



Samuli Koponen

Vakiovalovirtaohjauksen hyödyntäminen katuvalaistuksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Opinnäytetyö

30.11.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Samuli Koponen
Otsikko:	Vakiovalovirtaohjauksen hyödyntäminen katuvalaistuksessa
Sivumäärä:	47 sivua
Aika:	30.11.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto:	Elektroniikka
Ohjaaja(t):	Lehtori Tapio Kallasjoki

Tässä insinööriyössä tutkitaan ledivalaisimen himmentämisen sähkötekniistä teoriaa ja tutustutaan vakiovalovirtaohjauksen vaikutukseen katuvalaistuksessa. Työssä tehdään suunnitelma ulkovalaistuskohdeesta, jossa vertaillaan vakiovalovirtaohjauksen vaikutuksia sähköenergisestä ja taloudellisesta näkökulmasta verrattuna perinteiseen katuvalaisimeen ilman älykästä ohjausta.

Opinnäytetyön ulkovalaistussuunnitelma tehdään Espoon kaupungin ulkovalaistuksen suunnitteluohjetta sekä yleisiä standardeja noudattaen. Suunnitelmassa huomioidaan pelkästään työn tavoitteen kannalta olennaiset vaiheet, joten esimerkiksi sähkösuunnittelua ei tehdä.

Tutkielma osoittaa vakiovalovirtaohjauksen kustannus- ja energiatehokkuuden keski-kokoisessa katuvalaistuskohdeessa.

Avainsanat: ulkovalaistus, vakiovalovirtaohjaus, valaistussuunnitelma

Abstract

Author(s):	Samuli Koponen
Title:	Use of Constant Light Output in Street Lighting
Number of Pages:	47 pages
Date:	30 November 2022
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Electrical and Automation Engineering
Specialisation option:	Electronics
Instructor(s):	Tapio Kallasjoki, Senior Lecturer

This thesis studies dimming of LED lighting theoretically and covers the use of constant light output in street lighting. The study includes a lighting design of an outdoor area, focusing on the energy and economic efficiency of outdoor luminaires that use constant light output technology, compared to traditional luminaires without intelligent controlling.

The lighting design covered in the study was made according to regional and common standards. The plan covers only topics that are essential for the study, leaving out for example electrical planning.

As result, the study points out the energy and financial efficiency of constant light output on an average-sized street lighting project.

Keywords: outdoor lighting, constant light output, lighting design

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	6
2	LED eli ledi.....	6
2.1	Ledin historia	7
2.2	Ledi verrattuna perinteisiin valonlähteisiin	8
2.3	Liitäntälaitteet	10
2.4	Ledivalaisimien elinkaari.....	13
3	Himmennys.....	15
3.1	Himmennystavat.....	16
3.2	Vakiovalovirtaohjaus.....	20
3.3	Väriämpötilan ohjaaminen	21
3.4	Automatisoitu ohjaus	24
4	Ulkovalaistuksen suunnittelu.....	24
4.1	Standardit	26
4.2	Tievalaistus.....	28
5	Ulkovalaistussuunnitelma	30
5.1	Lähtökohdat.....	30
5.2	Laskenta	32
5.2.1	Laskenta 1	33
5.2.2	Laskenta 2	36
5.3	Suunnitelma.....	39
5.4	Lopputulos	40
5.5	Analyysi	44
6	Yhteenveto.....	46
	Lähteet.....	48

Lyhenteet

LED: *Light Emitting Diode*, Valodiodi. Valoa säteilevä puolijohdekomponentti.

PWM: *Pulse Width Modulation*, Pulssinleveysmodulaatio. Signaalin modulointitapa, jossa kuorman jännitettä säädetään muuttamalla pulssisuhdetta.

DC: *Direct Current*, Tasavirta. Sähkövirta, jonka suunta ei muutu.

AC: *Alternating Current*, Vaihtovirta. Sähkövirta, jonka suunta vaihtelee ajan funktiona.

CLO: *Constant Light Output*, Vakiovalovirta. Valaisimen ohjaustapa, jonka avulla valaisimen valovirran alenemaa kompensoidaan sen elinkaaren aikana.

1 Johdanto

Ledivalaisimet ovat muuttaneet valaistuksen kokonaisuutta merkittävästi. Ledi-valaisimet ovat erittäin pitkäikäisiä, ne syttyvät heti sekä niitä on helppo ohjata ja himmentää [1]. Valaistus on yksi suurimpia yksittäisiä sähköenergian kuluttajia, minkä vuoksi valaistuksen toteuttamisessa on otettava huomioon tarvittavan valaistustason lisäksi myös sen energiatehokkuus.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia ledivalaisimen tekniikkaa, toimintaperiaatteita ja sen himmentämisellä saavutettavia hyötyjä. Työssä tutkitaan leditekniikkaa ja ledivalaisimien himmentämistä yleisellä tasolla, mutta tarkemmin perehdytään vakiovalovirtaohjaukseen ja sen käyttöön ulkovalaistuksessa. Tutkielmassa käsitellään teorian lisäksi vakiovalovirtaohjauksen käyttöä käytännön tasolla selvittäen, onko siitä konkreettista hyötyä energiatehokkuuden kannalta.

2 LED eli ledi

LED (Light Emitting Diode, valodiodi tai loistediodi) on puolijohdekomponentti, joka säteilee näkyvää valoa, kun sen läpi johdetaan tarvittava määrä sähkövirtaa. Valodiodin, kuten minkä tahansa muunkin diodin, läpi voidaan johtaa sähkövirtaa vain yhteen suuntaan eli anodilta katodille [1]. Ledit säästävät ympäristöä tehokkaan energiankäyttönsä ansiosta, mutta ne ovat lisäksi myös käyttäjälleen taloudellisia [2]. Yksittäinen ledi on erittäin pieni, sen aktiivisesti valoa tuottavan pinnan ollessa kooltaan vain noin 1–2 neliömillimetriä. Tämän vuoksi ledit kytketään usein ryhmäksi, joka asennetaan ledimoduuliin. Esimerkki leditekniikalla toimivasta ulkovalaisimesta kuvassa 1.



Kuva 1. Easy LEDin Pro Flow-katuvalaisin [3].

Yllä esitetyssä ulkovalaisimessa voidaan havaita pienten ledien muodostama ryhmä ledimoduulissa. Tutkielman ulkovalaistussuunnitelma tullaan toteuttamaan kuvan 1 mukaisilla Pro Flow-katuvalaisimilla.

2.1 Ledin historia

Ledin voisi kuvitella olevan varsin uusi keksintö, mutta sitä se ei kuitenkaan ole. Lähteestä ja näkökulmasta riippuen ledin historian voidaan sanoa alkaneen jo vuonna 1907, kun Henry Joseph Round havaitsi elektroluminesenssi-ilmiön piikarbidissa. Elektroluminesenssilla tarkoitetaan ilmiötä, jossa tietyt aineet kykenevät emittoimaan valoa vahvassa sähkökentässä tai niiden läpi virratessa sähköä. Vuoden 1907 keksinnössä piikarbidin emittoi keltaista valoa sen ollessa sähköisesti varautunut. 1920-luvulla Oleg Vladimirovich Losev keksi

samankaltaisen elektroluminesenssi-ilmiöön perustuvan alkeellisen ledin. Kumpikaan keksintö ei kuitenkaan johtanut mihinkään, sillä näkyvää valoa oli liian vähän mitään käyttötarkoitusta varten. [4; 5.]

Vuonna 1961 Robert Biard ja Gary Pittman yrittivät keksiä laseriodia mutta keksivät vahingossa ensimmäisen infrapunaledin. Infrapuna on kuitenkin näkyvän valon spektrin ulkopuolella, joten tällekin ledille ei löytynyt käyttötarkoitusta. Vuotta myöhemmin Nick Holonyack, jota pidetään ledin keksijänä, kehitti ihmissilmälle näkyvän punaisen ledin. Vuonna 1972 M. George Crawford keksi keltaisen ledin ja kehitti Holonyackin innovaatiota keksimällä kymmenen kertaa kirkkaamman punaisen ledin. 1980-luvun alussa kehitettiin vihreä ledi, jonka avulla saatiin aikaan valkoinen väri yhdistämällä se punaisen kanssa. [4; 5.]

Nyky aikaisten ledien perusta kehitettiin vuonna 1994, kun Shuji Nakamura keksi sinisen ledin, joka oli huomattavasti edeltäjiään kirkkaampi. Sinisen ledin pystyi helposti muuttamaan valkoiseksi peittämällä se loisteaineella [3]. Vuonna 2006 Nakamura sai miljoonan euron Millennium-tekniologiapalkinnon keksinnöstään Suomessa ja asiasta uutisoi muun muassa Yleisradio [6].

2.2 Ledi verrattuna perinteisiin valonlähteisiin

Alun perin ledejä käytettiin erilaisina merkkivaloina televisioissa, puhelimissa ja laskimissa. Ledien käyttö valaisimissa alkoi 1990-luvun lopulla niiden kirkkauden ja valotehokkuuden noustessa. Nykyään ledivalaisimia käytetään niin ulko- kuin sisävalaistuksessa ja perinteisten valonlähteiden syrjäyttäminen kokonaisuudessaan on vain ajan kysymys. Ennen vuotta 2010 ledivalaisimet olivat hyvin energiatehokkaita mutta valmistuskustannukset olivat kalliit, mikä rajoitti niiden käyttöä kaikkialla. Nykyään ledit ovat verrattain halpoja, joten perinteisten valaisimien korvaamiselle ledeillä ei ole taloudellista estettä. [4; 5.]

2000-luvun aikana ledivalaisimet ovat kehittyneet räjähdysmäisesti niin kokonsa kuin valotehokkuutensa puolesta. 2000-luvun lopussa saavutettiin merkkipaalu, kun ledivalaisin saavutti ensimmäistä kertaa 100 lm/W valotehokkuuden.

Vuonna 2014 Forbes [7] uutisoi Cree LEDin saavuttaneen jo 300 lm/W valotehokkuuden. Näin suuren valotehokkuuden saavuttaminen ei ole kuitenkaan mahdollista, mikäli halutaan säilyttää riittävän hyvän värintoiston omaava valkoinen valo. Mikäli värintoistoarvo pidetään riittävän korkeana, on ennusteiden mukaan loisteaineella päällystetyn sinisen ledin valotehokkuushuippu noin 250 lm/W.

Kuluttajille myytävät ledilamput on merkittävä energiamerkinnällä. Vuoden 2021 maaliskuussa energiamerkinnät uusiutuivat, minkä ensisijaisena syynä oli vanhojen merkintöjen epäselvyys. Uudella merkintätavalla jätetään myös tilaa parannuksille, sillä merkintöjen muutoshetkellä paras luokka A mitoitettiin siten, että siihen ei tule yhtäkään tuotetta. Tutkielman kirjoitushetkellä markkinoilla on muutama ledilamppu, joka on saanut energiamerkinnän A, eli valotehokkuus on vähintään 210 lm/W. Vuoden 2021 elokuussa Philips ilmoitti kehittäneensä A-luokitukseen yltävän ledilampun [8]. Uudet energiamerkinnät ovat esitettynä alla kuvassa 2.



Kuva 2. Uudet energiamerkinnät [9].

Ledit ovat perinteisiin hehkulamppuihin nähden erittäin energiatehokkaita, sillä hehkulamput muuttavat jopa 95 % niille syötetystä sähkövirrasta lämmöksi ja vain 5 % valoksi [10]. Lähimmäksi lediä valotehokkuuden puolesta pääsee

suurpainenaatrium, jonka valotehokkuus on 70–150lm/W. Niiden värintoistokyky on kuitenkin erittäin huono verrattuna muihin valonlähteisiin.

2.3 Liitäntälaitteet

Suurimmassa osassa ledivalaisimien asennuksia käytetään liitäntälaitetta varsinaisen tehonlähteen ja valaisimen välissä. Liitäntälaitteen tarkoituksena on muuttaa sähkövirta sopivaksi kyseiselle valaisimelle, jotta se voi toimia oikein. Ledi ylikuumenee, jos sen läpi johdetaan liian suurta sähkövirtaa. Tämä voi johtaa ledivalaisimen ennenaikaiseen valovirran alenemaan [11.]

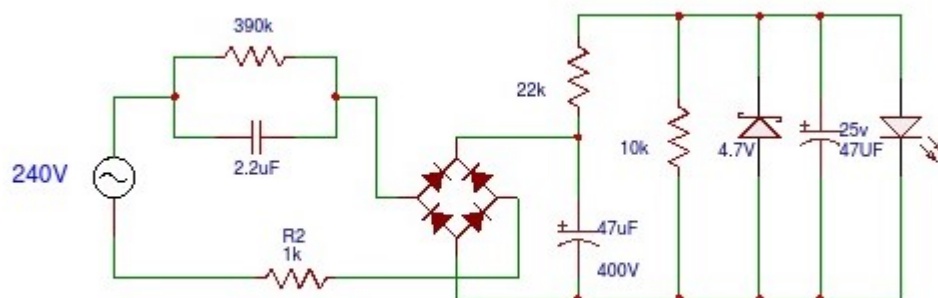
Liitäntälaitteen valintaan vaikuttaa monta seikkaa, ja sen kanssa pitää olla tarkkana. Ulkovalaistuksessa valaisinvalmistajat myyvät valaisimet yleisesti liitäntälaitteen kanssa. Sisävalaistuksessa valaisin ei välttämättä sisällä liitäntälaitetta, jolloin sen valinta vaatii suunnittelua. [12.]

Liitäntälaitteen valintaan vaikuttavat esimerkiksi seuraavat asiat:

- Minkä tehoisia ledivalaisimia käytetään?
- Kuinka monta valaisinta kytketään samaan liitäntälaitteeseen?
- Tarvitaanko vakiovirta- vai vakiojänniteohjattu liitäntälaitte?
- Millainen on käytettävä tehonlähde (DC, AC)?
- Tarvitaanko asennettaville valaisimille ohjausta?

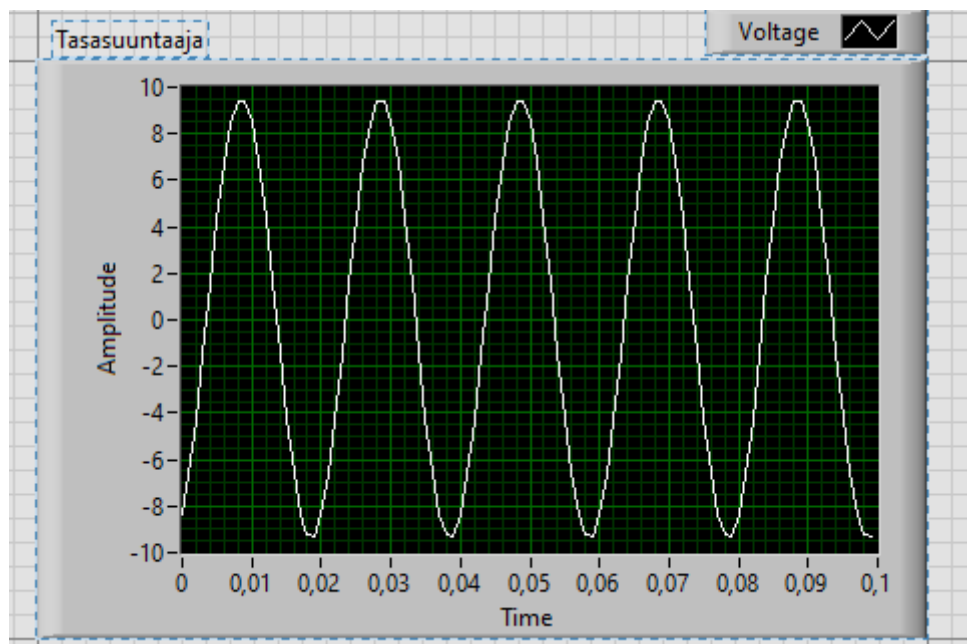
Ensimmäisenä liitäntälaitetta valittaessa on selvitettävä käytettävä tehonlähde. Liitäntälaitteen tyyppi eroaa merkittävästi esimerkiksi 230 V:n verkkovirtaa käytettäessä verrattuna 24 V:n akkuun. Jos virtalähteenä käytetään 230 V:n verkkovirtaa, on liitäntälaitteen tehtävänä muuntaa jännite ledille sopivaksi tasajännitteeksi. [13.]

Olellainen osa AC-DC-liitäntälaitetta on kokoaaltotasasuuntaaja, jonka tarkoituksena on kant sineaallon negatiiviset puolijaksot positiivisiksi. Kokoaaltotasasuuntaaja rakennetaan neljän diodin diodisillalla (kuva 3).



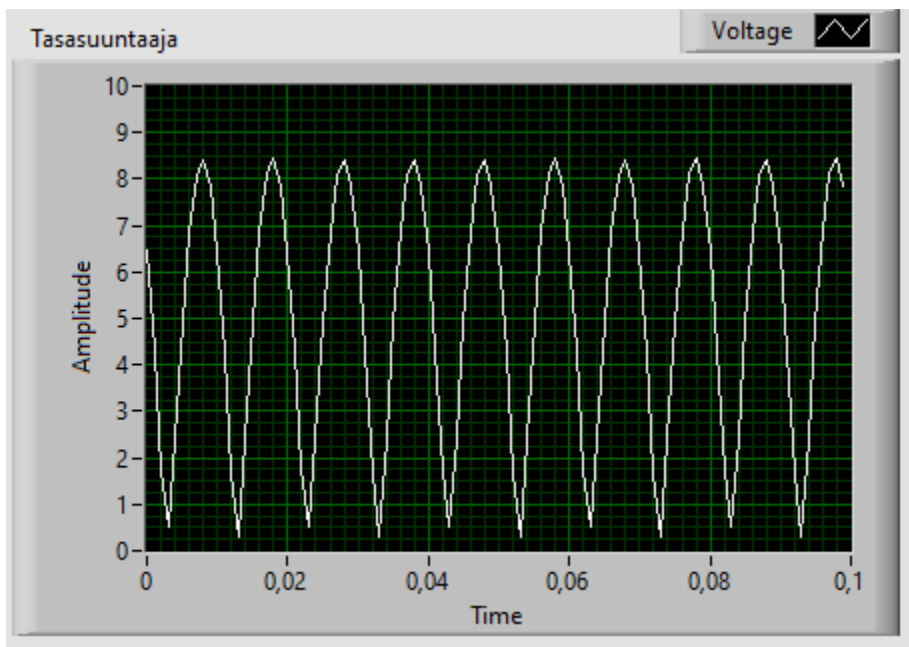
Kuva 3. AC-DC-liitäntälaitteen piirikaavio [11].

Alla olevassa kuvassa 4 on esitettyä kokoaaltotasasuuntaajan syöttöjännite.



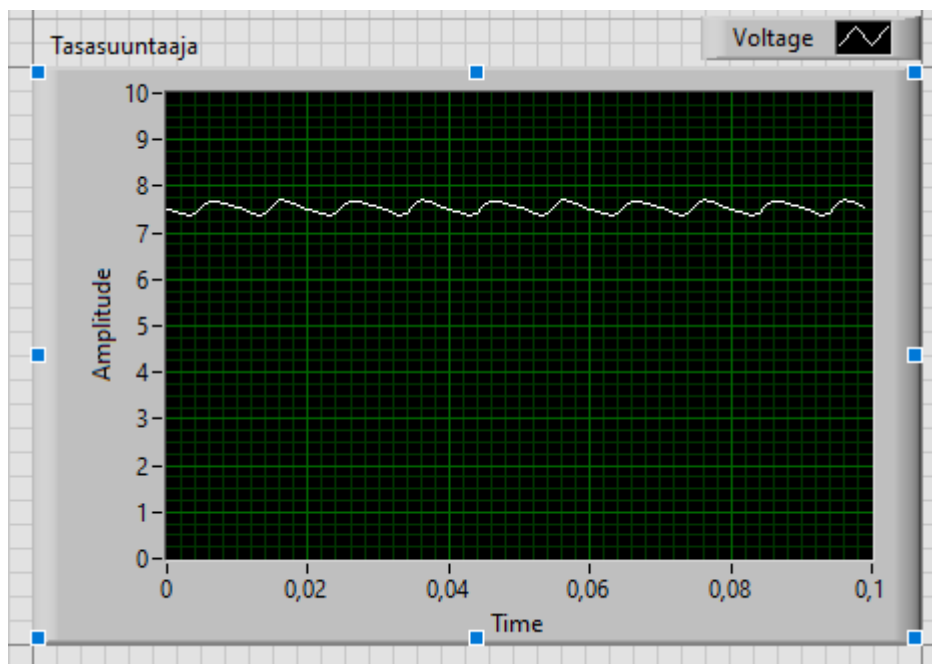
Kuva 4. Tasasuuntaajan syöttöjännite.

Alla olevassa kuvassa 5 on esitettyä kokoaaltoasasuuntaajan ulostulojännite. Tasasuuntaaja kääntää sinisignaalin negatiiviset puolijaksot positiivisiksi, eli sykkiväksi tasajännitteeksi.



Kuva 5. Tasasuuntaajan ulostulojännite.

Tasasuuntaajan ulostulojännitettä tasataan sopivalla kondensaattorilla. Kuvassa 6 esitetään tasasuuntaajan ulostulojännite sadan mikrofardin kondensaattorilla, jolla sykkivä tasajännite saadaan tasattua siten, että rippelijännite on alle puoli voltia.



Kuva 6. Tasasuuntaajan ulostulojännite 100 uF:n kondensaattorilla.

Tämän jälkeen jännitettä täytyy vielä mahdollisesti alentaa ledille sopivaksi. Jännitteenalentamiseen käytetään piirissä diodisillan jälkeen zenerdiodia ja vastusta (kuva 3) [13].

2.4 Ledivalaisimien elinkaari

Nykyisissä valaistusratkaisuissa on tärkeässä roolissa valaistuksen toimivuuden ja energiatehokkuuden kannalta myös asennuksen huollon tarve. Ledivalaisimet mahdollistavat pitkät huoltovälit, sillä ledit ja niiden liitännälaitteet ovat nykyään erittäin pitkäikäisiä.

Ledivalaisimen elinikä ilmoitetaan kansainvälisten standardien mukaan kahdella arvolla, joista toinen on ledimoduulin elinikä ja toinen on sen liitännälaitteen elinikä [14]. Ledivalaisimen L-arvolla tai L-kertoimella tarkoitetaan valovirran prosentuaalista määrää, joka on jäljellä tietyn ajan kuluttua. Valaisinvalmistajat ilmoittavat tuotteillaan käyttöiän ja valovirran määrän käyttöiän ylittyessä. Esimerkiksi Greenled [15] ilmoittaa CLO-ohjatun SIRIUS FLOOD -tuoteperheen valaisimien eliniäksi L90B10, C10, 100 000 h.

B-arvo kuvaa L-arvon tarkkuutta eli vaihtelua. Useimpien valaisimien B-arvo on B50, eli ilmoitettu valovirran alenema L tarkoittaa keskiarvolukemaa. C-arvo tarkoittaa ”catastrophic failures” -vikaantumista eli moduulin täyttä sammumista, joka johtuu yleensä liitäntälaitteen vioittumisesta. Arvo ilmoitetaan yhdessä tuntimäärän kanssa. C-arvo ei huomioi yksittäisten ledien sammumista useita ledejä sisältävissä moduuleissa, vaan ne sisältyvät B-arvoon [16]. Esimerkkinä mainitun SIRIUS FLOOD -tuoteperheen valaisimista 10 % ei tuota lainkaan valoa 100 000 käyttötunnin jälkeen.

Ledivalaisimen elinkaari liittyy olennaisesti alenemakertoimen tai huoltokertoimen laskemiseen. Alenemakertoimella tarkoitetaan valaistusteknillisiä laskentoja varten määriteltyä arvoa, jota käytetään kompensoimaan ledin elinkaaren aikana tapahtuvaa valovirran alenemista sekä ulkoisia tekijöitä. Kerroin vaikuttaa olennaisesti valaistussuunnitelman toteutukseen, sillä sen avulla mitoitetaan käytettävät valaisimet. Sen laskemiseen voidaan käyttää erilaisia kaavoja, tai se voi määräytyä taulukon perusteella. Liikenneviraston maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnitteluohjeen [17] mukaan alenemakertoimen määrittelyyn voidaan käyttää taulukkoa, johon on lueteltu erilaiset valonlähteet ja toiseen sarakkeeseen asennusympäristön vaikutus. Ensisijaisena kertoimen määrittelytapana käytetään kuitenkin laskukaavaa.

Ledivalaisimia käytettäessä alenemakerroin määräytyy yleisesti kaavojen avulla. Kaavassa huomioidaan edellä mainittu ledivalaisimen L-arvo sekä ympäristön vaikutus. Espoon kaupungin suunnitteluohjeen [18] mukaan alenemakerroin lasketaan kaavalla (1).

Kaava 1

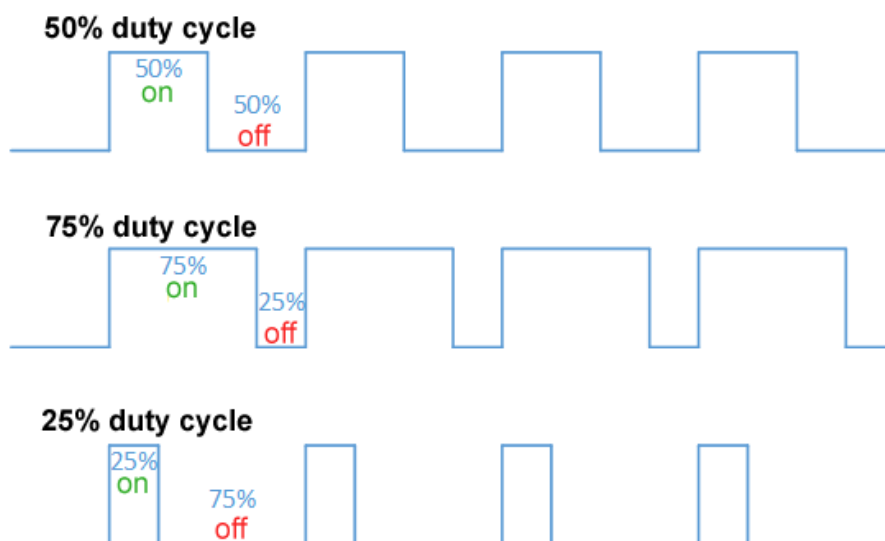
$$f_m = f_{LF} * f_{LM}$$

Kaavassa f_m on alenemakerroin, f_{LF} on valmistajan ilmoittama valovirran alenema (L-arvo) ja f_{LM} on valaisimen likaantumiskerroin, joka on vakio 0,9. Tunneli- tai sillanalusvalaisimissa käytetään likaantumiskerrointa 0,85 [18].

3 Himmennys

Yleisin tapa ohjata valoa päälle/pois-kytkennän lisäksi on sen himmentäminen. Vaikka ledivalaisimet ovat nykyään käytetyimpiä valaisimia, niiden himmentäminen on kuitenkin yleisesti ottaen vaikeampaa kuin perinteisten valaisimien (pois lukien purkauslamppuvalaisimet). LED-valaisinta himmentämällä voidaan säästää monta hyötyä, kuten esimerkiksi energiansäästö, visuaalisuus sekä entistä pidempi elinikä. Ulkovalaistuksessa himmentämisellä tavoitellaan myös yöaikaisen häiriövalon määrän vähentämistä.

LED-valaisimia ei pystytä himmentämään pelkästään laskemalla jännitettä, sillä silloin LED sammuu. Yksi tapa himmennykseen on analoginen virranalentaminen esimerkiksi potentiometrin avulla (DC-himmennys). Analogisen himmennuksen haasteena on kuitenkin se, että himmennystarkkuus on verrattain huono ja LED-valonlähteen väri voi muuttua. Toinen yleinen tapa himmentää LED-valaisinta on pulssinleveysmodulaation (PWM) avulla. PWM:llä himmentäminen on huomattavasti monimutkaisempaa mutta samoja ongelmia kuin analogisessa himmennyksessä ei ilmene [19].



Kuva 7. PWM-signaalin pulssisuhteet [19].

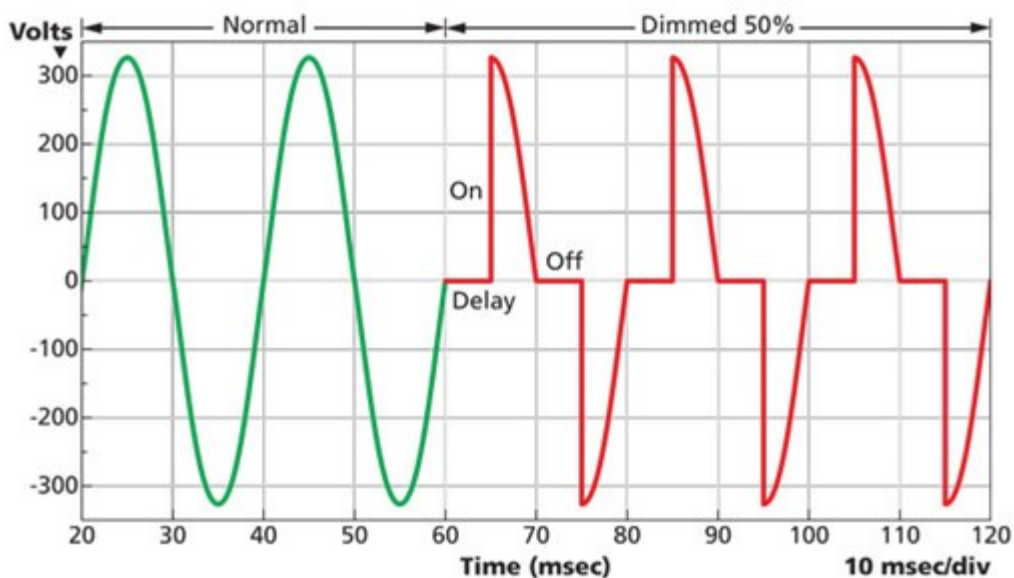
PWM-himmennys toteutetaan siten, että jännitettä kytketään päälle ja pois riittävän nopealla taajuudella, päälle-arvon ollessa valaisimen nimellijännite ja pois-arvon ollessa 0. Pelkästään kyseisen signaalin generoiminen ei mahdollista säädettävää himmennystä, vaan sen pulssisuhde on oltava muutettavissa. Pulssisuhde ilmaistaan prosentteina 0 %:n tarkoittaessa tasaista nollan voltin jännitettä ja 100 %:n tarkoittaessa tasaista nimellijännitettä. Jos pulssisuhde on esimerkiksi 80 %, niin yhden jakson aikana signaali on 80 % ajasta nimellijännitteessä ja 20 % nollassa voltissa. Signaalin taajuudelle ei ole olemassa erikseen määriteltyä arvoa, mutta ihmissilmän kuvataajuus noin 30-60 Hz. Tämän perusteella vähintään 100 Hz signaalin pitäisi riittää siihen, ettei ihminen pysty havaitsemaan värähtelyä valonlähteessä [19].

3.1 Himmennystavat

Kaikki ledivalaisimien himmennystavat pohjautuvat sähköteknisesti joko analogiseen himmentämiseen tai PWM-himmentämiseen. Varsinaisissa asennuksissa käytetään kuitenkin erilaisia ohjauskomponentteja, joiden käytössä on sovellettu aiemmin mainittuja himmennystapoja, ja ne toimivat erilaisilla periaatteilla, esimerkiksi erilaisia väyliä käyttäen. Kuluttajalle tärkeitä asioita ledivalaisimen himmennyksessä ovat sähkötekniikan toimivuuden lisäksi himmentimen käyttö, asennus ja sen aiheuttamat kustannukset. Himmennystavan valitsemiseen vaikuttaa myös valaisimessa käytettävä liitäntälaitte.

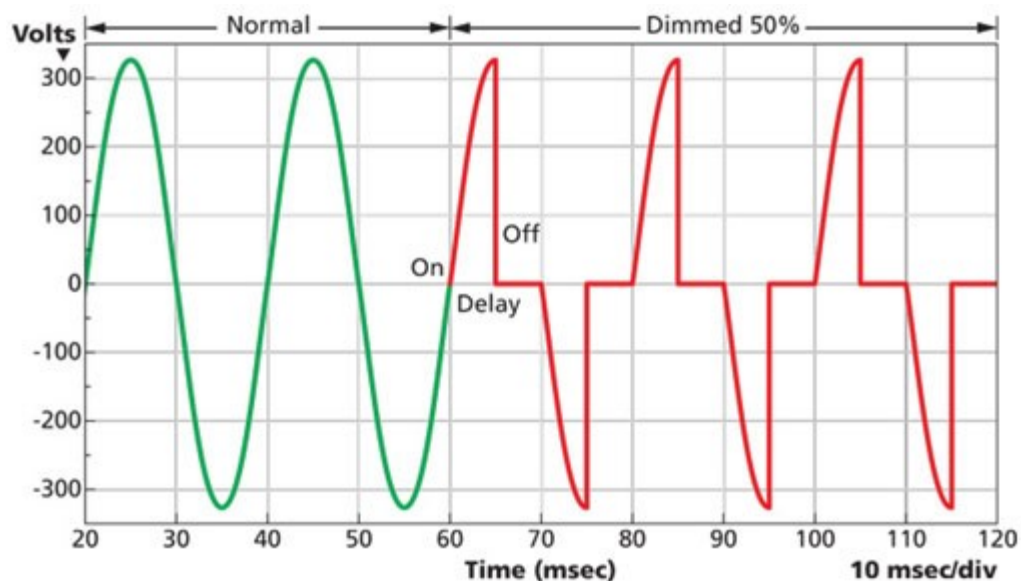
Leading ja Trailing Edge, eli suomeksi nousevan ja laskevan reunan himmennykset, ovat signaalin ohjaustapoja, joiden tarkoituksena on ohjata ledille suuntaavan vaihtovirran kulkua. Näitä himmennystapoja käytetään ohjaamaan valaisimelle tai liitäntälaitteelle syötettävää verkkovirtaa. Nousevan reunan himmennyksessä syöttövirta katkaistaan sinisignaalin alkuvaiheessa eli sen jännitearvon noustessa esimerkiksi TRIAC-säätimellä. Kytettäessä sähkövirta takaisin päälle siniaallon puolijakson huippukohdassa on himmennystaso 50 % (kuva 8). Nousevan reunan ohjaus keksittiin alun perin hehkulamppuja varten, ja sen käyttö ledivalaisimissa on vähäistä. Kun siniaalto katkotaan sen nousujaksolla,

syntyy suuri sysäysvirta ja tämän seurauksena häiriöitä sähköverkkoon ja esimerkiksi liitännälaitteeseen [20; 21.]



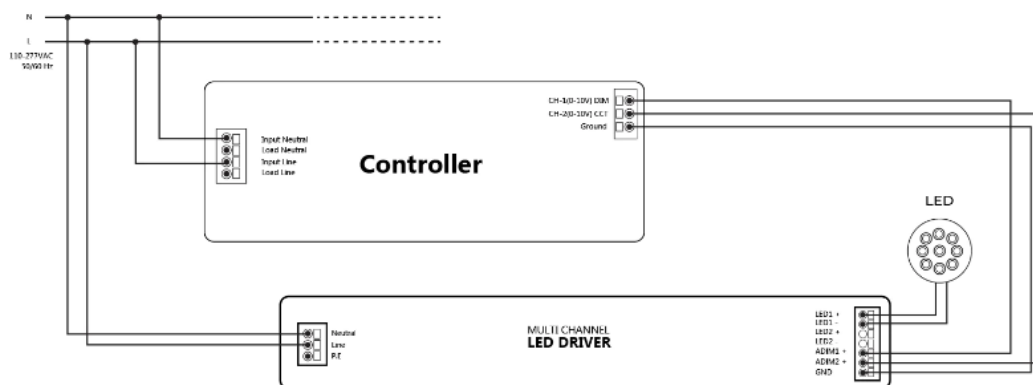
Kuva 8. Nousevan reunan himmennysignaali [20].

Laskevan reunan ohjaus toimii samalla periaatteella kuin nousevan reunan ohjaus, mutta sähkövirta katkaistaan puolijaksossa jännitteen laskiessa (kuva 9). Laskevan reunan ohjaus on modernimpi versio kyseisestä himmennystavasta, ja se soveltuu paremmin käytettäväksi ledivalaisimien kanssa. Tällä tavalla himmennettäessä virta kytkeytyy päälle jännitteen nollakohdassa ja se nousee luontaisesti huippuarvoonsa, jolloin suurta ledille vaarallista sysäysvirtaa ei pääse syntymään [20; 21.]



Kuva 9. Laskevan reunan himmennysignaali [20].

1–10 V:n ohjaus on analoginen ledivalaisimille tarkoitettu himmennystapa. Kyseisellä himmennystavalla verkkovirtaan kytketty ohjauslaite antaa liitännälaitteelle 1–10 V:n jännitevälillä ohjaussignaalin, joka määrittää valon himmennystason. 1–10 V:n himmennyksellä liitännälaitteen täytyy olla relekäyttöinen, jolloin verkkovirta kytketään pois erikseen kytkimellä. 1–10V:n himmennyksen etuina voidaan pitää tarkkaa himmennystasoa ja ledivalaisimen pitkää elinikää (verratuna nousevan ja laskevan reunan himmennykseen) [22; 23]. Alla olevassa kuvassa 10 havainnoidaan 1–10 V:n himmennyksen kytkentää ohjauslaitteen, liitännälaitteen ja ledin välillä.



Kuva 10. 1–10 V:n himmennuksen kytkentäkaavio [2].

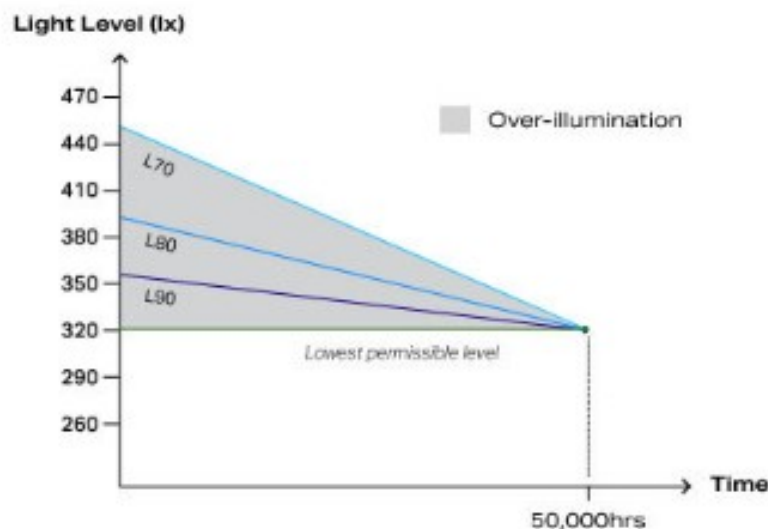
DMX512 on digitaalinen kommunikaatioväylä, joka suunniteltiin alun perin käytettäväksi näyttämöllä olevien valaisimien sovelluksiin. Nykyisin sitä käytetään myös perinteisissä valaistusratkaisuissa varsinkin silloin, kun ohjattavia laitteita on monta. Valaistuksessa käytettävät DMX-ohjaimet tarjoavat 512 osoitetta, mikä mahdollistaa monimutkaisten kokonaisuuksien ohjaamisen. DMX-ohjauksessa kaikki siinä käytettävät laitteet voidaan kytkeä sarjaan, jolloin DMX-signaali kulkee ohjattavalta laitteelta toiselle eikä ohjaimelta erikseen. DMX512-protokolla on hyvin nopea ja tehokas järjestelmä mutta myös kallis. Kustannustehokkuuden kannalta DMX-ohjausta ei ole järkevää käyttää yksinkertaisiin valaistusasennuksiin [24.]

DALI eli Digital Addressable Lighting Interface on standardisoitu digitaalinen valonohjausprotokolla. DALI-järjestelmän ovat kehittäneet Euroopan johtavat EL-liitälaitteiden valmistajat (Helvar, Osram, Philips ja Tridonic). DALI-ohjauksessa sovelluksen kaikki laitteet kytketään toisiinsa kaksinapaisella kaapelilla, jonka kautta kaksisuuntainen digitaalinen signaali välittyy kaikille yksiköille. Osramin valmistamat DALI-ohjaimet mahdollistavat jopa 64 LED-liitälaitteen ohjaamisen samanaikaisesti, mikä mahdollistaa suurienkin asennusten yksinkertaisen ohjauksen. DALI-yhteensopivat laitteet on merkitty erillisellä logolla, kuten esimerkiksi liitälaitte kuvassa 7. DALI-ohjauksen etuina voidaan pitää muun muassa ohjauskaapeleiden polaarittomuutta (ei virhekytkentöjä), ohjauksen tapahtumista digitaalisesti (ei alttiutta häiriöille), kaksisuuntaista

tiedonsiirtoa, jolloin se mahdollistaa esimerkiksi erilaisten valaistustilanteiden ja ryhmien luomisen sekä ohjauksen tietokoneen kautta [25.]

3.2 Vakiovalovirtaohjaus

Monet valaisinvalmistajat ylivoittavat vaaditun kohteen valaistustekniset tarpeet, jotta valaisimen valovirta ei heikkene vaaditun valotason alle sen elinkaaren aikana. Valaistussuunnittelussa käytettävässä DIALux-ohjelmassa käytetään käyttäjän määrittelemää huoltokerrointa valaisinvalmistajan antamien tietojen mukaisesti. Valaisimien ylivoittaminen ei ole kuitenkaan järkevää sähkönkulutuksen, ympäristön sekä siitä aiheutuvan häiriövalon kannalta. Alla olevassa kuvassa 11 esitetään ylivoittamisen vaikutus 50 000 käyttötunnin jälkeen. Kuvan mukaan L70-valaisinta pitää ylivoittaa noin 40 %, jotta sen valovirta on vaaditulla tasolla käyttöikänsä lopussa.



Kuva 11. Valaisimen ylivoitus havainnollistettuna [26].

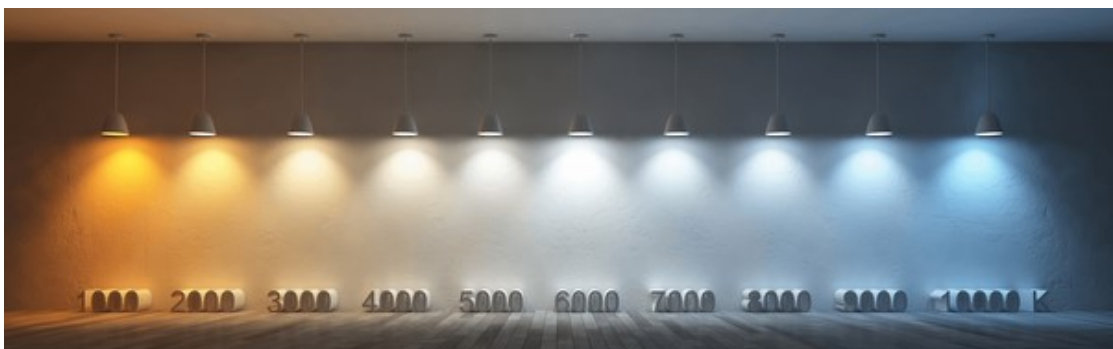
Ledivalaisimen elinkaaren aikana aiheutuvista hiilidioksidipäästöistä jopa 75 % aiheutuu sen käytön kuluttamasta energiasta [26]. Yllä olevassa kuvassa havainnollistetaan L-arvot L_{70} , L_{80} , sekä L_{90} käyttöikänsä ollessa 50 000h.

Vakiovalovirtaohjaus eli CLO (Constant Light Output) on eräs ledivalaisimen himmentämistapa, jonka tarkoituksena on säilyttää valaisimen valovirta mahdollisimman hyvänä koko sen elinkaaren ajan. Hyvällä vakiovalovirtaohjauksella voidaan saavuttaa ledivalaisimen L100-arvo, jolloin ledi tuottaa valoa polttoikänsä lopussa yhtä paljon kuin ensimmäisellä käyttökerralla [16; 26].

Valovirran alenemaa kompensoidaan CLO-ohjatulla ohjelmoitavalla liitäntälaitteella. CLO-ohjauksessa laskettu valaisin ylimitoitetaan hieman ja sen valaistusvoimakkuus himmennetään vaaditulle tasolle. Kun valaisimen tuottama valovirta alkaa ajan myötä heikentyä, nostaa ennalta ohjelmoitu liitäntälaitte valaisimeen syötettävää virtaa samassa suhteessa. Tämän toimenpiteen seurauksena valaisimen tuottama valovirta saadaan pidettyä vakiona tai ainakin lähellä sitä koko sen elinkaaren ajan.

3.3 Värilämpötilan ohjaaminen

Valaisimen värillä ja värilämpötilalla on suuri merkitys valaistuskokonaisuuden toteutuksessa. Värilämpötilalla voidaan vaikuttaa visuaalisuuteen, havainnointiin tai esimerkiksi viihtyvyyteen. Sisävalaistuksessa värilämpötilalla vaikutetaan valon visuaalisuuteen ja biologisen vuorokausirytmien saavuttamiseen. Dynaaminen valaistus korostuu varsinkin vuoden pimeinä kuukausina ja tiloissa, joihin ei tule päivänvaloa [27]. Alla olevassa kuvassa 12 esitetään havainnekuva erilaisen värilämpötilan omaavista valaisimista.



Kuva 12. Värilämpötilat havainnoituna [28].

Nykyaikaisella leditekniikalla valaisimen värilämpötila on suhteellisen helposti ohjattavissa. Monet valaisinvalmistajat markkinoivat "Tunable White" -valonlähteitä. Kyseisessä valaisintyypissä on vähintään kahta eri värilämpötilaa olevia ledejä, jotka ovat päällä samanaikaisesti, ja niiden kirkkauden suhdetta säätämällä saavutetaan tietty värilämpötila. Alla olevassa kuvassa 13 on esimerkkinä LED-nauha, jossa kirjaimen W kohdalla on 2700 K:n ledi ja kirjaimen C kohdalla 6000 K:n ledi.



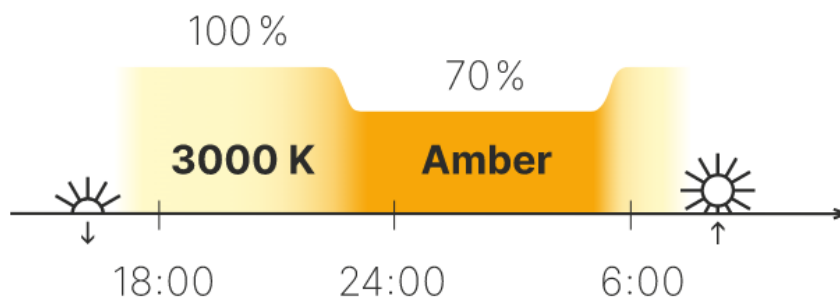
Kuva 13. EPISTAR 2835, 19.2W, Tunable White [29].

Valaisinvalmistaja BEGA markkinoi uutta värilämpötilan ohjaukseen pohjautuvaa tekniikkaa nimellä BEGA BugSaver® (kuva 14). Innovaation tarkoituksena on säilyttää ulkovalaistuksen luoma turvallisuus mutta samanaikaisesti suojella yöllä liikkuvia eliöitä sinisen värin aiheuttamilta haitoilta.



Kuva 14. BEGAN BugSaver®-valaisin, oikealla "Amber" [30].

Valaisimen tarkoituksena on muuttaa päiväsaikaan päällä oleva 3000 K:n väri- lämpötila BEGA:n kutsumaksi "Amber" värisävyksi, joka vastaa väri- lämpötilal- taan 1800 K. Kun valaisimen väri- lämpötila muutetaan Amber-tasolle, sen sätei- lemä sininen valo pienenee merkittävästi. BEGAN mukaan sinisen värin mini- moiminen tekee valaisimista vähemmän kiinnostavia eliöille muun muassa hyönteisille. Tämän avulla valaistun kohteen, esimerkiksi puiston eläimistö saa elää mahdollisimman pienillä ihmisen aiheuttamilla häiriöillä [30]. Alla olevassa kuvassa 15 havainnoidaan kellonajan mukaista ohjausta kyseisellä valaisimella.



Kuva 15. Havainnekuva kellonajan mukaan tapahtuvasta ohjauksesta [30].

Kun väriämpötilaa muutetaan, myös valaisimen tuottamaa valoa himmennetään, jolla vahvistetaan väriämpötilan muutoksen aiheuttamaa vaikutusta. Valonohjausta varten BEGA tarjoaa kolmea erilaista ohjauskomponenttia: koje- tai jakorasiaan asennettavaa laitetta, jolla voi syöttää ohjausvirtaa maksimissaan yhdeksälle pylväsvalaisimelle. Tämän lisäksi samasta ohjauslaitteesta on olemassa IP65- ja IP54-suojatut versiot [30].

3.4 Automatisoitu ohjaus

Valaistuksen ohjaus voidaan automatisoida olemaan riippuvainen kellonajasta, päivänvalosta tai läsnäolosta. Valtaosa ulkovalaistuksesta, kuten esimerkiksi katuvalaistuksen ohjaus, on yleisesti ottaen jollain tavalla automatisoitu. Alla olevassa kuvassa 16 esitetään Helsingin kaupungin [31] määrittämä ledivalaisimien himmennystaulukko suhteutettuna kellonaikaan ja valaistusluokkaan.

Helsinki Liite 1. Ulkovalaistuksen himmennystaulukko, katu- ja viheralueet Versio: 3.0
1.3.2022

Katu- ja viheralueet, ledivalaisimet
Ledivalaisimien ohjaus toteutetaan 2-portaisesti alla olevien kellonajojen ja valaistusluokkien mukaan. Kellonajat ohjelmoidaan talviaikaan. Valaisinkohtaisissa, liitäntälaitteeseen ennakoon ohjelmoiduissa valaistuksissa, kellonajat määräytyvät yleensä laskennallisen keskiyön mukaan (Helsingissä n. 00:25). C-luokissa käytetään luminanssi- ja valaistusvoimakkuusluokkien vastaavuustaulukkoa, ks. julkaisu *Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen suunnitteluohje*. Himmennys toteutetaan M-luokkien mukaisesti.

Mitoittava valaistusluokka	Muuttuvan valaistuksen valaistusluokat	Kellonaika, alkava tunti																				
		15	16	17	18	19	20	21	22	23	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09		
		Mitoittavasta valaistusluokasta jäljelle jäävä keskimääräinen luminanssi %																				
M1, C0 ja C1	M1 – M2 – M3 – M2 – M1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	100	100	100	100	
M2, C2	M2 – M3 – M4 – M3 – M2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	50	50	50	50	70	100	100	100	100	
M3a, C3	M3 – M4 – M5 – M4 – M3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	75	75	100	100	100
M3b	M3 – M4 – M5 – M4 – M3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	75	75	100	100	100
M4, C4	M4 – M5 – M6 – M5 – M4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	70	40	40	40	40	70	70	100	100	100
M5, C5	M5 – M6 – P5 – M6 – M5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	60	60	40	40	40	40	60	60	100	100	100
		Mitoittavasta valaistusluokasta jäljelle jäävä keskimääräinen valaistusvoimakkuus %																				
P1 (K1)	P1 – P2 – P3 – P2 – P1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	100	100	100	100	100
P2 (K2)	P2 – P3 – P4 – P3 – P2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	50	50	50	50	70	100	100	100	100	100
P3 (K3)	P3 – P4 – P5 – P4 – P3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	70	40	40	40	40	70	70	100	100	100
P4 (K4)	P4 – P5 – P6 – P5 – P4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	60	60	40	40	40	40	60	60	100	100	100
P5 (K5)	P5 – P6 – P5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	60	60	60	60	60	60	60	60	100	100	100

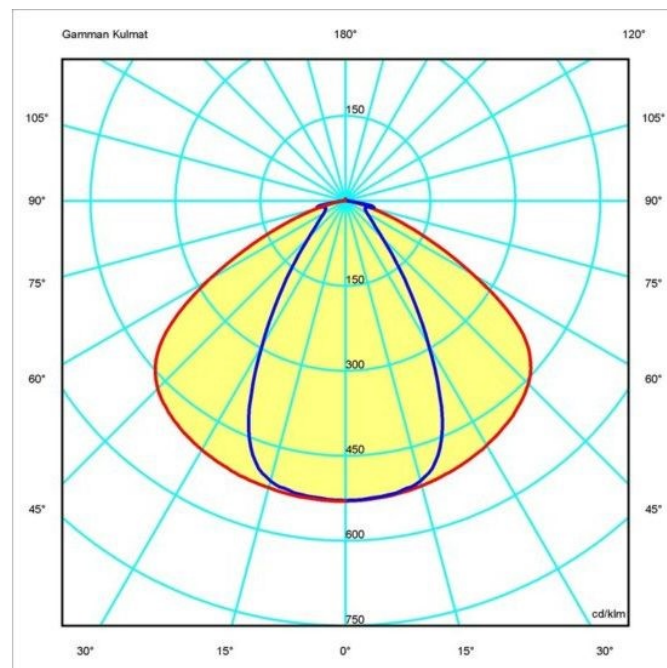
Kuva 16. Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen himmennystaulukko [31].

4 Ulkovalaistuksen suunnittelu

Ulkovalaistuksella tarkoitetaan kaikkea ulkona tapahtuvaa valaistusta, ja se eroaa sisätilojen valaistuksesta hyvin paljon niin teknisesti kuin tarkoitukseltaan. Ulkovalaistuksella voidaan tarkoittaa esimerkiksi tievalaistusta,

aluevalaistusta, urheiluväläistusta, puistovaläistusta tai ulkona sijaitsevien työalueiden valäistusta. Ulkovaläistuksen alakategorioille on määriteltä erilaisia standardeja valäistuksen kohteen tarpeiden mukaan. Ulkona sijaitsevilla valäistuksella voidaan luoda alueesta turvallisempi, silmää miellyttävämpi tai esimerkiksi työalueesta tehokkaampi [17].

Hyvässä valäistuksessa on huomioitava useita eri valäistuksen osa-alueita. Huomioon otettavia asioita ovat valonjakauma, valäistusvoimakkuus, häikäisy, valon suunta, värintoisto, häiriövalo ja toisinaan välkkyminen. Valonjakauma ilmaistaan graafisesti napakoordinaatistossa tai suorakulmaisessa koordinaatistossa, ja se voi olla symmetristä tai epäsymmetristä (kuva 17). Valonjakokäyrä esitetään yleensä valovoiman (cd) avulla. Joskus valonjakokäyrä ilmaistaan normeerattuna muodossa cd/klm, kandela tuhatta lumentu kohden, jolloin valovirran vaikutus valovoimaan eliminoidaan. Tällöin samaa valonjakokäyrää voidaan käyttää valonjakaumaltaan samantlaisille valäisimille, jotka voivat kuitenkin olla valovirralltaan eritehoisia.



Kuva 17. Esimerkkikuva valäisimen valonjakokäyrästä.

Muita ulkovalaistuksessa huomioon otettavia parametrejä voidaan ilmaista yleisimpien valaistusteknillisten suureiden avulla [17]:

- keskimääräinen luminanssi L_m (cd/m^2)
- luminanssin yleistasaisuus U_o
- luminanssin pitkittäistasaisuus U_l
- häikäisy f_{TI}
- vierialueen valaistusvoimakkuus R_{EI}
- vaakatason keskimääräinen valaistusvoimakkuus E_{hm} (lx)
- pystytason keskimääräinen valaistusvoimakkuus E_{vm} (lx)
- puolipallovalaistusvoimakkuus E_{hs} (lx)
- puolisynterivalaistusvoimakkuus E_{sc} (lx)
- yläpuolisen valon käyttöhyötysuhde R_{UL} .

Valaistusvoimakkuuksia käytetään laadunvalvonnassa, koska yleensä mittaushetkellä päällysteen heijastusominaisuuksia ei tunneta [17].

4.1 Standardit

Ulkovalaistuksen suunnittelussa noudatetaan pääpiirteittäin eurooppalaisia standardeja eli European standard EN 12464-2:2014 "Light and lighting - Lighting of workplaces. Part 2: Outdoor workplaces" [32] sekä SFS-EN 12193 "Light and lighting. Sports lighting" [33]. Yksiselitteisemmät ohjeet saadaan kuitenkin suunniteltavan kohteen kaupunkikohtaisesta suunnitteluohjeesta. Suurimmilla suomalaisilla kaupungeilla on oma yksilöity suunnitteluohje, mutta kaupunkien

välillä on paljon yhtäläisyyksiä. Kaupunkien suunnitteluohjeet perustuvat Väyläviraston eli entisen Liikenneviraston suunnitteluohjeeseen [15].

Eri kaupunkien suunnitteluohjeiden rakenne vastaa toisiaan, mutta sisältö on luotu yksilöllisesti kaupungin tarpeita varten. Kaupunkikohtaisten suunnitteluohjeiden tutkielman kannalta tärkeät asiat esitetään alla.

Ulkovalaistuksen tarpeet sisältävät ulkovalaistuksen päätehtävät ja sen valaistamat kohteet. Ulkovalaistuksen päätehtävät taajaman ulkopuolella liittyvät erityisesti liikenneturvallisuuteen. Taajamassa päätehtäviä on useampia, sillä kadun ympäristö on huomattavasti monipuolisempaa ja suunnittelijan kannalta huomioitettavia asioita on enemmän. Taajamassa ulkovalaistuksen päätehtäviä ovat havaitseminen, hahmottaminen ja yleinen ilmapiiri [17].

Valaistaviin kohteisiin eritellään kaupunkiympäristössä esiintyvät erilaiset alueet ja kadut. Näihin kuuluvat esimerkiksi:

- kaupungin omistamat kadut ja niiden yhteydessä olevat jalankulku- ja pyörätiet
- kaupungin omistamat torit ja aukiot
- puistoalueet, niiden pääreitit, sekä leikki-, peli- ja toiminta-alueet
- kaupungin uimapaikat
- venesatamat
- koira-aitaukset
- erilliset raitiotiet
- ulkoliikuntapaikat [15].

Valolajin valinnassa on huomioitava valonlähteen tyyppi ja sen väriämpötila sekä värintoisto. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että kaikkialla uudet valaistusratkaisut toteutetaan LED-valaisimilla. Kaupunkien alueet on jaettu teemoittain, ja niille on omat vaatimukset väriämpötilan ja värintoiston mukaan. Kaupunkien alueelliset vaatimukset eroavat paljon toisistaan, mutta kaikkialla tulee yleisesti ottaen välttää yli 4300 K:n väriämpötilaa [17; 18].

Valaistusteknilliset laskennat toimitetaan valaistussuunnitelman mukana, ja niiden tarkoituksena on osoittaa vaatimusten täyttyminen. Tievalaistuksen valaistusteknilliset laskennat tehdään standardin SFS-EN 13201-3:2015 Road lighting. Calculation of performance [34] mukaisesti. Valaistusteknilliset laskennat toteutetaan lähtökohtaisesti aina DIALux Evo-ohjelmalla, ja niille on ennalta määriteltäviä arvoja, esimerkiksi kuivan päällysteen, märän päällysteen ja vierialueen R_{EI} arvojen osalta.

4.2 Tievalaistus

Tievalaistuksella tarkoitetaan moottoriajoneuvoille tarkoitettuja autoteitä, risteysalueita sekä pääsääntöisesti jalankulkijoille tarkoitettuja kevyen liikenteen väyliä tai jalkakäytäviä. Tämän lisäksi tievalaistukseen luokitellaan erilaiset liittymät, pysäköintialueet, ohituskaistat, satama-alueet, julkisten liikennevälineiden pysäkit sekä sillat. Tievalaistuksen parametrit vaihtelevat alueiden välillä, mutta lähtökohtaisesti kaikilla alueilla valaistuksen päämääränä on luoda turvallisuutta [17].

Vaikka valaistussuunnittelussa on alueellisia eroja Suomen sisällä, noudatetaan silti lähtökohtaisesti kaikkialla ennalta määriteltäviä valaistusluokkia. Valaistusluokat on suunniteltu parantamaan liikenneturvallisuutta ja ympäristöä, ja niiden noudattamisessa nousevat esiin etenkin luminanssin tasaisuus, keskimääräinen luminanssi sekä häikäisy. Valaistusluokat on jaettu M-, C- ja P-luokkiin. M-luokalla (kuva 18) tarkoitetaan moottoriajoneuvoille tarkoitettuja teitä ja katuja kuivalla ja märällä päällysteellä.

Valaistus- luokka	Kuivan ja märän ajoradan luminanssi				Esto- häikäisy	Vieri- alueen valaistus
	Kuiva		Märkä	Kuiva		
	L_m cd/m ² min	U_o min	U_l min	U_{ow} min	f_{TI} %, max	R_{EI} min
M1 (AL1)	2,00	0,40	0,60	0,15	10	0,40
M2 (AL2)	1,50	0,40	0,60	0,15	10	0,40
M3a (AL3)	1,00	0,40	0,60	0,15	15	0,40
M3b (AL4a)	1,00	0,40	0,40	0,15	15	0,40
M4 (AL4b)	0,75	0,40	0,40	0,15	15	0,40
M5 (AL5)	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,40
M6	0,30	0,35	0,40	0,15	15	0,40

Kuva 18. M-luokat taulukoituna [17].

P-luokat (kuva 19) on tarkoitettu jalankulkijoille ja pyöräilijöille ajoradan vieressä sijaitsevilla alueilla sekä asunto- ja pihakaduille, jalankulkukaduille, pysäköinti-alueille ja pihaille.

Valaistusluokka	Vaakatason valaistusvoimakkuus	
	$E_{hm}^{1)}$ lx, min	E_h lx, min
P1 (K1)	15,0	3,00
P2 (K2)	10,0	2,00
P3 (K3)	7,50	1,50
P4 (K4)	5,00	1,00
P5 (K5)	3,00	0,60
P6 (K6)	2,00	0,40

1) Riittävän tasaisuuden takaamiseksi hankekohtainen keskiarvo ei saa ylittää 1,5-kertaista luokan edellyttämää keskiarvon minimiä.

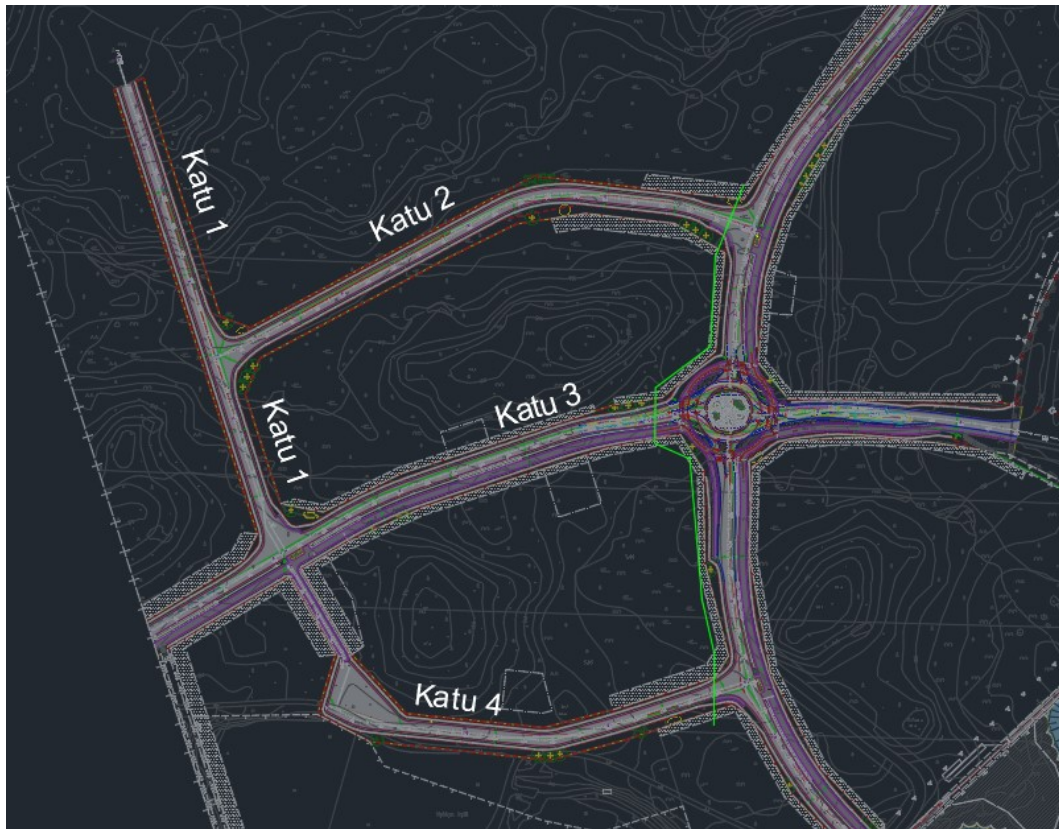
Kuva 19. P-luokat taulukoituna [17].

5 Ulkovalaistussuunnitelma

5.1 Lähtökohdat

Tutkimuksessa käsiteltäviä teoreettisia aiheita käytännön tasolle tuo ulkovalaistussuunnitelma. Suunnitelmaa varten käytetään teoreettista ulkovalaistuksen katukohdetta, jota kutsutaan työssä nimellä esimerkkikohde. Suunniteltava alue on esitettyä alla (kuva 20), missä alueen rajaa kuvastaa vihreä viiva oikealla. Esimerkkikohteeseen kuuluu neljä erilaista katua, joiden ominaisuuksista on selvitettävä tietoa laskentaa varten. Tievalaistuksessa tien tai kadun leveydellä ja käytettävällä valaistusluokalla on suuri painoarvo laskennan lopputuloksen ja

käytettävän valaisimen kannalta. Suunnitelmassa tullaan noudattamaan Espoon kaupungin ulkovalaistuksen suunnitteluohjetta [18].



Kuva 20. Suunniteltava esimerkkikohde

Suunniteltavan alueen neljä tietä ovat mitoiltaan seuraavanlaisia:

- Kadut 1 ja 2 ovat 8 metriä leveitä ajoratoja.
- Katu 3 sisältää 7,5 metriä leveän ajoradan, 4,5 metriä leveän välikaistan ja 4,5 metriä leveän kevyen liikenteen väylän.
- Katu 4 on 8 metriä leveä, mutta sen päässä on ajoneuvojen kääntöpaikka sekä 4 metriä leveä jalkakäytävä. Jalkakäytävää ei valaista.

Ajoradoilla käytetään M3b-valaistusluokkaa, jalkakäytävillä puolestaan P3. Taulukossa 2 esitetyllä tavalla P3-luokalla jalkakäytävän vaakatason

valaistusvoimakkuuden keskiarvo ei saa alittaa 7,5 luksia. Vaakatason valaistusvoimakkuuden minimiarvo puolestaan saa olla minimissään 1,5 luksia. Ajoradan valaistusluokka määrittää useamman arvon, joita voidaan tarkkailla taulukosta 1. Ajoradan valaistusluokka määrittää vaaditun keskimääräisen luminanssin L_m (cd/m^2), luminanssin yleistasaisuuden U_o , luminanssin pitkittäistasaisuuden U_l , häikäisyn f_{TI} , sekä vierialueen valaistusvoimakkuuden R_{EI} . Valaistusteknisissä laskennoissa käytetään DIALux Evo -ohjelman tievalaistus-projekttilaa.

Suunnitelmaan voi sisältyä myös muita huomioon otettavia seikkoja, kuten ennalta määriteltä pylväsväli, käytettävä valaisin sekä mahdolliset pimeänä pidettävät alueet. Esimerkkikohteessa ei ole ennalta määritettyä pylväsväliä, mutta sijoittelussa on silti huomioitava esimerkiksi suojatiet, kaarteet sekä rakennukset. Laskennan tarkoituksena on selvittää CLO:n eli vakiovalovirtaohjatun katuvalaisimen vaikutusta tavalliseen katuvalaisimeen kokonaisen projektin mitta-kaavalla. Suunnitelmasta tehdään kaksi erilaista versiota, jotka ovat vertailukelpoisia keskenään. Laskenta tullaan suorittamaan Easy LEDin Pro Flow-valaisimilla ja näistä toinen tehdään vakiovalovirtaohjatulla versiolla.

5.2 Laskenta

Kun lähtötilanne on käyty läpi ja tärkeimmät tunnusluvut on selvitetty, alkaa varsinaisen suunnittelun vaihe. Ensin DIALux Evo -laskentasovellukseen rakennetaan katukohtaiset laskennat, johon määritellään uniikit parametrit tien mittojen, valaisimen sijainnin ja valaistusteknillisten vaatimusten mukaan. Katujen 1, 2 ja osittain kadun 4 leveydet vastaavat toisiaan, joten ne voidaan laskea yhdellä laskulla.

Espoon kaupungin ulkovalaistuksen suunnitteluohjeen [18] mukaisesti valaisinpylvään keskikohdan etäisyys ajoradan ja jalkakäytävän reunasta on ensisijaisesti metri. Etäisyys jalkakäytävän ja ajoradan reunasta voi olla 0,5 m, jos se sijoitetaan esimerkiksi kapealle välialueelle. Suunnitelma toteutetaan noudattaen ensisijaista ohjetta, eli ensimmäisessä laskennassa pylväs sijoitetaan

metrin päähän kadusta. Laskennassa 1 käytetään kahdeksanmetrisiä valaisinpylväitä yhden metrin varrella, jolloin valaisin sijaitsee ajoradan päällä eikä viheralueella. Valaistuslaskennassa valaisin asetetaan 2° kulmaan, jolloin valaisin ei näytä ”roikkuvan” varressa.

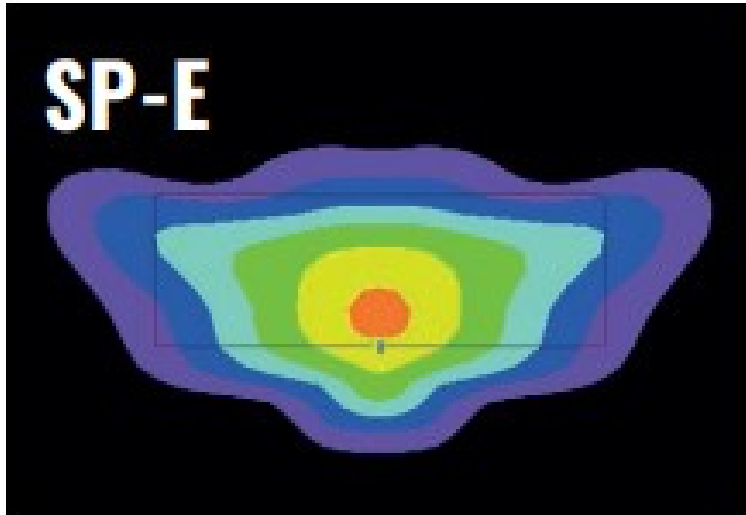
5.2.1 Laskenta 1

Ensimmäisenä tarkastellaan 8 metriä leveää ajorataa eli katuja yksi kaksi ja neljä. Laskentaohjelmaan asetetaan alla näkyvät (kuva 21) M3b-valaistusluokan mukaiset arvot, joilla laskenta toteutetaan.

Arviointikenttä (M3)		Ajorata 1 (M3)
Lm	[cd/m ²]	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 1.00
Uo		<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.40
Ul		<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.40 
TI	[%]	<input checked="" type="checkbox"/> ≤ 15
EIR		<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.30
Uo (märke)		<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.15

Kuva 21. M3b-valaistusluokkaa vastaavat DIALux-arvot

Easy LEDin Pro Flow-valaisimiin löytyy yrityksen verkkosivulta 12 erilaista optiikkaa mutta myös lisää pyydettyä. Laskennan alussa selvitettiin optiikkavaihtoehtojen sopivuutta kyseiseen tieprofiliin. Kokeilujen perusteella selvisi, että optiikkavaihtoehto SP-E (kuva 22) soveltuu tielle parhaiten. Koska suunnitelman tarkoituksena on tutkia CLO:n vaikutusta katuvalaistukseen, kokeillaan seuraavaksi valaisimen tehoa SP-E-optiikalla.



Kuva 22. Easy LEDin Pro Flow SP-E-optiikka.

Espoon kaupungin suunnitteluohjeen [18] mukaan katulaskennassa käytetään alenemakerrointa 0,9, jos valaisin on varusteltu vakiovalovirtaohjauksella. Jos ledivalaisinta ei ole varusteltu vakiovalovirralla, sen alenemakerroin lasketaan kaavalla 1: $f_m = f_{LF} * f_{LM}$, jossa f_m on alenemakerroin, f_{LF} on valmistajan ilmoittama valovirran alenema (L-arvo) ja f_{LM} on valaisimen likaantumiskerroin, joka on vakio 0,9. Easy LED ilmoittaa Pro Flow-valaisimien eliniäksi L95B10, C10, 100 000 h, joten kaavassa $f_{LF} = 0,95$. Kaavan mukaan alenemakerroin f_m on 0,855.

Kun alenemakertoimet on saatu selville, voidaan laskea katulaskennat molemmilla versioilla. Laskenta 1a tarkoittaa katulaskentaa ilman CLO:ta alenemakertoimella 0,855 ja laskenta 1b tarkoittaa katulaskentaa CLO:lla alenemakertoimella 0,9. Laskennassa 1a ilmenee, että kadulla tulee käyttää Pro Flow M 40–850 SP-E 740, 101W, 13270 lm. Laskennassa 1b alenemakertoimella 0,9 laskettuna tulee käyttää valaisinta Pro Flow M 40–700 SP-E CLO 740, 83W, 11310 lm. Molemmissa laskennoissa pylväsväli optimoitiin 40 metriin. Laskennan 1 tulokset esitetään alla kuvassa 23.

Katu 1a (ilman CLO) (M3)				Katu 1b (CLO) (M3)			
✓	≥	1.00	1.12 ✓	✓	≥	1.00	1.00 ✓
✓	≥	0.40	0.54 ✓	✓	≥	0.40	0.54 ✓
✓	≥	0.40	0.42 ✓	✓	≥	0.40	0.42 ✓
✓	≤	15	13 ✓	✓	≤	15	13 ✓
✓	≥	0.30	0.47 ✓	✓	≥	0.30	0.47 ✓
✓	≥	0.15	0.19 ✓	✓	≥	0.15	0.19 ✓

Kuva 23. Laskennan 1 tulokset CLO:lla (b) ja ilman (a).

Kun tarkastellaan kyseisten valaisimien sähkötekniisiä arvoja, voidaan havaita suuria eroja kulutuksen välillä. Laskennan 1a valaisin on **21,7 %** tehokkaampi kuin laskennan 1b. Kuvasta 23 voidaan kuitenkin havaita, että laskennassa 1a valaisin on hieman ylimitoitettu. 101 W:n valaisinta voidaan tällöin himmentää ylivalaistuksen välttämiseksi. Kun valaisinta himmennetään lineaarisesti, päästään pienimmillään arvoihin 91 W ja 11843 lm. Himmennetyn version tulokset esitetään kuvassa 24.

Katu 1a (ilman CLO) (M3)				Katu 1b (CLO) (M3)			
✓	≥	1.00	1.00 ✓	✓	≥	1.00	1.00 ✓
✓	≥	0.40	0.54 ✓	✓	≥	0.40	0.54 ✓
✓	≥	0.40	0.42 ✓	✓	≥	0.40	0.42 ✓
✓	≤	15	13 ✓	✓	≤	15	13 ✓
✓	≥	0.30	0.47 ✓	✓	≥	0.30	0.47 ✓
✓	≥	0.15	0.19 ✓	✓	≥	0.15	0.19 ✓

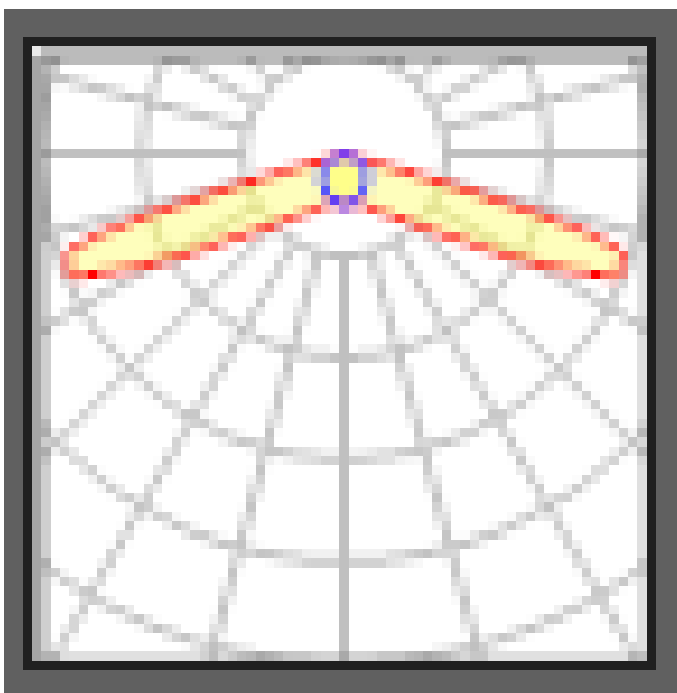
Kuva 24. Laskennan 1 tulokset (a himmennettynä).

Kun tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään, voidaan todeta, että mikäli katuvalaisimia ei varustella vakiovalovirtaohjauksella, joudutaan käyttämään 9,6 % suurempaa tehoa.

5.2.2 Laskenta 2

Seuraavaksi tarkastellaan katua kolme, joka sisältää 7,5 metriä leveän ajoradan, 4,5 metriä leveän viherkaistan ja 4,5 metriä leveän kevyen liikenteen väylän. Katuvalaisimet tullaan sijoittamaan laskentaa 1 vastaavalla 40 metrin pylväsvälillä ajoradan ja jalkakäytävän keskellä sijaitsevalle viheralueelle. Laskennan kulku toimii samalla periaatteella kuin laskennassa 1, mutta tällä kertaa sijoitetaan kaksi valaisinta yhteen pylväaseen, jolloin säästetään hankintakustannuksissa. Pylväs on tässä laskennassa 10 metrin korkuinen metrin varrella, ja siihen asennetaan erillinen puolen metrin varsi kuuden metrin korkeuteen. Pylvään sijoittelu havainnoidaan alla kuvassa 28. Valaisimet asennetaan varteen 2° asennuskulmalla.

Myös tässä laskennassa ajoratavalaisimen optiikaksi valikoitu SP-E, sillä se tarjosi parhaan valonjaon tälle tieprofiilille. Kuuden metrin korkeudessa olevan pienempitehoisen valaisimen optiikaksi valikoitu SP-T (kuva 25). Alenemakertoimet johdettiin samoista kaavoista kuin laskennassa yksi, ja niissä käytettiin samoja arvoja.



Kuva 25. Easy LEDin Pro Flow SP-T-optiikka.

Laskennan kaksi molemmissa versioissa laskenta antoi samat valaisinvaihtoehdot. Ajouradalle valikoitui Pro Flow L 48–850 SP-E 740, 123 W, 17600 lm. Jalkakäytävälle kuuden metrin korkeuteen puolestaan valikoitui Pro Flow S 12–500 SP-T 740, 19 W, 2660 lm. Mikäli valaisimia ei räätälöidä ollenkaan, on niiden sähkönkulutus molemmissa versioissa sama. Alla olevasta kuvasta (kuva 26) voidaan kuitenkin havaita, että molemmissa versioissa ajorata ja jalkakäytävä ylivalottuu.

Katu 3a (ilman CLO) (M3)				Katu 3b (CLO) (M3)					
✓	≥	1.00	1.21 ✓	✓	≥	1.00	1.27 ✓		
✓	≥	0.40	0.70 ✓	✓	≥	0.40	0.70 ✓		
✓	≥	0.40	0.71 ✓	✓	≥	0.40	0.71 ✓		
✓	≤	15	11 ✓	✓	≤	15	11 ✓		
✓	≥	0.30	0.72 ✓	✓	≥	0.30	0.72 ✓		
✓	≥	0.15	0.22 ✓	✓	≥	0.15	0.22 ✓		
Jalkakäytävä 3a (ilman CLO) (P3)				Jalkakäytävä 3b (CLO) (P3)					
✓	≥	7.50	≤ 11.25	9.47 ✓	✓	≥	7.50	≤ 11.25	9.97 ✓
✓	≥	1.50	2.55 ✓	✓	≥	1.50	2.68 ✓		

Kuva 26. Laskennan 2 tulokset CLO:lla (a) ja ilman (b).

Valaisimia on himmennettävä ylivalotuksen välttämiseksi. Kun toisen laskennan molempia versioita himmennetään lineaarisesti, ovat niiden tulokset vertailukelpoisia keskenään (kuva 27) Laskennan 2a valaisimia voidaan himmentää seuraavasti: ajoratavalaisimen valovirtaa voidaan laskea arvosta 17600 lm arvoon 14500 lm, jalkakäytävän valaisimen valovirtaa voidaan laskea arvosta 2660 lm arvoon 2330 lm. Ajoratavalaisimen valovirtaa voidaan laskea 17,6 %, ja jalkakäytävän valaisinta himmennetään puolestaan 12,4 %. Laskennan 2b valaisimia voidaan himmentää seuraavasti: ajoratavalaisimen valovirtaa voidaan laskea arvosta 17600 lm arvoon 13850 lm, jalkakäytävän valaisimen valovirtaa voidaan laskea arvosta 2660 lm arvoon 2280 lm. Ajoratavalaisimen valovirtaa lasketaan 21,3 %, ja jalkakäytävän valaisinta himmennetään 14,3 %.

Katu 3a (ilman CLO) (M3)				Katu 3b (CLO) (M3)					
✓	≥	1.00	1.00 ✓	✓	≥	1.00	1.00 ✓		
✓	≥	0.40	0.70 ✓	✓	≥	0.40	0.70 ✓		
✓	≥	0.40	0.71 ✓	✓	≥	0.40	0.71 ✓		
✓	≤	15	11 ✓	✓	≤	15	10 ✓		
✓	≥	0.30	0.72 ✓	✓	≥	0.30	0.72 ✓		
✓	≥	0.15	0.22 ✓	✓	≥	0.15	0.22 ✓		
Jalkakäytävä 3a (ilman CLO) (P3)				Jalkakäytävä 3b (CLO) (P3)					
✓	≥	7.50	≤ 11.25	8.02 ✓	✓	≥	7.50	≤ 11.25	8.16 ✓
✓	≥	1.50		2.16 ✓	✓	≥	1.50		2.20 ✓

Kuva 27. Laskennan 2 tulokset himmennettynä.

Laskennassa 2 käytettävien valaisimien lopulliset arvot ovat seuraavat:

- katu 3a: Pro Flow L 48–850 SP-E 740, 101,3 W, 14500 lm
- jalkakäytävä 3a: Pro Flow S 12–500 SP-T 740, 16,6W, 2330lm
- katu 3b: Pro Flow L 48–850 SP-E CLO 740, 96,8W, 13850lm
- jalkakäytävä 3b: Pro Flow S 12–500 SP-T CLO 740, 16,3W, 2280lm.

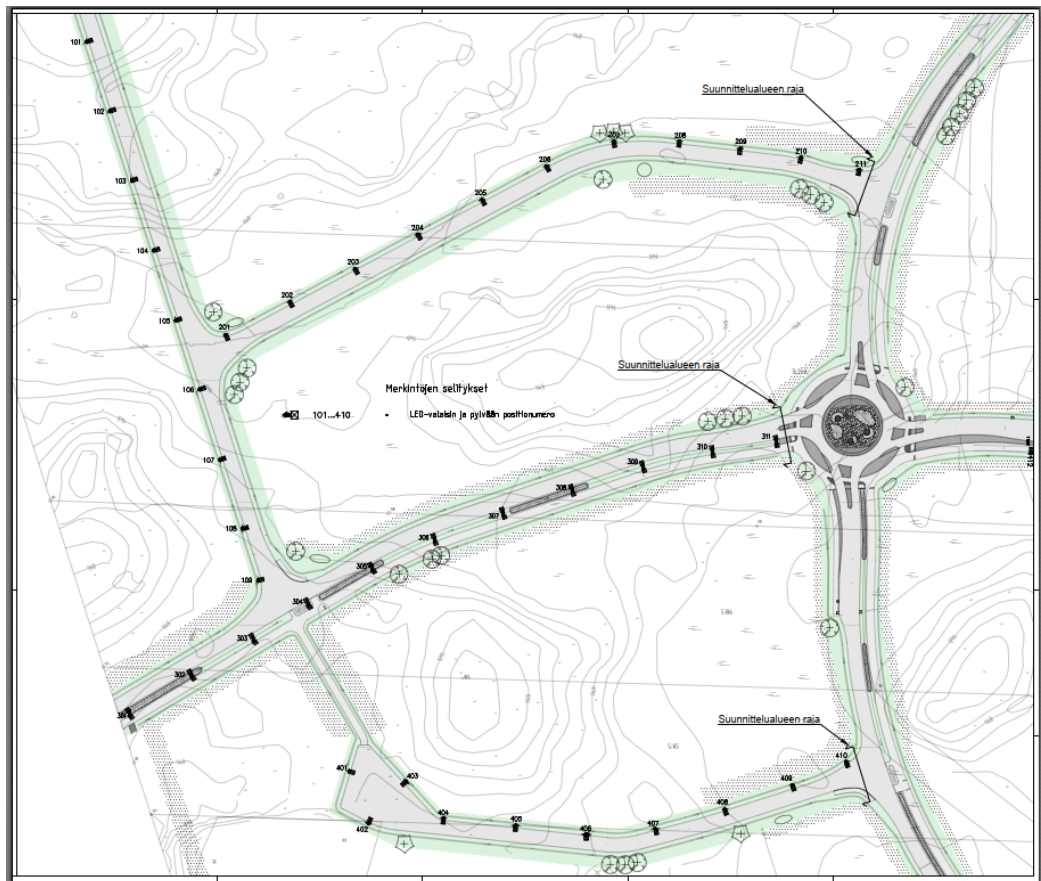
Luettelon arvoja tarkkaillessa voidaan todeta, että mikäli kadun 3 valaisinta ei varustella vakiovalovirralla, täytyy sen olla 4,6 % tehokkaampi. Jalkakäytävän valaisimissa ero on pienempi 1,8 %. CLO:n vaikutus voidaan myös ilmaista pylväskohtaisesti, ja tällöin pylvääseen kiinnitetyn ajoratavalaisimen, sekä pienemmän jalkakäytävän valaisimen arvot lasketaan yhteen. Pylväskohtaiset arvot ovat seuraavat:

- pylväs 3a: 117,9 W, 16830 lm
- pylväs 3b: 113,1 W, 16130 lm.

Pylväsکوhtaيسissa tarkastelussa voidaan havaita, että mikäli valaisimia ei varustella CLO:lla, niiden täytyy olla 4,2 % tehokkaampia.

5.3 Suunnitelma

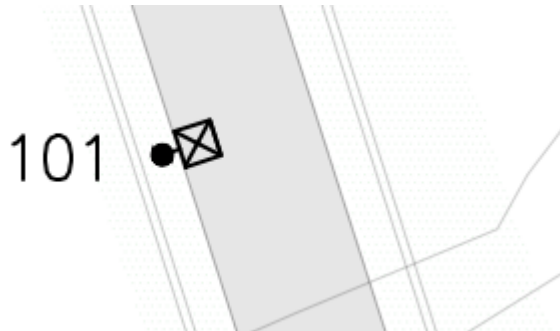
Kun kohteen valaisimet on päätetty ja niiden vaaditut arvot on saatu laskettua, alkaa suunnittelun seuraava vaihe. Projektin suunnitelmavaiheessa lasketut valaisimet sijoitetaan asemapiirrokseseen (kuva 28) edellä käytyjä vaadittuja määryksiä noudattaen. Laskennan mukaisesti valaisinpylväät sijoitetaan alustavasti 40 metrin etäisyydelle toisistaan.



Kuva 28. Esimerkkikohteen asemapiirros

Suunnitelmassa käytetään alla olevan kuvan 29 mukaisia piirrosmerkkejä, joilla ilmaistaan valaisimen sijaintia kartalla. Symbolin viereen kirjataan valaisimen sijaintinumero, jotta valaisimet voidaan yksilöidä. Sijaintinumeron ensimmäinen

kirjain ilmaisee kyseisen kadun numeroa. Symbolin ympärille voidaan myös kirjata esimerkiksi valaisimen teho sekä ulkovalaistuksessa käytettävän kolmivaiheverkon vaihenumero. Esimerkkikohteen suunnittelussa ei huomioida valaisinten sähkösuunnittelua, sillä se ei ole tutkittavan aiheen kannalta olennaista. Suunnittelussa tutkitaan valaisimissa käytettävää tehoa, mutta ne kirjataan erillisiin taulukoihin (luku 5.4).



Kuva 29. Asemapiirroksessa käytettävä valaisimen piirrosmerkki

5.4 Lopputulos

Esimerkkikohteen suunnittelun tarkoituksena on vertailla vakiovalovirtaohjauksella räätälöidyn ulkovalaisimen vaikutusta kokonaiskulutukseen suunnittelualueen mittakaavalla. Alla oleviin taulukoihin (taulukot 1 ja 2) on kirjattu asemapiirroksen valaisinten lukumäärä ja teho kaduittain.

Taulukko 1. Suunnittelualueen kokonaisteho ilman vakiovalovirtaohjausta

Ilman CLO	Valaisinten lukumäärä [kpl]	Valaisimessa käytettävä teho [W]	Kadun kokonaisteho [W]
Katu 1	9	91	819
Katu 2	11	91	1001
Katu 3	11	101,3	1114,3
Jalkakäytävä	11	16,6	182,6
Katu 4	10	91	910
Yhteensä	52	390,9	4026,9

Taulukko 2. Suunnittelalueen kokonaisteho vakiovalovirtaohjauksella

CLO	Valaisinten lukumäärä [kpl]	Valaisimessa käytettävä teho [W]	Kadun kokonaisteho [W]
Katu 1	9	83	747
Katu 2	11	83	913
Katu 3	11	96,8	1064,8
Jalkakäytävä	11	16,3	179,3
Katu 4	10	83	830
Yhteensä	52	362,1	3734,1

Taulukoinnin perusteella havaitaan, että esimerkkikohteen valaisinten kokonaisteho P on 4026,9 wattia ilman vakiovalovirtaohjausta. CLO:lla varustettujen valaisinten kokonaisteho P_{CLO} on puolestaan 3734,1 wattia. Koko kohteen mitta-kaavalla valaisimia täytyy ylittää 7,8 %, mikäli valaisimia ei varustella vakiovalovirtaohjauksella.

Esimerkkikohteen valaisinten kokonaisteho ei kuitenkaan ole riittävä tieto vertailua varten. Kun kokonaisteho on selvitetty, voidaan laskea valaisinten kuluttama sähköenergia tietyn ajan kuluessa. Sähköenergian kulutusta tietyssä aikana mitataan wattitunteina (Wh), kilowattitunteina (kWh) tai megawattitunteina (MWh). Esimerkiksi kilowattitunti vastaa energiamäärää, joka kuluu, kun 1000 watin laitetta pidetään käynnissä yhden tunnin ajan [22].

Valaisinten ohjaukseen käytetään luvussa 3 käsitellyä automatisoitua ohjausta. Katuvalaisimet ovat päällä yleisesti vain niinä kellonaikoina, kun ulkona on pimeää tai hämärää ja valaistukselle on tarve. Espoon kaupungin ulkovalaistuksen ohjaustaulukko esitetään alla olevassa kuvassa 30. Kyseisestä taulukosta voidaan selvittää tunnit, jolloin katuvalot ovat päällä ja millä kirkkaustasolla. Espoon kaupungin suunnitteluohjeen [18] mukaan ledivalaisimien ohjaus toteutetaan 2-portaisesti taulukon kellonaikojen mukaisesti. Taulukkoon on ilmoitettu prosentteina valaisinten jäljelle jäävä keskimääräinen luminanssi kyseisenä kellonaikana.

	Kellonaika, alkava tunti																		
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Mitoittava valaistusluokka	Mitoittavasta valaistusluokasta jäljelle jäävä keskimääräinen luminanssi %																		
Kaikki M-luokat ja C-luokat	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	50	75	100	100	100	100
	Mitoittavasta valaistusluokasta jäljelle jäävä keskimääräinen valaistusvoimakkuus %																		
Kaikki P-luokat	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	50	75	100	100	100	100

Kuva 30. Espoon kaupungin ulkovalaistuksen ohjaustaulukko [18].

Esimerkkikohteessa käytettävät valaisimet ovat lineaarisesti himmennettäviä, jolloin valaisimen valotehokkuus säilyy samana himmennystasosta huolimatta. Lineaarisen himmennyksen vuoksi ohjaustaulukon mukaisen himmennystason prosenttiarvolla voidaan suoraan laskea valaisimen käyttämä teho himmennettynä. 75 %:n teholla päällä ollessa kadun kokonaisteho P tai P_{CLO} lasketaan kertomalla kadun alkuperäinen kokonaisteho luvulla 0,75. 50 %:n teholla päällä ollessa kadun kokonaisteho lasketaan kertomalla kadun alkuperäinen kokonaisteho luvulla 0,5. Ilman CLO:ta varustellun kohteen kokonaisteho 75 %:n himmennystasolla P_{75} on 3020,18 W, 50 %:n himmennystasolla kokonaisteho P_{50} on 2013,45 W. CLO:lla varustellun kohteen kokonaisteho 75 % himmennystasolla P_{CLO75} on 2800,58W, 50 %:n himmennystasolla kokonaisteho P_{CLO50} on 1867,05 W.

Espoon kaupungissa valaistusta ohjataan astronomisen kellon avulla, johon on asetettu esiohjelmoidut viiveet. Tällä hetkellä kellot on säädetty siten, että valaistus syttyy 20 minuuttia auringonlaskun jälkeen ja sammuu 10 minuuttia ennen auringonnousua [18]. Espoon kaupungin ulkovalaisinten polttoaika on vuodessa 3870 tuntia [18], ja tämän vuoksi laskentakaavoja pitää muuttaa vastaamaan realistista tilannetta. Mikäli kuvassa 30 esitettyä Espoon kaupungin ohjaustaulukkoa noudatettaisiin suoraan, olisi valaisinten polttoaika päivän aikana 19 tuntia eli vuodessa 6935 tuntia. Laskentaan on lisättävä kerroin φ , jotta valaisinten himmennys otetaan huomioon kokonaiskulutuksessa mutta valaisinten polttoaika pysyy oikeana.

$$\varphi = \frac{3870}{6935} = 0,55804$$

Ohjaustaulukon mukaan valaisimet ovat päällä täydellä teholla 11 tuntia vuorokaudesta, 75 %:n teholla kolme tuntia vuorokaudesta ja 50 %:n teholla viisi tuntia vuorokaudesta. Vuotuisen energiankulutuksen laskemiseen käytetään seuraavia kaavoja:

Kaava 2

$$P_T = \varphi * (365 * (P * 11 + P_{75} * 3 + P_{50} * 5)), \text{ ja}$$

Kaava 3

$$P_{CLOT} = \varphi * (365 * (P * 11 + P_{CLO75} * 3 + P_{CLO50} * 5))$$

$$P_T = 12918428,93 \text{ Wh} = 12,92 \text{ MWh}$$

$$P_{CLOT} = 11979117,03 \text{ Wh} = 11,98 \text{ MWh}$$

Vuonna 2022 sähkön hinta on ollut edellisvuosia kalliimpi, mutta esimerkkikohteen vuotuisen kulutuksen hinta tullaan laskemaan sen avulla. Vuoden 2022 sähkön keskihinta työn kirjoitushetkellä on ollut 17 senttiä kilowattituntia kohden [35]. Megawattitunnin hinta saadaan kertomalla kilowattitunnin hinta tuhannella, eli tällöin megawattitunti maksaa keskimäärin 170 euroa. Espoossa sähkönsiirrostaa vastaa Caruna, jonka sähkönsiirtomaksu on 2,96 senttiä kilowattituntia kohden [36]. Kun sähkönsiirto otetaan huomioon sähkön hinnassa, saadaan megawattitunnin hinnaksi 199,6 euroa.

Esimerkkikohteen molempien versioiden kokonaiskustannus ja -kulutus esitetään alla olevissa taulukoissa (taulukot 3 ja 4). Taulukoiden kokonaishintasarakkeet on laskettu kertomalla kokonaiskulutus edellä mainitulla megawattitunnin hinnalla. Taulukkoon 5 on esitetty vakiovalovirtaohjattujen valaisimien tuoma säästö energiankulutuksessa ja energiakustannuksissa. Taulukon 5 arvot on laskettu taulukoiden 3 ja 4 vastaavien lukujen erotuksella.

Taulukko 3. Valaistuksen käyttökustannukset ilman CLO:ta.

Vuosi	Kokonaiskulutus [MWh]	Kokonaishinta [€]
25	323,00	64470,75

Taulukko 4. Valaistuksen käyttökustannukset CLO:lla, laskettuna keskiarvokulutuksella.

Vuosi	Kokonaiskulutus [MWh]	Kokonaishinta [€]
25	299,5	59780,2

Taulukko 5. Vakiovalovirtaohjauksella saavutettu säästö energiankulutuksessa ja energiakustannuksissa.

Vuosi	Säästynyt energia [MWh]	Kustannushyöty [€]
25	23,5	4690,50

5.5 Analyysi

Suuri osa ulkovalaisinvalmistajista tarjoaa katuvalaisimet suoraan CLO:lla varustettuna. Toiset eivät automaattisesti tarjoa katuvalaisimiin vakiovalovirtaohjausta, mutta yleensä sen saa valaisimiin erillisestä pyynnöstä. Yleensä Suomen suuremmissa kaupungeissa katuvalaisimet tilataan automaattisesti vakiovalovirtaohjattuna.

Edellisen luvun lopputuloksia tarkkaillessa voi päätellä, että vakiovalovirtaohjauksella räätälöity valaisin on aina edullinen vaihtoehto asiakkaalle. Taulukon 5 arvot kertovat, että ledivalaisimen elinkaaren aikana esimerkkituotteen vuotuisen energiansäästö on noin 23,5MWh tai 4690 euroa ja 50 senttiä. Tutkimassa käsitelty esimerkkituote sisälsi neljää katuvalaisinta, joista jokaiseen sijoitettiin noin kymmenen valaisinta. Jos tutkittava kohde olisi ollut esimerkiksi kaupunginosa tai kokonainen kaupunki, olisivat kustannus- ja energiatehokkuuden taulukon arvot olleet moninkertaisia. Vuonna 2016 Espoon kaupunki käytti yli 1,6 miljoonaa euroa valaistuksen sähköenergiaan [37], joten muutaman prosenttiyksikön säästö tekee kokonaisuuteen valtavan eron. Tämän vuoksi ulkovalaistuksen suunnittelu on tärkeä osa valaistuksen toteutusta ja sillä voidaan minimoida valaisinten käyttökustannukset karsimatta kuitenkaan niiden tuottamasta valovirrasta.

Suunnitelman tuloksien tarkastelussa on kuitenkin otettava huomioon laskennan tuloksien paikkansapitävyys. Valaisinvalmistajat ilmoittavat ledivalaisimen eliniän luvussa 2.4 käsitellyillä L-, B- ja C- arvoilla. Ledivalaisimet ovat nykyään erittäin pitkäikäisiä, joten niiden tarkkaa elinikää on mahdoton ennustaa. Eliniän tarkassa tutkimisessa esimerkkikohteen valaisimien pitäisi olla päällä 100 000 h, mutta tällöin tekniikka olisi jo vanhentunut tutkimuksen päättyessä. Valaisinvalmistajat käyttävät lyhyempiä arviointikausia ja yleistävät tulokset muodostaakseen ennusteet [14].

Valmistajan ilmoittaman eliniän lisäksi toinen laskentaan vaikuttava tekijä on käytettävän suunnitteluohjeen mukainen alenemakerroin. Suunnitelmassa käytettiin Espoon kaupungin suunnitteluohjeen mukaista kaavaa (1) alenemakertoimen määrittelyyn. Jotkin valaisinvalmistajat ilmoittavat vakiovalovirtaohjauksella varustellun valaisimen tehonkulutuksen erikseen valaisimen elinkaaren alussa, lopussa, sekä keskimääräisesti. Suunnitelmassa käytettiin CLO-tehonkulutuksen keskimääräistä arvoa.

Nykyään osa valaisinvalmistajista ilmoittaa valaisimen L-arvoksi jopa 98, kuten esimerkiksi osa GREENLED VEGA L -tuoteperheen valaisimista. Mitä lähempänä L-arvo on lukua 100, sitä pienempi merkitys vakiovalovirtaohjauksella on. L-arvon ollessa 98 alenemakerroin kaavan 1 mukaan on 0,882. Tällöin vakiovalovirtaohjaus tuo valaisimen mitoittamiseen vain 2 %:n edun (verrattuna alenemakerroin CLO:lla 0,9). CLO:n merkitys korostuu L-arvon ollessa pieni, ja esimerkiksi valaisimen L-arvon ollessa 80 alenemakerroin olisi 0,72. Tässä tilanteessa vakiovalovirta tuo valaisinten mitoittamiseen merkittävän noin 25 %:n edun. Tutkimuksen analysoimisessa on myös otettava huomioon se, että vuonna 2022 sähkön hinta on ollut merkittävästi edellisvuosia suurempi, jolloin vakiovalovirtaohjauksen tuoma taloudellinen etu korostuu.

Laskelma toteutettiin vuoden 2022 sähkön keskihinnalla, eikä siinä huomioitu sähkön hinnan vuorokausivaihtelua. Katuvalaistuksen tarpeet ajoittuvat enimmäkseen yön tunneille, jolloin pörssisähkön hinta on yleisesti ottaen halvempaa.

Tällöin voidaan ajatella pörssisähkön käytön olevan kustannustehokas vaihtoehto silloin, kun valaisimia ei käytetä päiväsaikaan.

6 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli tutkia ledivalaisimien teknistä toimintaa, himmentämisellä saavutettavia etuja ja tuoda niitä käytännön tasolle konkreettisella suunnitelmalla. Työssä käsiteltiin valaisinten teknisten toiminnan lisäksi myös standardeja, suunnitteluohjeita sekä ulkovalaistuksen suunnittelun eri vaiheita.

Ulkovalaistus on merkittävä osa kaupungin sähkönkulutuksesta, minkä vuoksi sen optimoiminen ja oikeanlainen suunnittelu on tärkeä osa kokonaiskuvaa. Käsiteltyjen aiheiden lisäksi ulkovalaistuksessa on huomioitava myös valaistuksen sähkösuunnittelu. Tutkielman valaistussuunnitelmaan ei sisältynyt sähkösuunnittelua, sillä se ei ollut tutkimuksen kannalta tarpeellista.

Tutkielman aikana haastateltiin Easy LEDin edustajaa, jonka mukaan katuvalaisimien varustelemisen vakiovalovirtaohjauksella ei tuo asiakkaalle yleensä lisäkustannuksia. Tällöin voidaan yleisesti todeta katuvalaisimien räätälöinnin vakiovalovirtaohjauksella olevan taloudellisesti ja energiatehokkuuden kannalta järkevää. Valaistuksen ylivoimittaminen aiheuttaa myös turhaa häiriövaloa, jonka minimoimiseen vakiovalovirta on järkevä vaihtoehto.

Työn käsittelemän aiheen lisäksi ulkovalaistuksen kustannus- ja energiatehokkuuteen vaikuttaa myös moni muu asia, mutta pelkästään vakiovalovirtaohjauksen käyttämisellä voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä.

Suunnitelmassa käytetyissä kaavoissa ja laskennoissa on paljon muuttujia, joihin vaikuttavat ulkoiset tekijät. Sähkön hinta vaihtelee paljon, joten valaisinten käyttökustannuksia tulevaisuudessa ei voida tarkasti arvioida. Käytettäessä astronomista kelloa valaisinten ohjaukseen on vuodenajalla suuri merkitys valaisinten energiankulutukseen ja käyttökustannuksiin. Tutkimuksen lopputuloksena

ilmenneet vakiovalovirtaohjauksen hyödyt korostuvat kuluttajalle silloin, kun sähkö on kallista ja valaisimet ovat päällä suuren osan vuorokaudesta.

Lähteet

- 1 Light Emitting Diode. 2018. Verkkoaineisto. Circuit Globe. <<https://circuitglobe.com/light-emitting-diode-led.html>>. Luettu 12.09.2022.
- 2 What is Light Emitting Diode: Working & Its Applications. Verkkoaineisto. Elprocus. <<https://www.elprocus.com/light-emitting-diode-led-working-application/>>. Luettu 12.09.2022.
- 3 Pro Flow-tuotepereheen tietolehti. Verkkoaineisto. Easy LED Oy. <<https://easyled.fi/en/products/luminaires/pro-flow/>>. Luettu 12.09.2022.
- 4 A Short History of LED Lighting. 2021. Verkkoaineisto. FM Lighting & Electrical. <<https://fluorescentmanlighting.com/blog/A+Short+History+of+LED+Lighting/260>>. Luettu 12.09.2022.
- 5 When LED Lights Were Invented? A Brief History of LED Lighting. 2020. Verkkoaineisto. <<https://ledlightinginfo.com/led-lights-history>>. Luettu 12.09.2022.
- 6 Millenium-palkinto luovutettiin. 2006. Verkkoaineisto. Yleisradio. <<https://yle.fi/a/3-5751090>>. Luettu 19.09.2022
- 7 Kelly-Detwiler, Peter. LEDs Will Get Even More Efficient: Cree Passes 300 Lumens Per Watt. 2014. Verkkoaineisto. Forbes. <<https://www.forbes.com/sites/peterdetwiler/2014/03/27/leds-will-get-even-more-efficient-cree-passes-300-lumens-per-watt/?sh=11384b702611>>. Luettu 12.09.2022.
- 8 Good for planet and purse: Signify introduces Philips LED's first most energy-efficient A-class bulbs. 2021. Verkkoaineisto. Philips. <<https://www.signify.com/en-gb/our-company/news/press-releases/2021/20210830-signify-introduces-philips-leds-first-most-energy-efficient-a-class-bulbs>>. Luettu 13.09.2022.

- 9 New energy labels in 2021: These are changes for lighting. 2021. Verkkoaineisto. Lucide. <<https://www.lucide.com/en/blogs/new-energy-labels-in-2021-these-are-the-changes-for-lighting/>>. Luettu 15.09.2022.
- 10 Lighting Comparison: LED vs Incandescent Lighting. 2016. Verkkoaineisto. Stouch Lighting. <<https://www.stouchlighting.com/blog/light-comparison-led-lighting-vs-incandescent-lighting>>. Luettu 22.09.2022.
- 11 Scully Taylor. Understanding LED Drivers and How To Choose the Right One. 2020. Verkkoaineisto. LEDSupply. <<https://www.ledsupply.com/blog/understanding-led-drivers/>>. Luettu 22.09.2022.
- 12 Scully Taylor. What Type of LED Driver Do I Need? Constant Current vs. Constant Voltage. 2020. Verkkoaineisto. LEDSupply. <<https://www.ledsupply.com/blog/constant-current-led-drivers-vs-constant-voltage-led-drivers/>>. Luettu 22.09.2022.
- 13 Sheikh Farhan. LED Driver Circuit Working And Applications. 2017. Verkkoaineisto. EEEProject. <<https://eeeproject.com/led-driver-circuit/>>. Luettu 29.09.2022.
- 14 Led-valaisimien elinikä. Verkkoaineisto. Fagerhult Oy. <<https://www.fagerhult.com/fi/osaamiskeskus/LED/Led-valaisimien-elinika/>>. Luettu 29.09.2022.
- 15 SIRIUS FLOOD-tuoteperheen tietolehti. Verkkoaineisto. GREENLED Oy. <<https://greenled.fi/led-valaisimet/tuote/sirius-flood-gen2/>>. Luettu 11.10.2022.
- 16 CLO ja L100 – ympäristöystävällinen ja taloudellinen valinta. Verkkoaineisto. Fagerhult Oy. <<https://www.fagerhult.com/fi/osaamiskeskus/LED/clo-ja-l100/>>. Luettu 11.10.2022.

- 17 Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu. 2015. Liikennevirasto. Luettu 20.10.2022.
- 18 Espoon kaupungin ulkovalaistuksen suunnitteluohje. 2020. Espoon kaupunki.
- 19 What is PWM Dimming For LED Driver. 2021. Verkkoaineisto. uPowerTek. <<https://www.upowertek.com/what-is-pwm-dimming/>>. Luettu 20.10.2022.
- 20 Dimming LEDs – The Difference Between Leading And Trailing Edge. Verkkoaineisto. General Lamps. <<https://www.lamps-on-line.com/leading-trailing-edge-led-dimmers>>. Luettu 26.10.2022.
- 21 Himmennys Triac-säätimellä. Verkkoaineisto. Valokas. <<https://valokas.fi/triac/>>. Luettu 26.10.2022.
- 22 Here's What Really Matters in 0-10V Dimming. 2021. Verkkoaineisto. Lumos Controls. <<https://shop.lumoscontrols.com/blogs/lumos/0-10-v>>. Luettu 26.10.2022.
- 23 Mikä himmennin sopii ledeille. Verkkoaineisto. Winled Oy. <<https://www.winled.fi/blogi/artikkeli/Mik%C3%A4-himmennin-sopii-ledeille>>. Luettu 26.10.2022.
- 24 How Does DMX Work? Verkkoaineisto. Lightwave. <<https://www.lightwaveuk.com/led-technology/how-does-dmx-work/>>. Luettu 01.11.2022.
- 25 Technical application guide OPTOTRONIC® constant-voltage LED drivers and controls. Verkkoaineisto. Osram. <<https://www.osram.com/ds/app-guides/index.jsp>>. Luettu 01.11.2022.

- 26 Constant Light Output (CLO). 2022. Verkkoaineisto. Eagle Lighting. <<https://eaglelighting.com.au/insights/constant-light-output-clo>>. Luettu 01.11.2022.
- 27 Valoa ihmisille. Verkkoaineisto. Fagerhult Oy. <<https://www.fagerhult.com/fi/Tunable-white/Henkilokohtaista-valoa/Ljus-for-manniskan/>>. Luettu 01.11.2022.
- 28 Colour temperature. Verkkoaineisto. Lighting Design Studio. <<https://lightingdesignstudio.co.uk/colour-temperature/>>. Luettu 01.11.2022.
- 29 EPISTAR 2835-ledinauhan tuotekortti. Verkkoaineisto. KGP Electronics. <<https://www.kgp-electronics.de/en/products/flexible-led-strips/tunable-white/ip65/epistar-2835-tunable-white-19-2w-ip65>>. Luettu 09.11.2022.
- 30 BEGA BugSaver. Verkkoaineisto. BEGA. <<https://www.bega.com/en/knowledge/lighting-theory/responsible-outdoor-lighting/bega-bugsaver/#navbar>>. Luettu 09.11.2022.
- 31 Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen suunnitteluohje. 2022. Helsingin kaupunki.
- 32 European standard EN 12464-2:2014 "Light and lighting. Lighting of workplaces. Part 2: Outdoor work places". 2014.
- 33 European standard EN 12193 "Light and lighting. Sports lighting". 2018.
- 34 European standard EN 13201-3:2015 Road lighting. Calculation of performance. 2015.
- 35 Sähkön hinta jatkaa lokakuun jälkeen nousussa kohti talvea. 2022. Verkkoaineisto. Sijoittaja.fi. <<https://www.sijoittaja.fi/348608/sahkon-hinta-jatkaa-nousussa-porssisahkosopimus-on-nyt-riski/>>. Luettu 15.11.2022.

- 36 Verkkopalveluhinnasto. 2021. Verkkodokumentti. Caruna Espoo Oy.
<https://caruna.fi/sites/default/files/docs/verkkopalveluhinnasto_caruna_espoo_oy_1.11.2021.pdf>. Luettu 15.11.2022.
- 37 Nevalainen, Miikka. 2018. Ulkovalaistuksen ohjausjärjestelmän teknisten ja toiminnallisten vaatimusten kehittäminen. Insinööri työ. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.