



Rami Hussain

DC-jakeluverkon hyödyntäminen tievaloverkossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Älykäs teollisuus

Insinöörityö

29.4.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Rami Hussain
Otsikko: DC-jakeluverkon hyödyntäminen tievaloverkossa
Sivumäärä: 112 sivua + 1 liite
Aika: 29.4.2022

Tutkinto: Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma: Älykäs teollisuus
Ohjaajat: Yliopettaja Jarno Varteva
Lehtori Osmo Massinen

LED-valaisimien kehitysvauhti on ollut viime vuosina kunnioitusta herättävää. Tämän opinnäytetyön ensimmäisessä osassa tutkitaan LED-teknologiaa ja etsiä syitä, miksi LED-valaisimet ovat pystyneet syrjäyttämään perinteisiä valonlähteitä niin katu kuin tievalaistuksessa. Tutkimuksessa vertaillaan LED-valaisimen ominaisuuksia perinteisten valonlähteiden ominaisuuksiin ja nostetaan esille todellisia syitä perinteisten valonlähteiden syrjäyttämiseksi.

Opinnäytetyön toisessa osassa tutkitaan pienjännittdirektiivin tasasähköjakelun hyödyntämistä tievalaistusverkossa ja minkälaisia kustannussäästöjä tasasähköjakelun edut ja mahdollisuudet tuovat valaistusverkkoon. Järjestelmien kustannukset sovelletaan kahden elinkaarimallin avulla Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus) ja Kuusamon kaupungin tilaamaan valaistussuunnitelmaan ”Valtatie 5, maantie 18865 jalankulku- ja pyöräilyväylien valaistuksen rakentaminen välillä Kitkantie-Nissivaarantie”. Ensimmäisessä elinkaarimalli laskennassa sovelletaan 400 V_{AC} vaihtosähköjärjestelmän kustannusrakennetta ja toisessa elinkaarimallissa sovelletaan 750 V_{DC} tasasähköjärjestelmän kustannusrakennetta.

Tasasähköjärjestelmässä voidaan käyttää pääosin samoja laitteita ja komponentteja kuin vaihtosähköjärjestelmässä, joten järjestelmien hinnat pysyvät samansuuruisina. Laitteita ja komponentteja valittaessa tasasähköjärjestelmän käyttöön on oltava erityisen tarkka, sillä kaikki laitteet ja komponentit eivät siedä korkeita jännitetasoja.

Opinnäytetyön tulosten perusteella tasasähköjärjestelmän käyttö tievalaistuksessa on kannattavaa. Tasasähköjärjestelmän korkean jännitetaso ansiosta päästään pitempiin valaistusryhmiin pienellä kaapelin poikkipinta-alalla, jossa ryhmän jännitteenalenema ja oikosulkuvirta pysyvät sallituissa arvoissa. Tutkimuksen perusteella tasasähköjärjestelmän valaistusryhmän pituutta rajoittaa jännitteenalenema valaistusryhmän viimeisellä pylväällä. Vaihtosähköjärjestelmän valaistusryhmän pituutta puolestaan rajoittaa oikosulkuvirta ryhmän viimeisellä pylväällä.

Tutkimusaineisto koostuu pääosin aikaisemmista tutkimuksista ja käytön kokemuksesta. Järjestelmien investointikustannuksien yksikköhinnat ovat peräsin infra- ja talorakentamisen kustannushallinnan ohjelmistosta (Fore).

Avainsanat: LED, tievalaistus, AC-järjestelmä, DC-järjestelmä, elinkaarikustannukset.

Abstract

Author: Rami Hussain
Title: Energy efficient road lighting
Number of Pages: 112 pages + 1 appendix
Date: 29 April 2022

Degree: Master of Engineering
Degree Programme: Intelligent Industrial Solutions
Supervisors: Jarno Varteva, Principal Lecturer
Osmo Massinen, Senior Lecturer

The pace of development of LED luminaires has been awe-inspiring in recent years. The first part of this thesis explores LED technology and looks for reasons why LED luminaires have been able to displace traditional light sources in both street and road lighting. The study compares the characteristics of an LED luminaire with those of traditional light sources and highlights the real reasons for the exclusion of traditional light sources.

The second part of the thesis examines the utilization of the low-voltage directive's direct current distribution in the road lighting network and what kind of cost savings the advantages and possibilities of direct current distribution bring to the lighting network. The costs of the systems are applied to the lighting plan "Construction of the lighting of pedestrian and cycle paths between Kitkan road and Nissivaaran road" ordered by the Northern Ostrobothnia Center for Economic Development, Transport and the Environment (ELY Center) and the City of Kuusamo using two life cycle models. In the first life cycle model calculation, the cost structure of the 400 VAC AC system is applied and in the second life cycle model, the cost structure of the 750 VDC DC system is applied.

The DC system can use essentially the same equipment and components as the AC system, so the prices of the systems remain the same. When choosing equipment and components, the use of a DC system must be particularly careful, as not all equipment and components can withstand high voltage levels. Based on the results of the thesis, the use of a direct current system in road lighting is profitable. Thanks to the high voltage level of the DC system, longer lighting groups can be achieved in a small cross-sectional area of the cable, where the voltage drops and short-circuit current of the group remain within the permissible values. Based on the study, the length of the lighting group in the DC system is limited by the voltage drop on the last column of the lighting group. The length of the lighting group in the AC system, in turn, is limited by the short-circuit current at the last column of the group. The research material mainly consists of previous research and experience of use. The unit prices for the investment costs of the systems are derived from infrastructure and building cost management software (Fore).

Keywords: LED, road lighting, AC system, DD system, life cycle costing.

Sisällys

Lyhenteet

1	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen taustaa	2
1.2	Tutkimuskysymykset ja tavoitteet	3
1.3	Tutkimusmenetelmät ja rajoitukset	4
1.4	Tutkimuksen rakenne	4
2	TIEVALAISTUS	6
2.1	Valaistuksen perussuureet	7
2.2	Valaistusluokat	8
2.2.1	M-Luokka	10
2.2.2	C-Luokka	11
2.2.3	P-Luokka	12
2.3	Väriämpötila ja värinsoistokyky	12
2.4	Häikäisy	13
2.5	Häiriövalo ja valosaaste	14
3	VALONLÄHTEET	16
3.1	Suurpainenatriumlamppu	16
3.2	Pienpainenatriumlamppu	16
3.3	Elohopeahöyrylamppu	17
3.4	Monimetallilamppu	17
3.5	LED	18
3.5.1	Toimintaperiaate	19
3.5.2	Rakenne	20
3.5.3	Valotehokkuus ja valontuotto	22
3.5.4	Elinikä	23
3.5.5	Aallonpituus	25
3.5.6	CRI	27
3.5.7	Väriämpö	28
3.5.8	Ympäristöystävällisyys ja energiatehokkuus	29
3.6	Valonlähteiden vertailu	30
4	TIEVALAISTUSVERKON RAKENNE	34

4.1	LED-valaisimen rakennevaatimukset	35
4.2	Kaapelointi ja asennus	35
4.3	Pylväät	36
4.3.1	Pylväskalusteet	38
4.4	Jalustat	39
4.5	Keskukset	39
5	TASASÄHKÖJAKELU TIEVALAISTUSVERKOSSA	40
5.1	Tasasähköverkon rakenne	41
5.2	Järjestelmän kaapelointi	43
5.3	Tasa- ja verkonvaihtosuuntaajat	49
5.3.1	Tasasuuntaajat	50
5.3.2	Verkonvaihtosuuntaajat	53
5.4	Tasasähköjärjestelmän suojaus	55
5.4.1	Järjestelmän maadoitus	55
5.4.2	Järjestelmän ylijännitesuojaus	60
5.4.3	Järjestelmän oikosulkusuojaus	61
5.5	Liitälaitteet	62
5.6	Yhteenveto	62
6	VERKKOJEN SUOJAUS JA TALOUDELLISET VERTAILUT	64
6.1	LED-valaisimen liitälaitteen vaikutus energiatehokkuuteen	65
6.2	Jännitehäviö, oikosulkuvirta ja kosketusjännitesuojaus	66
6.2.1	Jännitehäviö	67
6.2.2	Oikosulkuvirta	71
6.2.3	Kosketusjännite	72
6.2.4	Syöttökaapelin mitoitus automaattisella poiskytkennällä	73
6.3	Ylikuormitussuoja	74
6.4	Järjestelmän maadoitus	75
7	ELINKAARIKUSTANNUKSIEN MUODOSTAMINEN	76
7.1	Tievalaistus	76
7.2	Elinkaarikustannusten muodostuminen	77
7.2.1	Investointikustannukset	78
7.2.2	Sähkökustannukset	79
7.2.3	Häviökustannukset	81
7.2.4	Kunnossapitokustannukset	84

7.2.5	Hoitokustannuksien koonti ja nykyarvo	85
7.2.6	Elinkaarikustannusten koonti ja nykyarvo	87
7.3	Elinkaarikustannukset tievalaistuksessa (AC-järjestelmä)	89
7.3.1	Investointikustannukset	92
7.3.2	Sähkökustannukset	92
7.3.3	Kunnossapitokustannukset	93
7.3.4	Hoitokustannusten koonti ja nykyarvo	94
7.3.5	Elinkaarikustannusten koonti	96
7.4	Elinkaarikustannukset tievalaistuksessa (DC-järjestelmä)	97
7.4.1	Investointikustannukset	99
7.4.2	Sähkökustannukset	100
7.4.3	Kunnossapitokustannukset	101
7.4.4	Hoitokustannusten koonti ja nykyarvo	101
7.4.5	Elinkaarikustannuksien koonti	102
7.5	AC- ja DC-järjestelmän vertailu	104
8	YHTEENVETO	105
	Lähteet	109
	Liitteet	
	Liite 1: Valaistusverkon investointikustannuksia	

Lyhenteet

KeyLight:	<i>Väyläviraston ja kaupunkien käyttämä tievalaistuksen omaisuudenhallintajärjestelmää.</i>
LED	<i>Light Emitting Diode, valoa säteilevä diodi</i>
EU	<i>Euroopan unioni</i>
EY	<i>Euroopan yhteisö</i>
Hz	<i>Hertsi</i>
LVD	<i>Low Voltage Directive, pienjännitedirektiivi</i>
AC	<i>Vaihtosähköjärjestelmä</i>
DC	<i>Tasasähköjärjestelmä</i>
ELY	<i>Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus)</i>
φ	Valovirta [lm]
L_m	Keskimääräinen luminanssi [cd/m ²]
U_o	Luminanssin yleistasaisuus
U_L	Luminanssin pitkittäistasaisuus
f_{TI}	Häikäisy [%]
E	Valaistusvoimakkuus [lx]
CLO	<i>Constant Light Output, jatkuva valoteho [%]</i>

f_m	<i>Alenemakerroin</i>
R_a	<i>Värintoisto [0–100]</i>
LOR	<i>Light Output Ratio, valotehokkuuden hyötysuhde</i>
CRI	<i>Colour rendering index, värintoistoindeksi</i>
IK	<i>Ilkivaltaluokitus [0–10]</i>
HE	<i>Energiaa vaimentava valaisinpylväs</i>
NE	<i>Väistyvä valaisinpylväs</i>
KVL	<i>Vuorokausiliikenne [ajoneuvo/vuorokausi]</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current, Suurjännitetasavirta</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor, eristyshilainen bipolaaritransistori</i>
PWM	<i>Pulssinleveysmodulaatio</i>
Ω	<i>Ohmi [V/A]</i>
P	<i>Teho [W]</i>
U	<i>Pääjännite [V]</i>
I	<i>Virta [A]</i>
r	<i>Johtimen ominaisresistanssi [Ω/m]</i>
x	<i>Johtimen ominaisreaktanssi [Ω/m]</i>
Z	<i>Kaapelin impedanssi</i>

1 JOHDANTO

Vastuullisuus, huoli ilmastomuutoksesta ja kiristyneet vaatimukset kasvihuonepäästöjen hillitsemisen johdosta, vuonna 2021 astui voimaan eurooppalainen ilmastolaki Fit for 55. Lakipaketin tarkoitus on sitouttaa Euroopan jäsenmaat ilmastomuutoksen hillitsemiseen ja siihen sopeutumiseen. Ilmastolain tavoitteena on vähentää kasvihuonepäästöjä 55 prosentilla vuoteen 2030 mennessä [1].

Led-valaisimet ja valonlähteet ovat viime vuosina vakiinnuttaneet asemansa niin katu kuin tievalaistuksessa. Euroopan komission antamat hiilidioksidipäästöjen ja energiasäästöavoitteita koskevat direktiivit (EY) N:o 245/2009 ja (EU) 347/2010 asettivat tiukat määräykset ulkovalaistuksen kehittymiselle. Direktiivien avulla mm. elohopeahöyrylampujen valmistus ja myynti kiellettiin vuonna 2015 [2]. Tiukentuneet määräykset ovat johtaneet LED-tekniikan kehittymiseen ja yleistymiseen.

Direktiiveillä on suuri merkitys Suomen tievalaistukseen, sillä suurin osa Suomen tievalaistuksesta on toteutettu suurpainenatrium- ja elohopeahöyrylampuilla. Suomen heikko taloustilanne on hidastanut kaupunkien ja kuntien tievalaistuksen saneerausta.

Valtion maanteitä on yhteensä 80 857 km, joista valaistuna on noin 14 142 kilometriä. Näihin lukuihin perustuen valtion maanteistä on valaistu noin 17,5 prosenttia. Luvut sisältävät valaistukohteet, joiden omistajia ovat kunnat tai valtio [2]. Maanteillä on tällä hetkellä 233 442 kappaletta erilaisia valaisimia, joista 30 047 kappaletta on LED-valaisimia tai LED-valonheittäjiä. LED-valaisimien osuus maanteiden kokonaisvalaistuksesta on vajaat 13 prosenttia [3,4].

Suomen valaistusverkkoja on rakennettu jo vuosikymmeniä käyttäen vaihtovirtaverkkoa. Virtaa kulkee 4- tai 5-johdimellista maakaapelia tai ilmajohtoa pitkin valaisinpylväille. Ongelmia esiintyy pitkissä valaistusryhmissä, joissa kaapelin jännitehäviön kasvu ja oikosulkuvirran pienentyminen rajoittavat

valaistusryhmien pituutta. Pisin mahdollinen valaistusryhmä tievalaistuskeskuk-
sen ja valaistusryhmän viimeisen valaisinpisteen välillä on monesta seikasta
kiinni. Valaistusryhmän keskuksen oikosulkuvirta, valaistusryhmässä käytetyn
kaapelin tyyppi ja poikkipinta-ala sekä ryhmän kokonaisteho vaikuttavat muun
muassa valaistusryhmän pituuteen. Ongelmaan on hieman saatu helpotusta
LED-valaisimien tulon myötä, sillä LED-tekniikan parantuessa, valaisimien tehot
ovat pudonneet viidennekseen [6].

Suomen valtakunnan sähköverkossa oleva vaihtojännite on sinimuotoista ja sen
taajuus on 50Hz, eli vaihtovirta vaihtaa suuntansa 100 kertaa sekunnissa. Tasa-
virta tarkoittaa sähkövirtaa, jonka suunta ei muutu eli virta kulkee virtapiirissä
samansuuntaisesti koko matkan ajan. Tasajännitteellä on mahdollista käyttää
korkeampaa jännitetasoa kuin vaihtojännitteellä. Korkeampi jännitetaso vähen-
tää valaistusryhmien jännitehäviötä ja lisää oikosulkuvirtoja, jotka puolestaan
mahdollistavat pitkien valaistusryhmien toteuttamista [5,6].

1.1 Tutkimuksen taustaa

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/35/EU, low voltage directive
(LVD) sallii tasasähköllä käytettäväksi nimellisjännitealueeksi 75–1500 V (DC),
vastaava nimellisjännitealue vaihtosähköllä on ainoastaan 50–1000 V (AC).
LVD-direktiiviä soveltamalla tievalaistusverkossa, on mahdollistaa pidentää va-
laistusryhmien pituuksia moninkertaisesti nykyisiin verrattuna. Kun tievalaistuk-
seen käytetään tasasähköjakelua, tievalaistuskeskukset on varustettava tasa-
suuntaajilla, joiden tehtävä on muuttaa jakeluverkosta saatava vaihtojännite ta-
sajännitteeksi. Valaisimien erilaiset liitäntälaitteet muuttavat puolestaan jännite-
tasoa valaisimelle sopivaan tasoon [5].

Tasasähkön käyttö tievalaistuksessa mahdollistaa pitempien valaistusryhmien
toteuttamisen, mikä mahdollistaa suoraan tievalaistuskeskuksien määrän vä-
hentämisen. Lisäksi tasasähkön käyttö vähentää jännitekatkoja, parantaa säh-
kön laatua sekä antaa mahdollisuuksia älykkääseen sähköverkkohallintaan, ku-
ten tievalaistuksen energian optimointiin erilaisten ohjauksien avulla [5].

Tämän opinnäytetyön elinkaarimallit ovat sovellettu valtatie 5, maantie 18865 jalankulku- ja pyöräilyväylä välillä Kitkantie-Nissivaarantie valaistussuunnitelmaan. Valaistussuunnitelman tilaajana toimi Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY). Maantien valaistuksen rakennussuunnitelman on laatinut Sitowise Oy. Rakennussuunnitelmassa parannettiin jalankulku- ja pyöräilyväylän valaistusta. Rakennussuunnitelma laadittiin vuonna 2020.

Sitowise – The Smart City Company on pohjoismainen rakennetun ympäristön asiantuntija- ja digitalo. Sitowise tarjoaa suunnittelu- ja konsultointipalveluja kaiken kokoisiin hankkeisiin vastuullisemman ja älykkäämmän kaupunkikehityksen ja sujuvamman liikkumisen mahdollistamiseksi [12].

1.2 Tutkimuskysymykset ja tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on perehtyä valaistustekniikan olennaisiin termistöihin, valaistussuunnittelussa huomioon otaviin seikkoihin ja tasasähköjakeluun tievalaistusverkossa.

Nykyinen tievalaistusverkko on rakennettu pääosin vaihtovirtajakelua käyttäen. Tämän tutkimuksen tavoitteena on kertoa tasasähköjakeluverkon mahdollisesta käytöstä tievalaistusverkossa. Tutkitaan syyt vaihtovirtajakelun käyttöön tievalaistuksessa ja löytääkö tulevaisuudessa tasavirtajakelu paikkaansa tievalaistuksen sähköjakelussa. Tutkitaan tasavirran- ja vaihtovirran edut ja haitat sähkön tuotannossa ja siirrossa. Perehdytään tievalaistuksen historiassa käytössä oleviin valonlähderatkaisuihin ja tievalaistusverkon olennaisiin rakenteisiin.

Tarkastellaan tasasähkö- ja vaihtosähköjakelun käyttöä tievalaistuksessa säästöjen ja kustannuksien näkökulmasta elinkaarimallien avulla. Laaditaan kaksi erillistä elinkaarimallia esimerkkikohteeseen. Ensimmäisessä elinkaarimallissa lasketaan tievalaistuksen elinkaarikustannukset käyttäen vaihtovirtajakelua ja toisessa elinkaarimallissa tasavirtajakelua käyttäen. Elinkaarimallien tuloksien avulla nähdään, kumpi jakeluverkko on kustannustehokkaampi investointikustannuksien ja ylläpitokustannuksien osalta.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Tutkimuksessa sovelletaan laadullisia- ja määrällisiä tutkimusmenetelmiä. Tutkimuksen laadinnassa tullaan hyödyntämään alan uusinta julkaistua kirjallisuutta, tieteellisiä artikkeleita ja aikaisempia tutkimuksia. Aineiston keruussa hyödynnetään Metropolian Finna-tietokantaa, Metropolian kirjastoa, haastattelemalla alan asiantuntijoita, ammattikorkeakoulujen opinnäytetöiden tietokantaa ja yliopistojen avointa julkaisuarkistoa.

Tutkimusta rajataan tasasähköjakelele mahdollinen käyttö tievalaistusverkossa. Tarkastellaan tasasähköjakelele vaikutusta tievalaistuksen elinkaarikustannuksiin, investointikustannuksiin ja ylläpitokustannuksiin. Tasasähköjakelele ja vaihtosähköjakelele vaikutukset tievalaistuksen elinkaarikustannuksiin tarkastellaan kahden elinkaarimallin avulla.

Tutkimuksessa ei tulla käsittelemään älyvalaistusta eikä siihen kuuluvia komponentteja. Työssä ei myöskään käsitellä valaistuksen ohjausratkaisuja, tiedonsiirtoa, automaatiota eikä aurinkovoiman / tuulivoiman mahdollista hyödyntämistä tievalaistusverkossa.

1.4 Tutkimuksen rakenne

Luvussa kaksi perehdytään Suomen tievalaistukseen ja siihen määriteltyihin suosituksiin ja vaatimuksiin. Lisäksi perehdytään valaistustekniikan peruskäsitteisiin ja tievalaistuksen suunnittelussa huomioon otaviin seikkoihin, kuten valaistusluokkiin, valaisimen värilämpötilaan ja värinvalaistokykyyn, häikäisyyn, häiriövaeroon ja valosaasteeseen.

Kolmannessa luvussa tutustutaan tievalaistuksessa erilaisiin käytössä oleviin valaistusratkaisuihin ja vertaillaan valolähteiden energiatehokkuutta keskenään.

Neljännessä luvussa perehdytään tievalaistusverkon olennaisiin rakenteisiin sähköliittymästä aina valaisimeen asti.

Viidennessä luvussa perehdytään tasasähköjakelun käyttöön tievalaistusverkossa. Minkälaiset vaikutukset tasasähkö tuo erilaisten komponenttien toimintaan ja millä tavalla saadaan verkko suojamaadoitettua. Tutustutaan vaihto- ja tasasuuntaajan toimintaperiaatteeseen.

Kuudennessa luvussa perehdytetään valaistusverkon suojauksen olennaisiin mitoituksiin kuten ylikuormitussuojaukseen, oikosulkuvirta- ja kosketusjännitesuojaukseen, jännitteen alenemaan ja järjestelmän maadoitukseen.

Seitsemännessä luvussa perehdytään tievalaistuksen elinkaarikustannuslaskentaan. Lisäksi tarkastellaan elinkaarikustannuksia kahden elinkaarimallin avulla. Ensimmäisessä elinkaarimallissa hyödynnetään vaihtosähköjakelua ja toisessa mallissa tasasähköjakelun vaikutusta elinkaarikustannuksiin.

Kahdeksannessa luvussa kootaan lasketut elinkaarimallien tulokset, analysoidaan saadut tulokset, esitetään johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet.

2 TIEVALAISTUS

Tievalaistusomaisuuden ja toimenpiteiden hallintajärjestelmän (KeyLight) mukaan Suomessa on 234 700 kappaletta tievalaisinta tai valonheitintä, joista vuonna 2022 oli noin 13,2 % ledivalaisimia, noin 80,6 % suurpainenatriumlamppuvalaisimia ja noin 0,2 % monimetallilamppuvalaisimia sekä muita valaisimia noin 6 %. KeyLight on Keypron ylläpitämä omaisuudenhallintajärjestelmää.

Suomen kanta- ja valtateiden valaistuksen omistaa aina Väylävirasto, joka vastaa myös niiden valaistuksen kunnossapidosta. Väyläviraston vastuulla ja omistuksissa voi olla myös yhdys- ja seututeitä, jos tievalaistus koetaan tarpeelliseksi liikenneturvallisuuden kannalta. Muilla tieosuuksilla tievalaistuksen omistaa kaupunki tai kunta. Valtion omistukseen kuuluu suurin osa nykyisistä tievalaistuksista, jotka täyttävät Väyläviraston vaatimukset. Uusissa tievalaistuksen yhteishankkeissa kunta voi halutessaan tehdä omistusoikeuden siirtoa koskevan sopimuksen, jossa määritellään noudatettavat ohjeet, asian valmisteluvas- tuut, valaistuslaitteiden- ja kalusteiden kuntoonpanot, vastuut erikoisvalaistuk- sien lisäkustannuksista, yhteiskäyttösopimusten käsittely, tarvittavat suorite- määrät sekä kustannukset ja niiden jako sekä aikataulut [4].

Tievalaistuksella on suuri merkitys liikenneturvallisuuden ja viihtyvyyden kan- nalta, sillä tutkitusti 32 % kaikista tieliikenneonnettomuuksista tapahtuu pimeinä aikoina. Pimeällä onnettomuusaste kasvaa 2...4-kertaiseksi verrattuna valoi- saan aikaan. Pimeän ajan yleisempiä onnettomuuksia ovat eläin- ja jalankulkija- onnettomuudet, törmäys pysähtyneeseen tai pysäköityyn ajoneuvoon ja tör- mäys kiinteään esteeseen ajoradalla tai sen ulkopuolella. Tutkimuksien mukaan tievalaistus vähentää pimeän ajan onnettomuuksia 20–30 %:lla [5].

Liikenneturvallisuuden lisäksi tievalaistuksen toteuttamisessa on monia muita näkökohtia, jotka tulisi ottaa huomioon, kuten valaistuksen teknilliset ja toimin- nalliset ominaisuudet, tievalaistuksen vaikutusta viihtyisyyteen ja turvallisuus- teen. Valolla on kolme päätehtävää, jotka ovat: toimintojen valaiseminen eli

näkyvyys, ympäristön ja tilan muodostaminen eli hahmottaminen ja turvallisuuden tunteen ja tunnelman synnyttäminen eli käytännössä ilmapiiri [5].

Tievalaistuksen on oltava tasoltaan laadukasta täyttääkseen valaistukselle määrättyt laatuvaatimukset. Vaatimukset perustuvat fotooppiseen fotometriaan. Valaistusteknilliset vaatimukset ovat esitetty standardissa SFS-EN 13201-2. Tievalaistuksen on oltava riittävän hyvä, jotta tienkäyttäjä havaitsee tiellä ja sen läheisyydessä olevan esteen, saa oikean käsityksen hänen paikastaan ja liikkumisestaan tiellä sekä muiden tienkäyttäjien huomioiminen. Tienkäyttäjän on pystyttävä hahmottamaan tien muodot ja sen jatkuvuus. Autoilijan kyky nähdä pyöräilijät ja jalankulkijat ovat huomioitu kevyen liikenteen väylien valaistusvaatimuksissa. Erilaisissa tieosuuksissa liikenneolosuhteiden hahmottaminen vaihtelee. Näin ollen valaistuksen voimakkuutta on muutettava. Eritasoisilla tieosuuksilla tulee käyttää niille määritellyjä valaistusluokkia [5].

2.1 Valaistuksen perussuureet

Valaistuksen keskeisempiä valaistusteknillisiä suureita ovat luminanssi, häikäisy ja valaistusvoimakkuus [6].

Valovirta (φ) on suure, joka ilmoittaa valonlähteen tuottaman kokonaisvalomäärän. Valovirran mittayksikkö on lumen (lm).

Keskimääräisellä luminanssilla (L_m) ilmoitetaan tiepinnan valoisuus ja yksikkönä käytetään kandela per neliometri (cd/m^2). Kandela on SI-järjestelmän valovoiman mittayksikkö, joka mittaa valonlähteestä tulevan valon säteilyn määrän tiettyyn suuntaan. Keskimääräisen luminanssin mittaamiseksi on jokaisen kaistan valoisuus mitattava. Reagointiajan lyhentäminen, näköetäisyyden ja havaitsemisen parantaminen tapahtuu nostamalla keskimääräistä luminanssiarvoa.

Näkömukavuuteen ja suorituskykyyn vaikuttaa lisäksi luminanssin yleistaisuus (U_o) ja pitkittäistasaisuus (U_L). Yleistaisuus lasketaan jakamalla ajoradan pienemmän luminanssin arvo keskimääräisen luminanssin arvolla.

Tienpinnan olosuhteet vaikuttavat luminanssin yleistasaisuuteen. Luminanssin pitkittäistasaisuus lasketaan jokaisen kaistan keskellä sijoitetun havaitsemispisteen kautta pitkittäissuuntaisella suoralla jakamalla pienemmän mitatun luminanssin arvo suuremmalla luminanssin arvolla [6].

Häikäisy (f_{TI}) aiheuttaa epämukavuuden tunnetta ja heikentää havaitsemiskykyä ja siksi uusille valonlähteille häikäisyarvo on mitattava. Häikäisy mitataan silmän havaitseman ja erilaisuuden muuttumisena (%). Jokaisen tiekaistan suurin häikäisyarvo on mitattava [6].

Valaistusvoimakkuus (E) kertoo tienpinnalle tulevan valovirran määrän ja tiheyden. Valaistusvoimakkuuden mittayksikkönä käytetään luksia (lx). Valaistusvoimakkuus voidaan todeta monella eri tavalla, kuten esimerkiksi vaakataso- ja pystytason valaistusvoimakkuudella. Puolipallo- ja puolisynterivalaistusvoimakkuus ja valaisimen yläpuolisen alueen hyötysuhde. Valaistusvoimakkuuden yleistasaisuus lasketaan jakamalla alueen pienin (E_{min}) valaistusvoimakkuus keskimääräisellä (E_m) valaistusvoimakkuudella [6].

2.2 Valaistusluokat

Suomen tievalaistukselle on määritelty erilaisia valaistusluokkia, joiden avulla pyritään parantamaan liikenneturvallisuutta ja auttamaan tienkäyttäjää hahmottamaan tieympäristöä paremmin. Valaistus on oikeanlainen, kun valaistusteknilliset arvot täyttyvät sekä havaitsemisen ja näkemiseen vaaditut arvot ovat keskenään oikeassa suhteessa. Tievalaistuksen tarpeellisuuden arviointi ja tien valaistusluokan määrittämisessä käytetään Liikenneviraston julkaisussa annettuja ohjeita ja taulukoita. Valaistusluokat ovat jaettu M-, C- ja P-luokkiin. Valaistusluokat on määritelty valaistusteknillisten arvojen perusteella [6].

Alenemakerroin tulee aina ottaa huomioon tievalaistuksen suunnittelussa ja valaistusteknillisissä laskennoissa. Alenemakertoimen tehtävä on varmistaa, että valaistukselle annetut valaistusteknilliset arvot pysyvät vaaditulla tasolla koko valaisimien elinkaaren aikana. LED-valonlähteiden alenemakeroin on 0,90, jos

valaisin on varustettu vakiovalovirralla (CLO), eikä valaistuskohde ole tunneli tai sillanalusvalaistus. [7].

Valaisimen alenemakerroin on laskettavissa kaavan 1 mukaisesti, jos valaisin ei ole varustettu vakiovalovirralla.

$$f_M = f_{LF} \times f_{LM} \quad (\text{kaava 1})$$

Jossa:

f_M Alenemakerroin

f_{LE} Valaisinvalmistajan ilmoittama alenemakerroin (L_x)

f_{LM} Valaisimen likaantumiskerroin (0,90)

2.2.1 M-Luokka

Valaistusluokka M perustuu luminanssin arvon mittaamiseen ja on tarkoitettu ensisijaisesti maanteille. Valaistusteknilliset laskennat on laskettava standardin SFS-EN 13201-3 hyväksytyllä ohjelmalla. Tässä tutkimuksessa tehdyt valaistuslaskennat on tehty DIALux evo 9.2 valaistuslaskentaohjelmalla [6]. Taulukossa 1 on esitetty M-valaistusluokat.

Taulukko 1. M-luokat

Valaistusluokka	Kuivan ja märän ajoradan luminanssi				Estohäikäisy	Vierialueen 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

2.2.2 C-Luokka

Valaistusluokka C on tarkoitettu ensisijaisesti moottoriajoneuvojen kuljettajille ja muille tienkäyttäjille. C-luokka soveltuu erityisesti muun muassa taso-, ja kiero-liittymissä, jossa luminanssin tarkastelu ei ole perusteltua. Tarkastelu ei ole perusteltu, koska havaittavissa olevan säännöllisen ajoradan pituus on alle 60 metriä. Taulukossa 2 on esitetty C-valaistusluokan luksiarvot valaistusluokittain [6].

Taulukko 2. C-Luokka.

Valaistusluokka	Vaakatason valaistusvoimakkuus	
	E_{hm} lx, min	U_o min
C0 (AE0)	50	0,40
C1 (AE1)	30	0,40
C2 (AE2)	20,0	0,40
C3 (AE3)	15,0	0,40
C4 (AE4)	10,0	0,40
C5 (AE5)	7,50	0,40

2.2.3 P-Luokka

Valaistusluokka P on tarkoitettu ensisijaisesti kevyenliikenteenväylän jalankulkijoille ja pyöräilijöille, piha- ja asuntokaduille, pysäköintialueille ja pihoille. Miellyttävän tasaisuuden saavuttamiseksi hankekohtaisen keskimääräinen valaistuvuus (E_M) ei saisi ylittää 1,5-kertaista luokan laskettua keskiarvon minimiä [6]. Taulukossa 3 on esitetty P-valaistusluokan luksimäärät valaistusluokittain.

Taulukko 3. P-luokat

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

2.3 Värilämpötila ja värintoistokyky

LED-valaistuksen väriominaisuudet koostuvat kahdesta eri päätekijästä, värilämpötilasta ja värintoistokyvystä. Värilämpötilalla kuvataan valaisimesta ympärille säteilevää valon väriä. Värintoistokyky kuvaa miten hyvin valonlähde toistaa värejä.

LED-tekniikan yksi hyödyistä on ledien laaja väriskaala. LED-valon säteilemä monokromaattista eli yksitaajuisia valoa kutsutaan värilämpötilaksi, jonka yksikönä käytetään Kelviniä (K). Ihminen pystyy havaitsemaan ledin värilämpötilan avulla, onko valonlähteen väri kylmää vai lämmintä. Mitä sinertävämpi ja kylmempi valonlähde on, sitä korkeampi on värilämpötila. Erilaisia värimahdollisuuksia saadaan muuntamalla ledien aallonpituutta, jännitettä ja käyttämällä

erilaisia puolijohdemateriaalia. Taulukossa 4 on esitetty, minkälaisia värilämpötiloja eri valoilla saadaan [8].

Taulukko 4. Värilämpötilat [6]

Värilämpötila K	Valon väri
<3300	Lämmin valkoinen
3300–5300	Valkoinen
>5300	Kylmä valkoinen

Suomen tievalaistuksessa käytetään värilämpötilana pääsääntöisesti 4000 Kelviniä ja katuvalaistuksessa pääsääntöisesti 3000 Kelviniä.

2.4 Häikäisy

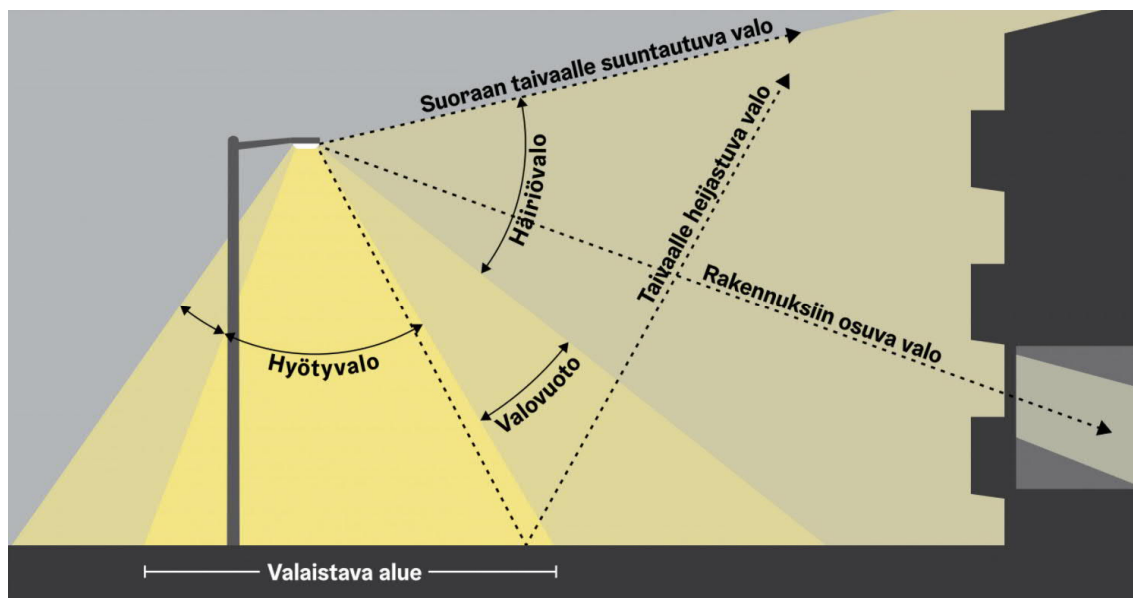
Häikäisy, estohäikäisy ja kiusahäikäisy ovat tievalaistuksen epäkohtia, jotka tuovat tienkäyttäjille turvattoman ja epämiellyttävän tunteen.

Häikäisyyn on kiinnitettävä erityisesti huomioon tievalaistuksen suunnittelussa. Valaisimien valonjako, asennuskorkeus, valaisimen valinta ja väärä suuntaus voivat aiheuttaa häikäisyä. Häikäisy syntyy, kun ihmisen näköaisti häiriintyy korkeasta luminanssitasosta, joka puolestaan viivästyttää kohteen hahmottamisen ja heikentää näkyvyyttä. Häikäisy voi syntyä joko suorana heijastuksena tai epäsuoraan. Suorassa häikäisyssä (kiusahäikäisy) valo kohdistuu valonlähteestä suoraan silmään. Epäsuorassa häikäisyssä (estohäikäisy) valo kohdistuu silmään pinnan heijastuksesta johtuen [9]. Valaistuksesta syntynyttä häikäisyä voidaan estää muun muassa häikäisysojilla.

Estohäikäisy mitataan silmän kontrastinerotuskyvyn muuttumisella f_{TI} (%). Kaikille uusille valonlähteille lasketaan estohäikäisyn arvo (alenemakerroin 1,00) [6].

2.5 Häiriövalo ja valosaaste

Valaistusalueen ulkopuolelle suuntaava valoa kutsutaan häiriövaloksi. Häiriövalo aiheuttaa epämiellyttävyyttä, vaikeuttaa informaation hahmottamista ja häiritsee esimerkiksi yöllä lentäviä hyönteisiä. Kuvassa 1 on esitetty häiriövalon muodot ja suuntaukset [10].



Kuva 1. Häiriövalon muodot ja suuntaukset.

Tarpeettoman valoviihtyvyyden ja valaistuksella luodusta turvallisuuden tasosta sekä taivaalle suuntautuvaa valoa kutustaan valosaasteeksi. Valosaaste vaikuttaa luontoon muun muassa kasvien kasvukauden muutoksella. Eläimille valosaaste aiheuttaa myös haittoja muun muassa elintapojen muutoksina. [10].

Kansainvälisessä valaistusstandardissa SFS-EN-12464-3 on kuvattu häiriövalon aluejaot (E-alueet). Alueet ovat jaoteltu ympäristön ja valoisuuden häiriövalon tarkastelua varten. Alueluokan valinta on esitettävä rakennussuunnitelma-vaiheessa. Taulukossa 5 on esitetty Aluejaot [6].

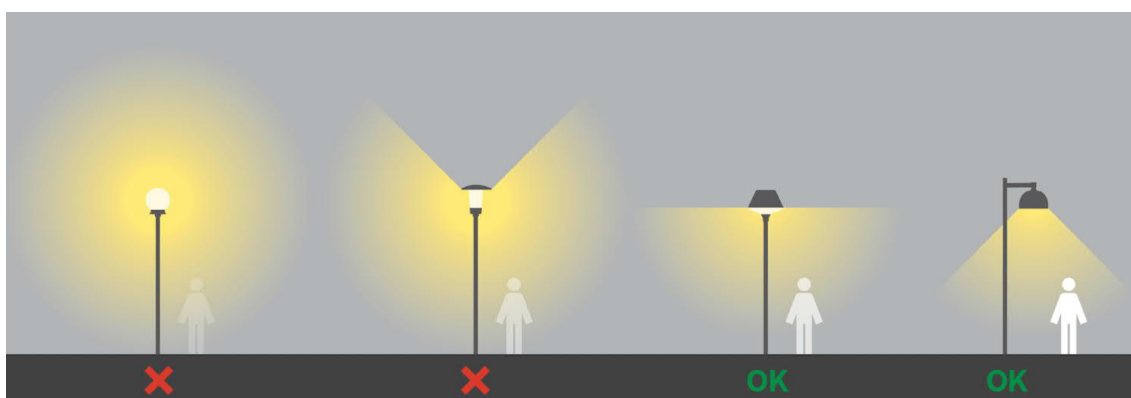
Taulukko 5. Aluejako

Alue	Ympäristö	Valoisuus	Esimerkkejä
E1	Luonnontila	Pimeä	Kansallispuisto
E2	Maaseutu	Vähäinen aluevalaistus	Teollisuus- tai asuinalueet
E3	Esikaupunki	Kohtalainen aluevalaistus	Teollisuus- tai asuinalueet
E4	Kaupungin keskusta	Voimakas aluevalaistus	Keskustat tai kauppa-alueet

Valaistuksen suunnittelussa tulee aina kiinnittämään huomioon valon oikealaiseen mitoittamiseen ja suuntaukseen. Taulukossa 6 on esitetty häiriövalon raja-arvot [6] Kuvassa 2 on esitetty valaisimenmallin valinnan tärkeys [10].

Taulukko 6. Häiriövalon raja-arvot

Ympäristön alue	Asennuksen yläpuolinen valo ULR %	Valaistusvoimakkuus ikkunoissa E_v lx		Valaisimen valovoima kohteen suuntaan I kcd		Rakennusten luminanssi	
		Ilta	Yö	Ilta	Yö	L_m	L_{max}
						cd/m ²	cd/m ²
						Ilta	
E1	0	2	1	2,5	0,5	0	0
E2	5	5	1	7,5	0,5	5	10
E3	15	10	2	10	1	10	60
E4	25	25	5	25	2,5	25	150



Kuva 2. Valaisinmallin valinnan tärkeys.

3 VALONLÄHTEET

3.1 Suurpainenatriumlamppu

Vuonna 2022 Suomen tie- ja katuvalotyypeistä on peräti 81 prosenttia suurpainenatriumlamppuja. Suurpainenatriumlampun toiminta perustuu kaasupurkaukseen natriumhöyryssä. Kaasupurkauksen tuottava valotehokkuus on 70–150 lm/W ja laskennallinen polttoikä suurpainenatriumlampuille on 12000–48000 tuntia, riippuen lampun tehosta. Mitä pienempitehoinen lamppu on, sitä pienempi on polttoikä. Suurpainenatriumin värintoistoindeksi (R_a) on 20–65 ja valon tuottama valo on keltaoranssia (2000 K) [11].

Vuonna 2015 Euroopan komission antamat direktiivit (EY) N:o 245/2009 ja (EU) 347/2010 vauhdittivat Suurpainenatriumlamppujen kehitykseen Suomen tie- ja katuvalaistuksessa. Suurin osa tie- ja katuvalaistuksen elohopealampuista on vaihdettu suurpainenatriumlampuiksi energiatehokkuuden ja säästöjen takia. [2].

3.2 Pienpainenatriumlamppu

Pienpainenatriumlampun toimintatapa on suunnilleen sama kuin suurpainenatriumlampun. Pienpainenatriumin kaasuina käytetään neonia ja natriumia. Pienpainenatriumlamppujen valotehokkuus on hyvä (100–180 lm/W), jonka vuoksi ne ovat soveltuneet hyvin tievalaistukseen. Pienpainenatriumlampun tuottama valon väri on keltaoranssia ja sen värintoistokyky on aika heikko. Pienpainenatriumlampun ovat poistuneet kokonaan Suomen tievalaistusverkosta heikon värintoiston, lyhyen polttoiän (8000 h) ja korkeiden kunnossapitokustannuksien vuoksi [11].

3.3 Elohopeahöyrylamppu

Elohopeahöyrylamppu oli ennen vuotta 2015 yleisesti käytetty valaisin katu- ja tievalaistuksessa. Elohopeahöyrylamppua käytettiin muun muassa kevyenliikenteenväylien, puistojen, pihojen ja alempien valaistusluokkien valaistukseen. Elohopeahöyrylamppun toimintaperiaate perustuu sähköpurkaukseen korkeassa lämpötilassa suurpaineisessa elohopeahöyryssä. Lampun pinta on käsitelty loisteaineella, jonka tarkoitus on muuttaa lampun tuottamaa ultraviolettisäteilyä näkyväksi valkoiseksi valoksi [11].

Lampun valoteho vaihtelee 20–45 lm/W ja värielämpötila 3800–4000 K. Lampun polttoikä on pitkä, mutta valovirran aleneman johdosta hyötypolttoikä on ainoastaan 16 000 tuntia. Suomessa elohopeahöyrylamppujen valmistus ja myynti kiellettiin vuonna 2015, hiilidioksidipäästöjen, ongelmajätteen ja energiasäästövoitteiden nojalla [11].

3.4 Monimetallilamppu

Monimetallilamppuja ovat käytetty ulkovalaistuksessa lähinnä valonheittimissä urheilukenttien, satamien, torien, aukoiden ja avoalueiden valaistukseen. Monimetallilampun toimintaperiaate on samanlainen kuin elohopeahöyrylamppussa, mutta suurpaineisessa purkausputkessa on elohopean lisäksi muita halogeeniyhdisteitä. Lamppujen teho, valonväri ja valontoisto riippuu metalliyhdisteistä [11].

Monimetallilamppujen värintoisto on hyvä (R_a90). Lamppujen tehot vaihtelivat 20–3000W ja niiden valotehokkuus on 80–120 lm/W. Lamppujen polttoikä riippuu lampun tehosta ja tyypistä, mutta yleisesti ottaen 6 000–16 000 polttotuntia. Mitä enemmän tehoja lampulla on, sitä lyhyempi on sen polttoikä. Lamppu on varustettava elektronisella sytytyslaitteella, koska monimetallilamppu vaatii jännitepulssein syttyäkseen [11].

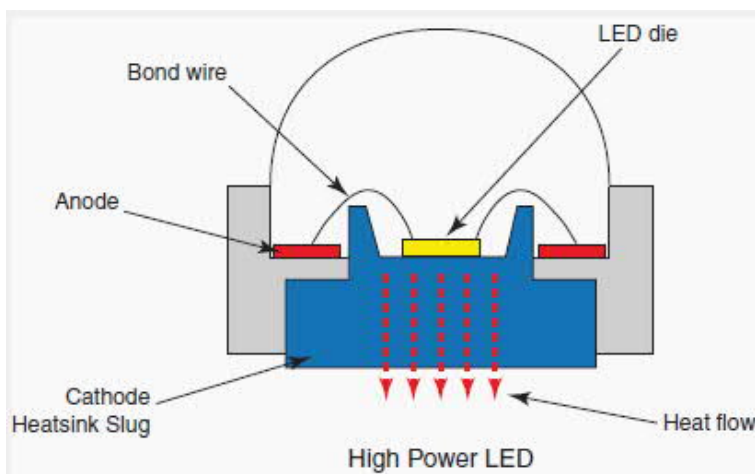
Monimetallilamppujen värintoistokyky ja energiatehokkuus ovat parempia kuin elohopeahöyrylampulla, mutta ne ovat hankintahinnaltaan kalliimpia kuin elohopeahöyrylamput. Haittapuolena pidetään monimetallilamppujen pitkää syttymisaikaa. [11]. Monimetallilappuja löytyy vieläkin jonkin verran katu- ja tievalaistusverkoissa, mutta niitä pystyy vaihtamaan korvaaviin LED-lamppuihin.

3.5 LED

Valaistusalan historian yksi isoimmista läpimurroista hehkulampun jälkeen on ollut LED ja LED-tekniikan kehittyminen. Tätä läpimurtoa on huomioitu maailmanlaajuisesti muun muassa vuoden 2014 fysiikan Nobel-palkinnolla, mikä myönnettiin japanilaistutkijoille Isamu Akasakille ja Hiroshi Amanolle LED-valojen keksimisestä [13].

Ensimmäiset ledit kehitettiin jo 1960-luvulla, mutta ne yleistyivät vasta 1970-luvun puolella. Silloin ledejä käytettiin kodinelektronikassa ja merkkivaloina (valodiodi). Ledien lopullinen lento ja yleistyminen alkoi 2000-luvulla erilaisten ilmasäädöksiä ja tavoitteiden johdosta. Tänä päivänä ledit ovat ainut valonlähde, jota käytetään uusissa tie- ja katuvalaistuksissa sekä puisto- ja erikoisvalaistuksessa niiden ympäristöystävällisyyden, laajan optiikan, energia-, kustannus-, valotehokkuuden ja pitkän eliniän ansiosta. Lisäksi LED-valaisimet ovat nostaneet suosiota myös sillä, että valaisimet syttyvät heti eikä niitä luokitella ongelmajätteiksi koska ne eivät sisällä elohopeaa, kuten monessa muussa valonlähteessä [13].

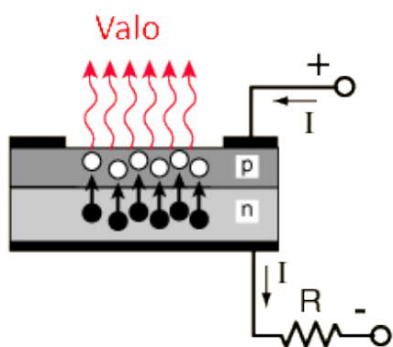
LED-lyhenne muodostuu englanninkielisistä sanoista Light Emitting Diode eli valoa lähettävää diodia (puolijohdekomponentti). Diodi lähettää valoa, kun sen lävitseen kulkee yksisuuntaista tasavirtaa. [11]. Suomen jakeluverkko on pääsääntöisesti vaihtovirtaa, joten LED-valaisin tarvitsee liitännälaitteen eli tassauntausmuuntimen, jonka tehtävä on muuntaa jakeluverkosta saatava vaihtojännite sopivasti tasajännitteeksi. Kuvassa 3 on esitetty LED-moduulin poikki-leikkaus ja lämmönsiirto [13,16].



Kuva 3. LED-moduulin poikkileikkaus ja lämmönsiirto [16].

3.5.1 Toimintaperiaate

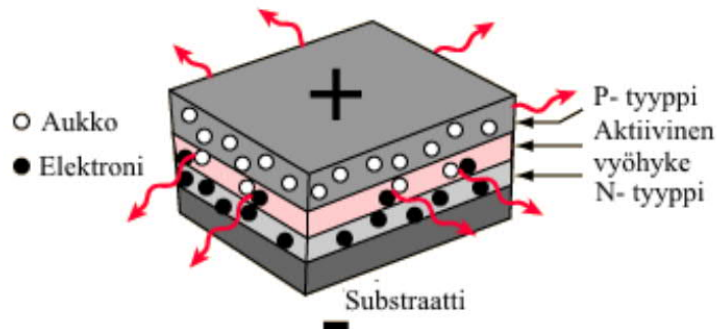
LED:it ovat puolijohdeita, jotka säteilevät valoa, kun niiden läpi kulkee yksisuuntaista sähkövirtaa. Puolijohdekomponentti koostuu kahdesta erilaisesta puolijohdeesta (N-tyyppi ja P-tyyppi). N-tyyppin puolijohde on varautunut negatiivisilla elektroneilla. P-tyyppin puolijohdeella on positiivinen varautunutta vapaata tilaa, joista puuttuu elektroneita. Näiden kahden puolijohteen kosketuspintaa kutsutaan PN-rajapinnaksi. Rajapinnalla negatiivisesti varautuneet elektronit siirtyvät kohti positiivista tilaa aiheuttaen reaktion, jonka seurauksena elektronit siirtyvät alemmalle energiatasolle. Reaktiossa elektronit vapauttavat energiaa, josta osa tuottaa näkyvää valoa ja osaa lämpöä [14]. Kuvassa 4 on esitetty LED:in toimintaperiaate [15].



Kuva 4. LED:in toimintaperiaate

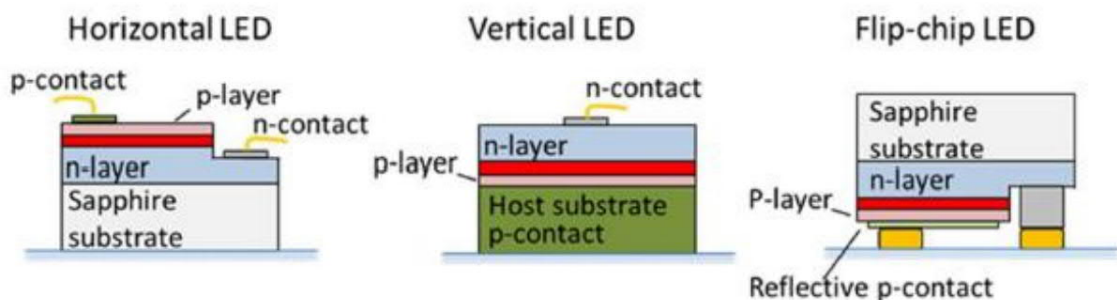
3.5.2 Rakenne

LED-valaisimien rakenne voidaan jakaa neljään eri tasoon. Rakenteen alinta tasoa kutsutaan LED-laataksi (LED die). Kuvassa 5 on esitetty laatan eri kerrokset. Yksinkertainen laatta koostuu alustasta, N- ja P-tyyppin puolijohdemateriaalien kerroksista, joiden välissä on aktiivisen vyöhykkeen kerros [17,18,19].



Kuva 5. LED-laatan rakenne

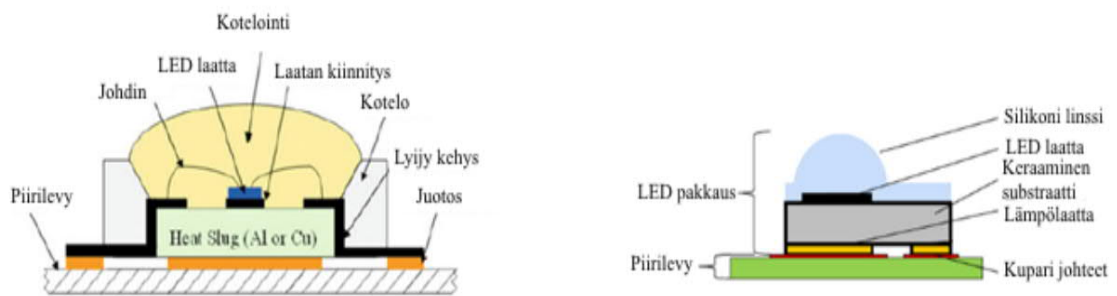
Vaikka LED-valaisimen laatan toimintaperiaate on kaikkialla sama, laatta voidaan kasata eri tavalla ja eri seoksilla, niiden avulla saadaan erilaisia variaatiota riippuen käytetystä materiaalista. Kuvassa 6 on esitetty laattojen yleisesti käytettyjä variaatiota suurtehoisissa LED-valaisimissa. Punaisella esitetyssä kerroksia kutsutaan aktiivisesti säteileväksi kerrokseksi, jossa elektronit vapauttavat energiaa näkyvän valon ja lämmön tuottamiseksi [17,18].



Kuva 6. Yleisesti käytettyjä laattojen variaatiota suurtehoisissa LED-valaisimissa.

Ensimmäisessä variaatiossa eli vaakasuorassa ledissä (Horizontal LED) sirun pohja voidaan käyttää suoraan jäähdytykseen, koska sähkövirran kulku on eristetty safiirialustan johdosta. Vertikaalisessa- ja käänteis-ledien pohja pitää erikseen eristää, koska leideissä on hyödynnetty pohjan puolta sähköisessä kontaktissa. Vaakasuorassa ledissä erilliset kontaktit tuodaan ulkopuolelta P- ja N-kerroksille [17, 20].

Puhuttaessa LED-pakkauksesta (LED-package) vaihtoehdot moninkertaistuvat. LED-pakkauksen tehtävä on kokonaisen rakenteen vahvistaminen ja tukeminen, tarjota LED-laatalle suojaa valoa päästävän kerroksen läpi, suuntaa syntyvää valoa tarpeen mukaan ja muuttaa valon väriä. Lämmön sietäminen ja johtuminen laatasta poispäin helpotetaan lämpönielun avulla [17, 20]. Kuvassa 7 on esitetty kaksi erilaista LED-pakkausesimerkkiä.



Kuva 7. Erilaisia LED-pakkausesimerkkejä

Led-valaisin (LED luminaire) koostuu yhdestä tai useammasta LED-moduulista, liitäntälaitteista ja muista komponenteista. Led-valaisimien erinomaisen laadun ja suuntauksen saavuttaminen saadaan onnistumaan erilaisilla komponenteilla, kuten esimerkiksi heijastimilla (reflectors), diffuuseille (diffusers), linssille ja muilla mahdollisilla osilla. Lisäksi LED-valaisimesta löytyy usein komponentteja liittyen lämmönhallintaan erilaisilla antureilla ja tunnistimilla. Nämä kaikki yhdistetään runkoon [17, 18].

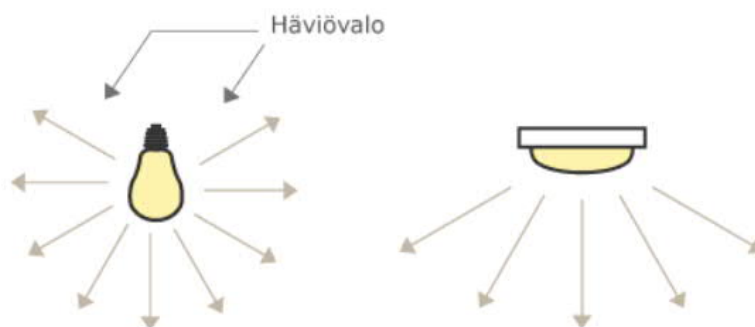
LED-moduuli koostuu virtapiiristä yhdistävistä LED-pakkauksista ja elektronisista tai mekaanisista komponenteista. LED-moduulit voidaan jakaa kolmeen osaan liitäntätavan mukaisesti. Ensimmäinen liitäntätapa ovat kiinteät moduulit

(integral), ja ovat nimensä mukaisesti kiinteitä moduuleita ja ne eivät ole vaihdettavissa tai niitä ei ole suunniteltu vaihdettaviksi. Toinen liitântätapa on sisäänrakennetut moduulit (built-in). Nämä moduulit ovat suunniteltu vaihdettavaksi valaisimen sisällä, mutta ne eivät toimi itsenäisesti. Liitântätapaa käytetään hyväksi vanhojen valaisintyyppien lappujen korvaamisessa. Kolmas liitântätapa on itsenäiset moduulit (independent) Tämä liitântätapa mahdollistaa moduulien käytön valaisimen ulkopuolella [17, 18].

3.5.3 Valotehokkuus ja valontuotto

LED-valaisimien valotehokkuus (energiatehokkuus) ilmoitetaan lm/W -arvolla, joka kuvaa valonlähteestä saadun valon määrää suhteessa käytettyyn energiaan. Perinteisten valaisimien valotehokkuuden hyötysuhde lasketaan LOR (Light Output Ratio) avulla, kun tiedetään valonlähteen valovirta, voidaan laskea perinteisten valaisimien ulos tuottama valovirta. LOR-arvo voidaan laskea ainoastaan vanhoille valaisimille, sillä uusissa LED-valaisimista on annettu suoraan valaisimen ulos tulevan valovirran määrän [21].

LED-valaisimien yksi isoimmista eduista on niiden laajat valonjaot, joiden avulla ledien tuottama valo saadaan suunnattua haluttuun suuntaan. Valon suunnattavuus on ollut ongelmallista perinteisissä valonlähteissä, sillä perinteiset valonlähteet tuottavat valoa ympärisäteilevästi, jolloin osa valosta menee heijastimen häviöihin. Kuvassa 8 on esitetty perinteisen valaisimen ja LED-valaisimen valon suuntaisuus [21].



Kuva 8. Perinteisten valaisimien ja LED-valaisimien valon suuntaisuus.

Kun elektronit vapauttavat energiaa niin osa energiasta tuottaa lämpöä. Tästä johtuu, että LED-moduulin sisäinen lämpötila (liitosrajapinnan lämpötila) on suurempi kuin ympäristön lämpötila. LED-moduulin korkeampi lämpötila vaikuttaa muun muassa moduulin elinikään ja valontuottoon. LED-moduulin korkeampi lämpötila voi antaa virheellisen tiedon LED-valaisimen tulevasta valovirran määrästä. Tästä johtuen LED-moduulin tuottama valovirta ilmoitetaan ympäristölämpötilassa 25 °C [21].

3.5.4 Elinikä

LED-valaisimien yksi tärkeimmistä eduista muihin valonlähteisiin verrattuna on niiden pitkäikäisyys. LED-valaisin voi esimerkiksi toimia normaalisti vaikka on menettänyt yli 90 % alkuperäisestä tehosta. Lisäksi LED-valaisimen sytytyskerat eivät vaikuta LED-valaisimen elinikään. Nämä seikat erottavat LED-valaisimet muistan valonlähteistä, sillä LED-valaisin palaa harvoin kokonaan loppuun. Tänä päivänä LED-valaisimien valmistajat lupaavat LED-valaisimien eliniäksi 50 000–100 000 tuntia riippuen valaisimen kokoonpanosta ja tehosta. [20].

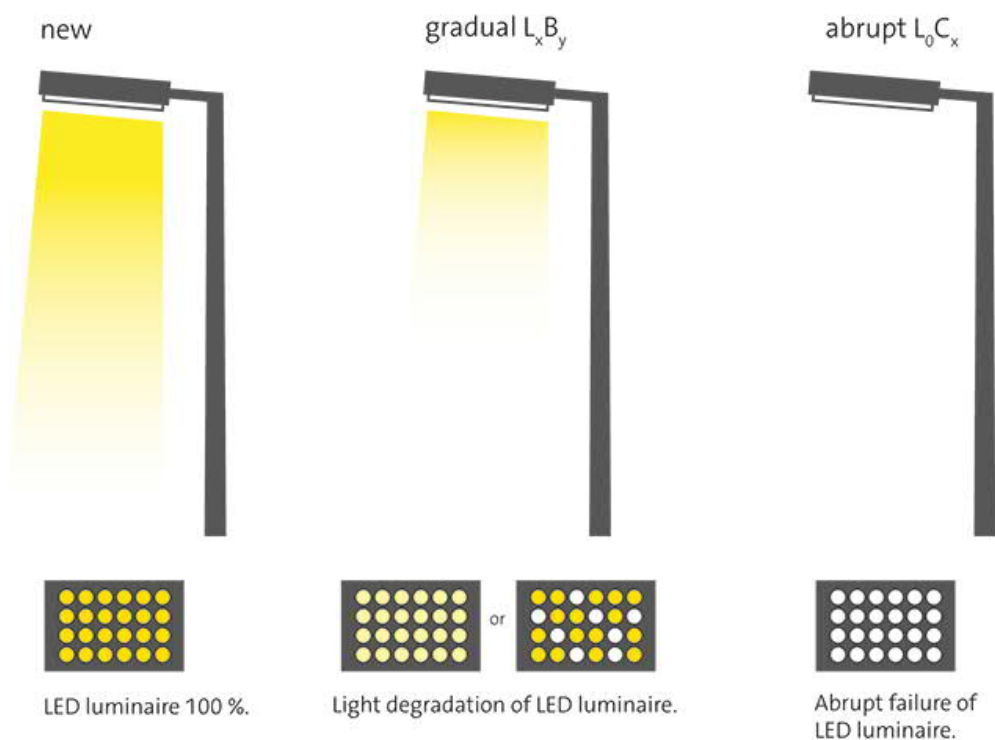
Standardeissa IEC 62722-2-1 Particular requirements for LED luminaires ja IEC 62717 LED-modules for general lighting-Performance requirements määritellään LED-valaisimien elinikä. Standardien mukaan LED-valaisimien eliniästä tulee ilmoittaa kaksi erilaista elinikää. Ensimmäinen on LED-moduulin elinikä ja toinen on liitälaitteen elinikä [22].

LED-moduulin elinikä ilmoitetaan käyttämällä lyhennearvoja $L_{90}B_y$, $L_{80}B_y$, tai $L_{70}B_y$. L_x -arvo kertoo jäljellä olevan valovirran määrä tietyn ajan päästä LED-valaisimen alkuperäisestä kokonaisvalovirrasta. L_x -arvo ei riitä yksinään ilmoittamaan LED-moduulin elinikä, vaan sen yhteydessä on annettava B_y -arvo tai C_y -arvo. B_y -arvo ilmaisee LED-valaisimen L_x -arvon täsmentämistä, ilmoittamalla prosentteina valovirran heikentymistä LED-moduulien joukosta [23].

Esimerkiksi LED-valasimen valmistaja ilmoittaa, valaisimen eliniäksi $L_{90}B_{10}$ 100 000 h tarkoittaa, että 100 000 tunnin jälkeen 90 % valaisimen LED-

moduuleista tuottavat ilmoitetun L_{90} -arvon valovirran ja 10 % eivät tuota ilmoitetun L_{90} -arvon valovirtaa.

C_y -arvo "catastrophic failures" ilmoittaa LED-valasimen vikaantuneiden / täysin sammuneiden LED-moduulien määrä prosentteina. C-arvo voi olla maksimissaan C_{10} tai tätä pienempi. C_{10} -arvo tarkoittaa, että 10 % LED-moduuleista eivät tuota lainkaan valoa tai ovat sammuneet. Kuvassa 9 on tarkemmin esitetty LED-moduulien eliniät periaate [23].



Kuva 9. LED-moduulien B_y - ja C_y -arvojen periaate.

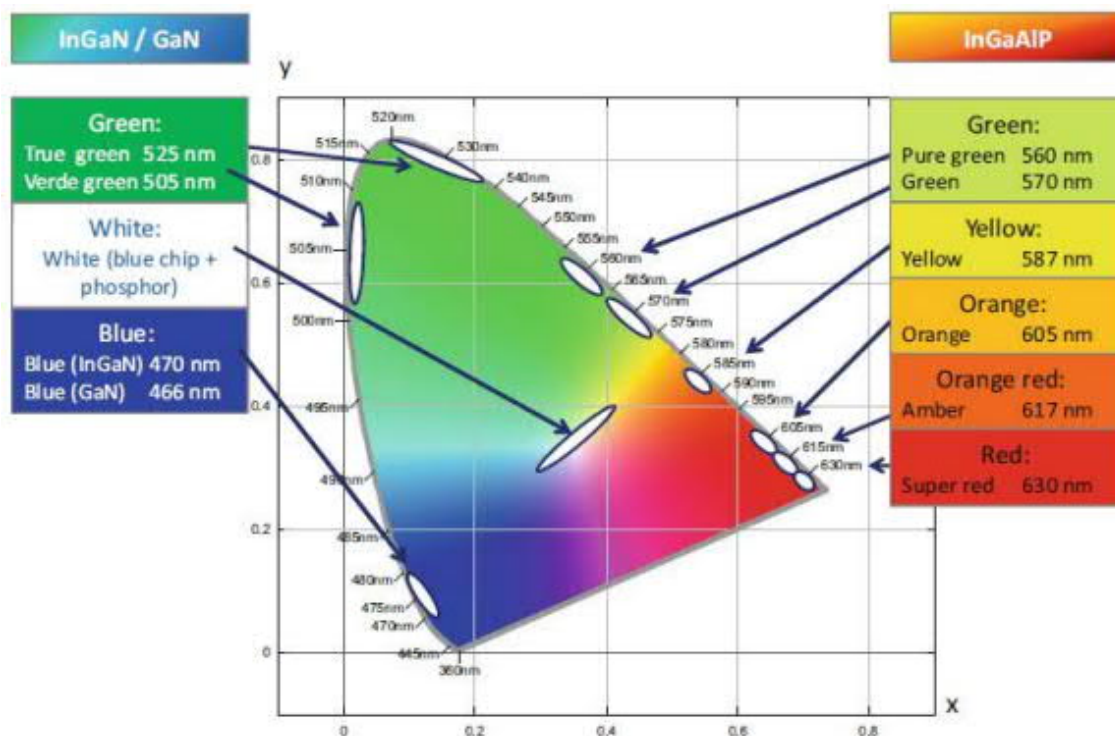
Taulukossa 7 on esitetty erilaisten käyttökohteiden LED-valaisimien vähimmäisvaatimukset käyttöiälle, L_x - ja C_y -arvoille [24].

Taulukko 7. Käyttökohteiden LED-valaisimien vähimmäisvaatimukset käyttöiälle, L_x - ja C_y -arvoille.

Valaisintyyppi	Elinikä (h)	Valaisimen valovirran alenema	Valaisimen kuolleisuus
Tievalaisin, sillanalusvalaisin, sisäalueen tieliikenne tunnelivalaisin	100 000	L_{90}	C_{10}
Valonheitin, korostusvalaisin	50 000	L_{90}	C_{10}
Kynnys- ja siirtymäalueen tieliikenne tunnelivalaisin	50 000	L_{90}	C_{10}
Turvavalaisin	25 000	L_{90}	C_{10}

3.5.5 Aallonpituus

LED-valaisimesta säteilemä näkyvän valo on monokromaattista (yksiväristä), jonka aallonpituus riippuu käytetyistä puolijohdemateriaaleista. Aallonpituuden yksikkönä käytetään nanometrejä (nm). Ihmisen silmä pystyy havaitsemaan näkyvän valon aallonpituutta, joka riippuu aktiivisella vyöhykkeellä vapautuvasta energian suuruudesta. LED-valaisimien väriin vaikuttaa aallonpituuksien lisäksi käytetyt puolijohdemateriaalit ja jänniteväli. Kuvassa 10 on esitetty, minkälaisia puolijohdemateriaaleja käytetään tiettyjen värien tuottamiseen [17].

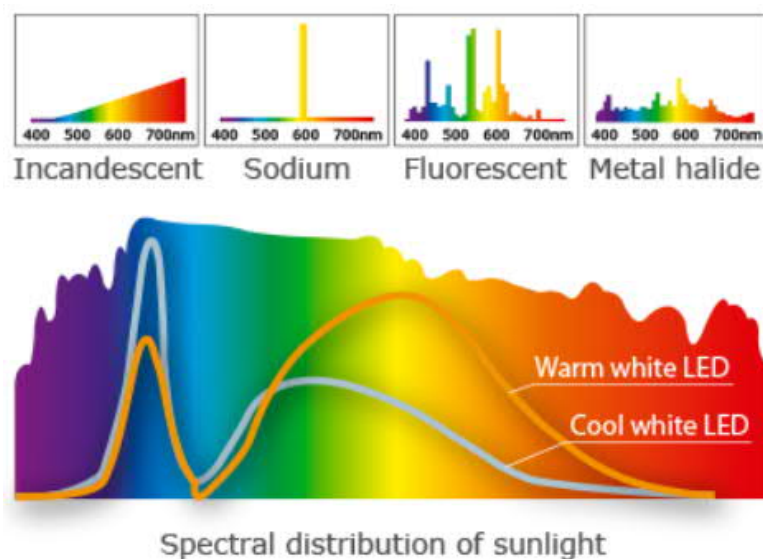


Kuva 10. LED-moduulissa käytettyjen erilaisten puolijohdemateriaalien vaikutus eri värien tuottamisessa.

Näkyvä valo on ihmiselle sähkömagneettista säteilyä. Ihminen pystyy havaitsemaan näkyvään aallonpituutta, jonka vaihtoväli on noin 380–760 nanometriä. Sähkömagneettinen säteily kulkee aaltoliikkeinä ja sen pitkäaaltoisien aallonpituus on 630–760 nanometriä ja on väriltään punainen. Lyhytaaltainen aallonpituus on 380–450 nanometriä ja on väriltään violettiä. Ihminen ei kykene havaitsemaan sähkömagneettista aallonpituutta, kun sen lyhytaaltainen aallonpituus alittaa 380 nanometriä. Vastaavasti ihminen ei kykene havaitsemaan pitkäaaltoisen aallonpituutta, kun se pitenee yli 760 nanometriin (nm) [25].

Sähkömagneettisen säteilyn lisäksi on olemassa muitakin säteilyitä kuten esimerkiksi radioaalto, jonka aallonpituus vaihtelee yhdestä millimetristä kymmeneen tuhansiin kilometreihin. Mikroaallot, joiden aallonpituus vaihtelee yhdestä millimetristä kymmeneen senttimetreihin. infrapunasäteily, jonka aallonpituus on noin 1000–1 000 000 nanometriä. Ultraviolettisäteily, jonka aallonpituus on noin 100–380 nanometriä. Röntgensäteily, jonka aallonpituus on noin 0,01–10 nanometriä. Gammasäteily, jonka aallonpituus on alle 0,01 nanometriä [25].

Kuvassa 11 on esitetty eri valonlähteiden ja auringonvalon spektrijakaumat [26].



Kuva 11. Spektrijakaumat eri valonlähteille.

3.5.6 CRI

Valon renderöinti-indeksi (värintoistoindeksi) eli Colour rendering index (CRI), kuvaa miten hyvin LED-valaisin erottaa värit toisistaan ja tuottaa mahdollisimman luonnollisen valonlähteen värejä. Vertailussa voidaan katsoa muun muassa miten hyvin valkoista valoa tuotettava LED-valaisimen spektrit vastaavat luonnollisen valkoisen valon spektriä. Ra-arvoa käytetään värintoistoindeksin ilmaisussa, jonka arvot asettuvat välille 0–100. Ra-arvon ollessa 0 kaikki värit näyttävät mustavalakoiselta ja kun Ra-arvo on 100, kaikki värit erottuvat toisistaan erinomaisesti. Esimerkiksi luonnon värin Ra-arvo on 80. Hehku- ja halogeenilamppujen Ra-arvo on 100 [6].

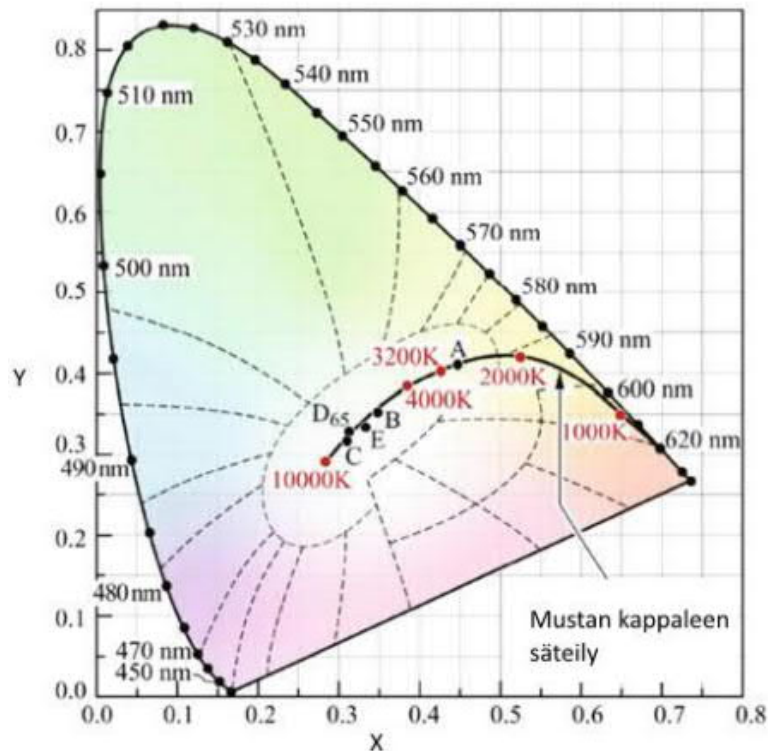
Värintoistoindeksin arvo nousee tärkeään rooliin valkoista valoa tuotettavien LED-valaisimien yleistyessä tie- ja katuvalaistuksessa. LED-valaisimen värintoistoindeksi on vaikea huomata silmämääräisesti, sillä todella korkean ra-indeksin omaavan LED-valaisimen värintoistoindeksi näyttää silmämääräisesti samanlaiselta, kuin todella heikon värintoistoindeksin omaavalla LED-valaisimella. Eron huomaa, kun tarkkaillaan LED-valaisimesta lähtevän näkyvän

valon heijastumista. Valaistavien asioiden väreihin vaikuttaa LED-valaisimesta lähtevän valon spektri. Näkyvä valo käyttäytyy kahdella eri tavalla osuessaan vastakappaleeseen, jolloin valo heijastuu tai absorboitu. Valon heijastumisesta vastakappaleeseen muodostuu havaittavia värejä. Valon absorptiospektri tarkoittaa, että, lähtevästä valosta puuttuu tietyt aallonpituudet ja näin ollen ne eivät myöskään heijastu vastakappaleeseen. Näin ollen sama vastakappale voidaan nähdä erilaisena / eri värisenä riippuen vastakappaleeseen osuvista valon spektreistä [17].

3.5.7 Värilämpö

Näkyvää valoa säteilevien LED-valaisimien ominaisuudet voivat vaihdella valmistajasta toiseen. Sen vuoksi valaisimille on määritelty erilaisia tarkentavia määritelmiä. Yksi määritelmistä on LED-valaisimen näkyvän valon värilämpötila. Kuvassa 12 on esitetty kromaattinen koordinaatisto, johon on sijoitettu LED-valaisimen erilaisia värilämpötiloja [27].

Kuvasta huomataan, että pienet värilämpötilat alkavat kromaattisen koordinaatiston haaleasta punertavasta alueista. Värilämpötilan noustaessa käyrä kääntyy kohti sinertävämpään alueeseen.



Kuva 12. Kromaattinen koordinaatisto, johon on sijoitettu valaisimien erilaisia värilämpötiloja. Y ja x-koordinaatit kuvaavat värikoordinaattia [17].

3.5.8 Ympäristöystävällisyys ja energiatehokkuus

Eurooppalainen ilmastolaki sekä lukuisat direktiivit ja säädökset ovat asettaneet tie- ja katuvalaistuksen energiatehokkuudelle vaatimuksia. Valaistussuunnittelijan rooli asianmukaisella ja hyvällä suunnittelulla antaa mahdollisuuden pienentää tie- ja katuvalaistuksen sähkönkulutusta, käyttämällä esimerkiksi mahdollisuuksien mukaan ns. älykästä valaistusta ja joissain tapauksissa kyseenalaistaa valaistuksen tarve ja käyttämällä kehittyneitä valaistusratkaisuja. Tohtori Eveliina Juntusen, väitöskirjatutkimuksen mukaan valaistukseen kuluu lähes 20 prosenttia kaikesta tuotetusta sähköistä [28].

LED-teknologia ja sen kehitysvauhti on ollut viime vuosina kunnioitusta herättävää. Tällä hetkellä LED-valaisimet ovat energiatehokkuudeltaan ja kaikilta ominaisuuksiltaan paras valaisinvalikoima. LED-valaisimet ovat suunniteltu toimimaan ainoastaan 12–24 voltin tasajännitteellä. LED-valaisimien

energiatehokkuuden mittayksikkönä käytetään lm/W, eli käytännössä monenko lumenin valovirran yksi watti tuottaa. Tällä hetkellä parhaat LED-valaisimet pystyvät tuottamaan 150 lm/W. LED-teknologiassa riittää silti tekemistä, sillä valkoisen LED-valaisimien teoreettinen hyötysuhde ylittää 260–300 lm/W [28]

Energiatehokkuudestaan huolimatta LED-teknologian energiakulutuksesta vain noin 30 prosenttia päättyy näkyväksi valoksi ja loput 70 prosenttia muuttuu lämmöksi. Vaikka näkyvän valon osuus kokonaiskulutuksesta on heikko, silti LED-valaisimet tuottavat enemmän näkyvää valoa per watti kuin aikaisemmat valoratkaisut. Lisäksi LED-valaisimet kuluttavat parhaimmillaan 80 prosenttia vähemmän energiaa kuin aikaisemmat valoratkaisut [28, 29].

3.6 Valonlähteiden vertailu

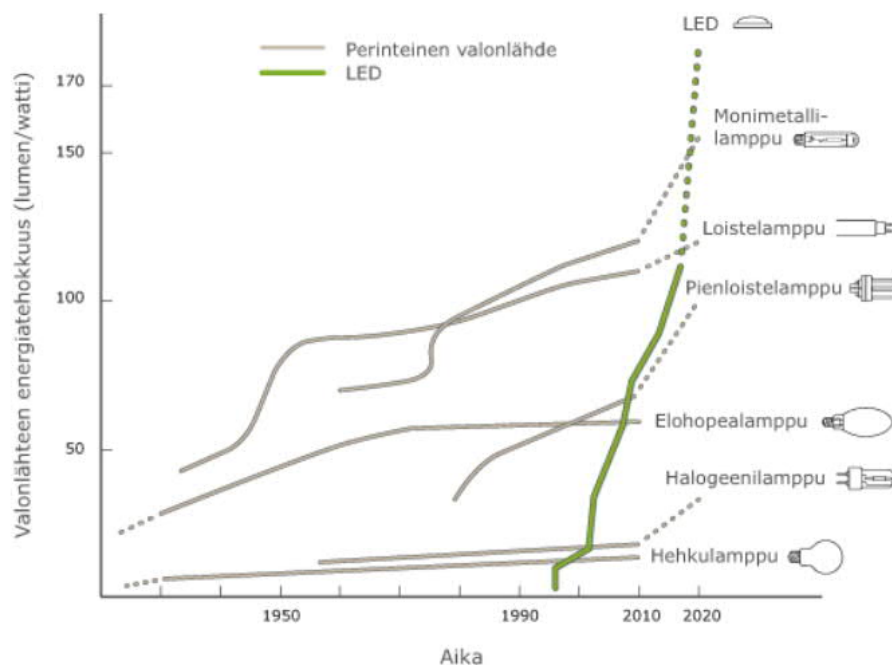
LED-valaisimet ovat pystyneet syrjäyttämään perinteisiä valonlähteitä niin tie- kuin katuvalaistuksessakin. Syrjäyttämislle löytyy monenlaisia konkreettisia syitä kuten esimerkiksi ledien pitkä elinikä (100 000 tuntia) ja pieni energiakulutus. Erittäin hyvä valotehokkuusarvo (noin 150 lm/W), jossa on vielä paljon kehitettävää (teoreettinen saavutettava valotehokkuus 260–300 lm/W). Lisäksi LED-valaisimien ohjaus ja säätö on erittäin helppo ja käyttöikä ei vaikuta LED-valaisimen sytytyskertojen määrää.

Taulukossa 8 on vertailtu valonlähteiden valotehokkuutta, värilämpötilaa, värin-toistoindeksiä, hyötypolttoikää ja säädettävyyttä. Taulukon perusteella voidaan päätellä, että LED-valaisimet ovat monella osa-alueella parempia, kuin vertailussa olleet muut valonlähteet [30].

Taulukko 8. Lamppujen keskimääräisiä ominaisuuksia.

Valonlähde	Valotehokkuus (lm/W)	Ekvivalentti värilämpötila (K)	Värintoistoindeksi R _a	Hyötypolttoikä (h)	Säädettävyys
Loistelamppu	70–100	2700–13000	70–90	15 000	Kyllä
Pienloistelamppu	50–80	2700–6000	85	10 000	Kyllä
Elohopealamppu	40–60	3000–4500	40–70	24 000	Kyllä
Pienpainenatriumlamppu	200	2700–3500	0	18 000	Ei
Suurpainenatriumlamppu	60–150	2000–2600	20–85	20 000	Kyllä
Monimetallilamppu	75–120	3000–6500	60–95	10 000	Kyllä
Halogeenilamppu	20	2700–5000	100	2 000	Kyllä
LED-valaisin	150	2700–6500	>90	100 000	Kyllä

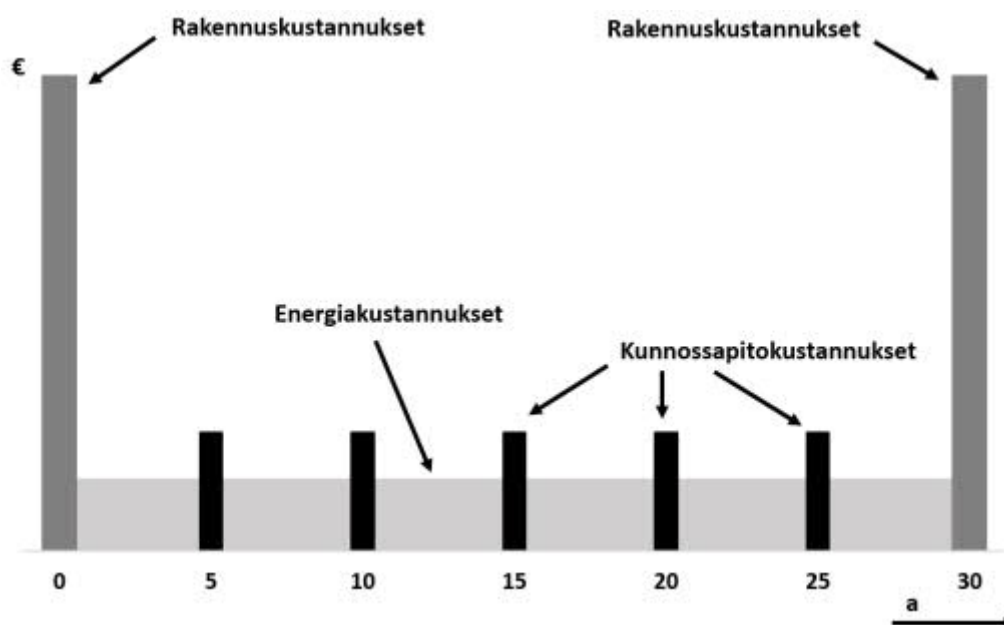
Kuvassa 13 on esitetty LED-valaisimien ja perinteisten valonlähteiden valotehokkuuden kehittymistä ajan funktiona. Kuvasta huomataan, miten LED-valaisimien valotehokkuuden hyötysuhde on parannettu pari viimeisen vuoden aikana [31].



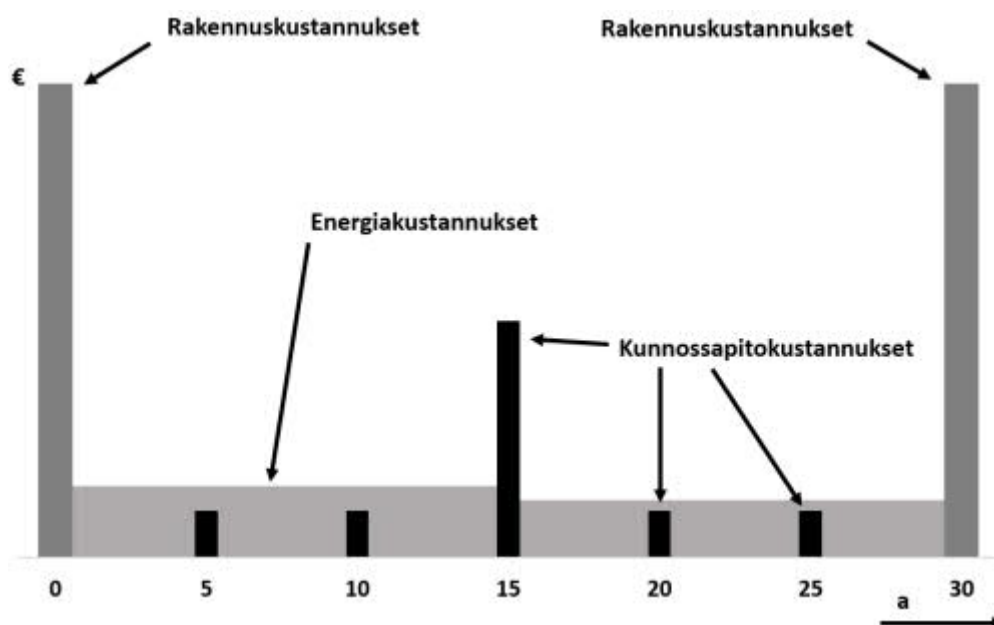
Kuva 13. Valonlähteiden valotehokkuuden kehittyminen ajan funktiona.

Valkoista valoa tuotettavien LED-valaisimien tuomista säästöistä ja niiden tarkkojen elinkaarikustannusien laskemisesta on vielä toistaiseksi hankalaa antaa arviota, sillä LED-valaisimien käytöstä ja niiden kestävydestä ei ole pitkäaikaista kokemusta. Usean eri valkoisen LED-valaisimen valmistaja lupaa ledien eliniäksi 50 000–100 000 polttotuntia, joka vastaa 4000 tunnin keskimääräisen valaistuksen vuotuisella polttoajalla noin 14–28 vuoden polttoikää.

LED-valaistuksesta syntyviä säästöjä voidaan karkeasti laskea elinkaarikustannuslaskennan avulla. Elinkaarikustannuslaskennassa otetaan huomioon LED-valaistuksen rakennus-, energia- ja kunnossapitokustannukset. Saatuja kustannuksia voidaan esimerkiksi verrata suurpainenatriumvalaistuksen elinkaarikustannuslaskentaan. Kuvassa 14 on esitetty elinkaarikustannuksien jakautuminen suurpainenatriumvalaisimilla toteutetussa tievalaistuksessa. Kuvassa 15 on esitetty elinkaarikustannuksien jakautuminen LED-valaisimilla toteutetussa tievalaistuksessa [6].



Kuva 14. Tievalaistuksen elinkaarikustannuksien jakautuminen suurpainenatriumvalaisimilla.

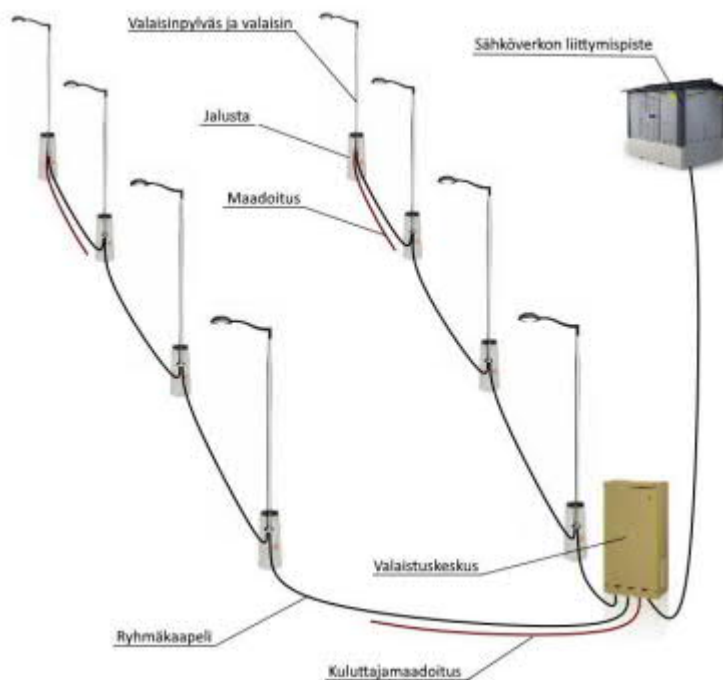


Kuva 15. Tievalaistuksen elinkaarikustannuksien jakautuminen LED-valaisimilla.

4 TIEVALAISTUSVERKON RAKENNE

Rakennuttaja määrittää valaistusverkon vaatimustason, jonka pohjalta valaistussuunnittelija laatii valaistussuunnitelman. Valaistussuunnitelmien vaatimustason määrittämisen apuna käytetään Liikenneviraston ”Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu” julkaisun ohjeita.

Valaistusverkko muodostuu valaisinpisteistä sekä rakennetusta jakeluverkosta. Valaisinpiste käsittää itse LED-valaisimen, varren, pylvään ja jalustan. Valaistusverkon jakeluverkko käsittää sähköverkon liittymispisteen eli muuntajan, katuvalokeskuksen ja kaapeloinnit liittymispisteen ja valaisinpisteiden välillä sekä maadoitukset. Kuvassa 16 on esitetty tie- ja katuvalaistusverkon periaate [5].



Kuva 16. Tie- ja katuvalaistusverkon periaate

4.1 LED-valaisimen rakennevaatimukset

Suomen maanteillä käytettävien LED-valaisimien tulee olla Liikenneviraston hyväksymiä tyyppivalaisimia ja niiden tulee täyttää ”ledivalaisimien laatuvaatimukset 31/2021” ohjeessa esitetyt vähimmäisvaatimukset. Tyyppitarkastuksessa tarkastetaan valaisintyyppin valaistusteknilliset ominaisuudet ja valaisintyyppin rakenteen tarkastaminen. Työryhmä tarkastaa valaistusteknillisiä ominaisuuksia ja valaisinmallin soveltavuutta eri valaistus- ja tieluokille. Sellaiset valaisintyyppit hylätään, jotka eivät täytä vähimmäisvaatimusta energiatehokkuuden osalta ja jotka ovat kalliita elinkaarikustannuksiltaan [32]

Työryhmä tarkastaa valaisintyyppin rakenteen osalta muun muassa valaisimen tiiveyden, kotelointiluokan IP65 (suihkuveden ja pölyn kestävä), ilkivaltaluokituksen (IK). Ilkivaltaluokitus on kerrottu standardissa ED50102, jossa on määritelty iskuenergialuokitus. Luokitus annetaan asteikoilla 0–10, jossa IK0 tarkoittaa, että valaisin ei kestä ollenkaan ilkivaltaa ja IK10 kestä erittäin hyvin ilkivaltaa. Valaisimien tulee lisäksi olla korroosionkestäviä, helposti asennettavia ja huollettavia sekä muodoltaan sellaisia, joihin tuulikuorma jää mahdollisimman pieneksi. Valaisimien tulee olla CE-merkittyjä (valaisin täyttää EU:n asettamat direktiivit ja vaatimukset. Valaisin on läpäissyt CE-merkintään vaadittuja testejä). Lisäksi valaisin tulee varustaa laitteella, joka mahdollistaa jännitteettömän huoltotyön suorittamisen ja tulee varustaa vakiovalovirran mahdollistavalla liitäntälaitteella (CLO) [32].

4.2 Kaapelointi ja asennus

Sähkönsiirto tapahtuu pienjännitekaapeleiden avulla tievalaistuskeskukselta valaisinpylväille. Kaapelointi voidaan toteuttaa joko maakaapelointina tai ripustamalla pylväisiin ilmajohtolla [7].

Maan alle asennettavat maakaapelit ovat monijohdinkaapeleita, joissa yksittäiset johtimet ovat eristetty ja suojattu muovivaipalla toisistaan. Vaativissa kohteissa, joissa maakaapeliin kohdistuu ulkoisia mekaanisia rasituksia, voidaan

käyttää armeeratua kaapelia. Armeeratussa maakaapelissa on suojakerros metallinauhoista tai langoista ulkovaipan alla. Suomen valtion omistamalla maanteillä käytetään aina PVC-eristettyä, konsentrisella kuparisuojajohtimilla ja alumiinijohtimilla varustettava AMCMK 4 x xx+yy maakaapelia. Maakaapelin konsentrisen kuparisuojajohdin toimii PEN-johtimena ja N-johdin toimii ohjausvarauksena. Maakaapeliasennuksissa valaisinpylvään asennuskaapelina valaisimen ja kytkentätilan välisellä käytetään MMJ 5x1,5S muovivaippakaapelia [7].

Kaikki maahan tulevat maakaapelit asennetaan kaapelisuojaputkeen, jonka asennussyvyys putken alapinnasta katsottuna maan pintaan on vähintään 700 mm. Poikkisuunnassa esimerkiksi tierakenteiden alituksissa kaapelisuojaputken asennussyvyys putken alapinnasta katsottuna maan pintaan on vähintään 1000 mm. Kaapelisuojaputkien asennussyvyyksistä on esitetty poikkeuksia tievalaistuksen työkohtaisissa laatuvaatimuksissa, johon valaistusurakoitsijan on syytä perehtyä [7].

Valaistusverkon kaapelointi voidaan toteuttaa myös ilmajohtoin käyttäen PE-eristettyä riippukierrekaapelia, jossa vaihejohtimet on PE-eristetty ja PEN-johdin on eristämätön alumiiniteräsvaijeri AMKA 3 x xx+yy. Johtimen rakenteessa kulkee teräksinen alumiinivaijeri, jonka tehtävä on kannatella johdinta. Kannatusvaijeri toimii myös nollajohtimena eli virran paluutienä. Ilmajohtoasennuksissa valaisinpylvään asennuskaapelina valaisimen ja kytkentäkotelon välisenä valaisinjohtona käytetään uv-säteilyn kestävästä MPK3x2,S asennuskaapelista tai kaksoiseristettyjä johtimia MKEMP 2,5. [7].

4.3 Pylväät

Valtion omistamille maanteille asennettavien valaisinpylväiden tulee täyttää Väyläviraston ”Tien valaisinpylväiden ja jalustojen laatuvaatimukset” ohjeessa esitetyt vaatimukset. Lisäksi valaisinpylväiden tulee olla standardin SFS-EN ISO 40 CE-merkittyjä tai erityistapauksessa Liikenne- ja viestintäministeriön tyyppi-hyväksymiä [33].

Valaisinpylvään CE-merkissä on ilmoitettu muun muassa pylvään mitoitettu tuulen referenssinopeus, valaisimen suurin sallittu paino ja poikkipinta-ala ja pylvään taipumislukka. Suomessa käytettävien pylväiden tuulen referenssinopeus on 21 m/s. Mikäli kohteen tuuliolosuhteet ovat korkeampia kuin pylväälle annettu tuulen referenssinopeus, sovelletaan Väyläviraston ”Tie valaisinpylväiden ja jalustojen laatuvaatimuksissa 14/2010” annettuja kertoimia ja ohjearvoja. Pylvään taipumusluokka on enintään 6 % pylvään korkeuden ja varren pituuden summista [34]

Ohjeessa on määritelty metalli- ja komposiittimuovipylväille vaaditut ominaisuudet kuten: [6]

- Tuulen nopeus, pylvään maksimi sallittu taipuma ja kuormien osavarmuuskertoimien huomioiminen
- Pylvään kytkentäaukon vähimmäiskoot, pylvään pintakäsittely ja soveltuminen suomessa käytettyihin jalustoihin
- Pylväiden törmäysturvallisuuden määrittäminen

Puupylväiden osalta on määritelty: [6]

- Standardin SFS-EN 50424 perusteella sallitut ilmajohtokuormat ja taipumat
- Jalusta edellytetään uusissa valaisinpylväiden asennuksissa
- Puupylväiden luokan kelpoisuus maanteillä

Maanteiden, joiden nopeusrajoitus on suurempi kuin 40 km/h ja ohjeessa ”Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015” huomioiden annettut poikkeukset, tulee uusien asennettavien valaisinpylväiden olla aina törmäysturvallisia. Törmäysturvalliset valaisinpylväät jaetaan kahteen eri luokkaan, joiden käyttö riippuu maantien poikkileikkauksesta, sallitusta nopeusrajoituksesta

ja liikennemäärästä. Törmäysturvalliset pylväät jakautuvat energiaa vaimentaviin valaisinpylväisiin (HE) ja väistyviin valaisinpylväisiin (NE) [6].

Törmäysturvallisia energiaa vaimentavia (HE) valaisinpylväitä käytetään esimerkiksi maantiellä, jonka vuoden keskimääräinen vuorokausiliikenne (KVL) on 6000 ajoneuvoa / vuorokausi, maantien rinnalla kulkee kevyenliikenteenväylä tai pyörätie tai maanteiden välikaista (keskialue) on kapea (alle 6,5 m). Väistyviä törmäysturvallisia valaisinpylväitä (NE) voidaan asentaa muun muassa moottoriteiden liittymis- ja erkanemiskaistojen ja ramppien kohdalla. Jäykkiä metallipylväitä (JÄ) käytetään ainoastaan kevyenliikenteen- ja pyörätien valaistukseen [6].

4.3.1 Pylväskalusteet

Pylväskalusteita käytetään tie- ja katuvalaistuksen kaikissa puu- ja metallipylväiden asennuksissa. Metallipylvään kytkentäluukun takana sijaitsee pylväskohtainen pylväskaluste, jonka tehtävä on yhdistää valaisinjohto ryhmäjohtoon ja tätä myöten valaistusverkkoon. Metallipylväessä pylväskalusteena käytetään yleensä kytkentäkalustetta Ensto LCK5-16-10A tai vastaava. Pylväskaluste sisältää 4 kpl 4-napaista vaihtoliitintä (KE-liittimiä, nolla- ja vaihejohtimet) ja yhden 6-napaisen vaihtoliittimen (KO-liitin) suojamaadoitusjohtimille. Kalustesarja sisältää vaihtoliittimien lisäksi 10 A varokepesän. Ilmajohtoasennuksissa pylväskalusteena käytetään eristeen läpäiseviä ja vaihtoliittimiä SL11.11 kalustesarjaa. Puupylväille voidaan maakaapeliasennuksissa käyttää valaisinpylväskaappia Ensto SK160 tai vastaava, joka sisältää tarvittavan varokepesän, varokeen ja vaihtoliitinsarjan. Kaikkien käytettävien pylväskalusteiden kotelointiluokan on oltava vähintään IEC IP20 eli kosteussuojattu [6].

4.4 Jalustat

Jalustan tehtävä on pitää valaisinpylväs pystyssä ja samalla estää maaperän joutumista kosketuksiin pylvään kanssa, sillä maaperä aiheuttaa pylväälle korroosiota ja lyhentää pylvään elinikää huomattavasti. Väyläviraston ohjeessa ”Tie ja valaisinpylväiden ja jalustojen laatuvaatimukset” on määritelty maanteillä käytettävien valaisinpylväiden jalustojen upotustilan mitat, murtokuorma ja DL³-arvon laatuvaatimukset. Pohjamaan- ja ympäristötäytteen materiaalit ja pylväeseen kohdistuva kaatava momentti vaikuttaa jalustan valintaan. Väylävirasto on lisäksi määritellyt jalustoissa käytettävän betonin ja raudoituksien laatuvaatimukset [6].

Pylväiden tukemiseen löytyy myös muita vaihtoehtoja, kuten laippakiinnitys ja teräsjalustan käyttö, mutta näiden vaihtoehtojen käytölle on saatava tilaajan hyväksyntä. Valaisinmaston tukemiseen käytetään yleensä laattajalustaa [6].

4.5 Keskukset

Uudet asennettavat tievalokeskukset asennetaan aina maahan jakokaappiin ja omalla jalustalla. Tievalokeskuksen rakennevaatimuksien pitää olla standardin SFS 2533 mukaisia ja tievalokeskukseen asennettavien kalusteiden kotelointiluokan tulee olla IP 34 (roiskevedenpitävä). Keskuksen ryhmälähdöt järjestetään ja numeroidaan pää- ja piirikaavion mukaisesti [7].

Tievalaistusverkossa asutustaajamissa noudatetaan verkon syötön automaattista poiskytkennän mitoitusta, jossa tulee noudattaa alle viiden sekunnin poiskytkentäaika. Pitkällä taajaman ulkopuolisilla tieosuuksilla tämä johtaisi kohtuuttoman kalliisiin kaapelointiratkaisuihin. Tästä syystä tievalokeskuksen sulakkeet ja johdonsuojakatkaisijat voidaan mitoittaa jakeluverkon mitoitusohjetta noudattaen. Eli ryhmäsulakkeen nimellisvirran tulee olla pienempi kuin ryhmän yksivaiheinen oikosulkuvirta ryhmän päässä. Ryhmäsulakkeet tulee toteuttaa lähtökohtaisesti tulppasulakkeilla, koska automaattikatkaisijat ovat herkkiä laukeamaan liikenteestä johtuvasta tärinästä [7].

5 TASASÄHKÖJAKELU TIEVALAISTUSVERKOSSA

Tasasähköjakelun käyttämistä sähköenergian siirtämisessä ei ole mikään uusi keksintö. 1800-luvulla teollisuudessa ja varakkaiden kodeissa on käytetty tasajännitetekniikkaa. 1900-luvulla Helsingin kaupunki käytti 110 V:n tasajännitteen jakelua ja nykypäivänä on käynnissä erilaisia testialueita tasasähköjakelun siirtämisessä ja käyttämisessä haja-asutusalueilla ja taajama-alueilla. Esimerkiksi Suur-Savossa on rakennettu kahden kilometrin tasasähköjakelulinja 750 V:n tasajännitteellä, joka syöttää yhteensä 4 asuintaloa [36]. Lisäksi tasajännitteisen sähköenergian siirtämisestä on ollut käytössä vuosia, etenekin merenalaisissa suurjännite yhteyksissä, jossa on hyväksikäytetty tasajännitetekniikkaa (High Voltage Direct Current, HVDC). Tasajännitetekniikan edut ovat muun muassa kustannustehokkuus, pienemmät häviöt, tehon hallinta ja pidempien siirtokapasiteetin mahdollistaminen.

Tasasähköjakelun mahdollinen käyttöönotto tievalaistusverkossa vaatii tasasähköjärjestelmän toiminnan tuntemusta. Tässä luvussa perehdytään tasasähköjakelujärjestelmän jännitetasoon, yksi- ja moninapaisen järjestelmän polariteettiin. Tutustutaan järjestelmän suojausten kannalta olennaisiin mitoituksiin liittyviin kysymyksiin kuten esimerkiksi ylijännitesuojaukseen, oikosulkusuojaukseen ja järjestelmän maadoitukseen. Lisäksi perehdytetään tasasähköjärjestelmän olennaisiin komponentteihin kuten verkon vaihto- ja tasasuuntaajiin, LED-valaisimien liitäntälaitteisiin ja yleisesti käytettäviin kaapelointeihin.

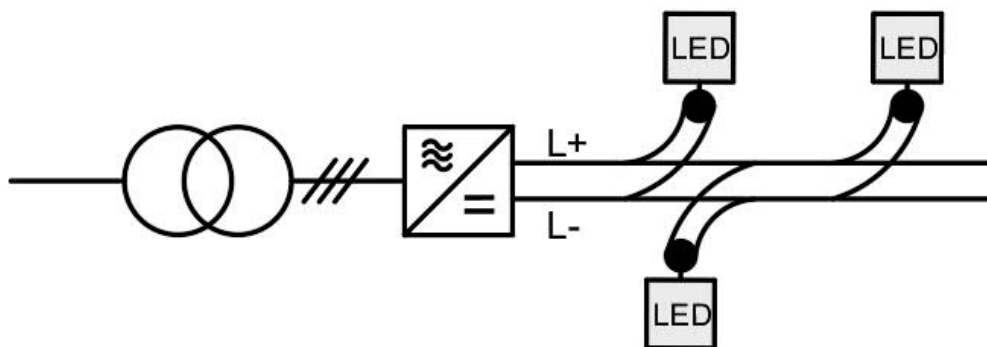
Tasasähköjärjestelmän suunnittelussa ja järjestelmän sisäänajossa tievalaistusverkkoon, tulee kiinnittää erityistä huomiota turvallisuuteen, standardeihin, määräyksiin ja eri valmistajien ohjeisiin tasasähköjärjestelmän korkean jännitetason vuoksi. Käyttämällä tasasähköjärjestelmälle tarkoitettuja komponentteja ja laitteita varmistetaan järjestelmän kestävyys ja korkean jännitteen aiheuttamat rasitukset.

5.1 Tasasähköverkon rakenne

Euroopan direktiivi 2014/35/EU sallii tasasähköjärjestelmän käytettäväksi nimellisjännitealueeksi 75–1500 V (DC). Tasasähköjärjestelmän suunnittelun ja toteuttamisen yksi tärkeimmistä tehtävistä on jännitetason valinta. Jännitetason valinnalla on vaikutusta järjestelmän elinkaarikustannuksiin, järjestelmän rakenteeseen ja turvallisuuteen [5].

Tasasähköjakeluverkko voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, joko unipolaarisena (monopolaarinen) tai bipolaarisena. Unipolaarisen järjestelmän jännite siirto tapahtuu kaksijohtoisena, jossa toinen johdoista toimii menojohtimena (+) ja toinen vastaavasti paluujohtimena (-). Unipolaarisessa järjestelmässä on yksi jännitetaso 1500 V_{DC} [5].

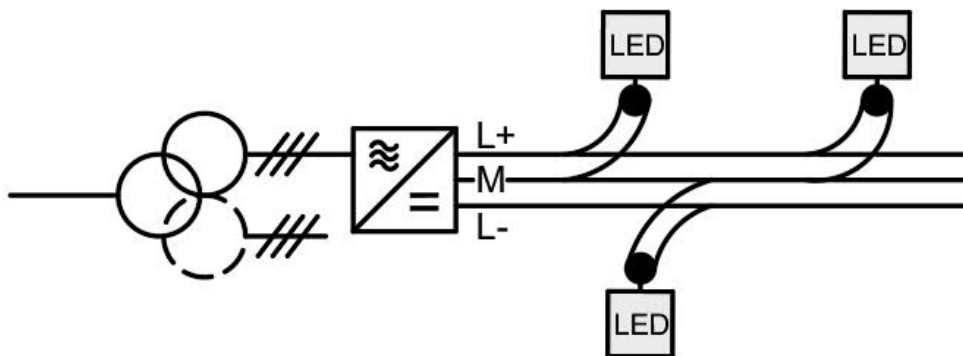
Unipolaarisen järjestelmän sähkön syöttö voidaan toteuttaa suoraan jakeluverkosta kaksikäämimuuntajan avulla. Tasasuuntaaja muodostaa enintään 1500 VDC tasajännitteen meno- ja paluujohtimen välille. Kaksi johtoisen järjestelmän ansiosta valaistusverkkoon ei pääse syntymään vinokuormaa. Järjestelmä sopii hyvin saneerauskohteisiin, jossa ei ole tarkoitus investoida syöttävään vaihtosähköverkkoon. Toisen johtimen katkeaminen tai vahingoittuminen johtaa koko järjestelmän sammumiseen [5,36]. Kuvassa 17 on esitetty kaksijohtoinen unipolaarisen järjestelmän rakenne tievaloverkoissa.



Kuva 17. Unipolaarisen verkon periaate tievaloverkossa. Kuvassa on esitetty liittymiskaapeli, kolmikäämimuuntaja, tasasuuntaaja, johtimet ja LED-valaisimet.

Bipolaarisessa järjestelmässä on kaksi jännitetasoja (± 750 VDC) ja sitä varten jännitesiiro tapahtuu kolmijohtoisena (2 vaihejohtinta ja maajohtin). Ensimmäinen johdin toimii menojohdina (+750 VDC), toinen johdin toimii paluujohtimena (-750 VDC) ja kolmas johdin on maajohtin, jossa kulkee 0 V.

Bipolaarisen järjestelmän sähkön syöttö voidaan unipolaarisen tapaan syöttää suoraan jakeluverkosta kolmikäämimuuntajan avulla. LED-valaisimet kytketään vuorotellen vaihejohtimen ja maajohtimen välille äärijohtimia tasaisesti vuorotellen, välttääkseen vinokuorman syntymistä valoverkossa. LED-valaisimien kytkemisen vuorottelu vaihejohtimeen, mahdollistaa suuremman tehon siirtämistä pidemmille matkoille unipolaarijärjestelmään verrattuna. Toisen johtimen katkeaminen tai vahingoittuminen ei johda koko järjestelmän sammumiseen [5,36]. Kuvassa 18 on esitetty kolmijohtoisen bipolaarisen järjestelmän rakenne tievaloverkoissa.



Kuva 18. Bipolaarisen verkon periaate tievaloverkossa. Kuvassa on esitetty liittymiskaapeli, kolmikäämimuuntaja, tasasuuntaaja, vaihejohtimet, nollajohdin ja LED-valaisimet.

Lopullisen järjestelmän valinta riippuu käyttökohteesta, matkasta ja siirrettävän sähkötehon määrästä. Unipolaarisen järjestelmän käytettävien komponenttien hinnat ovat huomattavasti alhaisempia kuin bipolaarisen järjestelmän komponenttien, mutta toisaalta bipolaarisen järjestelmän avulla päästään huomattavasti pitempiin ryhmäpituuksiin kuin unipolaarisessa järjestelmässä. Elinkaari-kustannuksiin vaikuttaa muun muassa mainitsemani seikat. Joka tapauksessa

tievalaistusverkossa, haja- ja laaja-asutusalueiden sähkön jakelussa on järkevä käyttää yli 600 V jännitettä [5,36].

5.2 Järjestelmän kaapelointi

Nykyisten pienjännitekaapeleiden käyttäminen tasasähköjärjestelmän toteuttamisessa olemassa olevaan tievaloverkkoon on erittäin tärkeä järjestelmän kokonaiskustannuksien alentamisessa. Maakaapelit, esimerkiksi pienjännitekaapelit (0,6/1,0 kV) soveltuvat kaapelistandardien mukaan AC-järjestelmässä aina 1000 V saakka ja DC-järjestelmässä 1500 V saakka. Ilmajohtoasennuksissa esimerkiksi AMKA-riippukierrehjon tasajännitekestoisuus ei ole määritetty [36,37].

Tasajännitteisessä järjestelmässä käytettävien pienjännitekaapeleiden eristeen soveltavuus ja kestoisuus on tutkittu korkean sähkökentän voimakkuuden johdosta. Korkean sähkökentän vuoksi, käytettävien kaapeleiden eristekerrokset ovat entistä herkempiä lämpenemiselle ja sen aiheuttamille rakennemuutoksille [5]. Pienjännitekaapelistandardien mukaan pienjännitekaapeleille suoritetaan 4 kV:n vaihtojännitteellä tai 15kV:n tasajännitteellä erilaisia jännitetestejä sekä kappale- ja tyyppikokeita, joiden avulla testataan pienjännitekaapelin eristekerroksen jännitekestoisuutta. Lisäksi testataan lyhyen vesiupotuksen jälkeen pienjännitekaapelin eristeen eristysvastuksen ja vaipan eheyttä [37].

Pienjännitekaapelin eristysrakenne käyttäytyy hieman eri tavalla riippuen käytetävästä järjestelmästä. Vaihtojännitteisessä järjestelmässä käytettävien pienjännitekaapeleiden eristekerrokseen kohdistuvat sähkökenttävoimakkuudet jakautuvat eristekerrosten mukaan kapasitiivisesti. Vastaavalla tasajännitteellä pienjännitekaapelin eristyksen jänniterasitus jakautuu kaapelin eristekerrosten perusteella resistiivisesti. Näin ollen resistiivisyys, mikä on lämpötilan funktiona ja koska pienjännitekaapeleiden eristekerroksien johtavuus heikkenee lämpötilan noustaessa. Pienjännitekaapelin eristeen johtavuuteen vaikuttaa lämpötilan lisäksi eristeen polarisoituminen sähkökenttävoimakkuuden ollessa yli 7000 V/mm [37].

Tampereen teknillisen yliopiston suurjännitelaboratoriossa on tutkittu pienjännitekaapeleiden eristysteknisiä ominaisuuksia erilaisten testien avulla. Testien avulla haluttiin varmistaa, voidaanko nykyiset käytössä olevat pienjännitekaapelit käyttää tasajännitejärjestelmässä. Tutkittaville pienjännitekaapeleille suoritettiin seuraavanlaiset mittaukset [37]:

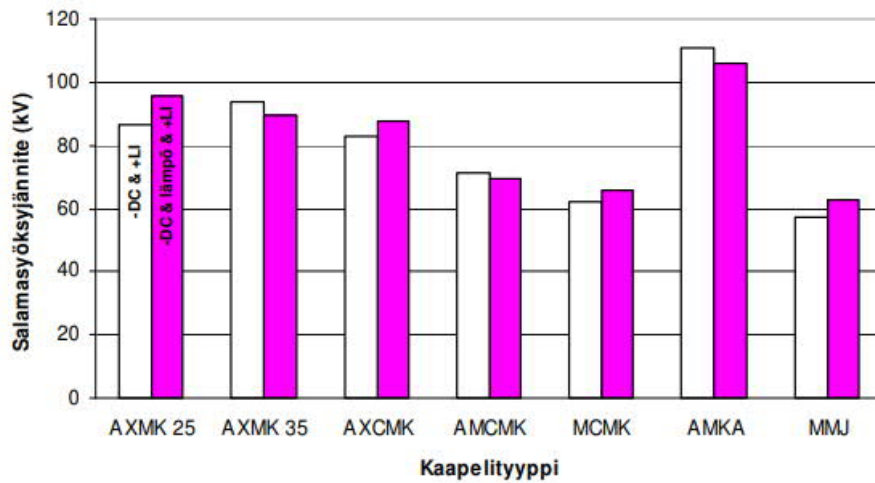
- Läpilyöntijännitemittaukset vaihto- ja tasajännitteellä
- Läpilyöntijännitemittaukset yhdistetyllä tasa- ja syöksyjänniteeräilyllä
- Eristysrakenteiden varautumisen aiheuttaman mahdollisen läpilyöntijännitteen alentumisen selvittäminen
- Kosteusrasitusmittaus

Taulukko 9. Tutkittavien pienjännitekaapeleiden läpilyöntilujuuksien 95 % kesto-
tasot vaihtojännitteellä, tasajännitteellä ja syöksyjännitteellä [37].

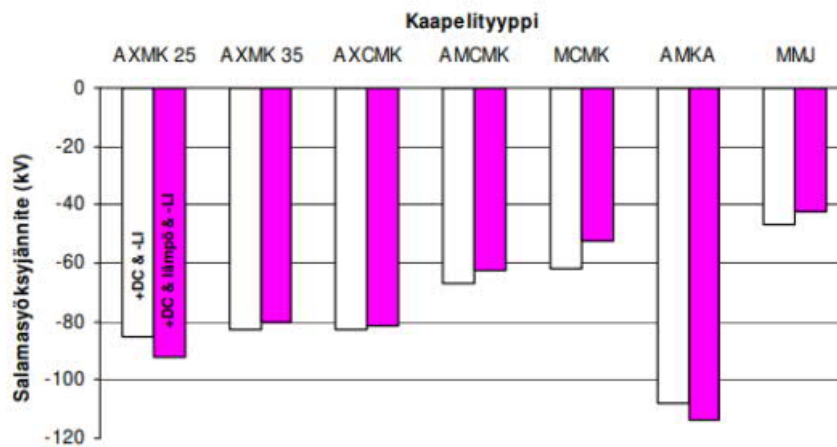
Kaapelityyppi	Vaihtojännite 95 % kestotaso (kV)	Tasajännite (+) 95 % kestotaso (kV)	4 kV DC + syöksyjännite 95 % kestotaso (kV)	
AXMK 4x25	15,6	51,0	86,5	-85,4
AXMK 4x35	31,7	76,5	93,7	-82,6
AXCMK 4x35+16	31,6	65,7	82,9	-82,5
AMCMK 3x16+10	27,3	58,2	71,0	-67,0
MCMK 3x16+16	-	-	62,0	-61,9
AMKA 3x25+35	40,2	87,2	111,0	-107,8
MMJ 3x10	20,9	30,4	57,3	-46,8

Mahdollisten varautumisilmiöiden vaikutuksia tutkittiin pienjännitekaapeleiden läpilyöntimittauksessa yhdistetyllä tasa- ja syöksyjännitteellä. Tutkimuksessa esirasitettiin +4 kV tasajännitteeseen tutkittavia kaapeleita kaksi vuorokautta lämpötilassa +65 °C. Tämän jälkeen yhdistetty tasa- ja syöksyjännitemittaukset tehtiin ampumalla jännitepulssit kaapeliin, jossa oli samanaikaisesti 4 kV:n vastakkaismerkkinen tasajännite. Varautumisilmiöiden vaikutus voidaan havaita

kuvien 19 ja 20 tuloksista. Syöksyjännitetestisarjojen tulokset ovat esitetty kuvissa 19 ja 20 [37].



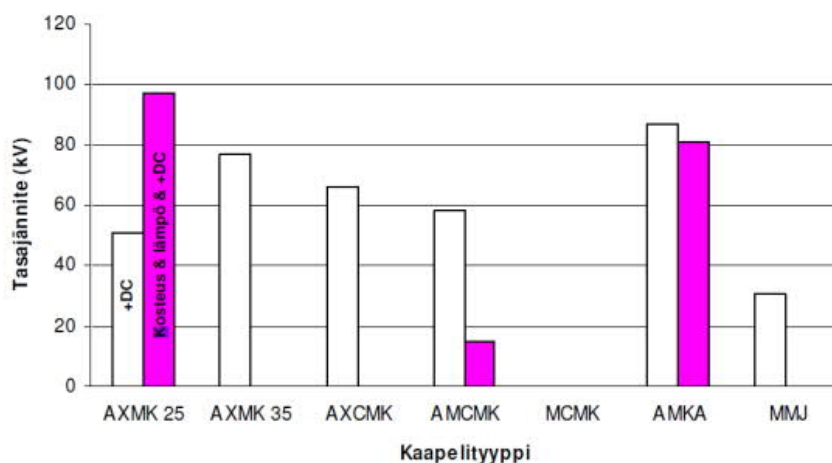
Kuva 19. Salamasyöksyjännitteellä tehtyjen läpilyöntitestien mittaustuloksista lasketut salamasyöksyjännitteen 95 % kestopot, kun käytössä oli -4 kV tasajännitettä ja positiivista salamasyöksyjännitettä [37].



Kuva 20. Salamasyöksyjännitteellä tehtyjen läpilyöntitestien mittaustuloksista lasketut salamasyöksyjännitteen 95 % kestopot, kun käytössä oli +4 kV tasajännitettä ja positiivista salamasyöksyjännitettä [37].

Kosteusrasitusmittauksessa testataan pienjännitekaapeleiden kosteuden läpäisyä ja sen vaikutus eristyksen läpilyöntilujuuteen. Testissä pienjännitekaapelit pidetään viikko +70 °C vedessä, jonka jälkeen mitataan

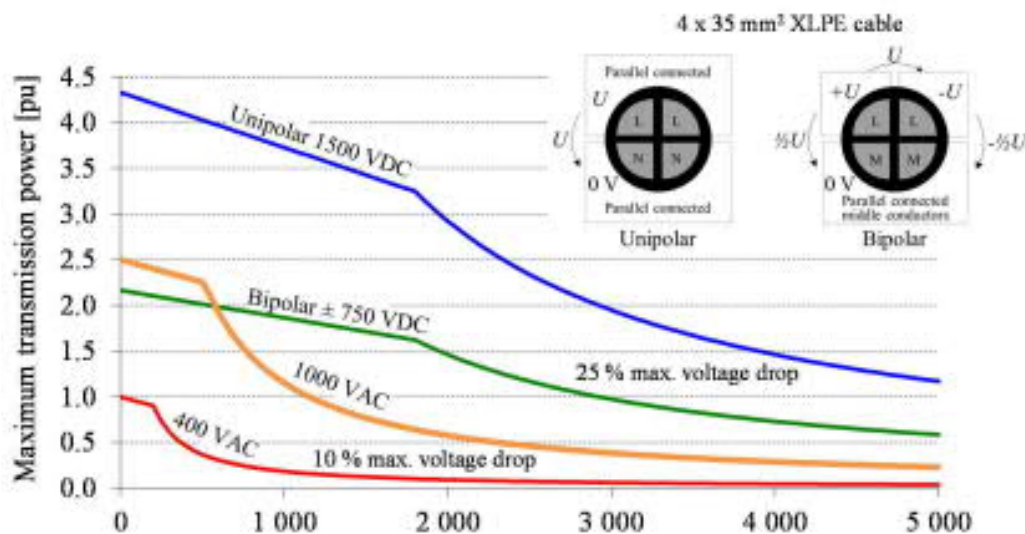
pienjännitekaapeleiden läpilyöntilujuus tasajännitteellä. Kuvassa 21 on esitetty pienjännitekaapeleiden jännitelujuuksien 95 % kestopasolla [37]. Kuvassa esitetty valkoinen diagrammi kuvaa pienjännitekaapelin läpilyöntilujuutta ennen kosteusrasitusta ja violetti puolestaan kosteusrasituksen jälkeen.



Kuva 21. Pienjännitekaapeleiden jännitelujuuksien 95 % kestopasolla läpilyöntilujuutta ennen kosteusrasitusta ja kosteusrasituksen jälkeen [37].

Testejä suoritettiin AXMK (PEX)-, AMCMK (PVC)- ja AMKA(HIDE)-pienjännitekaapeleille. Tehtyjen mittausten perusteella pienjännitekaapelit kestävät suuria ylijännitteitä, mutta lyhytaikaisesti. Pienjännitekaapeleiden pitkäaikaista tasajännitekestoisuutta ei testattu, mutta tästä huolimatta muut testien tulokset viittaisivat siihen tulokseen, että pienjännitekaapelit soveltuvat 1500 V tasajännitteisessä järjestelmässä. Kosteusrasitusmittauksessa PVC-eristeen AMCMK-pienjännitekaapelin läpilyöntilujuus heikkeni todella paljon kosteuden takia. Eli AMCMK (PVC)-eristeistä pienjännitekaapeleista ei suositella käytettäväksi kosteissa asennusolosuhteissa. Vastaava tilannetta ei tullut AXMK(PEX)-eristeisessä pienjännitekaapelissa, joten PEX-eristeiset pienjännitekaapelit soveltuvat paremmin käytettäväksi tasajännitteisessä järjestelmässä. Ilmajohdot ovat alttiita erilaisilla mekaanisilla kulutuksille, joten AMKA-johtoa käytettäväksi tasajännitteisessä järjestelmässä tulee olla erityisen huolellinen [37].

Kuvassa 22 on esitetty AC-järjestelmän ja DC-järjestelmän kaapeleiden siirron tehokapasiteetti suhteutettuna pituuteen eri jännitetasoissa. Kaapeleiden lähtöpään jännitetasoja on otettu AC-järjestelmästä 400 VAC ja 1000 VAC. Vastavasti DC-järjestelmästä on esitetty ± 750 VDC bipolaarisen järjestelmän ja 1500 VDC unipolaarisen järjestelmän tehokapasiteetin muutos [36]. Kuvan perusteella huomataan muun muassa, että bipolaarisessa tasajännitejärjestelmässä tehonsiirtokapasiteetti on 15 kertaa suurempi kuin vaihtosähköjärjestelmässä käytettävä 400 V, vaikka molemmissa järjestelmissä pienjännitekaapelin poikkipinta-ala on sama.



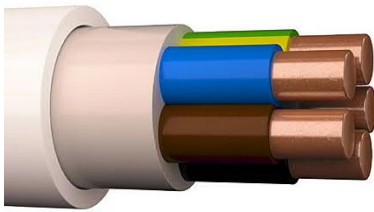
Kuva 22. AC- ja DC-järjestelmän kaapeleiden siirtokapasiteetti suhteutettuna johdon pituuteen.

Väyläviraston omistamilla maanteilla käytetään aina PVC-eristettyä, konsentrista kuparisuojajohdinta, alumiinijohtimista AMCMK 4 x xx+yy maakaapelia. Maakaapelissa ei ole erillistä PE-johdinta (keltavihreä), joten maakaapeli sopii merkintöjen puolesta erinomaisesti tasajännitteisen järjestelmään. Kuvassa 23 on esitetty viisijohtiminen maakaapeli konsentrisella johtimella [38]



Kuva 23. AMCMK- viisijohtiminen maakaapeli konsentrisella johtimella [38].

Valaisinpylvään asennuskaapelina valaisimen ja kytkentätilan välisenä valaisinjohtona käytetään muovivaippajohtoa MMJ 5x1,5S. Standardin SFS 2091 mukaan asennuskaapeli soveltuu enintään 800 V tasajännitteiseen järjestelmään, johdinpoikkipinta-ala ollessaan 1,5–6 mm² [5]. Kuvassa 24 on esitetty muovieristeinen asennuskaapeli [38].



Kuva 24. MMJ- muovieristeinen asennuskaapeli

Tampereen yliopiston suurjännitelaboratoriossa on tutkittu ilmajohdon (AMKA) käytettävyyttä tasajännitteisessä järjestelmässä. Tulosten perusteella riippukierrekaapelin käyttämiselle ei ole teknisiä esteitä [5]. Kuvassa 25 on esitetty riippukierrekaapelin rakenne [39].

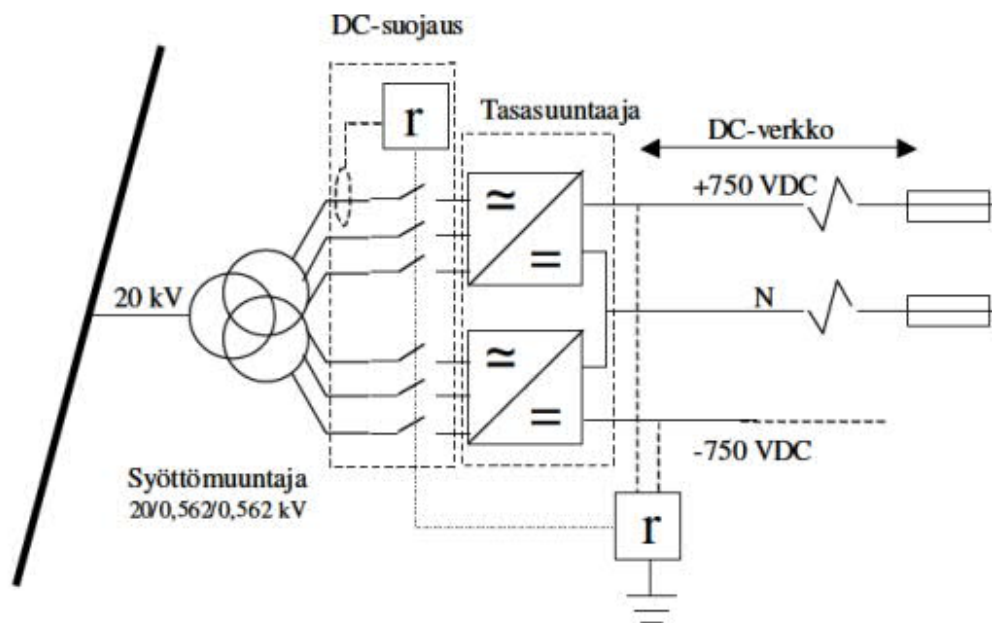


Kuva 25. Riippukierrekaapeli (AMKA).

5.3 Tasa- ja verkonvaihtosuuntaajat

Vaihtosähkön muuttaminen tasasähköksi voidaan toteuttaa monella eri tavalla ja käyttämällä erilaisia komponentteja, kuten esimerkiksi aktiivisia kytkinkomponentteja (Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT), diodeja tai tyristereja. Yksinkertainen sähkötehon tasasuuntauksen toteuttamiseen bipolaarisessa järjestelmässä on käyttää 12-pulssisia diodi- ja tyristoritasasuuntaajia. Sähkötehon siirtäminen keskijänniteverkosta (AC-järjestelmästä) pienjänniteverkkoon (DC-järjestelmään) voidaan toteuttaa käyttämällä Vienna-suuntaaja. Vienna on kehittyneempi tasasuuntaaja, jonka avulla saadaan virran tehokertoimen korjaus syöttävästä verkosta [5,37].

Verkkovaihtosuuntaajan aktiivisten kytkinkomponenttien avulla sähkötehon siirto voidaan toteuttaa kaksisuuntaisesti, eli sähkötehoa voidaan siirtää vaihtosähköverkosta tasasähköverkkoon ja takaisin vaihtosähköverkkoon. Verkkovaihtosuuntaaja mahdollistaa laajan hajautetun tuotannon liittämisen tasajännitteeseen verkkoon [5,37]. Hajautetun tuotannon liittämistä tasajännitesähköverkkoon ei tulla tässä tutkimuksessa käsittelemään. Kuvassa 26 on esitetty LVDC-järjestelmän perusrakenne [5].



Kuva 26. LVDC-järjestelmän rakenne

Suuntaajat luokitellaan rakennetasojen mukaan (yksi-, kaksi- tai kolmetasoisia). Tasajänniteverkon jännitetaso ei voida manuaalisesti säätää yksitasoisella tasa-suuntaajalla, vaan syöttävän verkon jännitetaso määrää tasasähköjännitteen jännitetasoa. Tasasähköverkon napajännite on laskettavissa kaavan (2) mukaisesti [5].

$$u_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{ac} \quad (\text{kaava 2})$$

Jossa:

u_{dc} Tasajännite äärijohtimen ja paluujohtimen välillä

U_{ac} Vaihtojännitteen pääjännite

Esimerkiksi jos tasasähköjakelun kahden vaiheen napajännitteeksi halutaan 750 VDC, täytyy vaihtosähköverkon pääjännite olla 556 V ja vaiheiden välinen vaihesiirto tulee olla 30 astetta. 30 asteen välinen vaihesiirto saadaan onnistumaan ainoastaan kolmikäämisellä muuntajalla. Yksinkertaisempia suuntaajia ovat yksi- ja kaksitasoiset suuntaajat, joissa yksittäiseen kytkinkomponenttiin vaikuttaa välipiirin kokonaisjännite. Käytettäessä yksi- ja kaksitasoista suuntaajaa on mitoitettava kytkinkomponentin jännitekestoisuus vähintään kaksinkertaiseksi järjestelmän nimellisjännitteeseen nähden. Kolmetasoisessa suuntaajassa on tuplasti enemmän kytkinkomponentteja ja näin ollen järjestelmän kokonaisjänniterasitus jakautuu kytkinkomponenttien kesken tasaisemmin [5].

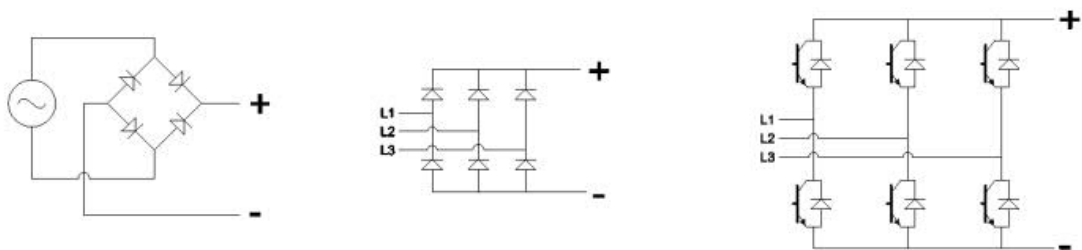
5.3.1 Tasasuuntaajat

Tasasähköjärjestelmän toiminnan jatkuvuuden varmistamiseksi tasasuuntaajan rakenne koostuu diodisilloista ja vähintään puoleksi ohjatuista tyristorisilloista. Ohjattuja tyristorisilloja käytetään järjestelmän käynnistystilanteen hallinnan vuoksi. Aktiivikomponenteilla voidaan parantaa tasasuuntaajan ominaisuuksia ja ohjattavuutta [36,37].

Diodisiltojen hyvät puolet ovat yksinkertaisia: ne ovat hankintahinnaltaan edullisia, pitkäikäisiä, toimintavarmoja ja niillä on korkea hyötysuhde. Diodisiltojen huono puoli on se, ettei niitä voida ohjata. Tästä johtuen tasajänniteverkkoon tarvitaan latauspiirejä pienentämään esiintyviä latausvirtapiikkejä järjestelmän käynnistyessä [37].

Tyristorisiltoja voidaan käyttää kahdella eri tavalla- joko puoleksi ohjattuina tai kokonaan ohjattuina. Puoleksi ohjatuissa tyristorisilloissa komponenteista puolet koostuu diodeista ja puolet tyristoreista. Kokonaan ohjatussa tyristorisillassa komponentit koostuvat kokonaan tyristoreista. Käyttämällä puoleksi ohjattua tyristorisiltaa, pienennetään tasasuuntaajan lähtöjännitettä. Näin voidaan järjestelmä käynnistää hallitusti ilman erillistä latauspiiriä. Muuttamalla tyristorien sytytyskulmaa saadaan laskettua tasajänniteverkon jännitetasoa. Tyristorien sytytyskulman muuttamista ei kuitenkaan suositella, sillä säätö aiheuttaa säröä vaihtosähkövirralle ja tehokerroin pienenee [36,37].

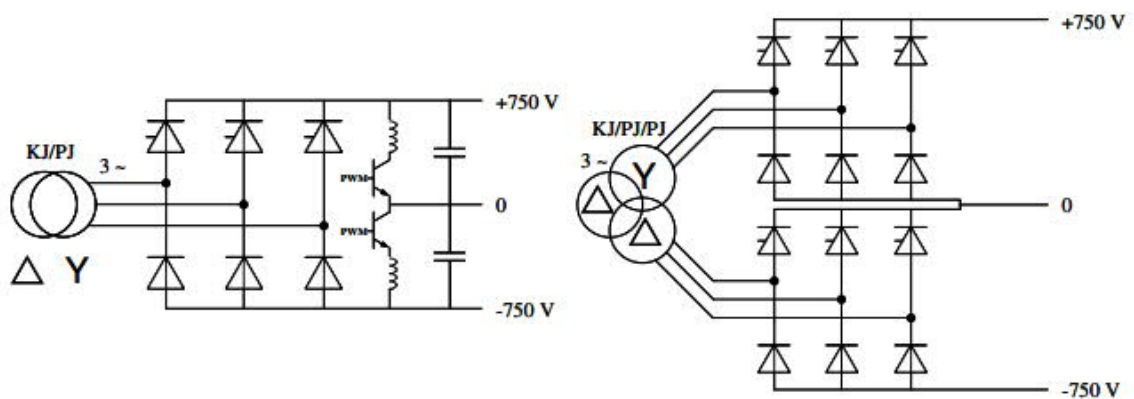
Täysin ohjatulla tyristorisillalla ei saada aikaiseksi merkittäviä hyötyjä, joten kustannuksien kannaltakin on parempi käyttää puoleksi ohjattuja tyristorisiltoja. Käyttämällä diodi- tai tyristorisiltoja voidaan sähkötehoa siirtää ainoastaan yhteen suuntaan. Mikäli sähkötehoa halutaan siirtää kaksisuuntaisesti eli AC-verkosta DC-verkkoon ja takaisin AC-verkkoon on järkevä käyttää kahta täysin ohjattua vastarinnankytkettyä suuntaajaa. 12-pulssista puoliksi ohjattua tyristorisiltaa riittää, jos tasajänniteverkosta ei tarvitse siirtää sähkötehoa takaisin syöttävään verkkoon (AC-verkkoon) [37]. Kuvassa 27 on esitetty vaihtoehtoja tasasuuntausmenetelmille [5,36].



Kuva 27. Tasasuuntausmenetelmien eri kytkentävaihtoehtoja.

Kuvassa vasemmalla esitettyssä kytkentäperiaatteessa yksivaiheinen vaihtovirta muutetaan tasavirraksi neljän diodin avulla. Keskimmaisessä kytkentäperiaatteessa kolmivaiheinen vaihtovirta muutetaan tasavirraksi kuuden diodin avulla ja oikealla kytkentäperiaatteessa kolmivaiheinen vaihtovirta muutetaan tasavirraksi kuudella pulssiohjatulla tehotyristorilla (IGBT) [5,36].

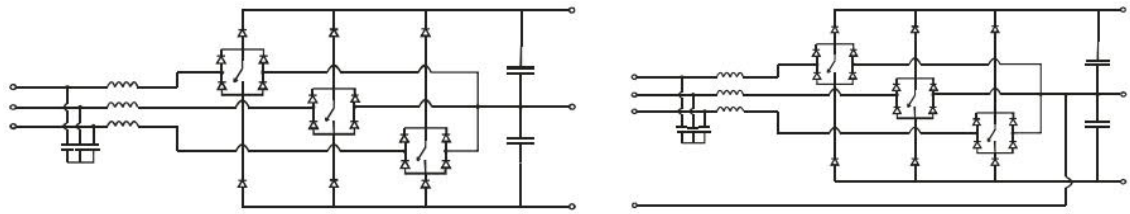
Unipolaarisessa järjestelmässä käytetään kuuden pulssijärjestelmän ja bipolaarisessa järjestelmässä käytetään kahdentoista pulssijärjestelmän kytkentää. Kahdentoista pulssijärjestelmä sisältää kaksi kuuden pulssijärjestelmän kytkentää, jotka ovat rinnan- ja sarjaan kytkettynä. Bipolaarisen järjestelmän syöttö tapahtuu suoraan muuntajalta. Bipolaarisessa järjestelmässä jokaiselle jännitetasolle tarvitaan oma tasasuuntaajansa [36,37]. Kuvassa 28 on esitetty puoliksi ohjattu 12-pulssinen tehotyristorin rinnan- ja sarjaan kytkettynä [37].



Kuva 28. Bipolaarisen järjestelmän puoliksi ohjatun tyristoritasasuuntaaja rinnankytkettynä ja sarjaan kytkettynä.

Bipolaarisessa järjestelmässä voidaan hyödyntää Vienna-tasasuuntaajan sähkötehön siirtoa vaihtosähköverkosta tasasähköverkkoon. Vienna on rakenteeltaan yksinkertainen, jossa käytetään kolmea aktiivikytkintä. Aktiivikytkimien avulla voidaan muun muassa muokata tasajänniteverkosta tulevan virran käyrämuotoa, jolloin virran särötaso saadaan matalammaksi. Lisäksi aktiivikytkimien avulla pienennetään muuntajahäviöitä. Vienna-tasasuuntaajan huono puoli on suuntaajan korkea hankintahinta. Kuvassa 29 on esitetty Vienna-tasasuuntaaja

nollajohtimella (kuvan oikeapuolimmainen kytkentäperiaate) ja ilman nollajohdinta (kuvan vasemmanpuolimmainen kytkentäperiaate) [37].



Kuva 29. Vienna-tasasuuntaaja nollajohtimen ja ilman nollajohdinta

5.3.2 Verkonvaihtosuuntaajat

Verkkovaihtosuuntaajat ovat joko kaksi- tai kolmitasoisia PWM (Pulse Width Modulation), eli pulssinleveysmodulaatio-ohjattuja IGBT-tehotyristoreja, jotka mahdollistavat muun muassa 1400 voltin tasajännitteen suuntaukseen 400 voltin vaihtojännitteeksi [36]. Verkkovaihtosuuntaajin rakenteessa käytetään aktiivisia komponentteja, joiden ansiosta sähkötehoa voidaan siirtää kaksisuuntaisesti eli AC-verkosta DC-verkkoon ja takaisin AC-verkkoon. Verkkovaihtosuuntaajan IGBT-tehotyristoreiden rakenne on esitetty kuvassa 29 (oikeanpuolimmainen kytkentäperiaate). IGBT-tehotyristorit mahdollistavat hajautetun tuotannon liittämisen tasajänniteverkkoon ja sähkötehon siirtämisen tasajänniteverkkoon. Tasajänniteverkon jännitetasoa voidaan pitää vakiona riippumatta vaihtojänniteverkon jännitetasosta suuntaajan säädön avulla [5,37].

Verkkovaihtosuuntaajat ovat hankintahinnaltaan kalliimpia kuin esimerkiksi tyristori- ja diodisillat, joten suuntaajan käyttö yksisuuntaisessa tehonsiirrossa ei ole järkevää. Verkkovaihtosuuntaajat vaativat tämän lisäksi LCL-verkkosuodattimen, joka tarjoaa tarvittavan energiavaraston ja suodattaa AC- tai DC-verkossa esiintyviä yliaaltoja. Tyristori- ja diodisillat eivät tarvitse LCL-suodatinta toimiakseen, vaan muuntajan hajainduktanssi riittää [37].

Muun muassa ABB:n tuotevalikoimasta löytyy tievalaistuskeskukseen soveltuvia tasasähkösuuntaajia. DCS800-suuntaajat muodostuvat 12-pulssisillasta ja

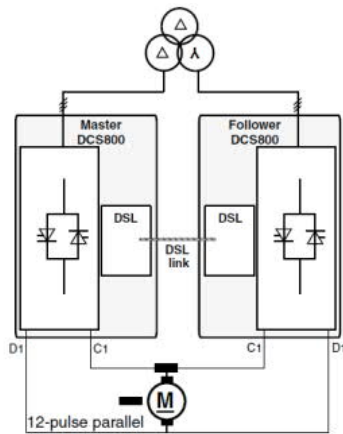
ohjainlaitteista. Pulssisiltoja on saatavilla yksiankkurisia eli toisen tehokvadrantin (2-Q)-mallia yksisuuntaiseen sähkötehon siirtoon tai kaksiankkurisia, eli neljännen tehokvadrantin (4-G)-mallia kaksisuuntaiseen sähkötehon siirtoon. Kaksiankkurinen tehokvadrantia valitaan ainoastaan, jos tievalaistusverkkoon ollaan liittämässä hajautettua tuotantoa. DCS-tasasuuntaajan lähtöjännite on verrannollinen suuntaajan syöttöjännitteeseen. Taulukossa 10 on esitetty DC-tasasuuntaajien syöttävän verkon AC-liitäntäjännitteet ja niitä vastaavia DC-lähtöjännitteitä [40].

Taulukko 10. Tasasuuntaajien AC-liitäntäjännitteet ja vastaavia DC-lähtöjännitteitä.

System connection voltage	DC voltage (recommended)		Ideal DC voltage without load	Recommended DCS800 voltage class
	U_{VN} [V]	$U_{dmax\ 2-Q}$ [V]	U_{d10} [V]	
230	265	240	310	04
380	440	395	510	04
400	465	415	540	04
415	480	430	560	04
440	510	455	590	05
460	530	480	620	05
480	555	500	640	05
500	580	520	670	05
525	610	545	700	06
575	670	600	770	06
600	700	625	810	06
660	765	685	890	07
690	800	720	930	07
800	915	820	1060	08
990	1160	1040	1350	10
1200	1380	1235	1590	12

Taulukon perusteella syöttöjännitteen ollessa 1200 V_{AC}, suurin mahdollinen DC-puolen jännitetaso kaksiankkurisen tehokvadrantin suuntaajalla saavuttaa 1380 V_{DC} ja neljännen tehokvadrantin suuntaajalla 1235 V_{DC}. Tasasähköllä käytettävän korkein nimellisjännite 1500 V_{DC} voidaan saavuttaa kahdella rinnankytkennällä. Kuvassa 30 on esitetty kahden DCS-tasasuuntaajan rinnakkainkytkentä.

Rinnakkaiskytkennän syöttö tapahtuu suoraan kolmikäämimuuntajan avulla, jonka toisiopuolen käämien välinen vaihe-ero on 30 astetta [40].



Kuva 30. Kahden DCS-tasasuuntaajan rinnakkainkytkentä

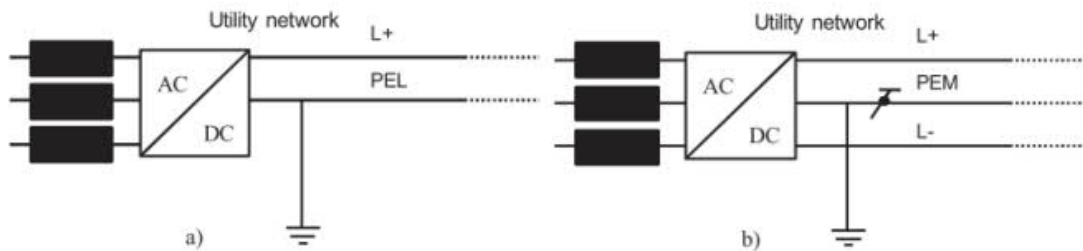
5.4 Tasasähköjärjestelmän suojaus

Tasasähköjärjestelmän suojaus on monimutkaisempi kuin vaihtosähköjärjestelmän suojaus. Monimutkaisuus tuo samalla monia hyödyllisiä etuja, kuten esimerkiksi vianpaikannuksen määrittäminen ja kosketusjännitteen että vikavirran paikallinen hallinta helpottuu. Tasasuuntaajien suojauskonseptin avulla voidaan saavuttaa toiminnallisia ja kustannuksellisia etuja vähentämällä valaistusverkossa esiintyviä muita suojalaitteita [5,37]. Tässä kappaleessa käydään tasasähköjärjestelmän maadoituksen, ylijännitesuojauksen ja oikosulkusuojauksen olennaiset asiat.

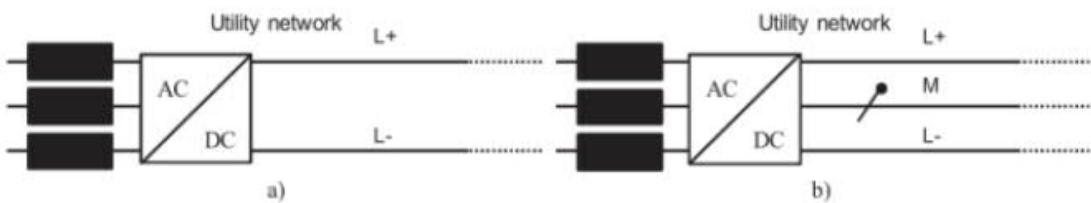
5.4.1 Järjestelmän maadoitus

Valaistusverkon maadoittamisen riittävyys ja toimivuus on tärkeä osa koko tasasähköjärjestelmän sähköturvallisuutta. Mikäli järjestelmän nollajohdin katkea ja maadoitus on vähäinen tai riittämätön, järjestelmän metallisten osien runkossa voi esiintyä hengenvaarallisia kosketusjännitteitä. Jakelujärjestelmissä käytetyt kirjainyhdistelmät ovat standardin IEC 60364 mukaisia [5,37].

Tasasähköjärjestelmän vaihtoehtoiset maadoitusjärjestelmät ovat joko maadoitettu TN-järjestelmä tai maasta erotettu IT-järjestelmä [5,37] Kuvassa 31 on esitetty maadoitettu unipolaarinen TN-järjestelmä (a) ja bipolaarinen TN-järjestelmä (b). Kuvassa 32 on esitetty maasta erotettu maadoitusperiaate unipolaarisessa TN-järjestelmässä (a) ja bipolaarisessa TN-järjestelmässä (b) [5].



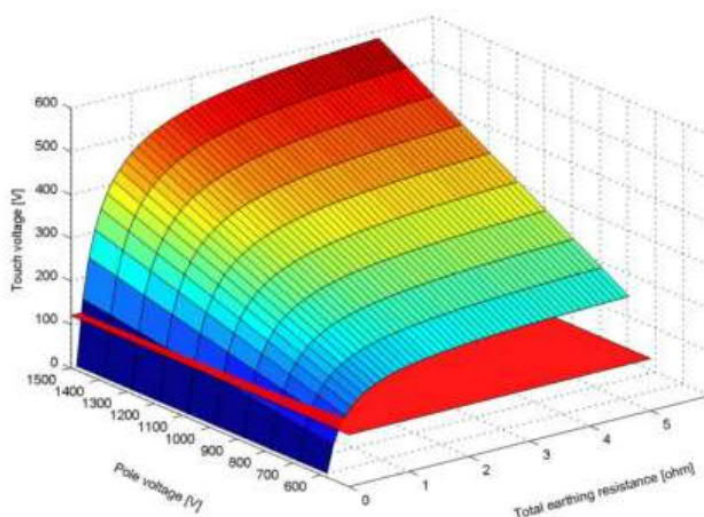
Kuva 31. Maadoitettu TN-järjestelmä a) Unipolaarisessa järjestelmässä, b) Bipolaarisessa järjestelmässä.



Kuva 32. Maasta erotettu IT-järjestelmä a) Unipolaarisessa järjestelmässä, b) Bipolaarisessa järjestelmässä.

Maadoitetussa TN-järjestelmässä ei esiinny nollapisteen siirtymistä, sillä yksi piste on suojamaadoitettu. Järjestelmässä sähköä johtavat osat on kytketty kyseiseen pisteeseen maadoitusjohtimella. Riittävä oikosulkuvirta, vikapaikan nopea havainnointi ja suojauksen nopea reagointi ovat TN-järjestelmän suojauksen kannalta olennaisia vaatimuksia. Maasta erotetussa IT-järjestelmän paluujohtin ja nollajohdin ovat irrallisia maatasosta eli järjestelmässä sähköjännitteille alttiit osat yhdistetään suoraan maahan. Ongelma syntyy, jos paluujohtin katkeaa, jolloin syntyy potentiaaliero maatasoon nähden [5,37].

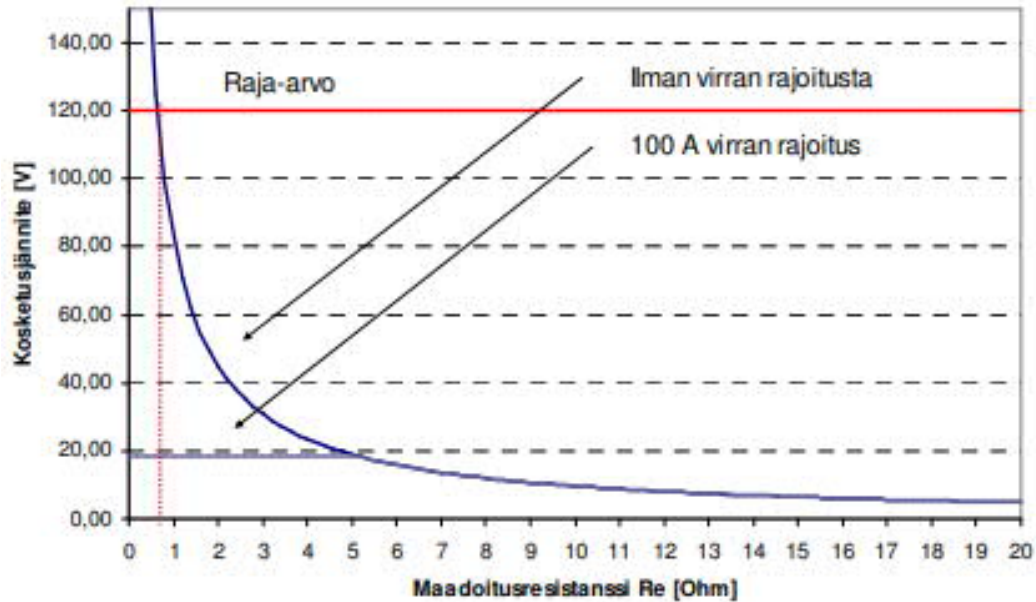
Tasavirtajärjestelmän korkean jännitetason ongelmaksi nousee järjestelmän kosketusjännitteen nousu vikatilanteessa. Kuvasta 33 huomataan, että standardissa IEC 60364-4-41 määritelty turvallisen kosketusjännitteen yläraja 120 V ylittyy hyvin helposti kuorman kasvaessa. Esimerkiksi vian sattuessa yhden kilometrin bipolaarisessa järjestelmässä ± 750 V, kosketusjännite johtojen päässä nousee 160 volttiin. Maasulkupaikan maadoitusvastus (Suomen maaperässä noin $2300 \text{ m}\Omega$) aiheuttaa kosketusjännitteen nousua [5]. Kuvassa 34 on esitetty maapotentialin nousun vaikutus vikatilanteessa. Vaaka-akselilla on esitetty tasavirtajärjestelmän napajännite ja eristysvastus. Pystyakselilla on esitetty vika paikan kosketusjännite. Punertava väri kuvastaa hengenvaaralliset kosketusjännitteet ja sinertävät matalat kosketusjännitteet. 120 V:a pidetään turvallisen kosketusjännitteen ylärajana, mikä on esitetty kuvassa punaisella tasolaatikkona [5,37].



Kuva 33. Maatason vaikutus vaihejohtimen ja maan välillä vian sattuessa maadoitetussa järjestelmässä.

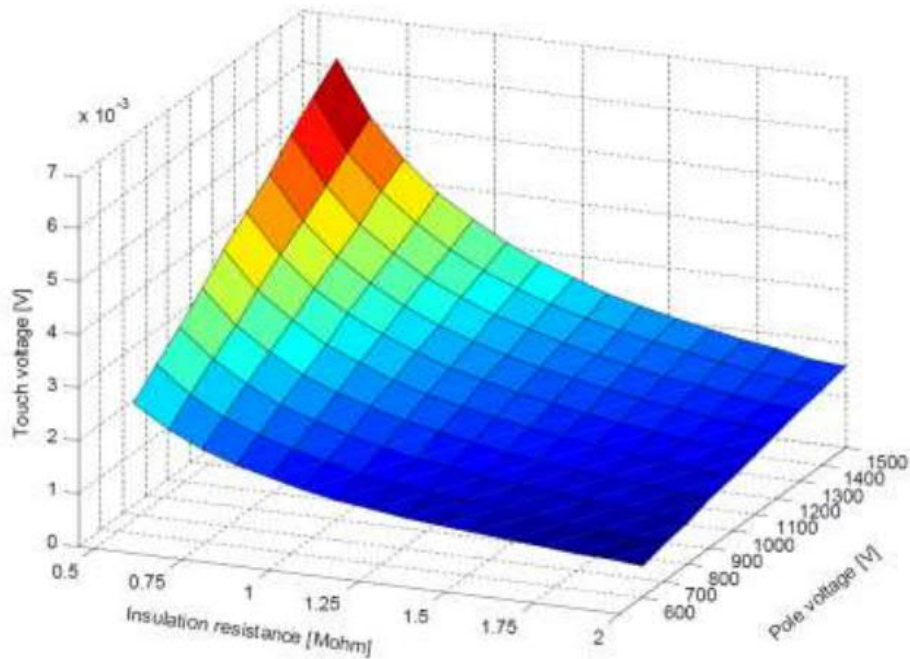
Tasavirtajärjestelmän kosketusjännitettä voidaan pienentää parantamalla järjestelmän kokonismaadoitusta eli asentamalla saattomaadoitusta maaperän maadoitusvastuksen ollessa liian suuri tai käyttämällä pienempiä jännitetasoisia järjestelmiä. Kosketusjännitteen arvoa voidaan pitää standardissa määritetyllä turvallisella alueella käyttämällä aktiivisia suojalaitteita, jotka rajoittavat

maasulkuvirran. Kuvassa 34 on esitetty suojausta, jonka toimintaperiaate perustuu virran rajoitukseen. Kuvassa on käytetty 100 A:n virranrajoitus, jonka avulla kosketusjännite on saatu tippumaan 20 V:iin [5,37]



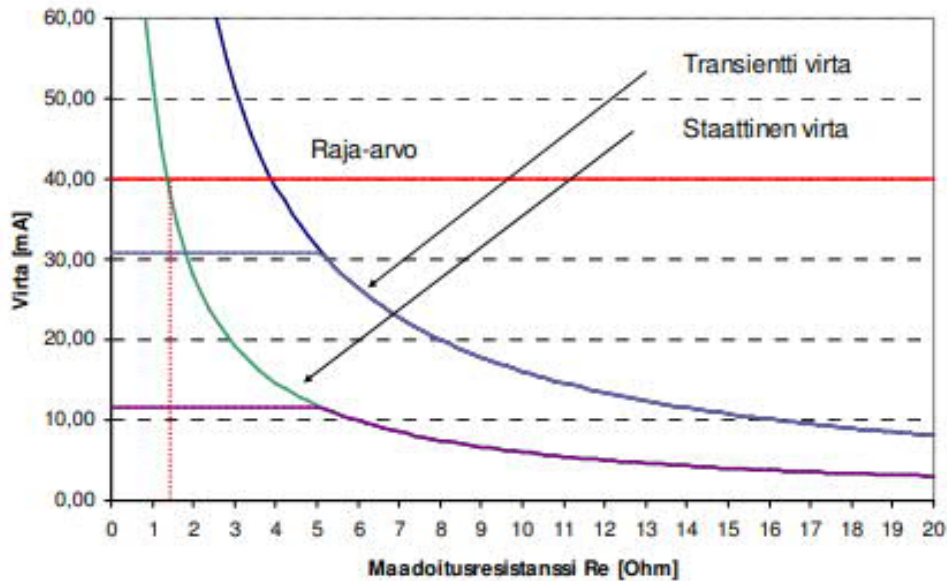
Kuva 34. Virran rajoituksen vaikutus kosketusjännitteeseen.

Maahan vuotava vika ei aiheuta kosketusjännitteeseen nousua maasta erotetussa IT-järjestelmässä. Järjestelmän vaarana on, että järjestelmä toimii maadoitetun järjestelmän tapaisesti, jos järjestelmässä havaittu vika ei pystytä korjaamaan nopealla aikataululla. Kuvassa 35 on esitetty kosketusjännitteen käyttäytyminen eristysvastuksen pienentyessä [5,37].



Kuva 35. Maatason nousun vaikutus maasta erotetussa järjestelmässä, jossa on käytetty 5Ω vikavastuksen.

Valaistusverkon kulutuskojeet valikoidaan siten, että ne kestävät hetkellisen jännitetasen nousun. Järjestelmässä käytettävien suojauksien täytyy tunnistaa verkossa esiintyviä maasulkutilanteita ja niiden tulee rajoittaa kosketusvirta alle 40 mA. Kuvassa 36 on esitetty maasta erotetun järjestelmän maadoitusresistanssin vaikutus kosketusvirtaan. Kuvasta nähdään, että vikavirta ylittää 40 mA maadoitusresistanssin ollessa $1,5\ \Omega$. Tästä johtuen järjestelmässä käytettävät suuntaajat on varustettava virranrajoitustoiminnolla [5,37].



Kuva 36. Kosketusvirran vaikutus maadoitusresistanssiin.

5.4.2 Järjestelmän ylijännitesuojaus

Kuten vaihtosähköverkko varustetaan ylijännitesuojilla niin tasasähköverkko varustetaan myös ylijännitesuojilla. Ainut poikkeus verkkojen välillä on, että tasasähköverkossa ilmajohtoasennuksissa ylijännitesuojauksen käyttö on välttämätöntä. Jättämällä transistorien kytkin avoimeen tilaan saadaan puolijohdekomponentit kestävämmän nimellisjännitettään suurempiakin ylijännitteitä [5,37].

Tasasähköverkossa käytettävien laitteiden ja komponenttien on täytettävä eristyskoordinaatiossa esitetyt jännitekestoisuusrajat. Näin varmistetaan, että verkossa tapahtuvat eristysvaurioita aiheuttavat ylijännitteet ovat sallitulla tasolla. Eristyskoordinaation oleelliset tehtävät ovat sähköjärjestelmän ja siihen kuuluvissa laitteissa tapahtuvien ylijännitteiden kontrollointi ja sähköturvallisuus. Lisäksi eristyskoordinaatio huomioi järjestelmässä tapahtuvia jänniterasituksia, jotka on jaettu viiteen eri ryhmään vaikutusajan mukaisesti: jatkuva käyttöjännite, viasta aiheutuneet käyttötaajuiset ylijännitteet, kytkentäylijännitteistä tapahtuvat hitaat transienttijännitteet, nopeat transienttijännitteet ja ilmastollisista ylijännitteistä johtavat erittäin nopeat transienttijännitteet [5,37].

Standardissa IEC 60664-1 ”Insulation coordination for equipment within low-voltage systems” on määritelty jakeluverkkoon liitettävien pienjännitelaitteiden käytettävien komponenttien syöksyjännitekestoisuudet. Eristystasolla neljä vaaditaan tasasähköverkolle, jonka johtojen välinen napajännite on yli $750 V_{DC}$ ja vaihtosähköverkolle jännitteen ollessa yli $1000 V_{AC}$, käytettävien komponenttien $12 kV$:n syöksyjännitekestoisuudet [5,37].

Tasasähköjärjestelmän ylijännitesuojien mitoituksessa käytetään samaa mitoitusta kuin suuntaajien aktiivisien kytkinkomponenttien mitoituksessa. Lisäksi käytönaikana järjestelmässä esiintyy suurtaajuisia jännitevärähtelyitä, joiden huippuarvo nousee napajännitteeseen $750 V_{DC}$, jolloin jännitetaso maata vasten nousee $1500 V_{DC}$. Ylijännitesuojien jatkuva käyttöjännitekestoisuus valitaan suuremmaksi kuin maata vasten tapahtuva jännitetaso eli $1700\text{--}1800 V_{DC}$. Tasasähköjärjestelmässä tapahtuva jäännösjännitetaso on suuruusluokaltaan $3000\text{--}4000 V_{DC}$, mikä tulee ottaa huomioon ylijännitesuojan mitoituksessa [5,37].

5.4.3 Järjestelmän oikosulkusuojaus

Tasasähköjärjestelmän oikosulkusuojaukseen voidaan soveltaa pienjännitestandardissa annettuja ohjearvoja. Oikosulkusuojauksen tehtävänä on katkaista järjestelmässä esiintyvä oikosulkuvirta mahdollisimman nopeasti ja estää komponenttien vaurioituminen. Oikosulkusuojauksen nopea katkaisureagointi varmistetaan suunnittelemalla verkko niin, että verkon viimeisellä valaisinpisteellä on riittävän suuri oikosulkuvirta [5,37]. Oikosulkuvirtaan vaikuttaa rakennetun sähköverkon kokonaispituus syöttävästä muuntajasta aina viimeiseen valaisinpisteeseen, sähköverkossa käytetyn kaapelin poikkipinta-ala ja johdinmateriaali.

Tasasähköverkon oikosulkusuojauksen toimivuuden varmistamiseksi suuntaajissa toimivat komponentit on mitoitettu tulppasulakkeisiin nähden monikertaisesti ja automaattisulakkeisiin nähden kolminkertaisesti suuntaajan nimellisvirtaan verrattuna [37].

5.5 Liitäntälaitteet

Liitäntälaitteen tehtävänä on muuntaa syöttävän verkon jännite sopivaksi muodoksi ja suojata LED-valaisin syöttävässä verkossa esiintyvistä säröistä ja häiriöistä. Liitäntälaitte voi olla rakenteeltaan yksinkertainen tai älyä sisältävä liitäntälaitte, jonka avulla voidaan ohjata valaistusta, keskitetysti hallintaa tai saada sen avulla tietoa valaisimen tilasta ja toimivuudesta. Vinokuorman ehkäisemiseksi bipolaarisessa järjestelmässä liitäntälaitteet kytketään molemmille vaihejohtimille [37].

LED-valaisimeen tulevaa virtaa pitää rajoittaa valaisimen ylikuormituksen ehkäisemiseksi. Virtaa voidaan rajoittaa esimerkiksi hakkurin avulla sopivaksi tasajännitteeksi. Hakkurin toiminta perustuu virtapiirin ensiövirran katkeamiseen ON/OFF-painikkeilla ja näin ollen valaisimen valontuotto lakkaa välittömästi.

Tällä hetkellä markkinoilla ei löydä sellaisia liitäntälaitteita, jotka kestävät tasasähköjakalessa kahden johtimen yli esiintyvää $\pm 750 V_{DC}$ napajännitettä. Tämän hetken käytettävien liitäntälaitteiden korkein sallittu jännite on $250 V_{DC}$.

5.6 Yhteenveto

Pienjännitstandardit mahdollistavat enintään $1500 V_{DC}$ jännitetason käyttämisen tasasähköjärjestelmässä, joka nostaa ryhmäjohtojen syöttökapasiteetin moninkertaiseksi verrattuna nykyiseen käytössä olevaan $400 V_{AC}$ vaihtosähköjärjestelmään. Tasasähköjärjestelmät jaetaan kahteen eri tasoon, yksinapaiseen unipolaariseen ja kaksinapaiseen bipolaariseen järjestelmään.

Yksinapainen unipolaarisen järjestelmän asentaminen nykyiseen tievaloverkkoon on kallis kustannuksiltaan, sillä järjestelmän on syötettävä suoraan keskijännitepuolen muuntajalta. Lisäksi korkeampi jännitetaso vaatii erityistä tarkkaavaisuutta järjestelmän suojauksen suunnittelussa

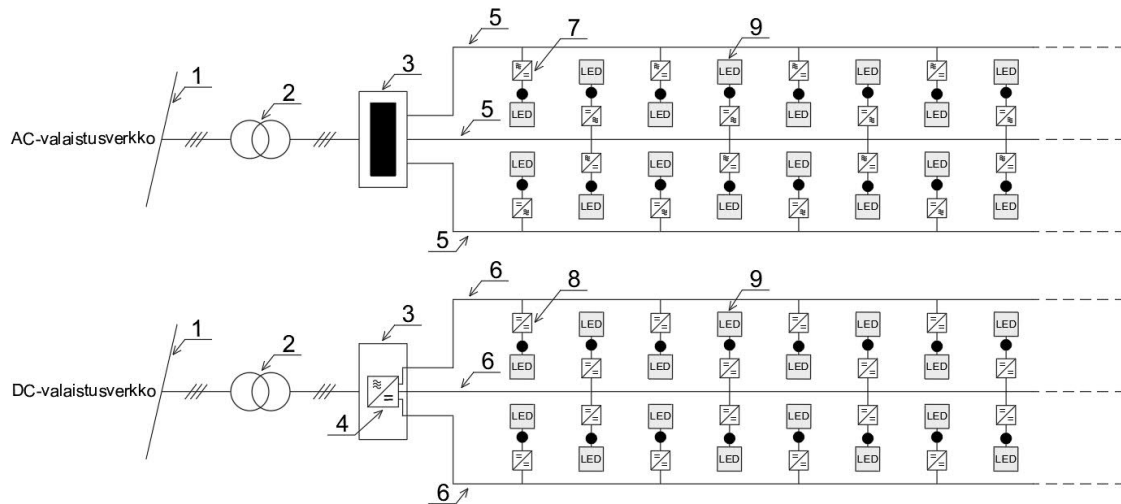
Kaksinapainen bipolaarinen järjestelmä on osittain toimintavarmempi, kuin unipolaarinen järjestelmää, koska yhden johtimen alasajo ei johda koko

järjestelmän sammumiseen. Järjestelmä vaatii myös muutoksia keskijänniteverkkoon, jonne joudutaan asentamaan kolmikäämimuuntajia.

Järjestelmän tasasuuntaajan koon valinnassa on otettava huomioon, että syöttävästä verkosta tuleva jännitteen määrä on tehollisarvo eikä huippuarvo, eli vaihtosähköltä tuleva jännitetason on oltava suureltaan noin 1,41-kertainen jotta tasasähköjärjestelmän ja vaihtosähköjärjestelmän jännitetasot ovat samoissa jännitetasoissa. Tasasähköjärjestelmän suunnittelussa on kiinnitettävä huomiota järjestelmässä käytettävien kaapeleiden ja komponenttien jännitelujuuteen, sillä kaikki komponentit eivät sovellu korkeille jännitetasoille.

6 VERKKOJEN SUOJAUS JA TALOUDELLISET VERTAILUT

Tässä luvussa käsitellään vaihtosähkö- ja tasasähköverkkojen välisiä eroavaisuuksia. Kuvassa 37 on esitetty vaihtosähkö- ja tasasähköverkon kytkentäperiaatteet.



Kuva 37. AC- ja DC-valaistusverkkojen kytkentäperiaatteet jossa 1) 20 kV keskijänniteverkko. 2) 400/230 V muuntaja. 3) Valaistuskeskus. 4) AC/DC tasasuuntaaja. 5) AC-valaistusverkon ryhmäkaapeli. 6) DC-valaistusverkon ryhmäkaapeli (750 V_{DC} tai 1500 V_{DC}). 7) LED-valaisimen AC/DC-liitännälaitte. 8) LED-valaisimen DC/DC-liitännälaitte. 9) LED-valaisin.

AC- ja DC-valaistusverkkojen suurimmat eroavaisuudet syntyvät valaistuskeskuksen kokoonpanossa, ryhmäkaapeleissa ja LED-valaisimien liitännälaitteissa. Järjestelmästä riippuen kaikki LED-valaisimet ottavat vastaan ainoastaan tasajännitettä. AC-valaistusverkossa jännitteen muunnos vaihtojännitteeksi tasajännitteiseksi ja jännitetason laskeminen sopivaan tasoon tapahtuu valaisimen liitännälaitteissa. DC-valaistusverkon pääkeskus varustetaan AC/DC tasasuuntaajalla, jonka tehtävä on muuntaa syöttävästä verkosta tuleva vaihtojännite tasajännitteeksi. DC-valaistusverkossa käytetään sellaisia ryhmäkaapeleita, joiden jännitelujuus kestää verkossa esiintyviä korkeita jännitteitä (750 V_{DC} tai 1500 V_{DC}). DC-valaistusverkossa käytettävät valaisimet varustetaan DC/DC-suuntaajalla, jonka tehtävä on laskea jännitetasoa LED-valaisimelle sopivaan tasoon.

AC-valaistuverkon mitoittamisessa vaikuttaa pääkeskuksen oikosulkuvirta, pääsulakkeiden koko ja käytettävien ryhmäkaapeleiden tyyppi ja poikkipinta-ala. DC-valaistusverkon mitoittamiseen vaikuttaa valaistuskeskukseen syötettävän jännitteen taso, tasasuuntaajan nimellisteho ja valaistuskeskuksessa käytettävien pääsulakkeiden koko.

Valaistusverkko tulee mitoittaa suunnitteluvaiheessa verkon suojauksen varmistamiseksi. Kaikki mitoitusasiakirjat dokumentoidaan asianmukaisesti ja liitetään valaistussuunnitelma-asiakirjoihin. Valaistusverkon keskeiset mitoitukset ovat ylikuormitus- ja ylijännitesuojaukset, jännitteenalenema, oikosulkuvirtasuojaus ja valaistusverkon maadoitus.

6.1 LED-valaisimen liitälaitteen vaikutus energiatehokkuuteen

Tasasähköjärjestelmän ja vaihtosähköjärjestelmän välisiä energiasäästöjä voidaan laskea syöttämällä molempiin järjestelmiin samanlaista kuormaa. Tämän jälkeen lasketaan järjestelmässä esiintyvän kuorman ottama kokonaisvirtaa. Vaihtosähköjärjestelmän liitälaitteen liitäläiteho voidaan laskea kaavan (3) mukaisesti, kun tiedetään liitälaitteen ottama liitäläiteho ja virta. [5].

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \quad (\text{Kaava 3})$$

Jossa:

P Teho

U Pääjännite

I Virta

$\cos \varphi$ Tehokerroin

Tasasähköjärjestelmän liitäntälaitteen liitäntäteho voidaan laskea kaavan (4) mukaisesti [5].

$$P = U \times I \quad (\text{Kaava 4})$$

Jossa:

P Teho

U Pääjännite

I Virta

Tasasähkö- ja vaihtosähköjärjestelmässä käytettävien LED-valaisimien energiatehokkuuden vertailu voidaan laskea kaavan (5) mukaisesti [5].

$$p = L_{AC} \times L_{DC} \quad (\text{Kaava 5})$$

Jossa:

L_{AC} Vaihtosähköjärjestelmässä käytettävän LED-valaisimen valovirta.

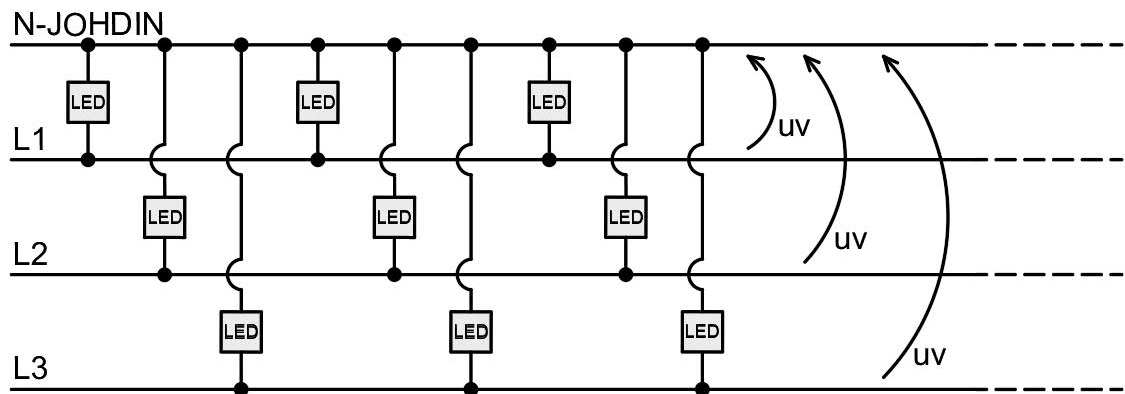
L_{DC} Tasasähköjärjestelmässä käytettävän LED-valaisimen valovirta.

6.2 Jännitehäviö, oikosulkuvirta ja kosketusjännitesuojaus

Valaistusverkossa syntyvät jännitehäviöt ja oikosulkuvirrat rajoittavat ryhmäkaapelin enimmäispituutta. Vanhat purkauslamppu valonlähteet vaikuttivat myös ryhmäkaapelin enimmäispituuteen, sillä valaisimet olivat tehoiltaan suuria. Ryhmäkaapelin kokonaiskuormitettavuuteen tuli helpotusta LED-valaisimien tulon myötä. LED-valaisimet ovat pienitehoisia eikä niiden kokonaiskuormitettavuus vaikuta niin paljon ryhmäkaapelin enimmäispituuteen.

6.2.1 Jännitehäviö

Standardisarjassa SFS 6000 suositellaan, että valaistusverkon pidemmän valaistusryhmä jännitteen alenema muuntajan ja viimeisen valaisinpisteen välillä ei ole enempää kuin -10 %...+6 %. Verkkojännitteen ollessaan 230V sallittu nimellisjännitevaihtelu on 207V – 244V, sillä jännitteen alenema vaikuttaa suoraan sähkön laatuun. Valaistusverkon virrat ja käytettävien ryhmäjohtimien impedanssit on selvitettävä jännitehäviön laskemiseksi [6,35]. Kuvassa 38 on esitetty LED-valaisimien kytkeminen äärijohtimiin kolmivaihejärjestelmässä. Valaisimet kytketään tasaisesti äärijohtimiin vuoron perään huippukuorman tasaukseksi.



Kuva 38. LED-valaisimien kytkeminen kolmivaiheisessa vaihtosähköjärjestelmässä.

Yksivaiheinen vaihtojännitteen alenema voidaan laskea kaavan (6) mukaisesti [35].

$$\Delta U = I \times l \times 2 \times (r \cos \varphi \pm x \sin \varphi) \quad (\text{kaava 6})$$

Jossa:

ΔU Yksivaiheinen jännitteen alenema (V)

I Kuormitusvirta (A)

l	Johtoon pituus (m)
r	Johtimen ominaisresistanssi 70 °C (Ω/m)
x	Johtimen ominaisreaktanssi 70 °C (Ω/m)
φ	Jännitteen ja virran välinen vaihekulma

Kolmivaiheisella vaihtojännitteen alenema voidaan laskea kaavan (7) mukaisesti [35].

$$\Delta U = I \times l \times \sqrt{3} \times (r \cos \varphi \pm x \sin \varphi) \quad (\text{kaava 7})$$

Jossa:

ΔU	Kolmivaiheisen jännitteen alenema (V)
I	Kuormitusvirta (A)
l	Johtoon pituus (m)
r	Johtimen ominaisresistanssi 70 °C (Ω/m)
x	Johtimen ominaisreaktanssi 70 °C (Ω/m)
φ	Jännitteen ja virran välinen vaihekulma

Suhteellisen vaihtojännitteen alenema voidaan laskea kaavan (8) mukaisesti [35].

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} \times 100\% \quad (\text{kaava 8})$$

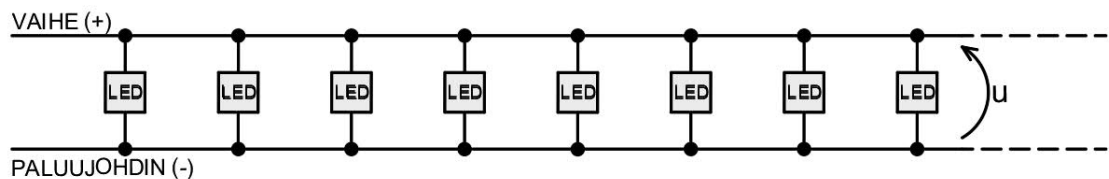
Jossa:

Δu Suhteellisen jännitteen alenema (%)

ΔU Jännitteenalenema (V)

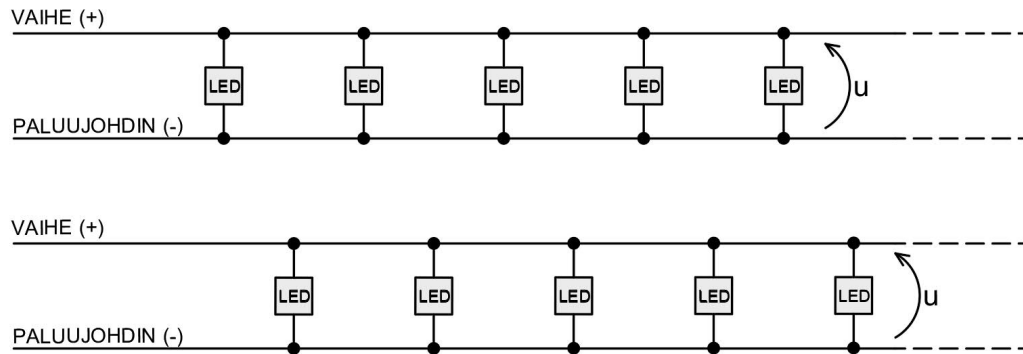
Δn Nimellisjännite (V)

Unipolaarisessa tasasähköjärjestelmässä on kaksi johdinta vaihe- ja paluujohdinta. Järjestelmään tulevat valaisimet kytketään kuvan 39 mukaisesti äärijohtimen ja paluujohdinten välillä.

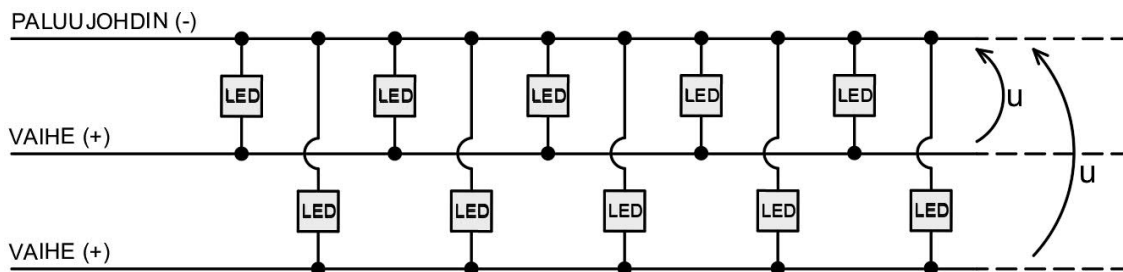


Kuva 39. LED-valaisimien kytkentäperiaate unipolaarisessa järjestelmässä.

Bipolaarisessa tasasähköjärjestelmässä on neljä johdinta, josta kaksi johdinta toimii vaiheina (+) ja kahta johdinta voidaan käyttää joko yhtenä tai kahtena paluujohdintena. Kuvassa 40 on esitetty valaisimien kytkentäperiaate bipolaarisessa järjestelmässä, jossa on käytetty kahta paluujohdinta ja kuvassa 41 on esitetty kytkentäperiaate yhdellä paluujohdintella.



Kuva 40. LED-valaisimien kytkentäperiaate bipolaarisessa järjestelmässä, jossa on käytetty kahta paluujohtinta.



Kuva 41. LED-valaisimien kytkentäperiaate bipolaarisessa järjestelmässä, jossa on käytetty yhtä paluujohtinta.

Tasasähköjärjestelmän pylväskohtainen jännitehäviö voidaan laskea kaavan (9) mukaisesti [5].

$$u_h = Z \times J \quad (\text{Kaava 9})$$

Jossa:

u_h Pylväskohtainen jännitehäviö

Z Kaapelin impedanssi

J Pylväsvälin pituus

6.2.2 Oikosulkuvirta

Ulkovalaistuksen oikosulkuvirta mitoitetaan standardien SFS 6000-4-43 ja SFS 6000-4-41 mukaisesti. Vaihtosähköjärjestelmässä ulkovalaistuksen yksivaiheisen oikosulkuvirran laskettaessa voidaan soveltaa kaava (10) [35].

$$I_k = \frac{c \times U}{\sqrt{3} \times (Z_L + Z_{PEN} + Z_0)} \quad (\text{kaava 10})$$

Jossa:

I_k	Yksivaiheinen pienin oikosulkuvirta (A)
c	Kerroin 0,95, joka ottaa huomioon johtojen, sulakkeiden, kytkimien ja liittimien jännitteen aleneman.
U	Pääjännite
Z_L	Vaihejohtimen impedanssi
Z_{PEN}	PEN-johtimen impedanssi
Z_0	Syöttävän verkon impedanssi

Oikosulkuvirtaa laskettaessa tasasähköjärjestelmässä täytyy ottaa huomioon tasasuuntaajan sisäinen impedanssi. Järjestelmän tarkan oikosulkuvirran laskeminen edellyttää matriisilaskentaa, sillä tasasuuntaajan sisäinen impedanssi muuttuu suuntaajan napajännitteen putoamisesta johtuen oikosulkuvirran aikana. Aikaisemmissa tutkimuksissa on käytetty 1,15 skaalauskerrointa, jota tul- laan tässäkin tutkimuksessa käyttämään. Tasasähköjärjestelmässä tapahtuvan oikosulkuvirran laskemisessa voidaan soveltaa kaava (11) [5].

$$I_{kDC} = 1,15 \times \frac{u_{vDC}}{Z_{ts} + Z_{DCvaihe} + Z_{DCpaluu} + Z_0} \quad (\text{Kaava 11})$$

Jossa:

u_{vDC} Tasasähköjärjestelmän jännitetaso

Z_{ts} Tasasuuntaajan sisäinen impedanssi

$Z_{DCääri}$ Tasasähköjärjestelmässä käytetyn vaihejohtimen impedanssi

$Z_{DCpaluu}$ Tasasähköjärjestelmässä käytetyn paluujohtimen impedanssi

Tulevan vaihtosähköverkon impedanssi täytyy muuntaa korkean jännitetasoa johtuen. Verkon impedanssin redusointiin voidaan soveltaa kaava (12) [5].

$$Z_0 = \left(\frac{U_0}{U_1} \right)^2 \quad (\text{Kaava 12})$$

Jossa:

U_1 Valaistusverkon jännite

6.2.3 Kosketusjännite

Ulkovalaistuksen kosketusjännitesuojaus mitoitetaan standardien SFS 6000-4-43 ja SFS 6000-4-41 mukaisesti. Ulkovalaistusverkossa käytettävien valaistuslaitteiden tulee olla käyttöolosuhteiden vuoksi joko suojamaadoitettuja tai suojaeristettyjä. Käytettäessä ulkovalaistusverkossa johdonsuojakatkaisijoita on niiden selektiivisyystoiminta tarkistettava sekä pääsulakkeen standardien ja valmistajan ohjeiden mukaisesti [6,35].

Standardisarjan SFS 6000 vaatimusten mukaan mitoitetaan valaistusverkon syötön automaattisen poiskytkentä. Standardissa ohjeistetaan, että

vikatilanteessa valaisimien suojalaitteet tulisi toimia alle viidessä sekunnissa. Valaistusverkossa käytetään valaisinkohtaisia sulakkeita, joten valaistusverkon mitoituksessa voidaan käyttää jakeluverkon syötön automaattista poiskytkennän mitoituksesta, joka on esitetty taulukossa 11 [6].

Taulukko 11. Jakeluverkon suurimmat sallitut sulakoot.

Ylivirtasuoja	Pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta jakeluverkossa
gG-tyyppin sulake $I_n \leq 63A$	$2,5 \times I_n$
gM-tyyppin sulake $I_n \geq 63A$	$3,5 \times I_n$

6.2.4 Syöttökaapelin mitoitus automaattisella poiskytkennällä

Valaistusverkossa käytettävän johdon valinnan yhteydessä on varmistettava, että automaattisen poiskytkentä tapahtuu vaaditussa ajassa. Suurin sallittu johdon pituus voidaan laskea kaava (13) mukaisesti [35].

$$I = \frac{\frac{c \times U}{\sqrt{3} \times I_k} - Z_v}{2 \times z} \quad (\text{kaava 13})$$

Jossa:

l Johtopituus (km)

c Kerroin 0,95

U Pääjännite (V)

I_k Oikosulkuvirta, joka aiheuttaa automaattisen poiskytkennän vaaditussa ajassa (A)

Z_v Verkon impedanssi ennen suojalaitteita (Ω)

z Suojattavan johtimen impedanssi 80 °C (Ω/m)

6.3 Ylikuormitussuoja

Standardeissa SFS 6000 5-52 ja SFS 6000-4-42 on esitetty johdon ylikuormitussuojaus, jossa on kerrottu kaapelin kuormitettavuudesta eri asennustavoissa. Kaikki valaistuspiirit varustetaan ylikuormasuojuuksella, jonka tehtävä on katkaista ylikuormitusvirta ennen kuin kaapeli ja liitoskohdat vahingoittuvat korkeasta lämpötilasta [6].

Valaistusverkon johdon kuormitettavuus on mitoitettava niin, ettei normaalisti käytössä oleva kuormitusvirta ylitä piirin sulakkeen nimellisvirtaa. Sulakkeen nimellisvirran lisäksi ylikuormitussuojauksessa huomioidaan käytössä olevien erilaisten suojalaitteiden toiminta-arvot. Standardissa on kerrottu muun muassa B-, C- ja D-tyyppien toimintavirrat esimerkiksi johdonsuojakatkaisijoiden toimintavirta on 1,45 kertaa käytetyn sulakkeen nimellisvirta. Käsikirjassa D1-2017 on kerrottu ryhmäjohtojen oikosulku- ja ylikuormitussuojan (I_n) nimellisvirran kaava (14) [6,35].

$$k \times I_n \leq 1,45 \times I_z \quad (\text{kaava 14})$$

Jossa:

I_n Suojalaitteen nimellisvirta (A)

I_z Johtimen jatkuva kuormitettavuus (A)

k Sulakkeen ylemmän sulamisrajavirran ja sulakkeen nimellisvirran

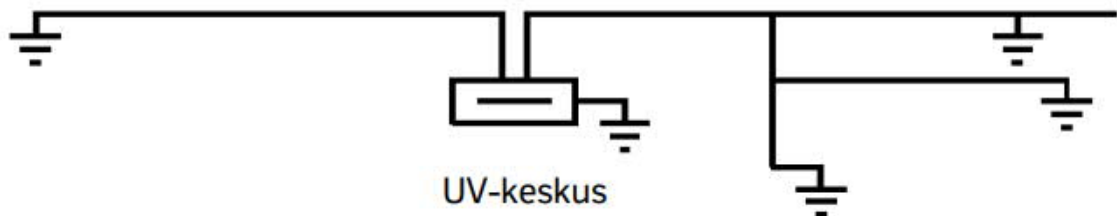
suhde

Jos k on pienempi kuin 1,45 sovelletaan kaava (15) [35].

$$I_n = < I_z \quad (\text{kaava 15})$$

6.4 Järjestelmän maadoitus

Valaistusverkon nollajohdin on maadoitettava enintään 200 m etäisyydellä verkon syöttöpisteestä maakaapeli- ja ilmajohtoasennuksissa. Maakaapeli-asennuksissa maadoitetaan jokaisen yli 200 m pituisen johdon tai johtohaaran loppupäässä. Ilmajohtoasennuksissa maadoitetaan 500 metrin ja jokaisen johtohaaran loppupäässä. Maadoitusimpedanssin arvoksi on pyrittävä saamaan alle 100 ohmia. Kuvassa 42 on esitetty ulkovalaistusverkon maadoitusperiaate [6].



Kuva 42. Valaistusverkon maadoitusperiaate.

Valaistusverkko maadoitetaan käyttämällä 16mm² tai 25 mm² kirkasta kupari-
köyttä. Tievalaistuskeskus varustetaan omalla maadoituselektrodilla. Maadoi-
tuskupari pyritään aina asentamaan kaapelikaivannon pohjalle, ei suoja-putkeen.
Lisäksi on otettava huomioon muutospiirien vaikutus kokonaisu-
maadoitukseen [6].

7 ELINKAARIKUSTANNUKSIEN MUODOSTAMINEN

Tässä luvussa tarkastellaan vaihtosähkö- ja tasasähköverkon kustannuksia kahden elinkaarimallin avulla. Tarkasteltava kohde sijaitsee kuusammossa ”Valtatie 5, maantie 18865 jalankulku- pyöräilyväylien valaistuksen rakentaminen välillä Kitkantie Nissivaarantie”. Tarkisteltavaan kohteeseen laaditaan kaksi elinkaarimallia. Ensimmäinen malli käsittää 400V_{AC} vaihtosähköjärjestelmä ja toinen malli 750 V_{DC} bipolaarisen tasasähköjärjestelmän.

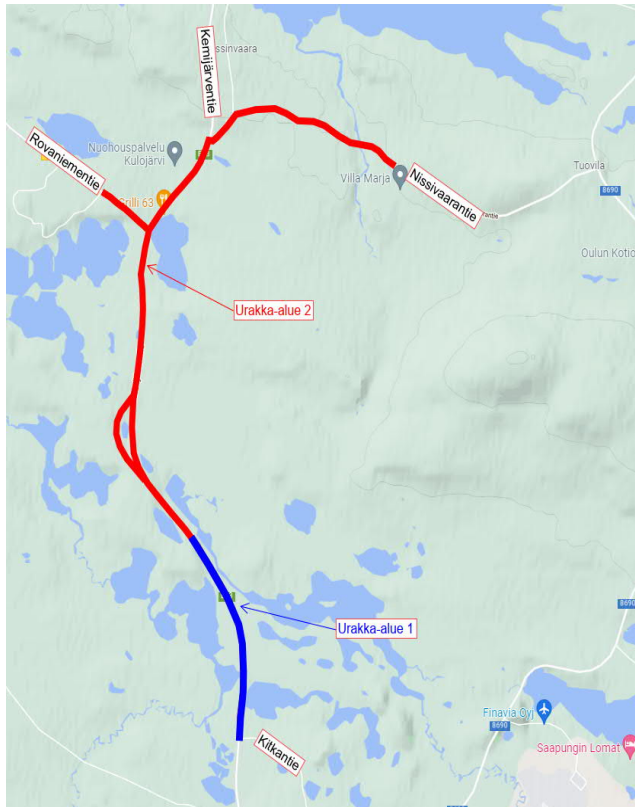
7.1 Tievalaistus

Työn tilaajat ovat Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus) ja Kuusamon kaupunki. Valaistus suunnitelma on laajuudeltaan 13,5 km, joka käsittää pimeiden jalankulku- ja pyöräilyväylien valaistuksen LED-valaisimilla sekä maantien vanhojen suurpainenatrium valaisimien korvaamisen LED-valaisimilla. Taulukossa 12 on esitetty hankkeen toimivuusvaatimukset. Tievalaistuksen toimivuustaulukossa on esitetty eri tieosuuksien pituus, omistaja, käytettävä valaistusluokka, valolaji, pylväslaji ja kaapelointitapa.

Taulukko 12. Tievalaistuksen toimivuusvaatimukset

Kohde, osuus	Pituus m	Omistaja	Valaistusluokka	Valolaji	Pylväslaji ja kaapelointitapa
VT 5, M1 välillä Kitkantie-Nissivaarantie	6200	Valtio	M3b	LED	Törmäysturvalliset metallipylväät, maakaapeli
Rovaniementie M2 välillä plv0-plv500	500	Valtio	M3b	LED	Törmäysturvalliset metallipylväät, maakaapeli
Nissivaarantie M3 välillä plv0-plv2000	2000	Valtio	M4	LED	Törmäysturvalliset metallipylväät, maakaapeli
Jalankulku- ja pyörätie J1 välillä Kitkantie-Nissivaarantie	4800	Valtio	P4	LED	Jäykät metallipylväät, maakaapeli

Vaihtosähköjärjestelmän elinkaarimalli sovelletaan esitettyyn hankkeeseen tievalaistuskeskusten määrän ollessa 5. Tasasähköjärjestelmän elinkaarimalli vertaillaan vaihtosähköjärjestelmän tapaan, mutta kahdella tievalaistuskeskuskella. Kuvassa 43 on esitetty tutkimuskohteen sijainti kartalla. Elinkaarikustannusmalleissa ei tulla huomiomaan urakka-alueita.



Kuva 43. Tutkimuskohteen sijainti

7.2 Elinkaarikustannusten muodostuminen

Tievalaistusverkon elinkaarikustannuksilla tarkoitetaan valaistusverkon elinkaarinaikana tapahtuvia investointikustannuksia, käyttökustannuksia, kunnossapitokustannuksia ja keskeytyskustannuksia valaistusverkon rakentamisesta aina käytöstä poistoon asti. Tässä tutkimuksessa elinkaarikustannuksissa otetaan huomioon investointi-, käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Elinkaarikustannuksissa otetaan lisäksi huomioon energiakustannusten-, huoltokustannusten- ja jäännöskustannusten nykyarvot. Elinkaarikustannuksien määrittämisen

olennainen määritelmä on valaistusverkon käyttöiän määrittäminen, joka vaihtelee 15–100 vuoteen [6]. LED-valaistuksella rakennetusta valaistusverkosta ei ole pitkäikäistä kokemus, joten valaistusverkossa käytettävien laitteiden ja komponenttien eliniän määrittämisessä on turvaututtava annettuihin ohjeisiin. Valaistusverkon heikoimpina lenkkeinä pidetään LED-valaisimien moduuleja ja liitäntälaitteita, jotka valmistajasta riippuen lupaavat käyttöiäksi 50 000–100 000 polttotuntia. 4 000 tunnin vuotuisella polttoajalla tämä tarkoittaa noin 12–25 vuoden elinikää.

Valaistusverkossa käytettävien laitteiden ja komponenttien elinkaaret on huomioitava investointien taloudellisen kannattavuuden määrittämisessä. Valaistusverkon elinkaarikustannusten määrittämisessä voidaan hyödyntää nykyarvomenetelmää. Nykyarvomenetelmän ansiosta saadaan valaistusverkkoon eri aikoina kertyneet kustannukset, kuten kunnossapito-, huolto- ja sähkökustannuksien muuttaminen vastaamaan nykypäivää. Nykyarvon määrittämisessä täytyy ottaa huomioon kustannuksien nousu eli inflaatio sekä sähkö- ja kunnossapitokustannuksien nousu. Tässä tutkimuksessa reaalikorkokokokannan (p) oletetaan olevan 5 %. Kustannuksien nousun oletetaan olevan myös 5 %/vuosi [5,6]

7.2.1 Investointikustannukset

Tievalaistusverkon investointikustannukset koostuvat valaistusverkon rakenteista ja syöttävän keskijänniteverkon rakenteista. Valaistusverkon investointikustannuksiin otetaan huomioon valaistuskeskukset komponentteineen, pienjännitekaapeloinnit ja valaisinpisteet. Keskijänniteverkon investointikustannuksiin huomioidaan muuntaja, pien- ja keskijännitekaapelit ja niiden kaapelointi. Jakeluverkonhaltija määrittää liittymispisteen ja valaistusverkon omistaja on liitettävä valaistusverkkonsa sovittuun liittymispisteeseen. Jakeluverkko perii liittymämaksut valaistusverkon omistajalta liittymispisteen vyöhykehinnittelun pääsulakkeen ja maantieteellisen sijainnin perusteella. Jakeluverkko sitoutuu, että liittymispisteen (tievalaistuskeskuksen) oikosulkuvirta on vähintään 500 A [41]. Investointikustannukset lasketaan kaavan (16) mukaisesti [6].

$$K_r = \frac{m \times H_p + n \times H_v + S \times H_{sv}}{S} \quad (\text{Kaava 16})$$

Jossa:

m	Pylväiden lukumäärä poikkileikkauksessa
n	LED-valaisimien lukumäärä poikkileikkauksessa
H_p	Pylvään, jalustan (ympäristötäyttö) hinnat asennettuina
H_v	LED-valaisimen hinta asennettuna (€/kpl)
H_{sv}	Sähköverkon perushinta (€/m)
S	Pylväsväli

7.2.2 Sähkökustannukset

Sähkökustannukset koostuvat liittämämaksusta, siirtomaksusta ja energiamaksusta. Liittämämaksu määräytyy käytettävän pääsulakekoon mukaan. Siirto- ja energiamaksut perustuvat energiayhtiön ja ELY-keskuksen väliseen sopimukseen. Tarkasteltavan kohteen kaikki suunnitellut tievalaistuskeskukset sijaitsevat keskijänniteverkon muuntajan läheisyydessä, joten liittymismaksuissa otettiin huomioon vyöhyke 1 (liittymät, joiden mitattu etäisyys lähimmästä jakelu-muuntamosta on alle 300 m) Taulukossa 13 on esitetty sähköliittymien liittymismaksut ja perusmaksut eri sulakekoille. [42]. LED-valaisimien vuotuinen palaa-misaika on laskennallisesti arvioitu noin 4000 tuntia. LED-valaisimien vuotuinen energiakulutus saadaan laskettua kaavalla (17) [6].

Taulukko 13. Sähköliittymän liittymismaksu ja perusmaksu energiayhtiön ja ELY-keskuksen perustavaan sopimukseen.

Pääsulakekoko (A)	Liittymismaksu (€)	Perusmaksu €/a
3x25	2640	320,76
3x35	3700	595,2

$$E_{val} = T_a \times n_{val} \times P_{val} \quad (\text{Kaava 17})$$

Jossa:

E_{val} LED-valaisimien vuotuinen energiakulutus (kWh)

T_a LED-valaisimien vuotuinen polttoaika (h)

n_{val} LED-valaisimien kappalemäärä (kpl)

P_{val} LED-valaisimen yksittäinen teho (kW)

Valaistuksen kokonaissähkötalustannukset saadaan laskettua kaavalla 18 [6].

$$K_{e1} = E_{val} \times H_s \quad (\text{Kaava 18})$$

Jossa:

K_{e1} LED-valaisimien sähkön kokonaistalustannukset (€/kWh)

E_{val} LED-valaisimien vuosittainen sähkötalustus (kWh)

H_s Sähkön kokonaishinta (€/kWh)

Todelliset sähkötalustannukset ovat selvitetty Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskuk-selta. Tievalaistuskeskuksen pääsulakkeiden 3x25A perusmaksu on 26,73 €/kk ja 3x35A on 49,60 €/kk. Energian siirto päiväsaikana 4,66 snt/kWh ja muun ajan siirto 2,29 snt/kWh. ELY-keskuksen energiamaksu perustuu pörssisähkötal-

joka on tällä hetkellä 5,0–10,5 snt/kWh [43]. Tässä tutkimuksessa tulen käyttämään sähköenergian hintana 11,28 snt/kWh mikä sisältää siirtohinnan, energiahinnan ja sähköveron. Hinnat perustuvat ELY-keskukselta saamani hintojen keskiarvoon.

Ensimmäisen vuoden energiakustannukset saadaan kaavan 19 mukaisesti [6].

$$K_{e1} = \frac{t_1 \times n \times P_i \times H_e}{S} \quad (\text{Kaava 19})$$

Jossa:

t_1	LED-valaisimen vuotuinen polttoaika (4000 h)
n	Valaisimen lukumäärä tiepoikkileikkauksessa (1)
P_i	Valaisimen teho liitännälaitteineen (107,35 W)
H_e	Sähköenergian kokonaishinta (0,1128 €/kWh)
S	Pylväsväli (44 m)

Esimerkkihankkeen ensimmäisen vuoden energiakustannukset ovat 1100,8 €/m a

7.2.3 Häviökustannukset

Sähköjärjestelmästä riippumatta kaikissa valaistusverkoissa esiintyy häviötehoja. Häviötehot syntyvät syöttävän verkon muuntajassa, ryhmäkaapeleiden johtimissa, valaisimen liitännälaitteessa ja sähköenergian muuttumisesta näkyväksi valoksi. Lisäksi tasasähköjärjestelmässä käytetty tasasuuntaaja aiheuttaa häviötehoja. Tasasuuntaajan häviöteho saadaan laskettua, kun tiedetään tasasuuntaajan hyötysuhde. Käytettävien kaapeleiden johtimissa syntyy häviöteho, jota voidaan laskea kaavan (20) mukaisesti [5].

$$S_h = P_h + Q_h = \left[\left(\frac{P}{U} \right)^2 R + \left(\frac{Q}{U} \right)^2 R \right] + \left[\left(\frac{P}{U} \right)^2 X + \left(\frac{Q}{U} \right)^2 X \right] \quad (\text{Kaava 20})$$

Jossa:

S_h Pätöhäviö

Q_h Loishäviöteho

X Reaktanssi

Valaistusverkon jokaisen pylväsvälin häviöteho on laskettavissa. Mikäli käytetty kaapeli koostuu useammasta vaihejohtimesta, jossa jokaisen vaiheen häviötehot on laskettava erikseen. Kaapelissa syntyvät tehohäviöt voidaan laskea kaavan (21) mukaisesti [5].

$$P_{kaaph} = n_{joht} \times \sum_n^n = 1 \left(\left[\frac{n_{val} \times P_{val}}{U} \right]^2 \times Z \right) \quad (\text{Kaava 21})$$

Jossa:

n_{joht} Kaapelin äärijohtimien määrä.

Vaihtosähköjärjestelmän tehohäviön laskemisessa voidaan soveltaa kaavaa 3 ja tasasähköjärjestelmän laskemisessa kaavaa 4. LED-valaisimien liitälaitteiden häviökustannusten määrittämisessä on käytetty aiemmissa tutkimuksissa saatuja energiatehokkuusarvoja 87 % LED-valaisimen liitälaitteen ollessa tasajänniteverkossa ja arvoa 74 % LED-valaisimen liitälaitteen ollessa vaihtojänniteverkossa. LED-valaisimen liitälaitteen häviötehot saadaan selville kaavan (22) mukaisesti [5].

$$P_{valh} = n_{va} \times P_{val} \times (1 - \mu_{val}) \quad (\text{Kaava 22})$$

Jossa:

μ_{val} LED-valaisimen hyötysuhde

Tässä tutkimuksessa käytettävien LED-valaisimien häviötehot tasasähkö- ja vaihtosähköjärjestelmässä ovat esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. LED-valaisimien häviötehot

LED-valaisimen teho (W)	LED-valaisimen häviöteho (W) AC-järjestelmässä	LED-valaisimen häviöteho (W) DC-järjestelmässä
95	24,7	12,4

Vaihtosähköjärjestelmän tievalokeskuksessa syntyy häviötehoja mm. keskuksessa toteutuneista kaapeloinnista. keskuksen häviöteho on erittäin pieni, joten tässä tutkimuksessa tievalokeskuksen häviöteho vaihtosähköjärjestelmässä oletetaan olevan 0 %. Tasasähköjärjestelmän tievalokeskuksessa syntyy vaihtosähköjärjestelmän tapaan häviötehoja toteutuneista kaapeloinnista ja tassa-suuntaajasta. Tasasähkösuuntaajan hyötysuhde on eri valmistajien mukaan 99 %. Tasasähköjärjestelmän tievalokeskuksen kokonaishäviöteho saadaan laskettua kaavan 23 mukaisesti [5].

$$P_{keskush} = P \times (1 - \mu_{ts}) \quad (\text{Kaava 23})$$

Jossa:

μ_{ts} Valmistajan ilmoittama tasasähkösuuntaajan hyötysuhde

7.2.4 Kunnossapitokustannukset

LED-valaisimet ovat energiatehokkaita ja lähes huoltovapaita. Tästä huolimatta LED-valaisimiin joutuu aika ajoin suorittamaan kunnossapitotehtäviä LED-valaisimen eliniän pidentämiseksi ja valaistustehon säilyttämiseksi hyvällä tasolla. LED-moduulien ja liitäntälaitteiden eliniäksi on ilmoitettu 50 000–100 000 polttotuntia, joka tarkoittaa käytännössä, että LED-moduulit ja liitäntälaitteet joutuu vaihtamaan ainakin kerran 30 vuoden elinkaaren tarkastelun aikana. Lisäksi LED-moduulit ja valaisimet joutuu aika ajoin pesemään likaantumisen ja pölyn takia.

Tässä tutkimuksessa kunnossapitokustannuksien hallinnollisena laskentakorkona käytetään 5 % ja vuotuisena kasvuna käytetään 3 %. Korot ovat peräisin Väyläviraston ulkovalaistuksen suunnitteluohjeesta. Ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannukset saadaan laskettua kaavan (24) mukaisesti [6].

$$K_{kp1} = \frac{\left(\frac{n \times H_{tr}}{t_2}\right) + q \times n \times H_{ly} + m \times C}{s} \quad (\text{Kaava 24})$$

Jossa:

n	LED-valaisimien lukumäärä poikkileikkauksessa (kpl)
H_{tr}	LED-valaisimien moduulin tai liitäntälaitteen perushinta sekä LED-valaisimen kuuluvat puhdistukset valaistuksen eliniän aikana (€/kpl)
t_2	LED-valaisimen tarkasteluajanjakson pituus, joka on yleensä 30 vuotta
q	Yksittäisvaihtojen suhteellinen määrä vuodessa (%)
H_{ly}	LED-valaisimen, moduulin tai liitäntälaitteen yksittäisvaihdon perushinta sisältäen asennustyöt (€/kpl)

m	Pylväiden lukumäärä poikkileikkauksessa (kpl)
C	Yksittäisen pylvään kiinteät kustannukset (€/pylväs)
S	Pylväsväli

7.2.5 Hoitokustannuksien koonti ja nykyarvo

Tievalaistuksen hoitokustannukset koostuvat kunnossapito- ja energiakustannuksista. Ensimmäisen vuoden kokonaishoitokustannukset voidaan laskea kaavalla (25) [6]

$$K_h = (K_e + K_{kp}) \quad (\text{Kaava 25})$$

Jossa:

K_{h1}	Hoitokustannuksien nykyarvo
K_e	Energiakustannuksien nykyarvo 30 vuodelta
K_{kp1}	Kunnossapitokustannuksien nykyarvo 30 vuodelta

Tievalaistuksen energiakustannuksien nykyarvo saadaan laskettua kaavan (26) mukaisesti [6].

$$K_e = \sum_{t=1}^{29} \left(\frac{1+\beta_e}{1+p} \right)^t \times K_{e1} \quad (\text{Kaava 26})$$

Jossa:

β_e	Kunnossapitokustannuksien vuotuinen kasvu (6 %)
p	Hallinnollisesti määrätty laskentakorko (5 %)
t	Tarkastelujakson pituus vuosissa (30 vuotta)

K_{e1} Ensimmäisen vuoden energiakustannukset

Tässä tutkimuksessa kunnossapitokustannuksien vuotuiseksi kasvuksi on määritely 6 % ja hallinnollisesti laskentakoroksi on määritely 5 %. Prosentit ovat peräisin Liikenneviraston valaistuksen suunnitteluohjeesta[6]. Sähkömarkkinoilla eletään vaikeita aikoja vallitsevista maailman tilanteista johtuen. Tässä tutkimuksessa sähkön hinnan nousun oletetaan olevan 4 %/a.

Eri vuosina syntyneitä kunnossapitokustannuksia voidaan vertailla keskenään nykyarvolla koko LED-valaisimien eliniän aikana. Kaavassa (27) on esitetty kunnossapitokustannuksien nykyarvo [6].

$$K_{kp} = \sum_{t=1}^{29} \left(\frac{1+\beta_{kp}}{1+p} \right)^t \times K_{kp1} \quad (\text{Kaava 27})$$

Jossa:

β_{kp} Kunnossapitokustannuksien vuotuinen kasvu (3 %)

p Hallinnollisesti määrätty laskentakorko (5 %)

t Tarkastelujakson pituus vuosissa (30 vuotta)

K_{kp1} Ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannukset (€)

Tasasähköjärjestelmässä on huomioitava tasasähkösuuntaajan elinikä, joka on oletettavasti 15 vuotta ja sen vaihdosta aiheutuu kustannuksia. Tasasähkösuuntaajan nykyarvo saadaan selville kaavan (28) mukaisesti [5].

$$K_{na} = \frac{K_{15a}}{p^T} \quad (\text{Kaava 28})$$

Jossa:

K_{na} Kustannusten nykyarvo

LED-valaisimien polttoiäksi on ilmoitettu valmistajasta riippumatta 50 000–100 000 polttotuntia. 4000 vuotuisen käyttötunneiksi tarkoittaa, että valaisimen joutuu vaihtamaan kerran lasketun 30 vuoden elinkaaren aikana. LED-moduulien ja liitäntälaitteiden yksittäinen vaihto 12–25 vuoden päästä ei ole järkevää, sillä LED-valaisimet kehittyvät ja muuttuvat edelleen energiatehokkaammiksi [44].

LED-valaisimien huoltokustannusten ja yksittäisten LED-moduulien vaihtoa on erittäin hankala arvioida, koska LED-valaisimista ei ole tarpeeksi käyttökokemuksia. Tässä tutkimuksessa LED-moduulien yksittäisvaihtojen vuosittainen määrä on 2 % nojaten Liikenneviraston ulkovalaistuksen suunnitteluohjeessa annettuun arvioon [5]. Yksittäisen LED-moduulin vaihtohinta on tässä arvioitu 200 €/kpl.

Tievalaistuksen palvelusopimuksen hankinta-asiakirjoissa on määritelty, että LED-valaisimet tulee pestä viiden vuoden välein. Lasketun valaistuksen 30 vuoden elinkaaren aikana LED-valaisimet pestään yhteensä 6 kertaa [4]. Tässä tutkimuksessa LED-valaisimen pesun yksikköhinnan oletetaan olevan 30 €/LED-valaisin.

7.2.6 Elinkaarikustannusten koonti ja nykyarvo

Vaihtosähköjärjestelmän ja tasasähköjärjestelmän taloudellinen vertailu kahden järjestelmän kesken edellyttää, että edellä esitetyt elinkaarikustannukset koota yhteen vertailtavaksi. Soveltamalla nykyarvomenetelmää saadaan eri vuosille tapahtuvat kustannukset, kuten esimerkiksi rakentamiskustannukset, ylläpito-kustannukset, näiden korot ja jäännösverot diskontataan käyttäen laskentakorkoa vastaamaan nykyhetkeä. Valaistuksen elinkaarikustannusten nykyarvo saadaan laskettua kaavan (29) mukaisesti [6].

$$E_k = K_r + K_h + \frac{1}{(1+p)^t} \times J \quad (\text{Kaava 29})$$

Jossa:

E_k	Elinkaarikustannusten nykyarvo
K_r	Tievalaistuksen rakennuskustannukset
p	Hallinnollisesti määrätty laskentakorko (5 %)
t	Elinkaarikustannusten tarkasteluajanjakson pituus (yleensä 30 a)
K_h	Hoitokustannusten nykyarvo
J	Laskennallinen jäännösvero (25 % rakennuskustannuksista)

Keskimääräisten vuosikustannuksien avulla saadaan elinkaarikustannuksien kokonaisvaikutus. Vuosikustannusmenetelmällä saadaan vuosikustannus laskenta-ajan tapahtuvia kustannuksia haluamalle vuosille kaavan (30) mukaisesti [6].

$$K_v = \alpha \times K_r + (1 + \beta_e)^t \times K_{e1} + (1 + \beta_{kp})^t \times K_{kp1} \quad (\text{Kaava 30})$$

Jossa:

α	Annuiteettitekijä
β_e	Energiakustannusten vuotuinen kasvu (6 %)
β_{kp}	Kunnossapitokustannusten vuotuinen kasvu (3 %)
K_r	Tievalaistuksen rakentamiskustannukset
K_{e1}	Energiakustannukset ensimmäiseltä vuodelta

K_{kp1} Kunnossapitokustannukset ensimmäiseltä vuodelta

t Tarkasteluajanjakson pituus (haluamasi vuodet)

Laskentakoron ja laskenta-ajan funktiona saadaan annuiteettitekijän (α) selville kaavan (31) mukaisesti [6].

$$\alpha = \frac{p}{1-(1+p)^{-t}} \quad (\text{Kaava 31})$$

Jossa:

p Hallinnollisesti määrätty laskentakorko (5 %)

t Tarkasteluajanjakson pituus vuosissa

7.3 Elinkaarikustannukset tievalaistuksessa (AC-järjestelmä)

Tässä luvussa tarkastellaan ELY-keskuksen ja Kuusamon kaupungin tilaaman hankkeen ”Valtatie 5, maantie 18865 jalankulku- ja pyöräilyväylien valaistuksen rakentaminen välillä Kitkantie Nissivaarantie” laadittua valaistussuunnitelmaa. Valaistussuunnitelma käsittää noin 13,5 kilometriä uutta tievalaistusta. Alueen jakeluverkko on erinomainen, joten uuden valaistuksen liittäminen sähköverkkoon ei edellytä verkon vahvistamista eikä pitkiä liittymiskaapeleita. Jakeluverkon haltijan kanssa on sovittu, että uusien tulevien tievalaistuskeskusten liittymispisteet ovat jakeluverkon olemassa olevilla muuntamoilla.

Alueelle rakennetaan 5 uutta tievalaistuskeskusta, joiden liittymiskaapelien pituudet vaihtelevat. Tässä tutkimuksessa on tehty oletus, ettei uusista rakennettavista tievalaistuskeskuksista syötetä muita tehokuormia, eli keskuksien tehot riippuvat ainoastaan uusista asennettavista LED-valaisimista. Taulukossa 15 on esitetty rakennettavien tievalaistuskeskusten olennaiset tiedot.

Taulukko 15. Uusien rakennettavien tievalaistuskeskusten ryhmätiedot.

Tievalais- tuskeskus	Liittymiskaapeli	Liittymiskaape- lin pituus (m)	Ryhmälähtöjen määrä (kpl)
1	AXMK 4x35S	60	1
2	AXMK 4x35S	20	3
3	AXMK 4x35S	35	3
4	AXMK 4x35S	20	1
5	AXMK 4x35S	95	2

Tievalaistuskeskusten laskennalliset oikosulkuvirrat (I_k), suurin sallittu ryhmä-
sulake oikosulkuvirran perusteella ja käytetyn valaistusryhmän kaapelin tyyppi
on esitetty taulukossa 16. Oikosulkuvirran laskemisessa on sovellettu kaava 10.

Taulukko 16. Keskuksien AC-järjestelmän laskennalliset oikosulkuvirrat, käy-
tetty ryhmäsulake ja ryhmäkaapelin tyyppi.

Tievalais- tuskeskus	Ryhmälähdön pituus (km)	Ryhmälähdöt ja AC-järjestelmän laskennalliset oikosulkuvirrat (A)	Käytetty ryh- mäsulake (A)	Ryhmäkaapelin tyyppi
1	0,817	1) 91	25	AMCMK 4x25+16
2	0,722	1) 95	25	AMCMK 4x25+16
	1,448	2) 72	25	AMCMK 4x35+16
	1,112	3) 73	25	AMCMK 4x25+16
3	1,821	1) 53	20	AMCMK 4x35+16
	1,099	2) 72	25	AMCMK 4x25+16
	0,993	3) 77	25	AMCMK 4x25+16
4	0,993	1) 70	25	AMCMK 4x35+16
5	0,931	1) 81	25	AMCMK 4x25+16
	0,963	2) 78	25	AMCMK 4x25+16

Tievalaistuskeskuksissa käytettyjen sulakkeiden määrittämiseksi, täytyy ensin selvittää LED-valaisimien nimellisvirrat kaavan (32) mukaisesti.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times U_p \times \cos\varphi} \quad (\text{Kaava 32})$$

Jossa:

I Nimellisvirta (A)

P LED-valaisimien kokonaistehot (W)

U_p Pääjännite (V)

AC-järjestelmässä valaistusryhmien yksivaiheinen jännitteenalenema lasketaan kaavan 6 mukaisesti. Taulukossa 17 on esitetty kukin valaistusryhmän laskennallinen nimellisvirrat ja jännitteenalenemat.

Taulukko 17. Keskuksien laskennalliset jännitteenalenemat

Tievalaistus- keskus	Valaisimien määrä ryhmässä (kpl)	Ryhmän laskennalli- nen kuormitusvirran keskiarvo (A)	Ryhmän suhteelli- nen jännitteenale- nema (%)
1	1) 19	2,9	0,9
2	1) 14 2) 39 3) 30	2,1 5,9 4,6	0,7 2,2 1,4
3	1) 42 2) 22 3) 39	6,4 3,4 5,9	2,7 1,1 1,3
4	1) 39	5,9	1,4
5	1) 16 2) 18	2,4 2,7	0,9 0,9

7.3.1 Investointikustannukset

Tievalaistuksen investointikustannuksiin kuuluvat muun muassa liittymiskaapeli, tievalaistuskeskus ohjauslaitteineen, valaisinpisteet, verkon kaapelointi ja siihen kuuluvat ympäristötäytöt ja kaivutyöt. Kustannuksia laskettaessa on huomioitu myös asennus- ja suunnittelutyöt. Vaihtosähköjärjestelmän rakentamiskustannuksien yksikköhinnat on esitetty liitteessä 1. Yksikköhinnat ovat infra- ja talorakentamisen kustannushallinnan yksikköhintoja sekä laite- ja komponentin valmistajan ilmoittamia hintoja. Tasasähköjärjestelmän investointikustannukset ovat 798 036 €.

7.3.2 Sähkökustannukset

Tievalaistusverkon sähkökustannukset muodostuvat taulukon 13 mukaisesta liittymän perusmaksusta, joka on riippuvainen keskuksen pääsulakkeista, käytetystä energiasta ja sen siirtomaksuista. Valaistussuunnitelmassa käytetty LED-valaisin on teholtaan 95 W. Valaistusverkon vuotuinen polttoaika oletetaan olevan 4000 h. Taulukossa 18 on esitetty LED-valaisimen tehot, kappalemäärät ja kokonaistehot.

Taulukko 18. LED-valaisimien kokonaistehot ja energian kulutus vuositasolla.

LED-valaisin	Teho (W)	Kappale (kpl)	Kokonaistehot (kW)	Energia (MWh/a)
1	95	278	26,41	105,64

Kaavan 22 mukaisesti voidaan selvittää LED-valaisimien liitälaitteiden aiheuttamat häviötehot vaihtosähköjärjestelmässä. Näin ollen 95 tehoisella LED-valaisimella syntyy 24,7 W:a häviötehoa / valaisin. Taulukossa 19 on esitetty LED-valaisimien kokonaishäviöenergiaa valaisimen hyötysuhteen ollessa 74 % ja vuotuinen polttoaika on 4000 h.

Taulukko 19. LED-valaisimien kokonaishäviöenergiaa AC-järjestelmässä

LED-valaisimien määrä	LED-valaisimien tehohäviöt (kW)	LED-valaisimien häviöenergia (MWh/a)
278	6,87	27,47

LED-valaisimien vuotuinen energiakulutus ja sähkökustannuksien kokonaiskustannukset saadaan selville kaavojen 16 ja 17 mukaisesti. LED-valaisimien vuotuinen polttoaika on 4000 h ja energianhinta 11,28 snt/kWh. Näin ollen AC-järjestelmän LED-valaisimien sähkön vuotuinen kustannus on 11916,2 €/a.

7.3.3 Kunnossapitokustannukset

Vaihtosähköjärjestelmän kunnossapitokustannukset voidaan selvittää kaavan 24 mukaisesti. Taulukossa 20 on koottu vaihtosähköjärjestelmän Kunnossapitokustannukset.

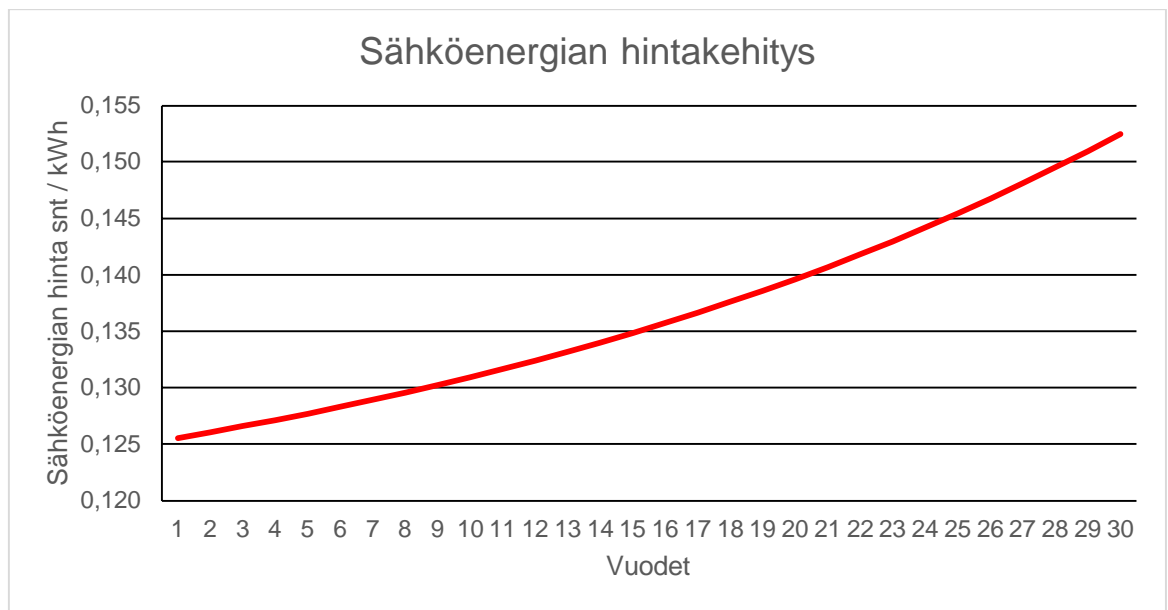
Taulukko 20. Kunnossapitokustannuksien muodostaminen

Selite	Lyhenne	Arvo
LED-valaisimien lukumäärä poikkileikkauksessa	n	1
Valaisimen ryhmävaihdon hinta	H _{lr}	410
LED-valaisimen polttoikä (a)	t ₂	30
Yksittäisvaihtojen määrän osuus kaikista valaisimista (%)	q	2
LED-valaisimen yksittäisvaihdon kustannus	H _{ly}	410
Pylväiden lukumäärä poikkileikkauksessa	m	1
Pylvään kiinteät kustannukset	C	34
Pylväsväli	S	44

Vaihtosähköjärjestelmän kunnossapitokustannukset ovat 9488,7 €/a.

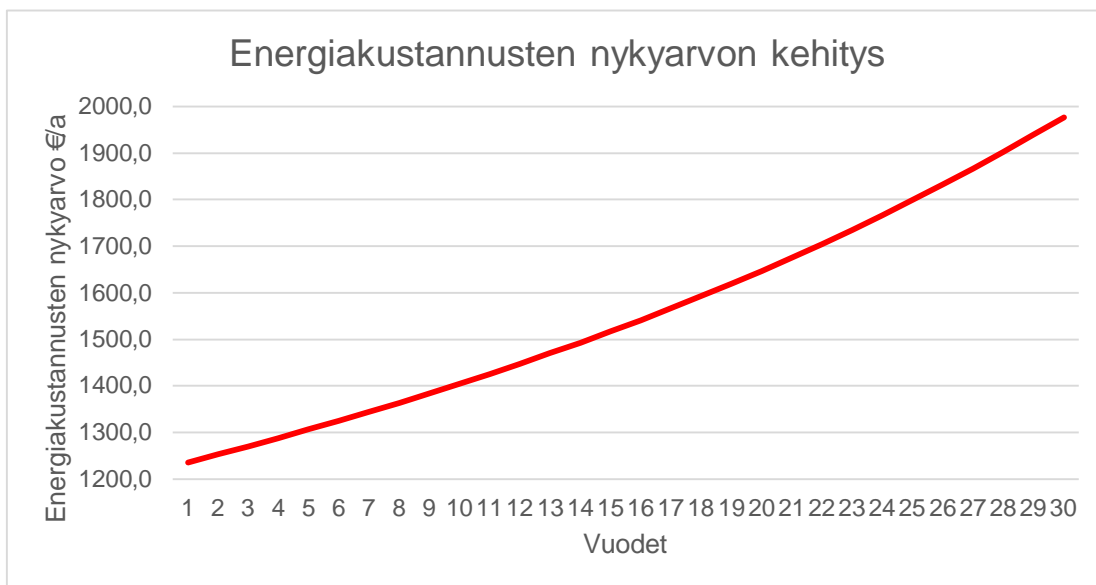
7.3.4 Hoitokustannusten koonti ja nykyarvo

Kunnossapitokustannukset ja energiakustannukset muodostavat yhdessä tievalaistuksen hoitokustannukset. Ensimmäisen vuoden kokonaishoitokustannukset saadaan selville kaavan 25 mukaisesti. Näin ollen esimerkkikohteen ensimmäisen vuoden kokonaishoitokustannukset ovat yhteensä 36207,7 €. Kuvassa 44 on esitetty sähköenergian hintakehitys oletetulla 4 % korolla.



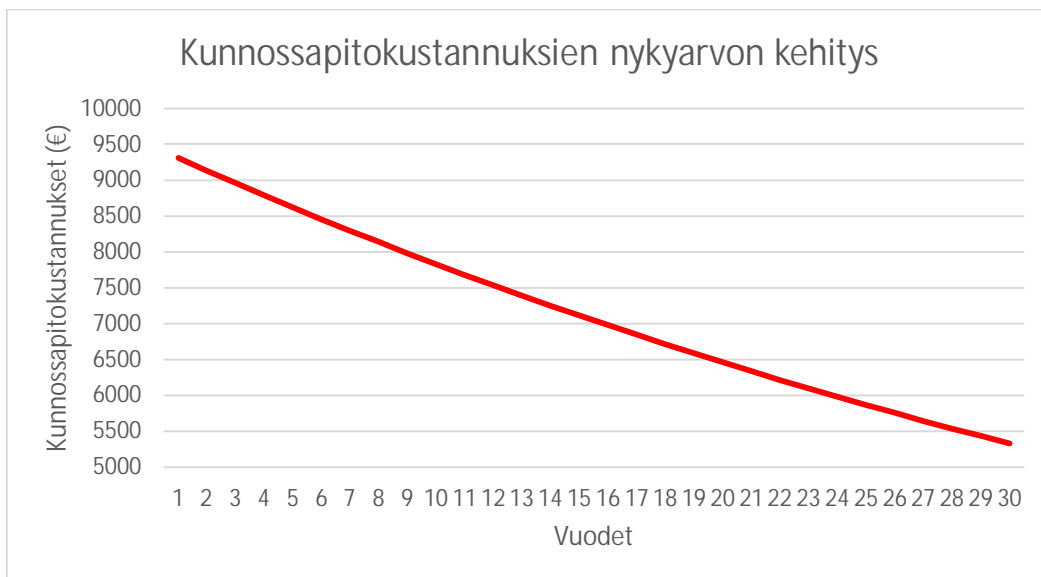
Kuva 44. Sähköenergian oletettu hintakehitys seuraavien 30 vuoden aikana.

Tievalaistuksen energiakustannusten nykyarvo tutkitaan kuvassa 45, jossa kunnossapitokustannuksien vuotuinen kasvu oletetaan olevan 6 %, laskentakoroa oletetaan olevan 5 % ja sähkön hinnan nousuksi on arvioitu 4 %.



Kuva 45. Energiakustannusten nykyarvon kehitys 30 vuoden aikana.

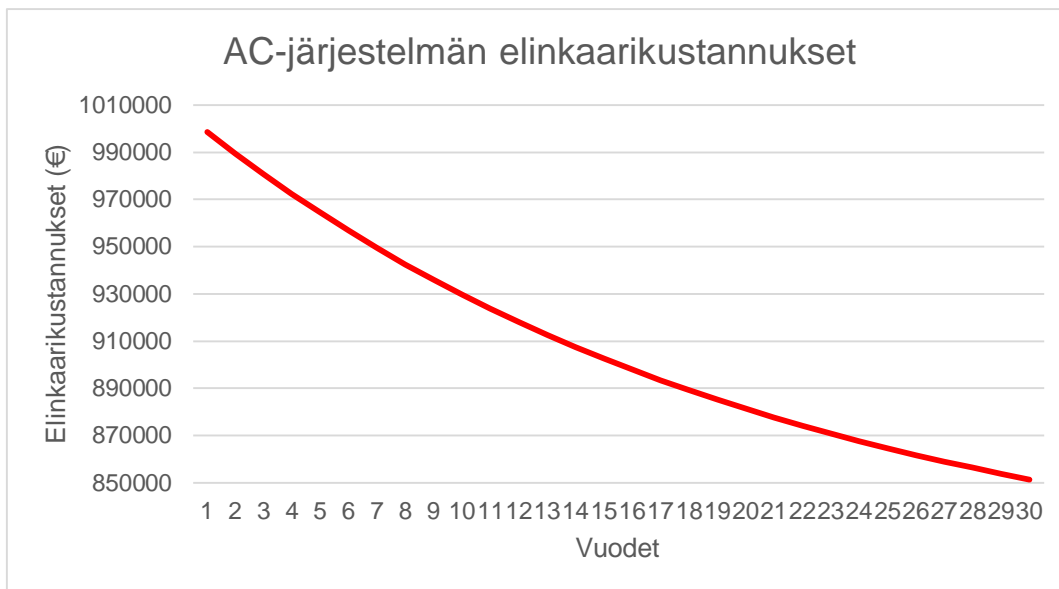
Vaihtosähköjärjestelmän kunnossapitokustannuksien nykyarvo tutkitaan kuvasta 46, jossa kunnossapitokustannuksien arvioitu vuotuinen kasvu on 3 % ja hallinnollisesti määrätty laskentakoron on arvioitu olevan 5 %.



Kuva 46. Kunnossapitokustannuksien nykyarvon kehitys 30 vuoden aikana.

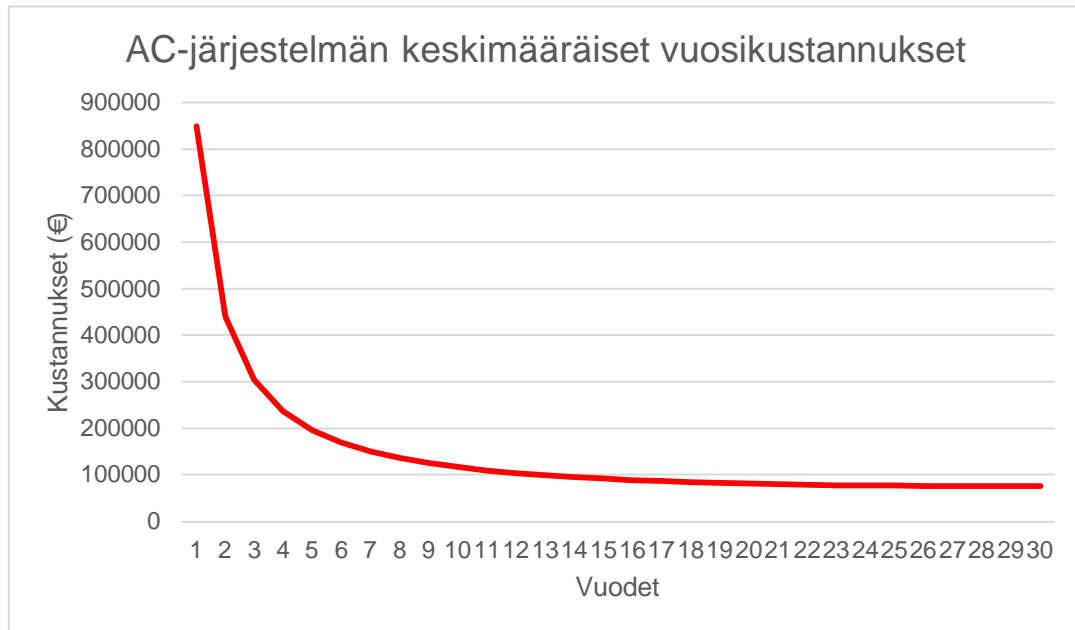
7.3.5 Elinkaarikustannusten koonti

Vaihtosähköjärjestelmän elinkaarikustannukset lasketaan käyttäen 5 % laskentakorkoa kaavan 29 mukaisesti. Kuvassa 46 on esitetty vaihtosähköjärjestelmän elinkaarikustannukset eri vuosille.



Kuva 47. AC-järjestelmän elinkaarikustannukset eri vuosille.

Tasasähköjärjestelmän elinkaarikustannuksien kokonaisvaikutus tutkitaan kuvassa 48, jossa energiakustannusten vuotuisen kasvu on oletettu olevan 6 % ja kunnossapitokustannuksien vuotuinen kasvun on oletettu olevan 3 %.



Kuva 48. AC-järjestelmän elinkaarikustannuksien keskimääräiset vuosikustannukset.

7.4 Elinkaarikustannukset tievalaistuksessa (DC-järjestelmä)

Tässä luvussa tutkitaan, saadaanko tasasähköjärjestelmän avulla saavutettuja säästöjä elinkaarikustannuksissa vaihtosähköjärjestelmään verrattuna. Tasasähköjärjestelmän säästöt syntyvät järjestelmän korkean lähtöjännitetaso ansiosta. Korkean lähtöjännitteen avulla saadaan kaapeloitua pitkiäkin valaistusryhmiä. Vaikutus näkyy suoraan tievalaistuskeskusten määrien sekä investointi- että ylläpitokustannuksien alenemisena. Tasasähköjärjestelmän suunnittelussa on huomioitava keskusten ja valaistusryhmien kokonaiskuorma. Keskusten kokonaiskuorman kasvattaminen merkittävästi vaatii sähköliittymän päivittämistä, pääsulakkeiden suurentamista ja näin ollen investointikustannukset, liittymämaksut, ja investointi- ja ylläpitokustannukset kasvavat. Pitkien valaistusryhmien toteuttaminen lisää jännitehäviötä ja pienentää oikosulkuvirtaa. Taulukossa 21 on esitetty ryhmälähtöjen DC-järjestelmän laskennalliset oikosulkuvirrat kaavan 11 mukaisesti. Oikosulkuvirrat on tässä laskettu samoille ryhmälähtöjen pituuksille kuin tasasähköjärjestelmässä.

Taulukko 21. Keskuksien DC-järjestelmän laskennalliset oikosulkuvirrat, suurin sallittu ryhmäsulake ja ryhmäkaapelin tyyppi.

Tievalaistuskeskus	Ryhmälähdön pituus (km)	Ryhmälähdöt ja DC-järjestelmän laskennalliset oikosulkuvirrat (A)
1	0,817	1) 380,7
2	0,722 1,448 1,112	1) 423,4 2) 277,9 3) 289,9
3	1,821 1,099 0,993	1) 184,2 2) 292,9 3) 320,7
4	0,993	1) 320,7
5	0,931 0,963	1) 339,6 2) 329,6

DC-järjestelmässä käytetyt sulakkeet määritellään kaavan 11 mukaisesti. Valaistusryhmien suhteellinen jännitteenalenema lasketaan kaavan 9 mukaisesti. Taulukossa 22 on esitetty valaistusryhmien vastaavat laskennalliset kuormitusvirrat ja suhteellinen jännitteenalenema DC-järjestelmässä.

Taulukko 22. Keskuksien laskennalliset oikosulkuvirrat

Tievalaistus- keskus	Valaisimien määrä ryhmässä (kpl)	Ryhmän laskennalli- nen kuormitusvirran keskiarvo (A)	Ryhmän suhteelli- nen jännitteenale- nema (%)
1	2) 19	2,72	0,56
2	4) 14	2,0	0,28
	5) 39	5,6	2,16
	6) 30	4,3	1,22
3	4) 42	6,0	2,38
	5) 22	3,1	0,67
	6) 39	5,6	2,16
4	2) 39	5,6	2,16
5	3) 16	2,3	0,37
	4) 18	2,6	0,46

Taulukoista voidaan laskennallisesti päätellä, että DC-järjestelmällä päästään jopa 5,6 kilometrin valaistusryhmiin, kunnes valaistusryhmän oikosulkuvirta tulee vastaan. Valaistusryhmä voidaan kasvattaa nostamalla ryhmäsulakkeen kokoa. Tässä tutkimuksessa laskennalliset jännitteenalenemien perusteellaan päästään ainoastaan 2,9 kilometrin valaistusryhmiin, kunnes standardissa SFS 6000 suositus -10 %...+6 % jännitteenalenema tulee vastaan. Jännitteenalene-
maan vaikuttaa muun muassa ryhmän kokonaistehot ja käytetty kaapelin poikki-
pinta-ala.

7.4.1 Investointikustannukset

Alueen jakeluverkko on erinomaisessa kunnossa eikä uusia jakelumuuntamoita ole tarvetta rakentaa. Näin ollen tasasähköjärjestelmän investointikustannukset ovat suurelta osalta samoja, kuin vaihtosähköjärjestelmän investointikustannukset. Ainut lisä kustannuksiin syntyy tievalaistuskeskuksiin asennettavien tasa-suuntaajien hankinnasta. Liitteessä 1 on esitetty järjestelmäkohtaiset investointi-
kustannukset yksikköhinnoissa. Vaihtosähköjärjestelmän

investointikustannukset ovat noin 793923,2 €. Tasasähköjärjestelmän investointikustannukset ovat jonkin verran pienemmät kuin vaihtosähköjärjestelmän investointikustannukset. Ero syntyy tievalaistuskeskusten määrän vähenemisestä.

7.4.2 Sähkökustannukset

Tasasähköjärjestelmän sähkökustannukset muodostuvat niin ikään taulukon 13 mukaisesta liittymän perusmaksusta, käytetystä energiasta ja sen siirtomaksuista. Tasasähköjärjestelmässä energiahäviöt muodostuvat tasasuuntaajan energian muunnoksesta, liitälaitteista ja LED-valaisimista.

Tasasähköjärjestelmän liitälaitteista syntyvä häviöteho voidaan selvittää kaavan 20 mukaisesti. Liitälaitteen häviöteho tasasähköjärjestelmässä on todettu olevan noin 13 %. Näin ollen 95 W tehoisella LED-valaisimella syntyy 12,35 W:a häviötehoa. Taulukossa 23 on esitetty LED-valaisimien kokonaishäviöenergia valaisimen hyötysuhteen ollessa 87 % ja vuotuinen polttoaika on 4000 h.

Taulukko 23. LED-valaisimien kokonaishäviöenergiaa DC-järjestelmässä

LED-valaisimien määrä	LED-valaisimien tehohäviöt (kW)	LED-valaisimien häviöenergia (MWh/a)
278	3,43	13,73

Taulukon 23 laskettujen arvojen perusteella tasasähköjärjestelmän liitälaitteiden häviötehot ovat 50 % pienemmät kuin vaihtosähköjärjestelmän liitälaitteilla.

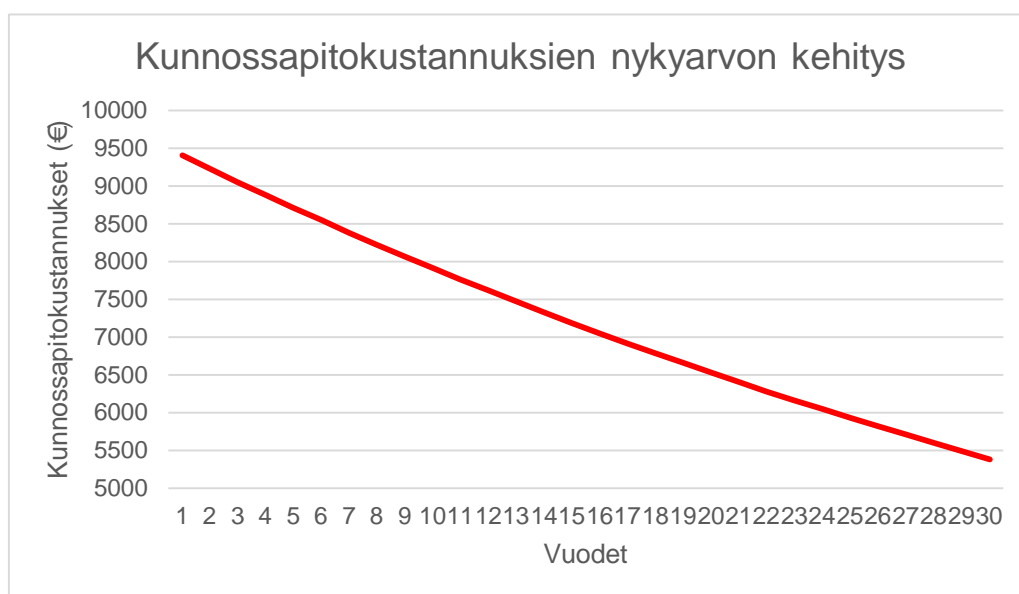
LED-valaisimien vuotuinen energiakulutus ja sähkökustannuksien kokonaiskustannukset saadaan selville kaavojen 16 ja 17 mukaisesti. LED-valaisimien vuotuinen polttoaika on 4000 h ja energianhinta 11,28 snt/kWh. Näin ollen tasasähköjärjestelmän LED-valaisimien sähkön vuotuinen kustannus on 11916,2 €/a.

7.4.3 Kunnossapitokustannukset

Tasasähköjärjestelmän vuotuiset kunnossapitokustannukset ovat hieman korkeampia kuin vaihtosähköjärjestelmän vuotuiset kunnossapitokustannukset. Ero syntyy tievalaistuskeskuksissa asennettavista tasasuuntaajista. Tässä tutkimuksessa tasasuuntaajan arvioidut ylläpitokustannukset ovat 500 € yhtä tievalaistuskeskusta kohden. Näin ollen Tasasähköjärjestelmän vuotuiset kunnossapitokustannukset ovat yhteensä 9588,7 €/a.

7.4.4 Hoitokustannusten koonti ja nykyarvo

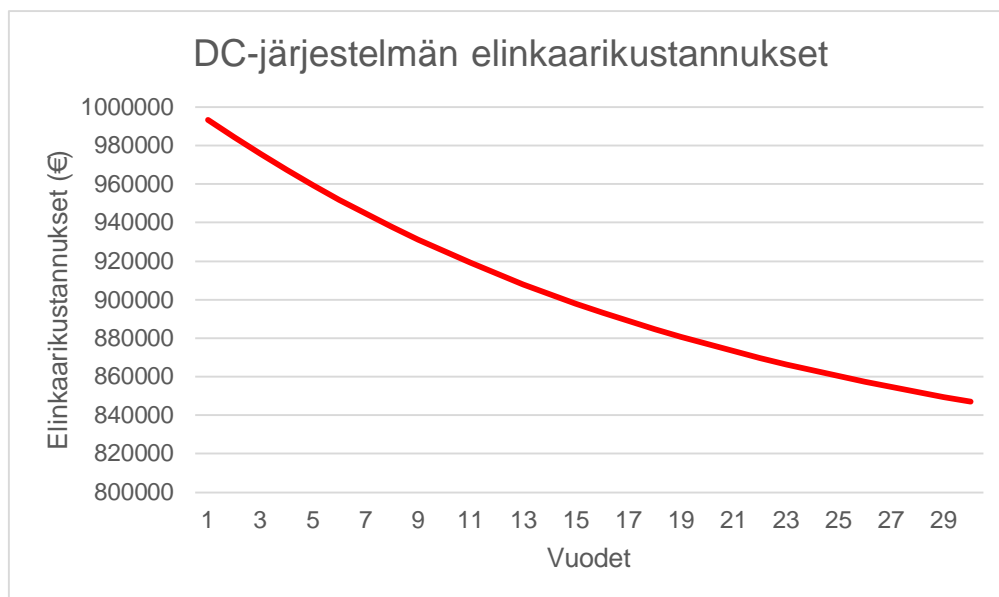
Tasasähköjärjestelmän kunnossapitokustannuksien nykyarvo tutkitaan kuvasta 49, jossa kunnossapitokustannuksien arvioitu vuotuinen kasvu on 3 % ja hallinnollisesti määrätty laskentakorko on arvioitu olevan 5 %.



Kuva 49. Kunnossapitokustannuksien nykyarvon kehitys 30 vuoden aikana.

7.4.5 Elinkaarikustannuksien koonti

Vaihtosähköjärjestelmän elinkaarikustannukset lasketaan käyttäen 5 % laskentakorkoa kaavan 29 mukaisesti. Kuvassa 50 on esitetty vaihtosähköjärjestelmän elinkaarikustannukset eri vuosille.



Kuva 50. DC-järjestelmän elinkaarikustannukset eri vuosille.

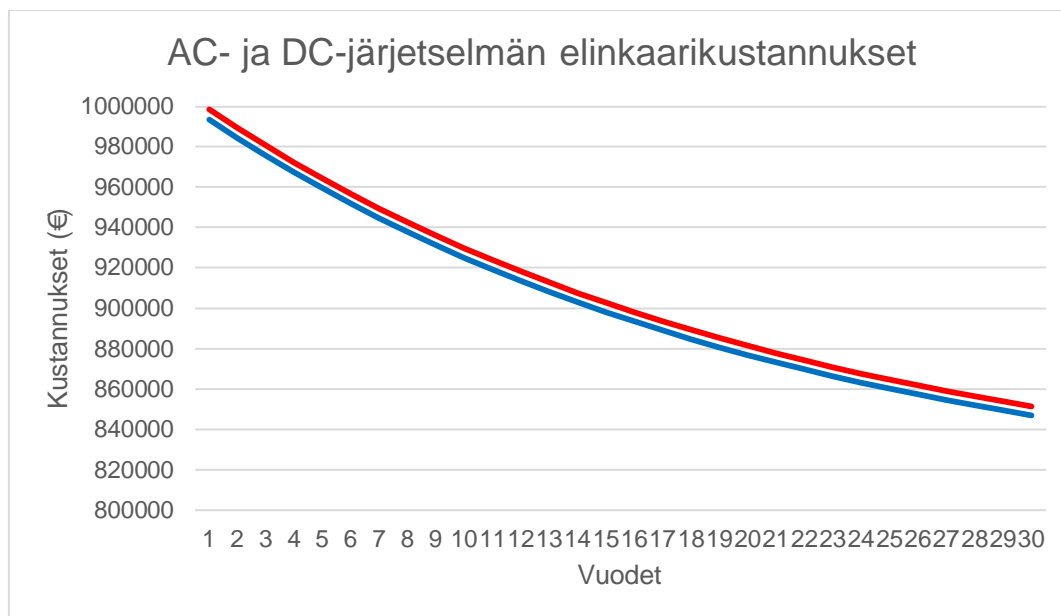
Vaihtosähköjärjestelmän elinkaarikustannuksien kokonaisvaikutus tutkitaan kuvassa 51, jossa energiakustannusten vuotuinen kasvu on oletettu olevan 6 % ja kunnossapitokustannuksien vuotuinen kasvun on oletettu olevan 3 %.



Kuva 51. DC-järjestelmän elinkaarikustannuksien keskimääräiset vuosikustannukset.

7.5 AC- ja DC-järjestelmän vertailu

Tässä luvussa vertaillaan vaihtosähkö- ja tasasähköjärjestelmän elinkaarikustannuksia. Kahden esitetyn järjestelmän elinkaarikustannukset lasketaan käyttäen 5 % laskentakorkoa kaavan 29 mukaisesti. Kuvassa 51 on esitetty vaihtosähköjärjestelmän ja tasasähköjärjestelmän elinkaarikustannukset eri vuosille.



Kuva 52. AC- ja DC-järjestelmän 30 vuoden elinkaarikustannukset. Punainen viiva kuvaa AC-järjestelmän kustannuksia ja sininen DC-järjestelmän elinkaarikustannuksia.

Kahden elinkaarikustannuksien välillä ei syntynyt isoa hintaeroa, sillä tasasähköjärjestelmän vaatima tasasuuntaajan hinta on edelleen todella kallis, mikä puolestaan lisää tievalaistuskeskuksen hintaa. Tievalaistuskeskusten sijoittaminen maanteilla ei yleensä tuota ongelmia, toisin kuin kaupunkialueelle sijoitettaessa, jossa uuden keskuksen paikan löytäminen on välillä mahdotonta. Tästä huolimatta tasasähköjärjestelmä on kaikissa mittareissa parempi vaihtoehto ja erittäin varma järjestelmä tievalaistuksessa.

8 YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tarkastaa tievalaistuksen teoriaa, olemassa olevia määräyksiä ja ohjeistuksia. Perehtyä erilaisiin valonlähteisiin ja antaa laajan käsityksen LED-valaisimista ja niiden kehityksestä. Lisäksi tavoitteena oli tutkia tasasähköjärjestelmän soveltuvuus tievalaistusympäristössä ja minkälaisia kustannussäästöjä järjestelmä tuo vaihtosähköjärjestelmään verrattuna elinkaarimallien tutkimisella.

Vaihtosähkö- ja tasasähköjärjestelmän elinkaarikustannukset sovelletaan Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus) ja Kuusamon kaupungin tilaamaan valaistussuunnitelmaan ”Valtatie 5, maantie 18865 jalankulku- pyöräilyväylien valaistuksen rakentaminen välillä Kitkantie Nissiväärantie” elinkaarimallien pitoajan ollessa 30 vuotta. Elinkaarimallien luotettavuus varmistettiin käyttämällä Liikenneviraston ”Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu” julkaisussa annettuja laskentakorkojen sekä huomioiden kunnossapito- ja ylläpitokustannuksien vuotuiset kasvut.

LED-valaisimien teoreettisesti vajaasta energiatehokkuudesta huolimatta ovat ne pystyneet vakiinnuttamaan paikkansa niin katu- kuin tievalaistuksessa pitkään, laajan optiikan, ympäristöystävällisyyden, energia-, kustannus-, valotehokkuuden ansiosta. Näistä huolimatta LED-moduuleissa riittää vielä paljon kehittämistä, sillä tämänhetkisen markkinoilla olevat LED-moduulit ovat saavuttaneet ainoastaan 50 % teoreettisesta maksimaalisesta valotehokkuusarvosta. LED-valaisimet tulevat yleistymään entisestään niin katu kuin tievalaistuksessa Euroopan komission RoHS-direktiivin päivityksen ansiosta, jossa suurpainenatrium- ja purkauslappujen valmistus loppuu 2027 vuoteen mennessä.

Pienjännitedirektiivin (LVD) ansiosta tasasähköjärjestelmässä on käytössä korkeampi jännitetasoa, joka mahdollisti valaistusryhmien pidentämisen, ryhmäkaapeleiden poikkipinta-alojen pienentämisen sekä tievalaistuskeskusten määrän vähenemisen. Tutkimuksen perusteella tasasähköjärjestelmän eduiksi lasketaan muun muassa sähkön laadun parantuminen, mahdollisuus älykkäälle

verkonhallinnalle, hajautetun tuotannon liittäminen valaistusverkkoon ja nopea vikapaikan paikallistaminen. Vaihtosähkön ja tasasähköverkon oikosulkuvirtojen ja jännitteenaleneman vertailussa paljastui, että vaihtosähköjärjestelmässä valaistusryhmien pituutta rajoittaa valaistusryhmän oikosulkuvirta niin tasasähköjärjestelmässä valaistusryhmän pituutta rajoittaa jännitteenalenema.

Tasasähköjärjestelmässä on käytössä kahta eri tasasähköjärjestelmää. 2-johtoinen unipolaarinen järjestelmä, jonka jännitetaso on $750 V_{DC}$ ja 3 tai 4-johtoinen bipolaarinen järjestelmä, jonka jännitetaso on $1500 V_{DC}$. Järjestelmät eroavat toisistaan merkittävästi, sillä bipolaarisella tasasähköjärjestelmällä on mahdollisuus siirtää sähkötehoa 15 kertaa ja unipolaarisella 5 kertaa enemmän verrattuna 400 V vaihtosähköjärjestelmään. Tutkimuksessa todettiin, että käyttämällä kaksinapaista järjestelmää, voidaan parantaa tievalaistusverkon toimintavarmuutta. Kaksinapainen järjestelmä on monimutkaisempi järjestelmä verrattuna muihin järjestelmiin koska se vaatii toimiakseen isoja investointeja keskijänniteverkkoon. Keskijänniteverkkoon joutuu asentamaan muun muassa kolmikäämi-muuntajia. Tasasähköjärjestelmän omaava korkeampi jännitetaso aiheuttaa haasteita tievalaistusverkon suojaukselle kuten kosketusjännitteen pitämistä sallitulla turvallisella alueella.

Tutkimusta tehdessä havaittiin tasasähköjärjestelmän ja vaihtosähköjärjestelmän välisiä energiahäviöeroja LED-valaisimien liitälaitteissa. Tutkimuksen mukaan tasasähköjärjestelmässä LED-valaisimien liitälaitteiden häviötehot ovat puolet parempia kuin liitälaitteiden häviötehot vaihtosähköjärjestelmässä.

Tutkimus aloitettiin sillä ajatuksella, että vaihtosähköjärjestelmässä käytössä olevat tarvikkeet, muun muassa kaapelit, pylväskalusteet, liittimet ja LED-valaisimien liitälaitteet kestävät tasasähköjärjestelmässä esiintyviä korkeita jännitetasoja. Tutkimuksen edetessä paljastui, että kaapelit ja pylväskalusteet sietävät hyvin korkeita jännitteitä, mutta sen sijaan LED-valaisimien liitälaitteet eivät siedä korkeita jännitetasoja. Pylväskalusteissa käytettävissä KE-liittimissä on leima 1 kV:n asti, joten se ei tuota ongelmia käyttää unipolaarisessa

järjestelmässä. Sen sijaan bipolaarisessa järjestelmässä nykyiset pylväskalusteiden käyttö ei ole sallittu. LED-valaisimen liitäntälaitteiden jännitelujuus rajoittuu 186–250 V_{DC}. Tasajännitejakelun käyttöönotto edellyttäisi tuotekehittelyä tarvittavan jännitelujuuden osalta koko tievaloverkon osalta.

Vaihtosähkö- ja tasasähköjärjestelmän elinkaarikustannukset tutkittiin kahden elinkaarimallin avulla. Ensimmäisessä elinkaarimallissa järjestelmänä käytettiin 400 V_{AC} vaihtosähköjärjestelmää ja toisessa elinkaarimallissa käytettiin unipolaarista 750 V_{DC} tasasähköjärjestelmää. Elinkaarimalleja sovellettiin ”Valtatie 5, maantie 18865 jalankulku- pyöräilyväylien valaistuksen rakentaminen välillä Kitkantie Nissivaarantie” valaistussuunnitelmaan. Elinkaarikustannuksissa otettiin huomioon investointikustannukset, ylläpitokustannukset ja energiakustannukset. Elinkaarikustannuksissa käytettiin nykyarvomenetelmää, jossa tarkasteltiin tievalaistuksen elinkaarenaikana eri vuosina tapahtuvien kustannuksien vertaamista. Elinkaarimallien tarkasteluajanjakson pituus on 30 vuotta.

Vaihtosähköjärjestelmän kaikki tulevat uudet tievalaistuskeskukset sijoituivat keskijänniteverkon muuntamoiden välittömään läheisyyteen, joten keskijänniteverkkoon ei tarvinnut investoida. Näin ollen elinkaarikustannuksien kannalta ei syntynyt merkittäviä investointikustannuksia keskijänniteverkosta. Vaihtosähköjärjestelmän investointikustannukset olivat noin 798 k€, Kunnossapitokustannukset olivat noin 9500 € ja elinkaarikustannukset 30 vuoden päästä ovat 850 k€. LED-valaisimien vuotuinen energiakulutus on järjestelmästä riippumatta noin 12 k€/vuosi.

Esimerkkikohteen keskijänniteverkko on erinomaisessa kunnossa, joten vaihtosähköjärjestelmän tapaan keskijänniteverkkoon ei tarvinnut investoida. Tasasähköjärjestelmän investointikustannukset olivat noin 794 k€, jotka ovat noin 0,5 % pienemmät kuin vaihtosähköjärjestelmän investointikustannukset. Ero syntyy tievalaistuskeskuksien määrän vähenemisessä. Tasasähköjärjestelmän kunnossapitokustannukset olivat noin 9600 €, jotka ovat noin prosentin verran isoimmat kuin vaihtosähköjärjestelmän kunnossapitokustannukset. Tasasähköjärjestelmän kunnossapitokustannuksia kasvattaa tasasuuntaajan huollot ja

vaihto elinkaarikustannuksien pitoajan puolella välissä. Tasasähköjärjestelmän elinkaarikustannukset 30 vuoden päästä ovat 847 k€, jotka ovat ainoastaan 0,51 % pienemmät kuin vaihtosähköjärjestelmän elinkaarikustannukset 30 vuoden jälkeen.

Järjestelmien elinkaarimallien laskemisessa käytin hallinnollisesti määrättyä laskentakorkona 5 %, laskennallinen jäännösvero on 25 %, kunnossapitokustannuksien vuotuinen kasvu on 3 % ja energiakustannusten vuotuinen kasvu on tässä 4 %. Arvot olivat peräisin Liikenneviraston ”Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu” julkaisussa annettuja arvoja.

Vastaukset tutkimuskysymykseen tehtyjen elinkaarimallien perusteella ovat, että tasasähköjärjestelmän investointikustannukset ovat pienemmät kuin vaihtosähköjärjestelmän investointikustannukset. Tasasähköjärjestelmän kunnossapitokustannukset olivat puolestaan korkeampia kuin vaihtosähköjärjestelmän kunnossapitokustannukset. Kokonaisuudessaan tasasähköjärjestelmän elinkaarikustannukset 30 vuoden pitoajan aikana ovat hiukan pienemmät kuin vaihtosähköjärjestelmän elinkaarikustannukset 30 vuoden pitoajan aikana.

Lähteet

- 1 Ympäristöministeriö. Euroopan unionin ilmastopolitiikka. Verkkoaineisto < <https://ym.fi/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka>>. Luettu 25.10.2021
- 2 Euroopan parlamentin komission asetus (EU) N:o 347/2010 ja (EY) N:o 245/2009. Verkkodokumentti <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A32010R0347>. Luettu 08.07.201.
- 3 Pekonen, Aleksi 2021. Paikkatietopalvelut, ELY-keskus. Sähköpostiviesti 08.07.2021.
- 4 Laitinen, Mikko 2021. Tienpidon suunnittelun asiantuntija, Pohjois-Savon ELY-keskus. Sähköpostiviesti 08.07.2021.
- 5 Pesonen, Kalle. 2018. Tasasähköjakelun katuvaloverkossa. Diplomityö. Lappeenrannan Teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti: <<https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/153168/Tasas%c3%a4hk%c3%b6jajakelu%20katuvaloverkos-sa%20diplomity%c3%b6%20Pesonen%2023032018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Luettu 28.10.2021
- 6 Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015. Liikenneviraston julkaisu. Verkkodokumentti < https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2015-16_maantie_rautatiealueiden_web.pdf>. Luettu 27.07.2021.
- 7 Tievalaistuksen rakennussuunnitelman työkohtaisten laatuvaatimusten malliasiakirja. Luettu 10.11.2021.
- 8 Lampputieto. Väriämpötila kelvinarvo. Verkkoaineisto < <https://lampputieto.fi/lampun-valinta/lamppujen-ominaisuuksia/kelvin-varilampotila/>>. Luettu 30.11.2021.
- 9 Spektri. Verkkoaineisto < <https://glamox.com/fi/-miten-se-toimii#spectrum>>. Luettu 02.12.2021.
- 10 Helsingin kaupungin kaupunkitilaohje. Häiriövalo ja valosaaste. Verkkoaineisto <<https://kaupunkitilaohje.hel.fi/kortti/hairiovalo-ja-valosaaste/>>. Luettu 10.12.2021.
- 11 St58.08 valonlähteet. 2018. Sähkötieto Ry.
- 12 Sitowise. Verkkosivusto: <<https://www.sitowise.com/fi/smart-city-company>>. Luettu 02.02.2022.

- 13 History of LED:s – Light Emitting Diodes. Verkkoaineisto. <<http://www.historyoflighting.net/light-bulb-history/history-of-led/>>. Luettu 07.02.2022.
- 14 Mitä ledi on ja mitkä ovat sen edut ja haitat? 2010. Verkkoaineisto. Suomen valoteknillinen seura. <https://www.valosto.com/tiedostot/Kohti_valoa_Tetri.pdf>. Luettu 07.02.2022.
- 15 Nave, R. 2016. Light Emitting Diode Structure. Verkkoaineisto. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/led.html>>. Luettu 07.02.2022.
- 16 LED-valaisimien kirkkaus, lampun käyttöikä ja tehokkuus. 2019. Verkkoaineisto. <<https://crushtymks.com/fi/energy-efficiency/898-brightness-lamp-life-and-efficiency-of-led-fixtures.html>>. Luettu 07.02.2022.
- 17 Gröhn, P. 2017. LED-valaisimen tuotekehitys. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/147628/Diplomityo_Grohn_Pekka.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu 08.02.2022.
- 18 Juntunen, E. 2014. From LED die to a lighting system. Väitöskirja. University of Oulu. Saatavilla: <<https://www.vtresearch.com/sites/default/files/pdf/science/2014/S64.pdf>>. Luettu 09.02.2022.
- 19 Nave, R. 2016. LED Device Structur. Verkkodokumentti. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/leds.html>>. Luettu 09.02.2022.
- 20 Hatziefstratiou, P. 2016. Lighting design with LEDs. Väitöskirja. Lontoo: University College London. Saatavilla: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1485779/82/Hatziefstratiou_Thesis_combined.pdf>. Luettu 09.02.2022.
- 21 LED ja energiatehokkuus. 2019. Glamox Oy. Verkkoaineisto. <<https://glamox.com/fi/led-ja-energiatehokkuus1>>. Luettu 21.02.2022.
- 22 Ledien elinikä. Glamox Oy. Verkkoaineisto. <<https://glamox.com/fi/ledien-elinika1>>. Luettu 22.02.2022.
- 23 LED-valaisimien elinikä. 2019. Fagerhult Oy. Verkkoaineisto. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/172284/Turunen_Arttur.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Luettu 22.02.2022.
- 24 LED-valaisimet – vaatimukset. Alenemakertoimen määrittely ulkovalaistuksessa. 2018. Verkkoaineisto. <https://nmfv.dk/wp-content/uploads/2018/05/NMF01_2018_LED_luminaires_%E2%80%93_requirements-Ed.-1.0.pdf>. Luettu 22.02.2022.

- 25 Harju, M. Valo ja värit. Verkkodokumentti. <<https://aalto-muoto.wordpress.com/valo/nayttamovalaisun-perusteet/valo-ja-varit/>>. Luettu 23.02.2022
- 26 Spektri. Glamox Oy. Verkkodokumentti. <<https://glamox.com/fi/-miten-se-toimii>>. Luettu 23.02.2022
- 27 Pecht, M. Das, D and Chang, M-H. 2014. Introduction to LED Thermal Management and Reliability. Verkkodokumentti. <https://www.researchgate.net/publication/278664048_Introduction_to_LED_Thermal_Management_and_Reliability>. Luettu 24.02.2022.
- 28 Partanen, P. LED-tutkijan loistava tulevaisuus. 2015. TEK-verkkolehti. Verkkoaineisto. <<https://www.tek.fi/fi/uutiset-blogit/led-tutkijan-loistava-tulevaisuus>>. Luettu 24.02.2022.
- 29 Ko, K. Advantages and Weaknesses of LED Application. 2007. Ledinside.com. Verkkoaineisto. <https://www.ledinside.com/knowledge/2007/12/Advantages_and_weaknesses_of_LED_Application_200712>. Luettu 24.02.2022.
- 30 Valonlähteet. Ensto. Verkkoaineisto. <<https://www.ensto.com/fi/materiaalit/suunnittelutyokalut/valaistusopas/valonlahteet/>>. Luettu 25.02.2022.
- 31 LED-perusteet. 2019. Glamox Oy. Verkkoaineisto. <<https://glamox.com/fi/led-perusteet->>. Luettu 25.02.2022.
- 32 Ledivalaisimien laatuvaatimukset. Väylävirasto. Ohje 31/2021. Verkkodokumentti. <https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2021-31_ledivalaisimien_laatuvaatimukset_web.pdf>. Luettu 02.03.2022
- 33 InfraRYL 2006. Infrarakentamisen yleiset vaatimukset osa 2, järjestelmät ja täydentävät osat. 2006. RTS.
- 34 Tien valaisinpylväiden ja jalustojen laatuvaatimukset. 10.11.2010. Liikenneviraston ohjetta 14/2010. Verkkodokumentti. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121681/lo_2010-14_978-952-255-559-5.pdf>. Luettu 04.03.2022
- 35 D1-2017 käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Sähköinfo
- 36 Hilden, R. 2017. Tasasähkön käyttö tulevaisuuden jakeluverkoissa sekä kiinteistöissä. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/134577/Hilden_Robert.pdf?sequence=1>. Luettu 10.03.2022

- 37 Partanen, J. 2010. Tehoelektroniikka sähkönjakelussa – Pienjännitteinen tasasähkönjakelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti. < <https://www.lut.fi/documents/10633/138922/Tehoelektroniikka+sahkonjakelussa+Loppuraportti+2010/639848d0-86c0-47ff-a9fc-057f745ff360>>. Luettu 14.03.2022.
- 38 Taloon.com.2022. Maakaapelit, asennuskaapelit. Verkkosivusto. <<https://www.taloon.com/>>. Luettu 16.03.2022.
- 39 Prysmian Group. 2022. AMKA 1kV. Verkkosivusto. < https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/AMKA%201kV_180118.pdf>. Luettu 16.03.2022
- 40 ABB DC-Drives. DCS800, 20A to 5200 A. Verkkodokumentti.<<https://library.e.abb.com/public/e3306fa445ed85c7c1257dea00492199/3ADW000192R0701%20DCS800%20Technical%20catalog%20e%20q.pdf>>. Luettu 22.03.2022
- 41 Sähkömarkkinalaki 588/2013. Verkojulkaisu. < <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Pidp433386592>>. Luettu 30.03.2022
- 42 Liittymismaksuhinnasto. Caruna Oy 1.12.2020. Verkkodokumentti.<https://images.caruna.fi/liittymismaksuhinnasto_caruna_oy_1.12.2020.pdf>. Luettu 30.03.2022
- 43 Stenius. Sanna. Suunnittelun projektipäällikkö, Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus). Sähköpostiviesti 31.03.2022
- 44 Kaitila, Mirja. Palvelutuki. Signify. Puhelinkeskustelu 06.04.2022

Valaistusverkon investointikustannuksia

JÄRJESTELMÄ	RAKENNUSOSA	MÄÄRÄ	YKSIKKÖ	YKSIKKÖKUSTANNUS (€)	KUSTANNUS (€)
AC/DC	Kaapelikaivannon teko ja täyttö (> 40 cm)	12900	mtr	6,03	77787
AC/DC	Varoituverkko	12900	mtr	0,3	3870
AC/DC	Ympäristäyttö murskeella	831	m3trtr	16,75	13919,25
AC/DC	Tievalaistuskeskus	5	kpl	3500	17500
AC/DC	Kaapeli, tyyppi AXMK 4x35S (liittymiskaapeli)	230	mtr	5,36	1232,8
AC/DC	Kutistemuovipäätte esim. Ensto SBO 4.1	554	kpl	21,69	12016,26
AC/DC	Kaapeli, tyyppi AMCMK 4x25+16 (tievalaistus)	8800	mtr	8,14	71632
AC/DC	Kaapeli, tyyppi AMCMK 4x35+16 (tievalaistus)	5500	mtr	9,05	49775
AC/DC	Maadoitusköysi 16mm2, a'25m	62	kpl	115,97	7190,14
AC/DC	Valaisinkaapelointi, MPK 3x2,5 S, ä 5m	278	kpl	9,8	2724,4
AC/DC	Kytöntäkalustesarja, esim. Ensto LCK5-16-10A	278	kpl	50	13900
AC/DC	LED-valaisin 95W	278	kpl	410	113980
AC/DC	Pylväsjalusta SJ-4/1500, 8-12m pylväille	278	kpl	301,17	83725,26
AC/DC	Suojaputki PVC TEL OPTO A 110	313	mtr	10,13	3170,69
AC/DC	Suojaputki PVC TEL OPTO B 110	12587	mtr	7,26	91381,62
AC/DC	Valaisinpylväs, metalli, h=10m, 1-vartinen, myötäävä	278	kpl	806,59	224232,02
DC	Tasasuuntaaja 30kW	2	kpl	4000	8000
	Suunnittelutyöt	1	kpl	10000	10000