

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennustekniikka

Infratekniikka

2015

Jukka Käär

LEDIN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET KATUVALAISTUKSESSA



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Turun ammattikorkeakoulu

Tekniikka, ympäristö ja talous

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Infratekniikka

Jukka Käär

Opinnäytetyö

LEDIN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET KATUVALAISTUKSESSA

Hyväksytty

Turussa ____/____ 2015

Valvoja

DI Pirjo Oksanen

KT-vastaava

Tekn. lis. Esa Leinonen

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka | Infratekniikka

Maaliskuu 2015 | 52 sivua

Ohjaaja: DI Pirjo Oksanen

Jukka Käär

LEDIN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET KATUVALAISTUKSESSA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää ledin käyttömahdollisuuksia katuväläistuksessa. Tarkoituksena oli perehtyä myös katuväläistuksen suunnitteluun ja merkitykseen, joiden lisäksi selvitettiin eri valonlähteiden ominaisuuksia.

Katuväläistuksen ensisijainen tehtävä on luoda turvalliset olosuhteet hämärän ja pimeän ajan katuväläen liikenteelle. Katuväläistuksessa käytössä olevat valonlähteet ovat pääasiassa elohopeahöyry- ja suurpainenatriumlamput. ErP-direktiivin myötä elohopeahöyrylamput poistuvat markkinoilta vuonna 2015, jonka jälkeen ne on korvattava energiatehokkaammilla valonlähteillä. Tämän johdosta katuväläistuksia uusitaan paljon eri puolilla maailmaa ja Suomea.

Katuväläistussuunnittelussa on tärkeää pyrkiä löytämään kohteen valaistusluokan täyttävä energiatehokkain valaistusratkaisu. Led-valaisimet ovat tällä hetkellä energiatehokkain ratkaisu katuväläistukseen, koska ne tuottavat enemmän valoa pienemmillä tehoilla muihin valonlähteisiin verrattuna ja ledien himmennysominaisuudet ovat ylivoimaisesti parhaat. Lisäksi ledien eliniät ovat moninkertaisesti muita valonlähteitä pidemmät. Valon värillä on vaikutusta katuväläistuksen laatuun, ja jos elohopeahöyrylamppujen valkoinen valo ja hyvä värintoistokyky halutaan säilyttää, vaihtoehtoina niiden korvaajiksi ovat vain monimetalli- tai led-valaisimet. Suurpainenatriumlampuille ominaista kellertävää valoa ja huonoa värintoistokykyä ei pidetä laadullisesti riittävänä katuväläistukseen.

Led-katuväläisimien käyttö on lisääntymässä hankintahinnan alenemisen ja teknisten ominaisuuksien kehityksen johdosta. Yleistymistä hidastaa vielä epävarmuus valaisimien todellisesta eliniästä ja hoidon tarpeesta, koska käyttökokemukset ovat vähäisiä. Lisäksi led-valaisinvalmistajien tuotteissa on suuria eroja laadun ja esimerkiksi valonjaon suhteen, mikä hankaloittaa oikean valaisimen valintaa.

ASIASANAT:

Katuväläistus, valaistus, led, led-valaisin

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering | Community Infrastructure Engineering

March 2015 | 52 pages

Instructor: Pirjo Oksanen, M. Sc.

Jukka Käär

THE OPPORTUNITIES AND FEASIBILITY OF LEDS IN STREET LIGHTING

The objective of the thesis was study the opportunities and feasibility of LED luminaires in street lighting. The secondary objective was become acquainted with the planning and significance of street lighting, as well as the properties of different light sources.

The primary function of street lighting is to provide safe conditions for traffic during the dark and twilight hours. The most common light sources used in street lighting are currently mercury-vapor and high-pressure sodium lamps. Mercury-vapor lamps are discontinued with the ErP directive in 2015 and must be replaced with more energy-efficient light sources. Because of the directive, plenty of street lighting setups are being renewed.

In street lighting planning it is important to try to find the most energy-efficient solution for the installation lighting class. LED luminaires are the most energy-efficient solution for street lighting at the moment because they produce more light with less power compared to other light sources. In addition, LEDs have superior dimming capability and multiple life-time compared to other common light sources. The color temperature and chromaticity of street lighting have an influence on light quality, and if the white color and good color rendering qualities of the mercury-vapour lamps are maintained in the future, the only replacement options are metal halide and LED luminaires, while yellowish light and poor color rendering, typical of high-pressure sodium lamps, is not seen as good enough quality for street lighting.

LEDs are becoming more common because of their decreasing purchasing price and developing technical properties. This is hindered by the uncertainty of the real life-time of luminaires as well as the need for maintenance because of limited experience in use. In addition, the products of the LED luminaire manufacturers have major differences in quality, and for example light distribution, which makes it more difficult to choose a suitable luminaire.

KEYWORDS:

Street lighting, lighting, LED, LED luminaire

SISÄLTÖ

VALAISTUKSEEN LIITTYVIÄ KÄSITTEITÄ	8
1 JOHDANTO	9
2 TIE- JA KATUVALAISTUKSEN TARVE	10
2.1 Tie- ja katuvalaistuksen vaikutukset	10
2.1.1 Liikenneturvallisuus	10
2.1.2 Valo tie- ja katuympäristössä	10
2.1.3 Katuvalaistuksen merkitys taajamassa	12
2.1.4 Kevyen liikenteen alueet	13
2.1.5 Ajoneuvoliikenteen alueet	14
2.2 Hankinta ja ylläpito	14
2.3 Tie- ja katuvalaistuksen suunnittelu ja valaistusteknilliset vaatimukset	16
2.3.1 AL-luokat	16
2.3.2 AE-luokat	17
2.3.3 K-luokat	18
2.4 Valaisimet ja valonlähteet	19
2.4.1 Direktiivi	23
2.4.2 Elohopeahöyrylamppu	24
2.4.3 Suurpainenatriumlamppu	25
2.4.4 Monimetallilamppu	26
2.4.5 Led, valodiodi	27
2.5 Valaistuksen ohjaustavat	28
3 LEDIT	30
3.1 Ledin kehitys ja edut	30
3.2 Toimintaperiaate	31
3.3 Valkoinen led ja värilämpötila	32
3.4 Värintoisto	33
3.5 Tehokkuus ja valotehokkuus	33
3.6 Laatuominaisuudet	34
3.7 Lämmönhallinta	35
3.8 Elinikä	35
3.9 Suosituimmat ledit ja led-katuvalaisimien valmistajat	36

4 LEDIN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET KATUVALAISTUKSESSA	37
4.1 Elinikä	37
4.2 Värintoisto	38
4.3 Värilämpötila	38
4.4 Valontuotto	39
4.5 Säädettävyys	40
4.6 Taloudellisuus	41
4.7 Muuta	43
4.8 Led-katuvalaisimien käyttö maailmalla	44
4.8.1 Pohjois- ja Etelä-Amerikka	44
4.8.2 Eurooppa	46
4.8.3 Suomi	46
4.8.4 Turun esimerkkitoimitus	47
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	49
LÄHTEET	51

LIITTEET

- Liite 1. Yleisten teiden valaistusluokat
Liite 2. Katujen valaistusluokat

KUVAT

Kuva 1. Havainnekuva häiriö- ja hukkavalosta.	12
Kuva 2. Ulkovalaistuksen valonlähteet Suomessa vuonna 2009.	21
Kuva 3. Elohopeahöyrylampun rakenne.	24
Kuva 4. Suurpainenaatriumlampun rakenne.	26
Kuva 5. Monimetallilampun rakenne.	27
Kuva 6. Ledin rakenne.	31
Kuva 7. Los Angeles, Hoover Street.	44

TAULUKOT

Taulukko 1. AL-luokat.	17
Taulukko 2. AE-luokat.	17
Taulukko 3. AL- ja AE-luokkien vastaavuus.	18
Taulukko 4. K-luokat.	18
Taulukko 5. Kevyen liikenteen väylillä ja alueilla käytettävät valaistusluokat.	19
Taulukko 6. Valonlähteiden ominaisuudet.	22
Taulukko 7. Valonlähteiden valotehokkuuksien kehitys.	34

VALAISTUKSEEN LIITTYVIÄ KÄSITTEITÄ

ErP-direktiivi	Energy related Products directive on puitedirektiivi energiaa käyttävien tuotteiden ekologisen suunnittelun vaatimuksista.
Led	Loistediodi (Light Emitting Diode) on valoa säteilevä puolijohde komponentti.
Luminanssi (L)	Luminanssi on valaistavalta pinnalta katsojan suuntaan heijastuva valovoima, joka ilmoittaa miten valoisalta pinta näyttää. Luminanssin yksikkö on cd/m^2 .
Polttoikä	Määritellään ajaksi, jolloin lampun valovirta on alentunut 70–80%:iin 100 tunnin arvosta.
Valaistusvoimakkuus (E)	Valovirta pinta-alayksikköä kohti, jonka yksikkö on luks (lx($=\text{lm/m}^2$))
Valovirta (\emptyset)	Valonlähteen valontuottoa kuvaava suure, jonka yksikkö on lumen (lm).
Valotehokkuus	Valotehokkuus määrittelee, miten hyvin valonlähde toimii valontuottamisessa eli miten hyvin valonlähde muuttaa sähkötehon valovirraksi. Valotehokkuuden yksikkö on lm/W .
Väriämpötila	Väriämpötila ilmoittaa valonlähteen tuottaman valon värisävyn. Väriämpötilan mittayksikkö on kelvin (K).
Värintoistoindeksi (R_a)	Värintoistoindeksi ilmoittaa, kuinka hyvin valonlähde pystyy toistamaan värit luonnollisina. Värintoistoindeksiä mitataan asteikolla 0–100.

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä katuvalaistussuunnitteluun ja erityisesti led-valaisimien käyttömahdollisuuksiin katuvalaistuksessa. Katuvalaistuksessa paljon käytetyt elohopeahöyrylamput poistuvat markkinoilta ErP-direktiivin myötä vuonna 2015, jonka jälkeen ne on korvattava energiatehokkaammilla valonlähteillä. Vaihtoehtoisia valonlähteitä ovat suurpainenatrium-, monimetalli- ja led-valaisimet, joista suurpainenatriumvalaisin on ollut suosituin. Led-valaisimet ovat kuitenkin yleistymässä niiden nopean kehityksen ansiosta.

Katuvalaistuksella on suuri merkitys hämärän ja pimeän ajan liikenneturvallisuuteen. Eri valonlähteillä tuotetun valaistuksen määrälliset ja laadulliset ominaisuudet vaihtelevat, ja niillä on vaikutusta liikenneturvallisuuden lisäksi esimerkiksi katuympäristön yleiseen viihtyvyyteen. Myös EU:n energiankulutusta koskevilla säädöksillä on vaikutusta tulevaisuudessa katuvalaistuksessa käytettäviin valonlähteisiin.

Energiatehokkuus on nykypäivänä suurimpia puheenaiheita, ja yksi energiatehokkuuden parantamisen kohteista on katuvalaistus. Katuvalaistusta uusitaan ympäri maailmaa ja Suomea. Esimerkillistä toimintaa on näyttänyt Turun kaupunki, joka vaihtaa kaikki elohopeahöyrylamput vuoden 2015 loppuun mennessä. Turussa suurin osa katuvalaistuksen elohopeahöyrylampuista tullaan korvaamaan led-valaisimilla, ja osa on jo korvattu suurpainenatriumvalaisimilla.

2 TIE- JA KATUVALAISTUKSEN TARVE

2.1 Tie- ja katuvalaistuksen vaikutukset

2.1.1 Liikenneturvallisuus

Pimeydellä on suuri vaikutus kuljettajan käyttäytymiseen ja suorituskykyyn. Pimeään aikaan tapahtuvien onnettomuuksien lukumäärä on suhteellisesti suurempi ja vaikeusaste pahempi kuin valoisaan aikaan. Vaikka pimeään aikaan riskitekijöinä ovat mm. väsymys, kurittomuus ja alkoholi, niin ratkaisevin tekijä on kuitenkin pimeys. Heikentyneet näkemisedellytykset kasvattavat onnettomuusriskin 1,5...3-kertaiseksi verrattuna valoisaan aikaan. Keskimäärin 30 % kaikista liikenneonnettomuuksista tapahtuu pimeään aikaan. Valaistuksella voidaan vähentää pimeän ajan onnettomuuksia moottoriteilla 20 %, sekaliikenteillä 30 % ja muilla autoliikenteen teillä 25 %. (Tiehallinto 2006, 8.)

Valaistus parantaa liikenneturvallisuutta olosuhteiltaan poikkeuksellisilla tieosuuksilla. Poikkeuksellisia olosuhteita ovat mm. suuri liittymätiheys, sumuiset tienkohdat ja monimutkaiset liikennejärjestelyt. Valaistus myös tasaa ja hieman lisää ajonopeuksia, parantaa ajoneuvoliikenteen palvelutasoa, sujuvuutta, ajomukavuutta ja optista ohjausta sekä vähentää ajoneuvojen häikäisyä ja lisää tieympäristön yleistä turvallisuutta. (Tiehallinto 2006, 8.)

2.1.2 Valo tie- ja katuympäristössä

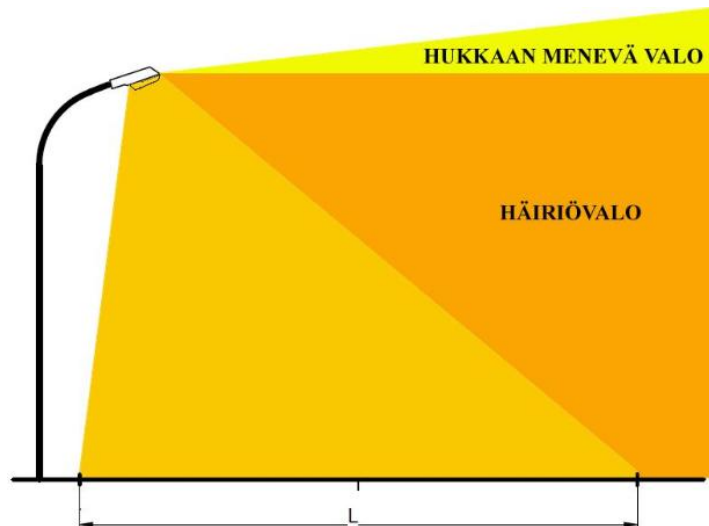
Valon kolme päätehtävää ovat näkyvyys, hahmottaminen ja ilmapiiri. Näkyvyydellä tarkoitetaan toimintojen valaisemista, kun taas hahmottaminen on tilan ja ympäristön muodostamista. Ilmapiiri on varmuuden ja tunnelman luomista. Valaistus toimii aina valoa heijastavien pintojen kautta. Katujen päällysteet ja esimerkiksi rakennusten julkisivut vaikuttavat valaistuksen toimivuuteen, kannattavuuteen sekä energian säästymiseen. Kuivat, märät ja lumiset pinnat heijastavat valoa eri tavoin. Riittävä ja tasainen valaistus auttaa liikenteessä liikkujaa

havaitsemaan kadun muodot, päällysteessä olevat merkinnät, liikennemerkkit, mahdolliset esteet ja päällysteen pinnan muutokset, kuten jäätymisestä johtuva liukkaus talvella. (Kauppinen 2011, 159; Tiehallinto 2006, 9.)

Tie- ja katuvalaistuksessa sovelletaan standardeihin SFS-EN 13201–13204 valaistuksen mittaukseen, mitoitukseen ja määrään liittyviä määräyksiä. Standardeista selviää eri liikennelajien valaistusluokat ja valaistustekniset arvot. Teknilliset ja toiminnalliset ominaisuudet esitetään vaatimuksina, jotka voidaan laskea ja mitata. Kun tarkastellaan tievalaistuksen vaikutusta yleiseen turvallisuuteen, viihtyisyyteen ja liikenneympäristön muodostumiseen, niin tarvitaan toisenlaisia keinoja, arviointeja ja vertailuja. (Tiensuu 2010, 10; Tiehallinto 2006, 9.)

Teiden ja katujen vaikutus ympäristöönsä on yhä monimutkaisempaa. Kalusteiden ja menetelmien kehityksellä on vaikutusta valaisutapoihin ja -tyyppeihin sekä elinkaarikustannuksiin. Taajamissa katuvalaistus vaikuttaa merkittävästi esteettömän liikkumisympäristön toteuttamiseen. Valolla, valaistustavalla ja -tyypillä tuetaan liikenne- ja tieympäristöä sekä osoitetaan niiden muutokset. (Tiehallinto 2006, 9.)

Valolla on myös haitallisia vaikutuksia ympäristöönsä. Häiriövalo (kuva 1) on valaisualueen ulkopuolelle menevää valoa. Häiriövalo voi määränsä, suuntansa ja spektrijakaumansa takia kasvattaa epämukavuutta, epämiellyttävyyttä, hämmennystä tai rajoittaa jonkin oleellisen tiedon näkymistä. Valaistuksesta ei saisi aiheutua häikäisyä, muita haittavaikutuksia alueella liikkuville tai kadunvarren liikkeisiin ja asuntoihin. (Tiehallinto 2006, 9.)



Kuva 1. Havainnekuva häiriö- ja hukkavalosta (Tiensuu 2010, 11).

Tie- ja katuvalaistuksen haittapuolena on myös valosaaste, joka häiritsee esimerkiksi tähtien tarkkailemista. Valosaaste koostuu erityisesti valaisusta syntyvästä hukkavalosta. Valosaasteella on tutkimusten mukaan vaikutusta ihmisen terveyteen, kuten syöpäriskin kasvuun, stressaantuneisuuteen, masentuneisuuteen, univaikeuksiin ja liikalihavuuteen. Valosaaste häiritsee lisäksi luontoa, mm. kasvien vuosirytmiiä ja muuttolintujen lentoa. (Saavalainen & Pekonen 2013.)

2.1.3 Katuvalaistuksen merkitys taajamassa

Yleisten teiden pinta valaistaan autonkuljettajan näkemisvaatimusten mukaan. Kaupunkien julkisten katujen ympäristössä valaistavia pintoja ja kohteita on kuitenkin monia. Myös havaittsijoita on useita eri suunnissa. Katukuvassa nähdään eri liikennelajeja ja tapahtumia. Liikenteessä tapahtuu virhearviointeja esimerkiksi jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden liikkuesssa arvaamattomasti. Kaupunkivalaistuksen ensisijainen tehtävä on, että kadut toimivat turvallisina kulkuväylinä ja työpaikkoina pimeänä aikana. Valaistuksen avulla kyetään havaitsemaan muut katualueella liikkujat ja arvioimaan asemaa näiden suhteen. Suunnistamista auttaa johdonmukainen katuverkko, julkiset rakennukset sekä eri katujen ja kaupunginosien omaleimaisuus. (Tiehallinto 2006, 58.)

Vaikka turvallisuus ja suunnistettavuus ovat valaistuksen merkittävimmät tavoitteet öisessä kaupungissa, niin myös eettiset ja kaupunkikuvan arvot ovat tärkeitä. Erilaiset näkymät, mielenkiintoiset rakennukset sekä taideteokset tarjoavat virikkeitä ja vetävät puoleensa. Tunteisiin vetoavia kohteita ovat mm. historialliset rakennukset, puistot ja rannat. Katunäkymiä voidaan korostaa valaistuksella. Liikenne- ja katutila saa luonnollisemman ilmeen, kun valaistaan sopivasti rakennusten julkisivuja, siltoja, puistoja ja muuta katu ympäristöä. Katuvalaistuksella on myös muita tahattomia tai tarkoituksellisia vaikutuksia. Esimerkkinä voidaan mainita vaikka valaisimien sijaintikorkeus, josta riippuen jotkut rakennukset näkyvät ja toiset jäävät pimentoon. Valaistuksen eri värit herättävät erilaista tunnelmaa, ja valaisinjonot helpottavat suunnistautumista pimeässä. (Tiehallinto 2006, 58.)

2.1.4 Kevyen liikenteen alueet

Kevyen liikenteen väylien erillisvalaistus on tarpeen, kun varsinaisen ajoradan valaistus ei ulotu valaisemaan erillistä väylää etäisyyden tai kasvuston vuoksi. Kevyen liikenteen alueilla ja kävelykaduilla valaisimet sijoitetaan yleensä suhteellisen matalalle pylväisiin tai seinäpintoihin miellyttävän mittakaavan ja tunnelman aikaansaamiseksi. Valaisimet ovat kalustoltaan pienempiä ja valonlähteet pienitehoisempia kuin ajoneuvoliikenteen katuvalaistuksessa. Valaisimet asennetaan tarkoituksenmukaisesti suhteellisen tiheästi, jotta ne muodostavat toistuvan sarjan. Valaistus on kävelykaduilla usein koristeellinen ja osa kaupungin imagoa. Matalalla tiheästi olevia valaisimia voidaan käyttää tehokeinoina jalankulkualueilla, joissa valaistaan vain kulkupinta. Huonona puolena on, että matalalla olevat valaisimet joutuvat helposti alttiiksi ilkeille. (Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry & Suomen Valoteknillinen Seura ry 1999, 329; Kauppinen 2011, 159.)

2.1.5 Ajoneuvoliikenteen alueet

Pääkaduilla valaistus voidaan toteuttaa näyttävillä kalusteilla. Asennuskorkeus on suurehko (8–12 m) ja pylväsvälit pitkät. Kokoojakaduilla valaistus toteutetaan katualueen ilmeeseen sovitetuilla kalusteilla tai ripustusvalaistuksena asennuskorkeuden ollessa suurehko (8–10 m). Kaupunkien keskus-, asunto- ja tonttikuilla valaistus sovitetaan tiheään ympäristöön matalahkolla asennuskorkeudella (6–8 m). Valaistus on pelkistetympää keskustan ulkopuolisilla asuntokuilla. Piha- ja hidaskaduilla valaistuksen matalahko asennuskorkeus suhteutetaan rakennusten korkeuteen, jolloin pylväät ja esimerkiksi puuistutukset muodostavat johdonmukaisen kokonaisuuden. Jalankulkualueilla, kuten suojateilla, pyritään valaisemaan kulkupinnan lisäksi muita kalusteita ja istutuksia, jotta alue voidaan hahmottaa turvalliseksi ja hallittavissa olevaksi pimeänä aikana. (Kauppinen 2011, 160–161.)

2.2 Hankinta ja ylläpito

Maanteiden ylläpitäjänä toimii valtio, jonka puolesta tienpitäjänä toimii Liikennevirasto. Tienpitöviranomaisena toimii alueellinen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus). Liikennevirasto omistaa valaistuksen valta- ja kantateillä. Valtio voi vastata myös seutu- ja yhdysteiden valaistuksen rakentamisesta, jos tievalaistus on tarpeellinen liikenneturvallisuuden, alueen muun valaistuksen tai varustelun puolesta. Tähän vaikuttavat kuitenkin ELY-keskuksen hankkeiden kiireellisyysjärjestys ja rahoitusmahdollisuudet. ELY-keskuksen ja kunnan välinen yhteistyö tievalaistushankkeessa on mahdollista. Jos kunta päättää rakentaa tievalaistuksesta selvästi korkealuokkaisemman kuin ELY-keskuksen ohjeet ja ympäristön vaatimukset huomioon ottaen on tarpeen, kunta vastaa lisäkustannuksista. Tievalaistus voidaan toteuttaa myös kokonaan kunnan kustannuksella. Valaistuksen omistuksesta ja ylläpidosta on sovittava, kun päätetään rakentamisesta. (Tiehallinto 2006, 5; vastuunalaiset tahot on päivitetty nykyisiä vastaaviksi.)

Tievalaistuksen kunto tarkastetaan yli 20 vuotta vanhoilla ELY-keskusten omistamilla tiealueilla. Valaistuksen uusiminen tulee kysymykseen, kun valaistustaso on liian alhainen, valaistuksen energiankulutus on selvästi nykyaikaista valaistusta korkeampi, lamput ovat lyhytikäisiä tai vikaherkkiä, tietä levennetään, siirretään tai tielle tehdään kevyen liikenteen väylä, pylväät eivät ole törmäysturvallisia, valaistukseen halutaan erilainen ulkonäkö tai ilmajohdoista halutaan luopua. (Tiehallinto 2006, 9.)

Valaistuksen arvoa on vaikea mitata rahassa. Valaistuksen kustannukset voidaan kuitenkin laskea. Ne koostuvat rakennus-, käyttö- ja kunnossapitokustannuksista. Käyttö- eli energiakustannukset ovat elinkaaren aikaisista kustannuksista suurimmat. Energiakustannukset pidetään alhaisina oikein mitoitettulla energiatehokkaalla valaistuksella ja sen ohjauksella. (Tiensuu 2010, 32.)

Valaisin komponentteineen ja lamppuineen vaatii säännöllistä huoltoa ja kunnossapitoa. Valaisimien huolto tehdään joko yksittäishuoltona tai ryhmähuoltona. Yksittäishuollossa vaihdetaan huoltokierroksella vikailmoitusten perusteella loppuun palaneet ja rikkoutuneet lamput sekä tehdään pieniä valaisinkorjauksia. Ryhmähuolto toteutetaan määräajoin alueittain. Ryhmähuoltoon kuuluvat lamppujen ryhmä- eli kausivaihdot sekä heijastimien vaihdot ja pesut. Esimerkiksi elohopeahöyry- ja suurpainenatriumlampuilla ryhmävaihtoväli on 3–4 vuotta, jonka rajoittavana tekijänä on valaisimen likaantuminen ja lamppujen valovirran alenema. Valaistusverkossa esiintyvät järjestelmän toiminnalliset viat, kuten sähkönsyöttöviat, pyritään korjaamaan välittömästi. Valaisinhuolto on usein korkealla tapahtuvaa työskentelyä, ja se vaatii esimerkiksi henkilönostokorin, jonka avulla huoltotyöt voidaan tehdä turvallisesti ja tehokkaasti. Valaisinhuolto tehdään yleensä liikenteen joukossa, joten muun liikenteen varoittaminen on tarpeellista. (Monni 2012, 183–184.)

2.3 Tie- ja katuvalaistuksen suunnittelu ja valaistusteknilliset vaatimukset

Suunnittelua varten valaistus jaetaan luokkiin, joiden määrittämiseen käytetään valaistusteknillisiä perusteita. Riittävät valaistusteknilliset ominaisuudet täyttävät näkemisen ja havaitsemisen edellyttämät vaatimukset, jolloin oikealla valaistusluokan valinnalla parannetaan liikenneturvallisuutta sekä yleistä liikenneympäristön viihtyvyyttä. Autoilijoiden kannalta tärkeitä valaistusteknillisiä ominaisuuksia ovat luminanssin tasaisuus, keskimääräinen luminanssi ja häikäisyn rajoitus. Valaistuksen suunnittelu pohjautuu pääosin luminanssilaskelmiin, jolloin myös tiepäällysteen ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus lopputulokseen. Valaistusluokkia ovat AL-, AE- ja K-luokat. Valaistusteknillisiä ominaisuuksia ovat koko ajoradan keskimääräinen luminanssi L_m (cd/m^2), ajoradan luminanssin yleistasaisuuden arvo U_o , kaistan luminanssin pitkittäistasaisuuden arvo U_l , vaakatason keskimääräinen valaistusvoimakkuus E_m (lx), valaistusvoimakkuus E (lx), estohäikäisystä johtuva kontrastierotuskyvyn muutos TI (%) ja ympäristön valaistuksen suhdeluku SR . (Tiehallinto 2006, 14–17.)

Valaistusluokan valintaan vaikuttavat liikenneväylän ja liikenteen ominaisuudet. Tyypillisimmät yleisten teiden valaistusluokat on esitetty liitteessä 1. Liitteessä 2 on esitetty taajaman sisäisen liikenneverkon tyypilliset katujen valaistusluokat.

2.3.1 AL-luokat

AL-luokat on tarkoitettu moottoriajoneuvoin liikennöitäville teille ja kaduille, joilla ajonopeus ylittää 50 km/h. Taulukossa 1 on esitetty AL-luokat kuivalla ja märällä päällysteellä.

Taulukko 1. AL-luokat (Tiehallinto 2006, 17).

Luokka	Kuivan ja märän ajoradan luminanssi				Esto- häikäisy	Ympäristön valaistus
	Kuiva			Märkä		
	L_m cd/m ² , min	U_o min	U_i min	U_o min	TI % max	SR min
AL1	2,0	0,4	0,6	0,15	10	0,5
AL2	1,5	0,4	0,6	0,15	10	0,5
AL3	1,0	0,4	0,6	0,15	15	0,5
AL4a	1,0	0,4	0,4	0,15	15	0,5
AL4b	0,75	0,4	0,4	0,15	15	0,5
AL5	0,5	0,4	0,4	0,15	15	0,5

AL-luokkien mitoitus perustuu luminanssiin, ja laskenta on tehtävä standardin SFS-EN 13201-3 vaatimukset täyttävällä valaistuksen laskentaohjelmalla.

2.3.2 AE-luokat

AE-luokat on tarkoitettu moottoriajoneuvoin liikennöitäville teille ja kaduille alueille, joissa ei pystytä tekemään luminanssiin pohjautuvaa tarkastelua. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi kiertoliittymät, mutkikkaat tasoliittymät sekä taajamien lyhyet tontti-, kävely- ja pihakadut, joissa säännöllisen ajoradan pituus on alle 60 m. Taulukossa 2 on esitetty AE-luokat.

Taulukko 2. AE-luokat (Tiehallinto 2006, 18).

Luokka	Vaakatason valaistusvoimakkuus	
	E_m lx, min	U_o min
AE 0	50	0,4
AE 1	30	0,4
AE 2	20	0,4
AE 3	15	0,4
AE 4	10	0,4
AE 5	7,5	0,4

AL- ja AE-luokkien vastaavuutta voidaan verrata taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3. AL- ja AE-luokkien vastaavuus (Tiehallinto 2006, 18).

Luminanssi	Valaistusvoimakkuus
AL 1	AE 1
AL 2	AE 2
AL 3	AE 3
AL 4a	AE 3
AL 4b	AE 4
AL 5	AE 5

2.3.3 K-luokat

K-luokat on tarkoitettu ajoradan viereisille tai ulkopuolisille kevyen liikenteen väylille, asunto- ja pihakaduille sekä pysäköintialueille ja pihaille. Taulukossa 4 on esitetty K-luokat.

Taulukko 4. K-luokat (Tiehallinto 2006, 19).

Luokka	Vaakatason valaistusvoimakkuus	
	Em ¹⁾ lx, min	E lx, min
K1	15	5
K2	10	3
K3	7,5	1,5
K4	5	1
K5	3	0,6
K6	2	0,6

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

Ajoradan vieressä sijaitseva kevyen liikenteen väylä valaistaan usein ajoradan valaistuksella, jolloin valaistuksen riittävyys varmistetaan laskentaohjelmien avulla. K-luokkien valintaperiaatteet on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Kevyen liikenteen väylillä ja alueilla käytettävät valaistusluokat (Tiehallinto 2006, 24).

VÄYLÄ TAI ALUE	VALAISTUSLUOKKA	VÄYLÄ TAI ALUE	VALAISTUSLUOKKA
KÄVELYKADUT		HIDAS- JA PIHAKADUT	
Kaupungin keskusta		- vilkkaat	K2
- vain kevytliikenne	K2	- vähätoimintaiset	K4, K5
- huoltoajo sallittu	K1		
Kaupungin muut alueet		JALANKULKUALUEET	
- vain kevytliikenne	K3	KESKUSTASSA,	K1, K2
- huoltoajo sallittu	K2	TORIT JA AUKIOT	
		PYSÄKÖINTIALUEET	
Maaseututaajamat		- vilkkaat	K3
- vain kevytliikenne	K3, K4	- vähäliikenteiset	K4
- huoltoajo sallittu	K2		
		ULKOILUTIET	
HIDAS- JA PIHAKADUT		- puistokäytävät	K3
- vilkkaat	K2	- hiihtoladut, pururadat	K4
- vähätoimintaiset	K4, K5		
JALANKULKUALUEET		ERILLISET KEVYEN	
KESKUSTASSA,	K1, K2	LIIKENTEEN TIET	
TORIT JA AUKIOT		- vilkkaat	K4
		- vähäliikenteiset	K6

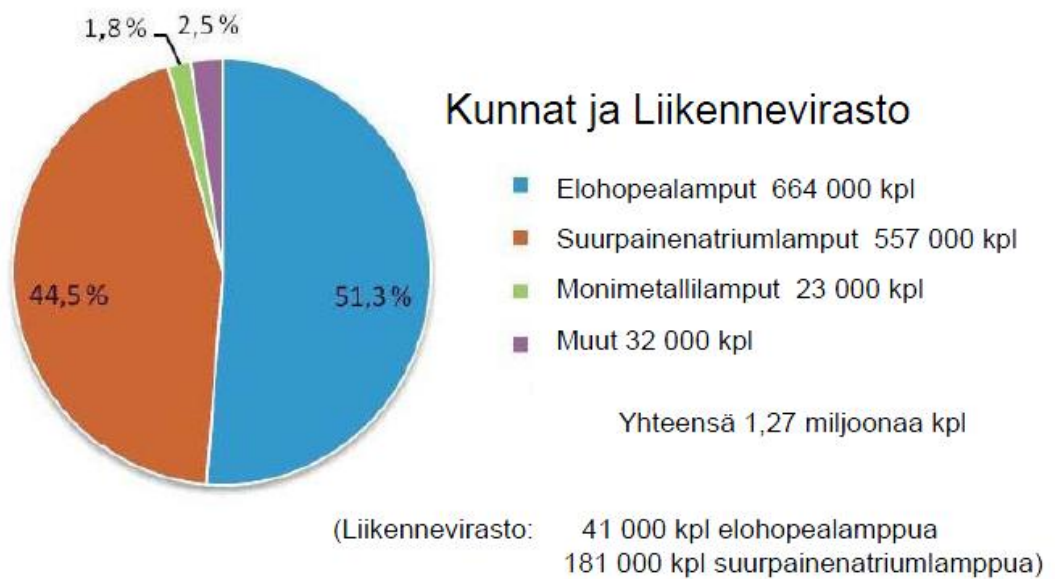
2.4 Valaisimet ja valonlähteet

Valaisimen tehtävä on sytyttää lamppu ja suunnata valo valaistavaan kohteeseen mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella siten, että häikäisy ja häiriövalo ovat mahdollisimman vähäisiä. Valaisimen hyötysuhde ilmoittaa, kuinka hyvin lampun tuottama valovirta saadaan ulos valaisimesta ja sen optiikasta. Valaisin suojaa lampun, virranrajoitinta ja muita sähköisiä osia erilaisilta rasituksilta, kuten sään vaihtelulta, tärinältä, korroosiolta, pölyltä, ilkeiltä ja ilman epäpuhtauksilta. Valaisimen pitää olla helposti asennettavissa ja huollettavissa sekä muodoltaan sellainen, että tuulikuorma on mahdollisimman pieni. Nykyään asennetaan vain suljettuja valaisimia, joissa optiikan ja lampun suojana on muovinen kupu tai tasolasi. Valaisimen tulee olla Liikenneviraston tarkastama ja hyväksymä, ja sen on täytettävä standardin SFS-EN 60598-2-3 tie- ja katuvalaisimille asetetut erityismääräykset. (Monni 2012, 154; Tiehallinto 2006, 80.)

Valaisimen valonjako-ominaisuudet määräytyvät valaisimen optiikan eli heijastimen mukaan. Heijastin ja lamppu muodostavat valonjakokäyrän, joka kertoo millaisen valaistuksen valaisin valaistavalle pinnalle muodostaa. Valaisinta valittaessa otetaan huomioon valaistavan pinnan heijastusominaisuudet, ja niiden perusteella valitaan valaisin, jolla on tapaukseen sopivin valonjakokäyrä. (Monni 2012, 154.)

Valaisimet sijoitetaan yleensä yhteen pylväsjonoon, joko yksirivisellä reunasijoituksella tai keskikaista-asennuksella. Reunasijoitus voi olla myös kaksirivinen. Valaisimet kiinnitetään valaisinvarteen, pylvään päähän tai ripustamalla esimerkiksi vaijerin avulla. Ripustusvaijereihin valaisimet saadaan sijoitettua ajoradan päälle, jolloin valaistusvoimakkuus on reunasijoitusta parempi. Valaisimet asennetaan siten, että ne ovat kohtisuorassa valaistavaan väylään nähden ja heijastuskuviot tulevat pääosin valaistavalle väylälle. Asennuskorkeus on yleensä sama kuin valaistavan väylän leveys, mutta se tarkentuu laskelmien perusteella. Pylväsvälillä ja -korkeudella on vaikutusta valonjakoon ja valaistuksen tasaisuuteen. Pylväsvälillä on vaikutusta myös asennustehoon. Liian lyhyt tai pitkä pylväsväli yli- tai alimitoittaa asennuksen. (EkoValo 2011; Tiehallinto 2006, 81.)

Tie- ja katuvalaistuksessa valonlähteinä käytetään suurimmalta osin erilaisia kaasupurkauslamppuja, joita ovat monimetalli-, elohopeahöyry- ja suurpainenatriumlamppu. Lamppujen valintaan vaikuttavat ominaisuudet ovat valovirta, valotehokkuus, hyötypolttoikä, kuolleisuus, valovirran alenema, valon väri, värin-toindeksi, valon suunnattavuus ja hinta. Tärkeimmät ominaisuudet ovat värin-toindeksi, valon suunnattavuus, hyötypolttoikä ja hinta. (Tiehallinto 2006, 77.) Ulkovalaistuksessa käytetyimmät valonlähteet on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Ulkovalaistuksen valonlähteet Suomessa vuonna 2009 (Rantakallio & Ylinen 2011).

Taulukossa 6 on esitetty eri valonlähteiden ominaisuuksia. Taulukon avulla voidaan vertailla tie- ja katuvalaistuksessa yleisimmin käytettyjä lampuja ja muiden valonlähteiden käyttökelpoisuutta erilaisissa ympäristöissä. Taulukosta voidaan huomata esimerkiksi, että suurpainenatriumlampun valotehokkuus on korkea, mutta värintoistokyky heikko ja värilämpötila matala. Suurpainenatriumlamppuun verrattuna monimetallilampun valotehokkuus on huonompi ja polttoikä lyhyempi, mutta värintoistokyky on selvästi parempi ja värilämpötila korkeampi. Etenkin polttoikässä ja valotehokkuudessa on eroja valmistajasta riippuen.

Taulukko 6. Valonlähteiden ominaisuudet (Tiehallinto 2006, 78).

Valonlähde	Valotehokkuus lm/W	Polttoikä 1000 h	Värintoistoindeksi R_a	Värilämpötila K
Suurpainenatrium	70-120	12-22	20-65	2000-2200
Monimetalli, keraaminen	80-95	5-12	80-95	3000-4200
Elohopea	40-55	12-16	50-60	3200-4200
Loistelamppu	60-100	11-40	80-90	2700-4000
Pistokantaloistelamppu	60-80	8-12	80-90	2700-4000
Induktiolamppu	60-80	60	80	2700-4000
LED	Useita tyyppisiä, värejä ja arvoja			

Neutraalin eli valkoisen valon värilämpötila on noin 4000 K. Valo on sitä lämpimämpää ja väriltään kellertävämpää tai punertavampaa, mitä pienempi värilämpötilan arvo on. 3000 K:n valo on lämpimän valkoista, kun taas 2000 K:n valo on kellertävää. 5000 K vastaa päivänvaloa. Korkea yli 6000 K:n valo on jo selkeästi sinertävää. Ihmissilmälle sopivin värilämpötila on 3000–4000 K. Valonlähteen värintoistokyky on erittäin hyvä, kun $R_a > 90$. Kun R_a on 60–80, värintoistokyky on hyvä. Värintoistokyky on olematon, kun $R_a = 0$. (Motiva 2011.)

2.4.1 Direktiivi

Euroopan komission asetus (EY) N:o 245/2009 panti täytäntöön Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2005/32/EY maaliskuussa 2009. Nykyisin noudatetaan korvaavaa ErP (Energy related Products) 2009/125/EY -direktiiviä. ErP-direktiivissä ohjeistetaan tuotteiden ekologista suunnittelua eli käsitellään energiaa käyttävien ja energian käyttöön vaikuttavien tuotteiden suunnittelua. (Kallasjoki 2011.)

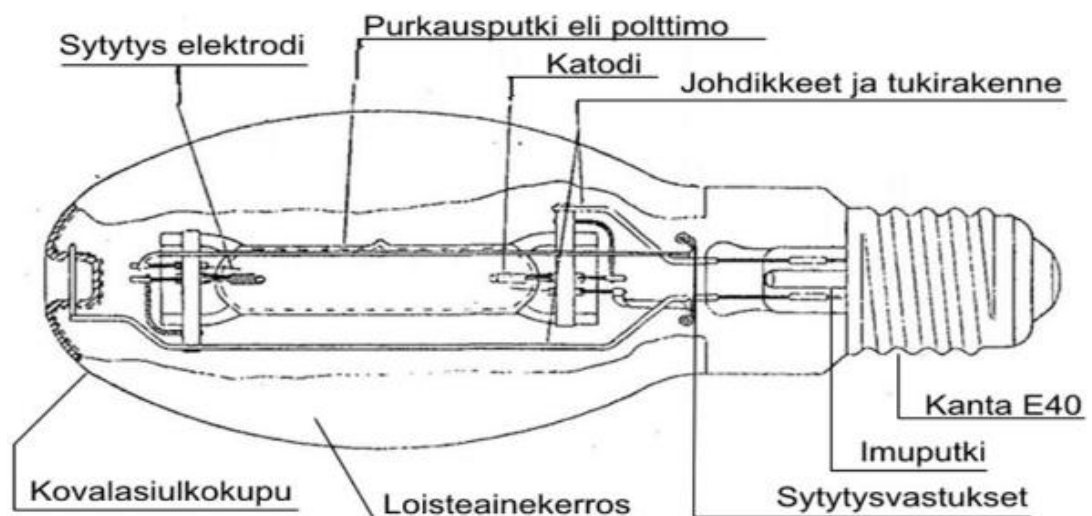
ErP-direktiiviä perustellaan energiatehokkaisiin tuotteisiin siirtymisen hitaudella. Merkittävät elinkaarikustannussäästöt olisi saavutettavissa, mutta niitä ei hyödynnetä tarpeeksi tehokkaasti. Direktiivissä markkinoilta poistuvien ja rajoitettujen tuotteiden merkitys on ympäristörasituksen ja energiansäästön kannalta suuri. Direktiivin tavoite on vähentää energiankulutusta 20 % vuoteen 2020 mennessä. Lähtökohtana on löytää vanhan valonlähteen tilalle energiatehokkaampi vaihtoehto. (EkoValo 2011; Kallasjoki 2011.)

Direktiivi on kolmivaiheinen. Ensimmäinen vaihe oli vuonna 2010, mutta se ei tuonut muutosta tie- ja katuvalaistukseen. Toinen vaihe oli vuonna 2012, minkä seurauksena vain energiatehokkaimmat suurpainenatrium- ja monimetallilamput jäivät markkinoille. Välitarkasteluvaiheessa vuonna 2015 elohopeahöyrylamput poistuvat markkinoilta. Lisäksi elohopeahöyrylamppuja suoraan korvaaville suurpainenatriumlampuille ja muille purkauslampuille asetetaan uudet energiatehokkuusvaatimukset. Elohopeahöyrylamppujen poistumisella on suuri vaikutus katuvalaistukseen. Kolmannessa vaiheessa vuonna 2017 annetaan uudet energiatehokkuuden minimiarvot kaikille monimetallilampuille ja kvartsilasiset monimetallilamput poistuvat kokonaan markkinoilta. (EkoValo 2011; Kallasjoki 2011.)

2.4.2 Elohopeahöyrylamppu

Elohopeahöyrylampusta (kuva 3) syntyy pääosin näkyvää valoa ja osin ultraviolettisäteilyä elohopeahöyryn ollessa korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Lampun syttyessä valo on väriltään punaista. Polttimon lämpeneminen kestää 2–5 minuuttia, minkä jälkeen ultraviolettisäteily muuttuu näkyväksi valoksi loisteaineella pinnoitetun suojakuvun avulla ja lamppu saavuttaa täyden valotehokkuuden. Tavallisin loisteainemateriaali on yttriumvanadaatti. Jännitekatkoksen jälkeen lampun jäähtymiseen ja uudelleen syttymiseen kuluu myös 2–5 minuuttia, mikä johtuu elohopeahöyryn suuresta paineesta. Suojakupu estää haitallisen UV-säteilyn pois pääsyn, toimii lämpöeristyskseenä ja suojaa polttimoa ulkoilman hapelta. (Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry & Suomen Valoteknillinen Seura ry. 1999, 47–49.)

Elohopeahöyrylampun tuottama valo on melko valkoista, tosin sävyltään hieman sinertävää. Melko valkoisen valon johdosta elohopeahöyrylampun värin-toistokyky on kohtalainen. Elohopeahöyrylamput ovat muihin suuritehoisiin purkauslamppeihin verrattuna edullisia, mutta heikkoutena on suuri energiankulutus ja merkittävä valovirran alenema elinkaaren aikana. Polttimon sisältämän elohopean takia lamppu on käytön jälkeen ongelmajätettä. (Honkanen 2009.)



Kuva 3. Elohopeahöyrylampun rakenne (Hietaranta 2012).

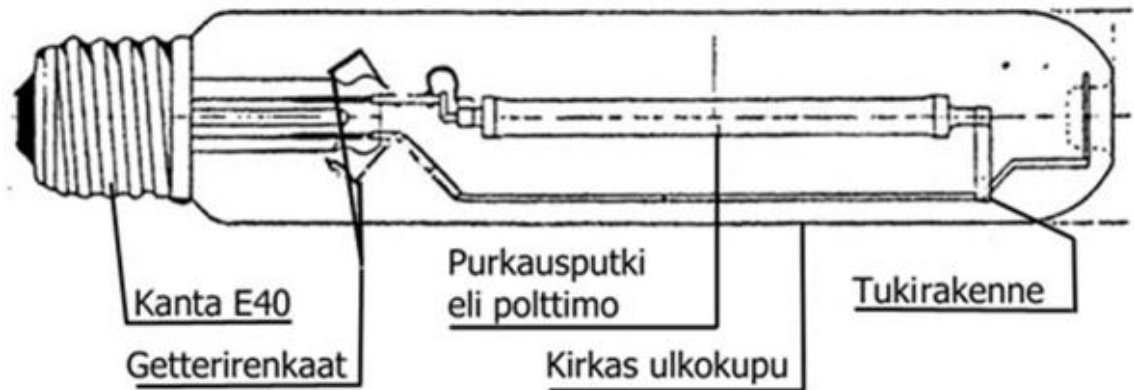
Tie- ja katuvalaistuksessa elohopeahöyrylamppu on melko yleinen. Yleisimmät käyttökohteet ovat seudulliset tai sitä alempiluokkaiset tiet, kevyen liikenteen väylät sekä kokooja- ja tonttikadut. Elohopeahöyrylamppua on pidetty yksinkertaisena, helppokäyttöisenä ja luotettavana valonlähteenä muihin purkauslampuihin verrattuna. Suurpainenatrium- ja monimetallilamput ovat kuitenkin syrjäyttämässä valo- ja energiatehokkuudeltaan heikompaa elohopeahöyrylamppua. EU:n ErP-direktiivin myötä elohopeahöyrylamput poistuvat markkinoilta 13.4.2015. Elohopeahöyrylamppujen poistumisessa ongelmana on se, ettei niitä voida suoraan korvata toisella suurpaineisella purkauslampulla, koska elohopeahöyrylamppu syttyy ilman ulkoista sytytintä. Elohopeahöyrylamppujen korvaaminen edellyttää liitälaitteiden tai koko valaisimen vaihtoa. (Kallasjoki 2011.)

2.4.3 Suurpainenatriumlamppu

Suurpainenatriumlampussa (kuva 4) purkausputken eli polttimon läpi johdetaan suuri virtatiheys, minkä seurauksena natriumhöyryn paine kasvaa ja höyry alkaa lähettää tehokkaasti näkyvää valoa. Lamppu tarvitsee syttyäkseen noin 2,5 kV:n suuruisen jännitepiikin, joka annetaan ulkoisella sytytinlaitteella. Osa lamppuista ei vaadi sytytintä, ja ne on suunniteltu liitettäväksi verkkoon elohopeahöyrylamppun kuristimen eli liitälaitteen välityksellä. Suurpainenatriumlampun polttimon lämpeneminen kestää 5–10 minuuttia ja sammunut lamppu syttyy uudelleen 1–2 minuutin kuluttua jännitekatkoksesta. (Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry & Suomen Valoteknillinen Seura ry. 1999, 60–62.)

Suurpainenatriumlamppu on käytetyin lampputyyppi Suomen teillä ja kaduilla. Yleisimmät käyttökohteet ovat moottori- ja moottoriliikennetiet, valta- ja kantatiet, pääkadut sekä taajamien sisääntulotiet. Suurpainenatriumlampun etuina ovat hyvä valotehokkuus, varma tekniikka, edullinen hinta ja pitkä käyttöikä esimerkiksi elohopeahöyrylamppuun verrattuna. Suurpainenatriumlampun ongelmana on kuitenkin sen tuottaman valon keltainen väri. Elohopeahöyrylamppun korvaaminen suurpainenatriumlampulla muuttaa valon värisävyn valkeasta kel-

lertäväksi, ja samalla valaistuksen värintoisto-ominaisuudet heikkenevät merkittävästi. (EkoValo 2011.)



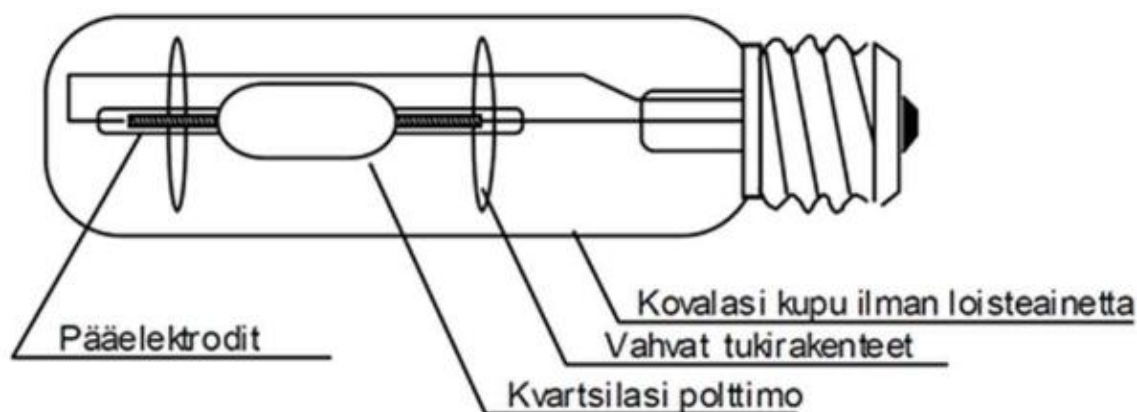
Kuva 4. Suurpainenatriumlampun rakenne (Hietaranta 2012).

Suoraan elohopeahöyrylampuja vanhoissa valaisimissa korvaavat suurpainenatriumlamput poistuvat ErP-direktiivin myötä markkinoilta samaan aikaan kuin elohopeahöyrylamputkin, vuoden 2015 huhtikuussa. (EkoValo 2011.)

2.4.4 Monimetallilamppu

Monimetallilampun (kuva 5) valontuotto perustuu korkeapaineiseen kaasupurkaukseen ja siinä käytettyyn useiden eri metallien seokseen. Purkausputkessa eri metallien jodidit hajoavat, jolloin vapaat metalliatomit elektronien virittäminä alkavat lähettää säteilyä näkyvää valoa. Lamppu tarvitsee syttyäkseen sytytyslaitteen, joka antaa useiden kilovolttien suuruisia jännitepiikkejä kunnes polttimo syttyy. Lampun lämpeneminen kestää 2–10 minuuttia. Lämpenemisen aikana lampun väri vaihtelee huomattavasti, koska eri jodidit höyrystyvät eri nopeudella. Jännitekatkoksen jälkeen lamppu vaatii useiden minuuttien jäähtymisen syttyäkseen uudelleen. Polttimon putki on kvartsilasinen tai keraaminen. Kvartsilasiset monimetallilamput poistuvat kokonaan markkinoilta vuonna 2017. Purkauslampuna monimetallilamppu on elohopeahöyrylampun kaltainen, mutta valo on puhtaamman valkeaa ja värintoistokyky parempi. Valotehokkuus on

myös elohopeahöyrylampun parempi. (Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry & Suomen Valoteknillinen Seura ry. 1999, 53–55; Honkanen 2009.)



Kuva 5. Monimetallilampun rakenne (Hietaranta 2012).

Valotehokkuudeltaan monimetallilamppu on lähes suurpainenaatriumlampun veroinen. Huonoja puolia ovat kallis hinta ja lyhyt polttoikä. Monimetallilamppuja käytetään mm. kenttävalaistuksiin sekä vaativiin julkisivu- ja taajamavalaukseen, kuten torit ja aukiot. (Honkanen 2009.)

2.4.5 Led, valodiodi

Led on puolijohdekomponentti, jossa valo syntyy puolijohderajapinnan yli kulkevan sähkövirran muuttuessa fotoneiksi. Puolijohteet ovat nimensä mukaisesti aineita, jotka johtavat sähköä huonommin kuin tavalliset johteet, kuten esimerkiksi kupari. Erilaiset puolijohteet tuottavat eriväristä valoa. Valkoinen katuvalaistukseen soveltuva led pohjautuu sinistä valoa tuottavaan puolijohdeeseen, joka koostuu yleisesti galliumnitridipohjaisesta led-sirusta ja sitä peittävästä loisteainekalvosta. Loisteaine absorboi osan sinisestä valosta ja säteilee sen ulos keltaisena sekä punaisena valona. Kokonaisuutena valo näyttää valkoiselta. (Monni 2012, 153.)

Fysiikan Nobel-palkinnon vuonna 2014 jakoivat japanilaiset Isamu Akasaki, Hiroshi Amano ja yhdysvaltalais-japanilainen Shuji Nakamura. Palkinto myönnettiin kolmikolle sinisen ledin kehittämistä, joka mahdollisti valkoisen valon tuottamisen. Kolmikko keksi sinisen ledin jo 1990-luvun alussa, mikä on johtanut nykypäivään mennessä ledien kehittymiseen hyvin kirkkaiksi ja energiatehokkaiksi valolähteiksi. Valaistukseen kuluu noin neljäsosa maailman sähköntuotannosta, joten ledien yleistyminen vähentää merkittävästi energiankulutusta ja pienentää hiilidioksidipäästöjä. Lisäksi ledeillä on mahdollisuus parantaa elämänlaatua yli 1,5 miljardin ihmisen osalta, joilla ei ole pääsyä sähköverkkoihin. Ledit vaativat hyvin vähän energiaa, ja niitä voitaisiin käyttää paikallisella aurinkoenergialla. (Mielonen 2014; Alford 2014.)

Led-valaisimet ovat voimakkaassa kehitysvaiheessa ja etenkin valotehokkuus paranee koko ajan. Led-valaisimien on luvattu olevan hyvin pitkäikäisiä, mutta tarkkoja kokemuksia ei vielä ole. Led-tekniikan kehityspotentiaali on valtava ja kehitystyötä tehdään jatkuvasti. Ledistä on nousemassa merkittävä energiansäästöön johtava valaistusmenetelmä. Ledin ominaisuutena on, ettei se varsinaisesti pala loppuun, vaan valoteho pienenee merkittävästi käytön aikana. Ledin huonona puolena on sen arkuus lämmölle. Ledin elinikä laskee voimakkaasti, jos lämpö nousee liikaa. Mitä viileämpänä led saa palaa, sitä pidempi sen paloaika on. Lämmön poistamisen vaikeudet ovat olleet esteenä ledin valotehon nostolle. (Tuominen 2012; Monni 2012, 153.)

2.5 Valaistuksen ohjaustavat

Katu- ja tievalaistuksen ohjauksen tarkoitus on syyttää valaistus, kun sitä hämärän tultua tarvitaan, ja sammuttaa valaistus silloin, kun luonnonvaloa on riittävästi. Valaistuksen ohjaustarvetta on myös silloin, kun pimeänä aikana halutaan vähentää valaistusta tai sammuttaa valot kokonaan. (Monni 2012, 168.)

Valaistuksen ohjaustapoja ovat paikallisohjaus, ketjuttaminen, keskitetty ohjaus ja älykäs tievalaistus. Paikallisohjauksessa valaistavana on pienehkö alue tai yksittäinen valaistuskohde, jota ohjataan hämärä- tai kellokytkimen avulla. Ket-

juttamisessa valaisinkeskukset ovat yhteydessä toisiinsa erillisten ohjauskaapeleiden välityksellä, jolloin ohjaus siirtyy keskusten välillä mekaanisella yhteydellä. Keskitetyllä ohjauksella saadaan valaistus syttymään tai sammumaan samanaikaisesti yhtenäisen tievalaistusverkon alueella. (Tiehallinto 2006, 90–91.)

Älykäs tievalaistus perustuu monipuoliseen ohjausjärjestelmään, joka kerää tietoa vallitsevista tie- ja liikenneoloista, tienpinnan ominaisuuksista ja lamppujen valovirroista. Erillisiä ohjauskaapeleita ei tarvita, sillä tieto liikkuu esimerkiksi korkeataajuisena signaalina ryhmäjohtoja pitkin tai GSM- ja radioyhteyden avulla. Kerättyjä tietoja hyväksikäyttäen ohjausjärjestelmä muuttaa automaattisesti valaistuksen määrää. Ohjausjärjestelmä antaa palautetietoja hoitotöiden ohjelmointia ja toiminnan seuranta varten. Tietoja voidaan lähettää sekä vastaanottaa GSM- tai radioyhteyden, puhelimen ja tietokoneen avulla. (Tiehallinto 2006, 13.)

Valaistuksen himmentäminen on mahdollista, jos ajorata on esimerkiksi pitkähkön ajan luminen. Kun valaistus on rakennettu liikenneturvallisuuden sijaan viihtyvyyden takia, tulee kysymykseen sekä himmentäminen että yösammutus. Himmentäminen ei lisää onnettomuuksia ajoradan ollessa pitkähkön aikaa luminen. Valaistuksen sammuttaminen taas lisää onnettomuuksia aina. Sammuttamisessa on myös riskinä ilkivallan tai rikollisen toiminnan lisääntyminen. (Tiehallinto 2006, 9.)

Lamppujen säätäminen voidaan toteuttaa elektronisella katuvalosäätimellä eli himmenninyksiköllä, jonka himmennyskäsky voidaan antaa keskitetyllä ohjausjärjestelmällä. Purkauslamppuista elohopeahöyrylamppu ja suurpainenatriumlamppu ovat himmennettävissä 50–100 %:iin. Himmentäminen tulee tehdä alaspäin mentäessä hyvin hitaasti 5–20 minuutin kuluessa, jottei lamppu sammu. Himmentäminen tosin lyhentää lampun elinikää. Lisäksi suurpainenatriumlampun valo on sitä keltaisempaa, mitä enemmän himmennetään. Monimetallilamppuja ei esteettisistä syistä suositella himmennettäväksi, koska lamput saattavat muuttua erivärisiksi ja vilkkuviksi. (Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry & Suomen Valoteknillinen Seura ry. 1999, 146–147.)

3 LEDIT

3.1 Ledin kehitys ja edut

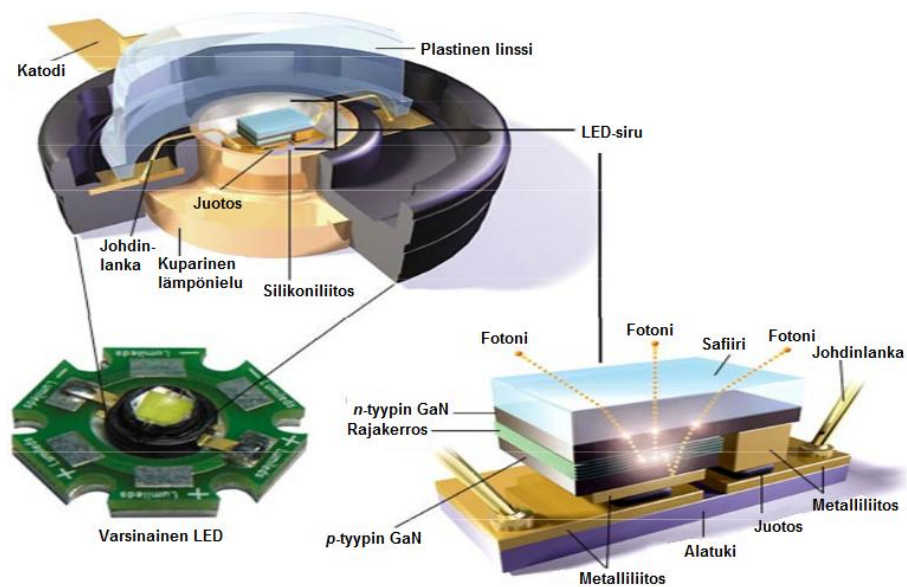
Kymmenen vuotta sitten ledit tunnettiin vielä lähinnä pieninä valonlähteinä näyttöissä ja merkkivaloissa, kuten liikennevaloissa. Nyt ledit ovat kehittyneet siihen pisteeseen, että niitä voidaan käyttää vaativimmissakin valaistustehtävissä, kuten katuvalaistuksessa. Tämän ovat tehneet mahdolliseksi entistä valovoimaisempien ledien kehittyminen ja etenkin valkoisen ledin keksiminen. Ympäristömääräykset ja kestävän kehityksen tavoitteet edistävät pyrkimistä energiatehokkaampiin ratkaisuihin, joita ledit tarjoavat. Ledin vaikutusta on verrattu matkapuhelimen tai Internetin keksimiseen, ja tällä hetkellä ledien kehitys on verrattavissa tietokoneiden ja taulutelevisioiden kehitykseen. Monet edut tekevät ledistä mielenkiintoisen. Seuraavassa ledin etuja valaistuksessa optimaalisen valaistussuunnittelun, taloudellisuuden ja tekniikan osalta:

- valkoista ja valkoisen eri sävyjen valoa
- korkea värikylläisyys ja hyvät värintoisto-ominaisuudet
- valo helposti hallittava ja suunnattava
- kompakti rakenne joustavaan valaisimen muotoiluun
- pitkäikäinen ja vähän huoltoa
- korkea hyötysuhde
- äärettömän himmennettävä
- ympäristöystävällinen ja helppo hävittää
- ei elohopeaa, UV- tai infrapunasäteilyä
- iskun- ja värinänkestävä (Licht.de 2014.)

Led-tekniikan nopea kehitys valaistusmarkkinoilla aiheuttaa myös epävarmuutta, kun vaaditaan selkeää ja luotettavaa tietoa ledin ominaisuuksista. (Licht.de 2014).

3.2 Toimintaperiaate

Led on valoa emittoiva diodi. Diodi on normaalisti kaksiosainen kide, joka koostuu N- ja P-tyyppin puolijohdeista. N-tyyppin puolijohdeeseen on seostamalla lisätty ylimääräisiä elektroneja. P-tyyppin puolijohdeeseen on seostamalla aikaan saatu aukkoja, joista puuttuu elektroneja. Aukot toimivat positiivisina varauksenkuljettajina. N-tyyppin puolijohde sisältää enemmistön varauksenkuljettajia ja P-tyyppin vähemmistön varauksenkuljettajia. P- ja N-tyyppin puolijohdeiden kosketuspintaa kutsutaan rajakerrokseksi tai PN-liitokseksi, joka muodostaa diodin. Elektronit siirtyvät N-tyyppin puolijohdeesta rajakerroksen yli P-tyyppin puolijohdeeseen, kun diodin läpi johdetaan sähkövirta. Elektronien ja aukkojen yhtyessä rajakerros säteilee valoa, joka muodostuu elektronien siirtyessä alempaan energia-tilaan jäljelle jäävästä energiasta. (Philips.com 2013.) Kuvassa 6 on esitetty ledin rakenne.



Kuva 6. Ledin rakenne (Daniel Jenkins 2009).

Ledin tärkein rakenneosiosa on led-siru, johon anodi ja katodi ovat kiinnitetty metalliliitoksien, juotoksien ja johdinlankojen avulla. Led-siru koostuu hyvin ohuista materiaalikerroksista, joita nimitetään kvanttikalvoiksi. Led-siru on pakattu aluslevyn päälle. Levyn heijastinpinnat ja ulkoinen linssi keräävät led-sirun säteilevän valon haluttuun keilaan. Kotelointi siirtää lämpöä led-sirusta ulkoiseen jäähdytyslevyyn. Erona moniin muihin valonlähteisiin ledit eivät ole ympärisäteileviä, koska ne eivät säteile valoa kantansa suuntaan. Yhden ledin teho on usein matala, joten led-katuvalaisimessa voi olla useita kymmeniä tai jopa satoja ledejä. (Monni 2012, 153.)

3.3 Valkoinen led ja värilämpötila

Led-sirut säteilevät aina värillistä valoa. Valon väri määräytyy säteilyn aallonpituuden mukaan. Valkoinen valospektri on ainoa spektri, jota led-siru ei pysty suoraan tuottamaan. Tämä johtuu siitä, että valkoinen valo on kaikkien valon värien sekoitus. Valkoinen led voidaan valmistaa joko luminenssia muuntamalla tai vihreää, punaista ja sinistä valoa sekoittamalla. Tällä hetkellä paras tapa perustuu luminenssin muuntamiseen, jossa led-sirun päällä on erittäin ohut loisteainekalvo. Loisteaineen kemiallisen koostumuksen ja konsentraation pitää olla erittäin tarkasti kontrolloitua, kun luodaan valon väriä. Loisteaineen erilaisilla annosteluilla saadaan aikaan erilaisia valkoisen valon sävyjä. Luminesenssin muuntaminen mahdollistaa muutakin kuin valon värin tarkan määrittämisen. Menetelmän etuina ovat suhteellisen suuri valovirta ja hyvä värintoisto R_a :n ollessa jopa yli 90. (Osram.fi 2014; Licht.de 2014.)

Valkoinen valo voidaan tuottaa myös erivärisiä valoja sekoittamalla. Tätä menetelmää kutsutaan additiivisen sekoittamisen periaatteeksi. Värien yhdistäminen vaatii paljon asiantuntemusta, ja oikeanlainen lopputulos on vaikea saavuttaa värillisten ledien kirkkauksien vaihdellessa. Menetelmä ei ole yhtä tehokas kuin luminenssin muuntaminen, sillä esimerkiksi värintoisto-ominaisuudet jäävät alhaisemmiksi R_a :n ollessa vain 70–80. Menetelmän hyötynä on valon värin

muunneltavuus ohjauksen avulla, jolloin voidaan tuottaa sekä valkoista että väriä valoa. (Licht.de 2014.)

Valon väriämpötila kertoo, säteileekö led lämmintä vai viileää valoa. Mitä korkeampi väriämpötila on, sitä viileämpää valo on. Valkoinen valo jaetaan perinteisesti väriämpötilaltaan kylmän valkoiseen (> 4500 K), neutraalin valkoiseen (n. 4000 K) ja lämpimän valkoiseen (< 3500 K). Valaistussovelluksissa perinteinen värisävyjako ei ole riittävä, joten ledin väriämpötila on luokiteltu kansainvälisen ANSI-standardin (American National Standards Institute) värikoodien mukaan seuraavasti: 2700 K, 3000 K, 3500 K, 4000 K, 5000 K ja 6500 K. (Laminmäki 2010.)

3.4 Värintoisto

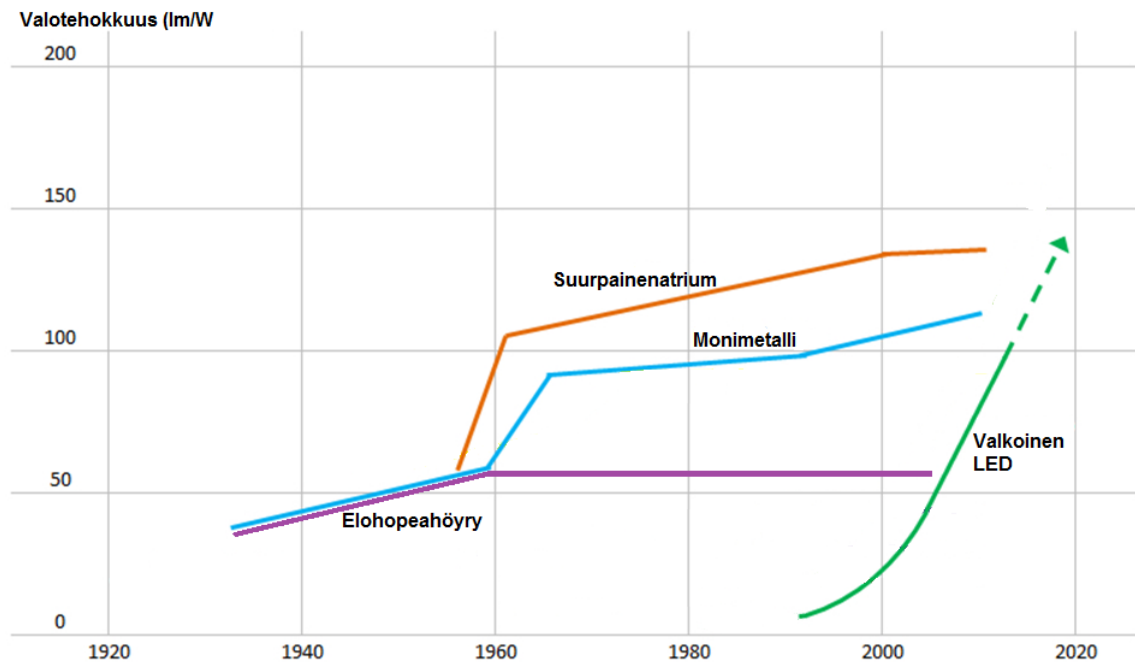
Ledit säteilevät monokromaattista säteilyä, mikä alun perin alensi niiden värintoisto-ominaisuuksia. Loistemateriaalien ansiosta valkoinen led on saavuttanut erittäin hyviä värintoistoindeksejä R_a :n ollessa parhaimmillaan jopa yli 90. Värintoisto-ominaisuudet ovat lämpimän valkoisen led-valon (2700–3300 K) osalta paremmat kuin neutraalin, päivänvalkoisen tai kylmän valkoisen led-valon. Lämpimän valkoista valoa tuottavat led-sirut ovat kuitenkin yleensä tehottomampia verrattuna suurempiin väriämpötiloihin. Kylmempää valoa tuottavat ledit ovat tehokkaampia mutta värintoisto-ominaisuuksiltaan hieman huonompia. Yhtenä ratkaisuna pidetään valkoisen eriväristen ledien sekoittamista valaisimessa, jolloin värintoisto ja tehokkuus saadaan tasapainoon. (Licht.de 2014.)

3.5 Tehokkuus ja valotehokkuus

Ledit toimivat erittäin tehokkaasti. Hyvä energiatehokkuus on tulos pitkän teknologian kehityksestä. Ensimmäinen led oli valotehokkuudeltaan 0,1 lm/W vuonna 1962. Nykyään ledeillä päästään valotehokkuuksiin 100–120 lm/W ja laboratorii-

oissa jopa 200–300 lm/W. (Licht.de 2014.) Taulukossa 7 on kuvattu katuvalaistuksessa käytettävien valonlähteiden valotehokkuuksien kehitystä.

Taulukko 7. Valonlähteiden valotehokkuuksien kehitys.



Tehokkuus riippuu käytössä monista tekijöistä. Valotehokkuuden ja ledien lisäksi tehokkuuteen vaikuttavat optiikka, käyttölaitteet, valaisimen optinen ohjaus ja ympäristöolosuhteet. (Licht.de 2014.)

3.6 Laatuominaisuudet

Led-markkinat kasvavat erittäin nopeasti ja tuotteita on tarjolla koko ajan enemmän. Led-komponenttien valmistajissa on kuitenkin vielä suuria eroja. Laatu vaihtelee voimakkaasti valmistajien käyttäessä erilaisia prosesseja ledien valmistukseen. Lisäksi laadukkaiden led-valaisimien kehitys ja valmistus vaatii paljon asiantuntemusta. Hyvällä valaisimella on korkea valotehokkuus ja tasapainoinen ihmissilmälle vaaraton luminanssi sekä valmistajan takuu. Hyvässä valaisimessa on lisäksi huomioitu ledien lämmöntuotto riittävällä jäähdytyksellä, joka estää valaisimen ylikuumentumisen. Valaisimen tulee myös säilyttää valaistusvoimakkuutensa. (Licht.de 2014.)

Led-katuvalaisimia ja -moduuleita on jo saatavilla monenlaisilla tehoarvoilla, joten valaistuksen vaatimat määrälliset ja laadulliset kriteerit pystytään täyttämään. Valaisimen optiikalla ohjataan valo sinne, missä sitä tarvitaan aiheuttamatta häikäisyä. Optimaalisesti led on muita valonlähteitä paremmin hallittava. Ledit ovat elektronisia komponentteja, joita voidaan kytkeä ja himmentää loputtomasti. Valaistuksen ohjaus voi olla myös dynaamista, jolloin valon väri muuttuu. Ledeillä pystytään tuottamaan 16 miljoonaa eri värisävyä, joita voidaan käyttää tehokkaasti esimerkiksi kävelykaduilla tunnelmavalaisuuteen, koristeelliseen valaistukseen ja erikoistehosteina. (Licht.de 2014.)

3.7 Lämmönhallinta

Lämpötilalla on suuri vaikutus ledin valotehokkuuteen. Mitä kylmempi ympäristö, sitä tehokkaammin ledit toimivat. Koska kylmät paikat ovat edullisia, ovat ledit erityisen tehokas vaihtoehto ulkovalaistukseen. Led muuttaa muiden valonlähteiden tapaan vain osan käytetystä energiasta valoksi ja suurin osa energiasta muuttuu lämpöenergiaksi. Muista valonlähteistä poiketen led ei säteile valon tuotossa syntyvää lämpöä valokeilassa pois, vaan led-siru lämpenee. Lämpö on johdettava pois led-sirusta, jotta led toimii tehokkaasti ja saavuttaa pitkän käyttöiän. Lämpö johdetaan pois led-sirusta erilliseen lämpönieluun, jonka kautta lämmönpoistoa edistetään jäähdytyslevyllä. Jäähdytyslevy on usein alumiininen, ja se rakentuu jäähdytysrivoista jäähdytyspinta-alan lisäämiseksi, jolloin aktiivisena jäähdyttäjänä toimii ilma. Vaikka ledit ovat pienikokoisia, niin jäähdytysrivasto tai vastaava jäähdytyslementti kasvattaa merkittävästi valaisimen kokoa. (Tetri 2010; Licht.de 2014.)

3.8 Elinikä

Ledien yhtenä suurimmista eduista pidetään pitkää elinikää verrattuna perinteisiin valonlähteisiin. Perinteiset valonlähteet sammuvat kokonaan elinikänsä loppuun toisin kuin ledit. Ledeille ilmoitetaan hyödyllinen käyttöikä, jonka aikana ledit lähettävät tarpeeksi valoa halutun valaistuksen aikaansaamiseksi. Ylei-

simmin ledin eliniäksi ilmoitetaan aika, jolloin jäljellä on 70 % alkuperäisestä valovirrasta. Kyseistä 30 %:n valovirran alenemaa merkitään tunnuksella L70. Muita mahdollisia valovirran alenemaa merkitseviä tunnuksia ovat L50, L80 ja L90. Ledien tuottama valovirta laskee lähes lineaarisesti elinkaaren aikana. Led-valaisimet on usein ylimitoitettava, jotta ne täyttävät valaistukselle asetetut minimivaatimukset asennusikänsä lopussa. Yleensä valaisimen valmistajat ilmoittavat valaisimen eliniäksi 50 000–100 000 tuntia. Ilmoitetusta eliniästä ei kuitenkaan ole vielä käytännön kokemuksia ja ne saattavat pohjautua laboratorio-olosuhteisiin. Lyhyt kertapoltto ja sytytyskertojen lukumäärä eivät laske ledin elinikää toisin kuin muilla valonlähteillä. (DOE 2014.)

3.9 Suosituimmat ledit ja led-katuvalaisimien valmistajat

Suomessa toimii useita katuvalaistukseen soveltuvia led-valaisimia valmistavia tai myyviä yrityksiä. Valaisimien ledit valmistetaan ulkomailla, vaikka valaisimet muuten suunnitellaan ja valmistetaan Suomessa.

Katuvalaisimissa käytettävien ledien suosituimpia valmistajia ovat esimerkiksi Osram, Cree, Philips ja Nichia. Eräitä suosituimpia led-katuvalaisinvalmistajia maailmalla ovat Philips, Osram, Sylvania, Siteco, Cree, Hevlar, Zumbtobel, Thorn lightning, Iguzzini, Urbis, Fagerhult ja Trilux. Suomessa led-katuvalaisimia valmistavia yrityksiä ovat Easy LED Oy ja Valopää Oy, joiden lisäksi Suomessa katuvalaistusasennuksissa käytettyjen led-valaisimien valmistajina ovat olleet mm. Iguzzini, Philips ja Fagerhult. (O. Laakkio, henkilökohtainen tiedonanto 10.10.2014.)

4 LEDIN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET KATUVALAISTUKSESSA

4.1 Elinikä

Led-valaisimien pitkä elinikä on niiden suurimpia etuja perinteisiin valonlähteisiin nähden. Led-valaisinvalmistajat ilmoittavat tuotteilleen 50 000–100 000 tunnin eliniän, jonka jälkeen valontuotto on laskenut 70–80 %:iin alkuperäisestä. Led-valaisimien eliniästä ja valovirran alenemasta ei ole kuitenkaan vielä käytännön kokemuksia, vaan eliniät ovat valmistajien arvioita. Suurpainenatriumlamppujen polttoaika on 12 000–22 000 tuntia ja monimetallilamppujen polttoaika jää 5 000–12 000 tuntiin, joihin verrattuna led-valaisimien käytöllä olisi mahdollista päästä yli kaksinkertaiseen tai parhaimmillaan viisinkertaiseen elinikään.

Katuvalaistuksen vuotuinen polttoaika on noin 4 000 tuntia. Led-valaisinvalmistajien ilmoittaman 50 000–100 000 tunnin eliniän mukaan led-valaisimet pitäisi vaihtaa 12–25 vuoden välein. Suurpainenatriumlampun vaihtoväli on noin neljä vuotta ja monimetallilampun 2–3 vuotta. Perinteisillä valonlähteillä vaihdetaan polttoain lopussa pelkkä lamppu. Led-valaisimen yksittäisiä ledejä ei vaihdeta niiden rikkoutuessa, vaan ledit voidaan vaihtaa moduuleittain. Yksittäisen ledin hajotessa koko valaisin voidaan joutua vaihtamaan, jos valaisimen rakenne ei ole modulaarinen.

Led-valaisimet vaativat toimiakseen liitälaitteen virranrajoitusta varten. Yhtenä suurimmista led-valaisimien haasteista koetaan liitälaitteen kestävyys. Valmistajat lupaavat liitälaitteiden kestävä valaisimen eliniän, mutta jos ne eivät kestäkään, valaisin ei toimi ja liitälaitte on vaihdettava. Liitälaitte tulisi olla vaihdettavissa niin, ettei koko valaisinta tarvitse vaihtaa. Yksi ledien ongelmista perinteisiin valonlähteisiin verrattuna on niiden lämmöntuotto, jolle sitä ole huolellisesti huomioitu led-valaisimen suunnittelussa. Ledien elinikä on verrannollinen niiden lämpötilaan. (E. Salminen, henkilökohtainen tiedonanto 26.9.2014.)

4.2 Värintoisto

Led-valaisimilla saavutetaan korkea värintoisto, jolloin valaistavat kohteet näkyvät luonnollisissa väreissään. Valmistajien led-valaisimilleen ilmoittamat värintoistoindeksit vaihtelevat 70–90 tai jopa yli 90. Monimetallilamppujen värintoistoindeksi on 80–95, joten led-valaisimet yltävät värintoistossa lähes samalle tasolle. Suurpainenatriumlamput säteilevät kellertävää valoa, jolloin valaistavien kohteiden värintoisto ei ole luonnollinen. Suurpainenatriumlamppujen värintoisto on 20–65.

Katuvalaistuksen osalta värintoistolla on suuri merkitys. Taajamissa ja kevyen liikenteen väylillä valkoiseen valoon ja korkeaan värintoistoon ollaan tyytyväisempiä kuin kellertävään valoon ja huonoon värintoistoon. Katukuvassa näköinformaatio on tärkeää, ja sitä saadaan paljon värien kautta. Esimerkiksi liikennemerkkit perustuvat osaltaan eri väreihin, jolloin ne on helpompi havaita värintoiston ollessa korkea. Väreillä on vaikutusta muidenkin kohteiden ja esteiden näkyvyyteen ja havaitsemisetaisyysksiin. Maanteillä väreihin perustuvaa näköinformaatiota on vähemmän, joten värintoistolla ei ole niin suurta merkitystä.

4.3 Värilämpötila

Suurpainenatriumlamppujen värilämpötila on 2000–2200 K, joten valo on keltaista tai jopa punertavaa. Monimetallilamppujen värilämpötila on 3000–4200 K. Led-valaisimet ovat värilämpötilaltaan 2700–6500 K. Ensimmäiset markkinoille tulleet led-valaisimet olivat valoltaan kylmän valkoisia eli värilämpötiloiltaan korkeita. Nykyään valmistajilla on tarjolla värilämpötiloiltaan matalampia led-valaisimia, joilla päästään ihmissilmälle sopivimpaan 3000–4000 K:n alueelle ja näin vastaavaan värilämpötilaan monimetallilamppujen kanssa. Valon värillä on suuri merkitys esimerkiksi kaupunkien keskustoissa, kevyen liikenteen väylillä, puistoissa, aukioilla sekä kävely- ja tonttikaduilla, kun taas taajamien ulkopuolisilla ajoteillä merkitys on pienempi. Jalankulkijat kokevat valkoisen valon turvallisemmaksi kuin keltaisen valon. Lisäksi valkoinen valo koetaan keltaista valoa

kirikkaammaksi, vaikka valaistustasot olisivat samat. Suurpainenatriumlamput eivät pysty kilpailemaan valaistuksen laatuun vaikuttavan valon värin osalta led- ja monimetallivalaisimien kanssa, jos katuvalaistukselta vaaditaan valkoista valoa.

4.4 Valontuotto

Katuvalaistukseen soveltuvien led-valaisimien valotehokkuudet vaihtelevat valmistajien ilmoittamien tietojen mukaan 90–120 lm/W. Suurpainenatriumlampun valotehokkuus on 70–120 lm/W ja monimetallilampun 80–95 lm/W. Led-valaisimet pystyvät siis kilpailemaan valotehokkuuden osalta jo suurpainenatriumlamppujen kanssa. Led-valaisimien valotehokkuudessa on huomioitu liitäntälaitteen ja optiikan häviöt, eli valotehokkuus ilmaisee sähköverkosta otetun tehon ja valaisimesta ulos tulevan valovirran. Perinteisillä valonlähteillä liitäntälaitteen ja optiikan häviöitä ei ole huomioitu, joten todelliset valotehokkuudet jäävät ilmoitettua alhaisemmiksi. Lisäksi led-valaisimilla pystytään tuottamaan yhtä suuri valovirta pienemmillä tehoilla suurpainenatrium- ja monimetallilamppuihin verrattuna. Led-valaisimien valotehokkuudet kasvavat koko ajan kehityksen myötä arviolta 4–12 kuukauden sykleissä. Tulevaisuudessa led-valaisimien valotehokkuudet tulevat kasvamaan huomattavasti korkeammiksi perinteisten valonlähteiden valotehokkuuksiin verrattuna. (M. Toivonen, henkilökohtainen tiedonanto 21.11.2014.)

Katuvalaistuksessa led-valaisimilla pystytään jo tuottamaan riittävän suuri valovirta. Led-valaisimia ei ole vielä käytössä maanteilla, koska valmistajilla ei ole valikoimissaan riittävän suuria valovirtoja tuottavia valaisimia. Nykyisillä valotehokkuuksilla riittävän valovirran saavuttamiseksi tarvitaan todella suuri määrä ledejä, jolloin valaisimista tulisi isokokoisia ja painavia. Ledien suuri määrä on ongelmallinen esimerkiksi lämmönhallinnan kannalta, jolloin vaaditaan suurempia jäähdytysrakenteita. Ledien suuri määrä vaikeuttaa myös valonjaon suunnittelua. Led-valaisimet eivät vielä pysty kilpailemaan suurpainenatriumlamppujen kanssa esimerkiksi moottoriteiden valaistuksessa.

Optinen hyötysuhde on yksi led-valaisimien eduista perinteisiin valonlähteisiin verrattuna. Optinen hyötysuhde ilmoittaa valaisimesta valaistavaan kohteeseen säteilevän valovirran määrän suhteessa valonlähteestä säteilevään valovirran määrään. Led-valaisimien optinen hyötysuhde on korkea valon ollessa jo valmiiksi suuntautunutta. Perinteisillä valonlähteillä lampun ympäri säteilevä valo joudutaan heijastimella suuntaamaan ulos valaisimesta. Led-valaisimen ledien yhteen laskettu valovirta on lähes sama kuin led-valaisimesta säteilevä valovirta. Perinteisillä valonlähteillä valaisimen tuottama valovirta on lampun tuottamaa valovirtaa selvästi alhaisempi, jolloin energiatehokkuus on led-valaisimia huompe.

Valaisimen keskeinen ominaisuus on sen optiikka, jonka avulla valonlähteen valovirta suunnataan valaistavalle alueelle. Perinteisten katuvalaisimien optiikka on pitkälle kehittyntä ja valaisimen tuottama valovirta saadaan kohdistettua valaistavaan kohteeseen niin, että liikenneturvallisuuden takia asetetut suunnitellustandardit täyttyvät. Led-valaisimien optiikka on kehittynt viime vuosien aikana, mutta valonjaossa on vielä parannettavaa. Valmistajien ja maahantuojien on pystyttävä luotettavasti osoittamaan, että led-valaisimien valonjako, valontuotto ja valovirran alenema täyttävät niille asetetut laadulliset ja määrälliset vaatimukset. Ledien jo valmiiksi suunnatun valon avulla voidaan saada aikaan tarkempi ja tasaisempi valonjako kuin perinteisillä valonlähteillä. Led-valaisimille löytyy paljon erilaisia linssivaihtoehtoja, joilla valonjakoon pystytään vaikuttamaan tehokkaasti. Led-valaisimien valonjakoa kehittämällä pystytään vähentämään myös hukka- ja häiriövaloa, jotka ovat olleet ongelmia perinteisillä valonlähteillä.

4.5 Säädettävyys

Led-valaisimien ominaisuutena on lähes rajaton säätömahdollisuus, joka on suuri etu perinteisiin valonlähteisiin verrattuna. Valovirran määrää voidaan säätää syötettyä virtaa muuntamalla. Led-valaisimen elinikä ei kärsi sammuttamisesta tai päällekytkennästä toisin kuin perinteisten valonlähteiden elinikä. Led-

valaisimet saavuttavat heti syttyessään täyden valaistusvoimakkuutensa, kun suurpainenatriumlampulla täyden valaistusvoimakkuuden saavuttaminen kestää 5–10 min ja monimetallilampulla 2–10 min. Esimerkiksi jännitekatkoksen takia suurpainenatriumlampun uudelleen syttyminen kestää 1–2 min lampun riittävän jäähtymisen takia, kun taas led-valaisimet syttyvät välittömästi.

Suurpainenatriumlamppu on himmennettävissä 50–100 %:iin. Himmentäminen tosin sammuttaa lampun helposti ja lyhentää polttoikää, joten himmentäminen on ongelmallista. Monimetallilamppujen himmentäminen on vielä ongelmallisempaa niiden muuttuessa himmennettäessä erivärisiksi ja vilkkuviksi. Led-valaisimet soveltuvatkin parhaiten himmentämiseen. Nykyaikaiset katuvalaisimet ovat asennettaessa ylimitoitettuja, jotta luminanssi täyttää valaistukselle asetetut vaatimukset eliniän loppupuolellakin. Led-valaisimia voitaisiinkin himmentää eliniän alkupuolella riittävälle luminanssitasolle, jolloin säästettäisiin energiaa ja pidennettäisiin valaisimien elinikää. Valaistavat pinnat heijastavat vähiten valoa sateisella kelillä, jolloin valaistusta tarvitaan eniten riittävän luminanssitason saavuttamiseksi. Luminanssitaso on korkeampi ja valaistus ikään kuin ylimitoitettu, kun valaistava pinta on kuiva tai esimerkiksi luminen. Älykkäällä ohjausjärjestelmällä pystytään keräämään tietoa vallitsevista liikenneolosuhteista ja säätämään automaattisesti valaistuksen määrää. Älykäs valaistuksen ohjaus sopii parhaiten led-valaisimille niiden erinomaisen säädettävyyden ansiosta.

4.6 Taloudellisuus

Valaisinvalmistajat eivät ilmoita suoraan valaisimiensa hintoja, vaan ne riippuvat esimerkiksi ostomäärästä. Investointihintojen vertailu eri valaisintyyppien välillä on hankalaa, sillä valaisimia on paljon monessa eri kokoluokassa. Led-valaisimen hinta on tällä hetkellä mallista riippuen noin 1,5–2 -kertainen suurpainenatrium- ja monimetallivalaisimeen verrattuna. Investointikustannuksia laskettaessa tarkastellaan valaistavaa katuosuutta esimerkiksi kilometrin matkalta, jossa vertailtavien valaisimien tulee täyttää saman valaistusluokan vaati-

mukset. Eri valaisintyyppien lukumäärät voivat vaihdella keskenään, koska riittävään valaistukseen johtavat pylväsvälitkin saattavat vaihdella. Led-valaisimien hinta on laskenut tapauskohtaisesti 5–25 % vuodessa viimeisten vuosien aikana. Yhtenä syynä led-valaisimien korkeisiin hankintahintoihin ovat pienet valmistusmäärät suhteessa perinteisiin valaisimiin. Led-valaisimien kysynnän ja valmistusmäärien kasvaessa hankintahinnat tulevat laskemaan. Led-valaisimen asennus onnistuu muiden valaisimien tavoin jo olemassa oleviin vanhoihin pylväisiin, joten pylväiden ja sähköistyksen osalta ei muodostu lisäkustannuksia. (M. Toivonen, henkilökohtainen tiedonanto 21.11.2014.)

Kunnossapitokustannusten osalta voidaan vertailla eri valonlähteiden ryhmävaihtovälejä. Led-valaisin on ryhmävaihdossa vaihdettava kokonaan, jos valaisin ei ole rakenteeltaan modulaarinen. Perinteisten valaisimien osalta ryhmävaihdossa vaihdetaan pelkkä lamppu. Led-valaisimien eliniät ovat huomattavasti pidempiä kuin perinteisten valonlähteiden. Valmistajat ilmoittavat led-valaisimilleen 50 000–100 000 tunnin eliniän, joten valaisin joudutaan vaihtamaan korkeintaan kaksi kertaa tarkasteltaessa ryhmävaihtoja tievalaistuksen eliniän aikana eli 30 vuoden jaksossa. Valaistuksen vuosittainen käyttöaika on noin 4 000 tuntia. Suurpainenatriumvalaisimen lamppu joudutaan vaihtamaan seitsemän kertaa ja monimetallivalaisimen lamppu 9–14 kertaa saman ajanjakson aikana. Monimetallilamput ovat tiheämmän ryhmävaihtovälin lisäksi suurpainenatriumlamppuja kalliimpia hankintahinnaltaan.

Merkittävimpiä elinkaaren aikaisista kustannustekijöistä ovat energiakustannukset. Sähköenergian hinta on jatkuvasti nousussa, ja led-valaisimet ovatkin ratkaisu perinteisten valonlähteiden suurempaan energiankulutukseen. Vaikka led-valaisimien investointihinnat ovat lähes kaksinkertaiset suurpainenatrium- ja monimetallivalaisimiin verrattuna, on niiden energiankulutus pienempi. Led-valaisimen takaisinmaksuaika laskee, kun investointikustannukset saadaan katettua energiasäästöillä. Elinkaarikustannuksia laskettaessa energiakustannukset nousevatkin led-valaisimien kannalta ratkaisevaksi tekijäksi, jonka perusteella ne ovat yleensä perinteisiä valonlähteitä taloudellisempi vaihtoehto.

4.7 Muuta

Led-valaisimet ovat valopisteinä kirkkaita ja aiheuttavat käyttökokemusten mukaan häikäisyä. Kiusahäikäisyä se ei estä näkemistä mutta aiheuttaa tienkäyttäjille epämiellyttäviä tunteita. Led-valaisimet aiheuttavat huomattavasti enemmän häikäisyä kuin esimerkiksi suurpainenatriumvalaisimet. Leveäspektriset eli valkoiset valonlähteet aiheuttavat helpommin häikäisyä. Mitä korkeampi led-valaisimen väriämpötila on, sitä korkeampi on häikäisyn vaikutelma. (E. Salmi-nen, henkilökohtainen tiedonanto 26.9.2014.)

Led-valaisimista voidaan tehdä mekaanisesti erittäin kestäviä. Ne kestävät hyvin sääolojen, ajoneuvoliikenteen ja ilkivallan niille aiheuttamat iskut ja tärinät. Led-valaisimet eivät sisällä mekaanisesti arkoja osia, kuten ohutta lasia, jota käytetään esimerkiksi perinteisten valonlähteiden polttimoissa. Led-valaisimien pitkästä eliniästä johtuen niiden on oltava rakenteeltaan kestäviä. Perinteisillä valonlähteillä UV-säteily tummentaa valaisimissa mahdollisesti käytettyjä muovikupuja laskien näin valontuottoa. Ledit eivät tuota UV-säteilyä eivätkä myöskään sisällä elohopeaa. Ledit ovat eliniän päättyessä kierrätettävissä elektro-niikkajätteenä, kun taas perinteisten valonlähteiden lamput ovat ongelmajätettä. Led-valaisimien pitkä elinikä vähentää kierrätettävän materiaalin määrää ja lisää näin niiden ympäristöystävällisyyttä.

Markkinoille tulee jatkuvasti uusia led-valaisimia, joiden laadussa ja valotekni-sissä ominaisuuksissa on suuria eroja. Valmistajat saattavat antaa ylisuuria lu-pauksia tuotteistaan ja ilmoitetut valaistustekniset tiedot ovat joidenkin tuotteiden osalta puutteellisia, mikä vaikeuttaa asennuskohteeseen soveltuvan va-laisimen valintaa. Asiakkaat eivät vielä täysin luota tuotteiden toimivuuteen. Led-valaisimien takuuajat ovat kuitenkin pidentyneet viime vuosien aikana, ja valmistajat tarjoavat tuotteilleen jopa 10 vuoden takuun.

4.8 Led-katuvalaisimien käyttö maailmalla

Led-katuvalaisimia on asennettu tai ilmoitettu asennettavaksi useissa suurkaupungeissa sekä pienemmissä kaupungeissa kaikkialla maailmassa.

4.8.1 Pohjois- ja Etelä-Amerikka

Yhdysvalloissa Los Angeles on saamassa valmiiksi maailman suurimman led-katuvalaisimilla toteutettavan hankkeen. Hanke alkoi vuonna 2009, ja ensimmäinen vaihe tuli päätökseen kesäkuussa vuonna 2013, jolloin led-valaisimia oli asennettu 141 089 kappaletta. Kaupunki arvioi säästävänsä vuodessa noin 10 miljoonaa dollaria energia- ja ylläpitokustannuksissa. Katuvalaistuksen osuus on voinut olla jopa 40 % kaupungin sähkönkulutuksesta. Hankkeessa käytetyt led-valaisimet kuluttavat arvioiden mukaan keskimäärin 63 % vähemmän sähköä kuin vanhat suurpainenatriumlamput. Los Angelesin hankkeessa on käytetty Cree, Philipsin ja Laotekin valmistamia led-katuvalaisimia. (Gerdes 2013.) Kuvassa 7 on esitetty vertailun vuoksi eräs Los Angelesin katu ennen ja jälkeen led-katuvalaistuksen.



Kuva 7. Los Angeles, Hoover Street. Vasemmanpuoleisessa kuvassa katu on valaistu suurpainenatriumlampuilla ja oikeanpuoleisessa kuvassa sama katu on valaistu led-katuvalaisimilla. (Cleantechnica.com 2013.)

Los Angeles ei ole ainut led-valaisimiin vaihtava kaupunki Yhdysvalloissa. Las Vegas on asentanut 42 000 led-katuvalaisinta ja Seattle 41 000 led-katuvalaisinta. San Antonioon asennetaan 20 000 led-katuvalaisinta joulukuusta 2012 lähtien ja huhtikuussa 2013 Austin ilmoitti asentavansa 35 000 led-katuvalaisinta. Detroitissa asennetaan 42 000 led-valaisinta vuoden 2014 kesäkuusta lähtien ja Bostonissa valmistuu 38 000 led-valaisimen asennus vuonna 2015. Suurten kaupunkien lisäksi monissa pienemmissä kaupungeissa on uusittu vanhaa katuvalaistusta led-valaisimilla sähkökustannusten hillitsemiseksi. (Gerdes 2013.)

Monet Yhdysvaltojen kaupungit ovat rahoittaneet katuvalaistushankkeensa avustuksilla, apurahoilla ja erilaisilla ohjelmilla. Yhdysvaltojen suurin kansallinen energiatehokkuutta ja -säästöä tukeva ohjelma on Energy Efficiency and Conservation Block Grant (EECBG), jonka avulla kaupungit voivat tehdä investointeja vastaamaan pitkän aikavälin tavoitteita energian kulutuksen vähentämisessä ja vaikutuksista ilmastomuutokseen. Hankkeita rahoitetaan tulevaisuudessa kertyvillä energiasäästöillä.

Canadassa New Brunswikin alueelle on asennettu 22 000 led-valaisinta vuoden 2013 mennessä, jonka jälkeen alueella on asennettu lisää led-valaisimia. New Brunswikin alueella on uusien led-katuvalaisimien asennusten jälkeen noin 72 000 led-valaisinta. Alue tosin koostuu useasta eri kaupungista. Windsorissa saatiin asennettua 23 000 led-valaisinta ja Edmontonissa asennettiin 13 000 led-valaisinta vuoden 2014 loppuun mennessä. (Cbc.ca 2013.)

Etelä-Amerikan toiseksi suurimmassa kaupungissa, Argentiinan Buenos Airesissa, 125 000 vanhentunutta katuvalaisinta on aloitettu korvaamaan led-valaisimilla vuoden 2013 marraskuusta lähtien. Led-valaisimet toimittaa Philips. (Ayre 2013.)

4.8.2 Eurooppa

Iso-Britanniassa useat kaupungit ovat ilmoittaneet asentavansa led-katuvalaisimia. Birmingham vaihtaa vuoden 2015 loppuun mennessä 41 500 led-valaisinta, Bristol vuoden 2016 loppuun mennessä 34 000 led-valaisinta, Leicester vuoden 2016 loppuun mennessä 33 000 led-valaisinta, Lontoo vuoden 2016 loppuun mennessä 35 000 led-valaisinta ja Wigan vuoden 2017 loppuun mennessä 31 000 led-valaisinta. Iso-Britannia on Euroopassa led-katuvalaistuksen edelläkävijä, sillä muissa Euroopan maissa ei ole asennettu tai ilmoitettu julkisesti asennettavaksi yhtä laajamittaisesti led-katuvalaisimia. Lähes jokaisesta Euroopan maasta kuitenkin löytyy led-katuvalaistusta ainakin kokeiluasteella esimerkiksi suurten kaupunkien keskustoista ja asuinalueilta.

4.8.3 Suomi

Jotkut Suomen kunnista ovat täyttäneet varastonsa elohopeahöyrylampuilla ennen niiden poistumista markkinoilta. Osa kunnista aikoo käyttää elohopeahöyrylamppeja tulevina vuosina, koska ne eivät ole vielä vakuuttuneita led-tekniikan suorituskyvystä katuvalaistuksessa. Monet kunnat lykkäävät elohopeahöyrylamppeja korvaavaa päätöstä, koska ne eivät usko tällä hetkellä markkinoilla olevien led-tuotteiden saatavuuteen myös tulevaisuudessa. Turku asensi 2 700 elohopeahöyrylampun tilalle led-valaisimet vuonna 2013. Hyvien kokemusten ansiosta Turku asentaa vuoden 2015 loppuun mennessä loppujen noin 5 000 elohopeahöyrylampun tilalle led-valaisimet. Tampereella on asennettu 1 300 led-valaisinta ja Helsingissä 650 led-valaisinta, mutta molemmat kaupungit ovat ilmoittaneet aikomuksesta lisätä led-valaistusta tulevaisuudessa. Led-katuvalaistusta on testattu vaihtelevalla menestyksellä monissa kunnissa ympäri Suomen. Esimerkiksi Espoossa testattiin led-katuvalaisimia vuonna 2013, mutta viranomaiset eivät olleet vakuuttuneita valaistuksen tehokkuudesta. (Lehtinen 2014.)

4.8.4 Turun esimerkkitoimitus

Turun kaupunki on toteuttamassa ErP-direktiivin myötä poistuvien elohopeahöyrylamppujen korvaamisen ESCO (Energy Service Company) -hankkeella, joka pohjautuu energiapalveludirektiivin 2006/32/EY asettamaan tavoitteeseen säästää 9 % energiaa vuoteen 2016 mennessä vuoden 2005 tasoon verrattuna. Energiapalveludirektiivin erityisenä huomion kohteena ovat energiayhtiöt ja julkinen sektori, joilta odotetaan esimerkillistä toimintaa. Turku Energia toimii Turun kaupungin elohopeahöyrylamppujen vaihdossa urakoitsijana. ESCO-hankkeessa energiansäästöön vaadittava investointi ja ESCO-palvelu maksetaan alentuneista energiakustannuksista syntyvillä säästöillä. Työ- ja elinkeinoministeriö on myöntänyt Turun kaupungille energian säästöön johtavasta hankkeesta investointitukea, jota ESCO-hankkeet voivat saada enintään 30 %. (EkoValo 2011.)

Turun ESCO-hankkeen ensimmäisessä vaiheessa vuonna 2011 vaihdettiin noin 2 500 elohopeahöyrylamppua suurpainenaatriumvalaisimiin. Led-valaisimet olivat silloin vielä korkeahintaisia eikä niiden kestävydestä oltu vakuuttuneita. Hankkeen toisessa vaiheessa vuonna 2013 vaihdettiin noin 2 700 elohopeahöyrylamppua led-valaisimiin, jotka valittiin valonlähteeksi tarjouskilpailun mukana. Hankkeen kolmannessa vaiheessa vaihdetaan loput noin 5 000 elohopeahöyrylamppua led-valaisimiin vuoden 2015 loppuun mennessä. Turun kaupunki esitti kolmannen vaiheen vaatimuksena valkoisen valon, joten vaihtoehtoina olivat led- tai monimetallivalaisimet. Led-valaisimia on asennettu tai asennetaan valaistusluokkien AL4a, AL4b, AL5 ja K4-K5 kaduille. Led-valaisimien toimittajana on salolainen Easy LED Oy, joka on vakuuttanut urakoitsijana toimivan Turku Energian valaisimille myöntämällään 10 vuoden takuulla ja PRO Wave -katuvalaisinmallilleen hankitulla Liikenneviraston tyyppihyväksynnällä. Asennettujen led-valaisimien värielämytilat ovat noin 4000 K, värintoistoindeksit 70–80 ja eliniät 80 000 tuntia. (E. Salminen, henkilökohtainen tiedonanto 26.9.2014; M. Toivonen, henkilökohtainen tiedonanto 21.11.2014.)

Kaikissa asennetuissa led-valaisimissa on valaisinkohtainen ohjausvalmius, jonka säätömahdollisuuden avulla valaistusta voidaan tulevaisuudessa himmentää. Tällä hetkellä käytössä on pelkkä päälle- ja poiskytkentä sekä yösammutus. Vanhoihin pylväisiin asennettaessa valon tasaisuus ei ole optimaalinen, ja valaisimen asento jää huonoksi valaisinvarsien ollessa 15–25 asteen kulmassa. Uutta valaistusverkkoa rakennettaessa led-valaisimin toteutettu valaistus on mitoitettu tarkemmin. Elohopeahöyrylamppujen lisäksi osa Turun kaupungin suurpainenatriumvalaisinasennuksista on niin vanhaa, että saneerauksen yhteydessä niiden tilalle tullaan todennäköisesti vaihtamaan led-valaisimet. (E. Salminen, henkilökohtainen tiedonanto 26.9.2014; M. Toivonen, henkilökohtainen tiedonanto 21.11.2014.)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Led-valaisimet tuottavat enemmän valoa samalla sähköenergian määrällä perinteisiin valonlähteisiin verrattuna, mutta ne ovat hankintahinnaltaan vielä kalliimpia. Katuvalaistuksen saneeraushankkeiden yleistyessä tulisi miettiä energiatehokkainta valaistusratkaisua. Esimerkiksi elohopeahöyrylampputen korvaaminen voidaan toteuttaa energiatehokkaammilla suurpainenaatriumvalaisimilla, koska investointikustannukset ovat led-valaisimia huomattavasti alhaisemmat. Pidemmällä aikavälillä tarkasteltuna led-valaisimet saattavat olla parempi ratkaisu pienempien elinkaarikustannusten ansiosta, sillä matalamman energiankulutuksen lisäksi pitkäikäisen led-valaisimen huolto- ja kunnossapitokustannukset ovat pienempiä perinteisiin valonlähteisiin verrattuna. Myös ledien kasvava valotehokkuus, valon valkoinen väri ja hyvä värintoisto kannattaa ottaa huomioon. Energiankulutus- ja elinkaarikustannuslaskelmia olisi syytä tehdä, kun valitaan valonlähde. Led-valaisimien elinkaarikustannuslaskelmia hankaloihtaa vielä todellisen eliniän ja huollon tarpeen arviointi.

Perinteisiä katuvalaisimia ja lamppeja on kehitetty jo vuosikymmenien ajan. Led-valaisimien kehitykseen on panostettu paljon viime vuosien aikana, ja nykyisen kehityksen jatkuessa ne tulevat yleistymään katuvalaistuksessa tulevaisuudessa. Yleistymisen ja valmistusmäärien kasvaessa led-valaisimien hinnat tulevat laskemaan lähemmäs perinteisten valonlähteiden valaisimien hintatasoa. Näin ollen led-valaisimet tulevat olemaan kustannuksiltaan entistä kilpailukykyisempi vaihtoehto tie- ja katuvalaistukseen. Led-valaisinvalmistajien ongelmana on täysin uusi tekniikka, joka on suunniteltava ja rakennettava itse. Hyödynnettävissä olevia tekniikoita ei ole. Asiakkaat ja kuluttajat saattavat vierastaa uutta tekniikkaa. Perinteiset valonlähteet ovat olleet markkinoilla pitkään ja led-valaisimien pitääkin ensin saavuttaa yleinen hyväksyntä, jotta ne omaksutaan vaihtoehdoksi muiden valonlähteiden rinnalle. Tästä syystä olisikin tärkeää kerätä käyttökokemuksia jo toteutetuista led-valaisinasennuksista ja ottaa ne huomioon jatkokehityksessä. Tarvitaan myös valaisinasennusten kenttämittauksia laboratorioissa tehtyjen valaisinmittausten lisäksi.

Ledien edustamaan uuteen teknologiaan katuvalaistuksessa olisi ehkä viisasta siirtyä vaiheittain, kuten Turun esimerkkitutetuksessa, jolloin riski minimoidaan eikä kertainvestointi kasva liian suureksi.

LÄHTEET

Alford, J. 2014. Nobel Prize In Physics Awarded To Scientists Who Invented Blue LED. Iflscience.com 7.10.2014. Viitattu 16.10.2014 www.iflscience.com/physics/nobel-prize-physics-awarded-scientists-who-invented-blue-led

Ayre, J. 2013. Buenos Aires LED Streetlamp Retrofit — 125,000 Streetlamps Being Replaced With LEDs. Cleantechnica.com 4.11.2013. Viitattu 15.10.2014 www.cleantechnica.com/2013/11/04/buenos-aires-led-streetlamp-retrofit-125000-streetlamps-replaced-leds/

Cbc.ca 2013. NB Power's switch to LED street lights criticized. CBC News 28.8.2013 Viitattu 1.11.2014. www.cbc.ca/news/canada/new-brunswick/nb-power-s-switch-to-led-street-lights-criticized-1.1331300

Cleantechnica.com 2013. Los Angeles, Hooverstreet –kuvatiedosto. Viitattu 15.10.2014 www.cleantechnica.com/files/2013/09/image14.jpg

DOE. U.S. Department of Energy 2014. LED Basics. Viitattu 10.10.2014 www.energy.gov/eere/ssl/led-basics

Gerdes, J. 2013. Los Angeles Completes World's Largest LED Street Light Retrofit. Forbes.com 31.7.2013. Viitattu 15.10.2014 www.forbes.com/sites/justingerdes/2013/07/31/los-angeles-completes-worlds-largest-led-street-light-retrofit/

Hietaranta, J. 2012. Seinäjoen ulkovalaistusverkon ohjausjärjestelmän uusiminen. Opinnäytetyö. Sähkötekniikka. Vaasa: ammattikorkeakoulu.

Honkanen, H. 2009. Valaistustekniikka. Opetusmateriaali. Kajaani: ammattikorkeakoulu. Viitattu 24.9.2014 www.gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/STEK_Valaistustekniikka.pdf

Jenkins, D. 2009. Ledifaktoja – Valomessut. OEM / Philips Valaistus. Viitattu 1.11.2014 www.valosto.com/tiedostot/LedifaktojaValomessut%202009_1.pdf

Kallasjoki, T. 2011. Energiatehokas valaistus. B2B renewable energies. Viitattu 24.9.2014 www.renewablesb2b.com/data/ahk_finland/publications/files/Kallasjoki.pdf

Kauppinen, M. 2011. Katuympäristön suunnitteluopas. Suomen Kuntatekniikan Yhdistys ry ja Viherympäristöliitto ry. 24. painos. Tampere: Tammerprint Oy.

Lamminmäki, T. 2010. Mikä on LED. Ledien erityispiirteet. Viitattu 22.10.2014 www.valosto.com/tiedostot/LED_perusteet_ja_edut.pdf

Lehtinen, T. 2014. Municipalities hoarding streetlights facing EU ban. Helsinki Times 12.10.2014. Viitattu 20.10.2014 www.helsinkitimes.fi/finland/finland-news/domestic/12304-municipalities-hoarding-streetlights-facing-eu-ban.html

Licht.de. 2014. LED – The Light of the Future. Viitattu 10.10.2014 www.licht.de/en/info-and-service/lighting-specials/led-the-light-of-the-future

Mielonen, M. 2014. Fysiikan Nobel led-valojen kehittäjille. Helsingin Sanomat 10.10.2014. Viitattu 16.10.2014 www.hs.fi/tiede/a1305882156251

Monni, M. 2012. Maakaapeliverkostotyöt. Tie- ja aluevalaistustyöt. Liikennevaloasennukset. 5. painos. Helsinki: Adato Energia Oy.

Motiva 2011. EuP-direktiivin vaikutusten arviointi. Tie- ja katuvalaistus sekä toimistovalistus. Viitattu 20.9.2014 www.motiva.fi/files/2648/EuP-direktiivin_vaikutusten_arviointi_Tie_ ja_katuvalaistus_seka_toimistovalistus.pdf

Osram.fi 2014. OSRAM-tietoa: led-valon värit. Viitattu 30.10.2014 www.osram.fi/osram_fi/uutiset--tiedot/led/ammattitietoa/led-perusteet/valon-vaerit/index.jsp

Philips.com 2013. LED LAMPS. Viitattu 1.11.2014 www.lighting.philips.com/pwc_li/main/connect/Lighting_University/internet-courses/LEDs/led-lamps.html

Puolakka, M.; & Rantakallio, A.; & Tähkämö, L.; & Ylinen, A.; & Halonen, L. 2011. EkoValo Toimintamalli. Viitattu 20.9.2014 www.lightinglab.fi/ekovalo/News/toimintamalli%20raportti.pdf

Rantakallio, A. & Ylinen, A. 2011. Elohopealamput pois – mitä tilalle ja millä hinnalla. Aalto-yliopisto. Viitattu 21.9.2014 www.lightinglab.fi/ekovalo/News/3_ylinen_rantakallio_elohopealamput_pois.pdf

Saavalainen, H. & Pekonen J. 2013. Valosaaste peittää kaupunkien tähtitaivaan. Helsingin Sanomat 15.10.2013.

Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry & Suomen Valoteknillinen Seura ry. 1999. Lamput ja Valaisimet. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Tetri, E. 2010. Mitä ledi on ja mitkä ovat sen edut ja haitat. Viitattu 23.10.2014 www.valosto.com/tiedostot/Kohti_valoa_Tetri.pdf

Tiehallinto 2006. Tievalaistuksen suunnittelu. Helsinki: Edita Prima Oy.

Tiensuu, A. 2010. Uusi valaistuskirja. Viherympäristöliitto ry.48. painos. Helsinki: LiCon-AT Oy.

Tuominen, A. 2012. Led. Viitattu 26.9.2014 www.Led1.fi/fi/node/289

Yleisten teiden valaistusluokat

Toiminnallinen luokka	Poikkileikkaus	Liikenne	Ajo- nopeus	Liittymät	Valaistusluokka	
					Valoisa	Pimeä ymp
Moottoriväylät	2x12,50/7,50+15,00 	M				
	2x12,50/7,50+4,50 	M	≥ 80	Eritaso	AL2	AL3
	12,50/7,50 	M				
Paatiet	2x9/7+4,50 	M+Pp+Jk M+E(Pp+Jk)	≥ 60	Taso Eritaso	AL1 AL2	AL2 AL3
	17,50/14,50 	M+Pp+Jk M+E(Pp+Jk)	≥ 60	Taso	AL1	AL2
	10,50/7,50 	M+Pp+Jk	≥ 60	Taso	AL4a	AL4a
	8/7 	M+E(Pp+Jk)	≥ 60	Taso	AL4a+K4	AL4b+K6
Muut tiet	8/7 	M+Pp+Jk M+E(Pp+Jk)	≤ 60	Taso	AL4a	AL4b
	7/6 	M+Pp+Jk	≤ 60	Taso	AL4b	AL4b
	4..6 	M+Pp+Jk	≤ 40		AL4b	AL4b
Laiturit					AL1	AL2

M=moottoriajoneuvoliikenne

Jk=jalankululiikenne

Pp=polkupyöräliikenne

E=enillinen liikenne

Katujen valaistusluokat

Toiminnallinen luokka	Poikkileikkaus	Liikenne	Nopeusrajoitus	Liittymät	Valaistusluokka
Pääkadut					AL2+K2
Keskustassa		M+E(Pp+Jk)	50	Taso	AL2+K2
					AL1+K1
Muilla alueilla		M+E(Pp+Jk)	80 60	Eritaso Taso	AL2+K2 AL3+K4
		M+Pp+Ejk	50	Taso	AL4a+K4
Kokoojakadut		M+E(Pp+Jk)	50	Taso	AL3+K4
		M+Pp+Ejk			AL3+K4
Muilla alueilla		M+E(Pp+Jk)	60	Taso	AL4a+K6
		M+Pp+Ejk	50		AL4b+K6
Tonttikadut		M+Pp+Ejk	50	Taso	AL4a+K4
Keskustassa					
		M+Pp+Ejk	40	Taso	AL4b+K6
Muilla alueilla		M+Pp+Jk	30		AL5

M=moottoriajoneuvoliikenne

Jk=jalankululiikenne

Pp=polkupyöräliikenne

E=erillinen liikenne