



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# JUHITAVA VALGUSTUSVÕRGU ENERGIA- JA VALGUSTÕHUSUS KALARANNA TÄNAVA NÄITEL

ENERGY AND LIGHTING EFFICIENCY OF THE CONTROLLABLE LIGHTING SYSTEM  
BY THE EXAMPLE OF KALARANNA STREET

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Sander Kulp

Üliõpilaskood: 182849AAVM

Juhendaja: Toivo Varjas

Tallinn, 2020

(Tiitellehe pöördel)

## 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.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Sander Kulp

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Juhitava valgustusvõrgu energia- ja valgustõhusus Kalaranna tänava näitel

*Kuupäev:* 20.05.2020

64 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* doktorant-nooremteadur Toivo Varjas

*Töö konsultant (konsultandid):*

*Sisu kirjeldus:*

Kuna järjest enam soovitakse tänavavõrkude juhtimises rakendada keerukamaid süsteeme ning valgustite hämardamisega veelgi enam elektrienergiat kokku hoida, tuleb vaadelda, missugused juhtimissüsteemid on paindlikumad ja otstarbekamad. Kuna väga ei pöörata tähelepanu hämardamisel valgusefektiivsusele, vaadeldakse, kuidas mõjutab hämardamine tee valgustatuse parameetreid.

Lisaks on selle lõputöö üks eesmärk välja selgitada ja analüüsida, kas Kalaranna tänava tänavavalgustite näitajad on garantiiaja lõpuks halvenenud ning kas sealsed teevalgustuse nõuded on täidetud nii valgustite täis- kui ka säästurežiimil.

Seetõttu tehakse simulatsiooniprogrammis tänavavalgustuse erinevad arvutused kontrollimaks, kas praegune valgustuse olukord vastab kehtivatele tänavavalgustuse standarditele. Vanema põlvkonna tänavavalgustite ja uute leedlampide võrdlemisel vaadeldakse erinevaid keskkonna- ja rahalise kulu tegureid.

Kuna elektrienergia tootmisel rakendatakse rangemaid keskkonnapoliitikaid, võrreldakse päikeseenergia põhinevaid tänavavalgustuse võrke tavaliste tänavavalgustuse võrkudega, et veenduda, milline võrk on rahaliselt kulukam.

*Märksõnad:* Valgustehnilised mõõtmised, juhtimissüsteemid, keskkond, leedvalgustid

## ABSTRACT

*Author:* Sander Kulp

*Type of the work:* Master Thesis

*Title:* Energy and lighting efficiency of the controllable lighting system by the example of Kalaranna street

*Date:* 20.05.2020

64 pages

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisor(s) of the thesis:* Associate Professor Toivo Varjas

*Abstract:*

As there is a growing desire to implement more sophisticated control systems in the street lighting networks to save even more electricity by dimming the luminaires, it is necessary to look, which control systems are more flexible and efficient. As little attention is paid to light efficiency during dimming, it is observed how dimming affects the road lighting parameters.

In addition, one of the aims of this thesis is to find out and analyze whether the lighting parameters of street lighting on Kalaranna Street has deteriorated by the end of the warranty period and whether the road lighting requirements have been fulfilled, when lamps are in full and dimmed mode.

Therefore, simulations of different street lighting calculations will be done to check whether the current lighting situation complies with the current street lighting standards. When comparing older generation street lamps and new LED lamps, various environmental and financial cost factors are considered.

As stricter environmental policies are applied to electricity generation, solar-based street lighting networks are compared with conventional street lighting networks to see which network is more costly.

*Keywords:* lighting measurements, lighting control system, LED lamps

Lõputöö teema: **Juhitava valgustusvõrgu energia- ja valgustõhusus Kalaranna tänava näitel**

Lõputöö teema inglise keeles: **Energy and lighting efficiency of the controllable lighting system by the example of Kalaranna street**

Üliõpilane: **Sander Kulp 182849AAVM**

Eriala: **Elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **Toivo Varjas**

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **21.06.2020**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **20.05.2020**

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Kuna järjest enam ehitatakse uusi ja uuendatakse olemasolevaid tänavavalgustustaristuid, siis on tähtis, et need võrgud oleks ehitatud vastavalt kehtivatele normdokumentidele ja standarditele. Käesoleva magistritöös on valgustehniliselt uuritavaks objektiks üks juhtimissüsteemiga Tallinna tänava valgustusvõrk, mis on ehitatud 2014. aasta paiku, kus valgustid on jõudnud/hakkavad jõudma tehase poolt antava garantiiperioodi lõppu.

Arvestades asjaolu, et järjest enam otsitakse võimalikult energiatõhusaid tänavavalgustuslahendusi, siis uuritakse ja võrreldakse käesolevas magistritöös tänavavalgustusvõrgus rakendatud juhtimissüsteemi ning analüüsitakse, kas mõni alternatiivne juhtimissüsteem oleks energiaefektiivsuse seisukohalt veelgi tõhusam.

Lisaks on vaja välja selgitada, kas aastatega on olnud konkreetse objekti valgustite valgusvoo ja elektrienergia tarbimises muutuseid.

Valgusti sees olev draiver on valgusti kõige kallim komponent ning ka üks sagedaseim komponent, mis rikneb. Seepärast vaadeldakse, missugused tegurid mõjutavad draiverite tööd ja mõjutavad nende eluiga. Lisaks uuritakse, kuidas mõjutab draiverite tööd võrgu elektrienergia- ja pingekvaliteet ning missuguste meetmetega oleks võimalik kvaliteeti parendada.

## 2. Töö eesmärk

Lõputöö eesmärgiks on analüüsida tänavavalgustusvõrgus kasutatud leedvalgusteid ja juhtimissüsteemi. Selgitada välja, kas ja kui palju oleks võimalik tagada veelgi suuremat energiasäästu mõne teise juhtimissüsteemi näol. Kuna leedvalgustid on palju väiksema tarbimisvõimsusega, kui lahenduslambid, on nad ka keskkonda säästvamad - seetõttu on vajalik vaadelda, kui palju vähem paiskavad leedvalgustid õhku kasvuhoonegaase kui lahenduslambid.

Samas on eesmärk kontrollida, missuguseid valgustite hämardamise astmeid hetkel kasutatakse ja kas need vastavad ka standardis määratud sõidu- ja jalgtee valgustusklassi nõuetele. Kontrollmõõtmiste tulemusena vaadeldakse samuti, kas valgustite parameetrites on viie aastaga mingisuguseid muutuseid toimunud.

Lisaks on vaja vaadelda, missugust mõju avaldavad harmoonikud võrgu pingekvaliteedile ning kui tähtis on tänavavalgustusvõrgus elektrienergia- ja pingekvaliteet?

### **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

1. Kas hetkel kasutatav juhtimissüsteem õigustab ennast?
2. Missugune alternatiivne tänavavalgustuse juhtimissüsteem oleks veelgi energiatõhusam, kuid samas ka standarditele vastav?
3. Kui palju keskkonda säästavad leedvalgustid võrreldes olukorraga, kui seal oleks naatriumvalgustid?
4. Kas kontrollmõõtmistega kontrollitud leedvalgustite omadused on garantiiperioodi lõpuks muutunud?
5. Kas hetkel kasutusel olev juhtimis-/hämaramissüsteem vastab ka standardiga kehtestatud teeklassi nõuetele?
6. Missugused faktorid mõjutavad enim elektrienergia- ja pingekvaliteeti?
7. Missuguste meetmetega saab võrgu elektrienergia -ja pingekvaliteeti parendada?
8. Missugune on valgustite leedraiverite tööpõhimõte ning missugused häiringud võivad põhjustada draiveri riknemist?
9. Leedraiverite poolt tekitatavad harmoonikud ja kuidas neid kompenseerida?

### **4. Lähteandmed**

Lähteandmetena on välja valitud praegu toimiv leedtänavavalgustuse võrk. Elektrotehnilised andmed on võimalik kätte saada valgusti tootjalt ning leida tänavavalgustuse projektist. Tarbimisandmete ajalugu on kätte saadav valgustuse ettevõttelt, kes on valgustusvõrgu juhtimissüsteemi haldaja. Lähteandmetena kasutatakse ka varasemaid valgustehnilisi mõõtmisi. Autor analüüsib ja võrdleb varasemaid ja magistritöö raames teostatud mõõtmiste protokolle, mille tulemusena on võimalik vaadelda, kas juba viie aastaga on täheldada valgustustite parameetrites muutusi.

On teada, et leedvalgustid tekitavad võrku harmoonikuid. Seepärast ongi vajalik uurida, kui suurel määral mõjutavad harmoonikud võrgu pinge siinuselist kuju.

### **5. Uurimismeetodid**

Vajalike järelduste tegemiseks tuleb esmalt kontakteeruda Elektrilevi tänavavalgustuse osakonnaga, kes haldab Tallinna linna tänavavalgustusvõrku. Nendelt on võimalik kätte saada eelnevate aastate statistika tarbimise ja juhtimise kohta. Enne järelduste tegemist tuleb esmalt läbi töötada konkreetse objekti kohta koostatud projektdokumentatsioon ning objektile mõõdetud väärtuste põhjal koostatud tehniliste valgusmõõtmiste protokoll.

Kontrollida tuleb, kas mõõdetud väärtused on kooskõlas ka standardis määratud nõuetega. Kuna osad standardid on antud ajaliselt välja hiljem kui valitud objekt valmis ehitati, tuleb kontrollida ka objekti vastavust uutele standardile ning vaadelda, kas mittevastavuse esinemisel on nende puuduste likvideerimine lihtne või keerukas.

Valgustuse haldusettevõttelt saadud info põhjal on võimalik analüüsida aastaseid tarbimisgraafikuid ning leida, kui suur on energia- ja keskkonnasääst võrreldes lahenduslampidega. Seejärel teostatakse valgustehnilised kontrollmõõtmised objektil kohapeal, mille mudeldamise tulemusena saab võrrelda neid võrgu algusaasta andmetega ning analüüsida, kas aastate jooksul on leedvalgustite efektiivsus vähenenud.

Kuna leedvalgustuse draiverid on kõige tähtsamad ja kallimad komponendid, uuritakse, missugune on draiveri tööpõhimõte ning millised on nende peamised riknemise põhjused. Kuna leedvalgusti draiveri üks ülesanne on vahelduvvoolu muutmine alalisvooluks, uuritakse, missugust mõju avaldab elektrienergia kvaliteet ning millist rolli mängivad pingemoonutamisel harmoonikud.

## **6. Graafiline osa**

Võrguskeemid koos oluliste parameetritega ning tabelid tulemuste võrdluseks esitatakse graafiliselt töö põhiosas, kuna need aitavad luua paremat tervikpilti ja muuta lõputöö lugemise lihtsamaks.

## **7. Töö struktuur**

Töö koostamise käigus võivad alapeatükid muutuda

Sissejuhatus

### **1. Tänavavalgustusvõrk**

#### **1.1. Leedvalgustid**

#### **1.2. Juhtimissüsteem**

#### **1.3. Alternatiivsed juhtimissüsteemid**

##### **1.3.1. Eelprogrammeeritud valgustitega juhtimissüsteem**

##### **1.3.2. Lisasoonega juhtimissüsteem**

#### **1.4. Juhtimissüsteemide võrdlus aastate lõikes ning võimalik rahaline kokkuhoid**

#### **1.5. Aastane keskkonnasäästu arvutuskäik õhku paisatavate kasvuhoonegaaside arvelt võrreldes lahenduslampidega**

### **2. Valgustehnilised mõõtmised ja analüüs**

#### **2.1. Valgustehnilised mõõtmised ehitusperioodi lõpus**

#### **2.2. Valgustehnilised mõõtmised garantiiperioodi lõpus (5 aastat)**



- 2.2.1. Mõõtmiste ettevalmistus
  - 2.2.2. Mõõteseadme spetsifikatsioon ja mõõtetulemuste analüüsiks vajalik tarkvara
  - 2.2.3. Mõõtetulemuste analüüs
  - 2.3. Standardid ja normdokumendid
3. Pinge- ja voolukvaliteedi olulisus valgustusvõrgus
- 3.1. Elektrienergia kvaliteeti mõjutavad asjaolud
  - 3.2. Valgustite draiverite tööpõhimõte ja nende tööd mõjutavad tegurid
  - 3.3. Harmoonikud ja nende kompenseerimine
- Kokkuvõte

## 8. Kasutatud kirjanduse allikad

Teooriat ja lähtematerjali otsitakse erialastest raamatutest, teadusartiklitest, õppematerjalidest ning standarditest.

Põhilisemad kirjanduse allikad, mida lõputöö koostamisel kasutatakse:

- [1] Teevalgustus. Osa 1: Valgustusklasside valiku juhised, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/tooted/cen-tr-13201-1-2014>. [Kasutatud 06.03.2020]
- [2] Teevalgustus. Osa 2: Toimivusnõuded, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-13201-2-2015>. [Kasutatud 06.03.2020]
- [3] Teevalgustus. Osa 3: Toimivuse arvutamine, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-13201-3-2015>. [Kasutatud 06.03.2020]
- [4] Teevalgustus. Osa 4: Valgusliku toimivuse mõõtemetodid, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-13201-4-2015>. [Kasutatud 06.03.2020]
- [5] Teevalgustus. Osa 5: Energiatõhususnäitajad, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-13201-5-2015>. [Kasutatud 06.03.2020]
- [6] „Madalpingelised elektripaigaldised. Osa 7-714: Nõuded eripaigaldistele ja -paikadele. Välisvalgustuspaigaldised“ Eesti Standardikeskus, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/tooted/evs-hd-60364-7-714-2012>. [Kasutatud 06.03.2020].
- [7] „Elektromagnetiline ühilduvus. Osa 3-2: Piirväärtused. Vooluharmoonikute emissiooni lubatavad piirväärtused (seadmetel sisendvooluga kuni 16 A faasi kohta)“ Eesti Standardikeskus,

[Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-iec-61000-3-2-2019>. [Kasutatud 08.03.2020].

[8] P. Natthanon, J. Chaiyan and N. Atthapol, "Harmonics and Reduction of Energy Consumption in Lighting System by using LED lamps," 15 November 2018. [Online]. Available: [www.mdpi.com](http://www.mdpi.com). [Accessed 08 03 2020].

## **9. Lõputöö konsultandid**

Lõputöö konsultantide järele vajadust ei ole.

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Tänavavalgustuse objekti välja valimine (10.03.2020)

Teoreetilise osa kirjutamine (28.03.2020)

Möötmiste teostamine (21.03.2020)

Teadusartiklite, kirjandusallikate otsimine (26.03.2020)

Analüüs (15.04.2020)

Järelduste ja kokkuvõtte kirjutamine (21.04.2020)

Esimene versioon juhendajale üle vaatamiseks valmis (28.04.2020)

Paranduste sisseviimine (10.05.2020)

Juhendajale teine versioon üle vaatamiseks (11.05.2020)

Töö lõplik versioon valmis (20.05.2020)

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
EESSÕNA.....	13
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	14
SISSEJUHATUS.....	15
1. Tänavavalgustusvõrgu olulisus.....	16
1.1 Leedvalgustid.....	17
1.2 Juhtimissüsteemid.....	21
1.2.1 Kalaranna tänav.....	21
1.2.2 Valgustite juhtimine eelprogrammeerimise teel.....	23
1.2.3 Valgustite juhtimine lisasoonega maakaabliga.....	26
1.2.4 Alternatiivseid juhtimissüsteeme.....	27
1.2.5 Leedvalgustite keskkonnasäästlikkus ja keskkonna ohutegurid.....	31
1.2.6 Kalaranna tänava energiatõhususnäitajate arvutamine.....	33
2. Valgustehnilised mõõtmised ja analüüs.....	36
2.1.1 Nõudmised mõõtmistele.....	37
2.1.2 Töökeskkonna ohutus ja mõõtemetoodika.....	37
2.1.3 Sõidutee valgustehnilised mõõtmised ehitusperioodi lõpus.....	38
2.1.4 Sõidutee mõõtmised garantiiperioodi lõpus.....	40
2.1.5 Sõidutee mõõtmistulemuste analüüsid ja järeldused.....	43
2.1.6 Kergliiklustee mõõtmised garantiiperioodi lõpus.....	44
2.1.7 Ülekäiguradade valgustamise olulisus.....	46
3. Tänavavalgustusvõrgu tuleviku perspektiivid.....	49
3.1.1 Elektrienergia kvaliteet.....	49
3.1.2 Leedvalgustid päikeseenergia toitel.....	51

KOKKUVÕTE .....	57
SUMMARY .....	59
KASUTATUD KIRJANDUS .....	61
LISAD .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Lisa 1 Esimese lisa pealkiri .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## EESSÕNA

Käesolev magistritöö on koostatud Toivo Varjase ettepanekul, kes on käesoleva töö juhendaja. Töös kasutatud kirjalik materjal on saadud avalikest internetiallikatest, juhendajalt ning raamatutest. Lõputöö on teostatud Tallinnas ning kasutatud alg- ja mõõteandmed on autentsed.

Lõputöö autor soovib tänada tema juhendajat Toivo Varjast, kes aitas lõputöö valmimisele suurel määral kaasa.

# LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

## Tähised

$\cos \phi$  võimsustegur

## Mõisted

Valgusdiod (LED)- p-n-siiret sisaldav tahkisseadis, mis elektrivooluga ergastamisel emiteerib optilist kiirgust. Lühend LED tuleneb ingliskeelsest terminist "light emitting diode"

Valgustustugevus (luminous intensity)- valgusallika poolt antud suunda sisaldavasse lõpmata väiksesse ruuminurka kiiratava valgusvoo ja ruuminurga jagatis. Valgustustugevuse ühikuks on kandela (cd).

Heledus (luminance)- iseloomustab valgustugevuse näivat tihedust valgust andval pinnal (iseloomustab valgustatud ala heledust). Heleduse ühikuks on kandela ruutmeetri kohta ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

Valgustustihedus (illuminance)- pinnaelemendile langeva valgusvoo  $\Phi$  ja selle elemendi pindala  $S$  jagatis. Valgustustiheduse ühikuks on luks (lx).

Valgusvoog (luminous flux) on suurus, mis iseloomustab kiirgusvoo toimet selektiivsele spektraalse valgusefektiivsuse standardi funktsiooniga. Valgusvoo ühikuks on lumen (lm).

Valgusviljakus (luminous efficacy)- valgusallika valgusvoo ja selle tarbitava võimsuse suhe.  $\eta = \Phi/P$ , kus  $\Phi$  on valgusvoog ja  $P$  on tarbitud võimsus. Valgusviljakuse ühikuks on lumenit vati kohta ( $\text{lm}/\text{W}$ ). Kui valgusallika võimsus on võrdne, siis saab suurema valgusviljakusega lambist rohkem valgust kui väiksema valgusviljakusega lambist.

Värvsustemperatuur (color correlating temperature, CCT)- valguse (näiteks päikese või lambi valguse) kelvinites (K) mõõdetav tunnusuurus, mis väljendab värvinägemisega kaasnevat soojuslikku muljet.

## SISSEJUHATUS

Tänavavalgustus on äärmiselt oluline infrastruktuuri osa, et tagada linnades ja asulates ohutus ning turvalisus. Kuna elektri hind on viimaste aastatel palju tõusnud, on energiasäästlikud valgustuslahendused hädavajalikud.

Välisvalgustus tekitab peaaegu 6% terve maailma süsihappegaasi emissioonidest. Vahetades kogu maailma lahenduslambid leedvalgustite vastu, aitaks see säästa üle 1400 miljoni tonni süsihappegaasi ja hoida ära vähemalt 1250 elektrijaama ehituse. [1]

Pärast ajaloolist Pariisi kliimakokkulepet on vaja tõhusaid kliimameetmeid. Kuni 50–70% kokkuhoiuga on LED-valgustust tunnustatud kui ühte kõige kasutatavamat ja kasutusele võetavat tehnoloogiat linnadele üleminekuks vähese süsihappegaasiheitega majandusele ja järgmise kümnendi suurimatele heitkogustele. [1]

Käesoleva lõputöö teema on aktuaalne, kuna Eestis plaanitakse lähitulevikus rekonstrueerida paljude linnade ja asulate välisvalgustust Keskkonnainvesteeringute Keskuse toetuste abiga või omavalitsuse enda finantsidega. Võttes arvesse, et uusi leedvalgustusvõrke ehitatakse juurde aina enam, on tähtis, et need on projekteeritud ja ehitatud vastavalt normidele ja standarditele, kuid peaksid olema sealjuures võimalikult energiatõhusad.

Autori kogemusest tulenevalt ei ole paljud omavalitsused kursis valgustusvõrkudesse pakutavate juhtimissüsteemidega, mistõttu on oluline teha selgeks nende eelised ja puudused. Lisaks soovitakse enamustes juhitavates valgustusvõrkudes öisel ajal valgustite väljundvõimsust vähendada, et suurendada energiasäästu. Sealjuures ei pöörata aga tähelepanu, et ka öisel hämardamisel võiksid olla tagatud olenevalt tee valgustusklassist standardis esitatud nõuded.

Käesolevas magistritöös parima võimaliku uuritava objektina valitud Tallinna linnas asuv Kalaranna tänava tänavavalgustuse võrk, mis on kaugjuhitava juhtimissüsteemiga, andes võimaluse uurida erinevaid valgustite juhtimisrežiime.

Kalaranna tänavavalgustuse võrk on välja ehitatud 2014. aastal, mis tähendab, et objektile kasutatud valgustid on jõudnud tehase poolt antava garantiiperioodi lõppu. Kuna võrgus olevate valgustite režiime on võimalik kaugjuhtimise teel muuta, tuleb lähemalt uurida, missugune juhtimissüsteem on hetkel kasutusel ning kas mõni teine juhtimissüsteem võiks olla veelgi energiatõhusam.

Valgustehniliste mõõtmiste ja teoreetiliste arvutuste abil on võimalik vaadelda, missugused on valitud tänavavalgustusvõrgu kitsaskohad ning missugusel määral on muutunud valgustite väljundparameetrid aastate möödudes.

## 1. Tänavavalgustusvõrgu olulisus

Tehislikku valgust on kasutatud juba aastasadu linnade valgustamiseks ja öiseks linnaruumi kontrolliks. Tänapäeval peetakse tänavavalgustust üha enam enesestmõistetavaks linnataristu osaks. Tänavavalgustust kasutatakse eelkõige ohutuse tagamiseks pimedal ajal liiklejatele sõidu- ja jalgteedel. [2]

Akadeemilised uuringud kipuvad tihti jätma tähelepanuta nüansi, mis leiab aset pimeduse saabudes. Ööpimedus pole pelgalt päevalguse puudumine vaid pimedas teisevad praktikad ja emotsioonid, mis omakorda seostub kindlate tegevuste ning võimalustega. Need tegevused võivad olla kriminaalselt laadi või olla seotud teistlaadse käitumisviisiga, mis päeval ajal ei kohta. [3]

Teevalgustuse paigaldamise investeerimise otsuseid saab mõistlikult teha ainult siis, kui on olemas selge ülevaade teevalgustuse eesmärgist ja eelistest. Motoriseeritud liikluse korral peaks teevalgustus pakkuma visuaalset jõudlust ja visuaalset mugavust ning aitama juhti hoida valvsana. Paljud erinevad uuringud on näidanud, et hea teevalgustus võib öiseid õnnetusi vähendada. Elamurajoonides peaks teevalgustus andma visuaalset teavet ka aeglaselt liikuvale liiklusele, näiteks jalakäijatele, jalgratturitele ja mopeedikasutajatele, et nad leiaksid oma tee ilma võimalike ohtlike ohtudega kokkupõrke või komistamise riskita. Lisaks peaks teevalgustuse eesmärk olema ka vägivalda, vandalismi ja kuritegevuse tõkestamine. Kuritegevuse statistika näitab, et teevalgustuse ja kuritegevuse vähendamise vahel on seos. Hea teevalgustus võib ka elanike turvatunnet soodustada. Lõpuks võib hästi kavandatud teevalgustus piirkonna atraktiivsust suurendada. [4]

Tallinn on Rahvusvahelise Linnavalguse Liidu (Lighting Urban Community International, LUCI) liige, mis asutati 2002. aastal ning mille eesmärk on luua ühtne valgustusstrateegia kõigile liikmeslinnadele. Liidu ambitsiooniks on koos 72 munitsipaalasutuse abil kujundada, suunata ja planeerida linna välisvalgustuse arendamist vastavalt ühiselt välja töötatud arengukavale, mille suundadeks on näiteks valgustatud ruumi täielik ligipääs, väiksem valgusreostus, valgustuse planeerimine elanike soove arvestades, valgustipõhine juhtimissüsteem, turismi elavdamine rohkemate valgustatud linnaobjektide näol ning ka targa linna lahenduste edendamine. [5]



## 1.1 Leedvalgustid

Leedtänavavalgustid on praegu tänavavalgustuses enim paigaldatavad valgusti tüübid. Leedvalgusti põhilised komponendid on draiver, valgusdiodid ja valgusti korpus. Leedvalgustite puhul võidakse kasutada väiksemal arvul suure võimsusega valgusdioode või suurel arvul väiksema võimsusega valgusdioode, olenevalt tootjast.

Esmalt hakati valgusdioode kasutama valgusfoorides. Esimene valge värvusega valgusdiod värvsustemperatuuriga 4000K-11000K tõi turule Nicha Chemical company, kes töötas välja 1990. aastate alguses valgusdiodi, mis oli senistest toodetud diodidest üle saja korra kõrgema valgusviljakusega. [2]

Leedmoodul on soklita valgusallikas, mis sisaldab üht või mitut trükkplaadil asetsevat leedpakki ja võib sisaldada ka üht või mitut elektrilist, optilist, mehaanilist ja termilist komponenti ning liideseid ja liiteseadist [7].

Leedide eripära on see, et nende puhul on võimalik valida erinevaid värvsustemperatuure. Vanema generatsiooni kõrgrõhulambid on enamasti väga sooja valgusega. Leedid seevastu ei suuda nii sooja valgust tekitada. Küll aga on nüüdseks suudetud tehnoloogiat nii palju arendada, et leedide värvsustemperatuur on 2300K lähedal, kui kõrgrõhulampide värvsustemperatuur on ligikaudu 2000K.

Lisaks on leedide eeliseks ülimalt suur valguse efektiivsus, mis nad suudavad ühe vati kohta toota. Võrreldes vanema generatsiooni kõrgrõhulampidega on nende efektiivsus kuni kolm korda suurem. Allolevas tabelis on välja toodud erinevate valgustite tüüpide valgusnivoo efektiivsus ühe võimsusühiku kohta ning keskmine eluiga.

Tabel 1.1 Eri valgusti tüüpide efektiivsus võimsusühiku kohta ja keskmine eluiga [7]

Lambi tüüp	Efektiivsus, lm/W	Eluiga, h
Elavhõbe kõrgrõhulamp	13-48	12000-24000
Metallhaliidlamp	60-100	10000-15000
Kõrgrõhu naatriumlamp	45-130	12000-24000
Leedlamp	70-150	60000-100000

Kalaranna teele on sõidu- ja kõnnitee valgustamiseks paigaldatud Theos tüüpi valgustid, mille tootja on SBP. Ülekäiguradade valgustusena on kasutatud D-Leds tootja valgusteid, mille mudel on Stratos N. Valgustite visuaalne väljanägemine on toodud joonistel 1.1 ja 1.2.

Esmalt oli projekt koostatud valgustite tootja WE-EF valgustitega, mille värvsüsteemtemperatuur oli 4000K. Kuna ehitushanke võitjal on õigus pakkuda välja teise tootja valgustid, peavad need vastama hankes esitatud valgustite nõuetele. Lisaks peavad teise tootjat valgustitega asendamise aktsepteerima ka töö tellija ning projekti koostaja. Hetkel sellise tarbimisvõimsusega valgusteid WE-EF enam ei tooda nagu oli ette nähtud projektdokumentatsioonis, mis tekitab küsimuse, kas oleks tagatud olnud leevalgustite varuosade saadavus kümne aasta jooksul?

Tänavavalgustuspaigaldise kujundus ja seadmete paigutus mõjutavad tugevasti tee esteetilist ilmet ja teekeskonda nii päeval kui öösel. See käib mitte üksnes tee kasutajate vaid ka paigaldist eemalt vaatlevate inimeste kohta. [8]



Joonis 1.1 Sõidu- ja jalgtee valgusti Theos [9]



Joonis 1.2 Ülekäiguraja valgusti Stratos [10]

Tallinna linnas väljastatakse projekteerijale tehnilised tingimused, millele seadmed vastama peavad. Neist kõige olulisemateks tingimusteks võib lugeda järgnevaid [11]:

- Valgustite ja juhtimisseadmete nimitalitus peab olema tagatud töökeskkonna temperatuuril 25 °C kuni +25 °C;
- Valgustis valgusallika värviedastusindeks on  $CRI \geq 70$ ;

- Uutel paigaldatavatel valgustitel peab olema püsiv väljundvalgusvoog (Constant Lumen Output, CLO) funktsioon;
- Valgusti piiratud talitus peab olema tagatud vahemikus -15 % kuni +10 % nimipinge väärtusest;
- Valgusti ja leedmooduli valgusviljakus peab olema vähemalt 90 lm/W.

Lisaks on nõutud, et valgusti tootja poolt oleks väljastatud sertifikaadid, mis tõendavad, et valgustitel on olemas 5- aastane tootjapoolne garantii ning valgustite varuosad on turul saadaval vähemalt 10 aasta jooksul alates valgustite paigaldamisest. [11]

Tabelis 1.2 on esitatud uuritava objektis kasutatud valgustite parameetrid ning summaarne valgustite võimsus.

Tabel 1.2 Kasutatud valgustite parameetrid [9] [10]

Seeria	Theos			Stratos
Sisendpinge, V	230			230
Eluaeg, h	100 000			100 000
Võimsustegur	>0,9			>0,9
Värvsustemperatuur, K	3000K			5500K
Elektriline isolatsioon	I klass			I klass
Võimsus, W	102	70	35	53
Valgusvoog, lm	10648	7144	3844	4706
Valgusviljakus	105,4	103,5	106,8	98,1
Valgustite arv objektis, tk	20	50	65	53
Koguvõimsus, W	7815			2809

M-valgustusklassid on ette nähtud mootorsõidukite juhtidele nende liiklusteedel, lisaks aga ka elamupiirkondade teedel, mis võimaldavad kasutada mõõdukat või suurt sõidukiirust. Nende klasside rakendamine sõltub tegeliku liikluspikiirkonna geometriast, liiklusest ja ajalistest olukordadest. Sobiv valgustusklass tuleb valida vastavalt tee otstarbele, projektkiirusele, üldehitusele, liiklusvoole, liikluskoosseisule ja keskkonnaoludele. [12]

P-valgustusklassid on ette nähtud eeskätt jalakäijatele ja jalgrattureile, kes liiklevad kõnni- ja jalgrattateedel ning aeglaselt liikuvate mootorsõidukitele elamupiirkondade teedel, ohutus- ja parkimisradadel ja muudel autoteedest või elamupiirkondade teedest eraldi või nendega rööbiti kulgevatel teedel jms. Jalakäijate nägemine erineb sõidukijuhtide omadest mitmel viisil. Nende liikumiskiirus on üldiselt palju aeglasem ja vaatlemist vajavad objektid on palju lähemal kui need, mis on tähtsad mootorsõidukite juhtidele. [12]

Valgustusklassi valikul tuleb arvestada valitavate parameetrite suurimaid väärtusi talitluse kestel, arvestades näiteks tiptunni liiklusvoogu. Valgustusklass valitakse valitavate parameetrite raskeimate väärtuste järgi, kuid selle klassi rakendamine ei pruugi end muutuvates oludes, näiteks nädalalõppudel, eri ilmaoludes, erisugustel liiklusvoogudel hämara aja kestel õigustada. Normaalklassi valitavate parameetrite kõrval võivad arvestatavate parameetrite ajalised muutused lubada või nõuda heleduse või valgustustiheduse normaalse keskmise taseme kohandamist, tavaliselt taseme madaldamise teel. Tähtsaimad parameetrid on sellest seisukohast liiklusvoog, liikluskoosseis, teekatte peegeldusomadused reaalajas ja teepinna olemasolev seisund. [12]

Kui valgustusklassi mõjutavate parameetrite varieerumisnäitajad on hästi teada, näiteks liikluse seirejaamade või liiklusteedel paiknevate ilmajaamade andmetel, siis võib sobivaks osutuda lihtsate aja järgi toimivate reguleerimissüsteemide kasutamine. Muudes oludes võid eelistada reaalajas toimivad interaktiivseid reguleerimissüsteeme. Sel juhul võib normaalklassi aktiveerida näiteks teetööde, raskete liiklusõnnetuste, halva ilma või ebapiisava nähtavuse puhul. [12]

Jalakäijate ülekäiguradel eraldi valgustusklassi ei ole. Ülekäiguraja valgustus peab vastama standardi 935:2-2017 Jalakäijate ülekäiguradade valgustamine lisavalgustusega nõuetele. Ülekäigurajavalgustitel on suunatud optikaga valgusjaotus mis on suunatud valgustama ülekäigurada. Sõiduteevalgustitega pole standardis esitatud nõudeid võimalik saavutada. Samuti tuleb ülekäigurada lisavalgustitega valgustamisel rohkem esile, mis juhib ka autojuhi tähelepanu sellele, et ees on ülekäigurada. Jalakäijate nähtavust mõjutab tunduvalt see, kust kohast jalakäijad teed ületavad. Kui seda teha ülekäiguraja keskelt kus on vertikaalne valgustustihedus 30 luksit on jalakäijad paremini nähtavad. Kui aga ületada teed ülekäiguraja äärest, siis on silmaga märgatav, et jalakäijad pole nii hästi valgustatud. [13]

## 1.2 Juhtimissüsteemid

Üldjuhul on kasutatud valgustite juhtimiseks kõige levinumat ja lihtsamat tööpõhimõtet, mis on astronoomilise kella, hämaralüliti või mõlema kombineeritud juhtimine. Hämaralüliti paigaldatakse valgustuse juhtimiskilbi kesta külge ning tema ülesanne on mõõta väliskeskonna valgustustihedust. Kui valgustustiheduse väärtus läheb allapoole hämaralüliti seatud piirväärtust, läheb hämaralüliti signaal kontaktoritele, mis lülitavad tänavavalgustid sisse.

Astronoomilise kellaga juhtimissüsteem on selline, kus astronoomiline kell arvestab vastavalt geograafilisele positsioonile päikese tõusu- ja loojumisaegu, millele vastavalt ta kontaktoritele sisselülitus- või väljalülitussignaali annab. Selle süsteemi üks miinuskülg on kogemuste põhjal näitanud, et astronoomilist kella tuleb iga aasta käia kalibreerimas, kuna see kipub üldjuhul valgusteid pikema aja möödudes liiga vara sisse lülitama, eriti suve ajal.

Astronoomilise kella ja hämaralüliti kombineeritud juhtimine on kõige kindlam lihtsa valgustite juhtimise moodus, kuna astronoomiline kell teostab hämaralüliti topeltkontrolli. See välistab võimaluse, et kellelgi on võimalik juhuslikult või tahtlikult (taskulambi valgusvihi suunamine hämaraandurile, auto tulede valgusvihk) tänavavalgustus kustutada. Kui hämaraandur mõõdab heleduse väärtuse suurema kui temale seatud piirväärtus, siis astronoomiline kell teostab ahelas topeltkontrolli, vaatlemaks, kas on loogiline, et sellisel kellaajal on heleduse väärtus selline, nagu hämaraandur just mõõtis.

### 1.2.1 Kalaranna tänav

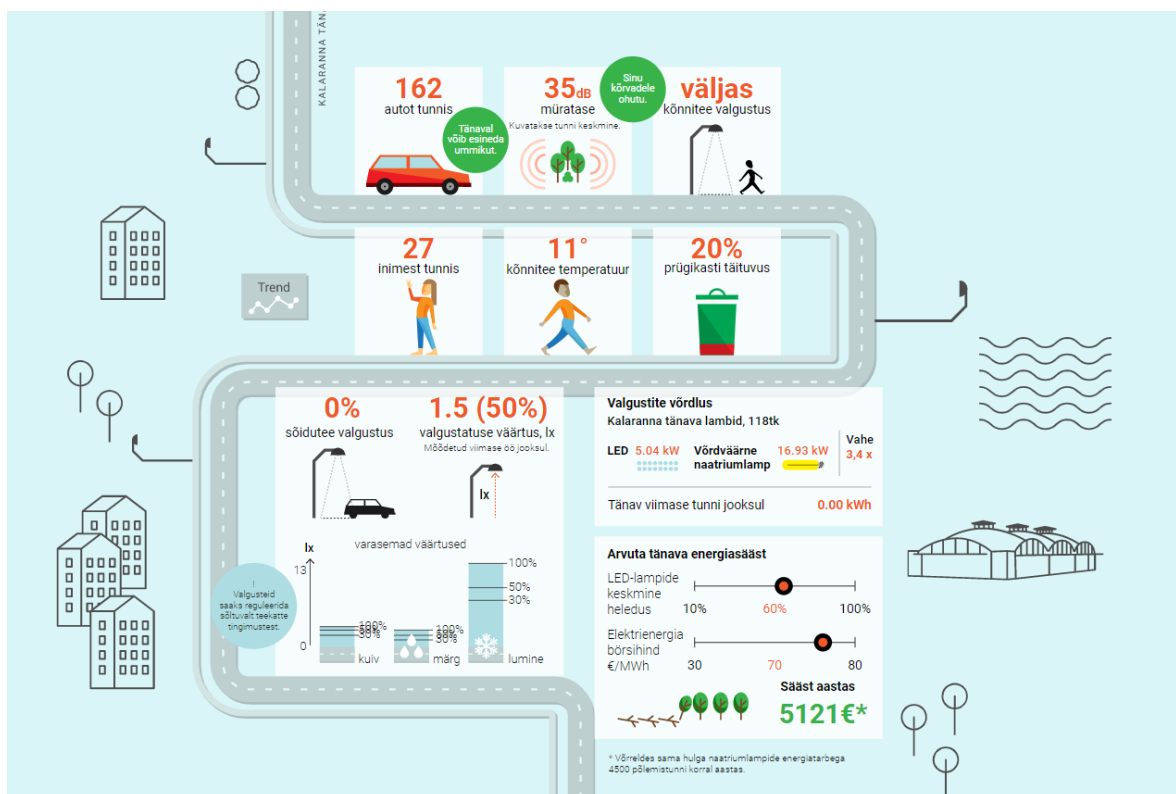
Nüüdisajal on hakatud uutes tänavavalgustusvõrkudes kasutusele võtma keerukamaid ja rohkemate funktsioonidega juhtimissüsteeme, kus öisel ajal valgustite väljundvõimsust alandatakse, vähendades sellega valgusti poolt välja antavat valgusvoogu ja säästes kokkuvõttes suurel määral elektrienergiat. Järjest enam on populaarsust kogunud kaugjuhtimissüsteemid, mille abil on võimalik üle serverühenduse valgustite grupe või igat valgustit eraldi juhtida.

Kalaranna teel oleva juhtimissüsteemina on hetkel SmartEliko ettevõtte poolt välja töötatud SmartELI süsteem, mis on üks osa nende poolt pakutavast targa linna lahendusest. Kalaranna tänav on üks sellelaadse konfiguratsiooniga tänav, kus on võimalik vaadelda valgustite hetkestaatust ning ka muude tänavatel asuvate objektide ja liikumiste statistikat.

Vaadeldava objekti valgustid on varustatud ka Zhaga pistikupesaga. Pistikupesa annab tulevikuks valgustusvõrgu haldajale võimaluse valgustite küljes olevatesse antennipesadesse kinnitada antennid, luues võimaluse hakata juhtima igat valgustuspunkti eraldi. Küll on aga praegu

paigaldatud valgustite korpuse sisse eraldi SmartELI juhtkontrollerid, millega saab iga valgusti olekut ja tööd juba eraldi kontrollida, mistõttu korpuses olevad pistikupesad annavad võimaluse liita tulevikus valgustite külge erinevaid monitooringusüsteeme. Valgustite tellimine juba antennipesadega on tuleviku perspektiivi arvestades väga mõtestatud tegevus, sest kui omavalitsusel peaks olema soov tulevikus üle minna spetsiifilisemale juhtimissüsteemile, siis on neil see võimalus olemas- juurde tuleb soetada ainult kontrollerid, mis valgustite antennipesasse ühendada tuleb. Nagu ka mainitud, ei ole pistikupesa ainult valgusti eraldi juhtimise jaoks, vaid on ka välja töötatud erinevaid andureid ja loendureid, millega saab omavalitsus koguda olenevalt anduri liigist erinevat statistikat. Seetõttu ongi omavalitsusel vägagi mõistlik soetada valgustid tulevikuperspektiivile mõeldes antennipesadega, kuna sinna ühilduvad ka teised seadmed.

Valgustipõhine juhtimissüsteem on kõige paindlikum süsteem, kuna siis on võimalik määrata igale valgustile või valgustite grupile eraldi hämardusastmed, vaadelda iga valgusti tarbimist ning saada teavet, kui mingi konkreetse valgustiga on toimunud rikkumine.



Joonis 1.3 Kalaranna tee targa tänava lahendus [14]

Võttes arvesse, et keskmiselt töötab tänavavalgustusvõrk aastas 4000 tundi, on võimalik aasta lõikes erinevate juhtimisrežiimidega palju energiat ja sealhulgas ka raha kokku hoida. Näiteks Kalaranna tänaval, kus kogu tänaval paiknevate valgustite koguvõimsus on 10,6kW, teeb see aastas

tarbitavaks koguvõimsuseks 42,5 MWh. Rahaliselt teeb see ligikaudu 3000€ aastas, eeldades, et elektri hind koos võrgutasude ja aktsiisidega on 70€/MWh.

Tulenevalt Eliko poolt saadud statistikast on allolevas tabelis toodud Kalaranna valgustusvõrgu tarbimine aastate lõikes.

Tabel 1.3 Kalaranna tänava aastane energiakulu ja eeldatav energiakulu rahaline maksumus [15]

Aasta	Tarbimine, MWh	Ligikaudne rahaline kulu, €
2016	25,43	1778
2017	37,33	2618
2018	29,40	2058
2019	26,72	1870

### 1.2.2 Valgustite juhtimine eelprogrammeerimise teel

Valgustite juhtimine eelprogrammeerimise teel tähendab seda, et valgustite draiverid programmeeritakse juba tootjatehases kliendi poolt soovitud hämardusastmetele. Selline juhtimisviis on Eestis uuemates valgustusvõrkudes üsna levinud. Seda tüüpi juhtimist saab vajadusel näiteks lisasoonega ARLC kaabliga tänavavalgustuse juhtimiskilbist üle kirjutada, annulleerides eelprogrammeeritud režiimi seniks, kuni toitekaabli lisasoone kaudu on tagatud signaal. See tuleb kasuks sellisel juhul, kui näiteks on toimumas mõni suurüritus, mille raames on öösel tänavatel liikumist rohkem.

Vaadeldes käesolevat Kalaranna tänava valgustusvõrku, uuritakse, missugune oleks aastane tarbimine eelprogrammeeritud valgustite režiimiga. Arvesse tuleb aga võtta, kui suure protsendi ulatuses võib valgusteid hämardada, mis on määratud dokumendis „Tallinna linna välisvalgustuse hämardamise režiimid“, mis on välja toodud alloleval joonisel 1.4.

Kuna Kalaranna sõidutee valgustusklassiks on valitud M3 ning jalgteel P3, siis vastavalt Tallinna linna tänavavalgustuse hämardamise väärtuste tabelile leitakse, missugune on aastane tarbimine etteantud hämardamise protsente arvestades.

	Kellaaeg, algav tund																				
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09		
Valgustusklass M	Hämdamisel alles jääv valgustustase protsentides																			Valgustusklasside muutumine	
M1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	75	75	100	100	100	M1 - M2 - M3 - M2 - M1
M2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	75	100	100	100	M2 - M3 - M4 - M3 - M2
M3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	100	100	100	M3 - M4 - M5 - M4 - M3	
M4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	100	100	100	M4 - M5 - M6 - M5 - M4	
M5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	100	100	100	M5-M6-P5-M6-M5	
M6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50	50	50	100	100	100	M6-P6-M6	
Valgustusklass P																					
P1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	50	75	75	100	100	100	P1 - P2 - P3 - P2 - P1
P2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	75	100	100	100	P2 - P3 - P4 - P3 - P2
P3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	100	100	100	P3 - P4 - P5 - P4 - P3	
P4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	50	75	100	100	100	P4 - P5 - P6 - P5 - P4	
P5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	P5	
P6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	P6	
P7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	P7	

Joonis 1.4 Tallinna linna tänavavalgustuse hämdamise tabel

Kui arvestada, et ilma mingisugust juhtimissüsteemi kasutamata ehk valgustid põlevad terve aasta jooksul 100% väljundvõimsusega, siis teeb see Kalaranna eeldatavaks aastaseks tarbimiseks ligikaudu 40MWh.

Lähtudes Tallinna linna välisvalgustuse hämdamise tabelist, joonisel 1.4, kus valgustusklassi M3 ja P3 korral on valgusti valgustustase alates kell 23.00 75%, kell 00.00-05.00 50% ning 05.00-06.00 taaskord 75%. Sellise hämdusprofili puhul Kalaranna tänava aastaseks keskmiseks tarbimiseks 4000 töötundi juures ligikaudu 27,5MWh. See näitab, et eelprogrammeeritud juhtimissüsteemi kasutamisel on kokkuhoid märkimisväärne.

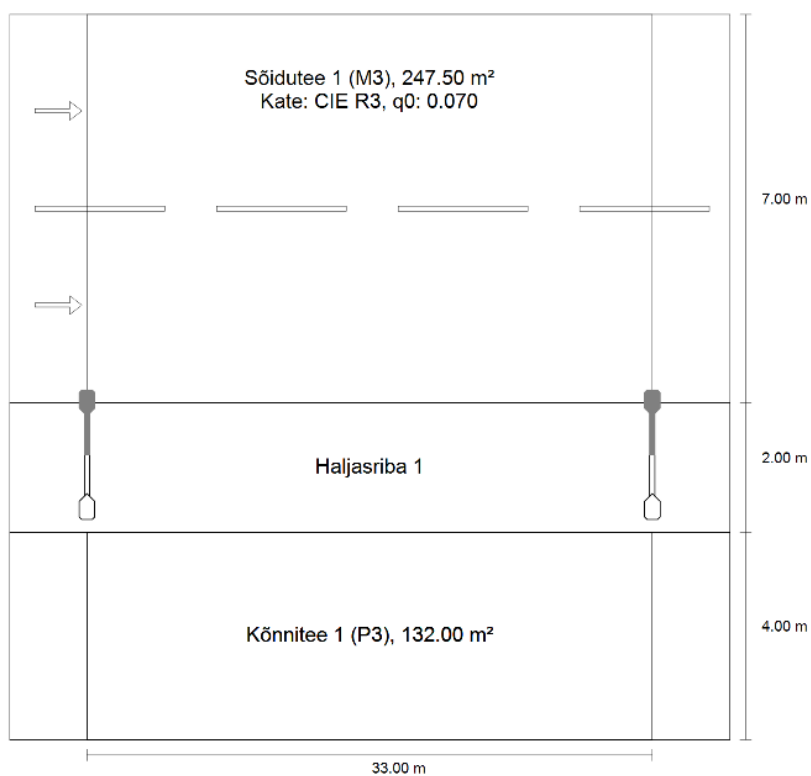
Lisaks kontrolliti, missuguse tulemuse annab tarbimise seisukohalt Intelilight programm, mis arvestab ka aastase tarbimis arvutamisel asukohta ning sellest tulenevalt päikese tõusu ja -loojumise andmeid. Sisestades valgustite võimsused ja hämdusastmete väärtused programmi sisse, tuli tulemuseks, et aastane tarbimine ilma juhtimissüsteemita oleks sisestatud andmete kohaselt 43 MWh, mis on eelpool teostatud meetodist 3 MWh võrra erinev. Kui aga rakendada juhtimissüsteemi, siis oleks tarbimine 32 MWh, luues sellega 27% säästlikuma valgustuslahenduse [16].

Siinkohal tuleb aga ära märkida, et Tallinna linn ei hämda valgustusvõrgus olevaid ülekäiguraja valgusteid. Kuna öisel ajal kogu tänava sõidu- ja jalgteed valgusteid hämdatakse, tuleks kaaluda ka ülekäiguraja valgustite hämdamist lisa energiasäästu saamiseks. Praegu Kalaranna teel olevad ülekäigurajavalgustid tarbivad aastas ligikaudu 8,2 MWh elektrienergiat. Kui kasutada sarnaseid hämdusastmeid nagu sõidutee valgustuse puhul, oleks võimalik säästa aastas ligikaudu 1,5MWh elektrienergiat. Kuna ülekäiguraja valgustite värvsustemperatuur on kõrgem kui sõidutee valgustite oma, tagab see piisava kontrasti, et sõidukijuht jalakäijat ka hämdatud režiimil märkaks.



Siinkohal tuleb aga vaadelda, kas määratud hämardusprotsendid tagavad ka joonisel 1.4 valgustusklassile vastavuse. Näiteks 75% valgustatuse korral peab olema tagatud sõidutee valgustusklass M4 ning 50% korral M3. Jalg- ja jalgrattatee puhul peab olema 75% valgustatuse korral klass P4 ning 50% korral P5. Valgustusklassi tagavuse kontrolliks kasutatakse valgusarvutusprogrammi Dialux EVO. Allpool olevas tabelis on välja toodud sõidu- ja jalgteede valgustuse klassid ning nendele nõutavad heleduse väärtused tulenevalt standardist CEN/TR 13201-1:2014.

Jooniselt 1.5 on näha, missugust tee geomeetriat arvutustel kasutati. Jooniselt 1.6 on näha, et Kalaranna tänavale installeeritud leedvalgustid tagavad Dialux EVO programmist saadud tulemuste järgi hämarduse astmetega ka nõutud tee valgustusklassi nõuded.



Joonis 1.5 Valgusarvutuses kasutatud teede parameetrid ja valgustite vahekaugused

Nimi		Sõidutee M3/jalgtee P3		Sõidutee M4/jalgtee P4		Sõidutee M5/jalgtee P5	
Hinnanguväli		Sõidutee 1 (M3)		Sõidutee 1 (M4)		Sõidutee 1 (M5)	
Lm	[cd/m <sup>2</sup> ]	✓ ≥ 1.00	1.04 ✓	✓ ≥ 0.75	0.79 ✓	✓ ≥ 0.50	0.53 ✓
Uo		✓ ≥ 0.40	0.59 ✓	✓ ≥ 0.40	0.58 ✓	✓ ≥ 0.35	0.58 ✓
Ul		✓ ≥ 0.60	0.79 ✓	✓ ≥ 0.60	0.79 ✓	✓ ≥ 0.40	0.79 ✓
TI		✓ ≤ 15	15 ✓	✓ ≤ 15	14 ✓	✓ ≤ 15	13
EIR		✓ ≥ 0.30	0.76 ✓	✓ ≥ 0.30	0.72 ✓	✓ ≥ 0.30	0.72 ✓
Hinnanguväli		Kõnnitee 1 (P3)		Kõnnitee 1 (P4)		Kõnnitee 1 (P5)	
Em	[lx]	✓ ≥ 7.50 ≤ 11.25	8.22 ✓	✓ ≥ 5.00 ≤ 7.50	6.04 ✓	✓ ≥ 3.00 ≤ 4.50	4.05 ✓
Emin	[lx]	✓ ≥ 1.50	2.23 ✓	✓ ≥ 1.00	1.85 ✓	✓ ≥ 0.60	1.24 ✓

Joonis 1.6 Kalaranna tänava valgustusklassi toimivusnäitajad

### 1.2.3 Valgustite juhtimine lisasoonega maakaabliga

Lisasoonega maa-aluse toitekaabli kasutamine on Tallinna linnas uue valgustusvõrgu projekteerimisel kohustuslik. Maakaablina kasutatakse sel juhul alumiiniumist toitekaablit ARLC, millel on lisaks kolmele faasisoonele ning ühele PEN soonele veel vasest 2,5mm<sup>2</sup> ristlõikega lisa kaablisoon. Lisasoonega juhtimise suurim miinus on see, et seda kasutades on võimalik valgusteid hämardada ainult ühe astme võrra, näiteks öösel ajavahemikul 00:00-06:00 on valgustid 50% väljundvõimsusel ning muul ajal on nad 100% väljundvõimsusel. Lisasoon ühendatakse kilbis lisasoone juhtimisahelasse ning valgustusvõrgus valgustite draiveritesse.

Kui kasutada Kalaranna tänaval lisasoonega juhtimist, siis tähendaks see, et kõige mõistlikum oleks vastavalt Tallinna välisvalgustuse hämardamise tabelile hämardada valgustid ajavahemikul 00:00-05:00 50% tarbimisvõimsusele. See tähendab juba seda, et ei ole võimalik saavutada sellist energiasäästu nagu oleks seda võimalik teha eelprogrammeeritud valgustitega. Sellisel juhul tuleks ligikaudselt aastaseks tarbimiseks 35 MWh, mis on 7,5 MWh rohkem kui eelprogrammeeritud valgustitega režiimi puhul. Kui alandada lisaks ka veel samal ajaperioodil ülekäiguradade valgustite väljundvõimsus 50% peale, oleks võimalik säästa lisaks 1,2MWh elektrienergiat, mis teeks aastaseks kogutarbimiseks 33,8 MWh elektrienergiat.

Kasutades taaskord IntelliLight programmi, arvutas see aastaseks Kalaranna tänava valgustusvõrgu tarbimiseks samuti 35 MWh. Võib väita, et tarbimise arvutuses tänavavalgustuse töötundides 4000 tunni kasutamine annab üsna ligilähedase tulemuse võrreldes arvutusega, kus võetakse arvesse rohkem faktoreid nagu näiteks asukoht ning päikese tõusu- ja loojumise ajad.

Kui võtta arvesse ka ehituslik maksumus, siis lisasoonega ARLC tüüpi elektrikaabel on olenevalt kaabli ristlõikest ~0,6-0,8 €/m kohta kallim kui ilma lisasoonega tavaline madalpinge maakaabel AXPK [17].

Tabel 1.4 Erinevate kaablite tüüpide hindade vahe ristlõigete kaupa

Kaabli ristlõige, mm <sup>2</sup>	ARLC tüüpi maakaabel, €/m	AXPK tüüp maakaabel, €/m	Hinna vahe, €
4x16	1,83	1,28	0,55
4x25	2,79	2,02	0,77
4x35	3,26	2,57	0,69

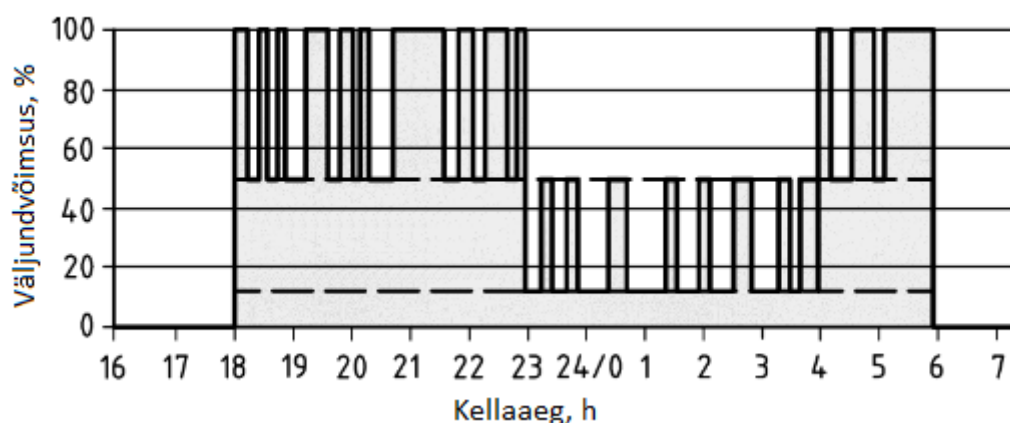
Kuna Kalaranna tänava valgustusvõrgu ehituseks kulus 2234 meetrit 4x35 mm<sup>2</sup> ristlõikega maakaablit ja 1845 meetrit 4x16 mm<sup>2</sup> ristlõikega maakaablit, siis teeb see materjali hindade vaheks käesoleva objekti kohta ~2550 €. Nii suure objekti puhul ei ole see summa kogu ehituse maksumuse seisukohalt väga määrav, kuid on ikkagi märkimisväärne. Lisaks tuleb arvesse võtta, et lisaseadmeid on vaja ka valgustuse juhtimiskilpi, mis võimaldavad faasisoonega juhtimise teoks teha.

## 1.2.4 Alternatiivseid juhtimissüsteeme

### 1.2.4.1 Liikumisradaritega juhtimissüsteem

Lisaks oleks võimalik ühe variandina võimalik kasutada liikumisradarite süsteemi, kus tänava alguses ja lõpus ning kohtades, kus auto võib teele sattuda (ristumised teiste teedega). Sellise lahenduse puhul paigaldatakse valgustitele liikumisandurid, mis tuvastavad sõiduki või jalakäija liikumise. Sellisel juhul kasutatakse samamoodi eelprogrammeeritud draivereid, mis vastavalt kellaajale hämardavad valgusteid. Kui aga andur tuvastab liikumise, annab see signaali valgustitele, mille tulemusena lähevad kõik valgustid määratud ajahetkeks 100% võimsusele tagasi. Sellise süsteemi kasutamine oleks kõige kasulikum kohtades, kus teelõigul ei ole väga palju mahasõite, kuhu peaks lisanduvaid andureid panema. Sellise meetodiga näeks hämardusgraafik välja taoline, nagu on esitatud joonisel 1.7. Selline graafik aga kindlasti erineb, tulenevalt liiklusintensiivsusest.

Eestis on üheks sellist liiki juhtimissüsteemi pakkujaks ComLight.



Joonis 1.7 Liikumisanduritega hämardusgraafiku näide [18]

#### 1.2.4.2 DALI protokolliga juhtimissüsteem

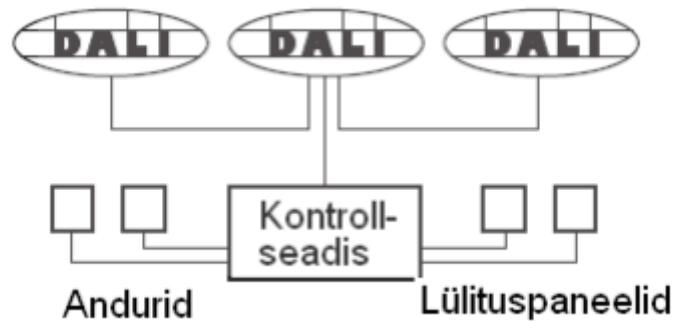
DALI (Digital Addressable Lighting Interface) juhtimissüsteem on digitaalsel juhtimisel põhinev intelligentne valgustuse juhtimissüsteem, mis annab igale valgustile oma aadressi ning võimaldab neist igaüht juhtida vastavalt vajadusele, kasutades selleks vaid eraldi kahesuunalist digitaalsignaali edastavat juhet. [19]

DALI standard võeti Euroopa liiteseadeldiste standardis esmalt vastu IEC 60929 Annex E all. Täna kannab standard tehnilist numbrit 62386, mis sätestab, et erinevate tootjate liiteseadeldised peavad DALI protokollis olema suutelised omavahel ühilduma. [19]

Et kasutada DALI juhtimissüsteemi tänavavalgustusvõrgus, eeldab see koos valgustuse toitekaabliga alates juhtimiskilbist eraldi kahesuunalise sidekaabli rajamist, mis ehitusmaksumuse seisukohalt on üsnagi kulukas.

DALI tööpinge on 9,5-22,4 V ning süsteem maksimaalne vool 250 mA. [19]

Igal DALI süsteemi seadeldisel on oma aadress. Kuigi juhtimisliin on üks, saab läbi sama juhtimisliini moodustada samade valgustitega erinevaid rühmasid, kuna igal valgustil on erinev aadress. DALI protokolliga saab käsklusi anda kuni 64 valgustile, kuni 16 grupile ning kuni 16 stsenaariumile. Lisaks peab jälgima reeglit, et valgustite ühendamine DALI ahelasse on vaba, kuid ei tohi tekkida suletud ahelaid. [19]



Joonis 1.7 DALI protokolliga lihtsustatud põhimõtteskeem [19]

Kokkuvõtteks võib öelda, et DALI juhtimissüsteemiga tänavavalgustusvõrke väga palju praktikas installeeritud ei ole. Süsteemi miinuseks on see, et juhtimiseks tuleb rajada eraldi sidekaabelliin, mille kaudu info edastamine toimub, kusjuures kui valgusti on kontrollseadeldisest juba üle 300 meetri kaugusel, tuleb paigaldada signaali võimendi. Kuna valgusteid eristatakse DALI teadetes kindla koodi abil. DALI süsteem eeldab ka kaugjuhitavat kilbikontrollerit, mis võimaldab süsteemi kasutajal eemalt teha vajalike kontrolltoiminguid.

Turul on küll mitmeid DALI juhtimissüsteemide pakkujaid, kuid tellijad ei ole süsteemi keerukuse ja kalli välja ehitamise tõttu agarad seda endale paigaldama. Küll on valgustite tootjad välja töötanud mitmeid eelprogrammeeritud lahendusi, kus kehtib ütlus ühenda ja kasuta (Plug and Play). Sellisel juhul ei nõua süsteem erilisi tehnilisi teadmisi süsteemi häälestamiseks ja mis on kohe peale paigaldust tööks valmis. [19]

### 1.2.4.3 Valgustikontrolleritega juhtimissüsteem

Valgustikontrolleritega juhtimine eeldab, et valgustitel, mida juhtida tahetakse oleks olemas spetsiaalsed kontrolleripesad ning nende sisse kinnitatud ka valgustite kontrollerid. Küll aga on kontrolleripesad kahte tüüpi: Zhaga ja Nema.

Valgustikontrolleritega juhtimissüsteem eeldab kaugloetava kilbikontrolleri olemasolu ning valgustuse geoinfosüsteemi andmebaasi.

#### 1.2.4.3.1 Zhaga pistikupesad

Zhaga on rahvusvaheline valgustustööstuse ettevõtete ülemaailmne konsortsium, kelle üldeesmärk on töötada välja liidese spetsifikatsioonid, mis võimaldaksid erinevate tarnijate leedvalgusteid vaheldumisi kasutada ilma valgusti kujundust muutmata [20]. Lisaks on nad kehtestanud leedvalgustites kasutatavate komponentide liideste tööstuslikud spetsifikatsioonid. 2019. aasta

juulikuu seisuga on sellel enam kui 120 liiget. Zhaga spetsifikatsioonide tulemuste kohaselt saab komponente vahetada, hooldada ning leedvalgustite komponente saab pärast paigaldamist uuendada juhul, kui uus tehnoloogia on saadaval. [20]

Zhaga pistikühendus koosneb valgustusseadme pistikupesast ning juhtmooduli ühendamiseks mõeldud aluse ja kupli komponentidest. Juhtmoodul on kaitstud kupliga väliste ilmastikuolude eest ning on valmistatud UV-kindlatest materjalidest. [22]

Ühenda ja kasuta pistikupesal põhinev süsteem teeb andurite lisamise või täiendamise väga lihtsaks. Pärast juhtmooduli pesaga ühendamist ilmub valgusti kohe geoinfosüsteemi, mille kaudu on valgusti andmeid võimalik vaadelda ja muuta.

Zhaga ühilduvusega on ka näiteks Eestis juhtimissüsteeme pakkuv Gridens.



Joonis 1.8 Gridensi poolt pakutav Zhaga pesaga ühilduv juhtmoodul

Lisaks on mõned juhtimissüsteemide pakkujad töötanud välja kontrolleri, mis paigaldatakse valgusti korpusesse või masti sisse, eemaldades sellega nõude eraldi antennipesa jaoks.

#### **1.2.4.3.2 Nema antennipesad**

Nema antennipesa on valgustustööstuses standardiseeritud ühendusliik, mis tagab elektrilise ja mehaanilise ühenduse juhtmooduli ja valgusti vahel. ANSI C136 standard määratleb selgelt pistikupesa suuruse, lukustuse tüübi ja muud üksikasjad. NEMA pistikupesa väljundites võib olla viis või seitse klemmi. Toiteühenduseks kasutatakse kolme klemmi ning ülejäänud kahte või nelja klemmi kasutatakse hämardamissignaali ja muu info edastamiseks. Toiteklemmid kannatavad voolu kuni 15A, signaalklemmid aga 100 mA. [23]

Küll aga on vaja Nema pistikupesaga ühilduva kontrolleri jaoks vahelduvvoolu, mistõttu peab seal olema leeddraiveri ja antennipesa vahel eraldi toiteplokk.

Kokkuvõttes võimaldavad mõlemad juhtseadeldised juhtimis- ja mõõtefunktsioone, kuid osade valgustite tootjate liiteseadeldised on suletud protokolliga, mistõttu ühte tüüpi antennipesa ja juhtmooduli lisamisel ei pruugi liiteseadeldis edastada mõnda tüüpi mõõteandmeid. Selle puhuks on välja töötatud D4i protokoll, mis tähendab kui liiteseadeldisel on tulevikus D4i tähis peal, peab see edastama olenemata juhtmoodulist kõiki vajalikke andmeid.

Valgustikontrolleritega juhtimissüsteem on üks kõige paindlikumaid ja efektiivsemaid juhtimissüsteeme, kuna lõppkasutaja saab ligipääsu tarbimisandmetele, töötundidele, nende põhjal loodud statistikale ning paljudele muudele andmetele. Juhtmoodulid suhtlevad 3G võrgu kaudu, mistõttu ei ole vaja paigaldada eraldi signaalkaablit nagu DALI süsteemi puhul. Lisaks on võimalik läbi raadioside valgustite režiime ka ümber programmeerida. Rahalises perspektiivis on see kindlasti kasulikum kui DALI süsteem, kuna uute tehnoloogiate puhul saab juhtmoodulid välja vahetada, ega pea hakkama kaevama uut kaablit.

Kokkuvõtteks võib öelda, et mida paindlikum ja keerukam on juhtimissüsteem, siis seda suuremat rahalist investeeringut see ka nõuab. Seetõttu tuleb hoolikalt vaadelda, missugusesse valgustusvõrgus tasub rakendada lihtsamaid juhtimissüsteeme ja millistes keerukamaid.

### **1.2.5 Leedvalgustite keskkonnasäästlikkus ja keskkonna ohutegurid**

On äärmiselt oluline, et kogu maailm liiguks pidevalt rohelisema energia ja keskkonnasäästlikuma käitumise suunas. Sinna alla kuulub ka tänavavalgustuse viimine järjest efektiivsemale ja säästlikumale tasemele.

Üheks leedlampi eeliseks peetakse just keskkonnasõbralikkust. Peamiselt tuleneb see asjaolust, et valgusdiodid koosnevad erinevalt vanema generatsiooni valgusallikatest mitmetest ümbertöödeldatavatest materjalidest ning lisaks ei kiirga need UV-valgust ega sisalda ohtlikke aineid nagu plii ja elavhõbe.

On sagedane nähtus, kui pimedal ajal suurlinna poole sõites taevas kollakalt kumab. See aga on kõik linna tänavavalgustus, mis näitab, et valgustid on ebaefektiivsed ja valgusräigust on palju, millele lisaks on ka elektrienergia tarbimine suur. Uute leedvalgustite projekteerimisel ja paigaldamisel on hakatud sellele suuremat tähelepanu pöörama.

Kui tuua näitena, et kogu aleviku/linna peale on kokku 500 vanema tüüpi kõrgrõhulampi, mille ühe valgustuspunkti keskmine tarbimisvõimsus on 150W, siis teeks see aastaseks kogutarbimiseks ligikaudu 300 MWh elektrienergiat. Asendades aga need samad valgustid leedvalgustitega, mille tarbimisvõimsus sama luumenite arvu puhul on 30W, teeks see aastaseks kogutarbimiseks 15MWh.

Vaadates tabelit 1.4, on võimalik näha, missugune on aastane keskkonna sääst juba kasvuhoonegaaside vähenemise arvelt, kui võrrelda praegu laialdaselt kasutusel olevaid kõrgrõhulampe uue generatsioon leedvalgustitega.

Tabel 1.4 Rahalise ja keskkonnasäästu võrdlus vana ja uue valgustuse taristu vahel [24]

Üldandmed		
Elektri hind koos võrgutasu ja aktsiisiga, €/MWh	70	
Valgustite töötundide arv aastas, h	4000	
CO2 emissioon energiaühiku kohta, t/MWh	1,09	
Tänavavalgustustaristu	Kõrgrõhulampidega	Leedlampidega
Valgustuspunktide arv, tk	500	500
Ühe valgustuspunkti keskmine võimsus, W	150	30
Praegu keskmine energiakulu valgustuspunkti kohta, kWh/a	600	120
Ühe valgusti kulu aastas, €/a	42	8,4
Taristu energiakulu aastas, MWh	300	60
Seniste valgustite rahaline kulu aastas, €/a	21 000	4200
Taristu süsihappegaasi eraldumise kogus, t/a	327	46

Nagu eelolevast tabelist näha, siis rahaline kokkuhoid on uue võrgu seisukohalt väga suur. Kui võtta arvesse, et uue tänavavalgustusvõrgu rajamine maksab arvestatava summa, siis vaadates aastaste kulutuste arve, teenib selle investeeringu tasa juba mõne aastaga.

Lisaks ei pea uut tänavavalgustusvõrku esimesed aastad kindlasti hooldama, küll aga vana võrgu puhul võivad rikneda vanad kaablid ning valgustid, mistõttu peab kogu aeg vanasse võrku raha juurde süstima uute kaablite ja valgustite paranduse ning pideva hoolduse näol.

Kuna leedvalgustite valgusspektris on sinist ja rohelist valgust võrreldes vanema generatsiooni kõrgrõhulampidega rohkem, siis tuleb hoolikalt jälgida, et valgustatav objekti ei oleks mingilgi määral ülevalgustatust. Ülevalgustatus tekitab taeva kuma, nagu on näha ka jooniselt 3.1. Ülevalgustatuse probleem võib viia lõpuks selleni, et muutub lindude rändegraafik ning loomade öine käitumine, kuna liigne valgustatus annab neile valed signaalid.



Lisaks on liigsest valgustatusest mõjutatud ka inimorganismid. Berliinis on oma uurimistöodes välja toonud, et isegi väga madala valgustasemega taevakuma surub alla unehormooni ehk melatoniinitaset. Eriti hästi kumab valgus alt taevasse vihma või lumesaju ajal ning peegeldub pilvedelt tagasi. Seda nimetataksegi taevakumaks. Taevakuma koos välisvalgusega mõjutavad aga kõiki elusorganisme alates roomajatest ja kahepaiksetest kuni inimesteni välja. [25]



Joonis 1.9 Valdeku tänaval paiknev valgustusmast, mis kumab väga palju valgust ka tuppä [25]

Joonis 1.9 ilmestab täpselt, mis tähendab ülevalgustatus. Joonisel nähtaval juhul paistab niivõrd palju valgust tuppä, et see võib muutuda inimesel häirivaks. Fotobioloogilise ohutuse standardis on määratud, et öisel ajal võib eramaja seinale langeda ainult 2 lx valgust, mis pildil nähtaval juhul kindlasti täidetud ei ole.

Leedvalgustitel on olemas tahaulatuvat (*backlight*) valgust piirav optika, mille abiga saab lahendada olukorrad, kus valgustusmast on hoonele liiga lähedal, tekitades sellega elanikele vähem häirivat valgust ning tagades standardis nõutud väärtuste täitmise.

### 1.2.6 Kalaranna tänava energiatõhususnäitajate arvutamine

Käesolevas peatükis on välja arvatud Kalaranna tee erivõimsusnäitaja ja aastane energiatarbimisnäitaja vastavalt standardile EVS-EN 13201-5:2015. Aastane energiatarbimisnäitaja, tähisega  $D_E$ , on valgustusvõrgu poolt aasta jooksul tarbitava elektrienergia ja valgustatava ala

pindala jagatis. Erivõimsusnäitaja, tähisega  $D_P$ , on valgustustaristu koguvõimsus jagatuna valgustatava ala pindalaga ning selle ala hooldeväärtuse korrutisena. [18]

Enne näitajate arvutamist on vaja selgitada analüüsitava piirkonna algandmete väärtused. Vajalikeks andmeteks on valgustusvõrgu koguvõimsus, valgustatava tee pindala ning põlemistundide arv. Vastavalt tabelis 1.2 esitatud andmetele saadakse 7815W. Sinna hulka ei ole arvestatud jalakäijate ülekäiguradade erivalgustust.

Erivõimsusnäitaja arvutamiseks kasutatav piirkond peab olema identne piirkonnaga, mida kasutatakse valgustuse projekteerimisel standardile EVS-EN 13201-2 vastavate ja standardis EVS-EN 13201-3 kirjeldatud parameetrite valgustusarvutamiseks. [18]

Arvestades, et aastas on valgustite põlemistunde ligikaudu 4000, valgustatava ala pindala on 44 456 m<sup>2</sup>, millest 15996 m<sup>2</sup> moodustab vaadeldava kõnnitee pindala ning 28460 m<sup>2</sup> sõidutee pindala. Antud lõigu kõnnitee keskmise rõhttasandilise valgustustiheduse hooldeväärtusesks on 8,22 lx, mis leiti simulatsiooniprogrammist Dialux EVO. Sõidutee valgustustiheduse hooldeväärtus leiti samal meetodil ning tulemuseks saadi 20,1 lx. Sellest tulenevalt on olemas kõik parameetrid, et leida valgustusvõrgu erivõimsusnäitaja väärtus.

Erivõimsusnäitaja leitakse järgneva valemiga [18]:

$$D_P = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i \cdot A_i)} = \frac{P}{A_R \cdot E_R + A_F \cdot E_F} \quad (1.1)$$

kus  $D_P$ - Erivõimsusnäitaja

$P$ - piirkonna valgustamiseks kasutatava valgustustite süsteemivõimsus, W,

$E_i$ - vastava mõõtepiirkonna keskmine rõhttasandilise valgustustiheduse hooldeväärtus, lx,

$A_i$ - valgustuspaigaldise mõõtepiirkonna pindala, m<sup>2</sup>,

$n$ - valgustatavate alade piirkondade arv,

$A_R$ - sõidutee pindala, m<sup>2</sup>,

$E_R$ - sõidutee valgustustiheduse arvatud hooldeväärtus, lx,

$A_F$ - kõnnitee pindala, m<sup>2</sup>,

$E_F$ - kõnnitee valgustustiheduse arvatud hooldeväärtus, lx.

Kasutades valemit 1.1, leitakse erivõimsusnäitaja väärtus:

$$D_P = \frac{7815}{28460 \cdot 20,1 + 15996 \cdot 8,22} = 0,014 \frac{W}{lx \cdot m^2}$$

Aastane energiatarbimisnäitaja leitakse valemiga [18]:

$$D_E = \frac{(P_R + P_F) \cdot (t_{tot} + k_{red} \cdot t_{red} + k_{red1} + t_{red1})}{A_R + A_F} \quad (1.2)$$

Kus  $t_{tot}$ - täistasemelise valgustuse aastane talitluskestus, h

$T_{red}$ -vähendatud tasemega aastane talitluskeskus, h,

$K_{red}$ - vähendatud tasemega talitluskestuse vähendustegur,

$T_{red1}$ - kolmanda režiimi vähendatud aastane talitluskestus, h,

$K_{red1}$ - kolmanda režiimi vähendatud tasemega talitluskestuse vähendustegur.

Valemist 1.2 avaldub:

$$D_E = 7815 \cdot \frac{1080 + 0,75 \cdot 730 + 0,5 \cdot 2190}{44456} = 0,48 \frac{kWh}{m^2}$$

Võrreldes arvatud tulemusi standardis esitatud tulemustega teekujunduse C korral, mispuhul on tabelis 1.5 välja toodud standardis EVS 13201-5:2015 esitatud väärtused ning arvatud väärtused.

Tabel 1.5 Standardi ja arvatud energiatarbimisnäitajate võrdlus

	Standardis esitatud väärtused	Arvatud väärtused
Erivõimsusnäitaja $D_P$ , $mW \cdot lx^{-1}$	20	14
Aastane energiatarbimisnäitaja $D_E$ , $kWh \cdot m^{-2}$	1,2	0,48

Vaadeldes arvatud ja standardis esitatud tulemusi, on arvatud väärtused palju madalamad kui standardis esitatud väärtused, milles võib järeldada, et hooldetegurite väärtused on liiga kõrged.

## 2. Valgustehnilised mõõtmised ja analüüs

On oluline, et pärast tänavavalgustuse taristu ehitust tehtaks ka valgustehnilised mõõtmised. Seda on oluline teha seepärast, et olla veendunud valgustuse vastavusest koostatud projektile ning kehtivatele valgustuse standarditele.

Teevalgustuse fotomeetrilise kvaliteedi parameetrite mõõtmisel tuleb järgida vähemalt nelja alljärgnevalt nimetatud eesmärki [26]:

1. Mõõtmised lõppkatsetusfaasis- mõõtmised, mis sooritatakse teevalgustuspaigaldise lõppkatsetus- või lõppvastuvõtufaasis, et kontrollida selle vastavust standardi nõuetele ja/või projekteerimiseeldustele. Mõõtmistulemusi võib kasutada teevalgustuspaigaldise vormikohaseks heakskiiduks;
2. Mõõtmised teevalgustuse eluea kestel- mõõtmised, mis sooritatakse ettemääratud ajavahemike järel teevalgustuse eluea jooksul peaaesjalikult hooldeväärtuste alusel, et kindlaks teha valgusliku toimivuse halvenemise määra ja vajadust hoolduse järele või kontrollida teevalgustuspaigaldise vastavust standardinõuetele või projekteerimiseeldustele;
3. Mõõtmised adaptiivse teevalguse puhul- mõõtmised, mis sooritatakse pideval või ettemääratud ajavahemike järel valgustite valgusvoo reguleerimiseks adaptiivsel teevalgustusel, kui paigaldise toimivust hoitakse antud väärtusel antud tolerantsi piirides;
4. Mõõtmised lahknevuste uurimiseks: mõõtmised, mis sooritatakse, kui nõutakse lahknevuse uurimist mõõteandmete ja projekteerimiseelduste või keskkonnatoime vahel.

Iga eesmärgi korral tuleb arvestada erisuguseid mõõteprotseduure, nõudeid ja mõõteriistade metrooloogilisi omadusi. [26]

Kui mõõtmised on ette nähtud üksnes teevalgustuspaigaldise valgusliku toimivuse kindlakstegemiseks, tuleb ümbrusest tingitud otsene või peegeldunud valgus ära hoida või arvesse võtta. Sellekohased meetmed tuleb esitada mõõtearuandes. Ümbrusest tingitud valguse hulka kuulub valgus kaupluste akendest, reklaamkujunditest, liiklusmärkidest, sõidukituledest, muudest teevalgustuspaigaldistest, taeva heledusest, teeäärse lume peegeldusest jne. Seda valgust saab mõnikord vältida, varjata või välja lülitada. [26]

### 2.1.1 Nõudmised mõõtmistele

Et saada võimalikult täpsed ja adekvaatsed fotomeetriliste mõõtmiste tulemused, tuleb järgida erinevaid nõudeid, mis on esitatud standardis EVS-EN 13201-4:2015.

Kõrge või madal temperatuur või tugev tuul võivad mõjutada soojuslikult tundlike lampide või valgustite valgusväljundit. Kui kliimaolud on väljaspool teadaolevate parandustegurite piirkonda, peab mõõtmiste eest vastutav isik lükkama mõõtmised edasi. Kui aga kliimaolud ei vasta mõõtmiste ajal mõõtmisteks nõutavale, tuleb isikul otsustada, kas ei tuleks mõõtmisi edasi lükata. [26]

Lisaks tuleb jälgida, et tee pinna heleduse mõõtmisel oleks vaatleja asukoht 1,5 meetri kõrgusel teepinnast ning 60 meetrit eespool arvestatavat liikluspiirkonna arvutusvälja. Põiksuunas peab vaatleja paiknema iga sõiduraja keskel. Mõõtmisi võib sooritada ka lühemal kaugusel, kusjuures mõõturi kõrgus teepinnast peab olema võrdeliselt väiksem, nii et selle suunanurk teepinna normaali suhtes oleks  $89 \pm 0,5$  kraadi. [26] [27]

Kui teevalgustuspaigaldise omadused on projekteeritud kogu paigaldise pikkuse ulatuses konstantsena, võib olla võimalik valida asjakohane arv tsoone ja sooritada mõõtmised üksnes nendes tsoonides. [26]

### 2.1.2 Töökeskkonna ohutus ja mõõtemetoodika

Objektile teostatavate valgustehniliste mõõtmiste eesmärk on viia läbi valgustite ning sõidu- ja jalgteede parameetrite mõõdistamine valgustite täis- ja säästurežiimil ning neid analüüsida. Enne mõõdistuste teostamist tuleb kalibreerida mõõteseadmed, mis seda vajavad. Lisaks tuleb veenduda töökeskkonna ohutuses. Kuna tegu on ala mõõdistamisega, kus liiguvad mootorsõidukid, tuleb mõõtjal ennast väga hästi nähtavaks teha, kandes näiteks helkurvesti või helkurjopet. Lisaks tuleb tutvuda mõõteseadme kasutusjuhendiga, kus on ka kindlasti märgitud ohtu vähendavad tegurid, millele peab tähelepanu pöörama. Mõõtmistega tegelev isik peab juhinduma ka mõõtevahendite kasutamise ohutusjuhendist. Õnnetusjuhtumi vältimiseks peab pidevalt ümbritsevat liiklust ja keskkonda hoolikalt jälgima.

Mõõdistamine algab mõõteseadmete omavahelise parandusteguri välja selgitamisega. TecnoTeam MobilAir kaameraga mõõtmisel tuleb kaamera eelnevalt kalibreerida vastavale valgusele ehk spektraaljaotusele- selleks kasutatakse spektroradiomeetrit. Spektroradiomeeter on juba kalibreeritud mõõteriist, mille kaudu heleduskaamerasse parandustegur hiljem sisse viiakse. Spektroradiomeeter väljastab andmed valgusti värvsustemperatuuri, heleduse ning valgusti kiirguse kohta. Järgnevalt teostati samasugune protseduur LMK heleduskaameraga ning võrreldi

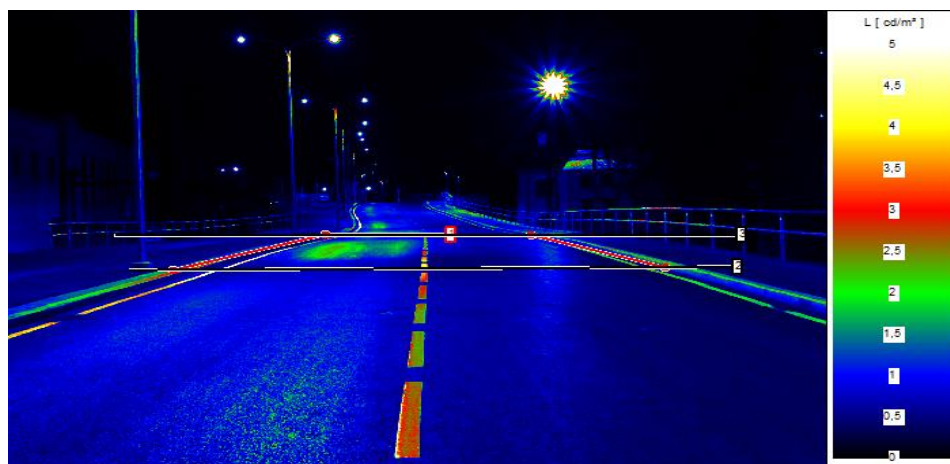
saadud tulemusi. Spektroradiomeetri poolt mõõdetud heleduseks oli 8,256 cd/m<sup>2</sup>. LMK heleduskaamera mõõdetud tulemuseks oli aga 7,93 cd/m<sup>2</sup>. Kuna spektroradiomeeter on kalibreeritud seade, siis tema tulemus on täpsem, mistõttu tuleb leida parandustegur kahe mõõtetulemuse vahel. Jagades spektroradiomeetri näidu LMK heleduskaamera näiduga, tuleb parandusteguri väärtuseks 1,04. See tähendab, et kõik LMK heleduskaamera poolt mõõdetud andmed tuleb läbi korrutada parandusteguriga.

LMK heleduskaamera kasutab pildi tegemisel särikahvli funktsiooni. See tähendab, et kaamera jäädvustab korraga kolm fotot erineva säritustega- madala, keskmise ja kõrge säritusega. Selline meetod aitab programmil tuvastada paremini erinevaid värve, andes kokkuvõttes usaldusväärsema tulemuse.

Pärast heleduskaameraga piltide jäädvustamist tuli pildid importida tarkvarasse LMK LabSoft4, kus on võimalik paika panna mõõdetava ala pind ning vastavalt sellele genereerida valemvärvides pilt koos mõõtepunktide väärtustega.

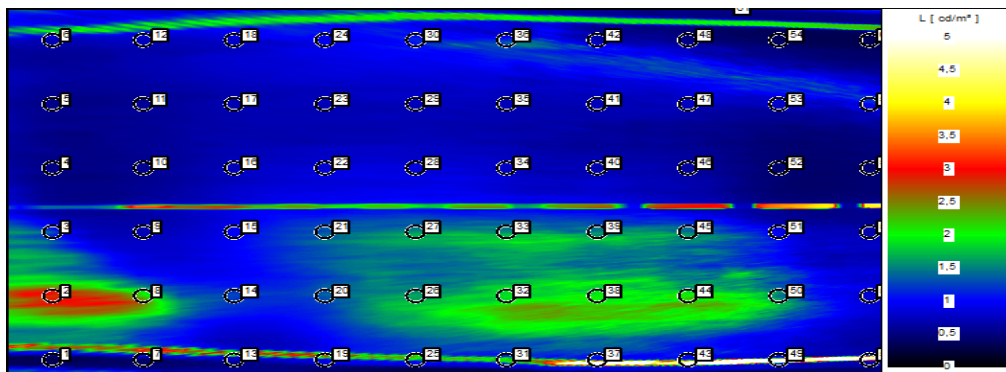
### 2.1.3 Sõidutee valgustehnilised mõõtmised ehitusperioodi lõpus

Minote DC OÜ teostas 09. septembril 2015. aastal valgustehnilised mõõtmised Kalaranna tänaval, kohe pärast ehitusperioodi lõppu. Mõõtetulemused on toodud allpool. Mõõtmised toimusid kuivades tingimustes ning õhutemperatuur oli ligikaudu 16 °C.



Joonis 2.1 2015. aastal teostatud teevalgustuse tehniliste mõõtmiste pilt valemvärvides

Nagu valemvärvidega pildilt näha, paiknes mõõtmiste hetkel sõidutee kõrval oleval ehitusobjektil võimas leedprojektor, mis kindlasti mõõtmistulemusi suurel määral mõjutada võis. Valemvärvide skaala vaates on see projektor kõige heledam punkt pildil.



Joonis 2.2 Mõõtevälja pealtvaade väärvärvides, valgustid 100% režiimil

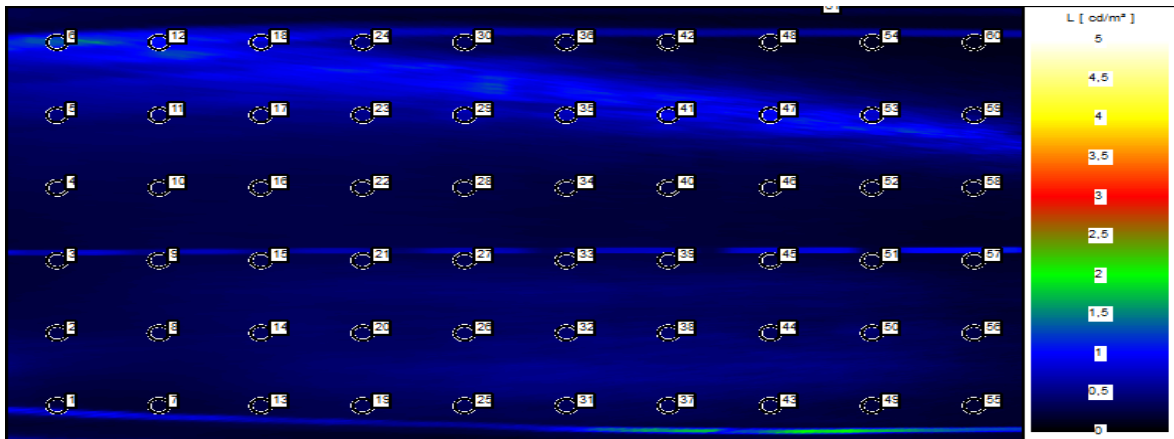
Tabel 2.1 Heledusväärtused mõõtmispunktides Kalaranna tänaval

nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0,8	0,8	0,8	0,9	1,1	1,1	0,7	0,5	0,4	0,4
5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	1,0
4	0,6	0,6	0,7	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5
3	1,2	0,7	1,0	1,4	1,6	1,6	1,5	1,5	0,9	0,7
2	2,9	2,2	1,3	1,3	1,6	1,9	2,0	2,1	1,6	0,8
1	0,4	0,6	1,0	1,5	1,6	1,6	2,5	2,4	2,9	2,5

Lisaks teostati kontrollmõõdistus, kus tänavavalgustid alandati 20 % peale nimivõimsusest, et kontrollida, missugust mõju avaldab ehitusplatsil olev prožektor. Tulemused on toodud joonistel 2.3-2.4 ning tabelis 2.2.



Joonis 2.3 2015. aastal tehtud mõõdistus, kontrollimaks prožektor mõju mõõtetulemustele



Joonis 2.4 Mõõtevälja pealtvaade väärvärvides, valgustid 20% režiimil

Tabel 2.2 Heledusväärtused mõõtmispunktides valgustite alandatud režiimil

nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0,8	0,8	0,8	0,9	1,1	1,1	0,7	0,5	0,4	0,4
5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	1,0
4	0,6	0,6	0,7	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5
3	1,2	0,7	1,0	1,4	1,6	1,6	1,5	1,5	0,9	0,7
2	2,9	2,2	1,3	1,3	1,6	1,9	2,0	2,1	1,6	0,8
1	0,4	0,6	1,0	1,5	1,6	1,6	2,5	2,4	2,9	2,5

Põhjalikum analüüs mõõtetulemuste ja järelduste kohta on välja toodud peatükis 2.1.5.

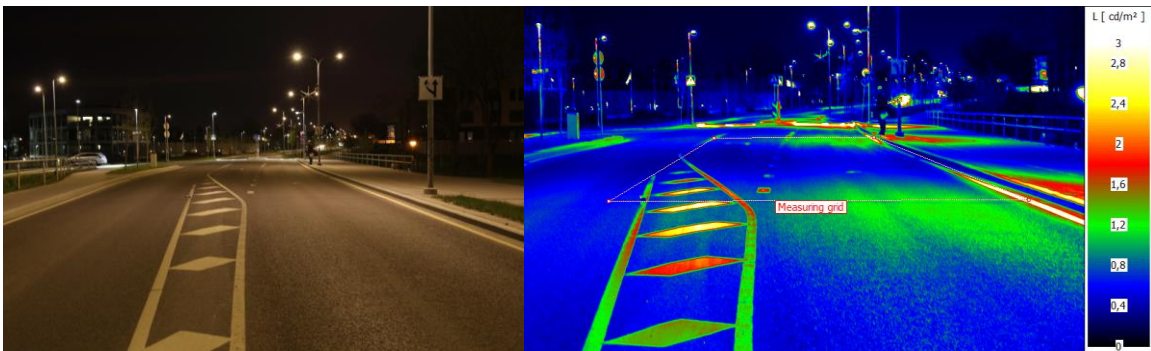
### 2.1.4 Sõidutee mõõtmised garantiiperioodi lõpus

Garantiiperioodi järgsed mõõtmised leidsid aset 08. mail 2020. aastal. Mõõtmiste toimusid ajavahemikul 23:00-00:30, ilm oli pilvine kuid kuiv, õhutemperatuur ligikaudu 13 °C. Mõõtmised teostati kahel lõigul mõlemal sõidurajal eraldi, et olla andmete usaldusväärsuses kindlam. Mõõtmised teostati mõlema sõidusuuna kohta eraldi, mida on näha ka allolevatelt joonistelt. Mõõtevahendina kasutati LMK Mobile Air heleduskaamerat. Valitud mõõtelõigud olid piiritletud otstest mastidega ning külgedelt tee servaga.

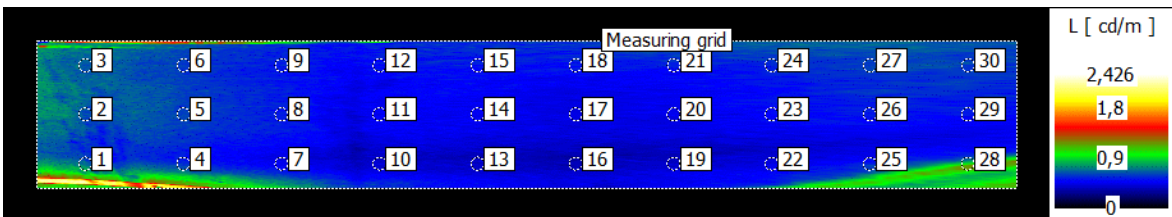




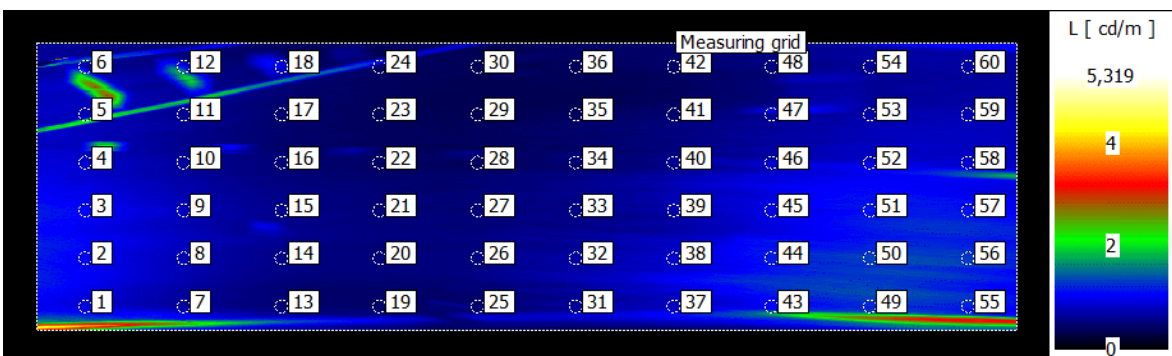
Joonis 2.5 Lõik 1, suunaga Koplisse õige- ja väärvärvides



Joonis 2.6 Lõik 1, suunaga linna õige- ja väärvärvides



Joonis 2.6 Mõõtevälja pealtvaade valevärvides, lõik 1 suunaga Koplisse



Joonis 2.7 Mõõtevälja pealtvaade valevärvides, lõik 1 suunaga kesklinna

Tabel 2.3 Heledusväärtused mõõtmispunktides, lõik 1 suunaga Koplisse

nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0,669	0,605	0,543	0,515	0,525	0,534	0,548	0,566	0,61	0,602
2	0,646	0,618	0,537	0,472	0,47	0,436	0,457	0,499	0,533	0,527
1	0,69	0,579	0,465	0,403	0,385	0,348	0,392	0,441	0,551	0,918

Tabel 2.4 Heledusväärtused mõõtmispunktides, lõik 1 suunaga linna

nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0,974	1,11	0,908	0,669	0,393	0,415	0,455	0,547	0,646	0,696
5	0,86	0,64	0,493	0,407	0,377	0,417	0,494	0,787	0,72	0,762
4	0,874	0,681	0,522	0,44	0,439	0,508	0,647	0,83	0,905	0,884
3	1,08	0,818	0,613	0,525	0,518	0,588	0,73	0,975	1,15	1,15
2	1,05	0,782	0,59	0,538	0,574	0,698	0,879	1,18	1,33	1,32
1	0,947	0,703	0,528	0,464	0,485	0,661	0,847	1,1	1,26	1,21

Sarnaselt eelnevatele tabelitele ja joonistele tehti mõõtmised ka teisel lõigul ning samuti 75% hämardusrežiimiga samadel lõikudel. Tulemused on toodud allolevas kokkuvõtvast tabelis, kus on ka välja toodud standardis EVS-EN 13201-2:2015 nõutud väärtused ning mõõdetud väärtused.

Tabel 2.5 Sõidutee heleduse ja ühtluse väärtused võrreldes standardis tooduga

100% väljundvõimsusega			
Objekt	Keskmine heledus, cd/m <sup>2</sup>	Pikiühtlus	Üldühtlus
Kehtiv standard, valgustusklass M3	1,00	0,60	0,40
Kalaranna tn lõik 1, 2015 aasta	1,14	0,55	0,31
Kalaranna tn lõik 1, 2020 aasta	0,64	0,51	0,65
Kalaranna tn Lõik 2, 2020 aasta	0,45	0,40	0,48

75% väljundvõimsusega			
Objekt	Keskmine heledus, cd/m <sup>2</sup>	Pikiühtlus	Üldühtlus
Kehtiv standard, valgustusklass M4	0,75	0,60	0,40
Kalaranna tn, lõik 1, 2020 aasta	0,41	0,46	0,53
Kalaranna tn, lõik 2, 2020 aasta	0,34	0,45	0,53

### 2.1.5 Sõidutee mõõtmistulemuste analüüsid ja järeldused

Tabelis 2.5 on välja toodud kõikide mõõtmistulemuste kokkuvõte. Vastavalt igale objektile on tabelis esitletud teepinna keskmine heledus, üldühtlus ning pikiühtlus. Mõõtmistulemuste põhjal saab teha järeldusi, kas ja mis määral on valgustid amortiseerunud ning missugused faktorid võisid mõõtetulemusi veel mõjutada.

Käesoleva magistritöö üheks ülesandeks oli kordusmõõtmiste teel välja selgitada, kas valgustid on viie aasta jooksul oma esialgsetest valgusvoost midagi kaotanud ning kas on jätkuvalt tagatud piki- ja üldühtluse nõuded. Juba objektile mõõtmisel viibides oli silmaga tuvastatav, et objekti ala on M3 valgustusklassi kohta pimedam, kui selle valgustusklassiga tee valgustus olema peaks. Mõõdistatud lõikude puhul see nii ka oli, kui mõõdetud heledus ja pikiühtlus on langenud, siis on üldühtluse väärtus parenenud ning vastab nüüd ka standardi normidele. 2015. aastal oli aga üldühtlus poole väiksem standardis nõutust. See võib tuleneda asfaltkatte kulumisest, kuna uus asfalt on tumedam kui kulunud asfalt, mistõttu neelab see rohkem valgust. Lisaks võis põhjus olla tee ääres asuvat kõrvalisest valgusallikast, mis oli suure valgusvooga ning võis mõõtepiirkonna mingisse kohta liiga palju valgust kontsentreerida.

Kui vaadelda 2020. aastal mõõdetud kahte Kalaranna tänava lõiku omavahel, siis on näha, et andmed omavahel on täiesti erinevad. See võib aga tulla sellest, et projekteerimis staadiumis ei ole eraldi arvutust tehtud teelõigule, kus on ka vasakpöörderada. Küll on aga laiemal teelõigul, kus on kolm sõidurada, heleduse ning piki- ja üldühtluse väärtused paremad, kui lõigul, kus on ainult kaks sõidurada.

Tabeli 2.5 põhjal võib väita, et heleduse väärtused on väga madalad. Võrreldes sama lõiku 2015. aastal teostatud mõõtmistega, on näha, et heledus on suurel määral langenud, kuid juba sellel ajal võis mõõteandmeid märkimisväärselt mõjutada kõrvaline valgusallikas, mistõttu on kahtlus, et ka siis jäi üldheledus juba alla standardis kehtestatud määra.

Vaadeldes simuleeritud tulemusi, oli valgustite täisvõimsuse kui ka hämardusrežiimil Tallinna linna valgustuse hämardamise tabelis toodud tee valgustusklassi nõuded täidetud. Kui aga vaadata mõõdetud tulemusi, jäävad need suurel määral alla kehtestatud tee valgustusklassi nõuetele.

Üldiselt ei saa mõõtetulemustega rahule jääda, kuna standardijärgsed normid ei ole kas heleduse, piki- või üldühtluse näol tagatud. Kõige suuremaks ebakõlaks on ikkagi heledus, sest 75% väljundvõimsusega režiimil, kui peaks olema tagatud M4 valgustusklass, mille nõudeks on 0,75 cd/m<sup>2</sup>, siis esimese lõigu väärtus on 0,41 ning teise lõigu väärtus 0,34 cd/m<sup>2</sup>, mis on kooskõlas ainult kõige madalama sõidutee valgustusklassiga M6, mille miinimum heledus on 0,30 cd/m<sup>2</sup>. Küll aga on hämardatud režiimil kahe lõigu ühtluste väärtused vägagi sarnased. Üldühtluse väärtus vastab standardi piirmääradele, pikiühtlus aga mitte. Vaadates jooniseid 2.5 ja 2.6, on näha, et tee peal on õrnad tumedad laigud, mis põhjendab ka pikiühtluse nõude mitte täitmist. Tumedaid laiike võivad põhjustada teerööpad, mida aga nii uuel katendil veel kindlasti ei ole.

Eelpool esitletud mõõtmised teostati ainult käesoleva lõputöö jaoks. Antud töö puhul on eelpool mainitud mõõtetulemuste avaldamine ilma autori nõusolekuta keelatud. Juhul kui on soov mõnda mõõtetulemust eraldi avaldada ja kuskil esitleda, tuleb selleks koostada eraldi mõõtmiste protokoll.

### **2.1.6 Kergliiklustee mõõtmised garantiiperioodi lõpus**

Kergliiklustee valgustehnilistel mõõtmistel mõõdeti rõhttasandilist valgustustihedust. Rõhttasandilise valgustustiheduse mõõtmisel peab fotomeetri anduri valgustundlik pind olema rõhtne või tegeliku teepinnaga rööbiti. [26]

Kergliiklustee mõõtmised tehti nii valgustite täisrežiimil kui ka 75% väljundvõimsusega säästurežiimil. Mõõtmised teostati 08.05.2020 ajavahemikul 23:30-00:15.

Nagu peatükis 1.2.2 mainitud, on kergliiklustee valgustusklassiks valitud P3 ning 75% hämardamisel vastavalt Tallinna linna valgustite hämardamise tabelile P4.

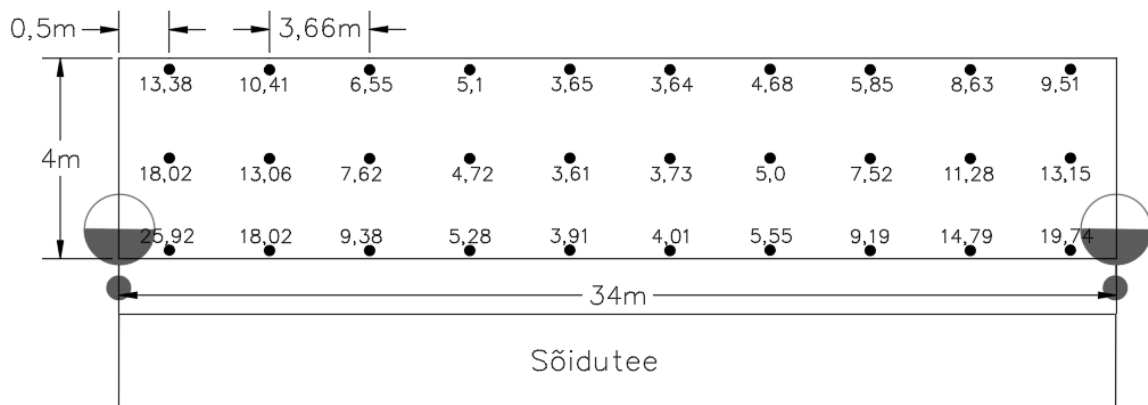
Mõõtmistele eelnevalt tuli paika panna mõõtepunktide asukohad. Esmalt valiti kahe valgustusposti vaheline lõik, mille pikkus mõõdeti täpselt ratasmõõdikuga. Tulemuseks saadi 34m pikkune lõik, mille peale tuli ära mahutada 10 mõõtepiirkonda. Ühes mõõtepiirkonnas mõõdeti ära valgustustihedus kergliiklustee ääres, kus asetsevad lambipostid, teiseks kergliiklustee keskel ning kolmandaks kergliiklustee kaugemas ääres. Kuna 34 meetri peale tuli ära mahutada 10 mõõtepiirkonda, kus igaühes on kolm rasterpunkti ning arvesse tuli ka võtta, et esimene mõõtepiirkond peab olema 0,5 meetrit seespool mõõdetava ala piire, mis tegi kogu mõõdetava ala

pikkuseks 33 meetrit- selle tulemusena leiti, et kahe rasterpunktide vaheline väärtus peab olema 3,66 meetrit.

Valgustehnilisteks mõõtmisteks kasutati luksmeeter Gigahertz-Optik BTS256-EF, mida on näha ka alloleval joonisel.



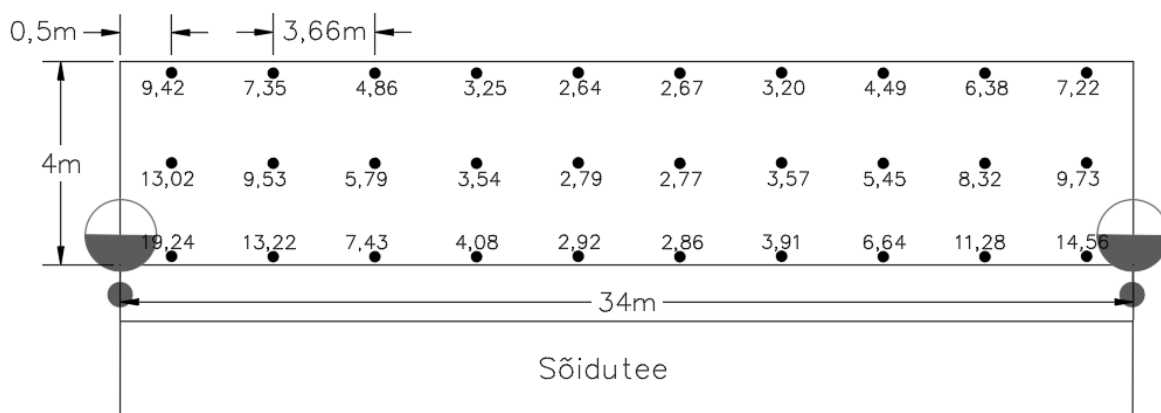
Joonis 2.8 Luksmeeter Gigahertz-Optik BTS256-EF



Joonis 2.9 Kergliiklustee valgustehniliste mõõtmiste väärtused valgustite täisvõimsusel

Leides mõõtepunktide aritmeetilise keskmise, tuleb kergliiklustee keskmiseks valgustustiheduseks 9,16 lx. Vaadates peatükis 1.2.2 esitletud valgusarvutusi, peab P3 kõnnitee valgustusklassi minimaalne valgustustihedus olema 7,5 lx. Valgusarvutusprogrammis Dialux EVO simuleeritud keskmiseks valgustustiheduseks kergliiklusteel saadi 100% väljuvõimsuse juures 8,22 lx, mis näitab, et mõõdetud tulemused on kõrgemad kui simuleeritud tulemused. Küll võib aga asjaolu tulla sellest, et mõõtmised teostati ajavahemikus, kus ei olnud taevast täiesti tume. Kuna luksmeeter on väga tundlik seade, võib see tulemust mõjutada. Kindlasti avaldab mõju tulemusele ka sõidutee valgustuse kuma, kuid Dialux EVO programm arvestab selle nüansiga juba ka simulatsioonis.

Järgevalt teostati mõõtmised valgustite säästurežiimil ehk 75% väljundvõimsusega. Tulemused on näha jooniselt 2.10. Mõõtmiseks kasutati samasid lähteandmeid ning sama valgustuspostide vahelist lõiku.



Joonis 2.10 Kergliiklustee valgustehniliste mõõtmiste väärtused valgustite säästurežiimil

Nagu jooniselt 2.10 näha, siis on tulemused tunduvalt madalamad, eriti kahe valgusti vahelises keskkohas. Peatükis 1.2.2 teostati samuti ka simulatsioon 75% väljundvõimsusega valgustite valgustustiheduse kohta ning leiti, et säästurežiimil 75% peab kergliiklustee valgustuse klass vastama normile P4, mis tähendab, et valgustustihedus peab jääme 5-7,5 lx vahele. Simulatsioonist saadud tulemus oli 6,03 lx, mõõdetud tulemus aga 6,73 lx. Taaskord on mõõdetud tulemuse kõrgem, kui simuleeritud tulemus. Nagu eelnevalt mainitud, on eeldatavasti peamiseks põhjuseks mõõtmiste aeg. Kuna aga valgustid lähevad pärast keskööd säästurežiimile, tuli mõõtmised teostada enne seda, kuid võimalikult hilisel ajal.

## 2.1.7 Ülekäiguradade valgustamise olulisus

Ülekäigurajad on jalakäija seisukohalt ülima tähtsusega ala, kuna seal on kõige suurem oht pimedas autojuhil teed ületavat jalakäijat mitte märgata, põhjustades sellega väga tõsise liiklusõnnetuse.

Enne 2017. aastat ei olnud Eestis ühtegi normdokumenti ega standardit, mis oleks seadnud ülekäiguradade valgustamisele konkreetsed nõuded. Standardis EVS 13201-2:2014 on ainult kirjutatud, kui on tagatud piisavalt kõrge teepinna heleduse tase, võib olla võimalik tavalised teevalgustuse paigaldised selliselt, et kalakäijal tekiks negatiivne kontrast tumeda siluetina heledal taustal. Lisaks soovitab standard paigaldada valgustid lühikese vahemaa taha enne ülekäiku ning kasutada suunatud valgusega valgusteid, vältimaks see eest liigset pimestust tekitamist autojuhtidele. Nüüdseks on aga välja töötatud standardid EVS 935-1:2017 ning EVS 935-2:2017, mis määratlevad kindlad nõuded, mida tuleb ülekäiguradade valgustamisel täita.

Ülekäiguradade valgeks triibutamisest pelgalt ei piisa, sest raja kulumine, talvine lumi ning vihmaga sõiduteelt tekkiv peegeldusräigus ja sellega kaasnev pimestus ei luba autojuhil iga kord ülekäigurada märgata. [28]

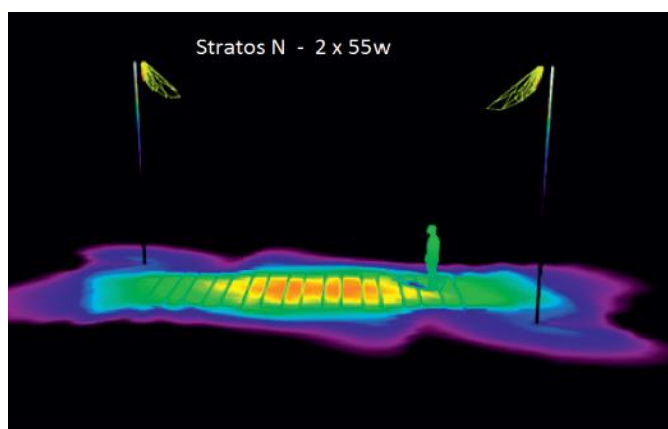
Olulisemad aspektid, millega ülekäiguraja valgustamisel arvestama peab, on [28]:

- Positiivse kontrasti loomine ja esiletoomine võrreldes sõiduteega;
- Valgusti valgusvoog peab olema sõidusuunal ehk valgustusmast peab asetsema sõidusuunas ülekäiguraja ees, vältimaks autojuhi pimestamist.
- Oote- ehk pealeminekualadel peab olema sama valgustustihedus, mis ülekäiguradadel;
- Ülekäiguradade püst- ehk vertikaalpinna valgustus peab olema suurem kui sõiduteel;
- Kogu ülekäigurada peab olema valgustatud ühtlaselt.

Jalakäijat on võimalik tuvastada, kui ta tumedal taustal heledana (positiivne kontrast) või heledal taustal tumedana (negatiivne kontrast) eristub. Kuna piisavalt tugevat negatiivkontrasti saab realiseerida üksnes erijuhtumitel ning üksnes suurte kuludega, siis käsitleb standard EVS 935-1:2017 ainult positiivset kontrasti. [29]

Jalakäija piisavaks positiivkontrastiks vajalik heledus saavutatakse, kui keskmise püsttasandilise valgustustiheduse hooldeväärtus on 1m kõrgusel jalakäijate ülekäiguraja keskteljest on sõidusuunast vaadates vähemalt 30 lx. Lisaks sellele ei tohi püsttasandilise valgustustiheduse hooldeväärtus üheski jalakäijate ülekäiguraja arvutuspunktis 1m kõrgusel olla alla 4 lx.

Et ülevalpool toodud nõuded tagada, tuleb kahesuunalisel tänaval igale ülekäigurajale paigaldada kaks valgustit, et oleks tagatud mõlemal sõidurajal jalakäija valgustamine.



Joonis 2.11 Ülekäiguraja valgustus valemvärvides esitatuna

Joonisel 2.11 on väga hästi näha, missugune kontrast tekib ülekäigurada ületaval jalakäijal. Kalaranna tänaval on ülekäiguradade valgustamiseks kasutatud samasuguseid Stratos N spetsiaalseid ülekäiguraja valgusteid, nagu on tehtud simulatsioon joonisel 2.11. Võib eeldada, et reaalselt on Kalaranna tänava ülekäiguradadel samasugune vaatepilt nagu eeloleval joonisel. Eraldi valgustehnilisi mõõtmisi ülekäiguradade kohta ei tehtud, kuna objekti projekteerimise ja välja ehitamise ajal ei olnud olemas veel Eesti standardit, mis määraks nõuded ülekäiguraja valgustusele.

Kui kohtkindel tänavavalgustus on ette nähtud teepinna keskmise heleduse hooldeväärtusele alla  $0,3 \text{ cd/m}^2$ , peab heledustase piirkonnas 100 meetrit enne ja pärast ülekäigurada vastama vähemalt valgustusklassile M6, mille nõuded on toodud standardis EVS-EN 13201-2:2015, tabel 1. See nõue on sellepärast, et vältida adaptsooniraskusi jalakäijate ülekäigurajast läbisõidul. [29]

Nagu sõidutee mõõtetulemustest selgus, on ka esimesel hämardusastmel sõidutee keskmine heledus väga madal, mis võib tekitada sõidutee ja ülekäiguraja vahel suure kontrasti. Sellest tulenevalt võivad autojuhil tekkida adaptsooniraskused ülekäigurajast läbisõidul.



### 3. Tänavavalgustusvõrgu tuleviku perspektiivid

#### 3.1.1 Elektrienergia kvaliteet

Maailm puutub pidevalt kokku tähelepanuväärsete energiaalaste väljakutsetega. Ülemaailmne elektrienergia tarbimise kasvu tõusu on aastaks 2040 56% võrra. Erinevad energeetikaettevõtted töötavad selle eesmärgi nimel, et parandada energiaefektiivsust kodudes, hoonetes, tööstustes ja infrastruktuurides. [30]

Eestis tarbiti 2016. aastal koos kadudega 8,4 TWh elektrienergiat. Elering AS 2016. aasta varustuskindluse aruande kohaselt on Eesti elektritarbimise kasv aeglustunud, mis on 1% aastas. 2030. aastal on prognoositav elektrienergia tarbimine sellise trendi jätkumise puhul 10 TWh. [31]

Seoses Euroopa Liidu nõuetega, on ka Eestil eesmärk jõuda aastaks 2030 taastuvenergia osakaalus lõpptarbimisse 50%-ni. Seoses nende väljakutsetega, on sellel oluline osa ka valgustusel.

Kuna võrku lisandub järjest karmimate taastuvenergia nõuete tõttu kohalike elektrienergia tootjaid väikeste päikeseelektrijaamade ja tuulegeneraatorite näol, tekib väljakutseid jaotusvõrgu valdajal neid muutusi kompenseerida.

Traditsiooniliselt on elektrivõrgud modelleeritud ja disainitud põhimõttega, et energia liigub ainult ühes suunas ehk võrgust tarbijatele. Nüüd on elektrivõrgu planeerijad silmitsi asjaoluga, kui palju päikesejaamu saab võrku integreerida enne kui tekivad ülepinged ning töökindluse probleemid.

Küll aga on võimalik taastuvenergia lahendusi integreerida ka tänavavalgustusvõrku. Olenevalt erinevatest aspektidest, nagu geograafiline positsioon, kliima ja aastaegade mõju, tuleb vaadelda, kas aga sellised lahendused end ära tasuvad.

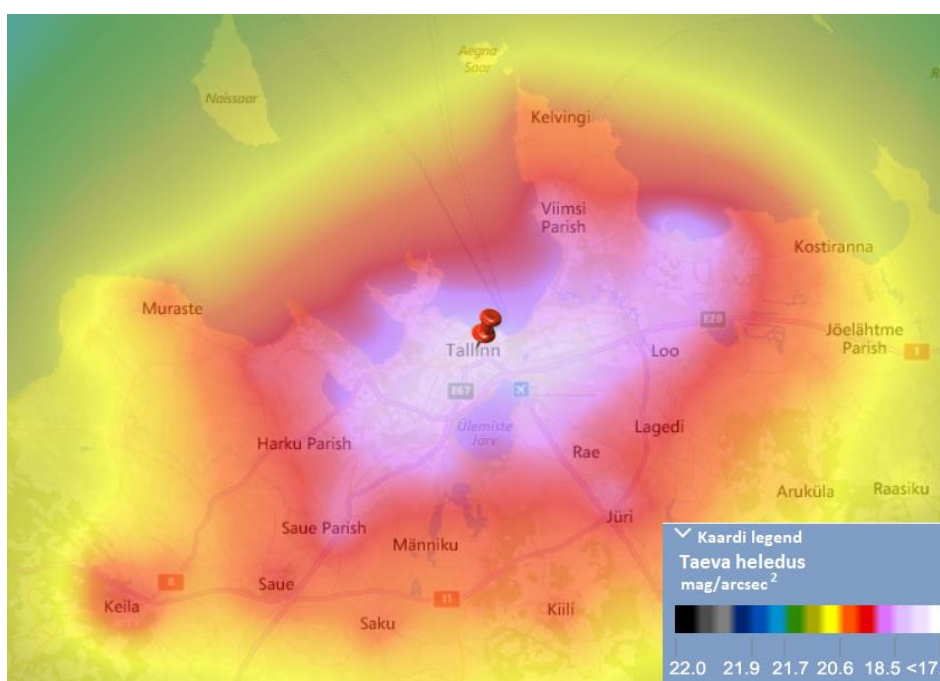
Kalaranna tänav on üks vähestest tänavatest Tallinnas, mis on täielikult rekonstrueeritud ning ehitatud terve teelõigu ulatuses uus leedvalgustusvõrk. Küll on aga kogu ülejäänud linnas vanu amortiseerunud valgusteid, mis tarbivad suurel määral võimsust ja tekitavad märkimisväärset rahalist kulu nii hoolduste kui ka suure tarbimise näol.

Tallinnas on 2019. aasta seisuga 59 260 valgustit, mille numbriline väärtus on vastavalt valgusti tüübile välja toodud tabelis 1.1. Tabelit vaadates selgub, et ülekaalukalt on siiani kõrgrõhu naatriumlambid, mille miinusteks on suur tarbimisvõimsus ning valgusreostuse tekitamine.

Tabel 3.1 Tallinnas olevate valgustite tüübid ja kogused [31]

Tüüp	Arv, tk
Luminofoorlambid	472
Metallhalogeniidlambid	3225
Elavhõbelambid	1197
Kõrgrõhu naatriumlambid	46659
Leedlambid	7406
Muud lambid	301

Vaadates joonist 3.1, on ilmekalt näha, kuidas Tallinna linnas on valgusreostus suur. Seda põhjustavadki peamiselt kõrgrõhu naatriumlambid.



Joonis 3.1 Taeva kuma Tallinna linna kohal

Vähendamaks valgusreostust, on vaja vana generatsiooni kõrgrõhu naatriumlambid välja vahetada uute leedvalgustite vastu. Kindlasti on Tallinna välisvalgustuse võrgu haldajal Elektrilevil ning Tallinna linnal eesmärk vahetada vanemat tüüpi valgustid uute valgustite vastu. Leedvalgustite algne investeering on kulukas ning palju valgusteid Tallinnas asub jaotusvõrgu või ühistranspordi kontaktliini mastidel, kuna tänavamaal ei ole piisavalt ruumi eraldiseisva valgustusposti paigaldamiseks ning eraldi valgustuse toiteliini rajamiseks, tasub kaaluda, kas oleks mõistlik kasutada mõningates piirkondades taastuenergialahendusi. Taastuenergiel põhinevate valgustusliinide rajamine võib esmapilgul tunduda suure investeeringuna, kuid kohtades, kus on

suures koguses erinevaid tehnovõrke ning maakaablit on peaaegu, et võimatu paigaldada, siis ei olegi see ebaratsionaalne idee.

### **3.1.2 Leedvalgustid päikeseenergia toitel**

Tagamaks 2050. aasta seatud Euroopa Liidu eesmärgi roheenergia saavutamisel, aitab kindlasti kaasa päikesepaneelide integreerimine valgustusvõrku. Nagu eelnevalt mainitud, oleneb selle tasuvus eelkõige geograafilisest asukohast ja valgustusposti füüsilisest asukohast, et päikesekiirgust ei jääks varjama suure hooned, puud või mõned teised objektid.

Kuna leedtehnoloogia ning päikesepaneelide tehnoloogia areneb jõudsalt efektiivsemate ja taskukohasemate lahendusteni, ei pruugi varsti enam selliste lahenduste installeerimine palju kulukam olla, kui toitekaabliga valgustusvõrgud.

Autori kogemusest tänavavalgustuse projekteerimisel lähtuvalt, on tavaliselt elumupiirkondades sõidutee valgustusklassiks seoses väikese liikluskoormusega M6, mille tulemusena sobivad sinna paigaldamiseks ligikaudu 15 W tarbimisvõimsusega valgustid.

Kuna valgusti tarbimisvõimsus on niivõrd väike ning ligikaudselt põleb valgusti 8-10 tundi ööpäevas, siis teeb see ööpäevaseks tarbimiseks 120-150 Wh. Valgustuse juhtimissüsteemid on aga niivõrd paindlikuks muutunud, et oleks võimalik rakendada ka stsenaariumi, kus valgustid näiteks alates 00:00-05:00 põlevad ainult 10 % väljundvõimsusega ning valgustitele installeeritud liikumisradarid liikumise tuvastades, annaksid käsu valgustitele kümneks minuks 100% väljundvõimsusele tagasi minna. Olenevalt liikumise intensiivsusest, on võimalik sellise juhtimissüsteemiga võita tarbimiselt kuni 40%. Lisaks oleks vaja paigaldada hämaraandur, mille eesmärgiks on tuvastada päeva ja öö olekut ning mis annab signaali valgustitele sisse lülitada. Küll võib see andur aga paikneda ka valgusti kilbi juures, kus asub kaugjuhtimissüsteemi puhul juhtimiskontroller.

Kindlasti ei saa paigaldada sellist tüüpi valgustuslahendusi magistraalteedele ning kohtadesse, kus valgustuse olemasolu on ülimalt tähtis.

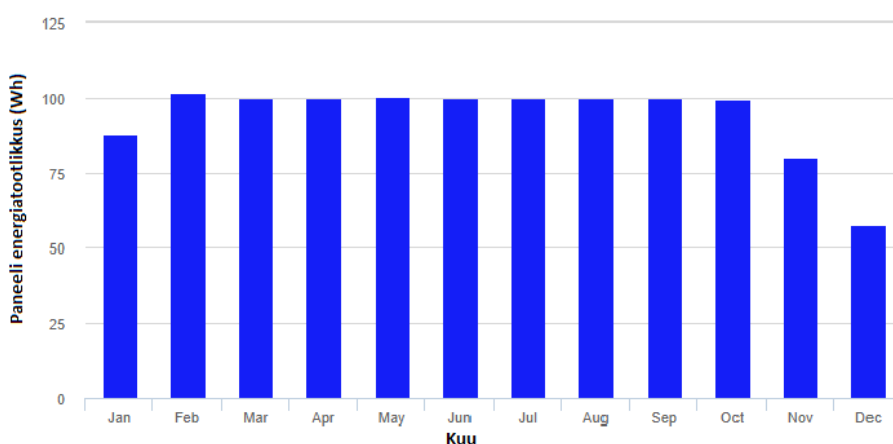
Järgnevalt koostati simulatsioon vaatlemaks, kas ainult päikeseenergiaal põhinev tänavavalgusti saab aastaringselt vajalikul ajal põleda, kui tema tarbimisvõimsus on 15W ning ööpäevane tarbimine keskel läbi 100W.

Sisendandmeteks valiti, et valgustusmastile on paigaldatud 100 W võimsusega päikesepaneel, mis paikneb lõuna suunas ning kaldenurgaks on 40 kraadi, mida loetakse Eestis optimaalseks kaldenurgaks [32]. Akupanga mahutavusel võeti arvesse, et selles võiks talletuda vähemalt kolme

päeva reserv, mistõttu peab sealt kätte saama 450 Wh. Päikeseenergia salvestamiseks kasutatakse 80 Ah akut, võttes arvesse ka asjaolu, et akud ei ole 100 % efektiivsusega [33]. Lisaks määrati simulatsioonis geograafiliseks asukohaks Tallinna linn, et tulemused oleksid kõige tõetruumad. Programm arvestab geograafilist positsiooni ning vastavalt sellele simuleerib andmed.

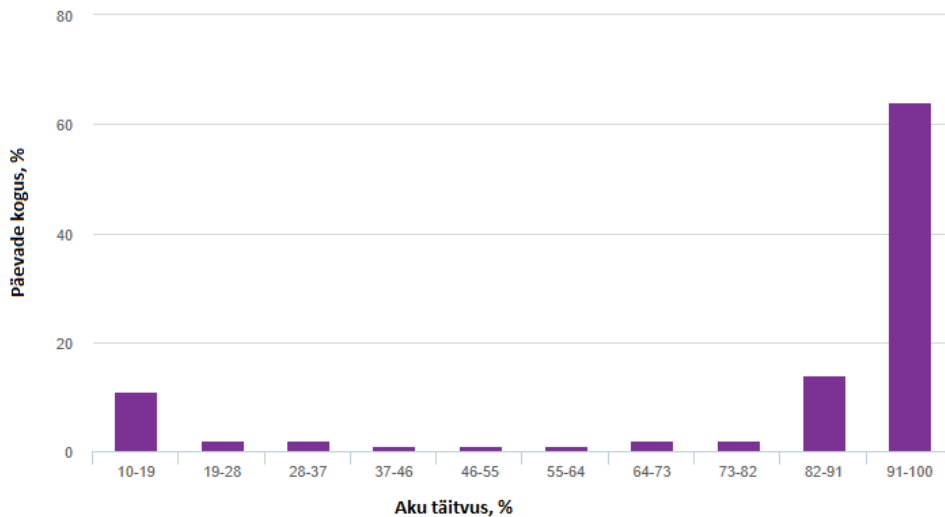
Lisaks tuleb akude valikul tähele panna, et on olemas mitut tüüpi akusid, mida on võimalik päikeseenergia salvestamiseks kasutada: plii- ja liitiumakud. Liitiumakud on tõhusamad, mis tähendab, et laadimis- ja tühjendusprotsessis kulutatakse vähem energiat. Neil on ka suurem tühjenemiskiir, mis võimaldab kogu aku mahtu täielikult ära kasutada. [33]

Pliiakud on tundlikud ja neid tuleb iga päev täielikult laadida, kus liitium-ioonakud võivad jääda osalise laadimiseta. Pliiakudel on samuti piiratud kasutuskõlblikkus ja need tühjenevad tavaliselt vaid 50%-ni. Parema efektiivsuse ja sügavama tühjendussügavuse tõttu on liitiumakupangad tavaliselt vaid 50–60% võrreldava pliihappega aku suuruselt. Liitiumaku on konstrueeritud pakkuma pikka kasutusiga (üle 10 aasta), olles samal ajal ka ohutu, stabiilse keemia ja keerukate elektrooniliste kaitsefunktsioonidega. [33]



Joonis 3.2 Päikesepaneeli tootlikkus kuu lõikes [34]

Nagu jooniselt 3.2 näha, siis alates veebruarist kuni oktoobrini suudab päikesepaneel vajalik tarbimisvõimsuse katta ilma probleemideta. Puudujäägid hakkavad tekkima alates novembrist kuni jaanuarini välja. Seetõttu ongi oluline aku olemasolu, et päikesepaistelisel päeval genereerida nii palju energiat kui võimalik ning salvestada see akusse, et halvema ilmadega päevadel kasutada akusse salvestatud energiat.



Joonis 3.3 Aku täitvuse tõenäosus päeva lõpuks [34]

Valitud parameetritega arvutamisel selgus, et 74 % päevadest on aku mahutavus täis, võimaldades vajalikku energiat tänavavalgustile öisel ajal. Küll aga on 11 % aastaste päevade hulgast sellised, kus aku mahutavuse tase 10-19 %. Defitsiidi hetked tekivad Eesti kliimas perioodil november kuni jaanuar, nagu on näha ka tootmise graafikult joonisel 3.2.

Et päikesepaneelide toitel olev tänavavalgustuse süsteem oleks võimalikult ohutu ja väikeste rikete arvuga, on vaja süsteemi lisada ka pingeregulaatorid, mis jälgivad aku täitvuse ja tühjenemise protsenti, et vajadusel ahel katkestada, vältimaks ülelaadimist või aku täielikku tühjenemist. Kuna tegu on eraldiseisva paigaldisega, siis jaotusvõrku üleliigse energia müümist ei toimu, mistõttu pole vaja ka inverterit, et muundada alalisvool vahelduvvooluks. Nii leedvalgusti kui ka päikesepaneel töötavad alalisvoolul.



Joonis 3.4 Päikesepaneeli toitel olev leedvalgusti

Näiteks viidi samasuguse juhtimise ülesehitusega katsetus läbi Hiinas. Valgustite toiteks olid kasutusel päikesepaneelid ning öisel ajal tuvastasid liikumist infrapunaandurid. Iga masti juures oli

eraldi andur ning kui andur tuvastas liikumise, läks selle anduriga ühenduses olev valgusti põlema. Sealjuhul kasutati meetodit, kus valgustid olid öö jooksul kustunud ning läksid põlema alles siis, kui andur signaali tuvastas. [35]

Sellise süsteemi kasutamine ei ole autori arvates otstarbekas, kuna leedvalgustite järsk süttimine täiesti pimedas keskkonnas võib autojuhti ehmatada. Küll aga on selline meetod energiatõhususe seisukohast väga efektiivne, eriti kui öösel autode liikumist väga palju ei ole.

Et paigaldada nii leedvalgustit kui päikesepaneeli valgustusmasti otsa, ei saa kasutada tavalist valgustusmasti, mistõttu tuleb kasutada eritellimusel valmistatud maste, mis võivad olla kallimad kui standardsed valgustusmastid. Ühe võimalusena saaks siiski standardset valgustusmasti kasutada, paigaldades paneeli masti tippu ning valgusti eraldi kanduriga paneeli alla- põhimõttelt sama nagu on näidatud joonisel 3.4.

Siinkohal aga on väga tähtis traditsioonilise maakaabliga ning päikesepaneelide toitega ehituse- ja ülalpidamiskulud. Näitena on teostatud 30 valgustiga võrgu ehituse maksumus ning selle ülalpidamiskulude 20 aasta lõikes.

Tabelis 3.2 on esitatud esialgsed ligikaudsed investeeringukulud päikeseenergiaal töötavate valgustusvõrgu ehituseks ning tabelis 3.3 on esitatud maakaabliga toitel oleva valgustusvõrgu ehitusmaksumus.

Tabel 3.2 PV- paneelidega valgustusvõrgu ehituslik maksumus [36]

Ehitus ja esialgne investeering	PV-paneelidega valgustusvõrk
Mastide ja valgustite maksumus, €	21600
PV-paneelide maksumus,	7500
Akude maksumus, €	4950
Muud ehituskulud, €	3000
Ehituse maksumus kokku, €	38100

Tabel 3.3 Maakaablil oleva toitega valgustusvõrgu ehitus [36]

Ehitus ja esialgne investeering	Maakaabliga valgustusvõrk
Mastide ja valgustite maksumus, €	16830
Kaabli materjal ja paigaldus koos taastamisega, €	21670
Valgustuse juhtimiskilp ja juhtimissüsteem, €	100
Elektrienergia maksumus aastas, €	115
Muud ehituskulud, €	3000
Kokku, €	41715

Eelolevatest tabelitest selgub, et ehitusmaksumusel tegelikult märkimisväärsed vahet ei ole. Siinkohal on arvesse võetud küll ligikaudsed maksumused, kuid arvude suurusjärk annab aimu ehituse maksumusest.

Järgnevalt on aga vaadeldud võrgu hoolduslike kulusid 20 aasta perspektiivis, lähtuvalt kui kaua peaks tavaliselt leedvalgustite eluiga olema. Kuna tegemist on väikese valgustusvõrguga, on rikete tõenäosus väiksem, millega on ka allolevas tabelis arvestatud.

Tabel 3.4 PV-paneelidega ja maakaabliga valgustusvõrgu hoolduslikud kulud 20 aasta lõikes

<b>PV-paneelidega valgustusvõrk</b>			
	<b>Kogus</b>	<b>Maksumus aastas, €</b>	<b>Maksumus 20 aasta lõikes, €</b>
Valgusti vahetus, tk	2	30	600
Paneelide iga-aastane puhastus, tk	600	800	16000
Akude vahetus 10 aasta tagant, tk	30	400	8000
Kulud kokku, €		1222,5	24525
<b>Maakaabliga valgustusvõrk</b>			
	<b>Kogus</b>	<b>Maksumus aastas, €</b>	<b>Maksumus 20 aasta lõikes, €</b>
Valgusti vahetus, tk	2	30	600
Elektrienergia kulu, kWh	12000	840	16800
Kulud kokku, €		862,5	17325

Hoolduskulude seisukohalt on arvesse võetud, et leedvalgustite eluea vältel ehk 20 aasta jooksul rikneb 5% valgustitest, mille tulemusena võib eeldada, et 20 aasta jooksul rikneb 2 valgustit, mis on vaja välja vahetada. Lisaks on eeldatud, et valgustitel on esimese 5 aasta jooksul garantii, mistõttu sel perioodil rikkeid ei esine.

Võrreldes hoolduskulude erinevust, siis on näha, et maakaabliga püsitoitel olev valgustusvõrk on põhimõtteliselt hooldusvaba. Ainukesed kulud on valgustusrikked ning elektrienergia eest tasutav rahaline kulu. Kui aga vaadata PV- paneelidega valgustusvõrku, siis näeb, et iga-aastased kulud on 360 € võrra suuremad, kui tavalise valgustusvõrgu puhul. 20 aasta lõikes teeb see juba märkimisväärse erisuse. Lisaks tuleb siinkohal tähele panna, et paneelide hooldusintervalliks määrati hetkel 1 aasta. Olenevalt valgustite paiknemise asukohast, peab seda võib-olla isegi tihemini tegema. Paneelide pinnale koguneb tolm ja lindude väljaheidet, mille tulemusena paneelide tootlus märkimisväärselt langeb. Küll aga on Eestis piisavalt palju vihmaseid ilmasid, mis tolmu kihi tekke aitavad ära hoida.

Võttes arvesse Eesti aastaringset kliimat, võib murekohaks olla akude mahtuvuse protsent. Kuna akude mahtuvus sõltub suuresti temperatuurist ning arvestades, et Eestis on talvekuud kohati väga

külmad, võib juhtuda, et akudest ei pruugi talvel külmadel ilmadel kasu olla. Kuna maapind talvel täiesti ära ei külma, oleks akude efektiivsuse tõstmiseks võimalik akud paigaldada pinnasesse. Küll aga tõstab see ehitusliku maksumust ja projekti keerukust.

Lisaks peab välja tooma, et juhtuda võib olukord, kus piisavalt energiat ei ole salvestusseadmesse salvestatud ning seetõttu võib tekkida energia defitsiit ja tänav jääb hoopis pimedaks. Seetõttu on oluline, et sellise iseloomuga projekti puhul tehtaks eelnevalt põhjalik analüüs ja valitakse välja seadmed, mille põhjal saab teha põhjalikku simulatsiooni täpset geograafilist asukohta arvestades, välja selgitamiseks, kas valitud seadmete puhul tuleb mõni seade välja vahetada või on eesmärgid täidetud ning on võimalik projektiga edasi minna.

Kokkuvõtteks võib öelda, et olenevalt objekti keerukusest, geograafilisest positsioonist ning õhuruum avarusest, on päikesepaneelidega ehk täielikult taastuveneergetika allikast toite saav valgustusvõrk mõningal määral kallim kui traditsiooniline maakabliga. Tähele tuleb aga panna, et sellisel kujul valgustusvõrgu modelleerimisel peab arvesse võtma temperatuuritingimusi ning vaatlema lähemat, kas ja kui palju Eesti kliimatingimused selline akuga variant end ära tasub. Kindel on aga see, et päikesepaneelidega valgustusvõrk nõuab rohkem hooldust kui tavaline valgustusvõrk, kuna paneele on vaja puhastada ning eeldatav akude eluiga on samuti 10 aastat.

Lisaks on vaadeldud erinevates teadusallikates tuulegeneraatorite integreerimist valgustusvõrkudes. Võttes arvesse, et rannikuäärsetel aladel on Eestis tuulikuid installeeritud päris palju, millest võib järelduse teha, et tuuleenergia potentsiaal on heal tasemel. Kui aga vaadelda tuuleenergia kasutamist valgustusvõrkudes, on selle jaoks välja töötatud eri tüüpi mastid, mille küljes on tuulegeneraatorid. Kuna käesolevas peatükis vaadeldi valgusti paigaldamist linnaruumi piiridesse, siis autori arvates ei sobi tuulikuga tüüpi masti linnaruumi miljösse, mistõttu ei ole kõnealuses peatükis neid ka käsitletud.



## KOKKUVÕTE

Tänavavalgustus on linna taristu lahutamatu osa, kuna see loob eelduse ohutumale keskkonnale ning parandab liiklusohutust. Küll aga peab tänavavalgustus vastama teevalgustuse standarditega ja normidega määratud nõuetele.

Järjest areneva leedvalgustuse tehnoloogia näol suudetakse luua väga energiatõhusaid ning valgustatuse seisukohalt efektiivseid valgustusvõrke. Võrreldes vanema generatsiooni kõrgrõhulampidega on leedvalgustid mitmeid kordi efektiivsemad, tekitades vähem valgusreostust suunatud valgusjaotusspektrite abiga ning tarbides sealjuures väga vähe elektrienergiat. Lisaks on leedvalgustid palju keskkonnasõbralikumad, kuna väiksema energiatarbimisega paisatakse õhku vähem kasvuhoonegaase. Liigne kasvuhoonegaaside õhku paiskamine on globaalne probleem ning Euroopa Liit on liikmesriikidele ette andnud selged taastuvenergia poole pürgivad suunised, mis peab 2050. aastaks täitma.

Lisaks on leedvalgustite eelis see, et nad on hämardatavad, mistõttu on võimalik leedtänavavalgustusvõrkude haldamiseks valida paljude erinevate valgustusjuhtimissüsteemide vahel. Kalaranna teele on paigaldatud SmartELI juhtimissüsteem, mille kaudu on võimalik distantsilt valgustitele käsklusi anda ning valgustite oleku ja tarbimise kohta infot saada. Vaadeldes erinevaid juhtimissüsteeme, on selge, et kõige paindlikum neist on valgustipõhine juhtimissüsteem nagu on ka Kalaranna teele paigaldatud SmartELI. Odavamate süsteemide hulgast on võimalik valida veel eelprogrammeeritud valgustitega juhtimissüsteem või lisasoonega toitekaabli juhtimissüsteem. Küll aga ei ole need juhtimissüsteemid niivõrd paindlikud.

Käesolevas magistritöös vaadeldi, kas 2015. aastal ehitatud Kalaranna tänava valgustusvõrk vastab teevalgustuse normidele nii valgusite täisvõimsusel kui ka öisel hämardusrežiimil. Selleks koostati enne valgustehnilisi mõõtmisi programmis Dialux EVO valgusarvutuste simulatsioon, kus määrati tänava mõõtmed, teede valgustusklassid ja valgustite mudelid. Valgusarvutuste simulatsioonist selgus, et kõikidel hämardusastmetel on teevalgustuse normid tagatud.

Võrreldes varasemaid mõõtetulemusi ja lõputöö raames mõõdetud tulemusi, ei saa ühest järeldust teha, kas leedvalgustite valgusvoog on viie aastaga langenud või mitte. Kuna mõõtmiste alal oli aastatel 2015-2018 kõrvaline valgusallikas, mida ei olnud võimalik mõõtmiste ajaks välja lülitada, võis see piisaval määral mõõtmistulemusi mõjutada. Küll aga saab tulemustest järeldada, et teevalgustuse piki- ja üldühtlus on kahte mõõtelõiku võrreldes mõnel juhul alla standardi väärtuse. Lisaks on probleeme tee heleduse väärtustega, kuna need ei vasta projektis määratud teevalgustuse klassile, mille nõuded on määratud standardiga EVS 13201-2:2015.

Ülekäiguradade valgustamine on ülimalt oluline, et tagada jalakäija võimalikult varajane märkamine sõidukijuhi poolt, mistõttu on spetsiaalse ülekäiguraja valgustiga vaja tekitada ületuskohale külmema valgustemperatuuriga kontrastsem ala, kus on võimalik jalakäijat lihtsasti tuvastada. Kui sõidutee valgustus on liiga madala heledusega nagu näiteks öistel aegadel, mil sõidutee valgustus on hämardusrežiimil, võivad tekkida sõidukijuhi silmadele adaptsooniraskused ülekäigurajast üle sõites, sest tavaks on ülekäigurajavalgusteid mitte hämardada, mistõttu tekib seal kohas suur heleduse erinevus.

Tallinnas on hetkel pea kolmveerand valgustusvõrgust vana tüüpi naatriumvalgustid. Pidevalt teostatakse uusi projekte, et neid järk-järgult välja vahetada. Paljud valgustid on paigaldatud jaotusvõrgu- või kontaktliini mastidele, kuna tänaval on teiste tehnovõrkude tõttu liiga vähe ruumi eraldi valgustusmastide või toiteliini rajamiseks. Seetõttu peab kaaluma alternatiivi, missugune potentsiaal oleks kasutada päikeseenergiat põhinevat valgustusvõrku linnaäärsetes rajoonides, kus on vähem päikesekeerust varjavaid objekte ning väiksema valgustusklassiga teed. Selgus, et eesti kliimatingimustes ei ole päikeseenergiat põhinev valgustusvõrk niivõrd efektiivne, kuna külmadel talvedel on akude mahutavus väiksem, mistõttu võib valgustatav objekt mõni öö üldsegi pimedaks jääda energia defitsiidi tõttu. Lisaks on hoolduskulud päikeseenergiat põhineval võrgul kallimad ja hoolduse intervall tihedam. Hetkel ei ole päikeseenergia kasutamisel tänavavalgustusvõrgus majandusliku otstarvet, küll aga võib seda kasutada innovatsiooni eesmärgil roheline energia poole, kuid arvestada tuleb siis suuremate rahaliste kuludega ja tihedama hooldusega.

## SUMMARY

Street lighting is inseparable part of City's infrastructure, because it makes pathway to safe environment and also improve road safety. Street lighting must be in accordance with road lighting standards and different normatives.

Because of the constantly evolving LED technology, it is able to create very energy- and light efficient street lighting networks. Compared to oled generation high power sodium lamps, LED lamps are couple times more efficient, consuming less electricity and producing therefore less light pollution due to the directed optic types. Also LED lamps are much more environmental friendly, because of the smaller consumption rate, less CO<sub>2</sub> emissions are being thrown into air. CO<sub>2</sub> emissions are global ecological problem, which is why European Union has set strict goals, that have to be fulfilled by the year of 2050.

In addition, LED luminaires have the advantage of being dimmable, making it possible to choose between many different lighting control systems to manage LED street lighting networks. A SmartELI control system has been installed on the Kalaranna street, through which it is possible to give commands to the luminaires from a distance, receive information about the status and consumption of the luminaires. Looking at the different control systems, it is clear that the most flexible of these are the luminaire-based control systems, as is the SmartELI installed on the Kalaranna road. Among the cheaper systems, it is also possible to choose a control system with pre-programmed luminaires or a control system for the power cable with an additional wire. However, these management systems are not so flexible.

In this master's thesis, it was examined whether the lighting network of Kalaranna Street, built in 2015, meets the norms of road lighting both at full power and in dimmable mode. To this end, a simulation of light values in the Dialux EVO program was prepared before the lighting measurements, in which the street dimensions, road lighting classes and luminaire models were determined. The simulation of the light calculations showed that the norms of road lighting are fulfilled at all levels of dimming.

Comparing the previous measurement results with the results measured in the framework of the dissertation, it is not possible to draw one conclusion whether the luminous flux of LED luminaires has decreased over the five years or not. As there was an external light source in the measurement area in 2015-2018, which could not be switched off during the measurements, this could have had a sufficient effect on the measurement results. However, it can be concluded from the results that the longitudinal and general uniformity of road lighting is below the standard value in some cases compared to the two measuring sections. In addition, there are problems with the road brightness

values, as they do not correspond to the road lighting classes specified in the design, the requirements of which are specified in the standard EVS 13201-2: 2015.

Illumination of pedestrian crossings is extremely important to ensure that the pedestrian is noticed as early as possible by the driver, which is why a special pedestrian lighting must create a contrast area with a colder light temperature where the pedestrian can be easily identified. If the road lighting is too low, such as at night when the road lighting is dim, the driver's eyes may have difficulty adapting when crossing the pedestrian crossing, as it is customary not to dim the crossing lights, resulting in a large brightness difference.

At present, almost three quarters of the lighting network in Tallinn has old-type sodium luminaires. New projects are constantly being carried out with a view to their gradual replacement. Many luminaires are installed on distribution network poles or city transport poles because there is too little space on the street to build separate lighting masts or power lines due to other utility networks. Therefore, an alternative to the potential of using a solar-based lighting network in urban areas with fewer objects and roads with a lower lighting class should be considered. It turned out that in Estonian climatic conditions, the lighting network based on solar energy is not so efficient, because in cold winters the capacity of the batteries is smaller, which means that the illuminated object may remain dark at night due to energy deficit. In addition, maintenance costs for a solar-based network are more expensive and the maintenance interval is tighter. At present, solar energy is not used for the economic purpose of the street lighting network, but may still increase the innovative target, whereas increased monetary costs and frequent maintenance intervals must be taken into account.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „LED SCALE-UP,“ The Climate Group, 22 Märts 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.theclimategroup.org/project/led-scale>. [Kasutatud 12 Märts 2020].
- [2] T. Tamm, Valgustustehnika I, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2009.
- [3] I. van Liempt ja I. S. T. van Aalst, „Geographies of the urban night,“ 9 oktoober 2014. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/267981512\\_Introduction\\_Geographies\\_of\\_the\\_urban\\_night](https://www.researchgate.net/publication/267981512_Introduction_Geographies_of_the_urban_night). [Kasutatud 22 aprill 2020].
- [4] W. Van Bommel, „Purpose and Benefits of Road Lighting,“ November 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/312842534\\_Purpose\\_and\\_Benefits\\_of\\_Road\\_Lighting](https://www.researchgate.net/publication/312842534_Purpose_and_Benefits_of_Road_Lighting). [Kasutatud 23 aprill 2020].
- [5] L. Association, „LUCI Strategic plan,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.luciassociation.org/wp-content/uploads/2017/09/LUCI-Strategic-Plan-2017-2027.pdf>. [Kasutatud 14 aprill 2020].
- [6] T. Varjas, Valgustustehnika- Elektrilambi ajalugu, Tallinn, 2017.
- [7] E. Standardikeskus, „EVS-EN 13201-2:2015 Teevalgustus Osa 2: Toimivusnõuded,“ august 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=57984&language=EstonianLanguage>. [Kasutatud 1 mai 2020].
- [8] „Performance In Lighting,“ Performance In Lighting, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.performanceinlighting.com/ww/en/outdoor/urban/street-lighting#S02056>. [Kasutatud 22 märts 2020].
- [9] „Detas DLeds,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dleds.com/2k16/en/home/led-streetlights/pedestrian-crossing/>. [Kasutatud 28 märts 2020].
- [10] J. Armas, „Tallinna välisvalgustuse tehnilised tingimused projekti koostamiseks,“ Tallinn, 2020.

- [11] E. Standardikeskus, „CEN/TR 13201-1:2014 Teevalgustus Osa 1: Valgustusklasside valiku juhised,“ Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2016.
- [12] L. Sumero, „Jalakäijate ülekäiguradade valgustuse uurimine,“ 2019.
- [13] „Kalaranna SmartStreet,“ Eliko, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.eliko.ee/smartstreet/>. [Kasutatud 30 märts 2020].
- [14] O. Eliko, *Kalaranna tänava valgustusvõrgu tarbimisandmed*.
- [15] „Intelilight,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://intelilight.eu/financing-and-business-case/street-lighting-savings-calculator/?fbclid=IwAR0I9p5KOKORyrGP2NjTyj\\_Hyluu6u\\_Ja4fjq1t8Yd7H-Qmj7TLj8Z\\_78aI](https://intelilight.eu/financing-and-business-case/street-lighting-savings-calculator/?fbclid=IwAR0I9p5KOKORyrGP2NjTyj_Hyluu6u_Ja4fjq1t8Yd7H-Qmj7TLj8Z_78aI). [Kasutatud 23 aprill 2020].
- [16] „Esvika,“ Esvika, [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.esvika.ee/?s=axpk&post\\_type=product](https://www.esvika.ee/?s=axpk&post_type=product). [Kasutatud 19 aprill 2020].
- [17] E. Standardikeskus, „EVS-EN 13201-5:2015 Teevalgustus Osa 5: Energiatõhususnäitajad,“ oktoober 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=58001&language=EstonianLanguage>. [Kasutatud 2 mai 2020].
- [18] T. Tamm, „Valgustuse juhtimise arengusuundadest,“ Tiiu Tamm Inseneribüroo OÜ.
- [19] „Zhaga standards for LED modules and light engines,“ OSRAM Digital Systems, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.osram.com/ds/knowledge/zhaga-standards-for-led-modules-and-light-engines/index.jsp>. [Kasutatud 12 aprill 2020].
- [20] „Zhaga Consortium,“ Zhaga, 08 mai 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.zhagastandard.org/about-us/why-use-zhaga.html>. [Kasutatud 10 mai 2020].
- [21] „Zhaga Book 18 Street Light Connectors,“ TE Connectivity, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.te.com/usa-en/products/connectors/lighting-connectors/solid-state-lighting/zhaga-book-18-street-lighting-connectors.html?tab=pgp-story>. [Kasutatud 10 mai 2020].

- [22] „What is NEMA socket?“, Lighting Equipment Sales, 18 aprill 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <http://lightingequipmentsales.com/what-is-nema-socket.html>. [Kasutatud 22 aprill 2020].
- [23] „Tänavavalgustuse taristu renoveerimise tingimused“, Keskkonnainvesteeringute Keskus, [Võrgumaterjal]. Available: [https://kik.ee/sites/default/files/ST/st\\_tv\\_itv\\_nouded\\_taotlusele\\_eduardsizov.pdf](https://kik.ee/sites/default/files/ST/st_tv_itv_nouded_taotlusele_eduardsizov.pdf). [Kasutatud 02 aprill 2020].
- [24] T. Tamm, „Tehisvalguse mõju öisel puhkeperioodil“, Tiiu Tamm Inseneribüroo, 5 mai 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tiutammib.ee/materjalid/Elektriala%20nr%202%2C%202020%2C%20Tehisvalguse%20m%C3%B5ju%20puhkeperioodil.pdf>. [Kasutatud 12 mai 2020].
- [25] E. Standardikeskus, „EVS-EN 13201-4:2015 Teevalgustus Osa 4: Valgusliku toimivuse mõõtemetodid“, oktoober 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=57996&language=EstonianLanguage>. [Kasutatud 01 mai 2020].
- [26] E. Standardikeskus, „EVS-EN 13201-3:2015 Teevalgustus Osa 3: Toimivuse arvutamine“, august 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=57990&language=EstonianLanguage>. [Kasutatud 2 mai 2020].
- [27] A. Õigus, „Ülekäiguradade valgustamisest“, Tallinn, 2016.
- [28] E. Standardikeskus, „EVS 935-1:2017 Jalakäijate ülekäiguradade valgustamine lisavalgustusega Osa 1: Kvaliteedi üldnäitajad ja juhisväärtused“, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-935-1-2017>. [Kasutatud 27 aprill 2020].
- [29] R. Bolduc, „Impacts of LED lighting on Power Quality“, [Võrgumaterjal]. Available: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=White+Paper&p\\_File\\_Name=998-2095-10-07-17AR0\\_EN.pdf&p\\_Doc\\_Ref=998-2095-10-07-17AR0\\_EN](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=White+Paper&p_File_Name=998-2095-10-07-17AR0_EN.pdf&p_Doc_Ref=998-2095-10-07-17AR0_EN). [Kasutatud 19 aprill 2020].
- [30] „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak\\_2030.pdf](https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030.pdf). [Kasutatud 20 aprill 2020].

- [31] E. Varandi, „Välisvalgustustaristu hoolduse tulemused ja taristu uuendamise vajalikkus,“ Tallinn, 2019.
- [32] „Päikesepaneelide tootlikkuse arvutamine,“ Päikeseküte, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.xn--pikeseekte-v2a4y.ee/artiklid/paikesepaneelide-tootlikkuse-arvutamine/>. [Kasutatud 20 mai 2020].
- [33] „Solar system basics,“ Solar Online, [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.solaronline.com.au/solar\\_system\\_basics.html](https://www.solaronline.com.au/solar_system_basics.html). [Kasutatud 14 mai 2020].
- [34] „Off-Grid Battery Bank Sizing,“ Wholesale SOLAR, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wholesalesolar.com/solar-information/battery-bank-sizing>. [Kasutatud 14 mai 2020].
- [35] „Photovoltaic geographical information system,“ European Commission, [Võrgumaterjal]. Available: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html#PVP](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP). [Kasutatud 02 mai 2020].
- [36] S. M. Qaisar, W. M. Alzahrani, F. M. Almojalid ja N. S. Hammad, „A Vehicle Movement Based Self-Organized Solar Powered Street Lighting,“ IEEE, 17 Oktoober 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8868384>. [Kasutatud 18 mai 2020].
- [37] „Rechargeable Deep Cycle Lithium Lifepo4 Solar Battery 12V 80AH,“ AliBaba, [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/China-Factory-Rechargeable-Deep-Cycle-Lithium\\_60838360705.html?spm=a2700.7724857.normalList.59.39a67c78Gfe9B2&bypass=true](https://www.alibaba.com/product-detail/China-Factory-Rechargeable-Deep-Cycle-Lithium_60838360705.html?spm=a2700.7724857.normalList.59.39a67c78Gfe9B2&bypass=true). [Kasutatud 18 mai 2020].
- [38] „Jalandid, mastid, mastitarvikud,“ Esvika, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.esvika.ee/tootekategooria/valgustus/jalandid-mastidtarvikud/>. [Kasutatud 13 mai 2020].