



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Johannes Kristian Luoma-aho

TEOLLISUUSALUEEN VALAISTUKSEN VERTAILU JA TOTEUTUS

Tekniikka ja liikenne
2010

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun sähkötekniikan koulutusohjelmassa. Olen ollut sähköasentajan toimessa Pitkäsen Sähköasennus Oy:ssä vuodesta 2006 lähtien. Viime aikoina olen työskennellyt pääasiassa Mäkelä Alu Oy:n huollossa, sekä tehnyt kone- ja kiinteistösähköasennuksia. Opinnäytetyöni aihe lähti Mäkelä Alu Oy:n johdon kiinnostuksesta valaista ulkoalueet energiatehokkaasti ja toteuttaa laajennusosien ulkoaluevalaistus osittain LED-valaisimilla.

Haluan kiittää Pitkäsen Sähköasennus Oy:tä ja Mäkelä Alu Oy:tä. Kiitokset myös työn valvoja Tapani Esalalle, Mauri Drufvalle (Artequa Oy), perheelleni ja kaikille niille osapuolille, jotka ovat minua työssäni auttaneet.

Alajärvellä 17.4.2010

Johannes Luoma-aho

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Johannes Luoma-aho
Opinnäytetyön nimi	Teollisuusalueen valaistuksen vertailu ja toteutus
Vuosi	2010
Kieli	suomi
Sivumäärä	50 + 8 liitettä
Ohjaaja	Tapani Esala

Työn tarkoituksena on ollut selvittää ja vertailla teollisuusalueen aluevalaistuksen eri keinoja ja toteutuksia. Mäkelä Alu Oy oli kiinnostunut laajenusosien valaistuksen toteuttamisesta osittain Led-valaisimilla, joten olen työssäni perehtynyt myös Led-valaisinten kehitykseen. Samalla teimme suunnitelmat myös vanhan valaistuksen saneerauksesta. Työn tavoitteena oli myös tehdä kustannuslaskelmat. Pyrimme myös hukka- ja häiriövalon minimoimiseen alueella, ja juuri tässä tarkoituksessa Led-valaisin on vertaansa vailla. Vertailuissa on käytetty Mäkelä Alulla jo olemassa olevia elohopeahöyrylamppu-valaisimia ja monimetalli- ja suurtehoLed-valaisimia.

Työssä selvisi, että nykyiset Led-valaisimet ovat kehittyneet jo niin paljon, että ne soveltuvat erittäin hyvin valaisemaan esim. teollisuusalueen pihvoja ja parkkialueita.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Sähkötekniikan koulutusohjelma

ABSTRACT

Author	Johannes Luoma-aho
Title	Comparative Study and Implementation of Lighting at an Industrial Area
Year	2010
Language	Finnish
Pages	50 + 8 Appendices
Name of Supervisor	Tapani Esala

The purpose of this work was to make a comparative study on various ways to implement lighting in an industrial area. Mäkelä Alu Oy was interested in implementing the lighting of extension parts using LED lamps, so the development of LED lighting development was part of the thesis as well.

The comparison was made between mercury vapor lamps currently used at Mäkelän Alu and metal halide lamps and high-power LED lamps. A plan to renew the existing lighting was also made. The aim was also to make cost calculations. The objective was also to minimize loss and interference of light in the area.

As a result of the thesis it can be said that the current LED lamps have developed so much that they are suitable for illuminating the industrial yards and parking areas.

Keywords Exterior Lighting, Cost Calculation

Sisällys

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
LIITELUETTELO	7
1 JOHDANTO	9
2 MENETELMIÄ VALON TUOTTAMISEKSI	10
2.1 Elohopeavalaisimet	10
2.2 Monimetallivalaisimet.....	11
2.3 Natriumvalaisimet	12
2.3.1 Suurpainenatriumlamppu	13
2.3.2 Pienpainenatriumlamppu.....	13
2.4 LED-valaisimet	14
3 VALAISTUKSEN VALINTAAN VAIKUTTAVAT SUUREET	15
3.1 Teho, sähköteho (W)	15
3.2 Valotehokkuus (lm/W)	15
3.3 Valovirta (lm)	15
3.4 Valaistusvoimakkuus (lux, lm/m ²)	16
3.5 Luminanssi (L)	16
3.6 Valovoima (cd).....	16
3.7 Valokeilan avautumiskulma (astetta)	16
3.8 Elinikä (h).....	17
3.9 Värintoistoindeksi (Ra)	17
3.10 Värilämpötila (K) /10/	18
3.11 Lampun lämpötila (astetta)	18
3.12 Valaisimen hyötysuhde.....	19

4	LAMPPUJEN TYYPPIMERKINNÄT.....	20
5	LED-TEKNOLOGIA.....	21
5.1	Historia	23
5.2	Ensimmäiset käyttötarkoitukset	24
5.3	Led- valaistus	25
5.3.1	Elinikä	27
5.3.2	Lämpö ja UV-säteily	27
5.3.3	Hyötysuhde	27
5.3.4	Valokuvio.....	28
5.3.5	Syttyvyys ja säätö.....	29
5.3.6	Kestävyys	29
6	ULKOVALAISTUS	30
6.1	Yleiset periaatteet ulko- ja aluevalaistuksessa	30
6.2	Energiansäästökriteerit	33
6.2.1	Eup- ja sen tarkoitus.....	33
6.2.2	Toimenpiteet koskien ulkovalaistusta.....	33
6.2.3	Energiatehokkuus.....	34
7	MITTAUKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	37
8	KUSTANNUSLASKELMAT JA TULOSTEN TARKASTELU.....	41
9	YHTEENVETO JA RATKAISUT	45
	LÄHTEET.....	48

LIITELUETTELO

- LIITE 1 Aluevalaistussuunnitelma.
- LIITE 2 Ulkotyöalueiden valaistussuositukset.
- LIITE 3 Kevyen liikenteen väylien ja – alueiden K-luokat.
- LIITE 4 Sähkönkulutus (kWh).
- LIITE 5 Sähkökustannukset (euroa).
- LIITE 6 Kokonaiskustannukset (hankintahinta + sähkö)(euroa).
- LIITE 7 Vertailua.
- LIITE 8 Mittauspisteet (valaistusvoimakkuusvertailu).

Käsitteitä, määritelmiä ja mittayksiköitä

Valovoima I	Mittayksikkö: kandela (cd). Määritelmä: Valovoima jonka musta kappale säteilee 1/600000 neliömetrin suuruisesta pinnastaan kohtisuorassa suunnassa platinan jähmettymispisteessä paineessa 101 325 N/neliometri /18/.
Valovirta Φ	Mittayksikkö: lumen (lm) 1 lm = 1 cd*sr(sr=avaruuskulma,steradiaani) Määritelmä: Suure, joka ilmaisee säteilyvirran lasketun kyvyn synnyttää valoestimukseen johtava arsytytys /18/.
Valomäärä	Mittayksikkö: luumensekunti (lms). Valovirran ja sen kestoajantulo $Q = \Phi t$ /19/.
Valaistusvoimakkuus E	Mittayksikkö: luksi (lx) 1 lx = 1 lm/neliometri. Määritelmä: Tarkasteltavan pisteen ympärillä olevalle äärettömän pienelle pintaelementille saapuvan valovirran suhde elementin pinta-alaan /18/.
Valotehokkuus K	Mittayksikkö: lm/W Määritelmä: Ilmaisee lampun antaman valovirran suhteessa kulutettuun sähkötehoon, yksikkö lm/W /23/.
Luminanssi L	Mittayksikkö: cd/m ² Määritelmä: (Aikaisempi nimitys valotiheys) Pisteen ympärillä olevan äärettömän pienen pintaelementin säteilemän, läpäisemän tai vastaanottaman määräsuuntaisen valovirran suhde tätä suuntaa vastaan kohtisuorassa tasossa olevan pintaelementin projektion pinta-alaan ja siihen äärettömän pieneen avaruuskulmaan, joka sisältää annetun suunnan /18/.
Väriämpötila T	Mittayksikkö: Kelvin (K). Määritelmä: Se täydellisen säteilijän(musta kappale)lämpötila, jossa täydellisen säteilijän valo on saman väristä kuin kysymyksessä olevan valolähteen valo. Väriämpötila ilmoittaa valon värisävyn, kuinka valkoiselta valo näyttää. Lampuilla, joilla on sama väriämpötila, saattaa kuitenkin olla erilaiset värintoist ominaisuudet /18/.
Värintoistoindeksi Ra	On suure, jolla mitataan valolähteen kykyä toistaa värejä verrattuna ihanteelliseen valonlähteeseen eli mustaan kappaleeseen. Pienin arvo 0 ja suurin 100 (paras värintoisto) /23/.

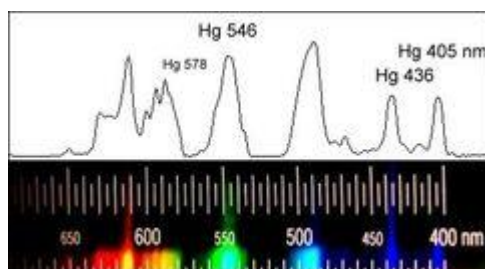
1 JOHDANTO

Nykyään termille ”valo” annetaan kaksi määritelmää. Ensimmäinen on aistittu valo ja toinen on näkyvä säteily. Sen lisäksi, että valo mahdollistaa näkemisen, sillä on myös hyvinvointia edistäviä biologisia vaikutuksia. Yleisimpiä valonlähteitä ovat hehku-, halogeeni-, loiste-, monimetalli-, elohopea-, suurpainenatrium- ja LED-lamput. Valaisintyyppiä ja valonlähdettä valittaessa kannattaa kiinnittää huomiota valon väriin, värintoisto-ominaisuuksiin, käyttöikään, energiatehokkuuteen ja hintaan /8/. Hyvä valaistus on tärkeä tekijä, kun halutaan luoda miellyttävä työskentely-ympäristö ja ihanteelliset työolosuhteet. Hyvät työolosuhteet lisäävät myös huomattavasti turvallisuutta. Tässä työssä on tarkoitus perehtyä ulkoaluevalaistuksessa käytettäviin purkauslamppuvalaisimiin ja LED-valaisimiin.

2 MENETELMIÄ VALON TUOTTAMISEKSI

Teollisuuden aluevalaistuksessa käytetään nykyään lähinnä suuren voimakkuuden purkauslamppujen ryhmään kuuluvia lamppeja. Purkauslamput tunnetaan merkittävästä taloudellisuudestaan ja kyvystään tuottaa huomattavan paljon valoa pienestä koostaan huolimatta. Purkauslamppuja käytetään pääasiassa myymälöissä ja näyteikkunoissa, teollisuudessa ja ulkoalueiden valaistuksessa. Näissä lampuissa valo tuotetaan purkausputkessa. Pieni valokaari kahden elektrodin välillä saa purkausputkessa olevat eri täytösaineet hehkumaan ja lähettämään valoa. Lähes kaikki purkauslamput vaativat toimiakseen kullekin lampputyypille ja teholle suunnitellun sytyttimen ja kuristimen /14/. Suuren voimakkuuden purkauslamput ovat tehokkaita valontuottajia, mutta ne soveltuvat vain raskaaseen käyttöön /23/. Purkauslamppujen luotettava sytytys edellyttää useiden kilovolttien suuruista sytytyspulssia.

2.1 Elohopeavalaisimet



Kuva 1. Elohopeahöyrylampan emittoiman valon spektri /23/.

Elohopealamppu eli *elohopeahöyrylamppu* on Suomen teillä kaikkein yleisin lampputyyppeistä. Se tuottaa valkoista, aavistuksen verran sinertävää valoa. Kuvassa 1 on elohopealampan spektri. Elohopealamput ovat lampputyypeistä edullisimpia, mutta myös tehottomimpia ja energiaa kuluttavimpia. Valotehokkuus on vain 36–60 lm/W /6/. Ne myös menettävät merkittävästi valotehoaan elinkaarensa aikana. Elohopealampan elinikä on vain puolet suurpainenaatriumlampun eliniästä. Useimmiten tätä tyyppiä ei enää asenneta uusiin valaistuskohdeisiin. Vanhatkin valaisimet poistuvat lähivuosina, sillä EuP-direktiivin myötä elohopeahöyrylamppujen myynti kielletään. Lampun valontuotto perustuu elohopeahöyryn korkeassa

lämpötilassa ja paineessa lähettämään sähkömagneettiseen säteilyyn, josta pääosa on näkyvää valoa ja osa ultraviolettisäteilyä. Polttimoa ympäröi loisteaineella pinnoitettu suojakupu, joka ultraviolettisäteilyn vaikutuksesta säteilee näkyvää valoa. Näin haitallista säteilyä ei myöskään pääse ulos. Elohopealampun suojakupu voi kuitenkin särkyä esimerkiksi lämpötilanvaihtelun vuoksi, jolloin paljas polttimo saattaa jäädä toimimaan. Tällainen elohopealamppu näyttää palaessaan himmeän sinivihreältä ja on vaarallinen: ultraviolettisäteily voi aiheuttaa silmä- ja ihovaurioita. Näin ollen rikkoontunutta elohopealamppua ei tule katsoa eikä sen valossa oleskella. Elohopealampun polttimo taas on valmistettu kvartsilasista, joka kestää hehkuvan elohopeahöyryn kuumuutta, joka sulattaisi tavallisen lasin. Vielä noin puolet kaikista Suomen katuvaloista on elohopealamppuvalaisimia, mutta niiden määrä vähenee. Halvan hankintahinnan vuoksi niitä kuitenkin asennetaan yhä esimerkiksi kerrostalojen ja muiden kiinteistöjen pihoilta. Joissakin paikoissa on olemassa myös sekavalolamppuja, joissa on yhdessä elohopeahöyrylampun ja hehkulamppuun tekniikkaa /23/.

2.2 Monimetallivalaisimet

Monimetallilamppu eli *metallihalogeenilamppu* on lähes identtinen elohopealamppuun kanssa, mutta eroaa siitä siten, että kaasuseokseen on lisätty elohopean lisäksi muitakin aineita. Lampputyypin tuottama valo on aidomman valkoista kuin elohopealamppussa. Monimetallilamput valaisevat elohopealamppuja tehokkaammin, mutta ovat hieman kalliimpia. Valotehokkuus monimetallilampulla on 80–105 lm/W /6/. Niitä voidaan käyttää haluttaessa erittäin hyvää värintoistoa, esimerkiksi julkisivujen, monumenttien ja aukoiden valaisemisessa /21/. Monimetalli on valaisuhyötysuhteeltaan lähes suurpainenatriumlamppujen luokkaa, mutta sen spektri on paljon sinertävämpi. Tehot alkavat 20 watista jatkuen kahteen kilowattiin. Tievalaistuksessa tämä lampputekniikka ei ole kovinkaan laajassa käytössä ja sitä käytetään lähinnä torien ja aukoiden valaisemisessa, missä luonnollinen valon väri ja värintoistokyky ovat tärkeitä valaistuksen ilmeen ja viihtyvyyden kannalta. Samoista syistä monimetallilamppuja käytetään urheilustadionien valaisuun. Monimetallilamppuja käytetään myös yleisesti sisävalaistuksessa julkisissa tiloissa ja myymälöissä. Monimetallilamput toimivat suuressa paineessa. Siten

niissä on räjähdysvaara. Suojalasi valaisimeen on turvallisuussyistä aiheellinen. Kvartsilasi kiteytyy ja haurastuu käyttöään pidetessä. Käyttöään lopussa yksi viikaantumismuoto on pamahdus pirstaleiksi. Uudemmat keraamisella purkausputkella varustetut mallit eivät yleensä poksahda pirstaleiksi, mutta alkavat vuotaa ulkokupuun saaden sen sisäpinnan sysimustaksi /23/. Kuvassa 2 on kolme monimetallivalaisinta asennettuna mastoon.



Kuva 2. Monimetallilamppu-valaisimet

2.3 Natriumvalaisimet

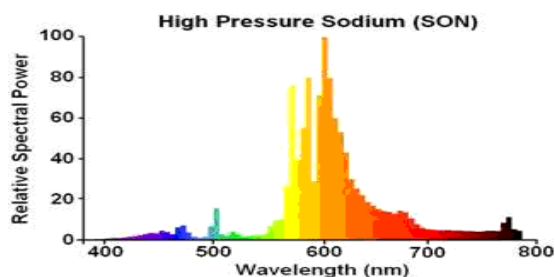
Natriumvalaisimia on olemassa kahdentyyppisiä: suurpainenatriumlamppuja ja pienpainenatriumlamppuja. Niiden toiminta perustuu siihen, että natriumhöyryn avulla saadaan aikaan näkyvää valoa. Ne eivät syttyessään saavuta lopullista väriään heti, vaan lopullinen värisävy tulee vähitellen esiin muutaman minuutin lämpenemisvaiheen aikana /7/ /11/.



Kuva 3. Suurpainenatriumlamppuja tievalaistuksessa /23/.

2.3.1 Suurpainenatriumlamppu

Suurpainenatriumlamppu tuottaa vaaleankeltaista valoa (kuva 3), jonka väriämpötila on 1900–2800 K. Syttymisvaiheessa väri on valkoista. Värintoistoindeksi on 20–80 /8/. Tavallisesti suurpainenatriumlamput ovat 50–1000 W tehoisia. Valotehokkuus on 70–150 lm/W, ja suuritehoisten lamppujen valotehokkuus on pienitehoisia parempi. Keskimääräinen kestoikä lähentelee jopa 40 000 tuntia, eivätkä ne merkittävästi himmene elinikänsä aikana, kuten useat muut lampputyypit. Näiden ominaisuuksien ansiosta suurpainenatriumlamput ovat erittäin taloudellisia käyttää. Suurpainenatriumlamppua pidetään nykyään kustannustehokkaimpana tievalaisintyyppinä. Se on tehokkaampi ja taloudellisempi kuin elohopealamppu, mutta hankkimiskustannuksiltaan halvempi kuin pienpainenatriumlamppu. Suurpainenatriumlamput sopivat käytettäväksi yleisesti kaikilla teillä ja kaduilla, ja niitä voidaan asentaa kaikkiin kohteisiin ellei erityinen syy edellytä muun kaltaista valoa /21/. Tekniikan huonoina puolina verrattuna elohopealamppuihin pidetään joissakin tilanteissa häiritsevää keltaista väriä ja lampun aiempaa suurempia hankintakustannuksia. Tievalaistuksen asiantuntijat väittävät kuitenkin, että energiatehokkaampi suurpainenatriumlamppu maksaa itsensä takaisin pitkällä ajanjaksolla /23/. Kuvassa 4 on suurpainenatriumlampun spektri.

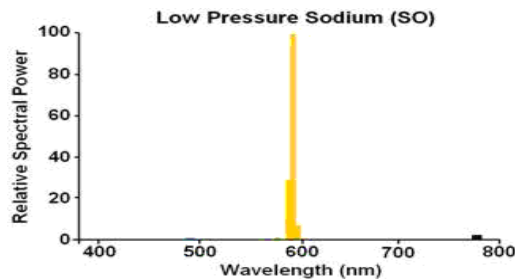


Kuva 4. Suurpainenatriumlampun spektri /23/.

2.3.2 Pienpainenatriumlamppu

Pienpainenatriumlamppu tuottaa kirkkaankeltaista, monokromaattista valoa (kuva 5). Tämän tekniikan lamput ovat kaikkein tehokkain tievalaisintyyppi. Kun pienpainenatriumlamppu syttyy, heijastuu siitä aluksi punaista neonvaloa /11/. Pienpainenatriumlamppuja näkee lähinnä moottoriteillä. Muualle niitä ei juuri asen-

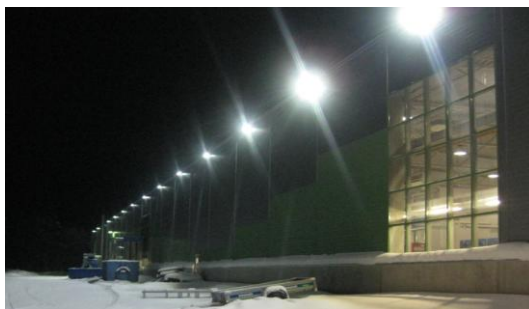
neta kalleutensa ja tekniikan aiheuttaman huonon värinnoiston vuoksi. Pienpainenatriumlamppujen värinnoistoindeksi on nolla, mikä tarkoittaa, että niiden valossa silmän kyky erottaa värejä on erittäin huono /11/. Valaisimien ongelmia ovat myös lampun lyhyempi käyttöikä verrattuna suurpainenatriumvalaisimiin, lampun korkea hinta ja energiankulutuksen lisääntyminen lampun ikääntyessä /23/.



Kuva 5. Pienpainenatriumlampun spektri /23/.

2.4 LED-valaisimet

LED-valaisin on uusi katuvalotyyppe, jonka käyttöä on testattu vuodesta 2005 saakka. Poikkeuksena muille katuvalaistustekniikoille se ei ole purkausvalaisin. LED-lamput kestävät huomattavasti pidempään ja kuluttavat vähemmän sähköä kuin purkauslamput. Ne ovat myös tärinän- ja iskunkestäviä, pienikokoisia ja lähes huoltovapaita. Ongelmina ovat kuitenkin vielä tekniikan keskeneräisyys ja liian heikko valaisuteho /23/. LED-valoja käytetään nykyisin valo-ohjauksessa ja valotaideteoksissa, mutta tulevaisuudessa on odotettavissa alue- ja tievalaistukseen soveltuvia LED-valoja (kuva 6).



Kuva 6. LED-valaisimilla toteutettu aluevalaistus.

3 VALAISTUKSEN VALINTAAN VAIKUTTAVAT SUUREET

3.1 Teho, sähköteho (W)

Perinteisissä lamppuissa teho on ollut valintakriteeri, joka on aina helpottanut lampun valintaa. Lampun ottama sähköteho on samalla myös maanläheisesti kertonut, paljonko lamppu tuottaa valoa. Oikeasti tämä lukema kertoo vain sen, kuinka paljon sähkötehoa lamppu kuluttaa palaessaan. Kaikki se teho, jota ei lampusta saada valona, muuttuu lämmöksi. Suurin osa perinteisten lamppujen kuluttamasta sähkötehosta käytetäänkin ympäröivän ilman lämmittämiseen. Siksi kannattaa valita lamppu, joka tuottaa mahdollisimman paljon valotehoa mahdollisimman pienellä sähköenergian määrällä (ks. kohta valotehokkuus). Tehon suure (tunnus) on P (Power) ja yksikkö watti (W) /10/.

3.2 Valotehokkuus (lm/W)

Valotehokkuus kertoo valolähteestä saadun valomäärän suhteessa käytettyyn sähkötehoon. Valonlähteiden valotehokkuuden yksikkö on lm/W (lumen/watti), joka kuvaa suoraan lampun hyötysuhdetta. Valotehokkuus on olennainen suure, kun vertaillaan eri valonlähteiden energiatehokkuutta. Valotehokkuus saadaan, kun valolähteen tuottama valomäärä (lumen, lm) jaetaan se kuluttamalla sähköteholla (watti, W). Mitä suurempi luku on, sen energiatehokkaampi valonlähde on, eli se on hyötysuhteeltaan parempi /10/.

3.3 Valovirta (lm)

Valovirta ilmaisee, kuinka paljon valoa valonlähde antaa. Valovirran lukema annetaan yleensä lamppuille, joilla ei varsinaisesti ole omaa heijastinta (ks. valovoima). Valovirran yksikkö on lumen (lm). Led-valojen (kuten monien muidenkin valolähteiden) valovirran määrä (luminous flux, F) ilmaistaan lumeneina (lm).

Valovirta määritellään lyhennettynä seuraavasti: *1 lumen on se valomäärä, jonka pinta-alaltaan 1/60 cm² oleva puhdas platinapinta tuottaa, kun se on läm-*

pötilaltaan juuri sulamispisteessä (noin 1770 astetta Celsiusta). Esimerkiksi 40 W:n hehkulampun valontuotto (valovirran määrä, luminous flux) on noin 400 – 500 lm ja 40 W:n loisteputken noin 2300 lm /10/.

3.4 Valaistusvoimakkuus (lux, lm/m²)

Valaistusvoimakkuus ilmaisee, paljonko valoa tulee tietylle pinnalle. Eri tiloille ja työtehtäviin annetaan suositeltavat valaistusvoimakkuudet. Valaistusvoimakkuus ilmoitetaan luxeina (lux), ja se lasketaan yksinkertaisesti jakamalla tuleva valovirta (lm) valaistavalla pinta-alalla (yleensä neliometri). Suure (tunnus) on E. /10/.

3.5 Luminanssi (L)

Luminanssi ilmaisee valaistavan pinnan valotiheyden eli pintakirkkauden. Näin ollen luminanssi on ainoa silmin nähtävissä oleva valaistustekniikan suure. Mitä suurempi luminanssi on, sitä kirkkaammalta pinta näyttää. Luminassin yksikkö on kandela neliometrille (cd/m²) /10/.

3.6 Valovoima (cd)

Valovoima ilmaisee paljonko lamppu antaa valoa määräsuuntaan. Heijastimilla varustetuille lamppuille annetaan yleensä valovoima valovirran sijaan. Myös useilla kapeakeilaisille linsseillä varustetuille LED-lamppuille annetaan valovoiman arvo. Yhtä tärkeä arvo kuin valovoima, on myös **keilan asteluku**. Mitä kapeampi keila, sen pienemmän pinta-alan valolähde valaisee. Usein valovoimaa saadaan keinotekoisesti kasvatettua kaventamalla valolähteen valokeilaa. Valovoima onkin määräsuuntaan säteilevän valon voimakkuus. Valovoiman perusteella voidaan laskea valaistusvoimakkuus annetulla etäisyydellä valolähteestä /10/.

3.7 Valokeilan avautumiskulma (astetta)

Valolähteen valon keilan leveyttä eli avautumiskulmaa käytetään ilmaisemaan miten leveällä (tai kapealla) heijastimella tai linssillä varustettu lamppu antaa valoa. Avautumiskulma annetaan asteina. Yleisvalaistuksessa tulee käyttää mahdol-

lisimman leveää keilaa (25 asteesta ylöspäin) ja esim. kapeissa kohdevaloissa (esim. taskulampuissa, lukuvaloissa) mahdollisimman kapeaa keilaa (alle 10 astetta). Avautumiskulma ilmoittaa kulman, jossa valovoima (cd) on vähintään puolet maksimiarvostaan. Niinpä avautumiskulman reunalla onkin puolet vähemmän valovoimaa kuin keilan keskellä /10/.

3.8 Elinikä (h)

Lampun elinikä kertoo lampun keskimääräisen paloajan testiolosuhteissa. Keskimääräinen elinikä on aika, jonka aikana puolet testiin laitetuista lamputa on palanut. Hehkulamputa tämä aika on noin 500 – 2 000 tuntia (20 – 83 päivää) ja halogeenilamputaillakin vain 4 000 tuntia (167 päivää). LED-lamputaillan tämä on jopa 100 000 tuntia (4167 päivää). Lamput testataan ns. vanhennustestissä /10/.

Lampun testissä saama elinikä ei kuitenkaan kerro koko totuutta. Lamputa joutuu käyttöolosuhteissa erilaisiin ympäristöolosuhteisiin, kuten alttiiksi värinälle. Se joutuu siis myös mekaanisesti koville. Lisäksi perinteisten lamputujen (halogeenit, hehkulamputa ja jopa loisteputket) hehkulan ka joutuu kovalle mekaaniselle rasitykselle, koska hehkulan ka lämpenee nopeasti sytytetessä (jolloin lanka venyy) ja se jäähtyy, kun lamputa sammutetaan (hehkulan ka lyhenee). Tämä jatkuva lämpeneminen ja jäähtyminen on yksi yleisimmistä syistä, miksi lamputa palaa. LED-valo on puolijohde, eikä sen sisällä ole hehkulan ka. LED-valo on lähes immuuni tällaisille mekaanisille rasituksille, kuten värinälle /10/. LEDin eliniän kannalta sen ohjaimelle asetetaan suuret vaatimukset. Mikäli LEDiä ohjataan oikein, saavutetaan LEDin täysi etu. Huonolla ohjaimella LEDin elinikä on jopa huomattavasti huonompi kuin hehkulamputa, jopa vain joitakin tunteja /10/.

3.9 Värintoistoindeksi (Ra)

Värintoistoindeksillä mitataan valonlähteen kykyä toistaa määrättyjä testivärejä (8 kpl) suhteessa annettuun vertailuvalonlähteeseen. Maksimiarvo on 100, mikä vastaa täysin samanlaista (mahdollisimman hyvää) värintoistoa. Ra-indeksin tulisi sisävalaistuksessa olla yli 80 ja hyvää värintoistoa edellyttäessä yli 90. Indeksien

arvo riippuu käytetystä vertailuvalonlähteestä, joka on alhaisilla väriämpötilan arvoilla hehkulamppu ja korkeilla päivänvalo /10/.

3.10 Väriämpötila (K) /10/

Väriämpötila kertoo lähinnä sen, onko valolähteen valon väri lämmintä vai kylmää. Väriämpötila ilmoitetaan kelvineinä (K), mutta sitä ei pidä sekoittaa normaaliin lämpötilaan. Korkea lukema kertoo valon olevan kylmää (valkoinen valo sinertää), aivan kuten kuulaana talvipäivänä. Matala arvo taas kertoo valon olevan lämmintä (valkoinen valo kellertää), aivan kuten kesällä auringon paisteessa. Eurooppalaiset ovat mieltyneet keinotekoisien valolähteen lämpimään valoon (esim. hehkulamppu), väriämpötila noin 3 000 K, kun taas valokuvaajat ja aasialaiset pitävät huomattavasti kylmemmästä luvusta, yli 5 000 K (=päivänvalo). Ohessa on joitakin väriämpötilan värejä. Huomaa, että Led-valo on lähinnä päivänvaloa:

- 10 000 K kylmän sinertävä (talvipäivä)
- 5 000 K päivänvalo (kirkkaat LED-valot, loisteputket)
- 4 000 K neutraali valkoinen
- 3 000 K lämmin valkoinen (Halogeenit. erikois LED-valot)
- 2 700 K "kodikas" (hehkulamput)
- 2 000 K melkein keltainen

3.11 Lampun lämpötila (astetta)

Valolähteen lämpötila kertoo sen, kuinka kuumaksi lamppu lämpenee, kun sitä käytetään. Perinteiset hehkulankaan pohjautuvat lamput, kuten halogeeni- ja hehkulamput, lämpenevät useiden satojen asteiden lämpöisiksi. Halogeenilampun sisällä on jopa 1 400 asteen lämpötila (hehkuva wolframlanka). Jopa niiden valo-keilan lämpö on niin suuri, että se voi sytyttää tulipalon. LED-lampun sisällä ei koskaan ole yli 120 asteen lämpötilaa. Puu saattaa syttyä jo 200 °C :ssa 12 – 15 minuutissa, mutta 400 asteessa jo alle minuutissa. Näin ollen halogeenivalon 1400 asteen lämpötila on suuri riski. Puu voi syttyä myös lämpösäteilyn vaikutuksesta. Jo 20 kW/m² lämpösäteilyssä puu syttyy parissa minuutissa. Halogeenivalosta

tälläinen säteilylämpö määrä on mahdollinen. LED-valojen turvallisuus perustuu juuri siihen, etteivät ne lämpene niin paljon, että ne voisivat sytyttää milloinkaan tulipaloa. Niiden valokeilassa ei ole juuri lainkaan lämpösäteilyä /10/.

Halogeenivalon suurempi valovoima suhteessa hehkulamppuun perustuukin juuri tähän korkeaan palamislämpötilaan. Koska halogeenipolttimon sisällä on tyhjiön sijaan ns. ei aktiivista halogeenikaasua, palaa Wolfram lanka korkeammalla lämpötilalla katkeamatta. Halogeenivalot (kuten hehkulamputkin) ovatkin suuria lämmönlähteitä. Suurin osa niiden ottamasta tehosta muuttuu valon sijaan lämmöksi. LED-valossa tämä suhde on juuri toisin päin, enemmän valoa kuin lämpöä /10/.

3.12 Valaisimen hyötysuhde

Valaisimen hyötysuhde voidaan jakaa kahteen osaan. Optiseen hyötysuhteeseen ja käyttöhyötysuhteeseen. (Sekoitetaan usein valolähteen tehokkuutta kuvaavaan hyötysuhteeseen)

- Optisella hyötysuhteella tarkoitetaan valaisimesta lähtevän valovirran suhdetta valaisimessa olevien lamppujen kokonaisvalovirtaan. Optinen hyötysuhde ottaa huomioon valaisimeen absorboituneen valonmäärän.
- Käyttöhyötysuhteella tarkoitetaan valaisimesta määrätyissä ympäristöolosuhteissa lähtevän valovirran suhdetta valaisimessa olevien lamppujen kokonaisvalovirtaan. Käyttöhyötysuhde ottaa valon absorboitumisen lisäksi huomioon myös lämpötilan vaikutuksen lamppujen valovirtaan /22/.

Optiikan avulla pyritään suuntaamaan mahdollisimman paljon lampusta lähtevää valoa valaistavaan kohteeseen. Paras optinen hyötysuhde saadaan valaisimesta jonka valolähde (lamppu) on pistemäinen ja heijastin (optiikka) on peili, joka on muodoltaan paraabeli, joka on pyörähtänyt akselinsa ympäri. Ympärisäteilevä valolähde eli lamppu sijoitetaan tällaisen optiikkaan polttopisteeseen. Tämä on ihanteellinen heijastimen tai valaisimen muoto. Erilaisilla paraabelin avauskulmilla saadaan valaisimelle erilaisia valonjakokäyriä /9/.

4 LAMPPUJEN TYYPPIMERKINNÄT

Lamppujen tyyppimerkinnöistä selviää Ra-indeksi ja väriämpötila. Tyyppimerkintä ilmoitetaan kolmella numerolla, joista ensimmäinen ilmoittaa Ra-indeksin ja kaksi seuraavaa väriämpötilan. Esim. tyyppimerkintä 827 kertoo, että lampun Ra-indeksi on 80–89 % ja väriämpötila 2 700 K. Jos tyyppimerkintä on 950, on lampun Ra-indeksi yli 90 % ja väriämpötila 5 000 K. Lampun tyyppimerkintään tutustuminen helpottaa valaistustarpeeseen sopivan valonlähteen valintaa /8/.

5 LED-TEKNOLOGIA

LED (Light Emitting Diode, valotiodi)

Valoa emittoiva diodi perustuu puolijohdetekniikkaan. Puolijohteiksi kutsutaan elektroniikassa käytettäviä komponentteja, kuten diodeja ja transistoreja. Puolijohteet ovat kuitenkin nimensä mukaisesti aineita, jotka johtavat sähköä heikommin kuin varsinaiset johteet, kuten kupari. Tämä johtuu siitä, että aineen atomin uloimmassa elektroneista muodostuvassa kerroksessa ns. johtavuusvyössä on neljä elektronia, kun johteilla niitä on kaksi ja eristeillä kahdeksan. Eristeillä siis johtavuusvyö on "täynnä" eivätkä elektronit pääse siirtymään atomista toiseen kun taas johtavilla aineilla on elektroneilla tilaa siirtyä. Puolijohteiden toiminta on sitten tältä väliltä. Elektroniikassa tärkeimpiä puolijohteita ovat pii ja germanium /5/.

Piiatomissa on atomiytimessä 14 positiivisesti varautunutta protonia ja elektroni-verhossa 14 negatiivisesti varautunutta elektronia kolmella kehällä, sisimmällä kehällä on 2 elektronia, keskimmaisella 8 ja uloimmalla kehällä niitä on 4. Tällaiset atomit voivat sitoutua toisiinsa, siten että ne liittyvät uloimmalla elektronikehällä toisiinsa kovalenssisidokseksi. Kun uloimmalla elektronivyöllä on neljä elektronia, voi atomi sitoutua neljään viereiseen toiseen atomiin muodostaen siten säännöllisen kiderakenteen. Kun puolijohteeseen lisätään pieniä määriä muita aineita, joissa on enemmän (tai vähemmän) elektroneja uloimmalla kehällä, saadaan kovalenssisidokseen häiriö. Tällainen häiriö aiheuttaa joko elektronin lisäyksen tai elektronin vajauksen uloimmalla elektronikehällä. Mikäli lisääaine, esimerkiksi arseeni saa aikaan elektronin lisäyksen (ns. donoriatomit), rakenteeseen tulee yksi elektroni joka ei osallistu kiderakenteeseen. Koska elektroni on negatiivisesti varautunut, tällaista puolijohdetta kutsutaan N-tyyppiseksi. Vastaavasti, jos puolijohdetta seostetaan aineella, esimerkiksi boorilla, joka aiheuttaa elektronin vajauksen (akseptoriatomi), syntyy positiivinen varaus, koska yksi negatiivinen elektroni on otettu pois. Tällöin poistunut elektroni jättää vain tyhjän paikan, aukon, joka toimii positiivisena varauskuljettajana. Tällaista puolijohdetta kutsutaan P-tyyppiseksi. Puhutaan myös enemmistövarauskuljettajista (N-tyyppi) ja vä-

hemmistövarauksenkuljettajista (P-tyyppi). Yhdistämällä kaksi erityyppistä puolijohdetta, saadaan aikaiseksi PN-liitos, joka muodostuu P-tyyppisestä ja N-tyyppisestä puolijohteesta sekä näiden välisestä rajapinnasta. Tämä liitos muodostaa diodin /5/.

Diodin rajapinnan läheisyydessä on varauksenkuljettajien (aukkojen ja elektronien) tiheys suurin. Rajapinnalta kulkee N-puolelta elektroneja P-puolelle ja elektronit täyttävät vapaita aukkoja, jotka siten häviävät. Tätä ilmiötä kutsutaan rekombinaatioksi. Vastaavasti P-puolelta kulkee aukkoja N-puolelle ja ne täyttyvät ylimääräisillä elektroneilla, rekombinoituvat elektronien kanssa. Kun varauksenkuljettajat siirtyvät näin rajapinnan yli, ne jättävät jälkeensä varauskerroksen P-puolelle akseptoriori-ioneista koostuvan ja N-puolelle donori-ioneista muodostuvan positiivisen varauksen. Kerros alkaa vastustaa diffuusiovirtoja ja diffuusiovirrat lakkaavat. Rajapintavyöhykkeelle syntyy siten alue, jossa on donori- ja akseptorioneja, mutta ei juurikaan vapaita varauksenkuljettajia /5/.

PN-liitos on tasapainossa, kunnes siihen tuodaan ulkopuolista energiaa. Jos ulkoisen jännitelähteen positiivinen napa kytketään PN-liitoksen N-tyyppiseen materiaaliin ja negatiivinen napa P-tyyppiseen materiaaliin, on PN-liitos estosuuntaan kytketty. Estosuuntainen jännite aiheuttaa rajapintavyöhykkeen levenemisen ja potentiaalivallin kasvamisen. Estosuuntaankin kulkee hieman vuotovirtaa, joka on alle mikroampeerien luokkaa. Tämä virtaa riippuu lämpötilasta /5/.

Jos ulkoinen jännitelähde kytketään siten, että negatiivinen napa kytketään N-tyyppiseen materiaaliin ja positiivinen vastaavasti P-tyyppiseen materiaaliin, kapenee rajapintavyöhyke ja enemmistövarauksenkuljettajat pääsevät rajapinnan yli ja virta alkaa kulkea. Jännitteen noustessa virran määrä nousee huomattavasti. Virran määrä ei tietenkään voi määrättömästi kasvaa, vaan sitä on rajoitettava, esimerkiksi sarjaan kytkettävällä vastuksella /5/.

Valodiodeissa virta johdetaan myötäsuuntaisesti diodin yli ja elektroni-aukkoparin rekombinoituminen saa aikaan fotonin emission (emissio = hiukkasten tai säteilyn lähettäminen). Tästä syntyy valoefekti /5/.

5.1 Historia

Ensimmäisen valoa lähettävän diodin valmisti Marconin laboratorioissa työskennellyt brittiläinen kokeilija H. J. Round vuonna 1907. Hänestä riippumatta venäläinen Oleg Vladimirovich Losev teki saman keksinnön 1920-luvulla. Vaikka siitä kerrottiin venäläisissä, saksalaisissa ja brittiläisissä tieteellisissä aikakauskirjoissa /25/, keksintö ei vielä tullut kovin tunnetuksi eikä sitä vuosikymmeniin käytetty hyväksi mihinkään tarkoitukseen. Vuonna 1955 Radio Corporation of America:ssa työskennellyt Rubin Braunstein havaitsi, että eräät puolijohdeaineet lähettävät infrapunasäteilyä /3/. Sitä lähettivät hänen tutkimustulostensa mukaan galliumarsenidista (GaAs) galliumantimonidista (GaSb), indiumfosfidista tai piin ja germaniumin seoksesta valmistetut puolijohdekomponentit, jotkin niistä huoneenlämmössäkin, toiset alhaisissa lämpötiloissa (77 K). Saman havainnon tekivät galliumarsenidin osalta vuonna 1961 Texas Instrumentissa työskennelleet kokeilijat Bob Biard ja Gary Pittman. Vaikka Braunstein oli tehnyt keksinnön aikaisemmin, Biard ja Pittman voittivat prioriteettikiistan ja patentti keksinnöstä myönnettiin heille /20/.

Ensimmäisen käyttökelpoisen näkyvää valoa lähettävän, punaisen LEDin kehitti vuonna 1962 General Electricissä työskennellyt Nick Holonyak, joka myöhemmin siirtyi Illinoisin yliopistoon /13/. Holonyakia pidetäänkin "valoa emittoivan diodin isänä." /24/. Holonyakin oppilaana yliopistossa opiskellut George Craford keksi vuonna 1972 ensimmäisen keltaisen LEDin sekä kymmenen kertaa entistä kirkkaammat punaiset ja punaoranssiset LEDit /4/.

Shuji Nakamura japanilaisessa Nichia Corporationissa valmisti ensimmäisen erittäin huomattavasti kirkkaamman sinisen LEDin. Sen materiaalina oli indium-galliumnitridi (InGaN). Jo sitä ennen oli galliumnitridista (GaN) valmistettu kirkkaita LEDejä. Vuonna 1995 Alberto Barbieri Cardiffin yliopiston laboratoriossa (GB) tutki kirkkaiden LEDien tehokkuus- ja luotettavuusominaisuuksia ja osoitti, että erityisen hyvä tulos saadaan, jos indium-tinaoksidi (InSnO) kytketään yhteen galliumarsenidin kanssa. Kun siniset ja erityisen tehokkaat LEDit oli keksitty, Nakamura sai pian kehitetyksi myös ensimmäisen valkoisen LEDin (kuva 7), johon

käyttettiin yttrium-alumiinioksidin ja ceriumin seosta $Y_3Al_5O_{12}:Ce$, "YAG". Fosforipitoisella päällysteellä saatiin sinisen valon väri muuttumaan niin, että se näyttää valkoiselta. Tästä Nakamuralle myönnettiin vuonna 2006 millennium-tekniologiapalkinto /23/.

LEDien tehokkuus ja valovoima on 1960-luvulta saakka kasvanut likipitään eksponentiaalisesti ja kaksinkertaistunut aina noin 36 kuukaudessa. Tämä muistuttaa tietotekniikan alalla havaittua Mooren lakia ja kehityksestä onkin käytetty nimitystä *Haitzin laki*, tohtori Roland Haitzin mukaan. LEDien kehitys johtuu suurelta osaltaan puolijohteiden muiden sovellusten sekä optiikan ja materiaalitieteiden kehityksestä /23/.



Kuva 7. Valkoista valoa emittoiva LED /5/.

5.2 Ensimmäiset käyttötarkoitukset

LEDien ensimmäisiä kaupallisia käyttötarkoituksia olivat erilaisten laitteiden merkkivalot. Ensin niitä käytettiin kalliissa laboriolaitteissa ja elektronisissa tutkimusvälineissä kuten oskilloskoopeissa, mutta jo 1970-luvulla myös televisioissa, radioissa, puhelimissa, laskimissa ja sittemmin kelloissakin. Niissä käytettiin yleensä punaisia LEDejä, joiden valovoima riitti vain merkkivaloihin, mutta ei huoneen valaistukseen. Myöhemmin näissä laitteissa alettiin yleisesti käyttää myös muunvärisiä LEDejä. Vasta 1990-luvulla uusien LEDien valovoima oli kehittynyt niin kirkkaaksi, että niitä voitiin käyttää myös valaisimina /23/.



Kuva 8. Poliisiauto, jonka vilkkuvaloissa käytetään LED-teknologiaa /23/.

5.3 Led- valaistus

LED säteilee monokromaattista valoa (sisältää vain yhden aallonpituuden). Tällöin hyvin tärkeä tieto on ns. värilämpö, joka ilmaistaan kelvinasteina [K]. Aurin-
gon pintalämpötila on 5 780 K ja sen säteilyn aallonpituuden huippu on 500 nm:n
kohdalla. Vaikka asteet ovat valolaitteissa suuria, se ei tarkoita, että valaisin kuu-
menisi tähän lämpötilaan, vaan sen säteilemä valo vastaa tämän lämpötilan mak-
simisäteilyarvoa. Johtuen monokromaattisesta säteilystä, 5 000 kelvinin valo on
osoittautunut miellyttävämmäksi käytössä. LEDin tyypillinen virran kesto on 20
milliampeeria [mA] ja kynnysjännite, toisin sanoen jännite, jonka ylityksen jäl-
keen LED alkaa johtaa on 1,5 - 5 voltia [V]. Kynnysjännite riippuu LEDin vä-
ristä, eli siinä käytetyistä puolijohdeaineista. Virta täytyy siis rajoittaa esimerkiksi
vastuksella niin, että se ei ylitä sallittua arvoa. Jos käytössä on 12 voltin jännite ja
LEDin kynnysjännite on 2,9 voltia (jännite jolloin virta alkaa kulkea) sekä virta
20 mA, tarvittava virtaa rajoittava sarjavastus on 470 Ohmia [(%uF057)]. On
huomattava, että tässä tapauksessa tehoa kuluu vastuksessa huomattavasti enem-
män (172 milliwattia, mW) kuin itse LEDissä (57 mW). Kannattaa siis käyttää
menetelmiä, jolla ajojännite LEDissä on pienempi ja rajoittava vastus on myös
vähemmän tehoa kuluttava, tai sitä ei tarvita ollenkaan, jolloin koko kuluva teho
kohdistuu LEDeihin. Tämä voidaan saada aikaiseksi esimerkiksi sarjakytkenällä.
Tässä tapauksessa neljä LEDiä sarjassa tekisi juuri tuon käytettävän 12 voltia /5/.

Koska yhden perinteisen LEDin valoteho ei riitä oikeastaan valaistukseen, on ke-
hitetty teholedejä, joiden antama valoteho (ja kuluttama sähköteho) on paljon suu-
rempi kuin perinteisen LEDin, aina viiteen wattiin asti. Niiden valoteho on myös
parantunut ja on jopa 80 lm/W. Teholedit muodostavat kuitenkin paljon hukka-

lämpöä ja se on jäähdytettävä. LEDien teho alkaa laskea voimakkaasti, jos ne kuumenevat liikaa. Vaihtoehtona on käyttää useita perinteisiä LEDejä sarjaan kytkettynä. Tällöin myös valokuviota voidaan suunnata laajemmalle alueelle ja itse valaisin näyttää kauniilta useiden pienien valopisteiden muodostaessa valolähteen. Uusimmat LED-tekniikan tutkimukset, Meijo Yliopistossa Japanissa, ovat johtaneet jopa 130 lm/W LEDien kehittämiseen. Normaali hehkulamppu tuottaa vain 10–15 lm/W. On selvää, että jatkossa valaistustekniikka tulee hyödyntämään enenevässä määrin LEDejä. Jatkossa LED valaisimien hinnat tulevat myös olemaan kilpailukykyisiä nykyisten valaisimien kanssa massatuotannon ja tekniikan kehittyessä /5/.

TehoLED tarvitsee etuvastuksen tai muun virranrajoituksen! TehoLED on tehostaan huolimatta tavallinen LED, sen virta ei saa nousta hallitsemattomasti.

LED-valaistuksessa on monia etuja verrattuna perinteiseen hehkulamppuun. Suurimpana on mahdollisuus sähkön säästämiseen, kun energiasta alkaa olla pulaa ja energian tuottamisen aiheuttama ilmaston lämpeneminen aiheuttaa huolta. Toisaalta koska LED-valot eivät kuumene paljoakaan, on niitä helppo asentaa sellaisiin paikkoihin, joissa lämpö on haitallista tai voi aiheuttaa esimerkiksi tulipalovaaran. Lisäämällä riittävän määrän valaisevia LEDejä, saadaan aikaiseksi riittävän kirkas valaistus missä tahansa tarkkuutta vaativassa kohteessa. Lisäksi LED-valot ovat paljon kestävämpiä kuin mikään muu valaistustekniikka. Valaisimet voivat kestää jopa 100 000 tuntia ja se tarkoittaisi 10 vuoden yhtämittaista paloaikaa. Perinteiset lamput eivät pääse kuin murto-osaan tuosta ajasta. Tosin vanhemmiten LEDien valoteho alkaa hiipua ja ne eivät kestä kuumuutta. Saunan valaistuksessa ikä saattaa olla paljon lyhyempi kuin esimerkiksi ulkokäytössä /5/.

LED-tekniologiasta on maailmalla saatavilla paljon sekä asiallista, että asiatonta tietoa. Suurin osa asiattomasta tiedosta on ns. hypeä, jossa LED-tekniologian väitetään säästävän sähköä 80–90 % käytännössä kaikkiin muihin maailman valonlähteisiin nähden. Toinen yleinen harhakäsitys on, että LED-valaisimet eivät tuota lainkaan lämpöä. Faktatietoa on myös saatavissa, mutta sen suodattaminen LED-

hypestä on toisinaan vaikeaa. Mutta jos pohjaksi ottaa puhtaan matematiikan ja LED-komponenttivalmistajien tekniset tiedot, pääsee jo hyvin pitkälle. Yritämme tässä keskittyä faktoihin sekä LED-tekniikan hyvistä puolista että haasteista.

5.3.1 Elinikä

Skeptikot sanovat, että puheet 50 000 tunnin kestoikästä ovat yliarvioituja. Mutta sitä mukaa kun LED:it keräävät käyttötunteja komponenttivalmistajien laboratorioissa, valmistajat kilvan nostavat omia ennusteitaan sekä LED:ien kestoikää, että sallitun käyttölämpötilan suhteen. Nykyään luvataan jo yli 100 000 tunnin käyttöikää lähes sata-asteisena palavalle suurtehoLED:ille. Juuri tuo käyttölämpötila on tärkein LED:in eliniän vaikuttava tekijä. Luvatun eliniän saavuttamisen perusta on huolellinen LED-valaisimen lämpösuunnittelu /12/.

5.3.2 Lämpö ja UV-säteily

LEDien spektri on hyvin kapea eikä se sisällä IR- eikä UV-komponentteja. LED-valonheittäjän edessä seisova ihminen ei siis tunne ihollaan kiusallista kuumotusta niin kuin esim. HID- tai halogeenivalon edessä. Tässä kohtaa pitää huomata, että vaikka LED ei säteile lämpöä, itse komponentti lämpiää kyllä huomattavasti. Vrt. jos hehkulampun kuluttamasta energiasta 95 % muuttuu lämmöksi, ja vain 5 % valoksi, niin valontuotoltaan viisi kertaa parempi LED tuottaa silti lämpöä vielä 75 % kuluttamastaan energiasta. Siis esim. 20 watin LED-valaisin tuottaa 15 watin lämpötehon, jonka haihduttaminen LED-komponenteista pitää ottaa valaisinsuunnittelussa huomioon /12/.

5.3.3 Hyötysuhde

Matalalla tasajännitteellä toimivia LED-komponentteja ei voi sellaisenaan kytkeä 230V vaihtosähköön. LED:it tarvitsevat vakiovirtalähteen, joka muuttaa sähkön LED:eille sopivaan muotoon. Uusimpien valkoisten LED-komponenttien hyötysuhde on yli 100 lm/W, mutta jotta valaisimessa päästäisiin yli 80 lm/W valotehoon, virtalähteeltä vaaditaan hyvää hyötysuhdetta. On huomattava, että tällaisiin lukemiin yltävät vain suurtehoLED:it. Valitettavasti markkinoilla näkee myös 5mm epoksiledeihin perustuvia valaistusratkaisuja, joiden valmistajat ratsastavat

markkinoinnissaan suurtehoLED:ien hyötysuhteella, kun näiden lähinnä merkki-valokäyttöön tarkoitettujen valodiodien hyötysuhde jää alle 50 lm/W:n. Hehku-lampun hyötysuhde on 10–15 lm/W, halogeenin 10–30 lm/W ja elohopealamp-pujen 30–60 lm/W. Niinsanottujen energiansäästölamppujenkin hyötysuhde on parhaimmillaankin alle 70 lm/W. Näihin teknologioihin LED antaa jo tänä päi-vänä energiatehokkaan vastineen. Säästöt ovat teknologiasta riippuen karkeasti 10–60%, ei kuitenkaan lähelläkään monissa mainoksissa väitettyä 85% tasoa. Mutta kun yhdistetään energiansäästö ja LED:ien pitkä käyttöikä, niin valaisimen elinkaaren aikana säästöt ovat merkittävät. Katuvalaistuksessa käytettyjä moni-metalli- ja jopa 150 lm/W hyötysuhteeseen yltävää suurpainenaatriumlamppua LED ei vielä energiatehokkuudessa päihitä. Katuvalaisinten vaihto- ja huoltotyö on merkittävä kustannustekijä valaistuksen elinkaaren aikana. Tämän kustannuk-sen pienentyminen tekee LED-tekniikasta varteenotettavan vaihtoehdon jopa ka-tuvalaistuskäytössä.

LED-teknologian hyötysuhde paranee kiihtyvällä vauhdilla

LED-teknologian kehityksessä on samanlaista vauhdin tuntua kuin mikroproses-sorien kehityksessä on ollut viime aikoina. Suunnilleen puolen vuoden välein valmistajat ilmoittavat jälleen 20 % parempia lukemia aikaisempiin verrattuna. Tänä päivänä laboratoriossa on saavutettu LED:eillä 150 lm/W hyötysuhteita, ja kaupallisestikin on jo saatavissa yli 100 lm/W valkoisia LED:ejä /12/.

5.3.4 Valokuvio

LED:it eivät ole ympärisäteileviä kuten yleisimmät valonlähteet. Etenkin kohde-valaistuksessa linsejä käyttäen kaikki LED:in tuottama valo voidaan helposti ohjata kohteeseen. Näin hyötysuhde paranee ja valosaasteen määrä minimoituu. Toisaalta LED-teknologialle on haasteellisempaa saada aikaan tasaista yleisvaloa. Paikoissa joissa käytetään paljon epäsuoraa valoa, tämäkään ei ole ongelma. Itse valokuviota suurempi haaste on LEDin pintakirkkaus. LED-komponentin hehkuva pinta on hyvin kirkas, ja silmän tarkentuessa siihen katsoja kokee häikäisyn to-della voimakkaana. Tämän häikäisyn poistaminen luo haastetta LED-valaisin-suunnittelijoille /12/.

5.3.5 Syttyvyys ja säätö

LED:ejä voi sytyttää ja sammuttaa rajattomasti. Siinä missä HID-valaisin sähkökatkosta toivuttuaan tarvitsee tuokion syttyäkseen, LED syttyy saman tien. LED:ien kirkkautta voidaan säätää käytännössä portaattomasti PWM-tekniikalla. Itse asiassa mitä enemmän LED:it ovat sammuneena, sitä kauemmin ne kestävät. Jos LED:iä himmennetään vaikka 50/50 pulssisuhteella PWM:ää käyttäen, tuosta ajasta LED on siis puolet "sammutettuna". Monet purkauslamput vaativat minuutteja syttyäkseen. Jos kaikki maailman katuvalot voitaisiin sytyttää nuo muutamat minuutit myöhemmin, tai ensimmäiset tunnit käyttää valaisinta osateholla, voi vain kuvitella millaisiin energiansäästöihin sillä päästäisiin /12/.

5.3.6 Kestävyys

LED ei sisällä hehkulankoja, ohutta lasia, eikä mitään muitakaan mekaanisesti arkoja osia. Tästä syystä LED:eillä voidaan toteuttaa iskun- ja värinänkestäviä valaisimia haastaviin ympäristöihin, kuten esim. työkoneisiin /12/.

Tässä jotain ajatuksia LED-tekniologiasta. Tarkka lukija huomaa, että teksti sisältää hyvien puolien lisäksi myös haasteita. Hyvän LED-valaisinvalmistajan tuntee siitä, että tämä tunnustaa myös nämä teknologian haasteet ja ottaa ne huomioon valaisinsuunnittelussaan.

6 ULKOVALAISTUS

Valaistuksen energiansäästöissä ei saa tinkiä valaistuksen laadusta. Hyvän valaistuksen käsite muodostuu suuresta määrästä eri osatekijöitä. Suunniteltaessa uutta rakennuskohdetta rakennuttajalla, arkkitehdillä, valaistussuunnittelijalla ja käyttäjällä voi olla tästä hyvin erilainen käsitys. Valaistussuositukset lähtevät siitä, kuinka hyvin kyseisessä valaistuksessa pystytään suorittamaan näkemiseen liittyvä työtehtävä. Suomessa on käytetty perinteisesti Suomen Valoteknillisen Seuran laatimia sisä- ja ulkotyöpaikkojen valaistussuosituksia. Nykyisin nämä suositukset on korvattu uusilla eurooppalaisilla SFS-EN 12464 -standardeilla /17/.

6.1 Yleiset periaatteet ulko- ja aluevalaistuksessa

Ulkovalaistuksen päätehtävä on taata katujen ja teiden turvallinen käyttö pimeän aikana niin jalankulkijoille kuin ajoneuvoillekin. Lisäksi valaistus mahdollistaa ulkotyöalueilla työn tehokkaan ja turvallisen tekemisen. Valaistuksella mahdollistetaan myös liikuntapaikkojen harrastus ja kilpailutoiminta pimeällä olevaan vapaa-aikaan. Valaistus lisää sekä henkilöiden että omaisuuden turvaa luoden samalla turvallisuuden tunnetta. Näille moninaisille eri sovellusalueille on useita eri valaistuksen osatekijöitä, jotta valaistus saadaan laadukkaasti oikein toteutettua. Ulkovalaistuksen suositusten pohjana ovat toiminnot, työtehtävät ja niiden vaativuus jossa näkötehtävä suoritetaan. Nykyisin erilaiset suositukset korvautuvat uusilla sovelluskohtaisilla eurooppalaisilla standardeilla.

Ulkotyöalueiden valaistusstandardi SFS-EN 12464-2 määrittelee eri työpaikoille ja niissä tehtäville töille keskimääräisen valaistusvoimakkuuden (E_m) ja valaistuksen tasaisuuden (U_o) vähimmäisarvojen raja-arvot. Valaistuksen värintoistokyvyn tulee myös olla annettujen käyttötarkoitukskohtaisten arvojen mukaiset eikä häikäisy saa ylittää annettua raja-arvoa. Suositellut valaistusvoimakkuudet työalueilla on esitetty SFS-EN 12464-2 standardin taulukoissa. Taulukoista ilmenee 15 alueen ja yhteensä 98 eri käyttötarkoituksen valaistuksen vaatimukset. Näistä sovelletaan niitä, jotka olosuhteiden tai työ- ja siihen liittyvän näkötehtävän osalta vastaavat standardin käyttötarkoitussarakkeessa esitettyä kuvausta.

Taulukko 1. Ulkotyöalueiden valaistussuosituksen periaatteet /17/.

Alueen käyttötarkoitus	E _m	U _o	GR _L	R _a	Huom.
Kuvaukset käyttötarkoituksesta joille on määritelty valaistuksen raja-arvot	5–300	0,1–0,5	45–55	20–60	Esim. Osin poikkeavia vaatimuksia

E_m = valaistusvoimakkuuden keskiarvon vähimmäisarvo (lx)

U_o = valaistuksen yleistasaisuuden vähimmäisarvo

GR_L = häikäisyn suurin sallittuarvo

R_a = värinointindeksin vähimmäisarvo

Tehtäväkohtaisesti annetut valaistusvoimakkuussuositukset tarkoittavat asennuksen arvoja ennen huoltoa. Suunnitelmissa tämä huomioidaan ns. alenemakertomella. Käytettävien alenemakertointen arvo riippuu lampun, liitälaitteen ja valaisimen ominaisuuksista sekä ympäristöstä ja laadittavasta huolto-ohjelmasta /17/.

Standardissa annetaan myös annetuille käyttötarkoituskohteisille arvoille ns. korotetut valaistusvoimakkuuden arvot jos:

- näkötehtävät työssä ovat kriittisiä
- virheet ovat kalliita korjata
- tarkkuus tai suurempi tuottavuus ovat erittäin tärkeitä
- työntekijän näkökyky on normaalia huonompi
- katsottavien kohteiden yksityiskohdat ovat pieniä tai kontrasti alhainen
- työtä tehdään epätavallisen pitkä aika /17/.

Jos näkemisen ja tekemisen kannalta jokin tai jotkut yllä olevista olosuhteista tai tekijöistä edellyttävät, niin valaistustasoa nostetaan. Standardin esittämiä valaistusvoimakkuuden keskiarvoja nostetaan vähintään yhdellä arvolla seuraavan jaottelun mukaan 5->10->20->30->50->75->100->150->200->300->500. Esimer-

kiksi vaaditun raja-arvon ollessa 50 lx korotetaan arvoon 75 lx. Standardin mukaan valaistustasoa voidaan vastaavasti laskea em. pykälän, jos katseltavien kohteiden yksityiskohdat ovat epätavallisen suuria tai kontrastierot ovat suuria tai työtä tehdään epätavallisen lyhyt aika.

Hyvässä valaistuksessa on oleellista, että vaaditun valaistusvoimakkuuden ohella myös laadulliset – tasaisuus, häikäisy ja värinöistä tarpeet tyydytetään. Lähiympäristön valaistusvoimakkuuden tulee olla suhteessa työalueen valaistusvoimakkuuteen, ja sen tulee saada aikaan tasapainoinen luminanssijakauma näkökentässä. Kohteen valaistusvoimakkuuden ollessa 30 lx tai alhaisempi samaa valaistusvoimakkuutta käytetään koko alueella. Standardissa esitetään myös vaatimukset häiriövalon rajaamiselle.

Kevyen liikenteen valaistusluokkia vastaavat valaistusvoimakkuuden keski- ja minimiarvot (E_m ja E_{min}) ovat seuraavan taulukon mukaiset.

Taulukko 2. K-Luokat (vaakatason valaistusvoimakkuudet) /17/.

Luokka	E_m (1 lx, min)	E_{min} 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 Hankekohtainen keskiarvo ei saa ylittää 1,5 kertaista keskiarvon minimiä.

K-luokat on tarkoitettu jalankulkijoille ja pyöräilijöille, jalkakäytävillä, jalankulku- ja muille alueille ajoradan vieressä sekä asunto- ja pihakaduille, jalankulkukaduille, pysäköintialueille ja pihaille /17/.

6.2 Energiansäästökriteerit

6.2.1 Eup- ja sen tarkoitus

EuP-direktiivi (Energy Using Products -direktiivi, jota kutsutaan myös Eco Design -direktiiviksi) tullaan korvaamaan ErP-direktiivillä (Energy related Products). ErP-direktiivi julkaistiin EU:n virallisessa lehdessä 31.10.2009 ja se on saatettava kansalliseen lainsäädäntöön ensi vuoden joulukuun mennessä. EuP ja ErP ovat puitedirektiivejä energiaa käyttävien tuotteiden ekologisen suunnittelun vaatimuksista. Sen nojalla annetaan tuoteryhmäkohtaisia täytäntöönpanosäädöksiä, joissa määritellään tarkemmin tuotesuunnittelun ympäristövaatimukset. Voimaan astuttuaan vaatimukset koskevat kaikkia EU:n jäsenmaita ilman kansallista lainsäädäntöä. EuP-direktiivin avulla voidaan parantaa markkinoille tuotavan tekniikan energiatehokkuutta vähentäen näin energiankulutusta ja hiilidioksidipäästöjä. EuP-direktiivi on yksi konkreettisimmista tavoista, joilla Euroopan Yhteisö pystyy ohjaamaan markkinoita kestäväen kehityksen tielle /16/.

6.2.2 Toimenpiteet koskien ulkovalaistusta

Konkreettisimmin täytäntöönpanosäädös vaikuttaa ulkovalaistukseen kieltämällä nykyisenkaltaisten elohopealamppujen markkinoille tulon 2015 alkaen. Elohopealamppuja on käytössä paljon erityisesti puistoissa, pienkaduilla ja taloyhtiöiden piha-alueilla. Näiden alueiden valaistus on siis uusittava. Myös osa nykyisenkaltaisista suurpaine- ja monimetallilampuista tulee häviämään markkinoilta lähivuosina. Käyttäjän kannalta tämä ei kuitenkaan ole yhtä kriittistä kuin elohopealamppujen poistuminen, koska samoihin valaisimiin tulee saamaan muita energiatehokkuusrajat täyttäviä lamppeja. Ulkovalaistusasennusten haltijoiden kannattaa pikaisesti vähintäänkin kartoittaa tilanteensa /16/.

Elohopealamppuvalaisinten uusimisen suunnittelu tulisi aloittaa pikaisesti, koska lamppeja ei enää ole saatavilla 2015 jälkeen. Ajoissa tehty suunnittelu auttaa yhdistämään saneerauksen muuhun mahdolliseen ulkoaluesaneeraukseen. Pelkkä valaisimen vaihto energiatehokkaampaan yksikköön riittää takaamaan vaihtolampujen saatavuuden. Asennuksen uusimista suunniteltaessa kannattaa kuitenkin

kin miettiä valaistustarpeet samalla kertaa kokonaan uudestaan. Miettimällä tarvelähtöisesti mihin, kuinka paljon, koska ja millaista valoa tarvitaan, saavutetaan todellista energiansäästöä ja samalla kertaa valaistustuloksen paranemista. Elohopealamppujen värintoisto on huono ja valaistuksen uusimistilanteessa onkin hyvä mahdollisuus luoda miellyttävämpi valaistusympäristö. Myös ohjausta ja säätöä tulisi aina miettiä saneerauksen yhteydessä /16/.

6.2.3 Energiatehokkuus

Suunnittelussa valaistuksen määräävät laadulliset tekijät ovat lähtökohtana. Kohteiden suunnittelussa tulee keskittyä valaistuksen oikeaan ja tarkoituksenmukaiseen mitoittamiseen. Mitoituksessa valaistuksen tehon tarve on määritettävä siten, että valaistus täyttää sille kaikin osin sille asetetut vaatimukset. Energian kulutuksessa teholtaan oikein mitoitettu valaistus on merkittävä tekijä, sen jälkeen tulee käyttäjien huolehtia valaistuksen tarkoituksenmukaisesta käytöstä ja käyttöajoista. Kalustehankinnoissa valinnat ohjataan ns. ECO-design tuotteisiin, joiden hyvä energiahyötysuhde ja rajattu häiriövalontuotto ovat sekä ohjaavia että määrääviä tekijöitä. Valaistustehoa ja sitten käyttötuntien mukaan määräytyvää energiankulutusta tulee tarkastella esim. hyötysuhdemenetelmän avulla. Energiatehokkuuteen käytännössä vaikuttavat kuitenkin valaistuksen oikea mitoitus, asennus ja myöhemmin käytön aikana oikein huolletut valaisimet. Aluevalaistuksen erittäin moninaisillekin alueille, joiden valaistustavoitteet ovat valaistusvoimakkuuden arvoilla määritellyt, on mahdollista suorittaa tarkoituksenmukaisuustarkastelu. Valaistuksen tehokkuutta arvioidaan määrittämällä valaistushyötysuhde. Hyötysuhde on valaistavan alueen pinta-alueen (A) ja tavoitevalaistustason (E_m) tulon suhde kohteessa käytettävien valaisimien lamppujen tuottamaan valovirtaan (θ) /17/.

Valaistuksen hyötysuhde:

$$\eta = \frac{E \cdot A}{\theta} \quad (1)$$

θ = lamppujen tuottama valovirta

E= tavoiteltu valaistusvoimakkuuden keskiarvo

A= valaistavan alueen pinta-ala

η = hyötysuhde (= η valaisin x η valaistus)

η valaisin = valaisinvalmistajan ilmoittama optiikan tehokkuutta kuvaava arvo

η valaistus = valaistusasennuksen tehokkuutta kuvaava hyötysuhde

Valaistuksen hyötysuhteelle η asetettavat tavoitearvot:

Taso I 0,25 – 0,3 (minimitaso)

Taso II 0,3 – 0,4 (tavoitetaso)

Taso III > 0,4 (hyvä)

Pienillä alueilla valaistuksen hyötysuhde on huonompi, koska valaistavan alueen ulkopuolelle ohjautuu käytännössä valoa suhteessa enemmän. Pienillä alueilla ongelmana saattaa olla myös tarkoitukseen soveltuvan valaisinlaitteiston saataavuus. Käyttöalueilla, joilla valaistuksen tavoitetaso on alhainen, riittävän tasaisuuden saavuttaminen heikentää käytännössä valaistuksen hyötysuhdetta. Pienillä alueilla ja alhaisilla valaistustasoilla Taso I on myös tulkittava hyväksi.

Valaistukseen käytettävän tehon rajaamiseksi tulee käytettävien lamppujen valotehokkuuden olla riittävän suuri. Taulukossa 3 on esitetty EuP-direktiivin 2005/32; Working document on possible Ecodesign requirements for Public Street Lighting, purkauslampuilta vaadittavia lamppujen valotehokkuusarvoja. Taulukon valotehokkuuden minimivaatimukset on esitetty tievalaistuksessa käytettäville lamppuille, mutta ne ovat sovellettavissa myös aluevalaistuksessa, ja niitä ei tule alittaa. Tehokkuusarvojen tulee täytyä teholuokittain myös kaikilla muilla käyttöön otettavilla valonlähteillä.

Taulukko 3. Valonlähteiden valotehokkuusvaatimukset /17/.

Tehoalue / W	Valotehokkuus lm/W
1000 < W < 2000	85
400 < W < 1000	80
125 < W < 400	75
70 < W < 120	70
50 < W < 70	65
50 < W	55

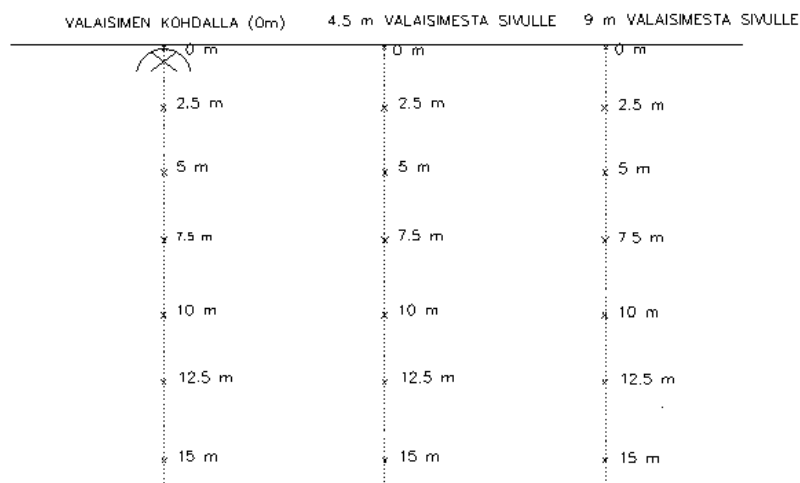
Valotehokkuusarvot ovat saatavissa lampunvalmistajilta lampputyypeittäin ja -tehoittain. Esim. markkinoilla olevien 400 W suurpainelamppujen valotehokkuus on yli 135 lm/W lampun nimellisteholla ilmoitettuna. Tällöin ei ole huomioitu valaisimessa olevien liitäntälaitteiden aiheuttamia tehohäviöitä. Käyttöön otettavien lamppujen valotehokkuus on suoraan verrannollinen valaistuksen energiatehokkuuteen /17/.

7 MITTAUKSET JA TULOSTEN TARKASTELO

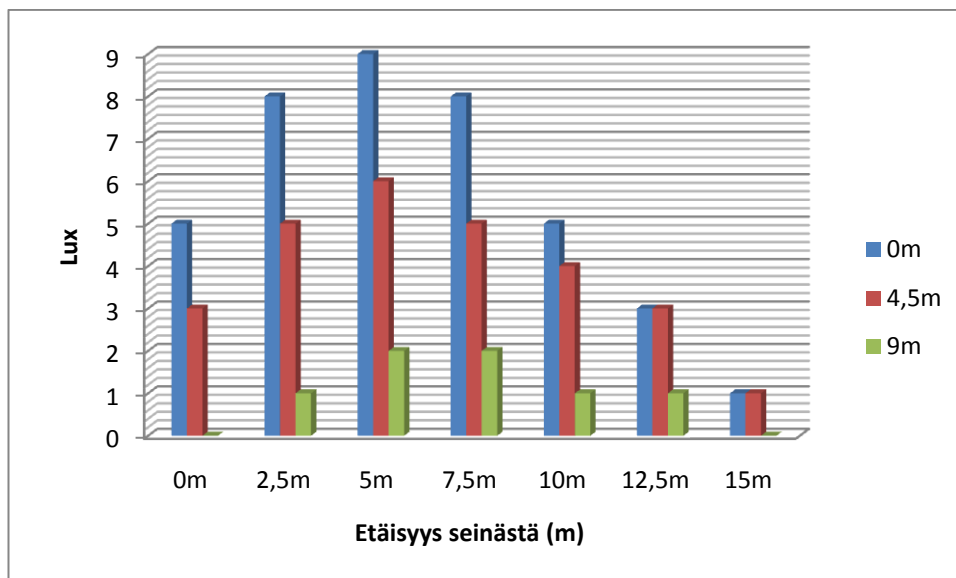
Valaistusvoimakkuuden mittaukset suoritin Mäkelä Alu Oy:n teollisuusalueella. Koska Mäkelä Alu oli kiinnostunut valaisemaan osan alueesta LED-valaisimilla, käytin vertailussa heillä jo olemassa olevia 400 W:n elohopealamppuvalaisimia ja Artequa-nimisen yrityksen valmistamia Ecovalo-valaisimia (50 W). **Valaisutapa seinältä yhdeksän metrin korkeudelta.** Tavoitteena oli rajata valo ja minimoida hukka- ja häiriövalon määrä ja tietenkin säästöt kustannuksissa. Tavoite valaistusvoimakkuus oli 5–10 luxia. Mittaukset suoritin lux-mittarilla, 1 metrin korkeudelta maan pinnasta. Ilma oli tumma ja sateinen 20.4.2009.

MITTAUSPISTEET

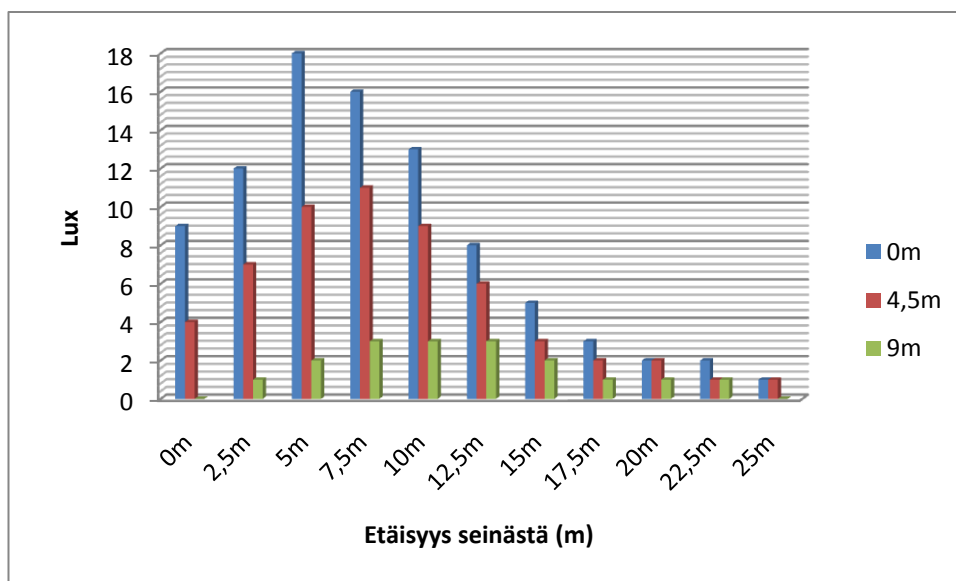
Valaisin seinällä 9m korkeudella



Kuva 10. Mittauspisteet.

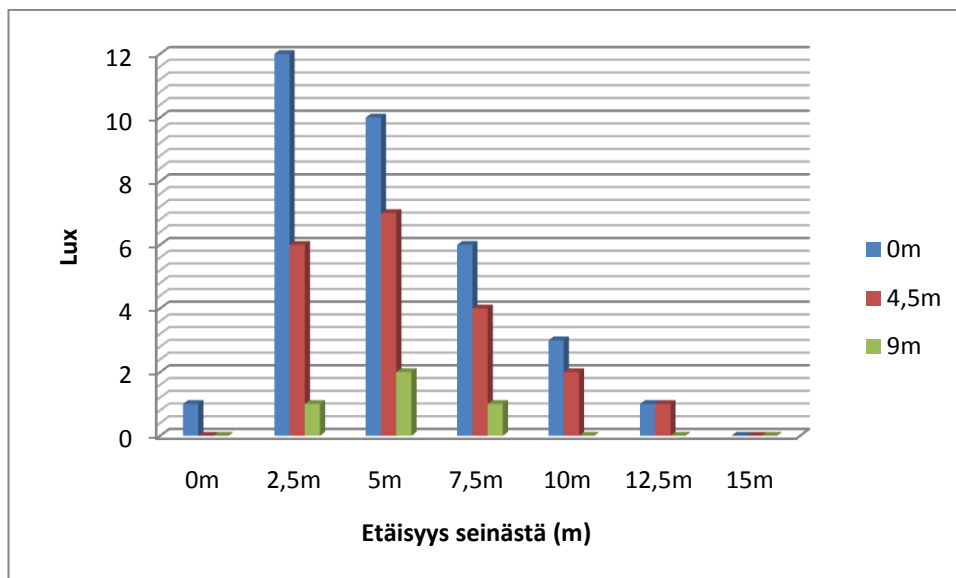


Kuva 11. Elohopealamppuvalaisin 400 W. Lamppua käytetty noin 16 000 h.

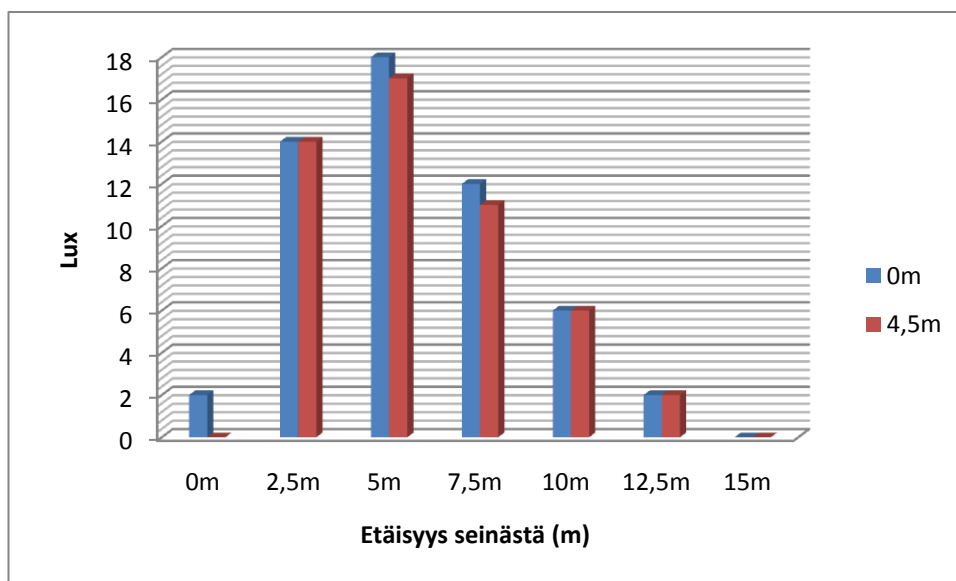


Kuva 12. Elohopealamppuvalaisin 400 W. Lamppu uusi.

Kuten kuvista 11 ja 12 näemme, neljän vuoden käytössä valaistusvoimakkuus on pudonnut elohopealamppussa jo n. 50 %. Eli lampun vaihtoväliksi 16 000 h on liian pitkä. **Mittauksissa on otettava huomioon elohopealamppuvalaisinten virheellinen suuntaus, joka osaltaan heikentää valaistusvoimakkuutta.**



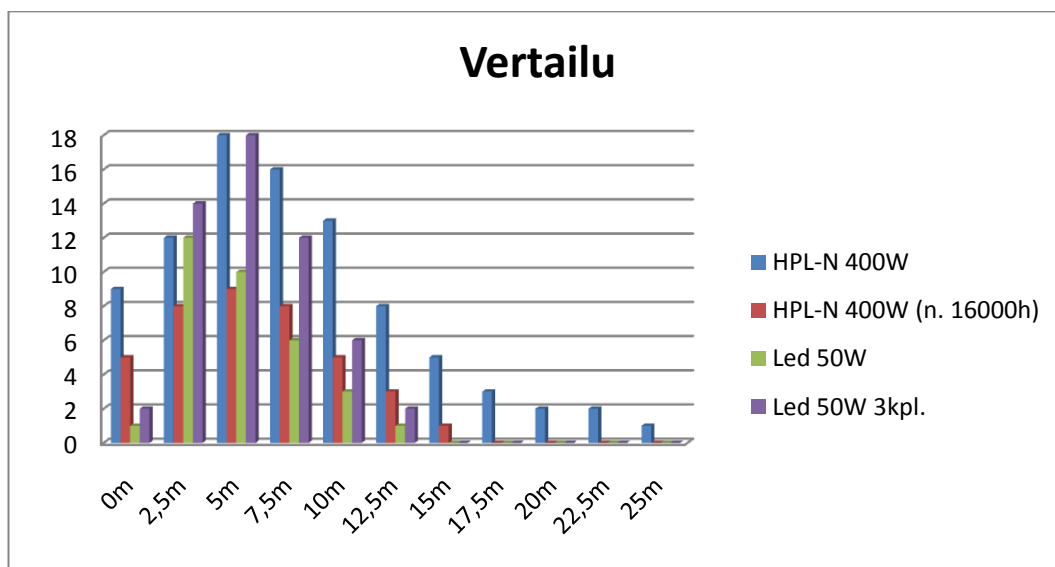
Kuva 13. ECOVALO-valaisin, 50 W.



Kuva 14. ECOVALO-valaisin 50 W, 3kpl.

Kuten kuvista 13 ja 14 huomaamme että ECOVALO-valaisin rajaa valon tarkasti. Maassa 15 metrin päässä on tarkka raja. Valaisimen linssioptiikka rajaa valon tarkasti vain halutulle alueelle. Tuhlaavaa häiriövaloa ei esiinny. LED-valaisimilla pääsimme tavoitteeseen. (Valaistavalla alueella keskimäärin 5–10 luxia) Valaistusvoimakkuuden huippu kolmella LED-valaisimella (yht. 150 W) vastaa eloho-

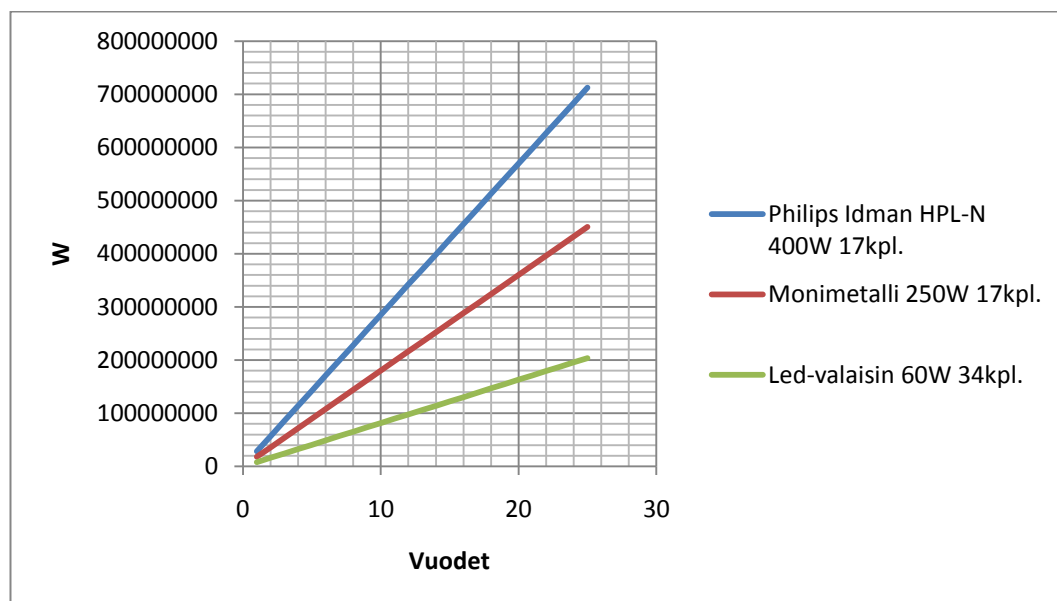
pealamppuvalaisinta (400 W). Kuvassa 15 on kaikkien valaistusvoimakkuudet vertailussa.



Kuva 15. Kaikki vertailussa. Mittaukset suoraan valaisimen kohdalta.

8 KUSTANNUSLASKELMAT JA TULOSTEN TARKASTELU

Kustannusvertailussa laskin sähkön kulutukset ja kustannukset sekä kokonaiskustannukset, joissa on mukana myös valaisinten hankintahinnat (paitsi elohopealamppuvalaisimissa, koska niitä on Mäkelä Alulla jo valmiiksi). Valaistavan alueen koko ja valaisimien asennusetäisyys (LED-valaisin 9 m, elohopea- ja monimetallilamppuvalaisin 18 m) huomioon ottaen valaisinten määrät olisivat seuraavat. Elohopealamppuvalaisin 400 W 17 kpl. Monimetallilamppuvalaisin 250 W 17 kpl. Ecovalo-valaisin 60 W 34 kpl. **Käyttötunnit 4 000 h vuodessa. Energian hinta 0.08 euroa/kWh.**



Kuva 16. Sähkönkulutus.

Valaisinten sähkönkulutus P_t (kuva 16) saadaan kaavalla:

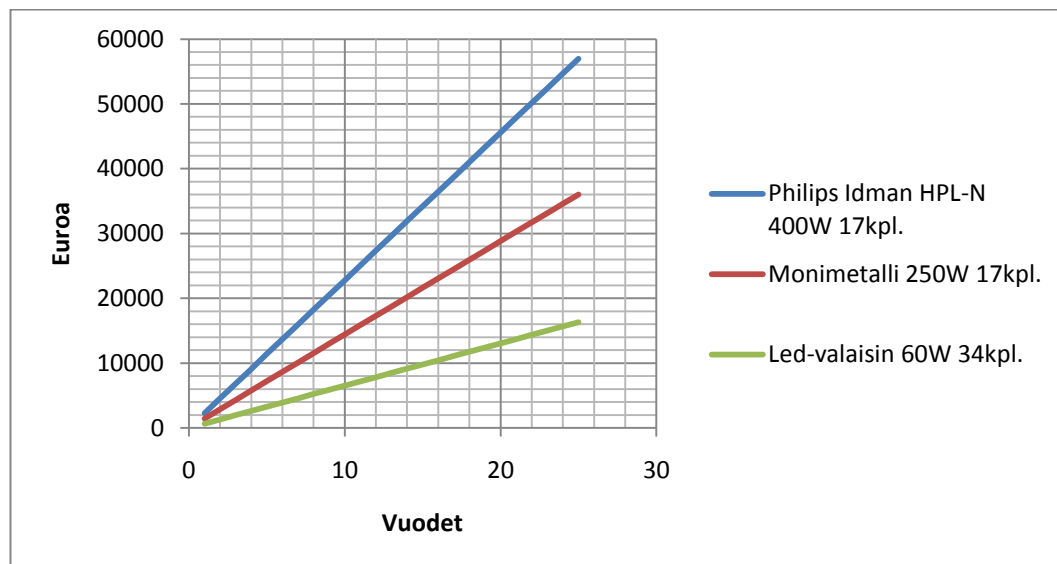
n = Valaisinten lukumäärä

P = Valaisimen todellinen ottoteho

T = Polttotunnit (4000h/v)

$$P_t = P \cdot T \cdot n \quad (2)$$

Kuvasta 16 huomaamme, että elohopealamppuvalaisinten sähkönkulutus 25 vuodessa on 712,3 MW/h. Monimetallilamppuvalaisinten sähkönkulutus on 450,5 MW/h. Ecovalo-valaisinten sähkönkulutus on 204 MW/h (kts. liite 4).



Kuva 17. Sähkötaloudet

Valaisimien käyttämän sähkön kustannukset (kuva 17) saadaan kaavalla:

n = Valaisinten lukumäärä

P = Valaisimen todellinen ottoteho (kW)

T = Polttotunnit (4000h/v)

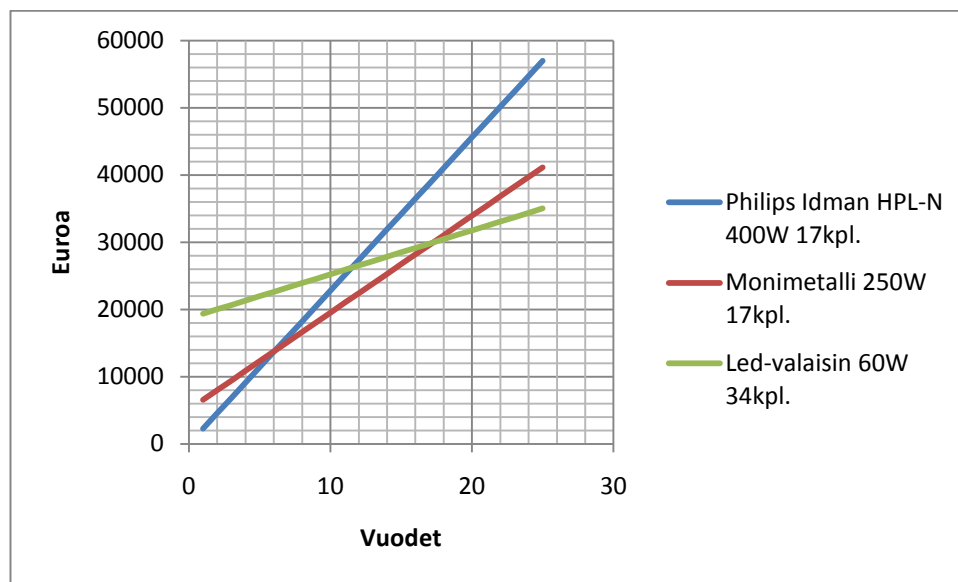
e = Energian hinta (0.08 euroa/kWh)

$$\text{Sähkötaloudet} = P \cdot (\text{kW}) \cdot T \cdot n \cdot e \quad (3)$$

tai kaavalla:

$$\text{Sähkötaloudet} = P_t \cdot (\text{kW}) \cdot e \quad (4)$$

Kuvasta 17 huomaamme, että elohopealamppuvalaisinten sähkökustannukset 25 vuodessa ovat 56984 euroa. Monimetallilamppuvalaisinten sähkökustannukset ovat 36040 euroa. Ecovalo-valaisinten sähkökustannukset ovat 16320 euroa (kts. liite 5).



Kuva 18. Kokonaiskustannukset

Valaisinten kokonaiskustannukset (kuva 18) saadaan kaavalla:

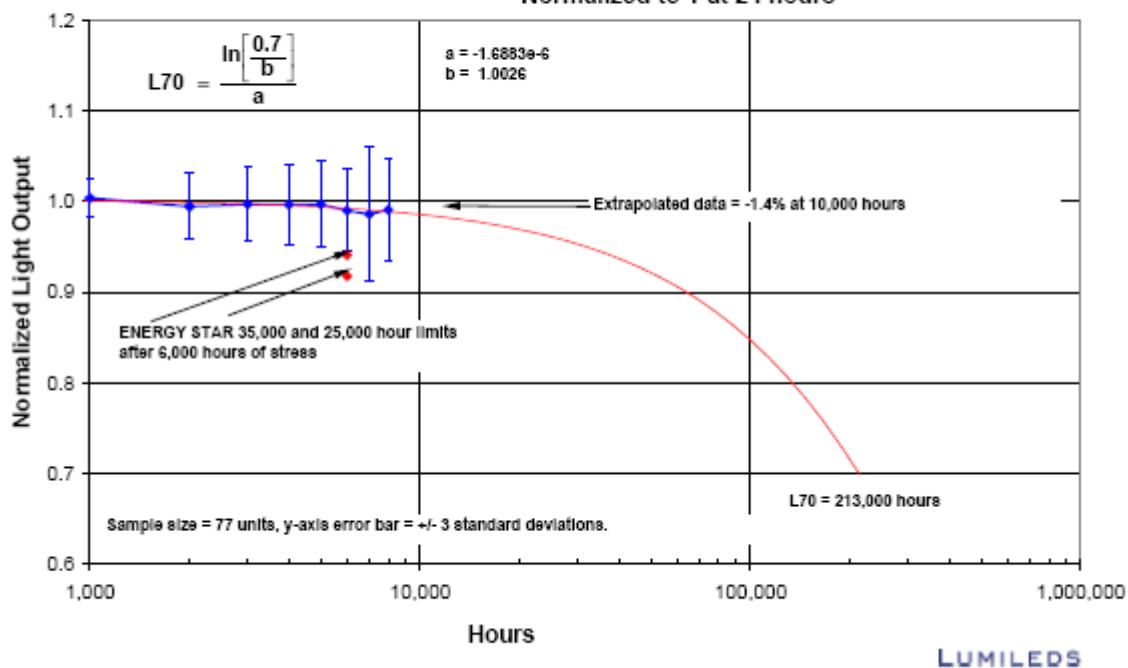
$$\text{Kokonaiskustannukset} = \text{Sähkökustannukset} + \text{Hankintahinta} \quad (5)$$

Kuvassa 18 on otettu huomioon myös valaisinten hankintahinnat. Monimetallilamppuvalaisin- 250 W, 300 euroa, Ecovalo- 60 W, 550 euroa. Elohopealamppuvalaisimissa ei hankintahintaa otettu huomioon, koska 17 kappaletta löytyy omasta varastosta. Vaikka LED-valaisimet ovat hinnaltaan vielä kalliita, maksaa ne kuitenkin pienen tehonsa vuoksi itsensä takaisin kohtuullisen nopeassa ajassa. Kuvasta 18 huomaamme että elohopealamppuvalaisinten kokonaiskustannukset 25 vuodessa ovat 56 984 euroa. Monimetallilamppuvalaisinten kustannukset ovat 41 140 euroa. Ecovalo-valaisinten kustannukset ovat 35 020 euroa (kts. liite 6). Aikajanaksi on otettu 25 vuotta, eli 100 000 tuntia. **Huomioitava on myös lampujen vaihdoista aiheutuvat kustannukset.** Purkauslampujen taloudellisena polttoikänä voidaan pitää n. 3:a vuotta, eli 12 000:tta tuntia, joten lamput pitäisi

vaihtaa 8 kertaa tässä ajassa, kun taas LED-valonlähteiden pitäisi kestää tämä aika, vieläpä suhteellisen pienellä valovirran alenemalla (kuva 19). Led-valaisinten huoltoväli on kuitenkin 50 000-60 000 h jolloin komponentit tarkastetaan ja tarvittaessa vaihdetaan.

PHILIPS

**80 lm Cool-White LUXEON Rebel stressed at 55°C, 0.35A
(T_{junction} ≅ 68°C)
Normalized to 1 at 24 hours**



Kuva 19. Ledin valovirran alenema.

9 YHTEENVETO JA RATKAISUT

Mäkelä Alu Oy:n aluevalaistus on toteutettu elohopealamppuvalaisimilla. Koska elohopealamppujen markkinoille tulo kielletään vuoden 2015 jälkeen, otettiin myös tämä seikka huomioon valaistuksen suunnittelussa. Alustavassa kokeilussa meillä oli käytössä viisi kappaletta 50 W:n Led-valaisinta, joilla valaistusvoimakkuus mittaukset suoritettiin. Valaistavalla alueella päästiin tavoitteeseen 5–10 luxia (Suositukset ja K-Luokat liitteissä 2 ja 3). LED-valaisin rajaa valon tarkasti halutulle alueelle, ja kuten tällä alueella, valaistava alue on n. 15m leveä, joten on turha valaista alueen takana olevaa metsää. Energiansäästölaskelmien ja valaistusvoimakkuusmittausten perusteella Mäkelä Alu Oy hankki 34 kappaletta Led-valaisimia. Koska LED-tekniikka kehittyi huimaa vauhtia, oli tästäkin valaisimesta puolella vuodessa kehittynyt uusi, valovirraltaan n. 25 % parempi 60 watin tuotantoversio. Mittaukset siis suoritettiin vanhalla tuotantoversiolla. Asennuspaikat selviää liitteestä 1. Kuvassa 20 näemme aluevalaistustoteutuksen LED-valaisimilla.



Kuva 20. Led-valaistusta.

Laajempaa ja tehokkaampaa valaistusta tarvitsevat alueet valaistiin pylväistä (kuva 21). Alueelle tuli kahdeksan kymmenen metrin korkuista pylvästä, joissa kussakin 3 kappaletta 250 watin monimetallilamppu-valaisinta. Näillä alueilla valaistusvoimakkuus on parhaillaan n. 50 luxia.



Kuva 21. Monimetallilamppu-valaisimet.

Vanhat elohopealamppu-valaisimet olivat suunnattu virheellisesti joissakin paikoissa yli 45 asteen kulmaan (kuva 22), joten suuntasimme ne epäsymmetriselle valaisimelle suositeltuun 15 asteen kulmaan ja joissakin paikoissa jopa vaakatasoon. Häikäisy väheni huomattavasti ja valotehokkuus alueella parani. **Oikein suuntaamalla valaistuksen voimakkuus parani jopa 15 luxia!**



Kuva 22. Epäsymmetriset valaisimet ”väärin” suunnattuna.

Kuten edellä mainitaan, elohopealamput kielletään vuoden 2015 jälkeen. Aloitamme vähitellen näiden 400 wattisten elohopealamppujen vaihtamisen 250 wattiin monimetallilamppuihin, jolloin energiakustannukset pienenevät ja valotehokkuus paranee /6/. Myös taloudellinen polttoikä pitenee. Koska vanhojen valaisinten rungot ovat vielä hyviä ja käyttökelpoisia ja optiikka näissä Philipsin-valaisimissa on hyvä, emme vaihda koko valaisinta, vaan kuristimen ja lisäämme näihin valaisimiin sytyttimet, jolloin niissä voidaan käyttää 250 watin monimetallilamppua.

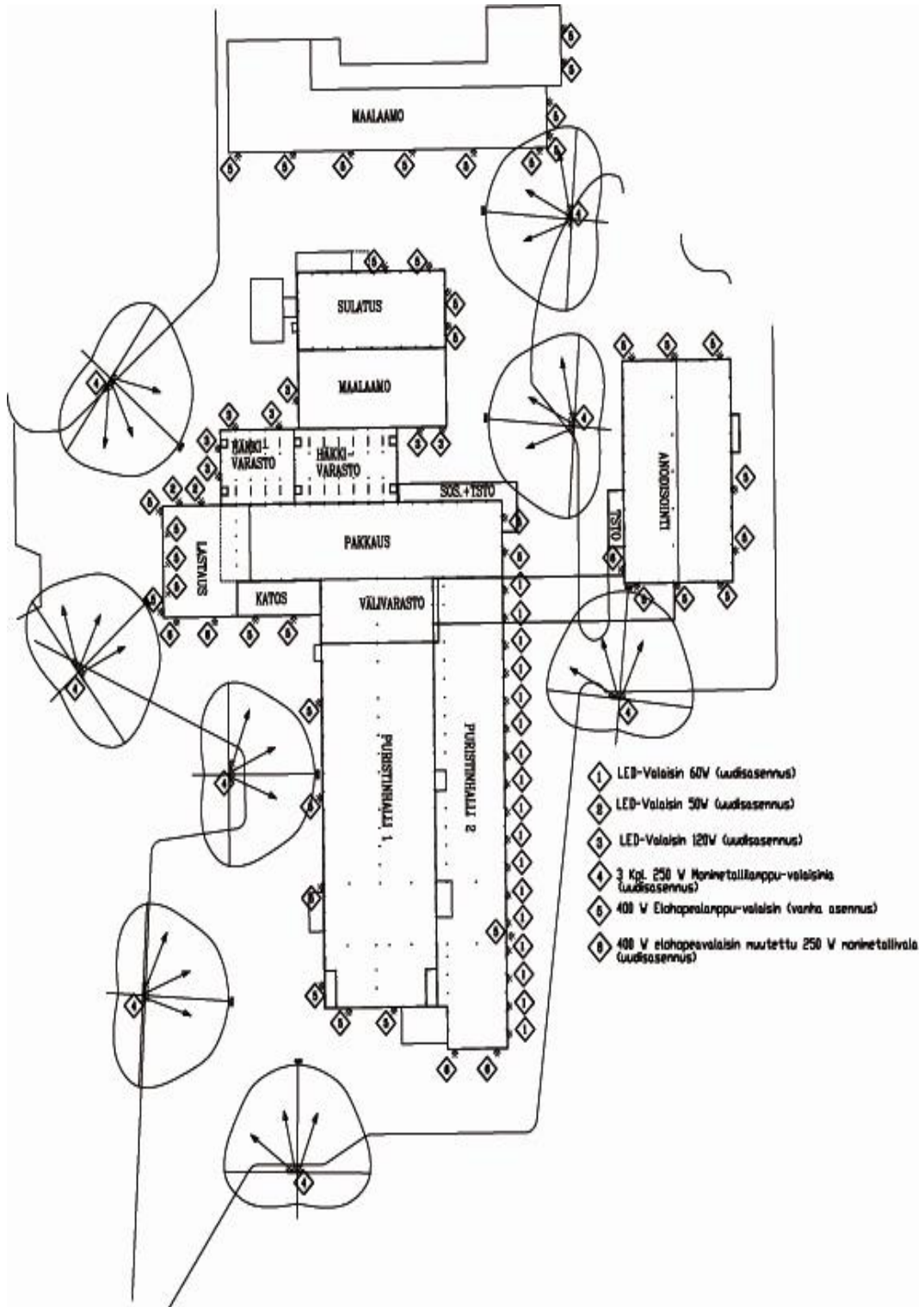
Tällä hetkellä ulkovalaistuksia ohjataan valvontakeskuksissa (VAK) olevilla kellokytkimillä. Valvontakeskuksia tehdasalueella on kaikkiaan seitsemän, ja kaikissa keskuksissa on ulkovalaistusohjauksia. Joten, pimeän ajan muuttuessa eri vuodenaikoina, on työlästä pitää kellot ajan tasalla ja valaistukset päällä vain pimeän aikana. Nämä kellokytkimet korvataan valoisuusmittarilla, joka pitää valot päällä vain kun niitä tarvitaan. Tälläkin saadaan aikaan säästöä energiakustannuksissa.

LÄHTEET

- /1/ ABB:n TTT-KÄSIKIRJA 2000-07 Luku 21: Valaistustekniikka
- /2/ ARTEQUA Led-Lighting [www-sivu].[viitattu 05.03.2010] Saatavissa:
http://www.artequa.com/suomi/Ecovalo_valaisin5.html
- /3/ Braunstein, Rubin (1955). ""Radiative Transitions in Semiconductors"". *Physical Review* **99**: 1892-3. [viitattu 15.03.2010] Saatavissa: http://prola.aps.org/abstract/PR/v99/i6/p1892_1
- /4/ Brief Biography – Holonyak, Craford, Dupuis (PDF). Technology Administration. [viitattu 15.03.2010] Saatavissa:
http://www.technology.gov/Medal/2002/bios/Holonyak_Craford_Dupuis.pdf
- /5/ EASY LED OY Prof. Aulis Tuominen. Turun Yliopisto [www-sivu].[viitattu05.03.2010]
 Saatavissa:http://www.led1.fi/led_teknologia.html
- /6/ GE Lighting Energiatehokas Tie- Ja Katuvalaistus Esite- Tammikuu 2009
- /7/ High pressure sodium lamps 1997. Pacific Gas and Electric Company. [viitattu 05.03.2010] Saatavissa:
http://www.lightingassociates.org/i/u/2127806/f/tech_sheets/High_Pressure_Sodium_Lamps.pdf
- /8/ INNOJOK OY Valaistussuunnittelu [www-sivu].[viitattu 05.03.2010] Saatavissa: <http://innojok.fi/valaistuss/index2.php?sivu=46>
- /9/ Kivelä, Juha. Hehkulamppujen kieltämisen vaikutukset energian käytössä (pdf). Tutkintotyö 2009. TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

- /10/ LIMIC OY [www-sivu].[viitattu 05.03.2010] Saatavissa: <http://www.limic.fi>
- /11/ Low pressure sodium lamps Lighting Systems.[viitattu 05.03.2010] Saatavissa: <http://tristate.apogee.net/lite/lhilphw.asp>
- /12/ LUMILAB Led-teknologia [www-sivu].[viitattu 05.03.2010] Saatavissa: <http://www.lumilab.fi/index.php/fi/teknologia>
- /13/ Nick Holonyak, Jr. 2004 Lemelson-MIT Prize Winner. Lemelson-MIT Program. [viitattu 15.03.2010] Saatavissa: <http://web.mit.edu/invent/a-winner/a-holonyak.html>
- /14/ OSRAM [www-sivu].[viitattu 12.04.2010] Saatavissa: http://www.osram.fi/osram_fi/Professional/General_Lighting/High_pressure_discharge_lamps/index.html
- /15/ SARMALUX LED-valaistus [www-sivu].[viitattu 05.03.2010] Saatavissa: <http://www.ledivalot.fi/LED`laaja.pdf>
- /16/ SSTL-Suomen sähkötukuliikkeiden liitto.[www-sivu].[viitattu 15.03.2010] Saatavissa: <http://www.sstl.fi/viestinta/esityksiae/555-eup-direktiivi-ohjaa-valistuneisiin-valaistusuudistuksiin-toimistoissa-kouluissa-myymaeloeissae-teollisuudessa-ja-ulkoalueilla.html>
- /17/ SUOMEN VALOTEKNILLINEN SEURA RY Valaistushankintojen energiatehokkuus. Taustaraportti Versio 4.0 Toukokuu 2008.
- /18/ SÄHKÖMIEHEN KALENTERI 2010 Kustantaja: Suomen kalenterit Oy
- /19/ Tekniikka-info[www-sivu].[viitattu 03.05.2010]
Saatavissa:<http://www.tekniikka.info/?page=hakusanaluettelo&acolor=EAEEAE&bcolor=FFFFFF&ID=4e298adcc2abdc2964ea870d9c38dfad>

- /20/ The first LEDs were infrared (invisible). The Quartz Watch. The Lemelson Center. [viitattu 15.03.2010] Saatavissa:
<http://invention.smithsonian.org/centerpieces/quartz/inventors/biard.html>
- /21/ Tievalaistuksen suunnittelu 24.4.2006. Tiehallinto.(PDF) [viitattu 05.03.2010] Saatavissa:http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100034-v-06tievalaist_suunn.pdf
- /22/ Valaisimet Luminord-seminaari 22.2.2007. Markku Varsila[www-sivu].[viitattu24.10.2007]Saatavissa:<http://www.nssoy.fi/lumi/Luminord%20seminaari%202007.pdf>
- /23/ Wikipedia [www-sivu].[viitattu 03.05.2010] Saatavissa:<http://fi.wikipedia.org/wiki/Katuvalo>
- /24/ Wolinsky, Howard. "U. of I.'s Holonyak out to take some of Edison's luster", *Chicago Sun-Times*, 5. helmikuuta 2005. [viitattu 15.03.2010] Saatavissa:
http://findarticles.com/p/articles/mi_qn4155/is_20050202/ai_n9504926/
- /25/ Zheludev, N. (2007). "The life and times of the LED — a 100-year history" (PDF). *Nature Photonics* **1** (4): 189–192. [viitattu 15.03.2010] Saatavissa: <http://www.nanophotonics.org.uk/niz/publications/zheludev-2007-ltl.pdf>



Näkötehtävä		Valaistusvoimakkuus $E_{hor} (lx)$
Luokka	Tyypillinen esimerkki	
Turvallisuus		
Alhainen riski	Teollisuusvarastot, satunnainen liikenne	5
Keskimääräinen riski	Konttiterminaalit, säännöllinen liikenne	20
Suuri riski	Öljynjalostus, sähköasemat, kaasuasemat	50
Liikenne		
Jalankulku	Vain henkilöliikenne	5
Hitaat kulkuneuvot	Trukkiliikenne	10
Normaali liikenne	Konttiterminaalit ja vastaavat	20
Työskentely		
Erittäin karkea työ	Kaivuu, rakennustyömaiden yleisvalaistus	20
Karkea työ	Puunkäsittely	50
Normaali työ	Muuraus, rakennustyöt	100
Tarkka työ	Maalaus, sähkötyöt	200

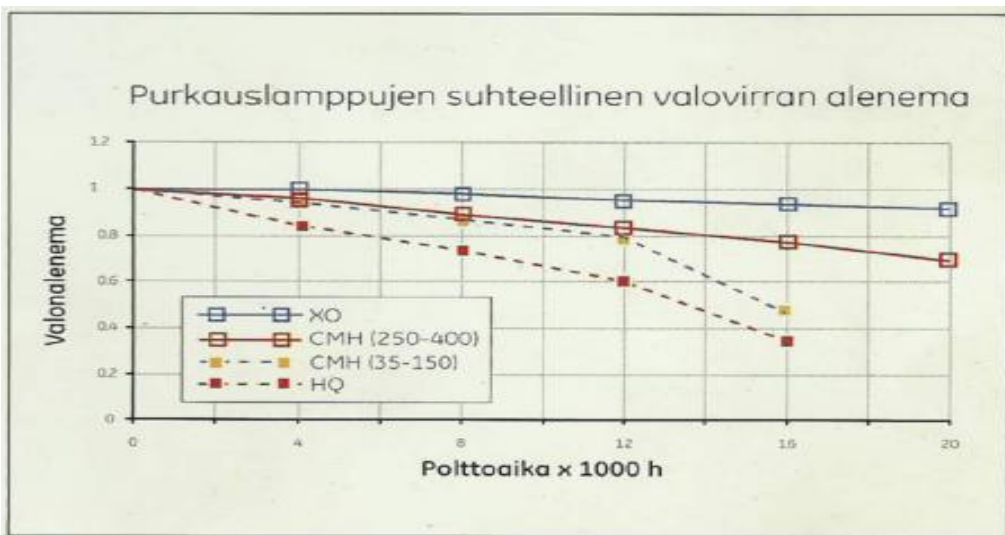
VÄYLÄ TAI ALUE	VALAISTUSLUOKKA	KESKIMÄÄRÄINEN VAAKATASON VALAISTUSVOIMAKKUUS lux, min
KÄVELYKADUT		
Kaupungin keskusta		
- vain kevytliikenne	K2	10
- huoltoajo sallittu	K1	15
Kaupungin muut alueet		
- vain kevytliikenne	K3	7,5
- huoltoajo sallittu	K2	10
Maaseututaajamat		
- vain kevytliikenne	K3, K4	7,5 tai 5
- huoltoajo sallittu	K2	10
HIDAS- JA PIHAKADUT		
- vilkkaat	K2	10
- vähätoimintaiset	K4, K5	5 tai 3
JALANKULKUALUEET		
- keskustassa, torit ja aukiot	K1, K2	15 tai 10
PYSÄKÖINTIALUEET		
- vilkkaat	K3	7,5
- vähäliikenteiset	K4	5
ULKOILUTIET		
- puistokäytävät	K3	7,5
- hiihtoladut, pururadat	K4, K5	5 tai 3
ERILLISET KEVYEN LIIKENTEEN TIET		
- vilkkaat	K4	5
- vähäliikenteiset	K6	2

v.	Elohopeavalaisin 400W(419W) 17kpl.	Monimetallivalaisin 250W(265W) 17kpl.	Led-valaisin 34kpl. 60W
1	28492000	18020000	8160000
2	56984000	36040000	16320000
3	85476000	54060000	24480000
4	113968000	72080000	32640000
5	142460000	90100000	40800000
6	170952000	108120000	48960000
7	199444000	126140000	57120000
8	227936000	144160000	65280000
9	256428000	162180000	73440000
10	284920000	180200000	81600000
11	313412000	198220000	89760000
12	341904000	216240000	97920000
13	370396000	234260000	106080000
14	398888000	252280000	114240000
15	427380000	270300000	122400000
16	455872000	288320000	130560000
17	484364000	306340000	138720000
18	512856000	324360000	146880000
19	541348000	342380000	155040000
20	569840000	360400000	163200000
21	598332000	378420000	171360000
22	626824000	396440000	179520000
23	655316000	414460000	187680000
24	683808000	432480000	195840000
25	712300000	450500000	204000000

v.	Elohopeavalaisin 400W(419W) 17kpl.	Monimetallivalaisin 250W(265W) 17kpl.	Led-valaisin 34kpl. 60W
1	2279	1441	652
2	4558	2883	1305
3	6838	4324	1958
4	9117	5766	2611
5	11396	7208	3264
6	13676	8649	3916
7	15955	10091	4569
8	18234	11532	5222
9	20514	12974	5875
10	22793	14416	6528
11	25072	15857	7180
12	27352	17299	7833
13	29631	18740	8486
14	31911	20182	9139
15	34190	21624	9792
16	36469	23065	10444
17	38749	24507	11097
18	41028	25948	11750
19	43307	27390	12403
20	45587	28832	13056
21	47866	30273	13708
22	50145	31715	14361
23	52425	33156	15014
24	54704	34598	15667
25	56984	36040	16320

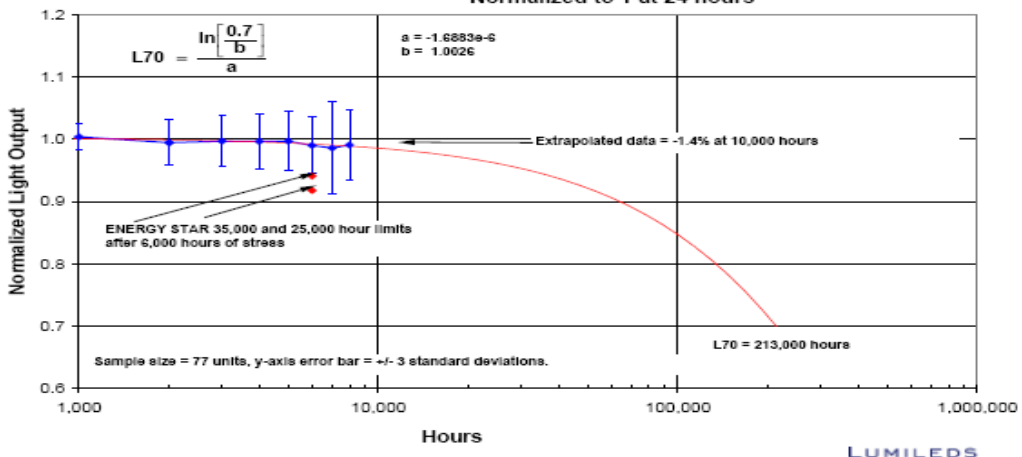
v.	Elohopeavalaisin 400W(419W) 17kpl.	Monimetallivalaisin 250W(265W) 17kpl.	Led-valaisin 34kpl. 60W
1	2279	6541	19352
2	4558	7983	20005
3	6838	9424	20658
4	9117	10866	21311
5	11396	12308	21964
6	13676	13749	22616
7	15955	15191	23269
8	18234	16632	23922
9	20514	18074	24575
10	22793	19516	25228
11	25072	20957	25880
12	27352	22399	26533
13	29631	23840	27186
14	31911	25282	27839
15	34190	26724	28492
16	36469	28165	29144
17	38749	29607	29797
18	41028	31048	30450
19	43307	32490	31103
20	45587	33932	31756
21	47866	35373	32408
22	50145	36815	33061
23	52425	38256	33714
24	54704	39698	34367
25	56984	41140	35020

	<u>Monimetallilamppu</u>	<u>Suurpainenatriumlamppu</u>	<u>Elohopealamppu</u>	<u>Led</u>
Lm/W	80-105	80-150	36-60	>100
Polttoikä h	12000-20000	28500-55000	12000-24000	60000-120000
Taloudellinen polttoikä v	2-4	4-6	2-3	15-30
Värintoisto Ra	80-93	25	42-52	70-90
Valovirran pysyvyys	75 %	90 %	55-60%	>70%
Väriämpötila K	3000, 4200	2000	3500, 4000	3000,4500,6500



PHILIPS

**80 lm Cool-White LUXEON Rebel stressed at 55°C, 0.35A
(Tjunction ≅ 68°C)
Normalized to 1 at 24 hours**



MITTAUSPISTEET

Valoisiin seinillä 9m korkeudella

