



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**TÄNAVAVALGUSTUSE MÕJU ANALÜÜS
VALGUSTUSREOSTUSE TEKKE JA
LINNAKESKKONNA MÕJUTAMISEL**

**STREET LIGHTING IMPACT ANALYSIS ON THE
FORMATION OF LIGHT POLLUTION AND ITS
INFLUENCE ON THE URBAN ENVIRONMENT**

Magistritöö

Üliõpilane: Aleks Lõbu

Üliõpilaskood: 232158EAMM

Juhendaja: Toivo Varjas, PhD
valgustehnika ekspert

Tallinn 2025

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.

/ kuupäev digiallkirjas /

Autor: Aleks Lõbu

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

/ kuupäev digiallkirjas /

Juhendaja: Toivo Varjas

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

/ kuupäev digiallkirjas /

Kaitsmiskomisjoni esimees Anton Rassõlkin

/ allkirjastatud digitaalselt /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS¹

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Aleks Lõbu,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Tänavavalgustuse mõju analüüs valgusreostuse tekkel ja linnakeskkonna mõjutamisel, 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.

13.05.2025

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.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Üliõpilane: Aleks Lõbu, 232158EAMM

Õppekava, peeriala: EAMM23/23 Elektrotehnika ja mehhatroonika

Juhendaja(d): Toivo Varjas, PhD valgustehnika ekspert

Lõputöö teema:

Tänavavalgustuse mõju analüüs valgusreostuse tekkel ja linnakeskkonna mõjutamisel

Street lighting impact analysis on the formation of light pollution and its influence on the urban environment

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida tänavavalgustuse tehnoloogilist arengut ning selle mõju valgusreostuse tekkimisele ja levikule linnakeskkonnas
2. Selgitada välja, millised standardid ja regulatsioonid mõjutavad avaliku ruumi valgustust Eestis ja teistes riikides, ning pakkuda soovitusi õigusliku raamistiku täiustamiseks.
3. Teostada Mustamäe piirkonnas tänavavalgustuse olemasolevate lahenduste kontrollmõõtmisi ning tuvastada võimalikke seaduspärasusi tänavavalgustite ning valgusreostuse vahel.
4. Töös püstitatakse eesmärgiks tänavavalgustuse rolli ja valgusreostuse mõju analüüsi põhjal esitada teaduspõhised ja rakendatavad soovitused, mis toetaksid linnakeskkonna valgusreostuse vähendamist ja kvaliteetsema avaliku ruumi valgustuse kavandamist.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teema valik ning selle piiritlemine	12.2024
2.	Ülevaate saamine olemasolevast kirjandusest	12.2024
3.	Algandmete kogumine	01.2025
4.	Praktiliste mõõtmiste tegemine linnas	03.2025
5.	Järelduste ja soovituste kirjutamine	04.2025
6.	Kokkuvõtte kirjutamine	04.2025
7.	Lõputöö lõplik vormistamine	05.2025

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 13.05.2025

Üliõpilane: "....."202...a
/allkiri/

Juhendaja: "....."202...a
/allkiri/

Konsultant: "....."202...a
/allkiri/

Programmijuht: "....."202...a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISSEJUHATUS	12
1. TÄNAVAVALGUSTUS	14
1.1 Tehisvalgus	14
1.2 Tehisvalguse areng tänavavalgustuses	16
1.3 Tänavavalgustussüsteemid tänapäeval	17
1.4 Tänapäeva tänavavalgustus valgusallikad	18
1.4.1 Gaaslahendusvalgustid	19
1.4.2 Valgusdiodid	22
1.5 Tänavavalgustuse seos liiklusohutusega	26
1.6 Tänavavalgustite juhtimissüsteemid	27
1.6.1 Astronoomiline taimer ja hämarandur	27
1.6.2 Astronoomilise taimeriga valgustid	28
1.6.3 Kohtjuhtimine	28
1.6.4 Kaugjuhtimine	29
1.7 Valgustus kui linnaruumi planeerimis- ja juhtimisvahend	30
2. VALGUSREOSTUSE TEOREETILINE JA PRAKTILINE KÄSITLUS	34
2.1 Valgusreostuse olemus	34
2.2 Valgusreostuse kvantitatiivne ja kvalitatiivne hindamine ning mõõtmine	37
2.3 Valgusreostuse mõju inimese ööpäevarütmile ja heaolule	38
2.3.1 Tsirkadiaanrütmi häired ja hormonaalne tasakaalutus	39
2.3.2 Visuaalsed häired ja adaptatsioonihäired	39
2.3.3 Neuropsühholoogilised ja metaboolsed mõjud	40
2.3.4 Valgusreostuse mõju ökosüsteemidele	40
2.3.5 Käitumuslikud muutused ja elurütmi häired	42
2.3.6 Mõju paljunemisele ja arengule	43
2.3.7 Kommunikatsiooni ja orientatsiooni häired	43
2.3.8 Füsioloogilised muutused ja hormonaalsed häired	44
2.3.9 Mõju taimestikule ja toiduahelatele	44
3. VALGUSREOSTUSE SEADUSANDLUS, UURINGUD JA ALGATUSED	45

3.1 Ülevaade valgusreostuse regulatsioonist Euroopa Liidu tasandil.....	45
3.2 Valgusreostuse regulatiivne raamistik Eestis	46
3.3 Kohaliku omavalitsuse algatused	47
3.4 Eestis teostatud valgusreostuse uuringud	49
3.5 Valgusreostuse ja pimedate alade uuring Soomes	51
3.6 Teiste riikide regulatsioonid	52
3.6.1 Prantsusmaa	53
3.6.2 Horvaatia.....	53
3.6.3 Itaalia	54
3.6.4 Lõuna-Korea	54
3.6.5 Tšehhi	55
3.7 Võimalused Eesti regulatiivse süsteemi arendamiseks	55
4. MÕÕTMISED MUSTAMÄE LINNAOSAS	58
4.1 Tallinna linna üldiseloostus.....	58
4.2 Mõõtmiste läbiviimine	59
4.2.1 Mõõteseadmed ja kalibreerimine	60
4.2.2 Andmetöötlus ja mõõtetulemuste arvutamine.....	60
5. MÕÕTMISTULEMUSTE ANALÜÜS	61
5.1 Helenduse mõõtmised.....	61
5.1.1 Sütiste tee	61
5.1.2 Kadaka tee	64
5.1.3 Ehitajate tee	67
5.1.4 Üliõpilaste tee	70
5.2 Mustamäe horisontaalse valgustustiheduse kaardistamine	73
5.3 Ettepanekud valgusreostuse ohjamiseks	78

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

Tähised

U_0	üldühtlus
U_1	pikiühtlus
R_a	värviesituse üldindeks
L [cd/m ²]	heledus
\bar{L} [cd/m ²]	keskmine heledus
ϕ_V [lm]	valgusvoog
E_V [lx]	valgustustihedus
η [lm/W]	valgusviljakus

Lühendid

CRI	värviesitusindeksi mõõt vahemikus 0 kuni 100
GSM	globaalne mobiilsidesüsteem
CCT	korreleeritud värvsustemperatuur
ALAN	(<i>artificial light at night</i>) ööaegne tehisvalgus
CLO	constant liht output

Mõisted

Pimeda aeg on ajavahemik ehist koiduni, kui loodusliku valguse vähesuse tõttu on nähtavus alla 300 meetri [1].

Piirangu aeg on ajavahemik, mille kestev kehtivad rangemad nõuded (vääriva valguse piiramisele) [2].

Halb nähtavus on ilmast või muudest nähtustest (udu, vihm, lumesadu, tuisk, hämarus, suits, tolm, vee- ja poripritsmed, vastupäike) tingitud ajutine olukord, kui teel vaadeldavat objekti ei ole võimalik taustast eristada kaugemalt kui 300 meetrit [1].

Piiratud nähtavus on olukord, kui tee kurvid, tõusuharjad, teeäärsed rajatised, haljastus või teel olevad takistused vähendavad nähtavust teel niivõrd, et sellel teelõigul lubatud suurima kiirusega sõitmine võib muutuda ohtlikuks [1].

Liiklus on jalakäija(te) või sõiduki(te) liikumine ja paiknemine teel. Liikluseks loetakse ka kariloomade ajamist ja ratsutamist [1].

Liikleja on isik, kes osaleb liikluses jalakäija või juhina [1].

Jalakäija on jalgsi või ratastoolis liikleja. Jalakäijaks loetakse ka rula, rulluiske või -suuski, tõukeratast või -kelku või muid sellesarnaseid abivahendeid kasutav liikleja [1].

Lamp on optilise, enamasti nähtava kiirguse tekitamiseks valmistatud kiirgusallikas [2].

Liiteseadis; ballast toiteallika ja ühe või mitme lahenduslambi vahele lülitatav seadis, mis peaaesjalikult on ette nähtud lambi (või lampide) voolu piiramiseks vajaliku väärtuseni [2].

Valgusti on seade, mis jaotab, filtreerib või muundavad ühe või mitme lambi valgust ja mis sisaldab peale lampide kõiki osi, mis on ajalikud lampide kinnitamiseks ja kaitseks ning, kui vaja, vooluahelaid ja seadiseid ühendamiseks toitevõrguga [2].

Häiriv valgus (*obtrusive light*) puistevalgus, mis oma koguse, suuna või spektraalkoostise tõttu suurendab antud oludes tülikut, ebamugavust ja segadust või vähendab võimet näha vajalikku teavet [2].

Puistevalgus (*spill light, stray light*) valgustuspaigaldises tekitatud valgus, mis langeb väljapoole hoonet või piirkonda, mille jaoks on valgustuspaigaldis on projekteeritud [2].

(sõidutee teepinna heleduse) Pikiühtlus (*longitudinal uniformity*) sõidutee teepinna kõigi sõiduradade keskjoontel määratavate vähima ja suurima heleduse jagatise vähimväärtus [2].

Üldühtlus ehk heleduse ühtlus (*luminance uniformity*) pinna vähima ja keskmise heleduse jagatis [2].

Värviesitus (*colour rendering*) valgusallika mõju esemete tajutavale värvile, kui seda teadlikult või mitteteadlikult võrreldakse tajutava värviga, mis tekib nende valgustamisel etalonvalgusallikaga.[2]

Värviesituse üldindeks (*general colour rendering index*) kaheksa kindla testvärvinäidise järgi määratud värviesituse erindeksite keskvärtus. [2] Värviesituse üldindeks näitab, kui palju valgusallika poolt valgustatud objekti värvid erinevad etalonvalgusallika poolt tekitatavatest värvidest. [3]

Värelus (*flicker*) nägemisaistingu ebapüsivuse mulje, mis on tingitud valgusstiimuli heleduse või spektraaljaotuse ajalisest vaheldumisest. [2]

Heledus (*luminance*) iseloomustav valgustugevuse näivat tihedust valgusandval või peegeldaval pinnal, s.t valgustatud ala helendust, mis jõuab vaataja silma [3].

Keskmine heledus (*average luminance*) on heleduse keskmine väärtus üle sätestatud pinna [2].

Valgusvoog (*luminous flux*) on lambi kiirgusvoo valguslikku toimet iseloomustav suurus [3].

Hooldetegur (*maintenance factor, MF*) valgustuspaigaldises pärast teatavat ajavahemikku toodetava valgustustiheduse ja uues paigaldises toodetava valgustustiheduse jagatis [2].

Valgustustihedus (*illuminance*) mingit pinna punkti sisaldavale tegelikule või kujuteldavale pinnaelemendile langeva valgusvoo $d\Phi_v$ ja selle elemendi pindala dA jagatis [2].

Valgustustiheduse hooldeväärtus (*maintained average illuminance*) on väärtus, millest allapoole sätestatud piirkonna valgustustihedus ei tohi langeda (ühik: luks, lx) [2].

Valgusviljakus (*luminaire luminous efficacy*) emiteeriva valgusvoo ja tarbitava võimsuse jagatis [2].

Paigalduskalle nurk valgusti tingliku telje ja rõhttasandi vahel pärast valgusti paigaldamist oma kohale [2].

Ahendamine (*cut-off*) tehniline võtte suure heledusega valgusallika (valgusallikate) ja pindade valguskiirguse otsese nähtavuse eest varjamiseks, et vähendada rägust või vähendada valguskiirguse levimist horisontaaltasandist kõrgemale [2].

Rägus (*glare*) nägmisolukord, mis tundub ebamugav või mille tagajärjel detailide või esemete nähtavus halveneb ja mis on tingitud heleduse ebasoodsast jaotusest, liigsest heledusest või liigtugevatest kontrastidest [2].

Pimestusrägus (*disability glare*) rägus, mis halvendab esemete nähtavust. Kuid ei pruugi seejuures esile kutsuda ebamugavustunnet [2].

Ebamugavusrägus (*discomfort glare*) rägus, mis põhjustab ebamugavustunnet, kuid ei pruugi seejuures halvendada esemete nähtavust [2].

Valgusreostus (light pollution) tähistab olukorda, kus tehisvalgus ületab funktsionaalse eesmärgi piiri, levides soovimatult ajas, ruumis või spektraalselt. [4]

Taevakuma (skyglow) on öine taeva üldine heleduse suurenemine, mis tuleneb kunstliku valguse hajumisest atmosfääris ning takistab tähtede ja teiste taevaobjektide nähtavust. [5]

Pealetükkiv valgus (light trespass) tähendab olukorda, kus valgus levib soovimatult teisele kinnistule või alale, põhjustades seal häiringuid või visuaalset ebamugavust. [5]

Häiriv valgus (obtrusive light) viitab igasugusele tehisvalgusele, mis avaldab negatiivset mõju inimese heaolule, ökosüsteemidele või visuaalsele keskkonnale. [5]

Visuaalne risustumine (clutter) on liigsete ja korratult paigutatud valgusallikate kogum, mis tekitab visuaalset koormatust ja vähendab ruumilist selgust. [5]

Liigne valgustatus (over illumination) tähistab olukorda, kus valgustugevus ületab tegeliku vajaduse, põhjustades energia raiskamist ning võimalikke tervise- ja keskkonnahäireid. [5]

Ülepoolne talituskasutegur (*upward light output ration, ULOR*) oma lampide ja seadistega komplekteeritud valgusti ülemisse pooruumi kiirguva valgusvoo ja valgusti lampide valgusvoogude summa jagatis, kui valgusti valgusvoog on mõõdetud sätestatud praktilistes käiduoludes, samade lampide valgusvoog samade seadiste korral aga sätestatud oludes väljapool valgustit. [2]

ZigBee on lühikese levialaga traadita sidesüsteem, mis võimaldab energiakuluefektiivset tänavavalgustuse juhtimist tihedates linnakeskkondades, kus valgustid asuvad lähestikku ja moodustavad omavahel ühendatud võrgustiku (mesh-võrk). [6]

LoRaWAN on pika leviala ja madala energiatarbega juhtmevaba sideprotokoll, mis sobib eriti hästi hajaasustusega piirkondadesse, võimaldades ühe keskse jaama kaudu juhtida sadu või tuhandeid valgustuspunkte. [6]

NB-IoT ehk kitsaribaline asjade internet (Narrowband Internet of Things) on mobiilsidevõrkudel põhinev tehnoloogia, mis võimaldab madala voolutarbega seadmete usaldusväärset ja pikaajalist ühendust tänavavalgustuse kaugseireks ja juhtimiseks. [6]

LTE-M on mobiilsidevõrgu lahendus, mis võimaldab edastada suuremaid andmehulkasid ja toetab reaalajas valgustuse juhtimist, olles sobiv kohtadesse, kus vajalik on kiire ja pidev ühendus. [6]

Wi-Fi on tavaline lähivõrgu tehnoloogia, mida saab kasutada tänavavalgustuse juhtimiseks ainult piiratud levialas ja olukordades, kus olemas on pidev toide ja juurdepääs võrgule. [6]

GSM/2G/3G/4G/5G on mobiilsidetehnoloogiad, mis võimaldavad valgustuse kaugjuhtimist läbi olemasolevate sidevõrkude, pakkudes erineval tasemel ribalaiust, leviala ja andmeedastuse kiirust, sõltuvalt kasutatavast generatsioonist. [6]

Pimeda infrastruktuur (*dark infrastructure*) viitab omavahel seotud looduslike, poollooduslike ja urbaniseeritud alade võrgustikule, mida iseloomustab madal öise tehisvalguse (ALAN) tase ning mille eesmärk on tagada ökoloogiline sidusus ja ööpimeduse säilimine, toetades sellega elurikkuse kaitset, ökosüsteemide taastumist ja inimeste heaolu [7].

SISSEJUHATUS

Linnaruumi valgustus on tänapäeva urbaniseeruvast maailmas muutunud oluliseks planeerimisprobleemiks. Maailma rahvastiku kiire kasv, linnade laienemine ja inimitaristu areng on 20. sajandi teisel poolel kaasa toonud valgusreostuse taseme järjepideva tõusu. Hinnanguliselt kasvab valgusreostuse tase märkimisväärselt, kasvades kuni 10% aastas keskmisel maailmas [8] ning ulatudes 20% kasvuni Aasias [9]. Selle tulemusel väheneb järjest enam looduslike pimedate alade osakaal. Täna elab üle 83% maailma rahvastikust ning rohkem kui 99% Ameerika Ühendriikide ja Euroopa elanikest valgusreostusega taeva all [10]. Üle kolmandiku inimkonnast, sealhulgas 60% eurooplastest, ei näe oma kodust taevavalguse tõttu Linnuteed [10].

Eestis on suurim valgusreostuse allikas Tallinn, mis on Eesti riigi suurim linnaline asula, kus asub märkimisväärne hulk valgustuspaigaldisi [11]. Valgusreostust põhjustavad peamiselt amortiseerunud, täielikult varjestamata või halvasti suunatud valgustid, mille valgusvoog ulatub väljapoole valgustatavat piirkonda, põhjustades puistevalgust ning häirivat valgust. Tallinn sarnaselt 23%-le maailma maismaast, mis asub laiuskraadide 75°N ja 60°S vahel, seisab silmitsi järjest süveneva valgusreostusega ning vajadusega suurendada valgustuse tõhusust ja jätkusuutlikkust [10].

Kuigi Eestis on valgusreostuse alane teaduslik tegevus alles algusjärgus, on mitmetes Euroopa riikides, nagu Soome ja Saksamaa, läbi viidud süsteemseid kaardistamisi ning rakendatud kohalikul tasandil piiranguid öise valgustuse kasutamisel [5]. Eestis on valgusreostuse ohjamise teemaarutulus siiski alles algusjärgus.

Valgusreostuse ohjamine on oluline teema, kuna linnaruumi valgustus mõjutab oluliselt inimeste elukvaliteeti, turvalisust ning ümbritsevat keskkonda. Valgustuslahenduste planeerimine, mis arvestab nii keskkonna- kui ka majanduslike aspekte, on muutumas kaasaegses ühiskonnas üha prioriteetseks ülesandeks ja väljakutseks. Teadusliku aluse loomine valgusreostuse ohjamiseks, pimedate alade kaitseks ja kategoriseerimiseks aitaks luua parema aluse Tallinna valgustus kvaliteedi ja tõhususe analüüsiks.

Valgusreostuse mõju ulatub nii inimeste igapäevaelust kuni ökosüsteemide toimimiseni. Peale laastavat mõju inimese füsioloogilistele ja psühholoogilistele toimetulekule ning ümbritsevale elusloodusele, halvendab valgusreostus ka inimkonna võimet tajuda oma kohta universumis, varjates looduslikku tähistaevast ning mõjutades kultuurilisi ja teaduslikke praktikaid. Linnades on tähed tuhmunud – öine taevast näitab vaid käputäit tähti, muutes tähistaeva jälgimise peaaegu mõttetuks. Valgusreostus mõjutab ka teaduslikku uurimistööd, halvendades asteroidide ja

komeetide nähtavust ning vähendades võimalusi nende kosmiliste objektide jälgimiseks ja mõistmiseks.

Tänavavalgustus, mis Euroopa Liidu andmetel moodustab ligikaudu 1–2% kogu elektritarbimisest, võib kohalikul tasandil ulatuda kuni 40–50% omavalitsuste energiakasutusest [12]. Tänavavalgustuse liigne ja valesti suunatud valgustus suurendab CO₂ heitmeid ning energiakulu. Tõhusate ja keskkonnasäästlike valgustuslahenduste rakendamine omab märkimisväärset potentsiaali nii keskkonnamõjude vähendamisel kui ka kulude optimeerimisel.

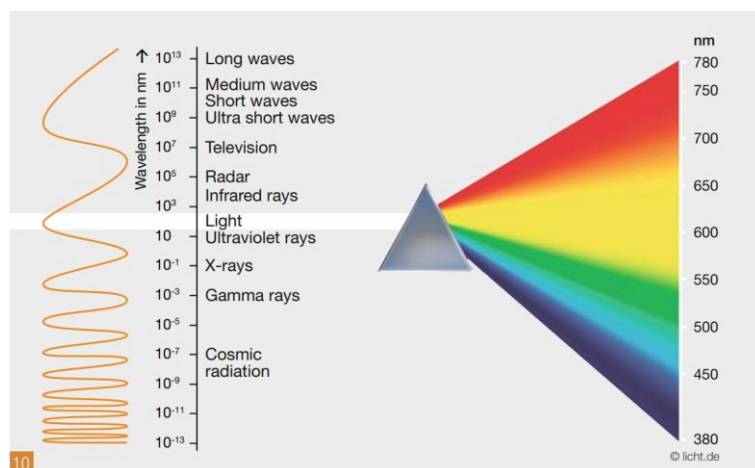
Käesoleva magistritöö eesmärk on hinnata Tallinna Mustamäe linnaosa näitel olemasolevate tänavavalgustuslahenduste mõju valgusreostusele. Töös analüüsitakse kehtivaid valgustusstandardeid, rahvusvahelisi praktikaid ning valgustustehnilisi parameetreid eesmärgiga esitada teaduspõhised ettepanekud, kuidas muuta linnaruumi valgustussüsteem keskkonnateadlikumaks, energiatõhusamaks ning paremini planeeritud linnaruumiga kooskõlas olevaks. Töö tulemused loodetakse rakendada Tallinna linna valgustusstrateegia täiendamisel ja linnakeskkonna kvaliteedi parandamisel.

1. TÄNAVAVALGUSTUS

Käesolevas peatükis käsitletakse tänavavalgustust kui olulist keskkonnategurit, pöörates tähelepanu selle tehnoloogilisele arengule, funktsioonile linnaruumi kujundamisel ning rollile kaasaegses ühiskonnas. Selgitatakse tehisvalguse olemust ja kasutust linnakeskkonnas, selgitatakse erinevaid valgusallikate tüüpe ning käsitletakse nende optilisi ja energiatehnilisi omadusi.

1.1 Tehisvalgus

Tehisvalgus on määratletav kui inimeste poolt sihipäraselt toodetud valgus, mille eesmärk on asendada või täiendada looduslikku päikesevalgust pimedal ajal või muudes vähese valgustatusega oludes. Valgustustehnilises mõttes hõlmab valgus elektromagnetkiirgust lainepikkuste vahemikus umbes 380–780 nanomeetrit, mis vastab inimsilma tajutavale nähtavale spektrile (vt Joonis 1.1). [13]

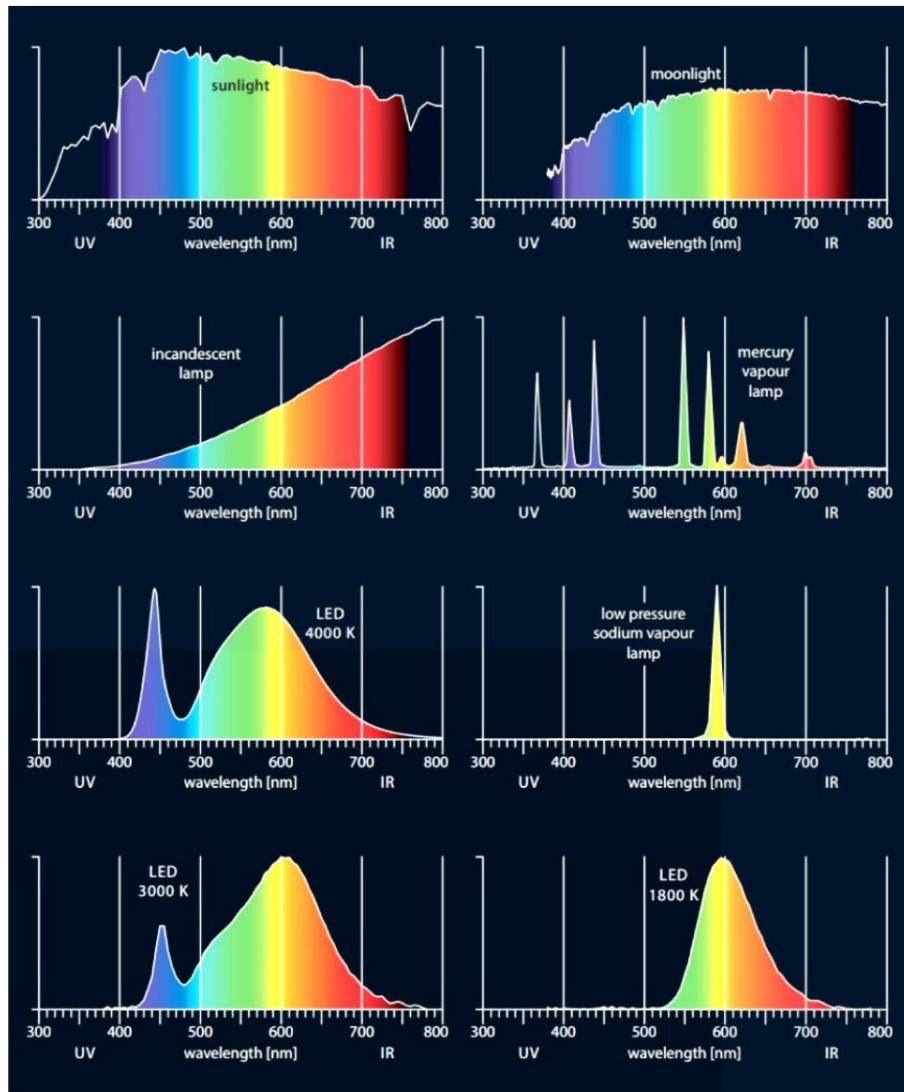


Joonis 1.1 Silmaga tajutav valgusspekter[13].

Inimsilm on inimese peamine meeleeelund, mille kaudu omandatakse üle 80% ümbritsevast informatsioonist. Valgus on keskkonnamõjur, mis võimaldab visuaalset tajumist. Ilma valguseta ei ole nägemine võimalik. Samas on inimsilm võimeline tajuma vaid kitsast osa elektromagnetkiirguse spektrist. [13]

Tehisvalgus erineb looduslikust päikesevalgusest eelkõige oma spektraalkoostise poolest [5]. Kunstlikud valgusallikad kiirgavad elektromagnetlainet erinevates lainepikkustes sõltuvalt valgusallika tüübist, kasutatavatest materjalidest ja tehnoloogiast. Päikesevalgus, mida peetakse visuaalsete ja värviesituse katsete etaloniks, on tasakaalustatud spektriga kiirgusallikas, mis sisaldab ühtlaselt kogu nähtavat valgusspektrit, samuti infrapuna- ja ultraviolettkiirgust (vt Joonis 1.2) [5].

Kuuvalgus on tegelikult peegeldunud päikesevalgus, mis on Kuupinna koostisest ja tekstuurist tingituna selektiivselt filtreeritud, mille tagajärjel on kuuvalguses vähem lühikese lainepikkusega kiirgust, eriti sinise spektriosa komponente. [5]



Joonis 1.2 Looduslike ja kunstlike valgusallikate valguse (kiirguse) spektraalne jaotus [5]

Hõõglambid kiirgavad sujuva ja katkematu spektraaljaotusega kiirgust, mille intensiivsus kasvab pikema lainepikkuse suunas. Kuna lühikese lainepikkusega kiirguse (sinise valguse) osakaal on väike, on nende kiirgus optiliselt soe ja kollakas [5]. Hõõglambi värvsüsteematuur jääb tavaliselt vahemikku 2700–3000 K.

Elavhõbelambid ja metallhalogeniidlambid kiirgavad spektraalselt väga ebahomogeenset valgust, kus domineerivad eredad spektraalpiigid, sealhulgas UV-kiirguse, sinise ja roheline valguse alal [5]. Käesolev spekter võib põhjustada suurt rägust ning sobib pigem tööstuslikele aladele, mitte avalikule linnaruumile [13].

Kõrgrõhu- ja madalrõhunaatriumlambid kiirgavad äärmiselt kitsa spektriga kiirgust, peamiselt 589 nm lainepikkusel (kollakas-oranž ala), ning nende värviesituse üldindeks (R_a) on väga madal [5],[13]. Nende valgus ei võimalda esemete loomulikku värvieristust ning on seetõttu sobimatu jalakäijate alade valgustamiseks [13].

Valgusdiodid pakuvad laia valikut spektraalkoostise reguleerimise võimalusi, sõltuvalt nende värvsüsteemtemperatuurist. Leedide puhul esineb sageli tugeva intensiivsusega piik sinise spektriosa juures (umbes 450 nm), millele järgneb laiem ja tasasem kollakas-punakas spekter. [5],[13]

Tänavavalgustuses kasutatavastet valgusallikatest räägitakse lähemalt lõputöö Peatükis 1.4.

1.2 Tehisvalguse areng tänavavalgustuses

Tehisvalguse kasutuselevõtt avalikus ruumis on ajalooliselt olnud seotud vajadusega suurendada ohutust ja pikendada aktiivset tegutsemisaega. Paleoliitikumi perioodil kasutati valgustuseks tuld ja looduslikke materjale, millest leiti jälgi nt Lascaux' koopamaalingute juures. Hilisemad tsivilisatsioonid rakendasid õlilampe ja küünlaid, mis pakkusid piiratud valgusvoogu, kuid olid olulised nii liikumise kui kaitse tagamise seisukohalt.[14],[15]

Organiseeritud tänavavalgustuse alguseks peetakse 15. sajandi algust, mil Londoni linnapea Henry Barton kehtestas õlilaternate paigaldamise kohustuse. Valgustus omandas lisaks praktilisele nähtavuse funktsioonile ka korra tagamise rolli. 18. sajandil välja töötatud Argandi õlilamp parandas oluliselt valguskvaliteeti, kuid selle keerukas hoolduspiirang vähendas masskasutust. [15],[16]

19. sajandi alguses toimus valgustuse arengus oluline tehnoloogiline nihe gaasivalgustuse kasutuselevõtuga. Esimene gaasilatern paigaldati Londonis 1807. aastal ning 1812. aastal rajati seal ka esimene gaasitootmistehas. Gaasivalgustuse levik võimaldas esmakordselt öist linnaruumi laialdaselt ja püsivalt valgustada, kujundades uue linnakogemuse ja avaliku ruumi kasutuskultuuri. Järgnenud kümnenditel levisid gaasilaternad mitmetesse Euroopa ja Ameerika suurlinnadesse, muutes valguse kättesaadavamaks ja juhitavamaks. [17]

20. sajandi teisel poolel algas elektrivalgustuse revolutsioon, mille käigus sündis üks tähtsamaid valgustustehnilisi leiutisi. Edisoni 1879. aastal leiutas hõõglambi ja konstantse pingega dünamo, mis võimaldas hõõglampe ühendada rööbiti [3]. Edisoni patenteeritud süsinikkiust hõõglamp kujunes esimese praktilise ja laialdaselt

kasutatava elektrivalgusallikana, mis oli töökindel, lihtsalt kasutatav ja sobis nii era- kui ka avalikku ruumi. Elektrivalgustuse arengut toetasid samaaegselt elektrivõrkude rajamine ning Nikola Tesla ja George Westinghouse'i panus vahelduvvoolusüsteemide arendamisse. Teadlaste arengud võimaldasid elektrienergia levikut suurel skaalal ning sillutasid teed elektrilise tänavavalgustuse massilisele kasutuselevõtule. [16]

21. sajandi alguseks oli elektrivalgustus saanud arenenud tööstusriikides standardiks. Hõõglampide ja hilisemate lahenduslampide (nt naatrium- ja elavhõbelambid) kasutamine võimaldas valgustada nii liiklusteid, jalakäijate alasid kui ka tööstusparke. Samal ajal hakati teadvustama ka tehisvalgusega kaasnevad negatiivsed kõrvalmõjud nagu räigus, valgusreostus ja suurenev energiakulu. Tänavavalgustus kujunes ühelt poolt linnaelu lahutamatuks osaks, teisalt ka valgustehniliseks ja keskkonnaküsimuseks seoses tekkiva valgusreostusega, mille lahendamine on oluliseks ülesandeks jätkusuutlikule linnaplaneerimisele. [16]

1.3 Tänavavalgustussüsteemid tänapäeval

Tänapäevane tänavavalgustussüsteem kujutab endast terviklikku tehnoloogilist lahendust, mis ühendab endas optilised, elektrilised ja mehaanilised komponendid eesmärgiga tagada ohutu, energiatõhus ja keskkonnamõjudele vastupidav avaliku ruumi valgustus. Süsteemi eesmärk on tagada avalikus ruumis visuaalne ohutus, energiatõhus toimimine ning valgusreostuse minimaalne tase. Süsteemi keskne element on valgusti, mis tekitab, suunab ja modifitseerib valgusvoogu, suunates selle täpselt vajalikesse piirkondadesse. Valgusti koosseisu kuuluvad valgusallikas, reflektorid, läätsed, refraktorid, kaitsekorpused, juhtseadis ning mehaanilised kinnitus- ja ühenduselemendid, mis võimaldavad seadet kinnitada ja ühendada elektrivõrguga. [18]

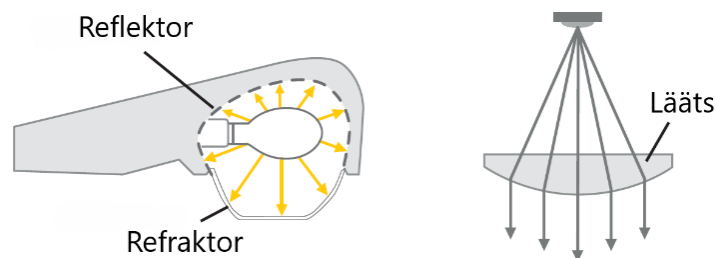
Tänavavalgustuse põhifunktsioon on liiklejate ja objektide nähtavaks muutmine, võimaldamaks sõidukijuhtidel aegsasti märgata võimalikke ohte. Efektiivne valgustus täidab järgmisi eesmärgi:

- Sõidukite liiklusohutus – nähtavuse parandamine ja liiklusõnnetuste vähendamine; [19]
- Jalakäijate turvalisus – jalakäijate parema nähtavuse ja turvatunde tagamine; [19]
- Avaliku ruumi kasutatavus – öise majandustegevuse ja sotsiaalse kasutuse toetamine. [19]

Läätsete kasutamine võimaldab valguse sihipärasest jaotust, võimaldades valgusvihu dünaamilist juhtimist näiteks selektiivse sisse- või väljalülitamise ning hämardamise kaudu. Selline lähenemine võimaldab valgustuse kohandamist vastavalt teekatte omadustele, valgustuspostide paigutusele ja ilmastikutingimustele. [18]

Reflektor ehk peegeldi on valgusti sisemine komponent, mis peegeldab valgusallikast lähtuvat valgust soovitud suunas, suurendades süsteemi valgusviljakust ja vähendades valguse hajumist ebaefektiivsetesse piirkondadesse. Sel viisil aitab reflektor minimeerida valgusreostust ja visuaalset pimestamist, suunates valgusvoo täpselt soovitud alale. [18] Reflektori peegeldusomadused määravad valgusti valgusjaotusdiagrammi. Enim kasutatav suure peegeldusteguriga reflektormaterjal on alumiinium, mida on lihtne töödelda, anodeerida kaitseoksiidikihiga, mis on ka soodne hinna poolest. [3]

Refraktor ehk valguse murdja on valgusti alumises osas paiknev optiline element, mille ülesandeks on valgusvihu täiendav kujundamine murdumise või hajumise kaudu. Refraktor aitab tagada valgusjaotuse ühtlust ning parandada valgustuse sobivust erinevatele linnaruumi geometriatele. Lisaks toimib refraktor ka mehaanilise kaitsena, mis kaitseb valgusallikat ja optilisi elemente välismõjude eest (vt Joonis 1.3). [18]



Joonis 1.3 Reflektor (peegeldi), refraktor (murdja) ja lääts tänavavalgustites (autori poolt kohandatud) [18]

Struktuuriliselt võib üks valgusti koosneda ühest või mitmest lambist, kusjuures iga lamp võib sisaldada omakorda ühte või enam valgusallikat.

1.4 Tänapäeva tänavavalgustus valgusallikad

Tänapäevane tänavavalgustus on kujunenud läbi ulatusliku tehnoloogilise ümberkujundamise, mille käigus on liikunud traditsioonilistelt valgusallikatelt energiatõhusamate ja töökindlamate lahenduste suunas. Ajalooliselt kasutusel olnud

hõõg- ja halogeenlambid on nüüdseks täielikult välja vahetatud, eeskätt nende madala valgusviljakuse, lühikese kasutusea ja kõrge energiatarbimise tõttu võrreldes valgusdiodidega. Seetõttu ei käsitleta neid alljärgnevas käsitluses üksikasjalikult.

Traditsioonilistes lahendustes 20. sajandi lõpus ja isegi veel 21. sajandi alguses kasutati tavapäraselt madal- ja kõrgrõhulampe, mille eeliseks oli lihtne vahetatavus ja pikk eluiga. [18] Kaasaegsed tänavavalgustussüsteemid toetuvad valdavalt valgusdiodidel põhinevatele süsteemidele (leedid) ja endiselt välja vahetamata jäänutele gaaslahenduslampidele (sh kõrgrõhu-naatrium- ja metallhalogeniidlambid). Leedvalgustid moodustavad väljavahetatavatest valgustuspaigaldiste valgustitest juba enam 70% [20]. Mõlemal tehnoloogial on iseloomulikud optilised, elektrilised ja eksploatatsioonilised omadused, mis on määranud nende sobivuse avaliku ruumi valgustamiseks erinevates kontekstides. Järgnevalt käsitletakse nende valgusallikate tehnoloogilist olemust, tüüpilisi kasutusvaldkondi ning arengutendentse.

1.4.1 Gaaslahendusvalgustid

Gaaslahendusvalgustid on tänavavalgustuse arenguloos täitnud olulist rolli, kujunedes 20. sajandil üheks levinumaks tehnoloogiliseks lahenduseks. Gaaslahendusvalgustid, mida sageli nimetatakse ka kaarlahenduslampideks, toimivad elektrilahenduse ehk kaare tekitamise teel gaasi või auruga täidetud torus. Ioniseerunud gaas moodustab plasmakeha, mis kiirgab valgust vastavalt kasutatud gaasi ja lisandite spektraalomadustele. [13] Lambi klaaskolb peab tagama gaaslahendustorus konstantse temperatuuri ja kaitsma lahendustoru füüsikaliste mõjude eest. Kõik kaarlahenduslambid vajavad süüteseadist ning tööiga sõltub muuhulgas tööasendist - kõrvalekaldumine normaalasendist võib eluiga oluliselt vähendada. [3]

Tänavavalgustuses endiselt kasutatavad gaaslahendusvalgustid jagunevad kaheks: madalrõhulambid ja kõrgrõhulambid. Eesti oludes on kõrgrõhulampidest olnud kõige laialdasemalt kasutusel kõrgrõhu-naatriumlambid, metallhalogeniid- ning elavhõbelambid. Madalrõhulampidest on esindatud peamiselt madalrõhu-naatriumlambid, mida kasutati pikemat aega eelkõige Lõuna-Euroopa riikide välisvalgustuses, kuid mis on mujal maailmas jäänud haruldasemaks. [3]

Madalrõhu-naatriumlambid on kõrge valgusviljakusega, kuid kiirgavad ainult kitsa spektriga monokromaatilist kollast valgust, mille R_a on praktiliselt null. Tüüpiline tööiga on ligikaudu 18 000 tundi, kuid lampide süttimine võtab aega 12–15 minutit ning korduv käivitamine võib vajada täiendavat jahutustsükli. Spektraaljaotuse tõttu ei sobi need lambid aladele, kus on vajalik objekti täpne värviedastus. Madalrõhu-

naatriumlampide kasutuspiirkonnaks on peamiselt tunnelid ja kiirteed, kus valguse kvantiteet on olulisem kui valguse kvaliteet. [3]

Kõrgrõhu-naatriumlambid annavad tugevalt kollakas-oranži valgust, mille valgusviljakus võib ulatuda 150 lm/W. Spektraaljaotuses domineerib samuti kollane spekter, kuid võrreldes madalrõhu-naatriumlampidega sisaldab see rohkem kõrvalkomponente, võimaldades veidi paremat värviedastust ($R_a \approx 20-25$). [3] Vaatama sellele ei sobi naatriumlambid valgustama keskkondi, kus värvieristus on oluline. Teatud kõrgrõhu-naatriumlampide kasutamine võimaldab lihtsat asendust vananenud elavhõbelampide asemel, mis vähendab moderniseerimiskulusid. Kõrgrõhu-naatriumlampide laialdane levik oli tingitud nende kõrgest pikast eluajast (kuni 24 000 tundi), mille juures enneaegsete rikete määr oli madal (alla 5%) isegi intensiivse töötsükli korral, ent pika tööea säilitamine sõltub korrektsetest töötingimustest [3],[21]. Kõrgrõhu-naatriumlampides puudub süüteelektrood, mistõttu nende käivitamiseks on vajalik kõrgepingeimpulss. Lambi süttimine võib kesta kuni kolm minutit, samas kui jahtumisjärgne taaskäivitamine võib võtta aega kuni üks minut. Kõrgrõhu-naatriumlampide spektraaljaotust on püütud aja jooksul täiustada, tõstes töörohku, mille tulemusena on välja töötatud niinimetatud valge naatriumlamp. Siiski kaasneb kõrgema rõhuga kaarlahendustoru tihendite suurem läbilaskmine, mis lühendab seadme eluiga. [3]

Kõrgrõhu-elavhõbelambid on vanimad elektril põhinevad valgusallikad, mille tööpõhimõte põhineb kvartsist kaarlahendustorus paiknevatel elavhõbedaurudel. Spekter sisaldab intensiivseid UV-kiirguse komponente ning roheka alatooniga nähtavat valgust. Valgusvoog ja värviedastus R_a on madalad (tavaliselt <50), kuid kolbi välispinnale fosforkatte lisamisega on võimalik neid parameetreid parandada (kuni $R_a \approx 60$). Lambi tööiga sõltub liiteseadisest ning võib ulatuda 12 000 tunnini. Soojenemisaeg on tavaliselt 7–10 minutit. Keskkonnakaalutlustest tulenevalt, sealhulgas elavhõbeda sisalduse tõttu, on nende kasutamine mitmetes Euroopa riikides keelatud ning järkjärguline asendamine kaasaegsemate lahendustega on vältimatu. [3]

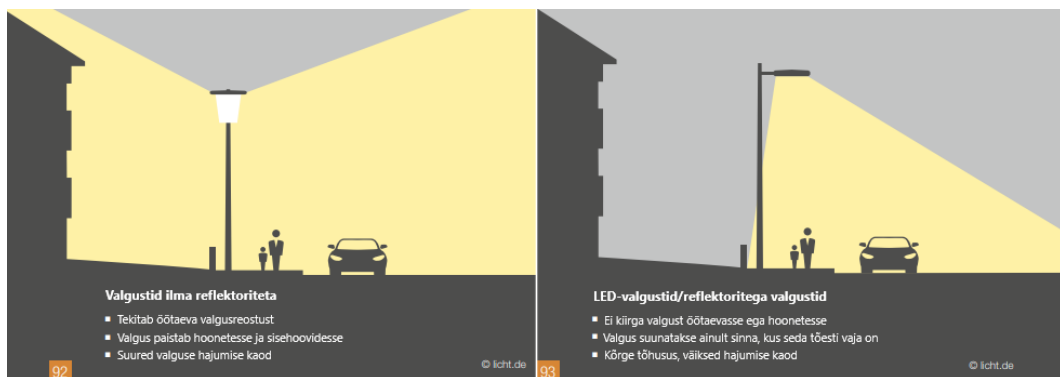
Metallhalogeniidlambid põhinevad samuti kaarlahendusele ning sisaldavad lisaks elavhõbedale metalljodiide (nt naatrium-, tallium-, indium-, skandiumjodiid). Tulemuseks on lai tasakaalustatud spektriga valgus, mille värviedastus R_a võib ulatuda üle 80 ning valgusviljakus jääda vahemikku 80–115 lm/W. Metallhalogeniidlambid pakuvad küll paremat värviedastust ja laiemat spektraalset jaotust, kuid nende tööiga jääb vahemikku 10 000–20 000 tundi, sõltudes töötingimustest ja tööasendist. Kuigi metallhalogeniidlampidel on hea valgusviljakus ja värviedastus, muudavad nende tööasenditundlikkus ja piiratud kasutusiga nad tänapäevastes valgustuslahendustes

vähem atraktiivseks võrreldes leedtehnoloogiaga. Nende soojenemisaeg on veidi pikem kui kõrgrõhu-naatriumlampidel - ligikaudu kuni 3–4 minutit. [3],[21]

Gaaslahenduslampide peamiseks puuduseks on nende optiline iseloom - valgus kiirgub ühtlaselt kõigis suundades, mis tähendab, et suur osa valgusvoost hajub või suunatakse soovimatutesse piirkondadesse, soodustades valgusreostust. Efektiivseks valgusjaotuseks vajavad need reflektoreid ja valguskorrektoreid, ent nende abil ei saavutata alati soovitud valgusjaotuse täpsust. Sellest tulenevalt loetakse gaaslahenduslampe tänapäevase valgustusplaneerimise kontekstis energiakulukateks ja vähem keskkonnamõeldavaks (vt Joonis 1.4).

Vaatamata eeltoodud puudustele olid gaaslahenduslambid (eriti kõrgrõhu-naatrium- ja elavhõbelambid) 20. ja 21. sajandi vahetusel endiselt laialdaselt kasutusel. Nende laialdast levikut toetasid madalad soetus- ja hoolduskulud, suhteliselt kõrge töökindlus ning sobivus olemasolevatesse valgustuspaigaldistesse. Gaaslahenduslampide kasutus pole tänapäeval täielikult lakanud, kuid nende osakaal väheneb pidevalt. Järk-järguline asendamine toimub peamiselt valgusdiodtehnoloogial põhinevate lahendustega, mille eeliseks on nii energiatõhusus, pikem eluiga kui ka oluliselt väiksem keskkonnamõju.

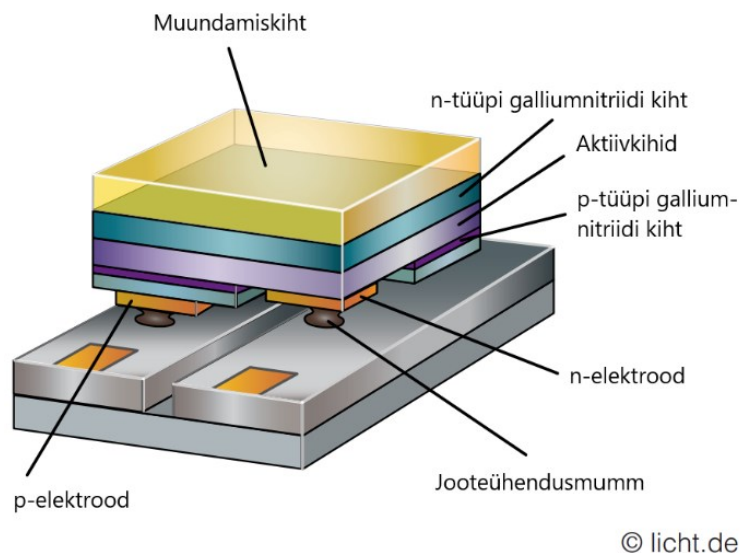
Üheks oluliseks teguriks gaaslahenduslampide asendamise protsessis on Euroopa Liidu ökodisaini määrused, mille eesmärk on piirata elavhõbedat sisaldavate lampide kasutamist [22]. Kuna turul on kättesaadavad piisavad alternatiivid leedvalgustite aga ka kõrgrõhu-naatriumlampide näol, siis lõpetatakse järk-järgult elavhõbeda kasutamine valgustites. Alates 2027. aasta veebruarist ei ole Euroopa Liidus enam lubatud müüa ega kasutada teatud spetsiaalse otstarbega lampe, mida varem tehnilise asendamatus tõttu erandina lubati [23]. Keelu alla kuuluvad lisaks halogeenlampidele ka mitmed suure intensiivsusega lahenduslambid, sealhulgas metallhalogeniidlambid [23].



Joonis 1.4 Erisu suunatud valgustuse ning suunamata vahel (autori poolt kohandatud) [13]

1.4.2 Valgusdioidid

Valgusdioidid ehk leedid (inglise keeles *light-emitting diode*, LED) esindavad elektroluminesentsil põhinevat valgusallikate tehnoloogiat, mis on viimastel aastakümnetel kujunenud kõige levinumaks ja olulisemaks lahenduseks nii sise- kui ka välisvalgustuses. Leedide tööpõhimõte tugineb pooljuhtmaterjalide omadusele muundada elektrienergia otse valgusenergiaks elektronide ja aukude rekombinatsiooni käigus spetsiaalses kihis, mida nimetatakse aktiivkihiks (vt Joonis 1.4). Selle tulemusel kiirgub valgus kindla lainepikkusega, mistõttu on leedid loomu poolest kitsaspektrilised. Valge valguse saamiseks kaetakse sinist valgust kiirgav diod spetsiaalse fosforkihiga, mis hajutab osa kiirgusest laiemale spektrivahemikule ning tekitab inimese silmale sobiva valge valguse. [24]



Joonis 1.4. Leedkiibi arhitektuur (autori poolt kohandatud) [24]

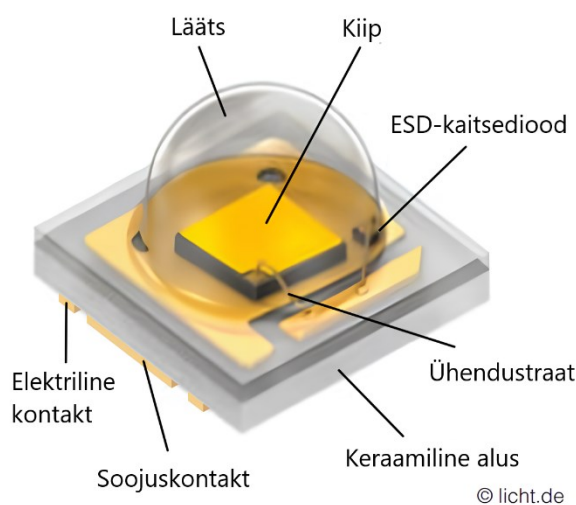
Valgusdioiditehnoloogia areng ulatub tagasi 1907. aastasse, mil Henry Joseph Round täheldas esmakordselt elektroluminesentsi nähtust. Esimene laialdasem rakendus leidis aset 1970. aastatel, kui värvilisi leede hakati kasutama elektroonikaseadmetes, näiteks kalkulaatorites ja digitaalkellades, peamiselt signaallampidena, kuna toona olid valgusdioidide valgusviljakus ja värviedastus madalad [24]. Alates 1990. aastatest on tehnoloogia arenenud, võimaldades luua tõhusalt valgust kiirgavaid diode. [3] Murranguks loetakse aga 1993. aastat, mil Shuji Nakamura töötas välja kõrge efektiivsusega sinise valgusdiodi, mis võimaldas hakata tootma valget valgust kiirgavaid leedallikaid [24]. Sellele järgnes valge valgusdiodi turuletoomine, mida võimaldas Nichia Chemical Company [3]. Alates 2000. aastatest on leedide valgusviljakus (valgusvoo ja tarbitud elektrivõimsuse suhe) kasvanud hüppeliselt: kui varased leeditüübid saavutasid maksimaalselt 20 lm/W, siis tänapäeva kvaliteetsed

valgusdiodid ületavad kergesti 200 lm/W piiri. Katsetes on saavutatud ka väärtusi kuni 230 lm/W, ent tavaliste kommertstoodetena leiduvad leedide valgusviljakus jääb sagemini vahemikku 120-180 lm/W. [24]

Tabel 1. Tabel erinevate lampide valgusviljakused [18], [25]

Valgusallika tüüp	Valgustõhusus (lm/W)	Tööiga (tundi)
Hõõglamp	~10-15	1000
Halogeenlamp	~20-40	2000
Madalrõhu naatriumlamp (LPS)	~150-200	18 000-24 000
Kõrgrõhu naatriumlamp (HPS)	~100-150	24 000
Metallhalogeniidlamp	~80-115	10 000-20 000
Valgusdiod (LED)	120-200+	50 000-100 000+

Tänapäevased leedid koosnevad epitaktsiaalselt kasvatatud kihtidest: aktiivkiht (nt InGaN) paikneb p-tüüpi ja n-tüüpi pooljuhtkihtide vahel. Kiibi elektrilised ühendused toimuvad läbi metallkontaktide ning diod on paigutatud epoksüümbrisesse koos optilise elemendi ja jahutuselementidega (vt joonis 1.5). [24]



Joonis 1.5 Valgusdiodide tööpõhimõte (autori poolt kohandatud) [24]

Tänapäeva tänavavalgustuses on järjest enam levinud valgusdiodidel põhinevad lahendused kasutamise, kuna leedid pakuvad võrreldes varasemate lahenduslampidega mitmeid eeliseid: [3]

- **Väike elektrienergia kulu:** Valgusdiodid tarbivad märkimisväärselt vähem elektrienergiat võrreldes traditsiooniliste valgusallikatega, mida väljendab ka

nende kõrge valgusviljakus. Tänu suurele efektiivsusele suudavad leedid saavutada vajaliku valgusvoo tunduvalt madalama võimsusega kui näiteks kõrgrõhu-naatrium- või metallhaliidid. Juhtimissüsteemidega kombineerituna on võimalik saavutada kuni 80% energiasäästu. Energiatõhusus omab kriitilist tähtsust just ulatusliku tänavavalgustuse korral, kus elektrienergia kulu moodustab valdava osa kogu süsteemi elutsüklikuludest (39%). [13], [21]

- **Eriti pikk tööiga:** Leedidel on võrreldamatu eluiga traditsiooniliste valgusallikatega, ulatudes 50 000 kuni 100 000 tunnini. Eriti pikk eluiga tähendab, et tüüpilistes kasustingimustes võib leedvalgusti töötada probleemideta 15–25 aastat. Eesti kliimatingimustes võib valgusti eluiga küündida pigem 25 aastani. Samuti rakendatakse nn CLO (Constant Light Output) tehnoloogiat, mis hoiab valgusvoo ühtlasena kogu kasutusaja vältel. Leedide tööea jooksul ei esine ootamatut läbipõlemist, vaid valgusvoog väheneb järk-järgult degratsiooni tõttu. [20]
- **Väikesed mõõtmed:** Valgusdiodid on oma olemuselt väga kompaktsed punktvalgusallikad. Väikesed füüsilised mõõtmed võimaldavad valgusdiode paigutada tihedalt, mis loob võimaluse disainida õhukesi, vormikohaseid ja isegi painduvaid valgusmoduleid. Kompaktsus muudab leedid sobivaks lahenduseks arhitektuurilises valgustuses, leedribades ning vähese ruumiga paigaldusoludes. Tänu leeditehnoloogia kompaksetele mõõtmetele saavad lambid ja valgustid moodustada ühe lahutamatu terviku, mis on eelduseks kõrge valgusviljakuse saavutamisele. [13],[24]
- **Vibratsiooni kindlus:** Erinevalt hõõglampidest ja gaaslahenduslampidest ei sisalda valgusdiodid habrast hõõgniiti ega rõhu all olevat gaasitäidist. Leedid on erakordselt vastupidavad mehaanilistele mõjudele, sealhulgas vibratsioonile ja põrutusele, mis muudab leedid sobivaks kasutamiseks keskkondades, kus mehaaniline vibratsioon on pidev, näiteks sõidukites, rongides või tööstuslikes seadmetes. [24]
- **Ultraviolet ja infrapunakiirguste puudumine:** Tavaliselt leedid kiirgavad kitsas spektrivahemikus ning ei emiteeri UV- ega IR-kiirgust, kui leed ei ole selleks spetsiaalselt disainitud. Ultraviolet ja infrapunakiirguste puudumine tagab valgustatavate nii pindade, objektide parema säilimise ja vähema kõrvalmõju elusorganismidele. [13],[24]
- **Väike soojuseraldus:** Erinevalt hõõglampidest, mis eraldavad kuni 90% energiast soojusena, toodavad leedid minimaalset soojuskiirgust. Vaatamata,

et leedide energiast muundub soojuseks (50%-70%), ei erita nad valgustatavale pinnale kuumust soojuskiirguse teel. Diodi enda temperatuur võib tõusta, ent temperatuuri tõus toimub peamiselt seadme sees ning temperatuuri saab kontrollida efektiivse jahutusega. [13],[24]

- **Hea värviesitus:** Tänapäeva leedid saavutavad värviesitusindeksi väärtusi 80 kuni 90 ja enam, mis tähendab, et need võimaldavad objektide värve edasi anda peaaegu sama täpselt kui loomulik päevavalgus. Kõrge spektraalne koostis võimaldab vähendada niinimetatud valgustuse moonutatavat mõju objektide värvusele. [13],[24]
- **Väikesed hoolduskuud:** Tänu pikale elueale ja madalale rikete arvule on leedvalgustitel oluliselt väiksem hooldusvajadus kui traditsioonilistel lampidel. Puudub vajadus sagedasteks pirnivahetusteks, mis vähendab tööjõukulusid, seisakuid ja varuosade vajadust eriti keerukates või raskesti ligipääsetavates valgustuspaigaldistes. Erinevalt varasematest tehnoloogiatest ei ole leedvalgusteid kavandatud valgusallika komponentide väljavahetamiseks. [13],[24]
- **Juhitavus/suunatus:** Valgusdioidide üks suurimaid eeliseid teiste valgusallikatega võrreldes on nende suunatavus. Leedkiibid kiirgavad valgust kindlas suunas ja väikese kiirgusnurgaga, mistõttu saab optikalahendusi kavandada märkimisväärselt täpsemalt, mis võimaldab suunata valgus otse soovitud piirkonda, vähendades valgusreostust ja suurendades süsteemi üldist energiatõhusust. Reflektorite vajadus väheneb oluliselt. Lisaks võimaldab punktallikate kasutamine valgusjaotust ühtlasemalt kujundada, parandades seeläbi teekatete valgustust. Leedvalgustites saavutatakse kõrge suunamistäpsus, kasutades individuaalseid läätseid iga üksiku valgusdiodi ees. [24] Juhitavus on tänavavalgustuse valgusreostuse vähendamise seisukohalt määrava tähtsusega!
- **Spektraalne paindlikkus:** Leedide spektraalne paindlikkus võimaldab toota eri värvistemperatuuriga valgusallikaid. Valgustemperatuuri vahemik jääb tavaliselt 2200–6500K. Madalama värvistemperatuuriga lahendusi eelistatakse linnavalgustuses, et vähendada sinise valguse mõju inimese ööpäevarütmile ja loodusele. Samas kõrgema temperatuuriga valgus (näiteks 4000K) parandab kontrastsust ning suurendab liiklusohutust ohtlikes piirkondades. [13],[24] Antud lõputöö kontekstis on spektraalne paindlikkus kesksel kohal, kuna spektraalsele paindlikkuse abil saab kujundada

looduskeskkonnale sõbralikuma, vähem invasiivse ja inimesele sobivama värvsustemperatuuriga valguskeskkonna öisel ajal.

Kuigi leedtehnoloogia pakub arvukalt eeliseid, mida varasemad tehnoloogiad ei oma, tuleb arvestada teatud leedtehnoloogia puudustega. Leedvalgustite tugev sinise spektriosa võib mõjutada inimese ööpäevarütmi ja põhjustada valgustundlikkust, samuti võib diodide värelus esile kutsuda peavalu ja visuaalseid häireid. Leedide töökindlus ja efektiivne toimimine sõltub suuresti jahutussüsteemidest. Ebapiisav soojuse hajutamine võib vähendada valgusvoogu ja seadme eluiga. [24]

Euroopa Liidu kliima- ja energiapoliitika eesmärgid on andnud tugeva tõuke energiatõhusate ja keskkonnasõbralike valgustustehnoloogiate arendamisele. Ökodisaini määruse kohaselt peavad kõik energiat tarbivad seadmed vastama kindlatele nõuetele energiatõhususe ja tehnilise teabe esitamise osas. Tootjad peavad esitama vajalikku teavet nii toote dokumentatsioonis kui ka veebis. Reguleerimise eesmärk on turult järk-järgult eemaldada vananenud ja ebaefektiivsed valgusallikad, nagu fluorestsentslambid, kõrgsurve-gaaslahenduslambid (eriti elavhõbedat sisaldavad) ja vananenud liiteseadised. Kuigi metallhalogeniidlampid on seni kuulunud erandi alla vastavalt komisjoni delegeeritud direktiivile (EL) 2022/278, kehtib lubatud erand elavhõbedade kasutamiseks metallhalogeniidlampides üksnes kuni 24. veebruarini 2027, mille järel muutub nende edasine kasutamine EL turul õiguslikult lubamatuks. [21],[24],[26]

Massiline üleminek valgusdioditehnoloogiale on toonud kaasa märkimisväärse tootmiskulude vähenemise ja seeläbi ka seadmete turuhindade languse. Selle tulemusel ei ole majanduslikult enam põhjendatud amortiseerunud kõrgrõhu-naatrium- või metallhalogeniidlampide asendamine sama tüüpi valgusallikatega. Otstarbekamaks on kujunenud üleminek kaasaegsetele, juhtimisvõimekatele leedvalgustussüsteemidele, mis võimaldavad dünaamilist valgusintensiivsuse reguleerimist ajapõhise või reaajas kogutud andmetel põhineva juhtimisloogika kaudu. Nutikad lahendused ei võimalda üksnes 30–80% ulatuses energiasäästu võrreldes traditsiooniliste kõrgrõhu-naatriumvalgustitega, vaid loovad ka eelduse valgusreostuse vähendamiseks ning inimese ja ökosüsteemidega kooskõlas oleva valguskeskkonna kujundamiseks [21], [24]

1.5 Tänavavalgustuse seos liiklusohutusega

Tänavavalgustuse roll liiklusohutuse tagamisel on kriitilise tähtsusega, eriti pimedal ajal ja halva nähtavusega tingimustes. Nii rahvusvahelised uuringud kui ka Eesti

statistika kinnitavad, et piisava ning korrektselt planeeritud valgustuse olemasolu teedel ja ristmikel vähendab märgatavalt liiklusõnnetuste riski ning aitab vältida surmaga lõppevaid juhtumeid. Näiteks Ameerika Ühendriikide 2022. aasta statistika kohaselt leidis 79% 7500-st jalakäijate liiklussurmast aset öisel ajal, viidates otseselt nähtavuse ja valgustuse kriitilisele tähtsusele.[27]

Eesti liiklusstatistika kinnitab samuti öiste tingimuste kõrgendatud ohtlikkust. Aastal 2024 toimus 70% surmaga lõppenud liiklusõnnetustest asulavälistel maanteedel, millest 17 (45-st) leidis aset pimedal ajal või hämaruses. Asulates registreeriti samal aastal 18 surmaga lõppenud õnnetust, millest 7 toimusid samuti öisel ajal. Korduvalt on täheldatud, et hukkunud jalakäijad ei kandnud helkureid, mis viitab nähtavuse olulisusele ja sellele, et valgustamata tingimustes jääb jalakäija juhile märkamatuks liiga hilja. [28] Kõige haavatavamateks kohtadeks on ülekäigurajad ja ristmikud, kus puudulik või ebaefektiivne valgustus võib piirata nähtavust nii autojuhtidele kui ka jalakäijatele [21].

OECD andmetel on öösel toimuvate surmaga lõppevate õnnetuste osakaal Euroopa riikides sageli kolmandik kuni pool kõigist liiklussurmatest, kuigi öine liiklus moodustab kogu liiklusmahust oluliselt väiksema osa, mis tähendab et liiklusõnnetuse risk ühesõidukikilomeetri kohta on öösel kordades kõrgem. [29]

1.6 Tänavavalgustite juhtimissüsteemid

Tänapäeva tänavavalgustuse juhtimissüsteemide areng on kujundanud valgustuse haldamise mitmekülgsemaks, energiatõhusamaks ja keskkonnateadlikumaks. Kui varasemalt piirdus juhtimine fikseeritud ajastamisega ehk valgustid lülitati sisse ja välja kindlatel kellaaegadel või valgustundlikkuse lävel, siis tänapäeval viiakse tänavavalgustuse juhtimissüsteemid üha enam üle dünaamilisele (ehk adaptiivsele) valgustusjuhtimisele. Adaptiivne valgustus tähendab, et valgustust reguleeritakse reaajas vastavalt liikumis- või liiklusvoole, keskkonna valgustusele, ilmastikule vms, pidades silmas nii visuaalseid vajadusi kui säästlikkust. Euroopa standardite (nt EVS-EN 13201) ja CIE soovitude järgi on adaptiivne juhtimine soovitatav strateegia, millega saab energiat märkimisväärselt kokku hoida ja vähendada valgusreostust, samal ajal tagades teede- ja liikumisohutuse. [30]

1.6.1 Astronoomiline taimer ja hämarandur

Astronoomiline taimer ehk astronoomiline kell ja hämarandur on tänavavalgustuses laialdaselt kasutatavad sisse-/väljalülitismehhanismid. Astronoomiline taimer lülitab valgustuse sisse ja välja kindlatel kellaaegadel vastavalt geograafilisele asukohale ja

aastaegadele määratud päikese tõusmise/loojumise aegadele. Hämarandur reageerib keskkonna valgusintensiivsuse muutustele ning lülitab valgustuse sisse, kui nivoo langeb alla seatud lävendi. [30] Astronoomilise taimeri eelis on stabiilne ajastamine ilma ilmastikuoludest mõjutatumata ning vajadusel saab taimeri programmi käsitsi kalibreerida näiteks suve- ja talveaja vahetamiseks tõttu. Ent on leitud, et astronoomilised kellad võivad ajas kalduda, nõudes iga-aastast kalibreerimist. Hämarandur võib vajada regulaarset hooldust võimalike ilmastikutingimust tõttu. Kombineeritud juhtimine, kus astronoomiline taimer ja hämarandur toimivad paralleelselt, tagab täiendava kontrollimehhanismi, vältides võimalikke väärsüütemisi näiteks auto esitulede või muude valgusallikate mõjul. [21], [30]

1.6.2 Astronoomilise taimeriga valgustid

Astronoomilise taimeriga valgusti on sisseehitatud juhtimissüsteemiga valgusti tüüp, kus kasutatakse nn „astronoomilist taimerit“ juhtseadmena, mis on integreeritud valgusti ballastplokki. Astronoomilise kellaga valgustid on eelprogrammeeritud geograafilise asukoha ja ajavahemike alusel ning töötavad ilma vajaduseta täiendavate tsentraalsete juhtseadmete või kaablite järele. Õige konfiguratsiooni ja geograafilise asukoha sisestamise korral saab selline lahendus automaatselt võtta arvesse suve-/talveaega. Astronoomilise taimeriga valgustite suurimaks eeliseks on lihtne paigaldus ja sõltumatus tsentraalse infrastruktuuri olemasolust. Puuduseks on aga see, et iga valgusti vajab individuaalset seadistust ja hilisem ümberprogrammeerimine eeldab spetsialisti sekkumist kohapeal, mis tekitab lisakulu. [21], [30]

1.6.3 Kohtjuhtimine

Kohtjuhtimine, mida sageli nimetatakse ka autonoomseks juhtimiseks, põhineb autonoomsel toimimisel ehk iga valgustuspunkt reguleerib oma tööd iseseisvalt, tuginedes otse ühendatud andurite signaalidele. Kõige sagedamini kasutatakse liikumis-, valgus- või temperatuuriandureid, mille abil tuvastatakse jalakäijate või sõidukite lähenemine. Tuvastuse korral suurendatakse valgustugevust ajutiselt ning seejärel taastatakse madalam tase, mis aitab optimeerida energiatarvet ja vähendada valgusreostust. [21]

Kohtjuhtimise süsteemid ei vaja pidevat ühendust tsentraalse juhtimiskeskusega (nt SCADA või pilvepõhise lahendusega), mistõttu sobib see eriti hästi äärealadele, teedele ja rajatistele, kus kaugjuhtimissüsteemi rajamine pole majanduslikult otstarbekas. Süsteemi peamiseks kitsaskohaks on kõrge alginvesteering, sest iga valgustuspunkt tuleb varustada individuaalse juhtloogika ja sensorikomplektiga. Samas võimaldab

selline modulaarne ülesehitus süsteemi etapiviisilist kasutuselevõttu ning paindlikku laiendamist vastavalt linna või piirkonna vajadustele. [21]

Autonoomne juhtimise rakendamine aitab ühtlasi säästa ökosüsteeme, vähendades valgustundlike alade (nt rohevööndid, loomade elupaigad) häirimist [21]. Uuringud Saksamaal, Hollandis ja mujal Euroopas on näidanud, et kohtjuhtimisega tänavavalgustus võib energiakulu vähendada 50-70%, võrreldes traditsiooniliste, kogu öö jooksul ühtlase intensiivsusega töötavate valgustussüsteemidega. Samas tuleks meeles pidada, et realiseerunud sääst sõltub iga objekti eripäradest (vanade süsteemide tegelik efektiivsus, paigaldatavad juhtimisfunktsioonid ja valgustuslahenduste töögraafikud). Katselinnades on kasutatud lahendust, kus valgustid süttivad ahelana liikuja trajektoori järgi, luues dünaamilise valgusvoo, mis „jälgeb“ inimest või sõidukit. Selline lähenemine tõstab lisaks energiatõhususele ka liikleja subjektiivset turvalisuse ja mugavus tunnet. [21], [30],[31]

1.6.4 Kaugjuhtimine

Kaugjuhtimissüsteemid tänavavalgustuses võimaldavad tsentraalset, reaajas toimuvat juhtimist, mille kaudu saab valgustite tööd planeerida, jälgida ja optimeerida vastavalt tegelikele vajadustele. Süsteemid koosnevad valgustitesse integreeritud juhtmoodulitest, mis suhtlevad juhtimiskeskuse või pilvepõhise platvormiga ning kasutavad erinevaid sideprotokolle: lühimaa traadita võrgud nagu ZigBee, pikamaa IoT-võrgud nagu LoRaWAN, mobiilside ning WiFi. [32]

- ZigBee-tehnoloogia sobib eriti hästi linnakeskkonda, kus valgustid paiknevad tihedalt ning andmevahetuse sagedus on madal. ZigBee-võrgu eeliseks on väga madal energiatarve. Samas on selle leviala piiratud, jäädes tavaliselt alla 100 meetri. [6],[32]
- LoRaWAN võimaldab hallata tuhandeid seadmeid üle mitme kilomeetri ning sobib seetõttu äärelinna või maantee valgustuse kaugjuhtimiseks. LoRaWAN võimaldab katta vahemaa kuni 15 km ulatuses avatud maastikul ja 2–5 km linnakeskkonnas. Tänu madalale ribalaiusele sobib see pigem aeglase andmeedastuse rakendusteks nagu rikketeavitused. [6],[32]
- Mobiilsidevõrgud pakuvad suuremat ribalaiust ja võimaldavad reaajas juhtimist. Mobiilsidevõrgude eeliseks on ulatuslik leviala ja tugev signaal, kuid puuduseks on kõrgem energiatarve ja sõltuvus teenusepakkujast. Eestis on näiteks kasutusele võetud NB-IoT-põhine Comlight süsteem, mida rakendati Kakumäe piirkonnas valgustuse juhtimiseks. [6],[32], [33]

- WiFi-tehnoloogia pakub väga suurt andmeedastuskiirust ning sobib spetsialiseeritud rakendusteks, kus on olemas infrastruktuur ja vaja suuremahulist andmevahetust. Samas on WiFi leviala piiratud ja energiatarve kõrge, mistõttu kasutatakse seda harvem tänavavalgustuses. [6],[32]

Kaugjuhtimissüsteemide eelised on paindlikkus, skaleeritavus ja võimalus määrata piirkondadele spetsiifilisi valgustusprofiile. Süsteemid võimaldavad reguleerida valgustugevust vastavalt kellaaajale, ilmastikule või üritustele. Lisaväärtusena saab kaugjuhtimist integreerida teiste linnasüsteemidega: turvakaamerad ja liiklusandurid, mis saavad töötada sünkroonselt valgustuse juhtimisega. Kaugjuhtimine loob aluse nutika linna infrastruktuurile, kus eri süsteemid reageerivad dünaamiliselt vastavalt olukorrale. [21]

Euroopa Liidu energiatõhususe ja digitaliseerimise strateegiad toetavad selliste süsteemide kasutuselevõttu. Eestis on kaugjuhtimise lahendusi edukalt rakendatud mitmes omavalitsuses, sealhulgas Tartus ja Pärnus, kus on saavutatud märkimisväärne elektrienergia kokkuhoid, väiksem keskkonnamõju ning paremini toimiv tänavavalgustuse haldus. Näiteks SmartEnCity projektis saavutas Tartu linn leedvalgustite ja kaugjuhtimissüsteemide abil kuni 70% energiasäästu. [34]

1.7 Valgustus kui linnaruumi planeerimis- ja juhtimisvahend

Kaasaegsed juhendid rõhutavad, et avaliku ruumi valgustus pole vaid nähtavuse tagamise vahend, vaid kujundab linnakeskkonda. Näiteks CIE 234:2019 rõhutab, et valgustuslahendused peavad kätkema nii funktsionaalseid kui ekspressiivseid aspekte linnapildis, mis toetavad orienteerumist, turvatunnet ja linna ööpilti tervikuna [35]. Uuringud näitavad, et hästi kujundatud avaliku ruumi valgustus võib märgatavalt tõsta jalakäijate turvatunnet ja mugavust. Samas seab tänapäevane valgustuspraktika samuti suurt rõhku energiatarbimise ja valgusreostuse vähendamisele. [36] Euroopa Liidu avaliku hanke juhised soovivad minimeerida sinist valguskomponenti ja kasutada madalat värvsustemperaatuuri, et vältida valgusreostust ning toetada inimeste ööpäevast rütmi. [11], [37]

Linnaruumi valgustuslahenduste kavandamine peab lähtuma konkreetsete piirkondade kasutusfunktsioonidest. Kesklinna väljakud, elamurajoonid, tööstusalad ja puhkealad vajavad erinevaid valgustugevusi, valgusvoo suundi ja spektraalseid omadusi (vt Joonis 1.5). Elamupiirkondades on oluline piirata valgusvoogu, eelistada madalat värvsustemperaatuuri ning kasutada täielikult varjestatud valgusteid, et vältida valguse

sattumist eluruumidesse ja hoida öörahu. Vastupidiselt sellele võib ajaloolise tähtsusega objekte või sümboolseid linnaruumilisi elemente valgustada ereda, ent kontrollitud valgusega, mis toetab visuaalset esiletõusu ja turismipotentsiaali ilma liialt pimestamata või elukeskkonda kahjustamata. [13],[21]



Joonis 1.5. Visualisatsioon linna tsoonidest [38]

Tallinna kontekstis võimaldaks keskkonnatsoonipõhine valgustuskorraldus kujundada sihipärase ja keskkonnasäästliku valgusstrateegia, mis arvestaks piirkondliku kasutusaktiivsuse, looduslike väärtuste ja elanike heaolu aspektidega. Kuigi Tallinnas kehtib "Tallinna linna teevalgustusnormid" dokument, mis sätestab tehnilised nõuded peamiselt sõiduteede valgustusele [39], ei hõlma need normid jalakäijate radu, haljasalasad, ajaloolisi miljöövektoreid ega looduskaitsealasad. Ühtne, tegelikul andmestikul põhinev keskkonnatsoone arvestav ülevaade Tallinnas hetkel puudub.

Keskkonnatsoon	Kinnistule langev valgus		Valgustugevus		Üleskiirgav osa	Heledus	
	E_V lx		I cd			R_{UL} %	L_b cd·m ⁻²
	Enne piiranguaega ^a	Piiranguaeg	Enne piiranguaeg	Piiranguaeg		Ehitise fassaad	Valgusmärgid
E0	0	0	0	0	0	0,1	0,1
E1	2	0 ^b	2 500	0	0	0,1	50
E2	5	1	7 500	500	2,5	5	400
E3	10	2	10 000	1 000	5	10	800
E4	25	5	25 000	2 500	15	25	1 000

kus

E0 loomulikult pimedad alad, nt IDA pimeda taeva kaitsealad või suured optilised observatooriumid;

E1 loomulikult pimedad alad, nt rahvuspargid ja kaitsealused paigad;

E2 madala piirkondliku heledusega alad, nt maal paiknevad tööstus- ja elamupiirkonnad;

E3 keskmise piirkondliku heledusega alad, nt tööstus- ja elamueeslinnad;

E4 kõrge piirkondliku heledusega alad, nt kesklinnad ja kaubanduspiirkonnad;

E_V maksimaalne kinnistule langeva vertikaalse valgustustiheduse väärtus lx;

I iga häirivat valgust tekitada võiva valgusallika valgustugevus häirivas suunas cd;

R_{UL} valgusti(te) valgusvoo suhteline osa, mis kiirgub rõhttasandist ülespoole, kui valgusti(d) on kinnitatud oma paigalduskohal ja oma paigaldusasendis %;

L_b ehitise fassaadi maksimaalne lubatud keskmine heledus cd·m⁻²;

L_s tööga seotud teabesiltide (seesmiselt või väliselt valgustatud) maksimaalne keskmine heledus cd·m⁻². See ei kehti reklaamtahvlite ja liiklusmärkide puhul.

^a Kui piiranguaega sätestavad eeskirjad ei ole kättesaadavad, ei tohi valgustustihedus olla kõrgem suurimast esitatud väärtusest ja soovitatavaks tuleb võtta vähim esitatud väärtus.

^b Kui paigaldis on üldkasutatav (tee)valgustus, võib selle väärtus olla kuni 1 lx.

Joonis 1.6 Enimalt lubatud häiriv valgus välivalgustuspaigladites [40]

Tsoonipõhine valgustuskorraldus eeldab, et igale tsoonile rakendatakse selgeid piirväärtusi langeva valguse, valgusvoo, heleduse ja üleskiirgava valguse osas. Standard EVS-EN 12464-2:2025 toob ametlikult sisse E0 keskkonnatsooni kontseptsiooni, mis loob aluse öökeskonna kaitseks. Joonisel 1.6 on esitatud tsoonide E0 kuni E4 piirväärtused. Näiteks E0 tsoonid, kuhu kuuluvad rahvuspargid ja observatooriumid, nõuavad täielikku valgusreostuse vältimist. E4 tsoonid, mis hõlmavad linnasüdameid ja ärikvartaleid, lubavad kõrgemat valgusintensiivsust näiteks reklaamvalgustuse ja hoonete esiletõstmise eesmärgil. Teevalgustuse standard EVS-EN 13201-2 käsitleb valgustusklasse eelkõige nähtavus- ja liiklusohutusnõuetest lähtuvalt, mitte keskkonnamõjude alusel. Mõned Euroopa linnad, näiteks Lyon, on siiski juba varem arvestanud valgustuslahenduste kavandamisel ka keskkonnatsoone. [41]

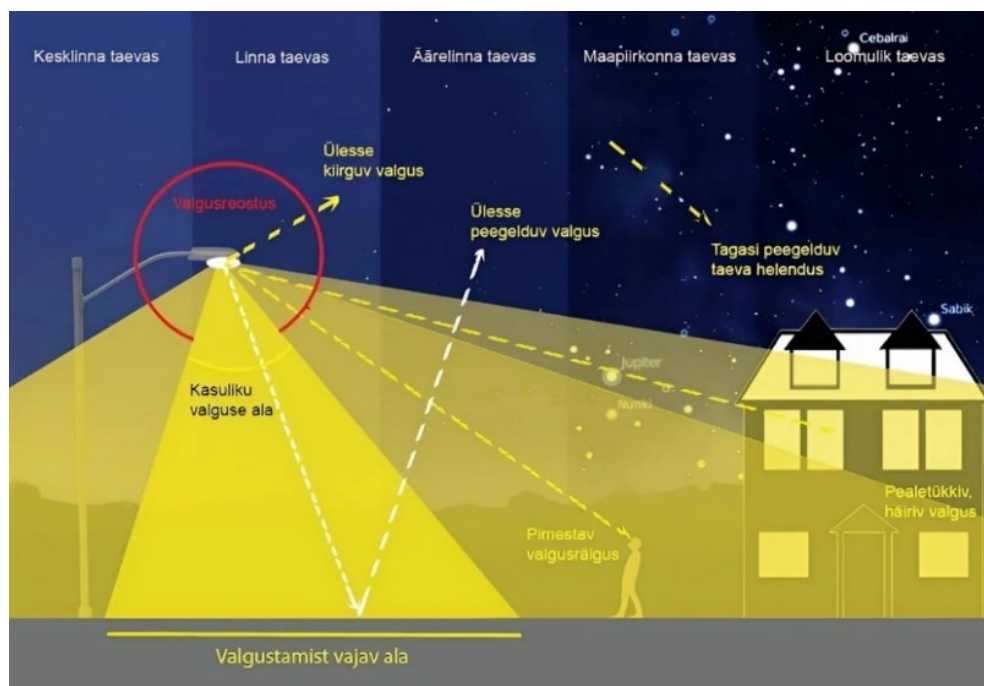
CIBSE juhendmaterjalid rõhutavad siiski, et enne valgustuslahenduste kavandamist tuleks läbi viia põhjalik olemasoleva olukorra analüüs, sealhulgas päevase ja öise valgustuse kaardistus, mille abil saab määrata sobiva keskkonnatsooni [42]. Edukas tsoonipõhine valgustuskorraldus nõuab mitmekesist andmestikku, mis hõlmab olemasolevate valgustingimuste, öise liikluse, elanike liikumismustrite, linnaplaneerimise prioriteetide ja ökoloogiliselt tundlike alade inventeerimist. Kuna Tallinnas pole praegu sellist integreeritud andmestikku, loetakse enamik piirkondi praktikas E3-taseme tsoonideks. Tegelikuses võib olla põhjendatud rakendada madalama valgusintensiivsusega keskkonnatsoone, näiteks Rocca al Mare looduspargi ja loomaaia ümbruses (E0 või E1 tsoon), et kaitsta looduskeskkonda. Samal ajal võiks Tallinna vanalinna öine visuaalne identiteet vastata E2 tsooni nõuetele, võimaldades esile tõsta vanalinna miljööd ning samas säilitada elanike öörahu.

2. VALGUSREOSTUSE TEOREETILINE JA PRAKTILINE KÄSITLUS

Kuigi tehisvalgus mängib inimtegevuse puhul hädavajalikku rolli, võib selle liigkasutus või valesti suunatud rakendamine põhjustada hulgaliselt soovimatuid kõrvalmõjusid. Viimasel ajal on valgusreostus kujunenud üha enam tähelepanu pälvivaks probleemiks, kuna see mõjutab mitte ainult öise linnapildi esteetikat, vaid avaldab negatiivset mõju ka inimese tervisele, ökosüsteemide tasakaalule ja astronoomiliste vaatlusteni. Valgusreostus on sageli märk ebaefektiivselt kavandatud, lõpuni läbimõttlemata lahendustest linnaplaneeringus ja/või majanduslikest kärbetest tingitud otsus, millel võivad olla ulatuslikud majanduslikud ja keskkondlikud tagajärjed. Käesolevas peatükis analüüsitakse valgusreostuse olemust, selle liike ning mõju linnaelukeskkonnale ja ökosüsteemidele.

2.1 Valgusreostuse olemus

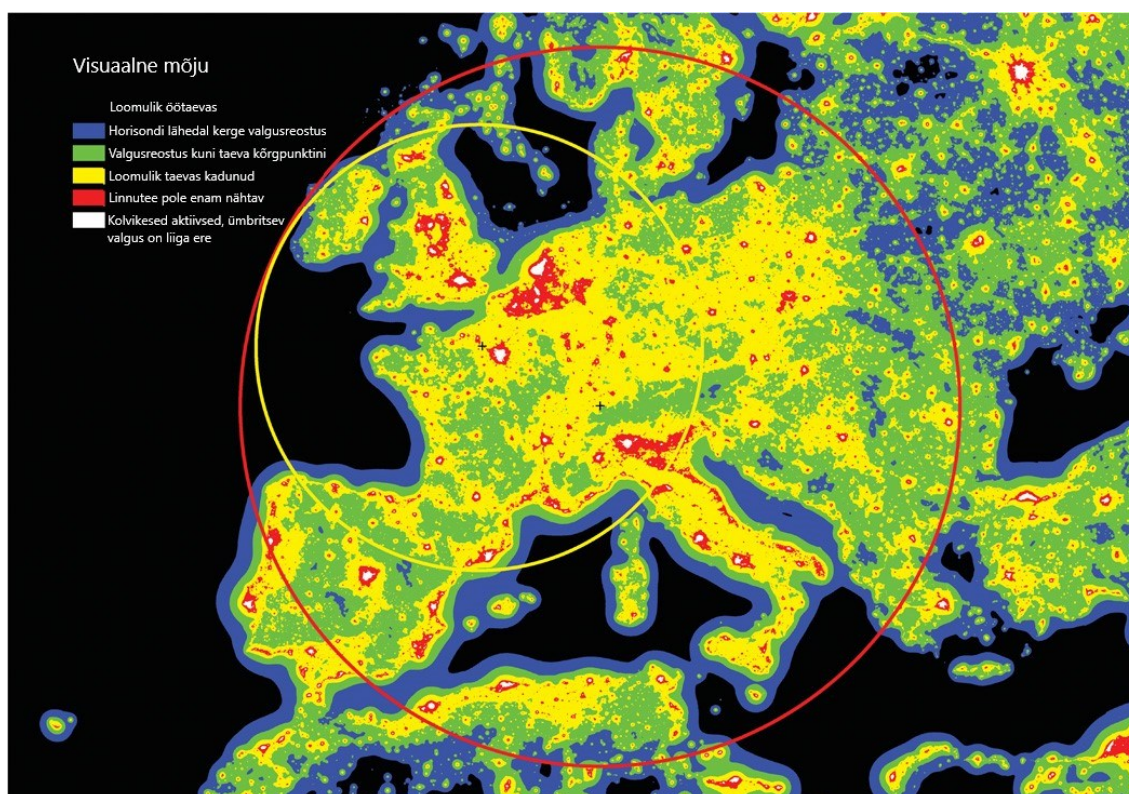
Valgusreostus kujutab endast olukorda, kus tehisvalgus valgustab alasid, mis ei vaja valgustamist, töötab ebavajalikul ajal või sisaldab lainepikkusi (nt sinist või ultraviolettkiirgust), mis põhjustavad kõrvalhäiringuid [4]. Valgusreostuse klassikaline definitsioon hõlmab kõiki kunstliku valguse emiteeritud komponente, mis ei toeta konkreetset valgustusülesannet, ning mis kiirgavad soovimatutesse piirkondadesse (vt Joonis 2.1) [18].



Joonis 2.1 Tänavavalgustitega loodud tehisvalgustus ning valgusreostus [10]

Valgusreostus on nähtus, mis ei toeta valgustuse põhieesmärki ja mille all peetakse üldiselt silmas liigset, ebaefektiivselt suunatud või ajaliselt ebasobivalt rakendatud valgustust, mis ei teeni valgustusülesannet või kahjustab nähtavuse kvaliteeti ja öist keskkonda. [18]

Valgusreostust peetakse üheks levinumaks inimtekkeliseks keskkonnaprobleemiks, mille ulatust on tihti alahinnatud. Selle mõju võib levida linnapiirkondadest kümnete või isegi sadade kilomeetrite kaugusele, mõjutades ka neid öiseid maastikke ja kaitsealasid, kus päevasel ajal inimtegevuse mõju ei ilmne (vt Joonis 2.2) [10]. Valgusreostus ei ole pelgalt visuaalne probleem: see kätkeb endas ka energia raiskamist, öise tähistaeva kadumist ning ulatuslikke häiringuid öise bioloogilistes ja füsioloogilistes rütmides.



Joonis 2.2 Valgusreostuse tasemeid Euroopas ning lähiümbruses 2016 aasta seisuga (autori poolt kohandatud). [10]

Valgusreostus hõlmab mitmeid nähtusi, mis tulenevad tehisvalguse ebaõigest suunamisest, liigsest intensiivsusest või sobimatust spektraalsest koostisest. Tänapäevases teaduslikus käsitluses eristatakse mitmeid visuaalseid valgusreostuse vorme, millel on erinev mõju nii inimese heaolule kui ka keskkonnale [43].

- Üks levinumaid ja kaugeleulatuvamaid nähtusi on **taevakuma**, mis väljendub öise taeva heleduse suurenemises valguse hajumise tõttu atmosfääris. Nähtus tekib linnade kohale iseloomuliku valguskupli, mille intensiivsus suureneb koos asustustiheduse ja valgusallikate hulgaga. Taevakuma takistab loomulikku pimedust, kahjustab astronoomiliste vaatluste kvaliteeti ning muudab öise maastiku tajutavust. Valguse spektraalsed omadused, nagu lainepikkus ja kiirguse intensiivsus, mängivad olulist rolli valguse levikus ja hajumises atmosfääris. Eriti märkimisväärne on sinise valguse mõju, mis hajub atmosfääris 3-4 korda rohkem kui punane valgus. Lisaks mõjutavad valguse levikut oluliselt atmosfääris leiduvad aerosoolid, veeaur ja tolmuosakesed, mis põhjustavad valguse hajumist sõltumatult lainepikkusest, mõjutades seeläbi kogu öise valgusmaastiku kvaliteeti. [5]
- **Pealetükkiv valgus** tekib juhul, kui valgusallikate kiirgus ulatub väljapoole ettenähtud valgustusala, valgustades soovimatult naaberkrunte, aknaid või avalikku ruumi (vt Joonis 2.1). Elamupiirkondades võib see häirida inimeste und ja kahjustada privaatsust; looduslikes elupaikades aga võib valguse sissetung mõjutada ööpäevaseid rütme, toitumis- ja liikumisharjumusi ning bioloogilisi paljunemismustreid. [2],[10]
- **Häiriv valgus** on üldisem mõiste, mis viitab valgusvoole, mis põhjustab ebamugavust, segab visuaalset tajumist või vähendab võimet märgata olulist teavet. Häiriv valgus võib väljenduda nii pimestuse, kontrasti kadumise kui ka muude nägemistingimuste halvenemisenä. [5]
- **Visuaalne risustus** on nähtus, kus linnaruumi kuhjuvad erinevat tüüpi valgustid (reklaam-, arhitektuuri- ja tänavavalgustid) paigaldatakse ilma koordineeritud plaanita. Tulemuseks on valgusallikate kaootiline koosseksisteerimine, mis põhjustab optilist segadust, vähendab ruumitaju selgust ning halvendab linnapildi esteetilist kvaliteeti. Risustumine raskendab ka orienteerumist ja võib suurendada valgusega seotud väsimust ning tähelepanuhäireid. Tavaliselt tekib selline olukord, kui valguslahendusi paigaldatakse järk-järgult aja jooksul. [5]
- **Liigne valgustus** kirjeldab olukorda, kus valgustugevus ületab tegeliku funktsionaalse vajaduse, põhjustades energiakulu suurenemist ja

potentsiaalselt ka kõrvalnähtusi nagu räigus või värelus. [45] Liigse valgustuse põhjuseks võivad olla ebatäpsed simulatsiooniarvutused projektis või valed projekteerimise lähteandmed, valesti valitud valgustus lahendused või sobimatu valgusti paigaldus.

2.2 Valgusreostuse kvantitatiivne ja kvalitatiivne hindamine ning mõõtmine

Valgusreostuse ulatuse ja mõju hindamine on oluline nii teaduslikus kui ka praktilises mõttes, sest võimaldab tuvastada probleemsed piirkonnad, kavandada sobivaid sekkumismeetmeid ning täiustada linna valgustusejuhendeid ja tegeleda valgushäiringu üksikjuhtumitega. Hindamise meetodid jagunevad laias laastus kaheks: kvantitatiivsed ehk objektiivsel mõõtmisel põhinevad ja kvalitatiivsed ehk subjektiivsel hinnangul ning tajukogemusel põhinevad lähenemised.

Kvantitatiivsetes hindamistes kasutatakse mitmeid täpsusmõõteriistu ja tehnoloogiaid: [5]

- Heledusmõõtur on laialdaselt kasutatav vahend, millega mõõdetakse heledust. [2],[5]
- Luksmeeter on mõõteriist millega mõõdetakse valgustustiheduse taset (lx) horisontaal ja vertikaaltasapinnas, võimaldades hinnata, kas valgustus jääb soovituslike piiride (nt standardi EVS-EN 12464-2 kohased soovitusväärtused välitööaladele) sisse või ületab neid. [2], [5]
- Satelliitandmed (nt VIIRS, DMSP/OLS) pakuvad piirkondlikke ja ajas muutuvaid ülevaateid valgusallikate levikust ning on eriti väärtuslikud ulatuslike linnakeskkondade hindamisel, ent satelliitandmete täpsust mõjutavad ilmastikust tingitud pilvisus, taimestik ja seadmete eraldusvõime. [5]
- Panoraamfotod ja pildianalüüsid (koos spetsiaalse analüüsitarkvaraga võimaldavad hinnata peegelduva valguse jaotust, intensiivsust ning potentsiaalset valgusreostust visuaalsel kujul. [5]
- Fotomeetriliste failide (nt IES/LDT) võimaldavad valgusallikate käitumist täpselt modelleerida ja hinnata selliseid tehnilisi näitajaid nagu ülepoolne talituskasutegur, mis kirjeldab kui suur osa kogu valgusvoost levib ülespoole, väljapoole sihtpiirkonda, aidates hinnata valgusti valgusreostuspotentsiaali. [5]

Kvalitatiivsed meetodid tõstavad esile inimeste isiklikku kogemust valguse mõjust.

- Bortle'i skaala on üheksapalliline visuaalne klassifikatsioonimeetod, mis põhineb taeva nähtavusel. Klass 1 tähistab looduslikku pimedat taevast, klass 9 tugevalt valgusreostatud linnataevast. Kuigi tegemist ei ole täppismõõteriistaga, võib see anda esmase hinnangu valgusreostuse tasemele, eriti kui muud mõõtevahendid puuduvad. [5]
- Elanike tagasiside ja kohalikud vaatlused võimaldavad välja selgitada, millised piirkonnad on kogenud valgushäiringut (nt aknasse suunatud valgustid, reklaamvalgus eluruumide läheduses), isegi kui objektiivne mõõtmine ei pruugi seda täiel määral kinnitada, seoses vajalikke mõõtmiste mahuga katmaks kogu linna või asula pindala. [5]

Parimaks tulemuseks tuleb kasutada kvantitatiivsete ja kvalitatiivsete meetodite kombineeritud kasutamist. Tehnilised mõõtmistulemused on aluseks objektiivsete otsuste tegemisel (nt valgustuse vähendamine või ümberkujundamine), samas kui kvalitatiivne tagasiside aitab esile tuua kasutajakogemuse põhiseid probleeme, mida pelgalt mõõteriistade abil ei pruugi tuvastada, kuna kõik linnaalad ei ole otstarbekas ära mõõta.

2.3 Valgusreostuse mõju inimese ööpäevarütmile ja heaolule

Valgus ei täida üksnes visuaalset funktsiooni, vaid on inimese füsioloogiliste ja psühholoogiliste protsesside oluline regulaator. Eriti oluline on valguse roll ööpäevarütmi ehk tsirkadiaanrütmi säilitamisel, mis juhib mitmeid organismi bioloogilisi funktsioone - une ja ärkveloleku vaheldumist, hormoonide sekretsiooni, kehatemperatuuri ning ainevahetust. Liigse või ebasobiva spektraaljaotusega tehisvalguse kasutus öisel ajal võib neid rütme oluliselt häirida, põhjustades terviseriske ja heaolu langust. [13]

Valgusreostus kahjustab elupaikade omavahelist ühendust ja võib viia populatsioonide fragmenteerumiseni. Kui elupaigad ei ole valgusreostuse tõttu enam läbitavad, väheneb geenivoog, suureneb väljasuremiskahju ning ökosüsteemi üldine vastupanuvõime kahaneb. Eriti ohustatud on võtmetähtsusega liigid, kelle kadumine võib vallandada ahelreaktsioone kogu ökosüsteemini. [46]

2.3.1 Tsirkadiaanrütmi häired ja hormonaalne tasakaalutus

Inimorganismi sisemine kell ehk tsirkadiaanrütm on kohandunud loodusliku valguse- ja pimedusevaheldusega, mille olulisimaks suunajaks on päevavalgus. Päeva jooksul saadav valgus, eriti spektri sinine osa, mängib keskset rolli suprakiasmaatilise tuuma kaudu ööpäevarütmi reguleerimisel. Suprakiasmaatilise tuuma piirkond ajus juhib mitmeid organismi protsesse, sealhulgas une-ärkveloleku tsüklit, hormonaalset aktiivsust, kehatemperatuuri ning ainevahetust. [13]

Korduv kokkupuude intensiivse kunstvalgusega öötundidel võib viia krooniliste unehäireteni ning tõsta stressihormoonide, näiteks kortisooli taset, mis omakorda suurendab riski südame-veresoonkonna ja ainevahetushäirete tekkeks. Häiritud ööpäevarütm mõjutab ka psühholoogilist heaolu, suurendades ärevuse ja meeleoluhäirete esinemise tõenäosust. [11],[13]

Eriti haavatavad on isikud, kes töötavad öisel ajal või viibivad valgustatud keskkondades ka pärast päikeseloojangut. Sellistes olukordades ei saa organism vajalikke signaale, mis suunaksid ta puhkeseisundisse. Uuringutulemused toetavad valgusreostuse vähendamist ja valgustuslahenduste kavandamist viisil, mis piirab valguse kõrge intensiivsusega sinise spektriosa kasutamist öötundidel, eelistades madalama värvsustemperatuuriga valgusallikaid. [11],[13]

2.3.2 Visuaalsed häired ja adaptatsioonihäired

Inimese nägemissüsteem suudab kohanduda väga erinevate valgusoludega – päevavalgus võib ulatuda kuni 100 000 luksini, samas kui täiskuu valgustus jääb vahemikku 0,2–1 luxi. Madala valgusintensiivsuse tingimustes väheneb nägemisteravus 3–30% võrra, mõjutades oluliselt visuaalset sooritusvõimet. [47]

Visuaalne adaptatsioon, ehk silma võime kohanduda valguse ja pimeduse muutustele, on asümmeetriline protsess: valgusesse kohandumine toimub kiiremini kui pimedusse naasmine. Kui valgustusolud ei võimalda piisavat kohanemisaega, langeb kontrasti tajumine ja visuaalne informatsioon muutub raskemini eristatavaks. Halvad valgustusolud võivad põhjustada ajutisi nägemishäireid, mis on eriti ohtlikud olukordades, kus on oluline visuaalne täpsus näiteks masinate või sõidukitega töötamisel. [47]

Kontrastitundlikkus määrab inimese võime eristada erineva heledusega objekte. Ebapiisava kontrasti korral pimedas keskkonnas muutub visuaalne ülesanne keerukamaks ja võib nõuda suuremat objekti suurust või valgustatust. Sobimatu

valgustus, sh liiga intensiivne või ebaühtlane valgus, võib põhjustada räigust, mis vähendab kontrastitundlikkust ja põhjustab visuaalset väsimust ja ebamugavust. [47]

Tugev valgusreostus tiheda asustusega piirkondades, sealhulgas eriti Tallinnas, takistab silmadel täielikult pimedusega kohaneda, mis vähendab loodusliku öise nägemise kvaliteeti. Mistõttu on linnade valgustuslahenduste kavandamisel oluline arvestada nii valgustatuse taseme kui ka valguse jaotuse ühtluse, spektraalse koostise ja intensiivsusega, et toetada öise nägemise võimet ja minimeerida valgusest tulenevaid häireid. [47]

2.3.3 Neuropsühholoogilised ja metaboolsed mõjud

Uuringud on näidanud, et pikaajaline kokkupuude tehisvalgusega võib mõjutada aju talitlust. On täheldatud muutusi hipokampuse geeniekspressioonis - piirkonnas, mis vastutab mälu ja meeleolu reguleerimise eest. Kokkupuude tehisvalgusega tekitab muutused, mis võivad suurendada käitumuslike ja psühholoogiliste häirete esinemissagedust. [46]

Rahvastikupõhised uuringud näitavad, et kõrgema öise valgusreostuse tasemega elukeskkonnad on seotud sagedasema depressiooni sümptomaatikaga. Samuti on leitud seoseid valgusreostuse ja neurodegeneratiivsete protsesside, sealhulgas Alzheimeri tõve biomarkerite halvenemise vahel. Uuringute tulemused viitavad võimalusele, et tehisvalgus võib soodustada krooniliste haiguste süvenemist. [46]

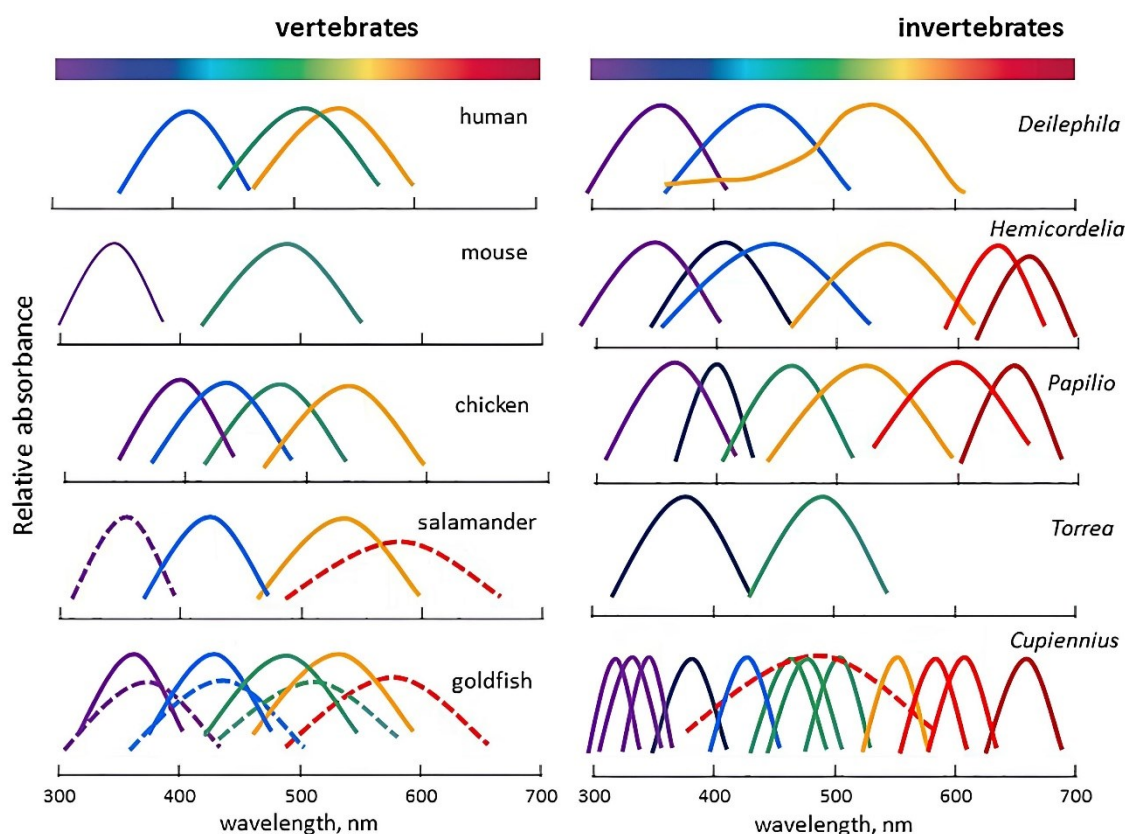
Valgusreostus on seotud ka ainevahetushäiretega. Näiteks on täheldatud korrelatsiooni öise valgusintensiivsuse ja ülekaalulisuse vahel. Võimalikeks mehhanismideks loetakse melatoniinitaseme langust, glükoositaluvuse halvenemist ning häireid une- ja toitumisharjumustes. Loomkatsed on näidanud, et tehisvalgusele eksponeeritud isenditel suureneb kehamass ja ilmnevad ainevahetuslikud muutused. Lisaks on uuritud melatoniini võimalikke kasvajakasvasteid omadusi, tõstes selle tähtsust tervishoius. [46],[48]

2.3.4 Valgusreostuse mõju ökosüsteemidele

Valgusreostus kujutab endast üha süvenevat keskkonnaprobleemi, millel on ulatuslik ja mitmetahuline mõju ökosüsteemide toimimisele ning elusorganismide käitumisele. Tehisvalgus, mis levib öisel ajal nii loodus- kui ka linnakeskkondades, häirib paljude liikide loomupäraseid ööpäevaseid rütme ja muudab nende elutegevuse mustreid. Päeva ja öö vaheldumine toimib paljude organismide jaoks ajastusmehhanismina, mille häirimine võib põhjustada füsioloogilisi ja käitumuslikke kõrvalekaldeid. [49]

Paljud liigid sõltuvad looduslikust valgus-pimedus tsüklist, mistõttu võib pidev kokkupuude kunstliku valgusega mõjutada nende aktiivsust, liikumist, sigimist ja ainevahetust. Kõige tundlikumad on öise eluviisiga loomad, kelle nägemine on kohastunud vähese valgusega keskkondadele. Kuna linnavalgustus põhineb peamiselt inimese päevase nägemise vajadustel ning kasutab sageli kõrge sinise komponendiga valgusallikaid (nt leede), tajuvad loomad sellist valgust eriti intensiivsena, mis võib kaasa tuua märkimisväärseid häiringuid. [9]

Erinevalt inimesest tajuvad paljud loomad valgust laiemas lainepikkuste spektris, sealhulgas ultraviolet- ja infrapunakiirguse aladel. Seetõttu võib kunstlik valgus mõjutada erinevaid liike väga erineval moel. Näiteks on teatud liigid tundlikumad lühikeste lainepikkuste suhtes, samas kui teised reageerivad tugevamalt pikematele lainepikkustele. See ühtlasi põhjenduseks näiteks valge või sinise spektrikomponendiga valgusallikad (valgusdiodid) võivad põhjustada olulisi ökosüsteemihäiringuid (vt Joonis 2.3).[50]



Joonis 2.3 Erinevate liigirühmade tundlikkus spektri teatud lainepikkuste suhtes

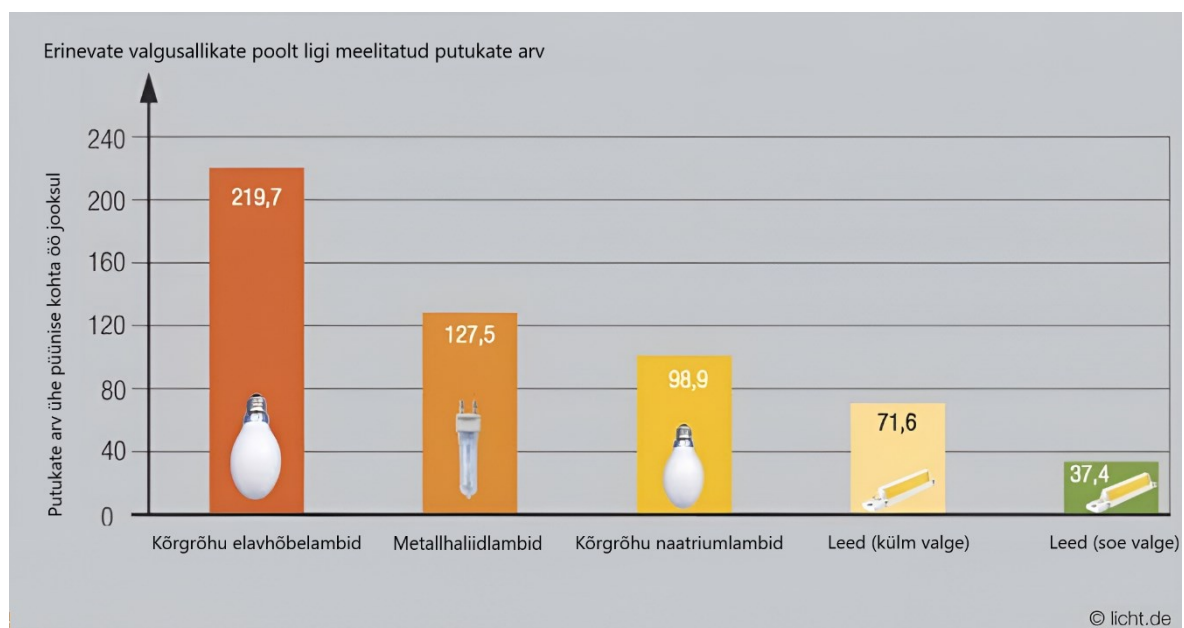
Erinevate liikide nägemisvõimeid illustreeriv joonis (vt joonis 2.3) näitab, kui suurel määral varieerub loomade valguse tajumise võime. Paljud selgroogsed ja selgrootud,

sealhulgas liblikad, ämblikud, kahepaiksed ja kalad, omavad laia spektrit katvaid nägemispigmente, mis muudab nad tundlikuks ka väga madala valgusintensiivsuse suhtes, mis suurendab tõenäosust, et isegi väike valgusfooni tõus võib häirida elusorganismide loomulikku käitumist, näiteks toitumist, orienteerumist või sigimisaktiivsust. [50]

2.3.5 Käitumuslikud muutused ja elurütmi häired

Öise eluviisiga liigid on valgusreostuse suhtes eriti tundlikud, sest nende nägemismeel on kohandunud madalale valguse tasemele [51]. Umbes 30% selgroogsetest ja 60% selgrootutest on aktiivsed öösiti [9]. Rändlinnud, kes navigeerivad tähistäeva järgi, võivad ereda linnavalguse tõttu suunda kaotada ja sattuda ohtlikesse piirkondadesse, mis suurendab nende suremust. [46]

Öised putukad on enim tugevalt mõjutatud. Paljud neist kogunevad tänavavalgustite ümber, kus nad võivad hukkuda kas kuumuse tõttu, väsimuse tagajärjel või sattudes röövloomade saagiks (vt Joonis 2.4). [5],[52]



Joonis 2.4 Prof. Dr. Gerhard Eisenbeisi uuring: erinevate valgusallikate mõju putukate ligimeelitamisele, Frankfurt, suvi 2011 (autori poolt kohandatud) [13]

Öine valgustus häirib putukate loomulikku aktiivsusemustrit, olles seeläbi ökosüsteemidele märkimisväärselt koormav. Uuringute kohaselt tõmbab leedvalgus, mis ei sisalda ultraviolettkiirgust, putukaid oluliselt vähem ligi kui traditsioonilised valgusallikad. Leedvalgustite puhul on putukate ligimeelitus- ja hukkumismäär

hinnanguliselt kuni 160% väiksem võrreldes kõrgrõhu-naatriumlampidega (vt Joonis 2.4) [13]. Putukate massiline hukkumine tehisvalguse kasutamise tõttu ohustab tolmeldamisprotsesse, kuna tänavavalgustite läheduses kasvavad taimed saavad vähem öist tolmeldamist [46]. Saksamaal hinnatakse, et igal suvel sureb tehisvalgustuse tõttu kuni 100 miljardit putukat [5],[52].

2.3.6 Mõju paljunemisele ja arengule

Valgusreostus mõjutab märkimisväärselt paljude liikide sigimiskäitumist ning paljunemistsüklite ajastust. Üheks tuntumaks näiteks on merikilpkonnade emasloomad, kes väldivad eredalt valgustatud randu, mis piirab sobivate pesitsuspaikade kättesaadavust ja põhjustab nende kontsentreerumist vähestesse turvalistesse piirkondadesse. Valgustusega seotud stress võib põhjustada ka munemisprotsessi katkestamist, vähendades oluliselt populatsioonide taastootmisvõimet. [46]

Sarnaseid valgusest tingitud häireid on täheldatud ka kahepaiksetel, näiteks harilikul kärnkonnal, kelle paaritumiskäitumine kunstvalguse mõjul muutub, mille tagajärjeks on edukate viljastamiste arvu vähenemine. Paljudel mereorganismidel, sealhulgas planktonil ja korallidel, on sigimiskäitumine tihedalt seotud kuutsükliga, mille looduslikku mustrit võib taevakuma hägustada. Selle tagajärjel võib paljunemine jääda ajaliselt ebasobivaks või täielikult ebaõnnestuda. [46]

Valgusreostusel on täheldatud ka arengulisi mõjusid. Katsetes, kus veekogud olid öösel valgustatud, ilmnes, et teatud kalaliikide, näiteks meriahvenate vastsed, ei arene korralikult. Valgustusega kokkupuutel suurenes väärarengute esinemine ning tõsis järglaste suremus noores eas. Samalaadsed mõjud on dokumenteeritud ka maismaaloomadel, näiteks tammari vallabil, kelle hooajalised sigimistsüklid võivad valgusreostuse tõttu häiruda, viies järglaste madalama elujõulisuseni. [46]

2.3.7 Kommunikatsiooni ja orientatsiooni häired

Mitmed liigid kasutavad bioluminestsentsi või loomulikku valgust kommunikatsiooniks. Näiteks hõõgusside ja tuleusside paaritumissignaalid võivad valgusreostuse tõttu jääda märkamatuks, põhjustades paljunemisedukuse langust. Sarnane mõju on täheldatud ka planktiliste vetikate ja teiste veeorganismide hulgas, kes kasutavad valgussignaale kaitsereaktsioonideks või liigisisesteks hoiatussüsteemideks. [46]

2.3.8 Füsioloogilised muutused ja hormonaalsed häired

Loomadel on kunstvalguse mõjul täheldatud hormonaalse regulatsiooni häireid, sh stressihormoonide taseme tõusu ja immuunvastuse nõrgenemist. Näiteks laululindudel põhjustab valgustus ööpesitsuspaikades häiritud immuunreaktsiooni. Samuti on kunstvalguse mõjul täheldatud mutatsioone geenides, mis reguleerivad ainevahetust ja sugurakkude arengut, eelkõige sääskede ja kahepaiksete hulgas. [46]

2.3.9 Mõju taimestikule ja toiduahelatele

Kunstlik valgus häirib taimede loomulikku valgustsükli, põhjustades varasemat õitsemist ja hilisemat lehtede langemist, mis muudab ökosüsteemide hooajalist dünaamikat ja mõjutab teiste liikide toitumis- ja sigimiskäitumist. Taimede fenoloogilised muutused vähendavad tolmeldamise edukust ja võivad suurendada invasiivsete liikide konkurentsieelist, mis omakorda kahjustab loodusliku taimestiku taastumisvõimet. [46],[53]

3. VALGUSREOSTUSE SEADUSANDLUS, UURINGUD JA ALGATUSED

Viimastel aastakümnetel on kasvav teadvustatus valgusreostuse ulatuslikest mõjudest viinud selleni, et nii teadlased, linnaplaneerijad kui ka poliitikakujundajad pööravad üha enam tähelepanu selle keskkonnanähtuse ohjamisele. Kuigi valgusreostus on globaalne probleem, on selle käsitlemise viisid riigiti ja piirkonniti märkimisväärselt varieeruvad. Mõnes riigis on kehtestatud rangemad riiklikud normid, samas kui teistes on tegemist peamiselt omavalitsuste tasandil rakendatavate suuniste ja algatustega. Käesolevas peatükis käsitletakse valgusreostusega seotud õigusraamistikke ja uurimistegevusi nii rahvusvahelisel tasandil kui ka Eestis, rõhuasetusega olemasolevatel standarditel, seaduslikel alustel ning kohalike omavalitsuste rakendatavatel meetmetel. Analüüsi eesmärgiks on hinnata, kuidas olemasolevad mehhanismid toetavad tõenduspõhist ja jätkusuutlikku valgustuskorraldust.

3.1 Ülevaade valgusreostuse regulatsioonist Euroopa Liidu tasandil

Valgusreostuse normatiivne käsitlemine on arenenud järk-järgult paralleelselt ühiskondliku teadlikkuse kasvuga selle mõjudest looduskeskkonnale, inimeste heaolule ja ökosüsteemide toimimisele. Valgusreostuse õiguslik reguleerimine on siiski rahvusvaheliselt killustunud ning sageli puudub selge ja sidus seadusandlik raamistik, mis käsitleks valgusreostust iseseisva keskkonnasaasteliigina. Erinevalt keemilisest või mürareostusest on valgusreostuse mõõtmine ja piiritlemine keerukam, mistõttu seda käsitletakse sageli vaid osana laiematest energiatõhususe või visuaalse mugavuse eesmärkidest. [5],[11]

Euroopa Liidu tasandil ei eksisteeri seni sidusat ja terviklikku õiguslikku alust valgusreostuse ennetamiseks. Tähelepanuväärseks näiteks on siinjuures Tšehhi Vabariigi eestvedamisel 2022. aastal koostatud raport „Light Pollution Reduction Measures in Europe“, mille eesmärk oli koondada teave liikmesriikide olemasolevate praktikate ja strateegiate kohta ning käivitada arutelu ühtsemaid Euroopa tasandi algatusi toetava poliitikaraamistiku loomiseks. Uuring esitati Brnos toimunud rahvusvahelisel seminaril ning see käsitles nii ELi liikmesriike, Euroopa Vaba Kaubandustsooni kuuluvad riike kui ka Ühendkuningriiki. [5],[11]

Uuringus tuuakse esile järgmised sidusus järgnevaga:

- riiklike või piirkondlike seadusandlike aktide olemasolu, millega reguleeritakse valgusreostuse piiranguid;

- kehtivaid ja kavandatavaid tehnilisi norme, mis seavad nõudeid valgusseadmete parameetritele, nagu värvsustemperatuur, valgusvoo tugevus;
- juhendmaterjale ja soovituslikke käsiraamatuid, mis aitavad kujundada sobilikke valgustuslahendusi;
- kohalikke initsiatiive, tumeda taeva alasid ja kogukondlikke ettevõtmisi, mis ei pruugi kuuluda ametlikesse rahvusvahelistesse programmidesse (nt Dark-Sky Association), kuid millel on oluline mõju öise valguse keskkonnale. [5],[11]

Euroopa Liidu tasandil puudub tänaseni otseselt siduv regulatsioon valgusreostuse kohta. Valguse mõju elurikkusele käsitletakse kaudselt näiteks elupaikade direktiivi või keskkonnamõjude hindamise direktiivi raames, kuid puuduvad ühised kohustuslikud piirmäärad (CCT-le, valgusvoole või ULOR-ile). Euroopa Parlament on siiski 2021. aastal esitanud resolutsiooni, milles kutsutakse Euroopa Komisjoni üles kehtestama valgusreostuse vähendamise eesmärgid aastaks 2030. Aruteludes on tõstatatud ka nn „pimedate infrastruktuuri“ kontseptsioon, mis keskenduks pimedate ökosüsteemide ja öise maastiku kaitsele. Praegused algatused on siiski suures osas soovituslikud ning liikmesriigid käsitlevad valgusreostust väga erineval viisil. [5],[7],[11]

3.2 Valgusreostuse regulatiivne raamistik Eestis

Eestis puuduvad seni riiklikul tasandil spetsiifilised õigusaktid, mis käsitleksid või ohjaksid valgusreostust iseseisva keskkonnaprobleemina. Erinevalt mitmest Euroopa riigist, näiteks Prantsusmaast, Horvaatiast ja osaliselt ka Soomest, kus valgusreostuse reguleerimiseks on kehtestatud kas siduvad määrused või spetsiaalsed strateegiad, põhineb Eesti käsitus valdavalt üldkeskkonnavalastel õigusaktidel, rahvusvaheliste standardite järgmisel ning kohalike omavalitsuste algatustel. [5], [11]

Valgus on Eesti õiguses defineeritud kui võimalik saasteaine. Näiteks Keskkonnakaitse seadustiku üldosa seaduses loetakse valgus üheks võimalikuks keskkonna heitmeks [54]. Siiski ei ole Eestis kehtestatud rakendusakte ega määruseid, mis määratleksid lubatud valgusparameetreid, näiteks maksimaalne lubatud valgusvoog, spektraalne koostis või värvsustemperatuur. Sellest tulenevalt puudub ühtne, siduv ja süsteemne regulatsioon riiklikul tasandil valgusreostuse ohjamiseks või vältimiseks.

Valgustuslahenduste projekteerimine toimub Eestis valdavalt Euroopa standardite (EVS-EN) alusel, kuid nende rakendamine on vabatahtlik või sõltub projektipõhiselt

tellijast, enamasti kohaliku omavalitsuse nõuetest. Eesti olulisemad standardid hõlmavad:

- EVS-EN 12665:2024, mis määratleb valgustehnilised mõisted ent ei sätesta energiasäästu, energiamärgistuse, valgusreostuse ega keskkonnamõjude nõudeid. [2]
- EVS-EN 12464-2:2025, mis käsitleb välitööalade valgustust ja sisaldab uuendusi häiriva valguse vältimiseks, sh keskkonnatsoon E0, troboskoopiliste efektide vältimise juhised ning jätkusuutlikkuse põhimõtted. [40]
- EVS-EN 13201-2, mis sätestab teevalgustuse jõudlusnõuded. Kuigi valgusreostust otseselt ei käsitleta, sisaldab standard mõistet "häiriv valgus", millega viidatakse valgusele, mis levib väljapoole valgustatavat piirkonda. [55]

Valgustusprojektide hindamine ja kooskõlastamine toimub Eestis peamiselt kohalike omavalitsuste tasandil, enamasti ehitus- ja planeerimismenetluste raames. Ulatuslikumad või keskkonnatundlikumad arendusprojektid võivad nõuda keskkonnamõju hindamist, mille käigus käsitletakse muuhulgas ka valgustingimuste mõju ümbritsevale keskkonnale. Siiski toimub valguse mõju hindamine valdavalt juhupõhiselt ning puudub süsteemne järelevalvemehhanism, mis tagaks valgusreostuse tervikliku käsitlemise keskkonnariskina.

Eesti valgustuspraktika on tugevalt mõjutatud rahvusvahelistest allikatest, eriti Saksamaa, Prantsusmaa ja Põhjamaade juhendmaterjalidest [5]. Paljud Eestis kasutusel olevad juhised ja määratlused on pärit otsetõlkena või kohandatult kolmandate riikide süsteemidest.

3.3 Kohaliku omavalitsuse algatused

Eestis puuduvad siiani riiklikul tasandil siduvad õigusaktid, mis käsitleksid valgusreostuse ennetamist või ohjamist iseseisva keskkonnaprobleemina. Siiski on mitmed kohalikud omavalitsused astunud samme valgusreostuse mõju vähendamiseks, töötades välja kohalikke määrusi ja suuniseid, mis reguleerivad valgustuspraktikat. Eeskätt Tallinn ja Tartu on oma arengudokumentides ja valgustusstrateegiates käsitlenud valgusreostuse vähendamise põhimõtteid, keskendudes seejuures nii keskkonna kui ka linnaruumi kvaliteedi parandamisele.

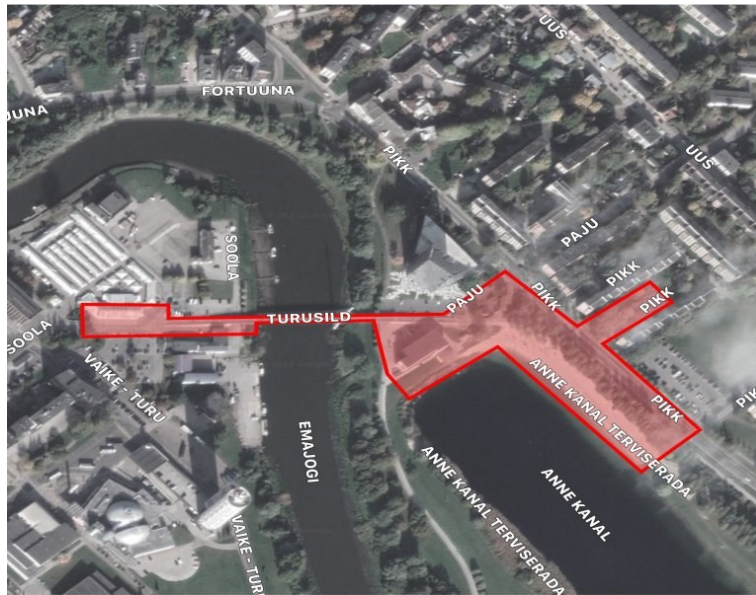
Tallinna linna ametlikus dokumendis „Tallinna linna teevalgustusnormid“ käsitletakse mitmeid valguskeskkonna kvaliteediga seotud aspekte, mis seonduvad otseselt või

kaudselt valgusreostuse temaatikaga. Kuigi dokument ei kasuta mõistet „valgusreostus“, sisaldavad selle sätted nõudeid soovimatu valguse hajumise vältimiseks: näiteks rõhutatakse, et valgustus ei tohi häirida hooneid, krunte ega eluruume, ning et valguse suunamine peab toimuma ainult sinna, kus seda on funktsionaalselt vaja. Samuti on normides sätestatud nõuded valgustugevuse, valgusti optiliste omaduste ja paigutuse kohta, mis aitavad vähendada valguse levikut väljapoole sihtala, sealhulgas ülespoole taeva suunas, kus see võib takistada öise taevavaatluse võimalusi ja avaldada negatiivset mõju looduskeskkonnale.[39]

Lisaks on mõnes omavalitsuses, nagu Rakvere ja Pärnu, rakendatud üldeeskirju ja linnaehituslikke suuniseid, mis mõjutavad välisvalgustust, eriti reklaamvalgustuse paigaldamisel. Need juhised reguleerivad valgustugevust, tööaegu ja valguse levikut, eelkõige elamupiirkondades. Spetsiifilisi valgusreostust käsitlevaid määrusi nendes linnades seni kehtestatud ei ole. Enamik kohalikke meetmeid põhineb kohalikel ehitismäärustel ja hea tava põhimõtetel. Meetmete ulatus ja konkreetne varieerub olenevalt omavalitsusest, mis näitab vajadust ühtlustatud ja koordineeritud riikliku lähenemise järele.

Tallinnas on viimastel aastatel seatud prioriteediks adaptiivse tänavavalgustuse arendamine, mille eesmärk on vähendada valgusreostust, säilitades samas liiklusohutuse ja visuaalse kvaliteedi. Linna valgustuskorraldust toetab GSM-võrgul põhinev haldussüsteem, mis võimaldab reaalajas jälgida ja juhtida valgustust ning reageerida kiiresti häiretele või ülevalgustamisele. Valgustusstrateegias "Tallinn 2035" rõhutatakse läbimõeldud ja esteetiliselt kooskõlastatud valgustuse olulisust, seostades valgusreostuse piiramise turvalise ja meeldiva linnaruumi kujundamisega. [11]

Tartu linn on samuti aktiivselt tegelenud valgusreostuse mõju uurimise ja vähendamisega. Linn osales Euroopa Liidu teadusprojektis ENLIGHTENme (2021–2024), mille raames analüüsiti sise- ja välisvalgustuse mõju elanike tervisele ja heaolule. Uuring viidi läbi Annelinna linnaosas, kus hinnati muudetud valgustingimuste mõju, kasutades nii valgustustehnilisi mõõtmisi kui ka elanike tagasisidet. Uus valgustuslahendus paigaldati Anne kanali äärde ja Turusillale, et testida valgustuse sobivust elanike vajadustega. Katseala valgustus oli enne projekti vananenud ning uued leedvalgustid paigaldati eesmärgiga parandada valgustustasemeid, vähendada energiakulu ja hinnata valgustuse mõju elanike heaolule.[11],[56]



Joonis 4.1 Annelinna linnaosa kaart valgusreostuse uuringuprojekti raames

Tallinn ja Tartu osalesid lisaks LUCIA (Lighting the Baltic Sea Region) projektis, mille eesmärk oli uurida hooajaliselt muutuva valgustuse mõju avalikus ruumis, eriti rohealadel. Projekt pakkus väärtuslikku teavet valgustuse dünaamilise juhtimise ja valgusreostuse vähendamise kohta põhjamaistes linnakeskkondades. [11]

3.4 Eestis teostatud valgusreostuse uuringud

Eestis on valgusreostuse ulatuslikemad teadusuuringud seni läbi viidud Tallinna Tehnikaülikooli Füüsikainstituudi eestvedamisel koostöös Keskkonnainvesteeringute Keskusega. 2012. aastal korraldati üleriigiline projekt „Valgusreostuse pikaajaliste muutuste uurimine Tallinnas ja valgusreostuse hetkeseisu määramine Eestis“, mille raames mõõdeti öise taeva heleduse taset mitmetes piirkondades üle Eesti, välja arvatud Saare- ja Hiiumaa. Uuringus kasutati seniidid mõõdetud taeva heleduse näitajaid ja võrreldi neid ajalooliste fotomeetriliste andmetega, mida oli kogutud Tallinna Hiiu Tähetornis aastatel 1968–1973. [57] Käesolev uuring ei ole kaasanud Tallinna linnaosade uurimist, mistõttu käesoleva magistr töö raames oli seatud eesmärk üles mõõta Mustamäe linnaosa. Andmaks ülevaadet käesolevast seisukorrast Mustamäe linnaosas ning rajada alus tulevaste uuringute jaoks.

2012. mõõtmised keskendusid seniidid taeva heleduse määramisele. Tähtsaks aluseks olid ajaloolised fotomeetrilised andmed Tallinna Hiiu Tähetornist, kus on alates 1955. aastast tehtud astronoomilisi vaatlusi. Taevafooni füüsikaliste muutuste uurimiseks sai

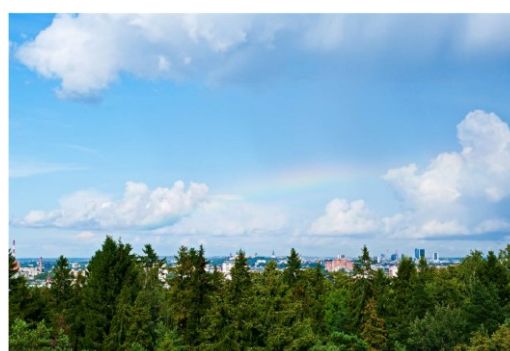
kasutada vaid teatud perioodil (1968–1973) kogutud andmeid (vt Tabel 2), kuna vaid siis registreeriti kõik vajalikud parameetrid taevafooni määramiseks.[57]

Uuring võrdles 1968–1973 Hiiu tähetornis kogutud vaatlusandmeid 2012. aastal tehtud mõõtmiste tulemustega. Tulemuste otsene võrdlemine oli keeruline erinevate seadmete tõttu: näiteks erines valgusdetektorite spektraalne tundlikkus, mis avaldas mõõtemääramatust.[57]

Tabel 2. Valgusreostuse uurimiste ja mõõtmiste verstepostid Eestis

Aasta	Juhtum	Kaasatud piirkonnad
1966	Astronoomiavaatluste algus Hiiu Tähetornis	Tallinn, Tallinna Hiiu Tähetorn
1968	Esmased kogutud andmed taevafooni heledusest	Tallinn, Tallinna Hiiu Tähetorn
1968–1973	Jätkub andmete kogumine taevafooni heledusest	Tallinn, Tallinna Hiiu Tähetorn
2012	Valgusreostuse kaardistamine üle Eesti	Tallinn, Eesti v.a Lääne-Eesti
2023	Valgusreostuse kaardistamine Tallinnas	Tallinn

Aastatel 1968–1973 kogutud andmete põhjal määrati taevafooni heleduseks keskmiselt $18,5 \pm 1,5$ mag/arcsec². Kuigi mõõtmismeetodid ja seadmed erinesid 2012. aasta omast, viitas võrdlus sellele, et taeva heleduse üldine tase ei ole oluliselt muutunud. Seda toetab ka õhureostuse vähenemine ja linnakeskkonna haljastuse, näiteks Mustamäe kõrghaljastuse, suurenemine.[57] Taeva tausta heleduse parimaks hinnanguks on soovitatud 22,7 mag/arcsec². [5]



Joonis 3.2a ja 3.2b Vaade Tallinna Tähetornist 1960-te keskel ning aastal 2011.[57]

2023 aastal viis TalTech läbi jätku-uuringu „Tallinna linna valgustuskeskkonna (valgusreostuse ja räiguse) hindamine ja analüüs“, mis käsitles valgusreostuse arengut aastatel 2012–2021. Analüüsis kasutati panoraamvaateid ja satelliitandmeid, mis näitasid, et pärast 2020. aastat, mil linnaline areng kiirenes ja majandustegevus taastus (pärast ajutist langust COVID-perioodil), toimus Tallinna valgusreostuses märkimisväärne kasv. Erinevalt näiteks Göteborgist või Turust, kus valgusreostuse suurenemine oli tagasihoidlikum, täheldati Tallinnas urbaniseerunud taevahelenduse laienemist äärelinna piirkondadesse, nagu Nõmme ja Põhja-Tallinn. [5] Uuring tõi valgusreostuse probleemi avalikkuse ette selgemalt kui varem – selle tulemusi esitleti Tallinna linna seminaril 14. septembril 2023, kus valgusreostus oli esmakordselt käsitletud keskkonnaprobleemina. [58]

Mainitud uuringud andsid väärtuslikke empiirilisi andmeid, ent ei käsitletud need valgusreostust standardi EVS-EN 12464-2 viimase redaktsioon käsitluses, mis ilmus alles käesoleval aastal ning mis defineerib nn keskkonnatsoone (E0–E4) ja häiriva valguse piirtasemeid. 2012. aasta projekt küll kaardistas öise taeva heleduse kogu riigis ning tuvastas vähem valgusreostunud piirkonnad, näiteks Hiiumaa, kuid sellest ei ole kujunenud süsteemset ega juriidiliselt siduvat pimedate alade määramise või kaitsmise poliitikat.

3.5 Valgusreostuse ja pimedate alade uuring Soomes

Soomes ei ole analoogiliselt Eestile kehtestatud spetsiaalset valgusreostust käsitlevat seadust. Soomes käsitlevad mitmed olemasolevad õigusaktid valgust kui võimalikku keskkonnahäiringut. Keskkonnakaitse seadus (527/2014) defineerib valguse ühe võimaliku heitmena, mis võib põhjustada keskkonnakahju, mis võimaldab piirata valgusheidet juhul, kui valgus põhjustab olulist häiringut. Samuti käsitlevad valgust ka teised õigusaktid, nagu Planeerimis- ja ehitusseadus (132/1999), Looduskaitse seadus (1096/1996), Naabrussuhete seadus (26/1920) ning Rahvatervise kaitse seadus (763/1994), mille alusel on võimalik reguleerida valgusreostuse allikaid juhul, kui need ohustavad looduskeskkonda, tervist või häirivad elanikkonda.[11]

Soomes on valgusreostuse kaardistamise ja ennetamise valdkonnas tehtud mitmeid teaduspõhiseid samme. Eriti märkimisväärne on Helsingi linna poolt 2021. aastal läbi viidud uuring „Häiriva valguse analüüs Helsingis“ (Helsingin häiriövaloselvitys), mille eesmärgiks oli tuvastada peamised valgusreostuse allikad ning pakkuda välja lahendusi keskkonda ja inimesi arvestavaks valgustuseks. Uuringus kombineeriti kvantitatiivsed mõõtmised sealhulgas taeva heleduse hindamine öötaeva heleduse

mõõtja (SQM) abil ja luksimõõtmised reklaam- ja fassaadivalgustuse osas koos kvalitatiivsete elanikelt kogutud hinnangutega. Uuringu üheks olulisemaks tulemusena jaotati Helsingi piirkonnad keskkonnatsoonideks E1 kuni E5 vastavalt valgustusvajadusele ja keskkonnatundlikkusele. Tsoon E1 määratleti kui valgusele äärmiselt tundlik piirkond, kus valgus peab olema minimaalne, samas kui E5 hõlmas tihedama asustusega ööelu piirkondi. Selline tsoonipõhine käsitlus võimaldas luua ühtsed ja selged kriteeriumid valgustuse intensiivsuse, suuna ja spektraalse koostise osas ning võimaldab jagada linna tsoonideks. [57],[59]

Lisaks töötati välja linna tasandi juhised valgustite valikuks ja paigaldamiseks nii avalikus ruumis kui linna omanduses olevatel hoonetel. Soovitustes rõhutati madalama heledusega valgusallikate kasutamist, värvsustematuuri piiramist (nt <3000 K tundlikes piirkondades), valgusvoo suunamist ainult vajalikule pinnale ning valguslekkega arvestamist. Reklaamekraanide ja välireklaamide osas kehtestati konkreetseid heleduse piirmäärasid, tööaegade piiranguid ja nõudeid valguse hajumise vältimiseks. Samuti vaadeldi olemasolevate valgustuslahenduste energiasäästlikkust ja võimalusi nende moderniseerimiseks, et saavutada parem tasakaal nähtavuse, ohutuse ja keskkonnamõjude vahel. [57],[59]

Oluline on märkida, et uuringu tulemusena kaardistati ja määratleti piirkonnad, kus looduslik pimedus säilib ning mida tuleks kaitsta tehisvalguse eest. Kaitsmist vajavad piirkonnad määrati säilitamiseks pimedana ning uute valgustuslahenduste planeerimisel tuli arvestada rangemaid piiranguid. Antud lähenemine tähistab esimest süsteemset sammu öise loodusliku pimeduse säilitamise suunas urbaniseeritud piirkonnas Soomes.

Kodanike tagasiside rõhutas tugevalt vajadust säilitada pimedaid alasid, kus oleks võimalik kogeda looduslikku pimedust ja tähistaevast. [57],[59]

3.6 Teiste riikide regulatsioonid

Valgusreostuse regulatiivne käsitlus erineb riigiti märkimisväärselt, sõltudes vastava riigi keskkonnapoliitika arengutasemest, seadusandlikest traditsioonidest ning ühiskondlikest prioriteetidest. Mitmed Euroopa ja Aasia riigid on viimastel aastatel kehtestanud siduvaid õigusakte, piirkondlikke strateegiaid või valgustusstandardeid, mille eesmärk on piirata tehisvalguse levikut ning leevendada selle mõju ökosüsteemidele ja inimeste heaolule. Rahvusvaheline raamistik valgusreostuse süsteemseks ohjamiseks siiski puudub, sh Euroopa Liidu tasandil, mis on tekitanud märkimisväärse lähenemisviiside killustatuse. Eesti paikneb selles võrdluses pigem

reguleerimata või nõrga käsitlesega riikide hulgas, samas kui mitmed teised riigid (nt Prantsusmaa, Horvaatia, Lõuna-Korea) on kehtestanud siduvad normid ja tsoonipõhise reguleerimise. [5],[11]

3.6.1 Prantsusmaa

Prantsusmaa on Euroopa kontekstis kehtestanud ühe kõige ulatuslikuma ja tehniliselt detailsema valgusreostuse ennetamise määrustiku, mille aluseks on keskkonnakoodeksi artiklid ja 27. detsembri 2018. aasta määrus „Arrêté relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses“. Määrus on siduv kogu riigi territooriumil ning hõlmab erinevat tüüpi välisvalgustust, sh teede, mitteeluruumide, avalike parkide, spordiväljakute, parkimisalade ja ehitusobjektide valgustust. Määrusega on sätestatud tehnilised piirväärtused valguse ülepoolse talituskasuteguri osas (ULOR <1%), korreleeritud värvsustemperatuuri maksimaalsed väärtused (üldiselt kuni 3000 K, kaitsealadel kuni 2400 K), valgusvoo pindtihedused ning konkreetse valguse sisselülitamise ja väljalülitamise kellaajad eri tüüpi aladele. Näiteks tuleb majade fassaadivalgustus ja vitriinid öötundidel välja lülitada ning parkimisalade valgustus lõpetada hiljemalt kaks tundi pärast tegevuse lõppu. Eraldi nõuded kehtivad ka ökosüsteemiliselt tundlikele aladele, nagu loodusreservaadid ja astronoomilised keskused, kus valgus ei tohi ülespoole levida (ULOR = 0) ning värvsustemperatuur on piiratud 2400 K või vähemaga. Lisaks on keelatud laser- ja valguskahurite kasutamine nendes piirkondades. Prefektil on õigus kehtestada veelgi rangemaid nõudeid, lähtudes liikide valgustundlikkusest ja ökosüsteemide katkematuse printsiibist. [11],[60]

3.6.2 Horvaatia

Horvaatia kuulub Euroopa riikide hulka, kes on kehtestanud valgusreostuse suhtes tervikliku ja siduva seadusandliku raamistiku. 2019. aastal jõustus seadus „Zakon o zaštiti od svjetlosnog onečišćenja“ (NN 14/19), mis käsitleb valgusreostust iseseisva keskkonnaprobleemina. Seadus sätestab kohustused nii kohalikele omavalitsustele kui ka kõigile valgustuse planeerimise, paigaldamise ja haldamisega seotud osapooltele. Muu hulgas kehtestatakse viieastmeline valgustsoonide süsteem, määratletakse lubatud valgusparameetrid (sh maksimaalne lubatud valgusvoog, ULOR = 0% tavalise valgustuse puhul) ning keelatakse sinise valguse ülekasutus (valgustuse spektraalsed piirangud alla 500 nm lainepikkuste osas). Kohustuslikud on valgustusplaanid ning meetmed peavad hõlmama valgusallikate korrapärast hooldust ja ümberehitust vastavalt seaduses toodud nõuetele. Erilist tähelepanu pööratakse kaitsealadele ja veekogudele suunatud valguse vältimisele, samuti astronoomilistele vaatluskohtadele.

Määrusega NN 128/2020 on täpsustatud tehnilised piirväärtused, sealhulgas maksimaalne ülesse kiirgav valguse määr, värvsustemperatuur (kuni 3000 K üldpiirkondades ja kuni 2200 K kaitsealadel) ning valgustugevuse ülempiirid. Seadus keelab otsesõnu ülespoole suunatud valgustid, prožektorid ja sinise valguse liigse kasutuse looduskeskkonnas. [5], [31]

3.6.3 Itaalia

Itaalia valgusreostuse käsitus on detsentraliseeritud ning põhineb peamiselt piirkondlikel õigusaktidel. Üks kõige eesrindlikumaid on Lombardia piirkonna seadus Lombardia piirkonnaseadus (L.R. 17/2000), mis kehtestab selged tehnilised ja halduslikud nõuded valgusreostuse piiramiseks. Seadus kohustab kasutama täisvarjestatud valgusteid, mille valgusvoog ei tohi ulatuda üle horisontaali (ULOR kuni 0,49 cd/klm), ning nõuab öise valgustaseme vähendamist vähemalt 30% võrra, ning seab ülempiirid heledusele ja valgusvoole. Soovitavate valgusallikatena nähakse ette kõrgrõhu- ja madalrõhu-naatriumlambid. Kaitsealadel ja observatooriumide läheduses kehtivad veelgi rangemad piirangud: näiteks tuleb valgus suunata täielikult allapoole ning värvsustemperatuur peab jääma alla 2700 K või 2200 K, sõltuvalt tsoonist. Kohalikud omavalitsused on kohustatud koostama valgustuskorralduse plaanid ning teostama järelevalvet; tootjatel lasub kohustus esitada fotomeetrilised tõendid oma toodete vastavusest tehnilistele kriteeriumitele. Kuigi Lombardia seadus on olnud teerajaja rollis ja eeskujuks mitmele teisele piirkonnale, ei käsitlee see tänapäevaseid leedvalgustustehnoloogiaid ning on seetõttu mõnevõrra ajale jalgu jäänud. Riiklikul tasandil on koostatud juhendmaterjale, nagu UNI 10819:1999, kuid siduv seadus puudub. [5],[11],[41]

3.6.4 Lõuna-Korea

Lõuna-Korea on üks väheseid Aasia riike, kus valgusreostust käsitletakse iseseisva keskkonnaprobleemina riiklikul tasandil. 2013. aastal jõustunud seadus „Act on the Prevention of Light Pollution due to Artificial Lighting“ loob tervikliku õigusraamistiku valgusreostuse vältimiseks ja piiramiseks. Seadus määratleb valgusreostuse liigse või sobimatu kunstliku valguse levikuna, mis häirib inimeste elukeskkonda või kahjustab ökosüsteeme, ning kohustab keskkonnaministrit koostama iga viie aasta tagant üleriigilise valgusreostuse ennetamise plaani. Kohalikud omavalitsused peavad seejärel koostama vastavad piirkondlikud tegevuskavad. Seadus näeb ette spetsiaalsete „valguskeskkonna haldustsoonide“ määramise, mille alusel jagatakse territoorium nelja tsooni (E1–E4) vastavalt ökosüsteemi tundlikkusele ja asustustihedusele. Iga tsooni jaoks kehtestatakse lubatud valguse emissiooni

piirväärtused, sealhulgas spektraalne koostis ja valgusintensiivsus. Valgustuse haldajatel lasub kohustus nendest piirnormidest kinni pidada, vajadusel kolme aasta jooksul pärast tsooni määramist oma valgustid ümber kujundada või asendada. Kohalikud omavalitsused viivad läbi regulaarseid järelevalve- ja mõõtetegevusi ning Keskkonnaministeeriumil on õigus määrata trahve või anda korraldusi seadusega vastuolus olevate valgustusseadmete sulgemiseks. Seadus sisaldab ka sätteid valgusreostuse hindamiste, valgustustehniliste standardite, teadusuuringute ja sertifitseerimisasutuste kohta. [5],[11],[42]

3.6.5 Tšehhi

Tšehhi on viimasel kümnendil teinud samme õigusloome suunal. Kuigi riiklikult siduvat valgusreostuse seadust veel ei eksisteeri, on Tšehhis mitmeid määrusi ja suuniseid, mis käsitlevad valgusreostuse vähendamist kaudsemalt, peamiselt loodus- ja maastikukaitse kontekstis. Tšehhi seadusandluses on valguse mõju käsitletud näiteks looduskaitse seaduse (Act No. 114/1992 Coll., on Nature and Landscape Protection) raames, kus valgusreostus on nimetatud võimaliku keskkonnahäiringuna. Erilise tähelepanu all on tumedad taevaalad ja rahvusvaheliselt tunnustatud pimedad taevakaitsealad (nt Jizerka ja Beskydy piirkonnad), mille kaitseks rakendatakse valgustuse piiranguid kohalike planeeringute ja keskkonnalubade kaudu. [5],[11],

3.7 Võimalused Eesti regulatiivse süsteemi arendamiseks

Rahvusvahelised praktikad näitavad selgelt, et valgusreostuse tõhusaks ohjamiseks on vaja sidusat, tsoonipõhist ja teaduspõhist õiguslikku raamistikku. Eriti eeskujuks sobib Soome, kus Helsingi linna poolt rakendatud keskkonnatsooni põhine valgustuse reguleerimine (E1–E5) on loonud praktilise aluse tõhusa valguskorralduse rakendamiseks [58]. Sellist lähenemist saab edukalt kohandada Eesti konteksti, tuginedes ka standardi EVS-EN 12464-2:2025 ametlikule keskkonnatsooni (E0–E4) klassifikatsioonile [40].

Tsoonipõhine raamistik võimaldaks Eestis määratleda piirkonnad, kus on vajalik minimaalne tehisvalgus näiteks kaitsealad, rahvuspargid, tumeda taeva alad, linnalähedased looduspargid ning astronoomilised vaatluspaigad. Selliste alade määratlemine peab tuginema tegelikele valgustingimuste mõõtmistele ning ökosüsteemide valgustundlikkuse hindamisele. [5], [57].

Kuigi Keskkonnaseadustiku üldosa seadus defineerib valguse kui võimaliku keskkonnaheitme [53], puuduvad Eestis siiani rakendusaktid, mis seaksid siduvad

piirväärtused, näiteks maksimaalne lubatud valgusvoog, CCT, ULOR või spektraalne koostis, mistõttu tuleks olemasolevaid keskkonnaõiguse sätteid tõlgendada valgusreostuse kontrollimise eesmärgil [5], [11].

Lisaks õigusaktide täiendamisele on oluline pimedate alade õiguslik kaitse. TalTechi uuringud (2012 ja 2023) on tuvastanud Eesti territooriumil mitmeid vähevalgustatud piirkondi: Hiiumaa, Tallinna looduslikud servaalad jmt [5],[57]. Nende alade säilitamiseks puudub juriidiline raamistik. Käesolevate alade tunnistamine ametlikeks keskkonnatsooni E0 või E1 piirkondadeks loovad eelduse nende kaitsmiseks nii planeeringutes kui valgustusprojektides [40].

Rahvusvahelised eeskujud (nt Prantsusmaa ja Horvaatia) näitavad, et edukas valgusreostuse piiramine tugineb siduvale õigusraamistikule, mis sisaldab selgeid tehnilisi näitajaid. Prantsusmaa 2018. aasta valgusreostuse määrus sätestab kohustuslikud ULOR, CCT ja ajapiirangud valgustuse kasutamisel [59], samas kui Horvaatia seadus õhutab ULOR = 0% ja CCT ≤ 3000K kohaldamist kõigis valgustsooni kuuluvates valgustites [5]. Eesti saab neilt eeskujuga võtta, sätestades selged normid käitumiseks erinevates keskkonnatsooni tüüpides ning keelates suunamata või liigse spektraalkoostisega valgustid.

Tuleviku valgusreostuse ohjamise õiguslik strateegia peaks sisaldama järgmisi samme:

- Riikliku valgusreostuse seaduse kehtestamine, mis sisaldab kohustuslikke tehnilisi piirmääraseid ja sätestab vastutuse järelevalve korraldamise eest;
- Tsoonipõhise valgustuskorralduse rakendamine, kasutades standardi EVS-EN 12464-2 tsoone [40];
- Kohustuslike valgustusplaanide koostamine kõikidele omavalitsustele, kaasates ka pimedade öökeskkonna säilitamise aspektid [11];
- ULOR ülempiiri sätestamine (nt ULOR ≤ 1% tavaoludes ja ULOR = 0% tundlikes tsoonides);
- Värvsüsteemtemperatuuri piirmäär 3000K, tundlikes piirkondades 2200K – võttes eeskujuga Prantsusmaa ja Horvaatia praktikast [5], [59];
- Juhitavate ja adaptiivsete valgustusüsteemide kohustuslik rakendamine uutes ja renoveeritavates valgustuspaigaldistes [5], [21].

Lõpuks on vajalik luua regulaarne seire- ja hindamissüsteem, mis tõendab valgusreostuse taset ning selle muutumist ajas. Selle aluseks saab olla TalTechi, Tartu ja Tallinna varasemate projektide (nt ENLIGHTENme) mõõtmis- ja seiresüsteemide

metoodika [55]. Tulemused peaksid olema avalikud ja kättesaadavad, et suurendada teadlikkust ja toetada andmepõhist poliitikakujundamist.

4. MÕÕTMISED MUSTAMÄE LINNAOSAS

Mustamäe linnaosa pimedate alade kaardistamiseks viidi läbi välitööd, mille käigus mõõdeti tänavavalgustuse kvaliteeti valitud sõiduteelõikudel. Kuna tegu oli mootorsõidukite liikluseks ettenähtud tänavatega, lähtuti mõõtmiste planeerimisel EVS-EN 13201 standardi põhimõtetest, mis käsitlevad M-klasside tänavavalgustuse kvaliteedinäitajaid. Lisaks valitud lõikudel teostatud heleduse mõõtmistele viidi kogu Mustamäe linnaosas läbi süsteemne ülevaatus, mille käigus kaardistati valgustustiheduse tasemed 49 erinevas punktis.

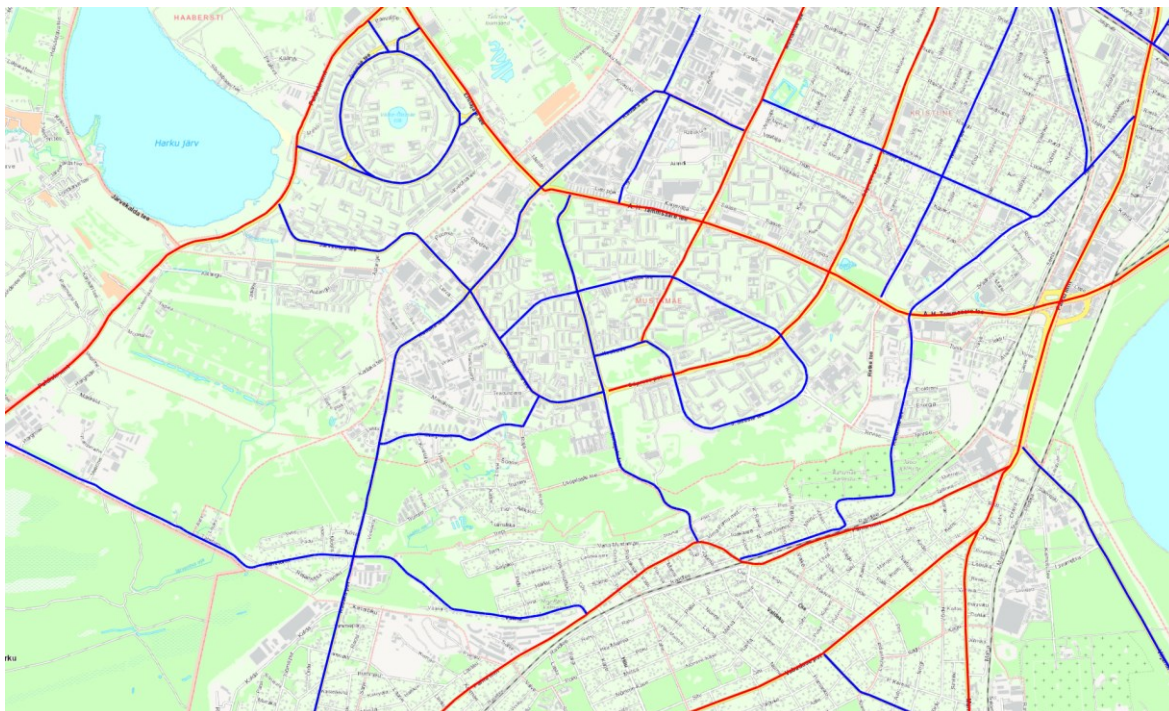
4.1 Tallinna linna üldiseloostus

Tallinna tänavavalgustuse võrgustik laieneb igal aastal ligikaudu 2000 uue valgusti võrra, kusjuures vananenud gaaslahenduslambid asendatakse süstemaatiliselt energiatõhusamate leedvalgustitega. 2023. aasta seisuga oli linnas kokku 71 435 tänavavalgustit, millest peaaegu pooled olid juba leedtehnoloogial põhinevad. [64] Ainuüksi 2024. aastal uuendati viies Tallinna linnaosas – Nõmmel, Kakumäel, Mustamäel, Kristiines ja Haaberstis – kokku 7878 valgustit. Enne vahetust oli nende seadmete koguvõimsus 963 kW, mille uus leedlahendus vähendas 410 kW-ni. Selle uuenduskuuri tulemusena saavutati hinnanguliselt ligikaudu 57% energiasäästu, mis tähendab umbes 2420 MWh säästetud elektrienergiat aastas. Edasiste sammudena kavandab Tallinna linn kogu linna hõlmava tänavavalgustuse kaugjuhtimissüsteemi rajamist, mis võimaldaks valgustust digitaalselt reguleerida ja tagaks omakorda ligikaudu 30% lisasäästu.[28]

Tallinna linnas kehtivad tänavavalgustuse nõuded põhinevad Euroopa standardil EVS-EN 13201, mille alusel on määratletud erinevad M-klassid vastavalt teekatte heledusele, valgustustiheduse ühtlusele ja räguse kontrollile. Kõige rangemad nõuded kehtivad M1 ja M2 klassile, kuid neid valgustusklasse Tallinnas ei kasutata. Kõige sagedamini rakendatakse linnas M3, M4 ja M5 valgustusklasse.

Joonisel 4.1 on kujutatud Tallinna tänavavalgustuse klasside jaotus: suuremad magistraalteed, kus liikluskoormus ja liikumiskiirused on kõrgemad, on määratud M3 (punane joon) ja M4 (sinine joon) valgustusklassidesse. Ülejäänud tänavatel, millele konkreetset valgustusklassi ei ole tähistatud, kasutatakse üldjuhul M5 klassi. M6 klassi

kasutatakse üksnes erandjuhtudel, näiteks tupiktänavatel või väga madala liiklussagedusega teelõikudel



Joonis 4.1. M3 ja M4 valgustusklassid Tallinna tänavatel, fookuses Mustamäe linnaosa.

4.2 Mõõtmiste läbiviimine

Mõõtmised Tänavavalgustuse kvaliteedi hindamiseks viidi mõõtmised läbi neljal valitud tänavalõigul Mustamäe linnaosas: Juhan Sütiste teel, Ehitajate teel, Kadaka teel ning Üliõpilaste teel. Nendes lõikudes rakendati digitaalkaamerapõhist heleduse mõõtmist seadmega LMK Mobile Air, mille abil määrati teekatte heleduse keskmine väärtus, piki- ja üldühtlus ning hinnati nende vastavust standardis EVS-EN 13201-3 sätestatud kvaliteedinõuetele. Lisaks digitaalmõõtmistele viidi läbi mahukad valgustustiheduste mõõtmised 49 punktis üle kogu Mustamäe linnaosa, kasutades selleks luksmeetrit Gigahertz-Optik MSC15.

Kõik mõõtmised teostati öisel ajal, kui tänavavalgustus oli töös nominaalrežiimil ning hajusvalguse allikad (nt reklaamtahvlid, liiklusvahendid, lähikonnas paiknevad hooned) olid minimaalselt häirivad. Mõõtmiste ohutuse ja usaldusväärsuse tagamiseks kandsid välitöötajad nähtavust suurendavaid helkurveste ning järgisid kehtivaid liiklusohutusnõudeid. Mõõtepunktide paigutamisel välditi varjestust põhjustavaid objekte (nt puid) ning kontrolliti, et tulemust ei mõjutaks teised valgusallikad, mis ei kuulu hinnatava valgustussüsteemi koosseisu.

4.2.1 Mõõteseadmed ja kalibreerimine

Heleduse mõõtmiseks kasutati kõrgtundlikkusega kaamerapõhist süsteemi LMK Mobile Air, mis võimaldab teekatte valgustatuse analüüsi kõrge ruumilise detailsusega. Kuna mõõtekaamera ei arvesta valgusallika spektraalseid iseärasusi, teostati enne mõõdistusi spektriline kalibreerimine spektroradiomeetriga Jeti Specbos 111UV. Kalibreerimise käigus jäädvustati valgustite all valget kalibratsiooniplaati mõlema seadmega, mille alusel arvutati individuaalsed spektraalkorrektuurid. Kalibreerimisandmed integreeriti tarkvaras LMK LabSoft, et saavutada võimalikult täpne spektraalne vastavus mõtekaadrite töötlusel.

4.2.2 Andmetöötlus ja mõõtetulemuste arvutamine

Heleduse mõõtmiseks digikaameraga kasutati kolmest säritusest koosnevat järjestikust pildistust – alasäri, kesksäri ja ülesäri. Selline mitme säritusega lähenemine võimaldab pilditöötluses luua kõrge dünaamilise ulatusega (HDR) heleduse kaadreid, mis vähendavad üle- või alasäritusest tingitud moonutuste riski ja tagavad maksimaalse mõõteandmete detailsuse. HDR-protsessis ühendati kolm pildifaili ühtseks mõõtealusmaterjaliks, millele rakendati väärvärvide süsteem, et hõlbustada mõõtepunktide visuaalset identifitseerimist ja paigutamist.

Mõõtepunktid paigutati tarkvarakeskkonnas vastavalt standardile EVS-EN 13201 selliselt, et need asusid üksnes sõidutee kattepiirkonnas. Eriti hoolikalt välditi pindasid, mis võinuksid mõjutada mõõtmistulemusi, nagu valged jooned, liiklusmärgistused, kaevuluugid või muud tugeva peegeldusvõimega elemendid. Selline paigutus tagas mõõteandmete representatiivsuse ja meetodilise täpsuse.

5. MÕÕTMISTULEMUSTE ANALÜÜS

Käesoleva peatüki eesmärk on analüüsida mõõtmistulemusi, mis saadi nelja erineva sõiduteelõigu heleduse ja Mustamäe linnaosa valgustustiheduse mõõtmiste käigus.

5.1 Helenduse mõõtmised

5.1.1 Sütiste tee

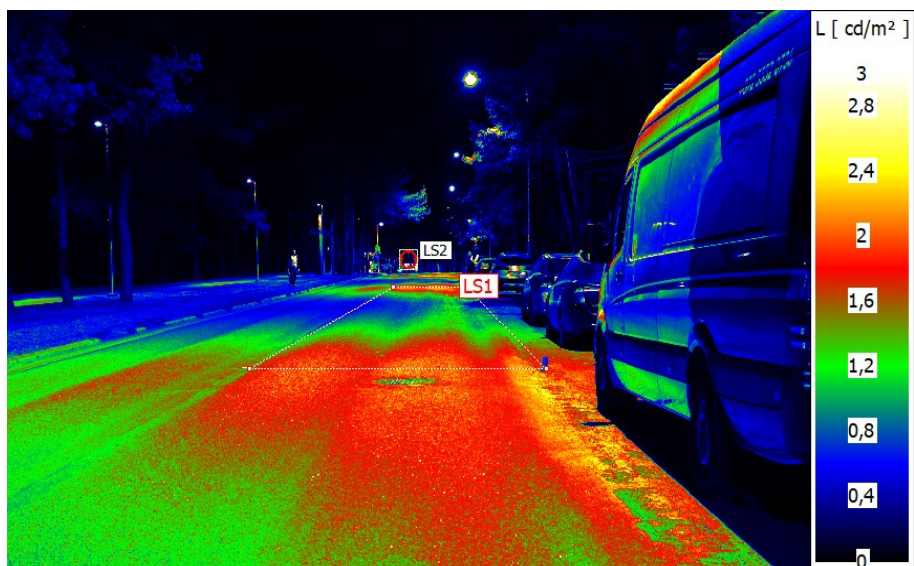
Sütiste tee valiti mõõdistusobjektiks selle iseloomuliku linnaruumilise paigutuse ja uuendatud leedvalgustite tõttu. Tänav kuulub valgustusklassi M4, mille kohaselt peavad valgustusparameetrid vastama standardile EVS-EN 13201-2:2015: minimaalne keskmine heleduse tase peab olema vähemalt $\bar{L} \geq 0,75 \text{ cd/m}^2$, pikiühtlus $U_1 \geq 0,6$ ja üldühtlus $U_0 \geq 0,4$.

Mõõtmised viidi läbi 03.04.2025 kell 22:23 kuiva ilmaga. Leedvalgustid töötasid nimivõimsusel. Mõõdistused viidi läbi kahes suunas – suund A (TalTechi suunal) ja suund B (Regionaalhaigla suunal), kusjuures igas suunas analüüsiti kahte valgustustmastide vahelist lõiku (A1 ja A2; B1 ja B2). Mastide kaugused olid vastavalt 49 m ja 51 m).



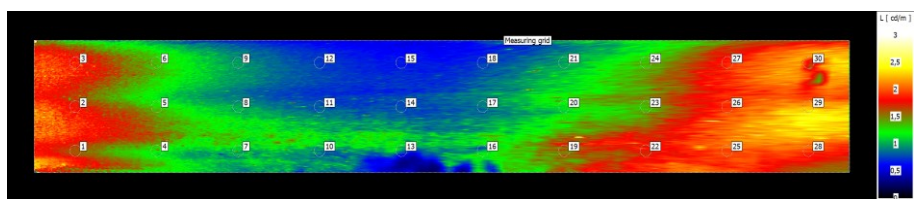
Joonis 5.1 Mõõdistusala pealtvaade Geoportaali kaardilt

Joonisel 5.2 on kujutatud mõõtekaameraga tehtud ülesvõtte mõõdistusalast. Lõik valiti nii, et ülekaiguradade või jalakäijate valgustus ei mõjutaks mõõtmistulemusi.



Joonis 5.2. Sütiste tee värvärvides, suund A1

Joonisel 5.2 on kuvatud mõõtepunktide asukohad, millest paremas servas (punkti 13 juures) on näha puude varjude osaline mõju, ent see ei mõjutanud tulemusi oluliselt.



Joonis 5.3 Mõõtmislõigu pealtvaade koos mõõtepunktidega, suund A1

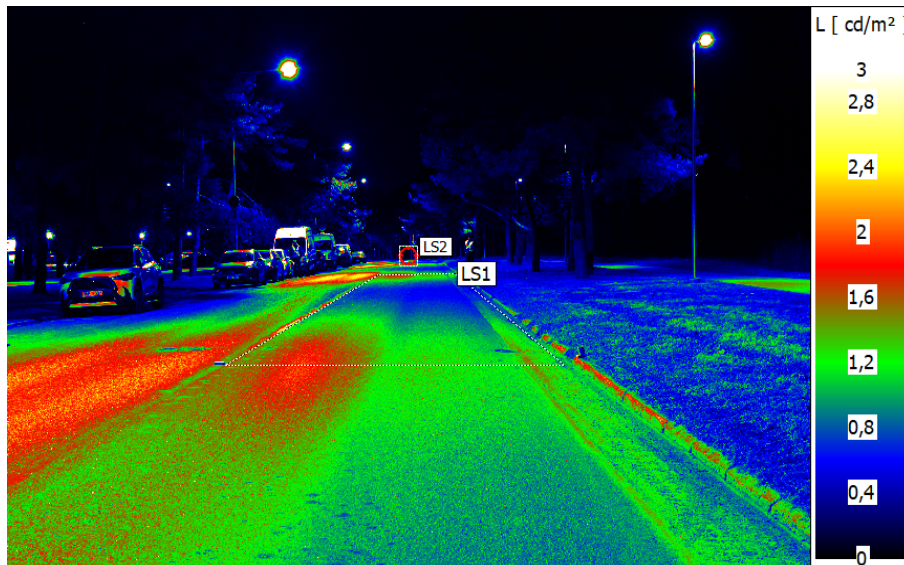
Joonisel 5.3 kujutatud mõõtepunktidele vastavad mõõtetulemused on toodud Tabelis 3. Mõõtepunktide heledusväärtused Tabelis 3 on esitatud ühikutes cd/m^2 , piki- ja üldühtlus on ilma ühikuta suurus.

Tabel 3 Sütiste tee mõõtepunktide heledusväärtused cd/m^2 ja ühtluse tegurid, suund A1

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pikiühtlus	Üldühtlus
3	1,88	1,38	0,99	0,77	0,67	0,73	0,99	1,36	1,89	1,89		0,50
2	1,83	1,37	1,03	0,83	0,81	0,87	1,13	1,38	1,92	2,26	0,36	
1	1,64	1,24	1,05	0,95	0,97	1,06	1,52	1,76	1,97	1,91		

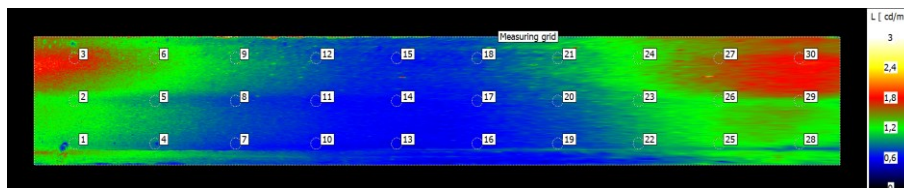
Keskmine heledus $\bar{L}=1,33 \text{ cd/m}^2$, mis ületab standardis M4-klassile seatud miinimumnõude ($\geq 0,75 \text{ cd/m}^2$) märkimisväärselt. Tegemist on ülevalgustatusega, mille põhjuseks on üledimensioneeritud valgustid, kuid oma mõju avaldab lähedal

paiknev jalakäijate valgustuslahendus. Üldühtluse näitaja $U_0 = 0,50$ ületab nõutud miinimumtaseme ($\geq 0,4$). Keskmine pikiühtlus $U_1 = 0,36$, mis ei vasta kehtestatud piirväärtusele. Alloleval Joonisel 5.4 ja Joonisel 5.5 on välja toodud värvvärvides vastassuund B1, kus on näha samuti jalakäijate valgustuslahendus.



Joonis 5.4 Sütiste tee värvvärvides, suund B1

Teises suunas läbiviidud mõõtmised näitasid ühtlasemat valgusjaotust, kuna haljastuse mõju oli minimaalne ning valgusti valgusvihk jaotus ühtlasemalt üle sõidutee (vt Joonis 5.5).



Joonis 5.5 Mõõtmislõigu pealtvaade koos mõõtepunktidega, suund B1

Suunas B1 mõõdetud keskmine heleduse väärtus oli $\bar{L} = 0,99 \text{ cd/m}^2$, mis ületab M4 valgustusklassile kehtestatud miinimumnõude ning viitab piisavale valgustustasemele sõiduteekattel. Üldühtluse koefitsient $U_0 = 0,57$ viitab rahuldavale valgusjaotusele, kuigi pikiühtlus keskmine $U_1 = 0,44$ ei vasta standardis sätestatud soovituslikule piirväärtusele. Visuaalse vaatluse põhjal on täheldatav, et mõõdistatud alale avaldab mõju ka kõrvalasuva Sütiste Parkmetsa jalakäijate tänavavalgustus, mille lisavalgus aitab kaasa valgusjaotuse ühtlustamisele. Üksikasjalikult on tulemused välja toodud

Tabelis 4. Mõõtepunktide heledusväärtused Tabelis 4 on esitatud ühikutes cd/m², piki- ja üldühtlus on ilma ühikuta suurus.

Tabel 4 Sütiste tee mõõtepunktide heledusväärtused cd/m² ja ühtluse tegurid, suund B1

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pikiühtlus	Üldühtlus
3	1,69	1,35	1,00	0,80	0,67	0,75	0,98	1,24	1,55	1,75		0,57
2	1,20	0,97	0,77	0,65	0,61	0,66	0,83	1,05	1,25	1,38	0,44	
1	1,07	0,87	0,72	0,61	0,56	0,60	0,74	0,94	1,18	1,13		

5.1.2 Kadaka tee

Kadaka tee valiti mõõdistusobjektiks selle iseloomuliku linnaruumilise asendi, suure liiklusintensiivsuse ning mõnda aega tagasi toimunud leedvalgustite uuendamise tõttu. Tegemist on M4 valgustusklassi kuuluva sõiduteega.

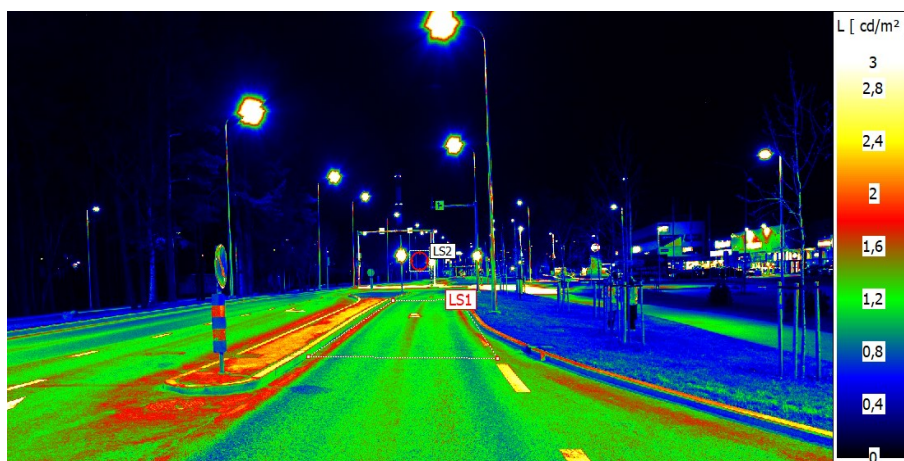
Mõõtmised viidi läbi 15.04.2025 kell 23.05 kuiva ja selge ilmaga. Valgustid töötasid nominaalses töörežiimis. Mõõdistused viidi läbi kahes sõidusuunas - suund A (Akadeemia tee suunal) ja suund B (A. H. Tammsaare tee suunal), valgustusmastide vahekaugustega vastavalt 12,1 ja 12,8 meetrit.

Lisaks tuleb arvestada, et Kadaka tee ümbruses paikneb mitmeid jalakäijatele suunatud tänavaid, mille iseseisvad valgustuslahendused tõstavad üldist valgusfoonitaset, tekitades mulje, et kogu keskkond on ülevalgustatud.



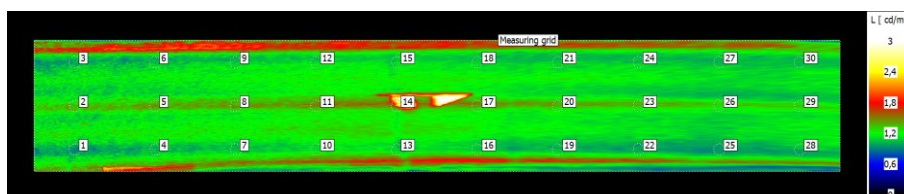
Joonis 5.6 Mõõdetava ala pealtvaade Geoportaali kaardilt

Möödistatav lõik valiti kahe järjestikuse valgustusmasti vahelt, et tagada möötmisteks sobilik valgustusala. Vastav teelõik on tähistatud joonisel 5.6. Joonisel 5.7 on esitatud heleduse mõõteseadmega LMK Mobile Air, mis illustreerib möödistusala visuaalset valgusolukorda. Silmapaistev on sõiduridade vaheline eraldussaar, kus möödeti suurenenud valguse peegeldust.



Joonis 5.7 Kadaka tee värvärvides, suund A

Möötepunktide asetuse kaardilt (vt Joonis 5.8 ja Tabel 5) on näha ka teekattesse tekkinud sõidurööpad. Möötepunkt 14 paiknes teekattemärgistusel, mille kõrgem peegeldustegur põhjustas oluliselt kõrgema heleduse väärtuse. Punktis viidi läbi kolm kordusmõõtmist eesmärgiga hajutada teekattemärgi mõju, kuid mõõteseadme ja keskkonnatingimuste tõttu ei õnnestunud seda täielikult vältida).



Joonis 5.8 Kadaka tee mõõtmislõigu pealtvaade koos möötepunktidega, suund A

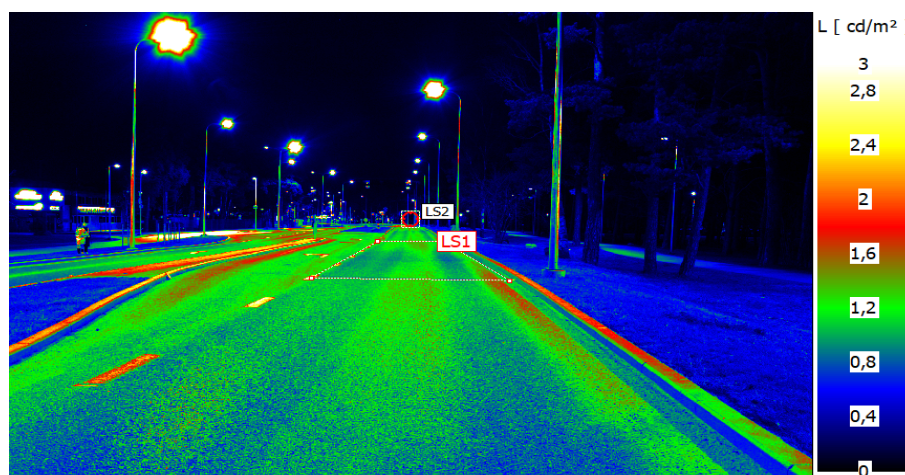
Kõik mõõdetud näitajad ületavad standardis EVS-EN 13201-2:2015 M4 valgustusklassile kehtestatud miinimumtasemeid ning viitavad nõuetekohasele ja tehniliselt hästi toimivale valgustuslahendusele. Mõõdetud keskmine heleduse väärtus $\bar{L} = 1,18 \text{ cd/m}^2$ viitab kõrgele teekatte heledusele. Üldühtluse näitaja $U_0 = 0,83$ ja pikiühtluse keskmine väärtus $U_1 = 0,65$ viitavad valguse väga heale jaotusele nii kogu teelõigu ulatuses kui ka sõidusuunas. Siiski tuleb arvestada, et visuaalsel vaatlusel

võib kogu piirkond tunduda ülevalgustatud, mis on tõenäoliselt tingitud ümbritsevast lisavalgustusest, mida annavad Kadaka tee vahetus läheduses paiknevad jalakäijate teede valgustuslahendused. Jalakäijate teede valgustuslahendused mõjutavad tajutavat valgusfoonitaset ning võivad tekitada üldise ereduse mulje isegi siis, kui tehnilised näitajad jäävad standardi piiresse. Mõõtepunktide heledusväärtused Tabelis 5 on esitatud ühikutes cd/m^2 , piki- ja üldühtlus on ilma ühikuta suurus.

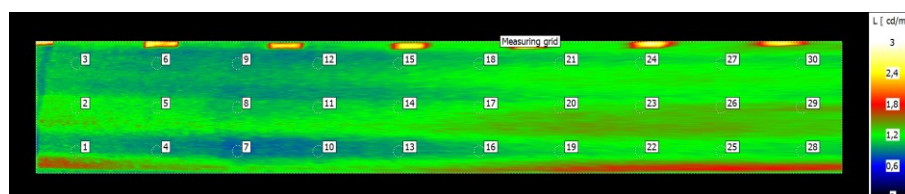
Tabel 5. Kadaka tee mõõtepunktide heledusväärtused cd/m^2 ja ühtluse tegurid, suund A

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pikiühtlus	Üldühtlus
3	1,03	1,07	1,08	1,12	1,11	1,11	1,09	1,09	1,05	1,06		0,83
2	1,32	1,38	1,39	1,43	1,94	1,40	1,33	1,31	1,26	1,25	0,65	
1	0,98	1,05	1,09	1,16	1,12	1,12	1,08	1,02	0,98	1,04		

Kadaka tee B-suunas teostatud mõõtmistulemused kinnitavad samuti valgustuse kõrget tehnilist kvaliteeti. Mõõdistuslõigul on näha sõiduteekatte läbivajumine intensiivse liiklusvoo tõttu (vt Joonis 5.9 ja Joonis 5.10), mis avaldavad mõju. Lähedal asuvad puud vähendasid kõrvaliste valgusallikate mõju, võimaldades mõõta tänavavalgustuse otsest efekti (vt Tabel 6).



Joonis 5.9 Kadaka tee värvärvides, suund B



Joonis 5.10 Kadaka tee mõõtmislõigu pealtvaade koos mõõtepunktidega, suund B

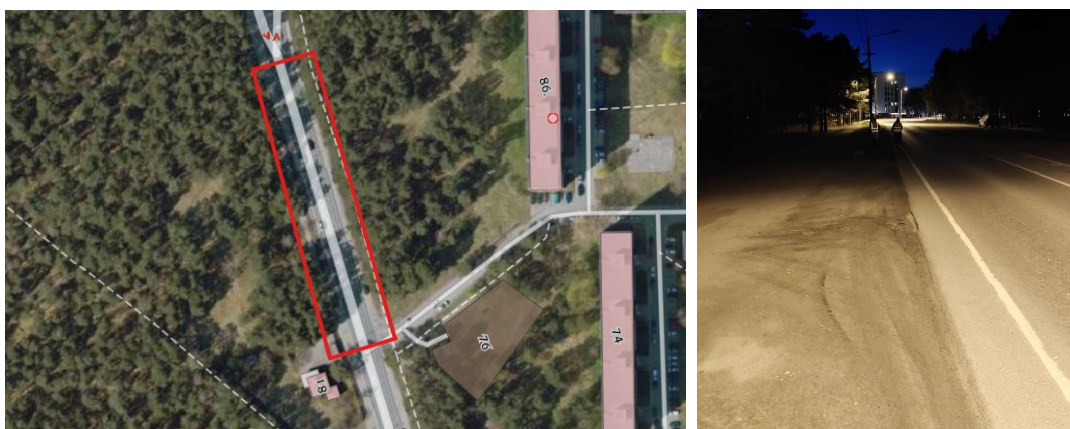
Mõõdetud keskmine heledus on $\bar{L} = 1,11 \text{ cd/m}^2$. Üldühtlus $U_0 = 0,78$ ja keskmine pikiühtlus $U_1 = 0,77$, viitavad valguse ühtlasele jaotumisele nii kogu teelõigu ulatuses kui ka mööda sõidusuunda. Mõõtmisala lähedal paiknevad puud vähendasid visuaalseid häireid kõrvalistest valgusallikatest, võimaldades hinnata just tänavavalgustuse otsest mõju. Mõõtepunktide heledusväärtused Tabelis 6 on esitatud ühikutes cd/m^2 , piki- ja üldühtlus on ilma ühikuta suurus.

Tabel 6. Kadaka tee mõõtepunktide heledusväärtused cd/m^2 ja ühtluse tegurid, suund B

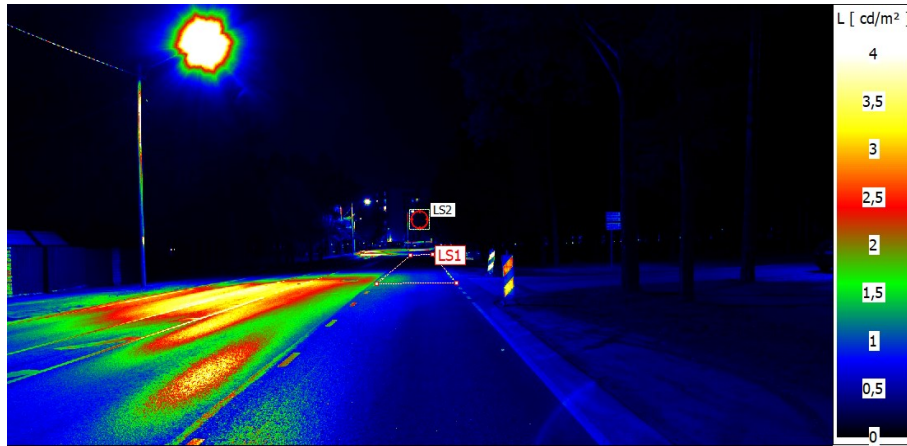
Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pikiühtlus	Üldühtlus
3	1,03	0,98	0,96	0,99	1,03	1,09	1,13	1,14	1,15	1,14		0,78
2	1,23	1,14	1,05	1,08	1,13	1,2	1,27	1,29	1,34	1,37	0,77	
1	1,09	0,98	0,87	0,92	0,98	1,04	1,12	1,15	1,17	1,13		

5.1.3 Ehitajate tee

Ehitajate tee valiti mõõdistusobjektiks, kuna antud teelõigul on veel kasutusel vanema põlvkonna Mira 70W gaaslahenduslambid ning lisaks esines piirkonnas valgustustehniline rike - üks tänavavalgusti oli mittetöökorras. Tänav kuulub valgustusklassi M4 ning mõõtmiste eesmärk oli hinnata valgustuse kvaliteeti olukorras, kus valgustuslahendus ei ole täielikult töökorras. Mõõtmised viidi läbi 15.04.2025 kell 22.25 kuiva ja pilvitu ilmaga, tagamaks valgusolude sobilikkust. Valgustid, mis olid töökorras, töötasid nimivõimsusel. Mastide omavaheline kaugus põlevast valgustist teise põleva valgustini oli 88 meetrit. Mõõdistati kahes suunas: suund A, mis kulges A. H. Tammsaare tee suunas (vt Joonis 5.11), ja suund B, mis suundus Sõpruse puistee poole.

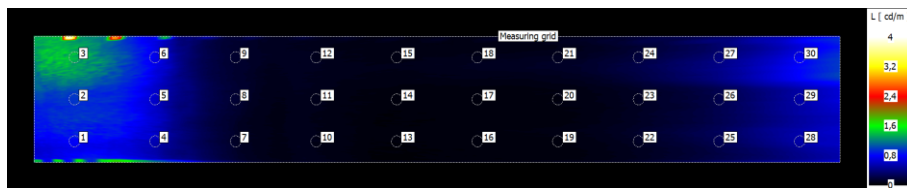


Joonis 5.11. Mõõdistatava lõigu pealtvaade Geoportaali kaardil (vasakul) ja autori poolt tehtud ülesvõtte mõõtealast (paremal).



Joonis 5.12. Ehitajate tee värvvärvides, suund A

Antud lõigus paiknesid kõik valgustid tänava ühel küljel, mille tulemusel jäi vastasserv oluliselt alavalgustatuks. Valgustite optiline jaotus oli puudulik ning esinesid nn valguslaigud, mis viitavad tugevalt ebaühtlasele valgusjaotusele (vt Joonis 5.12 ja Joonis 5.13).



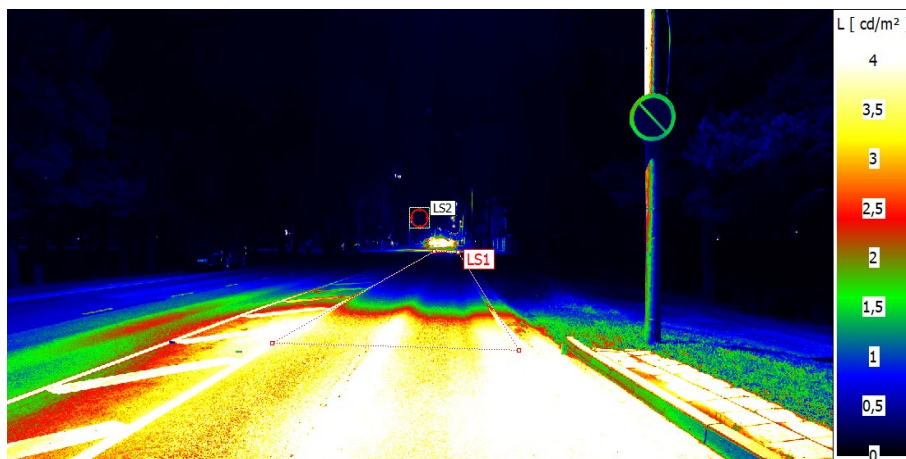
Joonis 5.13. Ehitajate tee mõõtmislõigu pealtvaade koos mõõtepunktidega, suund A

Mõõdetud keskmine heleduse tase oli $\bar{L} = 0,33 \text{ cd/m}^2$, mis jääb märgatavalt alla M4 valgustusklassile kehtestatud minimaalväärtusele, kuna üks valgusallikas ei tööta. Üldühtlus $U_0 = 0,16$ ning keskmine pikiühtlus $U_1 = 0,06$ viitavad valgustusolukorra olulisele ebakvaliteetsusele. Tulemus on seletatav nii ühest mastist puudevast valgusallikast kui ka eaproportsionaalselt pikast mastide vahekaugusest ($\sim 88 \text{ m}$), mille tõttu said mõõdetud alad, kus heledus oli praktiliselt olematu. Erinevate mõõtepunktide heleduse väärtused varieerusid oluliselt - $1,37 \text{ cd/m}^2$ kuni $0,05 \text{ cd/m}^2$ (vt Tabel 7). Heleduse kõikumised muudavad nähtavuse ebastabiilseks ja võivad halvendada liiklusohutust. Mõõtepunktide heledusväärtused Tabelis 7 on esitatud ühikutes cd/m^2 , piki- ja üldühtlus on ilma ühikuta suurus.

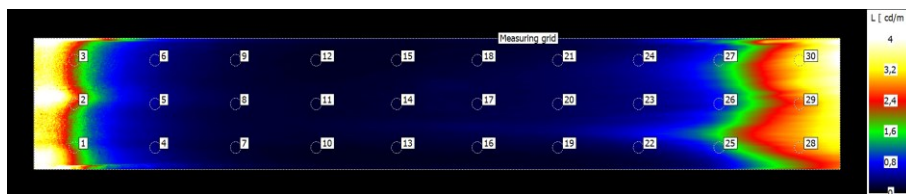
Tabel 7. Ehitajate tee mõõtepunktide heledusväärtused cd/m^2 ja ühtluse tegurid, suund A

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pikiühtlus	Üldühtlus
3	1,37	0,75	0,16	0,11	0,08	0,10	0,12	0,21	0,40	0,77		0,16
2	0,98	0,65	0,18	0,10	0,06	0,06	0,07	0,13	0,26	0,54	0,06	
1	0,81	0,59	0,14	0,09	0,05	0,06	0,07	0,14	0,28	0,54		

Suund B mõõtmistulemused näitavad veelgi selgemalt ebaproportsionaalset valgusjaotust, mis on hästi tuvastatav nii väärvärvipildi alusel kui ka mõõteandmetes. Heleduse väärtuste järsk muutumine, näiteks 3,26 cd/m² kuni 0,14 cd/m², kõigest 10 meetri jooksul viitab tugevatele kontrastile. Valgustuslahendus antud teelõigul ei vasta nõuetele ja ohutuse kriteeriumitele, kuna esineb tugevaid kontraste ja pimedamaid lõike (vt joonis 5.14 ja joonis 5.15).



Joonis 5.14 Ehitajate tee väärvärvides, suund B



Joonis 5.15 Ehitajate tee mõõtmislõigu pealtvaade koos mõõtepunktidega, suund B

Mõõdetud keskmine heleduse tase oli $\bar{L} = 0,79 \text{ cd/m}^2$. Üldühtlus $U_0 = 0,17$ ja keskmine pikiühtlus $U_1 = 0,06$, mis jäävad märkimisväärselt alla standardi miinimumnõuete. Sellistes oludes ei ole tagatud liiklusohutust toetav nähtavuskeskkond. Mõõtepunktide heledusväärtused Tabelis 8 on esitatud ühikutes cd/m², piki- ja üldühtlus on ilma ühikuta suurus.

Tabel 8. Ehitajate tee mõõtepunktide heledusväärtused cd/m² ja ühtluse tegurid, suund B

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pikiühtlus	Üldühtlus
3	2,17	0,46	0,20	0,14	0,14	0,18	0,25	0,43	1,10	3,26		0,17
2	2,45	0,47	0,21	0,16	0,18	0,22	0,28	0,40	0,86	2,71	0,06	
1	1,96	0,41	0,18	0,13	0,15	0,18	0,21	0,37	1,11	2,78		

5.1.4 Üliõpilaste tee

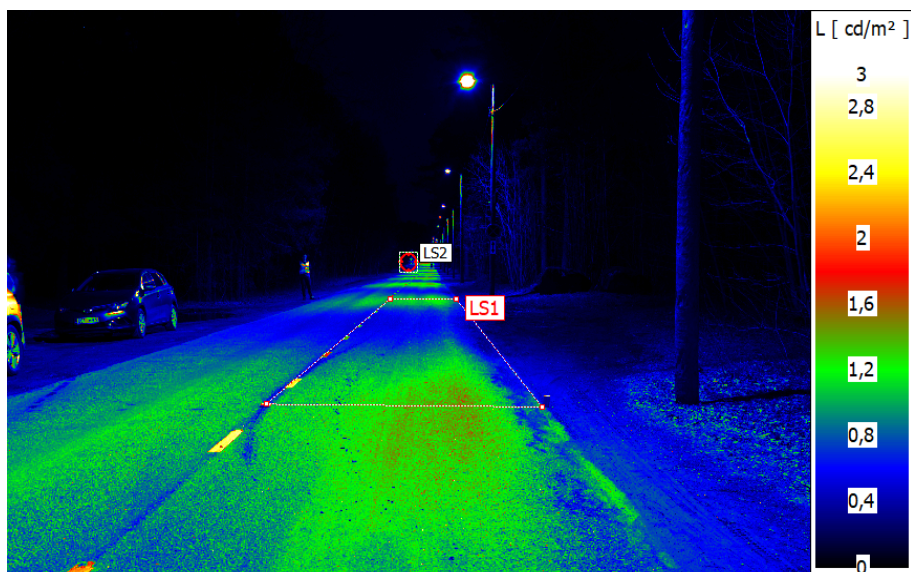
Üliõpilaste tee valiti välitööde objektiks selle linnaruumilise asukoha ja madala liikluskoormuse tõttu. Tänav paikneb rohevööndis ja kuulub valgustusklassi M5, mille kohaselt on standard EVS-EN 13201-2:2015 alusel minimaalne keskmine heleduse tase on $\bar{L} \geq 0,3 \text{ cd/m}^2$, pikiühtlus $U_1 \geq 0,4$ ja üldühtlus $U_0 \geq 0,35$.

Mõõtmised viidi läbi 15.04.2025 kell 22.02 kuiva ja selge ilmaga. Leedvalgustid töötasid nimivõimsusel ning mastide vahekaugused olid vastavalt 33,4 m ja 38,9 m. Mõõdistati kahte suunda: suund A (Nõmme tee suunal) ja suund B (Raja tee suunal)

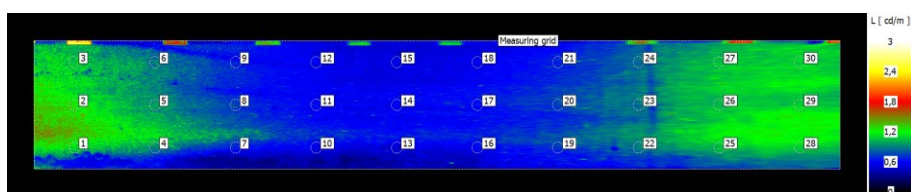


Joonis 5.16. Mõõdetava ala pealtvaade Geoportaali kaardilt

Tänavavalgustid olid paigaldatud ainult sõidutee ühele küljele. Kitsas sõidutee ja optiliselt sobiv valgusjaotus tagasid piisava heleduse ka vastasserva, mis on nähtav ka väärvärvides kujutistel ning mõõtepunktide pealtvaatel (vt Joonis 5.17 ja Joonis 5.18.)



Joonis 5.17. Üliõpilaste tee värvärvides, suund A



Joonis 5.18. Üliõpilaste tee mõõtmislõigu pealtvaade koos mõõtepunktidega, suund A

Mõõtmiste tulemuste järgi oli keskmine heleduse tase on $\bar{L} = 0,83 \text{ cd/m}^2$, mis ületab M5 klassi nõutud väärtuse märgatavalt. Üldühtlus $U_0 = 0,64$ ja pikiühtlus $U_1 = 0,58$, mis samuti vastavad klassi M5 nõuetele (vt tabel 9). Mõõtepunktide heledusväärtused Tabelis 9 on esitatud ühikutes cd/m^2 , piki- ja üldühtlus on ilma ühikuta suurus.

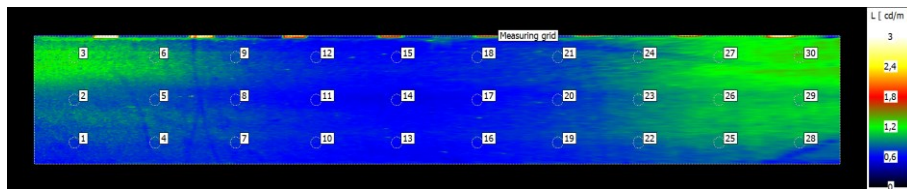
Tabel 9. Üliõpilaste tee mõõtepunktide heledusväärtused cd/m^2 ja ühtluse tegurid, suund A

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pikiühtlus	Üldühtlus
3	1,08	0,89	0,65	0,57	0,55	0,56	0,69	0,87	1,06	1,10		0,64
2	1,26	0,98	0,76	0,61	0,58	0,63	0,76	0,87	1,05	1,11	0,58	
1	1,14	0,93	0,67	0,56	0,53	0,59	0,74	0,90	1,06	1,09		

Suund B mõõtmistulemused kinnitavad samuti sobivat valgusjaotust. Visuaalse vaatluse põhjal ei ilmnenud järske heleduse muutusi ega alasid, mis jääksid pimedaks (vt Joonis 5.19 ja Joonis 5.20).



Joonis 5.19. Üliõpilaste tee värvvärvides, suund B



Joonis 5.20. Üliõpilaste tee mõõtmislõigu pealtvaade koos mõõtepunktidega, suund B

Mõõdetud keskmine heleduse tase oli $\bar{L} = 0,81 \text{ cd/m}^2$, üldühtlus $U_0 = 0,70$ ja pikiühtlus $U_1 = 0,54$. Mõõtetulemused näitavad (vt Tabel 9), et Üliõpilaste tee valgustus vastab valgustusklassi M5 nõuetele ja sobib hästi väikese liiklusintensiivsusega rohevööndi piirkonda. Mõõtepunktide heledusväärtused Tabelis 10 on esitatud ühikutes cd/m^2 , piki- ja üldühtlus on ilma ühikuta suurus.

Tabel 10. Üliõpilaste tee mõõtepunktide heledusväärtused cd/m^2 ja ühtluse tegurid, suund A

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pikiühtlus	Üldühtlus
3	1,18	1,01	0,80	0,67	0,61	0,70	0,79	0,91	1,11	1,30		0,70
2	0,83	0,79	0,69	0,59	0,57	0,59	0,71	0,88	1,04	1,05	0,54	
1	0,74	0,77	0,73	0,66	0,61	0,64	0,73	0,83	0,93	0,94		

Valgusreostuse kvantitatiivne hindamine välioludes on oluline, sest see võimaldab objektiivselt hinnata olemasolevate tänavavalgustuspaigaldiste mõju öisele keskkonnale. Mustamäe linnaosa valiti mõõtmiste läbiviimiseks mitmel põhjusel:

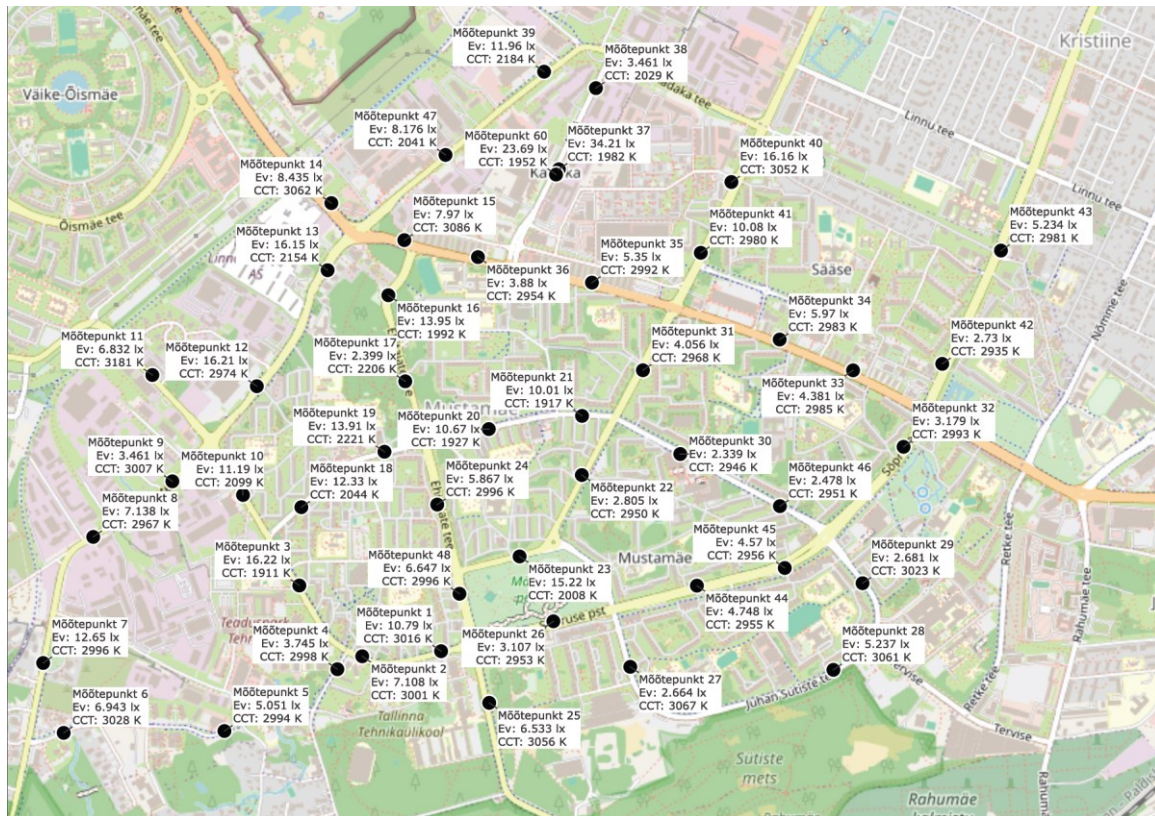
piirkond esindab tüüpilist nõukogude-aegset elamuehituse struktuuri, kus valgustuslahendused on kohati aegunud ning tehnoloogiliselt heterogeensed; samas on linnaosas viimastel aastatel rakendatud ka leedvalgustitele üleminekut ja kaugjuhtimissüsteemide kasutuselevõttu. Selline kontrastsus võimaldab võrrelda erinevate valgustustehnoloogiate mõju keskkonnale ühe ja sama linnaruumi sees.

Eesti senine valgusreostuse kaardistus on olnud piiratud ulatusega – viimane suuremahuline mõõtmine viidi läbi 2012. aastal ning ei hõlmanud detailset linnasisest tsoonilist analüüsi. Käesolev töö täidab seega olulist lünka, pakkudes empiirilist andmestikku konkreetselt Mustamäe kohta. Samuti aitab uuring kaardistada piirkonnad, kus oleks võimalik vähendada valgusreostust ilma visuaalset ohutust kahjustamata. Töö praktiline osa on seega vahetult rakendatav sisend kohalikele omavalitsustele, planeerijatele ja valgustusspetsialistidele, kes tegelevad jätkusuutliku ja keskkonnahoidliku linnavalgustuse arendamisega.

5.2 Mustamäe horisontaalse valgustustiheduse kaardistamine

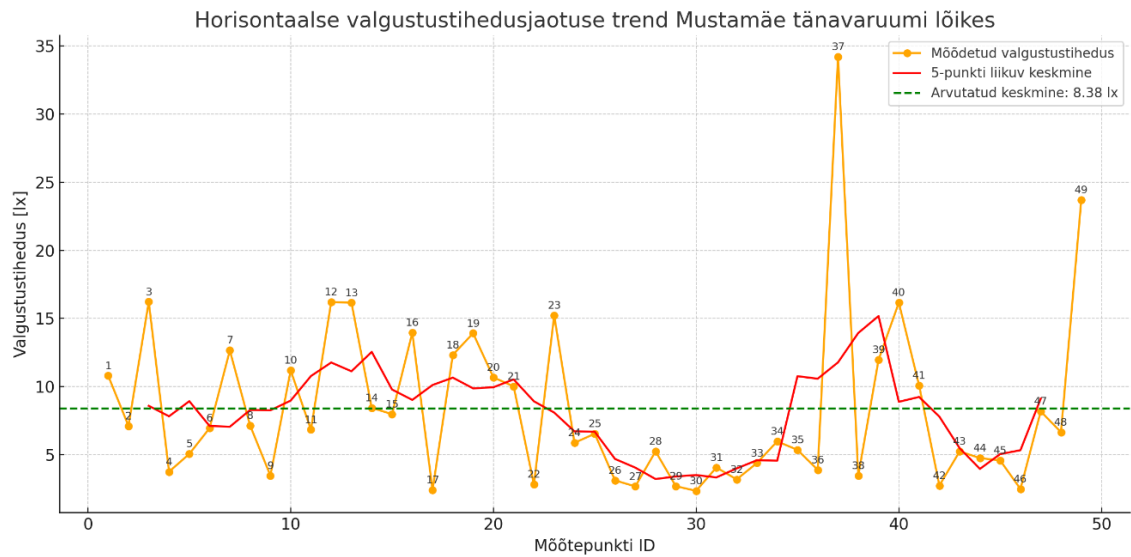
Lisaks punktipõhiste helenduse mõõtmistele neljal valitud sõiduteelõigul viidi Mustamäe linnaosas paralleelselt läbi ulatuslik horisontaalse valgustustiheduse hindamine. Selle alusuuringu eesmärk oli kaardistada horisontaalse valgustustiheduse tasemed M3 ja M4 valgustusklassidele vastavatel tänavalõikudel tuvastada potentsiaalseid valgusreostuse koldeid.

Mõõtmised viidi läbi kokku 49 mõõtepunktis, kasutades käsiluksmeetrit Gigahertz-Optik MSC15, mis võimaldas rakendada sarivõtte funktsiooni ehk igas punktis salvestati kümme järjestikust mõõtetulemust, mille alusel arvutati keskmine horisontaalse valgustustiheduse väärtus. Näitaja peegeldab valgustuse ruumilist intensiivsust horisontaalsel pinnal ning on otseselt seotud nii inimsilmale nähtava hajusvalguse kui ka öise taustkiirguse tasemega. Mõõtmised toimusid öisel ajal stabiilsete ilmastikutingimuste korral, et vältida kõrvalvalgusallikate ja atmosfääriliste tegurite moonutavat mõju.



Joonis 5.21 Mõõdetud punktide väärtused Tallinna linna topograafilise aluskaardil

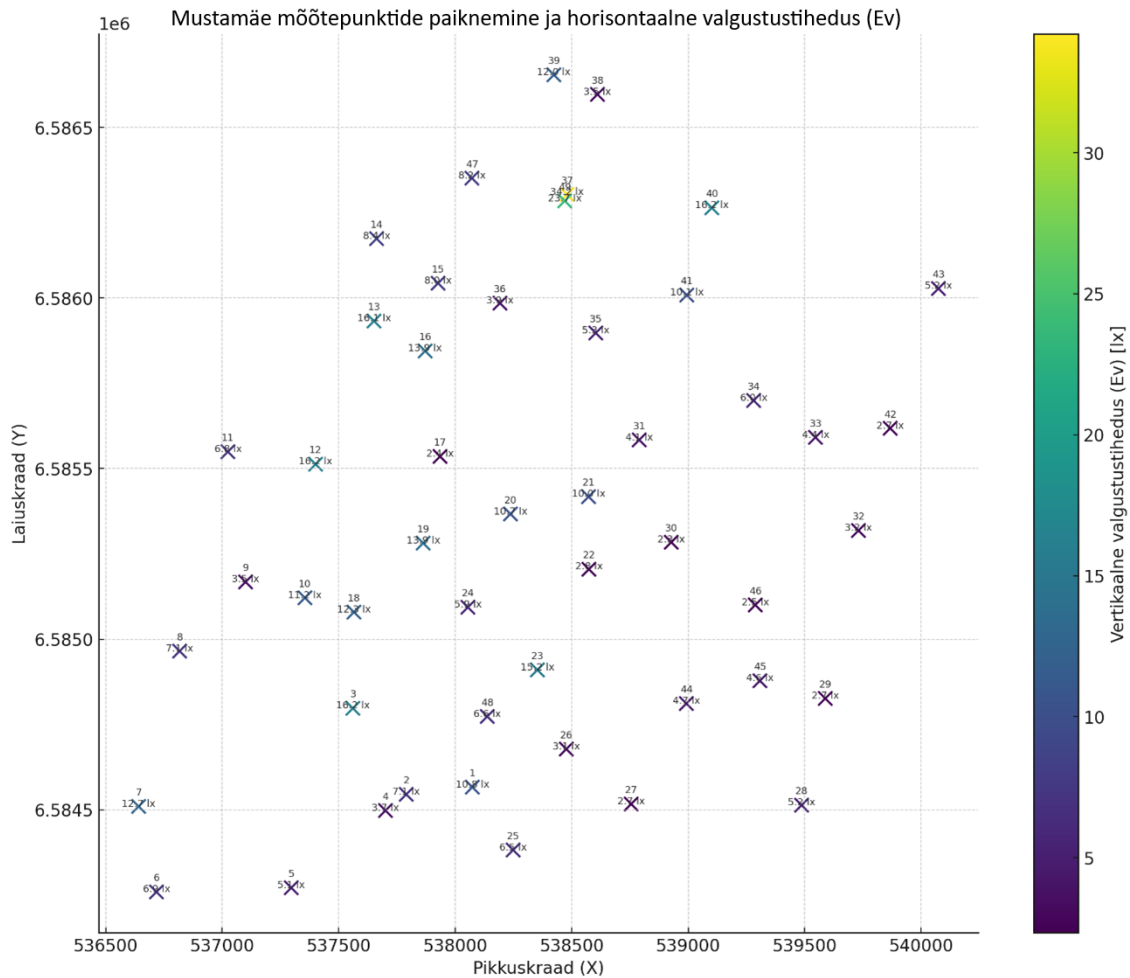
Andmed töödeldi ja visualiseeriti avatud lähtekoodiga geinfosüsteemis QGIS, kus igale punktile omistati lisaks valgustustiheduse väärtusele ka mõõdetud värvsustemperatuur (CCT). Nende põhjal koostati siltidega punktkaart (Joonis 5.22), mille abil on võimalik tuvastada piirkondlikke mustreid ning potentsiaalseid ülevalgustuse koldeid. Üheks selliseks alaks osutus Laki tänav (punktid 37 ja 49), kus mõõdetud väärtused ületasid piirkondlikku keskmist märkimisväärselt.



Joonis 5.22 Horisontaalse valgustustiheduse muutus Mustamäel (loodud AI abiga autori poolt) [38]

Mitmel M4 valgustusklassile vastaval tänavalõigul täheldati samuti normatiivi ületavaid valgustustiheduse väärtusi. Nimetatud lõigud paiknevad peamiselt piirkondades, kus asuvad kaubanduskeskused, ärihooned aktiivse fassaadivalgustusega, uusarendused (nt Mustamäe Keskus) ning reklaamvalgusallikad. Nende objektide valguskiirgus lisandub olemasolevale tänavavalgustusele, tõstes piirkondlikku valgustuskoormust

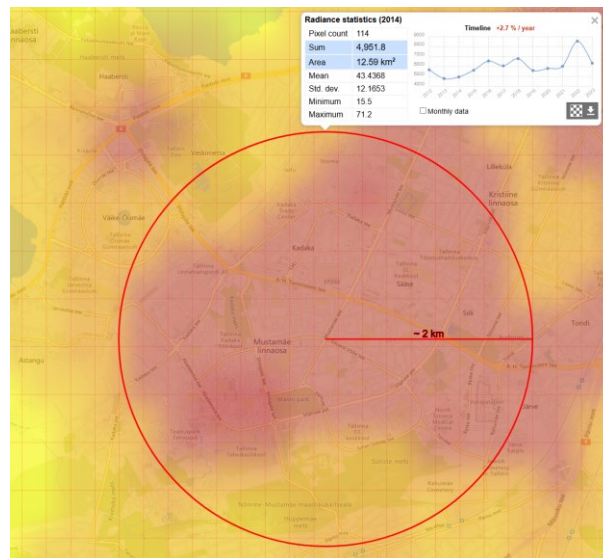
ning suurendades taustvalguse taset (vt Joonis 5.23). Tulemuseks on öise kontrastsuse vähenemine ning valguse hajumise tõttu tekkinud difusiooniefekt.



Joonis 5.23 Mõõtepunktide asend Mustamäel ning vastavad horisontaalsed valgustustihedused (loodud AI abiga autori poolt) [38]

Visuaalne analüüs võimaldas tuvastada ka seoseid valgusallikate tüüpide ja valgustustiheduse tasemete vahel. Eelkõige mõõtekohtades, kus on kasutusel gaaslahenduslambid, olid horisontaalse valgustustiheduse väärtused keskmisest kõrgemad (vt Joonised 5.22–5.24). Enamik mõõdetud teelõike, välja arvatud Laki tänav, Keskuse tänav, Akadeemia tee Kadaka-poolne lõik ning Vilde tee (Mustamäe tee ja Ehitajate tee vaheline lõik), on varustatud kaasaegsete leedvalgustitega. Vanemate kõrgrõhunaatriumvalgustite puhul on valgustid sageli paigaldatud amortiseerunud betoonmastidele, mille vajumise või vale nurga tõttu on valgus suunatud ebasihtotstarbelistele aladele, näiteks haljasaladele, fassaadidele või elamute akendesse. Selle tagajärjeks on häiriv räigus ja pealetükkiv valgus, nagu on näha Joonisel 5.25

Horisontaalse valgustustiheduse mõõtetulemuste võrdlus satelliitandmetega viitas samuti teatud kooskõlale (vt Joonis 5.26). Kõrgema liiklusintensiivsusega ning uuendamata valgustustaristuga piirkonnad (nt Akadeemia tee, Laki tn) langevad kokku satelliitandmetes tuvastatavate kõrge heleduse tsoonidega. Samas tuleb rõhutada, et piiratud mõõtepunktide arv ning satelliitandmete üldistusaste ei võimalda teha lokaalsel tasandil lõplikke järeldusi valgusreostuse ulatuse kohta. Selleks oleks vajalik tihedam mõõtevõrgustik ja ajaliselt mitmekesisem andmestik.



Joonis 5.26 Taevakuma Mustamäe kohal.

5.3 Ettepanekud valgusreostuse ohjamiseks

Tänavavalgustuse projekteerimisel on kriitilise tähtsusega valgusreostuse minimeerimine ning selliste valgustuslahenduste rakendamine, mis on ühtaegu ohutud, funktsionaalsed ning esteetiliselt sobivad. Need lahendused peavad arvestama nii inimasustuse kui ka looduslike ökosüsteemide vajadustega. Tulenevalt peatükis 3.7 käsitletud õiguslikest ja halduslikest kitsaskohtadest, on vältimatult vajalik rajada Eestis terviklik süsteem valgusreostuse leviku tõkestamiseks ja öise keskkonna visuaalse ning ökoloogilise tasakaalu säilitamiseks.

Eesti kontekstis on esimese sammuna vajalik määratleda valgustatavad alad vastavalt keskkonnatsooni klassifikatsioonile, nagu on kirjeldatud standardis EVS-EN 12464-2:2025, kus tsoonid ulatuvad E0-st (täielik pimedus) kuni E4-ni (tihe linnaruum). Lisaks on soovitatav kehtestada riiklik haldustsoonide süsteem, mis määrab igale tsoonile siduvad piinormid valgusvoo tugevusele, spektraalsele koostisele ja valgusjaotusele. Sellise süsteemi alusel saavad kohalikud omavalitsused koostada

piirkondlikke valgusrežiime ning kehtestada rangemaid nõudeid tundlikes alades, näiteks looduskaitsealadel või elamupiirkondades.

Keskkonnatsooni alusel tuleks valgustuslahendused projekteerida järgmiselt:

- E0 tsoon (nt rahvuspargid, observatooriumite ümbrus): tuleb vältida igasugust püsivat tehisvalgustust.
- E1 tsoon (nt kalmistud, loodusreservaadid): lubatud on ainult vajaduspõhine, madala intensiivsusega ja kitsalt suunatud valgustus.
- E2 tsoon (nt elamupiirkonnad, pargid, kergliiklusteed): valgustid peavad olema täisvarjestatud (ULOR = 0%), CCT ei tohi ületada 2700 K.
- E3 ja E4 tsoon (nt ärikeskused, magistraalid): lubatud on mõõdukalt intensiivne valgustus, kuid valgus peab jääma sihtalale ega tohi hajuda väljapoole.

Kõikides tsoonides tuleb vältida üle 3000 K CCT-ga valgusallikaid, välja arvatud juhul, kui lühiajaline suurem kontrastsus on vajalik liiklusohutuse tagamiseks, näiteks sõlmpunktides. Tundlikes piirkondades on soovitatav kasutada 2200–2700 K valguslahendusi, mis vähendavad spektraalset mõju elusorganismidele. Kõik valgustid peavad vastama fotomeetrilistele nõuetele ja omama vastavat sertifikaati (nt ENEC või sellega samaväärne).

Lisaks tuleb iga valgustusprojekti puhul määrata valgustusklass vastavalt teekatte kasutusintensiivsusele. Valgustusarvutuste alusel koostatud simulatsiooniaruanne peab olema kohustuslik ning selle peab enne ehitusloa väljastamist heaks kiitma kohalik omavalitsus. Valgustussüsteemi valmimise järel tuleb teostada järelevalvemõõtmised, mille alusel saab vajadusel nõuda puuduste likvideerimist ettenähtud tähtaja jooksul (nt 6 või 12 kuud).

Energiatõhususe ja valgusreostuse vähendamise eesmärgil tuleb valgustussüsteemid varustada adaptiivsete juhtimislahendustega. Madala kasutusköormusega öistel perioodidel tuleb valgusvoogu automaatselt vähendada vähemalt 30% võrra, liikluseta aladel kuni 70% võrra. Kergliiklusteedel ja rohealadel tuleb eelistada liikumis- ja hämaraanduritega varustatud süsteeme, mis aktiveeruvad ainult tegeliku kasutuse korral. Pidev maksimaalvõimsusel töötav valgustus peab piirduma üksnes turvakriitiliste sõlmpunktidega.

Valguse visuaalse mugavuse ja ohutuse tagamiseks tuleb vältida valgusallikate paigutamist jalakäijate või autojuhtide otsevaatevälja. Räguse vältimiseks tuleb kasutada cut-off optikaga valgusteid ja vältida äkilisi heleduse muutusi ülekäiguradadel ja ristmike piirkonnas.

Rahvusvahelised praktikad, eeskätt Soome ja teiste Põhjamaade näitel, on näidanud, et valgusreostuse tõhus ohjamine eeldab tsoonipõhist, teaduspõhist ja seaduslikult siduvat regulatsiooni. Näiteks Helsingi linna keskkonnatsooni süsteemi (E1–E5) saab edukalt kohandada Eesti tingimustele. Selle alusel saab määratleda alad, kus tehisvalgustus peab olema kas minimaalne või täielikult keelatud, nt kaitsealad, tumeda taeva piirkonnad, loodusreservaadid ja astronoomiliselt tundlikud tsoonid.

Eestis on juba varasemates TalTechi uuringutes (2012, 2023) tuvastatud piirkonnad, kus valgustus on minimaalne või puudub (nt Hiiumaa, Tallinna servaalad). Siiski puudub nende õiguslik kaitse, mistõttu tuleks need alad määratleda ja reguleerida osana riiklikust valguskeskkonna strateegiast.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös „Tänavavalgustuse roll valgusreostuse tekke ja linnakeskkonna mõjutamisel“ uuriti, kuidas tänavavalgustus mõjutab valgusreostuse kujunemist ning millised on selle mõjud inimeste heaolule, looduskeskkonnale ja ööpäevastele rütmidele. Töö keskendus Mustamäe linnaosa näitel linnaruumi valgustusolude hindamisele, püüdes tuvastada probleeme, mis on seotud liigse, valesti suunatud või ebaühtlase tänavavalgustusega. Töös püstitatud eesmärk oli välja selgitada, millised on tänavavalgustuse kui valgusreostuse allika peamised tehnilised ja sotsiaalsed aspektid ning milliseid meetmeid oleks võimalik rakendada valgusreostuse vähendamiseks. Samuti uuriti rahvusvahelisi õigusraamistikke ja võrdlusriikide praktikaid, et mõista, milline võiks olla Eesti edasine suund antud valdkonnas.

Töö struktuur järgnes järgnevale ülesehitusele: esimene peatükk keskendus valguse arengule ühiskonnas ning tänavavalgustuse tehnoloogiatele. Teises peatükis käsitleti valgusreostuse olemust ja liike, hindamismeetodeid ning mõju inimesele ja ökosüsteemidele. Kolmandas peatükis anti ülevaade rahvusvahelisest ja Eesti seadusandlusest, teadusuuringutest ning kohalikest algatustest. Neljas peatükk käsitles Mustamäe linnaosas läbi viidud mõõtmiste meetodikat ja tulemusi. Viendas peatükis analüüsiti mõõtetulemusi, võrreldi neid kehtivate standarditega ning esitati järeldused. Töö lõppes ettepanekutega valgusreostuse vähendamise võimaluste üle.

Valgusreostuse mõju analüüs näitas, et kunstlik öine valgus võib põhjustada häireid inimese ööpäevarütmis, mõjutades une kvaliteeti, melatoniini tootmist ja üldist heaolu. Keskkonnamõjude tasandil toodi esile negatiivne mõju putukatele, lindude rändele ja taimede kasvurütmile. Valgusreostus vähendab ka tähtede nähtavust ja öise taeva loomulikku tumedust, mõjutades seeläbi astronoomilisi vaatlusi ja inimeste kultuurilist sidet öötaevaga.

Praktiliste mõõtmiste käigus viidi Mustamäel läbi tänavavalgustuse valgustustiheduse mõõtmised 49 punktis eesmärgiga kaardistada potentsiaalseid valgustusreostuse koldeid Mustamäe linnaosas. Samuti kontrolliti 4 sõidutee vastavust heleduse standardile EVS-EN 13201-2:2015. Tulemused näitasid, et mitmed mitmed sõiduteed ei vasta kehtestatud pikiühtluse nõuetele, põhjustades visuaalseid kontraste ning potentsiaalset visuaalset ebamugavust (Ehitajate tee).

Edasistes uuringutes võiks keskenduda valgusreostuse kvantifitseerimisele satelliitandmete abil ning hinnata erinevate valgustusrenoveerimisprojektide tegelikku mõju öise keskkonna kvaliteedile. Samuti tuleks välja töötada Eesti jaoks sobilik valgusreostuse seiremeetodika ning koostada rahvuslik tegevuskava valgusreostuse

vähendamiseks.

Magistritöö raames analüüsi, kuidas tänavavalgustus mõjutab valgusreostuse kujunemist Mustamäe linnaosas. Uuriti nii tehnoloogilisi kui ka regulatiivseid aspekte ning viidi läbi välitööd, mille käigus tuvastati mitmel tänaval pikiühtluse puudujääke ja potentsiaalset häirivat valgust. Selgus, et ka kaasaegne leedvalgustus võib tekitada valgusreostust, kui puudub piisav optiline kontroll ja tsoonipõhine lähenemine. Eesti senine regulatsioon on soovituslik ja killustatud, mistõttu tuleks liikuda sidusate normide, seiremetoodika ja pimedate alade kaitse suunas. Kõik püstitatud eesmärgid said töö käigus sisuliselt kaetud ning tulemused toetavad vajadust senisest teadlikuma ja keskkonnahoidlikuma valgustuskorralduse järele.

SUMMARY

This master's thesis, titled "The Role of Street Lighting in the Formation of Light Pollution and Its Impact on the Urban Environment", investigates how street lighting contributes to the development of light pollution and its effects on human well-being, natural ecosystems, and circadian rhythms. The study focuses on the Mustamäe district in Tallinn, assessing urban lighting conditions to identify problems related to excessive, misdirected, or uneven street lighting. The main objective was to identify the key technical and social aspects of street lighting as a source of light pollution and to explore feasible mitigation measures. Additionally, international legal frameworks and best practices from other countries were analyzed to provide guidance for future developments in Estonia.

The thesis is structured as follows: Chapter 1 discusses the historical evolution of artificial lighting and contemporary street lighting technologies. Chapter 2 elaborates on the nature and types of light pollution, its evaluation methods, and its impact on human health and ecosystems. Chapter 3 provides an overview of international and Estonian legislation, scientific research, and local initiatives related to light pollution. Chapter 4 presents the methodology and results of field measurements conducted in Mustamäe. Chapter 5 analyzes these results, compares them to applicable standards, and formulates key conclusions. The thesis concludes with proposals for reducing light pollution.

The analysis confirmed that artificial nighttime lighting can disrupt human circadian rhythms, affect sleep quality, suppress melatonin production, and impair overall well-being. At the environmental level, negative impacts were observed on insects, bird migration, and plant growth cycles. Light pollution also reduces the visibility of stars and the natural darkness of the night sky, thereby affecting astronomical observations and the cultural connection to the nocturnal environment.

As part of the fieldwork, horizontal illuminance was measured at 49 locations in Mustamäe to identify potential hotspots of light pollution. Additionally, luminance uniformity was evaluated on four streets according to the EVS-EN 13201-2:2015 standard. The results revealed that several road segments, including Ehitajate tee, did not meet the required longitudinal uniformity levels, creating visual contrast and potential discomfort.

Future studies should focus on the quantification of light pollution using satellite data and assess the actual impact of lighting renovation projects on nocturnal environmental quality. There is also a need to develop a national methodology for monitoring light pollution and to establish a national action plan for its reduction.

The findings of the thesis demonstrated that even modern LED street lighting can contribute to light pollution if not properly designed and zoned. Estonia's current regulatory framework remains fragmented and largely non-binding, emphasizing the need for enforceable standards, monitoring systems, and legal protection for dark-sky areas. All primary research objectives were substantively addressed, and the results support the need for more informed, environmentally conscious lighting policies in urban planning.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1]Liiklusseadus. Vastu võetud 27.06.2022. RT I, 20.06.2022, 70. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/131122024009?leiaKehtiv>. [Kasutatud: 10.05.2025].

[2]Valgus ja valgustus. Põhioskussõnad ja valgustusnõuete valiku alused, EVS-EN 12665:2024, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12665-2024>. [Kasutatud: 10.05.2025].

[3]T. Tamm, E. Risthein, G. Tammann, ja A. Saar, *Valgustustehnika. I*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2009.

[4]TAB, Light pollution – extent, effects and approaches, TAB-Fokus nr 25, põhineb aruandel nr 186. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berliin, Saksamaa, 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.tab-beim-bundestag.de/en/publications/reports/2020/light-pollution-extent-effects-and-approaches.html> [Kasutatud: 02.05.2025].

[5]A. Rosin, T. Varjas, M. Parker, T. Möller, ja A. Oorn, *Tallinna linna valgustuskeskkonna (valgusreostuse ja räiguse) hindamine ja analüüs*. Tallinna Keskkonna- ja Kommunaalamet, Tallinn, Eesti, 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://uuringud.tallinn.ee/uuring/vaata/2023/Tallinna-linna-valgustuskeskkonna-valgusreostuse-ja-raigusehindamine-ja-analuus>. [Kasutatud: 20.02.2025].

[6]DFRobot, "Comparison of Wireless Technologies: LoRaWAN and Zigbee, WiFi, NB-IoT," *DFRobot blog*, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.dfrobot.com/blog-1646.html>. [Kasutatud: 13.05.2025]

[7]R. Sordello *et al.*, "A plea for a worldwide development of dark infrastructure for biodiversity – Practical examples and ways to go forward," *Landscape Urban Plan.*, kd 219, lk 104332, märts 2022, doi: 10.1016/j.landurbplan.2021.104332.

[8]F. Falchi *et al.*, "The new world atlas of artificial night sky brightness," *Sci. Adv.*, kd 2, nr 6, lk e1600377, Juuni 2016, doi: 10.1126/sciadv.1600377. [Kasutatud 12.12.2024]

[9]F. Hölker *et al.*, "The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy," *Ecol. Soc.*, kd 15, nr 4, Nov. 2010, doi: 10.5751/ES-03685-150413. [Kasutatud 12.12.2024]

[10]F. Falchi *et al.*, „The new world atlas of artificial night sky brightness“, *Science Advances*, kd 2, nr 6, lk e1600377, juuni 2016, doi: 10.1126/sciadv.1600377.

[11]Ministry of the Environment of the Czech Republic, „Light pollution reduction measures in Europe,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://mzp.gov.cz/sites/mzp.cz/files/tiskove-zpravy/Light_pollution_reduction_measures.pdf. [Kasutatud 2.05. 2024]

[12]S. Achim, "The evolution of public lighting, from torches to smart services." *Energy Cities*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://energy-cities.eu/the-evolution-of-public-lighting-from-torches-to-smart-services/>. [Kasutatud 12.01.2025]

[13]*licht.wissen 01 - Lighting with Artificial Light*, licht.de, Saksamaa. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.licht.de/fileadmin/Publications/licht-wissen/1608_lw01_E_Artificial_Light_web.pdf. [Kasutatud: 13.12.2024].

[14]S. Rothschild, "History of Lighting: From Ancient Flames to Modern Illumination." *Access Fixtures*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.accessfixtures.com/history-of-lighting-from-ancient-flames-to-modern-illumination/>. [Kasutatud 02.05.2025]

[15]D. DiLaura, "A Brief History of Lighting," *Optica*, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.optica-opn.org/home/articles/volume_19/issue_9/features/a_brief_history_of_lighting/. [Kasutatud: 02.05.2025].

[16]M. Florian, "The Safety of Light: A Short History of Light in Public Spaces." *ArchDaily*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.archdaily.com/998418/the-safety-of-light-a-short-history-of-light-in-public-spaces>. [Kasutatud 02.05.2025]

[17]J. Henley, "Life before artificial light." *The Guardian*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.theguardian.com/lifeandstyle/2009/oct/31/life-before-artificial-light>. [Kasutatud 02.05.2025]

[18]"LED Street Lighting Procurement & Design," *Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency*, Austria. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b6d1cf07&appId=PPGMS>. [Kasutatud 21.04.2025]

[19]J. Vooglaine, A. Tull, R. Kuldmaa, M. Kelgo, T. Harjak, ja A. Kurusk, „Juhend Riigiteede valgustuse kavandamine,“ Maanteeamet.

[20]International Energy Agency, *Lighting sales by type in the Sustainable Development Scenario, 2010–2030 – Charts – Data & Statistics*. [Võrgumaterjal].

Saadaval: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/lighting-sales-by-type-in-the-sustainable-development-scenario-2010-2030>. [Kasutatud: 12.05.2025].

[21]*licht.wissen 03 - Roads Paths Squares*, licht.de, Saksamaa. [Võrgumaterjal].
Saadaval: https://www.licht.de/fileadmin/Publications/licht-wissen/1409_LW03_E_Roads-Paths-Squares_web.pdf. [Kasutatud 11.12.2024]

[22]Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu, "Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrus (EL) 2019/2020, 1. oktoober 2019, ökodisaini nõuete kehtestamine valgusallikatele ja eraldi juhtelektroonikale," *Euroopa Liidu Teataja*, L 315, lk 209–240, 05.12.2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2020/oj>. [Kasutatud: 12.05.2025].

[23]Euroopa Komisjon, "Komisjoni delegeeritud direktiiv (EL) 2022/278, 26. november 2021, millega muudetakse direktiivi 2009/125/EÜ seoses valgusallikate ja eraldi juhtelektroonika ökodisaini nõuetega," *Euroopa Liidu Teataja*, L 43, lk 38–41, 18.02.2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir_del/2022/278/oj. [Kasutatud: 12.05.2025].

[24]*licht.wissen 17 - LEDs: Basics - Applications - Effects*, licht.de, Saksamaa. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.licht.de/fileadmin/Publications/licht-wissen/1807_lw17_E_LEDs-Basics-Applications-Effects_web.pdf. [Kasutatud 03.05.2025]

[25]"Luminous Efficacy: The Ratio Between Lumens and Watts," *lamps.eu*, Saksamaa. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.lamps.eu/magazine/luminous-efficacy-the-ratio-between-lumens-and-watts/>. [Kasutatud 23.04.2025]

[26]Euroopa Parlament ja Nõukogu, "Direktiiv 2009/125/EÜ, millega luuakse ökodisaini nõuete kehtestamise üldraamistik energiat tarbivate toodete jaoks," *Euroopa Liidu Teataja*, L 285, 31.10.2009. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/125/oj/eng>. [Kasutatud: 12.05.2025].

[27]J. Tyndall, "Road illumination and nighttime pedestrian deaths: Evidence from moonlight," *Econ. Transp.*, kd 42, lk 100411, juuni 2025, doi: 10.1016/j.ecotra.2025.100411. [Kasutatud 02.05.2025]

[28]*Liiklusaasta ülevaade 2024*, Transpordiamet, Eesti. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.transpordiamet.ee/liiklusaasta-ulevaade-2024>. [Kasutatud 14.04.2025]

[29]ITF, "Monitoring Progress in Urban Road Safety: 2022 Update," *International Transport Forum Policy Papers*, nr 108, OECD Publishing, Pariis, 2022. [Kasutatud 02.05.2025]

[30]Interreg CENTRAL EUROPE, *Dynamic Light – Handbook about Interpretation of EN 13201*, 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/Dynamic-Light/04-DL-Handbook-about-interpretation-of-EN-13201.pdf>. [Kasutatud: 12.05.2025].

[31]GI Hub, *Smart Street Lighting for Energy Efficiency*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.gihub.org/infrastructure-technology-use-cases/case-studies/smart-street-lighting-for-energy-efficiency/>. [Kasutatud: 13.05.2025].

[32]AGC Lighting, *How LoRaWAN Enables Smart Street Lighting*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.agcled.com/blog/lorawan-enables-smart-street-lighting.html>. [Kasutatud: 13.05.2025].

[33]O. Pukk ja T. Varjas, *Energiatõhusa tänavavalgustuse väljaarendamine ning planeeritava juhtimissüsteemi analüüs Kakumäe küla näitel*, bakalaureusetöö, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, Eesti, juuni 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/b5f86cef-3fac-4968-8fe4-7d8964c4f5e6>. [Kasutatud: 13.05.2025].

[34]„Osa Tartu kesklinnast saab nutika tänavavalgustusvõrgu,” *Tartu Postimees*, 23. okt. 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://tartu.postimees.ee/4362901/osa-tartu-kesklinnast-saab-nutika-tanavavalgustusvorgu>. [Kasutatud: 13.05.2025].

[35]CIE TC 4-56, *CIE 234:2019 – A Guide to Urban Lighting Masterplanning*. Wien: CIE (International Commission on Illumination), 2019, doi: 10.25039/TR.234.2019.

[36]T. Trop, S. Shoshany Tavory ja B. A. Portnov, "Factors Affecting Pedestrians' Perceptions of Safety, Comfort, and Pleasantness Induced by Public Space Lighting: A Systematic Literature Review," *Environ. Behav.*, kd 55, nr 1–2, lk 3–46, jaan. 2023, doi: 10.1177/00139165231163550.

[37]*DarkSky's collaborations with LUCI*, DarkSky International. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://darksky.org/news/illuminating-the-path-to-sustainable-cities/>. [Kasutatud: 13.05.2025].

[38]*ChatGPT*, OpenAI. "Graafikute ja illustratsioonide genereerimine valgusreostuse teemal." [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://chatgpt.com>. [Kasutatud: 11.05.2025].

[39] *Tallinna linna teevalgustusnormid*, Tallinna Linnavalitsus, Tallinn, Eesti, Mär. 2004. [Kasutatud 28.04.2025]

[40] *Valgus ja valgustus. Töökohavalgustus. Osa 2: Välistöökohad*, EVS-EN 12464-2:2025, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, Märts. 2025. [Kasutatud 20.03.2025]

[41] L. Association, *The City of Lyon 3rd Lighting Plan: taking care of the night*. LUCI Association. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.luciassociation.org/the-city-of-lyon-3rd-lighting-plan-taking-care-of-the-night/>. [Kasutatud: 13.05.2025].

[42] *Lighting Guide 6: The exterior environment*. Society of Light and Lighting, 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://s3.amazonaws.com/fonteva-customer-media/00D8E0000008w4FUAQ/LG06%202016%20b.pdf>. [Kasutatud: 13.05.2025].

[43] M. Breyer, *5 Types of Light Pollution and Their Environmental Impact*. Treehugger. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.treehugger.com/types-light-pollution-and-their-impact-4857940>. [Kasutatud: 30.04.2025].

[44] James Madison University, *Light Pollution: The Overuse & Misuse of Artificial Light at Night*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.jmu.edu/planetarium/light-pollution.shtml>. [Kasutatud: 10.05.2025].

[45] W. Kaja, M. Ian, B. Anton, ja V. Penelope, *Review and Assessment of Available Information on Light Pollution in Europe*. European Environment Agency. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-report-2022-8-review-and-assessment-of-available-information-on-light-pollution-in-europe/@@download/file/ETCHE_report_2022-8_LightPollution_FINAL_111122.pdf. [Kasutatud: 13.12.2024].

[46] *licht.wissen 13 – Outdoor Workplaces*, licht.de, Saksamaa. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.licht.de/fileadmin/Publications/licht-wissen/0712_lw13_E_Outdoor_Workplaces_web.pdf. [Kasutatud: 11.12.2024].

[47] A. Davoodvandi, B. Nikfar, R. J. Reiter ja Z. Asemi, "Melatonin and cancer suppression: insights into its effects on DNA methylation," *Cell. Mol. Biol. Lett.*, kd 27, nr 1, lk 73, dets 2022, doi: 10.1186/s11658-022-00375-z. [Kasutatud: 12.01.2025].

[48] S. van der Graaf, "Artificial Light at Night and the Wadden Sea World Heritage," *Programma naar een Rijke Waddenzee*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://rijkewaddenzee.nl/en/newsitem/artificial-light-at-night-wadden-sea/>. [Kasutatud: 13.12.2024].

- [49]W. Kaja, M. Ian, B. Anton ja V. Penelope, *ETC HE Report 2022/8: Review and Assessment of Available Information on Light Pollution in Europe*, European Environment Agency. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-report-2022-8-review-and-assessment-of-available-information-on-light-pollution-in-europe>. [Kasutatud: 13.12.2024].
- [50]A. Rodríguez, M. B. Dias, V. H. Paiva, M. J. Polito, R. A. Phillips ja J. P. Granadeiro, "Future Directions in Conservation Research on Petrels and Shearwaters," *Front. Mar. Sci.*, kd 6, märts 2019, doi: 10.3389/fmars.2019.00094. [Kasutatud: 13.12.2024].
- [51]A. C. S. Owens, P. Cochard, J. Durrant, B. Farnworth, E. K. Perkin ja B. Seymoure, "Light pollution is a driver of insect declines," *Biol. Conserv.*, kd 241, lk 108259, jaan. 2020, doi: 10.1016/j.biocon.2019.108259. [Kasutatud: 13.12.2024].
- [52]S. Giavi, C. Fontaine ja E. Knop, "Impact of artificial light at night on diurnal plant-pollinator interactions," *Nat. Commun.*, kd 12, nr 1, lk 1690, märts 2021, doi: 10.1038/s41467-021-22011-8. [Kasutatud: 13.12.2024].
- [53]*Keskkonnaseadustiku üldosa seadus*, Riigi Teataja, RT I, 04.12.2024, 9. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/104122024009?leiaKehtiv>. [Kasutatud: 10.05.2025].
- [54]*Teevalgustus. Osa 2: Toimivusnõuded*, EVS-EN 13201-2:2015, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13201-2-2015>. [Kasutatud: 09.04.2025].
- [55]*Tartu|ENLIGHTENme*, 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.enlightenme-project.eu/cities/tartu>. [Kasutatud: 09.04.2025].
- [56]Tallinna Tehnikaülikool, „Valgusreostuse pikaajaliste muutuste uurimine Tallinnas ja valgusreostuse hetkeseisu määramine Eestis“. [Online]. Available at: https://web.archive.org/web/20151222103201/https://www.kik.ee/sites/default/files/Uuringud/aruanne_valgusreostus.pdf
- [57]Tallinna Tehnikaülikool, *Valgusreostuse pikaajaliste muutuste uurimine Tallinnas ja valgusreostuse hetkeseisu määramine Eestis*, 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://web.archive.org/web/20151222103201/https://www.kik.ee/sites/default/files/Uuringud/aruanne_valgusreostus.pdf. [Kasutatud: 02.05.2025].
- [58]Helsingi Linn, *Helsingin häiriövaloselvitys 2021*, 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-07-21.pdf>. [Kasutatud: 12.03.2025].

[59]Prantsusmaa Vabariik, *Arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses*. Journal Officiel de la République Française, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037864346>. [Kasutatud: 02.05.2025].

[60]Tšehhi Vabariigi Keskkonnaministeerium (Ministerstvo životního prostředí), *Light pollution reduction measures in Europe*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.mzp.cz/en/light_pollution_2022. [Kasutatud: 13.12.2024].

[61]CieloBuio, *VISUAL Accomplishment Regulations for the R. L. 17/00*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://cielobuio.org/cielobuio/lr17/visualreg17en.htm>. [Kasutatud: 10.05.2025].

[62]Government of the Republic of Korea, *Statutes of the Republic of Korea*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://elaw.klri.re.kr/eng_mobile/viewer.do?hseq=52771&type=part&key=39. [Kasutatud: 10.05.2025]

[63]K. A. Keskküla ja T. Varjas, *Valgusreostust tekitavate objektide energiasäästu analüüs Kristiine linnaosa näitel*, bakalaureusetöö, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, Eesti, juuni 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/1ce273ff-16e2-4c89-a0af-c39b07bc214d>. [Kasutatud: 10.05.2025].

[64]Tallinna Keskkonna- ja Kommunaalamet, *2024. aasta kokkuvõte*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://live.s3.teliahybridcloud.com/s3fs-public/inline-files/KEKO%20aastakokkuv%C3%B5te_0.pdf. [Kasutatud: 09.04.2025].