



Päällysteen heijastusominaisuuksien vaikutukset katuvalaistuksen suunnitteluun Tampereen kaupungin alueella

Juuso Woivalin

OPINNÄYTETYÖ
Tammikuu 2021

Talotekniikan koulutus
Sähköinen talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutus
Sähköinen talotekniikka

WOIVALIN, JUUSO:

Päällysteen heijastusominaisuuksien vaikutukset katuvalaistuksen suunnitteluun Tampereen kaupungin alueella

Opinnäytetyö 54 sivua, joista liitteitä 8 sivua
Tammikuu 2021

Työn taustalla on vuonna 2017 tehty teiden ja katujen päällysteiden mittaukset. Mittausten tuloksista huomattiin, että nykyinen valaistuksen mitoituksessa käytössä oleva ajoradan päällysteluokka R2 vastaa melko huonosti todellisuutta Tampereen kaupungin katujen kohdalla. Mittaustulosten perusteella nykyiset päällysteet vastaisivat ominaisuuksiltaan paremmin päällysteluokkaa R3.

Tavoitteena oli tutkia, mitä vaikutuksia päällysteluokan muuttamisella luokasta R2 luokkaan R3 olisi valaistusteknisessä laskennassa ja mitä seurauksia mahdollisilla käytännön muutoksilla olisi valaistuksen energia- ja rakennuskustannuksiin.

Tutkimus toteutettiin siten, että valittiin Tampereen kaupungin alueelta yleisimpiä katujen poikkileikkauksia kustakin katuluokasta. Laskelmia tehtiin kolmen eri valmistajan valaisimilla, jotta saataisiin selville, onko eri valmistajien valaisinten kesken merkittäviä eroja. Jokaiselle poikkileikkaukselle tehtiin laskelmat kummallakin päällysteluokalla, ja lopuksi vertailtiin tuloksia keskenään.

Laskelmien perusteella huomattiin, että päällysteluokan muutoksella luokasta R2 luokkaan R3 on selkeä vaikutus katuvalaistukseen. Päällysteluokan muuttuessa enimmäispylväsvälit pienenevät noin 4–9%. Enimmäispylväsvälin pienentyessä valaistuslaitteiden määrä kasvaa. Rakenteiden määrän kasvu vaikuttaa energia- ja rakennuskustannuksiin, kasvattaen niitä. Päällysteluokan muuttuessa luokasta R2 luokkaan R3 myös valaistustekniset ominaisuudet muuttuvat merkittävästi. Päällysteluokan muuttuessa keskimääräinen luminanssi laskee keskimäärin 6,5%, luminanssin yleistasaisuus laskee keskimäärin 11,5% ja luminanssin pitkäaistaisuus laskee keskimäärin 3,3%.

Valaistusta päästään kuitenkin harvoin toteuttamaan kauttaaltaan enimmäispylväsvälillä. Usein on esimerkiksi tonttiliittymiä tai liittymäalueita, jotka pakottavat käyttämään lyhyempää pylväsväliä.

Asiasanat: katuvalaistus, päällysteluokka, valaistuslaskenta

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
Electrical Building Services Engineering

WOIVALIN, JUUSO:

The Effects of the Road Surfaces Reflection Properties on Planning Street Lighting in Tampere City Area

Bachelor's thesis 54 pages, appendices 8 pages
January 2021

The background of the work is the measurements of road surfaces made in 2017. From the results of the measurements, it was noticed that the current road surface class R2 of the roadway used in lighting dimensioning corresponds quite poorly to the reality. Based on the measurement results, the current road surfaces would better correspond to the road surface class R3.

The objective was to examine the effects of changing the road surface class from R2 to R3 in the lighting calculation and to see what kind of consequences the possible changes could have on the energy and construction costs.

The study was carried out by observing some of the most interesting and common street cross-sections in the Tampere city area. Luminaires from three different manufacturers were included in the calculations in order to find out whether there were significant differences between different manufacturers.

Based on the calculations, it was found that the change in the road surface class had a clear effect on street lighting. As the road surface class changes, the maximum column spacing decreases by about 4–9%. As the maximum column spacing decreases, the number of lighting structures increases. The increase in the number of structures affects energy and construction costs by increasing them. As the road surface class changes from class R2 to class R3, the lighting technical properties also change significantly. As the road surface class changes, the average luminance decreases by an average of 6,5%, the overall luminance uniformity decreases by an average of 11,5%, and the longitudinal luminance uniformity decreases by an average of 3,3%.

It is seldom possible to implement lighting throughout the maximum column spacing because there may be site accesses and intersection areas that force to use a shorter column spacing.

Key words: streetlighting, coating class, lighting calculation

SISÄLLYS

| | | |
|---|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 8 |
| 2 | PÄÄLLYSTELUOKAT JA NIIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT | 10 |
| | 2.1 Luminanssikertoimen määrittäminen..... | 10 |
| | 2.2 Päälysteiden luokittelu..... | 12 |
| | 2.3 Päälysteluokat maailmalla | 14 |
| | 2.4 Päälysteluokat Suomessa | 15 |
| | 2.5 Päälysteen heijastavuuteen ja vaaleuteen vaikuttavat tekijät | 17 |
| 3 | LASKENTAMENETELMÄT | 19 |
| | 3.1 Laskentaohjelmat | 19 |
| | 3.1.1 DIALux Evo | 19 |
| | 3.1.2 Relux | 19 |
| | 3.2 Valaistusluokat..... | 20 |
| | 3.3 Valonjakotiedostot..... | 21 |
| | 3.4 Valaisimen tyyppi | 21 |
| | 3.5 Pylvään ominaisuudet | 22 |
| 4 | VALAISTUSTEKNILLISET LASKELMAT..... | 23 |
| | 4.1 R-luokan sekä valaisimen sijainnin muuttaminen..... | 23 |
| | 4.2 Valaisimen valinta | 24 |
| | 4.3 Tarkasteltavat poikkileikkaukset..... | 25 |
| 5 | VALAISTUSLASKELMIEN TULOKSET..... | 30 |
| | 5.1 Päälysteluokan muuttamisen vaikutukset valaistusteknillisiin arvoihin | 30 |
| | 5.1.1 Keskimääräisen luminanssin muutos | 30 |
| | 5.1.2 Luminanssin yleistasaisuuden muutos | 31 |
| | 5.1.3 Luminanssin pitkittäistasaisuuden muutos | 33 |
| | 5.1.4 Enimmäispylväsvälien muutos | 34 |
| | 5.1.5 Päälysteluokan muuttamisen vaikutukset kustannuksiin ... | 39 |
| | 5.2 Valaistuksen mitoittaminen päälysteluokan R3 mukaan..... | 43 |
| 6 | JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA..... | 44 |
| | LÄHTEET..... | 46 |
| | LIITTEET | 47 |
| | Liite 1. Ajoneuvoliikenteen M-valaistusluokat (Tampereen kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat, LIITE 4) | 47 |
| | Liite 2. Valmistaja ja poikkileikkauskohtaiset päälysteluokan muuttumisen vaikutukset enimmäispylväsväleihin sekä kustannuksiin. | 48 |

| | |
|---|----|
| Liite 3. Päälysteluokan muutoksen keskimääräiset vaikutukset kustannuksiin poikkileikkauskohtaisesti. | 49 |
| Liite 4. Pylväsvälien keskimääräiset muutokset poikkileikkauskohtaisesti. 1 (2)..... | 50 |
| Liite 5. Pylväsvälien keskimääräiset muutokset poikkileikkauskohtaisesti. 2 (2)..... | 51 |
| Liite 6. Pitkittäistasaisuuden keskimääräiset muutokset. | 52 |
| Liite 7. Luminanssin yleistasaisuuden keskimääräiset muutokset. | 53 |
| Liite 8. Keskimääräisen luminanssin keskimääräiset muutokset. | 54 |

LYHENTEET JA TERMIT

| | |
|-----------------------|--|
| L_m | Keskimääräinen luminanssi (cd/m ²) kertoo, kuinka valoisalta ajoradan pinta näyttää. Arvon kasvattaminen pidentää näköetäisyyttä, parantaa havaitsemista ja liikkeen arviointia sekä parantaa kuljettajan reaktioaikaa. |
| U_o | Luminanssin yleistasaisuus , vaikuttaa näkösuorituskykyyn. Koko ajoradan pienimmän ja keskimääräisen luminanssin osamäärä. |
| U_i | Luminanssin pitkittäistasaisuus , ajo- ja näkömukavuuden kannalta merkittävä. Lasketaan kunkin kaistan keskellä olevan havaitsemispisteen kautta kulkevalla pitkittäissuuntaisella suoralla olevien pienimmän ja suurimman luminanssin osamääränä. |
| f_{TI} | Häikäisy . Estohäikäisyn näkemistä heikentävä vaikutus on mitattavissa silmän kontrastinerotuskyvyn muuttumisena (%). Lasketaan jokaiselle kaistalle. |
| R_{EI} | Vierialueen valaistusvoimakkuus . Ajoradan vieressä olevan, ajokaistan levyisen alueen keskimääräinen valaistusvoimakkuus jaettuna ajoradalla sijaitsevan lähimmän ajokaistan keskimääräisellä valaistusvoimakkuudella. R _{EI} -arvo lasketaan ajoradan molemmin puolin. |
| L | Luminanssi . Kuvaa pinnalta tai pisteestä lähtevää valon voimakkuutta eli "valon kirkkautta". Yksikkö: kandela per neliömetri (cd/m ²). |
| E | Valaistusvoimakkuus . Kuvaa tietylle pinta-alalle lankeavaa valovirran määrää. Yksikkö: luksi (lx). |

φ

Valovirta. Kuvaa valonlähteestä lähtevän valon kokonaismäärää. Yksikkö: Lumen (lm).

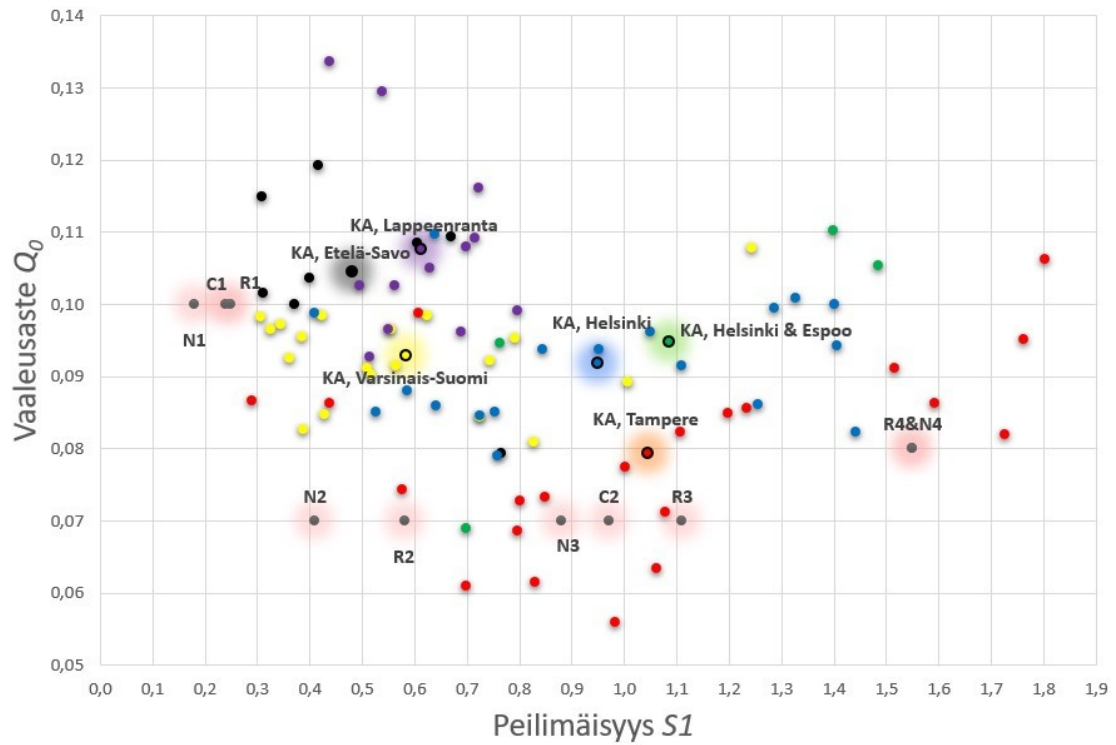
Enimmäispylväsväli Kuvaa pisintä pylväsväliä, joka voidaan tietyn poikkeileikkauksen suhteen saavuttaa tietyillä muuttujilla (esimerkiksi: valaisin, pylvään korkeus, valaisimen etäisyys ajoradan reunasta, valaisimen teho) ja jolla kaikki valaistusluokan valaistusteknilliset vaatimukset täyttyvät.

1 JOHDANTO

Tämän työn tilaajana oli Tampereen kaupunki. Tilaajan asettamat tavoitteet työlle oli tutkia, mitä vaikutuksia päällysteluokan muuttamisella luokasta R2 luokkaan R3 olisi valaistusteknisessä laskennassa, ja mitä seurauksia mahdollisilla käytännön muutoksilla olisi valaistuksen energia- ja rakennuskustannuksiin.

Suomessa lähes kaikki kaupungit, paria poikkeusta lukuun ottamatta, käyttävät tie- ja katuvalaistuksen suunnittelussa ja valaistusteknisissä laskennoissa ajoradan päällysteluokkaa R2. Kyseisen päällysteluokan käyttäminen perustuu Suomessa 1970- ja 1980-luvulla tehtyihin mittauksiin. Päällysteet ovat kehittyneet muutaman vuosikymmenen aikana ja uusia massatyyppejä on tullut lisää, joten päällysteiden ominaisuudetkin ovat muuttuneet ajan myötä. (Ekrias 2020, 5.)

Vuonna 2017 tehtiin uusia päällysteiden heijastusominaisuuksien mittauksia. Näiden mittaustulosten perusteella huomattiin, että nykyisin käytettävä päällysteluokka R2 vastaa kohtalaisen huonosti todellisuutta etenkin Tampereen alueella. (Ekrias 2020, 13). Päällysteen todellinen R-luokka olisi sen sijaan lähempänä luokkaa R3, mutta ei aivan täysin vastaa sitäkään luokittelun mukaan (kuva 1).



KUVA 1. Vuoden 2017 mittaustulokset esitettynä paikkakunnittain keskiarvona (Ekrias 2020, 19)

Tampereen mittaustulokset on esitetty kuvassa 1 punaisilla pisteillä. Tampereen mittaustulosten keskiarvo on esitetty punaisella pisteellä, jossa on musta reuna-
viiva ja teksti "KA, Tampere". Kuvassa 1 on esitetty myös muista Suomen kau-
pungeista ja valtion maanteiltä saatuja mittaustuloksia.

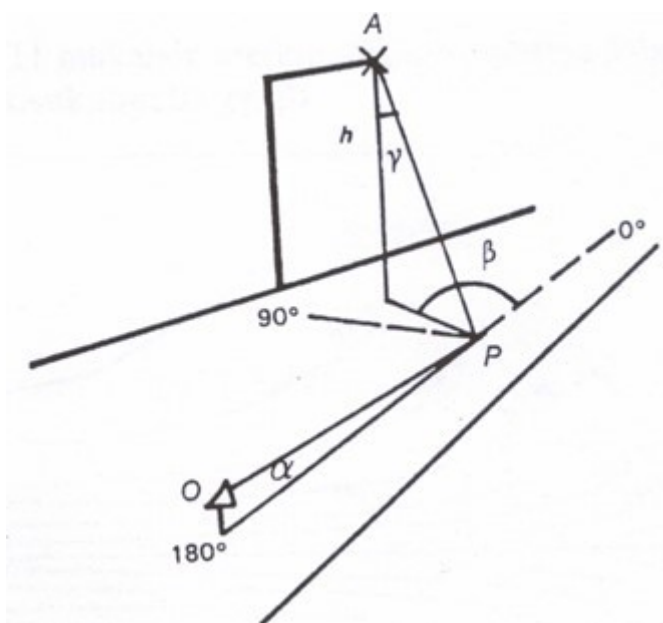
2 PÄÄLLYSTEKLUOKAT JA NIIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

2.1 Luminanssikertoimen määrittäminen

Ajoradan päällysteen pinnasta heijastuvaan valon määrään vaikuttaa katsojan sijainti, tarkasteltavan pisteen sijainti ajoradalla, sekä valon tulokulma tarkasteltavaan pisteeseen. Yksi tapa esittää tarkemmin heijastusominaisuuksia on luminanssikertoimet. Luminanssikerroin q , on pisteessä O olevan havaitsijan pisteessä P havaitseman ajoradan pinnan luminanssin L suhde valaistusvoimakkuuteen E ajoradan pinnalla pisteessä P (kuva 2). (van Bommel 2015, 165)

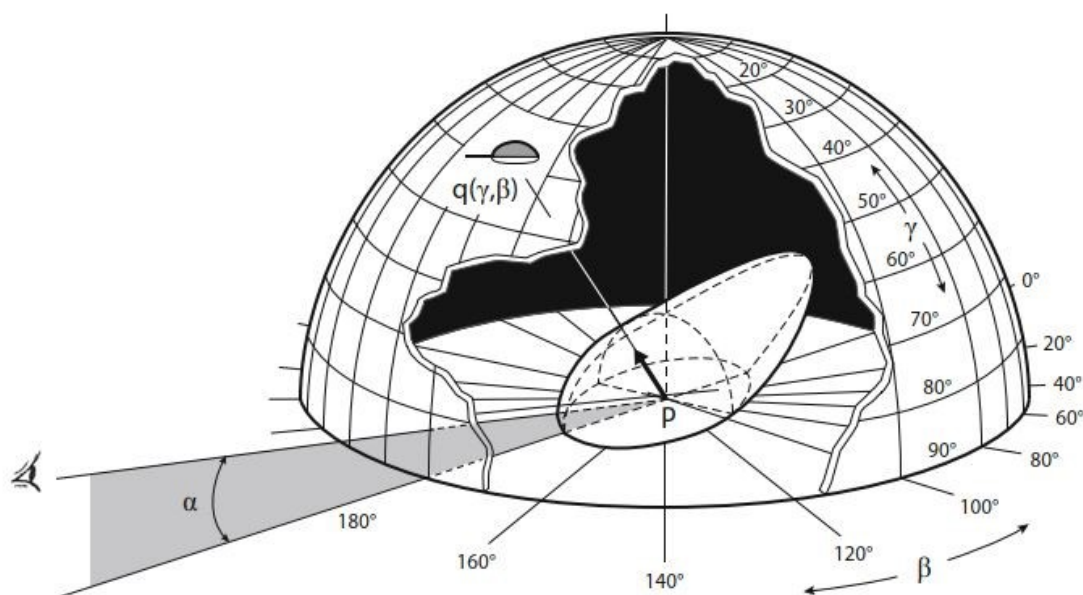
$$q = \frac{L}{E} \quad (1)$$

Luminanssikertoimeen vaikuttavat havaitsijan, valaisimen ja havaitsemisen kohteena olevan pisteen sijainnit ja niiden väliset kulmat (kuva 2).



KUVA 2. Tarkastelukulma α , tarkastelusuunnan ja valon tulosuunnan välinen kulma β ja valon tulokulma valaisimelta γ (CIE 140:2019 Road Lighting Calculations, 2nd Edition, 8)

Luminanssikertoimen suuruutta voidaan havainnollistaa kuvan 3 mukaisesti. Kuvassa on piirretty puolipallo tarkasteltavan pisteen ympärille. Puolipallon avulla on ilmaistu kutakin tarkasteltavaa kulmaa, jotka vaikuttavat luminanssikertoimeen. Puolipallon keskellä olevasta tarkastelun kohteena olevasta pisteestä P lähtee nuoli, joka kuvaa luminanssikerrointa ja nuolen pituus kuvaa kertoimen suuruutta. Puolipallon sisällä oleva pienempi muodostelma kuvaa valon heijastumista tarkastelupisteestä. Mitä enemmän päällyste peili-heijastaa valoa, sitä pidemmälle muodostelman ”kärki” venyy. Mikäli päällyste on ominaisuuksiltaan hajaheijastava, sitä enemmän muodostelma muistuttaa muodoltaan palloa, sillä valo haja-heijastuu tasaisesti joka suuntaan.



KUVA 3. Luminanssikertoimen esittäminen visuaalisesti (van Bommel 2015, 166)

Tarkastelukulma α on hyvin merkittävä luminanssin kannalta. Se voidaan kuitenkin olettaa lähes vakioksi, sillä moottorisoitujen ajoneuvojen kuljettajien tarkastelukulmat (α) vaihtelevat vain 0,5 ja 1,5 asteen kulmien välillä tienkäyttäjälle tärkeän tieosuuden (60-160m kuljettajasta eteenpäin) osalta. Tästä syystä tarkastelukulma onkin valaistusteknisessä laskennassa asetettu vakioksi, yhden asteen suuruuteen. Päällysteen luminanssikertoimen voidaan siis sanoa olevan riippuvainen kahdesta kulmasta: β ja γ . (van Bommel 2015, 167.) Joten luminanssikerroin q voidaankin ilmaista seuraavassa muodossa:

$$q = q(\beta, \gamma) \quad (2)$$

Laskennan helpottamiseksi voidaan käyttää niin sanottua rajoitettua luminanssi-kerrointa R , q :n paikalla, jolloin kaava on muotoa:

$$R = q(\beta, \gamma) \cdot \cos^3 \gamma \quad (3)$$

Täten yhden valonlähteen antama luminanssi tiellä olevalle elementille voidaan ilmaista muodossa:

$$L = q \cdot E = q \cdot \frac{I}{h^2} \cdot \cos^3 \gamma = R \cdot \frac{I}{h^2} \quad (4)$$

Jossa:

R on rajoitettu luminanssikerroin tiellä olevalle elementille, joka on määritelty kulmien β ja γ avulla (cd/m²/lux)

I on valovoima tarkastelupisteen suuntaan (cd)

h on valaisimen asennuskorkeus (m)

(van Bommel 2015, 167.)

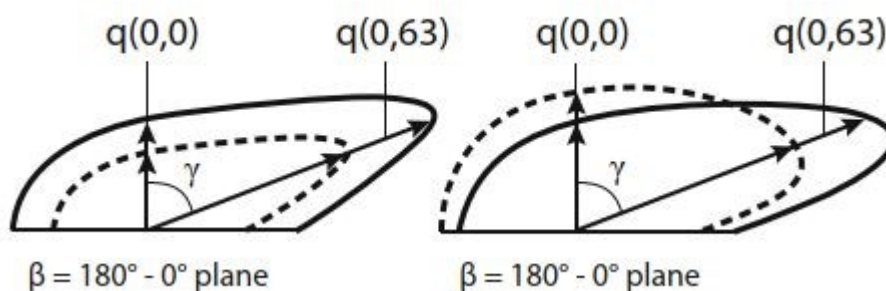
Kadunpinnan heijastusominaisuudet voidaan nyt esittää taulukossa, jossa R -arvot ovat määritelty β - γ yhdistelminä. Tällaista taulukkoa kutsutaan heijastustaulukoksi tai R -taulukoksi. Taulukon avulla voidaan laskea yhden valaisimen tuottama luminanssi missä tahansa kadun pinnan kohdassa. Toistamalla tätä laskua myös viereisiin valaisimiin ja laskemalla valaisimien tulokset yhteen saadaan pisteen luminanssi havaitsijan sijainnista laskettua. Edellä mainittuun menetelmään perustuu kaikkien valaistuslaskentaohjelmien toiminta. (van Bommel 2015, 167.)

2.2 Päälysteiden luokittelu

Kadun päälysteen heijastusominaisuuksien luokittelu perustuu olettamukseen, että useimmat päälysteet voidaan kohtuullisen hyvin kuvata kahden perusominaisuuden mukaan, jotka ovat vaaleus ja peilimäisyys. Vaaleudella tarkoitetaan harmaan sävyä valkoisesta mustaan ja peilimäisyydellä peiliheijastavuutta. Luo-

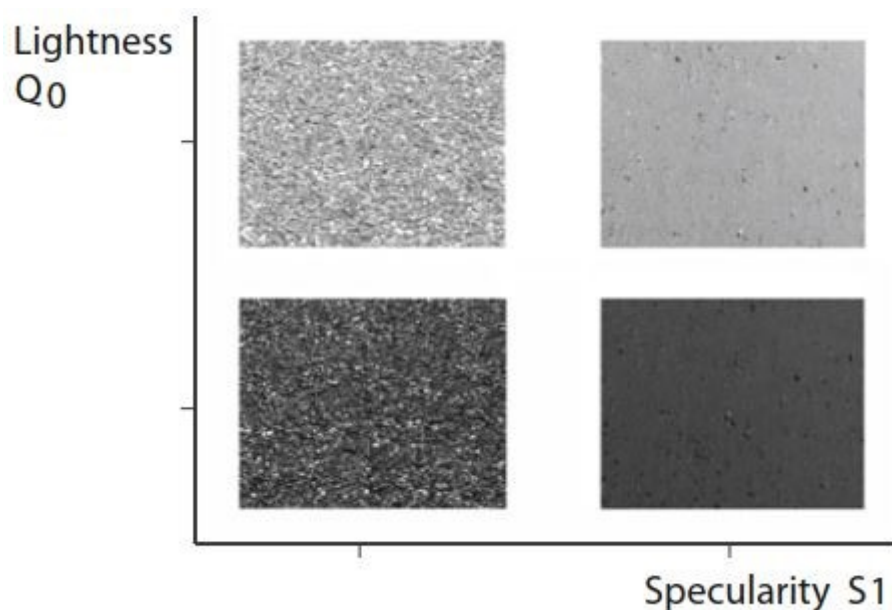
kittelua kutsutaan Q_0 - S_1 menetelmäksi ja se on käytössä ympäri maailmaa. Luokittelun tarkasteltavat parametrit ovat nimeltään keskimääräinen luminanssikerroin (Q_0) ja heijastuskerroin (S_1). (van Bommel 2015, 168)

Matala Q_0 -arvo kuvaa tummaa pintaa ja korkea Q_0 -arvo puolestaan vaaleaa pintaa. S_1 arvo kuvaa peiliheijastumisen määrää eli sitä, kuinka paljon valoa heijastuu pinnasta tiettyyn suuntaan (korkea S_1 arvo), tai paljonko valo hajaantuu heijastuessaan eri suuntiin (matala S_1 arvo). (van Bommel 2015, 169)



KUVA 4. Heijastuksen indikaattorit (van Bommel 2015, 169). Vasemmalla puolella on sama peilimäisyys (S_1) ja eri vaaleusaste (Q_0). Oikealla puolella peilimäisyys (S_1) vaihtelee ja vaaleusaste (Q_0) pysyy samana.

Alla olevassa kuvassa (kuva 5) on esitetty, miten päällysteitä luokitellaan niiden ominaisuuksien perusteella. Vasemmalla puolella olevat päällysteet on pyritty esittämään kuvassa karkeamman näköisenä kuin oikealla puolella olevat päällysteet. Karkeampi ja epätasainen pinta tarkoittaa yleensä, että päällyste on hajaheijastava ja puolestaan oikealla puolella olevat näytteet ovat enemmän peiliheijastavia sileytensä vuoksi. Kuvassa 5 yläpuolella olevat näytteet ovat taas vaaleampia kuin alapuolella olevat näytteet, joten niiden vaaleusaste on eri.



KUVA 5. Päällysteiden ominaisuuksien havainnollistaminen (van Bommel 2015, 170)

2.3 Päällysteluokat maailmalla

Erlaisia päällysteitä on olemassa todella paljon, joten kansainvälinen valaistuskomissio CIE on ryhmitellyt ne eri luokkiin tie- ja katuvalaistuksen suunnittelua varten. Kuivalle päällysteelle on tarkoitettu R-, N- ja C-luokat. Märälle päällysteelle on omat W-luokkansa. Jokaiselle luokalle on määritelty teoreettinen standardipäällyste. Standardipäällyste kuvaa valaistusteknisissä laskennoissa riittäväällä tarkkuudella kaikkia tähän luokkaan kuuluvia päällysteitä. (Ekrias 2020, 7)

Kuivan päällysteen luokat on esitetty taulukossa 1. Päällysteet luokitellaan luokkiin niiden peilimäisyysarvojen S_1 perusteella. Taulukon 1 perusteella esimerkki päällyste, jonka arvot ovat $Q_0 = 0,09$ ja $S_1 = 1,01$ luokiteltaisiin luokkiin C2, R3 tai N3 riippuen siitä mitä luokkaa kyseisessä maassa käytetään. Päällysteluokkien r-taulukot on esitetty julkaisun *CIE 144:2001* liitteessä B. (Ekrias 2020, 8.)

TAULUKKO 1. Kuivien päällysteiden luokittelussa käytetyt arvot (Ekrias 2020, 8)

| Päällyste- luokka | Peilimäisyys S_1 :n alue | Standardipäällysteen nimellisarvot | |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------|
| | | S_1 | Q_0 |
| C1 | $S_1 < 0,40$ | 0,24 | 0,10 |
| C2 | $S_1 \geq 0,40$ | 0,97 | 0,07 |
| R1 | $S_1 < 0,42$ | 0,25 | 0,10 |
| R2 | $0,42 \leq S_1 < 0,85$ | 0,58 | 0,07 |
| R3 | $0,85 \leq S_1 < 1,35$ | 1,11 | 0,07 |
| R4 | $1,35 \leq S_1$ | 1,55 | 0,08 |
| N1 | $S_1 < 0,28$ | 0,18 | 0,10 |
| N2 | $0,28 \leq S_1 < 0,60$ | 0,41 | 0,07 |
| N3 | $0,60 \leq S_1 < 1,30$ | 0,88 | 0,07 |
| N4 | $S_1 \geq 1,30$ | 1,61 | 0,08 |

Muut Pohjoismaat käyttävät erilaisia kuivien päällysteiden luokkia seuraavasti:

- Ruotsi: N2,
- Norja: C2,
- Tanska: N2, vaaleusasteen ollessa $Q_0 = 0,09$. (Ekrias 2020, 8)

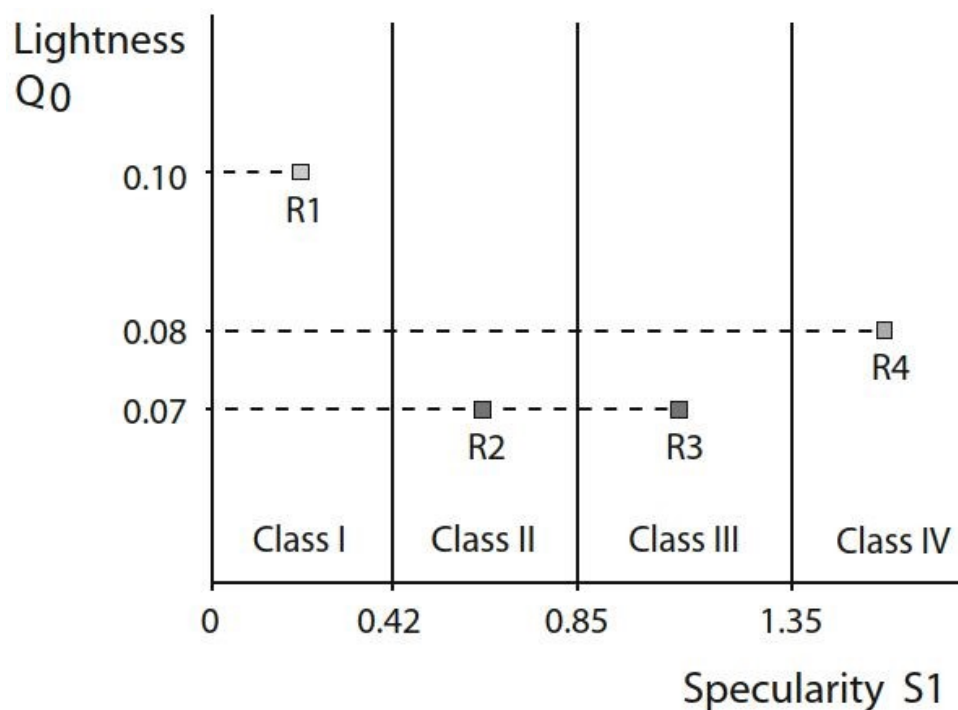
Edellä listattujen Pohjoismaiden päällysteloukat määräävät mittaukset on tehty 1970- ja 1980-luvuilla heidän omasta toimestaan. (Ekrias 2020, 9)

2.4 Päällysteloukat Suomessa

Suomessa päällysteiden heijastusominaisuuksia on mitattu 1970- ja 1980-luvuilla tehdyissä tutkimuksissa. Tutkimukset on esitetty julkaisuissa *VTT:1980* ja *VTT:1985*. Tutkimusten tuloksena oli se, että päällysteet kuuluvat suurimmilta osin luokkiin R1 ja R2. Tutkimuksissa suositeltiin käyttämään luokkaa R2, jos käytössä oli asfalttipäällysteet (mm. asfalttibetoni AB) ja luokkaa R1, mikäli käytössä oli betonipäällyste. Mittausten perusteella Suomessa otettiin käyttöön tie- ja katuvalaistuksen valaistusteknillisissä laskennoissa R-loukat kuivalle päällysteelle ja W-loukat märälle päällysteelle. Nämä luokat ovat yhä nykypäivänä käytössä. (Ekrias 2020, 10.)

Kuivien ajoratojen päällystelukat voidaan luokitella Suomessa käytössä olevan asteikon mukaan neljään eri R-luokkaan. Tämä helpottaa valaistusteknillistä laskentaa, kun jokaista kohdetta ei tarvitse käydä mittaamassa erikseen. Usein kohteen ajoradan päällysteen mittaaminen ei olekaan edes mahdollista, sillä valaistuslaskelmia tehdään ennen kuin itse katua on rakennettu.

Ajoratojen päällysteet ovat neljässä eri R-luokassa niiden heijastusominaisuuksien ja vaaleusasteen mukaan (kuva 6). Käytettäessä valaistuslaskennassa näitä standardisoituja luokkia, laskelmista saadaan tarpeeksi tarkkoja, tekemättä mittauksia olemassa olevalle päällysteelle.



KUVA 6. R-päällystelukat (van Bommel 2015, 171)

Väyläviraston ohjeen *Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu* mukaisesti tievalaistuksen suunnittelussa vaatimuksena on kuivalle päällysteelle luokka R2 ja märälle päällysteelle luokka W3. Lähes kaikki kunnat käyttävät samoja vaatimuksia julkisen ulkovalaistuksen suunnittelussa. Myös siis Tampereen kaupunki, jonka katualueille tämän työn tarkastelut kohdistuvat, käyttää edellä mainittuja päällystelukkaa suunnittelussa. Poikkeuksena on Helsinki, Kuopio ja Espoo, joissa käytössä on suunnittelussa luokat R3 ja W3.

Kaupunkialueella liikennemelun vähentämiseksi käytetään päällysteiden massa-tyyppejä, joissa kiviaineksen raekoko on pienempi. Pienemmän raekoon massa-tyypeillä vaaleusaste on yleensä hieman pienempi ja peilimäisyys suurempi. (Ekrias 2020, 8.)

2.5 Päällysteen heijastavuuteen ja vaaleuteen vaikuttavat tekijät

Ajoradan päällysteen vaikutus tie- ja katuvalaistuksen mitoitukseen on merkittävä. Päällysteen heijastusominaisuudet nimittäin määräävät sen, kuinka paljon valaisimen tuottamasta valosta heijastuu ajoradan pinnasta ajoneuvoa kuljettavan henkilön silmiin ja ympäristöön. (Ekrias 2020, 7.)

Päällysteen heijastavuus ei ole täysin yksiselitteinen asia, vaan siihen vaikuttaa useampi eri tekijä. Päällysteen rakenne voi vaihdella, eli sen valmistukseen on voitu käyttää eri kiviaineksia, sideaineita, täyteaineita tai jopa kokonaan eri valmistusmenetelmää. Toinen merkittävä asia, joka heijastavuuteen vaikuttaa, on pinnan fysikaalinen tila, eli se kuinka puhdas tai likainen päällyste on ja onko päällyste kuiva vai kostea. Lisäksi heijastavuuteen vaikuttaa valon tulokulma valaisimelta ajoradan pintaan, sekä ajoneuvon kuljettajan havaitsemiskulma. (Ekrias 2020, 7.)

Päällysteiden heijastavuus ilmaistaan r-taulukoiden avulla. Nämä taulukot ovat määritelty seuraavien päällysteiden heijastumisominaisuuksien avulla: vaaleusaste Q_0 sekä peilimäisyys S_1 . Vaaleusaste Q_0 on suuruusluokaltaan tyypillisesti 0,05 ja 0,14 välillä. Mitä suurempi vaaleusasteen arvo on, sitä vaaleampi on päällyste ja sitä enemmän se haja-heijastaa valoa. Vaaleammalle päällysteelle tyypillistä on, että pylväsvälit voivat olla pidempiä tai vaihtoehtoisesti valaisimen energiankulutus on pienempi, eli siis valaisin on mahdollisesti teholtaan pienempi. Peilimäisyyden S_1 arvot ovat tyypillisesti 0,10 ja 1,90 välillä. Mitä suurempi peilimäisyyden arvo on, sitä enemmän päällyste peili-heijastaa valoa. Peilimäisyyden vaikutukset näkyvät valaistusteknisissä suureissa. Peilimäisyydellä on suuri vaikutus luminanssin yleistasaisuuteen U_0 , luminanssin pitkittäistasaisuuteen U_l , sekä keskimääräiseen luminanssiin L_m . Päällysteen vaaleusasteeseen ja peili-

mäisyyteen vaikuttaa ajoradan pinnan kulumisen. Tämän voi konkreettisesti huomata, kun ajaa katua, johon on ehtinyt muodostua ajoneuvojen renkaiden kuluttamat urat. Urat näyttävät selkeästi vaaleammilta kuin muu päällyste uran vierellä. (Ekrias 2020, 7.)

Heijastusominaisuudet voidaan määritellä sekä kuivalle että märälle päällysteelle. Tässä työssä tehdyt laskelmat on tehty ainoastaan kuivalle ajoradan päällysteelle.

3 LASKENTAMENETELMÄT

3.1 Laskentaohjelmat

Suomessa valaistusteknisessä laskennassa käytössä on pääasiassa kolme laskentaohjelmaa, jotka ovat nimeltään DIALux 4.13, DIALux Evo ja Relux. Ohjelmat ovat ladattavissa ilmaiseksi ja niiden käyttö on myös ilmaista.

Edellä mainituista ohjelmista DIALux 4.13 suositellaan käytettäväksi ainoastaan hätäpoistumisteiden ja urheilualueiden valaistuksen laskentaan. DIALux 4.13 ei tue uutta tievalaistusstandardia, joten siksi sitä ei tässä tutkimuksessa käytetä. Reluxia ei tässä työssä käytetty, sillä se on Suomessa yleisestikin todella vähän käytetty, eikä sen käyttöön liittyen järjestetä opetusta lainkaan.

Tässä työssä käytettävä laskentaohjelma on DIALux Evo. Laskennat tehdään luvussa 2.1 kuvatulla tavalla.

3.1.1 DIALux Evo

DIALux Evolla pystyy laskemaan ja visualisoimaan sisä- sekä ulkoalueiden valaistusta. Evosta löytyy yli 190 valmistajan valaisimien tiedot. Evon ulkovalaistuksessa eniten käytetyt ominaisuudet ovat aluelaskenta ja tievalaistuksen laskenta. Tässä työssä ei ole tarpeen tehdä aluelaskelmia, sillä tarkoituksena on tutkia pylväsvälien ja laskenta-arvojen muuttumista suoralla katuosuudella. Evon laskenta perustuu standardiin SFS-EN13201-3:2015. Evolla saa laskelmista yksityiskoh- taisia yhteenvetoja ja se ilmoittaa selkeästi mikä tai mitkä valaistusteknisistä arvoista ovat täyttäneet standardin vaatimukset ja mitkä eivät. (DIALux)

3.1.2 Relux

Relux on myös ilmainen internetistä ladattavissa oleva sovellus. Reluxilla on mahdollista tehdä niin sisä- kuin ulkovalaistuslaskelmiakin kuten Evolla.

3.2 Valaistusluokat

Ulkovalaistuksen liikenneturvallisuutta, ympäristön muodostamista ja viihtyisyyttä parantavat vaikutukset saadaan aikaan sopivan valaistusluokan avulla. Valaistusluokka riippuu kadun ja liikenteen ominaisuuksista. (Tampereen kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat, 58)

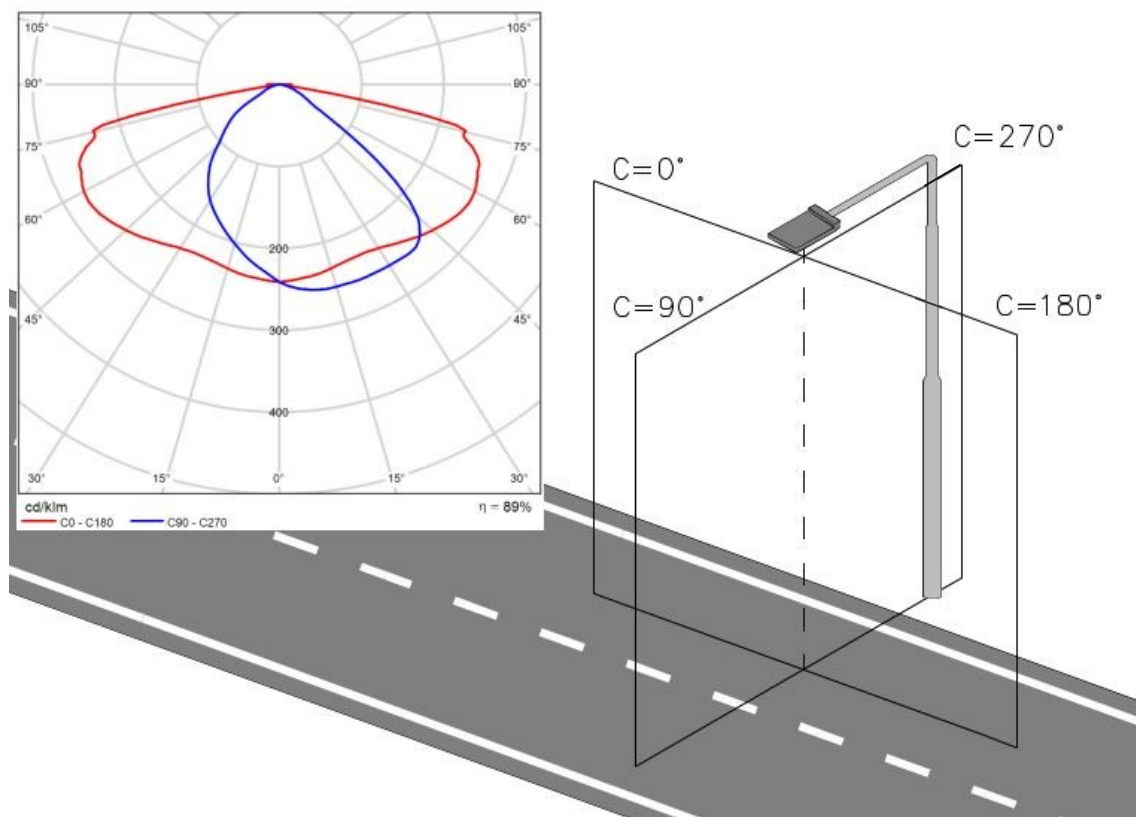
Moottoriajoneuvon kuljettajille tarkoitetut luminanssiin perustuvat valaistusluokat ovat nimeltään M-luokkia, joiden vaatimukset on esitetty taulukossa 2. Tampereen kaupungin katujen M-valaistusluokat on määritelty Tampereen kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat- dokumentin liitteessä 4. Tässä työssä edellä mainittu liite on numerolla 1. Työssä tarkasteltavat poikkileikkaukset on valikoitu tämän liitteenä olevan kartan avulla. Työssä ei ole tehty tarkasteluja valaistusluokan M6 kaduille, sillä kuten liitteen 1 kartasta käy ilmi Tampereen kaupungin alueella ei ole määritelty kaduille valaistusluokaksi kyseistä M-luokkaa ollenkaan.

TAULUKKO 2. Moottoriajoneuvon kuljettajille tarkoitetut M-luokat (Tampereen kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat. LIITE 4. Ajonauvoliikenteen M-valaistusluokat)

| Valaistusluokka | Kuivan ja märän ajoradan luminanssi | | | | Esto- häikäisy | Vierialueen valaistus |
|-----------------|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|--------------------------|
| | Kuiva | | | Märkä | | |
| | L_m cd/m ² min | U_o min | U_l min | U_o min | f_{π} %, max | R_a min |
| M1 | 2,00 | 0,40 | 0,60 | 0,15 | 10 | 0,40 |
| M2 | 1,50 | 0,40 | 0,60 | 0,15 | 10 | 0,40 |
| M3a | 1,00 | 0,40 | 0,60 | 0,15 | 15 | 0,40 |
| M3b | 1,00 | 0,40 | 0,40 | 0,15 | 15 | 0,40 |
| M4 | 0,75 | 0,40 | 0,40 | 0,15 | 15 | 0,40 |
| M5 | 0,50 | 0,35 | 0,40 | 0,15 | 15 | 0,40 |
| M6 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,15 | 15 | 0,40 |

3.3 Valonjakotiedostot

Valaisinvalmistajilta on saatavilla valaisimille useampia erilaisia valonjakotiedostoja ja valonjakokäyriä (kuva 7). Valonjakotiedosto on tietokonemallinnus, johon on pyritty luomaan mahdollisimman tarkasti todellisuutta mukaileva malli siitä, miten valo säteilee valonlähteestä ympäristöön. Valonjakotiedoston todenmukaisuudella on siis suuri vaikutus valaistusteknilliseen laskentaan. Valonjakokäyrästä voidaan tulkita jo ennen valonjakotiedoston lataamista laskentaohjelmaan, kuinka valo käyttäytyy kyseisellä optiikalla.



KUVA 7. Valonjakokäyrän tarkastelukulmat.

3.4 Valaisimen tyyppi

Valaisimen tyyppi vaikuttaa paljon laskentaan. Eri valmistajilla on lukuisia eri kohteisiin soveltuvia valaisimia, joiden valonjako-ominaisuudet vaihtelevat. Valaisimen tyypin avulla voidaan vaikuttaa muun muassa seuraaviin asioihin; paljonko kadun vialueelle tulee valoa, paljonko valaisin häikäisee tien käyttäjää, kuinka

pitkä pylväsväli voidaan saavuttaa tai paljonko halutun alueen valaisemiseen tarvitaan tehoa.

3.5 Pylvään ominaisuudet

Tavoitteena on aina lähtökohtaisesti saavuttaa mahdollisimman pitkä enimmäispylväsväli mahdollisimman pienellä teholla, niin että valaistusteknilliset vaatimukset täyttyvät. Myös tilanteissa, joissa pylväsväli on ennalta määrätty, esimerkiksi tehtäessä valaisinvaihtoja, pyritään mahdollisimman pienellä teholla saada valaistusteknilliset vaatimukset täyttymään.

Mitä korkeampi pylväk on, sitä enemmän valo ehtii hajaantua verrattuna matalammalla olevaan samanlaiseen valaisimeen, joten silloin tehoa joudutaan nostamaan keskimääräisen luminanssin säilyttämiseksi vaaditulla tasolla. Valaisimen asennuskorkeuden nostamisella on myös positiivisia vaikutuksia valaistuksen laatuun, sillä nostettaessa valaisinta, estohäikäisy pienenee. Myös luminanssin yleistasaisuus ja pitkittäistasaisuus yleensä paranevat.

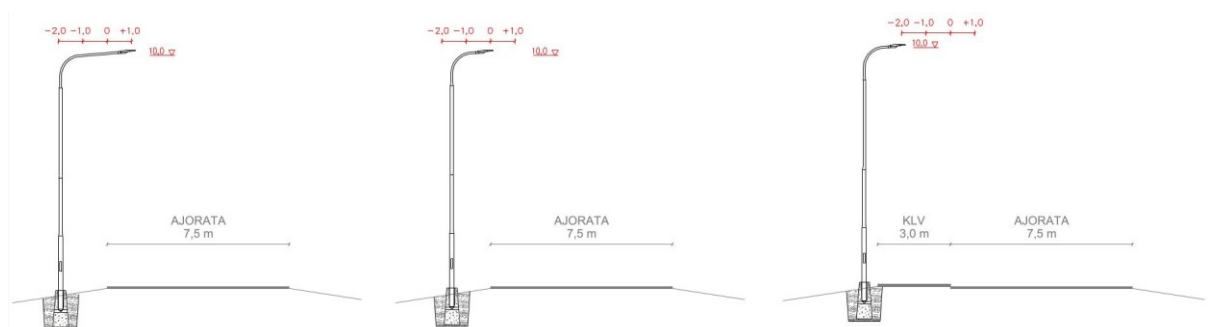
Enimmäispylväsvälillä tarkoitetaan sellaista kahden pylvään välistä pisintä mahdollista etäisyyttä, jossa kaikki valaistusteknilliset vaatimukset täyttyvät. Enimmäispylväsväli on laskettu aina teoreettiselle, suoralle kadun osuudelle, jossa ei tarvitse ottaa huomioon muita kadun varressa olevia rakenteita tai liittymiä. Valaisinylväiden sijoittelussa enimmäispylväsväliä ei saa ylittää, sillä muuten kaikki valaistusteknilliset arvot eivät täyty. Enimmäispylväsvälin voi kuitenkin alittaa ja näin usein tapahtuu, mikäli katu mutkittelee tai siinä on liittymiä tai useita väistettäviä rakenteita.

4 VALAISTUSTEKNILLISET LASKELMAT

4.1 R-luokan sekä valaisimen sijainnin muuttaminen

Tutkimusta varten tehdyissä valaistuslaskelmissa tärkeimpänä muuttujana oli päällysteen R-luokka. Jokaisen poikkileikkauksen kohdalla laskelmat tehtiin siten, että ensin selvitettiin paras mahdollinen valaistusteknilliset vaatimukset täyttävä enimmäispylväsväli päällysteluokan ollessa R2. Tämän jälkeen päällysteluokka muutettiin luokkaan R3 ja tarkasteltiin miten valaistusteknilliset parametrit muuttuvat. Mahdolliset muutokset kirjattiin ylös ja lopuksi selvitettiin paras mahdollinen valaistusteknilliset vaatimukset täyttävä enimmäispylväsväli päällysteluokan ollessa R3.

Toinen merkittävä muuttuja oli valaisimen etäisyys ajoradan reunasta. Valaisimia ei ole aina mahdollista sijoittaa kaikista optimaalisimpaan kohtaan ajoradan reunan nähden, joten siksi laskentoja tehtiin niin että valaisin oli sijoitettu neljälle eri etäisyydelle ajoradan reunasta. Nämä neljä etäisyyttä, joita tarkasteltiin, olivat +1, 0, -1 ja -2 metriä ajoradan reunasta. Valaisimen etäisyyden ollessa +1 metriä ajoradan reunasta, on valaisin käytännössä sijoitettu 1 metrin verran ajoradan päälle. Negatiivinen luku taas viittaa siihen paljonko valaisin on etäällä ajoradan reunasta. Esimerkiksi lukema -2 metriä tarkoittaa, että valaisin on 2 metrin päässä ajoradan reunasta ojan tai pientareen puolella.



KUVA 8. Valaisimen yllä olevan mitta-asteikon tulkitseminen.

Valaisimen sijainti ajoradan reunasta määrittyy valaisinvarren pituuden ja pylvään sijoittamisen mukaan. Niin kuin kuvasta 8 voidaan huomata, voi valaisinvarren pituus tai pylvään sijainti vaihdella sen mukaan, onko ajoradan ja pylvään välissä

esimerkiksi jalankulku- ja pyörätie tai vaikkapa oja, jonka pohjalle pylvästä ei normaalissa tapauksessa koskaan sijoiteta.

4.2 Valaisimen valinta

Laskelmia tehtiin kolmen eri valmistajan led-valaisimilla, jotta saataisiin selville mahdolliset valmistajien väliset eroavaisuudet päällysteen R-luokan muuttuessa. Laskelmiin valitut valmistajat ovat Suomessa katuvalaistuksessa käytettyjä yleisimpiä valmistajia. Lisäksi eri valmistajilta on valittu yleisimpiä valaisintyyppejä, joilla on tarkoitus päästä parhaaseen mahdolliseen valaistusteknilliseen lopputulokseen kustannustehokkaasti.

Eri valmistajilta löytyy erilaisilla optiikoilla ja tehoportailta varustettuja valonjakotiedostoja laskentoja varten. Tehoa ja valovirtaa olisi mahdollista muuttaa vielä manuaalisesti, mutta tässä työssä niin ei ole tehty, vaan on käytetty valonjakotiedostoon valmiiksi asetettua tehoa sekä valovirtaa.

Kunkin poikkileikkauksen kohdalla paras mahdollinen optiikka valaisimelle etsittiin ensin poissulkevaa periaatetta käyttäen. Valmistajilla voi olla kymmeniä erilaisia optiikoita, joten oli siis syytä sulkea pois sellaiset optiikat, jotka ovat suunniteltu erikoistarpeisiin, esimerkiksi vaikkapa suojatien valaisemiseen. Kaikki jäljelle jääneet optiikkavaihtoehdot tuotiin DIALuxiin ja asetettiin poikkileikkaukseen mahdollisiksi optiikoiksi.

Valaisimen etäisyys ajoradan reunaan nähden asetettiin ensimmäisenä kohtaan 0 metriä, sillä aikaisemman kokemuksen perusteella oli todettu, että tämä on usein optimaalinen sijainti valaisimelle pisintä pylväsväliä tavoiteltaessa. Laskelman tuloksena saatiin enimmäispylväsväli, sekä optimaalisin teho ja optiikka. Teho asetettiin vakioksi ja laskelmat toistettiin muille ajoradan reunasta määritetyille valaisimien sijainneille (kappale 4.1). Valaisimen optiikkaa muutettiin aina parhaaksi mahdolliseksi valaisimen sijainnin mukaan.

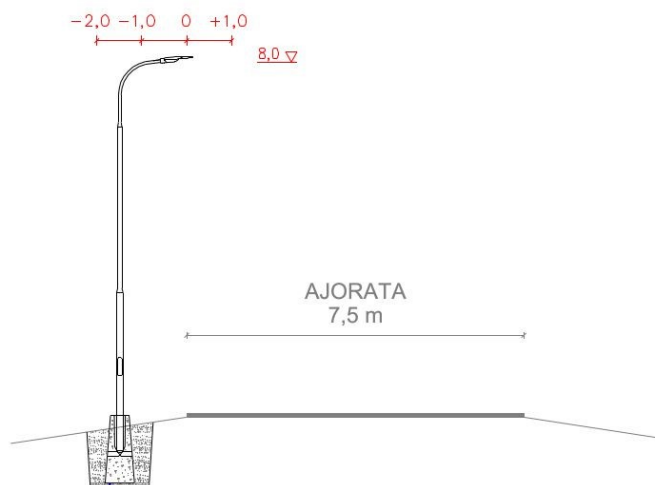
Edellä kuvattu laskentamenetelmä mahdollisti valaisimen sijainnin merkityksen selvittämisen enimmäispylväsväleihin. Samalla selvisi myös, onko optiikkaa vaihtamalla mahdollista saavuttaa tietty enimmäispylväsväli, kun valaisimen sijainti ajoradan reunaan nähden muuttuu, mutta teho pysyy vakiona.

4.3 Tarkasteltavat poikkileikkaukset

Valaistusteknisessä laskennassa poikkileikkauksilla tarkoitetaan teiden ja katu-
jen profiileja väylän leveyssuunnassa. Poikkileikkauksissa on määritelty tien tai
kadun kriittiset laskentaan vaikuttavat mitat. Tässä raportissa tarkasteltavat poik-
kileikkaukset ovat Tampereen alueelta. Tarkasteltavissa poikkileikkauksissa
vaihtelevat M-valaistusluokat, pylväsvälit, pylväskorkeudet, valaisinvarsien pituu-
det, pylvään etäisyydet ajoradasta sekä ajoradan leveydet. Poikkileikkauksissa
on otettu mallia Tampereella olevista oikeista kohteista. Erilaisia poikkileikkauk-
sia valittiin tarkastelua varten 6 kappaletta. Poikkileikkaukset valittiin kaduista,
joilla on eri valaistusluokat. Jokaisessa alla kuvatussa poikkileikkauksessa on va-
laisimen yläpuolelle sijoitettu mitta-asteikko, joka havainnollistaa valaisimen etäi-
syyden ajoradan reunasta mitattuna.

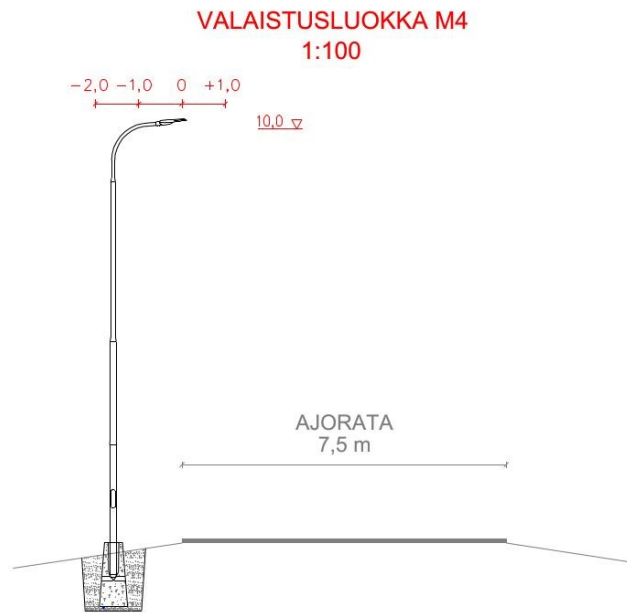
Poikkileikkaus 1 esittää tonttikatua, jonka valaistusluokka on M5. Tonttikatu pal-
velee kadun varressa olevien tonttien liikennettä. Tonttikatujen liikenne on pää-
sääntöisesti sekaliikennettä, josta suuri osa on kevyttä liikennettä. (Tampereen
kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat, 50)

VALAISTUSLUOKKA M5
1:100



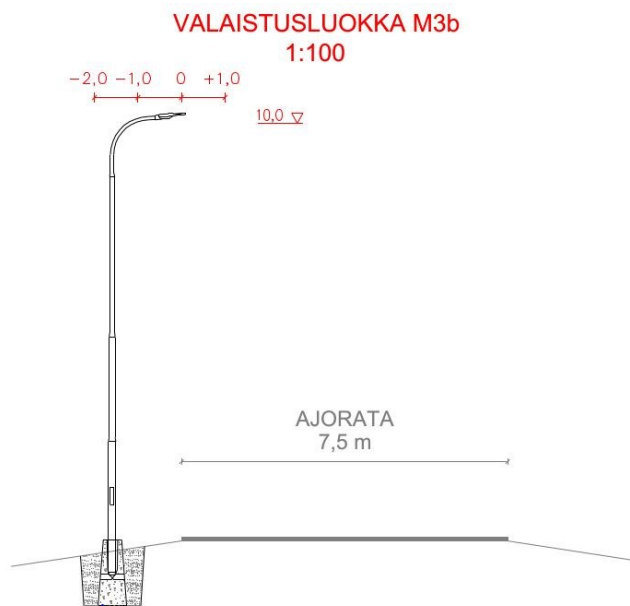
KUVA 9. Poikkileikkaus 1. Tonttikatu, jossa ajoradan leveys on 7,5 metriä, valaisimen asennuskorkeus on 8 metriä ja valaisimen etäisyys ajoradan reunasta vaihtelee esitettyllä välillä -2 metristä +1 metriin.

Poikkileikkaus 2 esittää paikallista kokoojakatua, jonka valaistusluokka on M4. Paikalliset kokoojakadut yhdistävät tonttikadut pääkatuihin. Alueellisten ja paikallisten kokoojakatujen valaistuksen tavoitteena on taata sekä ajoneuvo että kevyelle liikenteelle riittävät näkemisolosuhteet. (Tampereen kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat, 50) Tällaisissa katuprofileissa voi olla ajoradan vieressä esimerkiksi pysäköintikaista tai jalankulku- ja pyörätie. Usein pylväs on 10 metrin korkuinen ja valaisinvarsi on pitkä, jotta valoa saataisiin mahdollisimman kauas, kadun toiselle puolelle.



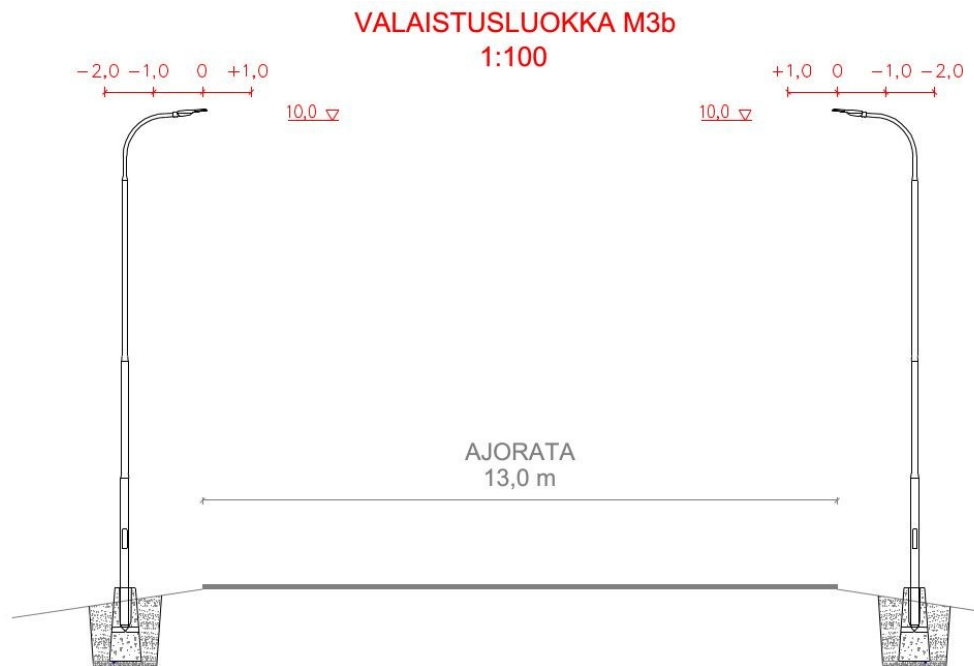
KUVA 10. Poikkileikkaus 2. Paikallinen kokoojkatu, jossa ajoradan leveys on 7,5 metriä, valaisimen asennuskorkeus on 10,0 metriä ja valaisimen etäisyys ajoradan reunasta vaihtelee esitetyllä välillä -2 metristä +1 metriin.

Poikkileikkaus 3 esittää alueellista kokoojakatua, jonka valaistusluokka on M3b. Alueellinen kokoojkatu palvelee kaupungin osa-alueen sisäistä liikennettä ja alueen yhteyksiä pääkatu- ja maantieverkkoon. (Tampereen kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat, 50)



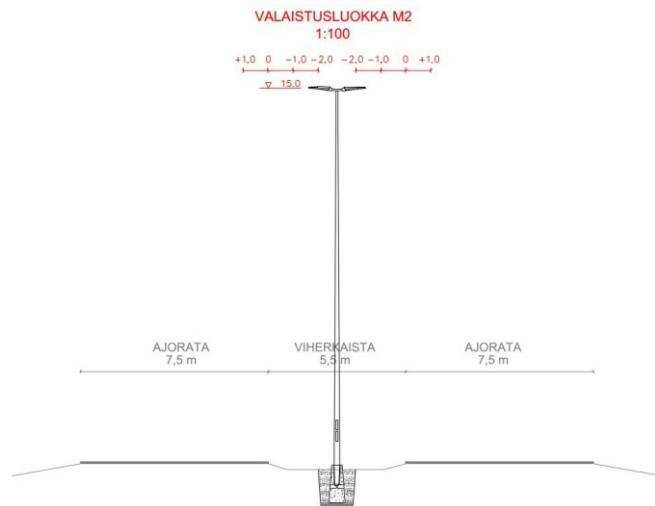
KUVA 11. Poikkileikkaus 3. Alueellinen kokoojkatu, jossa ajoradan leveys on 7,5 metriä, valaisimen asennuskorkeus on 10,0 metriä ja valaisimen etäisyys ajoradan reunasta vaihtelee esitetyllä välillä -2 metristä +1 metriin.

Poikkileikkaus 4 esittää alueellista kokoojakatua, jonka valaistusluokka on M3b. Erona poikkileikkaukseen 3 nähden, tässä poikkileikkauksessa on paljon leveämpi ajorata ja siksi on ollut syytä sijoittaa valaisimet kummallekin puolelle ajorataa, jotta valaistusluokan vaatimukset saadaan täyttymään. Poikkileikkauksessa 4 on 13 metrin ajorata, jossa on neljä kaistaa, kaksi kumpaankin suuntaan. Valaisimen asennuskorkeus on tässä poikkileikkauksessa myöskin 10 metriä.



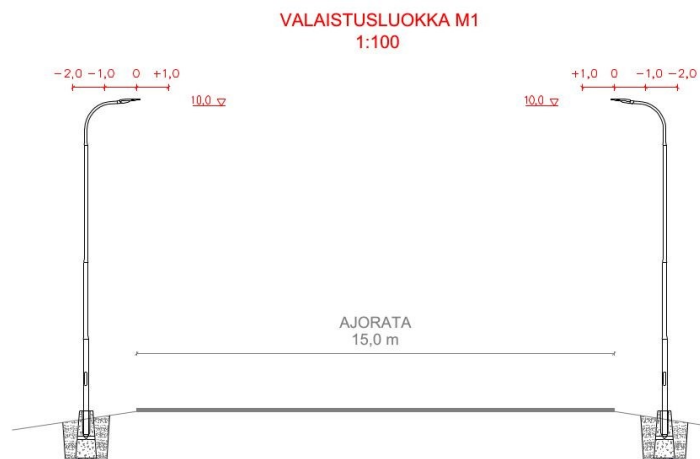
KUVA 12. Poikkileikkaus 4. Alueellinen kokoojakatu, jossa ajoradan leveys on 13,0 metriä, valaisimien asennuskorkeus on 10,0 metriä ja valaisimien etäisyys ajoradan reunasta vaihtelee esitetyllä välillä -2 metristä +1 metriin.

Poikkileikkaus 5 esittää pääväylää, jonka valaistusluokka on M2. Pääväylä palvelee seudullista ja kaupungin osa-alueiden välistä liikennettä. Sen tavoitteena on liittää ajoneuvoliikenteen ehdoilla valaistut maantiet katuverkon monimuotoisempaan ja kaupunkimaisempaan yleisilmeeseen. (Tampereen kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat, 50) Lisäksi pääväylien valaistus toteutetaan usein muita katuluokkia näyttävimmillä kalusteilla. Tässä poikkileikkauksessa näyttävyttä tuo 15 metrin korkuiset pylvää, jotka ovat sijoitettu ajoratojen väliselle viheralueelle. Tästä yhdestä korkeasta pylvästä valaistaan kumpaakin ajorataa omalla valaisimellaan. Ajoradat ovat leveydeltään 7,5 metriä kummallakin puolella viheraluetta ja ajoradoilla on 2 kaistaa samaan suuntaan.



KUVA 13. Poikkileikkaus 5. Pääväylä, jossa on kaksi, kaksi kaistaista, ajorataa kumpaankin kulkusuuntaan. Ajoratojen leveys on 7,5 metriä ja valaisimien asennuskorkeus on 15 metriä. Valaisimien etäisyydet ajoradan reunaan vaihtelevat esitetyllä välillä -2 metristä +1 metriin.

Poikkileikkaus 6, esittää pääkatua, jonka valaistusluokka on M1. Tässä poikkileikkauksessa on valaisimet sijoitettu jälleen kummallekin puolelle ajorataa, sillä ajorata on 15 metriä leveä. Valaisimien asennuskorkeus on 10 metriä. Tällainen katuprofiili voi löytyä esimerkiksi aivan Tampereen kaupungin ydinkeskustasta. Leveän ajoradan ansiosta kaistoja voi jälleen olla kumpaankin suuntaan useampia ja esimerkiksi kolmas kaista kääntyville ajoneuvoille.



KUVA 14. Poikkileikkaus 6. Pääkatu, jossa on kaksi valaisinpylvästä sijoitettu vastakkain, eri puolille ajorataa. Ajoradan leveys on 15,0 metriä ja valaisimien asennuskorkeus on 10,0 metriä. Valaisimien etäisyys ajoradan reunasta vaihtelee esitetyllä välillä -2 metristä +1 metriin.

5 VALAISTUSLASKELMIEN TULOKSET

5.1 Päälysteluokan muuttamisen vaikutukset valaistusteknillisiin arvoihin

Muutettaessa päälysteluokkaa R2:sta luokkaan R3, päälysteen peiliheijastavuus S_1 muuttuu ja luminanssikerroin Q_0 pysyy samana. Nostettaessa peilimäisyyttä S_1 , päälysteluokan R2 arvosta päälysteluokan R3 arvoon, päälysteen pinta muuttuu hajaheijastavasta peiliheijastavampaan. Tämä taas johtaa edelleen siihen, että päälysteen pinnasta heijastuva valo käyttäytyy hieman eri tavalla. Niin kuin aiemmin on todettu, hajaheijastava pinta heijastaa valoa enemmän pallomaisempaan tapaan, jokaiseen suuntaan tasaisesti ja peiliheijastava pinta taas heijastaa valoa johonkin yhteen tiettyyn suuntaan. Tämä heijastumisen suunta riippuu tietenkin valonlähteen sijainnista heijastuspisteeseen nähden.

5.1.1 Keskimääräisen luminanssin muutos

Keskimääräinen luminanssi on yksi autoilijan kannalta merkittävimmistä katuvalaistuksen ominaisuuksista. Keskimääräinen luminanssi osoittaa, kuinka valoisalta kadun pinta näyttää. Keskimääräisen luminanssin nostaminen vaikuttaa esimerkiksi näköetäisyyden pitenemiseen, havainnoinnin paranemiseen, sekä reaktionajan lyhenemiseen. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu, 22)

Päälysteluokan muuttamisella luokasta R2 luokkaan R3 oli laskelmien mukaan negatiivinen vaikutus keskimääräiseen luminanssiin. Keskimääräisen luminanssin arvo laski keskimääräisesti jokaisessa tapauksessa, huolimatta valaisimen valmistajasta tai kadun poikkileikkauksesta. Kun otetaan huomioon kaikki poikkileikkaukset ja valmistajat, keskimääräinen luminanssi laski keskimäärin noin 6,5%.

Taulukossa 3 on eriteltyinä jokaisen poikkileikkauksen keskimääräisen luminanssin keskimääräiset muutokset valmistajakohtaisesti. Taulukosta 3 huomataan, että vaihtelu eri valmistajien välillä oli melko pientä, sillä vähiten keskimääräinen

luminanssi laski valmistajan 2 kohdalla (5,23%) ja eniten valmistajan 3 kohdalla (7,69%). Myös poikkileikkauksien välillä vaihtelu oli melko pientä (4,98–8,49%).

TAULUKKO 3. Keskimääräisen luminanssin muutos päällysteluokan muuttuessa luokasta R2 luokkaan R3. Tulokset on esitetty valmistaja- ja poikkileikkauskohdaisesti. Lisäksi taulukossa on esitetty kaikkien valmistajien ja poikkileikkausten yhteenlasketut keskiarvot.

| Keskimääräisen luminanssin (Lm) muutos Valmistaja 1 | | | Keskimääräisen luminanssin (Lm) muutos Valmistaja 2 | | | Keskimääräisen luminanssin (Lm) muutos Valmistaja 3 | | | Keskimääräisen luminanssin (Lm) muutos Poikkileikkauskohtainen keskiarvo | | |
|--|---------|----|--|---------|----|--|---------|----|---|---------|----|
| Poikkileikkaus 1 | | | Poikkileikkaus 1 | | | Poikkileikkaus 1 | | | Poikkileikkaus 1 | | |
| R2 | 0,595 | Lm | R2 | 0,515 | Lm | R2 | 0,563 | Lm | R2 | 0,558 | Lm |
| R3 | 0,550 | Lm | R3 | 0,473 | Lm | R3 | 0,510 | Lm | R3 | 0,511 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -7,56 % | Lm | Muutos R2->R3 | -8,25 % | Lm | Muutos R2->R3 | -9,33 % | Lm | Muutos R2->R3 | -8,38 % | Lm |
| Poikkileikkaus 2 | | | Poikkileikkaus 2 | | | Poikkileikkaus 2 | | | Poikkileikkaus 2 | | |
| R2 | 0,823 | Lm | R2 | 0,795 | Lm | R2 | 0,840 | Lm | R2 | 0,819 | Lm |
| R3 | 0,755 | Lm | R3 | 0,773 | Lm | R3 | 0,780 | Lm | R3 | 0,769 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -8,21 % | Lm | Muutos R2->R3 | -2,83 % | Lm | Muutos R2->R3 | -7,14 % | Lm | Muutos R2->R3 | -6,06 % | Lm |
| Poikkileikkaus 3 | | | Poikkileikkaus 3 | | | Poikkileikkaus 3 | | | Poikkileikkaus 3 | | |
| R2 | 1,008 | Lm | R2 | 1,055 | Lm | R2 | 1,045 | Lm | R2 | 1,036 | Lm |
| R3 | 0,958 | Lm | R3 | 1,020 | Lm | R3 | 0,960 | Lm | R3 | 0,979 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -4,96 % | Lm | Muutos R2->R3 | -3,32 % | Lm | Muutos R2->R3 | -8,13 % | Lm | Muutos R2->R3 | -5,47 % | Lm |
| Poikkileikkaus 4 | | | Poikkileikkaus 4 | | | Poikkileikkaus 4 | | | Poikkileikkaus 4 | | |
| R2 | 1,068 | Lm | R2 | 1,045 | Lm | R2 | 1,083 | Lm | R2 | 1,065 | Lm |
| R3 | 1,023 | Lm | R3 | 1,013 | Lm | R3 | 1,000 | Lm | R3 | 1,012 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -4,22 % | Lm | Muutos R2->R3 | -3,11 % | Lm | Muutos R2->R3 | -7,62 % | Lm | Muutos R2->R3 | -4,98 % | Lm |
| Poikkileikkaus 5 | | | Poikkileikkaus 5 | | | Poikkileikkaus 5 | | | Poikkileikkaus 5 | | |
| R2 | 1,840 | Lm | R2 | 1,548 | Lm | R2 | 1,538 | Lm | R2 | 1,642 | Lm |
| R3 | 1,723 | Lm | R3 | 1,478 | Lm | R3 | 1,443 | Lm | R3 | 1,548 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -6,39 % | Lm | Muutos R2->R3 | -4,52 % | Lm | Muutos R2->R3 | -6,18 % | Lm | Muutos R2->R3 | -5,70 % | Lm |
| Poikkileikkaus 6 | | | Poikkileikkaus 6 | | | Poikkileikkaus 6 | | | Poikkileikkaus 6 | | |
| R2 | 2,080 | Lm | R2 | 2,010 | Lm | R2 | 2,165 | Lm | R2 | 2,085 | Lm |
| R3 | 1,905 | Lm | R3 | 1,823 | Lm | R3 | 1,998 | Lm | R3 | 1,908 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -8,41 % | Lm | Muutos R2->R3 | -9,33 % | Lm | Muutos R2->R3 | -7,74 % | Lm | Muutos R2->R3 | -8,49 % | Lm |
| Valmistaja 1 keskiarvo | | | Valmistaja 2 keskiarvo | | | Valmistaja 3 keskiarvo | | | Kaikkien poikkileikkauksien keskiarvo | | |
| Muutos R2->R3 | -6,62 % | Lm | Muutos R2->R3 | -5,23 % | Lm | Muutos R2->R3 | -7,69 % | Lm | Muutos R2->R3 | -6,51 % | Lm |

5.1.2 Luminanssin yleistasaisuuden muutos

Luminanssin yleistasaisuudella on vaikutus näkösuorituskykyyn. Yleistasaisuus lasketaan koko ajoradan pienimmän ja keskimääräisen luminanssin osamääränä jokaiselle havaitsijan sijainnille. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu, 22) Yleistasaisuus kertoo siis käytännössä sen, onko jokin tarkastelupiste jäänyt valaisematta tarpeeksi, tai onko jokin tarkastelupiste valaistu puolestaan liian voimakkaasti muihin tarkastelupisteisiin verrattuna.

Päällysteluokan vaihtuessa R2:sta luokkaan R3, päällysteen pinta muuttuu peiliheijastavammaksi, jolloin luminanssin yleistasaisuus laskee. Luminanssin yleistasaisuuden muutoksen voidaankin todeta taulukon 4 mukaan olevan melko suuri

päällysteluokan muuttuessa R2:sta luokkaan R3. Laskelmien mukaan luminanssin yleistasaisuus laski keskimäärin 11,6%. Yleistasaisuus laski kaikissa tapauksissa huolimatta valaisimen valmistajasta tai poikkileikkauksen tyypistä. Valmistajien väliset keskiarvot olivat jälleen melko lähellä toisiaan vaihdellen välillä 9,6–14,7%.

Tarkasteltaessa taulukon 4 tuloksia huomataan, että luminanssin yleistasaisuudet ovat keskimäärin olleet jo valmiiksi todella hyvällä tasolla. Tämän vuoksi melko suurikin lasku yleistasaisuudessa ei ole tuottanut juurikaan ongelmia valaistusteknillisten vaatimusten täyttymisen suhteen. Ainoastaan valmistajan 2 kohdalla poikkileikkauksessa numero 2 näyttäisi luminanssin yleistasaisuus olevan keskiarvoltaan (0,395) niukasti alle vaaditun raja-arvon, joka taulukon 2 mukaan on 0,40 valaistusluokan ollessa M4. Tämän perusteella voidaankin olettaa, että vaikka luminanssin yleistasaisuus laskee, se ei ole useinkaan esteenä valaistusteknillisten vaatimusten täyttymiselle muutettaessa päällysteluokkaa R2:sta luokkaan R3.

TUALUKKO 4. Luminanssin yleistasaisuuden muutos päällysteluokan muuttuessa luokasta R2 luokkaan R3. Tulokset on esitetty valmistaja- ja poikkileikkauskohtaisesti. Lisäksi taulukossa on esitetty kaikkien valmistajien ja poikkileikkauksien yhteenlasketut keskiarvot.

| Luminanssin yleistasaisuuden (Uo) muutos | | | Luminanssin yleistasaisuuden (Uo) muutos | | | Luminanssin yleistasaisuuden (Uo) muutos | | | Luminanssin yleistasaisuuden (Uo) muutos | | |
|--|----------|----|--|----------|----|--|----------|----|--|----------|----|
| Valmistaja 1 | | | Valmistaja 2 | | | Valmistaja 3 | | | Poikkileikkauskohtainen keskiarvo | | |
| Poikkileikkaus 1 | | | Poikkileikkaus 1 | | | Poikkileikkaus 1 | | | Poikkileikkaus 1 | | |
| R2 | 0,453 | Uo | R2 | 0,480 | Uo | R2 | 0,543 | Uo | R2 | 0,492 | Uo |
| R3 | 0,403 | Uo | R3 | 0,443 | Uo | R3 | 0,470 | Uo | R3 | 0,438 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -11,05 % | Uo | Muutos R2->R3 | -7,81 % | Uo | Muutos R2->R3 | -13,36 % | Uo | Muutos R2->R3 | -10,74 % | Uo |
| Poikkileikkaus 2 | | | Poikkileikkaus 2 | | | Poikkileikkaus 2 | | | Poikkileikkaus 2 | | |
| R2 | 0,545 | Uo | R2 | 0,420 | Uo | R2 | 0,533 | Uo | R2 | 0,499 | Uo |
| R3 | 0,475 | Uo | R3 | 0,395 | Uo | R3 | 0,440 | Uo | R3 | 0,437 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -12,84 % | Uo | Muutos R2->R3 | -5,95 % | Uo | Muutos R2->R3 | -17,37 % | Uo | Muutos R2->R3 | -12,06 % | Uo |
| Poikkileikkaus 3 | | | Poikkileikkaus 3 | | | Poikkileikkaus 3 | | | Poikkileikkaus 3 | | |
| R2 | 0,585 | Uo | R2 | 0,473 | Uo | R2 | 0,528 | Uo | R2 | 0,528 | Uo |
| R3 | 0,513 | Uo | R3 | 0,410 | Uo | R3 | 0,425 | Uo | R3 | 0,449 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -12,39 % | Uo | Muutos R2->R3 | -13,23 % | Uo | Muutos R2->R3 | -19,43 % | Uo | Muutos R2->R3 | -15,02 % | Uo |
| Poikkileikkaus 4 | | | Poikkileikkaus 4 | | | Poikkileikkaus 4 | | | Poikkileikkaus 4 | | |
| R2 | 0,465 | Uo | R2 | 0,440 | Uo | R2 | 0,525 | Uo | R2 | 0,477 | Uo |
| R3 | 0,445 | Uo | R3 | 0,405 | Uo | R3 | 0,428 | Uo | R3 | 0,426 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -4,30 % | Uo | Muutos R2->R3 | -7,95 % | Uo | Muutos R2->R3 | -18,57 % | Uo | Muutos R2->R3 | -10,28 % | Uo |
| Poikkileikkaus 5 | | | Poikkileikkaus 5 | | | Poikkileikkaus 5 | | | Poikkileikkaus 5 | | |
| R2 | 0,583 | Uo | R2 | 0,638 | Uo | R2 | 0,690 | Uo | R2 | 0,637 | Uo |
| R3 | 0,503 | Uo | R3 | 0,555 | Uo | R3 | 0,610 | Uo | R3 | 0,556 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -13,73 % | Uo | Muutos R2->R3 | -12,94 % | Uo | Muutos R2->R3 | -11,59 % | Uo | Muutos R2->R3 | -12,76 % | Uo |
| Poikkileikkaus 6 | | | Poikkileikkaus 6 | | | Poikkileikkaus 6 | | | Poikkileikkaus 6 | | |
| R2 | 0,680 | Uo | R2 | 0,660 | Uo | R2 | 0,645 | Uo | R2 | 0,662 | Uo |
| R3 | 0,658 | Uo | R3 | 0,565 | Uo | R3 | 0,595 | Uo | R3 | 0,606 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -3,31 % | Uo | Muutos R2->R3 | -14,39 % | Uo | Muutos R2->R3 | -7,75 % | Uo | Muutos R2->R3 | -8,48 % | Uo |
| Valmistaja 1 keskiarvo | | | Valmistaja 2 keskiarvo | | | Valmistaja 3 keskiarvo | | | Kaikkien poikkileikkauksien keskiarvo | | |
| Muutos R2->R3 | -9,61 % | Uo | Muutos R2->R3 | -10,38 % | Uo | Muutos R2->R3 | -14,68 % | Uo | Muutos R2->R3 | -11,56 % | Uo |

5.1.3 Luminanssin pitkittäistasaisuuden muutos

Luminanssin pitkittäistasaisuus vaikuttaa merkittävästi ajo- ja näkömukavuuteen, ja onkin tämän vuoksi yksi autoilijalle tärkeimmistä valaistuksen ominaisuuksista. (Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu, 22)

Luminanssin pitkittäistasaisuus vaihteli huomattavasti päällysteluokan muuttuessa R2:sta luokkaan R3. Taulukosta 5 huomataan, että pitkittäistasaisuus on kaikki poikkileikkaukset ja valmistajat huomioon ottaen laskenut keskimäärin 3,3%.

Valmistajakohtaisia keskiarvoja tarkasteltaessa huomataan, että valmistajien välillä on melko merkittäviäkin eroja. Valmistajan 1 kohdalla pitkittäistasaisuus on keskiarvollisesti noussut noin 4,5%, kun taas valmistajan 3 kohdalla pitkittäistasaisuus on laskenut noin 9,4%. Myös poikkileikkausten kesken on ollut eroja. Poikkileikkaus 1 on osoittautunut profiililtaan erityisen haasteelliseksi päällysteluokan muuttuessa. Ainoastaan valmistajan 1 valaisimilla pitkittäistasaisuus on keskimääräisesti täyttänyt vaaditun arvon, joka taulukon 2 mukaan on 0,40 valaistusluokan ollessa M5. Muidenkin poikkileikkausten kohdalla näyttäisi olevan usein tapauksia, joissa vaadittu raja-arvo ei ole keskimäärin täyttynyt.

Ottaen huomioon kaikki yksittäisten poikkileikkausten ja valmistajien tulokset voidaan todeta päällysteluokan muutoksella luokasta R2 luokkaan R3 olevan hyvin suuri vaikutus luminanssin pitkittäistasaisuuteen. Taulukon 5 tulosten perusteella näyttäisi pitkittäistasaisuus olevan siis mahdollisena esteenä sille, että valaistusteknilliset vaatimukset täytyisivät päällysteluokan muuttuessa R2:sta luokkaan R3.

Suuri vaihtelu luminanssin pitkittäistasaisuudessa johtuu siitä, että päällysteluokan muuttuessa luokasta R2 luokkaan R3 päällysteen pinta muuttuu enemmän peilimäisemmäksi.

Päällysteen pinnan ollessa peilimäisempi, myös häikäisy kasvoi melko monessa tapauksessa niin, että se ei enää täyttänyt valaistusteknillisiä vaatimuksia.

TAULUKKO 5. Luminanssin pitkittäistasaisuuden muutos päällysteluokan muuttuessa luokasta R2 luokkaan R3. Tulokset on esitetty valmistaja- ja poikkileikkauskohtaisesti. Lisäksi taulukossa on esitetty kaikkien valmistajien ja poikkileikkausten yhteenlasketut keskiarvot.

| Pitkittäistasaisuuden (UI) muutos Valmistaja 1 | | | Pitkittäistasaisuuden (UI) muutos Valmistaja 2 | | | Pitkittäistasaisuuden (UI) muutos Valmistaja 3 | | | Pitkittäistasaisuuden (UI) muutos Poikkileikkauskohtainen keskiarvo | | |
|---|----------|----|---|----------|----|---|----------|----|--|----------|----|
| Poikkileikkaus 1 | | | Poikkileikkaus 1 | | | Poikkileikkaus 1 | | | Poikkileikkaus 1 | | |
| R2 | 0,415 | UI | R2 | 0,455 | UI | R2 | 0,403 | UI | R2 | 0,424 | UI |
| R3 | 0,428 | UI | R3 | 0,390 | UI | R3 | 0,375 | UI | R3 | 0,398 | UI |
| Muutos R2->R3 | 3,01 % | UI | Muutos R2->R3 | -14,29 % | UI | Muutos R2->R3 | -6,83 % | UI | Muutos R2->R3 | -6,04 % | UI |
| Poikkileikkaus 2 | | | Poikkileikkaus 2 | | | Poikkileikkaus 2 | | | Poikkileikkaus 2 | | |
| R2 | 0,505 | UI | R2 | 0,465 | UI | R2 | 0,403 | UI | R2 | 0,458 | UI |
| R3 | 0,548 | UI | R3 | 0,478 | UI | R3 | 0,363 | UI | R3 | 0,463 | UI |
| Muutos R2->R3 | 8,42 % | UI | Muutos R2->R3 | 2,69 % | UI | Muutos R2->R3 | -9,94 % | UI | Muutos R2->R3 | 0,39 % | UI |
| Poikkileikkaus 3 | | | Poikkileikkaus 3 | | | Poikkileikkaus 3 | | | Poikkileikkaus 3 | | |
| R2 | 0,495 | UI | R2 | 0,493 | UI | R2 | 0,423 | UI | R2 | 0,470 | UI |
| R3 | 0,570 | UI | R3 | 0,478 | UI | R3 | 0,368 | UI | R3 | 0,472 | UI |
| Muutos R2->R3 | 15,15 % | UI | Muutos R2->R3 | -3,05 % | UI | Muutos R2->R3 | -13,02 % | UI | Muutos R2->R3 | -0,30 % | UI |
| Poikkileikkaus 4 | | | Poikkileikkaus 4 | | | Poikkileikkaus 4 | | | Poikkileikkaus 4 | | |
| R2 | 0,430 | UI | R2 | 0,500 | UI | R2 | 0,428 | UI | R2 | 0,453 | UI |
| R3 | 0,490 | UI | R3 | 0,520 | UI | R3 | 0,375 | UI | R3 | 0,462 | UI |
| Muutos R2->R3 | 13,95 % | UI | Muutos R2->R3 | 4,00 % | UI | Muutos R2->R3 | -12,28 % | UI | Muutos R2->R3 | 1,89 % | UI |
| Poikkileikkaus 5 | | | Poikkileikkaus 5 | | | Poikkileikkaus 5 | | | Poikkileikkaus 5 | | |
| R2 | 0,603 | UI | R2 | 0,623 | UI | R2 | 0,650 | UI | R2 | 0,625 | UI |
| R3 | 0,445 | UI | R3 | 0,610 | UI | R3 | 0,578 | UI | R3 | 0,544 | UI |
| Muutos R2->R3 | -26,14 % | UI | Muutos R2->R3 | -2,01 % | UI | Muutos R2->R3 | -11,15 % | UI | Muutos R2->R3 | -13,10 % | UI |
| Poikkileikkaus 6 | | | Poikkileikkaus 6 | | | Poikkileikkaus 6 | | | Poikkileikkaus 6 | | |
| R2 | 0,640 | UI | R2 | 0,720 | UI | R2 | 0,738 | UI | R2 | 0,699 | UI |
| R3 | 0,720 | UI | R3 | 0,595 | UI | R3 | 0,715 | UI | R3 | 0,677 | UI |
| Muutos R2->R3 | 12,50 % | UI | Muutos R2->R3 | -17,36 % | UI | Muutos R2->R3 | -3,05 % | UI | Muutos R2->R3 | -2,64 % | UI |
| Valmistaja 1 keskiarvo | | | Valmistaja 2 keskiarvo | | | Valmistaja 3 keskiarvo | | | Kaikkien poikkileikkauksien keskiarvo | | |
| Muutos R2->R3 | 4,48 % | UI | Muutos R2->R3 | -5,00 % | UI | Muutos R2->R3 | -9,38 % | UI | Muutos R2->R3 | -3,30 % | UI |

5.1.4 Enimmäispylväsvälien muutos

Taulukossa 6 on esitetty, miten eri valmistajien kohdalla enimmäispylväsvälit ovat keskimäärin muuttuneet, muutettaessa päällysteluokkaa luokasta R2 luokkaan R3. Jokaisen poikkileikkauksen valmistajakohtaiset tulokset on laskettu yhteen ja saadusta summasta on muodostettu valmistajakohtainen keskiarvo. Taulukon 6 valmistajakohtaisia keskiarvoja tarkasteltaessa huomataan, että muutettaessa päällysteluokkaa luokasta R2 luokkaan R3, pylväsvälien muutokset ovat suuruusluokaltaan hyvinkin samankaltaisia eri valmistajien kesken.

TAULUKKO 6. Valmistajakohtaisesti saadut pylväsvälien muutokset. Negatiivinen arvo tarkoittaa, että enimmäispylväsväli on pienentynyt vaihdettaessa päällysteluokka R2:sta R3:een. Enimmäispylväsvälien pienenemiset on ilmoitettu metreinä sekä prosentteina.

| Valmistaja 1 | | Valmistaja 2 | | Valmistaja 3 | |
|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|
| Pylväsvälän muutos keskimäärin | | Pylväsvälän muutos keskimäärin | | Pylväsvälän muutos keskimäärin | |
| Metriä | Prosenttia | Metriä | Prosenttia | Metriä | Prosenttia |
| -3,46 | -6,41 % | -3,42 | -6,38 % | -2,88 | -5,69 % |

Päällysteluokan muuttamisesta luokasta R2 luokkaan R3 johtuvat pylväsvälien muutokset on esitetty tarkemmin taulukoissa 7-8. Taulukosta 7 nähdään, miten enimmäispylväsvälit ovat muuttuneet poikkileikkauksien P1, P2 ja P3 osalta valmistajakohtaisesti, sekä miten kaikkein valmistajien yksittäisten tulosten summasta muodostettu keskiarvo on muuttunut. Taulukossa 8 on esitetty samat tulokset poikkileikkauksien P4, P5 ja P6 osalta.

Tarkasteltaessa taulukoiden 7 ja 8 tuloksia huomataan, että enimmäispylväsvälit pienenevät riippumatta poikkileikkauksen tyypistä. Enimmäispylväsvälit pienenevät noin 2–5 metriä, eli 4–9%.

Tarkasteltaessa miten enimmäispylväsvälit muuttuvat valmistajakohtaisesti huomataan, että yhtä poikkeusta lukuun ottamatta kaikissa poikkileikkauksissa kaikkien valmistajien osalta enimmäispylväsväli pienenee päällysteluokan muuttuessa luokasta R2 luokkaan R3.

TAULUKKO 7. Poikkileikkauksien 1-3 enimmäispylväsvälien muutokset esitetynä metreinä sekä prosentteina, kun päällysteluokka on vaihdettu R2:sta R3:een.

| Poikkileikkaus 1 / Valaistusluokka M5 | | | Poikkileikkaus 2 / Valaistusluokka M4 | | | Poikkileikkaus 3 / Valaistusluokka M3b | | |
|--|------------------------|------------------------|--|------------------------|------------------------|--|------------------------|------------------------|
| Valmistaja 1 | | | Valmistaja 1 | | | Valmistaja 1 | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) |
| +1 | 2 | 4,76 % | +1 | -4 | -8,16 % | +1 | -1 | -1,82 % |
| 0 | -1 | -2,27 % | 0 | -2 | -4,17 % | 0 | -2 | -3,70 % |
| -1 | 3 | 6,52 % | -1 | -2 | -4,88 % | -1 | -2 | -3,92 % |
| -2 | -4 | -8,70 % | -2 | -3 | -7,89 % | -2 | -4 | -7,84 % |
| Muutoksen keskiarvo | 0 | 0,08 % | Muutoksen keskiarvo | -2,75 | -6,28 % | Muutoksen keskiarvo | -2,25 | -4,32 % |
| Valmistaja 2 | | | Valmistaja 2 | | | Valmistaja 2 | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) |
| +1 | -3 | -5,66 % | +1 | -4 | -6,06 % | +1 | -5 | -8,20 % |
| 0 | -3 | -6,00 % | 0 | -2 | -3,08 % | 0 | -6 | -8,82 % |
| -1 | -4 | -9,09 % | -1 | -3 | -5,17 % | -1 | -2 | -3,23 % |
| -2 | -5 | -12,20 % | -2 | -6 | -10,71 % | -2 | -3 | -5,17 % |
| Muutoksen keskiarvo | -3,75 | -8,24 % | Muutoksen keskiarvo | -3,75 | -6,26 % | Muutoksen keskiarvo | -4 | -6,35 % |
| Valmistaja 3 | | | Valmistaja 3 | | | Valmistaja 3 | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) |
| +1 | -2 | -4,44 % | +1 | -2 | -3,64 % | +1 | 0 | 0,00 % |
| 0 | -1 | -2,22 % | 0 | 0 | 0,00 % | 0 | -3 | -5,08 % |
| -1 | 0 | 0,00 % | -1 | -3 | -5,45 % | -1 | -4 | -6,78 % |
| -2 | -5 | -10,87 % | -2 | -2 | -3,70 % | -2 | -4 | -7,14 % |
| Muutoksen keskiarvo | -2,00 | -4,38 % | Muutoksen keskiarvo | -1,75 | -3,20 % | Muutoksen keskiarvo | -2,75 | -4,75 % |
| | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) | | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) | | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) |
| Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 1 osalta | -1,92 | -4,18 % | Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 2 osalta | -2,75 | -5,24 % | Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 3 osalta | -3,00 | -5,14 % |

TAULUKKO 8. Poikkileikkauksien 4-6 enimmäispylväsvälien muutokset esitetynä metreinä sekä prosentteina, kun päällysteluokka vaihdetaan R2:sta R3:een.

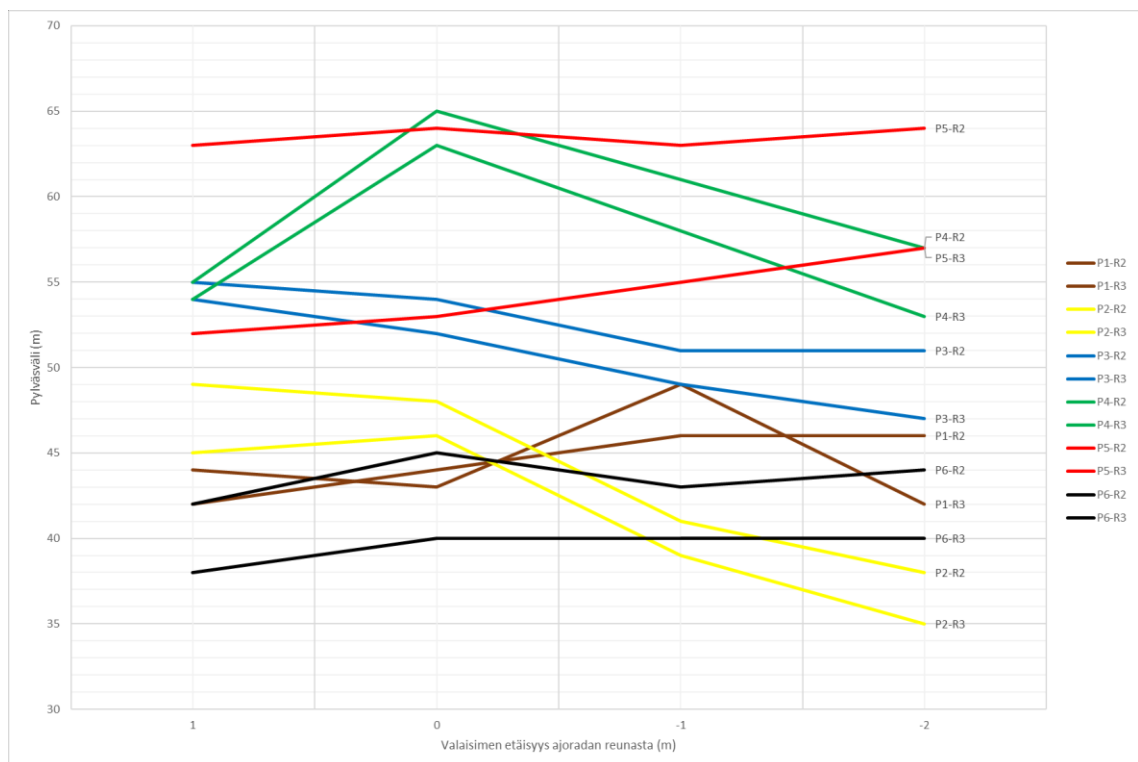
| Poikkileikkaus 4 / Valaistusluokka M3b | | | Poikkileikkaus 5 / Valaistusluokka M2 | | | Poikkileikkaus 6 / Valaistusluokka M1 | | |
|--|------------------------|------------------------|--|------------------------|------------------------|--|------------------------|------------------------|
| Valmistaja 1 | | | Valmistaja 1 | | | Valmistaja 1 | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) |
| +1 | -1 | -1,82 % | +1 | -11 | -17,46 % | +1 | -4 | -9,52 % |
| 0 | -2 | -3,08 % | 0 | -11 | -17,19 % | 0 | -5 | -11,11 % |
| -1 | -3 | -4,92 % | -1 | -8 | -12,70 % | -1 | -3 | -6,98 % |
| -2 | -4 | -7,02 % | -2 | -7 | -10,94 % | -2 | -4 | -9,09 % |
| Muutoksen keskiarvo | -2,5 | -4,21 % | Muutoksen keskiarvo | -9,25 | -14,57 % | Muutoksen keskiarvo | -4 | -9,18 % |
| Valmistaja 2 | | | Valmistaja 2 | | | Valmistaja 2 | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) |
| +1 | -4 | -6,06 % | +1 | 0 | 0,00 % | +1 | -5 | -11,63 % |
| 0 | -1 | -1,64 % | 0 | -3 | -4,17 % | 0 | -4 | -8,70 % |
| -1 | -2 | -3,70 % | -1 | -3 | -4,11 % | -1 | -4 | -9,09 % |
| -2 | -5 | -9,43 % | -2 | -1 | -1,37 % | -2 | -4 | -9,76 % |
| Muutoksen keskiarvo | -3 | -5,21 % | Muutoksen keskiarvo | -1,75 | -2,41 % | Muutoksen keskiarvo | -4,25 | -9,79 % |
| Valmistaja 3 | | | Valmistaja 3 | | | Valmistaja 3 | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) |
| +1 | -2 | -4,08 % | +1 | -1 | -1,82 % | +1 | -4 | -11,43 % |
| 0 | -8 | -14,55 % | 0 | -4 | -6,78 % | 0 | -3 | -7,14 % |
| -1 | -5 | -9,26 % | -1 | -4 | -6,45 % | -1 | -3 | -7,50 % |
| -2 | -4 | -7,55 % | -2 | -2 | -3,28 % | -2 | -3 | -7,32 % |
| Muutoksen keskiarvo | -4,75 | -8,86 % | Muutoksen keskiarvo | -2,75 | -4,58 % | Muutoksen keskiarvo | -3,25 | -8,35 % |
| | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) | | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) | | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) |
| Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 4 osalta | -3,42 | -6,09 % | Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 5 osalta | -4,58 | -7,19 % | Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 6 osalta | -3,83 | -9,11 % |

Alla olevissa kuvaajissa on esitetty valaisimen sijainnin merkitys enimmäispylväsväleihin päällysteluokan muuttuessa luokasta R2 luokkaan R3. Jokaisessa

kuvaajassa on yhteensä 12 viivaa, jotka kuvaavat kunkin poikkileikkauksen pylväsvälejä eri R-luokalla, sekä eri valaisimen etäisyydellä ajoradan reunasta. Kuvaajissa jokaisella poikkileikkauksella on kaksi samanväristä viivaa, jotka on nimetty kuvaajaan esimerkiksi "P1-R2" ja "P1-R3". Toinen viivoista kuvaa siis enimmäispylväsväliä, joka on saavutettu, kun ajoradan päällyste on ollut luokkaa R2 ja toinen viivoista edustaa päällysteluokalla R3 saatuja tuloksia.

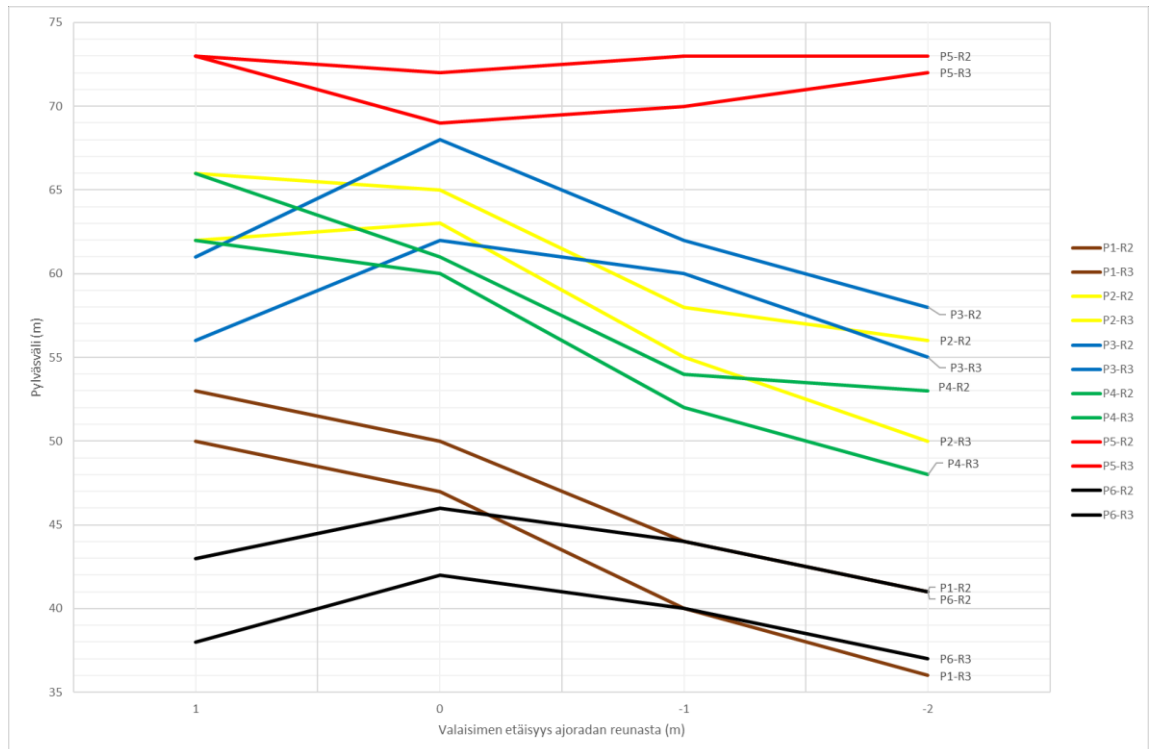
Kuvaajassa 1 esitetyn valmistaja 1:n kohdalla nähdään, että jokaisen poikkileikkauksen kohdalla pätee sama kaava: päällysteluokan ollessa R2 on saavutettu samalla teholla pidempi enimmäispylväsväli kuin päällysteluokalla R3. Poikkileikkauksessa P1, nähdään kuitenkin pientä vuorottelua sen suhteen, kummalla päällysteluokalla on saavutettu pidempi pylväsväli kulloisenkin valaisimen sijainnin suhteen.

Vertailtaessa valaisimen sijoittelun vaikutuksia huomataan, että eri poikkileikkauksien kesken on hajontaa. Osassa poikkileikkauksista enimmäispylväsväli kasvaa siirrettäessä valaisinta kauemmas ajoradan reunasta ja osassa poikkileikkauksista enimmäispylväsväli pienenee.



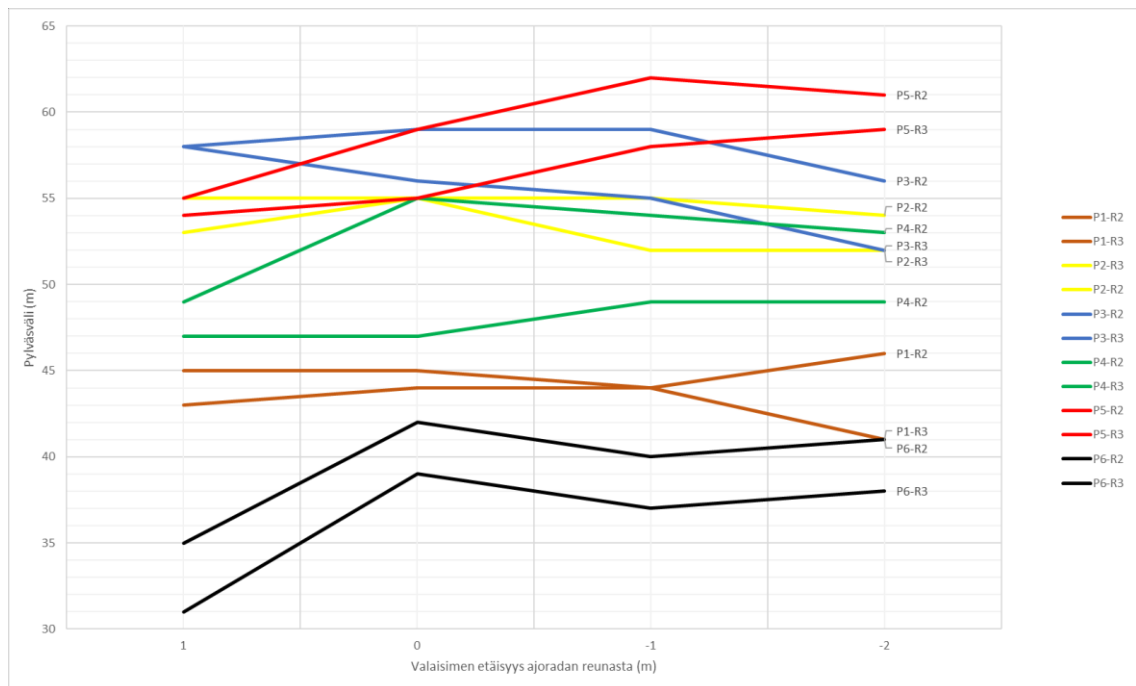
KUVAAJA 1. Valmistaja 1:n enimmäispylväsvälien muutokset, kun päällystelokka vaihdetaan R2:sta R3:een.

Kuvaajassa 2 esitetyn valmistaja 2:n tuloksista huomataan myös, että päällysteluokalla R2 on saavutettu pidempi enimmäispylväsväli kuin päällysteluokalla R3 jokaisen poikkileikkauksen osalta. Poikkileikkausta P6 lukuun ottamatta kaikissa muissa poikkileikkauksissa, siirrettäessä valaisinta kauemmaksi pientareen suuntaan, enimmäispylväsväli on pienentynyt. Siirrettäessä valaisinta ajoradan päälle näyttäisi enimmäispylväsväli pysyvän suunnilleen samana kuin valaisimen ollessa suoraan ajoradan reunan yllä.



KUVAAJA 2. Valmistaja 2:n enimmäispylväsvälien muutokset, kun päällysteluokka vaihdetaan R2:sta R3:een.

Kuvaajassa 3 esitetyn valmistaja 3:n tuloksissa nähdään hieman eroa kahteen ensimmäiseen valmistajaan nähden. Kolmannen valmistajan kohdalla tulokset näyttävät muodostavan melko tasaiset viivat aikaisempiin kuvaajiin verrattuna eli enimmäispylväsväli on pysynyt lähes samana riippumatta valaisimen sijainnista poikkileikkauksessa. Pääsääntöisesti näyttäisi kuitenkin taas käyvän niin, että päällysteluokan R2 avulla on saatu pidempi pylväsväli kuin päällysteluokalla R3.



KUVAAJA 3. Valmistaja 3:n enimmäispylväsvälien muutokset, kun päällysteluokka vaihdetaan R2:sta R3:een.

Vertailtaessa kaikkien tarkasteltavien valmistajien tuloksista muodostettuja kuvia huomataan, että ajoradan päällysteluokalla on selkeä vaikutus enimmäispylväsväleihin. Päällysteluokalla R2 saavutetaan pidemmät pylväsvälit kuin päällysteluokalla R3. Valaisimen sijoittelun suhteen taas on hieman vaihtelua. Tilanteissa, joissa valaisimet on sijoitettu ainoastaan toiselle puolelle ajorataa, huomataan että enimmäispylväsväli pienenee, mitä kauemmaksi valaisinta viedään ajoradan reunasta. Joissakin poikkileikkauksissa, joissa valaisimia on sijoitettu kummallekin puolelle ajorataa, vastakkain toisiinsa nähden, on pylväsväli kasvanut, siirrettäessä valaisimia kauemmaksi ajoradan reunasta.

5.1.5 Päällysteluokan muuttamisen vaikutukset kustannuksiin

Taulukoissa 9-14 on esitetty, miten päällysteluokan muuttaminen R2:sta luokkaan R3 vaikuttaa energiakustannuksiin sekä rakennuskustannuksiin. Energiakustannuksissa on otettu huomioon pörssisähkön, eli spot-sähkön hinta, sekä sähkön siirtohintaa. Sähkön siirtohintaa on selvitetty Tampereen sähköverkon verkkosivuilta. Siirtohintaa muodostuu energiamaksusta 2,57 snt/kWh, sekä sähköve-

rosta 2,79372 snt/kWh (Tampereen Sähkölaitos). Sähköenergian hinta on muodostettu katsomalla Nord Poolin sivuilta viiden viimeisen vuoden kuukausikohtaiset pörssisähkön hinnat. Hinnoista on laskettu keskiarvo, joka on 3,72 snt/kWh (Nord Pool). Kaikissa laskelmissa katuvalaistuksen polttoajaksi on oletettu 3600 tuntia (Tampereen kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat, 17).

Rakennuskustannuksia tarkasteltaessa yhdeksi ”rakenteeksi” on määritelty valaisimesta, pylvästä ja jalustasta muodostuva kokonaisuus. Valaisinten hinnat on kyselyt puhelimitse suoraan valmistajilta. Valaisinten hinnoissa ei ole otettu huomioon esimerkiksi Tampereen alueella valaisimiin asennettavia Zhaga tai NEMA-liittimiä tai urakoitsijan katetta, vaan hinnat ovat niin sanottuja budjettihintoja. Tässä työssä käsiteltyjen valaisimien hinnoittelu riippuu jokaisen valmistajan kohdalla valaisimen runkokoosta. Valaisimen teholla tai ledien lukumäärällä ei ole katsottu olevan vaikutusta valaisimen hintaan, kunhan runkokoko on pysynyt samana.

Yhteen rakenteeseen kuuluu siis valaisimen lisäksi myös pylväs ja jalusta. Näiden hinnat on katsottu suoraan tukkurin sivuilta ja jokaiseen poikkileikkaukseen löytyikin pylvään ja jalustan osalta sopivia vakiomalleja. Sähkötukkuliiikkeen sivuilta saadut hinnat ovat olleet alv 0%.

Kaapeleiden määrän muutoksen on katsottu olevan kokonaiskustannuksiin nähdessä niin pieni, että niitä ei ole otettu huomioon laskelmissa.

TAULUKKO 9. Taulukossa on esitetty miten teho, rakenteiden määrä, energiakustannukset sekä rakennuskustannukset muuttuvat poikkileikkauksen 1 osalta, kun lasketaan eri valmistajien tuloksista saadut arvot yhteen ja otetaan niistä keskiarvo.

| Poikkileikkaus 1 | Päällysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|
| | R2 | 1112,75 | 364,00 € |
| | R3 | 1158,58 | 378,99 € |
| | Muutos R2->R3 | 45,83 | 14,99 € |
| | Muutos prosentteina | | 4,12 % |
| Poikkileikkaus 1 | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 21,99 | 21 958,59 € |
| | R3 | 22,95 | 22 919,90 € |
| | Muutos R2->R3 | 0,96 | 961,31 € |
| | Muutos prosentteina | | 4,38 % |

TAULUKKO 10. Taulukossa on esitetty miten teho, rakenteiden määrä, energia-kustannukset sekä rakennuskustannukset muuttuvat poikkileikkauksen 2 osalta, kun lasketaan eri valmistajien tuloksista saadut arvot yhteen ja otetaan niistä kes-kiarvo.

| Poikkileikkaus 2 | Päällysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|
| | R2 | 1666,58 | 545,16 € |
| | R3 | 1765,00 | 577,36 € |
| | Muutos R2->R3 | 98,42 | 32,19 € |
| | Muutos prosentteina | | 5,91 % |
| Poikkileikkaus 2 | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 19,11 | 24 562,86 € |
| | R3 | 20,17 | 25 903,85 € |
| | Muutos R2->R3 | 1,06 | 1 340,98 € |
| | Muutos prosentteina | | 5,46 % |

TAULUKKO 11. Taulukossa on esitetty miten teho, rakenteiden määrä, energia-kustannukset sekä rakennuskustannukset muuttuvat poikkileikkauksen 3 osalta, kun lasketaan eri valmistajien tuloksista saadut arvot yhteen ja otetaan niistä kes-kiarvo.

| Poikkileikkaus 3 | Päällysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|
| | R2 | 2755,25 | 901,28 € |
| | R3 | 2890,00 | 945,36 € |
| | Muutos R2->R3 | 134,75 | 44,08 € |
| | Muutos prosentteina | | 4,89 % |
| Poikkileikkaus 3 | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 17,42 | 22 431,61 € |
| | R3 | 18,36 | 23 632,51 € |
| | Muutos R2->R3 | 0,94 | 1 200,90 € |
| | Muutos prosentteina | | 5,35 % |

TAULUKKO 12. Taulukossa on esitetty miten teho, rakenteiden määrä, energia-kustannukset sekä rakennuskustannukset muuttuvat poikkileikkauksen 4 osalta, kun lasketaan eri valmistajien tuloksista saadut arvot yhteen ja otetaan niistä kes-kiarvo.

| Poikkileikkaus 4 | Päällysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|
| | R2 | 2149,25 | 703,05 € |
| | R3 | 2291,17 | 749,47 € |
| | Muutos R2->R3 | 141,92 | 46,42 € |
| | Muutos prosentteina | | 6,60 % |
| Poikkileikkaus 4 | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 17,62 | 45 777,03 € |
| | R3 | 18,80 | 48 905,48 € |
| | Muutos R2->R3 | 1,18 | 3 128,45 € |
| | Muutos prosentteina | | 6,83 % |

TAULUKKO 13. Taulukossa on esitetty miten teho, rakenteiden määrä, energia-kustannukset sekä rakennuskustannukset muuttuvat poikkileikkauksen 5 osalta, kun lasketaan eri valmistajien tuloksista saadut arvot yhteen ja otetaan niistä keskiarvo.

| Poikkileikkaus 5 | Päällysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|
| | R2 | 7456,33 | 2 439,08 € |
| | R3 | 7978,33 | 2 609,83 € |
| | Muutos R2->R3 | 522,00 | 170,75 € |
| | Muutos prosentteina | | 7,00 % |
| Poikkileikkaus 5 | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 15,46 | 37 787,39 € |
| | R3 | 16,74 | 40 849,23 € |
| | Muutos R2->R3 | 1,28 | 3 061,84 € |
| | Muutos prosentteina | | 8,10 % |

TAULUKKO 14. Taulukossa on esitetty miten teho, rakenteiden määrä, energia-kustannukset sekä rakennuskustannukset muuttuvat poikkileikkauksen 6 osalta, kun lasketaan eri valmistajien tuloksista saadut arvot yhteen ja otetaan niistä keskiarvo.

| Poikkileikkaus 6 | Päällysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|
| | R2 | 5866,42 | 1 918,99 € |
| | R3 | 6439,33 | 2 106,40 € |
| | Muutos R2->R3 | 572,92 | 187,41 € |
| | Muutos prosentteina | | 9,77 % |
| Poikkileikkaus 6 | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 23,76 | 64 553,08 € |
| | R3 | 26,13 | 70 979,09 € |
| | Muutos R2->R3 | 2,36 | 6 426,00 € |
| | Muutos prosentteina | | 9,95 % |

Kun kaikkien poikkileikkausten kustannusten muutokset lasketaan yhteen ja otetaan saadusta summasta keskiarvo, huomataan, että kustannukset nousevat, jos päällysteluokka muuttuu R2:sta R3:een (taulukko 15).

TAULUKKO 15. Kustannusten nousu ilmaistuna kaikista poikkileikkauksista saadun keskiarvon avulla.

| | |
|---|--------|
| Energiakustannusten keskimääräinen nousu | 6,38 % |
| Rakennuskustannusten keskimääräinen nousu | 6,68 % |

5.2 Valaistuksen mitoittaminen päällysteluokan R3 mukaan

Kuten aiemmin todettiin, niin muutettaessa pelkästään päällysteluokkaa R3:een lähes kaikki valaistustekniset ominaisuudet kärsivät verrattuna päällysteluokalla R2 saavutettuun tilanteeseen. Viimeiseksi mitoitettiin siis valaistus täyttämään kaikki valaistustekniset vaatimukset niin, että päällysteluokkana oli R3.

R3 päällysteluokalla mitoitettun valaistuksen osalta huomattiin mielenkiintoisia muutoksia, enimmäispylväsvälin pienenemisen lisäksi. Verrattaessa R3 päällysteluokalla mitoitettua tilannetta R2 päällysteluokalla mitoitettuun tilanteeseen, luminanssin pitkittäistasaisuus parani keskimäärin noin 8 %:lla ja luminanssin yleistasaisuus laski keskimäärin noin 9 %:lla.

Keskimääräisen luminanssin suhteen R3 päällysteluokalle mitoitettu valaistus ei juuri eroa R2 päällysteluokalle mitoitetusta valaistuksesta. Kummallakin päällysteluokalla mitoitettaessa keskimääräinen luminanssi on hyvin lähellä vaadittua raja-arvoa muiden valaistusteknistien suureiden ollessa usein yli vaaditun minimin. Näyttäisi siis siltä, että keskimääräinen luminanssi on usein ainakin yksi merkittävimmistä tekijöistä valaistuksen mitoituksessa.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työn tuloksista käy selvästi ilmi, mihin päällysteluokan muuttaminen luokasta R2, luokkaan R3 johtaa Tampereen kaupungin alueella. Katuvalaistuksen rakentamiskustannukset nousevat joillakin prosentteilla verrattuna tapaukseen, jossa päällysteluokkana on R2, sillä valaistuslaitteita (valaisin, valaisinpylväs ja jalusta) tarvitaan enemmän kilometriä kohden. Valaistusteknillisiä ominaisuuksia tarkasteltaessa huomattiin, että päällysteluokan muuttumisella luokasta R2 luokkaan R3 on sekä hyviä, että huonoja vaikutuksia mitoitettaessa valaistusta. Tästä esimerkkinä pitkittäistasaisuuden nouseminen, jota voidaan pitää hyvänä muutoksena ja yleistasaisuuden laskeminen, jota puolestaan voidaan pitää huonona muutoksena.

Työssä on tarkasteltu kustannusvertailuissa nimenomaan teoreettista kilometrin mittaista suoraa kadun osuutta. Tämän vuoksi onkin hyvä muistaa, että todellisuudessa harva katu Tampereen kaupungin alueella on täysin suora alusta loppuun. Kadun mutkittelu, liittymäalueet ja maahan asennetut rakenteet pakottavat usein teoreettista enimmäispylväsväliä lyhyempiin pylväsväleihin. Tästä syystä enimmäispylväsvälin pieneneminen ei käytännössä johda niin suureen kustannusten nousuun kuin taulukossa 15 on esitetty.

Työssä pyrittiin valitsemaan tarkasteltavaksi valaistusteknillisestä näkökulmasta merkittävimmät muuttujat. Valaistuslaskenta tehtiin seulomalla noin kahdestakymmenestä poikkileikkauksesta kuusi parhaiten todellisia tilanteita vastaavia poikkileikkauksia, joten työn otanta on ollut kattava. Valaisinvalmistajia työssä oli mukana kolmea erilaista, ja valaisimista on käytetty vakiona olevia tarkkoja tehoja sekä valovirta-arvoja. Kaiken edellä mainitun huomioon ottaen tuloksia voidaan pitää melko luotettavina ja kertovan hyvin, miten päällysteluokan muutos vaikuttaa valaistuksen suunnitteluun.

Työn voidaan katsoa olevan laskelmien kannalta onnistunut. Aihetta käsittelevää teoriaa on melko vähän tarjolla suomenkielisenä, ja sanasto on osittain sen luonteista, että välillä on haastavaa ilmaista suomeksi asioita niin että niiden merkitys ei muuttuisi alkuperäisestä.

Jatkotutkimuksena aiheeseen liittyen voitaisiin tutkia, miten päällysteen vaaleusasteen muutos vaikuttaisi tarkemmin valaistusteknillisiin suureisiin. Teorian perusteella nimittäin näyttäisi siltä, että vaaleampi päällyste olisi valaistuksen kannalta parempi. Lisäksi voitaisiin tutkia vielä, miten märkä ajorata käyttäytyy, kun päällysteluokkaa muutetaan.

LÄHTEET

CIE 140:2019 Road Lighting Calculations, 2nd Edition. 2019. Commission Internationale de L'Eclairage. CIE Central Bureau.

DIALux. Software. Luettu 15.8.2020. <https://www.dialux.com/>

Ekrias A. 2020. Päälysteiden valonheijastusominaisuudet. Väyläviraston tutkimuksia 2020, julkaistaan vuoden 2021 alussa. Opinnäytetyön tekijän hallussa.

Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu. 2015. Väyläviraston julkaisu. Luettu 16.8.2020 https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2015-16_maantie_rautatiealueiden_web.pdf

Nord Pool. Market data. Nord Pool day ahead. Prices. Luettu 19.11.2020. <https://www.nordpoolgroup.com>

Relux. Software. ReluxDesktop, Luettu 16.8.2020. <https://relux.com>

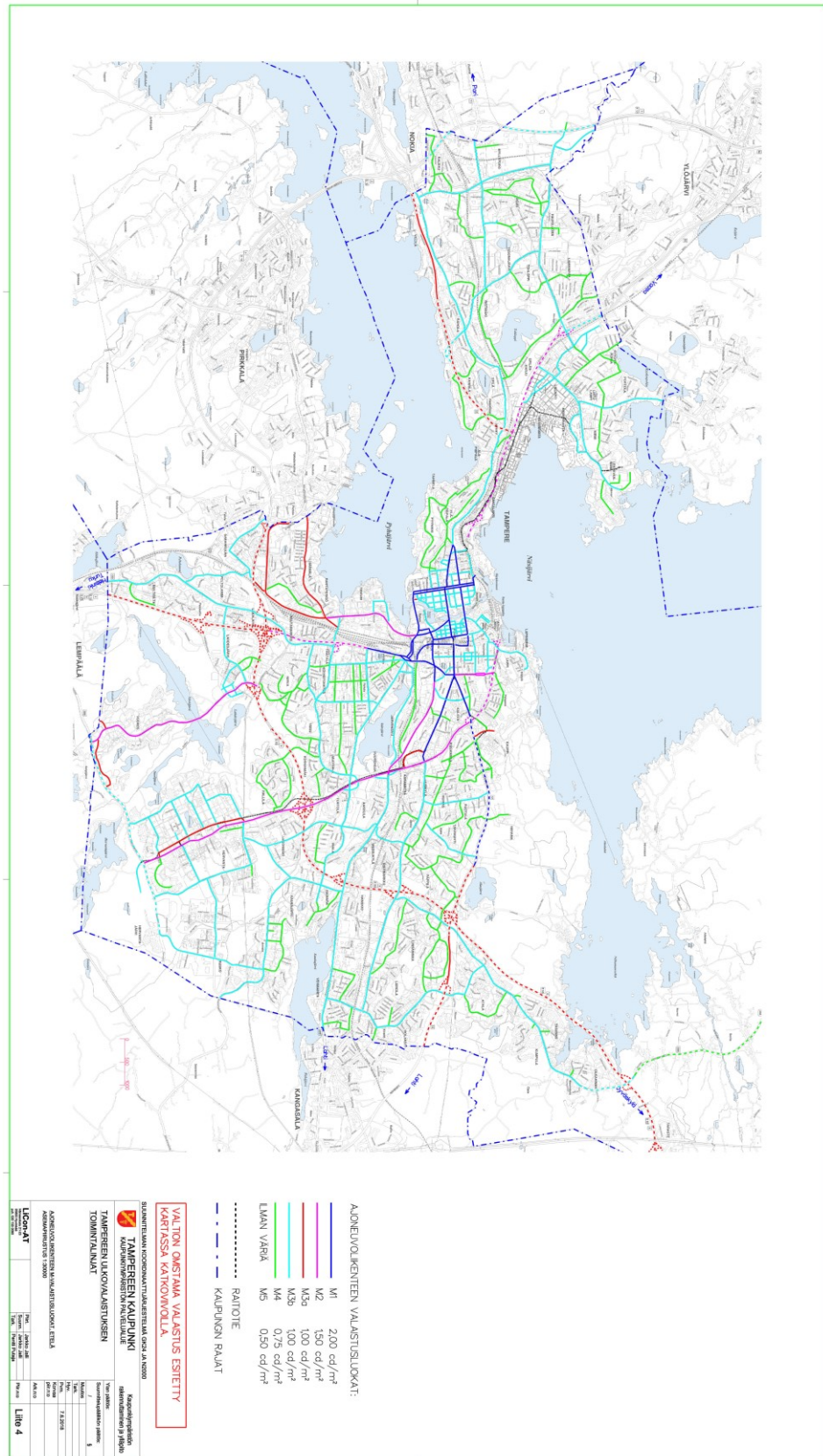
Tampereen kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat. 29.11.2018. LIITE 4. Ajonauvoliikenteen M-valaistusluokat. Luettu 9.6.2020.

Tampereen Sähkölaitos. Palvelut ja tuotteet. Tuotteet ja hinnastot. Luettu 20.11.2020. <https://www.sahkolaitos.fi>

van Bommel W. Road Lighting. Fundamentals, Technology and Application. 2015. Springer International Publishing Switzerland.

LIITTEET

Liite 1. Ajoneuvoliikenteen M-valaistusluokat (Tampereen kaupungin ulkovalaistuksen toimintalinjat, LIITE 4)



Liite 2. Valmistaja ja poikkileikkauskohtaiset päällysteluokan muuttumisen vaikutukset enimmäispylväsväleihin sekä kustannuksiin.

| Valmistaja 2 | | | | Valmistaja 3 | | | | Valmistaja 1 | | | |
|-----------------|--------------------|-------------|---------------------------|-----------------|--------------------|-------------|---------------------------|-----------------|--------------------|-------------|---------------------------|
| Polkileikkaus | Päällysteluokka | Teho (W/km) | Energiakestamukset (€/km) | Polkileikkaus | Päällysteluokka | Teho (W/km) | Energiakestamukset (€/km) | Polkileikkaus | Päällysteluokka | Teho (W/km) | Energiakestamukset (€/km) |
| P1 | R2 | 828 | 270,85 € | P1 | R2 | 1361,5 | 445,37 € | P1 | R2 | 1148,75 | 375,77 € |
| Valistusluokka | R3 | 905 | 1423,25 € | Valistusluokka | R3 | 465,57 € | 1147,5 | Valistusluokka | R3 | 147,5 | 375,36 € |
| Muutos | | 77 | 25,19 € | Muutos | | 61,75 | 20,20 € | Muutos | | -1,25 | 0,41 € |
| M5 | R2 | 77 | 25,19 € | M5 | R2 | 20,20 € | 61,75 | M5 | R2 | -1,25 | 0,41 € |
| Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 77 | 25,19 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 20,20 € | 61,75 | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | -1,25 | 0,41 € |
| R2 | 21,24 | 207,64,68 € | 22,22 | 23,33 € | 22,22 | 23,33 € | 22,47 | 21,797,75 € | 22,47 | 21,797,75 € | |
| R3 | 23,12 | 225,43,35 € | 23,26 | 24,418,60 € | 23,26 | 24,418,60 € | 22,47 | 21,797,75 € | 22,47 | 21,797,75 € | |
| Muutos | 1,84 | 1,798,67 € | 1,03 | 1,095,27 € | 1,03 | 1,095,27 € | 0,00 | - | 0,00 | - | |
| Polkileikkaus | Teho (W/km) | 1,84 | 1,798,67 € | Polkileikkaus | Teho (W/km) | 1,03 | 1,095,27 € | Polkileikkaus | Teho (W/km) | 0,00 | - |
| P4 | R2 | 1383,75 | 419,93 € | P4 | R2 | 2146,25 | 702,07 € | P4 | R2 | 1569,75 | 513,49 € |
| Valistusluokka | R3 | 1382,5 | 452,24 € | Valistusluokka | R3 | 2204,75 | 721,21 € | Valistusluokka | R3 | 1707,75 | 558,63 € |
| Muutos | | 98,75 | 32,30 € | Muutos | | 58,5 | 19,14 € | Muutos | | 138 | 45,14 € |
| M4 | R2 | 16,33 | 20,163,27 € | M4 | R2 | 18,26 | 25,570,78 € | M4 | R2 | 22,73 | 27,954,55 € |
| Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 16,33 | 20,163,27 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 18,26 | 25,570,78 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 22,73 | 27,954,55 € |
| R2 | 17,99 | 21,478,26 € | 18,87 | 26,415,09 € | 18,87 | 26,415,09 € | 24,24 | 29,818,14 € | 24,24 | 29,818,14 € | |
| Muutos | | 1,06 | 1,315,00 € | Muutos | | 0,60 | 844,32 € | Muutos | | 1,52 | 1,863,64 € |
| Polkileikkaus | Teho (W/km) | 1,06 | 1,315,00 € | Polkileikkaus | Teho (W/km) | 0,60 | 844,32 € | Polkileikkaus | Teho (W/km) | 1,52 | 1,863,64 € |
| P3 | R2 | 2432 | 795,54 € | P3 | R2 | 3177,25 | 1,039,33 € | P3 | R2 | 2656,5 | 868,98 € |
| Valistusluokka | R3 | 2628,75 | 859,80 € | Valistusluokka | R3 | 3315,75 | 1,084,63 € | Valistusluokka | R3 | 2725,5 | 891,55 € |
| Muutos | | 196,75 | 64,26 € | Muutos | | 138,5 | 45,31 € | Muutos | | 69 | 22,57 € |
| M3b | R2 | 16,06 | 19,839,36 € | M3b | R2 | 17,24 | 24,137,93 € | M3b | R2 | 18,96 | 23,317,54 € |
| Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 16,06 | 19,839,36 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 17,24 | 24,137,93 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 18,96 | 23,317,54 € |
| R2 | 17,17 | 21,201,72 € | 18,10 | 25,399,37 € | 18,10 | 25,399,37 € | 19,80 | 24,356,44 € | 19,80 | 24,356,44 € | |
| Muutos | | 1,10 | 1,362,36 € | Muutos | | 0,86 | 1,201,44 € | Muutos | | 0,84 | 1,038,90 € |
| Polkileikkaus | Teho (W/km) | 1,10 | 1,362,36 € | Polkileikkaus | Teho (W/km) | 0,86 | 1,201,44 € | Polkileikkaus | Teho (W/km) | 0,84 | 1,038,90 € |
| P4 | R2 | 1383 | 609,41 € | P4 | R2 | 2306,75 | 754,57 € | P4 | R2 | 2278 | 745,17 € |
| Valistusluokka | R3 | 1971 | 64,74 € | Valistusluokka | R3 | 2883,5 | 81,402 € | Valistusluokka | R3 | 2414 | 789,55 € |
| Muutos | | 108 | 35,33 € | Muutos | | 181,75 | 59,45 € | Muutos | | 136 | 44,49 € |
| M3b | R2 | 17,09 | 42,905,98 € | M3b | R2 | 18,96 | 53,080,57 € | M3b | R2 | 16,81 | 41,344,54 € |
| Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 17,09 | 42,905,98 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 18,96 | 53,080,57 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 16,81 | 41,344,54 € |
| R2 | 18,02 | 45,225,23 € | 20,83 | 58,333,33 € | 20,83 | 58,333,33 € | 17,54 | 43,157,89 € | 17,54 | 43,157,89 € | |
| Muutos | | 0,92 | 2,319,24 € | Muutos | | 1,88 | 5,282,76 € | Muutos | | 0,74 | 1,813,36 € |
| Polkileikkaus | Teho (W/km) | 0,92 | 2,319,24 € | Polkileikkaus | Teho (W/km) | 1,88 | 5,282,76 € | Polkileikkaus | Teho (W/km) | 0,74 | 1,813,36 € |
| P5 | R2 | 7420 | 2,427,19 € | P5 | R2 | 7973 | 2,608,09 € | P5 | R2 | 6976 | 2,281,95 € |
| Valistusluokka | R3 | 7420 | 2,427,19 € | Valistusluokka | R3 | 8449 | 2,763,79 € | Valistusluokka | R3 | 8066 | 2,638,51 € |
| Muutos | | 0 | - | Muutos | | 476 | 155,71 € | Muutos | | 1090 | 356,56 € |
| M2 | R2 | 13,75 | 31,408,93 € | M2 | R2 | 16,88 | 45,654,01 € | M2 | R2 | 15,75 | 36,289,21 € |
| Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 13,75 | 31,408,93 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 16,88 | 45,654,01 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 15,75 | 36,289,21 € |
| R2 | 14,08 | 32,183,10 € | 17,70 | 47,876,11 € | 17,70 | 47,876,11 € | 18,43 | 42,488,48 € | 18,43 | 42,488,48 € | |
| Muutos | | 0,34 | 774,16 € | Muutos | | 0,82 | 2,222,10 € | Muutos | | 2,69 | 6,189,27 € |
| Polkileikkaus | Teho (W/km) | 0,34 | 774,16 € | Polkileikkaus | Teho (W/km) | 0,82 | 2,222,10 € | Polkileikkaus | Teho (W/km) | 2,69 | 6,189,27 € |
| P6 | R2 | 5152 | 1,685,30 € | P6 | R2 | 6191,25 | 2,005,25 € | P6 | R2 | 6256 | 2,046,43 € |
| Valistusluokka | R3 | 5712 | 1,868,48 € | Valistusluokka | R3 | 6738 | 2,204,10 € | Valistusluokka | R3 | 6868 | 2,246,62 € |
| Muutos | | 560 | 183,18 € | Muutos | | 546,75 | 178,85 € | Muutos | | 612 | 200,19 € |
| M1 | R2 | 22,99 | 57,701,15 € | M1 | R2 | 25,32 | 63,544,30 € | M1 | R2 | 22,99 | 72,413,79 € |
| Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 22,99 | 57,701,15 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 25,32 | 63,544,30 € | Päällysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | 22,99 | 72,413,79 € |
| R2 | 25,48 | 63,949,04 € | 27,59 | 69,241,38 € | 27,59 | 69,241,38 € | 25,32 | 79,756,84 € | 25,32 | 79,756,84 € | |
| Muutos | | 2,49 | 6,247,90 € | Muutos | | 2,27 | 5,697,08 € | Muutos | | 2,33 | 7,333,04 € |

Liite 3. Päälysteluokan muutoksen keskimääräiset vaikutukset kustannuksiin poikkileikkauskohtaisesti.

| Päälysteluokan muuttamamisen vaikutus kustannuksiin. Valmistajien tulokset yhdistetty ja niistä laskettu keskiarvo. | | | |
|--|-----------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Poikkileikkaus 1 | Päälysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
| | R2 | 1112,75 | 364,00 € |
| | R3 | 1158,58 | 378,99 € |
| | Muutos R2->R3 | 45,83 | 14,99 € |
| | Muutos prosentteina | | 4,12 % |
| Poikkileikkaus 1 | Päälysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 21,99 | 21 958,59 € |
| | R3 | 22,95 | 22 919,90 € |
| | Muutos R2->R3 | 0,96 | 961,31 € |
| | Muutos prosentteina | | 4,38 % |
| Poikkileikkaus 2 | Päälysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
| | R2 | 1666,58 | 545,16 € |
| | R3 | 1765,00 | 577,36 € |
| | Muutos R2->R3 | 98,42 | 32,19 € |
| | Muutos prosentteina | | 5,91 % |
| Poikkileikkaus 2 | Päälysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 19,11 | 24 562,86 € |
| | R3 | 20,17 | 25 903,85 € |
| | Muutos R2->R3 | 1,06 | 1 340,98 € |
| | Muutos prosentteina | | 5,46 % |
| Poikkileikkaus 3 | Päälysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
| | R2 | 2755,25 | 901,28 € |
| | R3 | 2890,00 | 945,36 € |
| | Muutos R2->R3 | 134,75 | 44,08 € |
| | Muutos prosentteina | | 4,89 % |
| Poikkileikkaus 3 | Päälysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 17,42 | 22 431,61 € |
| | R3 | 18,36 | 23 632,51 € |
| | Muutos R2->R3 | 0,94 | 1 200,90 € |
| | Muutos prosentteina | | 5,35 % |
| Poikkileikkaus 4 | Päälysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
| | R2 | 2149,25 | 703,05 € |
| | R3 | 2291,17 | 749,47 € |
| | Muutos R2->R3 | 141,92 | 46,42 € |
| | Muutos prosentteina | | 6,60 % |
| Poikkileikkaus 4 | Päälysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 17,62 | 45 777,03 € |
| | R3 | 18,80 | 48 905,48 € |
| | Muutos R2->R3 | 1,18 | 3 128,45 € |
| | Muutos prosentteina | | 6,83 % |
| Poikkileikkaus 5 | Päälysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
| | R2 | 7456,33 | 2 439,08 € |
| | R3 | 7978,33 | 2 609,83 € |
| | Muutos R2->R3 | 522,00 | 170,75 € |
| | Muutos prosentteina | | 7,00 % |
| Poikkileikkaus 5 | Päälysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 15,46 | 37 787,39 € |
| | R3 | 16,74 | 40 849,23 € |
| | Muutos R2->R3 | 1,28 | 3 061,84 € |
| | Muutos prosentteina | | 8,10 % |
| Poikkileikkaus 6 | Päälysteluokka | Teho (W/km) | Energiakustannukset (€/km) |
| | R2 | 5866,42 | 1 918,99 € |
| | R3 | 6439,33 | 2 106,40 € |
| | Muutos R2->R3 | 572,92 | 187,41 € |
| | Muutos prosentteina | | 9,77 % |
| Poikkileikkaus 6 | Päälysteluokka | Rakenteet (kpl/km) | Rakennuskustannukset (€/km) |
| | R2 | 23,76 | 64 553,08 € |
| | R3 | 26,13 | 70 979,09 € |
| | Muutos R2->R3 | 2,36 | 6 426,00 € |
| | Muutos prosentteina | | 9,95 % |

Liite 4. Pylväsvälien keskimääräiset muutokset poikkileikkauskohtaisesti. 1 (2)

| Poikkileikkaus 1 / Valaistuluokka M5 | | | | Poikkileikkaus 2 / Valaistuluokka M4 | | | | Poikkileikkaus 3 / Valaistuluokka M3b | | | |
|---|------------------------|------------------------|--|---|------------------------|------------------------|--|---|------------------------|------------------------|--|
| Valmistaja 1 | | | | Valmistaja 1 | | | | Valmistaja 1 | | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | |
| +1 | 2 | 4,76 % | | +1 | -4 | -8,16 % | | +1 | -1 | -1,82 % | |
| 0 | -1 | -2,27 % | | 0 | -2 | -4,17 % | | 0 | -2 | -3,70 % | |
| -1 | 3 | 6,52 % | | -1 | -2 | -4,88 % | | -1 | -2 | -3,92 % | |
| -2 | -4 | -8,70 % | | -2 | -3 | -7,89 % | | -2 | -4 | -7,84 % | |
| Muutoksen keskiarvo | 0 | 0,08 % | | Muutoksen keskiarvo | -2,75 | -6,28 % | | Muutoksen keskiarvo | -2,25 | -4,32 % | |
| Valmistaja 2 | | | | Valmistaja 2 | | | | Valmistaja 2 | | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | |
| +1 | -3 | -5,66 % | | +1 | -4 | -6,06 % | | +1 | -5 | -8,20 % | |
| 0 | -3 | -6,00 % | | 0 | -2 | -3,08 % | | 0 | -6 | -8,82 % | |
| -1 | -4 | -9,09 % | | -1 | -3 | -5,17 % | | -1 | -2 | -3,23 % | |
| -2 | -5 | -12,20 % | | -2 | -6 | -10,71 % | | -2 | -3 | -5,17 % | |
| Muutoksen keskiarvo | -3,75 | -8,24 % | | Muutoksen keskiarvo | -3,75 | -6,26 % | | Muutoksen keskiarvo | -4 | -6,35 % | |
| Valmistaja 3 | | | | Valmistaja 3 | | | | Valmistaja 3 | | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | |
| +1 | -2 | -4,44 % | | +1 | -2 | -3,64 % | | +1 | 0 | 0,00 % | |
| 0 | -1 | -2,22 % | | 0 | 0 | 0,00 % | | 0 | -3 | -5,08 % | |
| -1 | 0 | 0,00 % | | -1 | -3 | -5,45 % | | -1 | -4 | -6,78 % | |
| -2 | -5 | -10,87 % | | -2 | -2 | -3,70 % | | -2 | -4 | -7,14 % | |
| Muutoksen keskiarvo | -2,00 | -4,38 % | | Muutoksen keskiarvo | -1,75 | -3,20 % | | Muutoksen keskiarvo | -2,75 | -4,75 % | |
| | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) | | | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) | | | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) | |
| Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 1 osalta | -1,92 | -4,18 % | | Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 2 osalta | -2,75 | -5,24 % | | Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 3 osalta | -3,00 | -5,14 % | |

Liite 5. Pylväsvälien keskimääräiset muutokset poikkileikkauskohtaisesti. 2 (2)

| Poikkileikkaus 4 / Valaistuluokka M3b | | | | Poikkileikkaus 5 / Valaistuluokka M2 | | | | Poikkileikkaus 6 / Valaistuluokka M1 | | | |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| Valmistaja 1 | | | | Valmistaja 1 | | | | Valmistaja 1 | | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) |
| +1 | -1 | -1 | -1,82 % | +1 | -11 | -17 | -46 % | +1 | -4 | -9 | -52 % |
| 0 | -2 | -3 | -3,08 % | 0 | -11 | -17 | -19 % | 0 | -5 | -11 | -11 % |
| -1 | -3 | -4 | -4,92 % | -1 | -8 | -12 | -70 % | -1 | -3 | -6 | -98 % |
| -2 | -4 | -7 | -7,02 % | -2 | -7 | -10 | -94 % | -2 | -4 | -9 | -9,09 % |
| Muutoksen keskiarvo | -2,5 | -4,21 % | | Muutoksen keskiarvo | -9,25 | -14,57 % | | Muutoksen keskiarvo | -4 | -9,18 % | |
| Valmistaja 2 | | | | Valmistaja 2 | | | | Valmistaja 2 | | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) |
| +1 | -4 | -6 | -6,06 % | +1 | 0 | 0 | 0 % | +1 | -5 | -11 | -63 % |
| 0 | -1 | -1 | -1,64 % | 0 | -3 | -4 | -17 % | 0 | -4 | -8 | -70 % |
| -1 | -2 | -3 | -3,70 % | -1 | -3 | -4 | -11 % | -1 | -4 | -9 | -9,09 % |
| -2 | -5 | -9 | -9,43 % | -2 | -1 | -1 | -37 % | -2 | -4 | -9 | -7,6 % |
| Muutoksen keskiarvo | -3 | -5,21 % | | Muutoksen keskiarvo | -1,75 | -2,41 % | | Muutoksen keskiarvo | -4,25 | -9,79 % | |
| Valmistaja 3 | | | | Valmistaja 3 | | | | Valmistaja 3 | | | |
| Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) | Valaisimen etäisyys ajoradan reunasta (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (m) | Pylväsvälin muutos (%) |
| +1 | -2 | -4 | -4,08 % | +1 | -1 | -1 | -8,2 % | +1 | -4 | -11 | -43 % |
| 0 | -8 | -14 | -5,5 % | 0 | -4 | -6 | -7,8 % | 0 | -3 | -7 | -14 % |
| -1 | -5 | -9 | -2,6 % | -1 | -4 | -6 | -4,5 % | -1 | -3 | -7 | -5,0 % |
| -2 | -4 | -7 | -5,5 % | -2 | -2 | -3 | -2,8 % | -2 | -3 | -7 | -3,2 % |
| Muutoksen keskiarvo | -4,75 | -8,86 % | | Muutoksen keskiarvo | -2,75 | -4,58 % | | Muutoksen keskiarvo | -3,25 | -8,35 % | |
| | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) | | | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) | | | Pylväsväli (m) | Pylväsväli (%) | |
| Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 4 osalta | -3,42 | -6,09 % | | Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 5 osalta | -4,58 | -7,19 % | | Keskimääräinen muutos poikkileikkauksen 6 osalta | -3,83 | -9,11 % | |

Liite 6. Pitkittäistasaisuuden keskimääräiset muutokset.

| Pitkittäistasaisuuden (UI) muutos | | Pitkittäistasaisuuden (UI) muutos | | Pitkittäistasaisuuden (UI) muutos | | Pitkittäistasaisuuden (UI) muutos | |
|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|----------|--|----------|
| Valmistaja 1 | | Valmistaja 2 | | Valmistaja 3 | | Poikkileikkauskohtainen keskiarvo | |
| Poikkileikkaus 1 | | Poikkileikkaus 1 | | Poikkileikkaus 1 | | Poikkileikkaus 1 | |
| R2 | 0,415 | R2 | 0,455 | R2 | 0,403 | R2 | 0,424 |
| R3 | 0,428 | R3 | 0,390 | R3 | 0,375 | R3 | 0,398 |
| Muutos R2->R3 | 3,01 % | Muutos R2->R3 | -14,29 % | Muutos R2->R3 | -6,83 % | Muutos R2->R3 | -6,04 % |
| Poikkileikkaus 2 | | Poikkileikkaus 2 | | Poikkileikkaus 2 | | Poikkileikkaus 2 | |
| R2 | 0,505 | R2 | 0,465 | R2 | 0,403 | R2 | 0,458 |
| R3 | 0,548 | R3 | 0,478 | R3 | 0,363 | R3 | 0,463 |
| Muutos R2->R3 | 8,42 % | Muutos R2->R3 | 2,69 % | Muutos R2->R3 | -9,94 % | Muutos R2->R3 | 0,39 % |
| Poikkileikkaus 3 | | Poikkileikkaus 3 | | Poikkileikkaus 3 | | Poikkileikkaus 3 | |
| R2 | 0,495 | R2 | 0,493 | R2 | 0,423 | R2 | 0,470 |
| R3 | 0,570 | R3 | 0,478 | R3 | 0,368 | R3 | 0,472 |
| Muutos R2->R3 | 15,15 % | Muutos R2->R3 | -3,05 % | Muutos R2->R3 | -13,02 % | Muutos R2->R3 | -0,30 % |
| Poikkileikkaus 4 | | Poikkileikkaus 4 | | Poikkileikkaus 4 | | Poikkileikkaus 4 | |
| R2 | 0,430 | R2 | 0,500 | R2 | 0,428 | R2 | 0,453 |
| R3 | 0,490 | R3 | 0,520 | R3 | 0,375 | R3 | 0,462 |
| Muutos R2->R3 | 13,95 % | Muutos R2->R3 | 4,00 % | Muutos R2->R3 | -12,28 % | Muutos R2->R3 | 1,89 % |
| Poikkileikkaus 5 | | Poikkileikkaus 5 | | Poikkileikkaus 5 | | Poikkileikkaus 5 | |
| R2 | 0,603 | R2 | 0,623 | R2 | 0,650 | R2 | 0,625 |
| R3 | 0,445 | R3 | 0,610 | R3 | 0,578 | R3 | 0,544 |
| Muutos R2->R3 | -26,14 % | Muutos R2->R3 | -2,01 % | Muutos R2->R3 | -11,15 % | Muutos R2->R3 | -13,10 % |
| Poikkileikkaus 6 | | Poikkileikkaus 6 | | Poikkileikkaus 6 | | Poikkileikkaus 6 | |
| R2 | 0,640 | R2 | 0,720 | R2 | 0,738 | R2 | 0,699 |
| R3 | 0,720 | R3 | 0,595 | R3 | 0,715 | R3 | 0,677 |
| Muutos R2->R3 | 12,50 % | Muutos R2->R3 | -17,36 % | Muutos R2->R3 | -3,05 % | Muutos R2->R3 | -2,64 % |
| Valmistaja 1 keskiarvo | | Valmistaja 2 keskiarvo | | Valmistaja 3 keskiarvo | | Kaikkien poikkileikkauksien keskiarvo | |
| Muutos R2->R3 | 4,48 % | Muutos R2->R3 | -5,00 % | Muutos R2->R3 | -9,38 % | Muutos R2->R3 | -3,30 % |

Liite 7. Luminanssin yleistasaisuuden keskimääräiset muutokset.

| Luminanssin yleistasaisuuden (Uo) muutos | | Luminanssin yleistasaisuuden (Uo) muutos | | Luminanssin yleistasaisuuden (Uo) muutos | | Luminanssin yleistasaisuuden (Uo) muutos | | | | | |
|--|----------|--|---------------|--|----|--|----------|----|---------------|----------|----|
| Valmistaja 1 | | Valmistaja 2 | | Valmistaja 3 | | Poikkeileikkauskohdainen keskiarvo | | | | | |
| Poikkeileikkaus 1 | | Poikkeileikkaus 1 | | Poikkeileikkaus 1 | | Poikkeileikkaus 1 | | | | | |
| R2 | 0,453 | Uo | R2 | 0,480 | Uo | R2 | 0,543 | Uo | R2 | 0,492 | Uo |
| R3 | 0,403 | Uo | R3 | 0,443 | Uo | R3 | 0,470 | Uo | R3 | 0,438 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -11,05 % | Uo | Muutos R2->R3 | -7,81 % | Uo | Muutos R2->R3 | -13,36 % | Uo | Muutos R2->R3 | -10,74 % | Uo |
| Poikkeileikkaus 2 | | Poikkeileikkaus 2 | | Poikkeileikkaus 2 | | Poikkeileikkaus 2 | | | | | |
| R2 | 0,545 | Uo | R2 | 0,420 | Uo | R2 | 0,533 | Uo | R2 | 0,499 | Uo |
| R3 | 0,475 | Uo | R3 | 0,395 | Uo | R3 | 0,440 | Uo | R3 | 0,437 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -12,84 % | Uo | Muutos R2->R3 | -5,95 % | Uo | Muutos R2->R3 | -17,37 % | Uo | Muutos R2->R3 | -12,06 % | Uo |
| Poikkeileikkaus 3 | | Poikkeileikkaus 3 | | Poikkeileikkaus 3 | | Poikkeileikkaus 3 | | | | | |
| R2 | 0,585 | Uo | R2 | 0,473 | Uo | R2 | 0,528 | Uo | R2 | 0,528 | Uo |
| R3 | 0,513 | Uo | R3 | 0,410 | Uo | R3 | 0,425 | Uo | R3 | 0,449 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -12,39 % | Uo | Muutos R2->R3 | -13,23 % | Uo | Muutos R2->R3 | -19,43 % | Uo | Muutos R2->R3 | -15,02 % | Uo |
| Poikkeileikkaus 4 | | Poikkeileikkaus 4 | | Poikkeileikkaus 4 | | Poikkeileikkaus 4 | | | | | |
| R2 | 0,465 | Uo | R2 | 0,440 | Uo | R2 | 0,525 | Uo | R2 | 0,477 | Uo |
| R3 | 0,445 | Uo | R3 | 0,405 | Uo | R3 | 0,428 | Uo | R3 | 0,426 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -4,30 % | Uo | Muutos R2->R3 | -7,95 % | Uo | Muutos R2->R3 | -18,57 % | Uo | Muutos R2->R3 | -10,28 % | Uo |
| Poikkeileikkaus 5 | | Poikkeileikkaus 5 | | Poikkeileikkaus 5 | | Poikkeileikkaus 5 | | | | | |
| R2 | 0,583 | Uo | R2 | 0,638 | Uo | R2 | 0,690 | Uo | R2 | 0,637 | Uo |
| R3 | 0,503 | Uo | R3 | 0,555 | Uo | R3 | 0,610 | Uo | R3 | 0,556 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -13,73 % | Uo | Muutos R2->R3 | -12,94 % | Uo | Muutos R2->R3 | -11,59 % | Uo | Muutos R2->R3 | -12,76 % | Uo |
| Poikkeileikkaus 6 | | Poikkeileikkaus 6 | | Poikkeileikkaus 6 | | Poikkeileikkaus 6 | | | | | |
| R2 | 0,680 | Uo | R2 | 0,660 | Uo | R2 | 0,645 | Uo | R2 | 0,662 | Uo |
| R3 | 0,658 | Uo | R3 | 0,565 | Uo | R3 | 0,595 | Uo | R3 | 0,606 | Uo |
| Muutos R2->R3 | -3,31 % | Uo | Muutos R2->R3 | -14,39 % | Uo | Muutos R2->R3 | -7,75 % | Uo | Muutos R2->R3 | -8,48 % | Uo |
| Valmistaja 1 keskiarvo | | Valmistaja 2 keskiarvo | | Valmistaja 3 keskiarvo | | Kaikkien poikkeileikkausten keskiarvo | | | | | |
| Muutos R2->R3 | -9,61 % | Uo | Muutos R2->R3 | -10,38 % | Uo | Muutos R2->R3 | -14,68 % | Uo | Muutos R2->R3 | -11,56 % | Uo |

Liite 8. Keskimääräisen luminanssin keskimääräiset muutokset.

| Keskimääräisen luminanssin (lm) muutos Valmistaja 1 | | Keskimääräisen luminanssin (lm) muutos Valmistaja 2 | | Keskimääräisen luminanssin (lm) muutos Valmistaja 3 | | Keskimääräisen luminanssin (lm) muutos Poikkileikkauskohdainen keskiarvo | | |
|--|---------|--|---------------|--|----|---|---------|----|
| Poikkileikkaus 1 | | Poikkileikkaus 1 | | Poikkileikkaus 1 | | Poikkileikkaus 1 | | |
| R2 | 0,595 | Lm | R2 | 0,515 | Lm | R2 | 0,558 | Lm |
| R3 | 0,550 | Lm | R3 | 0,473 | Lm | R3 | 0,511 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -7,56 % | Lm | Muutos R2->R3 | -8,25 % | Lm | Muutos R2->R3 | -8,38 % | Lm |
| Poikkileikkaus 2 | | Poikkileikkaus 2 | | Poikkileikkaus 2 | | Poikkileikkaus 2 | | |
| R2 | 0,823 | Lm | R2 | 0,795 | Lm | R2 | 0,819 | Lm |
| R3 | 0,755 | Lm | R3 | 0,773 | Lm | R3 | 0,769 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -8,21 % | Lm | Muutos R2->R3 | -2,83 % | Lm | Muutos R2->R3 | -6,06 % | Lm |
| Poikkileikkaus 3 | | Poikkileikkaus 3 | | Poikkileikkaus 3 | | Poikkileikkaus 3 | | |
| R2 | 1,008 | Lm | R2 | 1,055 | Lm | R2 | 1,036 | Lm |
| R3 | 0,958 | Lm | R3 | 1,020 | Lm | R3 | 0,979 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -4,96 % | Lm | Muutos R2->R3 | -3,32 % | Lm | Muutos R2->R3 | -5,47 % | Lm |
| Poikkileikkaus 4 | | Poikkileikkaus 4 | | Poikkileikkaus 4 | | Poikkileikkaus 4 | | |
| R2 | 1,068 | Lm | R2 | 1,045 | Lm | R2 | 1,065 | Lm |
| R3 | 1,023 | Lm | R3 | 1,013 | Lm | R3 | 1,012 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -4,22 % | Lm | Muutos R2->R3 | -3,11 % | Lm | Muutos R2->R3 | -4,98 % | Lm |
| Poikkileikkaus 5 | | Poikkileikkaus 5 | | Poikkileikkaus 5 | | Poikkileikkaus 5 | | |
| R2 | 1,840 | Lm | R2 | 1,548 | Lm | R2 | 1,642 | Lm |
| R3 | 1,723 | Lm | R3 | 1,478 | Lm | R3 | 1,548 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -6,39 % | Lm | Muutos R2->R3 | -4,52 % | Lm | Muutos R2->R3 | -5,70 % | Lm |
| Poikkileikkaus 6 | | Poikkileikkaus 6 | | Poikkileikkaus 6 | | Poikkileikkaus 6 | | |
| R2 | 2,080 | Lm | R2 | 2,010 | Lm | R2 | 2,085 | Lm |
| R3 | 1,905 | Lm | R3 | 1,823 | Lm | R3 | 1,908 | Lm |
| Muutos R2->R3 | -8,41 % | Lm | Muutos R2->R3 | -9,33 % | Lm | Muutos R2->R3 | -8,49 % | Lm |
| Valmistaja 1 keskiarvo | | Valmistaja 2 keskiarvo | | Valmistaja 3 keskiarvo | | Kaikkien poikkileikkausten keskiarvo | | |
| Muutos R2->R3 | -6,62 % | Lm | Muutos R2->R3 | -5,23 % | Lm | Muutos R2->R3 | -6,51 % | Lm |