



Jatkuvan säädön vaikutus tunnelivalais- tuksen elinkaarikustannuksiin

Jesse Kujanpää

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2021

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Kujanpää, Jesse

Jatkuvan säädön vaikutus tunnelivalaistuksen elinkaarikustannuksiin

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2021, 43 sivua.

Tekniikan ala. Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Nykymaailmassa energiansäästö ja energiankulutus ovat keskeisiä teemoja monissa asiayhteyksissä, kuten myös tunnelivalaistuksessa. Näiden teemojen kautta entistä energiatehokkaampien ja pidempi-ikäisten valaistusjärjestelmien tarve tunneleissa on kasvanut. Tarkoituksena oli tutkia, kuinka ledivalaisimet yhdessä uudenlaisen säätömenetelmän kanssa vaikuttavat tunnelin valaistusjärjestelmän elinkaarikustannuksiin. Tavoitteena oli kartoittaa, onko säätömenetelmällä merkittäviä vaikutuksia elinkaarikustannuksiin ja kannattaako sitä jatkokehittää.

Elinkaarikustannuksia laskettiin kahdella valmiilla työkalulla ja nykyaikaisella menetelmällä. Aluksi laskettiin nykyisen purkausvalaisimilla toteutetun ja suunnitellun ledivalaistuksen elinkaarikustannukset ilman säädön tai ohjauksen vaikutusta. Tämän jälkeen laskettiin ja arvioitiin jatkuvan säädön vaikutuksia ledivalaistuksen vuotuisiin energiakustannuksiin ja laskettiin elinkaarikustannukset uusilla lähtötiedoilla. Laskelmien perusteella säädöllä saatiin aikaan merkittäviä säästöjä energiakustannuksiin, jotka vaikuttivat myös elinkaarikustannusten loppuarvoon. Vaikka ledivalaisimien alkuinvestoinnit ovat tällä hetkellä suurempia kuin purkausvalaisimilla, tulevat ledivalaisimet pidemmällä aikavälillä kustannustehokkaammiksi. Lisäksi jatkokehittämällä jatkuvan säädön menetelmää voidaan kasvattaa energiasäästöjä ja mahdollisesti pidentää tunnelivalaistusjärjestelmän elinikää.

Avainsanat (asiasanat)

Tunnelivalaistus, valaistuksen ohjaus, elinkaarikustannukset, energiansäästö,

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Kujanpää, Jesse

Impacts of continuous control in tunnel lighting life cycle costs

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2021, 43 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Electrical and Automation Technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

In today's world energy savings and energy consumption are some of the central themes regarding many topics including tunnel lighting. Through these themes has risen the need and demand for constantly more energy efficient and longer lasting tunnel lighting systems. The aim was to study how LED-luminaires together with a new kind of lighting control method affect the life cycle costs of tunnel lighting system. The goal was to find out if the control method had significant affects to the life cycle costs and whether it is worth developing in the future.

The life cycle costs were calculated using two pre-existing tools and present value method. Life cycle costs were initially calculated for the existing and newly designed lighting systems. The existing lighting system was constructed with high pressure sodium luminaires and the new system was designed with LED-luminaires. The initial calculations were made without considering the effects of control. After the initial calculations it was estimated how and how much would the new control system affect to yearly energy costs and to total life cycle costs. After estimations, the life cycle costs were re-calculated using the estimated values. Based on the calculations there was significant reduction of energy costs and hence of the life cycle costs as well. Although the initial costs of LED-luminaires are at this moment considerably higher compared to high pressure sodium, it should be taken into consideration that the total life cycle costs are significantly lower. With further developing of the continuous control method, it is possible to increase the energy savings and possibly the service life of tunnel lighting systems.

Keywords/tags (subjects)

Tunnel lighting, lighting control, life cycle costs, energy saving

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Valaistuksen perussuureet	8
2.1	Valovirta	9
2.2	Valovoima.....	9
2.3	Valaistusvoimakkuus	9
2.4	Luminanssi.....	11
3	Valonlähteet.....	12
3.1	Suurpainenatriumlamppu	12
3.2	Elohopealamppu	13
3.3	Induktiolamppu	13
3.4	LED.....	14
4	Tunnelivalaistus.....	15
4.1	Tunnelivalaistuksen pääosat	16
4.1.1	Päivävalaistus.....	19
4.1.2	Yövalaistus	24
4.2	Turvavalaistus.....	24
4.3	Tunneleissa käytetyt valaisimet	25
5	Tunnelivalaistuksen säätömenetelmät	29
5.1	Portaittainen säätö.....	29
5.2	Portaaton säätö.....	31
6	Tunnelivalaistuksen elinkaarikustannukset	33
6.1	Elinkaarikustannukset purkauslampuilla	36
6.2	Elinkaarikustannukset LED-valaisimilla	38
6.3	Jatkuvan säädön vaikutus elinkaarikustannuksiin	40
7	Pohdinta.....	41
	Lähteet	42

Kuviot

Kuvio 1.	Valaistussuureet käytännössä (Illuminance, 2019).....	8
Kuvio 2.	Valaistusvoimakkuuden havainnollistaminen (Kutz 2016, 2053).	10
Kuvio 3.	Valaistusvoimakkuuden suhde etäisyyteen.....	10
Kuvio 4.	Luminanssin havainnollistaminen.....	11
Kuvio 5.	Ledin toimintaperiaate (Mikä on LED?).	14

Kuvio 6. Tunnelivalaistuksen alueet (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015).	15
Kuvio 7. Symmetrinen valaistus, kattokiinnitys (Tunnel lighting N.d., 7).	17
Kuvio 8. Epäsymmetrinen valaistus, seinäkiinnitys (Tunnel lighting N.d., 7).	18
Kuvio 9. Vastavalo, kattokiinnitys (Tunnel lighting N.d., 7).	18
Kuvio 10. Myötävalo, kattokiinnitys (Tunnel lighting N.d., 7).	19
Kuvio 11. Esimerkki erään eurooppalaisen tunnelin L20-ympyrästä (Doulos ym. 2020, 7).	20
Kuvio 12. Siirtymäalueen luminanssi (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015).	23
Kuvio 13. Tunnelivalaisimien periaattelinen sijoitus ja jaottelu.	29
Kuvio 14. Valaisimien jaottelu portaattomassa säädössä.	31
Kuvio 15. Portaaton ohjaus L20-Teho kuvaajana.	33
Kuvio 16. Tunnelivalaistuksen elinkaaren vaiheet (Adden ym. 2018, 4).	34
Kuvio 17. Esimerkkitunnelin kustannusten jakautuminen (Adden ym. 2018, 28).	35

Taulukot

Taulukko 1. Valaistussuureet.	8
Taulukko 2. Erään eurooppalaisen tunnelin L20-laskennassa käytetyt luminanssiarvot (Doulos ym. 2020, 8).	21
Taulukko 3. Kokemukseen perustuvat luminanssiarvot (Liikennevirasto 2015).	21
Taulukko 4. Luminanssikertoimet ja pysähtymismatkat eri tien nopeuksille (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015).	22
Taulukko 5. M-luokat (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 25).	26
Taulukko 6. C-luokat (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 25).	27
Taulukko 7. P-luokat (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 26).	27
Taulukko 8. Tunneleihin hyväksytyt valaisimet (Hyväksytyt tievalaisimet 2019, 10).	28
Taulukko 9. Esimerkki valaistuportaiden jaottelusta L20-mittauksen perusteella.	30
Taulukko 10. Esimerkki valaistusryhmien ja -portaiden jaottelusta.	30
Taulukko 11. On-off ohjaus.	32
Taulukko 12. Tunneleiden valaistusjärjestelmien arvioidut käyttövuodet (Adden ym. 2018, 12).	33
Taulukko 13. Valaistuportaiden käyttötunnit	37
Taulukko 14. Auringon säteilyn mittausdata.	39

1 Johdanto

Nykymaailmassa energiansäästön ja energiankulutuksen ympärille rakentuneet vihreät teemat ovat jatkuvasti enemmän esillä niin taloudessa kuin myös politiikassa (Lapillonne & Sudries 2020). Tästä on syntynyt tarve ja kysyntä myös valaistusjärjestelmien energiatehokkuuden ja käyttöiän parantamiselle. Energiatehokkuutta ja käyttöikää voidaan parantaa vaihtamalla vanhoja valaisimia uusiin ja paranneltuihin malleihin. Tie- ja tunnelivalaistuksessa tämä näkyy erilaisten kaasupurkauslamppujen vaihtumisena LED-valaisimiin. Koska LED-valaisimet ovat yleisesti käyttöiltään, energiankulutukseltaan ja valaistusominaisuuksiltaan parempia kuin purkauslamput, valaisinvalmistajat ovat vähitellen luopumassa purkauslamppujen valmistuksesta kokonaan. (Reliable, efficient, and safe tunnel lighting N.d.) Tunnelivalaistuksen tapauksessa tämä tarkoittaa energiatehokkaampia valaisimia ja parempaa valaistuksen säätöä. Valaistuksen säädössä pyritään yleensä huomioimaan ja hyödyntämään mahdollisimman paljon luonnonvaloa niiltä osin, miltä se on järkevää. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 73.) Esimerkiksi rakennuksissa ja maanteillä päiväsaikaan tai muina valoisina aikoina valaisimien valotehoa vähennetään mahdollisuuksien mukaan, jotta saavutettaisiin säästöjä sähköenergiankustannuksissa. Tunnelivalaistuksessa luonnonvaloa ei voida hyödyntää samalla tavalla kuin maanteillä tai rakennuksissa, koska tunnelivalaistuksen valotehon on oltava sitä voimakkaampaa, mitä valoisampaa tunnelin ulkopuolella on. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 74–75.)

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia jatkuvan säädön vaikutuksia tunnelivalaistuksen elinkaarikustannuksiin ja sitä, kannattaako jatkuvan säädön menetelmää jatkokehittää. Suomessa tunnelivalaistuksessa on yleisesti käytetty suurpainepurkauslamppuja, mutta LED-tekniikan kehittyessä on ryhdytty siirtymään enenevässä määrin LED-valaisimiin (Vt 12 Lahden eteläisen kehätien tunneliin tulee paljon tekniikkaa varmistamaan turvallisen liikkumisen 2020). Työelämän kannalta aihe tarjoaa uudenlaisen ja vähemmän tutkitun lähtökohdan valaistuksen ohjausjärjestelmien suunnitteluun ja toteuttamiseen tunneleissa. Opinnäytetyö toteutettiin osittain case-tutkimuksena, jossa aluksi laskettiin ja vertailtiin suurpainenatriumvalaisimilla toteutetun valaistuksen elinkaarikustannuksia LED-valaisimilla toteutettuun huomioimatta säädön vaikutusta. Toiseksi laskettiin ja vertailtiin suurpainenatriumvalaisimilla toteutetun valaistuksen elinkaarikustannuksia LED-valaisimilla toteutettuun, jossa huomioitiin lisäksi portaittaisen säätömenetelmän vaikutukset. Lopuksi määriteltiin ihanteellinen jatkuva säätö, jolla valoteho saadaan pidettyä mahdollisimman lähellä minimi-

vaatimuksia ja arvioitiin tästä syntyvien energiasäästöjen merkityksellisyyttä kokonaiskustannuksissa. Tunnelivalaistuksen elinkaarikustannuksia laskettiin kahdella valmiilla työkalulla ja nettonykyarvomenetelmällä. Tarkoituksena ei ollut lähteä kehittämään uutta laskentatyökalua vaan tutustua olemassa oleviin ja vertailla niiden soveltuvuutta tunnelivalaistuksen elinkaarikustannusten laskuun. Kaikkien laskentojen pohjana käytettiin samaa esimerkkikohdetta, johon oli aikaisemmin suunniteltu valaistuksen saneeraus purkausvalaisimista ledivalaisimiin.

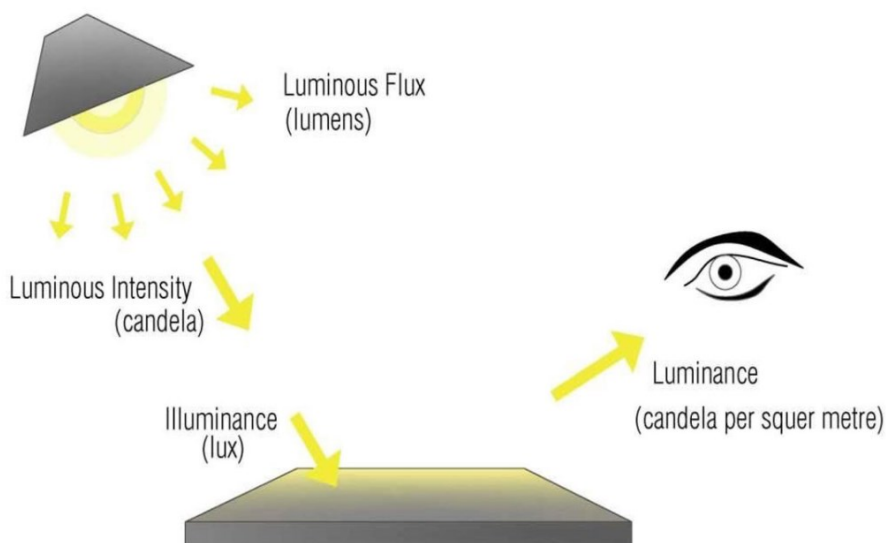
Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Nodeon Finland Oy. Nodeon on kriittisen infrastruktuurin, älykkään liikenteen ja älykkäiden kaupunkien toimialoilla toimiva teknologia asiantuntija, joka tarjoaa muun muassa sähkö- ja automaatiosuunnittelua moninaisiin hankkeisiin. Yrityksen keskeiseen osaamiseen sisältyy lisäksi suunnittelu- ja asiantuntijapalvelut tietoliikenteen, valaistuksen sekä ohjelmistotuotanto. (Lyhyesti N.d.) Tunneleiden osalta Nodeon on ollut mukana muun muassa Tampereen Rantatunnelin ja Lahden eteläisen kehätien hankkeissa. Näissä hankkeissa Nodeon on toteuttanut muun muassa sähkö-, automaatio- ja valaistussuunnittelua. Nodeon on tehnyt useita projekteja julkisille toimijoille kuten Väylävirastolle, Fintrafficille ja eri maakuntien ELY-keskuksille. (Referenssit N.d.) Väylävirasto vastaa valtion tieverkon, rautateiden ja vesiväylien kehittämisestä sekä kunnossapidosta. (Tietoa meistä N.d.) Fintraffic tuottaa ja kehittää liikenteenohjauksen ja hallinnan palveluita. Tieliikenteen ohjauksesta ja hallinnasta vastaa Fintrafficin tytäryhtiö Fintraffic Tie Oy. (Fintraffic lyhyesti n.d.)

2 Valaistuksen perussuureet

Kuten esimerkiksi sähkötekniikalla, myös valolla on omat suurensa, joiden avulla sitä voidaan käsitellä. Muun muassa valaistuksen suunnittelussa ja valaisimien vertailussa perussuureiden ymmärtäminen on keskeistä laadukkaan lopputuloksen kannalta. Tässä luvussa on avattu muutamia keskeisiä valaistuksen perussuureita, jotka on esitetty taulukossa 1. Kuviosta 1 taas nähdään, missä kohdissa eri valaistussuureet vaikuttavat.

Taulukko 1. Valaistussuureet.

Suure	Tunnus	Yksikkö	Yksikön lyhenne
Valovirta (eng. luminous flux)	Φ	lumen	lm
Valovoima (eng. luminous intensity)	I	kandela	cd
Valaistusvoimakkuus (eng. illuminance)	E	luksi	lx
Luminanssi (eng. luminance)	L	kandela per neliömetri	cd/m ²



Kuvio 1. Valaistussuureet käytännössä (Illuminance, 2019).

2.1 Valovirta

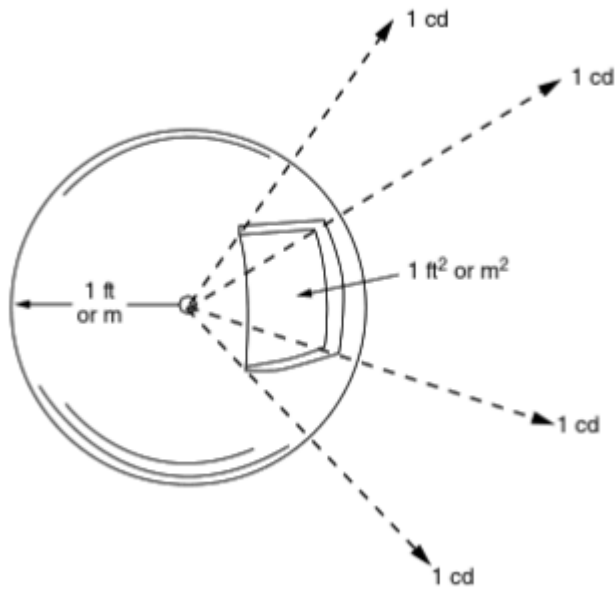
Valovirralla tarkoitetaan valonlähteen kaikkiin suuntiin tuottamaa valon määrää ja sen yksikkö on lumen (lm). Geometrisesti tarkasteltuna lumen on se valovirta, jonka pistemäinen valonlähde tuottaa tasaisella yhden kandelan (cd) valovoimalla yhden steradiaanin, eli yhden avaruuskulman, kokoisen kartion sisälle. (Kutz 2016, 2047.) Steradiaani eli avaruuskulma on kolmiulotteisessa avaruudessa kulman vastine. Steradiaani tarkoittaa kartion avaruudesta rajaamaa osaa, jonka koko on kartion sisälle jäävä alue. Steradiaanin koko on siis se alue, joka jää kartion sisään sellaisen pallon pinnasta, jonka keskipisteenä on kartion kärki. (Avaruuskulma n.d.)

2.2 Valovoima

Valovoima tarkoittaa valonlähteen tiettyyn suuntaan säteilemän valon määrää ja sen yksikkö on kandela (cd). Voidaan siis sanoa, että yksi kandela kuvastaa yhtä lumenia steradiaania kohti ($1\text{cd} = 1\text{lm}/\text{sr}$). Valovoima on suuntariippuvainen eli valonlähde ei tuota samaa valovoimaa kaikkiin suuntiin. Samalla valovoima ei ole etäisyysriippuvainen, vaan valonlähde tuottaa saman valovoiman riippumatta etäisyydestä, mikäli sen kulma pysyy samana. (Kutz 2016, 2047.)

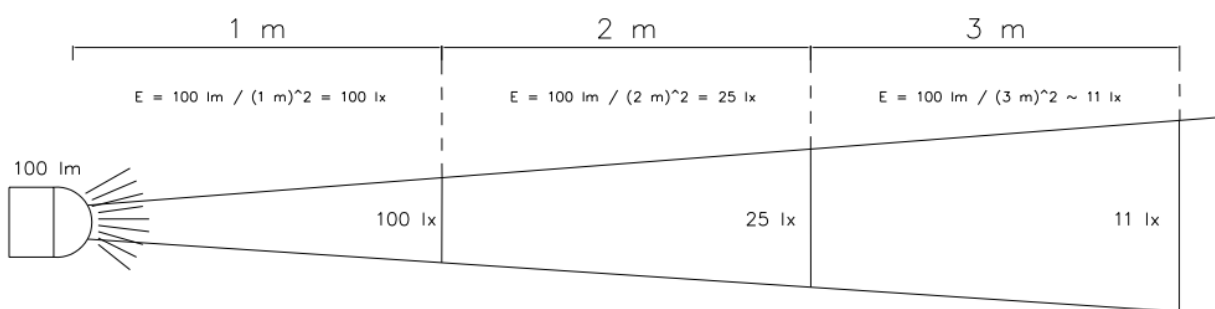
2.3 Valaistusvoimakkuus

Valaistusvoimakkuudella tarkoitetaan valovirran määrää tietyllä pinnalla ja sen yksikkönä käytetään lukseja (lx). Yksi luks vastaa yhden lumenin valovirtaa neliömetrin kokoisella alueella eli $1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2$. Tämä voidaan havainnollistaa esimerkiksi kuvion 2 mukaan: valonlähde, joka säteilee yhden kandelan voimakkuudella, asetetaan pallon sisään, jonka säde on yksi metri. Tällöin pallon sisäpinnan valaistusvoimakkuus on yhden luksin. (Kutz 2016, 2052–2053.)



Kuvio 2. Valaistusvoimakkuuden havainnollistaminen (Kutz 2016, 2053).

Toisin kuin valovirta ja valovoima, jotka ovat valonlähteen ominaisuuksia, valaistusvoimakkuus on riippuvainen siitä, kuinka kaukana havainnoitavasta pinnasta valonlähde on. Valaistusvoimakkuus on siis valovoiman suhde etäisyyden neliöön $E = \frac{I}{d^2}$. Kaavassa E on valaistusvoimakkuus, I on valovirta ja d on valonlähteen ja havainnoitavan pinnan etäisyys toisistaan. Kaava on havainnollistettu kuviossa 3. (Kutz 2016, 2053–2054.)

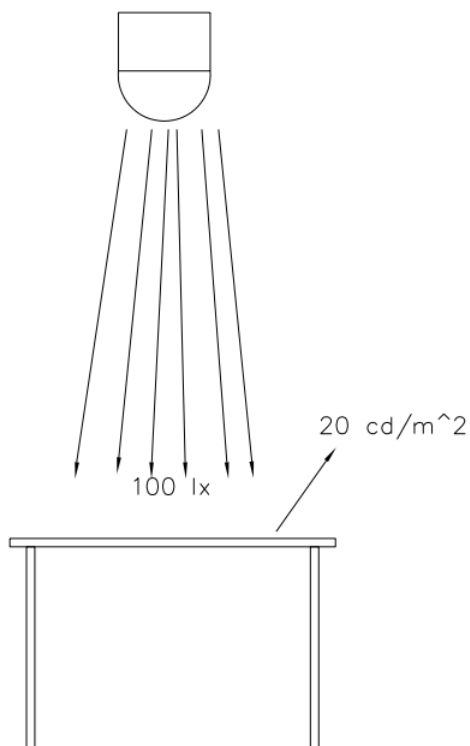


Kuvio 3. Valaistusvoimakkuuden suhde etäisyyteen.

Valaistusvoimakkuus on yleensä se arvo, joka esitetään valaistuksen mitoittamiseen liittyvissä standardeissa. Tämä johtuu siitä, että se on yleensä kuvaava arvo siitä, kuinka paljon valoa on havaittavissa esimerkiksi pöydän pinnalla. (Kutz 2016, 2054.)

2.4 Luminanssi

Luminanssin arvo kertoo, kuinka paljon valoa heijastuu havainnoitavalta pinnalta tiettyyn suuntaan. Se on myös ainoa suure, jonka voi nähdä. Luminanssi ilmaistaan kandeloiden määränä pinta-alaa kohti eli cd/m^2 . Tavallisesti luminanssilla ilmaistaan tietyn pinnan kirkkautta. Esimerkiksi kuviossa 4 on esitetty pöydän luminanssi tiettyyn katselukulmaan, kun valonlähde on kohtisuoraan yläpuolella. Luminanssin suuruus muuttuu havainnointikulman muuttuessa eli se on riippuvainen siitä, mistä kohtaa pintaa havainnoidaan. Luminanssin arvo pysyy samana kaikilla etäisyyksillä tietyssä kulmassa. Esimerkiksi, jos havainnoidaan pöydän pintaa kohtisuoraan ylhäältä ja hieman viistosta niin tällöin molemmissa havainnointikohdissa luminanssin arvo on eri. Jos taas havainnoitaisiin seinää kohtisuoraan ja liikuttaisiin edes takaisin samassa kulmassa niin tällöin luminanssin arvo pysyisi muuttumattomana. (Kutz 2016, 2054–2055.)



Kuvio 4. Luminanssin havainnollistaminen.

3 Valonlähteet

Luvussa käsitellään yleisimpien käytössä olevien sekä käytöstä ja markkinoilta poistumassa olevien valonlähteiden rakenteita ja toimintaperiaatteita. Luvussa keskitytään erityisesti ulko- ja tunnelivalaistuksessa käytettyihin ja käytettäviin valonlähteisiin.

3.1 Suurpainenatriumlamppu

Suurpainenatriumlamput kehitettiin 1980-luvun lopulla ja ne tulivat yleisesti myyntiin 1990-luvun puolivälissä. Suurpainenatriumlamppujen oli tarkoitus korvata elohopea- ja pienpainenatriumlamppujen puutteita. Suurpainenatriumlamppu on säilyttänyt suosionsa vaihtoehtona valaistusratkaisuihin sen hyvän teho-valosuhteen ja suhteellisen pitkän käyttöiän vuoksi. Nämä lamput sopivat sovelluksiin, joissa värinvalaistus-ominaisuudet eivät ole ensisijaisen tärkeitä kuten tie- ja aluevalaistuksessa. (Coaton & Marsden 2011, 235.)

Suurpainenatriumlamppu rakentuu keraamisesta purkausputkesta, jonka molemmissa päissä on volframista valmistettu elektrodi. Purkausputki on täytetty yleensä natriumin ja elohopean seoksella, tosin nykyään markkinoilla on myös elohopea vapaita vaihtoehtoja. Purkausputken kaasuseokseen lisätään esimerkiksi ksenonkaasua, joka toimii lampun sytytyskaasuna. Purkausputken ja lampun ulkovaipan välissä on tyhjiö, jotta elektrodi ei olisi kosketuksissa hapen kanssa. Tämä muun muassa estää liian kuumana palamista. (Coaton & Marsden 2011, 235–238.)

Natriumelohopeaseoksen paine lampussa on melko alhainen huoneenlämmössä, jonka takia sen läpilyöntijännite on korkea. Ksenonia tarvitaan läpilyöntijännitteen laskemiseen. Lamppu sytytetään elektrodeihin syötetyllä korkealla vaihtojännitepulssilla (noin 1,5–5 kV). Tässä vaiheessa ksenonkaasu latautuu ja saavuttaessaan riittävän latauksen tapahtuu läpilyönti, joka sytyttää natriumelohopeaseoksen eli amalgaamin. Lamppu ei tuota heti syttyessään täyttä valovirtaa vaan sen lämpeneminen kestää noin viisi minuuttia, jonka jälkeen lamppu tuottaa noin 80 % täydestä valovirrastaan. (Coaton & Marsden 2011, 242–245.)

3.2 Elohopealamppu

Elohopealamppu on kaasupurkauslamppu, joka on rakenteeltaan melko samankaltainen kuin suurpainenatriumlamppu. Lamppu koostuu kvartsisesta purkausputkesta, joka mahdollistaa lampulle ominaisen korkean lämpötilan ja paineen sen palaessa. Elohopealamppun ulkokuori voidaan myös päällystää fosforilla, jolloin valon väristä saadaan punaisempaa verrattuna elohopealle ominaiseen valkeanvihreään valoon. Tällaisia fosforilla päällystettyjä lamppuja käytetään esimerkiksi tie- ja katuväläistuksessa. (Coaton & Marsden 2011, 252–255.)

Lampun purkausputki on täytetty argonilla ja tarkalla määrällä elohopeaa. Argonin paine purkausputkessa on 2500–5000 Pa. Elohopean määrä vaikuttaa purkausputken jännitteeseen ja argonin korkea paine saattaa häiritä lampun syttymistä. Elohopealamput tarvitsevat yleensä jonkinlaisen kuristimen, jolla rajoitetaan lampun virtaa. Normaalisti verkkojännitteellä kuristin koostuu kondensaattoreista ja pienemmillä verkkojännitteillä voidaan käyttää korkea reaktanssista muuntajaa. Lamppu sytytetään kytkemällä elektrodien jännite läpilyönnin aikaansaamiseksi. Purkausputkessa oleva argonikaasu täyttää tyhjän tilan elektrodien välillä ja mahdollistaa läpilyönnin, jolla lamppu syttyy. Lampun syttymiseen ja syttymisjännitteeseen vaikuttaa merkittävästi ympäristön lämpötila, koska se vaikuttaa herkästi elohopeakaasun paineeseen lampussa. (Coaton & Marsden 2011, 256–257.)

3.3 Induktiolamppu

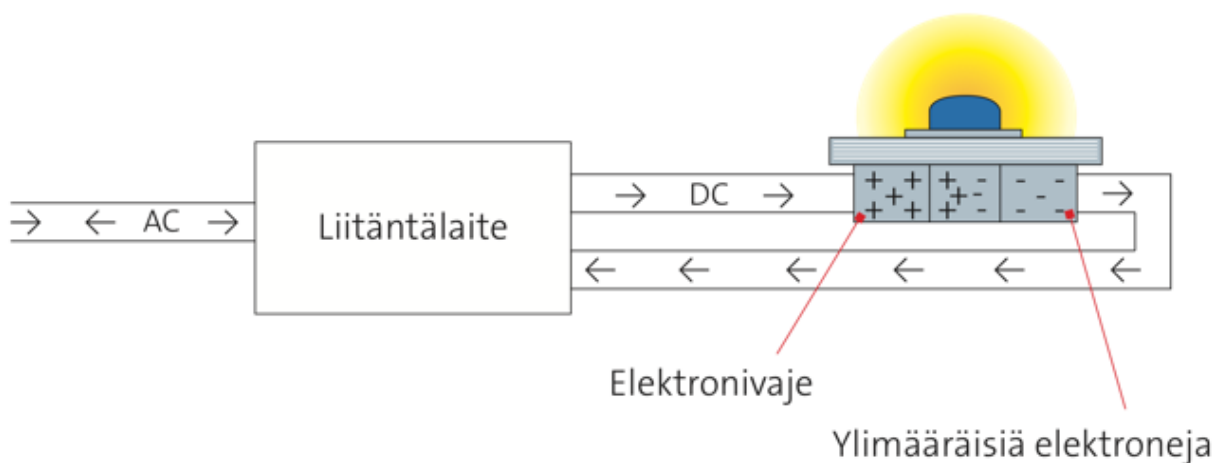
Induktiolamppu on myös eräänlainen kaasupurkauslamppu. Erona induktiolampuissa suurpainenatrium- tai elohopealamppuihin on se, että lampussa ei ole elektrodia. Elektrodien poistaminen mahdollistaa esimerkiksi lampun muodon muokkaamisen, eikä sen tarvitse induktiolampuissa olla putkimainen. Induktiolampuista on myös putkimaisia versioita, joilla voidaan korvata esimerkiksi suurpainenatriumlamppuja niiden tullessa käyttöikänsä loppuun. Elektrodivapaissa lampuissa etuna on myös pidempi käyttöikä, koska niissä ei ole kuluvia elektrodia, jotka yleensä vikaantuvat ensimmäisenä. Lisäksi induktiolampuissa on mahdollista käyttää sellaisia kaasuseoksia, jotka eivät ole yhteensopivia elektrodien materiaalien kanssa. (Coaton & Marsden 2011, 216–217.)

Induktiolampussa läpilyönti saadaan aikaan sähkömagneettisella induktiolla. Lampussa on kela, joka voi olla sisällä tai ulkona purkaustilasta. Kelan läpi kulkeva virta aiheuttaa magneettikentän,

joka synnyttää sähkökentän purkaustilaan. Tässä sähkökentässä syntyy läpilyönti, joka sytyttää lampun samoin kuin muissa purkauslamputissa, mutta ilman elektrodien tarvetta. (Coaton & Marsden 2011, 217–220.)

3.4 LED

LED-lyhenne muodostuu sanoista Light Emitting Diode eli valoa säteilevä diodi. Ledi on puolijohdekomponentti, joka koostuu kahdesta eri varauksella olevasta kerroksesta. Ledin kerroksista käytetään nimityksiä p- ja n- kerros (positiivinen ja negatiivinen) tai katodi ja anodi. Kuviossa 5 on esitetty ledin karkea toimintaperiaate. Ledissä sähkövirta kulkee päästösuuntaan katodilta anodille ja kuljettaa katodilla olevia elektroniaukkoja sekä anodilla olevia elektroneja ledin liitoskohtaan. Liitoskohdassa elektroniaukot ja elektronit yhdistyvät, jolloin elektronit siirtyvät alemmalle energiatasolle. Tässä tapahtumassa energiaa vapautuu valon säteilyä ja värähtelyä viereisiin atomeihin, josta syntyy lämpöä. Ilmiötä, jolla ledi synnyttää valoa kutsutaan elektroluminesenssiksi ja se löydettiin ensimmäisen kerran 1900-luvun alussa. (Khanh, Bodrogi, Vinh & Winkler 2015.)



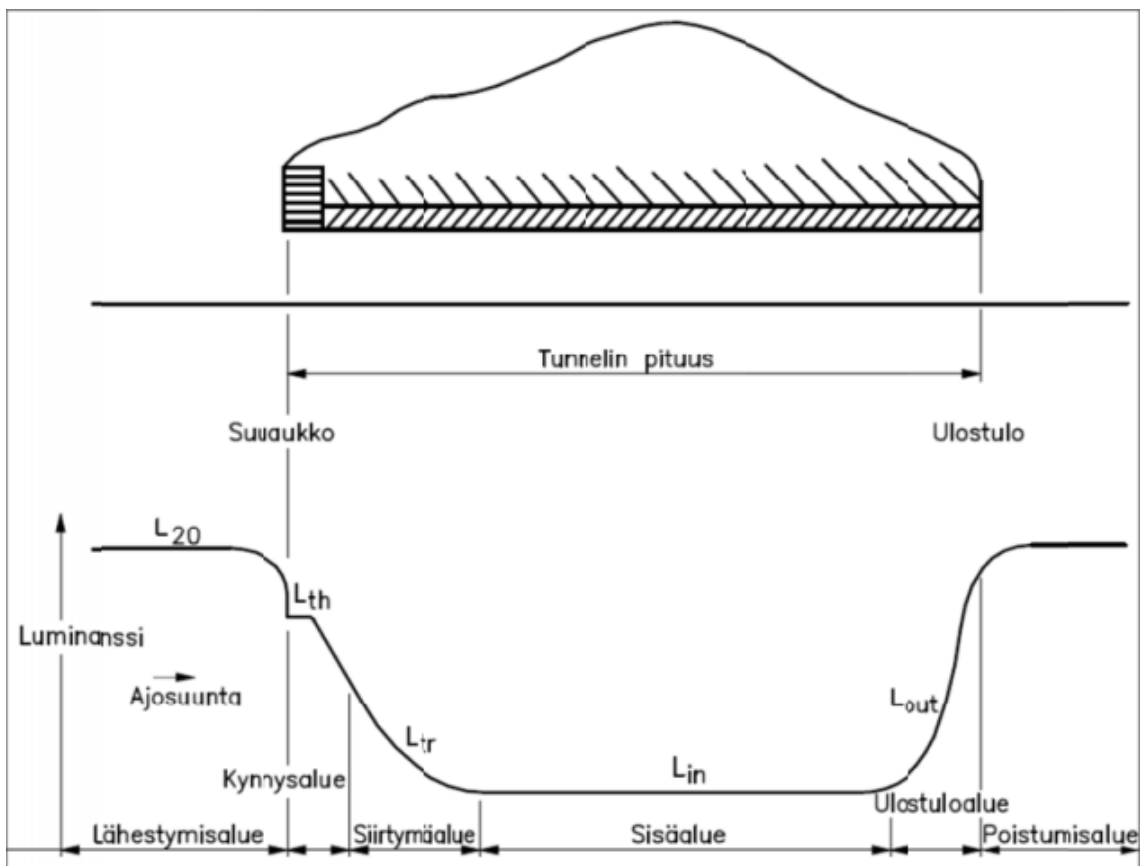
Kuvio 5. Ledin toimintaperiaate (Mikä on LED?).

Ledin valo on yksiväristä eli monokromaattista ja yleisimmät valon värit ovat punainen, vihreä ja sininen. Nykytekniikalla led voi säteillä lähes minkä väristä valoa tahansa ja valon väriin vaikuttaa ledissä käytetyt materiaalit. Valkoista valoa loistava led saadaan käyttämällä punaisen, vihreän ja sinisen ledin sekoitusta. (Khanh ym. 2015.)

4 Tunnelivalaistus

Tunnelivalaistuksen tarkoituksena on varmistaa ympäri vuorokauden sellaiset olosuhteet, että ajoneuvot voivat turvallisesti ajaa tunneleissa. Tämä tarkoittaa, että ajoneuvo voi lähestyä ja ajaa tunnelin sisälle sekä ulos tunnelista ilman, että liikenneturvallisuus poikkeaa merkittävästi avoimen tien tai kadun vastaavasta. Keskeistä turvallisuuden varmistamisessa on, että kuljettaja näkee riittävällä etäisyydellä tien, muut ajoneuvot ja ajoneuvojen liikkeitä. Tunnelivalaistuksen suunnittelussa keskitytään muun muassa seuraaviin tekijöihin: luminanssitasoihin, luminanssin tasaisuuteen, häikäisyn rajoittamiseen ja vilkkumisen vähentämiseen. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 73.)

Tunnelin valaistusta suunniteltaessa on huomioitava kaikki tunnelin alueet. Tunnelivalaistus voidaan jakaa viiteen alueeseen kuvion 6 mukaisesti: lähestymisalue, kynnyshalue, siirtymäalue, sisäalue ja ulostuloalue. Alla olevassa kuviossa esitettyä poistumisaluetta ja sen valaistusta ei lasketa osaksi tunnelivalaistusta.



Kuvio 6. Tunnelivalaistuksen alueet (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015).

Lähestymisalue on tunnelia ennen oleva alue, jonka pituus määräytyy pysähtymismatkan mukaan. Pysähtymismatkalla tarkoitetaan sitä matkaa, joka vaaditaan ajoneuvon pysäyttämiseen. Esimerkiksi jos tien nopeusrajoitus on 60 km/h pysähtymismatka on tällöin 35 metriä ja lähestymisalueenpituus täten myös 35 metriä. (Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses 2004, 5.) Suomessa kuitenkin käytetään valaistuksen laskennoissa taulukon 4 arvoja pysähtymismatkan pituuksina (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 77).

Kynnysalue on välittömästi tunnelin suuaukon jälkeen alkava tunnelin osa, jonka pituus on vähintään pysähtymismatkan pituinen (Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses 2004, 5).

Siirtymäalue alkaa siitä, mihin kynnysalue päättyy ja loppuu kun sisäalue alkaa. Oleellista tällä alueella on, että luminanssitasot laskevat kynnysalueen tasosta sisäalueen tasoon. (Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses 2004, 5.)

Sisäalue tarkoittaa valtaosaa tunnelista. Sisäalue alkaa siirtymäalueen jälkeen ja loppuu poistumisalueen alkuun. (Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses 2004, 5.)

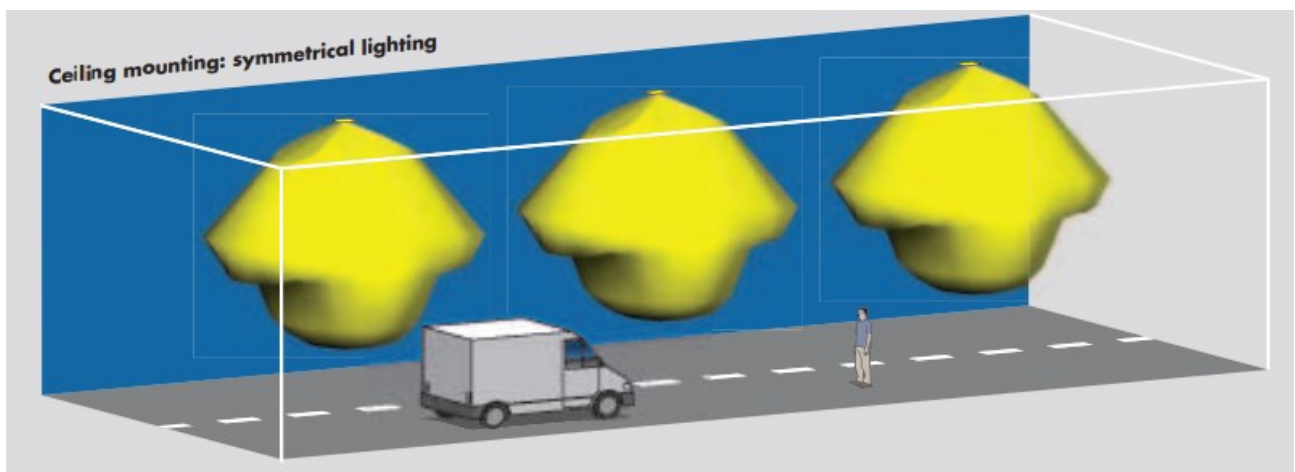
Ulostuloalue alkaa sisäalueen jälkeen. Ulostuloalueella tunnelinkäyttäjä altistuu päivänvalolle ja totuttautuu ulkoalueen valaistustasoon. Ulostuloalue päättyy tunnelin poistumissuuaukkoon. (Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses 2004, 5-6.)

4.1 Tunnelivalaistuksen pääosat

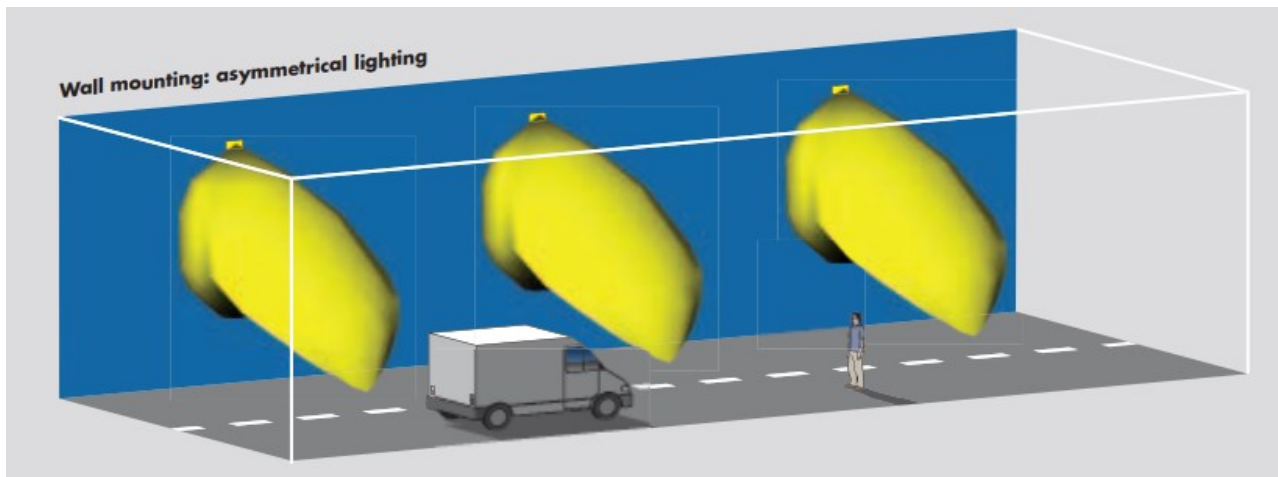
Liikenneviraston (nykyinen Väylävirasto) ohjeessa tunnelivalaistus jaetaan kahteen pääosaan: normaalivalaistukseen ja turvavalaisukseen. Normaalivalaistukseen kuuluu päivävalaistus ja yövalaistus. Päivävalaistuksen ominaisuuksiin kuuluu sisäänajo-osuudella tai suuaukolla korkeat luminanssiarvot, jotka riippuvat luonnonvalon määrästä ja voimakkuudesta. Kiteytettynä tämä tarkoittaa sitä, että suuaukon luminanssin on oltava sitä suurempi, mitä suurempi ulkopuolella vallitseva luminanssiarvo on. Yövalaistusta käytetään yöllä, silloin kun liikenne on hiljaista. Tällöin tunnelissa on huomattavasti matalammat luminanssin tasot kuin päivällä. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 73.)

Tunneleissa turvavalaistus koostuu kahdesta kokonaisuudesta: varavalaistuksesta ja evakuointivalaistuksesta. Varavalaistukseen kuuluu osa tunnelin normaalista päivävalaistuksesta ja sen tarkoituksena on varmistaa luminanssin vähimmäisarvo esimerkiksi sähkökatkoksen aikana, jotta tunnelia voidaan käyttää normaalista. Evakuointivalaistusta tarvitaan mahdollisissa onnettomuustilanteissa, joiden aikana tunnelissa olevia henkilöitä on ohjattava poistumaan jalan. Evakuointivalaistus koostuu siis erilaisista merkkivaloista ja valaistuista poistumisopasteista. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 73.)

Tunnelivalaistuksessa valo voidaan kohdistaa ja ohjata liikenteeseen muutamalla eri tavalla. Näitä tapoja ovat symmetrinen, epäsymmetrinen, vastavalo ja myötävalo. Symmetrinen valaistus tarkoittaa, että valaisimet säteilevät joka suuntaan kuvion 7 omaisesti yhtä paljon. Symmetrisellä valaistuksella saavutetaan tasainen luminanssi ja matalat kontrasti erot koko tunnelissa. Symmetrisiä valaisimia käytetään esimerkiksi silloin kun valaisimet kiinnitetään tunnelin kattoon. Epäsymmetrisyydellä tarkoitetaan sitä, että valaisimen optiikalla valo ohjataan painotetusti tiettyyn suuntaan esimerkiksi silloin kun valaisimet on asennettu seinään. Epäsymmetrisillä valaisimilla voidaan esimerkiksi korostaa haluttuja osia tunnelista tai valaista hankalan muotoisia alueita. Esimerkki seinäkiinnitteisestä epäsymmetrisestä valaistuksesta on esitetty kuviossa 8. (Tunnel lighting N.d., 6.)

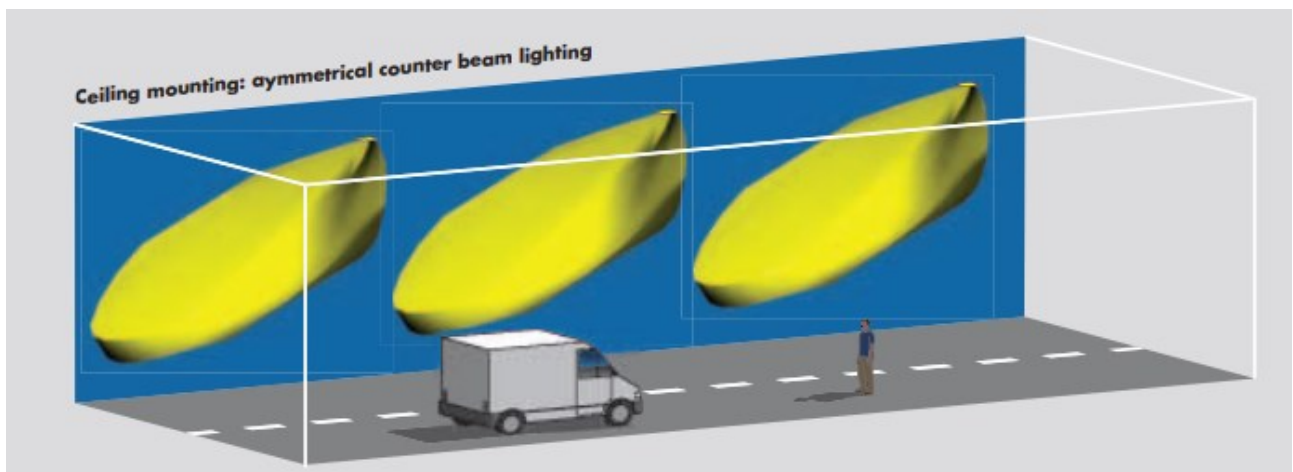


Kuvio 7. Symmetrinen valaistus, kattokiinnitys (Tunnel lighting N.d., 7).

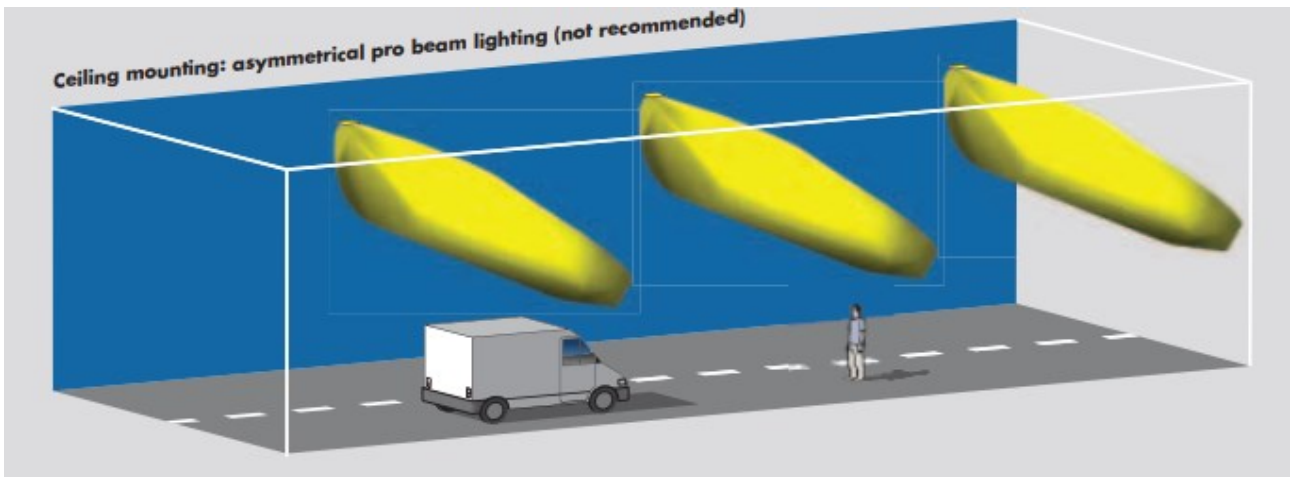


Kuvio 8. Epäsymmetrinen valaistus, seinäkiinnitys (Tunnel lighting N.d., 7).

Vastavalolla voidaan nostaa luminanssitasoja ja korostaa tunnelissa mahdollisesti olevia esteitä. Vastavalo toteutetaan asettamalla epäsymmetristen valaisimien valokeilat liikennevirtaa vasten kuvion 9 mukaisesti. Valaisimet tulee kuitenkin sijoitella siten, että ne eivät häikäise kuljettajaa. Myötävalolla voidaan tasoittaa ulostuloalueen kontrastia ja tällöin epäsymmetriset valaisimet asetetaan liikenteen suunnan myötäisesti, kuten kuviossa 10 on esitetty. (Tunnel lighting N.d., 6.)



Kuvio 9. Vastavalo, kattokiinnitys (Tunnel lighting N.d., 7).



Kuvio 10. Myötävalo, kattokiinnitys (Tunnel lighting N.d., 7).

Valaisimet voidaan sijoittaa tunneliin usealla tavalla. Yleisimpiä tapoja ovat katto- tai seinäkiinnitys yhdessä tai useammassa linjassa. Kattokiinnityksen etuna on se, että valaisimesta saadaan usein paras suorituskyky ja se samalla vähentää valaisimen häikäisyä. Toisaalta valaisimet saattavat jäädä liikennemerkkien taakse ja jos valaisimet on asennettu yhteen linjaan, on tunneli suljettava huoltoa varten. Seinäasennuksen etuna on muun muassa, että valaisimien luokse on helpompi päästä ja huolto vaatii vain yhden ajokaistan sulkemisen. On kuitenkin huomioitava, että matalammalla olevat valaisimet häikäisevät enemmän ja likaantuvat helpommin. Lisäksi korkeat ajoneuvot kuten rekat tai kuorma-autot voivat peittää niitä hetkellisesti. (Tunnel lighting N.d., 6.)

4.1.1 Päivävalaistus

Tunnelin päivävalaistuksen mitoituksessa ja laskennassa on tarkasteltava luminanssitasoja eri kohdissa tunnelia. Liikenneviraston ohjeessa käytetyt termit ovat lähestymis-, kynnyalueen, siirtymäalueen, sisäalueen ja ulostuloalueen luminanssi. Näiden lisäksi koko tunnelissa on huomioitava myös seinien luminanssi, luminanssintasaisuus sekä häikäisyn ja vilkkumisen rajoittaminen. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 74.)

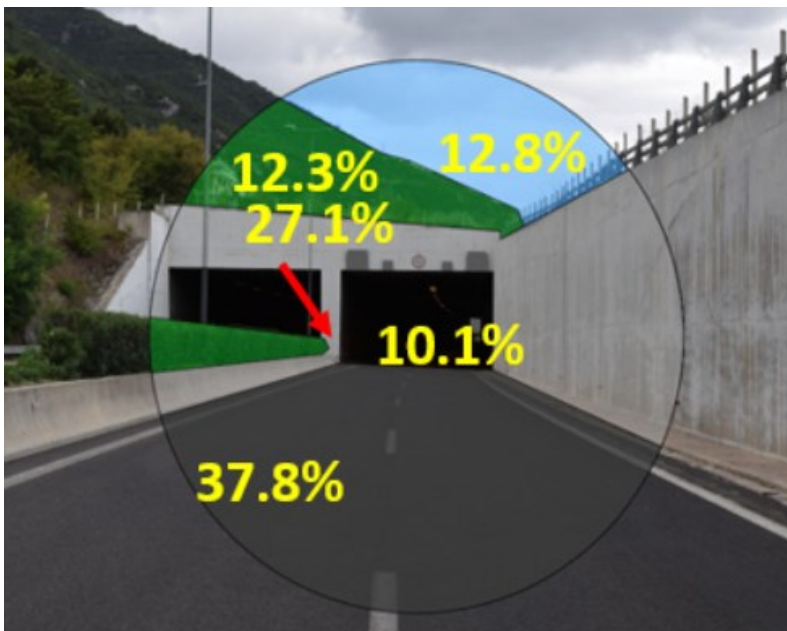
Lähestymisluminanssi kertoo suuaukon välittämättömän ympäristön luminanssin, jonka kuljettaja näkee lähestyessään tunnelia. Lähestymisluminanssi riippuu erilaisten pintojen kuten rakennusten seinien tai tienpinnan heijastusominaisuuksista, ympäristön yleisestä valoisuustasosta ja tunnelin

maantieteellisestä sijainnista sekä auringon asemasta. Lähestymisluminanssin määrittämiseen käytetään niin sanottua L20-menetelmää, jossa pysähtymismatkanpäähän tunnelin suuaukosta asetetaan 20 asteen kartio, jonka sisällä oleva luminanssi lasketaan. Piirretystä ympyrästä määritetään näkyvän taivaan, tien ja ympäristön suhteelliset osuudet ja luminanssin arvo lasketaan kaavalla:

$$L_{20} = \gamma L_C + \rho L_R + \varepsilon L_E + \tau L_{th}$$

, jossa γ on taivaan osuus, ρ on tien osuus, ε on ympäristön osuus ja τ on tunnelin suuaukon osuus ympyrän pinta-alasta. Suhteellisten osuuksien summan on oltava yksi, jotta voidaan todeta osuuksien oikeat määrittelyt. Erialueiden luminansseille (LC taivaalle, LR tielle, LE ympäristölle, Lth kynnyksalueelle) käytetään Suomessa kokemusperäisiä arvoja, jotka on esitetty taulukossa 3. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 75–76.)

Kuviosta 11 nähdään tunnelin suuaukon ympärille piirretty L20-ympyrä ja taulukosta 2 voidaan lukea erään eurooppalaisen tunnelin laskennassa käytetyt luminanssiarvot. Näiden pohjalta kyseisen tunnelin L20-arvoksi saatiin 4912 cd/m². (Doulos, Sioutis, Tsangrassoulis, Canale, Faidas 2020, 8.)



Kuvio 11. Esimerkki erään eurooppalaisen tunnelin L20-ympyrästä (Doulos ym. 2020, 7).

Taulukko 2. Erään eurooppalaisen tunnelin L20-laskennassa käytetyt luminanssiarvot (Doulos ym. 2020, 8).

Tunnel	4a	4b	5a	5b
Driving direction	East Northeast	West Southwest	East Southeast	West
γ (%) of sky	21.5%	0.0%	0.0%	12.8%
L_c (Sky) (kcd/m ²) [31]	11	13	13	12
ρ (%) of road	42.2%	41.3%	37.8%	37.8%
L_R (Road) (kcd/m ²) [31]	3.75	4.25	4.25	4
ϵ (%) of surrounding – vegetation	10.5%	32.8%	27.0%	12.3%
L_E (Vegetation) (kcd/m ²) [31]	2	2	2	2
ϵ (%) of surrounding – buildings	18.3%	20.0%	26.4%	27.1%
L_E (Buildings) (kcd/m ²) [31]	6.5	5.5	5.5	6
ϵ (%) of surrounding - rock	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
L_E (Rock) (kcd/m ²) [31]	2.25	1.75	1.75	2

Taulukko 3. Kokemukseen perustuvat luminanssiarvot (Liikennevirasto 2015).

Ajosuunta	L_c	L_R	L_E			
			kallio tai tumma rakennus	normaali tai vaalea rakennus	lumi	nurmikko
Pohjoiseen	8	3	3	8	15	2
Länteen tai itään	12	4	2	6	15	2
Etelään	16	5	1	4	15	2

Kynnysalueen luminanssilla tarkoitetaan suuaukon ja sisäalueen välistä luminanssia. Kynnysalueella tarkoitetaan pysähtymismatkan pituista osuutta tunnelin suuaukosta sisäänpäin. Luminanssin on oltava kynnysalueen alkupuoliskolla täydessä arvossa. Kynnysalueen valaistuksen tarkoituksena on tasoittaa luminanssitasojen eroa tunnelin ulko- ja sisäpuolella ja estää niin sanotun ”musta aukko”-efektin muodostuminen. ”Musta aukko”-efektillä tarkoitetaan tilannetta, jossa siirtyään kirkkaammasta ympäristöstä hämärämpään ympäristöön ja silmät sopeutuvat valaistuksen muutokseen. Vaikka hämärämmässä ympäristössä olisi näkemiseen riittävästi valoa, mutta siirtyminen on tapahtunut huomattavasti kirkkaammasta ympäristöstä, ympäristö näyttäytyy hetkelli-

sesti pimeänä ennen kuin silmät ovat sopeutuneet tilanteeseen. Kynnysalueella käytetään tehokkaampia valaisimia kuin sisäalueella, jotta luminanssierot saadaan tasoitettua mahdollisimman tehokkaasti. Kun käytetään L20-menetelmää kynnysalueen alkupuoliskolla tarvittavan luminanssin määrittämiseen, lasketaan se kaavalla:

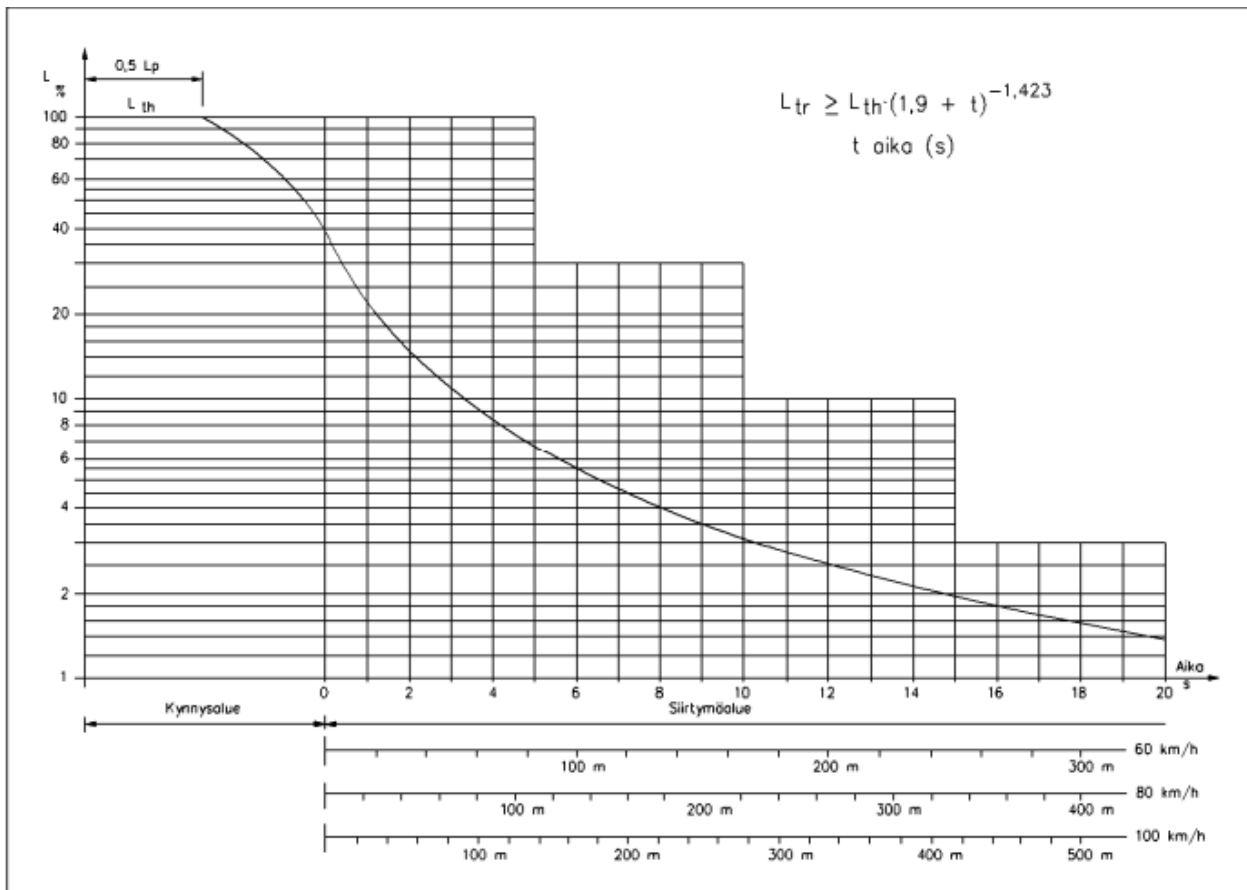
$$L_{th} = k * L_{20}$$

, jossa L_{th} on kynnysalueen luminanssi, L_{20} on lähestymisalueen luminanssi ja k on luminanssikerroin. Liikenneviraston ohjeessa on esitetty taulukon 4 mukaiset käytettävät luminanssikertoimet ja pysähtymismatkat eri tien nopeuksille. Lyhyiden tunnelien (alle 350 m) laskennassa luminanssikerroimen k arvo jaetaan kahdella. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 77–79.)

Taulukko 4. Luminanssikertoimet ja pysähtymismatkat eri tien nopeuksille (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015).

Suunnittelunopeus tai nopeusrajoitus (km/h)	k	Pysähtymismatka (m)
≤ 60	0,04	75
80	0,05	120
100	0,07	180
120	0,10	260

Siirtymäalueen luminanssilla tarkoitetaan kynnysalueen ja sisäalueen välistä aluetta, jossa luminanssia vähennetään portaittain tai portaattomasti, siten että siirtymäalueella olevat ajoneuvot ja niiden mahdolliset liikkeet voi havaita riittävältä etäisyydeltä. Liikenneviraston ohjeessa esitetään kuvion 12 mukainen kuvaaja, jonka mukaan luminanssia voidaan laskea L20-mittauksen perusteella samalla säilyttäen riittävä havainnointi kyky tunnelissa. Valaistusta mitoitettaessa tulee huomioida, että siirtymäalue päättyy, kun kuvion 12 käyrän vaatimus on yhtä suuri kuin sisäalueen luminanssi. Yleensä kuitenkin siirtymäalue päätetään siinä kohdassa, jossa käyrän arvon on kaksinkertainen sisäalueen luminanssiin. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 78.)



Kuvio 12. Siirtymäalueen luminanssi (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015).

Sisäalueen luminanssi on koko tunnelin sisällä vallitseva luminanssi, joka on tunnelin siirtymäalueen jälkeen ensisijainen valoisuuden arvo. Sisäalueen luminanssin tulee olla vähintään kaksinkertainen verrattuna sen tien keskimääräiseen luminanssiin, josta tunneliin ajetaan. Tunnelin sisäalueen valaistus aloitetaan ja lopetetaan kohdassa, jossa tievalaistuksen luminanssi on vähintään sama kuin sisäalueen luminanssi. Tämä koskee niitä aikoja, joina ulkopuolisen tien valaistus on päällä. Jotta tämä vaatimus täyttyy, on suuaukkoja lähimpänä olevat tunnelivalaisimet oltava riittävän lähellä. Päivänvalon aikaan sisäalueen valaistus lopetetaan vastaavasti siinä kohdassa, jossa luminanssi on vähintään sama kuin sisäalueen luminanssi. Koska sisäalueen valaistus on aina päällä, on tunnelin sisäosan heijastusominaisuuksien oltava optimoidut valaistuksen energiakulutuksen vähentämiseksi. Tällaisia toimenpiteitä ovat muun muassa seinien tasoitus ja maalaaminen vaalealla sävyllä. Sisäalueen valaisimina yleensä käytetään suuntaamattomia ja pienempi tehoisia valaisimia yleisvaloisuuden luomisessa. Pimeinä aikoina, jolloin kynnyks- ja siirtymäalue eivät ole päällä sisäalueen valaistus valaisee koko tunnelin. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 78.)

Ulostuloalueen luminanssi mitoitetaan yleensä samaksi kuin sisäalueen luminanssi. Ulostuloalueen luminanssia voidaan kuitenkin lisätä päivällä, jos tunneli on runsaasti liikennöity ja sen ulostuloaukon läheisyydessä on korkeampi onnettomuusriski. Tällöin luminanssin lisäys tulee toteuttaa pysähtymismatkan siten, että luminanssi on viisinkertainen 20 metriä ennen suuaukkoa. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 78.)

Luminanssintasaisuudelle on Liikenneviraston ohjeessa annettu yksiselitteiset arvot: 0,40 yleistasaisuudelle (U_o) ja 0,60 pitkittäistasaisuudelle (U_L) (Liikennevirasto 2015, 78–79). Yleistasaisuus vaikuttaa suoraan siihen, kuinka tunnelin käyttäjä näkee. Yleistasaisuus määritetään ajoradan pienimmän ja keskimääräisen luminanssin osamäärällä. Pitkittäistasaisuus taas on olennainen ajo- ja näkömukavuuden tekijä. Pitkittäistasaisuus määritetään asettamalla kaistan keskelle havaitsemispiste ja ”piirtämällä” pitkittäinen suora sen kautta. Suoralta saatavien pienimmän ja suurimman luminanssin osamäärä on pitkittäistasaisuuden arvo. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 22–23.)

4.1.2 Yövalaistus

Öisin tunneleissa on käytössä päivävalaistuksesta himmennetty yövalaistus. Yleisesti jos tunneliin kulkevan tien valaistusta ohjataan, niin tunnelinvalaistuksen ohjausajat ovat samat kuin tievalaistuksessa. Tunnelissa yövalaistuksen keskimääräisen luminanssin tulisi olla ainakin kaksinkertainen tien valaistukseen verrattuna, jos tievalaistusta himmennetään. Jos taas tunneli on tiellä, jota ei valaista, tunnelin keskimääräisen luminanssin tulisi olla vähintään 1 cd/m^2 . Luminanssin tasaisuuden tulisi olla sama kuin päivävalaistuksen aikaan. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 79.)

4.2 Turvavalistus

Tunneleissa turvavalistus koostuu varavalaisuksesta ja evakuointivalaistuksesta. Varavalaisuksella tarkoitetaan valaisimia, jotka ovat osa päivävalaistusta, mutta toimivat myös sähkökatkon aikana. Varavalistus toteutetaan liittämällä osa sisäalueen valaisimista varmennettuun sähkönsyöttöön. Liikenneviraston ohjeessa määrätään, että varavalaisuksen tulee toimia 15 minuuttia, luminanssin on oltava vähintään 1 cd/m^2 ja yleistasaisuuden vähintään 0,10. Mikäli tunnelin toinen

suuaukko on havaittavissa sisäänajo kohdasta ei varavalaistus ole välttämätön. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 82.)

Evakuointivalaistuksella tarkoitetaan tunnelin valaistuja poistumisopasteita. Niitä tulee sijoittaa enintään 25 metrin välein 1,5 metrin korkeudelle samalle puolelle tunnelia poistumisovien kanssa. Jos tunnelissa ei ole poistumisovia opasteet tulisi sijoittaa ulommalle seinälle ja jos kaistoja on kolme tai enemmän opasteita tulisi olla molemmin puolin tunnelia. Poistumisopasteet sijoitetaan 1,5 metrin korkeudelle, jotta ne eivät peittyisi savuun esimerkiksi tulipalon aikana. Poistumisopasteet liitetään varmennettuun sähkönsyöttöön ja lisäksi niillä on oltava oma sisäinen virtalähde, jolla ne voivat toimia vähintään 60 minuuttia sähkönsyötön katkettua. Poistumisopasteilla on tarkoitus ohjata ihmiset läheisille poistumisoville tai suuaukoille, jos tunnelissa tapahtuu esimerkiksi onnettomuus, joka pakottaa ihmiset jalkautumaan ajoneuvoistaan ja poistumaan tunnelista jalan. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 82–83.)

Poistumisopasteen valovoiman tulee olla 0,1 kandela jokaisella opasteiden välisellä metrillä. Eli jos opasteiden väli on 25 metriä, valovoiman tulee olla vähintään 2,5 kandela. Vaakatason valaistusvoimakkuuden ja yleistasaisuuden mitoituksessa käytetään samoja arvoja kuin sisäalueen valaistuksessa. Poistumisovilla valaistusvoimakkuuden tulee olla oven ympärillä keskimäärin vähintään 100 luksia ja yleistasaisuuden 0,60. Lisäksi poistumisovi tulee ilmaista vihreillä vilkkuvaloilla. Poistumisovien ja ovien takana olevien käytävien valaistuksen tulee toimia jatkuvasti. Käytävissä valaistusvoimakkuuden tulee olla vähintään 150 luksia ja tasaisuuden arvon 0,2. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 83.)

4.3 Tunneleissa käytetyt valaisimet

Tietunneleissa on perinteisesti käytetty kaasupurkauslamppuja, joista yleisimpänä suurpainenatrium lamppuja. LED-tekniikan kehittyessä jatkuvasti on uusien tunneleiden valaistuksia ryhdytty toteuttamaan ledeillä ja vanhojen tunnelien valaistuksia saneeraamaan LED-valaistukseen. Ledien etuna kaasupurkauslamppuihin verrattuna ovat muun muassa niiden valoteho ja pitkä polttoikä. Valaistusjärjestelmän kannalta yksittäisten valaisimien keskeisiä ominaisuuksia ovat valovirta, valotehokkuus, polttoikä, vikaantumisaste, valovirran suhteellinen alenema, valon väri ja värintoisto-ominaisuudet, himmennysominaisuudet ja hinta. (Hyväksytyt tievalaisimet 2019, 7–9.)

Suomen teillä ja tunneleissa tulee käyttää Väyläviraston tyyppihyväksymiä valaisimia. Valaisimet on listattu Väyläviraston ohjeessa ”Hyväksytyt tievalaisimet”, jonka viimeisin versio on julkaistu tätä opinnäytetyötä kirjoitettaessa 4.10.2019. Jotta Väylävirasto hyväksyy LED-valaisimen käytettäväksi teillä ja tunneleissa, tulee sen täyttää laatuvaatimukset ohjeen ”Ledivalaisimien laatuvaatimukset 27.9.2019”. Purkauslamppujen tulee täyttää ohjeen ”Tien valaisimien laatuvaatimukset 13.4.2016”. Valaisimen on lisäksi suoriuduttava tyyppitarkastuksesta, jossa tarkastetaan valaisimen valaistusteknillisiä ominaisuuksia sekä rakennetta. Valaistusominaisuuksien tarkastuksessa on tarkoitus määrittää valaisimen soveltuvuus eri tie- ja valaistusluokille. Suomessa laskennassa käytetään Liikenneviraston ohjeessa ”Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu” esitettyjä valaistusluokkia. Valaistusluokat on jaettu M-, C- ja P-luokkiin. M-luokilla tarkoitetaan moottoriajoneuvojen kuljettajille tarkoitettuja teitä ja katuja, C-luokat taas on tarkoitettu moottoriajoneuvojen käyttäjien lisäksi muille tienkäyttäjille sellaisilla alueilla, joilla luminanssiin perustuva tarkastelu ei ole soveltuvaa. Esimerkiksi C-luokkia käytetään kierto- ja tasoliittymissä. P-luokat luokilla tarkoitetaan jalankulkijoille ja pyöräilijöille tarkoitettuja jalkakäytäviä, pyöräteitä, asunto- ja pihakatujen sivussa kulkevia jalankulkukatuja sekä pysäköintialueita ja pihoja. Liikenneviraston valaistusluokat on esitetty taulukoissa 5, 6 ja 7.

Taulukko 5. M-luokat (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 25).

Valaistusluokka	Kuivan ja märän ajoradan luminanssi				Estohäikäisy	Vieri-alueen valaistus
	Kuiva		Märkä	Kuiva		
	L_m cd/m ² min	U_o min	U_t 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

Taulukko 6. C-luokat (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 25).

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

Taulukko 7. P-luokat (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu 2015, 26).

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

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

Lisäksi tarkastellaan, että valaisimilla voidaan toteuttaa energiatehokkaita ja elinkaarikustannuksiltaan suotuisia valaistusjärjestelmiä. Rakenteellisten ominaisuuksien tarkastelussa arvioidaan muun muassa valaisimen

- rungon rakennetta, materiaalia ja pintakäsittelyä
- kotelointiluokkaa ja sen tiiveyttä
- linssien ja heijastimien materiaalia,
- kestävyttä ja valonläpäisyominaisuuksia
- sähköturvallisuutta johdotusten, läpivientien ja rakenteen kannalta
- ohjausmahdollisuuksia ja mekaanisia säätömahdollisuuksia
- asennuksen ja kunnossapidon vaatimuksia.

(Hyväksytyt tievalaisimet 2019, 7–9.)

Ohjeen mukaan tunneleissa voidaan käyttää kolmen valmistajan valaisimia. Nämä valaisimet ovat siis täyttäneet laatuvaatimukset, läpäisseet testit ja saaneet Väyläviraston hyväksynnän. Kyseiset valaisin valmistajat ja mallit on esitetty taulukossa 8. (Hyväksytyt tievalaisimet 2019, 10.)

Taulukko 8. Tunneleihin hyväksytyt valaisimet (Hyväksytyt tievalaisimet 2019, 10).

Valmistaja	Malli
AEC	Galileo
Schreder	GL2, OMNIstar
Signify	FlowStar, TubePoint

“Ledivalaisimien laatuvaatimukset 27.9.2019” on Väyläviraston lisädokumentti, joka täydentää pohjoismaisen tieviranomaisten laatuvaatimus dokumenttia “NMF01:2019 LED luminaires – requirements”. Dokumentissa määritellään mekaaniset, sähkötekniset ja valaistustekniset laatuvaatimukset Suomen teillä ja rautateillä käytettäville LED-valaisimille. Valaisimen tulee täyttää kyseisen dokumentin vaatimukset, jotta se voidaan lisätä hyväksytyjen valaisimen listalle.

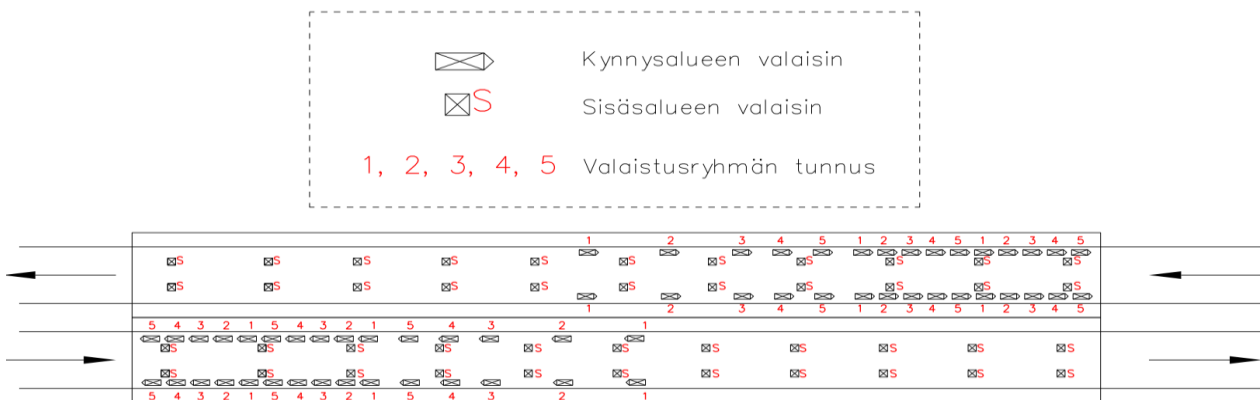
(Ledivalaisimien laatuvaatimukset 2019, 5.)

5 Tunnelivalaistuksen säätömenetelmät

Tunnelivalaistuksen säätämiseen käytetään pääsääntöisesti portaittaista tai portaatonta säätöä. Molempien tapojen tarkoituksena on pitää tunnelin valaistus jatkuvasti sellaisella tasolla, että se mahdollistaa vaivattoman ajamisen tunnelin lävitse ja on energiankulutukseltaan taloudellinen. Portaittaisessa valaistuksessa valaistusportilla ohjataan valaistusryhmiä suuaukon luminanssimittauksen perusteella. Portaittaista säätöä käytetään tyypillisesti purkauslamppujen kanssa, koska niiden säätömahdollisuudet ovat suppeampia kuin ledivalaisinten. Portaattomassa säädössä ei käytetä valaistusryhmiä vaan valaisimia säädetään yleensä poikkileikkauskohtaisesti. Portaattomalla säädöllä voidaan ohjata valaisimien päällä oloa sekä niiden valotehoa luminanssimittauksen perusteella. (Saari 2021.)

5.1 Portaittainen säätö

Portaittaisen säädön järjestelmässä tunnelin valaisimet on jaoteltu valaistusryhmiin. Valaistusryhmä kertoo, mitkä tunnelinvalaisimet ohjautuvat samanaikaisesti. Kuviossa 13 on esitetty esimerkki tunnelin valaisimien jaosta valaistusryhmiin. (Saari 2021.)



Kuvio 13. Tunnelivalaisimien periaattellinen sijoitus ja jaottelu.

Valaistusryhmien ohjaus määritellään valaistusportilla. Valaistusporras kertoo, mitkä valaistusryhmät ohjautuvat päälle saman aikaisesti. Valaistusportaat muodostetaan jakamalla L20-menetelmällä määritetty suurin luminanssi sopiville väleille. Valaistusportaita ohjataan Lth-arvolla, joka ilmaisee kynnyksalueella tarvittavaa luminanssia suhteessa mitattuun L20-arvoon. Alla olevissa taulukoissa on esitetty esimerkki, kuinka valaistusryhmät ja -portaat voidaan muodostaa. Taulukoissa käytetyt portaat ovat yövalaistusporras Y ja päivävalaistusportaat P1-P4. (Saari 2021.)

Taulukosta 9 nähdään, millä suuaukon luminanssin arvolla mikäkin valaistusporras ohjataan päälle. Taulukosta 10 voidaan katsoa, mitkä valaistusryhmät ovat missäkin portaassa päällä. Esimerkiksi Y-porras on päällä, kun lähestymisluminanssi on 0–20 cd/m² ja tällöin valaistusryhmän 1 valaisimet ovat tunnelissa päällä. Vastavuoroisesti kun lähestymisluminanssin arvo on korkeimmillaan, tarvitaan tunnelissa vastavuoroisesti täyttä valaistusta. (Saari 2021.)

Taulukko 9. Esimerkki valaistuportaiden jaottelusta L20-mittauksen perusteella.

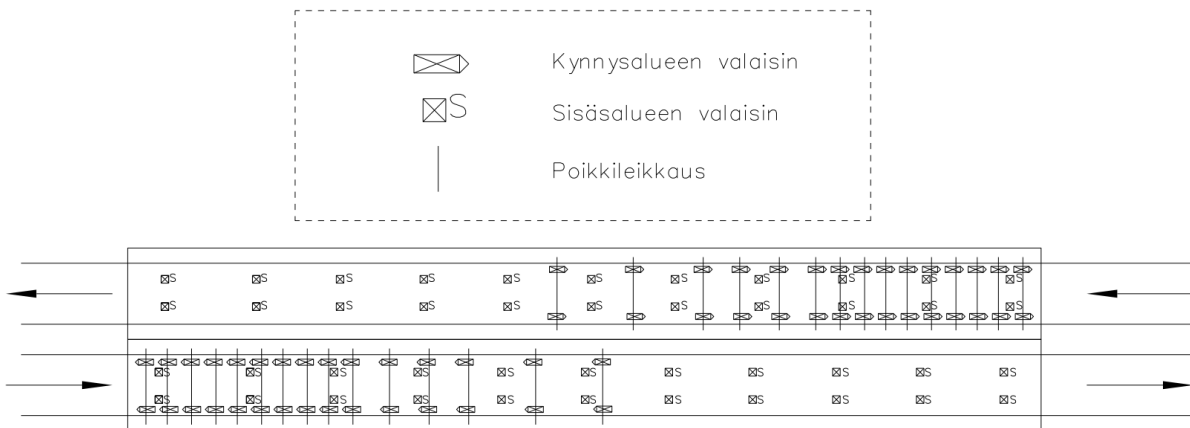
Valaistusporras	L20-arvo (cd/m ²)
Y	0–20
P1	20–100
P2	100–1000
P3	1000–2000
P4	2000–

Taulukko 10. Esimerkki valaistusryhmien ja -portaiden jaottelusta.

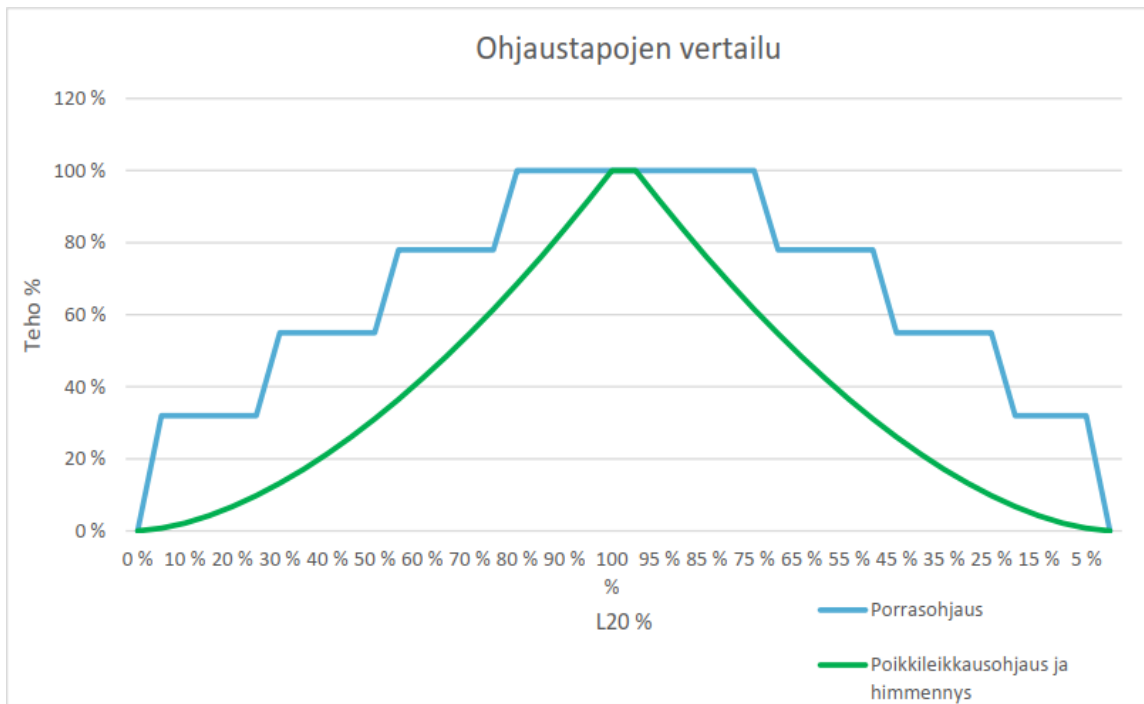
Valaistusporras	Päällä olevat valaistusryhmät
Y	1
P1	1, 2
P2	1, 2, 3
P3	1, 2, 3, 4
P4	1, 2, 3, 4, 5

5.2 Portaaton säätö

Portaattomassa säädössä valaisimia voidaan käsitellä valaisinryhmittäin tai poikkileikkauksittain. Valaisinryhmä jaottelussa ryhmiä muodostetaan enemmän kuin portaattaisessa säädössä, kun taas poikkileikkaustavassa valaisimia käsitellään enemmänkin pareittain kuin ryhminä. Molempien ratkaisujen ohjaus- ja säätöperiaate kuitenkin on pitkälti samankaltainen. Suuaukolla mitataan lähes-tymluminanssia L20, joka viedään valaistuksenohjausjärjestelmään. Ohjausjärjestelmässä on en- nalta määritetyt luminanssiraja-arvot kullekin portaalille tai poikkileikkaukselle, jonka perusteella niitä ohjataan päälle tai pois. Säätö siis perustuu mitatun ja suunnitteluvaiheessa mitoitettun lähes-tymluminanssin suhteeseen. (Saari 2021.) Valaisimien jakoperiaatetta on kuvattu kuviossa 14, jossa valaisimet on jaettu poikkileikkauksittain. Kuviossa valaisimet voisi olla jaettu valaisinryhmiin kuvion 13 omaisesti, mutta sekaannuksen välttämiseksi tässä on esitetty vain toinen tavoista. Täl- laisella konfiguraatiolla pystytään siis portaattomasti ohjaamaan tunnelin valaisimia päälle tai pois taulukon 11 omaisesti.



Kuvio 14. Valaisimien jaottelu portaattomassa säädössä.



Kuvio 15. Portaaton ohjaus L20-Teho kuvaajana.

6 Tunnelivalaistuksen elinkaarikustannukset

Saksan tunnelikomitean Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) vuonna 2018 julkaisemassa selvityksessä on tutkittu tunneleiden elinkaarikustannusten muodostumista ja selvitetty tapoja niiden määrittämiseen. Selvityksessä tutkittiin nettonykyarvon (NPV, net present value) soveltuvuutta tunnelin elinkaarikustannusten määrittämiseen. Nettonykyarvon todettiin olevan julkaisuaikaan parhaiten soveltuva menetelmä tunnelin elinkaarikustannusten laskemiseen. Todettiin myös, että menetelmän laatu ja luotettavuus riippuu pitkälti käytettävissä olevasta aineistosta. Mitä laajemmin ja tarkemmin aineistoa on saatavilla, sitä luotettavampi on elinkaarikustannusten ennuste selvityksen mukaan. Tunnelin varusteiden elinkaarikustannuksien määrittäminen alkaa jakamalla kustannukset vaiheisiin ja prosesseihin, joiden voidaan ajatella sopivan sellaisinaan myös pelkästään tunnelivalaistukseen. Saksassa tunneleiden käyttöiäksi on määritetty noin 100 vuotta ja tunnelin laitteiden noin 20 vuotta. Selvityksessä oli kerätty taulukon 9 mukaisesti eräiden Euroopan tie- ja tunneliviranomaisten ilmoittamia valaistusjärjestelmien käyttövuosia, jotka vaihtelivat 10–30 vuoteen. (Adden, Engelhardt, Friebel, Lehan, Schwarz, Speier, Thewes & Vogt 2018, 2–5.)

Taulukko 12. Tunneleiden valaistusjärjestelmien arvioidut käyttövuodet (Adden ym. 2018, 12).

Service lives for the equipment of road tunnels				Sources						
				DE		PIARC	CH		AT	UK
				ABBV	Vogt		SN	Welte	RVS	DMRB
Module				20		11.2		0-5		
Lighting										
Entrance lighting									20	
Inner tunnel lighting					20				20	
Lamps							25-30			18
Ballasts							15-20			
Lighting of cross passages/escape routes					20				20	
Control/regulation/measurement instrumentation					12		10-15		15	
Brightness measurement										15

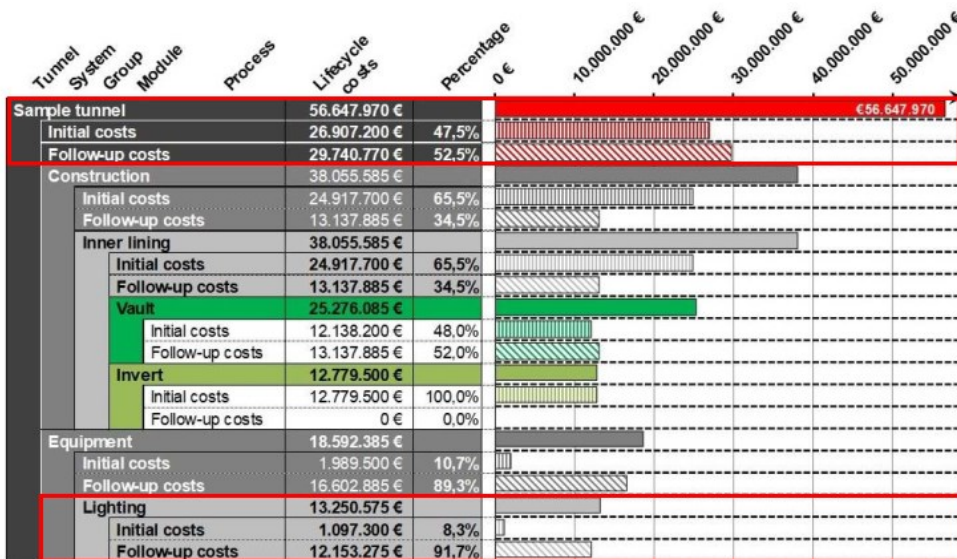
Tunnelin laitteiden elinikään vaikuttaa laitteiden ominaisuudet kuten materiaali valinnat ja tästä johtuva mahdollinen korroosio. Paikallinen ilmasto ja ilmanlaatu vaikuttavat myös laitteiden elinikään. Kulumista saattaa tapahtua enemmän, jos lämpötila vaihtelee suuresti, ilmasto on kostea, laitteet altistuvat kemikaaleille ja liikenteen päästöjä on paljon. Tällaiset olosuhteet tulisi huomioida huollossa, jotta laitteet kestävät mahdollisimman pitkään. Tämä tarkoittaa, että tunnelin elinkaaren aikana tekniset järjestelmät uusitaan useamman kerran. Kuviossa 16 esitetään karkeasti, mistä elinkaarikustannukset muodostuvat. Alkukustannuksiin kuuluvat suunnittelu ja asennus, jonka jälkeen kustannuksia syntyy huollosta, ylläpidosta ja käyttökuluista. Huoltokuluihin sisältyy tarkastukset, korjaukset ja laitteiden korvaushankinnat. Valaistuksen tapauksessa käyttökulut muodostuvat pääasiassa sähköenergiasta. (Adden ym. 2018, 9.)



Kuvio 16. Tunnelivalaistuksen elinkaaren vaiheet (Adden ym. 2018, 4).

Selvityksessä on myös todettu, että taloudellinen elinkaari on lyhyempi kuin tekninen elinkaari. Tällä tarkoitetaan muun muassa teknologian kehitymisestä johtuvaa varaosien saatavuuden heikkenemistä, vanhojen ja uusien laitteiden yhteensopimattomuutta sekä raha- ja energiatalouden optimointia uuden teknologian myötä. Taloudelliseen elinkaareen vaikuttavat selvityksen mukaan tunnelin sijainti, järjestelmien vaikutukset ympäristöön ja liikennemäärien muutokset. (Adden ym. 2018, 9–10.)

Selvityksen esimerkkien perusteella tunnelin varusteiden kustannus on noin 33 % koko tunnelin kustannuksista ja valaistuksen osuus näistä kustannuksista on noin 71 %. Valaistuksen elinkaaren aikana taas pääosa kustannuksista syntyi rakentamisen jälkeen huolto- ja käyttökustannuksista, kuten kuviosta 17 voidaan tarkastella. (Adden ym. 2018, 28.)



Kuvio 17. Esimerkkitunnelin kustannusten jakautuminen (Adden ym. 2018, 28).

Elinkaarikustannusten selvittämiseksi tutkittiin, onko olemassa valmista mallia tai tapaa niiden laskemiseen DAUBin raportissa esitetyn nettonykyarvomenetelmän. Lisäksi tiedusteltiin kokemuksia valaistusjärjestelmien huollon tarpeesta ja kustannuksista sekä siitä, miten kustannukset eroavat purkauslamppujen ja led-valaisinten osalta. Tietoja lähdettiin hankkimaan Väylävirastolta, Espoon ja Hämeenlinnan kaupungeilta sekä Varsinais- ja Kaakkois-Suomen ELY-keskuksilta.

Tässä vaiheessa tarkasteltiin myös Motivan ja Euroopan komission työkalujen soveltuvuutta elinkaarikustannusten laskemiseen. Tarkastelussa huomattiin, että työkalut on suunniteltu pääasiassa tie- ja katuvalaistuksen elinkaarilaskelmien laskemiseen ja arviointiin. Työkalujen käyttöohjeissa kuitenkin mainittiin, että vaikka työkalut eivät suoraan ole tarkoitettu tunnelivalaistukseen voi niiden tulokset silti olla käyttökelpoisia. Koska aikaisempaa kokemusta näiden työkalujen käytöstä ei ollut, tulosten soveltuvuuden ja luotettavuuden arviointi osoittautui hankalaksi. Valmiiden työkalujen lisäksi tutkittiin myös Liikenneviraston ohjetta maantie- ja rautateiden valaistuksen suunnit-

telusta. Ohjeessa on esitelty laajasti tievalaistuksen elinkaarikustannusten laskentaa, mutta nämäkään eivät suoraan tai pienillä muutoksilla soveltuneet tunnelivalaistukseen. Merkittävänä erona Liikenneviraston laskukaavoihin on se, että tievalaisimet asennetaan pylväisiin ja tunnelivalaisimet kaapelihyllyille. Liikenneviraston kaavoissa muuttujana toimi usein pylväsväli tai pylväiden määrä valaistusjärjestelmässä, joista kumpikin oli hankala adaptoida tunnelivalaistukseen.

Motivan kehittämä VALTTI-elinkaarikustannuslaskuri on Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmaan rakennettu työkalu. VALTTI on tarkoitettu elinkaarikustannusten vertailuun samankaltaisten valaistusratkaisujen kesken. Työkalua ei kuitenkaan ole tarkoitettu suunnitteluun, joten ennen sen käyttöä on tiedettävä melko tarkasti valaistusratkaisujen teknisiä yksityiskohtia. Työkalulla voidaan vertailla myös uuden valaistuksen hankkimisen ja vanhan valaistuksen peruskorjaamisen elinkaarikustannus eroja. Työkalu soveltuu sekä sisä-, että ulkovalaistuksen elinkaarikustannusten laskentaan. Käyttöohjeen mukaan työkalun pohjana ei ole käytetty mitään suunnitteluohjetta, joten varsinkin erikoisympäristöissä tulokset vaativat huolellista tarkastelua. Kuitenkin valovirran alenema on huomioitu työkalussa. Elinkaarikustannusten määrittämiseen työkalu käyttää nykyarvomenetelmää ja sillä voidaan laskea kustannuksia enintään 100 vuoden ajalle. (VALTTI- elinkaarikustannuslaskurin käyttöohje 2016, 2–5.)

Myös Euroopan Komission kehittämä LCC (Life Cycle Costs) -työkalu on rakennettu Microsoft Excelin laskentataulukkoon. Työkalu on tarkoitettu pääasiassa tievalaistuksen ja liikennevalojen elinkaarikustannusten laskuun. Komission mukaan työkalu on kehitetty auttamaan erilaisia toimijoita tekemään kustannustehokkaampia päätöksiä tievalaistus ja liikennevalo hankinnoissa. Työkalun käyttöohjeessa on kuitenkin mainittu, että sitä ei ole tarkoitettu käytettäväksi tunnelivalaistuksen elinkaarikustannusten laskemiseen. Työkalun tulokset voivat kuitenkin olla sovelluskelpoisia myös tunnelivalaistukseen. (User Guide to the Life Cycle Costing Tool for Green Public Procurement of Road lighting & Traffic signals 2019, 2–5.)

6.1 Elinkaarikustannukset purkauslampuilla

Esimerkkikohteen valaistusjärjestelmä muodostui neljästä valaistusportaasta ja sisävalaistuksesta, jotka olivat toteutettu kontaktoriohjauksella. Tunnelin valaisimet olivat suurpainenaatriumvalaisimia, joiden tehot olivat 100–400 W ja niitä oli kokonaisuudessaan noin 400 kappaletta.

Vuotuisia energiakustannuksia tunnelinvalaistuksen osalta lähdettiin selvittämään valaistuksen käyttötuntimittareiden perusteella. Käyttötuntimittareista saatujen valokuvien ja tunnelin iän perusteella mittareiden lukemista saatiin eri valaistusportaiden vuotuisiksi käyttötunneiksi taulukon 13 arvot. Taulukon tunnelit A ja B tarkoittavat saman tunnelin eri putkia. Tunnelin ikä oli valokuvien ottamisen aikaan noin 10 vuotta.

Taulukko 13. Valaistusportaiden käyttötunnit

Porras	Käyttötunnit vuodessa (h)	
	A-tunneli	B-tunneli
S (sisävalaistus)	8766	8766
P1	2426,1	2455,7
P2	953,1	947
P3	428,7	451,9
P4	190,5	214,9

Taulukosta nähdään, että maksimivalaistus on ollut vuoden aikana päällä noin 2 % ajasta. Tämä tarkoittaa, että tunnelin suuaukosta kauimpana olevat kynnyalueen valaisimet ovat vähiten päällä. Syy tähän on se, että päivänvalon luminanssin huippuarvo on vain pienen ajan päivästä mittaava tekijä. Huolto- ja ylläpitokustannusten kannalta voidaan arvioida, onko lamppujen ryhmävaihdossa aina tarpeellista vaihtaa kaikki lamput vai voidaanko vähemmän käytettyjen lamppujen vaihtoa siirtää. Tunnelin käyttöohjetta tutkittaessa havaittiin, että lampunvaihtoväliksi oli määritetty 16 000 tuntia. Tämä tarkoittaa lamppujen vaihtoa noin kahden vuoden välein. Käyttöohjeen perusteella kauempana suuaukosta olevien lamppujen käyttötunnit jäävät huomattavasti alle 16 000. Kuitenkin tulee huomioida, että vaihdettujen lamppujen väri ja kirkkaus voi erota ja täten luoda värieroja tunneliin. Tästä syystä yleensä kaikki lamput vaihdetaan samanaikaisesti.

Koska työn tarkoituksena oli keskittyä vertailemaan suurpainenatrium- ja led-valaistuksen elinkaarikustannusten eroja, työssä ei lähdetty tutkimaan esimerkkikohteen valaistuksen saneeraamisen elinkaarikustannuksia. Lisäksi tunnelin toteutuneita rakennuskustannuksia ei ollut saatavilla, joten laskentaa varten arvioitiin paljonko tunnelin nykyistä vastaava järjestelmä kustantaisi nykypäivänä rakentaa. Elinkaarikustannusten laskennassa huomioitiin valaisinten hankinta- sekä käyttö- ja

huoltokustannukset. Laskennoissa ei huomioitu työn, tarvikkeiden tai muiden materiaalien kustannuksia, koska niistä ei ollut saatavilla tietoa ja arvioiminen olisi ollut epäluotettavaa.

Elinkaarikustannuslaskelmat tehtiin hyödyntäen nettonykyarvo menetelmää sekä Motivan VALTTI-elinkaarikustannuslaskurilla ja Euroopan Komission LCC-laskurilla. Laskelmat tehtiin usealla tavalla, jotta voitiin tutkia myös työkalujen soveltuvuutta kyseiseen tehtävään. Nettonykyarvo laskettiin DAUBin raportissa esitettyllä kaavalla:

$$NPV = a_0 + \sum_{t=1}^n c_t * q^{-t}$$

, jossa

- a_0 = alkuinvestointi. Arvioitiin tämän olevan noin 120 000 €.
- c_t = kulut ajanjaksolla t. Vuodessa arvioitiin käyttö- ja huoltokuluiksi noin 38 000 €.
- q = diskonttauskerroin $1+i$, jossa i on korkokanta. Korkona käytettiin 4 %, joka oli Motivan ja EU:n laskureissa oletuksena.
- n = ajanjakso jolle elinkaarikustannukset lasketaan. Laskennat on tehty 20 vuodelle.

Tällä menetelmällä elinkaarikustannuksiksi saatiin 20 vuoden tarkastelujaksolle noin 1,3 miljoonaa euroa. Euroopan Unionin LCC työkalulla elinkaarikustannuksiksi saatiin noin 1,1 miljoonaa ja VALTTI-laskurilla noin 1,3 miljoonaa. Tulokset olivat siis melko lähellä toisiaan, mutta eivät aivan samoja. Eroavaisuuksien paikantaminen työkalujen välillä osoittautui hankalaksi, sillä vaikka kaikissa käytettiin pääasiassa samoja muuttujia, oli työkaluissa myös eroja.

6.2 Elinkaarikustannukset LED-valaisimilla

Energiansäästö potentiaalin määrittämiseksi ongelmaa lähestyttiin tutkimalla, onko olemassa valoisuustietoja esimerkkikohteen alueelta. Ilmatieteenlaitoksen verkkosivuilta löydettiin palvelu, josta oli mahdollista ladata paikallisen sääaseman mittausdataa. Mittausdataa ladattiin vuoden 2020 ajalta ja se oli jaoteltu taulukkoon vuosi, kuukausi, päivä ja tunti sarakkeisiin. Taulukossa 14 on esitetty ote mittausdatasta. Lyhyen tarkastelun perusteella huomattiin kuitenkin haasteita taulukon tulkinnassa. Ensimmäisenä vastaan tuli, että tunti merkinnät olivat UTC 0 aikavyöhykkeellä.

Suomen aikavyöhyke on talviajassa UTC +2 ja kesäajassa UTC +3, joten aineiston kelloaikojen korjaaminen olisi sekoittanut päivät ja kuukaudet. Todettiin, että ei ole tarkoituksenmukaista käyttää paljoa aikaa tai vaivaa taulukon muokkaamiseen. Toisena ongelmana havaittiin mittaukselliset tulokset itsessään, koska ne olivat säteilytehon yksiköissä W/m² ja W/cm². Näiden muuttaminen lukseiksi tai muiksi valaistuksen suureiksi todettiin epäluotettavaksi, koska tällaisen datan käytöstä ja muokkaamisesta ei ole aiempaa kokemusta. Tästä syystä lähdettiin tarkastelemaan muita tapoja arvioida valoisaa aikaa ja valaistuksen energiankulutusta. Valoisuuden kannalta oikeat ajanhetket ovat ratkaisevia, koska etenkin talvella valoisa-aika on lyhyt ja tunnelin valaistus on maksimiteholla vain lyhyen aikaa vuorokaudesta verrattuna kesäaikaan.

Taulukko 14. Auringon säteilyn mittausdata.

Vuosi	Kk	Pv	Klo	Aikavyöhyke	Hajasäteily (W/m ²)	Suorasäteily (W/m ²)	Kokonaisäteily (W/m ²)	Ilmakehän pitkäaalto säteily (W/m ²)	Maanpinnan pitkäaalto säteily (W/m ²)	Säteilytasote (W/m ²)	Heijastunut säteily (W/m ²)	Paistealka (s)	UV-B säteily (index)	Hajasäteily (W/cm ²)	Suorasäteily (W/cm ²)	Kokonaisäteily (W/cm ²)	Ilmakehän pitkäaalto säteily (W/cm ²)	Maanpinnan pitkäaalto säteily (W/cm ²)	Säteilytasote (W/cm ²)	Heijastunut säteily (W/cm ²)
2020	1	2	06:00	UTC	0,1									0,00001	0	0	0	0	0	0
2020	1	2	07:00	UTC	0									0	0	0	0	0	0	0
2020	1	2	08:00	UTC	0,1									0,00001	0	0	0	0	0	0
2020	1	2	09:00	UTC	1		1	297,2	314,6	-11,4	-5	0	0,0001	0	0,0001	0,02972	0,03146	-0,00114	-0,0005	
2020	1	2	10:00	UTC	4,4		5,5	300	314,4	-8,5	-0,4	0	0,00044	0	0,00055	0,03	0,03144	-0,00085	-0,00004	
2020	1	2	11:00	UTC	3		3,3	308,5	315,8	-2	-1,9	0	0,0003	0	0,00033	0,03085	0,03158	-0,0002	-0,00019	
2020	1	2	12:00	UTC	0		-0,7	321,7	317,2	8,7	-4,8	0	0	0	-0,00007	0,03217	0,03172	0,00087	-0,00048	
2020	1	2	13:00	UTC	0		-1,7	322,7	317,4	9,7	-6,1	0	0	0	-0,00017	0,03227	0,03174	0,00097	-0,00061	
2020	1	2	14:00	UTC	0		-1,5	322,3	317,9	8,8	-5,9	0	0	0	-0,00015	0,03223	0,03179	0,00088	-0,00059	
2020	1	2	15:00	UTC	0		-2	307,6	318	-7,3	-5,1	0	0	0	-0,0002	0,03076	0,0318	-0,00073	-0,00051	
2020	1	2	16:00	UTC	0		-1,9	295,9	318,5	-19,1	-5,4	0	0	0	-0,00019	0,02959	0,03185	-0,00191	-0,00054	
2020	1	2	17:00	UTC	0		-2,1	270,9	318,4	-43,9	-5,7	0	0	0	-0,00021	0,02709	0,03184	-0,00439	-0,00057	
2020	1	2	18:00	UTC	0		-2,1	261	318,1	-53,5	-5,7	0	0	0	-0,00021	0,0261	0,03181	-0,00535	-0,00057	
2020	1	2	19:00	UTC	0		-2,4	263	317,7	-51,2	-5,9	0	0	0	-0,00024	0,0263	0,03177	-0,00512	-0,00059	
2020	1	2	20:00	UTC	0		-2,5	267,3	317,9	-46,7	-6,4	0	0	0	-0,00025	0,02673	0,03179	-0,00467	-0,00064	
2020	1	2	21:00	UTC	0		-2,6	272,9	318,2	-41,3	-6,6	0	0	0	-0,00026	0,02729	0,03182	-0,00413	-0,00066	
2020	1	2	22:00	UTC	0		-1,9	286,8	318,9	-27,5	-6,5	0	0	0	-0,00019	0,02868	0,03189	-0,00275	-0,00065	
2020	1	2	23:00	UTC	0		-2	284	318,7	-30,1	-6,6	0	0	0	-0,0002	0,0284	0,03187	-0,00301	-0,00066	
2020	1	3	00:00	UTC	0		-1,3	306,7	319,3	-7,9	-6	0	0	0	-0,00013	0,03067	0,03193	-0,00079	-0,0006	
2020	1	3	01:00	UTC	0		-2,2	316,1	319,7	1,2	-7,1	0	0	0	-0,00022	0,03161	0,03197	0,00012	-0,00071	
2020	1	3	02:00	UTC	0		-1,8	316,6	320,4	0,7	-6,3	0	0	0	-0,00018	0,03166	0,03204	0,00007	-0,00063	
2020	1	3	03:00	UTC	0		-1,2	317,1	320,5	2,6	-7,1	0	0	0	-0,00012	0,03171	0,03205	0,00026	-0,00071	
2020	1	3	04:00	UTC	0		-2	305,2	319,3	-9,1	-7	0	0	0	-0,0002	0,03052	0,03193	-0,00091	-0,0007	
2020	1	3	05:00	UTC	0		-2,2	284,8	318,1	-29,2	-6,2	0	0	0	-0,00022	0,02848	0,03181	-0,00292	-0,00062	
2020	1	3	06:00	UTC	0		-2,6	266,5	317,2	-47	-6,3	0	0	0	-0,00026	0,02665	0,03172	-0,0047	-0,00063	
2020	1	3	07:00	UTC	0		-2,9	254,7	316,1	-57,9	-6,4	0	0	0	-0,00029	0,02547	0,03161	-0,00579	-0,00064	
2020	1	3	08:00	UTC	0,1		-2	252,9	314,5	-58,2	-5,4	0	0,00001	0	-0,0002	0,02529	0,03145	-0,00582	-0,00054	
2020	1	3	09:00	UTC	0,4		1,2	313,6	318,3	1,2	-4,7	0	0,00004	0	0,00012	0,03136	0,03183	0,00012	-0,00047	
2020	1	3	10:00	UTC	1,2		0,3	318,8	317	6,1	-4	0	0,00012	0	0,00003	0,03188	0,0317	0,00061	-0,0004	
2020	1	3	11:00	UTC	2,1		2	319,1	315,8	6,7	-1,5	0	0,00021	0	0,0002	0,03191	0,03158	0,00067	-0,00015	
2020	1	3	12:00	UTC	0,3		0,7	304,9	316,1	-7,8	-2,8	0	0,00003	0	0,00007	0,03049	0,03161	-0,00078	-0,00028	
2020	1	3	13:00	UTC	0		-2,1	292,9	315,3	-19,6	-4,9	0	0	0	-0,00021	0,02929	0,03153	-0,00196	-0,00049	

Ledivalaistuksen hankintakustannus oli huomattavasti isompi kuin arvioitu suurpainenaatrium valaistuksen hankintakustannus. Toisaalta ledivalaistuksen valintaa puolsi sen huomattavasti pienemmät käyttö- ja huoltokustannukset. Ledivalaistuksen hankintakustannuksiksi arvioitiin noin 220 000 € ja vuotuisiksi energiakustannuksiksi ilman säätöä valaisinten määrän ja tehon perusteella noin 18 000 €. Huolto- ja ylläpitokustannusten arvioinnissa keskeisenä pidettiin valmistajan ilmoittamaa L96 @ 100 000 h merkintää, joka tarkoittaa, että 100 000 käyttötunnin jälkeen valaisin tuottaa 96 % alkuperäisestä valovirrasta. Lisäksi valmistajan mukaan valaisimien liitäntälaitteiden vikaantumisaste 100 000 käyttötunnin jälkeen olisi noin 10 %. Näiden perusteella arvioitiin,

että vuodessa vikaantuisi 1,3 valaisinta, mikä tarkoittaisi noin 700 € kustannuksia vuodessa. Ledivalaisimien kohdalla ei yleisesti ole mahdollista vaihtaa vain ”polttimoa” tai led-elementtiä, vaan valaisin on vaihdettava kokonaisuudessaan. Tämä korottaa huollon yksikkökustannuksia, mutta valaisimien vikaantumisaste on matala ja huollon tarve on merkittävästi vähäisempi verrattuna suurpainenatrium valaisimiin. Näiden seikkojen perusteella ledivalaistuksen huoltokustannukset jäivät elinkaarikustannuksissa merkittävästi pienemmiksi kuin suurpainenatriumvalaisimilla.

Ledivalaisimien elinkaarikustannusten laskennassa ei huomioitu ohjauksen vaikutusta elinkaarikustannuksiin, jotta tuloksia voitiin verrata suurpainenatriumvalaistukseen. Myöskään ei huomioitu rakennus- tai huoltotyön aiheuttamia kustannuksia, koska näiden tietojen hankkiminen osoittautui hankalaksi ja arvioiminen epäluotettavaksi. Näissä laskelmissa hajontaa tuli enemmän työkalujen välillä. Nettonykyarvomenetelmällä elinkaarikustannuksiksi saatiin noin 0,75 miljoonaa, VALTTI-työkalulla noin 0,5 miljoonaa ja EU LCC-työkalulla noin 0,65 miljoonaa euroa. Eroja luultavasti selittää työkalujen eriävät korkokannat ja laskukaavat. Koska valmiit työkalut oli rakennettu suojattuihin Excel-taulukoihin, näiden eroavaisuuksien tutkiminen ei ollut mahdollista. Laskelmista voidaan kuitenkin nähdä, että elinkaarikustannukset ovat huomattavasti pienemmät kuin suurpainenatriumvalaisimilla.

6.3 Jatkuvan säädön vaikutus elinkaarikustannuksiin

Jatkuvan säädön vaikutukset näkyivät elinkaarikustannuslaskelmissa energiakulutuksen ja tätä kautta energiakustannusten laskuna. Jatkuvalle säädöllä saatiin laskennallisesti aikaan huomattavia energiasäästöjä verrattuna siihen, että valaisimia ei ohjattaisi lainkaan tai ohjattaisiin vain päälle ja pois. Arvioidut energiakustannukset ilman säätöä olivat vuodessa noin 18 000 € ja jatkuvalla säädöllä noin 7300 € vuodessa. Laskennallisesti potentiaalista säästöä olisi siis mahdollista saada vuosittain noin 10 700 €, joka taas puoltaa jatkuvan säädön integroimista tunnelivalaistusjärjestelmään. Arvioitiin myös, että valaisimien käyttöikä saattaa pidentyä. Arvio perustettiin siihen, että etenkin suuaukosta kauimmat valaisimet palavat pienemmällä teholla ja vähemmän aikaa verrattuna säädöttömään järjestelmään.

7 Pohdinta

Tunnelivalaistuksen elinkaarikustannukset laskettiin kolmella eri tavalla. Näiden tapojen vertailu keskenään oli hankalaa, mutta koska tulokset olivat melko lähellä toisiaan, voidaan näitä laskelmia pitää onnistuneina. Elinkaarikustannusten laskentatyökaluja tulisi käyttää projektin siinä vaiheessa, jossa valaistussuunnittelu on tehty. Tällöin työkaluilla voidaan vertailla tarjottuja valaistusjärjestelmiä keskenään eri toimittajien yksityiskohdilla. Tässä työssä suoritettuun kahden täysin erilaisen valaistusjärjestelmän vertailuun kumpikaan työkaluista ei kunnolla soveltunut. Toisaalta tämä oli ilmoitettu molempien työkalujen käyttöohjeissa. Laskentoja voidaan kuitenkin pitää onnistuneina. Erot todennäköisesti johtuvat ohjelmiin määritetyistä eriävistä korkokannoista ja muista muuttujista, joiden selvittämistä ei tämän työn puitteissa tehty.

Työn aikana hahmottui, että varsinkin rajattujen ja samankaltaisten teknisten järjestelmien elinkaarikustannuksissa on otettava huomioon samoja muuttujia. Tätä selkeytti muun muassa DAUBin raportti, jossa tunnelin elinkaarikustannuksia oli käsitelty kattavasti. Kuitenkin tarkkojen kustannusten ja yksikköhintojen määrittäminen osoittautui hankalaksi ja laskelmissa jouduttiin jonkin verran arvioimaan eri kustannuksia.

Kreikassa vuonna 2020 tehdyssä tutkimuksessa osoitettiin, että energiakustannukset voivat pudota jopa 31 % jos nykyistä tunnelivalaistusta ohjattaisiin laskemalla L_{th} -arvoa ja sen avulla etäisyyttä suuaukosta, jolla valaisimien on oltava päällä. Ohjaustapa on melko samanlainen kuin jatkuvassa säädössä, mutta koska käytössä on purkauslamput ei niiden valotehoa voi ohjata yhtä joustavasti. Tutkimuksessa oli lisäksi laskettu vuotuisten energiakustannusten lasku tilanteessa, jossa tunnelin valaisimet saneerataan ledivalaisimiksi. Tällöin tutkimuksen mukaan olisi mahdollista päästä jopa 62 % säästöihin energiakustannuksissa. (Doulos, Sioutis, Tsangrassoulis, Canale & Faidas 2020, 15–17.) Tämä tukee myös opinnäytetyössä tehtyjä laskelmia, joissa ilman säätöä energiakustannukset laskivat noin 40 % ja jatkuvalla säädöllä noin 75 %. Tuloksia ei voida kuitenkaan yleisesti soveltaa muihin tunneleihin, koska opinnäytetyön tarkastelu koski vain yhtä tunnelia. Tutkimuksessa on myös todettu, että tunnelin valaistuksen käyttö ja huoltokustannukset nousevat vuosien aikana laitteiden kuluessa. Toisaalta kuitenkin vanhojen valaisimien korvaaminen led-valaisimilla aiheuttaa isoja investointikustannuksia ja joissain tilanteissa saattaa olla taloudellisempaa korjata vanhaa. Kuitenkin on selvää, että ledivalaisimilla ja paremmalla säätömetodiikalla on mahdollista saada aikaan merkittäviä säästöjä energiankulutuksessa.

Lähteet

Adden, H., Engelhardt, S., Friebel, W-D., Lehan, A., Schwarz, J., Speier, L., Thewes, M. & Vogt, P. 2018. Recommendations for the Determination of Lifecycle Costs for Road Tunnels. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen. Cologne, Germany. https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec4/gtcrec12_LZK_Recommendation_EN_final.pdf.

Avaruuskulma. N.d. JKorpela www-sivuilla. Viitattu 14.2.2021. <http://jkorpela.fi/yksikot/6.6.html>.

Coaton, J.R. & Marsden A.M. 2011. Lamps and Lighting. 4. painos. Routledge. New York.

Doulos, L., Sioutis, I., Tsangrassoulis, A., Canale, L & Faidas, K. 2020. Revision of Threshold Luminance Levels in Tunnels Aiming to Minimize Energy Consumption at No Cost: Methodology and Case Studies. Viitattu 10.4.2021.

Fintraffic lyhyesti. N.d. Fintraffic www-sivut. Viitattu 17.4.2021. <https://www.fintraffic.fi/fi/fintraffic/fintraffic-lyhyesti>

Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses. 2004. CIE – Commission Internationale De L'éclairage. Wien, Itävalta. Viitattu 14.4.2021. <http://15805587.s21d-15.faiusrd.com/61/ABUIABA9GAAgl6g0wUoyMWe3gl.pdf>.

Hyväksytyt tievalaisimet. 2019. Väylävirasto. Helsinki. https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/opas_2019-04_hyvaksytyt_tievalaisimet_web.pdf.

Illuminance. 2019. Arend -verkkosivut. Viitattu 30.3.2021. <https://arendlighting.com/illumination/?lang=en>.

Khanh, T.Q., Bodrogi, P., Vinh, Q.T. & Winkler, H. 2015. LED Lighting - Technology and Perception. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim, Germany.

Kutz, M. 2016. Handbook of Measurement in Science and Engineering - Volume 3. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.

Lapillonne, B. & Sudries, L. Overall trends in energy efficiency in the EU. 2020. Viitattu 15.4.2021. <https://www.odyssee-mure.eu/publications/policy-brief/overall-energy-efficiency-trends.html>

Ledivalaisimien laatuvaatimukset 27.9.2019. 2019. Väylävirasto. Helsinki. https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2019-21_ledivalaisimien_laatuvaatimukset_web.pdf.

Lyhyesti. N.d. Nodeon www-sivut. Viitattu 15.4.2021. <https://www.nodeon.com/yritys/lyhyesti>

Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu. 2015. Liikennevirasto. Helsinki. Viitattu 23.2.2021. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2015-16_maantie_rautatiealueiden_web.pdf.

Mikä on LED? N.d. Fagerhult verkkosivut. Viitattu 10.3.2021. <https://www.fagerhult.com/fi/osaimiskeskus/LED/>.

Referenssit. N.d. Nodeon www-sivut. Viitattu 15.4.2021. <https://www.nodeon.com/referenssit>

Reliable, efficient, and safe tunnel lighting. N.d. Philips www-sivut. Viitattu 13.4.2021. <https://www.lighting.philips.com/main/application-areas/tunnels>

Saari, J. 2021. Suunnittelija. Nodeon Oy. Haastattelu 4.3.2021.

Tietoa meistä. N.d. Väyläviraston www-sivut. Viitattu 16.4.2021. <https://vayla.fi/tietoa-meista>

Tunnel lighting. N. d. Thorn-valaisinvalmistajan www-sivuilla. Viitattu 15.3.2021. <http://www.thornlighting.com/download/TunnellINT.pdf>.

User Guide to the Life Cycle Costing Tool for Green Public Procurement of Road lighting & Traffic signals. 2019. Euroopan Komissio. Viitattu 23.3.2021. https://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/EC_LCC_OutdoorLighting_guide_final.pdf.

VALTTI- elinkaarikustannuslaskurin käyttöohje. 2016. Motiva Oy. Viitattu 20.3.2021. <https://valaistustieto.fi/wp-content/uploads/Valaistuslaskenta-k%C3%A4ytt%C3%B6ohje-7-6-2016.pdf>.

Vt 12 Lahden eteläisen kehätien tunneliin tulee paljon tekniikkaa varmistamaan turvallisen liikku-
misen. 2020. Väylävirasto. Artikkelin www-sivuilla. Viitattu 20.4.2021. <https://vayla.fi/-/vt-12-lahden-etelaisen-kehätien-tunneliin-tulee-paljon-tekniikkaa-varmistamaan-turvallisen-liikkumisen>