



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**VALGUSREOSTUST TEKITAVATE OBJEKTIDE
ENERGIASÄÄSTU ANALÜÜS KRISTIINE
LINNAOSA NÄITEL**

**ANALYSIS OF ENERGY SAVINGS OF LIGHT POLLUTING
OBJECTS ON THE EXAMPLE OF KRISTIINE DISTRICT**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kevin Andris Keskküla

Üliõpilaskood 213746EAAB

Juhendaja: Toivo Varjas, valgustehnika
ekspert

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor: Kevin Andris Keskküla

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja: Toivo Varjas

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Kevin Andris Keskküla

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Valgusreostust tekitavate objektide energiasäästu analüüs Kristiine linnaosa näitel“, mille juhendaja on Toivo Varjas,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

13. mai 2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kevin Andris Keskküla, 213746EAAB

Õppekava, peeriala: EAAB16/17, Elektroenergeetika

Juhendaja(d): Valgustehnika ekspert, Toivo Varjas, 6203706

Lõputöö teema:

Valgusreostust tekitavate objektide energiasäästu analüüs Kristiine linnaosa näitel

Analysis of energy savings of light polluting objects on the example of Kristiine district

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Valida välja suurimad valgusreostuse allikad ning teostada nendel objektidel mõõtmised
2. Teha suurimatele valgusreostuse allikatele energiasäästu analüüs
3. Pakkuda välja lahendusi valgusreostuse vähendamiseks

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbitöötamine	30.11.23
2.	Teoreetilise osa kirjutamine	24.04.24
3.	Mõõtmiste teostamine	24.04.24
4.	Töö esimene versioon valmis	24.04.24
5.	Paranduste sisseviimine	03.05.24
6.	Töö lõplik versioon valmis	13.05.24

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 13.05.2024

Üliõpilane: Kevin Andris Keskküla ".....".....2024 a
/allkiri/

Juhendaja: Toivo Varjas ".....".....2024 a
/allkiri/

Programmijuht: Marek Tull ".....".....2024 a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
Mõisted	8
1. SISSEJUHATUS	11
2. VALGUSTUSE VAJALIKKUS.....	13
2.1 Tänavalgustus ja turvalisus	13
2.2 Tänavalgustus ja liiklusõnnetused.....	14
3. VALGUSREOSTUS	15
3.1 Astronoomiline valgusreostus	16
3.2 Ökoloogiline valgusreostus.....	16
3.3 Standardid ja normdokumendid Eestis.....	17
3.4 Standardid ja normdokumendid teistes Euroopa riikides	18
3.5 Eesti standardite ja normdokumentide võrdlus Euroopa riikide omadega.....	19
3.6 Valgusreostuse hindamise meetodid.....	20
3.7 Valgusreostus Eestis	21
3.8 Valgusreostus Göteborgis	22
3.9 Valgusreostuse mõju inimesele ja keskkonnale.....	23
3.10 Valgusreostuse vähendamise meetodid	26
3.11 Väljakutsed valgusreostuse vähendamisel.....	27
4. VALGUSTID	29
4.1 Leedvalgustid.....	30
4.2 Gaaslahendusvalgustid.....	32
4.3 Valgustite hämardamine	33
4.3.1 Valgustite hämardamise energiasääst	35
4.4 Valgustite juhtimine	36
4.4.1 Faasjuhtimine	37
4.4.2 Astronoomilise kellaga valgustid.....	37
4.4.3 DALI juhtimine.....	38
4.4.4 Liikumisradaritega juhtimine.....	38
4.5 Juhtimissüsteemide analüüs.....	39
4.6 Valgustite valimine	39
4.5.1 Valgustite valimine valgusreostuse vaatepunktist	41
5. VALGUSREOSTUSE MÕÕTMISED JA ANALÜÜS	42
5.1 Nõudmised mõõtmistele	42
5.2 Leedekraanide mõõtemetoodika	43
5.3 Välisfassaadi mõõtemetoodika.....	43

5.4	Tänavavalgustite mõõtemetoodika	44
5.5	Leedekraanide mõõtmistulemused Kristiines	44
5.6	Välisfassaadi mõõtmistulemused Kristiines.....	45
5.7	Tänavavalgustuse mõõtmistulemused Kristiines.....	46
5.8	Leedekraanide mõõtmistulemused Mustamäel	47
5.9	Välisfassaadi mõõtmistulemused Mustamäel	47
5.10	Tänavavalgustuse mõõtmistulemused Mustamäel	48
5.11	Leedekraanide mõõtmistulemuste analüüs ja järeldused	49
5.12	Välisfassaadi mõõtmistulemuste analüüs ja järeldused	51
5.13	Tänavavalgustuse mõõtmistulemuste analüüs ja järeldused	53
5.14	Leedekraanide valgusreostuse minimeerimisel saavutatav energiasääst.....	54
5.15	Tänavavalgustite valgusreostuse minimeerimisel saavutatav energiasääst ...	55
5.16	Mõõtmistulemuste analüüsi kokkuvõte	58
6.	TALLINNA LINNA ARENGUSUUNAD	59
7.	ETTEPANEKUD VALGUSREOSTUSE VÄHENDAMISEKS	60
	KOKKUVÕTE	62
	SUMMARY.....	64
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	66
	LISAD	72
	Lisa 1 Leedekraanide asukohad	73
	Lisa 2 Leedekraanide pildid	74
	Lisa 3 Välisfassaadide asukohad	78
	Lisa 4 Välisfassaadide pildid	81
	Lisa 5 Välisfassaadide pildid värvärvides	84
	Lisa 6 Mõõdistatavad tänavalõigud.....	86
	Lisa 7 Tänavate pildid	87
	Lisa 8 Tänavate pildid värvärvides.....	89

EESSÕNA

Bakalaureusetöö teema valiti koostöös Toivo Varjasega. Lõputöö jaoks lähtematerjali sai autor juhendajalt Toivo Varjaselt ning Tallinna Keskkonna- ja Kommunaalametist linnavalgustuse ja elektrivõrkude kavandamise juhilt Eva Tallolt.

Autor soovib tänu avaldada Toivo Varjasele konsultatsioonide ja materjalidega abistamise eest. Samuti soovib autor tänada Eva Tallot abi eest.

Lühendite ja tähiste loetelu

Tähised

L [cd/m ²]	heledus
\bar{L} [cd/m ²]	keskmine heledus
Φ_v [lm]	valgusvoog
I_v [cd]	valgustugevus
E_v [lx]	valgustustihedus
η [lm/W]	valgusviljakus
R_a	Värviesituse üldindeks
U_l	pikiühtlus
U_o	üldühtlus

Lühendid

CCT	lähim värvsüsteemtemperatuur
CRI	värviesitusindeks
GSM	globaalne mobiisidesüsteem

Mõisted

Valgustusalaused mõisted saadakse Tiiu Tamme raamatust „Valgustehnika I“ [1] ja standardist EVS-EN 12665 [2].

Heledus (*luminance*) – iseloomustab valgustugevuse näivat tihedust valgustandval või peegeldaval pinnal, st valgustatud ala heledust, mis jõuab vaataja silma.

Heleduse hooldeväärtus – väärtus, millest allapoole sätestatud pinna keskmine heledus ei tohi langeda.

Räigus (glare) – nägemisolukord, mis tundub ebamugav või mille tagajärjel detaile või esemete nähtavus halveneb ja mis on tingitud heleduse ebasoodsast jaotusest, liigsest heledusest või liigtugevatest kontrastidest.

Pimestusräigus – räigus, mis halvendab esemete nähtavust, kuid ei pruugi seejuures esile kutsuda ebamugavust.

Diskomforträigus – räigus, mis põhjustab ebamugavust, kuid ei pruugi seejuures halvendada esemete nähtavust.

Valgusvoog (*luminous flux*) – suurus, mis tuleneb kiirgusvoost selle hindamise teel inimsilma spektraaltundlikkusega. See on valgusallikast kiirguv või mingil pinnal vastu võetav valguslik võimsus. Lambi valgusvoog sõltub lambi võimsusest, valgusviljakusest, tüübist ja pingest.

Valgustugevus (*luminous intensity*) – valgusallikast lähtuva, antud suunda sisaldavas ruuminurgaelemendis $d\Omega$ leviva valgusvoo $d\Phi_v$ ja nimetatud ruuminurga elemendi jagatis.

Valgustustihedus (*illuminance*) – mingi pinna punktis punkti sisaldavale pinnaelemendile langeva valgusvoo $d\Phi_v$ ja selle elemendi pindala dA jagatis.

Valgusviljakus (*luminous efficacy*) – emiteeritava valgusvoo ja allika poolt hajutatava võimsuse jagatis.

Värviesitus – valgusliigi mõju esemete värvimuljele, kui seda teadlikult või mitteteadlikult võrreldakse värvimuljega, mis tekib nende valgustamisel võrdlusvalgusliigiga.

Värviesituse üldindeks – kaheksa kindla testvärvinäidise järgi määratud värviesituse eriindeksite keskväärtus. Värviesituse üldindeks näitab, kui palju valgusallika poolt valgustatud objekti värvid erinevad etalonvalgusallika poolt tekitatavatest värvidest.

Värelus – nägemisaistingu ebapüsivuse mulje, mis on tingitud valgusstiimuli heleduse või spektraaljaotuse ajalisest vaheldumisest.

Värelus – nägemisaistingu ebapüsivuse mulje, mis on tingitud valgusstiimuli heleduse või spektraaljaotuse ajalisest vaheldumisest.

Ballast ehk liiteseadis – toiteallika ja ühe või mitme lahenduslambi vahele lülitatav seadis, mis peamiselt on ette nähtud lambi (või lampide) voolu piiramiseks vajaliku väärtuseni.

Valgustusklass M – on ette nähtud rakendamiseks mootorsõidukijuhtidele liiklusteedel keskmise kuni suurema sõidukiiruse korral.

Valgustusklass P – on ette nähtud rakendamiseks jalakäijate ja pedaaljalgratturite suhtes kõnniteel, jalgrattateel, sõiduteede ohutusribadel ja muudel tänavaosadel, mis kulgevad eraldi või pikki sõiduteed, elupiirkondade teedel, kõnniteedel, parkimisplatsidel, kooliõuedel, parkides jms.

Valgustusklass C – on ette nähtud rakendamiseks konfliktipiirkondades, nagu näiteks äritänavatel, keerukamatel teeristmikel, tagasipöördekohtadel ja ummikupiirkondades, kus teepinna heleduse nõudeid ei saa rakendada või kus need on ebapraktilised.

Piiranguaeg – aeg, mille kestel kehtivad rangemad nõuded (hääriva valguse piiramisele).

1. SISSEJUHATUS

Valgusreostus on tänapäeval suurenev ülemaailmne probleem, mida esineb kõige rohkem tihedalt asustatud piirkondades. Eestis on suurimaks valgusreostuse tekitajaks Tallinn, kus on palju valgusteid ja leedekraane. Valgusreostust põhjustavad valgustid, mis ei ole täielikult varjestatud ning õigesti suunatud. Samuti on probleemiks ka valgustite ja leedekraanide liigne heledus ning piirkondade üleliigne valgustus. Igal aastal lisandub tänavapilti uusi valgusallikaid, sealhulgas suureneb tänavavalgustite arv. Valgustatakse aina rohkem selliseid tänavaid ja piirkondi, kus varem polnud mingit valgustust. Oluline on leida lahendusi valgusreostuse vähendamiseks, kuna liigne ja valesti suunatud valgustus mõjutab inimeste tervist ning elusloodust, suurendab CO₂ heitmeid ning energiakulu ja raskendab tähistava nägemist. Teema on oluline inimestele, kes suuremates linnades elavad, ümbritsevale looduskeskkonnale ning linnade tänavavalgustusvõrku haldavatele ettevõtetele. Ettevõtted saavad edaspidi teadlikumalt planeerida uusi valgustussüsteeme ning suurendada nende efektiivsust.

Antud lõputöö eesmärk on teostada suurimatele valgusreostuse allikatele Kristiine ja Mustamäe linnaosas energiasäästu analüüs. Selle jaoks valitakse esmalt välja suurimad valgusreostuse allikad ning teostatakse nendel objektidel mõõtmised. Valgusreostuse allikate tuvastamiseks on lähtematerjalina kasutatud Tallinna linna poolt koostatud valgusreostuse ja räguse küsitlust. Seejuures osad valgusreostuse allikad on autor valinud ise juurde visuaalse vaatluse teel. Objektidel saadud mõõtmistulemusi võrreldakse standardites lubatuga. Töö käigus pakutakse lahendusi valgusreostuse vähendamiseks ning tehakse ettepanekud leedekraanide maksimaalseteks heleduse väärtusteks. Lõputöö peamiseks fookuseks on valitud Kristiine, kuna tegemist on linnaosaga, mida läbivad mitmed magistraalteed. Mõõtmistulemusi on plaanis võrrelda ka Mustamäe linnaosaga, sest Kristiine ja Mustamäe erinevad asustustiheduse poolest peaaegu kaks korda, olles samaaegselt võrdsed pindalalt.

Lõputöö teises peatükis räägitakse valgustuse vajalikkusest tänavapildis, selle ebapiisavuse või puudumise tagajärgedest. Kolmandas peatükis käsitletakse valgusreostusega seotud standardeid ja normdokumente, millest peamised on EVS-EN 12464-2 ja EVS-EN 13201-4. Samuti räägitakse lähemalt mõjust inimesele ja keskkonnale, sealhulgas leedvalgustite suurenenud kasutamisega kaasnevatest terviseprobleemidest. Tuuakse ka välja erinevad olemasolevad lahendused valgusreostuse vähendamiseks ning peamised takistused valgusreostuse vähendamisel. Neljandas peatükis räägitakse leedvalgustitest ja gaaslahendusvalgustitest, keskendudes peamiselt leedvalgustitele ja nende juhtimisele.

Tuakse välja ka parameetrid, mille alusel valgusteid valitakse. Viiendas peatükis on välja toodud, mille alusel valiti erinevaid mõõdistatavaid objekte (sh valgustid ja leedekraanid) ning kuidas on saadud mõõtmistulemused võrreldavad standardites lubatuga. Samuti pakutakse välja viise antud objektidel valgusreostuse vähendamiseks ning arvutatakse välja valgusreostuse minimeerimisel saavutatav potentsiaalne energiasääst.

2. VALGUSTUSE VAJALIKKUS

Elektervalgustus jõudis esmalt tänavatele 1870-ndatel, kui tänavaid hakati valgustama kaarlampidega, mis andsid välja väga tugevat valgust. Kaarlampidega sai valgustada suuri alasid, näiteks tänavaid ja põldusid. Kaarlambid ei sobinud aga sisevalgustuseks, kuna need läksid väga kuumaks ja tekitasid pimestusräigust. Mõne aja pärast hakati laialdasemalt kasutama hõõglampe, mida sai kasutada siseruumides ja mis võimaldas elektervalgustusel jõuda inimeste kodudesse. Sellest ajast saadik on elektervalgustus laialdaselt levinud üle maailma ning tänaseks on ta muutunud asendamatuks osaks meie elust. [3]

Tehisvalguse kasutusele võtmine on oluliselt lihtsustanud erinevaid tegevusi. Näiteks on hämaras valguses kirjutamine või lugemine üsna ebamugav ning tekitab silmade väsimust ja peavalusid. Hea valgustus aitab luua paremad töötingimused ning ära hoida tööõnnetusi suurendades liikuvate masinaosade nähtavust ja vähendades tugevamate varjude tekkimist. Näiteks on valgustuse parandamine mõnedes tehastes suurendanud produktiivsust 10% võrra ja vähendanud vigade arvu 30% võrra. Tehisvalgus on võimaldanud inimestel ka kauem ärkvel püsida. [4] [5] [6] Lisaks aitab tehisvalgus kaasa teatud tüüpi depressiooni ravis, parandades meeleolu ja vähendades väsimust. [7]

Tänavavalgustuse ülesanded: [8]

- sõidukite ohutu liiklemine – tänu tänavavalgustusele näeb sõidukijuht paremini ümbruses toimuvat ning seeläbi juhtub vähem õnnetusi;
- inimeste ohutus – tänavavalgustust hakatigi algselt kasutama peamiselt turvalisuse pärast. Tänu valgustusele on jalakäija paremini nähtav ja nii välditakse autode otsasõitu neile. Samuti on teevalgustusest abi politseile oma töö tegemisel;
- avalik valgustus – kasulik äridele, mis tegutsevad õhtusel ja öisel ajal, samuti soodustab inimeste tegevusi õues.

2.1 Tänavavalgustus ja turvalisus

Erinevad uuringud näitavad vastandlikke tulemusi seoses sellega, kas valgustuse parandamine või valgustite juurde lisamine tegelikult aitab vähendada kuritegevust. Küll aga võib valgustus aidata inimestel tunda ennast turvalisemalt. Seda seetõttu, et pimedad alad tihtipeale seostuvad kuritegevusega. Inimesed kardavad, et nende sõidukitest varastatakse midagi või siis neile endile tungitakse kallale. On aga leitud, et piirkonnad, mis on liigselt valgustatud, võivad hoopis tekitada vastupidise olukorra, kus

inimesed tunnevad ennast ebaturvalisemalt pimedamate varjude tõttu. [9] [10] Tänavavalgustus on vajalik jalakäijatele pimedal ajal orienteerumiseks, kukkumiste ennetamiseks. Samuti tekitab tänavavalgustus inimestes suurema julguse üksi liigelda. [11]

2.2 Tänavavalgustus ja liiklusõnnetused

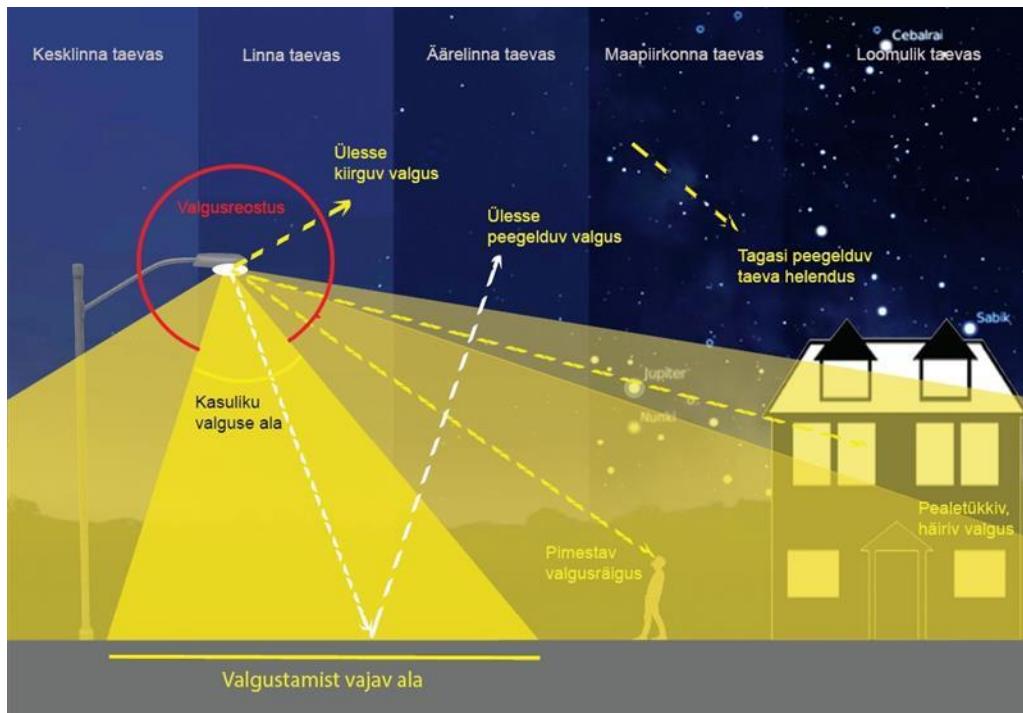
Valgustid, mis vastavad valgustusklassi poolt määratud heledustasemele ja muudele nõuetele, aitavad vähendada liiklusõnnetuste arvu. Valgustus suurendab võimalike ohtude nähtavust erinevates olukordades. Näiteks tihedama liiklusega teedel, keerulise liikluskorraldusega aladel või ilmastikust tingitud halva nähtavuse korral. Hea tänavavalgustus aitab muuta liiklusvoogu sujuvamaks ja vähendab räigust ning sellest tingitud liiklusõnnetuste arvu. [12] Hollandis tehtud uuringus leiti, et pimedal ajal on valgustamata teedel 360% suurem risk liiklusõnnetuste tekkimiseks jalakäijatega kui valgusel ajal. Samal ajal valgustatud teedel väheneb see oht 140%-ni. [13] Jalakäijate surmaga lõppevaid õnnetusi juhtub pimedas 4 korda rohkem kui päevasel ajal. [11]

3. VALGUSREOSTUS

Ameerika Ühendriikides kulub välisvalgustusele 120 TWh energiat aastas, millest suurem enamus on mõeldud tänavate ja parkimisplatside valgustamiseks. Selline kogus energiat on piisav selleks, et ära katta terve New York-i elektritarbimine kaheks aastaks. Üsna suur osa sellest energiast läheb aga raisku. Varjestamata tänavavalgustus raiskab hinnanguliselt vähemalt 30% kogu tänavavalgustuse energiakulust. Rahaliselt tähendab see, et asjatult kulutatakse 3,3 miljardit dollarit aastas ning keskkonda paisatakse 21 miljonit tonni CO₂-te. Selle kompenseerimiseks oleks vaja istutada 875 miljonit puud aastas. Olukorda on võimalik parandada, kuid see nõuab suuri investeeringuid uutesse valgustitesse, mis on varjestatud. Samuti peaksid uued valgustid olema ühendatud juhtimissüsteemidega, mis võimaldaks valgusreostust ja energiakulu veelgi enam vähendada. Seega võtab selliste meetmete rakendamine tavaliselt palju aega, kuna linnadel pole piisavalt rahalisi vahendeid kõiki meetmeid koheselt rakendada. [14]

Valgusreostusel ehk valgussaastel on mitmeid definitsioone. Üldiselt iseloomustab valgusreostust ebavajalik, liigne ja/või valesti suunatud ehk pealetükkiv tehisvalgus. Seda tekitavad erinevad valgusallikad, näiteks tänavavalgustus, fassaadivalgustus, leedekraanid, sõidukite valgustus, spordivalgustus ja paljud muud valgusallikad. [15] Standardi EVS-EN 13201-2 järgi nimetatakse häirivaks valguseks valgust, mis kutsub öistes nägemisoludes esile kohalikke või ulatuslikke soovimatuid nägemisnähtusi. [16] Soovimatuteks nägemisnähtusteks võib pidada kõiki alltoodud mõisteid.

- räigus (*glare*) – liigne heledus, mis takistab nägemisülesandeid, tekitades ebamugavus- või pimestustunnet. Räigus tekitab olukorra, kus on raske eristada vaadeldavat objekti taustast (kontrasti puudus), mis võib näiteks põhjustada liiklusõnnetusi; [17] [18]
- taevakuma (*sky glow*) – öise taeva liigne heledustase, mida tekitab maapinnalt peegelduv valgus ja valgustist üleskiirguv valgus. Taevakuma esineb asustatud alade ja nende läheduses olevate alade kohal ning takistab astronoomilisi vaatlusi; [18] [19]
- pealetükkiv valgus (*light trespass*) – valguse sattumine sinna, kuhu ta pole mõeldud. Näiteks iseloomustab pealetükkivat valgust maja aknast sisse paistev valgusallikas, mis segab magama jäämist; [17] [18]
- liigne valgustatus (*clutter*) – ühes piirkonnas olev suurem kogus valgusallikaid, mis on eredad ning mille koosmõju tekitab segadust; [17]
- ülevalgustatus (*over-illumination*) – heledustase, mis on kõrgem kui on vajalik mingi konkreetse ülesande/tegevuse jaoks. [20]



Joonis 3.1 Valgusreostuse olemus [21]

3.1 Astronoomiline valgusreostus

Enamasti kui räägitakse valgusreostusest, siis mõeldakse selle all astronoomilist valgusreostust. Astronoomiline valgusreostus on valgusreostuse vorm, mis takistab loodusliku tähistaeva nägemist. Astronoomiline valgusreostus avaldub taevakumana, mida tekitab maapinnalt peegelduv valgus ja valgustitest üleskiirguv valgus. [22] Astronoomilise valgusreostuse hulk sõltub väga suurel määral vaatleja asukohast, ilmastikutingimustest ja atmosfääri koostisest. [23]

3.2 Ökoloogiline valgusreostus

Ökoloogiline valgusreostus muudab loomulikku valgustaset maismaa- ja veeökosüsteemides. Ökoloogilist valgusreostust iseloomustab rägus, suurenenud valgustatuse tase ja ajutised muutused valgustatuses. Ökoloogilise valgusreostuse allikateks on taevakuma, valgustatud ehitised ja tornid, tänavavalgustid, kalastamislaevad, turvatuled, sõidukite tuled ja muud valgusallikad. Sisuliselt on probleemiks kõik valgusallikad, mis häirivad ökosüsteeme vähemal või suuremal määral. [22]

3.3 Standardid ja normdokumendid Eestis

Eestis tegeleb standardite avaldamisega Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. Valgusreostuse vaatepunktist on olulisemad järgnevad standardid:

- EVS-EN 12665 – selles standardis on välja toodud peamised valgustusalsed mõisted (sealhulgas häiriv valgus, rägus, valgustustihedus ja muud olulised parameetrid);
- EVS-EN 12464-2 – selles standardis on välja toodud oluline tabel, mis sätestab keskkonnatsoonidele vastavad maksimaalsed häiriva valguse valgustusparameetrid. Võimalik on mõõtmistega kontrollida valgustustihedust ja heledust;
- EVS-EN 13201-2 – selles standardis on samuti välja toodud häiriva valguse mõiste ning lisaks on antud standardis esitatud M- ja P- valgustusklasside vähimad ja suurimad valgustusparameetrid. Antud lõputöös vaadeldakse ainult M-valgustusklassi;
- EVS-EN 13201-4 – selles standardis on detailsemalt kirjeldatud mõõtemetoodikat. Selle mõõtemetoodika abil saab hinnata valgusreostust ehk mõõta on võimalik standardis EVS-EN 12464-2 välja toodud valgustustiheduse ja heleduse väärtuseid.

Keskkonnatsoon	Kinnistuile langev valgus		Valgusti valgustugevus		Üleskiirguv valgus R_{UL} %	Heledus	
	E_v lx		I cd			L_b cd·m ⁻²	L_s cd·m ⁻²
	Enne piiranguaega ^a	Piiranguajal	Enne piiranguaega	Piiranguajal		Ehitise fassaad	Valgusmärgid
E1	2	0	2 500	0	0	0	50
E2	5	1	7 500	500	5	5	400
E3	10	2	10 000	1000	15	10	800
E4	25	5	25 000	2500	25	25	1000

Joonis 3.2 EVS-EN 12464-2 standardis esitatud enimalt lubatav häiriv valgus välisvalgustuspaigaldistes [24]

Klass	Sõidutee pinna heledus teepinna kuivas või märjas olekus			Pimestus- räägus	Ümbruse valgustus	
	Kuiv olek		Märg olek	Kuiv olek	Kuiv olek	
	\bar{L} [vähim hooldeväärtus] cd·m ⁻²	U_o [vähemalt]	U_1^a [vähemalt]	U_{ow}^b [vähemalt]	f_{T1}^c [enimalt] %	R_{EI}^d [vähemalt]
M1	2,00	0,40	0,70	0,15	10	0,35
M2	1,50	0,40	0,70	0,15	10	0,35
M3	1,00	0,40	0,60	0,15	15	0,30
M4	0,75	0,40	0,60	0,15	15	0,30
M5	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,30
M6	0,30	0,35	0,40	0,15	20	0,30

Joonis 3.3 EVS-EN 13201-2 standardis esitatud vähimad ja suurimad valgustusparameetrid [25]

3.4 Standardid ja normdokumendid teistes Euroopa riikides

Tšehhis tutvustati valgusreostuse mõistet esmakordselt aastal 2002, kuid õhukaitse seaduse muudatuste tõttu jäeti ta hiljem seadusest välja. 2017-ndal aastal avaldati esimene valgustusala juhend, milles jagati soovitusi avaliku valgustuse ja erakinnistute valgustuse kohta. Samuti oli dokumendis antud juhiseid arhitektidele. Alates 2017-ndast aastast on võimalik riigilt rahalist toetust saada juhul, kui paigaldatakse valgusteid, mille värvsüsteemtemperatuur on 2700 K või vähem. 2022. aastal alustati uue standardi koostamisega, mis on mõeldud välisvalgustuse kahjulike mõjude vähendamiseks. [26]

Prantsusmaal ei ole valgusreostus reguleeritud ühegi standardiga, kuna need arvestavad ainult turvalisuse aspekti ning ei sisalda asjakohaseid nõuandeid, mis aitaksid valgusreostust vähendada. Selle asemel uuendatakse juhendmaterjale, kus on välja toodud meetmed, mida tuleks rakendada. Alates 2018-ndast aastast on Prantsusmaal kehtinud määrus, mis sätestab välisvalgustuse piiranguaja, üleskiirguva valguse osakaalu ja täpsemad nõuded observatooriumite läheduses. Samuti kehtestab see määrus mõned nõuded, mis kehtivad terves riigis: [26]

- kõikide välisvalgustite puhul CCT väärtus ei tohi olla üle 3000 K, 2700 K ehitusplatsidel ja 2400 K muidu kaitsealas;
- mistahes paigaldises ei tohi valgustatud sihtpinnal olla rohkem kui 35 luksi. Äärelinnas ning maapiirkondades ei tohi see väärtus olla rohkem kui 10;
- liigne valguse tungimine eluruumidesse on keelatud;

- prožektorite, laserite ja teiste sarnaste suure intensiivsusega valgusallikate kasutamine ning veeteede öine valgustamine on keelatud.

Saksamaal on riiklikul tasandil valgusreostuse eest vastutav keskkonnaministeerium ja föderaalne looduskaitseamet. Lisaks on olemas piirkondlikud ning kohalikud strateegiad valgusreostuse vähendamiseks. Keelatud on uute tänavavalgustite ehitus ja valgustatud reklaampindade paigaldamine looduskaitsealadel. Üldisemalt tuleks vältida igasugust kahjulikku mõju loodusele ja maastikule ning kui see ei ole võimalik, tuleb rakendada kompensatsiooni- või asendusmeetmeid. Palju suurema mõjuga määrus peaks valmima aastaks 2025, kus on konkreetsed eeskirjad, mis hakkavad kaitsma loomi ja taimi valgustuse kahjulikke mõjude eest. Saksa looduskaitseameti poolt antud väljaandes on põhjalik kirjeldus valgustuspaigaldiste kahjulike mõjude kohta ning toodud on ka tehnilised parameetrid, mille abil saab minimeerida valgusreostust. Väljaandes soovitatakse kasutada looduskaitsealadel valgusteid värvsüsteemiga 2400 K ning mitte rohkem kui 3000 K. Samuti soovitatakse kasutada kõikides uutes leedvalgustites värvsüsteemiga 3000 K. [26]

Itaalias on piirkondlikud seadused, mis reguleerivad valgusreostust. Samuti on olemas riiklik seadus, mis sätestab konkreetsed suunised ja standardid seoses valgustusega, et vältida ebavajalikku üleskiirguvat valgust ja vähendada räigust. Piirkondlikud keskkonnaagentuurid esitavad ettepanekuid valgustuskavade kohta ning viivad läbi akendele langeva valgustustiheduse kontrollmõõtmisi kaebuste korral. Kõik, kes haldavad rohkem kui 50 valgustit, peavad koostama valgustuskava, mille kohaselt tuleb eelistada täielikult varjestatud valgusteid. [26]

3.5 Eesti standardite ja normdokumentide võrdlus Euroopa riikide omadega

Võrreldes Eesti standardeid välisriikide omadega on märgata seda, et Eestis ei ole nõuded välisvalgustitele piisavalt konkreetsed. On küll piiratud maksimaalne heledus ning kinnistule langev valgustustihedus, aga näiteks värvsüsteemiga osas pole ette nähtud mingeid piiranguid ega soovitusi. Looduskaitsealadel on osades riikides eraldi nõuded. Näiteks on piiratud leedekraanide ja valgustite ehitus looduskaitsealadel ning värvsüsteemiga osas on teistsugused nõuded. Itaalias on piirkondlikud keskkonnaagentuurid, kes teevad inimeste kaebuste korral kontrollmõõtmisi.

3.6 Valgusreostuse hindamise meetodid

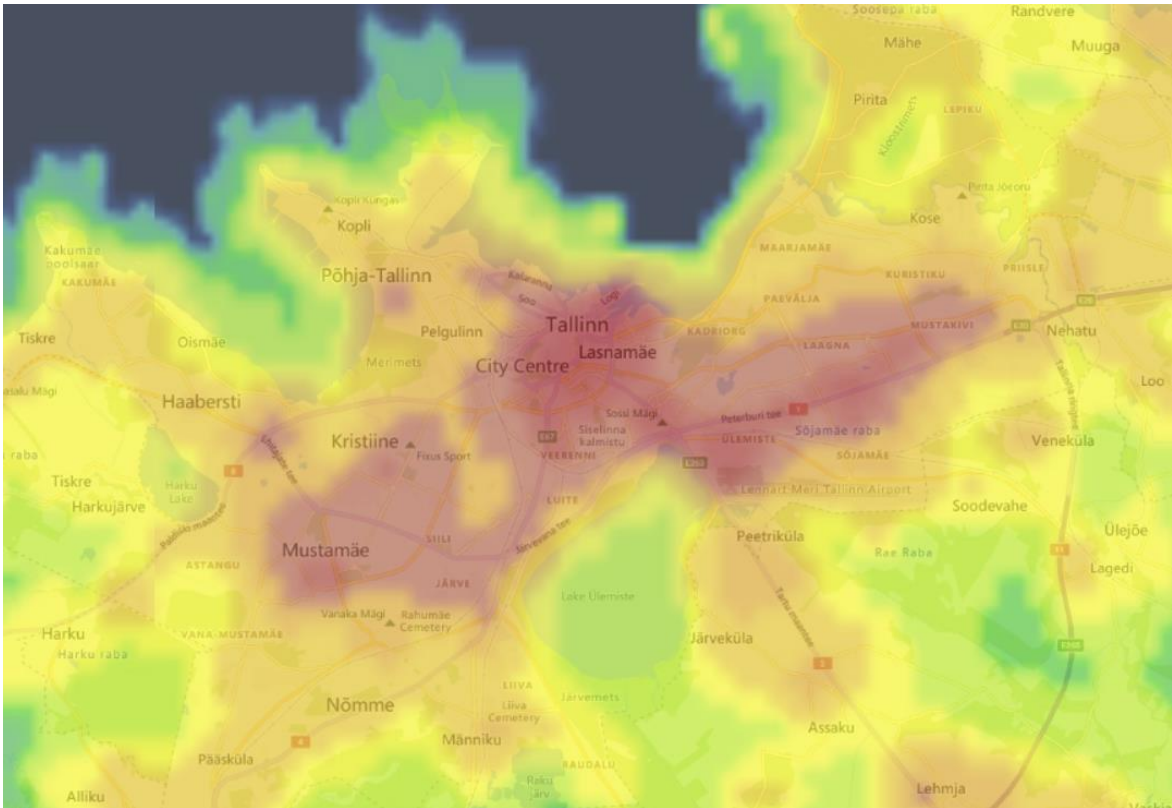
Kõige lihtsam viis valgusreostuse hindamiseks on taeva heleduse hindamine kasutades Bortle'i skaalat. Bortle'i skaala järgi jagatakse taeva heledused üheksasse kategooriasse, kus 1 kujutab ideaalselt pimedat taevast ja 9 eredalt valgustatud siselinna taevast. [27] Valgusreostust saab ka hinnata tähtede lugemise abil. Selleks tuleb taevast üles leida üks kindel regioon, mille sees olevad tähed kokku loetakse. Selle meetodi rakendamiseks on aga vaja teada tähtkujude asukohti ning teatud olukordades võivad regioonide piirialad jääda segaseks. [23]

Mõõteriistadest on võimalik kasutada taeva kvaliteedi mõõtjat (SQM), mis on odav ning levinud mõõteriist amatöörastronoomide hulgas. Seade vajab aga regulaarset kalibreerimist oma ebatäpsuse vähendamiseks. [28] [29] Kasutatakse ka spektroskoopilisi mõõtmisi, mis võimaldavad eristada erinevate valgusallikate poolt tekitatud spektrit. Nimelt on igal valgusallikal erinevad spektraalsed omadused. [29]

Luksmeetrid on levinud mõõteseadmed, mida on kerge kasutada, kuid nendega mõõtmiste teostamine on üsna ajamahukas protseduur. Luksmeeter võimaldab korraga mõõta ainult ühte punkti ning lisaks on selle mõõteriista puuduseks tundlikkus vähese valguse puhul. [28] Heledusmõõturid vajavad spetsiaalset kalibreerimisprotseduuri, sealhulgas vinjettimine, kuna objektiiv võib vähendada heledust pildi servades. Heledusmõõturi eeliseks on suur andmete hulk, kuid tegemist ei ole odava seadmega. [28]

Valgusreostusest laiemat ülevaadet saamiseks kasutatakse satelliitpilte. Satelliitpiltide andmed koosnevad VIIRS radiomeetri mõõtmistest, mis mõõdab valgusreostust spektrivahemikus 500-900 nm. Selline spektrivahemik ei kata aga leedvalgustite poolt tekitatavat sinist valgust, mistõttu järgnevate aastate jooksul leedvalgustitele üleminek võib valgusreostuse kaardil jääda mulje, et valgusreostus väheneb. [28]

Veel üks viis valgusreostust hinnata on standarditega. Standardites on sätestatud maksimaalsed valgustusparameetrid, mida saab mõõtmiste teel kontrollida. Näiteks on standardis EVS-EN 12464-2 sätestatud valgusreklaamide ja fassaadivalgustuse maksimaalsed heledusväärtused. Samuti on piiratud kinnistule langeva valguse valgustustihedus enne piiranguaega ja piiranguajal. Antud parameetrite mõõtmiseks saab kasutada standardit EVS-EN 13201-4, milles on detailsemalt kirjeldatud mõõtemetoodikat.



Joonis 3.4 Valgusreostuse kaart (VIIRS 2023) [30]

3.7 Valgusreostus Eestis

Valgusreostust on Eestis uuritud vähe, kuid kaks sellelaadset suuremat uuringut on läbi viinud Tallinna Tehnikaülikool. Esimene taoline uuring teostati aastal 2012 [23], kus kaardistati valgusreostust üle Eesti. Töö käigus sõideti läbi 22 linna ja 76 alevit ning sõidu ajal mõõdeti taevaheladust taeva kvaliteedimõõtjaga. Uuringu peamine eesmärk oli valgusreostuse hetkeolukorra hindamine ning valgusreostusega seotud informatsiooni levitamine üle Eesti. Uuringu tulemusena saadi üldine ülevaade valgusreostusest ning suurendati inimeste teadlikkust. Välja toodi täpsemate mõõtmiste ning konkreetsemate meetmete vajadus.

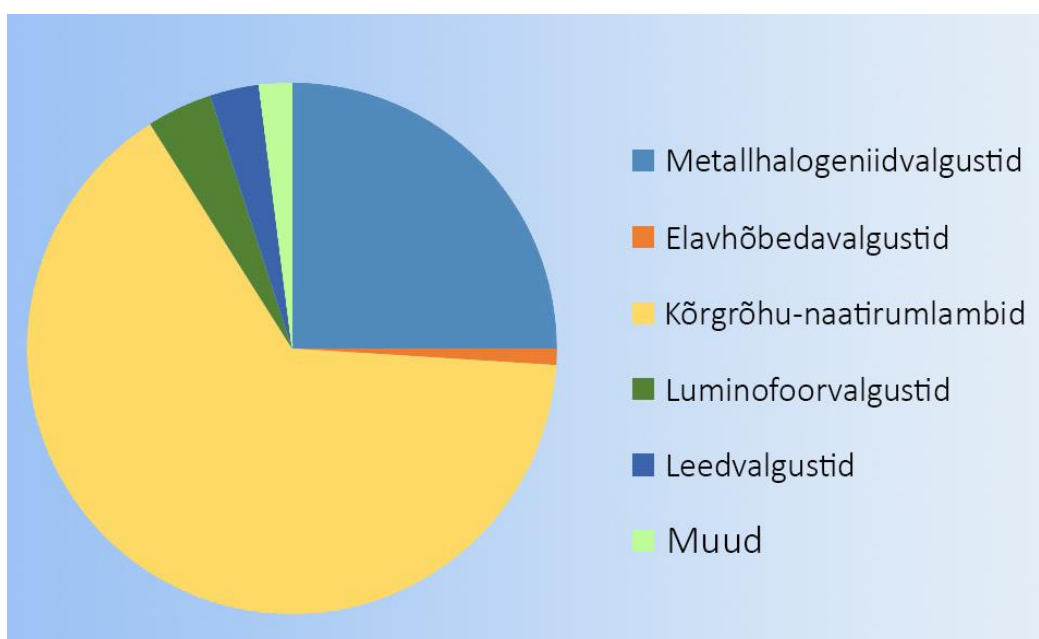
Teine uuring, mille Tallinna Tehnikaülikool teostas, valmis 2023 aastal [31], kus uuriti konkreetselt Tallinna linna valgusreostust. Üheks uurimismeetodiks oli panoraamvaadete analüüs, et tuvastada suurimad reostuse ja räiguse allikad. Teiseks uurimismeetodiks oli satelliitpiltide analüüs, kus vaadeldi erinevate linnaosade valgusreostuse kasvu vahemikus 2012-2021. Uuringus võrreldi Tallinna valgusreostust ka kahe teise sarnase suure linnaga – Göteborgi ja Turkuga. Tulemusena leiti, et Göteborgi ja Turku valgusreostuse trendijoon langes, oli stabiilne või tõusis minimaalselt, samal ajal kui Tallinnas valgusreostuse trendijoon kasvas. Uuringus toodi välja, et oleks vaja uurida lähemalt, miks Göteborgis ja Turkus on valgusreostus oluliselt

vähem kasvanud võrreldes Tallinnaga. Seega antud lõputöö järgmises peatükis vaadeldakse natuke lähemalt Göteborgi valgusreostust, kuna Göteborgi sisealadel oli märgata valgusreostuse kahanemist.

3.8 Valgusreostus Göteborgis

2022. aasta seisuga ei olnud Rootsis riiklikul tasandil ühtegi konkreetsemat määrust või seadust, mis piiraks valgusreostust. Olemas olid vaid üldisemad nõuded, mis piirasid valguse levimist aladele, kus see võib kahjulikult mõjuda elusloodusele. Küll aga on Rootsis olnud igal omavalitsusel võimalus luua oma enda valgustusala nõuded. Seda võimalust on ka kasutanud Göteborg, luues valgustusala strateegia *Stadens Ljus*. Selle sisus on välja toodud, et valgustuslahendused peaksid olema jätkusuutlikud ja energiatõhusad. Samuti on esitatud viise, kuidas valgusreostust vähendada, näiteks hämardamine, valgustite suunamine ja valgustite paigaldamine ainult sinna, kus neid vaja läheb. Konkreetseid nõudeid valgustitele aga *Stadens Ljus* pole seadnud. [32] [26]

Stadens Ljus loodi 2014. aastal ning sel ajal oli Göteborgis üsna palju kõrgrõhu-naatriumlampe nagu Tallinnaski. Kokku oli valgusteid sel ajal 95000 ning kõrgrõhu-naatriumlambid moodustasid nendest üle poole. Võrreldes Tallinnaga on Göteborgis kasutatud tunduvalt rohkem metallhalogeenidvalgusteid, mis on kõrgema värvsüsteemiga kui kõrgrõhu-naatriumlambid. Samal ajaperioodil katsetati Göteborgis jalgrattateedel erinevaid leedvalgusteid, et leida kõige energiatõhusam valgustuslahendus. Plaanis on sel ajal olnud ka ühendada kõik uued valgustid juhtimissüsteemidega, et tõsta energiatõhusust ja vähendada hoolduskulusid. [33]



Joonis 3.5 Göteborgi valgusti tüüpid 2014. aasta seisuga [33]

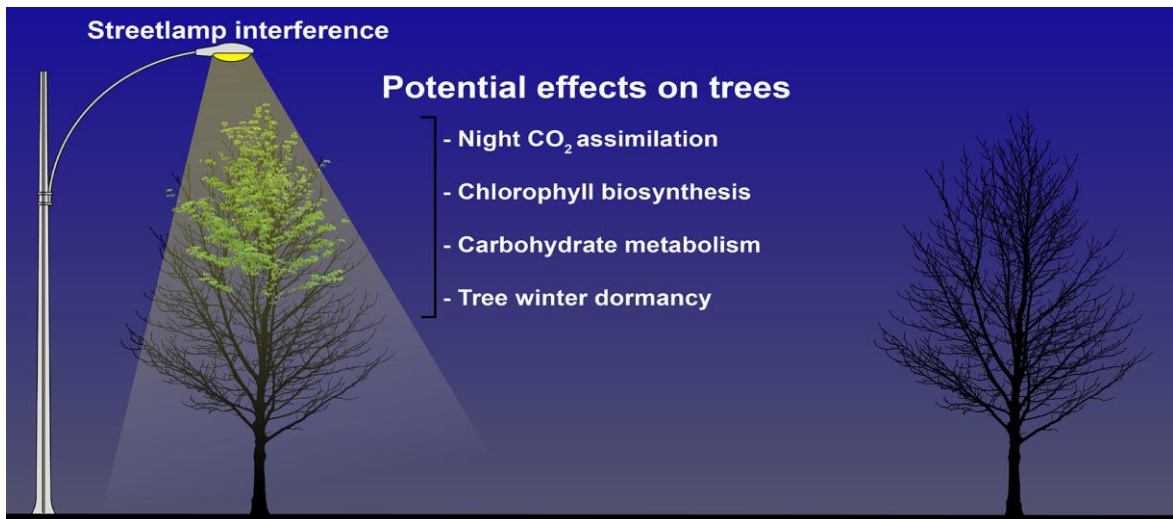
Juhtimissüsteeme on Göteborgis katsetatud juba aastast 2006. Esimese projekti käigus paigaldati 378 uut valgustit, mis oli üsna edukas. Selle tulemusena hakati juhtimissüsteeme rohkem kasutama ning 2012. aasta seisuga oli Göteborgis 2500 valgustit, mida sai häärdada. Erinevate projektide käigus kuue aasta jooksul leiti, et juhtimissüsteemide ja leedvalgustite paigaldamisega on võimalik saavutada suurt energiasäästu. Kokku saavutati 53-60% energiasäästu ning projektide käigus tekkis arusaam, et ainuüksi leedvalgustitest ei piisa energiasäästu tagamiseks. [34]

2012. aasta seisuga on Göteborgis leedvalgusteid juba aeglaselt tempos paigaldatud. Sel ajal ei olnud aga leedvalgustite värviesitus niivõrd hea, mistõttu on välja toodud, et suurel skaalal leedvalgustitele üleminekuga tasuks oodata. [34] Aastal 2016 oli linnal plaan vahetada kõik kõrgrõhu-naatriumlambid leedvalgustite vastu. [35] Konkreetsemad nõuded valgustitele on plaanis rakendada 2024. aastast, kus piiratakse värvsüsteemide temperatuuri, üleskiirguvat valgust ja sätestatakse muud nõuded valgustitele. [36]

Saadaoleva info põhjal pole võimalik täpselt öelda, miks valgusreostus Göteborgis aeglasemalt on kasvanud. Teada pole valgustite koguarv praegusel hetkel ning millises tempos valgustite arv on kasvanud. Samuti pole teada valgusti tüüpide osakaalu muutus aastate jooksul. Arvestades Tallinna Tehnikaülikooli poolt tehtud uuringut, oli valgusreostus Göteborgis kasvava trendijoonega ainult suurema mõõteala raadiuse korral. Sellest võib arvata, et äärealadel lisandub pidevalt valgusteid juurde, kuid linna keskosas valgusallikate kasv on pidurdunud.

3.9 Valgusreostuse mõju inimesele ja keskkonnale

Uuringud näitavad, et valgusreostus mõjutab loomade ja lindude rändemustreid, nende ärkveloleku harjumusi ja elupaikade kujunemist. [37] Valgusreostus takistab öises taevas tähtede nägemist ning segab astronoomilisi vaatlusi. Samuti häirib ta ökosüsteeme, avaldab inimese tervisele kahjulikku mõju ja raiskab energiat. [18] Pimedal ajal kasutatav tehisvalgus mõjutab taimede ööpäevarütmi. Lisaks on häiritud paljude putukate elu, kes tolmeldavad lilli. Valguse suund, selle kogus ja kvaliteedi muutus on taimedele kella eest. Taimed jälgivad päeva pikkust ja aastaegade vahetumist valguse kaudu. Vastavalt valgusele teab taim, millal on aeg pungadel puhkeda või lehed langetada. Eriti tundlikud on taimed punaste lainepikkuste suhtes. [38]



Joonis 3.6 Tänavavalgustusest tulenev puulehtede hilisem langemine [39]

Öine tehisvalgus segab hämaras ja pimedas tegutsevate liikide bioloogilist kella. Peamiselt põhjustab see neile mitmeid kahjulikke tagajärgi nagu:

- putukad lendavad valgusallika ümber jälgides oma instinkte. Nad ei lenda mitte valguse poole, vaid suunavad oma selja valgusallika suunas ning selle tulemusena jäävad valgusallika juurde lõksu. Kõige halvemad on putukate jaoks just kuppelvalgustid nende sfäärilise kuju poolest. Putukad lendavad ümber valgusallika, suutmata lahkuda ning nad võivad seeläbi hukkuda; [40]
- tehisvalgus põhjustab liikide seas valesti orienteerumist, mille tagajärjel paljud elusolendid saavad hukka. [38] Valgusreostuse tõttu satuvad muidu kuuvalgusest juhitud merikilpkonnad ja linnud segadusse, eksivad ning sageli ka hukkuvad. [37] Tehisvalgus võib põhjustada ka lindude liigvarajast või -hilist rändamist. Samuti mõjutab tehisvalgus lindude pesitsemist, toidu otsimist ja muid käitumismustreid. [41] On leitud, et kõik liigid sõltuvad mingil määral valguse lainepikkuse omadustest. Näiteks linnud vajavad orienteerumiseks valgusspektri sinakasrohelist osa. Avamere platvormidel on juba katsetatud roheka tooniga valgustust ning on leitud, et see on vähendanud lindude hukkumist. [42] Probleemiga tegelemiseks on paljud linnad maailmas võtnud kasutusele programmi „Lights Out“, mis tähendab hoonetel tuled väljalülitamist lindude rände ajaks; [37]

	UV	Violet	Sinine	Roheline	Kollane	Oranz	Punane	IR
Lainepikkus (nm)	<400	400-420	420-500	500-575	575-585	585-605	605-700	>700
Mageveekalad	x	x	x	x	x	x	x	
Merekalad	x	x	x	x				
Koorikud (zooplankton)	x	x	x					
Kahepaiksed ja roomajad	x	x	x	<500 ja >550	x	x	x	x
Linnud	x	x	x	x		x	x	x
Imetajad (v.a nahkhiired)	x	x	x	x			x	
Nahkhiired	x	x	x	x				
Putukad	x	x	x	x				

Joonis 3.7 Lainepikkused, mida tuleks vältida [31]

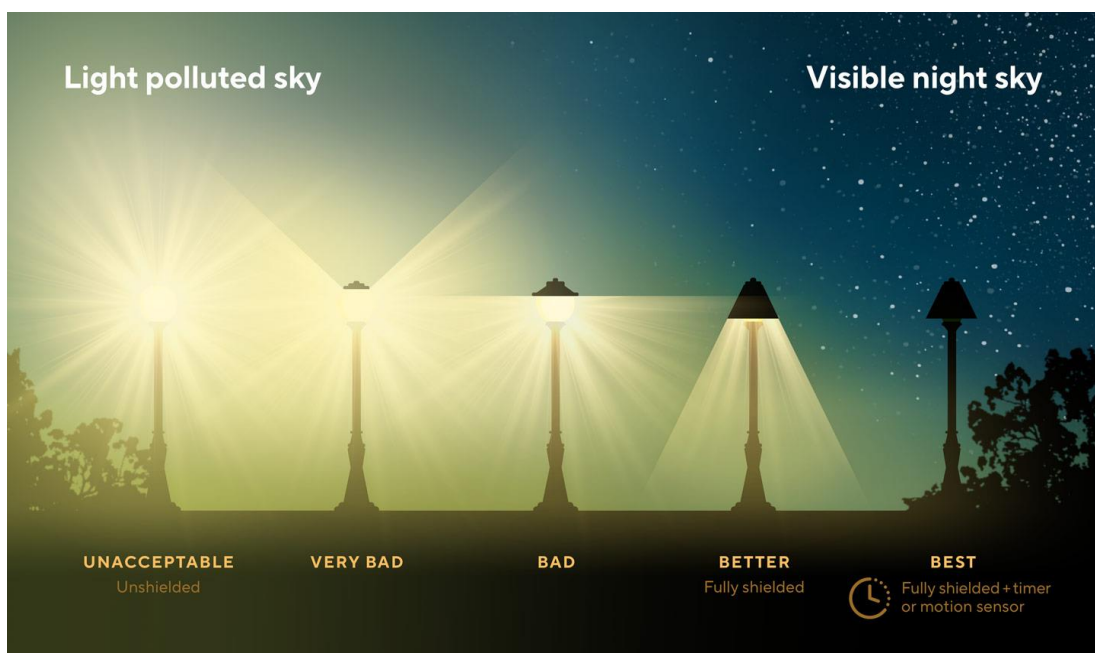
- c) tehisvalgus suurendab riskikäitumist ja vähendab/suurendab toidu saamist ning sellega mõjutab liikide populatsiooni arvukust. [38] Ebaloomuliku valguse poolt põhjustatud putukate populatsiooni vähenemine vähendab omakorda nahkhiirte toitumisvõimalusi. Nahkhiirte pesitsuspaikade läheduses tuleks võimalusel valgustamist täielikult vältida. Nad on võimelised normaalselt funktsioneerima selliste valgustite lähedal, mille valgusspektris puudub UV-kiirguse osa ja mis on madalama värvustemperatuuriga; [42]
- d) tehisvalgus annab mõnele liigile teiste ees eelise ja põhjustab sellega loomade omavahelist otsest või kaudset konkurentsi. [38] Kiskjad kasutavad valgust selleks, et jahti pidada ning saakloomad pimedust varjumiseks. [41]

Inimeste puhul mõjutab tehisvalgus melatoniini tootmist. [38] Juhul kui melatoniini tootmine on häiritud, siis selle tulemusena esinevad inimestel sellised sümptomid nagu unepuudus, väsimus, peavalud, stress ja ärevus. Hiljutised uuringud näitavad ka seost melatoniini taseme languse ja vähi vahel. Probleemne on just sinine valgus, kuna sinine valgus vähendab kõige rohkem melatoniini taset inimestel. [37] Samuti on inimene öösel tundlikum sinisele valgusele kui päeval ajal, mis on tingitud skotoopilise (öise) ja fotoopilise (päevase) nägemise erinevusest. [43] Sinine valgus mitte ainult ei vähenda melatoniini taset, vaid lausa tekitab silma võrkkestas püsivaid kahjustusi. [44] Sinist valgust leidub üsna palju leedvalgustites, mida praegu laialdaselt kasutusele võetakse, mistõttu on eriti oluline piirata uute valgustite paigaldamisel valgusreostust. [37] Valge tooniga leedvalgustitel võib olla lausa viis korda suurem mõju inimese ööpäevarütmile kui tavapärasel tänavavalgustitel. [11]

3.10 Valgusreostuse vähendamise meetodid

Valgusreostuse vähendamiseks on mitmeid viise. Kõige lihtsam on valgusreostuse probleemi ennetada, tehes juba valgustite projekteerimisel teadlikke otsuseid. See aga ei tähenda, et olemasolevate valgustuspaigaldiste olukorda ei saaks kuidagi parandada. [38] Järgnevalt on välja toodud erinevad viisid valgusreostuse vähendamiseks nii projekteerimisel kui ka hilisemas etapis.

- tänavavalgustite varjestamine – see on kõige parem viis vähendada astronoomilist valgusreostust, kuid varjestatud valgustid võivad ikkagi tekitada ökoloogilist valgusreostust. [22] Uuringud näitavad, et 75% taevakumast on tekitatud varjestamata valgustite poolt. [20] Samuti aitab varjestamine vähendada räigust. Valgustite suunamine on oluline, et valgus ei satuks sinna, kuhu ta pole ette nähtud (atmosfääri, maja fassaadile, akendest sisse, kõrvalisele maatükile); [23]



Joonis 3.8 Valgustite varjestamise mõju [17]

- valgustite suunamine – valgustid peaksid olema paigaldatud maapinnaga paralleelselt. Vanade kõrgrõhu-naatriumlampide puhul on näiteks märgata seda, et elamurajoonides on nad tihtipeale paigaldatud üsna suure nurga all ning see tekitab olukorra, kus valgustatud saab ka vastas oleva hoone fassaad. Lisaks tekitab selline paigaldamisviis palju üleskiirguvat valgust. Taolise paigaldamise taga on tavaliselt soov valgustada võimalikult suurt ala. Valgusreostuse vältimiseks on oluline kõikide valgustite õige paigaldamisviis, aga leedvalgustite

- puhul on eripäraks see, et nende optika on asümmeetriline, mistõttu nende paigaldamine kalde all vähendab maapinnale jõudvat valgustustihedust; [45]
- värvsustemperatuur – kõrgema värvsustemperatuuriga leedvalgustid sisaldavad üsna palju sinist valgust, mis hajub õhus rohkem kui näiteks punane valgus. Sinine valgus on ebasobilik nii inimestele kui ka paljudele loomadele. [38] Lindude rände ajal saab kasutada teistsuguse tooniga välisvalgusteid, et hoida neid rajalt kõrvale kaldumast. [42] Tooni muutmiseks on võimalik näiteks kasutada inimkeskseid valgusteid; [46]
 - hämardamine või valgusallikate väljalülitamine – suured kaubanduskeskused ja büroohooned saavad paigaldada seadmeid, mis võimaldavad valgusteid hämardada. Alternatiivina võiks kaaluda valgusallikate välja lülitamist ööseks antud hoonetes. [42] Tänavavalgustite puhul saab kasutada juhtimissüsteeme, mis võimaldavad valgustite heledust reguleerida öösel madalamale tasemele; [47]
 - pimealad – pimealade kasutamine ei tähenda ilmtingimata seda, et inimeste turvalisus kuidagi väheneks. Näiteks võiks kaaluda pimealade kasutamist looduslähedastes piirkondades, et võimalikult vähe häirida ökosüsteeme. Pimedaks võiks jätta ka alad, kus teatud kellaegadel inimtegevus puudub (koerteväljakud, mänguväljakud, välised jõuväljakud); [38] [48]
 - inimeste teadlikkuse suurendamine – paljud inimesed ei ole teadlikud valgusreostuse probleemist. [49] Inimesed saavad välja lülitada kõik valgusallikad, mida otseselt ei kasutata (eriti välisvalgustus). Elumajades on soovitatav hoida kardinad ees, et valgus ei leviks toast välja; [37]
 - liikumisandurid – looduslähedastes linnapiirkondades, kus on valgustatud välirajad, on kõige ökoloogilisem liikumisandurite paigaldus. Sellisel juhul on tavaolekus valgustid hämardatud miinimumini ning kui tuvastatakse liikumine, siis toimub valgusti süttimine. Sel on kasulik mõju nii loomadele kui taimedele. [38]

3.11 Väljakutsed valgusreostuse vähendamisel

Valgusreostus on saaste vorm, mida on kõige kergem vähendada. Ometi tekib valgusreostust kogu aeg juurde. Valgusreostuse suurenemist võib olla aina raskem satelliidipildidel näha leedvalgustite hulga suurenemise tõttu, kuid taeva kvaliteedi mõõtmised näitavad, et igal aastal kasvab taevakuma heledustase umbes 10% võrra. [50] Põhjused, miks valgusreostust võib olla keeruline vähendada, on järgmised:

- valgustite suurenev arv – kogu aeg lisandub tänavapilti uusi valgusallikaid, mille koosmõjul tekib valgusreostust järjest juurde. Valgusreostuse kaardi pealt on

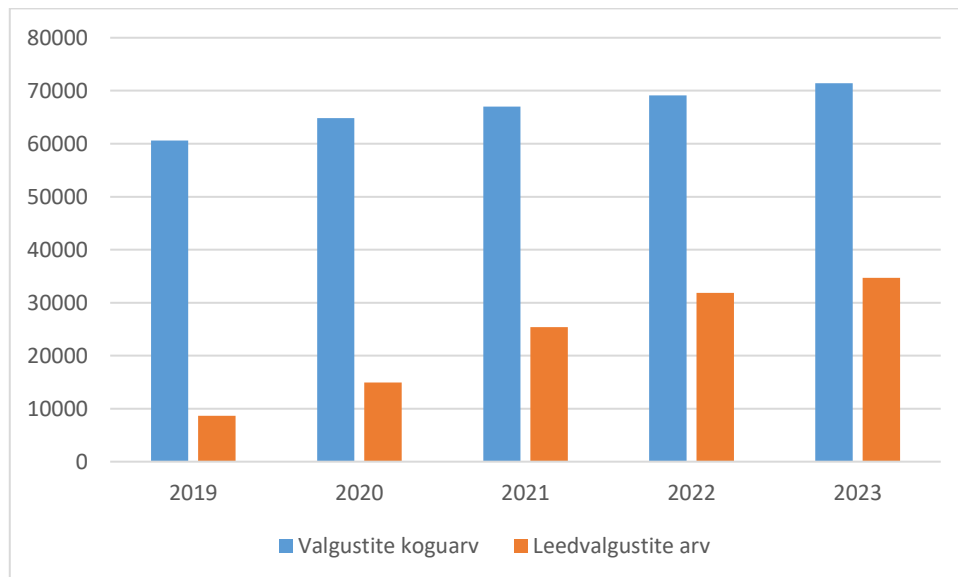
märgata, kuidas äärealade valgusreostus kasvab ja laieneb pidevalt. Leedvalgustid muutuvad üha odavamaks, energia hinnad on samuti viimase aastaga alla tulnud ning see kõik tingibki aina suurema valgustite hulga;

- leedvalgustite energiatõhusus – kuna leedvalgustid kulutavad vähem energiat võrreldes teiste valgusallika tüüpidega, kasutatakse neid kohtades, kus neid otseselt vaja ei ole. Valgustatakse näiteks erakinnistu aeda, välisfassaadi, sealjuures ei mõelda valgusallika välja lülitamise peale, kuna rahaline kahju on niivõrd väike;
- inimeste vähene teadlikkus – ei teata täpselt valgusreostuse kahjulikke mõjusid inimesele ja keskkonnale [51], mistõttu ei lülitata ööseks mitte kasutatavaid valgusallikaid välja;
- turvalisus [51] – inimestele seostub valgustus turvatundega, mistõttu valgustite liigne hämarus võib tekitada olukorra, kus inimesed ei julge kodudest pimedamal ajal välja minna. Samuti võivad inimesed sealhulgas kaupluste omanikud karta oma materiaalse vara pärast (vandalism ja röövimine);
- olulisemaks peetakse muid aspekte – projekteerimise etapis ei ole valgusreostuse vältimine tavaliselt kõige suurem prioriteet. [51] Keskendutakse rohkem energiasäästu saavutamisele ja CO₂ heitmete vähendamisele;
- standardid on vabatahtlikud – kuna standardite järgimine ei ole kohustuslik, võib see tekitada olukorra, kus nendega arvestamine tundub liigse kohustusena.

4. VALGUSTID

Valgusti tüüpe on väga palju erinevaid, kuid peamiselt võib neid jagada järgmiselt: hõõg- ja halogeenlambid, gaaslahendus- ning leedvalgustid. [52]. Antud lõputöös keskendutakse ainult viimasele kahele, kuna neid kasutatakse tänavavalgustuses.

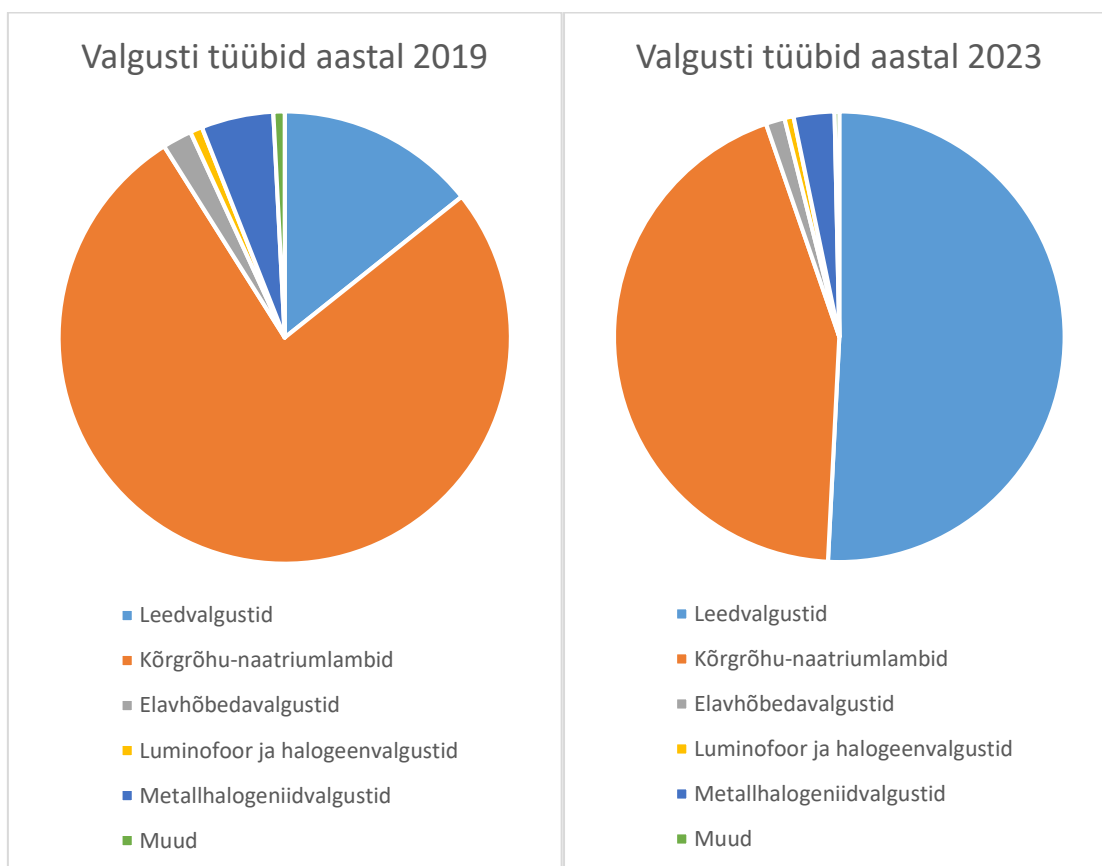
Tallinnas lisandub tänavapilti igal aastal umbes 2000 uut tänavavalgustit. 2023. aasta seisuga oli valgusteid kokku 71435, millest peaaegu pooled olid leedvalgustid. Aastatel 2019 kuni 2023 läks kõrgrõhu-naatriumlampide ümber vahetamine leedvalgustite vastu üsna kiires tempos. Keskmiselt lisandus tänavapilti 8000 leedvalgustit aastas. 2023. aastal paigaldati leedvalgusteid aga juba tunduvalt vähem, umbes 3000 tükki. Praegu on Tallinna linnal soov lähema nelja või viie aasta jooksul täielikult leedvalgustitele üle minna. [48]



Joonis 4.1 Valgustite arvu kasv aastatel 2019-2023 [48]

2019. aastal oli Tallinnas tänavavalgustuse energiatarve 34086 MWh. 2023. aasta seisuga oli energiatarve juba ainult 25496 MWh. Aastas on energiatarve leedvalgustitele vähenenud keskmiselt 7,6% hoolimata sellest, et valgusteid tuleb kogu aeg juurde. Kokku on nelja aastaga tänavavalgustuse energiatarve vähenenud 25% võrra. See näitab, et leedvalgustitele üleminek aitab saavutada olulist energiasäästu. 2019. aastal oli energiatarve ühe valgusti kohta 563 kWh, 2023. aastaks oli see juba 357 kWh. Seega on energiatarve ühe valgusti kohta vähenenud iga aasta keskmiselt 10,7%. Kokku on nelja aastaga energiatarve ühe valgusti kohta vähenenud 37%. [48]

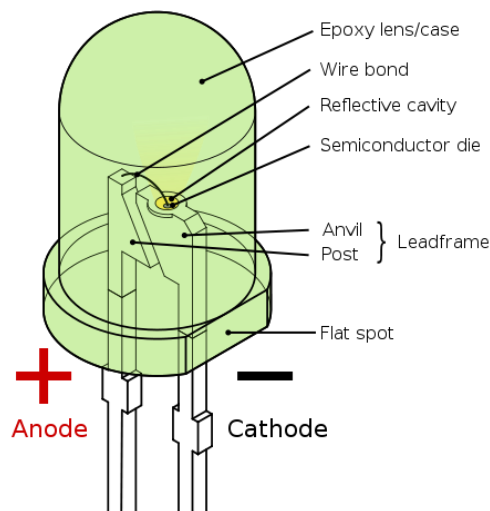
Lisaks kõrgrõhu-naatriumlampide arvu vähenemisele on järjepidevas languses ka ülejäänud valgusti tüüpide osakaal. Aastal 2019 moodustasid kõrgrõhu-naatriumlambid ja leedvalgustid 91% kogu valgustitest ning aastaks 2023 oli see osakaal tõusnud juba pea 95%-ni. Vähendatakse kõikide lampide osakaalu, kuid oluline on just elavhõbedavalgustite vähendamine. [48] Seega, kuna suurem osa tänavavalgustusest koosneb kõrgrõhu-naatriumlampidest ja leedvalgustitest, keskendutakse siin peatükis rohkem just nendele valgustitüüpidele.



Joonis 4.2 Valgusti tüüpide arv aastatel 2019 ja 2023 [48]

4.1 Leedvalgustid

LED ehk valgusdiod on tahke pooljuht, mis konverteerib elektrienergia otse valguseks. Esimene praktiline valgusdiod leiutati 1960. aastatel ning see kiirgas punast värvi. Seejärel leiutati oranž ja kollane valgusdiod 1970. aastatel. 1980. aastatel algas leedide jaoks uus etapp, kui täiustati leedide tehnoloogiat. Uus areng võimaldas luua säästlikumaid ja mitmeid kordi tugevama valgusvooga valgusdioode. 1993. aastal tutvustas üks Jaapani firma uut sinist ja rohelist valgusdiodi ning nende valgusvoog oli eelmiste valgusdiodidega võrreldes sada korda suurem. Sinise valguse loomine oli oluline samm edasi, kuna see võimaldas hakata tootma ka teisi värve, sealhulgas valgeid valgusdioode. [52]

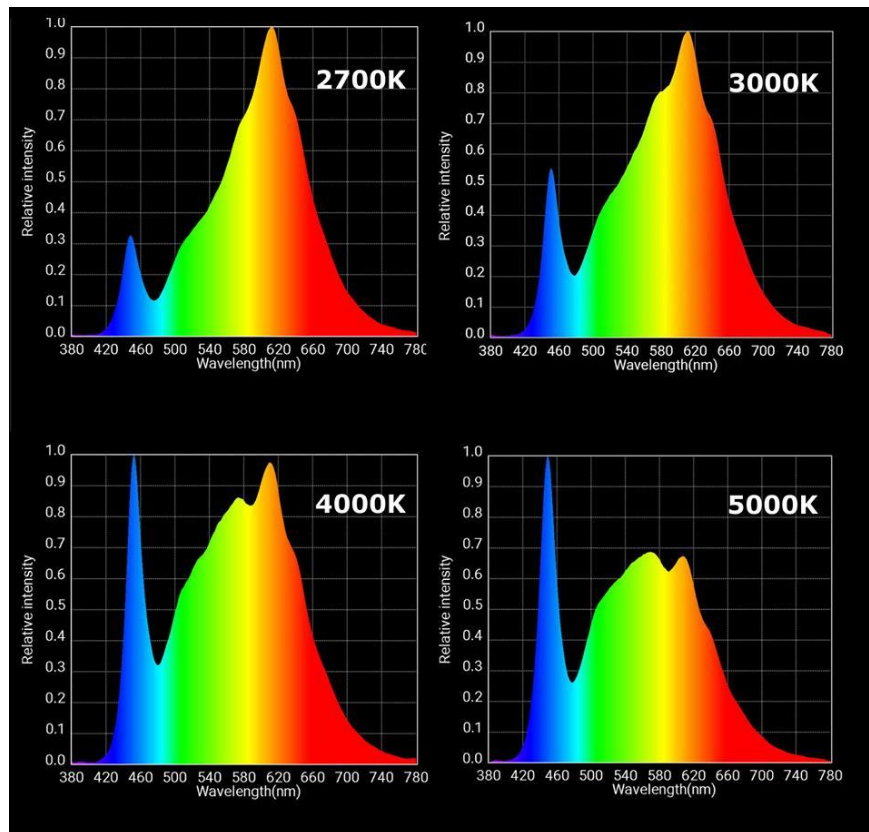


Joonis 4.3 Valgusdiodi konstruktsioon [53]

Valgusdiodielement koosneb mitmest erinevast pooljuhtkihist, kus alalispinge abil genereeritakse kindla spektriga valgus. Värvsus, mis selle tulemusena tekib, sõltub kasutatavast pooljuhtmaterjalist ja selle protsesside ülesehitusest. [52]

Leedvalgustite kasutamisel on mitmeid eeliseid. Leedvalgusteid iseloomustab kõrge valgusviljakus, mis kasvas hüppeliselt võrreldes teiste valgusti tüüpidega. Leedide valgusjaotust on võimalik kujundada selliselt, et puudub vajadus kasutada reflektoreid (peegeldeid) ja refraktoreid (hajuteid). Valgusti saavutab oma täieliku valgusvoo praktiliselt koheselt peale sisselülitamist. [54] Leedvalgustid koosnevad paljudest diodidest, mis kiirgavad erineva lainepikkusega värve. [11] Tänu sellele on leedide valgusvoo juhtimine küllaltki lihtne ning seda saab teha sujuvalt. Leedid on ka kõige pikema elueaga. [54] Veel võib eeliseks tuua selle, et leedvalgustite spektris esineb väga vähesel määral UV- ja infrapunakiirgust. Samuti vajavad leedvalgustid vähem hooldust võrreldes teiste valgusti tüüpidega. Puuduseks võib aga pidada jahutuse vajalikkust. Lisaks tekitavad värvilised valgusdiodid kitsa lainepikkusega monokromaatilist valgust, mis tekitab olukorra, kus leedvalgustite spektris esineb väga tugev sinine piik (vt Joonis 4.4). [52] Leedvalgustid tekitavad ka rohkem räägust võrreldes teiste valgusti tüüpidega. [11]

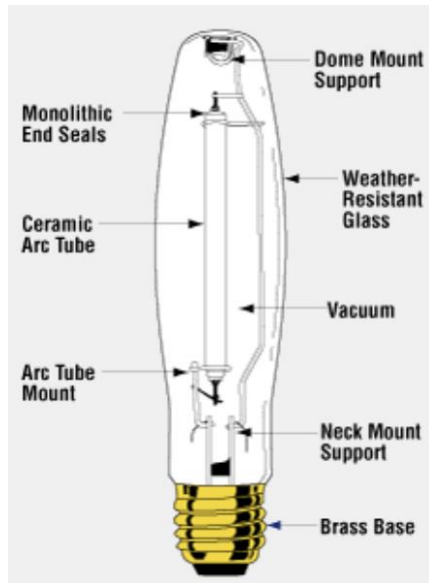
Leedid võivad olla oma suuruselt väga väikesed, vastupidavad ning madala energiatarbimisega. Leedvalgusteid on lihtsam suunata väiksemale alale, kuid see võib tekitada olukorra, kus sõidutee valgustamiseks kasutatavad leedvalgustid ei valgusta varasemate lampidega võrreldes enam nii hästi tee ääres olevaid ülekäiguradasid. Seega võivad need ülekäigurajad vajada eraldi uut kõnnitee valgustust. [11]



Joonis 4.4 Leedvalgusti spektraaljaotus erinevate värvsüsteemide korral [44]

4.2 Gaaslahendusvalgustid

Gaaslahendusvalgustid ehk kaarlahenduslambid jagatakse omakorda kaheks: madalrõhulambid ja kõrgrõhulambid. Kõrgrõhulahenduslampidest on tänavavalgustuses kasutusel peamiselt kõrgrõhu-naatriumlambid, kuid vähesel määral võib tänavapildis kohata ka metallhalogeniid- ja elavhõbelampe. Kõrgrõhu-naatriumlampides puudub süüteelektrood, mistõttu kasutatakse süütamiseks kõrgepingeimpulssi. Kaarlahendustoru valmistatakse materjalist, mis peab vastu pidama naatriumi söövitavale toimele. Kõrgrõhu-naatriumlampide spekter ei sisalda UV-kiirgust, mida leidub aga metallhalogeniidlampides ja kõrgrõhu-elavhõbelampides. Suurem osa lampidest on ühe sokliga, kuid valmistatakse ka kahe sokliga lampe. [52]



Joonis 4.5 Kõrgrõhu-naatriumlambi konstruktsioon [55]

Kõrgrõhu-naatriumlampidel on mitmeid eeliseid võrreldes teiste vanemate valgusti tüüpidega. Nende eluiga on küllaltki pikk – kuni 24000 tundi. See on peamine põhjus, miks neid massiliselt kasutati enne leedvalgusteid. Metallhalogeniid- ja elavhõbelampidega võrreldes on nende soojenemisperiod lühem (3-4 minutit). Valikus on mitmeid erinevaid lambitüüpe ning võimsusi. [56] Naatriumlampide valgusvoog väheneb tunduvalt aeglasemini võrreldes teiste kõrgrõhulampidega. [52] Naatriumlampide miinusteks on halb värviesitus, ballasti vajadus ning täisvõimsuse aeglane saavutamine (aega võib kuluda 5-10 minutit). [56] Lambi spektraaljaotust on püütud parandada, aga see eeldab lambis rõhu tõstmist, mis omakorda lühendab lambi tööiga. [1]

4.3 Valgustite hämardamine

Tallinna linnas kasutusel olevad valgustusklassid on näha Joonisel 4.6. Joonisel on M3 valgustusklass tähistatud punase joonega ning M4 valgustusklass sinise joonega. Jooniselt on näha, et suuremad magistraalteed on tähistatud valgustusklassidega M3 ja M4. Ülejäänud tänavatel, kus valgustusklassi pole märgitud, kasutatakse M5 valgustusklassi. M6 valgustusklassi kasutatakse ainult erijuhtumitel, näiteks tupiktänavate puhul. Tänav valgustusklassid vaadatakse veel eraldi üle projekti tehnilist kirjeldust tehes. [48]



Joonis 4.6 M3 ja M4 valgustusklassid Tallinna tänavatel [48]

Hämmardamisel tuleks järgida Tallinna linna poolt kehtestatud uusi hämmardamise režiime. Võrreldes uusi hämmardamise režiime vanadega, on märgata mõningaid erinevusi. Näiteks algab osade valgustusklasside puhul piiranguaeg juba kella 22:00-st. Lisaks on uuest tabelist välja võetud P7 valgustusklass. Hämmardamisele kuulub nüüd ka P5 valgustusklass, mida varem ei hämmardatud. Täielikult lülitatakse välja valgustid koorteväljakutel, mänguväljakutel ja jõuväljakutel. Lasteaedade mänguväljakute hämmardamise režiimi aeg kooskõlastatakse eraldi lasteaia ja tellijaga. Hämmardamisele ei kuulu C valgustusklassid, kaamerate piirkonnad ning ülekaigurajad. [48]

Hämmardada tuleks ühe valgustusklassi kaupa. Näiteks M3 valgustusklassi puhul tuleks kõigepealt valgustid hämmardada M4 valgustusklassi tasemele ning seejärel M5 valgustusklassi tasemele. [48]

	KELLAAEG, ALGAV TUND																			
	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00		09:00
Valgustusklass M	Hämardamisel alles jääv keskmine valgusvoog protsentides																		Valgustusklasside muutmise	
M1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	100	100	100	100	M1 - M2 - M3 - M2 - M1
M2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	100	100	100	100	M2 - M3 - M4 - M3 - M2
M3	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	50	50	75	100	100	100	M3 - M4 - M5 - M4 - M3
M4	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	50	50	75	100	100	100	M4 - M5 - M6 - M5 - M4
M5	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	50	50	75	100	100	100	M5 - M6 - P5 - M6 - M5
M6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50	50	50	100	100	100	100	M6 - P6 - M6
Valgustusklass P	Hämardamisel alles jääv keskmine valgusvoog protsentides																			
P1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50	50	50	100	100	100	100	P1 - P2 - P3 - P2 - P1
P2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50	50	50	100	100	100	100	P2 - P3 - P4 - P3 - P2
P3	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	50	50	75	100	100	100	P3 - P4 - P5 - P4 - P3
P4	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	50	50	50	75	100	100	100	P4 - P5 - P6 - P5 - P4
P5	100	100	100	100	100	100	100	75	75	75	75	75	75	75	75	100	100	100	100	P5-P6
P6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	P6
Valgustusklass C	Ei kuulu hämardamisele																			
C0 - C5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Kaamerate piirkonnad	Ei kuulu hämardamisele																			
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Ülekäigurajad	Ei kuulu hämardamisele																			
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Väljakud:	Hämardamisel alles jääv keskmine valgusvoog protsentides																			
Sporti- ja ekstreemspordiväljakud	100	100	100	100	100	100	100	50	50	10	10	10	10	10	10	50	50	100	100	
Koorteväljakud	100	100	100	100	100	100	100	50	50	X	X	X	X	X	X	50	50	100	100	X-valgustus ei põle
Mänguväljakud	100	100	100	100	100	100	100	50	X	X	X	X	X	X	X	50	50	100	100	X-valgustus ei põle
Lasteaedade mänguväljakud*	100	100	100	100	100	100	X	X	X	X	X	X	X	X	X	100	100	100	100	X-valgustus ei põle
Välised jõuväljakud	100	100	100	100	100	100	100	50	50	X	X	X	X	X	X	50	50	100	100	X-valgustus ei põle

Joonis 4.7 Tallinna linna välisvalgustuse hämardamise režiimid [48]

4.3.1 Valgustite hämardamise energiasääst

Kõikidest tänavavalgustitest umbes 4000 on hämardatud [48], kuid pole täpselt teada, kuidas neid hämardatakse. On aga teada, et M6 tänavaid kasutatakse väga harvadel juhtudel, seega suurem osa tänavatest on M3-M5 valgustusklassiga, millel on ühesugune hämardamise režiim. Seetõttu võib teoreetilist arvutust tehes eeldada, et kõik 4000 valgustit on hämardatud sama režiimi järgi. Hämardamise võimalus on ilmselt tagatud suures osas leedvalgustitele, mistõttu võib arvutust tehes eeldada, et nad kõik on leedvalgustid. Leedvalgustite võimsus on tavaliselt 60-70 W. Arvutuste lihtsustamiseks võetakse võimsuseks 60 W. Seega, kui kõik 4000 leedvalgustit töötaksid täisvõimsusel, saab nende energiakulu arvutada järgmiselt:

$$E_{kogu} = P_{valgusti} \cdot \text{Valgustite arv} \cdot \text{Valgusti töötundide arv aastas} \quad (4.1)$$

kus E_{kogu} – energiakulu täisvõimsusel

$P_{valgusti}$ – ühe valgusti võimsus

Seega oleks antud leedvalgustite energiakulu täisvõimsusel:

$$E_{kogu} = 60 \cdot 4000 \cdot 4000 = 960 \text{ MWh}$$

Teada on, et tänavavalgustus töötab aastas 4000 tundi. See teeb keskmiselt 11 tundi päevas. Eeldame, et ajavahemik, millal tänavavalgustid töötavad, on 20:00-07:00. See annab küll ligikaudse tulemuse, aga aitab meil saada parema ettekujutuse sellest, kui

palju energiat antud valgustid tarbivad. Täpsemate tulemuste saamiseks tuleks iga kuu tänavavalgustuse töötamise aega eraldi arvestada. M3-M5 valgustusklassi hämardamise režiimi kasutades saab energiakulu leida järgmiselt:

$$E = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i \cdot \text{Valgustite arv} \cdot \text{Päevade arv aastas} \quad (4.2)$$

kus n – erinevate hämardamisastmete hulk

P_i – valgusti võimsus konkreetsel hämardamisastmel

t_i – hämardamisastmel töötatud tundide arv

Energiakulu hämardamise režiimi kasutades on seega:

$$E = (60 \cdot 2 + 45 \cdot 3 + 30 \cdot 6) \cdot 4000 \cdot 365 = 635 \text{ MWh}$$

Sellest tulenevalt on 4000 leedvalgusti hämardamisel võimalik kokku hoida 325 MWh energiat. Protsentuaalselt on energiatarbimine 34% võrra väiksem. Arvestades CO₂ emissioonide kogust energiaühiku kohta, milleks on 0,661 t/MWh [57], siis antud valgustite hämardamisel jääb aastas õhku paiskamata 215 tonni CO₂-te. Võttes elektri hinnaks 173,53 €/MWh (vt Tabel 4.1) saame, et rahaline kokkuhoid aastas on 56397 €.

Tabel 4.1 Kogu elektri hind

Elektrienergia kulu (fikseeritud pakett)	128,5 €/MWh [58]
Keskmine võrgutasu	30,46 €/MWh [59]
Taastuenergia tasu	12,8 €/MWh [60]
Elektriaktsiis	1,77 €/MWh [60]
Kogu elektri hind	173,53 €/MWh

Teame, et kogu tänavavalgustusvõrk tarbis 2023. aastal 25496 MWh energiat. Kokku oli tänavavalgusteid samal aastal 71435, millest 34696 olid leedvalgustid. Seega on veel umbes 30000 leedvalgustit, mida ei hämardata. Nende leedvalgustite energiatarve ühes aastas on 7200 MWh. Juhul, kui neid valgusteid ka hämardataks, langeks nende valgustite energiatarbimine 4763 MWh peale. See jätkaks õhku paiskamata 1611 tonni CO₂-te aastas ning rahaline kokkuhoid oleks 422893 € aastas.

4.4 Valgustite juhtimine

Valgustite hämardamiseks on võimalik kasutada erinevaid juhtimissüsteeme, millest olulisemad on välja toodud selles peatükis. Juhtimissüsteemide paigaldamisega kaasnevad järgmised eelised: energiasääst, väiksemad tegevuskulud ja suurem kliendi rahulolu. Peamiselt võib jagada juhtimissüsteeme kolmeks: [61]

- autonoomne juhtimissüsteem – kõige lihtsam ja odavam viis valgustite juhtimiseks. Selle juhtimissüsteemi puhul on valgustid eelprogrammeeritud töötama teatud perioodidel;
- kohtjuhtimissüsteem – juhtimiskilbist juhitakse mingis konkreetses grupis olevaid valgusteid. Andmed saavad liikuda selle juhtimissüsteemi puhul ühes suunas. Infot on võimalik saada ainult terve grupi valgustite kohta, mitte üksikute lampide kohta;
- digitaalne kaugjuhtimissüsteem – juhtimiskeskusest on võimalik saada infot valgusti gruppide või üksikute valgustite kohta. Antud juhtimisviis annab valgustite üle kõige parema kontrolli.

4.4.1 Faasjuhtimine

Faasjuhtimine on kõige töökindlam ja painedlikum juhtimisviis, küll aga on selle juhtimise puuduseks ainult ühe hämardamisastme olemasolu. Valgustid saavad töötada kas täisvõimsusel või 50% võimsusega ning vahepealset varianti ei ole. Faasjuhtimine toimub läbi lisaosone, millele antakse peale 230 V pinge ning pinge rakendumisel lähevad kõik valgustid hämardamise režiimile. Faasjuhtimine on häirevaba ja ei nõua jooksvaid kulutusi. Samuti on lisaosone paigaldamine küllaltki odav. [62]

4.4.2 Astronoomilise kellaga valgustid

Astronoomilise kellaga valgustid reguleerivad hämardamist virtuaalse keskköös alusel, mille pikkust on võimalik valgustite paigaldamisel seadistada. Seda juhtimisviisi kasutati juba kõrgrõhu-naatriumlampide puhul, kuid taolise juhtimise puhul on hilisem hämardamise režiimi ümberseadistamine ajakulukas. Samas on antud juhtimise eelisteks odav hind, lihtne kasutamine ja töökindlus. [62]

Üks tootja, kes pakub astronoomilise kella lahendust, on Philips. Nende poolt pakutava juhtimissüsteemi nimeks on Dynadimmer, mis võimaldab valgusteid reguleerida igal ajal ükskõik millisele hämardamise režiimile. See on astronoomilise kellaga juhtimisel suureks eeliseks. Maksimaalselt võimaldab Dynadimmer kasutada viite erinevat hämardamise režiimi, mida on lihtne reguleerida tarkvara abil. Tarkvara arvutab välja ka energiasäästu. Dynadimmeri ümberseadistamine on küllaltki lihtne ning üheks võimaluseks seda teha on arvutist, laadides peale uue programmi. Küll aga saab ümberseadistamist teha ainult ühe valgusti kaupa, mitte gruppides. [63]

4.4.3 DALI juhtimine

DALI juhtimist kasutatakse kahesuunalise andmesidega kaugjuhtimissüsteemides. DALI juhtimine käib digitaalse kaugjuhtimissüsteemi alla, mis tähendab, et DALI võimaldab täielikku kontrolli valgustite üle. Juhtimiskäsklused edastatakse ballastidele ning juhul, kui mõnes valgustis esineb rike, on võimalik saada täpsemat teave probleemi olemusest. Digitaalsel juhtimisel saavad kõik juhitavad ballastid ühesuguse juhtimissignaali, aga kuna igal DALI-ballastil on oma isiklik lühiaadress, siis juhtimine toimub ainult nendes valgustites, millele juhtimissignaali mõeldud on. Sellise lahenduse rakendamiseks tuleb valgustid eelnevalt ballastide rühmadesse ja/või stsenaariumidesse jagada. DALI juhtimise suurimaks eeliseks on see, et sama liiteseadist saab kasutada erinevates rühmades ja erinevate valgustusstsenaariumite korral. Seega on DALI juhtimisega võimalik saata kõikidele valgustitele ühesugune käsklus kasutades *broadcast*-korraldust. [64] [52]

DALI juhtimise üheks miinuseks võib pidada seda, et ta võimaldab ühendada maksimaalselt ainult kuni 64 DALI-ballasti. Antud ballaste saab jagada kuni 16 rühma ning nende valgustite jaoks on võimalik rakendada kuni 16 erinevat stsenaariumi. DALI juhtimine toimub pideva võrgutoite all ning valgusteid lülitatakse ja hämardatakse kahesoonelise tugevvoolu juhtimise abil. DALI juhtimiskaabli maksimaalne pikkus ei tohi samuti olla väga pikk. Toiteallika ja kaugeima valgusti vahemaa ei tohi ületada 300 m kaabliisone ristlõikel 1,5 mm². Üldiselt on DALI juhtimisel vajadus välise toiteallika järele. Erinevate tootjate poolt valmistatud DALI-ballastid peavad sobima ka teiste tootjate juhtimisseadmetega. [52]

4.4.4 Liikumisradaritega juhtimine

Üks ettevõtte, kes pakub liikumisradaritega juhtimissüsteemi, on Comlight. Comlight-i tehnoloogia puhul kasutatakse valgustite juhtimiseks mikrolainesensorit ja juhtimistarkvara, mis koguvad infot tänaval oleva liikluse kohta. [65] Comlight juhtimissüsteem on ühendatud tootja serveriga läbi GSM-i, kus hoitakse süsteemi andmeid. Süsteemi on võimalik seadistada kaugühenduse abil. Comlight süsteemi eeldatav eluiga on 10-15 aastat, mis tähendab seda, et kui eeldada tänavavalgustuse elueaks 20-25 aastat, siis selle aja jooksul võib tekkida süsteemi uuendamise vajadus. Ainus pidev väljaminek, mis antud süsteemiga kaasneb, on GSM andmesidekulu. Võttes arvesse saavutatavat energiasäästu, ei ole summa tegelikult suur, eriti kui see valgustite peale ära jagada. [66]

Comlight juhtimissüsteem on kasutusel näiteks Viimsis Randvere teel, Leppneeme teel ja Muuga teel. Valgustite väljundvõimsus reguleeritakse 20%-le kui liiklust ei ole ning kui liikumine tuvastatakse, lähevad valgustid üle täisvõimsusele. See kui palju valgusteid täisvõimsusel süttivad, sõltub sõidukite või jalakäijate liikumiskiirusest. Olenevalt liikluse sagedusest on antud juhtimissüsteemiga võimalik saavutada kuni 60% energiasäästu. [66]

4.5 Juhtimissüsteemide analüüs

Juhtimissüsteeme on palju erinevaid ning igal ühel neist on erinevad eelised ja puudused. Faasjuhtimine on töökindel, kuid selle kasutusele võtmine tähendaks olemasolevate kaablite väljavahetamist. Seetõttu ei oleks antud lahendus sobiv suurel skaalal. Astronoomilise kellaga juhtimisel on mitmeid eeliseid ning ilmselt sobiks selline lahendus hästi suuremal skaalal valgusreostuse vähendamiseks. Tegemist on tehniliselt lihtsa lahendusega, mis ei nõua kaabelduse väljavahetamist. Lisaks on ta odav võrreldes valgustipõhise juhtimisega ja võimaldab mitmeastmelist hämardamist. Tema üks suur miinus on see, et kui valgustite hämardamise režiime on vaja ümber programmeerida, siis seda saab teha ainult üks valgusti korraga. Samas, kui arvesse võtta seda, et Tallinna linnal tulid üsna hiljuti välja uued hämardamise režiimid, siis ilmselt ei teki ümberseadistamise vajadust lähiajal. Ümberseadistamise vajadus võib tekkida ainult osadel valgustitel, mis ei vasta hämardamise tulemusena enam standarditele. DALI juhtimist eelistatakse üldjuhul sisevalgustuse puhul, kuna see võimaldab korraga juhtida väheseid valgusteid ning seda üsna lühikese vahemaa ulatuses. Comlight juhtimissüsteem sobib väiksema liiklustihedusega aladele ning aitab tagada suurt energiasäästu. Juhtimissüsteemi puuduseks on kõrge maksumus, mistõttu tuleks enne selle paigaldamist analüüsida liiklusvoo tihedust antud piirkonnas. [67]

4.6 Valgustite valimine

Valgustuse valikul on olulised mitmed asjaolud, millele peab tähelepanu pöörama:

- valgustite kujundus ja ehitus peab olema selline, et normaalolukorras oleks tagatud nende ohutus nii inimestele kui ja keskkonnale. Sellest tulenevalt tuleb valgustid ära märgistada vastavalt standardile EVS-EN 60598. [1] Olulisemad tähised, millele tuleks tähelepanu pöörata, on CE ja ENEC tähis. CE märgistusega kinnitab tootja, et toodet on hinnatud ning see vastab kõigile selle toote osas kehtestatud keskkonna-, tervise- ja ohutusnõuetele. [68] ENEC sertifikaat

täiendab kohustuslikku CE märgistust ning selle annab välja sõltumatu kolmas osapool. ENEC sertifikaat kindlustab selle, et toode on ohutu ja vastab asjakohastele Euroopa standarditele. CE märgistus ja ENEC sertifikaat on mõlemad kohustuslikud Eestis; [69] [70]

- garantii ja varuosade saadavus – valgustite leedmooduleid ja elektrilisi komponente peab olema võimalik vahetada ning tootja poolt peab olema tagatud varuosade kättesaadavus vähemalt 10 aasta jooksul pärast valgustite paigaldamist. [45] Garantii peab olema vähemalt 5 aastat; [70]
- välisvideovalve korral tuleb kasutada värelemisvabasid leedvalgusteid; [70]
- värviesitusindeks – ohutuse tagamiseks peavad värvid olema eristatavad, mistõttu on oluline kõrge värviesitusindeksi väärtus. Eriti oluline on värviesitusindeksi kõrgem väärtus kaamerate piirkondades;
- IP kaitseaste – IP-kood koosneb kahest tunnusnumbrist ja kahest mittekohustuslikust tähest. Olulisem info on edastatud numbritega, millest esimene näitab, et ümbris kaitseb inimest juurdepääsu eest ohtlikele osadele, takistades või piirates sissetungi kehaosaga või käeshoitava tööriistaga. Samaaegselt näitab see number, et ümbris kaitseb seadmeid tahkete võõrkehade sissetungimise eest. Esimene number on vahemikus 0 kuni 6. Teine tunnusnumber näitab ümbrise abil saavutatavat kaitseastet, mis iseloomustab seadme kaitset vee sissetungimise kahjuliku toime eest. Teine number on vahemikus 0 kuni 9. Juhul kui üht tunnusnumbrit ei ole vaja esitada, asendatakse see tähega X. [71] Tänavavalgustite kaitseaste peab olema vähemalt IP66; [45]
- IK löögikindlus – IK-kood koosneb ühest numbrist skaalal 0 kuni 11 ning ta näitab valgusti vastupidavust mingile mehaanilisele jõule džaulides. [72] IK numbri õige valik aitab tagada selle, et valgusti ei puruneks ega väänduks ega muul viisil kahjustuks valitud keskkonnaoludes. Löögikindluse alternatiivne nimetus on vandaalikindlus. [1] Tänavavalgustuse löögikindlus peab olema vähemalt IK06; [70]
- valgustite materjal – valgustite materjal tuleb valida lähtuvalt keskkonnaoludest. Leedvalgustite eluiga on üsna pikk, mistõttu peavad nende korpused olema valmistatud alumiiniumist, et nad peaksid vastu ilmastikule. Tavaliselt ei ole valgustite materjalid keemiliselt kuigi vastupidavad, mistõttu tuleb mereäärse keskkonna puhul materjalide valikule erilist tähelepanu pöörata; [1] [45]
- valgusviljakus ei tohi liialt kõrge olla, kuna sellisel juhul ei ole värvid enam eristatavad. Teoreetiline valgusviljakuse piir on 683 lm/W, kuid nähtava valguse korral on see piir 199 lm/W. Tänapäeval valmistatavad leedvalgustid suudavad saavutada juba valgusviljakuse 160 lm/W; [73]

- disaini poole pealt peaks valgusti- ja mastitüübid sobima ka ülejäänud linnaruumiga. Arvesse tuleb võtta olemasolevat ja kavandatavat haljastust. Valgustite juurde lisamisel tuleb juhinduda olemasolevast valgustuslahendusest, kasutatavatest valgusti tüüpidest ja samuti värvsüsteemist. [74]

4.5.1 Valgustite valimine valgusreostuse vaatepunktist

Valgusreostuse vaatepunktist on olulised järgmised parameetrid:

- optiline süsteem – oluline on tagada teevalgustuse nõuded selliselt, et valgustatud oleks vajalik teepind ning sellest välja jääv ala jääks valgustamata. Seda on võimalik tagada, kui projekteerimise faasis tähelepanu pöörata valgusti valgusjaotuskõverale. Valgusjaotuskõvera kuju sõltub valgusti optilisest süsteemist. Teostada tuleks seejuures ka valgusarvutused; [45] [38]
- rägusindeks ja pimestusklass – rägus on kõige häirivam valgusreostuse liik, mistõttu vajab selle piiramine samuti tähelepanu. Pimestusrägust hinnatakse valgustugevusklasside G*1 kuni G*6 abil ning diskomforträgust rägusindeksiklasside D0 kuni D6 abil. [16] Tootja peab need andmed esitama, mistõttu tuleks neid ka valgustuse arvestamisel arvesse võtta. Häiriva valguse ja pimestamise vältimiseks tuleks eelistada G*4-G*6 valgustugevusklassi. D-klasside puhul tuleks eelistada D4-D6 rägusindeksiklassi; [38]
- üleskiirguva valguse osakaal peaks olema 0°. See tähendab, et valgusti peaks olema täielikult alla suunatud ehk valgusti horisontaaltasandist ülespoole valgus levida ei tohiks. Eriti oluline on piirata valguse levimist 85°-100° nurga all. Selleks tuleks kasutada valgusteid mis on korpuse sees ning ei ole väljaulatuvad; [38]
- hämardamine peaks olema tagatud. Tallinna linnas on vähe tänavavalgusteid, mida on võimalik hämardada. Hämardamise võimalus on tagatud ainult suurematel magistraalteedel ning selle põhjuseks on juhtimissüsteemide maksumus. Kõrgrõhu-naatriumlampide välja vahetamine leedvalgustite vastu on linnale piisavalt suur väljaminek, mistõttu juhtimissüsteemide lisandumiseks tänavapilti hetkel veel raha ei jätku. Tulevikus tuleks aga hämardamist kaaluda rohkematel tänavatel, kuna pikas perspektiivis aitaks see tagada säästu ning vähendada valgusreostust. [48]

5. VALGUSREOSTUSE MÕÕTMISED JA ANALÜÜS

Lõputöö praktiliseks osaks oli välja valida suurimad valgusreostuse allikad ning teostada nendel objektidel mõõtmised. Mõõtmistulemusi võrreldi standardites lubatuga ning leedekraanide puhul tehti ettepanekud maksimaalseteks heleduse väärtusteks. Samuti pakuti lahendusi valgusreostuse vähendamiseks ning arutati välja suurimate valgusreostuse allikate väljalülitamisel/hämardamisel saavutatav potentsiaalne energiasääst.

Suurimate valgusreostuse allikate välja valimiseks lähtus autor Tallinna linna poolt koostatud valgusreostuse ja räguse küsitlusest, kus inimesed said märkida kaardil neid häirivaid objekte (hoonete fassaadid, leedekraanid, tänavavalgustus jms). Küsitlusele vastajaid oli 689 ning kõige rohkem oli märgitud leedekraane ja valgusreklaame, mida oli teinud 248 inimest. Järgmisena oli kõige rohkem märgitud välisfassaade (187 inimest), seejärel tänavavalgustust (146 inimest) ja erakinnistuid (94 inimest). Skulptuure ja lipumaste oli märkinud ainult 14 inimest ning Kristiine ja Mustamäe linnaosas polnud neist üksi. Töö käigus sõideti läbi kõik Kristiines ja Mustamäel märgitud objektid ning sealt valiti välja suurimad reostuse allikad, mida mõõdistati. Visuaalse vaatluse teel valiti välja 2 kõige häirivamat leedekraani ning 2 vähesel määral häirivat leedekraani. Lisaks valiti 5 välisfassaadi ja 2 tänavat mõõtmiste teostamiseks. Tänavad valis autor ise, kuna küsitluses märgitud objekte läbi sõites selgus, et inimesed olid suures enamuses märkinud üksikuid rägust tekitavaid tänavavalgusteid. Autorile pakkusid aga huvi tänavad, mis on ülevalgustatud ehk liigse heledusega. Samuti valis autor ise ühe välisfassaadi, mis lasi Kristiine ja Mustamäe linnaosa tulemusi omavahel paremini võrrelda.

5.1 Nõudmised mõõtmistele

Mõõtmistel lähtuti standardist EVS-EN 13201-4, mis sätestab konkreetsed nõuded mõõtemetoodikale.

Heleduse mõõtmisel peab vaatleja asukoht olema 1,5 meetri kõrgusel teepinnast ning 60 meetri kaugusel eespool arvestatavat liikluspiirkonna arvutusvälja. Põikisuunas peab vaatleja asukoht olema iga sõiduraja keskel. Mõõtmisi võib sooritada lühemal kaugusel, kusjuures mõõturi kõrgus teepinnast peab olema võrdeliselt väiksem, nii et selle suunanurk teepinna normaali suhtes oleks $(89 \pm 0,5)^\circ$. [75]

Kõrge või madal temperatuur võib mõjutada valgusmõõteriistade kalibreeringut ja täpsust. Kõrge või madal temperatuur võib mõju avaldada ka soojuslikult tundlikele

lampidele. Niiskus või selle kondenseerumine mõõteriistade valgusedastuspindadel või nende elektriabeltel võib mõjutada nende täpsust. Tugev tuul võib esile kutsuda mõõteriistade või valgustite võnkumist. Kui kliimaolud ei vasta mõõtmiste jaoks nõutavale, peab mõõtmise eest vastutav isik lükkama mõõtmised edasi. [75]

5.2 Leedekraanide mõõtemetoodika

Leedekraane mõõdistas autor iseseisvalt ning ekraanide mõõdistamiseks kasutati punktheledusmõõturit Hagner Model S3. Punktheledusmõõtur on mõõteseade, millega on üsna lihtne mõõtmiseid teostada. Antud mõõteriista puuduseks on aga see, et korraga on võimalik mõõta ainult ühte punkti, mis võib muuta mõõtmised ajakulukaks. Samuti on mõõteriista puuduseks tema kallidus.

Leedekraanide mõõtmisel valiti välja kuus mõõtepunkti, mis kõik olid valge pinna pealt. Neli mõõtepunkti asetsevad ekraani nurgas või selle läheduses ning ülejäänud kaks mõõtepunkti ekraani keskosas. Täpselt samu mõõtepunkte ei olnud võimalik kasutada kõikide leedekraanide puhul, kuna ekraanid ei olnud mõõtmiste aeg testrežiimis.

Kõige eredama leedekraani puhul mõõdistati ka vertikaalset ja horisontaalset valgustustihedust. Standardi EVS-EN 12464-2 kohaselt on piiratud kõrvalisele kinnistule langev valgustustihedus, mis tohib olla enne piiranguaega maksimaalselt 10 luksi ja piiranguajal 2 luksi. Vertikaalse ja horisontaalse valgustustiheduse mõõdistamiseks kasutati luksmeetrit BTS256-EF.

5.3 Välisfassaadi mõõtemetoodika

Välisfassaade mõõdistati samuti punktheledusmõõturiga, kuid antud mõõtmiste teostamisel oli võimalik rakendada kalibreeritud mõõteseadet Konica Minolta LS-100. Kalibreeritud mõõteseadme eeliseks on suurem täpsus. Kalibreeritud mõõteseadme mõõtemetoodika on sarnane kalibreerimata punktheledusmõõturi omaga.

Välisfassaadi mõõtmised teostati enamuses kaubanduskeskuste valgusmärkide peal. Valgusmärkide puhul mõõdistati valgumärgi erinevaid valgustatud pindu ning pandi kirja maksimaalne heleduse väärtus. Põhjus, miks ei arvestatud keskmist heledust on selles, et valgusmärkide heledus võib suurel määral varieeruda nende omapärase kuju tõttu (vt Lisa 4). Samuti mõõdistati fassaadivalgustust ning ühes kohas ka kõrval olevale

hoonele langevat vertikaalset ja horisontaalset valgustustihedust. Kinnistule langev valgustustihedus on mõõtemetoodikas oluline parameeter, mida tuleb hinnata.

5.4 Tänavavalgustite mõõtemetoodika

Tänavate mõõdistamiseks kasutati pildistavat heledusmõõtekaamerat LMK Mobile Air, mis paigutati sõiduraja keskele statiivi peale mõõtmiste ajaks. Mõõteriista näol on tegemist digitaalse peegelkaameraga Canon EOS70D, mida kalibreeriti spektroradiomeetriga Jeti specbos 1211. Kalibreerimine on vajalik, kuna spektroradiomeeter võtab arvesse värvsüsteemtemperatuuri, mida peegelkaamera ei võta. Spektroradiomeetriga kalibreerimine annab parandusteguri, mis saadakse valge pinna mõõtmise teel. Parandustegur võetakse arvesse mõõtmistulemuste töötlemise tarkvaras. Mõõtmistulemuste analüüsimiseks kasutati LMK Labsoft tarkvara.

Mõõtmiste teostamiseks valiti välja üks masti vahe, mida pildistati heledusmõõtekaameraga. Hiljem mõõtetulemuste analüüsimisel tekitas tarkvara ühel sõidureal 3 x 10 mõõtepunkti vastavalt standardile EVS-EN 13201-3 (vt Lisa 8). Standardist lähtuvalt olid esimesed ja viimased mõõtepunktid 0,5 meetrit mastivahest sissepoole.

5.5 Leedekraanide mõõtmistulemused Kristiines

Kristiines mõõdistati kahte leedekraani, mis mõlemad asusid sama hoone peal. Ekraanid olid erinevate heledusväärtustega ning suunatud Kadaka tee poole erinevates sõidusuundades (vt Lisa 1). Eredam ekraan (edaspidi Kadaka tee 4 ekraan 1), mis oli suunaga kortermajade poole, oli sõidutee poolt vaadatuna halvema nähtavusega kui teine (edaspidi Kadaka tee 4 ekraan 2). Mõlemad ekraanid lülitusid välja kell 23:00. Ekraani nr 1 mõõdistati kell 22:30 ning ekraani nr 2 kell 22:45. Mõõtmistulemused on toodud Tabelis 5.1 ja Tabelis 5.2.

Tabel 5.1 Kadaka tee 4 ekraan 1

Mõõtepunkt	Heledus [cd/m ²]	Keskmine heledus [cd/m ²]
1	1120	1088
2	1089	
3	1068	
4	1060	
5	1105	
6	1083	

Tabel 5.2 Kadaka tee 4 ekraan 2

Mõõtepunkt	Heledus [cd/m ²]	Keskmine heledus [cd/m ²]
1	313	301
2	293	
3	297	
4	303	
5	310	
6	289	

Mõõtemetoodikast tingitult tuli hinnata kõrvalisele kinnistule langevat valgustustihedust, mida ka tehti Kadaka tee 4 ekraan 1 puhul. Mõõtmiste tulemusena saadi teada, et vertikaalne valgustustihedus oli 11 luksi ja horisontaalne valgustustihedus 11,6 luksi.

5.6 Välisfassaadi mõõtmistulemused Kristiines

Veel mõõdistati Kristiines kahte välisfassaadi. Üheks väljavalitud objektiks oli Kristiine keskus, kus mõõdistati erinevaid valgusmärke ning ka kaubanduskeskuse ees olevat valgusreklaami. Kristiine Keskus valiti välja just seetõttu, et tegemist on suure kaubanduskeskusega. Teiseks objektiks oli Lilleküla Päästekomando välisfassaad, kus mõõdistati fassaadivalgustust. Lilleküla Päästekomando valiti välja, kuna visuaalse vaatluse põhjal oli antud välisfassaad märgatavalt ülevalgustatud. Lilleküla Päästekomando puhul mõõdistati ka kõrval olevale hoonele langevat vertikaalset ja horisontaalset valgustustihedust, et kontrollida valgustustiheduse vastavust standardile. Kristiine Keskust mõõdistati kell 22:00 ja Lilleküla Päästekomandot 22:30. Mõõtmistulemused on esitatud vastavalt Tabelis 5.3 ja Tabelis 5.4.

Tabel 5.3 Kristiine keskus

Valgusmärk/leedekraan	Maksimaalne heledus [cd/m ²]
KFC	843
HM	388
Mohito	447
Denim Dream	482
Sinsay	331
Poke Bowl	892
Valgusreklaam	534

Tabel 5.4 Lilleküla Päästekomando

Fassaadivalgustus	Kõrval olevale hoonele langev valgustustihedus	
Maksimaalne heledus [cd/m ²]	Vertikaalne valgustustihedus [lx]	Horisontaalne valgustustihedus [lx]
446	6,7	4

5.7 Tänavavalgustuse mõõtmistulemused Kristiines

Järgnevalt mõõdistati Kristiines ka ühte tänavat, kus on paigaldatud leedvalgustid. Valituks osutus Vesipapi tänav, kuna tegemist on uue elamurajooniga, kus peaksid olema nõuetele vastavad tänavavalgustid. Arvestades seda, et Vesipapi tänava puhul on tegemist kõrvalise tänavaga, kus on M5 valgustusklass, võis juba visuaalse vaatluse põhjal hinnata tema ülevalgustatust. Tänaval oli üks sõidurida kinni pargitud, mistõttu teostati mõõtmised ainult ühel sõidureal. Tänavalõigu heleduse, pikiühtluse ja üldühtluse mõõtmised teostati mõlemas suunas, et kontrollida vastavust standarditele. Mõõdistatava tänavalõigu mastide vaheline kaugus oli 25 meetrit. Vesipapi tänavat mõõdistati kell 23:10. Vastavalt mõõtemetoodikale toimusid mõõtmised pimedal ajal, kuival teepinnal ning kõrvaliste valgusallikate mõju (sõidukituled, peegeldused jms) välditi. Teepinna heleduse ja valgustustiheduse mõõtmistulemused on vastavalt Tabelis 5.5 ja Tabelis 5.6.

Tabel 5.5 Vesipapi tänav suunaga Linnu tee poole, mõõtepunktides on väärtused ühikuga cd/m²

Mõõte- punktid	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	L_{max}	L_{min}	\bar{L}	U_l	U_o
											cd/m ²	cd/m ²	cd/m ²		
3	0,86	0,75	0,72	0,71	0,71	0,72	0,79	0,84	0,92	0,90	0,92	0,71	0,87	0,78	0,80
2	0,92	0,83	0,76	0,70	0,71	0,76	0,81	0,86	0,89	0,93	0,93	0,70		0,75	
1	1,15	0,96	0,87	0,88	0,90	0,96	1,06	1,12	1,14	1,13	1,15	0,87		0,75	

Tabel 5.6 Vesipapi tänav suunaga Mustamäe Keskuse poole, mõõtepunktides on väärtused ühikuga cd/m²

Mõõte- punktid	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	L_{max}	L_{min}	\bar{L}	U_l	U_o
											cd/m ²	cd/m ²	cd/m ²		
3	1,19	1,10	1,02	0,97	0,96	1,01	1,02	1,02	1,11	1,22	1,22	0,96	0,92	0,79	0,80
2	0,93	0,86	0,80	0,79	0,79	0,79	0,83	0,92	0,95	1,03	1,03	0,79		0,77	
1	0,91	0,82	0,77	0,73	0,74	0,76	0,80	0,85	0,90	0,97	0,97	0,73		0,75	

5.8 Leedekraanide mõõtmistulemused Mustamäel

Mustamäel mõõdistati samuti kahte leedekraani, mis mõlemad asusid A. H. Tammsaare tee ja Sõpruse pst ristmikul. Mõlemad ekraanid olid hea nähtavusega. Ekraanid lülitusid välja kell 23:00. Esimesena mõõdistati Sõpruse ekraani kell 22:20. Tammsaare ekraani mõõdistati kell 22:40. Mõõtmistulemused on toodud Tabelis 5.7 ja Tabelis 5.8.

Tabel 5.7 Sõpruse pst 202 leedekraan

Mõõtepunkt	Heledus [cd/m ²]	Keskmine heledus [cd/m ²]
1	731	693
2	690	
3	664	
4	692	
5	683	
6	695	

Tabel 5.8 A. H. Tammsaare tee 73 leedekraan

Mõõtepunkt	Heledus [cd/m ²]	Keskmine heledus [cd/m ²]
1	233	238
2	244	
3	241	
4	234	
5	242	
6	236	

5.9 Välisfassaadi mõõtmistulemused Mustamäel

Erinevalt Kristiinest mõõdistati Mustamäel kolme välisfassaadi. Põhjus on selles, et Mustamäel asub kaks suuremat kaubanduskeskust (Mustika Keskus ja Mustamäe Keskus), kuid Kristiines asub ainult üks (Kristiine Keskus). Kõiki neid kolme kaubanduskeskust on võimalik omavahel võrrelda, mistõttu tuuakse siin peatükis välja rohkem kui ühe kaubanduskeskuse mõõtmistulemused. Lisaks mõõdistati Mustamäe Elamus Spa välisfassaadi, mille autor ise välja valis. Mustamäe Elamus Spa osutus valituks, kuna antud välisfassaad oli tihedalt valgustatud ning see võimaldas tulemusi võrrelda Lilleküla Päästekomandoga. Mustamäe Elamus Spa välisfassaadi mõõdistati kell 00:15. Mõõtmistulemused on esitatud vastavalt Tabelis 5.9, 5,10 ja 5.11.

Tabel 5.9 Mustamäe Keskus

Valgusmärk	Maksimaalne heledus [cd/m ²]
Sinsay	1227
Muhu Pagarid	490
Snus Empire	1013
Ohoo	805
My Döner	346

Tabel 5.10 Mustika Keskus

Valgusmärk	Maksimaalne heledus [cd/m ²]
Gym!	639
Mustikas	471
Huppa	380
Südameapteek	392
OlyBet Sports Bar	2005

Tabel 5.11 Mustamäe Elamus Spa

Fassaadivalgustus
Maksimaalne heledus [cd/m ²]
98

5.10 Tänavavalgustuse mõõtmistulemused Mustamäel

Järgnevalt mõõdistati Mustamäel ühte tänavat. Välja valiti Kadaka pst, kuna tegemist on suurema magistraalteega, kus on leedvalgustid ning visuaalsel vaatlusel tundus tänav olevat ülevalgustatud. Kadaka pst valgustusklassiks on määratud M3. Mõõtmised teostati mõlemas suunas ning mõõdistatavad hinnatavad parameetrid olid heledus, pikiühtlus ning üldühtlus. Mõõdistatava tänavalõigu mastide vaheline kaugus oli 50 meetrit. Tegemist oli suurima mastivahega antud teelõigul. Mõõtmisi ei olnud võimalik teostada väiksema mastivahega lõigul, kuna teekattel olev eraldussaar oleks seganud mõõtmistulemusi. Kadaka puisteed mõõdistati kell 23:50. Mõõtmiste aeg oli teepind täielikult kuiv ning taevas oli selge. Teepinna heleduse mõõtmistulemused on esitatud Tabelis 5.12 ja Tabelis 5.13.

Tabel 5.12 Kadaka pst suunaga Akadeemia tee poole, mõõtepunktides on väärtused ühikuga cd/m²

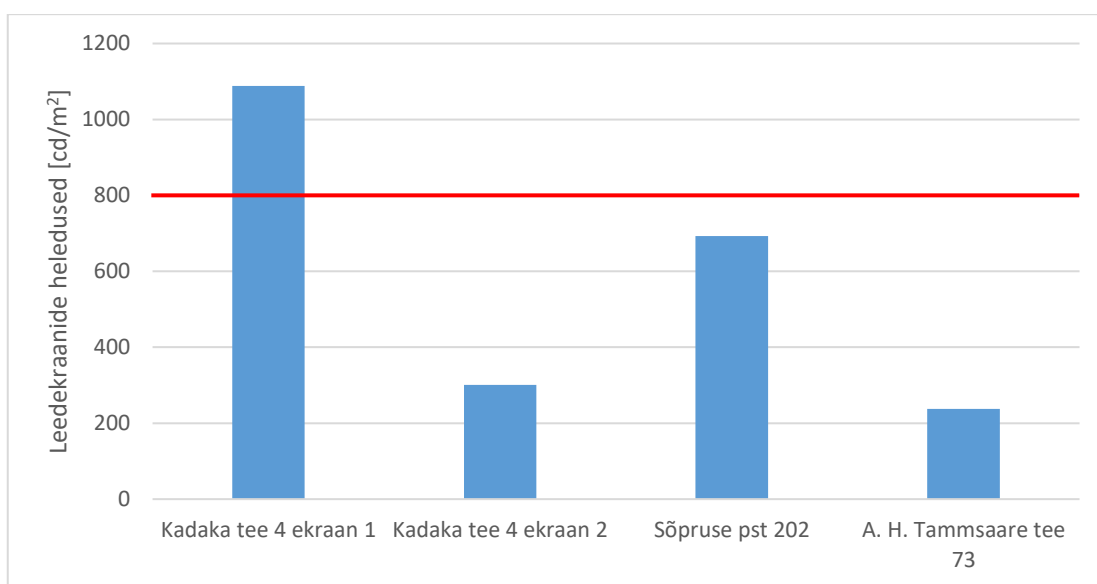
Mõõte- punktid	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	L_{max}	L_{min}	\bar{L}	U_l	U_o
											cd/m ²	cd/m ²	cd/m ²		
3	1,38	1,07	0,99	1,02	1,00	1,31	1,53	2,31	2,90	2,65	2,90	0,99	1,48	0,34	0,55
2	1,32	1,10	1,06	1,09	1,37	1,39	1,52	1,83	1,99	1,92	1,99	1,06		0,53	
1	1,22	0,94	0,81	0,85	0,87	1,26	1,56	2,21	2,23	1,81	2,23	0,81		0,37	

Tabel 5.13 Kadaka pst suunaga Nõmme poole, mõõtepunktides on väärtused ühikuga cd/m^2

Mõõte-punktid	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	L_{\max}	L_{\min}	\bar{L}	U_l	U_o
											cd/m^2	cd/m^2	cd/m^2		
3	1,70	1,42	1,24	1,25	1,41	1,66	2,12	2,27	2,03	1,44	2,27	1,24	1,30	0,55	0,56
2	1,34	1,06	0,87	0,76	0,75	0,94	1,44	1,49	1,51	1,31	1,51	0,746		0,49	
1	1,00	0,86	0,72	0,77	0,85	1,04	1,49	1,71	1,47	1,07	1,71	0,72		0,42	

5.11 Leedekraanide mõõtmistulemuste analüüs ja järeldused

Kadaka tee 4 leedekraanidest oli üks leedekraan märgatavalt eredam kui teine. See kajastus ka mõõtmistulemustes, kus antud leedekraani keskmine heledus tuli $1088 \text{ cd}/\text{m}^2$. Standardi EVS-EN 12464-2 järgi on valgusreklaamide maksimaalne heledus $800 \text{ cd}/\text{m}^2$ keskkonnatsoonis E3, milleks on Tallinn [76]. Seega ületab antud leedekraan standardites lubatud väärtust. Leedekraan oli suunatud teisel pool teed asuvate kortermajade poole ning sõidutee poolt vaadatuna halva nähtavusega. Kuna leedekraan on sõidutee poolt halvasti nähtav, häirib antud leedekraan ilmselt rohkem kortermaja elanikke. Teine leedekraan, mis asus sellel samal hoonel, oli keskmise heledusega $301 \text{ cd}/\text{m}^2$, kuid visuaalsel vaatlusel oli ka see leedekraan häiriv. Antud ekraan võib olla häiriv sõidukijuhtidele, kuna kortermaju selle ekraani vastu ei jäänud. Tallinna linna poolt koostatud valgusreostuse küsitluses oli antud aadressil olevaid leedekraane märgitud häirivaks kahe inimese poolt.



Joonis 5.1 Leedekraanide heledused

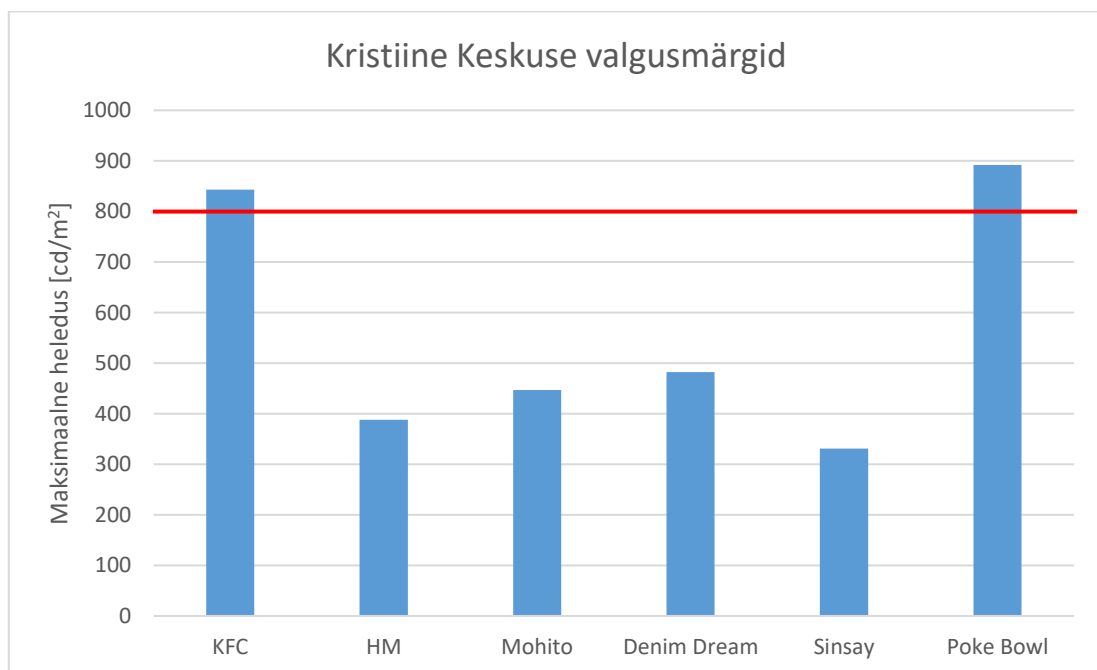
Kadaka tee 4 ekraan 1 läheduses mõõdistati ka valgustustihedust ning tulemustest on näha, et kõrval olevale kinnistule langev valgustustiheduse väärtus ei vasta standardis lubatule. Standardi järgi on lubatud kõrvalisele kinnistule langeda maksimaalselt 10 luksi. Mõõtmistulemustes ületasid aga nii horisontaalne kui ka vertikaalne valgustustihedus antud piirväärtust. Juhul kui Kadaka leedekraan ei oleks välja lülitunud piiranguajaks, siis oleks valgustustihedus olnud lubatust viis kuni kuus korda suurem.

A. H. Tammsaare tee ja Sõpruse pst ristmikul oli kaks leedekraani, millest eredam oli Sõpruse pst 202 leedekraan keskmise heledusega 693 cd/m^2 . Antud leedekraan vastas küll standarditele, kuid oli siiski märgatavalt häiriv. Tallinna linna poolt koostatud valgusreostuse küsitluses oli seda leedekraani märkinud häirivaks kaheksa inimest. A. H. Tammsaare tee 73 leedekraan oli keskmise heledusega 238 cd/m^2 . See leedekraan vastas samuti standarditele ning oli visuaalselt häiriv. Valgusreostuse küsitluses oli seda leedekraani märkinud häirivaks kolm inimest. Võrreldes Tammsaare leedekraani Kadaka tee 4 ekraaniga nr 2, oli Kadaka teel olev leedekraan häirivam, hoolimata sellest, et nende leedekraanide heledus ei erinenud nii suurel määral. Ilmselt on see tingitud sellest, et Kadaka teel oli keskkond vähesemal määral valgustatud kui A. H. Tammsaare tee ja Sõpruse pst ristmikul. Mõlemad leedekraanid on häirivad ilmselt valgusfoori taha jäävate sõidukijuhtide jaoks. Samas võib reklaamide vahetumisel tekkiv heleduse muutumine olla häiriv ka sõidu ajal.

Heleduse osas on üldisemalt reguleeritud valgusreklaamide heledus, kuid standardis eraldi leedekraanide heledust välja toodud ei ole. Keskkonnatsooni E3 järgi võetakse leedekraanide maksimaalseks heleduseks 800 cd/m^2 , mis on sama valgusreklaamide puhul. Erinevate leedekraanide analüüsimisel võib järeldada, et leedekraanide maksimaalne heledus sõltub suuresti keskkonna valgustustasemest, leedekraani suurusest ja selle paigutusest. Seega on ühest maksimaalset piirväärtust leedekraanidele seada raske. Siiski võib mõõtmistulemuste ja visuaalse vaatluse põhjal aga väita, et valgusreklaamidele ette nähtud 800 cd/m^2 on liiga kõrge väärtus seest valgustatud leedekraanide jaoks. Seest valgustatud leedekraanide maksimaalselt lubatav keskmine heledus võiks standardis hinnanguliselt jääda vahemikku 300-400 cd/m^2 .

5.12 Välisfassaadi mõõtmistulemuste analüüs ja järeldused

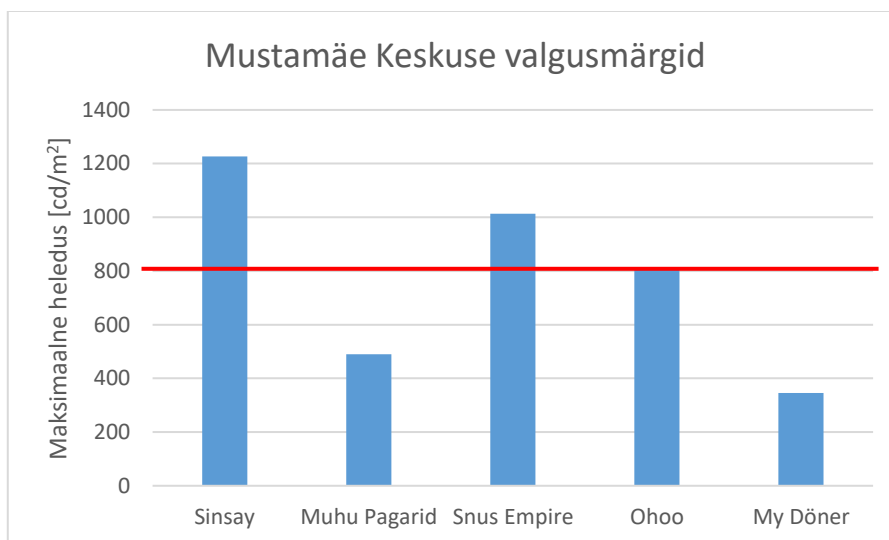
Peatükis 5.6 esitatud mõõtmistulemuste alusel koostati Joonis 5.2. Jooniselt 5.2 on näha, et kõige suuremad heleduse väärtused olid KFC ja Poke Bowl valgusmärkidel, mis mõlemad ei vastanud standardile. Ülejäänud valgusmärkide heledused jäid vahemikku 300-500 cd/m² ning visuaalsel vaatlusel ei olnud nad ka nii häirivad. Üldiselt selliste väikeste valgusmärkide heledust ei reguleerita, mistõttu on üsna tavaline, et valgusmärkide heleduse väärtused ületavad standardis lubatud. Valgusreostuse küsitluses oli Kristiine Keskuse välisfassaadi märkinud häirivaks kaks inimest. Üks märgi oli ka tehtud kaubanduskeskuse ees oleva valgusreклаami kohta, mida antud töös mõõdistati. Valgusreклаami mõõtmistulemused olid suure varieeruvusega, kuna mõõtmisi ei olnud võimalik teostada valge osa pealt. Seega antud valgusreклаami oleks vaja uuesti mõõta testrežiimis. Peamiselt võivad mõõdistatud välisfassaad ja valgusreклаam häirida teisel pool teed olevaid kortermaja elanikke, kuna kumbki neist pole otseselt suunatud sõidutee poole.



Joonis 5.2 Kristiine Keskuse valgusmärkide maksimaalsed heledused

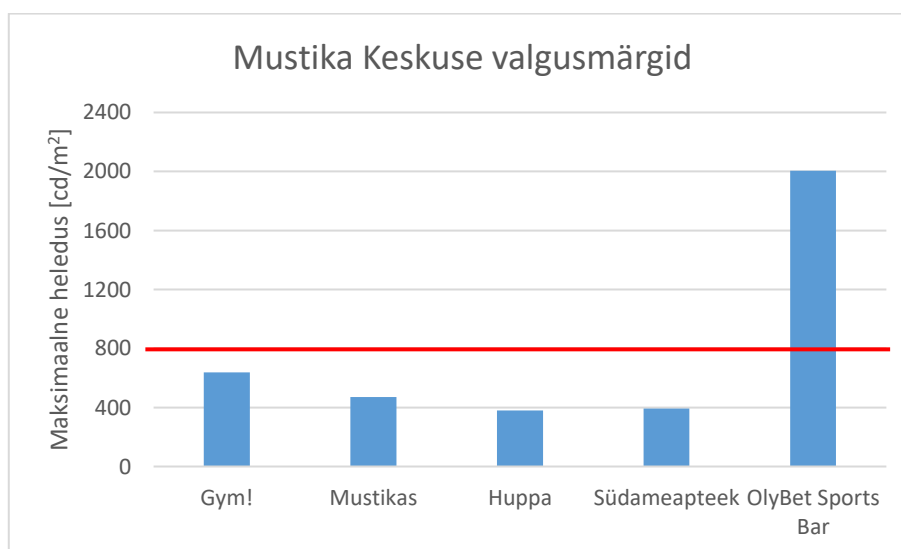
Mustamäe Keskuse välisfassaadil olevatest valgusmärkidest eristusid kaks, mis selgelt ei vastanud standardile ning üks, mis peaaegu ületas standardis olevat piirväärtust. Ülejäänud kaks valgusmärki jäid oma heleduse poolest vahemikku 300-500 cd/m². Samasse vahemikku jäid ka Kristiine Keskuses valgusmärgid, mis vastasid standardile. Mõõtmistulemuste põhjal võib väita, et Mustamäe Keskuse valgusmärgid tekitavad

rohkem valgusreostust kui Kristiine Keskuse omad. Mustamäe Keskuse välisfassaad võib olla häiriv teisel pool teed olevate kortermaja elanike jaoks. Mustamäe Keskust oli valgusreostuse küsitluses ära märkinud 5 inimest.



Joonis 5.3 Mustamäe Keskuse valgusmärkide maksimaalsed heledused

Üldiselt olid Mustika Keskuse mõõtmistulemused paremad võrreldes Mustamäe Keskuse ja Kristiine Keskusega. Standardile ei vastanud vaid üks väiksemate mõõtmetega valgusmärk, mille heledus ületas 2000 cd/m². Teiste valgusmärkide heledused jäid vahemikku 300-700 cd/m². Mustika Keskuse välisfassaad võib olla häiriv kaugemal olevate kortermaja elanike jaoks. Mustika keskust oli valgusreostuse küsitluses ära märkinud 3 inimest.



Joonis 5.4 Mustika Keskuse valgusmärkide maksimaalsed heledused

Võrreldes omavahel Lilleküla Päästekomando ja Mustamäe Elamus Spa välisfassaadi on näha, et Lilleküla Päästekomando välisfassaadi maksimaalne heledus ületab neljakordselt Mustamäe Elamus Spa oma. Põhjus on selles, et Lilleküla Päästekomando välisfassaadi valgustus oli varjestamata, mistõttu valgusallika läheduses oli heledus niivõrd suur. Vaadates pilti väärvärvides (vt Lisa 5) on märgata seda, et Lilleküla Päästekomando välisfassaad on eredamalt valgustatud ning valgusallikaid on seal ka rohkem. Mõlemad välisfassaadid ületasid standardis lubatud piirväärtust, milleks on 10 cd/m². Lilleküla Päästekomando välisfassaad võib olla häiriv teisel pool teed kaugemal olevate kortermaja elanike jaoks. Välisfassaad ei ole sõidutee suunas, mistõttu ei tohiks antud välisfassaad olla häiriv sõidukijuhtide jaoks. Valgusreostuse küsitluses oli antud välisfassaadi ära märkinud 1 inimene. Mustamäe Elamus Spa välisfassaad võib olla häiriv vastas oleva kortermaja elanike jaoks. Sõidukijuhtidele ei tohiks antud välisfassaad häiriv olla, kuna tegemist on kortermajade vahelise asukohaga, kus piirkiirus on madal.

Mõõtemetoodikast lähtuvalt hinnati Lilleküla Päästekomando juures ka kõrval olevale hoonele langevat vertikaalset ja horisontaalset valgustustihedust. Mõõtmistulemused vastasid küll standardile, kuid seda ainult enne piiranguaega. Piiranguajal ületaksid antud mõõtmistulemused standardis lubatavat väärtust rohkem kui kolmekordselt.

5.13 Tänavavalgustuse mõõtmistulemuste analüüs ja järeldused

Valgusreostuse vaatepunktist on oluline analüüsida teepinna heleduse väärtuseid, kuna see aitab meil tuvastada, kas tegemist on ülevalgustatud tänavaga või mitte. Antud lõputöös lähtutakse sellest, et kui heleduse väärtused ületavad juba järgmise valgustusklassi hooldeväärtust, siis on tegemist ülevalgustatud tänavaga. Vastavalt sellele teostatakse antud lõputöös mõõdistatud tänavatele ka energiasäästu analüüs.

Vesipapi tänava valgustusklassiks on määratud M5, mis tähendab seda, et maksimaalseks heleduseks võetakse M4 valgustusklassi hooldeväärtus. Seega peab Vesipapi tänava keskmine heledus jääma vahemikku $0,50 \leq \bar{L} \leq 0,75$. Mõõtmistulemustest on aga näha, et mõõdistatud teelõigu keskmine heledus oli ühes suunas 0,87 cd/m² ja teises suunas 0,92 cd/m². Seega võib mõõtmiste põhjal väita, et antud teelõik oli ülevalgustatud ning vastas juba valgustusklassile M4. Üldühtlus ja pikiühtlus olid antud teelõigul väga head, mis tähendab seda, et kui Vesipapi tänavat hämardataks, siis ei tohiks tekkida olukorda, kus ühtluse parameetrid enam ei vasta standardile.

Kadaka puiesteel peavad tänavavalgustid vastama valgustusklassile M4, mis tähendab, et teepinna keskmine heledus peab jääma vahemikku $0,75 \leq \bar{L} \leq 1,00$. Mõõtmistulemused aga näitavad, et keskmine heledus on mõlemas suunas suurem kui M3 valgustusklassi hooldeväärtus. Ühes suunas oli keskmine heledus $1,48 \text{ cd/m}^2$, mis vastab juba olulisemalt kõrgema M2 valgustusklassi hooldeväärtusele. Teises suunas oli keskmine heledus $1,30 \text{ cd/m}^2$ ning see ületab ka juba oluliselt M3 valgustusklassi hooldeväärtust. Seega oli Kadaka pst ülevalgustatud ning vastas juba valgustusklassile M3. Teelõigu üldühtlus vastas küll standardile, kuid pikiühtluse osas ei vastanud teelõik standardile. Seega võib järeldada, et kui antud teelõiku hämardataks, oleksid ühtluse parameetrid mitte nõuetele vastavad. Tähelepanu tuleb aga pöörata sellele, et heledust mõõdistati kõige suurema mastivahega teelõigul. See võib tähendada, et ülejäänud sõiduteel on ühtluse parameetrid paremad, kuid seda tuleks kontrollida.

Võrreldes omavahel Kadaka pst ja Vesipapi tänavat on näha, et mõlemad sõiduteed on üledimensioneeritud. Vesipapi tänaval on ühtluse parameetrid paremad kui Kadaka puiesteel, mistõttu Vesipapi tänavat saaks hämardada, kuid Kadaka puiesteel mitte. Kadaka puiesteel tuleks esmalt tagada standardile vastavus ning ainult sellisel juhul saaks kaaluda antud sõidutee hämardamist. Oluline oleks Kadaka puiesteel kontrollida ühtluse parameetreid ka väiksema mastivahe korral, et tuvastada, kas ülejäänud sõiduteel on ühtlusega probleeme.

5.14 Leedekraanide valgusreostuse minimeerimisel saavutatav energiasääst

Leedekraanidest olid suurimateks valgusreostuse tekitajateks Kadaka tee 4 ekraan 1 ja Sõpruse pst 202 ekraan. On teada, et Kadaka tee 4 aadressil olevad leedekraanid on eraldusvõimega 960×1440 . Sõpruse 202 leedekraan on eraldusvõimega 720×1440 ning mõõtudega $4\text{m} \times 8\text{m}$. [77] Täpselt ei ole teada, mis tüüpi paneelidega on tegemist, kuid firma toodab paneele pikslitihedusega P0,8 kuni P16 (väiksem number tähendab detailsemat pilti). Vaja oleks teada nende paneelide võimsustarvet, mida saab hinnata olemasoleva info põhjal. Üks tootja pakub leedekraani mõõtmetega $7680 \text{ mm} \times 3840 \text{ mm}$ ning pikslitihedusega P6,67 ja P8. Selle ekraani andmetes on näha, et võimsustarve ei sõltu pikslitihedusest. Maksimaalne võimsustarve antud ekraani puhul on 550 W/m^2 . On teada, et Mustamäe Keskusel on sama suur leedekraan pikslitihedusega P16, mille heledus maksimaalsel võimsusel on eelnevate mõõtmiste käigus olnud 4571 cd/m^2 . Sellest tulenevalt saame arvutada lõputöö käigus mõõdistatud ekraanide võimsustarbe ruutmeetri kohta. Esmalt arvutame Kadaka ekraanide võimsustarve. Teada on, et

Kadaka tee 4 ekraan 1 keskmine heledus on 1088 cd/m². Seega kui 4571 cd/m²-le vastab 550 W/m², saame ristkorrutise abil saame leida maksimaalse võimsustarbe:

$$P_{max} = \frac{1088 \cdot 550}{4571} = 131 \text{ W/m}^2$$

Kadaka ekraani puhul ei ole antud mõõtmeid, kuid eeldame, et ekraani suurus on 5m x 8m. Sellisel juhul on ekraani pindalaks 40 m² ning ekraani maksimaalne võimsus on seega 5240 W. Siinkohal on aga oluline hinnata, milline on ekraani keskmine võimsus. Tavaliselt on leedekraanide keskmine võimsus maksimaalsest umbes kolm korda väiksem. [78] Seega antud leedekraani keskmine võimsus on vähemalt 1745 W. Sellise võimsusega ekraani välja lülitamisega ajavahemikul 23:00 kuni 6:00 säästetakse 12,2 kWh energiat. Aastas säästetakse selle ekraani välja lülitamisega seega 4458 kWh energiat. Võttes arvesse peatükis 4.3.1 toodud elektri hindu ja CO₂ emissioonide kogust energiaühiku kohta, siis jääb aastas õhku paiskamata 2,95 tonni CO₂-te ning rahaline sääst on 773,6 €.

Sõpruse pst 202 leedekraani keskmine heledus oli 693 cd/m² kohta, mis teeb antud leedekraani maksimaalseks võimsustarbeks 83 W/m². Paneeli suurus on mõõtudega 4m x 8m ehk leedekraani maksimaalseks võimsuseks on 2656 W. Paneeli keskmine võimsus on seega vähemalt 885 W. Lülitades selle ekraani välja ajavahemikul 23:00 kuni 6:00 on võimalik säästa 6,2 kWh energiat. Aastas oleks energiasääst 2261 kWh. Ekraani välja lülitamisega ööseks jääb aastas õhku paiskamata 1,49 tonni CO₂-te ning rahaline sääst on 392,4 €.

5.15 Tänavavalgustite valgusreostuse minimeerimisel saavutatav energiasääst

Mõlemad tänavad, mida töö käigus mõõdistati, ületasid juba järgmise valgustusklassi hooldeväärtust. Sellest tulenevalt tehakse energiasäästu analüüs mõlema tänava kohta, kuigi Kadaka puiestee hämardamiseks tuleks esmalt teostada täiendavad kontrollmõõtmised, kus kontrollitakse erinevate mastivahede ühtluse parameetreid. Vaja oleks ka teada, kas antud tänaval valgusteid hämardatakse või mitte.

Kadaka pst puhul on tegemist suure magistraalteega, mistõttu täpsema informatsiooni puudumisel võib eeldada, et seal olevad valgustid on võimsusega 60-70 vatti. Vesipapi tänaval nii võimsad valgustid tõenäoliselt ei ole, mistõttu võib sealsete tänavavalgustite võimsus jääda vahemikku 45-50 vatti. Arvutuste tegemiseks võtame Kadaka puiesteel olevate tänavavalgustite võimsuseks 60 vatti ja Vesipapi tänavavalgustite võimsuseks

45 vatti. Eeldame, et hämardamisel ei teki ühtluse parameetritega probleeme, mistõttu võtame arvesse hämardamise astmete arvutamisel ainult mõõdistatud heledusväärtusi.

Mõõtmistulemustest saime teada, et Vesipapi tänaval oli keskmine heledus ühes suunas $0,87 \text{ cd/m}^2$ ja teises suunas $0,92 \text{ cd/m}^2$. See teeb teepinna keskmiseks heleduseks $0,90 \text{ cd/m}^2$. Teame, et keskmine heledus võiks jääda vahemikku $0,50 \leq \bar{L} \leq 0,75$. Võttes antud vahemikust keskmise, saame teada heledusväärtuse, mis nendel valgustitel võiks olla enne piiranguaega. Keskmine väärtus on mõistlik valida, kuna see tagab selle, et välja arvutatavaid hämardamise astmeid saab kasutada mitu aastat, enne kui tekib vajadus hämardamisastmete muutmiseks valgusti vananemise tõttu. Niisiis võiks valgustite keskmine heledus enne piiranguaega olla $0,63 \text{ cd/m}^2$. Vastavalt hämardamise režiimide tabelile (vt Joonis 4.7), peaks ajavahemikul 22:00 kuni 00:00 ning 06:00 kuni 07:00 antud sõidutee vastama valgustusklassile M6 ja ajavahemikul 00:00 kuni 06:00 valgustusklassile P5. Vastavalt sellele peaks keskmine heledus kõigepealt langema $0,40 \text{ cd/m}^2$ peale ning seejärel P5 valgustusklassi tasemele. P5 valgustusklassi puhul ei ole aga heleduse hooldeväärtust välja toodud, vaid on esitatud valgustustiheduse hooldeväärtused. Kuna on teada M6 valgustusklassi hooldeväärtus, milleks on $0,30 \text{ cd/m}^2$, siis teeme arvutused selle heledusväärtusega.

Teades seda, milliseid heledusväärtuseid me soovime antud teepinnal, saame välja arvutada, milliseid hämardamise astmeid tuleks rakendada. On teada, et täisvõimsusel on teepinna keskmine heledus $0,90 \text{ cd/m}^2$. Seega saame ristkorrutise abil leida, millisel võimsusel valgustid peaksid töötama enne piiranguaega.

$$\text{Valgusti võimsus enne piirangu aega} = \frac{0,63 \cdot 100}{0,90} = 70\%$$

Leiame ka valgusti võimsuse esimesel ja teisel hämardamisastmel.

$$\text{Valgusti võimsus esimesel hämardamise astmel} = \frac{0,40 \cdot 100}{0,90} = 45\%$$

$$\text{Valgusti võimsus teisel hämardamise astmel} = \frac{0,30 \cdot 100}{0,90} = 35\%$$

Nüüd teades seda, et valgustid töötavad aastas 4000 tundi ehk keskmiselt 11 tundi päevas, saame arvutada energiasäästu. Eeldasime Tallinna linna leedvalgustite hämardamise energiasäästu arvutamisel peatükis 4.3.1, et tänavavalgustid töötavad ajavahemikus 20:00-07:00. Sama eeldust kasutame ka siin arvutuste teostamisel. Vesipapi tänaval võtsime tänavavalgustite võimsuseks 45 vatti. Kokku on Vesipapi tänaval 17 valgustit. Arvestades seda arvutame kõigepealt antud valgustite energiatarbe täisvõimsusel valemi (4.1) abil.

$$E_{kogu} = 45 \cdot 17 \cdot 4000 = 3,06 \text{ MWh}$$

Nüüd arvutame välja energiatarbimise varem leitud hämardamise astmeid kasutades valemi (4.2) alusel.

$$E = (45 \cdot 70\% \cdot 2 + 45 \cdot 45\% \cdot 3 + 45 \cdot 35\% \cdot 6) \cdot 17 \cdot 365 = 1,35 \text{ MWh}$$

Arvutustest tulenevalt hoiame valgustite hämardamisega Vesipapi tänaval kokku 1,71 MWh energiat ning saavutame 56% energiasäästu. Antud hämardamise režiimi kasutades jääks aastas õhku paiskamata 1,13 tonni CO₂-te ning rahaline kokkuvõtte aastaks oleks 296,7 €.

Energiasäästu arvutused teeme ka Kadaka puiesteele. Seal saime keskmiseks heleduseks ühes suunas 1,48 cd/m² ja teises suunas 1,30 cd/m². See teeb teepinna keskmiseks heleduseks 1,39 cd/m². Antud tänaval võiks aga keskmine heledus jääda vahemikku $0,75 \leq \bar{L} \leq 1,00$. Võtame jällegi antud vahemikust keskmise ning saame, et valgustite heledus enne piiranguaega võiks olla 0,88 cd/m². Kõigepealt peaks heledus langema M5 valgustusklassi tasemele ning seejärel M6 valgustusklassi tasemele. Vastavalt sellele võiks heledus esmalt langeda 0,63 cd/m² peale ning seejärel 0,40 cd/m² peale. Leiame riskorruptise abil jällegi valgustite võimsuse enne piiranguaega.

$$\text{Valgusti võimsus enne piirangu aega} = \frac{0,88 \cdot 100}{1,39} = 65\%$$

Leiame ka valgusti võimsuse esimesel ja teisel hämardamisastmel.

$$\text{Valgusti võimsus esimesel hämardamise astmel} = \frac{0,63 \cdot 100}{1,39} = 45\%$$

$$\text{Valgusti võimsus teisel hämardamise astmel} = \frac{0,40 \cdot 100}{1,39} = 30\%$$

Kadaka puiesteele võtsime valgustite võimsuseks 60 vatti. Teadame, et Kadaka puiesteele on kokku 126 valgustit. Arvutame selle alusel energiatarbimise täisvõimsusel vastavalt valemile (4.1).

$$E_{kogu} = 60 \cdot 126 \cdot 4000 = 30,24 \text{ MWh}$$

Nüüd arvutame välja energiatarbimise hämardamise astmete alusel kasutades valemit (4.2).

$$E = (60 \cdot 65\% \cdot 2 + 60 \cdot 45\% \cdot 3 + 60 \cdot 30\% \cdot 6) \cdot 126 \cdot 365 = 12,28 \text{ MWh}$$

Saame, et valgustite hämardamisel Kadaka puiesteele hoiame kokku 17,96 MWh energiat ning saavutame 59% energiasäästu. Antud hämardamise režiimi kasutades jääks aastas õhku paiskamata 11,9 tonni CO₂-te ning rahaline kokkuvõtte aastaks oleks 3117 €.

5.16 Mõõtmistulemuste analüüsi kokkuvõte

Erinevate valgusreostuse allikate analüüsimisel jõuti järeldusele, et suurimad valgusreostuse allikad on leedekraanid ja kaubanduskeskused. Leedekraanid ja kaubanduskeskused tekitavad palju lokaalset valgusreostust ning tihtipeale on nad juhtimata. Liigne leedekraanide või valgusmärkide heledus võib tekitada olukorra, kus inimesed väldivad neid häirivate valgusallikate poole vaatamist. Sellest tulenevalt on erinevate reklaampindade juhtimine oluline mitte ainult valgusreostuse vähendamise vaatepunktist, aga sellel oleks positiivne mõju ka reklaampindade omanikele. Tänavavalgustustite näol on suuremaks probleemiks räigust tekitavad valgustid ning inimesi ei häiri üldjuhul ülevalgustatud tänavad. Seetõttu jäävad ka ülevalgustatud tänavad tähelepanuta ning ei kasutata ära nende energiasäästu potentsiaali. Antud lõputöös leiti kahe ülevalgustatud tänava näitel, et energiasääst võiks olla 55-60%. Suurema magistraaltänava puhul, nagu seda on Kadaka pst, tooks vagustite hämardamine kaasa tuhandetes eurodes rahalist säästu. Oluline on seejuures tagada, et valgustite hämardamisel oleks tagatud standarditele vastavus.

6. TALLINNA LINNA ARENGUSUUNAD

Tallinna linna eelarve strateegias aastateks 2024-2027 on välja toodud, et tänavavalgustuses on plaanis edasi arendada säästlike ja tarkade valgustuslahenduste rakendamist. Samuti on eesmärgiks kiirendada leedvalgustitele üleminekut ning panustada rohkem parkide ja lasteaedade välisvalgustusse. [79] Plaanis on ka jätkata programmiga „Turvaline ülekäigurada“, mille raames rajatakse ülekäiguradadele erivalgustust ja foorisüsteeme jalakäijatele. [80]

Leedvalgustitele üleminekuks on ette nähtud 6 miljonit eurot, mille alla kuulub välisvalgustuse uuendamine parkides ja lasteaedades. 2024. aastal on ette nähtud tänavavalgustite ehitamisele ja renoveerimisele 1,8 miljonit eurot. Tähelepanu vajab amortiseerunud valgustusvõrk ja/või ebapiisavalt valgustatud tänavad. Eesmärgiks on esteetilisuse parendamine ning energiasäästu suurendamine. Programmi „Turvaline ülekäigurada“ kogumaksumuseks on planeeritud 2 miljonit eurot, millest 360000 eurot on ette nähtud 2024 aastaks. Leedvalgustite paigaldamiseks tänavavalgustusvõrku on ette nähtud samal aastal 2 miljonit eurot. Parkide ja lasteaedade välisvalgustuseks on ette nähtud 1,6 miljonit eurot. Jätkatakse ka fooride üleviimist leedfooridele. [80]

Aastaks 2035 on plaanis vähendada energiatarvet ühe valgusti kohta 267 kWh-ni. Samuti on plaanis suurendada valgustipõhise juhtimisega valgustite osakaalu magistraalteedel 90%-ni. [81]

2035-ndaks aastaks on veel järgmised eesmärgid: [82]

- parkide ja avalike alade valgustamiseks on loodud spetsiaallahendused;
- inimesed tunnevad ennast pimedamal ajal liikudes turvalisemalt;
- valgusreostust esineb minimaalselt;
- paljasjuhtmega liinid on asendatud kaabelliinidega.

7. ETTEPANEKUD VALGUSREOSTUSE VÄHENDAMISEKS

Valgustite üledimensioneerimine – aja möödudes valgustid amortiseeruvad ning nad ei pruugi enam vastata standarditele. Seetõttu oleks mõistlik teadlikult valida projekteerimise etapis natuke võimsamad leedvalgustid ning kasutada juhtimissüsteemi nende heleduse reguleerimiseks. Valgustid võiksid eluea alguses töötada 80% võimsusega, 5 aasta pärast 90% võimsusega ning veel 5 aasta pärast töötaksid valgustid täisvõimsusel. See aitab tagada olukorra, kus valgustid vastavad terve eluea vältel standarditele ning samas ei tekita nad ülevalgustatust.

Valgustite hämardamine – Tallinna linn ei hämarda paljusid tänavavalgusteid, kuid rahaliselt on see oluline kokkuhoiu koht. Lisaks tänavavalgustitele on hämardamata paljud lasteaedade territooriumid ja mänguväljakud, mille valgustid töötavad täisvõimsusel öö läbi. Hämardamise režiime rakendades on võimalik saavutada suurt energiasäästu ning samuti aitab see võidelda valgustite üha suureneva arvu vastu.

Kõrgemat värvsustemperatuuri (maksimum 4000 K) võiks kasutada ainult kõrgendatud riskiga kohtades, näiteks ristmikel ja ülekäiguradadel, et suunata sõidukijuhtide tähelepanu võimalikele eesseisvatele ohtudele. Elamurajoonides võiks kasutada inimkeskseid valgusteid, mis võimaldavad valgustite värvsustemperatuuri reguleerida. Näiteks võiks õhtusel perioodil olla värvsustemperatuur soojem (maksimum 2700 K), kuna sellel värvsustemperatuuril on leedvalgusti sinise spektri osa tunduvalt väiksem võrreldes 4000 Kelviniga. Hommikusel perioodil võiks värvsustemperatuur kõrgem olla (näiteks 3000 K), kuna see aitab vähendada varajasel ajal esinevat väsimust. Looduskaitsealadel võiks maksimaalne värvsustemperatuur olla 2400 K, nagu Prantsusmaal.

Piirkondades, kus on väiksem liiklustihedus, võiks kasutada liikumisanduritega valgusteid. Kindlasti ei ole mõistlik liikumisandureid kasutada linnas, kuna see tekitaks olukorra, kus valgustid lülituvad pidevalt sisse ja välja. Selline pidev valgustite vilkumine häirib lähedal elavaid elanikke suure tõenäosusega palju rohkem kui valgusallikas, mis on natuke eredam, aga põleb konstantselt.

Sarnaselt Itaaliale võiks Eestis rakendada kontrollmõõtmiste teostamist vastavalt inimeste kaebustele. Inimestel võiks olla võimalus esitada kaebusi valgusreostust tekitavate objektide kohta ning kontrollorgan saaks seejärel teostada vastavad

mõõtmised. Küll aga peaks sellisel juhul piirama valgusreostust seaduslikul tasandil, kuna standardid on vabatahtlikud.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli teostada suurimatele valgusreostuse allikatele Kristiine ja Mustamäe linnaosas energiasäästu analüüs. Probleemiks on valgustite ja leedekraanide liigne heledus ning piirkondade üleliigne valgustus. Tänavapilti lisandub pidevalt uusi valgusallikaid, sealhulgas valgustatakse aina enam selliseid piirkondi, kus varem valgustust polnud. Lõputöö peamiseks fookuseks valiti Kristiine, kuna tegemist on linnaosaga, mida läbivad mitmed magistraalteed. Mõõtmistulemusi võrreldi Mustamäe linnaosaga, sest Kristiine ja Mustamäe erinevad asustustiheduse poolest peaaegu kaks korda, olles samaaegselt võrdsed pindalalt.

Valgusreostuse allikate valimisel lähtuti Tallinna linna poolt koostatud valgusreostuse ja räiguse küsitlusest, kuid osad valgusreostuse allikad valis autor ise. Töö käigus sõideti läbi kõik antud küsitluses märgitud objektid Kristiines ja Mustamäel ning seejärel tegi autor oma valiku mõõdetavatest objektidest. Mõõtmised teostati suurimatele valgusreostuse allikatele ning saadud mõõtmistulemusi võrreldi standardites lubatuga. Töö käigus leiti, et standardites sätestatud piirväärtus leedekraanide jaoks on liiga kõrge ning võiks olla madalam. Sellest tulenevalt mõõdistati leedekraanide puhul ka vähe häirivaid ekraane, et teha ettepanek standardites sätestatud piirväärtuse muutmiseks. Lõputöö käigus pakuti ka lahendusi valgusreostuse vähendamiseks. Kokku mõõdistati 4 leedekraani, 5 välisfassaadi ja 2 tänavat. Leedekraanidest 2 olid häirivad ja 2 vähem häirivad. Mõõdistatavaid objekte valiti võrdselt sama palju nii Kristiines kui ka Mustamäel, välja arvatud välisfassaadide puhul, et teostada nende vaheline võrdlus.

Lõputöö käigus arvutati välja, kui palju oleks võimalik raha Tallinna linnal kokku hoida aastas, kui ta hämardaks kõiki praegu kasutuses olevaid leedvalgusteid. Tulemusena saadi teada, et iga-aastane rahaline sääst oleks 422893 € ning aastas jääks õhku paiskamata 1611 tonni CO₂-te. Tehtud arvutus oli aga ligikaudne ning oli mõeldud pigem andma ettekujutuse, mis suurusjärgus võiks potentsiaalne energiasääst olla. Tegelikult energiasäästu arvutamiseks on vaja teha detailsemad arvutused, mis võtavad arvesse erisusi valgustite hooajalisel sisse- ja välja lülitamisel.

Konkreetsemad energiasäästu arvutused tehti kahele leedekraanile ja tänavale. Välja tuli, et Kadaka teel oleva eredama leedekraani välja lülitamisega ööseks jääb aastas õhku paiskamata 2,95 tonni CO₂-te ning iga-aastane rahaline sääst on 773,6 €. Sõpruse leedekraani välja lülitamisega ööseks jääb aastas õhku paiskamata 1,49 tonni CO₂-te ning iga-aastane rahaline sääst on 392,4 €. Tänavavalgustite energiasäästu arvutustest tuli välja, et Vesipapi tänaval oleks võimalik antud lõputöös välja pakutud hämardamise

astmeid kasutades saavutada 56% energiasäästu ning Kadaka puiesteel 59%. Sellise hãmardamisega jääks Vesipapi tänaval õhku paiskamata 1,13 tonni CO₂-te ja Kadaka puiesteel 11,9 tonni CO₂-te aastas. Rahaline kokkuhoid oleks Vesipapi tänaval 296,7 € ja Kadaka puiesteel 3117 €.

Töö raames erinevaid tänavaid läbi sõites selgus, et valgusreostuse allikaid oli tunduvalt lihtsam leida Mustamäe linnaosas kui Kristiine linnaosas. Samuti tuvastati Tallinna linna küsitluses märgitud objekte läbi sõites valgusreostuse allikaid rohkem Mustamäel kui Kristiines, aga kuna Kristiine oli antud töö põhifookuses, ei oleks nende objekte mõõdistamine antud tööle palju juurde andnud.

SUMMARY

The purpose of this thesis was to carry out energy savings analysis of the largest sources of light pollution in the Kristiine and Mustamäe district. The problem is the excessive brightness of luminaires and LED screens and the over-illumination of areas. New light sources are constantly being added to the streetscape, including the increasing illumination of areas where there was no lighting before. Kristiine district was chosen as the main focus of the thesis, as it is a district crossed by several trunk roads. The measurement results were compared with those of the Mustamäe district, as Kristiine and Mustamäe differ almost twice in terms of population density, while being equal in area.

Sources of light pollution were selected on the basis of a light pollution and glare survey conducted by the City of Tallinn, but some sources of light pollution were selected by the author. During the course of the thesis, all the objects marked in the survey in Kristiine and Mustamäe were driven through, and the author made then his own selection of the objects to be measured. Measurements were conducted at the largest sources of light pollution and the results were compared with the values allowed by the standards. During the course of the thesis, it was found that the limit value set in standards for LED screens is too high and should be lower. Therefore, mildly intrusive LED screens were also measured in order to propose a change to the limit value set in standards. The thesis also proposed solutions to reduce light pollution. In total, 4 LED screens, 5 external facades and 2 streets were measured. Of the LED screens, 2 were intrusive and 2 less intrusive. The same number of objects to be measured were selected in both Kristiine and Mustamäe, except for the external facades, in order to make a comparison between them.

During the course of the thesis, it was calculated how much money the City of Tallinn could save per year if it dimmed all the LED street lights that are currently in use. As a result, it was found that the annual monetary savings would be 422893 € and that 1611 tonnes of CO₂ would not be emitted into the atmosphere per year. However, the calculation was only a rough estimate and was rather intended to give an idea of the order of magnitude of the potential energy savings. To calculate the actual energy savings, more detailed calculations are needed that take into account the differences in the seasonal on and off switching of luminaires.

More specific energy savings calculations were done for two LED screens and streets. The results showed that by turning off the brighter LED screen on Kadaka tee during

the night, 2,95 tonnes of CO₂ would not be emitted into the atmosphere per year and the annual monetary savings would be 773,6 €. By turning off the Sõpruse LED screen during the night, 1,49 tonnes of CO₂ would not be emitted into the atmosphere per year and annual monetary savings would be 392,4 €. Calculations of the energy savings of street lighting showed that it is possible to achieve 56% energy savings on Vesipapi street and 59% on Kadaka puiestee by using the dimming levels proposed in this thesis. With this type of dimming, 1 tonne of CO₂ would not be emitted per year on Vesipapi street and 3,77 tonnes of CO₂ per year on Kadaka puiestee. Annual monetary savings on Vesipapi street would be 260,3 € and 989,1 € on Kadaka puiestee.

As part of the thesis, different streets were driven through, during which it became clear, that sources of light pollution were much easier to find in Mustamäe than Kristiine. Also, more light polluting objects were spotted in Mustamäe than in Kristiine when driving through the objects marked in the survey conducted by the City of Tallinn, but as Kristiine was the main focus of this work, measuring those objects would not have added much to this thesis.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] T. Tamm, Valgustehnika I, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2009.
- [2] „EVS-EN 12665:2018,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12665-2018>. [Kasutatud 15. 04. 2024].
- [3] Science Museum, „ELECTRIFYING: THE STORY OF LIGHTING OUR HOMES,“ 28. 01. 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencemuseum.org.uk/objects-and-stories/everyday-wonders/electric-lighting-home>. [Kasutatud 31. 01. 2024].
- [4] Lighting Research Center, „Task Lighting,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lrc.rpi.edu/patternbook/techniques/task.asp>. [Kasutatud 03. 02. 2024].
- [5] Canadian Centre for Occupational Health and Safety, „Lighting Ergonomics,“ 30. 09. 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ccohs.ca/oshanswers/ergonomics/lighting/lighting_general.html. [Kasutatud 31. 01. 2024].
- [6] International Labour Organization, „Physical Hazards - Indoor Workplace Lighting,“ 24. 07. 2014. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ilo.org/caribbean/projects/WCMS_250198/lang--en/index.htm. [Kasutatud 01. 02. 2024].
- [7] Mayo Clinic Staff, „Seasonal affective disorder treatment: Choosing a light box,“ 30. 03. 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/seasonal-affective-disorder/in-depth/seasonal-affective-disorder-treatment/art-20048298>. [Kasutatud 03. 02. 2024].
- [8] Maanteeamet, „RIIGIMAANTEEDE VALGUSTAMISE JUHIS,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://transpordiamet.ee/media/2694/download>. [Kasutatud 23. 04. 2024].
- [9] R. Haridy, „Study finds car thefts decrease when street lights are turned off,“ 29. 03. 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://newatlas.com/science/vehicle-theft-crime-street-light-dark/>. [Kasutatud 01. 02. 2024].
- [10] N. Kalms, „More lighting alone does not create safer cities. Look at what research with young women tells us,“ 28. 05. 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://theconversation.com/more-lighting-alone-does-not-create-safer-cities-look-at-what-research-with-young-women-tells-us-113359>. [Kasutatud 01. 02. 2024].
- [11] F. Markowitz, Outdoor lighting for pedestrians: A Guide for Safe and Walkable Places, New York: Routledge, 2022.
- [12] Greenled, „FEWER ACCIDENTS, MORE COMFORT,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://greenled.com/lighting-solutions/street-lighting/>. [Kasutatud 03. 02. 2024].
- [13] P. O. Wanvik, "Effects of road lighting: An analysis based on Dutch accident statistics 1987–2006," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 41, no. 1, pp. 123-128, 2009.
- [14] DarkSky, „Light pollution wastes energy and money and damages the climate,“ 17. 10. 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://darksky.org/resources/what-is-light-pollution/effects/energy-climate/>. [Kasutatud 22. 04. 2024].

- [15] K. T. Smith, B. Lopez, S. Vignieri and B. Wible, "Losing the darkness," *LIGHT POLLUTION*, vol. 380, no. 6650, pp. 1116-1117, 2023.
- [16] „EVS-EN 13201-2:2015,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13201-2-2015>. [Kasutatud 09. 04. 2024].
- [17] DarkSky, „What is light pollution?,“ 05. 10. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://darksky.org/resources/what-is-light-pollution/>. [Kasutatud 07. 02. 2024].
- [18] Globe at Night, „Light Pollution,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://globeatnight.org/light-pollution/>. [Kasutatud 04. 04. 2024].
- [19] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, „Text-Alternative Version: What Is Sky Glow?,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.energy.gov/eere/ssl/text-alternative-version-what-sky-glow>. [Kasutatud 07. 02. 2024].
- [20] James Madison University, „Light Pollution: The Overuse & Misuse of Artificial Light at Night,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.jmu.edu/planetarium/light-pollution.shtml>. [Kasutatud 07. 02. 2024].
- [21] E. Liiv, „Linnutee igatsus,“ 12. 10. 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sirp.ee/s1-artiklid/arhitektuur/linnutee-igatsus/>. [Kasutatud 07. 02. 2024].
- [22] T. Longcore ja C. Rich, „Ecological light pollution,“ *Frontiers in Ecology and the Environment*, kd. 2, nr 4, pp. 191-198, 2004.
- [23] Tallinna Tehnikaülikool Füüsikainstituut, „Valgusreostuse pikaajaliste muutuste uurimine Tallinnas ja valgusreostuse hetkeseisu määramine Eestis,“ Keskkonnainvesteeringute Keskus, Tallinn, 2012.
- [24] „EVS-EN 12464-2:2014,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12464-2-2014>. [Kasutatud 19. 04. 2024].
- [25] „EVS-EN 13201-2:2015,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13201-2-2015>. [Kasutatud 19. 04. 2024].
- [26] Ministry of the Environment of the Czech Republic, „Light pollution reduction measures in Europe,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_20221027-/\\$FILE/Light_pollution_reduction_measures.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_20221027-/$FILE/Light_pollution_reduction_measures.pdf). [Kasutatud 13. 04. 2024].
- [27] J. E. Bortle, „The Bortle Dark-Sky Scale,“ *Sky and Telescope*, 2001.
- [28] S. Mander, F. Alam, R. Lovreglio and M. Ooi, "How to measure light pollution—A systematic review of methods and applications," *Sustainable Cities and Society*, vol. 92, 2023.
- [29] Globe at Night, „Light pollution measurement,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://globeatnight-network.org/lp-measurement.html>. [Kasutatud 14. 03. 2024].
- [30] „Light pollution map,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lightpollutionmap.info/s/X6VMcoJQpUyrKvO3njkfNQ>. [Kasutatud 14. 03. 2024].
- [31] A. Rosin, T. Varjas, M. Parker, T. Möller ja A. Oorn, „Tallinna linna valgustuskeskkonna (valgusreostuse ja räiguse) hindamine ja analüüs,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2023.
- [32] M. Lindroth ja M. Svensson, „AFTER DARK,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://odr.chalmers.se/bitstreams/8ff7fc41-18be-424e-993f-4aa2ee101fb4/download>. [Kasutatud 21. 04. 2024].

- [33] LUCI Association, „Gothenburg, (Sweden),“ 07. 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.luciassociation.org/map-city/gothenburg-2/>. [Kasutatud 21. 04. 2024].
- [34] ESOLi, „ESOLi newsletter,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.bserc.eu/uf/projects/2/ESOLi%20newsletter_n5_Winter%202012-2013_EN.pdf. [Kasutatud 21. 04. 2024].
- [35] LUCI Association, „City under Microscope Gothenburg – lighting the future,“ 05. 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.luciassociation.org/city-under-microscope-gothenburg-lighting-the-future/>. [Kasutatud 21. 04. 2024].
- [36] European Commission, „Light Pollution: Mitigation measures for environmental protection,“ 15. 11. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2779/906521>. [Kasutatud 21. 04. 2024].
- [37] National Geographic, „Light Pollution,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://education.nationalgeographic.org/resource/light-pollution/>. [Kasutatud 04. 04. 2024].
- [38] J. Sandström ja P. Rantanen, „Helsingin Häiriövaloselvitys,“ 14. 09. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-07-21.pdf>. [Kasutatud 04. 04. 2024].
- [39] E. L. Piccolo, G. Lauria, L. Guidi, D. Remorini, R. Massai and M. Landi, "Shedding light on the effects of LED streetlamps on trees in urban areas: Friends or foes?," *Science of The Total Environment*, vol. 865, 2023.
- [40] S. T. Fabian, Y. Sondhi, P. E. Allen, J. C. Theobald and H.-T. Lin, "Why flying insects gather at artificial light," *Nature Communications*, vol. 15, no. 689, 2024.
- [41] DarkSky, „Light pollution harms wildlife and ecosystems,“ 13. 11. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://darksky.org/resources/what-is-light-pollution/effects/wildlife-ecosystems/>. [Kasutatud 06. 04. 2024].
- [42] WLS Lighting Systems, „WHAT IS LIGHT POLLUTION?,“ 20. 07. 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://wlsighting.com/what-is-light-pollution/>. [Kasutatud 04. 04. 2024].
- [43] P. E. Moldvar, „Photopic, Mesopic, Scotopic - Concepts,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://docs.agi32.com/AGi32/Content/references/Photopic_Mesopic_Scotopic_-_Concepts.htm. [Kasutatud 14. 04. 2024].
- [44] Soft Lights Foundation, „Chapter 11 – Color Temperature,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.softlights.org/chapter-11-color-temperature/>. [Kasutatud 14. 04. 2024].
- [45] Silman, „Tänavavalgustid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.silman.ee/tooted/valgustid/valisvalgustid/tanavavalgustid/>. [Kasutatud 18. 04. 2024].
- [46] Vizulo, „Human Centric Lighting,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vizulo.com/en/products/interior/2802-human-centric-lighting>. [Kasutatud 08. 04. 2024].
- [47] Comlight, „GET STARTED,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.comlight.no/getstarted-en>. [Kasutatud 08. 04. 2024].
- [48] „Tallinna Keskkonna- ja Kommunaalamet,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tallinn.ee/et/keskkonna-ja-kommunaalamet>. [Kasutatud 08. 04. 2024].

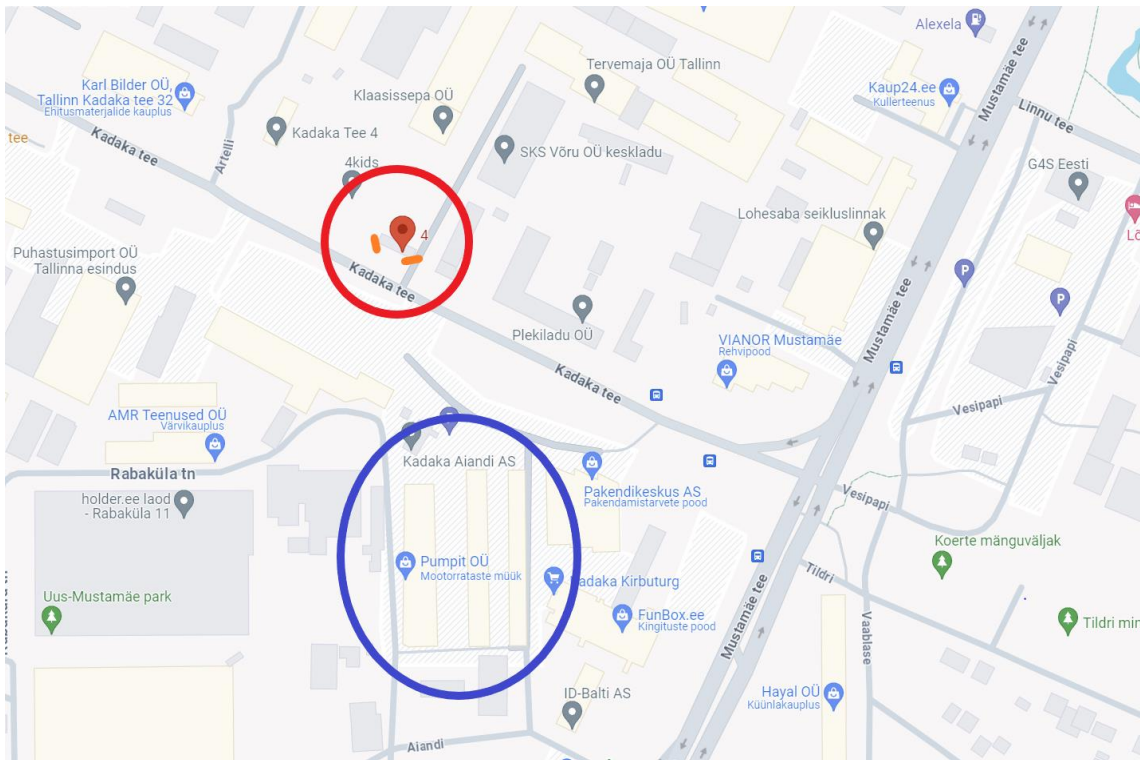
- [49] IUCN World Conservation Congress, „084 - Taking action to reduce light pollution,“ 07. 09. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.iucncongress2020.org/motion/084>. [Kasutatud 08. 04. 2024].
- [50] C. C. M. Kyba, Y. Ö. Altıntaş, C. E. Walker and M. Newhouse, "Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022," *Science*, vol. 379, no. 6629, pp. 265-268, 2023.
- [51] N. Schulte-Römer, J. Meier, E. Dannemann and M. Söding, "Lighting Professionals versus Light Pollution Experts? Investigating Views on an Emerging Environmental Concern," *Sustainability*, vol. 11, no. 6, 2019.
- [52] T. Tamm, *Praktiline valgustustehnika*, Tallinn: Eetel-Ekspert OÜ, 2011.
- [53] M. Jaanus, „ISC0100 Küberelektroonika,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://martinjott.ee/ttu/ISC0100/kyberelektroonika12018-5.pdf>. [Kasutatud 16. 04. 2024].
- [54] E. Rlsthain, *Energiatehnika ja maailm*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2013.
- [55] A. Emleh, A. S. d. Beer, H. C. Ferreira ja A. J. H. Vinck, „The influence of high pressure sodium lamps on the power line communications channel,“ %1 *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, Austin, 2015.
- [56] Exelon Corporation, „LAMPS – Types and Characteristics II,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://c03.apogee.net/mvc/home/hes/land/el?utilityname=peco&spc=cel&id=1175>. [Kasutatud 15. 04. 2024].
- [57] Elering, „Eesti 2022. a. segajääk (tõendamata päritoluga elektrienergia) ning segajäägi arvutuse alused,“ 01. 06. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/sites/default/files/2023-06/Eesti%202022.%20aasta%20segaj%C3%A4k%20ja%20metoodika.pdf>. [Kasutatud 08. 05. 2024].
- [58] Enefit, „Elektripaketid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.energia.ee/era/elekter/elektrileping-ja-paketid?packages=Seasonal-Secure>. [Kasutatud 23. 04. 2024].
- [59] Viimsi Uudised OÜ, „Mihkel Härm: Elektrilevi võrgutasu on 11,7% väiksem kui Imatra Elektril,“ 15. 03. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://viimsiuudised.ee/koik-uudised/mihkel-harm-elektrilevi-vorgutasu-on-117-vaiksem-kui-imatra-elektril/>. [Kasutatud 23. 04. 2024].
- [60] Elektrilevi, „Elektrilevi võrguteenuse hinnakiri,“ 01. 01. 2024. [Võrgumaterjal]. Available: https://elektrilevi.ee/files/el_vorguteenuse_hinnakiri_01.01.2024.pdf. [Kasutatud 23. 04. 2024].
- [61] „LED Street Lighting Procurement & Design,“ 09. 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b6d1cf07&appId=PPGMS>. [Kasutatud 20. 04. 2024].
- [62] T. Tamm, „Esvika pakutavad juhtimissüsteemid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tiutammib.ee/valisvalgustuse-juhtimisvoimalused?download=18:esvika-pakutavad-juhtimisssteemid>. [Kasutatud 20. 04. 2024].

- [63] Philips, „Different ways,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.docs.lighting.philips.com/en_gb/oem/download/dynadimmer/P_Leaflet_Dynadimmer_V2Finpages.pdf. [Kasutatud 20. 04. 2024].
- [64] OSRAM, „Technical application guide 3DIM feature: DALI®, StepDIM, AstroDIM,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://mediacn.osram.com.cn/media/img/osram-dam-300813//339643_3DIM_Application_Guide_GB.pdf. [Kasutatud 20. 04. 2024].
- [65] Diotech OÜ, „Turvaline ja energiasäästlik tänavavalgustus eeldab valgustite reaalajas juhtimist,“ 18. 09. 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.diotech.ee/turvaline-ja-energiasaastlik-tanavavalgustus-eeldab-valgustite-reaalajas-juhtimist/>. [Kasutatud 20. 04. 2024].
- [66] Viimsi vald, „Viimsi valla tänavavalgustuse arengukava 2019-2029,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.viimsivald.ee/sites/default/files/inline-files/Viimsi%20valla%20t%C3%A4navavalgustuse%20arengukava%202019-2029.pdf>. [Kasutatud 20. 04. 2024].
- [67] T. Rooba, „Energiatõhusate välisvalgustuse lahenduste juhised kohalikele omavalitsustele,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/1dfc7b4c-9c95-465d-89cb-569c5d61c6ca>. [Kasutatud 23. 04. 2024].
- [68] Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Amet, „CE-märgis,“ 11. 01. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ttja.ee/ariklient/ohutus/ce-margis>. [Kasutatud 17. 04. 2024].
- [69] ETICS, „About the ENEC Mark,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.enec.com/page.php?p=190>. [Kasutatud 17. 04. 2024].
- [70] Riigi Kinnisvara AS, „9.4 Välisvalgustus,“ 09. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://nouded.rkas.ee/tugevpool>. [Kasutatud 20. 04. 2024].
- [71] „EVS-EN 60529:2001+A2:2014,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-60529-2001-a2-2014-consolidated>. [Kasutatud 18. 04. 2024].
- [72] „EVS-EN 62262:2008+A1:2021,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-62262-2008-a1-2021-consolidated>. [Kasutatud 18. 04. 2024].
- [73] TRILUX, „Luminous efficacy,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.trilux.com/en/lighting-practice/lighting-equipment/light-sources/characteristics-of-light-sources/luminous-efficacy/>. [Kasutatud 19. 04. 2024].
- [74] „Tänavavalgustus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://gis.tallinn.ee/pohjatallinnyp/?page=8.5-T%C3%A4navavalgustus&views=Legend----->. [Kasutatud 19. 04. 2024].
- [75] „EVS-EN 13201-4:2015,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13201-4-2015>. [Kasutatud 24. 04. 2024].
- [76] T. Varjas, I. Gorislavskaja, D. Antov, M. Parker, T. Möller ja L. M. Wikgren, „Leedekraanide mõjud liiklusohutusele,“ 05. 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://uuringud.tallinn.ee/uuring/vaata/2022/Leedekraanide-mojud-liiklusohutusele>. [Kasutatud 12. 05. 2024].

- [77] „Megameedia Grupp OÜ,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.megameediagrupp.ee/digiekraanid/valiekraanid/#>. [Kasutatud 24. 04. 2024].
- [78] Linsn LED, „LED Display Power Consumption – How Much Money Will You Pay for It?,“ 17. 06. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.linsnled.com/led-display-power-consumption-how-much.html>. [Kasutatud 24. 04. 2024].
- [79] Tallinn, „Tallinna eelarvestrateegia aastateks 2024–2027,“ 19. 10. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tallinn.ee/et/tallinna-linna-eelarve>. [Kasutatud 26. 04. 2024].
- [80] Tallinn, „Tallinna linna 2024. aasta eelarve eelnõu seletuskiri,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tallinn.ee/et/tallinna-linna-eelarve>. [Kasutatud 26. 04. 2024].
- [81] Tallinn, „Tallinna linna eelarve,“ 02. 11. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tallinn.ee/et/tallinna-linna-eelarve>. [Kasutatud 26. 04. 2024].
- [82] Tallinn, „Tehnovõrgud,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://strateegia.tallinn.ee/tehnovorgud/>. [Kasutatud 26. 04. 2024].

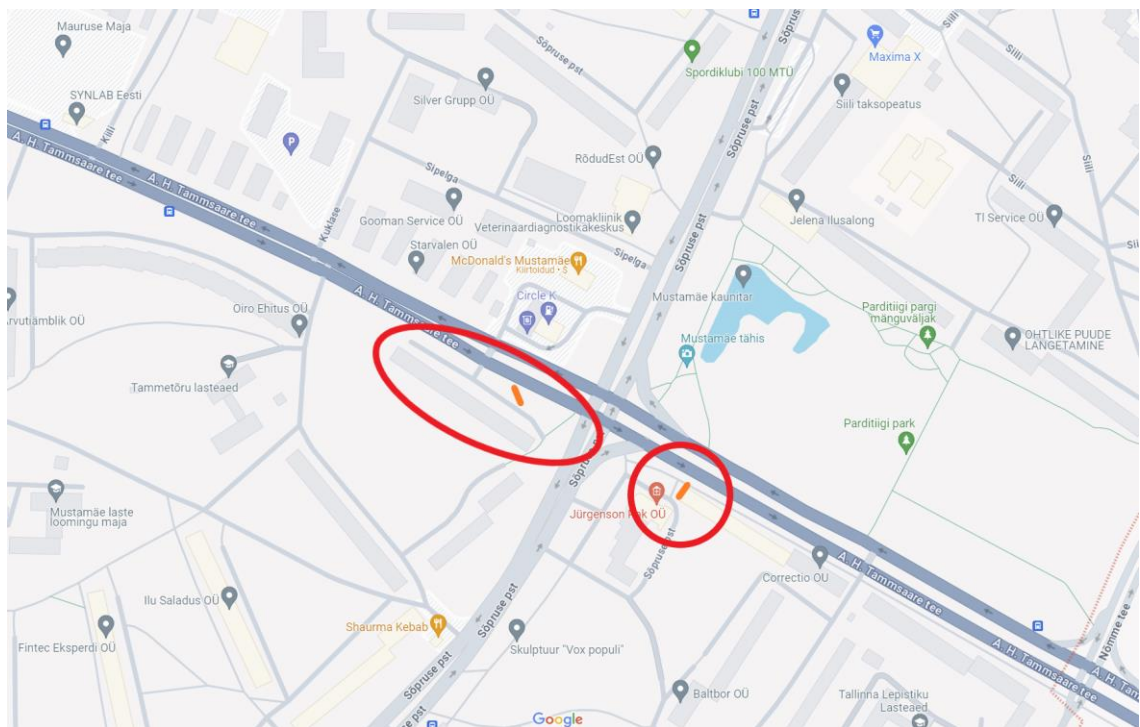
LISAD

Lisa 1 Leedekraanide asukohad



Joonis Lisa 1.1 Kadaka tee 4 leedekraanid

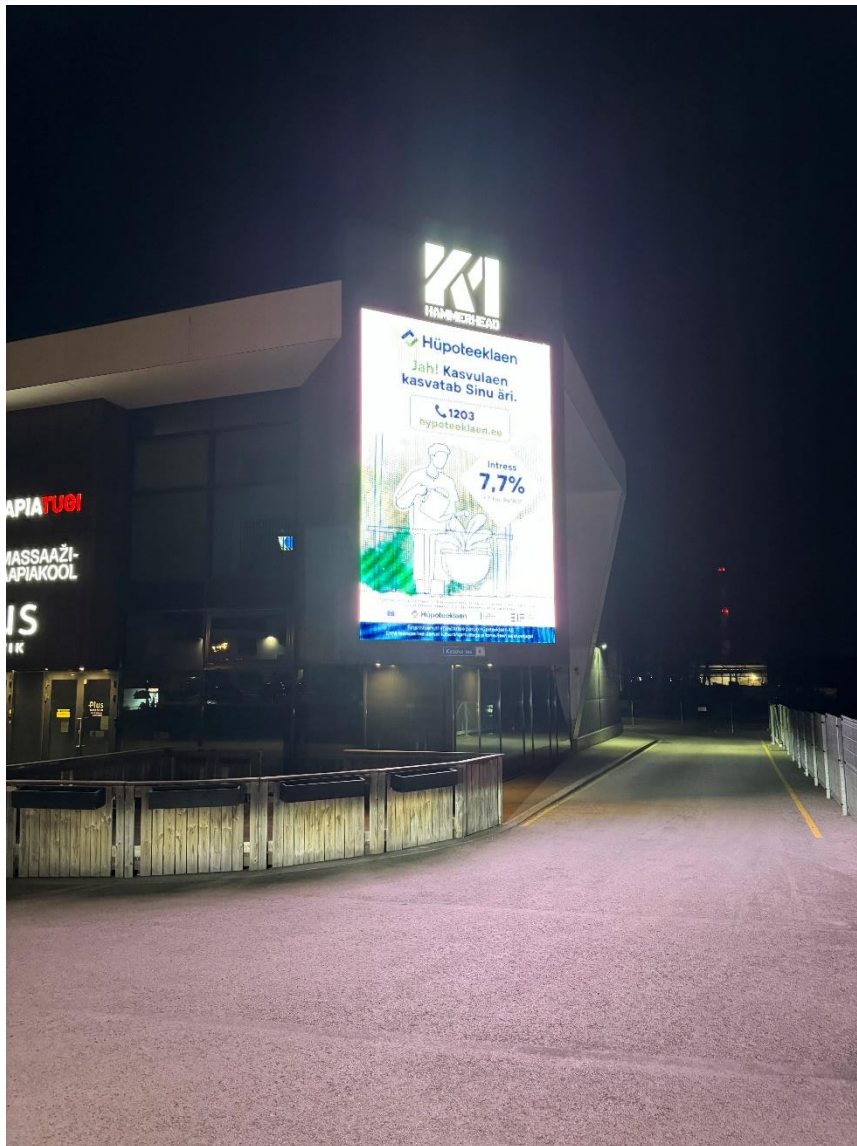
Punases ringis asuvad 2 leedekraani, sinises ringis kortermajad.



Joonis Lisa 1.2 A. H. Tammsaare tee 73 ja Sõpruse pst 202 leedekraanid

Punases ringis asuvad leedekraanid.

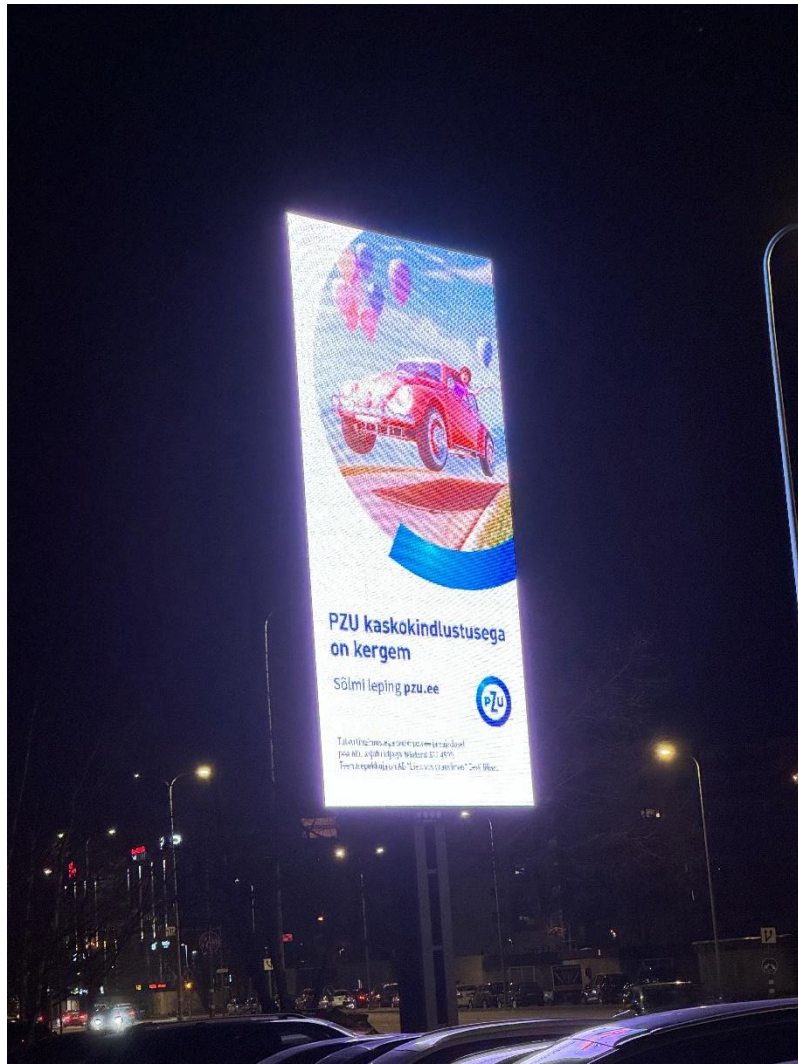
Lisa 2 Leedekraanide pildid



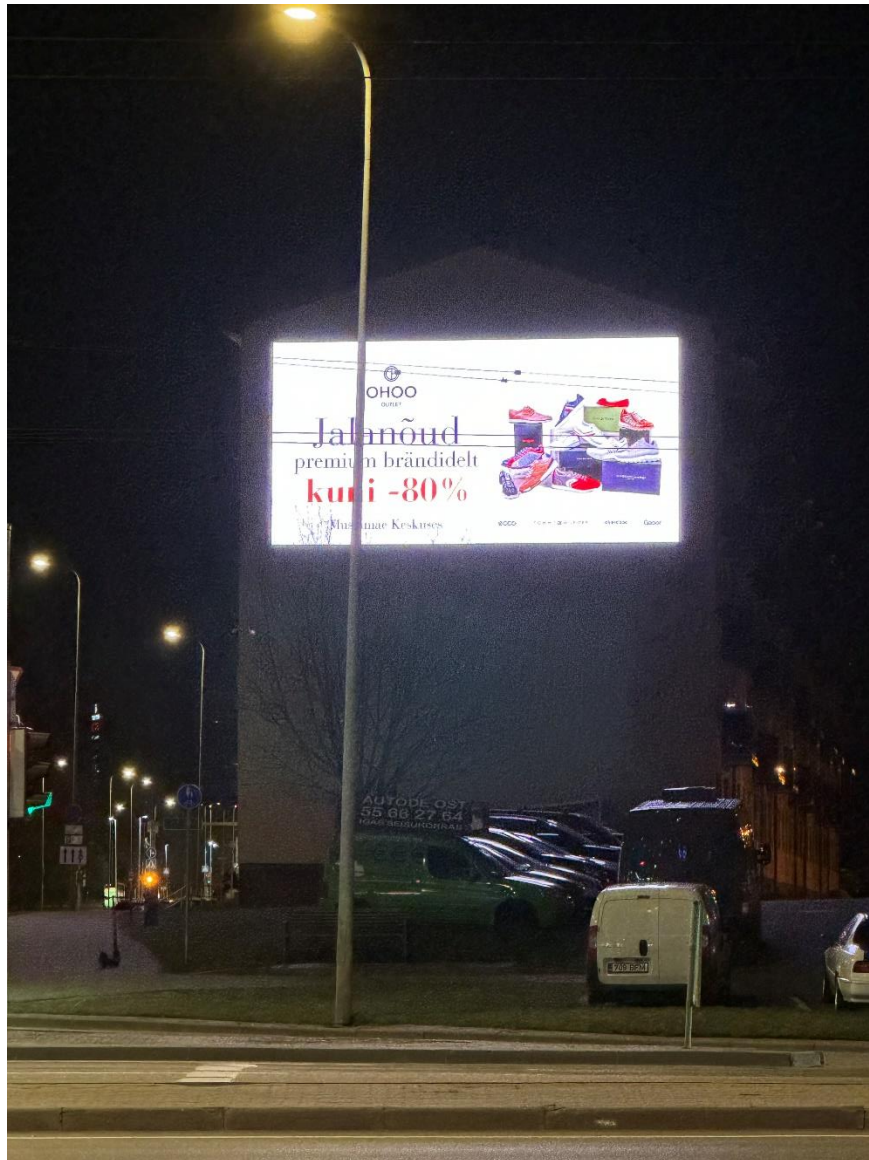
Joonis Lisa 2.1 Kadaka tee 4 ekraan 1



Joonis Lisa 2.2 Kadaka tee 4 ekraan 2

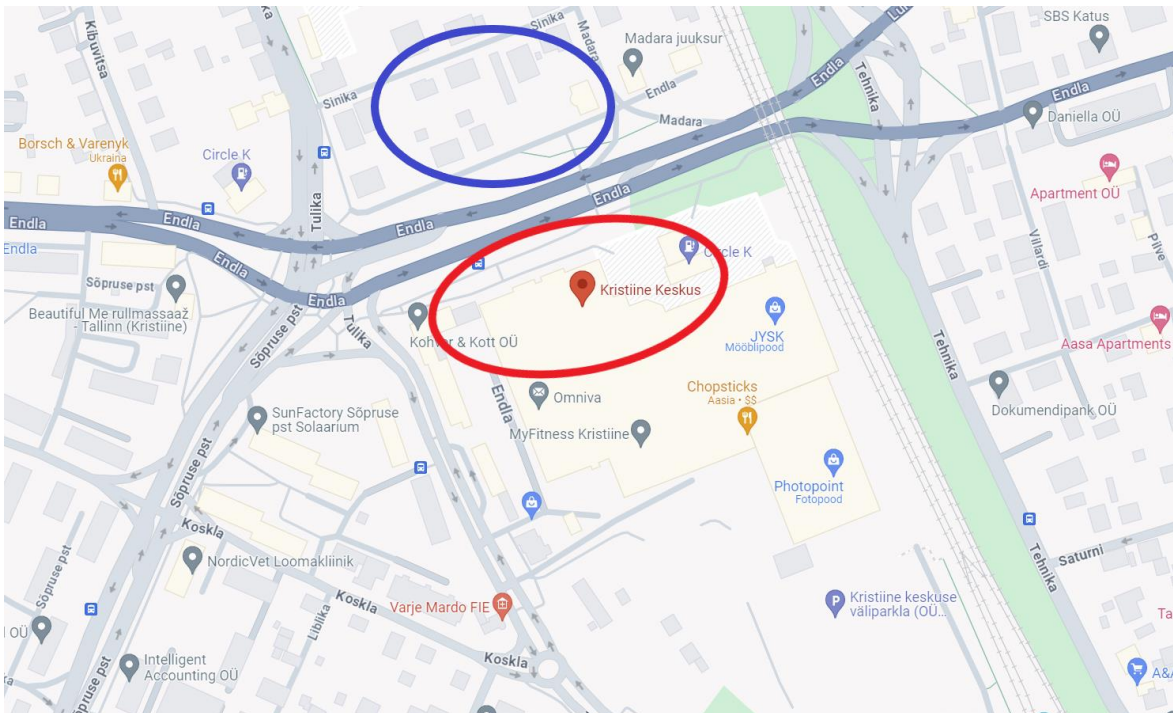


Joonis Lisa 2.3 Sõpruse pst 202 leedekraan



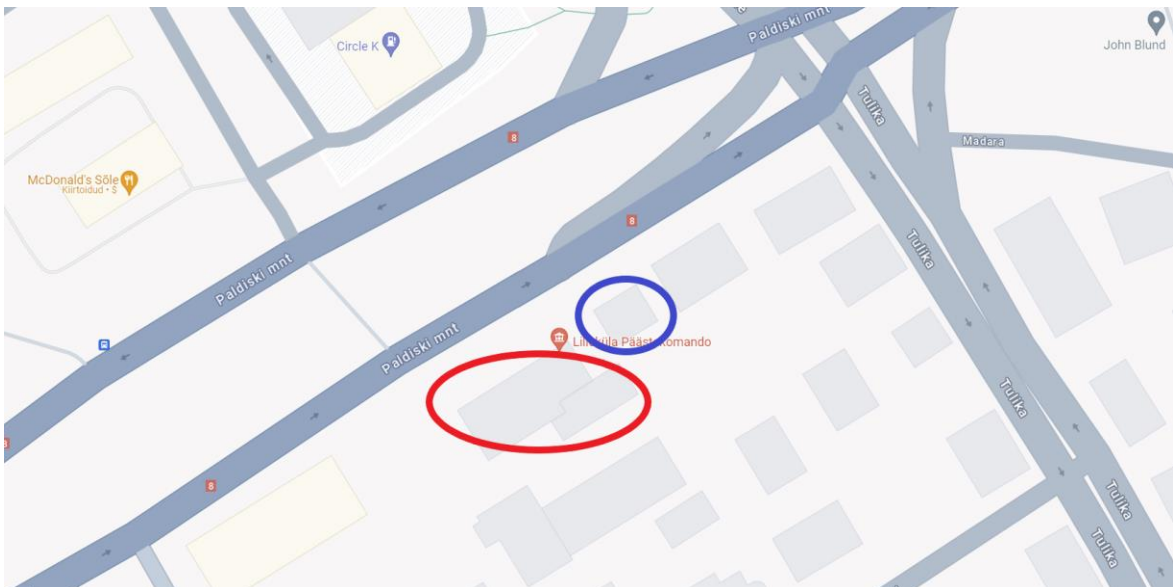
Joonis Lisa 2.4 A. H. Tammsaare tee 73 ledekraan

Lisa 3 Välisfassaadide asukohad



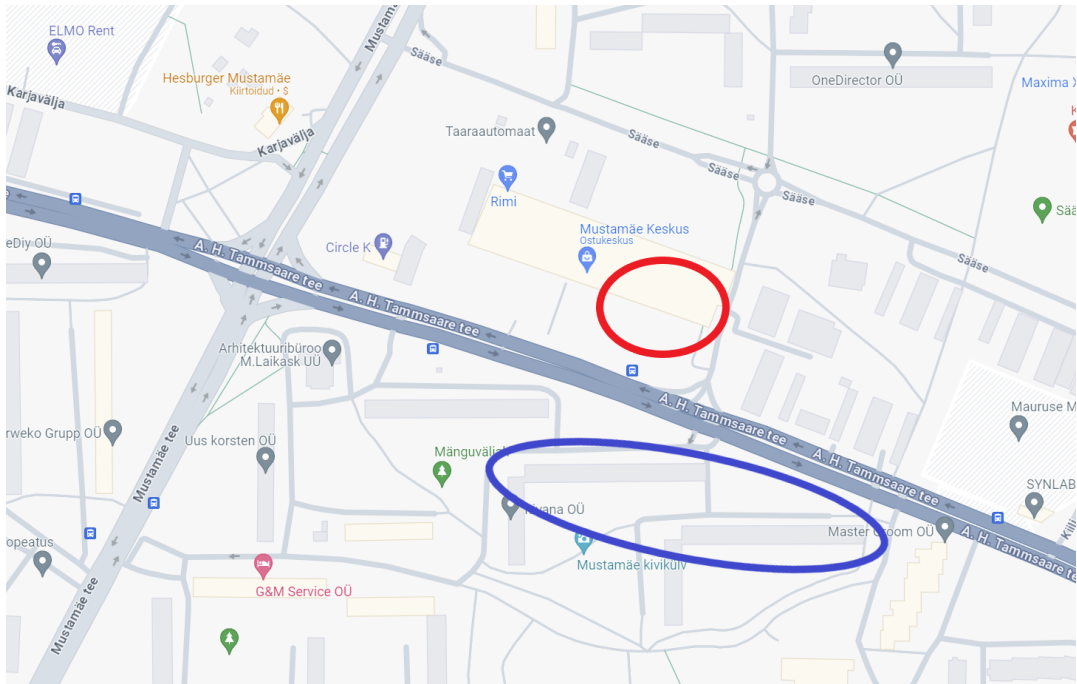
Joonis Lisa 3.1 Kristiine Keskus

Punases ringis asuvad erinevad valgusmärgid ja ka valgusreklam. Sinises ringis teisel pool teed olevad kortermajad.



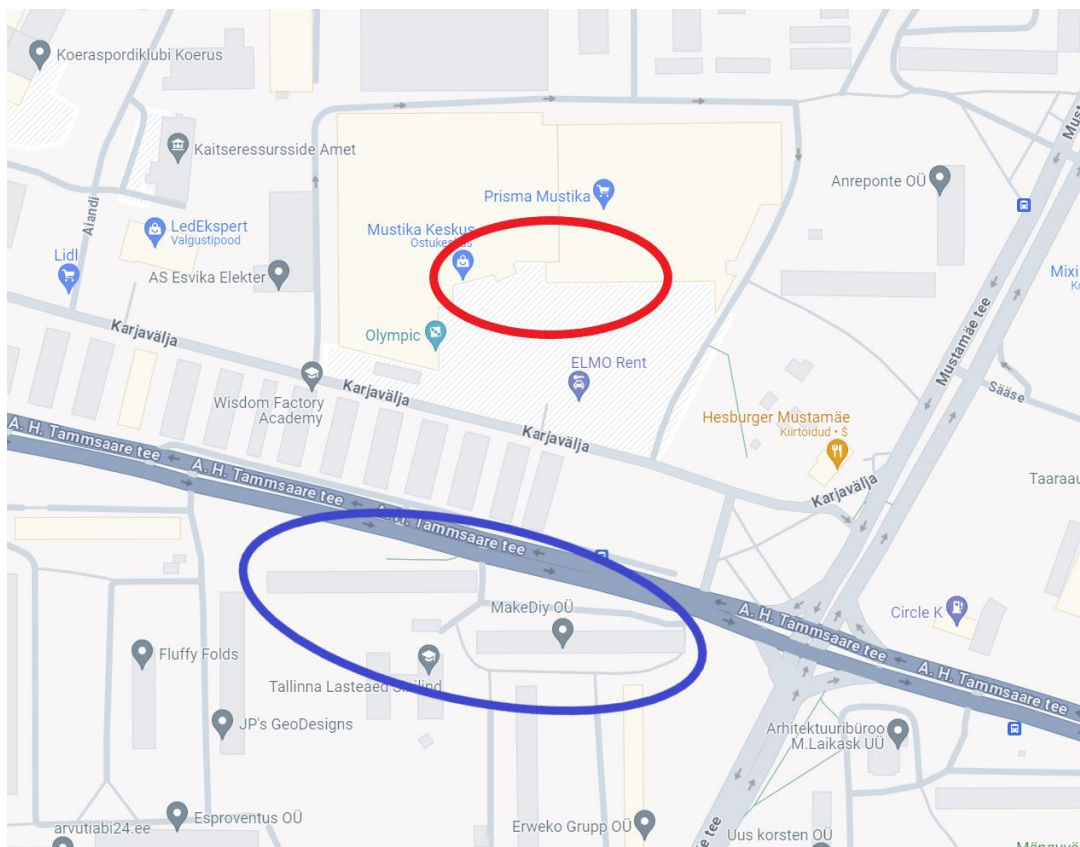
Joonis Lisa 3.2 Lilleküla Päästekomando

Punases ringis asub Lilleküla Päästekomando valgustatud välisfassaad. Sinises ringis hoone, mille puhul mõõdistati sellele langevat vertikaalset ja horisontaalset valgustustihedust.



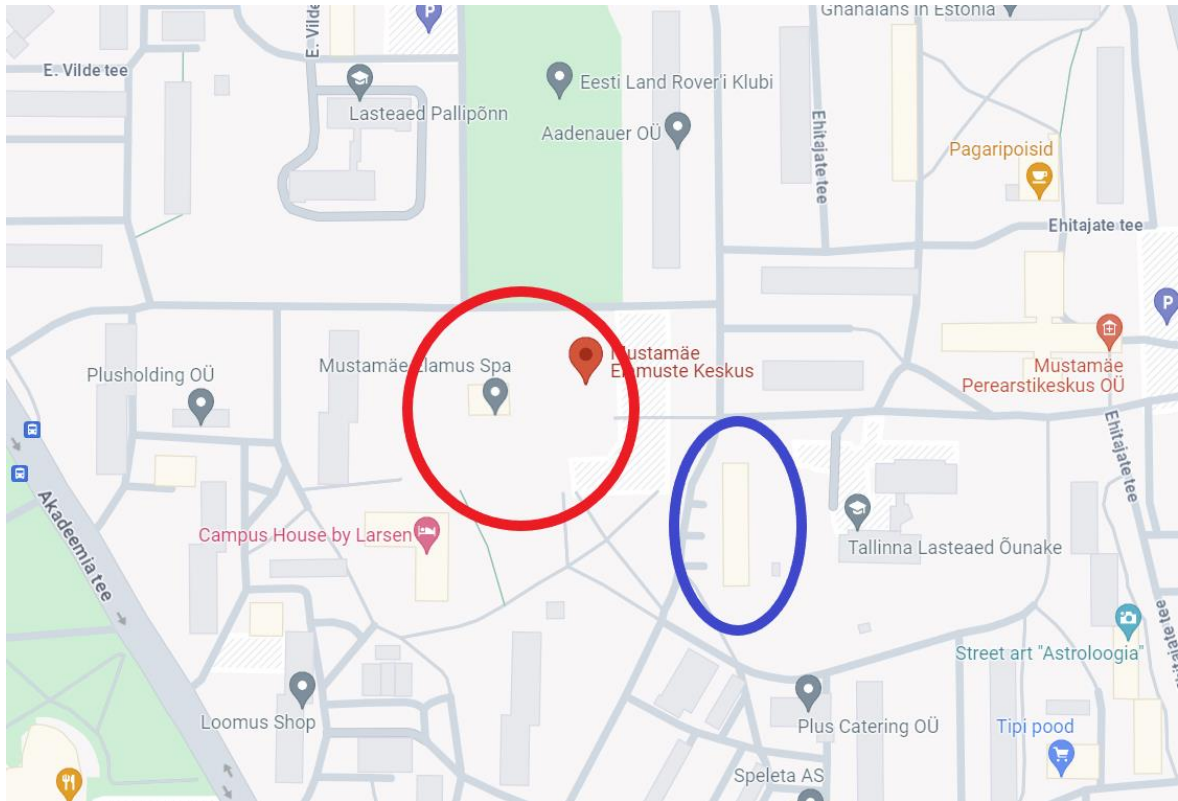
Joonis Lisa 3.3 Mustamäe Keskus

Punases ringis asuvad erinevad valgusmärgid. Sinises ringis teisel pool teed olevad kortermajad.



Joonis Lisa 3.4 Mustika Keskus

Punases ringis asuvad erinevad valgusmärgid. Sinises ringis kaugemal olevad kortermajad.



Joonis Lisa 3.5 Mustamäe Elamus Spa

Punases ringis asub Mustamäe Elamus Spa valgustatud välisfassaad. Sinises ringis vastas olev kortermaja.

Lisa 4 Välisfassaadide pildid



Joonis Lisa 4.1 Kristiine Keskus



Joonis Lisa 4.2 Lilleküla Päästekomando



Joonis Lisa 4.3 Mustamäe Keskus



Joonis Lisa 4.4 Mustika Keskus



Joonis Lisa 4.5 Mustamäe Elamus Spa

Lisa 5 Välisfassaadide pildid värvärvides



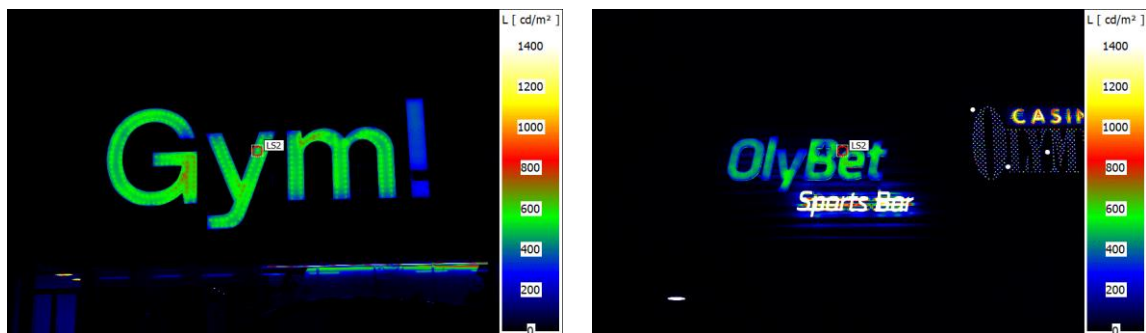
Joonis Lisa 5.1 Kristiine Keskuse valgusmärgid värvärvides



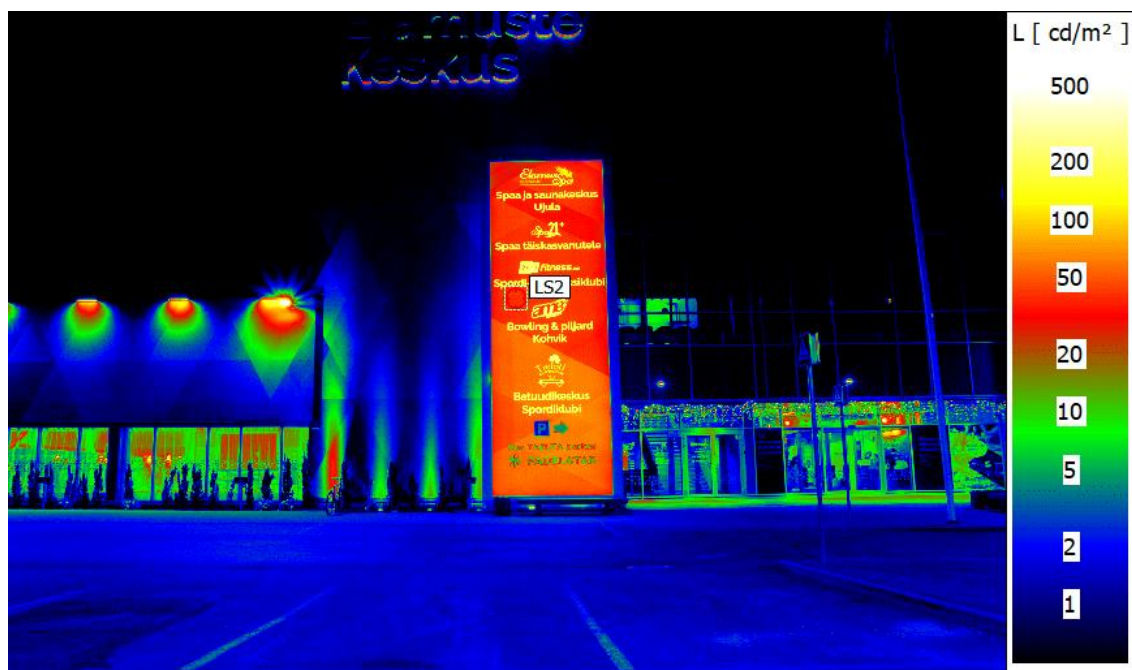
Joonis Lisa 5.2 Lilleküla Päästekomando välisfassaad värvärvides



Joonis Lisa 5.3 Mustamäe Keskuse valgusmärgid väärvärvides

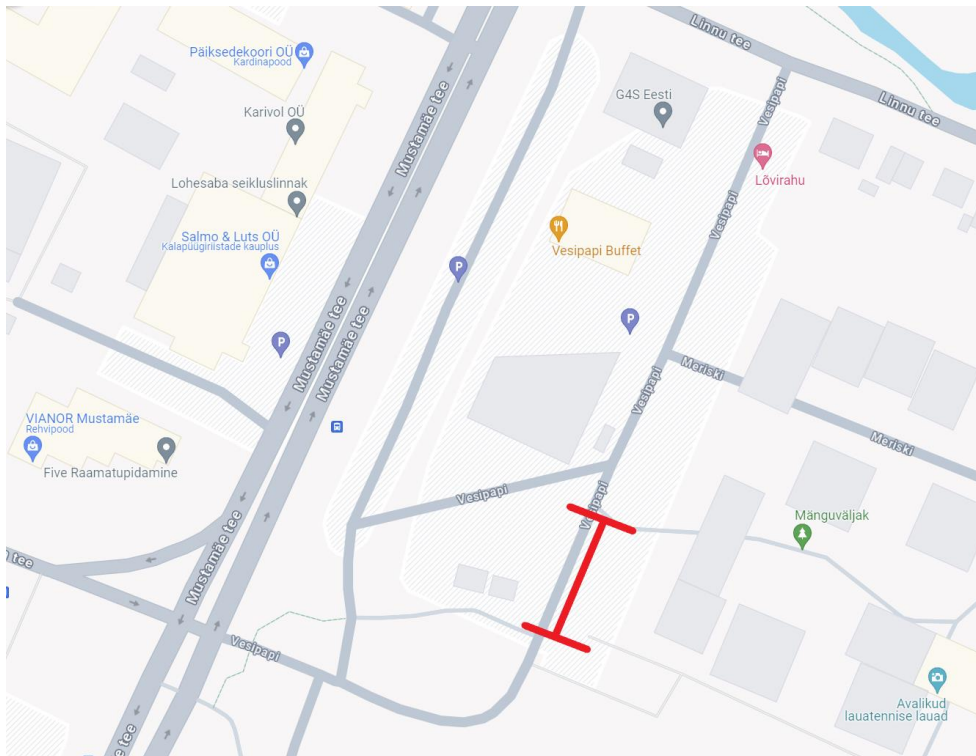


Joonis Lisa 5.4 Mustika Keskuse valgusmärgid väärvärvides



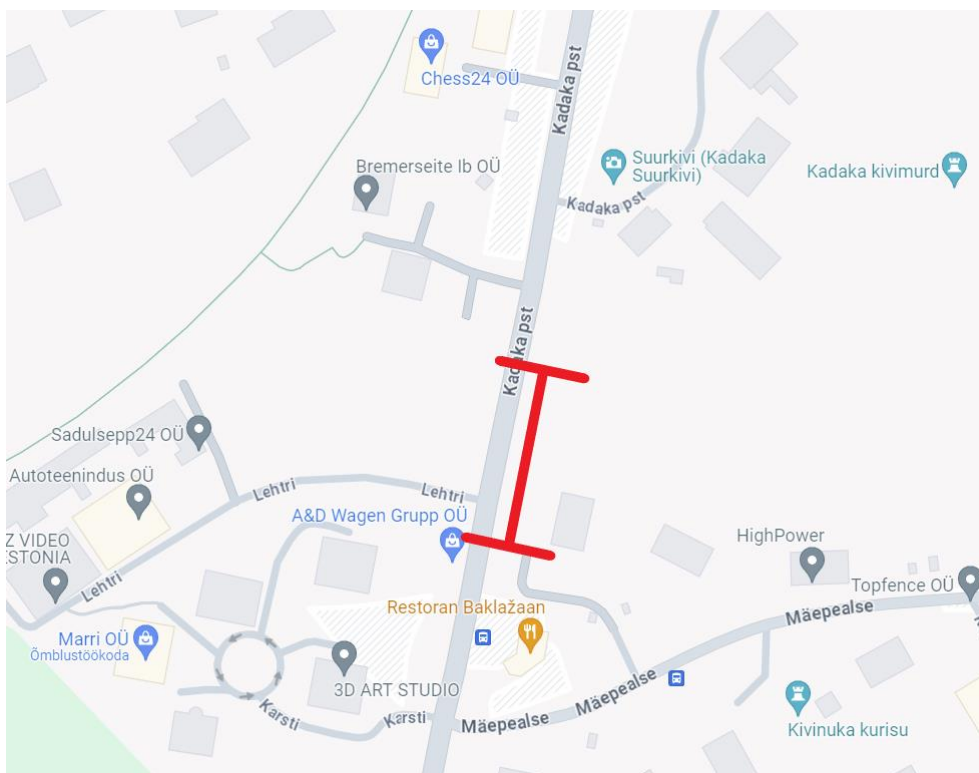
Joonis Lisa 5.5 Mustamäe Elamus Spa välisfassaad väärvärvides

Lisa 6 Mõeldistatavad tänavalõigud



Joonis Lisa 6.1 Vesipapi tänav

Punase joonega on tähistatud tänavalõik, kus mõeldistati heledust.



Joonis Lisa 6.2 Kadaka pst

Punase joonega on tähistatud tänavalõik, kus mõeldistati heledust.

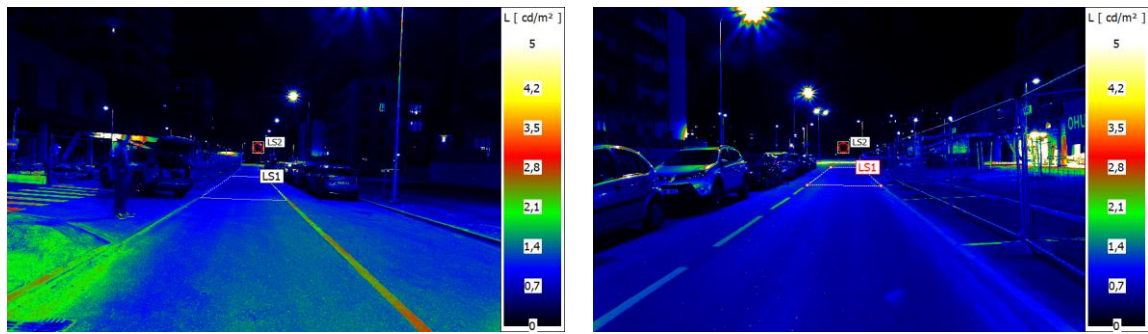


Joonis Lisa 7.1 Vesipapi tänav

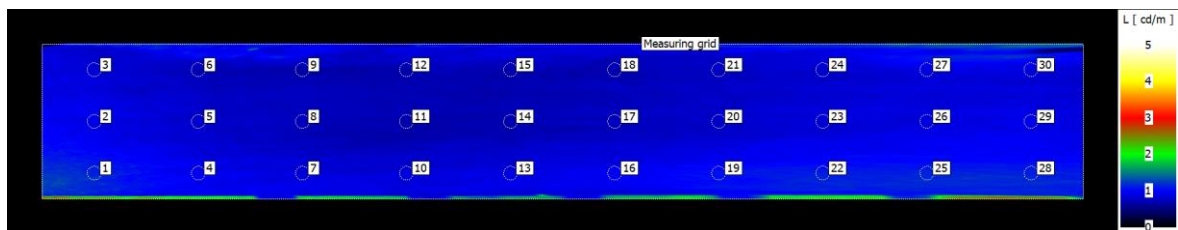


Joonis Lisa 7.2 Kadaka pst

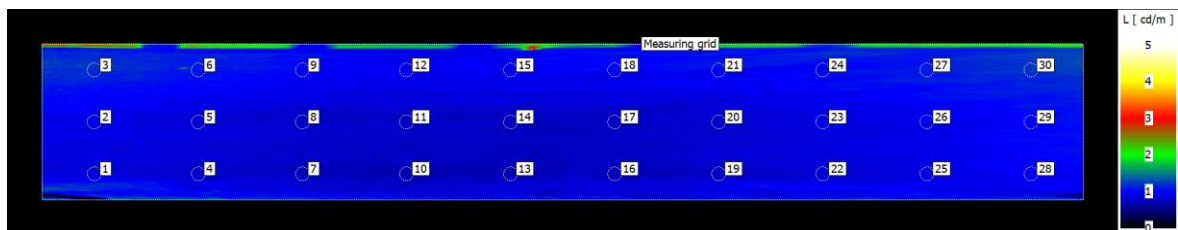
Lisa 8 Tänavate pildid värvärvides



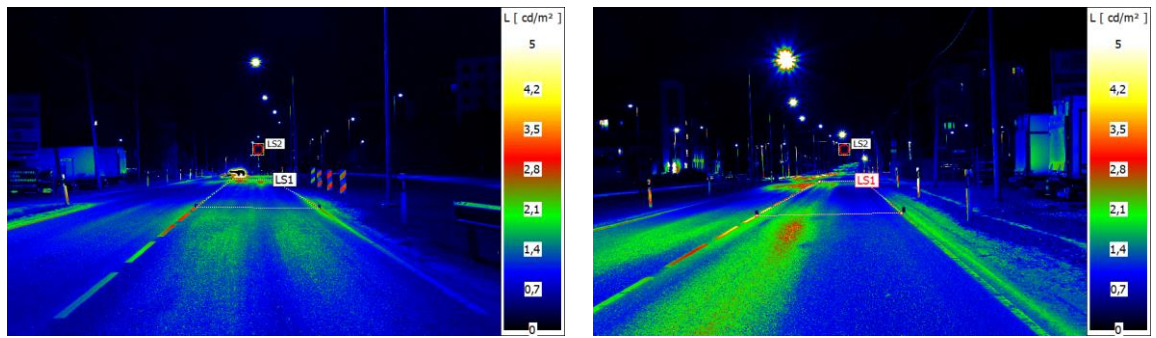
Joonis Lisa 8.1 Vesipapi tänav värvärvides mõlemas suunas



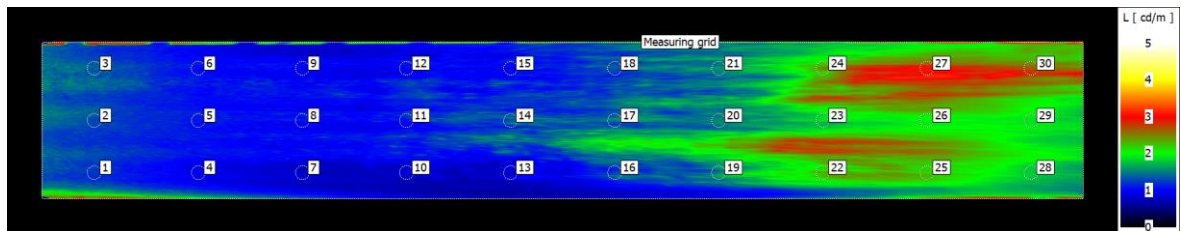
Joonis Lisa 8.2 Vesipapi tänav värvärvides koos mõõtepunktidega Linnu tee suunas



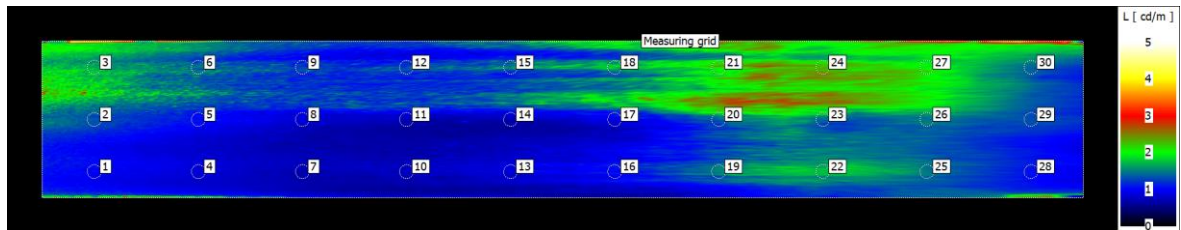
Joonis Lisa 8.3 Vesipapi tänav värvärvides koos mõõtepunktidega Mustamäe Keskuse suunas



Joonis Lisa 8.4 Kadaka pst värvärvides mõlemas suunas



Joonis Lisa 8.5 Kadaka pst värvärvides koos mõõtepunktidega Akadeemia tee suunas



Joonis Lisa 8.6 Kadaka pst värvärvides koos mõõtepunktidega Nõmme suunas