat sähkön valmisteverosta annetun lain mukaista toimintaa, kuten tietyt teollisuusyritykset sekä ammatillinen kasvihuoneviljely. Veroluokan 2 hinta on nykyisin 0,07812 senttiä/kWh, huoltovarmuusmaksun kanssa ja sis. alv 24 %. Kauppapuutarha Verso Oy:n kasvihuonekiinteistössä kaikki toiminta on veroluokan 2 mukaista. Jos vain osa yrityksen toiminnasta, kuten sivutoimi, olisi oikeutettua alempaan veroluokkaan, on kuluttajan silloin toimitettava vuosittain tiedot kulutuksen alamittauksesta, josta eri veroluokan omaavien kohteiden kulutus ilmenee [55].

17.4 Huoltokustannukset

Valaisimet ovat vähäisen puhdistustarpeen vuoksi nykyisellään vailla huolto-suunnitelmaa ja ne vaihdetaan yksittäisvaihtona sitä tahtia, kun korjauskelvottomia valaisimia ilmenee. Myös tässä elinkaarikustannuslaskennassa on käytetty samaa yksittäisvaihdon periaatetta. Valaisimille on lisäksi kullekin määritetty 10 €:n huolto- tai puhdistuskustannus kymmenen vuoden elinkaaren päätteeksi. Valaisimista vaihdetaan kasvihuoneella pimenneitä lamppeja muiden töiden ohella, ja Valtti-laskuri huomioi valaisinten vaihdosta sekä lamppeiden vaihdosta koituvat kustannukset L- ja C-kertoimien sekä laskentaparametriksi syötettävän hyväksyttävän valovirranaleneman muodossa. Lisäksi vaihtokustannusten

laskentaan vaikuttaa vaihtolampuille tai LED-kennoille syötettävät hintatiedot sekä niille ilmoitettu elinikä.

18 Elinkaarikustannuslaskennan tulokset

18.1 Vanha korvattava valaistus

Aiemman valaistuksen Valtti-elinkaarikustannuslaskelman tulokset löytyvät taulukosta 6. Laskennan tuloksena syntyi selkeä vertailtavissa oleva käsitys aiemmista elinkaarikustannuksista suhteessa uuteen valaistukseen, koska molemmat summat ovat laskettuna niiden nykyarvoon.

Taulukko 6. Aiemman valaistuksen elinkaarikustannuslaskenta.

Vanhan valaistuksen kustannuslähde	Elinkaarikustannuslaskennan tulos, laskenta 10 vuodelle (sis. alv %)
Valonlähteiden alkuinvestointi	11 300 €
Asennuskustannukset ja muu	3 500 €
Investointikustannukset yhteensä	14 800 €
Huoltokustannukset	1 940 €
Valonlähteiden vaihtokustannukset	9 700 €
Tehomaksu ja perusmaksut	3 340 € / vuodessa
Käyttökustannukset	35 900 € / vuodessa
Energiakustannukset yhteensä (nykyarvossa, ei sisällä teho- ja perusmaksut)	345 300 €
Elinkaarikustannukset yhteensä (nykyarvossa, ei sisällä teho- ja perusmaksut)	371 700 €

Nykyarvolaskelma perustuu laskentakorkoon, jonka perusteella laskuri devalvoi tulevat kustannukset niiden nykyarvoon. Siten en ole käyttänyt aiemman valaistuksen nykyarvolaskelmassa ollenkaan laskentakorkoa ja tulevien kustannusten nykyarvolaskelmassa on 4 %:n vuotuinen laskentakorkokanta.

Investointikustannus vuonna -92 oli tämän päivän Poot-valaisinten (55,90 €) ja Osram Plantastar-lamppujen (45,00 €) hinnoista devalvoiden yhteensä noin 11 300 €, lisäksi asennuskustannuksia sekä muita kustannuksia noin 3 500 € [40].

Energiankulutuskustannukset viimeiselle kymmenelle vuodelle, summat nykyarvossa (0 %:n vuotuinen laskentakorkokanta ja 2 %:n vuotuinen energianhinnannousu) ovat noin 345 300 € yhteensä. Kaikki valaisimet ovat 600 wattista HPS-tekniikkaa. Laskennassa on mukana myös Osram Plantasta-lampun painotettu energiankulutus 680 wattia / 1000 tuntia, sekä valaisimelle oletetut 10 %:n liitäntälaittehäviöt [3; 40]. Myös sähkönkulutuksen hinnat on devalvoitu laskentaa varten kymmenen vuoden takaisiksi.

Käyttökustannukset ovat 35 900 € vuodessa sisältäen myös kulut energiankulutuksesta ja sähkön perusmaksut ja tehomaksun. Perusmaksuja ja tehomaksua Valtti-laskuri ei kuitenkaan sovellu laskemaan lopullisiin energiakustannuksiin, vaan ne ilmoitetaan erikseen vuotuisena kuluna. Niiden vuotuinen kustannus on laskennassa vanhalla valaistuksella noin 3 340 €, jos kaikkia valoja poltetaan vuodessa vain kahdeksana kuukautena eli varsinaisen kasvatuskauden ulkopuolella.

Valonlähteiden vaihtokustannukset ovat laskelmassa yhteensä 885 €/vuosi ja huoltokustannukset 162 €/vuosi eli yhteensä nykyarvossa noin 9 700 € ja € 1900 €.

Lasketut elinkaarikustannukset ovat yhteensä 371 700 €, sisältäen alkuinvestoinnin vuonna -92 ja kymmenen edellisen vuoden elinkaarikustannukset niiden nykyarvossa. Summa ei sisällä sähkön perusmaksuja sekä tehomaksua, jotka ovat yhteensä 3 340 €/vuodessa ja jotka tulisi laskea vuosittaisesta nykyarvoon sähkön hinnannousun mukaisella kertoimella (tässä laskennassa kasvun

oletettu olevan 2 %) ja vuotuisella laskentakorkokannalla, joka on tässä laskennassa 0 %.

Kaikki summat sisältävät arvonlisäveron, 22 % alkuinvestoinnille (alv % ennen vuotta 1994) ja energiakustannusten laskentaa varten 24 %. Energiakustannukset ja muut käyttökustannukset on laskettu viimeiselle kymmenelle vuodelle.

18.2 Tarjouksen 1 elinkaarikustannuslaskenta

Tarjouksen 1 Valtti-elinkaarikustannuslaskelman tulokset esitetään taulukossa 7. Summat ovat niiden nykyarvossa olettaen vuotuisen laskentakorkokannan olevan laskurin oletusarvona tarjoama 4 %.

Taulukko 7. Tarjouksen 1 elinkaarikustannuslaskelman tulokset.

Tarjouksen numero 1 kustannuslähde	Elinkaarikustannuslaskennan tulos, laskenta 10 vuodelle (sis. alv %)
Valonlähteiden alkuinvestointi	56 000 €
Asennuskustannukset ja muu	12 000 €
Investointikustannukset yhteensä	68 000 €
Huoltokustannukset	900 €
Valonlähteiden vaihtokustannukset	3 200 €
Tehomaksut ja perusmaksut	3 820 € / vuodessa
Käyttökustannukset	36 100 € / vuodessa
Energiakustannukset yhteensä (nykyarvossa, ei teho- ja perusmaksuja)	294 300 €
Elinkaarikustannukset yhteensä (nykyarvossa, ei teho- ja perusmaksuja)	366 200 €

Investointikustannus on yhteensä 68 000 €, mistä 12 000 € on erilaisia asennuskustannuksia esimerkiksi automaatiokorttien uusimisen muodossa. Asennuskiinnikkeet ja valmisjohdot sisältyvät laskelmassa investoinnin perussummaan, eivät asennuskustannuksiin.

Energiankulutuskustannusten kymmenen vuoden nykyarvo (4 %:n vuotuinen laskentakorkokanta ja 3 %:n vuotuinen energianhinnannousu) huomioiden lamppulle ilmoitetun energiankulutuksen ovat 294 300 € yhteensä [34]. LED-valaisimet ovat tästä 93 300 € ja HPS-valaisimet 201 000 €.

Käyttökustannukset ovat 36 100 €/vuosi sisältäen kulut energiankulutuksesta, sähkön perus- ja tehomaksut, sekä lamppujen ja valaisinten vaihdot ja huollot. Käyttökustannukset kuvastavat verrattain hyvin sitä, minkälainen laskentatuloks on ilman nykyarvolaskelmaa. Perusmaksuja ja tehomaksua Valtti-laskuri ei kuitenkaan sovellu laskemaan kymmenen vuoden nykyarvolla lopullisiin energiakustannuksiin. Niiden vuotuinen kustannus on laskennassa tarjousvaihtoehdossa yksi noin 3 820 €, jos valot ovat päällä vuodessa vain kahdeksana kuu-kautena, kuten on tässä tapauksessa tavallisesti riittävää.

Valonlähteiden vaihtokustannukset ovat yhteensä 28 €/vuosi LED-valaisimille ja 326 €/vuosi HPS-valaisimille. Kymmenelle vuodelle nykyarvossa valonlähteiden vaihtokustannuksista ovat 280 € LED-valaisimille ja 2900 € HPS-valaisimille, huoltokustannuksia laskettiin olevan 900 €.

Kustannukset ovat yhteensä 366 200 € alkuinvestoinnista ja kymmenen vuoden käyttökustannuksista niiden nykyarvossa, sisältämättä 3 820 €/vuodessa sähkön perusmaksuja sekä tehomaksua, jotka tulisi laskea vuosittaisesta nykyarvoon sähkön hinnannousun mukaisella kertoimella (tässä laskennassa kasvun on oletettu olevan 3 % vuodessa) ja vuotuisella laskentakorkokannalla, joka on tässä laskennassa 4 %. Hinnat sisältävät arvonlisäveron 24 %.

18.3 Tarjouksen 2 elinkaarikustannuslaskenta

Taulukossa 8 on tarjousvaihtoehdon 2 elinkaarikustannuslaskelman tulokset Motivan Valtti-ohjelmalla laskettuna. Summat ovat niiden nykyarvossa olettaen vuotuisen laskentakorkokannan olevan 4 %.

Taulukko 8. Tarjouksen 2 elinkaarikustannuslaskennan tulokset.

Tarjouksen numero 2 kustannuslähde	Elinkaarikustannuslaskennan tulos, laskenta 10 vuodelle (sis. alv %)
Valonlähteiden alkuinvestointi	76 600 €
Asennuskustannukset ja muu	28 320 €
Investointikustannus yhteensä	104 920 €
Huoltokustannukset	1 240 €
Valonlähteiden vaihtokustannukset	4 020 €
Tehomaksut ja perusmaksut	4 980 € / vuodessa
Käyttökustannukset	46 400 € / vuodessa
Energiakustannukset yhteensä (nykyarvossa, ei teho- ja perusmaksuja)	377 300 €
Elinkaarikustannukset yhteensä (nykyarvossa, ei teho- ja perusmaksuja)	487 520 €

Investointikustannus on yhteensä 104 920 €, mistä 15 000 € muodostuu asennuskustannuksista esimerkiksi automaatiokorttien uusimisen muodossa. 13 230 € investointikustannuksista on siirtoverkkoyhtiön liittymismaksua pääsulakkeiden kasvattamisesta 3x(3x125) A:n, mikä on luultavasti välttämätöntä, jos kaikki

valaisimet asennetaan ja teho kytketään päälle laitoksen nykyisen huipputehon lisäksi.

Energiankulutuskustannusten kymmenen vuoden nykyarvo (4 %:n vuotuinen laskentakorkokanta ja 3 %:n vuotuinen energianhinnannousu) on 372 800 € yhteensä lampun ilmoitetun energiakulungin kanssa. LED-valaisimet ovat tästä 118 100 € ja HPS-valaisimet 254 700 €.

Käyttökustannukset ovat 47 660 €/vuodessa yhteensä sisältäen kulut energiankulutuksesta sekä perusmaksut ja tehomaksun. Sähkön perusmaksujen ja tehomaksun vuotuinen kustannus on laskennassa tarjousvaihtoehdolla 2 noin 4980 €, jos valot ovat päällä vuodessa vain kahdeksana kuukautena, ja ne eivät sisälly lopulliseen laskelmaan kustannusten nykyarvosta.

Valonlähteiden vaihtokustannukset ovat laskelmassa 32 €/vuosi LED-valoille ja 430 €/vuosi HPS-lampuille, nykyarvo on laskennan mukaan 320 €:n kustannus ledeille ja 3 700 €:n suurpainenatrium-lampuille, yhteensä 4020 €. Lisäksi laskelmassa on huoltokustannukset valaisimille 144 €/vuosi ja nykyarvossa 1 240 € yhteensä.

Elinkaarikustannukset ovat laskennan mukaan yhteensä 487 520 € alkuinvestoinnista ja kymmenen vuoden käyttökustannuksista niiden nykyarvossa. Sisällyttämättä 4978 €/vuodessa sähkön perusmaksuja sekä tehomaksua, jotka tulisi laskea vuosittaisesta nykyarvoon sähkön hinnannousun mukaisella kertoimella (tässä laskennassa kasvun oletettu olevan 3 %) ja vuotuisella laskentakorkokannalla, joka on tässä laskennassa 4 %. Laskentaan on käytetty nykyisiä sähkön siirto- ja kulutussopimusten hintoja, hinnat sisältävät arvonlisäveron 24 %.

18.4 Johtopäätökset elinkaarikustannuslaskelmasta

Elinkaarikustannuslaskennan tuloksena saatiin eriteltyinä tieto käyttökustannuksista. Tähän sisältyi lamppujen vaihtokustannusten lisäksi laskurissa myös sähkön teho- ja perusmaksut, sekä erikseen investointikustannukset ja

kustannukset energiankulutuksesta. Teho- ja perusmaksuja laskuri ei soveltunut laskemaan kymmenen vuoden ajalta niiden nykyarvossa, joten niiden summa on ilmoitettu erikseen.

Laskelmasta selvisi paljon asioita mahdollisten tulevien käyttökustannusten suuruudesta kummallekin tarjoukselle, sekä myös vanhan valaistuksen kustannuksista viimeiselle kymmenelle vuodelle. Siten Kauppapuutarha Verso Oy voi paremmin varautua ja myös kehittää toimintaansa, jotta turhia kuluja sähkön siirto- ja kulutuskustannuksissa sekä tehomaksuissa voidaan välttää. Tehomaksuja tosin vältetään jo nyt, kun valaistusta ei pidetä päällä varsinaisen kasvu-kauden aikana.

18.5 Elinkaarikustannuslaskelmat ja sähkön hintakehitys

Suunnitelmien yhteydessä on kuitenkin huomioitava myös nykyinen sähkön vahvassa nousussa oleva hintatilanne, erityisesti pörssisähkön, josta myös Yle on viime aikoina uutisoinut ja jonka hintoja myös kiinteähintaiset sähkö sopimukset jossain määrin seurailevat. Myös uusissa sähkö sopimuksissa hintojen nousu on viime aikoina ollut hyvin nopeaa. [56.]

Energiaviraston julkaiseman tilaston mukaan sähkön uusien siirtosopimusten hinnat olivat siirtoverkkoyhtiö Caruna Oy:llä vuoden 2019 marraskuussa pienteollisuuden siirtosopimuksen TJ1:n tapauksessa energiankulutuksesta 7,68 snt/kWh. TJ2:n tapauksessa hinta oli energiankulutuksesta 6,86 snt/kWh talvipäivisin sekä jonkin verran halvempi muuna aikana, arvonlisäverojen 24 % kanssa [57].

Carunan verkonhaltijakohtaiset keskihinnat sähkön siirrolle vuonna 2022 tammi-kuussa olivat pienteollisuuden TJ1:n tapauksessa 6,89 snt/kWh ja TJ2:n tapauksessa 5,57 snt/kWh arvonlisäverojen 24 % kanssa, ja joka on TJ2:n tapauksessa talvipäivien korkein hinta [57].

Tämä ei silti luultavammin aiheuta suurta ongelmaa, koska Carunalta 9.5.2022 tulleessa sähköpostissa vedottiin 1.11.2019–2021 siirtohinnoittotaulukkoon eli vuoden 2021 verkkopalveluhinnastoon. TJ2:n hinnat siinä olivat vain päiväsiirto talvisin 2,86 snt/kWh sekä muun ajan siirto 1,84 snt/kWh, 52,20 €:n perusmaksu ja 5,46 €/kWh tehomaksu, sekä 6,89 €/kvarin loistehomaksu TJ2-liittymäsopimuksen tapauksessa, mutta hinnat ilman arvonlisäveroprosenttia. [58.]

Sähkösopimusta ei ole tarpeen liittymisoikeuden kasvattamisen lisäksi tarpeen muuttaa, mutta liittymähinnaston mukaan viime vuoden 2021 hinnat olivat PJ2:n eli TJ2:n (pienteollisuuden liittymäsopimus) tapauksessa jonkin verran halvempia, paitsi tehomaksun osalta. Talvipäivien siirtohinnoittotaulukko eli ma–la, klo 7–22 ajalla 1.11–31.3 oli Carunalla vuoden 2021 verkkopalveluhinnastossa 3,55 snt/kWh ja 2,28 snt/kWh muulloin, sis. alv % [58]. Niinpä yrityksen kannattaisi luultavasti vaihtaa siihen. Vaasan Sähköltä ei ehditty tätä työtä varten saada tietoja uusista kulutus sopimuksen hinnoista, eikä elinkaarikustannuslaskelmia tehty myöskään Carunan PJ2-sähkönsiirtotuotteen hinnoilla, vaan yrityksen nykyisillä sähkö sopimusten hinnoilla.

Nykyiset sähkön siirtolaskun hinnat [53] ovat ilman erillistä talvipäivien hintaa ja energiankulutuksesta 3,91 snt/kWh + Perusmaksu 64,70 € + Tehomaksu 3,97 €/kW + Loistehomaksu 8,54 €/kvar (hinnat sis. alv 24 %) + Sähkövero 2.

Työn laskelmat ovat nykyisten sähkö sopimusten hintojen perusteella, mutta Valtti-laskuri tuottaa varsin korkeita lukemia kymmenen vuoden kustannuksille, jos esimerkiksi siirtolaskuun lisätään kolme senttiä lisää kilowattituntia kohden. Kuten vaikuttaisi olevan mahdollista, kun nykyistä määräaikaista sopimusta joudutaan toisinaan uudistamaan.

Laskelmassa käytetty odotusarvo sähkön hintakehitykselle 3 % on melko matala ottaen huomioon nykyisen hintatilanteen. Valtti-laskuri tarjoaa oletusarvona 2 %, ja melko pitkään sähkö sopimusten hinnat ovatkin olleet suhteellisen vakaita [57]. Koska laskelmat ovat nykyarvossa tarkoittaa tämä myös sitä, että maksut ovat tulevana ajankohtana tosiasiallisesti vieläkin suuremmat. Kun hinnat

ovat nykyarvossa voidaan vanhan valaistuksen energiakustannuksia ja elinkaarikustannuksia vertailla paremmin, ja siksi ne on tässä raportissa esitetty näin. Yrityksen taloudellisen tilanteen kannalta tulee kuitenkin huomioida myös nämä muut näkökohdat.

18.6 Johtopäätöksiä sähkön hintakehityksestä

Uusien sopimusten hinnat ovat pääasiassa pysyneet samana tai luultavammin nousseet ja voidaan todeta, että sähkön siirtosopimuksen uusiminen voi mahdollisesti tuoda yrityksen energiakustannusten kannalta kookkaan lisäkulun [57]. Kun yritys kolmen vuoden päästä nykyisen määräaikaisen sähkönsiirtosopimuksen uusii, voi hintatilanne olla hyvinkin erilainen kuin aiemmin tai nyt. Tämä saattaisi olla melko energiariippuvaiselle yritykselle kohtalaisen suuri haaste, vaikka huomattava osa Kauppapuutarha Verso Oy:n käyttämästä energiasta tulee edullisesti Gasum Oy:n hukkalämmöstä. Voisi olla ehkä eduksi pyrkiä sopimaan pidempiaikaiset sähkönsopimukset yrityksen energiankulutuksen ja sähkölaskujen vakaampien hintojen takaamiseksi. Tällä hetkellä sopimukset kilpailutetaan määrävuosin kolmannen osapuolen kautta.

LED-valaisimet ovat tulossa vasta aikaisintaan heinäkuussa 2022 ja ne on tarkoitus ottaa syksyllä käyttöön, joten asentamista tai lopullisia tarkkoja suunnitelmia ei ole ehditty vielä aloittaa. Niinpä parasta tapaa niiden asentamiseksi voidaan edelleen harkita ja näin mahdollisesti välttää monenlaisia lisäkustannuksia, joita myöhemmistä suunnitelmien muutoksista koituisi. Tämä on osaksi oheisen elinkaarikustannuslaskelman ansiota, sillä se antoi paljon tarkempaa lisätietoa valaistusvaihtoehtojen kulutuksesta ja mikä mahdollisesti vielä tärkeämpää, tuoreet tiedot sähkönsopimusten hintojen nopeasta kasvusta kävivät ilmi työn parissa ja näin yritys voi varautua niihinkin paremmin.

Myös voidaan todeta, että tarjous 1 vaikuttaa laskelmien ja sähkön hintakehityksen perusteella taloudellisesti kohtalaisen kannattavalta vaihtoehdolta. Energiankulutus asennuksen yhteydessä vähenisi ja kuitenkin voidaan myyjän

esittämän valaistuslaskennan mukaan saavuttaa aiempaan nähden jopa kaksinkertainen valon määrä kirkaammalla alueella huonetta.

19 Loistehon kompensoimisesta mahdollisesti koituvat hyödyt

Toimintatapansa vuoksi suurpainenatriumvalaisimilla on tapana synnyttää työtä tekemätöntä loistehoa, josta sähköverkkoyhtiö nykyisin laskuttaa verkolle koituvan kuormituksen vuoksi. Loistehoa aiheutuu pääasiassa suurpainenatriumpurkauslampan tarvitsemasta virranrajoittimesta, jonka toiminta synnyttää eroa vaihevirran ja vaihejännitteen välille jättämällä virtaa jälkeen ja aiheuttaen sen, että pätötehon osuus näennäistehosta pienenee ja loistehon osuus kasvaa. [3; 59.]

Tässä tapauksessa virranrajoittimen aiheuttama induktiivinen kuorma saa aikaiseksi sen, että vaihe-eroa pyrkii syntymään myös syöttävään verkkoon, mikä on sen toiminnan kannalta ongelmallista. Niinpä vaikei loisteho olekaan kulutettua tehoa samalla tavoin kuin pätöteho, laskuttaa sähköverkkoyhtiö silti tietyn laskennallisen rajan ylittävästä osuudesta. [59.]

Pien- ja keskijänniteverkon asiakkailta induktiivisen loistehomaksun perusteena on osaksi kuukausittainen loistehohuippu, josta ensin vähennetään 20 % saman kuukauden laskutuspätötehoisuuden määrää, tai yli 50 kilovaria ylittävä induktiivisen loistehon määrä [59].

Induktiivisen loistehon hintaan vaikuttaa myös sen suhteellinen määrä, 20–40 % laskutuspätötehon määräästä on ilman kerrointa ja yli menevällä osalla hinta on viisinkertainen. Loistehomaksun suuruus määräytyy hinnaston mukaan. Toisaalta laskutettava kapasitiivinen loisteho on kunkin kuukauden suurin mitattu kapasitiivinen loisteho, josta ensin vähennetään 5 % laskutuspätötehon lukuarvosta tai vähintään 12,5 kVar. Kyseiset uudet säännöt sähkönsiirtosopimuksille on julkaistu 1.1.2019. [59.]

19.1 Tehokertoimen vaikutus

Koska uusien HPS-valaisinten elektroninen virranrajoitin suo niille huomattavasti paremman tehokertoimen, tulee loistehon osuus kiinteistön sähkönsiirtokustannuksista joka tapauksessa investoinnissa laskemaan. Magneettisen virranrajoittimen kanssa varustettujen suurpainenatriumvalaisinten tehokerroin $\cos(\varphi)$ voi olla esimerkiksi noin 0,8 ja uusien elektronisella mallilla varustettujen HPS-valaisinten ja LED-valaisinten on 0,98 tai joidenkin dokumenttien mukaan jopa 0,99 [34].

Kiinteistön aiempi kuukauden korkein loistehohuippu on ollut Carunan tietojen mukaan jopa 56 kvar (13.11.2018), kun pätötehon osuus on ollut 222 kW. Toisaalta se on tavallisesti hieman matalampi 40–50 kvar, kun täysi valaistusteho esimerkiksi 231 kW on ollut käytössä. Vastaavasti tehokertoimet ovat välillä $\cos(\varphi) = 0,969–0,985$. Ilmeisesti nykyinen paikallinen kompensointi valaisimissa on siten varsin tehokas, sillä huonoimmillaan koko laitoksen tehokerroin on tavallisessa melko hyvä.

19.2 Johtopäätökset kompensoimisen kannattavuudesta

On oletettavissa, että kun loistehon osuus uuden asennuksen yhteydessä laskee sen osuus sähkölaskusta luultavasti häviää muutenkin kokonaan. Syyskuussa 2021 loistehon hinta sähkölaskussa on ollut 6,89 €/kvar ilmaisosuuden ylittävälle määrälle (ilman alv %). Nykyisellään sen suuruus vaihtelee noin välillä 0–60 € kuukaudesta riippuen. Kesäkuukausina maksua syntyy useammin, koska valaistuksella on muuta laitteistoa parempi tehokerroin ja korkea kuukausittainen pätötehuippu nostaa myös sallittua loistehon määrää. Mutta turhat tehomaksut valojen sytyttämisestä olisivat tietysti vieläkin kalliimpia.

On olemassa myös automatisoituja keskitettyjä kondensaattoriparistoja loistehon kompensoimiseen, jotka voivat oikein asennettuina huolehtia siitä, ettei myöskään ylikompensoimista pääse syntymään. Sellainen saattaisi mahdollisesti tuoda joissakin vuosissa muutamia tuhansia euroja säästöä, mikäli ne

eivät ole kovin kalliita. Niiden tavoitearvo tai asetusarvo tehokertoimelle voi olla esimerkiksi $\cos(\varphi)=0,995-0,997$. [59; 60.]

20 Valaistuksen himmentämisen mahdolliset hyödyt

Koska valmistajan Philips mukaan tarjotun LED-valaistuksen valotehokkuus eli hyötysuhde paranee himmentämällä jopa yli kymmenen prosenttia (kun valaistuksen teho on himmennettynä 50 %) ja koska on olemassa muitakin etuja, joita tarkemmalla automaation ohjauksella voidaan saavuttaa, on myös LED-valaistuksen himmentämisestä mahdollisesti saatavia hyötyjä tarpeen pohtia [61]. Täydellä himmentämättömällä teholla tarjotulle LED-valaisimelle ilmoitetaan 3,5 $\mu\text{mol}/\text{J}$ fotosynteesiaktiivista fotonihyötysuhdetta PPE ja himmennettynä puoleen niiden tehosta jopa 3,8 $\mu\text{mol}/\text{J}$ [17]. Myös HPS-valaisinten himmentämisestä on kuitenkin olemassa jonkin verran kokemusta [62].

20.1 Himmennystapa

Koska tarjotuissa Philipsin LED-valaisimissa on niiden tasavirtamuuntaja sisäänrakennettuna ja ne myös sopeutuvat syöttävän verkon jännitetasoon, ei himmennystä käytännössä voida hoitaa tavallisella virta- tai jänniteohjauksella. Jotta virtaohjaus esimerkiksi TRIAC:illa voitaisiin järjestää, vaatisi kytkimen asentamista virransyötön ja valonlähteen väliin. Samantapainen ongelma olisi myös Gavitan HPS-valaisinten tapauksessa niiden sisäänrakennetun 230 voltista 400 volttiin jännitemuuntajan vuoksi.

Valmistajan Philips mukaan valaisimet tarvitsevatkin Philips GrowWise Control System -hallintajärjestelmän (GWCS) ja sen tukeman Coded Mains -himmennysprotokollan, jotta niitä voidaan himmentää. Tarkoitukseen olisi kuitenkin hankittava kallis himmennysjärjestelmä, ja jatkuva suora PAR-säteilytason mittaus auringonvalosta olisi hieman tarkempi tapa määrittää sopiva himmennystaso kuin laskea vastaava arvo kertoimen avulla kaikesta auringon säteilystä mitatusta säteilytasosta. [17; 61.]

HPS-lamppujen himmentämisellä voi olla vaikutusta niiden valotehokkuuteen, ja lampun polttoikä voi lyhetä, spektrijakauma muuttuu sekä tavallisesti tehokertoimen huononee. Himmentämisellä voi olla purkauslamppujen toimintaan myös monia muitakin vaikutuksia, esimerkiksi valokaaren reitti voi muuttua. Haittavai-
kutukset ainakin pienitehoisilla lampuilla (70–100 W) ilmenevät kuitenkin pää-
asiassa vasta himmennettäessä alle 60 %:iin kokonaistehosta ja jos lamppua ei
himmennetä enempää, ei tästä välttämättä aiheudu suuria häiriöitä sen toimin-
taan. Kyseiset tulokset on saatu, kun himmentämisen toimivuutta on tutkittu re-
sonantilla täyssilta-invertterillä. [62.]

Ei ole kuitenkaan kovin yleistä himmentää HPS-valaisimia, sillä siitä voi aiheu-
tua enemmän lisäkustannuksia, kuin saavutetaan hyötyä. Nykyisten elektroni-
sella virranrajoittimella varustettujen HPS-valaisinten himmentäminen on kuiten-
kin mahdollista, jos valaisin ja lamppu sitä tukevat. [62.]

20.2 Himmentämisen edut

Himmennyksen avulla on mahdollista keinotekoisesti simuloida auringonnousua
ja -laskua, joka on kasvien näkökulmasta luonnollisempaa. Kun kasvien olosuh-
teet ovat luonnollisemmat, voidaan saavuttaa etuja, kuten paremman makuisia
salaatteja ja muita vihanneksia sekä mittasuhteiltaan kauniimmiksi kasvaneita
kukkia [17; 61]. Kasvit eivät yleisesti pidä nopeista ja voimakkaista vaihteluista
valon määrässä esimerkiksi fotosynteesin induktion vuoksi, joten valaistuksen
hidastusta sammumisesta tai syttymisestä on tästä näkökulmasta etua.

Oikeastaan tutkimusten mukaan nopeat ja voimakkaat vaihtelut valon määrässä
saattaisivat muutenkin haitata fotosynteesiä ja kasvien kasvua, sillä niillä voi
vuoden 2016 tutkimusten mukaan olla vaikutusta kasvien valoa keräävien an-
tennikompleksien liikkeeseen ja värähtelyihin (LHC – Light-harvesting complex).
Esimerkiksi on todettu auringon säteilyn vihreiden värinsävyjen signaalin vaihte-
levan niin paljon, että sen tehokas absorboiminen haittaisi antennikompleksien
läpi virtaavaa energiaa. [63; 64.]

LED-valaistuksen tarvitsema ja luultavasti hyvin kallis järjestelmä olisi kuitenkin huomattavasti hyödyllisempi, jos käytössä olisi enemmän ledejä ja eri värispekt-rin valaisimia, koska tällöin voitaisiin esimerkiksi auringonlaskuja ja -nousuja jäl-jiteltäessä hyvin tarkkaan säädellä valaistuksen spektrikoostumusta mahdolli-simman luonnolliseksi [17; 61]. Esimerkiksi joitakin kasveja niin sanotusti puna-valo-käsitellään iltaisin, millä on niiden kasvuun suotuisia vaikutuksia [27; 32]. Tarjousten Philips-ledeissä siniset ja kaukopunaiset LED:it ovat kuitenkin sa-massa kennossa, eikä niitä siten voida ohjailta erikseen.

Lisäksi kun suurin osa kasvihuonetilojen muusta kasvatustaloudesta koos-tuu HPS-valaisimista, olisivat Philips GWCS -hallintajärjestelmän käyttömahdol-lisuudet varsin rajoitetut, eikä sellainen muutoinkaan toisi nykyisen korkeatasoi-sen automaatiojärjestelmän lisäksi kovin suurta lisähyötyä.

Himmennystä automatisoidusti liu'uttamalla voidaan auringonvalon ja sähköva-lon yhdistämisessä pidentää valaistuksen vuotuista käyttöaika ilman, että va-laistus on ylivoimainen. Himmennyksestä saatava hyöty riippuu siis paitsi valojen käyttöajasta himmennettynä ja silloisesta valaisinten valotehokkuudesta, niin myös siitä paljonko kytkemisiä on. Kytkemisten määrään on yhteydessä se aika, kun juuri himmennyksen ansiosta voidaan käyttää yhdistelmävalaistusta ja samalla säätää sen teho juuri sopivaksi salaatile suositellun valon vähimmäis-määrän kannalta.

Jos LED-valaistus ohjelmoidaan automaation kautta himmentymään syttymisten ja sammumisten yhteydessä liukuvasti auringon säteilystä mitatun tason perus-teella, voidaan automaatiojärjestelmälle valaisinten sytyttämistä varten syötettyä pienintä auringon säteilytehon arvoa W/m^2 nostaa, ja siten kasvatustaloudesta ja auringonvalon yhdistämistä lisätä kasvilajien yksilöllisten tavoitearvojen mukaisesti.

20.3 Tarve käyttää himmennystä

Himmennyksestä saatava hyöty riippuu esimerkiksi siitä, kuinka paljon on auringonvalon vaihtelun vuoksi kytkemisiä ja siten himmennysaikaa, kuinka korkea LED-valaisinten valotehokkuus on sinä aikana, kun himmennystä eniten käytetään, sekä kuinka paljon sillä muuten voidaan optimoida luonnonvalon sekä HPS- ja LED-valaistuksen yhteistä toimintaa.

Vaikka LED-valojen valotehokkuus tai fotonitehokkuus voi himmentämällä hieman parantua niin on silti hyvä, etteivät valot ole aina himmennettyinä, koska tehokkaammat valaisimet ovat kalliimpia ja silloin valaistusta voitaisiin pitää ylimitoitettuna. Koska tarjouksissa olevista valaisimista esitettyjen valaistuslaskelmien mukaan kumpikaan tarjottu valaistus ei täydellä 20 tunnin päällä olemisellä yllä salaatin kasvattamiseksi tavoiteltuun 15 DLI:n arvoon, ei tarjotuilla valaisimilla tarvetta himmennykseen ole siihen aikaan vuodesta lainkaan, kun valaistus on koko kasvien valotusajan päällä täydellä teholla.

Tarjousten valaistuslaskentoihin perustuen vähemmän tehokas lähettää fotoneja kasvatusalueelle laskennallisesti keskimäärin noin 8,6 DLI-yksikköä 20 tunnin valotusajalla ja enemmän valaisimia sisältävässä tarjouksessa vastaava luku on noin 12,7 DLI:tä.

Himmennys olisi enemmän tarpeen tarjousten yhdistelmävalaistuksilla jonkin pienemmän päivittäisen DLI:n tarvitsevia kasveja kasvatettaessa, koska tällöin tarvetta himmennykseen olisi huomattavasti enemmän. Siinä tapauksessa himmennys voisi olla jatkuvasti käytössä, ja silloin Philips Toplight LED -valaisimet voisivat olla jossakin määrin himmennettynä aina, sekä fotonihyötysuhde useammin korkein mahdollinen valmistajan lupaama.

Tämä ei kuitenkaan niiden kalliin hinnan vuoksi ole välttämättä kovin kannattavaa ja muutenkin tehokkaamman himmentämättömän LED-valaistuksen spektri sekä kasvien tarvitsemat aallonpituudet siinä ovat tarpeen tukemaan suurpainenatriumvalaistusta. Lisäksi koska auringonvalon suurpainenatriumvalaistuksen spektriä parantava vaikutus on melko vähäinen silloin kun valaistus on

käytössä koko päivän, tehokkaampaa himmentämätöntä LED-valaistusta tarvitaan varsinkin tuolloin tuomaan siihen täydennystä.

LED-valaisimet tuottavat tarjousten asennussuunnitelmissa fotoneista jopa lähes puolet, sillä niille ilmoitettu PPF-arvo on 1 800 $\mu\text{mol/s}$ ja tarjousten sisältämän suurpainenatriumlampun on 2 100 $\mu\text{mol/s}$ [17; 36]. Niinpä jos ledit himmennetään puoleen valontuotosta saavutetaan arviolta noin 260 W:n säästö valaisinta kohden ja noin 15 %:n säästö kasvatushuoneen energiakustannuksissa, mutta kasvatusvalaistuksen lähettämän valon määrä voi pudota viidenneksen tai lähes neljänneksen.

Tarjotut LED-valot tulevat käyttöön vasta myöhemmin, joten niistä kasvatusalueella saatavan valon määrää ei voida vielä mitata ja sen selvittämiseksi tarvittaisiin edistynyttä valaistuslaskentaa. Toisaalta kun tarjousten valaistuslaskennat sisältävät arvot vain yhdistelmävalaistukselle, niin ilman tarkempaa tietoa pelkästään LED-asennuksen lähettämästä valosta ei voida myöskään tarkkaan määrittää sitä mikä yhdistelmävalaistuksesta saatava valon määrä on, jos LED-valoja himmennetään hyötysuhteen kannalta mahdollisimman vähän kuluttaviksi.

Vähäinen tarve himmennykseen on tämän investoinnin tapauksessa sekä etu että haitta. On etua, jos ei tarvitse investoida kalliiseen himmennysjärjestelmään. Toisaalta koska Philips Toplight LED -valaisinten fotosynteesiaktiivinen fotonihyötysuhde kuitenkin valmistajan ilmoittaman mukaan paranee hieman, kun himmennetään, voi valaistuksen himmentäminen tuoda hieman säästöjä sen sähkönkulutuksessa [17]. Himmennyksen avulla on myös mahdollista säädellä tarkasti fotoaktiivisen fotonivuon tiheyttä kasvatusalueella.

21 Johtopäätöksiä valaisintarjouksista

Tarjotut valaisimet on suunniteltu toimimaan hyvin kasvinviljelyssä ja ne ovat uutta tekniikkaa, minkä vuoksi niiden toimintavarmuus ja hyötysuhde olisi aiempaa parempi. Lisäksi erilaisen valaistustekniikan yhdisteleminen on kätevää,

koska tällöin voidaan hyödyntää molempien ratkaisujen hyviä puolia ja samalla saadaan helposti vielä laajempi ja monipuolisempi, kasveille paremmin sopiva spektri, kuin mitä vain yhdenlaisilla valaisimilla saataisiin. Kuitenkin juuri yhdistyvää väriensekoittumista haittaa pieni valaisinmäärä tilaan nähden, sillä valaisimia olisi tarjouksessa 1 viisikymmentä aiempaa vähemmän. Tarjouksen 2 tapauksessa valaisimia on uudessa asennuksessa 18 vähemmän ja kummassakin tapauksessa myös kasveja lämmittävä suurpainenaatrium-asennusteho vähenisi nykyisestä, tarjouksen 1 tapauksessa se lähes puoliintuu.

Kun valaistuksessa voidaan yhdistää LED-valaisinten vähäinen kulutus ja HPS-valaisinten kasveja lämmittävä vaikutus, on mielestäni syytä olettaa, että kyseinen yhdistelmä voi olla kasvinviljelyn kannalta kohtalaisen tehokas. Erityisesti tarjouksen 2 tapauksessa valon määrä on valaistuslaskennan perusteella melko suuri ja voisi ylittää jopa puoleen siitä, mitä se kirkkaammalla säällä kasvihuoneen sisällä on, sekä korkeimmillaan jopa kolminkertaiseen valon määrään verrattuna aiempaan valaistukseen. Kuitenkin kuten aiemmin on perusteltu, vaikuttaisi useastakin syystä siltä, että tarjouksen 2 asentaminen kokonaan osaston C-puolelle toisi mittavia lisäkustannuksia, esimerkiksi koska tuolloin pääsulakeiden kokoa pitäisi luultavammin nostaa ja syöttäviä kaapeleita kasvattaa sekä luultavammin maksaa pääsulakekoon kasvattamisesta 13 230 €:n liittymismaksu.

Tarjous 1 sen sijaan alkaisi tuottamaan välitöntä säästöä matalamman energiankulutuksensa vuoksi. Koska LED-valaisimet kuluttavat vähemmän energiaa, voidaan investoinnin yhteydessä myös saada korkeampi kokonaisvalaistusvoimakkuus, vaikka kokonaissähköteho ei kasvakaan tai jopa laskee. Valaisintiheys vaikuttaa paljon siihen, kuinka hyvin kasvit saavat valoa myös sivuttaisuunnassa ja muista suunnista kuin ylhäältä päin. Kun kasvit saavat valoa useasta suunnasta ja myös alemmille lehdilleen niiden kasvu tehostuu huomattavasti. Tarjousten LED-valaisinten valaisukulma on kahdesta kyseisen tuotemerkin vaihtoehdosta leveämpi 150 astetta ja siten sama, kuin sen kanssa tarjotun HPS-valaisimen heijastinosalla.

Kuten mainittua valaistuksen spektri olisi kasvien ja näkemisen kannalta yhdistyvän väriensekoittumisen vuoksi sopivampi kuin aiemmin tai kummallakaan valaisinmallilla erikseen asennettuna [9]. Mielestäni juuri valon yhdistyvän väriensekoittumisen ja siitä aiheutuvan valkoisemman valon vaikutus vuonna 2016 selvinneeseen kasvien valoa keräävien antennikompleksien (LHC) värähtelyliikkeeseen voisi olla yksi syy, jonka vuoksi laajemmalla spektrikoostumuksella ja kaikilla PAR-alueen aallonpituuksilla on jonkinlainen hyödyllinen vaikutus kasvien fotosynteesitoiminnan kannalta [7; 64]. Ei välttämättä ole vielä aivan varmaa mikä on vihreän valon värinsävyn vaikutus värähtelyihin ja kuinka asiaan vaikuttaa kasvien taipumus heijastaa pois juuri sitä, muutoin kuin että vaihtelu vihreän aallonpituuskaistan auringonvalossa häittäisi antennikompleksien toimintaa [63].

Kasvien valoa kerääviin antennikomplekseihin ja niiden värähtelyliikkeeseen liittyvä uudehko tutkimus antaa myös mielestäni mahdollisesti viitteitä, että valaistusvaihtoehtoja verrattaessa myös niiden tapa emittoida valoa ja fotoneja saattaa olla kasveihin vaikuttava tekijä ja syy, miksi kyseinen erilaisista valaisimista koostuva kokoonpano saattaa paremmin soveltua kasveille yhdessä kuin erikseen [63; 64].

HPS-lampun laajasta spektristä on kasveille monia etuja, mutta kuitenkin vihreiden LED-valaisinten lähes monokromaattinen syvän vihreä valo saattaisi tuoda spektriin lisättynä yllättäviä etuja ja tekisihän se valosta edelleen luonnollisimman värisen muutankin [9; 34]. Tänä vuonna 2022 ilmestynyt LED-tutkimus antaa viitteitä siitä, että joillekin kasveille jopa puolet valon määrästä vihreistä diodeista voi olla matalilla valon määrillä paras suhde ainakin joillekin kasveille, kun LED-valaistuksessa sekoitetaan eri värinsävyjä. Tämä poikkeaa hyvin paljon siitä, mikä on aiempi käsityksistä valon vihreän värinsävyn merkitys kasveille. [37]

21.1 Energiankulutus

Suurin osa valaistuksen kustannuksista syntyy niiden käyttöiän aikaisista energiakustannuksista, kuten tämänkin työn elinkaarilaskennassa ilmeni. Niinpä voi

olla järkevää pohtia voidaanko niitä saada laskemaan esimerkiksi välttämällä turhia tehomaksuja, turhaa kulutusta ja kalliita sähkösopimuksia sekä pyrkimällä sopimaan pitkäaikainen kiinteähintainen sähkösopimus. Kiinteistön nykyinen sähkönsiirtosopimus on voimassa vielä kolme vuotta, mutta on erittäin mahdollista, että uudessa sopimuksessa on nykyisen sähkön hintakehityksen vuoksi huomattavasti suuremmat hinnat.

Elinkaarikustannuslaskelmien mukaan tarjouksen 2 alkuinvestoinnin hinta ei ole kovin suuri verrattuna tarjoukseen 1, suhteessa kustannuseroon energiankulutuksessa, joka muodostaisi nykyisessäkin hintatilanteessa moninkertaisen eron investoinnin alkukustannuksiin verrattuna. Tämä oli jossakin määrin odotettavissa, koska tavallisesti valaistuksessa energiakustannukset muodostavat ylivoimaisesti suurimman osan elinkaaren aikaisista kokonaiskustannuksista.

Jos sähkövalaistusta käytetään auringonvalon lisänä, niin kannattavan valotusajan ja tarvittavan valaistuksen määrittämisessä on se vaikeus, että tehokkaampaa valaistusta pidetään tavallisesti päällä lyhyemmän aikaa. Mikäli tarvittavaa valonsaantia määritetään DLI:n tai säteilysummien perusteella tai jos lisävalaisun tarve lasketaan erityisen tehokkaalle valaistukselle, niin valotusaika voi varsinkin kirkaampina päivinä jäädä huomattavasti lyhyemmäksi, kuin se lehtisalaatille voisi olla.

Pidemmästä valotusajasta tai suuremmasta fotonivuon tiheydestä saatavan hyödyn arvioiminen ei ole yksinkertaista. Kannattaako valoja esimerkiksi käyttää syys-lokakuun vaihteessa tai maaliskuun-huhtikuun vaihteessa, kun päivä on huomattavasti lyhyempi kuin lehtisalaatin fotoperiodiksi suositeltu 20 tuntia, mutta päivittäinen suositeltu valontarve tulee auringonvalosta DLI:nä laskettuna silti täyteen. Myös kasvien yksilölliset tarpeet ja pidempiaikaiset kierrot vaikuttavat niiden valontarpeeseen [33].

Suomen kesän aikana saadaan pelkästä luonnonvalosta hyvin valoa salaateille lähes koko suositellun 20 tunnin aikana, mutta talvella edes päivittäinen saantisuositus ei täyty ilman järeää kasvatusvalaistusta. Nykyisellään automaatiikka ei

huomioi päivittäistä suositeltua valontarvetta, joten se suosii enemmän tasaisen pitkää valotusaikaa auringon säteilystä riippumatta.

21.2 HPS-heijastinosa

Suurpainenatriumvalaisinten EcoMax Miro-alumiinista heijastinosaa suositellaan vaihdettavaksi kahden vuoden tai jopa vuoden välein, koska pinnoite ei kestä puhdistusta tai sen jälkeen heijasta hyvin valoa [35], ja teollisissa kasvi-huoneissa olosuhteet ovat aina jossakin määrin pölyiset. Heijastimen vaihtamista valaisinten käyttöiän aikana on ehkä syytä harkita, mikäli valaisinten suuresta energiankulutuksesta halutaan saada paras mahdollinen hyöty ja pitää yllä niiden fotosynteesiaktiivista fotonihyötysuhdetta (PPE) sekä vastaavaa kasvatusalueelle säteilevää fotonivuota (PPF ja PPFd).

Uudet heijastinosat valaisimiin eivät ole energiakustannuksiin verrattuna kovin kalliita, vaan maksavat nykyisellään noin 45 € kappaletta kohden ilman veroja tai toimituskustannuksia [65]. Niinpä heijastinten vaihtamista esimerkiksi käyttöiän puolessavälissä saattaisi kuitenkin olla hyvin järkevää, tai niitä voidaan valmistajan uhkauksista huolimatta yrittää puhdistaa. Nykyisellään valaisimet ovat heijastimineen kuitenkin kokonaan ilman huoltoa tai huoltosuunnitelmaa, ja tavallisesti valaisimia ja lamppeja vaihdetaan sitä mukaa kun niitä pimenee. Kuitenkin heijastinosan vanhanemisen ja tästä johtuvan valaisimen valovirranalenneman vuoksi HPS-valaisinten valotehokkuus, sekä PPE-hyötysuhde, laskisi muutamassa vuodessa merkittävässä määrin.

21.3 RoHS-direktiivi

HPS-valaisinten käyttöikä saattaa jäädä lyhyeksi, kuten seitsemään vuoteen elinkaarikustannuslaskelmassa esitetyn kymmenen vuoden käyttöiän sijaan, mikäli haitallisia aineita rajoittavaa RoHS-direktiiviä kiristetään entisestään. Tällöin voi käydä jopa niin, ettei uusia vastaavia valaisimia tai niiden varaosia ja lamppeja ole enää saatavilla. Nykyisin Euroopan unionin RoHS (Restriction of Hazardous Substances) määrittelee enimmäispitoisuudet kymmenelle haitalliselle

aineelle, jotka selviävät rajoitettuine enimmäismäärineen painon miljoonasosan suhteen taulukosta 9.

Ensimmäistä kertaa direktiivi tuli käyttöön vuonna 2002 ja nyt on voimassa jo RoHS 3, joka on aiempia laajempi ja jossa on myös tiukennettu määräyksiä. Kuitenkaan aivan tarkkaa tietoa minkälaisia muutoksia on suunniteltu ja milloin seuraava RoHS-direktiivi tulee ei ole vielä julkaistu [39].

Valaisinpakettiin kuuluvan Philips MASTER GreenPower Plus 1000W EL/5X6CT-lampun nimellinen elohopeasisältö (nominal content, Hg) on 42.0 mg ja lampun paino on 108,0 g. Niinpä sen elohopeapitoisuus painon suhteen on 296,33 ppm [36].

Taulukko 9. RoHS 3 direktiivin vuonna 2019 määrittelemät haitallisten aineiden enimmäisrajat [66].

Alkuaine tai kemiallinen yhdiste	Direktiivin sallima pitoisuus, ppm
Kadmium (Cd)	< 100 ppm
Lyijy (Pb)	< 1000 ppm
Elohopea (Hg)	< 1000 ppm
Heksavoloitu kromi (Cr VI)	< 1000 ppm
Polybrominoidut bifenyylit (PBB)	< 1000 ppm
Polibrominoidut difenyylieetterit	< 1000 ppm
Bis(2-etyyliheksyyli) ftalaatti (DEHP)	< 1000 ppm
Bentsyylibutyylftalaatti (BBP)	< 1000 ppm
Dibutyylftalaatti (DBP)	< 1000 ppm
Di-isobutyylftalaatti (DIBP)	< 1000 ppm

Koska lampun elohopea on painoa kohden alle kolmasosan sallitusta rajasta, ei näillä näkymin ole luultavaa, että direktiivi kiristyy lähivuosina sellaiselle tasolle, jonka vuoksi valaisinpaketissa oleva lamppu poistuu myynnistä tai korvaavaa sallitun elohopeamäärän rajoissa olevaa ei ole saatavilla

Tämä ei kuitenkaan ole varmaa, koska elohopea on eläville olennoille ja ympäristölle jo pieninä määrinä ja pitoisuuksina hyvin haitallista ja onhan kadmiuminkin sallittu pitoisuus vain kymmenesosan siitä, mitä muille direktiiviin sisältyville haitallisille aineille sallitaan. Puheita suurpainenaatrium-lamppujen poistumisesta markkinoilta on. Myös tästä syystä on ehkä hyvä, että yritys jo nyt investoi pitkäikäiseen ja valotehokkaaseen LED-teknologiaan.

22 Yhteenveto

Tarkoituksena oli tuottaa yritykselle luotettavaa tietoa sen investointivaihtoehtojen soveltuvuudesta kasvinviljelyyn sekä niiden elinkaarikustannuksista. Mielestäni Valtti-laskuri oli tässä suuri apu, joka helpotti paljon laskelmien suorittamista. Laskurin tuottamat arviot aiemman ja suunnitellun valaistuksen elinkaarikustannuksista antavat selkeän kuvan minkälainen muutos valaistuksen käyttökustannuksiin olisi tulossa investoinnin johdosta mahdollisesti tulossa, ja mittauksista saatu tieto jäljelle jäävän valaistuksen toiminnasta osaltaan varmasti selkeyttää käsitystä sen tuottamasta fotosynteesiaktiivisesta fotonivuosta.

Mielestäni työn tavoitteet tässä mielessä saavutettiin ja myös ymmärrys kasvien tavasta hyödyntää valoa laajeni paljon työn yhteydessä tutkimustietoa selvittäessä. Työtehtävänä olleet elinkaarikustannuslaskelmat ja selvitystyöt onnistuivat melko hyvin, ja lopputuloksena saatiin kokonaisuudessaan muutenkin laaja selvitystyö liittyen investoinnin kustannuksellisiin, teknisiin, fysikaalisiin ja fyto-logisiin eli kasvitieteellisiin puoliin. Jos ei myös kasvien fotosynteesiprosessiin ja niistä saatuun uuteen tutkimustietoon olisi työtä tehdessä perehtynyt, olisi ollut mahdotonta sanoa lainkaan, kuinka hyvin suunnitellut valaisimet oikeasti tarkoitukseensa soveltuvat. Työn yhteenvetona voidaan todeta myös, että kasvihuonevalaistus ja kasvinviljely asettaa käytettävälle sähkö- ja valaistustekniikalle

monenlaisia haasteita. Kuten työn selvityksissä on käynyt ilmi, tulisi samalla huomioida esimerkiksi sekä kasvien fotosynteesiaktiivisuus ja muu viihtyisyys valaistuksessa, että esimerkiksi ympäristö- ja energianäkökulmat.

Kauppapuutarha Verso Oy:lle tarjotun yhdistelmävalaistuksen etuna on, että yksin sen HPS-osasta puuttuisi eniten juuri sinistä värinsävyä [3]. Myös kasvin fytochromien ja muidenkin fotoreseptoriproteiinien toiminnan kannalta tärkeät kaukopunaiset tai syvänpunaiset värinsävyt ovat siinä varsin heikkoja, ja joita kuitenkin tarjotut LED-kasvatusvalot sitten myös tuottavat [17; 27]. Vihreiden aallonpituuksien valoa suurpainenaatrium-valaistus tuottaa varsin vähän, enimmäkseen spektrialueen keltavihreältä osalta enemmän kuin puhtaan vihreältä tai sinivihreältä, mutta hieman vihreää ja runsaasti keltaista sen spektri kuitenkin sisältää ja näin yhdistyvä väriensekoittuminen saa LED-valaistuksen kanssa valon näyttämään kohtalaisen valkoiselta [9; 14]. Työn viimeisessä liitteessä 7 on lisää havainnollistavia kuvia valon yhdistyvistä väriensekoittumisesta ja Tulasikasveista Hare Kṛṣṇa -temppelillä Helsingissä.

Lähteet

- 1 Kauppapuutarha Verso Oy:n yrityssivut. 2021. Verkkoaineisto. <<https://www.kauppapuutarhaverso.fi/>>. Päivitetty 2021. Luettu 5.3.2022
- 2 Vehmaan Verson yritysalueen sivut. 2020. Verkkoaineisto. <<https://www.vehmaa.fi/yrityspalvelut/vehmaan-verso>>. Päivitetty 14.8.2020. Luettu 1.3.2022
- 3 Halonen, Liisa & Lehtovaara, Jorma. 1992. Valaistustekniikka. Espoo: Ota-tieto.
- 4 Ahponen, Veikko. 1998–1999. Valaistustekniikka-sarja; osa 2, Lamput ja valaisimet. Suomen sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry:n ja Suomen valoteknillinen seura ry:n julkaisu. Espoo: Sähköinfo.
- 5 Säteilyn eri aallonpituusalueet. 2022. Verkkoaineisto. Kuva muokattu. <<https://www.cyberphysics.co.uk/topics/radioact/Radio/EMSpectrumcolor.jpg>> Päivitetty 2022. Luettu 12.5.2022.
- 6 Gringer. 2008. Verkkoaineisto. Public domain. Kuva muokattu. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linear_visible_spectrum.svg> Päivitetty 27.8.2008. Luettu 12.5.2022.
- 7 Sarvikas, Päivi; Suorsa, Marjaana; Rintamäki, Eevi; Vapaavuori, Elina; Aro, Eva-Mari; Tyystjärvi, Esa. 2017. Fotosynteesi. Helsinki, Suomi: Books on Demand GmbH.
- 8 Radiant and luminous flux: what are they? 2022. Kuva. Verkkoaineisto. <<https://www.electrical4u.com/radiant-flux-and-luminous-flux/>> Päivitetty 23.10.2020. Luettu 30.5.2022.
- 9 Juselius, Ulrika. 2004. Väri on valoa. Verkkoaineisto. <<http://www.phpoint.fi/ulrikaj/www/colors.htm#subtr>> Päivitetty 16.11.2015. Luettu 10.3.2022.
- 10 Ritchie, R.J. 2010. Modeling photosynthetic photon flux density and maximum potential gross photosynthesis. Faculty of Technology and Environment, Prince Songkla University / Phuket, Thailand 83120. Verkkoaineisto. <<https://www.researchgate.net/publication/225339540>> Päivitetty 1.12.2010. Luettu 25.3.2022.
- 11 Bartok, John W. Jr. 2018. Does light transmission through greenhouse glazing matter? Verkkoaineisto. <<https://www.greenhousemag.com/article/does-light-transmission-through-greenhouse-glazing-matter/>> Päivitetty 5.4.2018. Luettu 1.4.2022.

- 12 William, J. Roberts. 1998. Glazing Materials, Structural Design, and Other Factors Affecting Light Transmission in Greenhouses Bioresource Engineering Rutgers University. Verkkoaineisto. <<https://fyi.extension.wisc.edu/energy/files/2016/09/Glazing-structure-other-factors-affecting-light-transmission-in-GH-Roberts.pdf>> Päivitetty 1998. Luettu 5.3.2022.
- 13 "Resonance radiation." 2022. Merriam-Webster.com Dictionary, Merriam-Webster. Verkkoaineisto. <<https://www.merriam-webster.com/dictionary/resonance%20radiation>> Päivitetty 10.3.2022. Luettu 10.3.2022.
- 14 Full Spectrum LED- ja HPS-spektrijakauman vertailu. 2022. Verkkoaineisto. Kuva. <<https://wegrowpros.com/blog/hps-vs-led-grow-lights-the-complete-guide/>> Päivitetty 2022 Luettu 13.4.2022.
- 15 Koivunen, Taina. 2003. Tehokkaasti kasvihuoneesta / toimittanut; [valokuvat: Arto Rantanen] Julkaisutiedot; Helsinki: Opetushallitus. (Jyväskylä: Gummerus)
- 16 Barceló-Muñoz, M.; Gago-Calderon, A. Joulukuu 2021. Effect of LED Lighting on Physical Environment and Microenvironment on In Vitro Plant Growth and Morphogenesis: The Need to Standardize Lighting Conditions and Their Description. Verkkoaineisto <<https://www.researchgate.net/publication/357341047>> Päivitetty 2021. Luettu 13.4.2022.
- 17 Philips Toplight GP Compact-esite. Maaliskuu 2021. Kuva. Verkkoaineisto. <<https://www.lighting.philips.com/main/products/horticulture/greenpower-products/led-toplighting-compact>> Päivitetty 2021. Luettu 3.2.2022.
- 18 Scherz, Paul & Monk, Simon. 2013. Practical electronics for inventors, third edition. McGraw-Hill Education LLC, Yhdysvallat.
- 19 Whelan, M. 2013. LEDs and OLEDs. Verkkoaineisto. <<http://edisontechcenter.org/LED.html>> Päivitetty 2013. Luettu 15.4.2022.
- 20 S-kei, Wikimedia-käyttäjä. 2011. LED- p-n-junktio. By User:S-kei – Verkkoaineisto.File:PnJunction-LED-E.PNG, CC BY-SA 2.5. Kuva. <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14985902>> Päivitetty 22.4.2011. Ladattu 29.4.2022.
- 21 Inkinen, Pentti; Manninen, Reijo; Tuohi, Jukka. 2002. Momentti 2, insinöörifysiikka. Kustannusosakeyhtiö Otava, Helsinki. 2.–5. painos.
- 22 Eskola, Sisko Maria; Ketolainen, Pasi; Stenman, Folke. 2007. Fotoni, Aine ja säteily, Fysiikka 8. Kustannusosakeyhtiö Otava, Helsinki. 1. painos.

- 23 Shine-järjestelmänvalvoja. 2020. What is an LED die (chip)? Global Lighting Forum. Verkkoaineisto. <<https://www.shine.lighting/threads/127/>> Päivitetty 5.12.2020. Luettu 20.4.2022.
- 24 Young, Barry. 2018. Osram joins Philips and GE, exiting luminaire businesses. Verkkoaineisto.<https://www.oled-a.org/osram-joins-philips-and-ge-exiting-luminaires-business_81318.html> Päivitetty 13.8.2018. Luettu 25.4.2022
- 25 Pocock, Tessa. 2018. McCree Curve Demystified. Verkkoaineisto. <https://www.photonics.com/Articles/The_McCree_Curve_Demystified/a63340>. Päivitetty 16.4.2018. Luettu 2.4.2022
- 26 PAR, PPF, YPF, PPFD, DLI. 2022. Verkkoaineisto. <<https://www.hortigrowlight.com/en-gb/par-ppf-ypf-ppfd-dli>> Päivitetty 2022. Luettu 28.3.2022.
- 27 Tingting Tan, Shenglan Li, Yuanfang Fan, Zhonglin Wang, Muhammad Ali Raza, Iram Shafiq, Beibei Wang, Xiaoling Wu, Taiwan Yong, Xiaochun Wang, Yushan Wu, Feng Yang, Wenyu Yang. 2021. Far-red light: A regulator of plant morphology and photosynthetic capacity. Verkkoaineisto. <<https://www.science-direct.com/science/article/pii/S2214514121001501>> Päivitetty 1.4.2022. Luettu 15.4.2022.
- 28 Mrmw, Wikimedia-käyttäjä. 2018. Verkkoaineisto. Creative Commons Zero v1.0 Universal. Teksti muokattu. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:McCree-Kurve_1_DE_demo.png> Päivitetty 15.8.2018. Ladattu 7.5.2022.
- 29 Vanhaelewyn, Lucas; Van Der Straeten, Dominique; De Coninck, Barbara; Vandebussche, Filip. 2020 Ultraviolet Radiation From a Plant Perspective: The Plant-Microorganism Context. Verkkoaineisto. <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.597642/full>> Päivitetty 15.12.2020. Luettu 21.3.2022.
- 30 Gonçalves dos Reis, Mariana; Ribeiro, Aristides. 2019. Conversion factors and general equations applied in agricultural and forest meteorology. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/339896036_Conversion_factors_and_general_equations_applied_in_agricultural_and_forest_meteorology> Päivitetty 2020. Luettu 2.4.2022.
- 31 What Are The PAR, PPF And PPFD In Grow Light? 2022. Verkkoaineisto. <<https://www.finepixeled.com/par-ppf-ppfd-grow-light/>> Päivitetty 17.10.2020. Luettu 1.4.2022.
- 32 Kainu, Petteri. Keskustelut ja sähköpostit 2021–2022. Tekniikan DI. Asiantuntija ammattimaisessa kasvihuoneviljelyssä. Serkku ja toinen kauppapuutarha Verso Oy:n pääomistajista.

33 Mendonca, Michelle; Holland, Daryl; Haydon, Mike. 2017. The chemical that tells plants when it's time to sleep. Verkkoaineisto. <<https://pursuit.unimelb.edu.au/articles/the-chemical-that-tells-plants-when-it-s-time-to-sleep>> Päivitetty 2022. Luettu 20.4.2022

34 Klimek-Szczykutowicz, Marta; Prokopiuk, Barbara; Dziurka, Kinga; Pawłowska, Bożena, Ekiert, Halina; Szopa, Agnieszka. 2021. The influence of different wavelengths of LED light on the production of glucosinolates and phenolic compounds and the antioxidant potential in in vitro cultures of *Nasturtium officinale* (watercress). Verkkoaineisto <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11240-021-02148-6>> Päivitetty 2021. Luettu 23.4.2022.

35 Gavita GAN HPS-valaisinten käyttöohje. 2022. Verkkoaineisto. <<https://gavita.com/horti/app/uploads/Manual-GAN-Electronic-750-1000W-DE-EU-V17-24.pdf>> Päivitetty 2022. Luettu 20.2.2022.

36 Philips GreenPower Xtra 1000 watin suurpainenatriumlamppu. 2022. Verkkoaineisto. <https://www.lighting.philips.com/main/prof/conventional-lamps-and-tubes/high-intensity-discharge-lamps/hid-horticulture/horti/928152419216_EU/product> Päivitetty 2022. Luettu 13.4.2022

37 SFS-käsikirja 600–1–2. 2017. Osa 1–2: Erikoistilojen ja täydentävät vaatimukset (SFS 6000-standardi) Osat 7–8. 1. painos. Kustantaja SFS, Helsinki.

38 SFS-käsikirja 600–1–1. 2017. Osa 1–1: Pienjännitesähköasennukset (SFS 6000-standardi) Osat 1–6 Yleisvaatimukset. Painos 1. Kustantaja SFS, Helsinki.

39 Kallasjoki, Tapio. Keskustelut ja sähköpostit 2021–2022. Insinöörioppityötä ohjaava opettaja, Metropolia Oy:n lehtori, Suomen Valaistusteknillinen Seura ry:n puheenjohtaja.

40 Osram Plantastar 600 watin suurpainenatriumlamppu. 2022. Verkkoaineisto. <<https://www.onninen.fi/osram-lamput-suurpainenatriumlamppu-osram-plantastar-600w-400v/p/HDF050>> Päivitetty 2022. Luettu 13.4.2022

41 Caruna Oy siirtoverkkoyhtiön vastaussähköposti liittymän korotuskyselyyn. 6.5.2022. Kuva. Luettu 7.5.2022.

42 ABB-kahvasulakedokumentti gG- ja aM-sulakkeet 2...1 600 A. 2022. Verkkoaineisto. <<https://library.e.abb.com/public/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/1SCC317002C1801.pdf>> Päivitetty 2022. Luettu 10.3.2022.

43 DI-2017. 2017. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Espoo: Sähköinfo Oy. 26. painos. Painokurki Oy, Helsinki.

44 Tiainen, E. 2010. Johdon mitoitus ja suojaus. Espoo: Sähköinfo Oy. 3. uudelleenpainos.

45 Prysmian-kaapelidokumentti AMCMK 0,6/1 kV. 2018. Verkkoaineisto. <https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/cpr%20AMCMK%200%2C6_1kV_180118.pdf> Päivitetty 18.1.2018. Luettu 20.3.2022.

46 Prysmian-kaapelidokumentti AXMK-PLUS4G185AN 0,6/1kV. 2011. Verkkoaineisto. <<https://www.finnparttia.fi/AXMK-4x185>> Päivitetty 6.4.2022. Luettu 3.6.2022.

47 ST 53.14. 2018. Ohjeet perinteisten sulakkeiden valinnasta ja käytöstä, alle 1000 V:n sähköjärjestelmät. Verkkoaineisto. <https://www.severi.sähköinfo.fi> Espoo: Sähköinfo Oy. Päivitetty 13.11.2018. Luettu 3.4.2022.

48 Saavalainen, Heli. 2000. Inter Graydon-artikkeli. Verkkoaineisto. <<https://www.hs.fi/kaupunki/art-2000003933863.html>> Päivitetty 15.12.2000. Luettu 14.3.2022.

49 Ahponen, Veikko; Kasurinen, Esko & Timonen, Tapani. 1996. Valaistuksen laskenta, mittaukset ja huolto. 1. Painos. Suomen sähkörajoitusliitto ry. Suomen valoteknillinen seura ry. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.

50 Apogee-instruments mittausvälinevalmistaja. 2022. Verkkoaineisto. <<https://www.apogeeinstruments.com/sq-520-full-spectrum-smart-quantum-sensor-usb/>> Päivitetty 2022. Luettu 28.3.2022.

51 Motivan Valtti-laskuri. 2016. Valaistustieto, Motiva Oy. Verkkoaineisto. <<https://valaistustieto.fi/laskuri/>> Päivitetty 15.6.2016. Luettu 15.11.2021.

52 Suur-Uski, Päivi. Puhelu 6.4.2022. Valtti-asiantuntija, Motiva Oy.

53 Caruna Oy:n sähkösiirtolaskulasku. 3.9.2021. Kauppapuutarha Verso Oy.

54 Vaasan Sähkö Oy:n energiankulutuslasku. 1.10.2021. Kauppapuutarha Verso Oy.

55 Caruna Oy siirtoverkkoyhtiö. 2021. Sähkövero. Verkkoaineisto. <<https://www.caruna.fi/palvelut/sahkonjakelu/sahkovero>> Päivitetty 1.1.2021. Luettu 1.4.2022.

56 Sähkön hinta koko loppupalveksi yli kaksinkertaistui hetkessä. 2021. Helsingin Sanomat-artikkeli. Verkkoaineisto. <<https://yle.fi/uutiset/3-12231628>> Päivitetty 22.12.2021 Luettu 13.4.2022.

- 57 Energiaviraston hintaseurantatilastot. 2022. Verkkoaineisto<[https://energia-
virasto.fi/sahkon-hintatilastot](https://energia-
virasto.fi/sahkon-hintatilastot)> Päivitetty 2022. Luettu 13.4.2022.
- 58 Verkkopalveluhinnasto 2019–2021, Caruna Oy. Verkkoaineisto. <[https://ima-
ges.caruna.fi/verkkopalveluhinnasto_caruna_oy_1.11.2019-2.pdf](https://ima-
ges.caruna.fi/verkkopalveluhinnasto_caruna_oy_1.11.2019-2.pdf)> Päivitetty
2021. Luettu 27.3.2022
- 59 Tampereen Sähköverkko Oy. 2019. Loistehon kompensointiohje. Verkkoai-
neisto. <[https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opas-
teet/sahkoverkko/tsv-ohjepankki/2.sahkon-suunnittelijalle-ja-urakoitsijalle/5.-lois-
teho-ja-kompensointi/1.-loistehon-kompensointi.pdf](https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opas-
teet/sahkoverkko/tsv-ohjepankki/2.sahkon-suunnittelijalle-ja-urakoitsijalle/5.-lois-
teho-ja-kompensointi/1.-loistehon-kompensointi.pdf)> Päivitetty 2019. Luettu
1.4.2022.
- 60 Hietalahti, Lauri; Eronen, Mikko; Pakonen, Pertti; Männistö, Matti; Seesvuori,
Reino & Vesa. 2018. Yliaallot ja kompensointi / Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto
STUL ry; päätoimittaja: Orrberg, Matti. Julkaisutiedot Espoo: Sähköinfo Oy.
- 61 Philips GP Toplight-tuoteohje. 2020. Verkkoaineisto. <[https://www.manu-
alslib.com/manual/1949381/Philips-Greenpower-Led-Toplighting-Compact-Se-
ries.html](https://www.manu-
alslib.com/manual/1949381/Philips-Greenpower-Led-Toplighting-Compact-Se-
ries.html)> Päivitetty 2020. Luettu 3.2.2022.
- 62 Ponce-Silva, Mario; Correa, Jailane Brandao; Arau, Jaime. 2002. Dimming in
metal-halide and HPS lamps operating at HF: Effects and modeling. Verkkoai-
neisto. [https://www.researchgate.net/publication/3972720_Dimming_in_metal-
halide_and_HPS_lamps_operating_at_HF_Effects_and_modeling/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/3972720_Dimming_in_metal-
halide_and_HPS_lamps_operating_at_HF_Effects_and_modeling/figures?lo=1)
Päivitetty 2022. Luettu 20.4.2022.
- 63 Why Are Plants Green? To Reduce the Noise in Photosynthesis. 2020. Verk-
koaineisto. <[https://www.quantamagazine.org/why-are-plants-green-to-reduce-
the-noise-in-photosynthesis-20200730/](https://www.quantamagazine.org/why-are-plants-green-to-reduce-
the-noise-in-photosynthesis-20200730/)> Päivitetty 2020. Luettu 23.4.2022.
- 64 Arp, Trevor B.; Morris, Jed-Kristner; Aji, Vivek; Cogdell, Richard J.; Van
Grondelle, Rienk; Gabor, Nathaniel M. 2020. Quieting a noisy antenna reprodu-
ces photosynthetic light-harvesting spectra. Verkkoaineisto.
<<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba6630>> Päivitetty 2020. Luettu
25.4.2022.
- 65 Gavita W150 EcoMax Miro -heijastinosa. 2022. Verkkoaineisto. <[https://max-
growshop.fi/product-fin-1555-Vaihdeettava-heijastin-Gavita-Pro-W150-DE.html](https://max-
growshop.fi/product-fin-1555-Vaihdeettava-heijastin-Gavita-Pro-W150-DE.html)>
Päivitetty 2022. Luettu 15.4.2022.
- 66 Haitallisten aineiden direktiivimääräykset, EU RoHS-direktiivi. 2015. Verkko-
aineisto. <<https://www.rohsguide.com/>> Päivitetty 9.4.2022. Luettu 9.4.2022.

Caruna Oy:n vastaussähköposti liittymän korotuskyselyyn. Kuvissa myös Priva-automaatiosäädin, sekä taimi- ja kukkaistutuksia.

Liitteessä on sähköpostivastaus liittymän korotuskyselyyn siirtoverkkoyhtiö Caruna Oy:ltä, joka tuli melko loppuvaiheessa työtä. Alavasemmalla on myös kuva Kauppapuutarha Verso Oy:n taimi- ja kukkaistutuksista osastolla D. Kolmannen kuvan automaattiosäädin ohjaa tuuletusta, sekä hoitaa lannoiteseoksen sekoittamisen ja mittaa siitä happamuutta ja ravinnepitoisuutta.

RE: Fwd: Liittymän korotuskysely Kalannintie 189 [TSK598083e2]



liittyma@caruna.fi <liittyma@caruna.fi>
6.5.2022 9:07



Hei Petteri ja Jaakko!

Kiitos viestistä ja pahoittelut viivästyneestä vastauksesta.

Liittymisoikeus on 2x3x160A ja liittymän huipputeho on ollut 231 kW viimeisen vuoden aikana joka tarkoittaa sitä että kulutus on nyt jo ylittänyt liittymisoikeuden. Tämä tarkoittaa sitä että sähköliittymän kokoa täytyy kasvattaa. Seuraava koko on 2x3x200A ja arvioitu hinta korotukselle on 8 400 euroa sis alv 24%. Korotuksen voi tilata osoitteessa <https://www.caruna.fi/palvelut/sahkoliittymat/suurena-sahkoliittymaa> ja me emme voi valitettavasti ohjeistaa liittymäkoon valinnassa vaan tarvittaessa oma sähkösuunnittelijanne ottaa tähän kantaa.

Liittymän korotuksen yhteydessä sähkön siirtotuote ei muutu eli perusmaksu pysyy samana, mutta tehon lisääntyessä kuukausittaiset huipputehot tulevat varmastikin olemaan suuremmat, jolloin tehomaksun määrä kasvaa. Ohessa linkki siirtohinnoistoon, tällä hetkellä siirtotuote on Tehosiirto 1 PJ eli tässä ei ole erillistä talvihintaa joka Tehosiirto 2 PJ-tuotteessa on. Hinnoissa kerrotaan milloin talvihinta on voimassa https://images.caruna.fi/verkkopalveluhinnasto_caruna_oy_1.11.2019-2.pdf

Caruna Plussassa voi valita kulutusnäkyäksi listauksen jonka jälkeen tuntiadat saa vietyä cvs-tiedostoon. Liitteenä kuitenkin Excel-tiedosto kulutuksista. Meiltä saatavat tiedot ovat tunnin keskiarvoja toteutuneesta huipputehosta joten todellisuudessa huipputehot ovat olleet korkeammat ja tämä tulee ottaa huomioon mitoituksessa.

Autan mielelläni lisäkysymyksissä. Hyvää viikonloppua!

Ystävällisin terveisin

Verkkopalveluasiantuntija

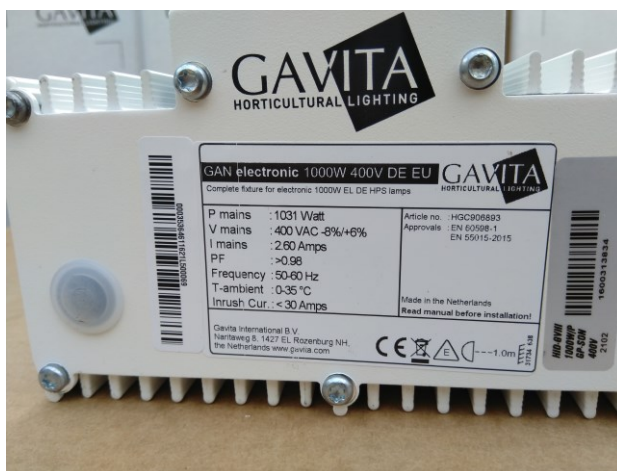
Caruna
Upseerinkatu 2, 02600 Espoo
PL 1, 00068 Caruna
caruna.fi



Mittaukseen osallistuneen valaisinmallin komponentteja, sekä Gavitan suurpainenatriumvalaisimen arvokilpi.

Kuvissa on Gavitan GAN -valaisinten arvokilpi (A) sekä suomalaisvalmisteisten Hel-light suurpainenatriumvalaisinten virranrajoitin (B), kondensaattori (C) ja elektroninen sytytinsytkä (D). Kondensaattorin ja Tridonic-ballastin kuvia on hieman muokattu venyttämällä.

(A)



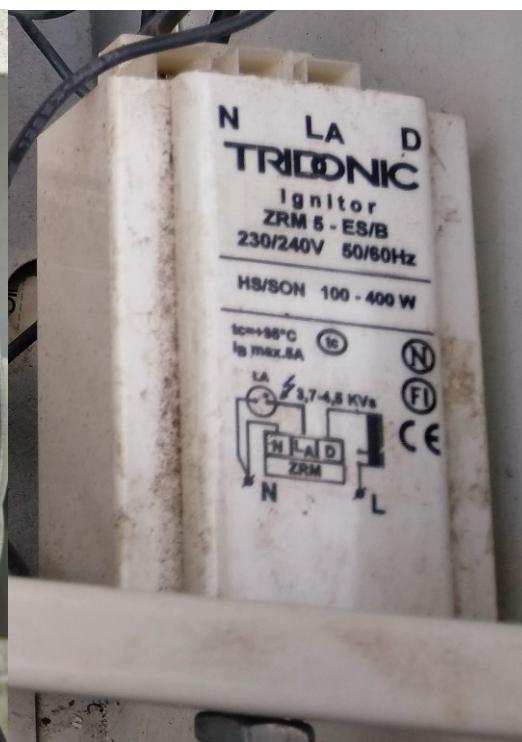
(B)



(C)



(D)



ITU-releyksikköjä, joita yhä käytetään luukkujen ja verhojen käsisäätöön, sekä Priva-automaation anturilaatikko osastolla B.

Alemman kuvan vasemmassa reunassa on automaatiokeskus. Ylemmässä kuvassa on esimerkiksi lämpötilaa mittaava anturilaatikko, ja vasemman seinän takana osasto C.



Rakenteilla oleva toinen kiertovesiallas, sekä lämmitysjärjestelmän pienempiä pumppuja.

Ylemmässä kuvassa osasto D ja edessä oikealla rakenteilla oleva toinen vesiallas. Alemman kuvan pienehköt pumput ovat teholtaan noin 500 wattia.



Kasvihuonetilojen luukku- ja verhomootoreita, sekä muuta infrastruktuuria.

Ylhäällä kuvissa on luukkumootoreita ja lämmityksen yläputket, keskellä verhomootoreita ja alhaalla uusi rakenteilla oleva kiertovesiallas.



Kauppapuutarha Verso Oy:n kukkaviljelmiä keväisellä osastolla C, sekä osaston B vesiallas.

Kuvista selviää kasvatuspöytien kastelutoiminta, pöytien lämmityskaapelit ja putket joiden päällä ne liikkuvat. Alemmassa kuvassa on osaston B aikaisempi vesiallas.



Tulasi eli pyhäbasilika kasveja, Hare Krishna-temppelillä Helsingissä. Kuvissa on havaittavissa valaistuksen yhdistyvä väriensekoittuminen.

Koska Tulasi-devi on alkujaan trooppisemman alueen kasvi, tarvitaan niitä varten Suomessa sisälläkin mieluiten runsaasti lämpöä.



Tulsi eli Tulasikasvit ovat kasvamassa Śrī-Śrī Gaura-Nitāin alttarihuoneen sivuhuoneessa. Tässä kuvassa jälleen huomattavissa yhdistyvä väriensekoittuminen. Jaya Śrīla Prabhupāda, Hare Kṛṣṇa Hari bol!



śrī-kṛṣṇa-caitanya prabhu-nityānanda śrī-advaita

gadādhara śrīvāsādi-gaura-bhakta-vṛnda

*Hare Kṛṣṇa Hare Kṛṣṇa
Kṛṣṇa Kṛṣṇa Hare Hare
Hare Rāma Hare Rāma
Rāma Rāma Hare Hare*