



Robert Malmet

**ERINEVATE VALGUSTI MUDELITE
ARVU MÕJU
TEEVALGUSTUSLAHENDUSELE**

LÕPUTÖÖ

**Tehnikainstituut
Elektritehnika õppekava**

Tallinn 2023

Autori deklaratsioon

Mina,

Robert Malmet,

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendajad: Margus Leoste, Liis Luik

Kuupäev:

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1. Lõputöö eesmärk	5
2. Lõputöö teema valik ja uurimise vajalikkus	5
3. Lõputöös kasutatav teelõik.....	6
4. Lõputöö struktuur	7
1. TEEVALGUSTUSE MÕISTED	8
2. VALGUSTUSLAHENDUSE KOOSTAMISE PROTSESS.....	10
3. TEEDE VALGUSTUSKLASSI MÄÄRAMINE	11
3.1 Klasside tutvustus	11
3.2 Klasside tüübid	11
3.3 Määramise meetodika.....	12
4. KASUTATUD VALGUSTID	14
4.1 Nõuded valgustitele	14
4.2 Valitud valgustid.....	14
4.3 Valgustite hämardamine	16
5. VALGUSARVUTUSTE LÄHTEANDMETE MÄÄRAMINE.....	19
5.1 Tee parameetrid	19
5.2 Mastide parameetrid	19
5.3 Konsoolide parameetrid.....	20
5.4 Valgusti optikad.....	21
6. VALGUSARVUTUSTE KOOSTAMINE	23
7. VALGUSTUSLAHENDUSED	26
7.1 I variant.....	26
7.2 II variant	28
8. VALGUSTUSLAHENDUSTE VÕRDLUS	31
8.1 Toimivusnäitajad	31
8.2 Energiatarbimine	33
8.3 Energiatõhususnäitajad	36
9. ERINEVATE VALGUSTI MUDELITE ARVU MÕJU RIKETE KÕRVALDAMISELE	40

KOKKUVÕTE.....	41
SUMMARY	42
VIIDATUD ALLIKAD.....	43
Lisa 1. Valgustuslahenduse I variandi valgusarvutuste tulemused	45
Lisa 2. Valgustuslahenduse II variandi valgusarvutuste tulemused.....	49

SISSEJUHATUS

1. Lõputöö eesmärk

Käesoleva lõputöö eesmärk on uurida valgusti mudelite arvu mõju teevalgustuslahenduse erinevatele aspektidele kahe erineva sõidutee valgustuslahenduse põhjal. Töös võrreldakse lahenduste toimivusnäitajaid, koguvõimsust, elektrienergia kulu ja hinda ning mõju rikete kõrvaldamisele. Lõputöö tulemusena selgub, kas sõidutee valgusti mudelite arvu piiramine on õigustatud ning millised on valgustuslahenduste toimivusnäitajate erinevused. Kogutud info põhjal selgub millise lahenduse kasutamine on antud teelõigul ratsionaalsem.

Eesmärgi saavutamiseks koostas autor teevalgustusprojekti raames sõidutee lõikudele kaks valgustuslahenduse varianti. Üks lahendustest on optimeeritud erinevate valgusti mudelite arvu vähendamiseks rikete kõrvaldamise lihtsustamise nimel. Teises lahenduse variandis on keskendutud energiatarbimise vähendamisele, mille saavutamiseks on kasutatud rohkem erinevate võimsustega valgusteid. Valgusarvutuste tulemuste analüüsimise ja koostatud võrdlustabelite põhjal on leitud mõlema lahenduse eelised ja puudused.

2. Lõputöö teema valik ja uurimise vajalikkus

Lõputöö teema uurimise vajadus tekkis autori tööülesannete käigus ettevõttes Contactus AS. Ettevõtte tegeleb elektrialase ehitusprojekteerimise, konsultatsiooni ja ekspertiisi osutamisega. Tänavavalgustuse projekteerimise käigus pidi autori välja selgitama, kas erinevate valgusti mudelite arvu oleks kasulik tee valgustuslahendustes piirata. Samuti soovis autor välja uurida, mille poolest erinevate valgusti mudelite arvuga valgustuslahendused erinevad. Lõputöös kasutatud projekti ei saa autor nimetada tellija soovi tõttu. Antud projekt osutus uurimiseks siiski sobivaks mahu ning ajakava poolest. Lõputöö raames kogutud teadmised tulevad kasuks projekteerimistöös ka edaspidi.

Tänavavalgustus on saanud linnaruumi lahutamatuks osaks, millest suuresti sõltub linna elukeskkonna kvaliteet ja ohutus. Teevalgustuspaigaldiste kujundus ja seadmete paigutus mõjutavad ka teede esteetilist ilmet ja teekeskkonda nii päeval kui ka öösel. See kehtib nii tee kasutajate kui ka paigaldist eemalt vaatlevate inimeste kohta.

Päevastest nägemisoludest lähtuvalt tuleb tähelepanu pöörata järgmistele aspektidele: [1]

- valgustite paigaldusviis;
- valgustusmastide paigutus ja kõrgus;
- valgustite ja mastide kujundus;
- valgustite konsoolide pikkus ja kalle.

Öistest nägemisoludest ja nägemiskomfordist lähtudes tuleb tähelepanu pöörata aspektidele: [1]

- valguse värvimulje ja valgustusmulje;
- paigaldise kui terviku valgustusmulje;
- värviesitus;
- valgustite paigalduskõrgus;
- otsevalguse juhendav toime;
- valgustaseme perioodiline vähendamise võimalus.

Tänavavalgustuse projekteerimisel lähtutakse eelkõige õigusaktidest, standarditest tehnilistest tingimustest, tellija soovidest, ning olemasolevast olukorrast. Parima lahenduse saavutamiseks on oluline ka tähelepanu pöörata valgustuse energiatõhususele ja hooldatavusele. Selleks, et leida tasakaal nende aspektide vahel on aga vaja teada kuidas need omavahel seotud on. [1]

3. Lõputöös kasutatav teelõik

Valgustuslahendused on koostatud Tallinna linnas asuvale ligi 6 km pikkusele sõidutee lõigule. Teel on enamasti 2+2 sõidurada. Sõidusuunad on piiratud eraldusribaga. Sõidukite liiklus on enamasti väga tihe ning liiklusolukord keerukas. Töös uuritaval lõigul kehtib asulas liiklemise kord 50 km/h piirkiirusega. Teel esineb mitmeid ülekäiguradasid ja ristmikke. Tee ääres asuvad mitmed tööstushooned, eluhooned, kaubanduskeskused, tanklad, ja bussipeatused.

Teelõigu valgustus koos elektri- ja sidevarustuse ning muude tehnovõrkudega uuendatakse täielikult rekonstrueerimise projekti raames. Lisaks uuendatakse sõidutee katendit ja haljastust, rajatakse tee äärde kõnni- ja kergliiklusteed koos tunnelitega, ehitatakse välja juurdepääsuteed. Rekonstrueerimise tulemusel muutub tänavaruum meeldivamaks ja tee liiklusohutus paremaks nii sõidukijuhtidele, jalakäijatele kui ka kergliiklejatele. Rekonstrueerimine on plaanis lõpetada hiljemalt 2025. aastal. Lõputöö raames on valgustuslahendused koostatud vaid sõiduteedele. Ülekäiguradade, tunnelite, ristmike ja kõnniteede valgustust ei käsitleta.

4. Lõputöö struktuur

Lõputöös tutvustatakse esmalt teemaga asjakohaseid teevalgustuse mõisteid ja valgustuslahenduse koostamise protsessi. Seejärel on käsitletud kõiki valgusarvutuste koostamiseks vajalike parameetrite määramist ning põhjendatud kasutatud valgustite valikut. Valgusarvutuste osas kirjeldatakse nende koostamist valgusarvutuse programmis. Valgustuslahenduste osas on välja toodud teelõikude kaupa kasutatud valgustid ja nende näitajad. Järgmisena võrreldakse koostatud lahenduste energiatõhusust, toimivusnäitajaid ning rikete kõrvaldamise keerukust. Lõpuks tehakse kogutud info põhjal järeldused erinevate valgustite arvu mõju kohta.

1. TEEVALGUSTUSE MÕISTED

Järgnevas loetelus on välja toodud tähtsamad mõisted, mis on valgustuslahenduste koostamisel asjakohased [1], [2], [3], [4]:

- **valgusvoog** on inimsilma poolt valgusena tajutav kiirgusvoog, mis näitab kui palju valgust valgusti kiirgab, ühikuks on lumen (lm);
- **valgusviljakus** on valgusvoo ja tarbitava energia jagatis ehk valguslik kasutegur, see on tähtsaim valgusallikate ökonoomsust iseloomustav suurus, mille ühikuks on lumen vati kohta (lm/W);
- **valgustustihedus** on pinnaelemendile langev valgusvoog pinnaühiku kohta, ühikuks luks (lx);
- **heledus** iseloomustab valgustugevuse näivat tihedust valgust kiirgaval või peegeldaval pinnal, sõltub vaataja vaatenurgast ja pinna peegeldusvõimest, ühikuks on kandela ruutmeetri kohta (cd/m^2);
- **teepinna keskmine heledus L_m** on heleduse keskväärtus tee pindalal, mis määrab heleduse üldtaseme, millega sõidukijuhi silmad kohanevad, teevalgustuses kasutataval madalal valgustustasemel tõstab heleduse suurendamine kontrastitundlikust, nägemisteravust ning vähendab rägust, teevalgustuse projekteerimisel on see tähtsaim parameeter, ühikuks on cd/m^2 ;
- **teepinna heleduse üldühtlus U_0** on heleduse vähimväärtuse ja keskväärtuse jagatis, mis iseloomustab üldist heleduse varieerumist ning teepinna toimet taustana teemärgistuste, esemete ja teise liiklejate eristamisel;
- **teepinna heleduse pikiühtlus U_1** on vähim tee iga raja kohta määratud teepinna heleduse vähima ja suurima väärtuse suhtest sõiduraja keskjoonel, iseloomustab teepinna heledate ja tumedate osade märgatavat vaheldumist, pikiühtluse mõju on tunda pikkadel katkematutel teeosadel;
- **teepinnal oleva eseme heledusläve kõrgenemistegur TI** on eseme kontrasti suhteline suurenemine, mida on vaja nähtavusläve säilitamiseks teevalgustitest tingitud pimestusräguse olemasolul, iseloomustab asjaolu, et kuigi teevalgustus parandab nähtavust, tekitab see ka pimestusrägust, mis on põhjustatud valguse hajumisest inimsilmas, mis kaldub inimese vananemisel tugevnema, kuid selle mõju on individuaalne;
- **tee naaberriba ääre valgustustihedussuhe R_{EI}** on vahetult tee kõrval kulgeva riba ja sõidutee äärmise riba rõhttasandilise keskmise valgustustiheduse suhe, kusjuures mõlema riba laius on võrdne tee ühe sõiduraja laiusega, sõidutee mõlemal äärel ja lahutatud sõidusuundadega ühe

suuna sõidutee mõlemal äärel on selle väärtused erisugused, nõutud R_{EI} vähimväärtust peavad kõik väärtused rahuldama, iseloomustab seda, et üksnes sõidutee pinnaga piirduv valgustus ei ole piisav tee vahetu ümbruse ja tee ääres liikuvate teekasutajate tuvastamiseks;

- **valgustusklass** on määratud fotomeetriliste nõuete kogumiga, mis arvestavad tee kasutaja nägemisnõudeid teatava teeliigi ja ümbruse korral, valgustusklasside iga arvjada esindab järjestikku vähenevaid nõudeid ja kujundavad seega valgustustasemete astmeid, normaalvalgustusklassi keskmist heledust või valgustihedust iseloomustab suurim väärtus, mingis talitus ajavahemikus, adaptiivvalgustuse puhul muudetakse teepinna heledust või valgustihedust olenevalt liiklusvoost, ajast, ilmast või muudest parameetritest;
- **paigaldise hooldetegur** on valgustiheduse hooldeväärtuse ja alg-valgustustiheduse jagatis, mis sõltub lampide hooldetegurist ja elueategurist ning valgustite hooldetegurist.

2. VALGUSTUSLAHENDUSE KOOSTAMISE PROTSESS

Valgustuslahenduste koostamisel tutvuti esmalt lähteandmetega nagu valgustuse tehnilised tingimused ja teede geodeetilise alusplaan. Seejärel uuriti välja tee eripärad, mille põhjal arvutati välja tee valgustusklass. Teevalgustuse toimivusnõuded, mida tuleb valgustuse projekteerimisel järgida, tulenevad eelnevalt määratud valgustusklassist vastavalt standardile. Valgustuslahenduse koostamisel on juhitud peamiselt EN 12301 standardisarjast. Enne valgusarvutuste koostamist oli vaja määrata ka tee hooldetegur ning panna paika mastide vahekaugus ja kõrgus. Valgustuslahendustes kasutatud valgustite valikul lähtuti tehnilistest tingimustest.

Kui algandmed olid teada, koostati programmi Dialux Evo abil valgusarvutused. Selleks oli vaja teede alusplaanilt leida erineva laiuse või sõiduradade arvuga lõigud, mis nõudsid Dialuxis eraldi valgusarvutust. Kõikidele lõikudele koostati kaks valgustuslahenduse varianti, mis erinesid peamiselt valgusti mudelite arvu poolest. Arvutuste käigus selgus kasutatavate valgustite võimsus, optika, korpuse suurus, konsoolide pikkus ja kalle. Seejärel koostati ka valgustite paigutuse kiht välisvõrkude plaani jaoks, mille alusel hiljem projekteeriti kaablitrassid ja kilbid.

Kui valgustuslahendused olid valmis, sai võrrelda variantide valgusti mudelite arvu, koguvõimsust, energiatõhususnäitajaid ja aastas tarbitud elektrienergia hinda. Seejärel uuriti antud teelõigu valgustuse korrashoiuga tegelevast ettevõttest, kuivõrd koostatud lahendused erinevad rikete kõrvaldamise keerukuse poolest. Viimaks tuli koostada võrdlustabelid, kuhu on koondatud uurimistulemused, neid analüüsida ning teha selle põhjal järeldused.

3. TEEDE VALGUSTUSKLASSI MÄÄRAMINE

3.1 Klasside tutvustus

Valgustusklassid määratakse teedele vastavalt nende otstarbele ja liiklejate koosseisule. Nendest tulenevad minimaalsed toimivusnõuete väärtused, mis peavad olema vastavatel teedel tagatud. Toimivusnõuded on klassidel erinevaid olenevalt teede erivajadustest. Kõiki valgustusklasside nummerdatakse ühest kuueni toimivusnõuete vähenemise suunas. Erinevate valgustusklasside määratlemist ja valiku juhiseid käsitleb standard CEN/TR 13201-1:2014. [5]

Sõiduteed kuuluvad M valgustusklassi, kuhu kuuluvad eelkõige mootorsõidukitele mõeldud liiklusteed, mis võimaldavad kasutada mõõdukat kuni suurt kiirust. M klasside peamiseks kriteeriumiks on teepinna heledus, mida väljendatakse keskmise heleduse, heleduse üldise- ja pikiühtlusega kuiva teepinna korral. Lisakriteeriumiteks on pimestusräigus, mida väljendatakse heledusläve kõrgenemisteguriga ning ümbrusalade valgustusega, mille väljendamiseks kasutatakse ääre valgustustihedust. [5]

Sageli koosnevad avalikud piirkonnad enam kui ühest liikluspiirkonnast, sõidutee kõrval võib kulgeda näiteks kõnni- või kergliiklustee, mis kuulub P valgustusklassi. Piirkondasid, kus sõidukivood ristuvad üksteisega või kattuvad muud liiki liiklejate kasutatavate piirkondadega nimetatakse konfliktpiirkondadeks ja jagatakse C klassidesse. Nendeks loetakse ka teegeomeetria muutuspiirkondi, näiteks sõiduradade arvu või tee laiuse muutumist. Erinevalt M valgustusklassist on P ja C klasside peamiseks valgustuskriteeriumiks rõhtpinna valgustustihedus. [5]

3.2 Klasside tüübid

Normaalvalgustusklassi valiku puhul arvestatakse teede parameetrite suurimaid väärtusi näiteks suurimat liiklusvoogu. Sellisel viisil leitud klassi rakendamine ei pruugi end igal ajal õigustada, kuna ilmastikuolud, liikluskoormus, teepinna seisund ja peegeldusomadused on muutlikud. Arvestatavate parameetrite ajalised muutused võivad nõuda valgustuse heleduse või valgustustiheduse normaalse taseme kohandamist, enamasti madaldamise teel. Seda teostatakse adaptiivse teevalgustuse paigaldamisega, mille kasutamist õigustab lisaks nägemisnõuete muutumisele ka energiatarbimise vähenemine ja keskkonnaolude parandamine. [5]

Adaptiivsete klasside tasemeid peavad võrduma klassi keskmise heleduse või valgustihedusega samade tabelite järgi, millest normaalvalgustusklass on valitud. Adaptiivvalgustuse kasutamisel on tähtis, et valgustustaseme muutmine ei halvendaks teisi kvaliteedinõudeid alla valgustusklassi lubatavaid piire. Sobiva adaptiivvalgustusklassi valikuparameetreid on erisuguseid. [5]

3.3 Määramise metoodika

Valgustusklassi määramisel võetakse arvesse [5]:

- tee projekt- või piirkiirust;
- liiklusvoo hulka;
- liikluskoosseisu;
- teede eraldatust;
- teesõlmede arvu;
- pargitud sõidukite olemasolu;
- ümbruse valgustatust;
- liikluskeerukust.

Üheks tee valgustusklassi määramise meetodiks on leida tabeli (Tabel 1) järgi kaaluväärtused V_w ja nende summa V_{ws} . Seejärel saab kasutada M valgustusklassi puhul valemit (1) [5]

$$M = 6 - V_{ws} \quad (1)$$

Kui kaaluväärtuste summa on väiksem kui 0, siis tuleb selleks lugeda 0. Kui M klassi number on 0 või sellest väiksem, siis tuleb rakendada klassi M1. Sobiva valgustusklassi lõplikul määramisel peab kindlasti arvestama reaalse olukorra ja eripärasustega. [5]

Tabel 1. M valgustusklassi kaaluväärtuste tabel [5]

Parameeter	Variandid	Kirjeldus ^a		Kaalu- väärtus V_W ^a
Projektkiirus või kiiruse piirväärtus	Väga suur	$v \geq 100$ km/h		2
	Suur	$70 < v < 100$ km/h		1
	Mõõdukas	$40 < v \leq 70$ km/h		-1
	Aeglane	$v \leq 40$ km/h		-2
Liiklusvoog		Autoteed ja mitmerajalised teed	Kahe- ja kolmerajalised teed	
	Suur	Üle 65 % suurimast väärtusest	Üle 45 % suurimast väärtusest	1
	Mõõdukas	35 % kuni 65 % suurimast väärtusest	15 % kuni 45 % suurimast väärtusest	0
	Väike	Alla 35 % suurimast väärtusest	Alla 15 % suurimast väärtusest	-1
Liikluskoosseis	Segaliiklus mittemootorliikluse kõrge osakaaluga			2
	Segaliiklus			1
	Üksnes mootorliiklus			0
Sõiduteede eraldamine	On			1
	Ei ole			0
Teesõlmede tihedus		Ristmikke kilomeetri kohta	Eritasandiliste sõlmede vahemaa km	
	Kõrge	Üle 3	Alla 3	1
	Mõõdukas	Kuni 3	Alates 3	0
Pargitud sõidukid	On			1
	Ei ole			0
Ümbruse valgustus	Tugev	Vaateaknad, reklaampaigaldised, spordiväljakud, jaamapiirkonnad, laopiirkonnad		1
	Mõõdukas	Normaalolukord		0
	Nõrk			-1
Liikluskeerukus	Väga keerukas			2
	Keerukas			1
	Lihtne			0

^a Veerus esitatud väärtused on toodud näitena. Rahvuslikul tasandil võib kasutada meetodi kohandamist või sobivamaid kaaluväärtusi.

Lõputöös kasutatud sõidutee valgustusklassi kaaluväärtused on valitud järgmiselt:

- piirkiiruseks on 50 km/h, $V_W = -1$;
- teel on suur liiklusvoog, $V_W = 1$;
- liikluskoosseisu moodustab peamiselt mootorliiklus $V_W = 0$;
- sõiduteed on eraldatud, $V_W = 1$;
- teesõlmede tihedus km kohta on kõrge, $V_W = 1$;
- pargitud sõidukeid ei esine, $V_W = 0$;
- tee ümbrus on mõõdukalt valgustatud, $V_W = 0$;
- teed on liikluskeerukuse poolest keerukad, $V_W = 1$.

Kaaluväärtuste summaks $V_{W\S}$ saadi 3. Kasutades valemit (1) kujunes sõidutee valgustusklassiks M3.

4. KASUTATUD VALGUSTID

4.1 Nõuded valgustitele

Antud teelõigu rekonstrueerimise käigus uuendatakse valgustus täielikult. Olemasolevad kõrgrõhu-naatriumvalgustid asendatakse tänapäevaste pikema elueaga, kõrgema valgusviljakusega ja parema värviedastusindeksiga LED valgustitega. Lisaks projekteeritakse uued kaablitrassid ja paigaldatakse uued mastid. Valgustid on valitud vastavalt Tallinna välisvalgustuse tehnilistele tingimustele. Tähtsamad nõuded valgustitele on järgmised:

- LED tüüpi valgusti;
- 230V nimipinge;
- värvustemperatuur 3000K;
- vandaalikindlus paigalduskõrgusele: ≥ 6 m IK07, < 6 m IK08M;
- IP66 kaitseaste;
- värviedastusindeks ≥ 70 ;
- CLO funktsioon;
- CE JA ENEC+ sertifikaat;
- vastavus uuringule ET-2 0102-0329 ja standardile EN 62471.

4.2 Valitud valgustid

Lõputöö raames koostatud valgustuslahendustes on kasutatud Philips Unistreet Gen2 seeria valgusteid, kuna need vastavad tehnilistele tingimustele ning selle seeria valgusteid võib leida ka teistel teelõikudel Tallinnas. Sobilik osutus ka Philips Digistreet seeria, millel on erinev korpuse disain ja veidi parem valgusviljakus. Soodsama hinna pärast osutusid Unistreet Gen2 seeria valgustid sobivamaks.

Unistreet Gen2 valgustid on kõrge efektiivsusega ja sooda hinnaga ning sobivad kasutamiseks teede ja tänavate valgustitena suuremahulistes rekonstrueeringutes. Valgustid on saadaval laia optikate valiku ja võimsustega ning on hämardatavad. Unistreet Gen2 seeria valgusteid on saadaval 5 erineva korpuse suurusega (Joonis 1) vastavalt valgusallika võimsusele ja valgusvoole. Igale valgusti korpusele on saadaval palju erinevaid LED moodulite mudeleid. Tänu kergesti lahti võetavale korpusele on valgustite paigaldamine ja hooldamine lihtne. Kõiki valgusti näitajaid saab kiiresti identifitseerida skaneerides

valgusti korpusel või masti luugil olevat Philipsi hooldusmärgist. Liiteseade ja liigpingepiirik on valgusti korpusesse integreeritud. Valgusti sisu on välja toodud joonisel (Joonis 2). Valgusti korpusel on ka kaks 24 V Zhaga pistikupesadega- üks üleval ja teine allpool, mis võimaldavad koheselt või tulevikus lisada valgustuse kontrollimiseks andureid või mooduleid. [6] Kahe Zhaga pistikupesade olemasolu on tehnilistes tingimustes nõutud, kuigi praeguses valgustuslahenduses koheselt sinna midagi ei ühendata.



Joonis 1. Philips Unistreet Gen2 valgustite korpused [7]

LED valgustite vananemisel valgusvoo langemise hoiab ära CLO funktsioon, mis tagab konstantse valgusvoo aja jooksul valgusallika voolu lineaarse suurendamise teel. CLO funktsiooni saab vajadusel sisse ja välja lülitada. Kasulikuks elueaks on valgustitel arvestatud 100000 h. Kui CLO on välja lülitatud, säilib Unistreet Gen2 valgustitel eluea lõpus 90 % algsest valgusvoost, mille korral 10 % LED moodulite valgusvoog võib olla sellest madalam. Valitud valgustite värvusetemperatuur on 3000K nagu Tallinna sõiduteevalgustitel on nõutud. Valgustite CRI ehk värviedastusindeks on 70, mis on piisav sõidutee valgustitele. Parema CRI-ga valgustid osutusid kallimateks ning nende valgusviljakus oli madalam. [6]



Joonis 2. Philips Unistreet Gen2 valgusti sisu [7]

Unistreet Gen2 valgustite põrutusklass on IK08 ja IP astmeks on IP66. Valgustid taluvad seega 5 J kokkupõrkeenergiat ning on kaitstud igasuguse tolmu ja igast suunas tuleva veejoa vastu. Valgustite konstruktsioon minimeerib valgusreostuse ja valgusspekter loomade elukeskkonna rikkumise. Tehnilistes tingimustes nõutud sertifikaadid, standardile vastavused, 5 aastane garantii ning 10 aastane varuosade saadavus on tagatud. [6]

4.3 Valgustite hämardamine

Valgustite hämardamine toimub Tallinna kommunaalameti käskkirja järgi. Valgustusklasside kaupa on määratud valgustite hämardamine teatud kellaaegadel (Tabel 2). Väiksema liiklusvooga ja madalamate valgustusnõuetega kellaajal valgustuse hämardamisel väheneb oluliselt paigaldise energiakulu ja valgusreostus. Ühtlasi pikeneb ka LED valgustite eluiga madalama võimsusega talitluses. Tallinnas hämardatakse vähemalt 70 W võimsusega valgusteid, muud valgustid töötavad nimivõimsusel.

Tabel 2. Tallinna välisvalgustuse hämardamise juhised [8]

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

Antud valgustuslahenduses toimub hämardamine astronoomilise kella ja anduriga hämaralüliti (Joonis 3) abil. Üks astronoomiline kell on integreeritud valgusti liiteseadmesse, mis võimaldab seadistada valgusti võimsuse taset vastavalt kellaajale. Valgustile tehases määratud hämardamise tasemeid saab hiljem arvutiga ühendades ümber programmeerida valgustitootja programmi abil. Liiteseadmel on selle jaoks programmeerimisklemmid. Valgustuse toitekilbi taga asuv hämaraandur edastab valgustitele signaali valgustiheduse vähenemisel valgustite toitekaabli juhtsoone kaudu. Valgustuse kilbis asub ka teine astronoomiline kell, mis on ühendatud hämaralülitiga rööbiti. See hoiab ära olukorra, kui hämaraandurile langev valgus, näiteks sõidukite tuledest, lülitab pimedal ajal selle välja, mille tõttu võib juhtuda, et valgustid töötavad hämardatud režiimi asemel täisvõimsusel. Kui valgustite juhtsoon on pingestatud, siis kõik valgustid hämardatakse ettemääratud võimsusele. Vastasel juhul töötavad valgustid täisvõimsusel.



Joonis 3. Anduriga hämaralüliti näide [9]

Selline hämardamise viis on odav ja lihtne, kuid puuduseks on üksiku valgusti rikke tuvastamise, mis on võimalik vaid visuaalse vaatluse käigus. Samuti on hämardamise astmete hilisem muutmine raskendatud, kuna neid tuleb ümber muuta valgusti kaupa ning vajalik on ligipääs valgusti sees olevale liiteseadmele.

5. VALGUSARVUTUSTE LÄHTEANDMETE MÄÄRAMINE

5.1 Tee parameetrid

Lisaks valgustusklassile tuleb enne valgusarvutuste koostamist teelõigule ja valgustuspaigaldisele määrata mitmeid parameetrid lähteandmetena. Järgnevalt on kirjeldatud nende valikut.

Hooldetegurit kasutatakse, et valgustusnõuded oleksid tagatud paigaldise kogu eluea jooksul. Hooldetegur määratakse valemiga (2) [10]

$$f_M = f_{LF} \cdot f_S \cdot f_{LM} \cdot f_{SM}, \quad (2)$$

kus	f_M	– hooldetegur;
	f_{LF}	– valgusvoo säiletegur, mis väljendab valgusallika vananemise tõttu valgusvoo vähenemist, CLO valgusti korral $f_{LF} = 1$;
	f_S	– elueategur, mis iseloomustab valgusallikat rikke korral, valgusti üksikasenduse korral $f_S = 1$;
	f_{LM}	– valgusti hooldetegur, mis iseloomustab valgusti mustumise mõju valgusvoole;
	f_{SM}	– pindade hooldetegur, mis võtab arvesse pindade mustumisel peegeldamisvõime vähenemist, välisvalgustuse v.a maa-aluste paigaldiste puhul $f_{SM} = 1$.

Teelõigu hooldetegur vastavalt valemile on:

$$f_M = 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 1 = 0,8$$

Teepinna klassiks on määratud rahvusvahelise valgustuskomisjoni CIE standardi järgi R3, mis tähistab tumeda täitematerjaliga krobeline pinnaga mõnevõrra kulunud kuiva asfaltteed. Antud klassi keskmine heleduse koefitsient on 0,07. [11]

5.2 Mastide parameetrid

Valgusti mastide vahe on sõiduteedel 40 m. Selline vahekaugus osutus teelõikude pikkust, laiust ja ristmikke arvestades optimaalseks. Valgustusmastide vahe suurendamine võib vähendada lahenduse

ehitusmaksumust kuna teelõigule paigaldatavate mastide arv väheneb. Suurem mastide vahe võib samas tähendada võimsamate ja kallimate valgustite vajadust. Mastide vahekauguse valikul on arvestatud tee geomeetriaga. Teelõigul ühtlane mastide paigaldamise vahe ei ole alati võimalik ristmike tõttu või kui teelõik lõppeb enne järgneva masti paigaldamise vahekaugust. Nendel juhtudel on vajalik kohati mastide vahekaugust vähendada. Seda on mõttekas teha enne ristmikke, aga mitte tee lõigu keskel. Nii on võimalik saavutada ühtlane mastide vahekaugus ülejäänud teelõigul ja ristmike juures parem valgustatus. Kuna ristmikel on liiklusolukord keerulisem, siis on valgustusega ristmike esile tõstmine ja sõidukijuhtide tähelepanu suurendamine kasulik. Maste on võimalik paigaldada ka vaheldumisi, kuid see ei osutunud antud teelõigul mõtekaks, kuna teelõigul on palju ristmikke. Sõidutee äärde paigaldatud mastide kaugus teest jääb 0,5 m ja 2 m vahele.

Mastide kõrgus on vahekaugusega tihedalt seotud. Sõidutee lõikude valgustusmastide kõrguseks on valitud 12 m, mis on vastavalt tehnilistele tingimustele suurim lubatud masti kõrgus. Kõrge masti kasutamine võimaldab suurendada mastide paigaldamise vahekaugust, kuna tee langeb valgusvoog laiemalt. Liiga kõrge masti puhul valgustatakse teega külgnevat ala, ning teel on keskmine heledus madalam kui madalama masti puhul. Liiga madala masti korral halveneb valgustuse ühtlus kuna tee tekivad suure heledusega alad, kuigi ülejäänud tee võib olla alavalgustatud. Masti kõrguse valikul lähtutakse ka sobivusest konkreetse keskkonda. Madalamad mastid on paremad tee visuaalse üldmulje poolest. Valgustusmastidele kinnitatakse üks või kaks valgustit. Võimalusel kasutatakse sõidu-, kõnni- ja kergliiklusteede valgustamiseks ühiseid maste.

5.3 Konsoolide parameetrid

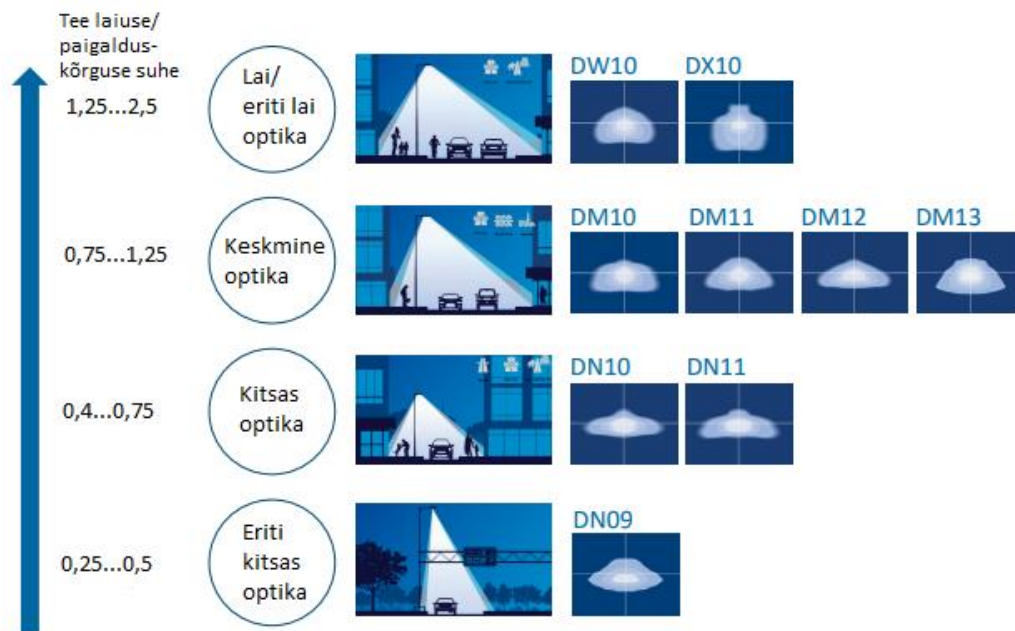
Valgustuslahendustes on kasutatud konsoole pikkusega 0,5 m kuni 2 m. Vajalik konsooli pikkus sõltub masti kaugusest sõiduteeni ja tee laiusest. Konsooli pikkus on teelõigul valitud nii, et valgusti asetseks eelistatult sõidutee ääre kohal või sellele võimalikult lähedal. See on soovitatav, sest siis ei lange osa valgusvoost teega külgnevale alale, mille valgustamine ei ole eesmärgiks. Selline valgusti asetus osutus valgustuslahendustes kasutatava valgusti optika puhul optimaalseks. Konsooli pikkus võiks olla lahenduse hea visuaalse mulje jätmiseks mastidel ühtlane ja võimalikult lühike. Tee laiematel lõikudel või siis, kui valgustusmast on paigaldatud laia eraldusriba keskele, tuleb paratamatult valgustusnõuete saavutamiseks kasutada pikemat konsooli. Puuduseks pikema konsooli puhul on ka see, tugev tuul avaldab sellele rohkem mõju.

Konsooli kalle on enamasti 0° . Erinevalt varem kasutatud kõrgrõhu-naatrium valgustitest võimaldavad LED valgusti erineva valgusjaotuse laiusega optikad teed valgustada ka kaldeta konsooliga. Kaldega konsooli kasutamine võib suurendada teekasutajatele diskomfortrõiguse tekkimise võimalust. Samuti on valgustuslahendus visuaalselt parem kui konsoolid on sama kaldega. Laia teelõigu valgustamiseks, vaid ühel pool teed paiknevate valgustitega võib aga kaldega konsooli kasutamine olla vajalik.

5.4 Valgusti optikad

Valgustite optika valikul tutvuti esmalt valgusti tootja poolt avaldatud juhtumuringuga. See sisaldas joonist tüüpiliste sõidutee optikatega (Joonis 4), mille alusel võib leida tee sobiva optika, kui on teada tee laiuse ja masti kõrguse suhe. Lõputöös käsitletud teelõigul on ühes suunas enamasti kaks või kolm 3,5 m laiust rada ja paigaldatavad mastid on 12 m kõrged. Selle alusel osutusid sobivaks kitsa ja keskmise valgusjaotusega optikad. Täpsed optika tüübid selgusid hiljem valgusarvutuste käigus. Philips pakub ka paljusid teisi optikaid kasutamiseks, kui teedel on kehtestatud erinõuded, näiteks näotuvastuse või valguse ühtluse osas. Antud valgustuslahendustes ei olnud nende jälgimine vajalik.

Tee laiusele vastavalt õige optika valik on valgustuse projekteerimisel väga oluline. Liiga laia valgusjaotusega optika ei valgusta kitsast teed tõhusalt, ning suur osa valgusest langeb teega külgnevale alale. Selle tulemusena on vähenenud lahenduse energiatõhusus ning suureneb valgusreostus. Liiga kitsas optika aga ei valgusta laia teed täies ulatuses piisavalt ning teepinna heledus on ebaühtlane. Õige optika valik lahendab ka näiteks olukorra, kui üks rööpselt kulgevatest teedest on üle või alavalgustatud. Selline probleem võib tekkida kui sõidutee ja kõnnitee on valgustatud samade valgustitega.



Joonis 4. Philipsi sõidutee optikate valiku juhis [12]

6. VALGUSARVUTUSTE KOOSTAMINE

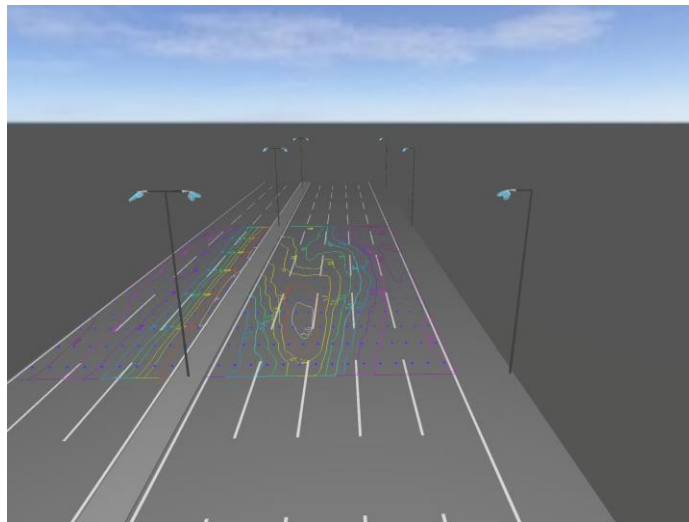
Kui teede ja mastide parameetrid said määratud ja valgustid valitud, siis loodi Dialux Evos vajalikud teelõigud. Selleks uuriti teede geodeetilist alusplaani, et välja selgitada, millistele lõikudele tuleb teha eraldi arvutus. Kuigi käsitletav tee on enamasti 2+2 radadega, siis kohati on teel ühes suunas kuni 5 sõidurada ja tee laius varieerub 7 m ja 17,5 m vahel. Samuti varieerub sõiduradade eraldusriba laius ja valgustite paigutus. Valgustusmastid on paigaldatud tee eraldusribale või tee äärde. Tee laiemad lõigud võivad vajada võimsamaid valgusteid, pikemat konsooli või laiema valgusjaotusega optikat.

Valgusarvutusprogrammis teedele pikkust ei määrata. Valgustusnõuete hindamisväljaga vaadeldakse, vaid ühte tee mastide vahelist osa. Valgustuslahenduse toimivuse tagamiseks tervel rekonstrueeritaval teelõigul oli vaja Dialux Evo programmi sisestada kokku 9 erinevat lõiku. Lõputöös rekonstrueeritaval teel kõnniteede, ristmike ning ülekäiguradade valgustust ei käsitleta. Nende puhul valgusti mudelite arvu muutmine ei olnud vajalik ja seega ei ole nende valgustuse uurimine lõputöö eesmärgi saavutamiseks asjakohane.

Kui teelõigud olid Dialux Evo programmi sisestatud, sai kontrollida kas eelnevalt valitud valgustite paigutus, optika ja masti kõrgus on sobivad hea valgustuslahenduse loomiseks. Dialux Evo teelõikude hinnanguväljade tulemuste (Joonis 5) abil saab lihtsalt jälgida tee valgustusnõuete täitmist. Määrates teelõigule valgustusklassi, kuvab Dialux Evo vastava klassi nõudeid ning koostatud lahenduse vastavust nendele, mida saab pärast igat muudatust jooksvalt jälgida. Parameetri nõuetele vastavus on tähistatud rohelise linnukesega. Programm loob ka teelõikudest 2D ja 3D kujutuse (Joonis 6) mida saab soovi korral jälgida. Korrekse kujutuse jaoks on vaja, et valgustite fotomeetria failis oleks korrektne 3D mudel olemas.

Hinnanguväli (M3)	▼	Sõidutee 1 (4 rada+bussitasku) (M3)	
L_m	[cd/m ²]	✓ ≥ 1.00	1.33 ✓
U_o		✓ ≥ 0.40	0.57 ✓
U_l		✓ ≥ 0.60	0.73 ✓
TI	[%]	✓ ≤ 15	10 ✓
R_{EI}		✓ ≥ 0.30	0.61 ✓
Hinnanguväli (M3)	▼	Sõidutee 2 (3 rada) (M3)	
L_m	[cd/m ²]	✓ ≥ 1.00	1.09 ✓
U_o		✓ ≥ 0.40	0.45 ✓
U_l		✓ ≥ 0.60	0.76 ✓
TI	[%]	✓ ≤ 15	11 ✓
R_{EI}		✓ ≥ 0.30	0.61 ✓

Joonis 5. Dialux Evo hinnanguvälja näitajate väärtused

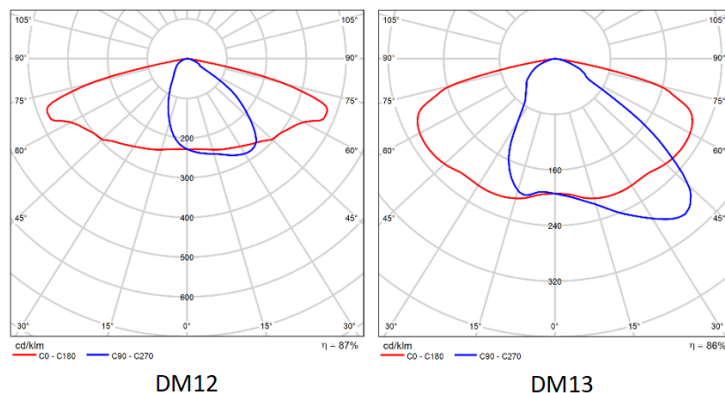


Joonis 6. Dialux Evo tee 3D vaade

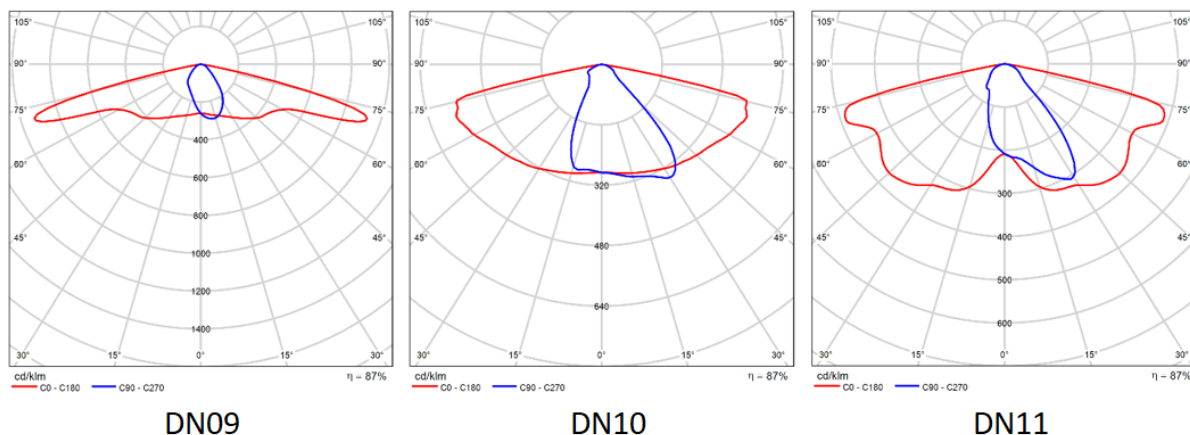
Eelnevalt määratud M3 valgustusklassi puhul peavad olema tagatud järgmised toimivusnõuete väärtused [1]:

- keskmine heledus $L_m \geq 1,00 \text{ cd/m}^2$;
- heleduse üldühtlus $U_o \geq 0,40$;
- heleduse pikiühtlus $U_l \geq 0,60$;
- heledusläve kõrgenemistegur $TI \leq 15$;
- ääre valgustustihedussuhe $R_{EI} \geq 0,30$.

Valgustuslahenduse optimeerimiseks oli vaja Dialux Evo programmi laadida erinevad valgusti ULD faile valgustite andmebaasist, mis sisaldavad kõiki valgustehnilisi andmeid. Eelnevalt Philipsi juhise järgi valitud keskmise (Joonis 7) ja kitsa (Joonis 8) valgusjaotusega optikad osutusid ka valgusarvutuste järgi optimaalseks. Valgustuslahenduse I variandis kasutati valgusti mudelite vähendamiseks ainult ühte optikat DM12. II variandis kasutati lisaks kitsa valgusjaotusega optikaid nagu DN09, DN10 ja DN11.



Joonis 7. Keskmise valgusjaotusega Philipsi optikate graafikud [13], [14]



Joonis 8. Kitsa valgusjaotusega Philipsi optikate graafikud [15], [16], [17]

7. VALGUSTUSLAHENDUSED

7.1 I variant

Teelõikude valgustuslahenduse I variandis on kasutatud ainult kolme erinevat valgusti mudelit (Tabel 3), mida on 6 km pikkusel linnasisesel teelõigul üsna vähe. Valgustid erinevad peamiselt võimsuse ja valgusvoo poolest, valgusviljakus on kõikidel suurem kui nõutud 110 lm/W. I variandis koostati valgusarvutused ja valiti valgustid esmalt laiematele teelõikudele. Seejärel uuriti, kas samad valgustid sobivad ka kitsamatele lõikudele. Nii saavutati minimaalne valgusti mudelite arv. Kõik valgustid valiti DM12 optikaga, sest see oli sobilik nii kitsamatele kui ka laiematele teelõikudele (Tabel 4). Ainult kolme erineva valgusti ja üht tüüpi optikaga ei olnud enamasti võimalik saavutada ideaalset lahendust, kuid toimivusnõuded said kõikidel teelõikudel probleemideta täidetud (Lisa 1).

Tabel 3. valgustuslahenduse I variandi valgusti mudelid

Nr.	Valgusti mudel	Nimivõimsus, W	Valgusvoog, lm	Valgusviljakus, lm/W
1.	BGP282 T25 1 xLED120-4S/730 DM12	78	10440	134
2.	BGP282 T25 1 xLED160-4S/730 DM12	108	13440	124
3.	BGP283 T25 1 xLED180-4S/730 DM12	114	15840	139

Tabel 4. Valgustuslahenduse I variandi valgustid teelõikude kaupa

Nr.	Valgusti mudel	5+2 rada+ bussitasku	4+3 rada+ bussitasku	3+2 rada+ Bussitasku	3+3 rada	3+2 Rada	2+2 rada, 2 m eraldusriba	2+2 rada, 8 m eraldusriba	3 rada	2 rada
1.	BGP282 T25 1 xLED120- 4S/730 DM12	20	5	27	-	13	59	-	-	-
2.	BGP282 T25 1 xLED160- 4S/730 DM12	-	10	13	-	13	-	-	-	-
3.	BGP283 T25 1 xLED180- 4S/730 DM12	3	-	-	50	-	-	34	50	50

7.2 II variant

Valgustuslahenduse II variandis on kasutatud kokku 9 erinevat valgusti mudelit (Tabel 5), mida on 6 võrra rohkem kui I variandis. Kõikidele teelõikudele läheneti sellel korral individuaalselt valides valgusti mudelid, mis just vastavale lõigule kõige paremini sobisid. Valgustusmastide parameetreid ega paigutust ei muudetud. Selles variandis on kasutatud ka rohkem erinevaid valgusti optikaid, mille tulemusena valgustuse ühtlus enamasti halvenes. Erinevalt I variandist, kasutatakse selles variandis kitsamatel teelõikudel (Tabel 6) kitsa valgusjaotusega optikaid DN09, DN10 ja DN11. Erinevaid valgusti optikaid on kokku 6. Sellele tulemusena oli võimalik tõsta lahenduse energiatõhusust ja vähendada ebavajalike alade valgustamist.

Tabel 5. Valgustuslahenduse II variandi valgusti mudelid

Nr.	Valgusti mudel	Nimivõimsus, W	Valgusvoog, lm	Valgusviljakus, lm/W
1.	BGP282 T25 1 xLED65-4S/730 DM12	42	5874	142
2.	BGP282 T25 1 xLED109-4S/730 DM13	70	9570	137
3.	BGP282 T25 1 xLED109-4S/730 DN09	70	9680	138
4.	BGP282 T25 1 xLED109-4S/730 DN10	70	9577	137
5.	BGP282 T25 1 xLED120-4S/730 DM12	78	10440	134
6.	BGP282 T25 1 xLED149-4S/730 DM12	100	12750	128
7.	BGP282 T25 1 xLED160-4S/730 DM12	108	13440	124
8.	BGP282 T25 1 xLED160-4S/730 DN11	108	13440	124
9.	BGP283 T25 1 xLED180-4S/730 DM12	114	15840	139

Tabel 6. Valgustuslahenduse II variandi valgustid teelõikude kaupa

Nr.	Valgusti mudel	5+2 rada+ bussitasku	4+3 rada+ Bussitasku	3+2 rada+ bussitasku	3+3 rada	3+2 Rada	2+2 rada, 2 m eraldusriba	2+2 rada, 8 m eraldusriba	3 rada	2 rada
1.	BGP282 T25 1 xLED65-4S/730 DM12	-	-	27	-	-	-	-	-	-
2.	BGP282 T25 1 xLED109-4S/730 DM13	20	-	-	-	-	-	-	-	-
3.	BGP282 T25 1 xLED109-4S/730 DN09	-	-	-	-	-	-	-	-	50
4.	BGP282 T25 1 xLED109-4S/730 DN10	-	5	-	-	-	59	-	-	-
5.	BGP282 T25 1 xLED149-4S/730 DM12	-	10	-	-	13	-	-	-	-
6.	BGP282 T25 1 xLED120-4S/730 DM12	-	-	-	-	13	-	-	-	-

Nr.	Valgusti mudel	5+2 rada+ bussitasku	4+3 rada+ Bussitasku	3+2 rada+ bussitasku	3+3 rada	3+2 Rada	2+2 rada, 2 m eraldusriba	2+2 rada, 8 m eraldusriba	3 rada	2 rada
7.	BGP282 T25 1 xLED160-4S/730 DM12	-	-	13	-	-	-	-	-	-
8.	BGP282 T25 1 xLED160-4S/730 DN11	-	-	-	-	-	-	34	-	-
9.	BGP283 T25 1 xLED180-4S/730 DM12	3	-	-	50	-	-	-	50	-

8. VALGUSTUSLAHENDUSTE VÕRDLUS

8.1 Toimivusnäitajad

Võrreldes valgustuslahenduse I ja II varianti on II variandil teede keskmine heledus ligi 6 % väiksem. See tuleneb II variandis valgustite võimsuse vähendamisest. Teede keskmine heledus on II variandis viidud valgustusklassi minimaalsele väärtusele lähemale. II lahenduse variandis on valgustuse heleduse üld- ja pikkiühtlus mõnevõrra halvenenud, kuna kasutatud on rohkem erinevaid valgustite optikaid. Heledusläve kõrgenemistegur teelõikudel enamasti ei muutunud. II variandi valgustuse keskmine ääre valgustustihedussuhe oli ligi 10 % madalam kui I variandis. See viitab sellele, et tee äärsetele aladele langeb vähem valgust, mis on hea energiatõhususe poolest, kuid mõnevõrra halvem selle poolest, tee äärsed objektid on vähem nähtavad. Mõlema lahenduse korral on toimivusnäitude väärtused kõikidel lõikudel standardile vastavad ja suuri erinevusi ei esine.

Tabel 7. Valgustuslahenduse I variandi toimivusnäitajad

Teelõik	Keskmine heledus, cd/m ²	Heleduse üldühtlus	Heleduse pikiühtlus	Heledusläve kõrgenemistegur TI	Ääre valgustus- tihedussuhe R _{EI}
5+2 rada+bussitasku	1,14	0,46	0,77	11	0,60
4+3 rada+bussitasku	1,23	0,49	0,75	11	0,61
3+2 rada+bussitasku	1,38	0,53	0,81	11	0,61
3+3 rada	1,00	0,40	0,70	12	0,48
3+2 rada	1,06	0,52	0,83	11	0,60
2+2 rada, 2 m eraldusriba	1,02	0,59	0,92	10	0,85
2+2 rada, 8 m eraldusriba	1,12	0,59	0,78	11	0,71
3 rada	1,02	0,58	0,73	10	0,70

Teelõik	Keskmine heledus, cd/m ²	Heleduse üldühtlus	Heleduse pikiühtlus	Heledusläve kõrgenemistegur TI	Ääre valgustus- tihedussuhe R _{EI}
2 rada	1,12	0,73	0,90	10	0,75
Keskväärtus	1,12	0,54	0,80	11	0,66

Tabel 8. Valgustuslahenduse II variandi toimivusnäitajad

Teelõik	Keskmine heledus, cd/m ²	Heleduse üldühtlus	Heleduse pikiühtlus	Heledusläve kõrgenemistegur TI	Ääre valgustus- tihedussuhe R _{EI}
5+2 rada+bussitasku	1,07	0,49	0,80	11	0,60
4+3 rada+bussitasku	1,16	0,50	0,81	11	0,61
3+2 rada+bussitasku	1,01	0,53	0,81	11	0,61
3+3 rada	1,00	0,40	0,7	12	0,48
3+2 rada	1,03	0,52	0,83	11	0,60
2+2 rada, 2 m eraldusriba	1,08	0,48	0,84	9	0,70
2+2 rada, 8 m eraldusriba	1,01	0,51	0,72	10	0,56
3 rada	1,02	0,58	0,73	10	0,60
2 rada	1,10	0,54	0,72	12	0,52
Keskväärtus	1,05	0,51	0,77	11	0,59
Võrdlus I variandiga	6,25 % väiksem	5,56 % väiksem	3,75 % väiksem	samaväärne	10,6 % väiksem

8.2 Energiatarbimine

Tänavavalgustuse aastaseks töötundideks on arvestatud 4000h. Aastate lõikes need töötunnid tegelikkuses mõnevõrra varieeruvad ilmastikuolude tõttu. Keskmiseks tänavavalgustuse ööpäevasteks töötundideks on seega $4000 / 365 = 11$ h. Tallinna välisvalgustuse hämardamise juhise järgi töötavad valgustid M3 sõidutee puhul 75% võimsusega 2 h ööpäevas ning 50% võimsusega 6 h ööpäevas. Ülejäänud 3 h ööpäevast töötavad valgustid seega täisvõimsusel. M3 sõidutee tänavavalgustus töötab aastas tundides:

- 50% võimsusega $365 \cdot 6 = 2190$ h;
- 75% võimsusega $365 \cdot 2 = 730$ h;
- 100% võimsusega $4000 - 2190 - 730 = 1080$ h.

Teelõikude aastane energiatarbimine leiti järgnevalt:

$$E = 1080 \cdot P_h + 730 \cdot 0,75 \cdot P_h + 2190 \cdot 0,5 \cdot P_h + 4000 \cdot P_n,$$

millest avaldub valem (3):

$$E = 2722,5 \cdot P_h + 4000 \cdot P_n, \quad (4)$$

kus	E	– teelõigu aastane energiatarbimine, kWh;
	P_h	– hämardatavate valgustite koguvõimsus, kW;
	P_n	– nimivõimsusel töötavate valgustite koguvõimsus, kW.

Tallinna valgustuse hämardamise juhisele vastavalt kuuluvad hämardamisele valgustid võimsusega alates 70 W. Valgustuslahenduse energiatarbimise vähendamiseks sellest väiksema võimsusega valgustite kasutamine võib hoopis aastane energiatarbimine suurendada. ≥ 70 W võimsusega valgustid töötavad enamuse ajast hämardatud režiimis nimivõimsusest oluliselt madalamal võimsusel. Energiatarbimise vähendamiseks oleks kasulik vältida valgusteid, mille võimsus jääb 47 W ja 70 W vahele, kuna nende keskmine võimsus on suurem kui hämardatud 70 W valgustil. Valgustid, mille võimsus on 47 W või väiksem, tarbivad ka täisvõimsusega talitluses vähem elektrienergiat kui ≥ 70 W võimsusega valgustid.

Võrreldes I valguslahenduse variandiga (Tabel 9) oli II variant (Tabel 10) 12,1 % väiksema energiatarbimisega nimivõimsusel ja 10,6 % väiksema tarbimisega hämardamist arvestades. Rohkemate

valgusti mudelite kasutamisega oli võimalik vähendada valgustite kogunimivõimsust enamikel lõikudel. Kokku vähenes II variandis valgustuse nimivõimsus ligi 4,2 kW võrra.

Tabel 9. valgustuslahenduse I variandi energiatarbimine

Teelõik	Valgustite nimivõimsus, kW	Aastane energiatarbimine nimivõimsusel, kWh	Aastane energiatarbimine hämardamisega, kWh
5+2 rada+bussitasku	1,902	7608	5178
4+3 rada+bussitasku	1,470	5880	4002
3+2 rada+bussitasku	3,510	14040	9556
3+3 rada	5,700	22800	15518
3+2 rada	2,418	9672	6583
2+2 rada, 2 m eraldusriba	4,602	18408	12529
2+2 rada, 8 m eraldusriba	3,876	15504	10552
3 rada	5,700	22800	15518
2 rada	5,700	22800	15518
Kokku	34,878	139512	94954

Tabel 10. valgustuslahenduse II variandi energiatarbimine

Teelõik	Valgustite nimivõimsus, kW	Aastane energiatarbimine nimivõimsusel, kWh	Aastane energiatarbimine hämardamisega, kWh
5+2 rada+bussitasku	1,742	6968	4743
4+3 rada+bussitasku	1,350	5400	3675
3+2 rada+bussitasku	2,538	10152	8358
3+3 rada	5,700	22800	15518
3+2 rada	2,314	9256	6300

Teelõik	Valgustite nimivõimsus, kW	Aastane energiatarbimine nimivõimsusel, kWh	Aastane energiatarbimine hämardamisega, kWh
2+2 rada, 2 m eraldusriba	4,130	16520	11244
2+2 rada, 8 m eraldusriba	3,672	14688	9997
3 rada	5,700	22800	15518
2 rada	3,500	14000	9529
Kokku	30,646	122584	84882
Võrdlus I variandiga	12,1 % vähem		10,6 % vähem

8.3 Energiatõhususnäitajad

Programmi Dialux Evo abil oli võimalik leida dokumentatsiooni teelõikude näitajate kohta nagu erivõimsusnäitaja ja aastane energiatarbimisnäitaja (Tabel 11, 12). Erivõimsusnäitaja on valgustuse süsteemivõimsus jagatuna valgustatava pindala ja keskmise valgustustiheduse hooldeväärtuse korrutisega. Aastane energiatarbimisnäitaja on valgustuspaigaldise aasta kestel tarbitava päevase ning öise elektrienergia ja valgustatava pindala jagatis. [18] Antud näitajate keskmised väärtused olid lahenduse II variandil ligi 8 % madalamad, kui I variandi puhul, elektrienergia tarbimine km kohta erines ligi 500 W ehk 11 % võrra. Tulemustest võib järeldada, et kasutades rohkem erinevaid valgusti mudeleid on valgustuslahenduse energiatarbimist tõepoolest võimalik mõnevõrra parandada.

Tabel 11. valgustuslahenduse I variandi energiatõhususnäitajad

Teelõik	Erivõimsusnäitaja D_p , Wh/m^2	Aastane energiatarbimisinäitaja D_e , $W/lx \cdot m^2 \cdot a$	Tarbimine km kohta, W/km
5+2 rada+bussitasku	0,004	700	6210
4+3 rada+bussitasku	0,003	600	6762
3+2 rada+bussitasku	0,004	700	6072
3+3 rada	0,008	600	5244
3+2 rada	0,007	700	4278
2+2 rada, 2 m eraldusriba	0,018	700	3588
2+2 rada, 8 m eraldusriba	0,021	1000	5244
3 rada	0,017	700	2622
2 rada	0,024	1000	2622
Keskväärtus	0,012	744	4738

Tabel 12. valgustuslahenduse II variandi energiatõhususnäitajad

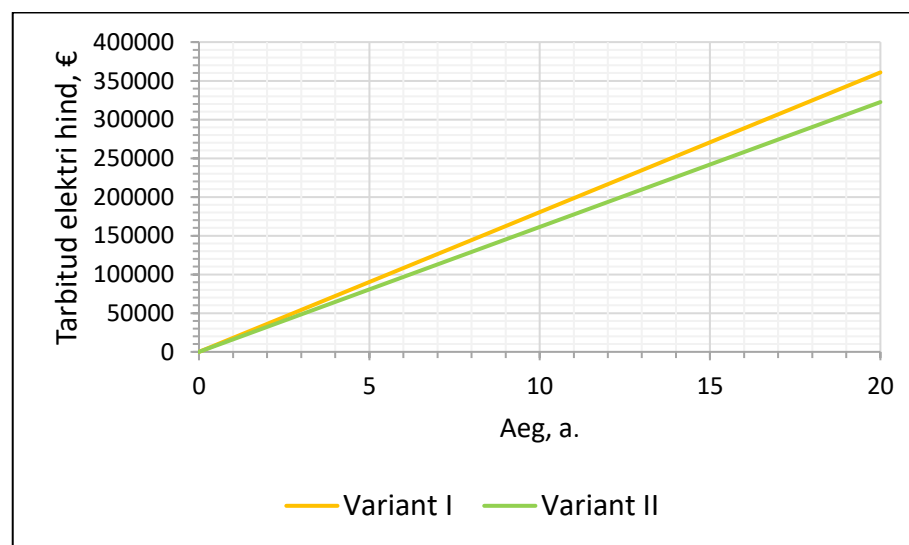
Teelõik	Erivõimsusnäitaja D_p , Wh/m^2	Aastane energiatarbimisinäitaja D_e , $W/lx \cdot m^2 \cdot a$	Tarbimine km kohta, W/km
5+2 rada+bussitasku	0,004	700	5842
4+3 rada+bussitasku	0,003	600	6210
3+2 rada+bussitasku	0,003	700	4394
3+3 rada	0,008	600	5244
3+2 rada	0,007	700	4094

Teelõik	Erivõimsusnäitaja D_p, Wh/m^2	Aastane energiatarbimisnäitaja D_e, $W/lx \cdot m^2 \cdot a$	Tarbimine km kohta, W/km
2+2 rada, 2 m eraldusriba	0,015	600	3220
2+2 rada, 8 m eraldusriba	0,021	900	4692
3 rada	0,017	700	2622
2 rada	0,018	600	1610
Keskväärtus	0,011	678	4214
Võrdlus I variandiga	8,33 % väiksem	8,87 % väiksem	11,1 % väiksem

Valgustuse energiatarbimise vähendamise tulemusena II variandis on võimalik aastas kokku hoida elektrienergiat teelõigu valgustuse töötamisel nimivõimsusel ja hämardamisega vastavalt 3216 € ja 1913 € eest (Tabel 13). Tarbitud energia hinna arvutamisel on arvestatud valgustuse aastasteks töötundideks 4000 h. Paigaldise kasuliku eluea jooksul, milleks on 100 000 h ehk 20 aastat, on võimalik rohkemate valgusti mudelitega lahenduse kasutamisel säästa 38260 € (Joonis 9). Eluea jooksul tarbitud energia arvutamisel ei ole arvestatud CLO funktsiooniga valgustite aja jooksul suureneva võimsusega. Arvestatud on ka seda, elektrihind on konstantne. Elektrihind on valitud elektrienergiabörsi Nordpool Spot 2022. aasta Eesti keskmise börsi hinna järgi, milleks oli 0,19 €/kWh [19]

Tabel 13. Valgustuslahenduste energiahinna võrdlus

Valgustus- lahendus	Aastane elektrienergia hind valgustuse nimivõimsusel, €	Aastane elektrienergia hind valgustuse hämardamisega, €	20 a. / 100000 h elektrienergia hind valgustuse hämardamisega, €
I variant	26507	18041	360820
II variant	23291	16128	322560
Elektrienergia hinna vahe	3216	1913	38260



Joonis 9. Valgustuslahenduste tarbitud elektri hind ajas

9. ERINEVATE VALGUSTI MUDELITE ARVU MÕJU RIKETE KÕRVALDAMISELE

Optimaalseima valgustuslahenduse koostamine valgustusklassi nõuetele vastavuse ja madala energia tarbimise poolest võib tähendada paljude erinevate valgusti mudelite kasutamist teelõigul. Erineva optika ja võimsusega tänavavalgustite suur arv on aga raskendavaks teguriks valgustuse rikete kõrvaldamisel. Valgustuse projekteerimisel tasub tähelepanu pöörata ka sellele lahenduse aspektile. Valgusti mudelite arvu ja rikete kõrvaldamise lihtsustamise vahel tuleb leida tasakaal.

Tallinna välisvalgustust haldab ettevõtte Enefit Connect, kellel on Tallinna linnaga leping, mis sätestab nõutud rikete kõrvaldamise aega vastavalt rikke iseloomule. Valgusti rikke korral tuleb see kõrvaldada lepingus nõutud aja jooksul. Rikke korral asendatakse valgusteid üldiselt üksikasendusena. Kulude vähendamiseks valgusteid ennetavalt ei asendata. Rikkis valgusti asendamisel tuleb vastav valgusti tellida, kuna Enefit Connect tänavavalgusteid lattu ei varu. Koheseks asendamiseks on varutud vaid ajutisi valgusteid, mida kasutatakse, et rikke kiiresti kõrvaldada. Õige valgusti tellimiseks kulub rohkem aega ning võib ka juhtuda, et seda ei ole enam saadaval. Väiksem valgusti mudelite arv lihtsustab valgusti hankimise protsessi. Kui aga tänavavalgustust haldav ettevõtte valgusteid lattu varub, siis on erinevate varundatavate valgustite väiksem arv eriti kasulik.

Tänavavalgusti asendamisel on väga oluline, et asendus oleks samaväärne. Valgusti mudeli määramine on tehtud lihtsaks tänu valgusti korpusel või masti luugil oleva skaneeritavale koodile. Valgustite asendamisel on eksimused siiski võimalikud. Valgusti mudelite arvu minimeerimine muudab selle vähem tõenäolisemaks.

Koostatud valgustuslahenduste variantides kasutatud valgusti mudelite arv erineb vaid 6 valgusti poolest. See vahe valgusti mudelite arvus 6 km teelõigul ei tohiks omada märkimisväärset mõju valgustuse rikete kõrvaldamisele osas. Mõttekas oleks seega antud lõigul kasutada madalama energiatarbimise, kuid rohkemate valgusti mudelitega lahendust. Kui valgustuslahendused erineksid valgustite mudelite arvu poolest rohkem, näiteks 10 valgusti võrra, siis oleks parem kasutada vähemate valgusti mudelitega lahendust.

KOKKUVÕTE

Lõputöö raames uuriti Contactus AS elektri- ja valgustusprojekti käigus erinevate valgusti mudelite mõju teevalgustuslahendusele. Selleks koostati kaks erineva valgusti mudelite arvuga valgustuslahendust ühele 6 km pikkusele teelõigule Tallinna linnas. Teele määrati valgustusklassiks M3 ja hooldeteguriks 0,8. Valgusarvutused tehti üheksale erineva laiuse või radade arvuga teelõikudele programmis Dialux Evo. Valgustuslahendustes kasutati Philips Unistreet Gen2 LED valgusteid, mis valiti Tallinna välisvalgustuse tehnilistest tingimustest lähtuvalt.

I valgustuslahenduse variant sai koostatud erinevate valgusti mudelite vähendamist silmas pidades. Selles kasutati 3 erineva võimsusega valgustit, millel oli sama optika. II lahenduse variandi koostamisel keskenduti valgustuse energiatarbimise vähendamisele. Võrreldes I lahenduse variandiga oli II variandis erineva võimsusega valgusti mudeleid kasutatud 3 korda rohkem ehk 9 tükki, erinevaid valgusti optikaid oli kokku 6. Valgustusmastide parameetrid ja paigutus jäid aga samaks.

Valgustusklassi nõuete vastavuse poolest olid mõlemad lahendused sobivad. Rohkemate valgusti mudelitega variandi puhul vähendati energiatõhususe tõstmiseks teepinna keskmist heledust. II lahenduse variandil oli I variandist energiatõhususnäitajate poolest mõne protsendi võrra parem, kuid mõnevõrra halvenes valgustuse üld- ja pikkiühtlus teelõikudel. Erinevate valgusti mudelite arvu suurendamisega II lahenduse variandis saavutati 12,1 % madalam aastane energiatarbimine nimivõimsusel ja 10,6 % madalam hämardamist arvesse võttes, keskmine valgustuse nimivõimsus km kohta langes 11,1 %. Antud lahenduste puhul on valgusti mudelite arvu suurendamise abil võimalik aastas säästa 1912 € ja 20 aasta jooksul 38260 € elektrienergia arvelt. Kuna valgusti mudelite arv erines lahendustes vaid 6 võrra, siis ei erine valgustuse rikete kõrvaldamise keerukus oluliselt.

Lõputöö tulemuste põhjal võib järeldada, et nõuetele vastava valgustuslahenduse võib saavutada ka väheste erinevate valgusti mudelitega. Kui tee geomeetria varieerub teelõigu ulatuses, siis on võimalik valgustuslahenduse energiatarbimist vähendada rohkemate valgusti mudelite kasutamisega, toimivusnäitajate väärtusi oluliselt langetamata. Nii toimivusnõuete kui ka energiatarbimise poolest optimaalse lahenduse jaoks ei pea kasutama sedavõrd palju erinevaid valgusteid, et valgustuse rikete kõrvaldamine muutub keerukamaks. Kõigi valgustuslahenduse parameetrite vahel saab leida tasakaalu.

SUMMARY

The aim of this thesis is to investigate how a road lighting solution is affected by the amount of different luminaire models. The thesis is based on an electrical and lighting project of Contactus AS. Two road lighting solutions with different number of luminaires were created for a 6 km long section of road in Tallinn. The lighting class of M3 and a maintenance factor of 0,8 was assigned to that road. In total, 9 separate lighting calculations were made for road sections with various numbers of lanes and widths using Dialux Evo software. Philips Unistreet Gen2 series LED luminaires were used in lighting solutions in accordance with the technical specifications of Tallinn street lighting.

The I lighting solution aimed to minimise the number of different luminaire models. That solution included only 3 different luminaire models with the same optics. The II solution variant was created to minimise energy consumption. The II variant included 9 luminaire models which is 3 times as many as in the I variant. The chosen luminaire models used 6 different optics. Lighting mast parameters and layout were unchanged between the two solutions.

Both lighting solutions met the lighting class requirements. Average road surface illuminance was reduced in the II solution with a higher amount of luminaire models. Consequently, the II solution variant was a few percent better by energy efficiency indicators, overall and longitudinal uniformity, however, were somewhat lower. Increasing the number of luminaires in the II variant achieved 12,1 % lower annual energy consumption at rated power and 10,6 % lower consumption when taking dimming into account. The average rated power of road lighting per km also was reduced by 11,1 %. With the increased number of luminaire models on the current road, it is feasible to save 1912 € annually or 38260 € after 20 years on energy consumption. The number of luminaire models only differed by 6 models between the variants, therefore lighting fault repair process difficulty was not significantly affected.

From the thesis results it can be concluded that road lighting performance requirements can be achieved even with a small number of different road luminaire models. Although, if road section geometry varies, then it is possible to reduce energy consumption by using a higher amount of different luminaire models without adversely affecting the performance indicators of a lighting solution. Achieving an efficient lighting solution with good performance indicator values does not necessarily require the use of excessive amount of luminaire models. Generally, a good balance can be achieved between all lighting solution parameters without severely compromising any of them.

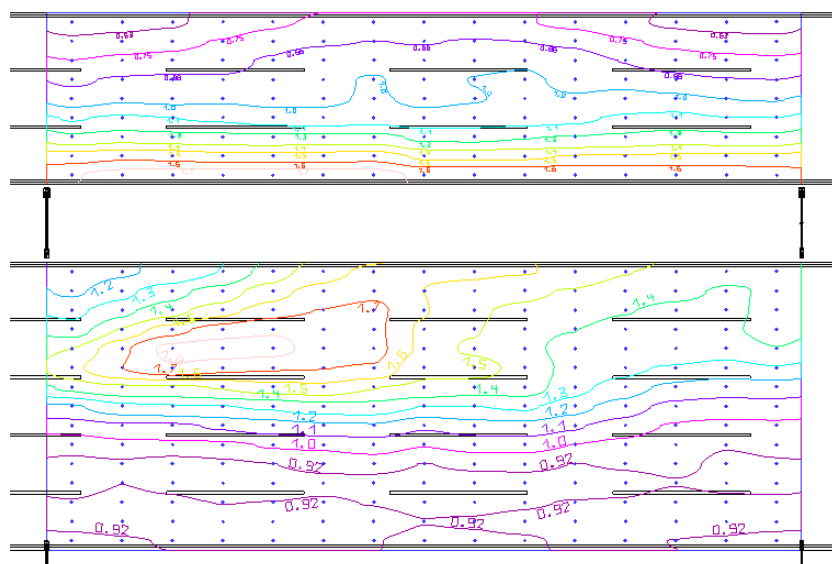
VIIDATUD ALLIKAD

- [1] EVS-EN 13201-2:2015 Teevalgustus. Osa 2: Toimivusnõuded. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2015.
- [2] EVS-EN 12665:2018 Valgus ja valgustus. Põhioskussõnad ja valgustusnõuete valiku alused. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2018.
- [3] T. Tamm, Praktiline valgustustehnika, Tallinn: EETEL-Ekspert, 2011, p. 243.
- [4] J. Lootus, Valgustehnika, Tallinn: Eesti Mereakadeemia, 2008, p. 59.
- [5] CEN/TR 13201-1:2014 Teevalgustus. Osa 1: Valgustusklasside valiku juhised. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2014.
- [6] Philips, „UniStreet gen2 brochure,“ 2019. [Võrgumaterjal]. [kasutatud 28. aprill, 2023].
- [7] Philips, „Unistreet gen2,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lighting.philips.com/main/prof/outdoor-luminaires/road-and-street/unistreet-gen2>. [Kasutatud 28. aprill 2023].
- [8] Tallinna Kommunaalamet, „Tallinna linna välisvalgustuse hämardamise väärtuste kinnitamine,“ 2016. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 25. märts 2023].
- [9] W.E.G. Eesti, „Anduriga hämaralüliti DIN liistule,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.weg.ee/twr1-1-100lx-ip20-1no-16a-230v-anduriga-hamaraluliti-din-liistule-1442628>. [Kasutatud 25. märts 2023].
- [10] ISO/CIE TS 22012:2019 et Valgus ja valgustus. Hooldeteguri määramine. Määramisviis. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2019.
- [11] CIE 144:2001 Road surface and road marking reflection characteristics. Viin: Rahvusvaheline Valgustuskomisjon, 2001.
- [12] Signify, „Lighting applications case-studies,“ 2020. [Võrgumaterjal]. [kasutatud 10. aprill, 2023].
- [13] Philips, „UniStreet gen2 BGP282 T25 1 xLED120-4S/730 DM12,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://luminaires.dialux.com/en-US/article/eiiXWTKdRCC2mqxL99c6mg?_Y=0. [Kasutatud 1. mai 2023].
- [14] Philips, „UniStreet gen2 BGP282 T25 1 xLED109-4S/730 DM13,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://luminaires.dialux.com/en-US/article/xZiN6h9NR_6ld3jMMT1gDg?_Y=0. [Kasutatud 1. mai 2023].

- [15] Philips, „BGP282 T25 1 xLED109-4S/730 DN09,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://luminaires.dialux.com/en-US/article/W-CeSw81QHyKVmP66Y7Nog?_Y=0. [Kasutatud 1. mai 2023].
- [16] Philips, „BGP282 T25 1 xLED109-4S/730 DN10,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://luminaires.dialux.com/en-US/article/_SV_WFGbSYOIq530-xjQWg?_Y=0. [Kasutatud 1. mai 2023].
- [17] Philips, „BGP282 T25 1 xLED160-4S/730 DN11,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://luminaires.dialux.com/en-US/article/6fUZUJCKtUyBHTVrak9ELw?_Y=0. [Kasutatud 1. mai 2023].
- [18] EVS-EN 13201-5:2015 Teevalgustus. Osa 5: Energiatõhususnäitajad. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2015.
- [19] Nord Pool, „Yearly prices,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Hourly/>. [Kasutatud 1. mai 2023].

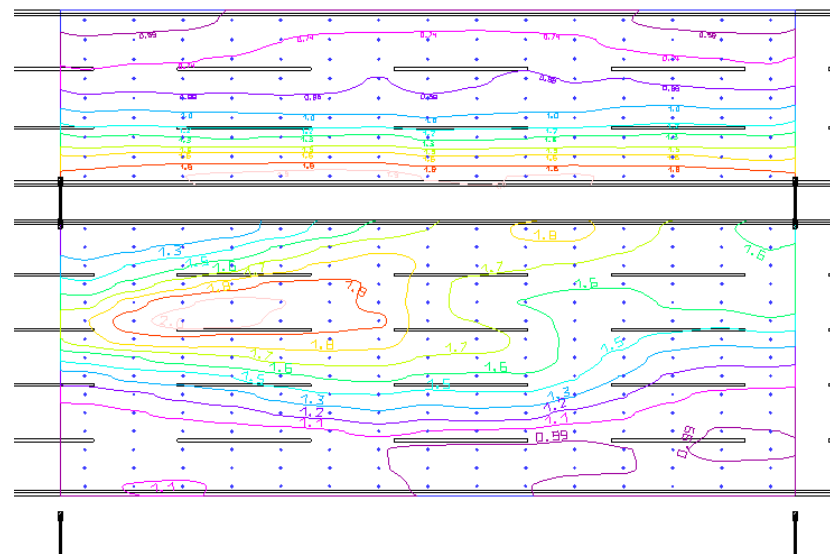
Lisa 1. Teelõikude valgustuslahenduse I variandi valgusarvutuste tulemused

5+2 rada+bussitasku



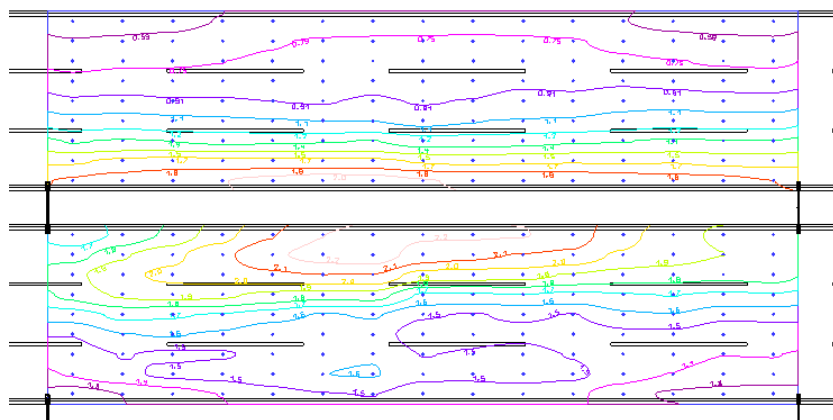
	Suurus	Arvutatud	Nõutav väärtus	Kontroll
Sõidutee 2 (2 rada +bussitasku) (M3)	L_m	1.10 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.48	≥ 0.40	✓
	U_l	0.73	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.60	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (5 rada) (M3)	L_m	1.17 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.44	≥ 0.40	✓
	U_l	0.80	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.60	≥ 0.30	✓

4+3 rada+bussitasku



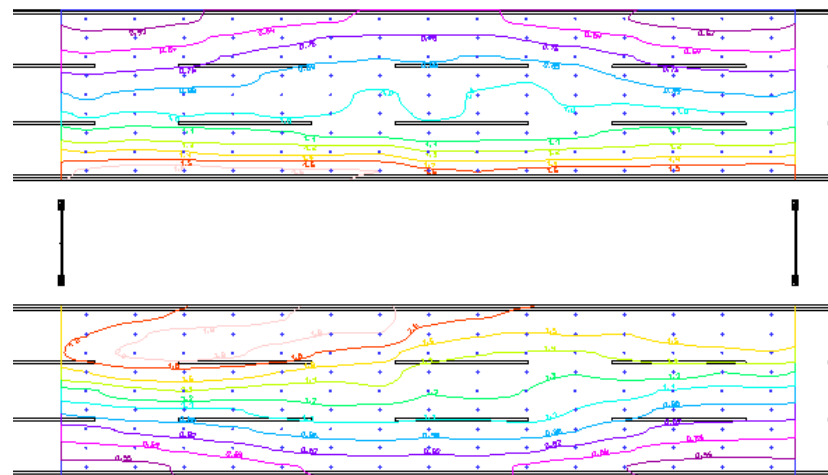
	Suurus	Arvutatud	Nõutav väärtus	Kontroll
Sõidutee 2 (3 rada) (M3)	L_m	1.09 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.45	≥ 0.40	✓
	U_l	0.76	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.61	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (4 rada +bussitasku) (M3)	L_m	1.36 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.52	≥ 0.40	✓
	U_l	0.74	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.61	≥ 0.30	✓

3+2 rada+bussitasku



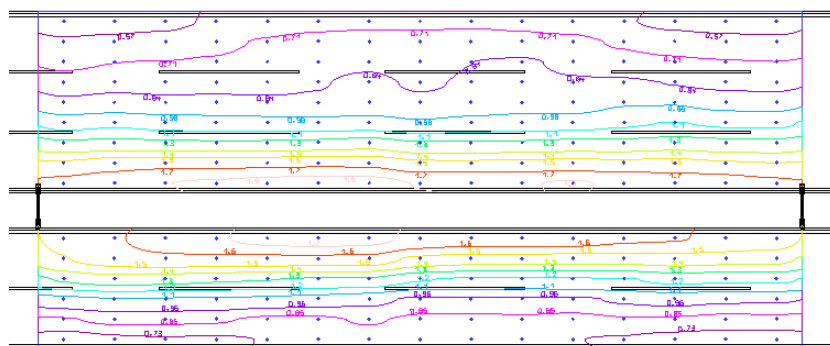
	Suurus	Arvutatud	Nõutav väärtus	Kontroll
Sõidutee 2 (3 rada) (M3)	L_m	1.11 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.44	≥ 0.40	✓
	U_l	0.75	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{el}	0.61	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (2 rada +bussitasku) (M3)	L_m	1.64 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.62	≥ 0.40	✓
	U_l	0.86	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{el}	0.61	≥ 0.30	✓

3+3 rada



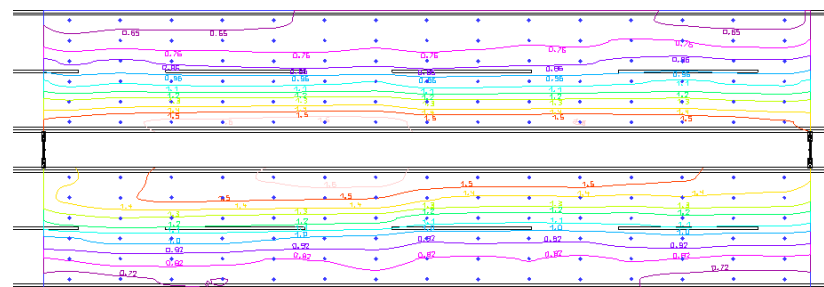
	Suurus	Arvutatud	Nõutav väärtus	Kontroll
Sõidutee 2 (3 rada) (M3)	L_m	1.00 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.40	≥ 0.40	✓
	U_l	0.70	≥ 0.60	✓
	TI	12 %	≤ 15 %	✓
	R_{el}	0.48	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (3 rada) (M3)	L_m	1.00 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.40	≥ 0.40	✓
	U_l	0.70	≥ 0.60	✓
	TI	12 %	≤ 15 %	✓
	R_{el}	0.48	≥ 0.30	✓

3+2 rada



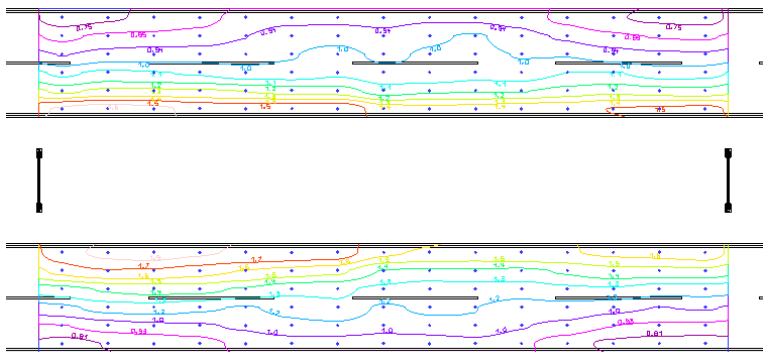
	Suurus	Arvutatud	Nõutav väärtus	Kontroll
Sõidutee 2 (3 rada) (M3)	L_m	1.06 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.46	≥ 0.40	✓
	U_l	0.75	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.60	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (2 rada) (M3)	L_m	1.05 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.58	≥ 0.40	✓
	U_l	0.91	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.60	≥ 0.30	✓

2+2 rada, 2 m eraldusriba



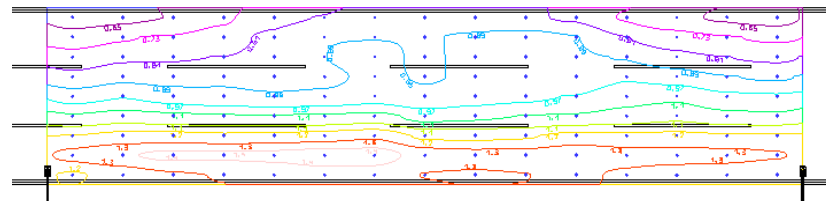
	Suurus	Arvutatud	Nõutav väärtus	Kontroll
Sõidutee 2 (M3)	L_m	1.02 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.59	≥ 0.40	✓
	U_l	0.92	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.85	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (M3)	L_m	1.02 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.59	≥ 0.40	✓
	U_l	0.92	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.85	≥ 0.30	✓

2+2 rada, 8 m eraldusriba



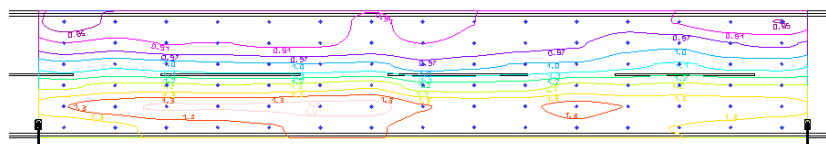
	Suurus	Arvutatud	Nõutav väärtus	Kontroll
Sõidutee 2 (M3)	L_m	1.12 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.59	≥ 0.40	✓
	U_l	0.78	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.71	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (M3)	L_m	1.12 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.59	≥ 0.40	✓
	U_l	0.78	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.71	≥ 0.30	✓

3 rada



	Suurus	Arvutatud	Nõutav väärtus	Kontroll
Sõidutee 1 (M3)	L_m	1.02 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.58	≥ 0.40	✓
	U_l	0.73	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.70	≥ 0.30	✓

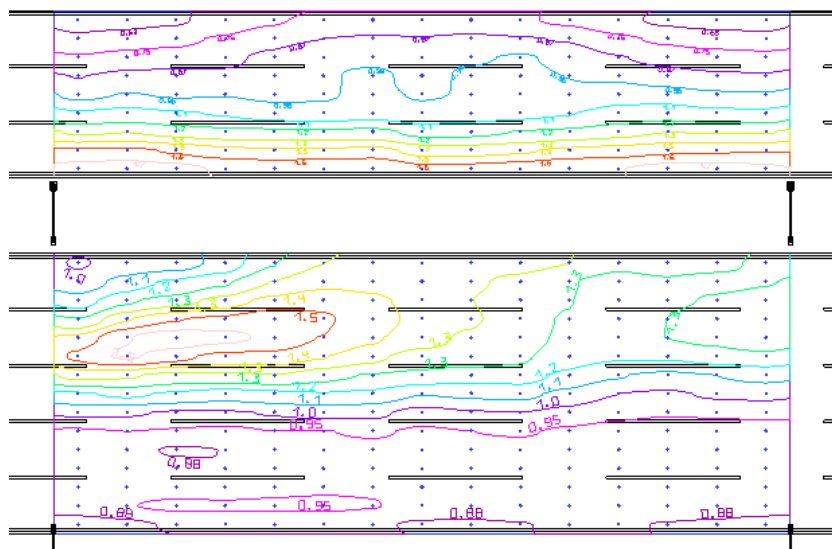
2 rada



	Suurus	Arvutatud	Nõutav väärtus	Kontroll
Sõidutee 1 (M3)	L_m	1.12 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_o	0.73	≥ 0.40	✓
	U_l	0.90	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.75	≥ 0.30	✓

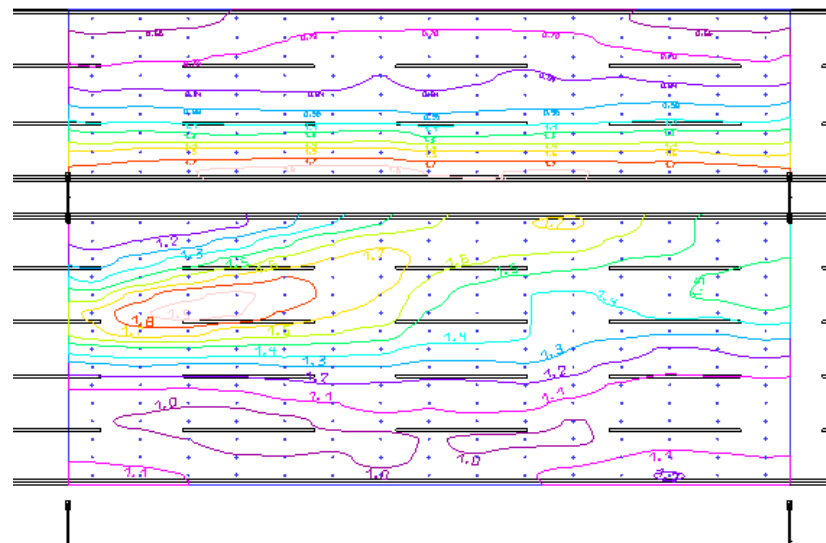
Lisa 2. Teelõikude valgustuslahenduse II variandi valgusarvutuste tulemused

5+2 rada+bussitasku



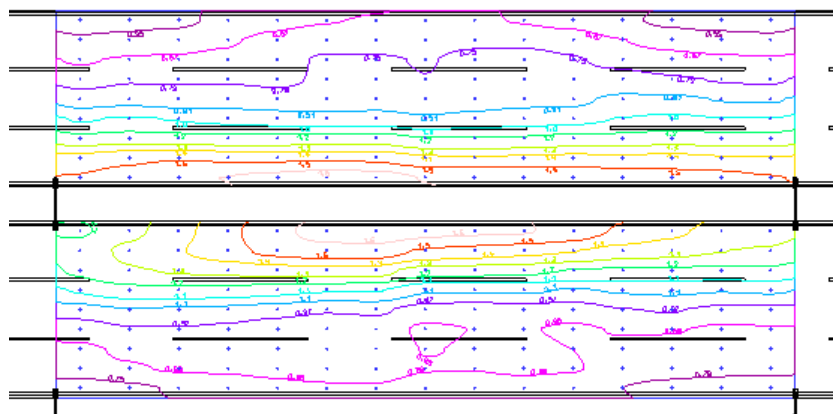
	Symbol	Calculated	Target	Check
Sõidutee 2 (2 rada +bussitasku) (M3)	L_{av}	1.09 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.49	≥ 0.40	✓
	U_1	0.73	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{BI}	0.60	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (5 rada) (M3)	L_{av}	1.05 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.48	≥ 0.40	✓
	U_1	0.86	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{BI}	0.60	≥ 0.30	✓

4+3 rada+bussitasku



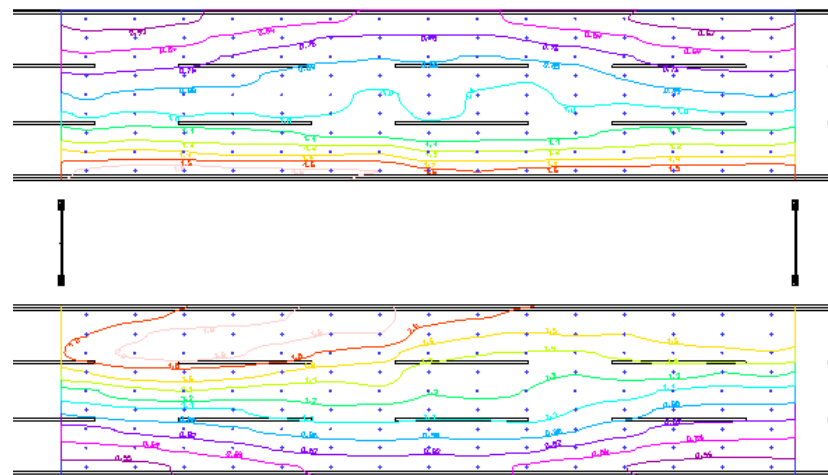
	Symbol	Calculated	Target	Check
Sõidutee 2 (3 rada) (M3)	L_{av}	1.04 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.45	≥ 0.40	✓
	U_1	0.76	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{BI}	0.61	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (4 rada +bussitasku) (M3)	L_{av}	1.28 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.55	≥ 0.40	✓
	U_1	0.86	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{BI}	0.61	≥ 0.30	✓

3+2 rada+bussitasku



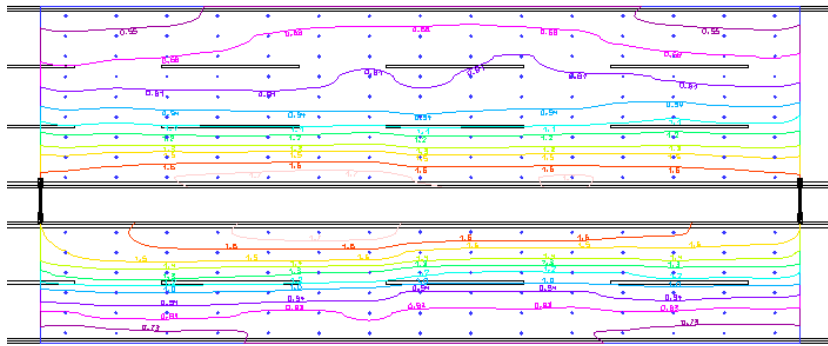
	Symbol	Calculated	Target	Check
Sõidutee 2 (3 rada) (M3)	L_{av}	1.00 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.48	≥ 0.40	✓
	U_l	0.74	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.61	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (2 rada +bussitasku) (M3)	L_{av}	1.02 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.58	≥ 0.40	✓
	U_l	0.88	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.61	≥ 0.30	✓

3+3 rada



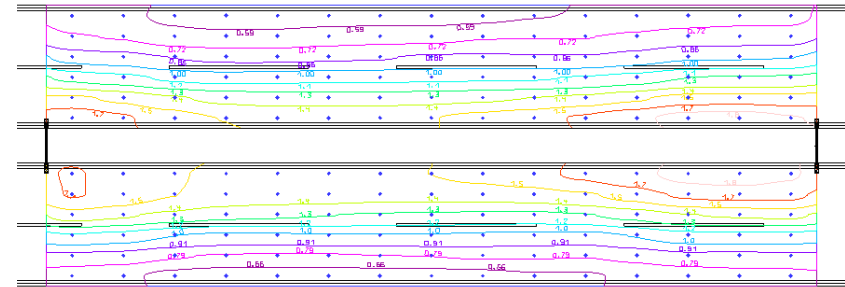
	Symbol	Calculated	Target	Check
Sõidutee 2 (3 rada) (M3)	L_{av}	1.00 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.40	≥ 0.40	✓
	U_l	0.70	≥ 0.60	✓
	TI	12 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.48	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (3 rada) (M3)	L_{av}	1.00 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.40	≥ 0.40	✓
	U_l	0.70	≥ 0.60	✓
	TI	12 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.48	≥ 0.30	✓

3+2 rada



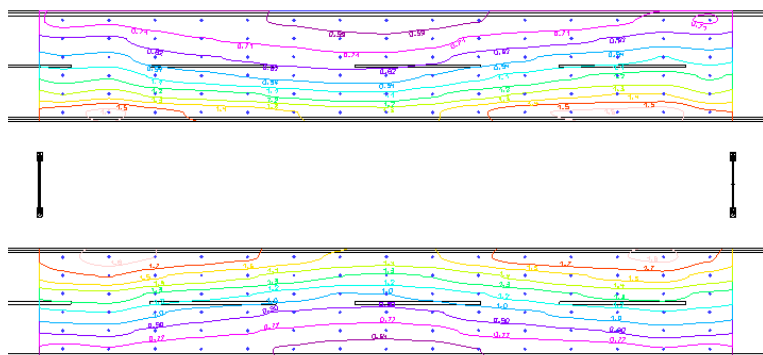
	Symbol	Calculated	Target	Check
Sõidutee 2 (3 rada) (M3)	L_{av}	1.01 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.45	≥ 0.40	✓
	U_l	0.75	≥ 0.60	✓
	TI	11 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.60	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (2 rada) (M3)	L_{av}	1.04 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.59	≥ 0.40	✓
	U_l	0.91	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.60	≥ 0.30	✓

2+2 rada, 2 m eraldusriba



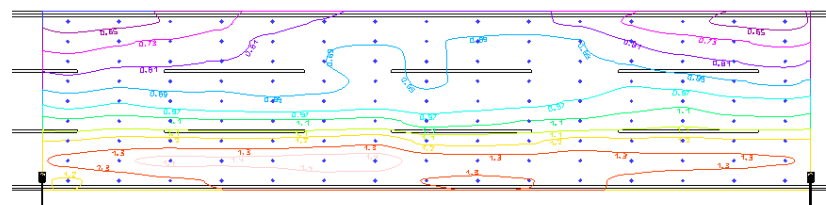
	Symbol	Calculated	Target	Check
Sõidutee 2 (M3)	L_{av}	1.08 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.48	≥ 0.40	✓
	U_l	0.84	≥ 0.60	✓
	TI	9 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.70	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (M3)	L_{av}	1.08 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.48	≥ 0.40	✓
	U_l	0.84	≥ 0.60	✓
	TI	9 %	≤ 15 %	✓
	R_{EI}	0.70	≥ 0.30	✓

2+2 rada, 8 m eraldusriba



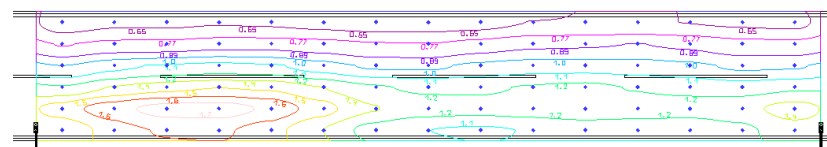
	Symbol	Calculated	Target	Check
Sõidutee 2 (M3)	L_{av}	1.01 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.51	≥ 0.40	✓
	U_l	0.72	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{BI}	0.56	≥ 0.30	✓
Sõidutee 1 (M3)	L_{av}	1.01 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.51	≥ 0.40	✓
	U_l	0.72	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{BI}	0.56	≥ 0.30	✓

3 rada



	Suurus	Arvutatud	Nõutav väärtus	Kontroll
Sõidutee 1 (M3)	L_m	1.02 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.58	≥ 0.40	✓
	U_l	0.73	≥ 0.60	✓
	TI	10 %	≤ 15 %	✓
	R_{BI}	0.70	≥ 0.30	✓

2 rada



	Symbol	Calculated	Target	Check
Sõidutee 1 (M3)	L_{av}	1.10 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²	✓
	U_0	0.54	≥ 0.40	✓
	U_l	0.72	≥ 0.60	✓
	TI	12 %	≤ 15 %	✓
	R_{BI}	0.52	≥ 0.30	✓