

Ranno Raidla

TÄNAVAVALGUSTUSE MAKSUMUSE ANALÜÜS TULENEVALT MASTIDE KÕRGUSEST

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut

Elektritehnika

Juhendaja: Toivo Varjas, *PhD*

Tallinn 2024

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, **Ranno Raidla**

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Tänavavalgustuse maksumuse analüüs tulenevalt mastide kõrgusest

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, **Ranno Raidla**

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

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja **Toivo Varjas**

Juhendaja **Andrei Rudz**

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäevad digiallkirjades)

SISUKORD

LÜHENDID JA MÕISTED.....	4
SISSEJUHATUS	5
1 TÄNAVAVALGUSTUSE PROJEKTEERIMINE	7
1.1 Tänavavalgustuse eesmärk.....	7
1.2 Valgustusklass, selle määramine ja tänava laius.....	7
1.3 Valgustusmastide ja konsooli valik.....	9
1.3.1 Mastide jalandid	11
1.4 Valgustite valik	12
1.5 Hooldeteguri määramine	15
1.6 Elektrilöögi vastane kaitse ja maandus.....	16
1.7 Näidis TNV projekteerimise põhikomponendid	17
2 TÄNAVAVALGUSTUSE HINNASTAMINE	19
2.1 Tänavavalgustuse ehituskulud	19
2.2 Tänavavalgustuse eksploatatsiooni- ja hoolduskulud.....	20
2.3 Eksploatatsiooni- ja hoolduskulude nüüdisväärtused	21
2.4 Sisendite eeldatav tulem	22
3 ARVUTUSTE TULEMUSED, ANALÜÜS JA JÄRELDUSED	24
3.1 TNV elukaarekulu, mastide kõrguste ja mastivahede seos	25
3.1.1 Ehituskulu ja mastivahe ning -kõrgus	27
3.1.2 Eksploatatsioonikulu.....	28
3.1.3 Hoolduskulu	32
3.2 Heleduse üld- ja pikiühtluse ning TNV energiakulu analüüs.....	33
KOKKUVÕTE	36
SUMMARY.....	37
VIIDATUD ALLIKAD	39
Lisa 1. Valgustusklassi määramine.....	41
Lisa 2. Tartu linna valgustusklasside kaart	42
Lisa 3. Hajuvusdiagrammid enne erindite eemaldamist.....	43
Lisa 4. Valimist eemaldatud valgustid	44
Lisa 5. Valgustite koondtabel, reastatud E_k hinna järgi kasvavalt	45

LÜHENDID JA MÕISTED

D_E	– aastane energiatarbimisnäitaja
D_P	– erivõimsusnäitaja
DM	– keskmine valgusjaotus
DN	– kitsas valgusjaotus
DP	– ülekäiguraja valgusjaotus
DR	– raudtee valgusjaotus
DS	– sümmeetriline valgusjaotus
DW	– lai valgusjaotus
DX	– eriti lai valgusjaotus
E_k	– elukaarekulude nüüdisväärtus
H_{pj}	– valgustusmasti ja jalandi hind koos paigaldustööde ja ümbritseva täidisega
H_{sv}	– tänavavalgustuse elektrivõrgu nominaalhind
H_v	– valgusti hind koos valgustijuhtme ning paigaldus- ja ühendustöödega
K_h	– hoolduskulude nüüdisväärtus
K_{h1}	– esimese aasta hoolduskulud
K_k	– eksploatatsioonikulude nüüdisväärtus
K_{k1}	– esimese aasta eksploatatsioonikulud
K_{kh}	– eksploatatsiooni- ja hoolduskulude nüüdisväärtus
K_{kh1}	– esimese aasta eksploatatsiooni- ja hoolduskulud
K_r	– tänavavalgustuse ehitusmaksumus
KM	– käibemaks
KOV	– kohalik omavalitsus
$\bar{L}_m$	– keskmise heleduse hooldeväärtus
Mk	– masti kõrgus
P_i	– valgusti sisendvõimsus
r	– lineaarne korrelatsioonikordaja
S	– mastivahe
TNV	– tänavavalgustus
U_l	– pikiühtlus on sõidutee teepinna kõigi sõiduradade keskjoontel määratavate vähima ja suurima heleduse jagatise vähimväärtus
U_o	– üldühtlus on pinna vähima ja keskmise heleduse jagatis
Φ_v	– valgusvoog

SISSEJUHATUS

Tänavavalgustuse (TNV) projekti koostamisel saab projekteerija tellijalt lähteülesande, mis võib sisaldada määratud valgustusklassi ning valgustusmastide soovituslike kõrgusi. Tihti jäetakse eelmainitu projekteerija otsustada või antakse raamistik, mille piires on valik vaba. Inseneri-etikast tulenev kohustus pakkuda efektiivseimat lahendust peab jääma ikkagi esikohale, kui lähteülesanne ei eelda muud. Seega on tihti projekteerija otsustada, milliseid maste ja sellest tulenevaid lahendusi ta tänavavalgustuseks pakub.

Sageli ei pruugi kohalikel omavalitsustel (KOV) tellijana olla head nõustajat, kes erinevate projektlahenduste postitiivsed ja negatiivsed küljed välja tooks.

Töö eesmärgiks on pakkuda efektiivse TNV lahenduse põhjendus KOVile tulenevalt valgustusmastide kõrgusest. Lõputöös uuritakse TNV hinna kujunemist kahel erineval masti kõrgusel (M_k). Kõrgemale paigutatud valgusti tarbib valgustamiseks enam energiat kui madalamal asuv, samas vahekaugus järgmise valgustiga on pikem. Töös lähtutakse tänavavalgustusklassist M5, mida on optimaalne rakendada KOV territooriumitel nagu kvartalisestel- ja kõrvaltänavatel, kuid samuti jaotustänavatel [1]. Lõputöös kasutatav valgustusklass on sobilik väikelinnades ja -asulates ning valdades. Töö autor loobus M6 valgustusklassi valikust selle madalate valgustusnõuete pärast.

Töö autorile teadaolevat ei ole varem Eestis sellist analüüsi TNV-le tehtud. Analoogne materjal on välja antud Soomes, kuid see on maanteede valgustuse projekteerimiseks ning hinnastamiseks [2] ja see tasuvusanalüüsi näiteid tänavate kohta ei sisalda. Samuti ei anna soomlaste juhend alust järeltöös, milline valgustuslahendus on efektiivsem. Töös on kasutatud hinnastamise tegemiseks sama metoodikat.

Töö esimeses peatükis antakse ülevaade TNV maksumuse komponentidest, esitatakse nende valiku kriteeriumid ning mõju TNV projektile. Järgnevas peatükis käsitletakse hinnastamise metoodikat, tuuakse välja TNV hinna kujunemine ning selgitused. Kolmandas osas analüüsitakse tehtud arvutusi, leitakse kulude tekkepõhjuseid ning tehakse saadud tulemustest järeldused.

Käesolevas töös on kasutatud lihtsustusi:

- rakendatud ei ole valgustite hämardamist, mis tingiks vajaduse valgustusklassi vähendamiseks;
- energiatõhususe arvutamisel ei ole arvesse võetud juhtimissüsteemide energiakulu;
- valitud abstraktne tänav on kindla laiusega.

Diplomitöös on tööde hinnastamisel lähtutud Eestis 2024. a turu keskmistest pakkumistest. Toodete ühikuhinnad on võimalusel võetud vastavate kaupade müügiga tegelevate ettevõtete kodulehekülgedelt. Tooted, mille hinnad ei ole avalikult kätte saadavad (näiteks tänavavalgustid), on hinnastatud valgustusprojektide ehitamisega igapäevaselt seotud inimestelt saadud info põhjal. Kõik hinnad on esitatud ilma käibemaksuta (KM).

Käesoleva lõputöö aluseks olev diplomipraktika läbiti ettevõttes AS KH ENERGIA-KONSULT.

1 TÄNAVAVALGUSTUSE PROJEKTEERIMINE

1.1 Tänavavalgustuse eesmärk

Tänavavalgustuse olulisim ülesanne on pealtnäha lihtne – luua piisav nähtavus kõigile liiklejatele. Põhimõtteliselt peaksid kõik liikluseks mõeldud alad olema valgustatud nii, et iga liikleja jõuaks muutuvate olukordadega kohaneda. Õigesti projekteeritud valgustus aitab kaasa õnnetuste riski vähendamisele, samuti suurendab kodanikes turvatunnet. Valgustuse olemasolu mõjutab ka visuaalset linnapilti. Päevasel ajal kujundavad valgustid ja mastid oma disainiga ümbritsevat ruumi, pimedal ajal lisavad ümbruskonnale oma valgusega atraktiivsust. [3, lk 7] Kõige eel nimetatul saavutamisel lähtutakse standardites toodud nõuetest.

Tänavavalgustuse projekteerimine koosneb mitmest etapist ning nendes kasutatakse erinevaid spetsiaalseid projekteerimisprogramme. Valgustuse ja valgustite projekteerimisel on enim levinud DIALux evo programm, kuid kasutatakse ka teisi analoogseid simulatsiooni- või arvutusprogramme (Citylight, Relux). Selles töös rakendatakse DIALux evo võimalusi.

Enne programmiga tööle asumist määratakse:

- tänavalaaius;
- tänavavalgustusklass;
- valgustusmastide kõrgus või mastide soovitud vahekaugus, mis võib olla lähteülesandega piiratud;
- valgustite tootja;
- valgustite värvustemperatuur;
- hooldetegur, millest hakkab sõltuma valitud (vastavalt valgustusklassile) valgustiga loodava pinna heledus või langeva valguse valgustustihedus.

Valgustusvõrgu projekteerimise eesmärgiks on sümmeetriline 3-faasiline võrk, mis on võimalikult ühtlaselt koormatud. Valgustid grupeeritakse iga kolmanda laterna järgi samasse faasi. Sama ristlõikega valgustid rühmitatakse erinevate faaside järgi. [4, lk 22]

1.2 Valgustusklass, selle määramine ja tänavalaaius

Liiklusohutust, loodavat keskkonda ja selle mugavust ning üldist turvalisust parandav tulemus saavutatakse sobiva valgustusklassiga. Määratud valgustusklassi loetakse sobivaks, kui valgustuse tehnilised omadused vastavad nägemise ja tajumise miinimumi nõuetele [4, lk 8]. Valgustusklass valitakse tänavalaaiuse ja selle liikluse omadustest lähtuvalt [4,

lk 8]. Valgustusklassist sõltub valgusti võimsus ja sellest tulenevalt kujuneb valgustusrajatise maksumus.

Välditakse valgustuspaigaldiste ülevalgustamist oluliselt kõrgema valgustustasemega kui nõutud ja eeldatud on. Sellise juhtumi aset leidmisel tuleb kindlaks teha, kas põhjus on halvas projektis või on see muude nõuete vältimatu tagajärg. Energiatõhususe ja keskkonnasäästlikkuse seisukohast tuleb ülevalgustust korrigeerivate meetmete abil minimeerida. Standardi EVS-EN 13201-5:2015 „Teevalgustus. Osa 5: Energiatõhususnäitajad” alusel ei tohi teatava valgustuspaigaldise arvutatud valgustustase ületada järgmise kõrgema valgustusklassi nõutavat valgustustaset; kõrgeima valgustusklassi korral nõutavast tasemest 50% võrra kõrgemat taset. [5]

Teede ja tänavate valgustuse projekteerimist alustatakse objekti valgustusklassi määramisega. Kui valgustusklass on projekteerimise lähteülesandes antud, siis saab selle etapi vahel jätta. Tihti oodatakse valgustusklassi määramist projekteerijalt. Selle määramine põhineb kahel standardil [6], [7]:

- CEN/TR 13201-1:2014 „Teevalgustus. Osa 1: Valgustusklasside valiku juhised”;
- EVS-EN 13201-2:2015 „Teevalgustus. Osa 2: Toimivusnõuded”.

Esimene standard aitab valgustusklassi määrata Tabeli 1 abil, teises standardis on toodud valgustusklasside spetsiifilised nõuded [6, lk 13], [7]. Käesolevas töös on valitud valgustusklassiks M5, mille määramine on toodud lisas (Lisa 1)[6, lk 13]. Määramisel valitakse tabelist tänavat kajastav kaaluväärtus ning saadud väärtused summeeritakse tulbas T_1 . Tulp T_1 kajastab ajaperioodi vastava valgustusklassi kohta. Kui kasutatakse valgustite hämardamist ja sellest tulenevalt valgustusklass muutub, siis võib T tulpasid olla mitu ning valgustusklassi tee kohta tuleb samuti mitu.

Antud töös on M5 klass valitud selle laia leviku tõttu ning selle perspektiivsusest valgustuse projekteerimisel elamurajoonide kvartalite siseselt ja nende ühenduseteedel. Üheks valiku teemakohasuse aluseks on võetud Tartu linna valgustusklasside kaart (Lisa 2), mille järgi on M5 valgustusklassiga kõrvaltänavate osakaal tänavate üldarvus arvestatav, et tagada valiku põhjendatus [8]. Valgustusklassi teemakohasusele osundab samuti Viimsi valla arengukavas määratletud tänavavalgustuse nõue, millega valdavalt kehtestatakse M5 valgustusklass [9, lk 78].

Tänavalaaius määratakse projekteerimise aluseks oleva alusplaani järgi. Kui tänav on ühtlase laiusega, siis kasutatakse valgustusarvutuses saadud väärtust. Tänavalaie varieerumisel tuleb teha valgustusarvutused kitsamatele ja laiematele lõikudele eraldi. Tulemused peavad kõikidel lõikudel vastama määratud valgustusklassile. Käesolevas töös määratakse abstraktse tänavalaieks 4,5 m.

1.3 Valgustusmastide ja konsooli valik

Valgustusmastide valimisel osutub määrava tähtsusega eelnev projekteeritava objekti ülevaatus ja analüüs. Selle käigus selgitatakse [4, lk 21]:

- piirkonnas seni kasutusel olevad valguslahendused ning mastide kõrgused;
- valgustuslahendust piiravad asjaolud nagu hooned, põõsad, puud ja nende kõrgused;
- planeeritavate valgustusmastide võimalikud asukohad ja kohad, kuhu maste ei saa paigutada.

Autor kasutab töös Vantaa linna 2022. a tänavavalgustusjuhendi materjale [4]. Analoogeid juhendeid on Vantaa linn koostanud pikaaegselt ning seega on juhendis lähtutud lisaks visuaalsele aspektile empiirilistest valikutest ning sellega tagatud ratsionaalsus. Näited soovituslikest mastide kõrgustest Vantaa linnas on toodud tabelis (Tabel 1) [4, lk 21].

Tabel 1. Valgustusmastide soovituslikud kõrgused, m

Tänavaklass	Valgusti paigalduskõrgus¹
Peatänavad	10
Piirkondlikud magistraalteed	10
Tänavad tööstuspiirkondades	8; 10
Kohalikud magistraalteed	8; 10
Elamukvartalid	6; 8
Jalakäijate- ja jalgrattateed	5; 6
Parkimisplatsid	6; 8 ; 10
Turud ja väljakud	5; 6; 8; 10

Mastide paigutuse projekteerimisega alustatakse sundpunktidest. Paigutuse eesmärk on saavutada mastide maksimaalne vahekaugus ning, et mastide ja tee moodustatud jooned oleksid paralleelsed. Laternamastide asukohad valitakse selliselt, et puud ei takistaks valgustehniliste nõuete täitmist. Kurvilisel teel tagatakse juhile valgustite optilise suunamise säilimine. Maste ei paigutata teisele poole teed, kus see võib autojuhti eksitada. Väikese raadiusega kurvides, mille raadius jääb alla 100 m lühendatakse mastide vahekaugusi [4, lk 29]:

- väliskurvis mastidel kasutatakse koefitsienti 0,9 ja
- sisekurvis mastidel koefitsienti 0,8.

¹ Sagedamini kasutatavad paigalduskõrgused on paksus kirjas.

Maste ei paigutata vahetult tee serva, jäetakse piisav vahemaa talviseks lumetõrjeks ning tänavate hoolduseks. Metallmastid püstitatakse jalanditesse ning mastide ääre kaugus teest jäetakse vähemalt 0,5 m. Vantaa linna juhend soovib valgustusmasti ja tee vahekauguseks 0,75 m masti tsentrist ning minimaalselt 0,5 m [4, lk 30].

Valgustusmastidena kasutatakse enamasti metallmaste. Puitmaste kasutatakse piirkondades, kus sarnane lahendus on juba varasemalt kasutusel. Samuti on puitmastid õigustatud, kui maakaabli paigaldamine osutub keerukaks või võimatuks. Ühiskasutuslepingu alusel on valgustust võimalik paigaldada olemasolevatele puitmastidele, sel juhul tagatakse piisav kaugus olemasolevatest liinidest – näiteks sidekaablist 30 cm. Sellisel lahendusel tuleb projekteerijal leppida mastide vahekaugusega ja leida optimaalsed valgustid.

Mastidel kasutatakse valgustite paigaldamiseks konsoole:

- segava kõrgthaljastuse korral;
- valgusti jääb teest liiga kaugemale;
- vajadusel parandada valgustite visuaalset juhendamist (pimedas suuna andmine autojuhile);
- laiadel teedel parendamiseks valgusvoogu;
- puitmastide valikul.

Liiga pikad konsoolid valgustusmastidel jätavad "raske" mulje. Erinevate kõrgustega mastide jaoks esteetiliselt sobilikud konsooli pikkused on toodud tabelis (Tabel 2). [4, lk 21]

Tabel 2. Soovitatavad konsoolide pikkused Vantaa linnas

Konsooli paigalguskõrgus, m	Konsooli pikkus ² , mm
10	0; 1 000 ; 2 000
8	0; 500; 1 000 ; 1 500
6	0 ; 500
5	0 ; 300

Antud töös kasutatakse valgustitele määratud kõrguse saamiseks Tehometi toodetud kahe erineva kõrgusega maste (6 ja 8 m), mis valitakse Esvika kodulehelt ja millede hindu kasutatakse hinnastamisel [10], [11]:

- kuuemeetrine koonusmast TB6S, 223 €/tk ja
- kaheksameetrine koonusmast TB8S, 299 €/tk.

² Sagedamini kasutatavad pikkused on paksus kirjas.

Mastidele ei paigaldata konsoole, sest selleks puudub otsene vajadus. Kohtumisel Tehometi esindajatega, sai töö autor teada, et konsooli pikkusest sõltuvalt muutub valgusti stabiilsus. Mida pikem on mastile paigaldatav konsool, seda enam hakkab mast kõikumama sõltuvalt tuule tugevusest. Seega tuulistes piirkondadest tuleks eelistada minimaalse pikkusega või ilma konsoolita lahendusi.

Kaablite ühendamiseks mastis kasutatakse ühenduskomplekti, käesolevasse töösse valitakse toode Esvika kodulehelt hinnaga 28 €/komplekt [12]. Mastide hoolduse juurde käib õigumine ehk töö käigus antakse mastile esialgne püstine asend ja selle töö hind kajastub teises peatükis.

1.3.1 Mastide jalandid

Enamlevinud metallmastide paigaldus toimub betoonist jalanditesse (Sele 1).



Sele 1. Valgustusmasti jalandid metallmastidele [13]

Olenevalt jalandist on sobilik masti kõrgus kuni 15 m. Valmistamisel on jalandisse tehtud paigalduskoht valgustusmastile, avad maakaabitele ning kinnitusplaat masti kinnitamiseks jalandi pealispinnal (kinnitusplaati kõikide mastide korral ei kasutata). Mastide jalandid on kõrgustega 0,5 kuni 2 m ja talle läbimõõt kuni 800 mm. Jalandi paigaldamiseks kaevatakse süvend, mille põhi kaetakse ca 10 cm paksuse liivakihi ja tihendatakse vibraatoriga. Süvend kaevatakse laiusega, et jalandi ümbrust saaks täita piisava hulga vett läbilaskva liiva-killustikuseguga. Jaland tõstetakse sillutatud põhjaga süvendisse ja asetatakse täpselt

paigale. Erilist tähelepanu pööratakse jalandi rõhtsale asendile. Süvend täidetakse kuni kaabliavani ning selle lõplik täitmine tehakse peale kaablite paigaldamist. Süvendi täitepinnas tihendatakse hoolega, et mast püsiks kindlalt. Pärast paigaldamist ulatub jalandi krae umbes 10 cm maapinnast kõrgemale. [13], [14, lk 204]

Masti ja jalandi vahe kaitsmiseks ilmastiku eest kasutatakse kaitsekummi. Töös kasutatakse hinnastamisel Esvika kodulehel toodud 150 kuni 168 mm kaitsekummi hinda [15].

Töös kasutatakse metallist koonusmastide paigaldamisel VMT Betooni toodetud jalandeid VPA 3 (91 €/tk), mis sobitub mõlemale valitud mastile [16]. Mõõndusega saab kasutada madalama mastiga väiksemat jalandit, kuid see võib muuta paigaldise ebastabiilsemaks. Jalandi õigumine on tootega samas hinnas ning seetõttu ei pea autor siinkohas kokkuvõidu ratsionaalseks.

1.4 Valgustite valik

Valgustusseadmed valitakse eelkõige selliselt, et elutsükli kulud oleksid võimalikult madalad ning täidetud oleksid objektile esitatud valgustusklassi nõuded ning muud funktsionaalsuse, ohutuse ja vastupidavusega seotud tingimused [17, lk 16].

Välisvalgustid liigitatakse kapitalikaupade alla ja neid kasutatakse sageli üle 20 aasta. Valikus tuleks eelistada kauakestvaid ja kvaliteetseid tooteid, vastasel juhul muutub alguses valitud odavam toode kõrgema hoolduskulu (üksikvahetus, remont, vms) tõttu kallimaks. [17, lk 16]

Valikus eelistatakse valgusteid tuntud ja pikaajalistelt kaubamärkidelt, mille tootjad on huvitatud kvaliteedi tagamisest ja jätkuvast koostööst ostjaga. Samuti on olulised valgustite garantiitingimused ning vajaduse korral kättesaadav nõustamine hoolduse tegemisel. Valik usaldusväärsete kaubamärkide ja nende toodete vahel osutub mitmekülgseks, kõigi analüüsimine osutub ajaliselt ebaefektiivseks, seega valikut mõjutab mingil määral subjektiivsus. Selles töös valitakse valgustite kaubamärgiks Philips, mille tänavavalgustuse tootevalikus on seitse tooteperekonda [18]. Visuaalsest väljanägemisest, kasutamise laiaast levikust ning hinnatasemest tulenevalt osutub valituks UniStreet gen2 valgusti perekond (Sele 2, lk 13), milles omakorda esindatud viis erinevat tooteseeriat [18].



Sele 2. UniStreet gen2 valgustite perekond [19]

Valgustite tüübid hinnatasemeilt ja nendele omased tooteseeria tüübiandmed on järjestatud tabelis (Tabel 3) ülevalt alla kahanevalt.

Tabel 3. UniStreet gen2 valgustite tooteseeriade andmed

Valgustitüübi nimetus	LEDide arv, tk	Valgusvoog (4000 K), lm
Large (BGP284)	120; 160	13 900...34 000
Medium (BGP283)	40; 60; 80	4 500...24 000
Mini (BGP282)	20; 30; 40	3 400...12 000
Micro (BGP281)	6; 10; 20	800...6 400
Nano (BGP280)	info puudub	800...4 700

Edasises analüüsis sobiva tooteseeria leidmiseks kaalutakse järgmisi aspekte [17, lk 16–17]:

- valgusti valgusvoo valiku mitmekülgsus;
- valgusti optika valik;
- värviedastuse üldindeks;
- värvustemperatuuri valik;
- valgusti eluiga;
- valgusti kaitseaste (löögikindlus) (IK);
- niiskus- ja tolmukindlus (IP);
- valgusti hinnataset;
- CE vastavusdeklaratsioon;
- EVEC ohutuse märgis;
- DALI liidestamise võimalus;
- Zhaga võimekus.

Analüüsimist alustatakse kõige soodsama hinnaga valgusti tüübist Nano (Tabel 4). Võrreldakse erinevate optikate valgusjaotuste arvu ja nende sihipärast kasutusala, lisaks optikatega rakendatavaid valgusvooge, mida on 16 erinevat. [18]

Tabel 4. Optika valik valgustil Nano, tk

Keskmine	Kitsas	Raudtee	Eriti lai
DM10	DN09	DRM1	DX10
DM12	DN10		
DM31	DN11		
DM32	DN25		
DM50			
DM65			

Võrdlusesse kaasatakse hinnalt järgmise kahe valgustitüübi optikad (Tabel 5).

Tabel 5. Optika valik Micro³ ja Mini valgustitel, tk

Keskmine	Kitsas	Lai	Eriti lai	Raudtee	Sümmeet- riline	Ülekäigu- rada
DM10	DN08	DW10	DX10	DRN1	DS50	DPL1
DM11	DN09	DW30	DX50	DRN2	DS51	DPR1
DM12	DN10	DW50	DX51	DRXN0		
DM13	DN11	DW52	DX52	DRXN1		
DM30	DN25	DW65	DX65	DRM1		
DM31	DN26		DX70	DRM2		
DM32	DN33					
DM33	DN50					
DM50						
DM52						
DM65						
DM70						

Võrdlemisel selgub, et Nano valgusti valgusvoo valikuvõimalused ning optikate valikud on ahtad võrreldes järgnevate valgustitüüpidega (Micro ja Mini). Micro valgustil on valida 32 ja Minil 45 erinevat valgusvoogu, erinevaid optikaid on mõlemal valgustitüübil 41 tk [18]. Töösse valitakse valgustitüüp Micro eeldusel, et valgusvoogude hulk on piisav. Eelduse paikapidavus selgub valgustite optimeerimise käigus.

³ Rasvases kirjas optikaid kasutatakse valgustite valiku optimeerimisel.

Valgustitüübi valimisel kasutatakse valgustusprogrammi DIALux evo võimalusi. Selleks laetakse programmi valgustusfailid, mis sisaldavad valitud optikat ja sellega seotud valgusvoogu ning programmis optimeerimise funktsiooni teel leitakse sobivaimad lahendused. Selgelt spetsiifilised optikad jäetakse valikust välja (Tabel 5, lk 14). Micro valgusti puhul kasutatakse programmis optimeerimisel kokku 992 erinevat valguslahendust ehk faili. Valgustite hinna kujunemine on esitatud hinnastamise peatükis.

Töös on valitud valgustusklassiks M5, mille üheks olulisimaks näitajaks on teepinna keskmise heleduse hooldeväärtus $\bar{L}_m$ ning see määratakse heleduse arvutusvälja arvutuspunktide heleduse väärtuste aritmeetilise keskmisena [20, lk 37]. Keskmise heleduse hooldeväärtus $\bar{L}_m$ väärtus leitakse töös DIALux evo programmiga, selleks vajaliku heleduse hooldeväärtus L arvutusvalem on (1) [20, lk 25]

$$L = \sum_{k=1}^{n_{lu}} \frac{I_k(C, \gamma) \cdot f_m \cdot r_k(\tan \varepsilon, \beta)}{H_k^2}, \quad (1)$$

kus	L	– heleduse hooldeväärtus, $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$;
	k	– arvestatavate valgustite järjekorraindeks;
	n_{lu}	– arvutusel arvesse võetav valgustite arv, tk;
	$I_k(C, \gamma)$	– k -nda valgusti nurkade C_k ja γ_k järgi vastavalt jaotisele 6.4, cd;
	f_m	– üldine hooldetegur, mis sõltub valgusallika valgusvoo hooldetegurist ja valgusti hooldetegurist;
	$r_k(\tan \varepsilon, \beta)$	– k -nda valgusti valguskiire, nurkkoordinaatidega, taandatud heledustegur, sr^{-1} ;
	H_k	– k -nda valgusti paigalduskõrgus teepinnast, m.

Valemist tuleneb, et õige heleduse väärtuse saamiseks tuleb eelnevalt määrata hooldetegur.

1.5 Hooldeteguri määramine

Valgustustehniliste nõuete täitmist näitavad valgustustehnilised arvutused. Valgustustehnilistes arvutustes tuleb kasutada õiget üldist hooldetegurit. See tagab valgustuspaigaldise vastavuse kõikidele valgustustehnilistele nõuetele kogu paigaldise elutsükli jooksul, arvestades planeeritud hooldusmeetmeid. [4, lk 13]

Lampide, valgustite ja olemasolevate peegeldavate pindade vananemise ja saastumise tagajärjel süsteemi tööaja pikenedes väheneb valgustus. Selles kontekstis vastab hooldetegur heleduse või valgustustiheduse keskmisele väärtusele, mis ei tohi standardis EVS-EN 13201 – 2:2015 toodud väärtusest väiksem olla. Heleduse ja valgustustiheduse

vähendamise kompenseerimiseks tuleb uus süsteem dimensionida suurema heleduse või valgustustihedusega (uus väärtus). [21, lk 12]

Valgusti hooldeteguri määramine on reguleeritud standardiga ISO/CIE TS 22012:2019 [22]. Hooldetegur f_m arvutatakse valemiga (2)[22]

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

- kus f_{LF} – valgusvoo säiletegur;
 f_S – elueategur;
 f_{LM} – valgusti hooldetegur;
 f_{SM} – pindade hooldetegur.

Enne hooldeteguri arvutamist tuleb välisvalgustusel määrata järgmised tegevused [22, lk 5]:

- hooldusvälp;
- valgustite puhastusintervall (töös 3 a);
- komponendi asendussagedus.

Töös on arvestatud paigaldise elukaare nüüdisväärtuse perioodiks 25 aastat, valgusti valgusvoo säiletegur L90B10 (100 000 tundi) saadakse tootja esitatud andmetest [18] ja Hooldeteguri määramise standardi Tabeli B.3 alusel on säiletegur 0,90 [22]. Valgustitele on määratu üsikasendus, sellest tulenev elueategur võrdub ühega. f_{LM} määratakse välisvalgustil tootja antud IP kaitseastme (IP66), keskkonna mustumisklassi ning puhastusintervalli kombinatsioonist ja leitakse Hooldeteguri määramise standardi Tabelist C.5, hooldeteguri väärtus saadakse 0,90. Välisvalgustuses arvestatakse f_{SM} võrdseks ühega, v.a valgustid tunnelites jm maa-alused paigaldised. f_m arvutamiseks rakendatakse valemit (2) ning hooldeteguri väärtuseks on töös 0,81. [22]

1.6 Elektrilöögi vastane kaitse ja maandus

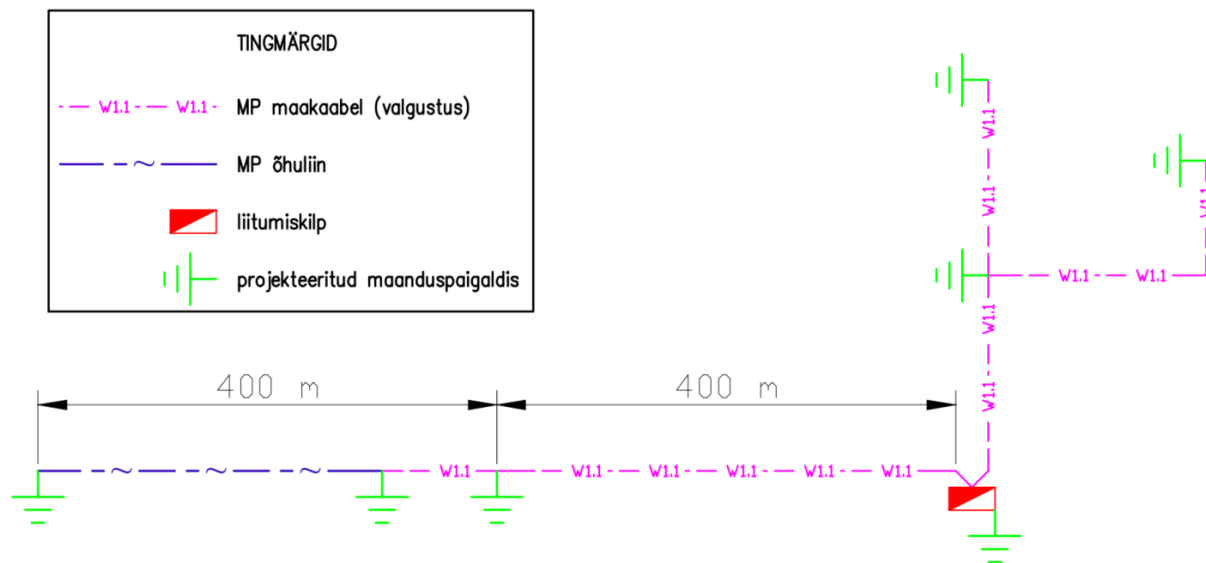
Tänavavalgustusvõrgu juhistikusüsteem on valdavalt TN-C-S, kilbi ja fiidrikaablite juhistikusüsteem vastavalt TN-C. Ohutuse tagamiseks on tarvilik, et ühe juhtme lahti ühendamine ei põhjustaks mõne teise juhtme lahti ühendamist. Rakendatakse pingestatud osade põhiisolatsioonil, katetel ja ümbristel, kaitsemaandusel, kaitse- ja potentsiaaliühtlustusel ning toite automaatsel väljalülitamisel põhinevaid kaitseviise. Fiidrikaabli PEN juht maandatakse vertikaalsete kordusmaandusseadmetega asendiplaanil näidatud asukohtades. [23], [14]

Maanduse projekteerimisel võetakse arvesse järgmisi miinimumnõudeid (Sele 3, lk 17) [24], [4, lk 23]:

- rühmakaabli PEN-juht maandatakse iga kaabli- ja haruliini otsas;

- PEN-juhi maandus planeeritakse selliselt, et igast valgustist vaadatuna ei jää maandus kaugemale kui 200 m;
- maandus projekteeritakse kohtadesse, kus õhukaabli paigaldus muutub maakaablipaigalduseks ja vastupidi;
- metallmastide maandus projekteeritakse harupunktidesse.

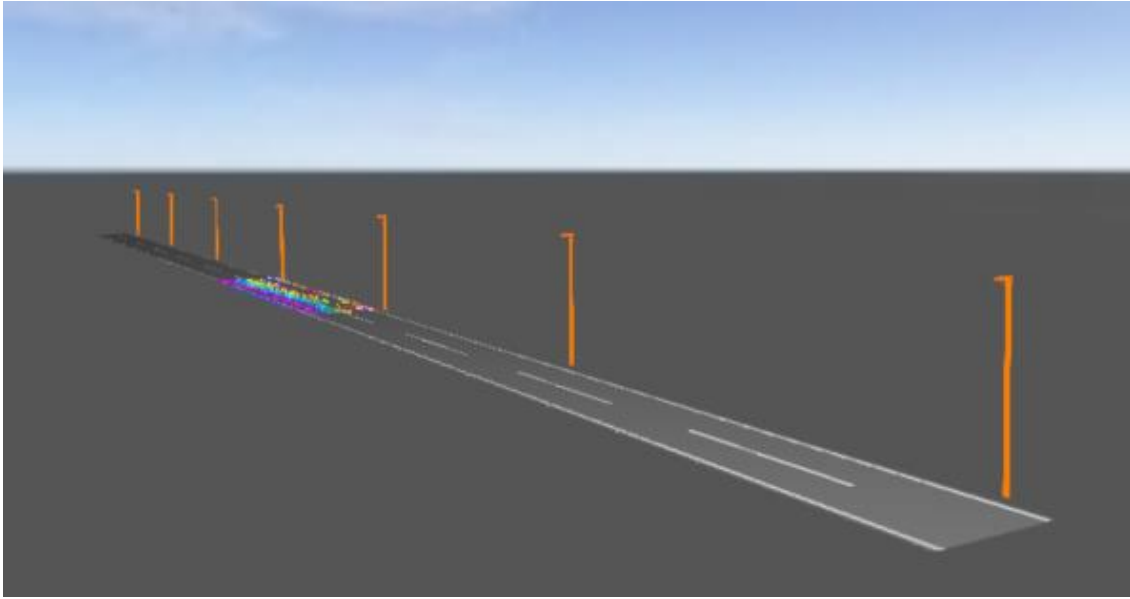
Maanduspaigaldisi eraldi kuluna välja ei tooda, nende maksumus sisaldub elektrivõrgu nominaalhinnas.



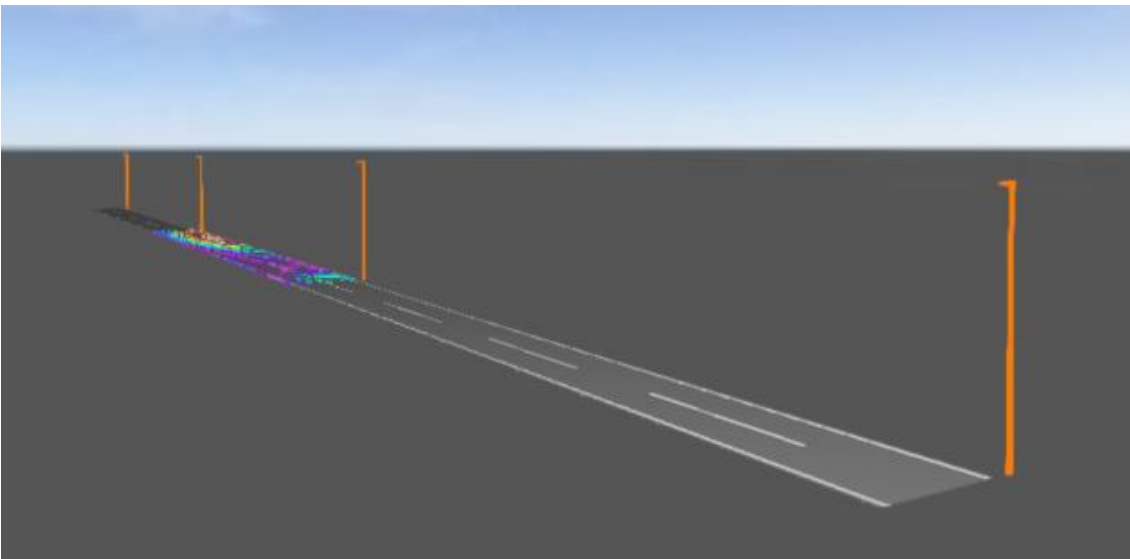
Sele 3. Tänavavalgustusvõrgu maanduspõhimõtted

1.7 Näidis TNV projekteerimise põhikomponendid

Abstraktse tänava moodustavad kaks sõidurada ning tee laiuks on valitud 4,5 m, sõidutee tagasipeegeldusteguriks CIE R3. Tänavale on määratud valgustusklassiks M5, mille põhinõuded valgustusele on rangemate väärtustega, võrreldes minimaalsete M6 valgustusklassi nõuetega. Kõrgendatud nõuete täitmiseks on valgustite võimsusvajadus suurem ning suurem elektrikulu toob paremini välja valgustite kõrgusest tingitud erinevused. Valgustamisel ei kasutata hämardamist. Võrreldakse TNV elukaarekulude tulemusi kahe mastikõrgusega, kuuemeetriste (Sele 4, lk 18) ning kaheksameetriste koonusmastidega (Sele 5, lk 18). Mastid on püstitatud VPA 3 jalanditesse, mis sobitub mõlema kõrgusega mastile. Mastid on paigutatud tee servast 0,6 m kaugusele. Valgustiks on valitud Philips UniStreet gen 2 Micro värvustemperatuuriga 3000 K ja värviedastusindeksiga CRI > 70 [18]. Valgustid kinnitatakse mastidele ilma konsolideta ning valgustite hooldeteguriks on arvatud koefitsent 0,81.



Sele 4. Kuuemeetriste mastidega TNV visuaal [25]



Sele 5. Kaheksameetriste mastidega TNV visuaal [25]

Madalamate mastidega tänavale tuleb eeldatavasti maste rohkem kui kõrgemale paigaldatud valgustite puhul. Kõik sisendhinnad peale masti hinna on mõlemale tänavatüübile samad. Kuuemeetriste mastide hind on kaheksameetristega võrreldes 76 € soodsam.

2 TÄNAVAVALGUSTUSE HINNASTAMINE

Töö autor pöördus hinnastamise metoodika saamiseks Eesti Transpordiameti poole, kuid sellekohast infot neil pakkuda ei olnud.

Töös lähtuti valgustusrajatise hinnastamisel Soomes välja antud „Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu” 2023. a juhendist, kus kasutatakse lõpetatud valgustusprojektide töödest pärinevaid koguste ühikuid ning hangetel esitatud pakkumishindu. Juhendi metoodika on jaotatud kaheks osaks, kus esimeses arvestatakse hindu pikkusühiku kohta ja teine meetod käsitleb hindu piirkonnana. Käesolevas töös kasutatakse pikkusühiku meetodit. [2, lk 115–122]

Elektrihinna määramisel lähtutakse Enefit Greeni kodulehel toodud 2023. a majandusaruande prognoosandmetest Baltikumi kohta. Vastava tuleviku-vaate on Enefit Green välja töötanud omakorda kolme analüüsifirma prognooside baasil ning töös kasutatavaks hinnaks on 0,095 €/kWh. [26, lk 4] Autor rakendab elektrihinnale lisaks võrgutasu, mille määraks võetakse 0,05 €/kWh, seega kujuneb nominaalhinnaks kokku 0,145 €/kWh ilma käibemaksuta.

2.1 Tänavavalgustuse ehituskulud

Erinevate teevalgustuste ehitusmaksumuste võrdlemiseks valitakse töös pikkusühikuks kilomeeter. Tänavavalgustuse ehitusmaksumus K_r , €/km leitakse valemiga (3) [2, lk 115]

$$K_r = \frac{m \cdot H_{pj} + n \cdot H_v + S \cdot H_{sv}}{S} \cdot 1000, \quad (3)$$

- kus m – valgustusmastide arv ristlõikes, tk;
 H_{pj} – valgustusmasti ja jalandi hind koos paigaldustööde ja ümbritseva täidisega, €/tk;
 n – valgustite arv tänava ristlõikes masti kohta, tk;
 H_v – valgusti hind koos valgustijuhtme ning paigaldus- ja ühendustöödega, €/tk;
 S – mastivahe, m;
 H_{sv} – tänavavalgustuse elektrivõrgu nominaalhind, €/m.

Valgustusmastid on tänaval paigaldatud tee ühte serva, samuti on mastidele kinnitatud üks valgusti. H_{pj} sisalduva paigaldustöö hind 100 €/tk rehkendatakse koos samal ajal rajatava elektrivõrgu tööga, s.t jalandi paigaldamisel kasutatakse osaliselt olemasoleva kraavi süvendit. UniStreet valgustite hinnad ei ole avalikult saadaval, H_v kujuneb 280 €/tk, mis ei sisalda Zhaga pesasid. DiaLux programmi poolt leitud tänavavalgustite mastivahede kaugused esitatakse tabelis (Lisa 5) ning need varieeruvad 19 kuni 50 m.

Tänavavalgustuse elektrivõrgu nominaalhind sisaldab kogu tänavavalgustuse elektrivõrgu varustust ja töid, mis on vajalikud valgustite tööks, v. a valgusti juhe [2, lk 116]. Nende hulka kuuluvad [2, lk 116]:

- maakaablid ja õhuliinid;
- kaablikaitsetoru;
- maandus;
- tänavavalgustuskeskused;
- ühenduskomplektid;
- kõik ühendus- ja pinnasetööd.

Elektrivõrgu nominaalhind arvutatakse kõigi seadmete ja tööde kogumaksumuse jagamisel elektrivõrgu kogupikkusega, mille pikkusena kasutatakse kaablikraavi või õhuliini kogupikkust [2, lk 116].

H_{sv} nominaalhind (45 €/m) kujuneb ligi kaks korda kallimaks kui soomlaste juhendmaterjalis toodu, arvatavaks põhjuseks on piirkond [2, lk 121]. Lõputöös on arvestatud tänavaga, kus tekib kaevamisel enam kaablite ristumisi võrreldes põhjanaabrite töös maantee serva kaabli paigaldamisega. Seetõttu on käsitsi tööd enam ning ühikuhind kallim.

2.2 Tänavavalgustuse eksploatatsiooni- ja hoolduskulud

Sarnaselt ehituskuludele, kasutatakse võrreldavuse saamiseks eksploatatsiooni- ja hoolduskulude arvutamisel pikkusühikuna kilomeetrit. Eksploatatsiooni- ja hoolduskulud leitakse valemiga (4) [2, lk 116]

$$K_{kh1} = (K_{k1} + K_{h1}), \quad (4)$$

kus K_{kh1} – esimese aasta eksploatatsiooni- ja hoolduskulud, €/km;

K_{k1} – esimese aasta eksploatatsioonikulud, €/km;

K_{h1} – esimese aasta hoolduskulud, €/km.

Esimese aasta eksploatatsioonikulud K_{k1} leitakse valemi (5) [2, lk 117] põhjal

$$K_{k1} = \frac{t_1 \cdot n \cdot P_i \cdot H_e}{S} \cdot 1000, \quad (5)$$

kus t_1 – valgusti töötundide arv aastas, h;

P_i – valgusti sisendvõimsus, kW;

H_e – elektri nominaalhind, €/kW.

Töö lihtsustamise huvides valgustite hämardamist ei kasutata, valgustite töötundide arvuks aastas on 4000 h. Valgustite sisendvõimsused on toodud tabelis (Lisa 5) ja nende amplituudid ulatuvad 11,2 kuni 49,9 W. K_{k1} kulu tekib ainult valgustite töötamisel.

Esimese aasta hoolduskulud leitakse valemi (6) [2, lk 117] põhjal

$$K_{h1} = \frac{\frac{n \cdot H_{rv}}{t_2} + q \cdot n \cdot H_{yv} + m \cdot C}{S} \cdot 1000, \quad (6)$$

- kus H_{rv} – valgusti puhastamise nominaalhind, €/tk;
 t_2 – puhastusintervall, a;
 q – üksikvahetuste suhteline arv aastas, %;
 H_{yv} – valgusti ühekordse vahetuse nominaalhind, mis sisaldab paigaldustöid, €/tk;
 C – valgustusmasti hoolduse nominaalhind, €/tk.

Töös on määratud valgustite puhastusintervalliks kolm aastat ja puhastamise nominaalhinnaks 10 €/tk. Üksikvahetuste suhteliseks arvuks võetakse Soomes koostatud tööst väärtus 0,4%. Valgusti ühekordse vahetuse nominaalhind on võrdne selle ehitusmaksumuses arvestatud paigaldus- ning ühendustöödega 280 €/tk. Valgustusmasti hooldus koosneb peamiselt õigutamisest hinnaga 20 €/tk ja on mõlemal mastikõrgusel sama.

2.3 Eksploaatatsiooni- ja hoolduskulude nüüdisväärtused

Tänavavalgustuse projekti arvestusperioodi (tavaliselt 25 aastat) erinevatel aastatel tasumisele kuuluvad kulud, nagu ehituskulud ja nende intressid või eksploaatatsiooni- ja hoolduskulud, tuleb omavahel võrreldavaks teha. Eelnimetatud põhjusel diskonteeritakse kulud ja tulud administratiivselt kindlaksmääratud arvestusmääraga (tavaliselt 4%) projekti käivitamise aastale. [2, lk 120]

Võrreldavuse tagamiseks leitakse eksploaatatsiooni- ja hoolduskulude nüüdisväärtused kilomeetri kohta, milleks rakendatakse valemit (7) [2, lk 119]

$$K_{kh} = (K_k + K_h), \quad (7)$$

- kus K_{kh} – eksploaatatsiooni- ja hoolduskulude nüüdisväärtus⁴, €/km;
 K_k – eksploaatatsioonikulude nüüdisväärtus, €/km;
 K_h – hoolduskulude nüüdisväärtus, €/km;

Eksploaatatsioonikulude nüüdisväärtus K_k arvutatakse valemiga (8) [2, lk 119]

$$K_k = \sum_{t=0}^{24} \left(\frac{1 + \beta_k}{1 + p} \right)^t \cdot K_{k1}, \quad (8)$$

- kus β_k – eksploaatatsioonikulude aastane kasv⁵, %;

⁴ Nüüdisväärtuse periood käesolevas töös 25 a.

⁵ Aastane kasv töös 4%.

- p – adminastratiivselt määratud intressimäär⁶, %;
 t_t – perioodi pikkus aastates, a.

Hoolduskulude nüüdisväärtus K_h arvutatakse valemiga (9) [2, lk 119]

$$K_h = \sum_{t_t=0}^{24} \left(\frac{1 + \beta_h}{1 + p} \right)^{t_t} \cdot K_{h1}, \quad (9)$$

kus β_h – hoolduskulude aastane kasv⁷, %.

Tänavavalgustuse ehitusaeg on tavaliselt piisavalt lühike, mille perioodil ühikuhinnad ei muutu ja intressikulud ei kaasne. Sellest tulenevalt arvutatakse projekti elukaarekulude nüüdisväärtus valemiga (10) [2, lk 120]

$$E_k = K_r + K_{kh} + \frac{1}{(1 + p)^{t_t}} \cdot J, \quad (10)$$

kus E_k – elukaarekulude nüüdisväärtus (25 a), €/km;
 J – arvestuslik jääkväärtus, €/km.

Arvestuslik jääkväärtus J on 30% ehituskuludest K_r .

2.4 Sisendite eeldatav tulem

Ehitusmaksumus valgustuspunkti kohta (ilma elektrivõrgu nominaalhinnata) tuleb 6 m kõrgusel mastil 694 € ja 8 m mastil 770 €, ehk kõrgemale paigaldatud valgustusallika ehitamine maksab valgustuspunkti kohta ca $((770 / 694 - 1) \cdot 100\% =)$ 11% enam. Saavutamaks võrdset ehituskulu peaks mastivahe ulatus jääma samasse suurusjärku. Madalamate mastide vahekauguse puhul näiteks 25 m peaks kõrgemate mastide korral vahekauguseks tulema kuni $(25 \cdot 1,11 =)$ 27,8 m saavutamaks samaväärset ehitusmaksumust. Empiirilisele kogemusele tuginedes eeldab autor, et kõrgemate mastide vahekaugus tuleb pikem. Seega eeldatavad ehituskulud tulevad 8 m mastide kasutamisel odavamad.

Ekspluatatsioonikulu erinevus kahe lahenduse korral aasta kohta hakkab sõltuma valgusti sisendvõimsusest (madalamale paigutatud valgustil peaks tulema soodsam) ja valgustite arvust kilomeetrile. Täpne energiakulu selgub DIALux evo programmist saadavatest tulemustest ja arvutustest valgustite koondtabelis (Lisa 5).

Hoolduskulud sõltuvad peamiselt valgustite arvust, seepärast on oodatav kulu eelis kõrgemale paigutatud valgusti lahendusel. Elukaarekulude nüüdisväärtuses kajastub

⁶ Intressimäär töös 4%.

⁷ Hoolduskulude kasv töös 3%.

ehitumaksumus lisaks 30% jääkväärtusena, mis peaks eelise andma kõrgemate mastidega lahendusele.

3 ARVUTUSTE TULEMUSED, ANALÜÜS JA JÄRELDUSED

DIALux evost saadakse andmete optimeerimisega 62 erinevat valgustite andmerida, mis sisestatakse Excelisse tabeli kujul. Kuue ja kaheksa meetri kõrgused mastid jagunevad tabelis esialgu võrdselt. Kuigi valgustusprogrammi kaasamisel jäeti välja spetsiifilised valgustitüübid, mis ei olnud mõeldud pikisuunas tee valgustamiseks, on valgustite valgustustulemuste jt skaala väärtuste erinevused suured. Energiatõhususe ja mastivahe näitajad erinevad kordades, lisaks on andmetes standardist tulenevatele nõuetele mitte vastavaid valgusteid (need eemaldatakse valimist koheselt, 4 tk). Andmete võrreldavaks tegemisel klassikalises mõistes silumist ei rakendata, kuna andmemahud ei ole suured, kuid erindite eemaldamiseks kasutatakse hajuvusdiagramme (Lisa 3) ning erindid eemaldatakse visuaalse vaatluse ja nende põhjuste alusel. Erinditena eemaldatakse andmetest seitse valgustit, kokku eemaldatakse kuue meetri kõrgusel asuvaid valgusteid 7 tk ja kaheksa meetri kõrgusel 4 tk (Lisa 4). Sel viisil puhastatud andmeid (51 valgustit) saab hakata analüüsima (Lisa 5).

Analüüsimise eesmärgiks on leida põhjuslikke seoseid, et teha järeldusi tänavavalgustuse kulukuse kohta – kuidas projekteerimisele esitatud tingimused mõjutavad tulemust.

Järgnevates alapeatükkides kasutatakse saadud andmete analüüsimisel lineaarset korrelatsioonikordajat r , mis leitakse iga seose kohta eraldi Excelis funktsiooniga CORREL. Sellele iseloomulike tunnuste väljatoomine kajastatakse hajuvusdiagrammil. Lineaarset korrelatsioonikordajat kasutatakse töös selle lihtsuse tõttu seose tuvastamisel, kõik leitavad seosed ei pruugi olla lineaarsed.

Korrelatiivseid seoseid uurides iseloomustatakse neid kolmest põhilisest küljest [27, lk 160]:

- seose rangusest ehk tugevusest, mida väljendab korrelatsioonikordaja r ;
- seose kujust, mis määratakse geomeetrilise joonena, mille juurde kuulub joone võrrand;
- seose suunast.

Geomeetriline joon iseloomustab ühe väärtuse muutumist teise suhtes. Töös kasutatakse lineaarset korrelatsioonikordajat, seepärast on jooneks sirge. Sirge koht korrelatsiooniväljal (hajuvusdiagrammil) leitakse vähimruutude meetodil ning sirget nimetatakse regressioonijooneks. [27, lk 160]

Korrelatiivse seose ranguse all mõeldakse korrelatiivse ja funktsionaalse seose sarnasusastet. Korrelatiivne seos on seda rangem, mida vähem on diagrammiväljal olevaid võrreldavaid väärtusi esindavad punktid hajutatud ehk mida lähemal need punktid

paiknevad seose kuju ja suunda iseloomustavale teoreetilisele sirgele. Lineaarse korrelatsioonikordaja rangust mõõdetakse korrelatsioonikordaja absoluutväärtusega. Metoodika on välja töötatud selliselt, et kordaja väärtus on null, kui seost ei ole, ning väärtus üks viitab täiesti rangele seosele, s.t funktsionaalsusele. Seega korrelatiivne seos on üldisem ja funktsionaalset seost võib vaadelda korrelatiivse seose erijuhuna. [27, lk 160]

Korrelatiivset seost nimetatakse positiivseks, kui ühe suuruse arväärtuse kasvades teise suuruse arväärtus samuti kasvab, ning negatiivseks, kui esineb pöördvõrdeline seos. Lineaarse korrelatsiooni korral iseloomustab seose suunda korrelatsioonikordaja märk r . [27, lk 160]

Põhjuslikke seosed otsitakse järgmiste andmete vahel:

- E_k ja masti kõrgus;
- E_k ja mastivahede;
- K_r ja mastivahede;
- K_{k1} ja mastivahede;
- K_{h1} ja D_E ;
- masti kõrgus ja valgusti võimsus;
- E_k ja elektri hind;
- K_{h1} ja mastivahede;
- K_h ja K_r ;
- pikiühtluse ja D_E ;
- üldühtluse ja D_E ;
- D_P (erivõimsusnäitaja) ja D_E .

3.1 TNV elukaarekulu, mastide kõrguste ja mastivahede seos

Mastide kõrgusest tulenevad soodsaimad E_k summad on toodud tabelis (Tabel 6).

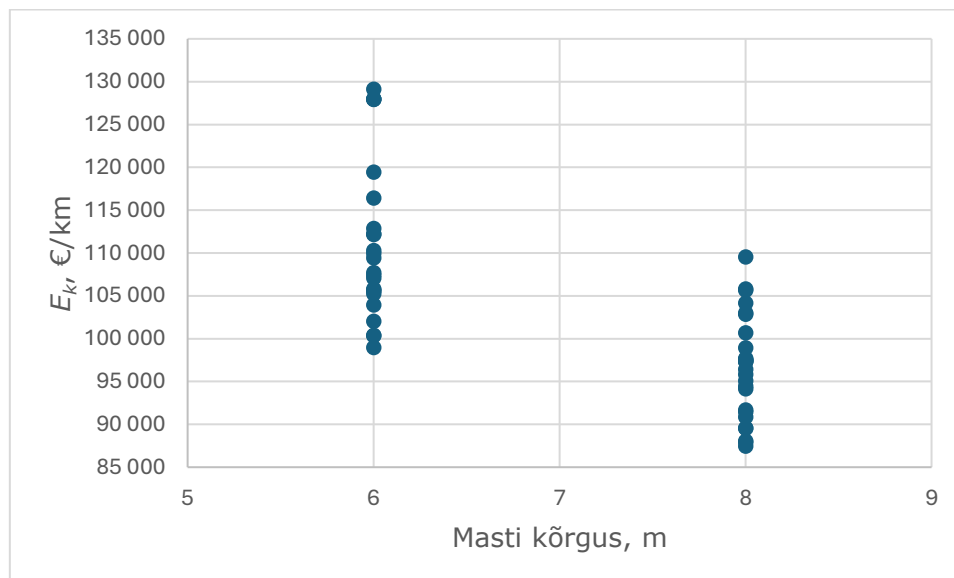
Tabel 6. TNV viis soodsaimat elukaarekulude nüüdisväärtust kuue ja kaheksa meetri kõrgustel mastidel

Valgusti BGP281 T25 nimi	S, m	Mk, m	E_k , €/km
LED44-4S/730 PSA DN26 FG	48	8	87 467
LED50-4S/730 PSA DN10 FG	49	8	87 917
LED39-4S/730 PSA DN25 FG	46	8	88 053
LED54-4S/730 PSA DN11 FG	48	8	89 551
LED54-4S/730 PSA DX65 FG	48	8	89 551
LED39-4S/730 PSA DM11 FG	34	6	98 974

Valgusti BGP281 T25 nimi	S, m	Mk, m	E_k , €/km
LED30-4S/730 PSA DN11 FG	32	6	100 354
LED44-4S/730 PSA DM10 FG	34	6	100 381
LED39-4S/730 PSA DN33 FG	32	6	102 031
LED34-4S/730 PSA DM32 FG	30	6	103 948

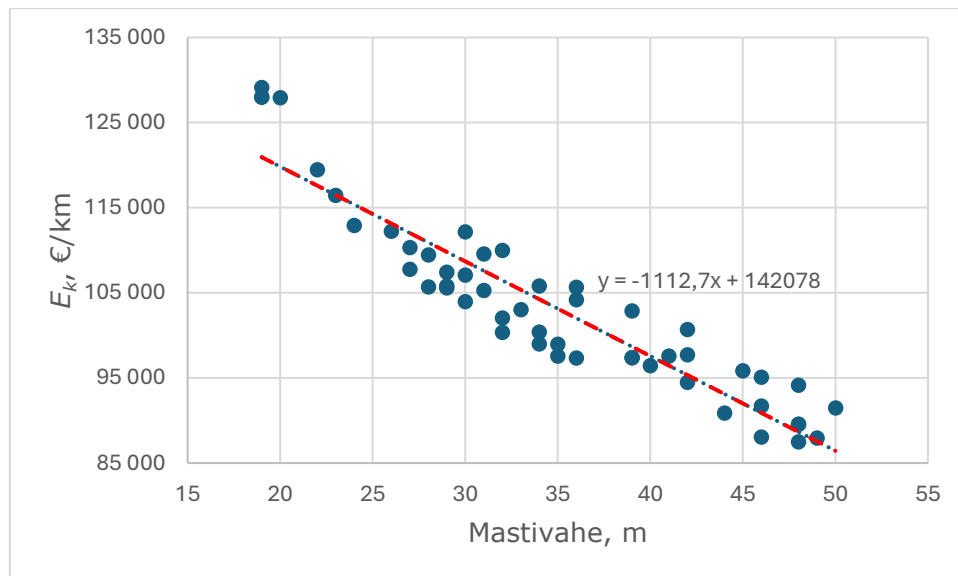
Tabelis toodud andmete analüüsimisel selgub, et kõige soodsamate kuue ja kaheksa meetri kõrguste mastide E_k hinnaavahe erinevus on $((98974 / 87467 - 1) \cdot 100\% =)$ 13% madalamate kahjuks ehk summas $(98974 - 87467 =)$ 11498 €/km.

Visuaalselt ülevaatliku tulemuse E_k maksumuse ja masti kõrguste vahel annab hajusvudiagramm (Sele 6). Soodsamad lahendused ilmnevad kõrgemate mastide kasutamisel.



Sele 6. E_k ja masti kõrgusest tulenev valgustusrajatise maksumus

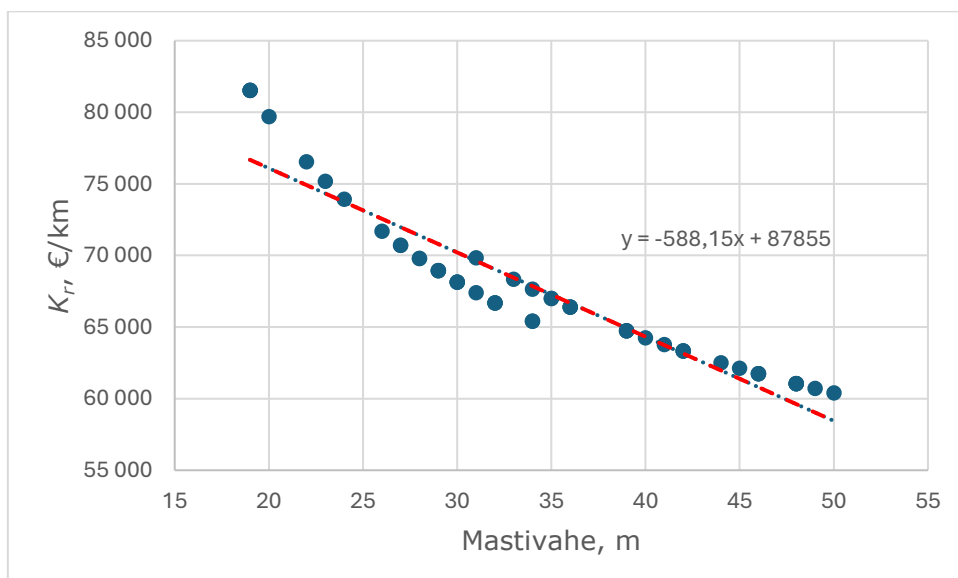
Võimaliku seose leidmiseks koostatakse lisadiagramm (Sele 7, lk 27) E_k ja mastivahede seose kohta. Diagrammil esitletav tulemus kajastub negatiivses korrelatsioonikordajas $r = -0,93$. See pöördvõrdeline seos annab kinnituse, et pikema mastivahega saavutatakse madalam elukaarekulude nüüdisväärtus ehk kogukulu. Koondtabelis on kõige soodsam kuuemeetrise mastikõrgusega elukaare nüüdisväärtus E_k alles 21. positsioonil.



Sele 7. Elukaare nüüdisväärtuse ja mastivahede seos, regressioonisirge valemiga

3.1.1 Ehituskulu ja mastivahe ning -kõrgus

Teise peatüki lõpus eeldas töö autor tulenevalt TNV sisendite hindadest, et ehituskulud K_r on kõrgemate mastide valikul madalamad, sest mastivahed kompenseerivad kõrgemate mastide hinnad. Eeldus leiab kinnitust selel (Sele 8) ning korrelatsioonikordaja väärtus r ($= -0,94$) kajastab väga tugevat pöördvõrdelist seost ehituskulu ja mastivahe korral. (Diagrammi kõveral kohtakuti olevad ülemised punktid kajastavad sobimatust valgusti valikust tingitud ebaefektiivsust.)



Sele 8. TNV ehitushindade ja mastivahede seos, regressioonisirge valemiga

Tabelis (Tabel 7) esitatakse soodsaimad ehitusmaksumused kuue- ja kaheksameetriste mastidega.

Tabel 7. TNV kolm madalaimat K_r väärtust mõlemal mastikõrgusel

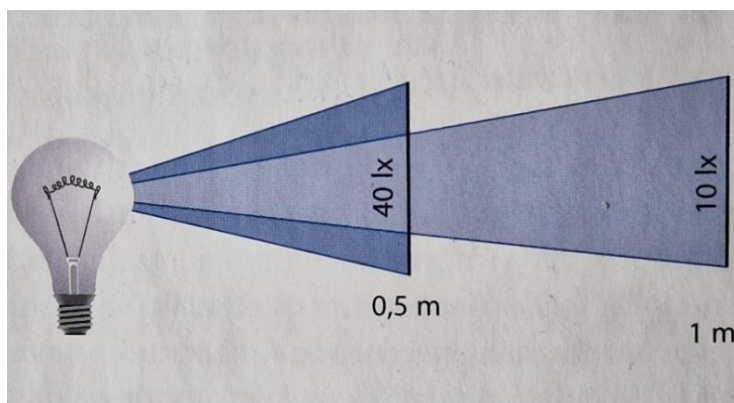
Valgusti BGP281 T25 nimi	S, m	Mk, m	K_r , €/km
LED70-4S/730 PSA DM11 FG	50	8	60 400
LED50-4S/730 PSA DN10 FG	49	8	60 714
LED74-4S/730 PSA DM10 FG	48	8	61 042
LED44-4S/730 PSA DM10 FG	34	6	65 412
LED39-4S/730 PSA DM11 FG	34	6	65 412
LED30-4S/730 PSA DN11 FG	32	6	66 688

Kõrgema ja madalama mastiga TNV K_r erinevus on $((65412 / 60400 - 1) \cdot 100\% =) 8\%$ suurem madala masti korral. Võrdlusesse valiti soodsaimad ehituskulu väärtused, need moodustavad odavaimatest E_k ligikaudu 2/3. Seega on K_r oluline mõju üldkulule.

Juba kasutusesolevale tänavale madalamate mastidega TNV projekteerimise muudab keerulisemaks valgustuspunktide rohkus. Projekteerijal tuleb leida sobivaid kohtasid mastide paigutamiseks enam ja olemasolevad trassid seavad piiranguid. Kõrgemate mastide kasutamisel saavutatav pikem mastivahe suurendab liiklusohutust – maste on km kohta vähem. Valgusti võimaliku rikke korral osutub ohutumaks madalamate mastide ja väiksema mastivahega tänav, sest valgustamata lõigu pikkus on lühem.

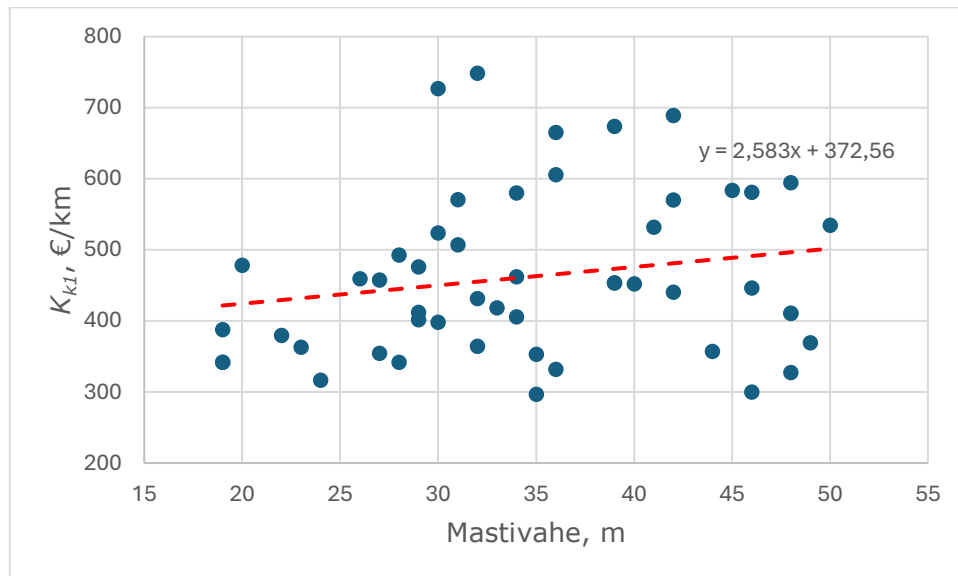
3.1.2 Eksploaatatsioonikulu

Töös analüüsitakse eksploaatatsioonikulu, mis madalamatel mastidel peaks olema väiksem võrreldes kõrgemate mastidega, tulenevalt valgustite energiatarbimisest. Teooriast on teada, et valgustustihedus sõltub ruutpöörvõrdeliselt valgusallika ja valgustatava pinna vahelisest kaugusest (Sele 9).



Sele 9. Pinna valgustustiheduse sõltuvus valgusallika kaugusest [28, lk 12]

Kaks korda kõrgemale paigutatud valgusti valgustab neli korda nõrgemalt. [28, lk 12] Käesolevas töös ei ole valgustite kõrguse erinevus kordades, seega seos ekspluatatsioonikulu ja valgustite kõrgusest tingitud mastivahede vahel väga tugev olla ei tohiks. Võimaliku seose saamiseks koostatakse hajuvusdiagramm (Sele 10), mida iseloomustav korrelatsioonitegur r annab nõrga (0,2) seose.



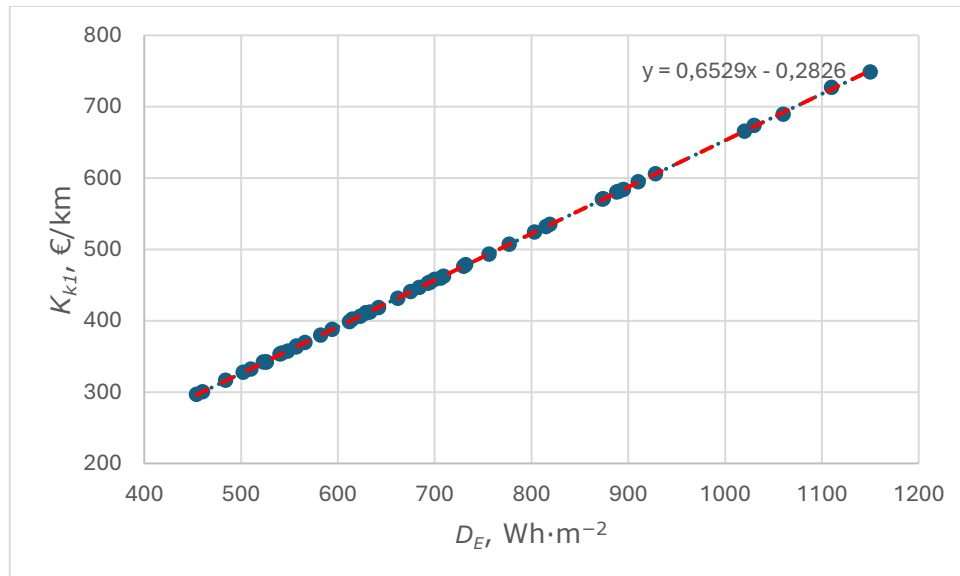
Sele 10. K_{kl} ja mastivahe seos, regressioonisirge valemiga

Lõputöös valitud elektri nominaalhinna juures osutub kõige madalama E_k kuluga (Tabel 8) kaheksameetrise mastiga valgusti D_E 502 $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ ja vastava kuuemeetrise D_E 623 $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$, seega elektri hinna kasvades madalama valgustiga rajatis kõrgemast soodsamaks muutuda ei saa.

Tabel 8. Soodsaima E_k alusel valitud mõlema mastikõrgusega viis D_E väärtust

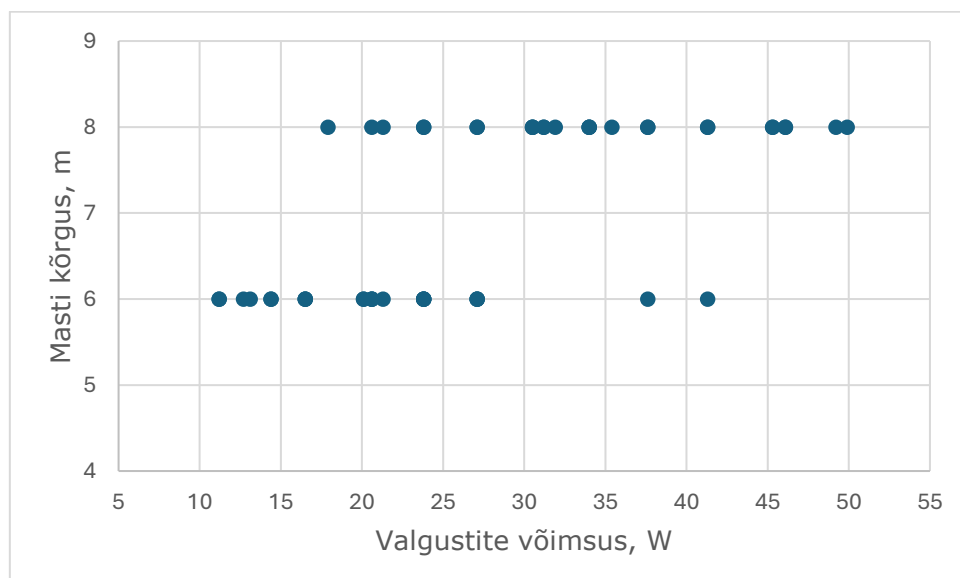
Valgusti BGP281 T25 nimi	S, m	Mk, m	D_E , $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$
LED44-4S/730 PSA DN26 FG	48	8	502
LED50-4S/730 PSA DN10 FG	49	8	566
LED39-4S/730 PSA DN25 FG	46	8	460
LED54-4S/730 PSA DN11 FG	48	8	629
LED54-4S/730 PSA DX65 FG	48	8	629
LED39-4S/730 PSA DM11 FG	34	6	623
LED30-4S/730 PSA DN11 FG	32	6	557
LED44-4S/730 PSA DM10 FG	34	6	709
LED39-4S/730 PSA DN33 FG	32	6	662
LED34-4S/730 PSA DM32 FG	30	6	612

Jääb võimalus, et valimis on efektiivse D_E väärtusega valgusti madalal mastil, mille potentsiaal ilmneb kõrgema elektrihinna korral, elimineerides ehitushinnast tekkinud kulud. K_{k1} ja D_E väärtuse seose määramiseks koostatakse diagramm (Sele 11) ning arvutatakse korrelatsioonikordaja. Seos kahe väärtuse vahel on üksühene, $r = 1$.



Sele 11. K_{k1} ja D_E vaheline üksühene seos, regressioonisirge valemiga

Kui madalamatel mastidel on väiksema võimsusega valgustid, siis võib otsing olla resultatiivne. Leidmaks valgustite jaotust võimsuse järgi koostatakse diagramm (Sele 12).



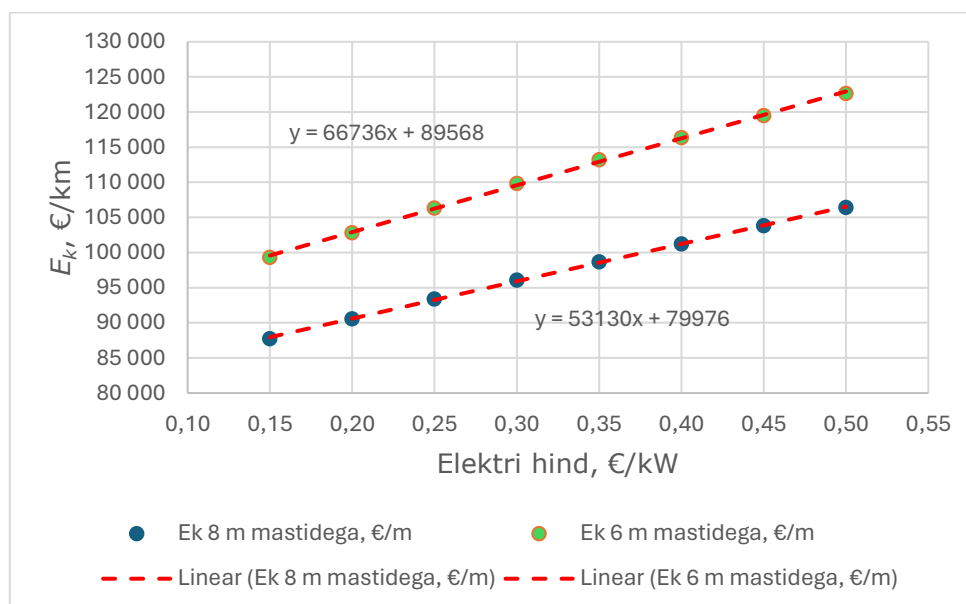
Sele 12. Valgustite võimsuse jaotus lähtudes masti kõrgusest

Diagramm kinnitab madalamatel mastidel väiksema võimsusega valgustite olemasolu. Koostatakse elektrihinna 0,05 €/kW tõusva sammuga tabel (Tabel 9, lk 31).

Tabel 9. Elektri hinnast tulenev E_k muutus kaheksa- ja kuuemeetriste mastidega

Elektri hind, €/kW	E_k 8 m mastidega, €/m	E_k 6 m mastidega, €/m	6 m ja 8 m mastiga E_k muutus, %
0,150	87 749	99 324	113%
0,200	90 572	102 824	114%
0,250	93 395	106 324	114%
0,300	96 072	109 824	114%
0,350	98 659	113 231	115%
0,400	101 246	116 371	115%
0,450	103 833	119 512	115%
0,500	106 420	122 653	115%

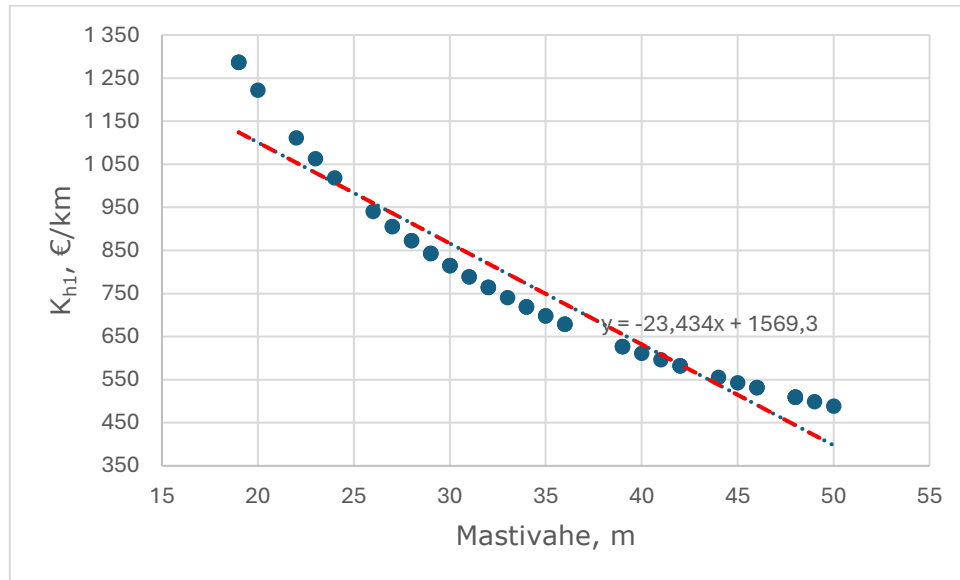
Tulemused osutuvad vastupidiseks otsitule ning suund on oodatule vastupidine. Mõlema kõrgusega mastide korral vahetus valgusti energiatõhusama vastu, kuid üldine tendents näitab kõrgemate mastidega TNV rajamise eelist. Elektri kallinedes tõusevad suhtelised E_k kulud madalamate mastide korral enam (Sele 13). Madalamast valgustuskõrgusest saadav energiasääst ei väljendu TNV projekti maksumuses piisavalt või kaasneb madalamate valgustite võimsusega väiksem mastide vahe ja sellest kõrgem K_r . Valgustite koondtabeli analüüsimisel on kaks kõige energiatõhusamat valgustit 8 m mastidel. Järeldatakse, et kaasaegse valgusti energiatõhusus on tingitud valgusti optikast ja valgusti kõrgus ei osutu ainumääravaks.



Sele 13. Soodsaima E_k muutus elektri hinna tõustes kuue- ja kaheksameetriste mastidega, regressioonisirge valemiga

3.1.3 Hoolduskulu

Hoolduskulu on valgustuspunkti põhine ning otseselt tulenev mastide arvust kilomeetri kohta. Vastav fakt leiab kinnitust seel (Sele 14). Seos ei ole lineaarne, pigem eksponentfunktsioonile vastav.

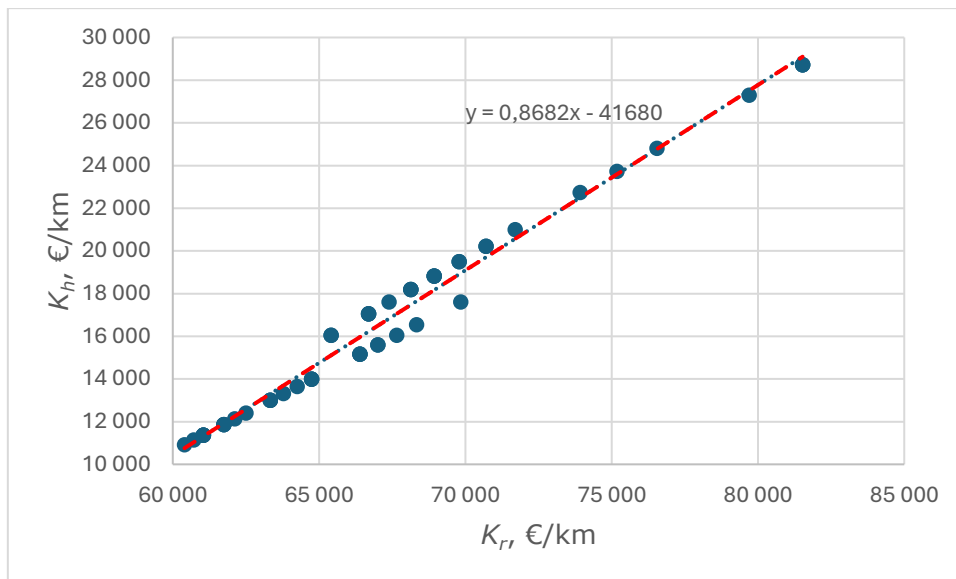


Sele 14. Tänavavalgustuse K_{h1} tulenevalt mastivahedest, regressioonisirge valemiga

Väiksema mastide vahemaa tingib valgustusallika madalam kõrgus. Seega tuleb km kohta valgusteid ning maste enam ning suurenevad kulud:

- valgustite puhastamisele;
- üksivahetustele;
- mastide õigutamisele.

Nende tööde tegemiseks vajatakse kvalifitseeritud tööjõudu ning ajas seda liiki kulu saab ainult suureneda. Hoolduskuludelt tulevikus saavutatav kokkuhoid tekib TNV projekteerimisel. Suurem mastide vahe tagab madalama ehitushinna K_r ning sellega on seotud hoolduskulud K_h (Sele 15, lk 33), mida iseloomustab korrelatsioonikordaja väärtus üks.

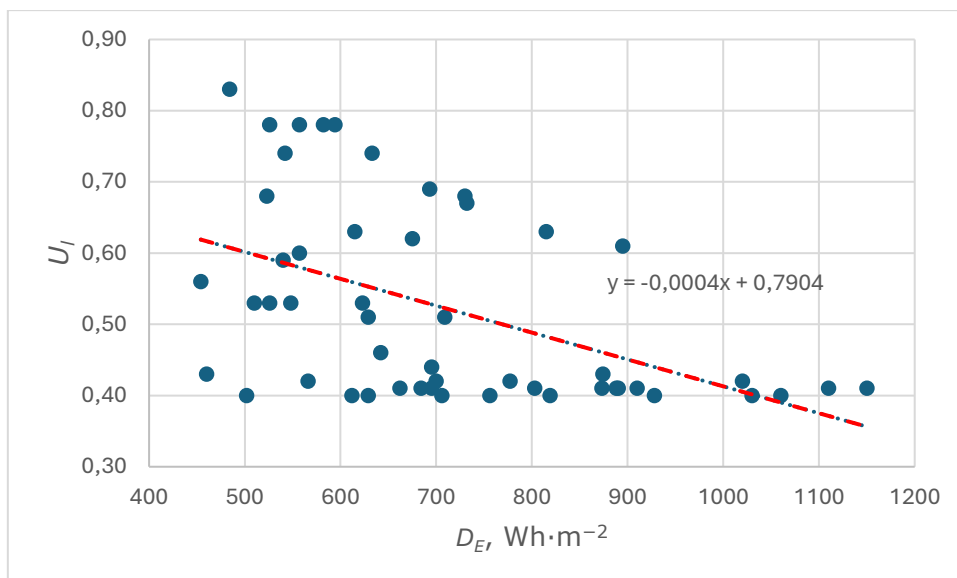


Sele 15. Ehitusmaksumus ja hoolduskulude nüüdisväärtuse seos, regressioonisirge valemiga

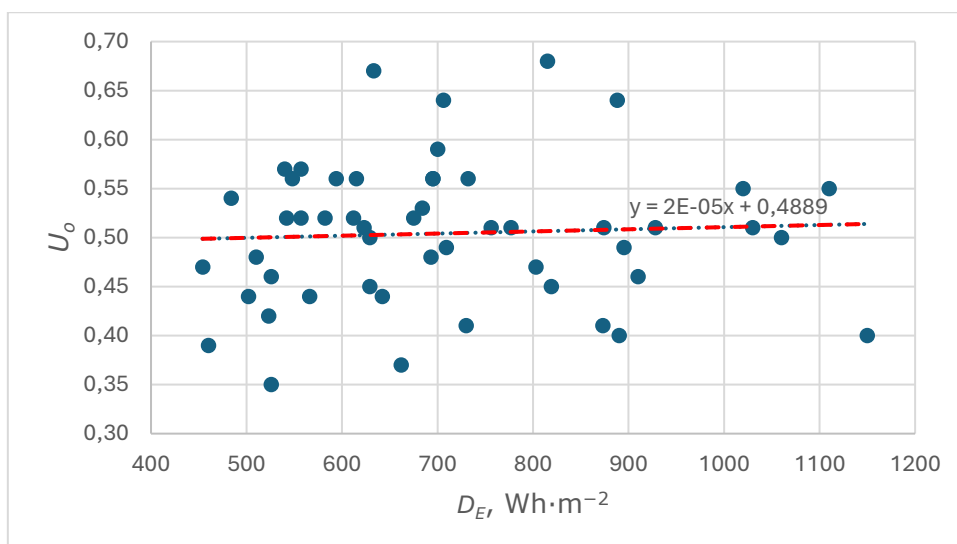
3.2 Heleduse üld- ja pikiühtluse ning TNV energiakulu analüüs

Standardist EVS-EN 13201-5:2015 lähtuvalt tuleb energiatõhususe ja keskkonnanahoiu eesmärgil hoiduda valgustusklassi piirnormide ületamisest, sh peetakse silmas üldühtlust U_o ja pikiühtlust U_l [5].

Käesolevasse töösse valitud esialgsest 992. valgustist vastasid U_l nõudele 35 tk ja U_o nõuet täisid neli valgustit. Töösse on kaasatud ka nendele nõuetele mittevastavad valgustid, mille alusel võidakse töö liigitada standardile mittevastavaks. Seega seab standardist tulenev soovituslik nõue valgustusprojekteerijad keerulisse olukorda. Autor uuris, mil määral antud nõude täitmine aitab kaasa energiatõhususele. Analüüsimaiks U_l ja U_o energiakulukust koostati kaks hajuvusdiagrammi. Esimese hajuvusdiagrammi (Sele 16, lk 34) tulemus lükkab ümber pikiühtluse põhjendamata nõude eelmainitud alustel. Suurema pikiühtlusega saavutatakse väiksem D_E väärtus. Korrelatsiooninäitaja tulemus r ($= -0,5$) viitab vastupidisele keskmise määraga mõjule. Järgmisel diagrammil (Sele 17, lk 34) otsitakse aastase energiatarbimise ja heleduse üldühtluse vahelist seost, mille tulemus on positiivne, kuid näitaja liigitub nõrga ja olematu seose piirimaile. Sellest järeldub, et piki- ja üldühtluse määra ületamisega ei kaasne käesolevas töös energiatõhususe alanemist. Keskkonnasäästu aspektide hindamiseks antud töö maht ja eesmärk ei vasta, kuid võimalikku valgustusreosust saab vähendada valgustite valimisel G valgustusklassi kasutamist. Antud väärtus on toodud valgustite üldtabelis (Lisa 5).

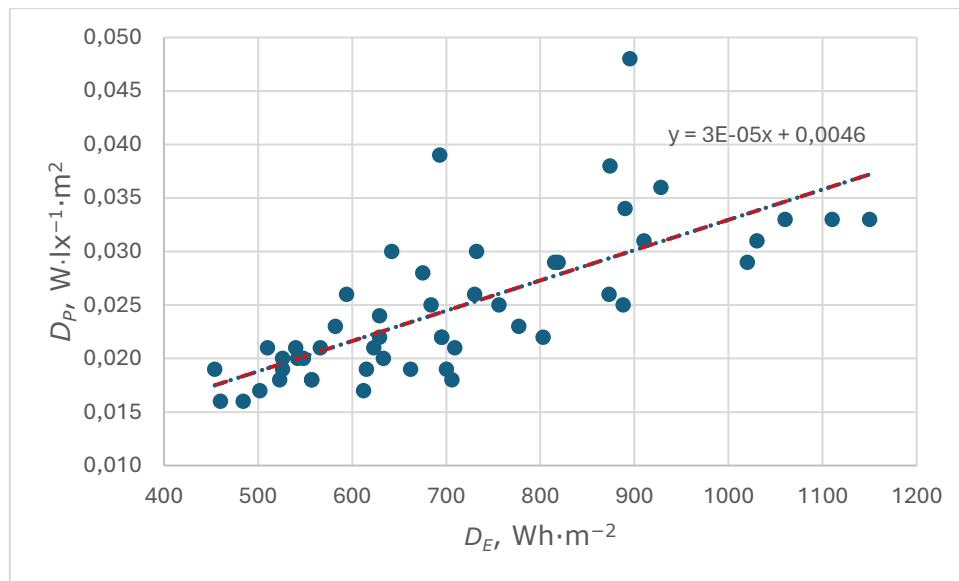


Sele 16. Pikiühtluse ja aastase energiatarbimise seos, regressioonisirge valemiga



Sele 17. Üldühtluse ja aastase energiatarbimise seos, $r = 0,05$, regressioonisirge valemiga

Standardis EVS-EN 13201-5:2015 nõutakse, et D_E ja D_P väärtust kasutatakse koos. Käesolevas töös on kasutatud senini ainult D_E väärtust ning eelnevalt leiti selle üksühene seos eksploatatsioonikuluga, mis tõestab väärtuse paikapidavust. Valgustite koondtabelis (Lisa 5) soovitakse D_P väärtusest loobuda ülevaatlikuma tulemuse saamiseks, kui D_P ei kujuta endast otsest seost aastase energiatarbimisinäitajaga, siis võib näitajast loobuda. Näitaja mittekohasuse leidmiseks koostatakse diagramm (Sele 18, lk 35) ja leitakse mõlema väärtuse korrelatsioonikordaja.



Sele 18. D_P ja D_E diagramm, $r = 0,73$, regressioonisirge valemiga

Seos on tugev, kuid mitte üksühene ja D_P näitajast loobutakse.

KOKKUVÕTE

Diplomitöö eesmärgiks on analüüsida TNV maksumuse kujunemist sõltuvalt mastide kõrgusest. Tihti ei pruugi tellijale olla lähteülesande saavutamise vahendid arusaadavad ja projekteerijale esitatav lähteülesanne neid eesmärke pärssiv.

Töö esimeses peatükis selgitatakse TNV olulisust ja nõudeid ning ootusi, millele kaasaegne TNV peab vastama. Jätkatakse ehitamiseks vajalikke komponentide käsitlemisega, tuues välja nende olulisus ning läbi konkreetsete hindade näidatakse iga osa maksumust tervikus. Näidatakse võimalusi, kus valgustuse ehitusel saab saavutada kokkuhoidu ning põhjendatakse, mis sellega kaasneb.

Teine peatükk kirjeldab TNV maksumuse kujunemist. Autor selgitab töös kasutatava elektrihinna valiku kriteeriume. Põhjendatakse ja selgitatakse valitud hinnastamismetoodikat, sh nagu ehitusmaksumuse, eksploatatsiooni- ja hoolduskulude olemust ning vastavate kulurühmade osakaalu tervikus. Esitatakse kulusid, mis hõlmavad erinevaid tööoperatsioone. Tuuakse välja ehituskulud kuue- ja kaheksameetriste mastide kohta. Selgitatakse erinevate sisendandmete saamist ja leidmist lõputöös.

Kolmanda peatüki alguses selgitab autor analüüsi meetodit ning selleks sobivate andmete saamist. Peatükk jaguneb kaheks, kus esimeses alapeatükis antakse tulemused E_k kulude kohta, selgub kõrgemate mastidega TNV soodsam hind ning otsitakse selle põhjuseid. Põhjenduse leiab ehituskulude suur osakaal ning võrreldakse madalamate ja kõrgemate mastide ehituskulusid. Autor toob välja põhjuse eelistamiseks projekteerimisel kõrgemaid maste. Edasi käsitletakse eksploatatsioonikulusid ning ei leita märkimisväärset seost sellel mastide kõrgusega üldisesse kulusse. Koondtabeli analüüsimisel järeldatakse, et kaasaegse valgusti energiatõhusus saavutatakse õige optika valikuga ning valgusti kõrgus ei osutu siin ainumääravaks. Alapeatüki viimases osas uuritakse TNV hoolduskulusid, saadakse nende üksühene seos ehituskuludega ning jõutakse ainuvõimaliku järelduseni hoolduskuludel säästmiseks.

Kolmanda peatüki teises osas analüüsitakse töö vastavust standardile ning selle piki- ja üldühtluse nõuete asjakohasust käesolevas lõputöös. Autor tõdeb, et standardist tulenevad soovitusel ei ole resultatiivsed.

Töö tulemusena valmis valgustite koondtabel (Lisa 5), mis võimaldab analüüsida TNV kulusid liigiti. Andmetabelist jäetakse põhjendatult välja erivõimsusnäitaja. Kokkuvõtvalt jõutakse töös järeldusele, et KOV-le on majanduslikult optimaalseim ehitada TNV kõrgemate mastidega.

SUMMARY

When drawing up a street lighting design, the designer receives from the client the terms of reference, which may include the specified lighting class and the recommended heights of the lighting masts. Often, the contracting entity does not fully understand the means that need to be used to fulfil the requirements included in the terms of reference. Therefore, it happens that the initial task presented to the designer may hinder the achievement of those objectives. The obligation arising from engineering ethics - to provide the most effective solution - must remain a priority, unless the initial task requires something else.

The aim of the thesis "*Cost Analysis of Street Lighting Considering Mast Height*" is to provide an effective street lighting solution to the local government. The study examines the price of street lighting at two different mast heights. A luminaire that is placed higher consumes more energy for illumination than the one that is placed lower; however, the distance to the next luminaire is longer.

As far as the author of the work is aware, in Estonia no such analysis has been carried out on street lighting before. A comparable material has been issued in Finland [2], but it is for the design and pricing of road lighting, and it does not include examples of streets in a cost-benefit analysis.

The first chapter of the work explains the importance and requirements of street lighting and clarifies the expectations that modern street lighting must meet. Subsequently, it deals with the components necessary for construction, highlighting their importance and, through detailed prices, the cost of each component is shown in the total. The chapter further focuses on some ways in which savings can be achieved in the construction of lighting. Also, the consequences of it will be explained.

The second chapter describes how the cost of street lighting is calculated. The author explains the criteria used in the thesis for choosing the electricity price. The pricing methodology chosen is justified and explained, including, for example, the nature of the construction costs, as well as the operating and maintenance costs and their proportion in the total costs. The chapter presents costs covering different operational activities. It further indicates the construction costs for 6 m and 8 m masts. The chapter explains how different input data can be obtained and retrieved.

At the beginning of the third chapter, the author explains the method of analysis and how the suitable data can be obtained. The chapter is divided into two parts. The first part gives results on the present values of lifecycle costs, shows a more favourable price for street

lighting with higher masts and looks for the reasons for it. It justifies the high proportion of construction costs and a comparison is made between the construction costs of lower and higher masts. The author explains why higher masts should be preferred when designing. The author then considers the operating costs and does not find it to have a significant correlation with the height of the masts in the overall cost. From analysing the summary table it is concluded that the energy efficiency of the modern luminaire is achieved with the right choice of optics and the height of the luminaire did not prove to be the sole determinant in this case. The last part of the sub-chapter examines the maintenance costs of street lighting, establishes their direct link with the construction costs and leads to the only possible conclusion that the design will determine future maintenance costs.

The second part of chapter 3 examines the compliance of the work with the standard and the appropriateness of its longitudinal and overall uniformity requirements. The author states that the recommendations arising from the standard do not lead to the desired result.

The result of the present thesis is a summary table of luminaires, which allows to analyse the costs of street lighting by type. The exclusion of the power density indicator (PDI) from the data table is justified. Finally, the thesis concludes that it is economically optimal for the local government to build street lighting with higher masts.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] EVS 843:2016, „Linnatänavad“. 2016. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/evs-843-2016>
- [2] A. Ekrias, „Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu“. Väylävirasto, 20. juuni 2023.
- [3] „Aufgaben der kommunalen Beleuchtung“, *licht.wissen 03 Straßen, Wege und Plätze*, kd 03, lk 7.
- [4] Vantaa linn, „Vantaan kaupungin ulkovalaistuksen suunnitteluohje“. 2022. Vaadatud: 1. märts 2024. [Online]. Available at: <https://kaupunkitilaohje.vantaa.fi/sites/default/files/document/Vantaan-kaupungin-ulkovalaistuksen-suunnitteluohje-1.2.2022.pdf>
- [5] EVS-EN 13201-5:2015, „Teevalgustus. Osa 5: Energiatõhususnäitajad“. 5. jaanuar 2016. Vaadatud: 11. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13201-5-2015>
- [6] CEN/TR 13201-1:2014, „Teevalgustus. Osa 1: Valgustusklasside valiku juhised“. 2016. Vaadatud: 9. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/cen-tr-13201-1-2014>
- [7] EVS-EN 13201-2:2015, „Teevalgustus. Osa 2: Toimivusnõuded“. 2016. Vaadatud: 9. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13201-2-2015>
- [8] Tartu linn, „Tänavavalgustus projekteerimiseks“. Vaadatud: 9. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://tartu.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=2e01c70976e44630be0e78cc2b421ff8>
- [9] „Viimsi valla tänavavalgustuse arengukava 2019-2029“. Viimsi vald, 2019. Vaadatud: 9. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.viimsivald.ee/sites/default/files/inline-files/Viimsi%20valla%20t%C3%A4navavalgustuse%20arengukava%202019-2029.pdf>
- [10] Esvika, „Koonusmast TB6S 6m 60/126/6500 Varreta mast“. Vaadatud: 18. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://pood.esvika.ee/valgustus/koonusmast-tb6s-6m-601266500-varreta-mast>
- [11] Esvika, „Koonusmast TB8S 8m 60/146/8600 Varreta mast“. Vaadatud: 18. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://pood.esvika.ee/valgustus/koonusmast-tb8s-8m-601468600-varreta-mast>
- [12] Esvika, „LCK4-16-06A KAITSMEKOMPL. KLEMMID JA 6A SULAR“. Vaadatud: 18. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://pood.esvika.ee/valgustus/lck41606a-kaitsmekompl-klemmid-ja-6a-sular>
- [13] VMT Betoon, „Valgusposti jalandid“. Vaadatud: 9. märts 2024. [Online]. Available at: <https://vmtbetoon.ee/tooted/raudbetoonpostid-ja-jalandid/>
- [14] M. Monni, *MAAKAABLIVÕRKUDE EHITUSTÖÖD*. Markku Monni ja Adato Energia Oy, 2010. Vaadatud: 1. märts 2024. [Online]. Available at: <https://eetel.ee/wp-content/uploads/2019/04/Maakaablivo%CC%83rkude-ehitsuto%CC%88o%CC%88d-eesti-keles.-Markku-Monni.pdf>
- [15] Esvika, „Kaitsekumm 150-168mm 150-168mm 235/145“. Vaadatud: 18. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://pood.esvika.ee/valgustus/kaitsekumm-150168mm-150168mm-235145>
- [16] Esvika, „MASTIJALAND VPA-3 128-168mm, 290kg“. Vaadatud: 18. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://pood.esvika.ee/valgustus/mastijaland-vpa3-128168mm-290kg>
- [17] „Produktqualität“, *licht.wissen 03 Straßen, Wege und Plätze*, kd 03, lk 16–17.
- [18] Signify Holding, „Philips Product Selector“. Vaadatud: 10. aprill 2024. [Online]. Available at: https://www.photometrics.lighting.philips.com/#/category/NROADLUM_CA
- [19] Signify Holding, „Unistreet Lumistreet_gen2_Family_sideview-SPP (375×375)“. Vaadatud: 15. aprill 2024. [Online]. Available at:

- https://www.assets.signify.com/is/image/Signify/Unistreet_Lumistreet_gen2_Family_sideview-SPP?wid=375&hei=375&qlt=82
- [20] EVS-EN 13201-3:2015, „Teevalgustus. Osa 3: Toimivuse arvutamine“. 5. jaanuar 2016. Vaadatud: 15. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13201-3-2015>
 - [21] „Lichtplanung und Normen“, *licht.wissen 03 Straßen, Wege und Plätze*, kd 03, lk 10–13.
 - [22] ISO/CIE TS 22012:2019, „Valgus ja valgustus. Hooldeteguri määramine. Määramisviis“. 16. november 2020. Vaadatud: 11. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/iso-cie-ts-22012-2019-et>
 - [23] *Elektripaigaldustööd 1*. Eesti Elektritööde Ettevõtjate Liit (EETEL), 2009. [Online]. Available at: https://eetel.ee/wp-content/uploads/1999/11/www.ekk.edu.ee_vvfiles_0_elektripaigaldustood_1.pdf
 - [24] EVS-HD 60364-5-54:2011+A11+A1:2022, „Madalpingelised elektripaigaldised. Osa 5-54: Elektriseadmete valik ja paigaldamine. Maandamine ja kaitsejuhid“. 1. detsember 2022. Vaadatud: 11. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/evs-hd-60364-5-54-2011-a11-a1-2022-consolidated>
 - [25] DIALux, „DIALux is the software for your professional lighting design“. Vaadatud: 28. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.dialux.com/en-GB/dialux>
 - [26] Enefit Green, „Auditeerimata vahearuanne IV kvartal ja 12 kuud 2023“. Vaadatud: 16. aprill 2024. [Online]. Available at: https://public-docs.enefit.ee/green/EGR1T_2023_esitlus_EST.pdf
 - [27] A. Aarma ja V. Vensel, *Statistika teooria põhikursus*, 2., Parand. ja Täiend. tr. Majandusraamat, no. 2–93. Tallinn: Külim, 2005.
 - [28] T. Tamm, *Valgustustehnika. I*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2009.

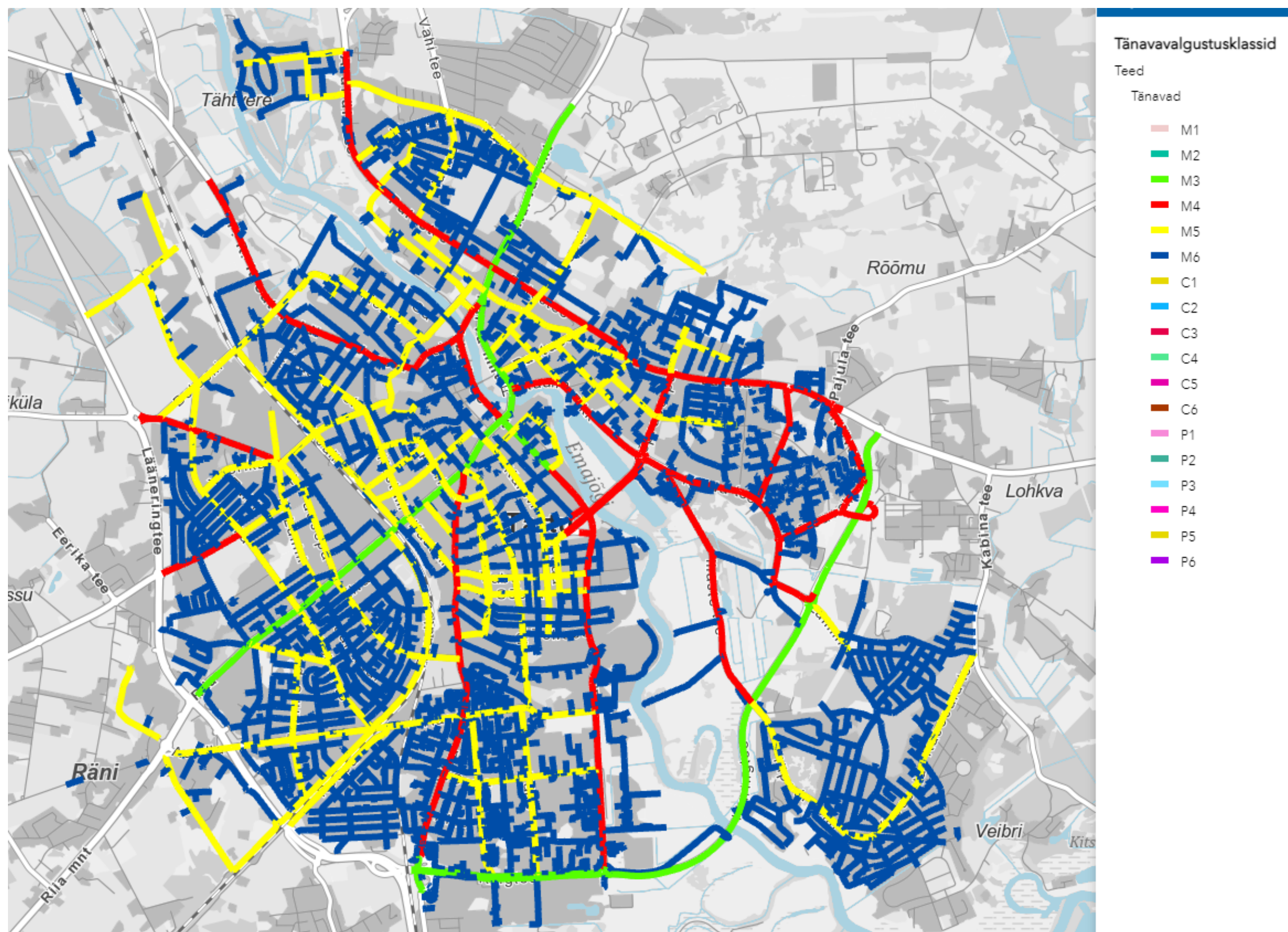
Lisa 1. Valgustusklassi määramine

Parameeter	Variandid	Kirjeldus		Vw ⁸	T ₁ ⁹
Projekt-kiirus 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	-2
Liikluvoog		Autoteed ja mitmerajalised teed	Kaherajalised 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	-1
Liiklus-koosseis	Segaliiklus mittemoo-torliikluse kõrge osakaaluga			2	2
	Segaliiklus			1	
	Üksnes mootor-liiklus			0	
Sõiduteede eraldamine	On			0	
	Ei ole			1	1
Teesõlmede tihedus		Ristmikke kilomeetri kohta	Eritasandiliste sõlmede vahemaa km		
	Kõrge	Üle 3	Alla 3	1	
	Mõõdukas	Kuni 3	Alates 3	0	0
Pargitud sõidukid	On			1	1
	Ei ole			0	
Ümbruse valgustus	Tugev	Vaateaknad, reklaampaigaldised, spordiväljakud, jaamapiirkonnad, laopiirkonnad		1	
	Mõõdukas	Normaalolukord		0	0
	Nõrk			-1	
Liiklus-keerukus	Väga keerukas			2	
	Keerukas			1	
	Lihtne			0	0
Valgustusklass M					5

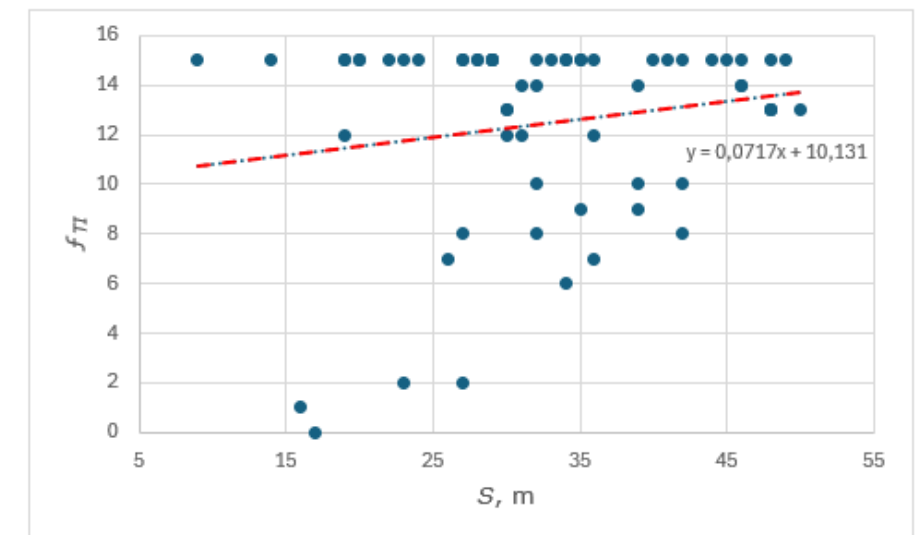
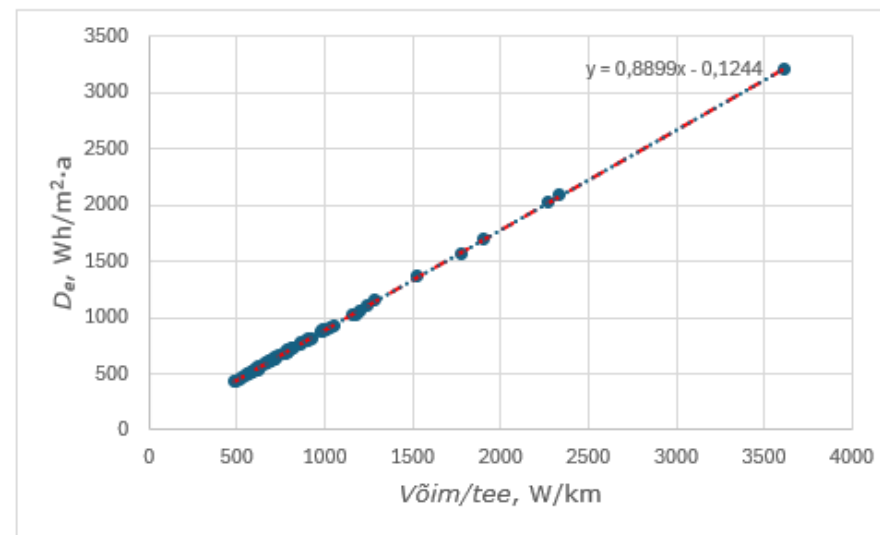
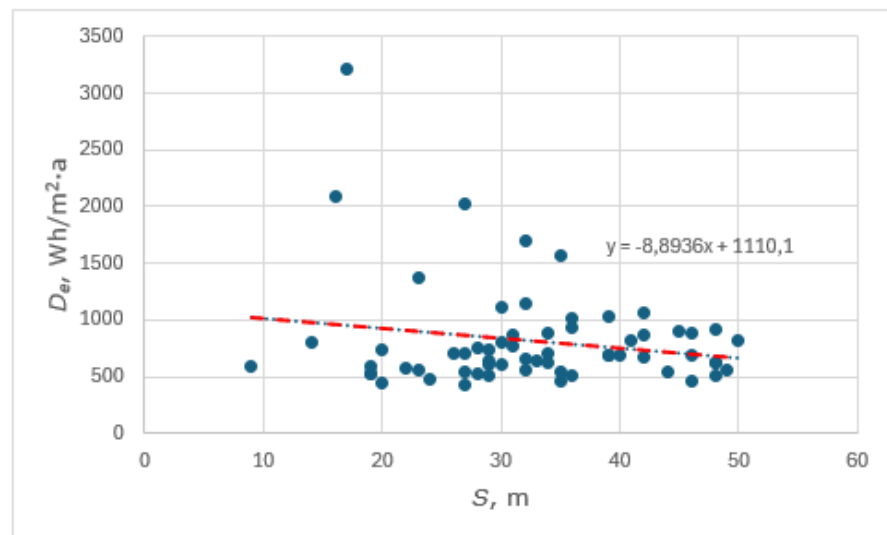
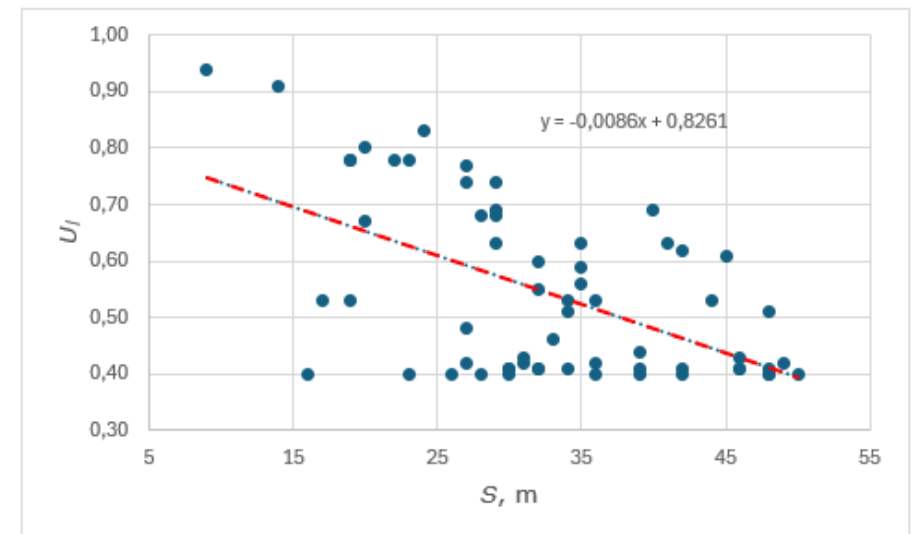
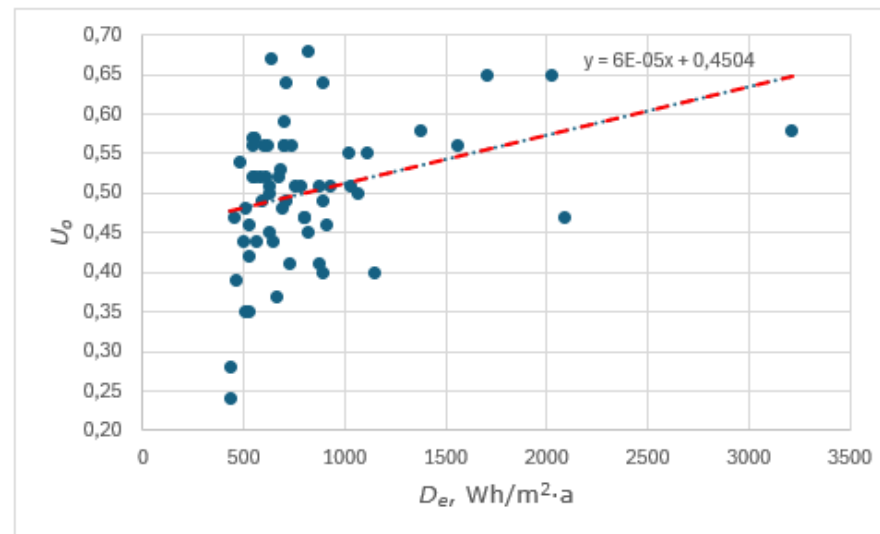
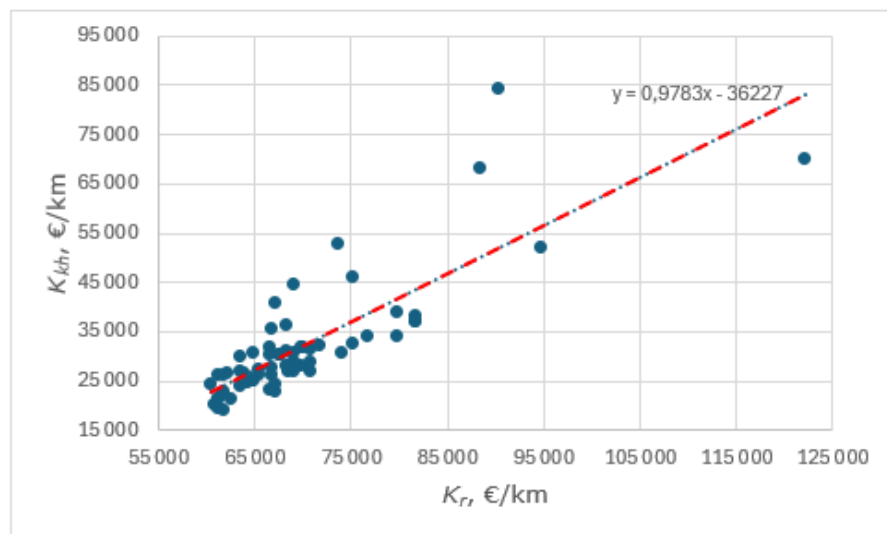
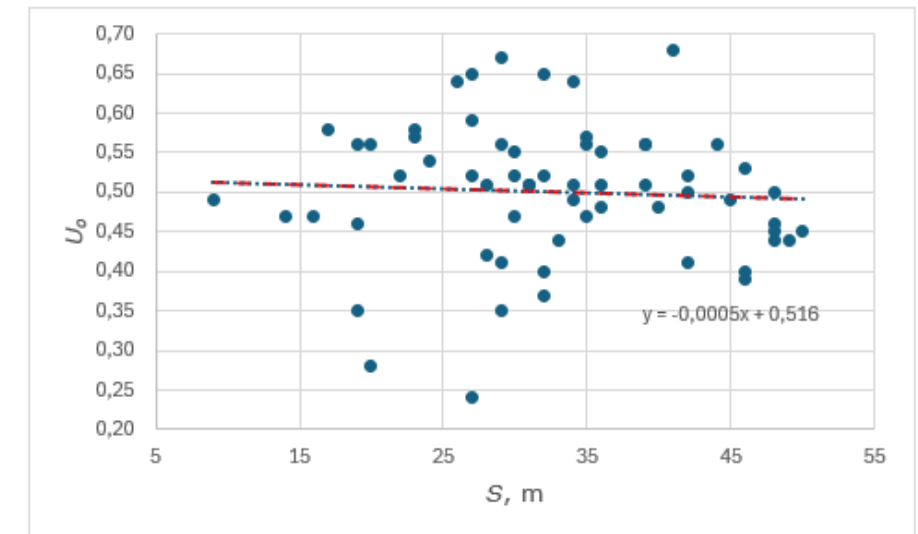
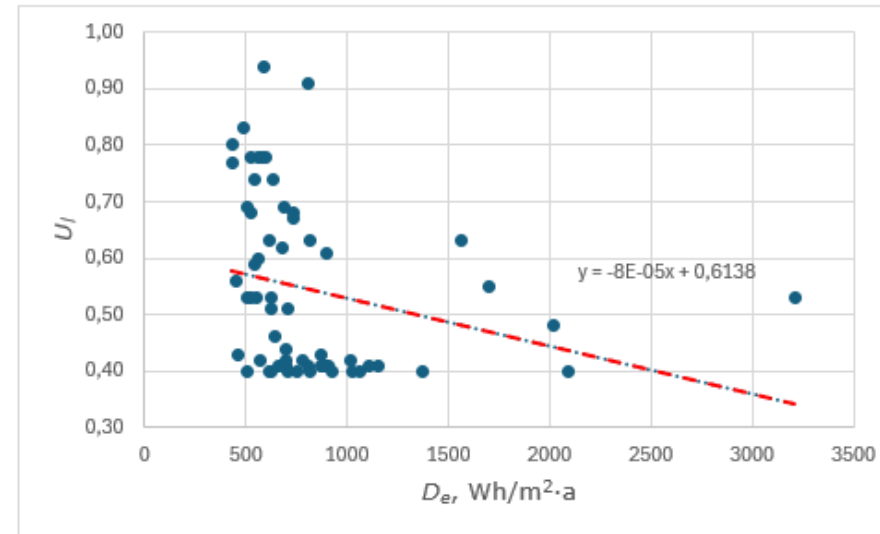
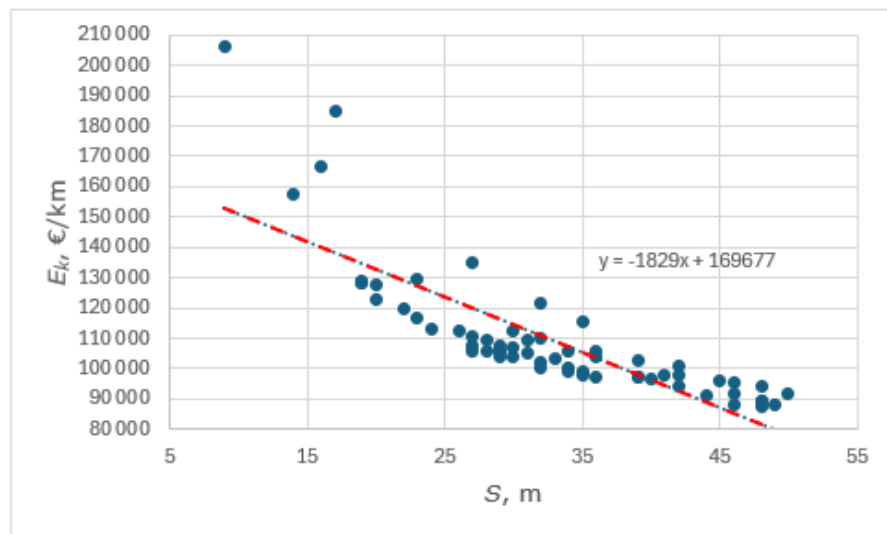
⁸ Kaaluväärtus

⁹ Täisvõimsustalitlus

Lisa 2. Tartu linna valgustusklasside kaart



Lisa 3. Hajuvusdiagrammid enne erindite eemaldamist



Lisa 4. Valimist eemaldatud valgustid¹⁰

Valgusti nimi BGP281 T25:	P_i, W	Φ_v, lm	S, m	M_k, m	$P, W/km$	$D_{E_i}, Wh \cdot m^{-2}$	$\bar{L}_{m_i}, cd \cdot m^{-2}$	U_o	U_l	f_{TI}	R_{EI}	$K_{r_i}, €/km$	$K_{kh1_i}, €/km$	$K_{k1_i}, €/km$	$K_{h1_i}, €/km$	$K_{kh_i}, €/km$	$K_{k_i}, €/km$	$K_{h_i}, €/km$	$E_{k_i}, €/km$
LED20-4S/730 PSA DN25 FG	13,1	1 749	27	6	484	430	0,52	0,24	0,77	15	0,18	70 704	1 187	281	906	27 247	7 035	20 212	105 908
LED14-4S/730 PSA DN09 FG	9,8	1 278	20	6	492	438	0,51	0,28	0,80	15	0,25	79 700	1 507	284	1 223	34 392	7 105	27 287	123 061
LED25-4S/730 PSA DN26 FG	16,5	2 171	29	6	560	505	0,54	0,35	0,69	15	0,27	68 931	1 173	330	843	27 068	8 250	18 818	103 756
LED8-4S/730 PSA DM70 FG	6,0	604	9	6	665	592	0,42	0,49	0,94	15	0,74	122 111	3 104	387	2 717	70 303	9 667	60 637	206 156
LED89-4S/730 PSA DX51 FG	61,3	4 475	17	8	3 618	3 210	0,50	0,58	0,53	0	0,56	90 294	3 530	2 091	1 438	84 387	52 285	32 102	184 842
LED59-4S/730 PSA DX51 FG	37,6	3 143	16	6	2 329	2 090	0,50	0,47	0,40	1	0,46	88 375	2 891	1 363	1 528	68 183	34 075	34 108	166 503
LED89-4S/730 PSA DX50 FG	61,3	7 151	27	8	2 269	2 020	0,50	0,65	0,48	2	0,74	73 519	2 222	1 317	906	53 133	32 920	20 212	134 925
LED18-4S/730 PSA DX70 FG	12,7	1 318	14	6	901	803	0,50	0,47	0,91	15	0,71	94 571	2 273	526	1 747	52 134	13 154	38 981	157 348
LED89-4S/730 PSA DW30 FG	61,3	6 943	32	8	1 901	1 700	0,51	0,65	0,55	8	0,76	69 063	1 875	1 111	764	44 831	27 777	17 054	121 665
LED89-4S/730 PSA DX10 FG	61,3	7 090	35	8	1 778	1 560	0,50	0,56	0,63	9	0,94	67 000	1 714	1 016	699	40 988	25 396	15 592	115 528
LED56-4S/730 PSA DX50 FG	35,4	4 778	23	6	1 522	1 370	0,50	0,58	0,40	2	0,67	75 174	1 956	893	1 063	46 045	22 317	23 727	129 678

¹⁰ Valgusti eemaldamise põhjustanud andmed rasvases kirjas.

Lisa 5. Valgustite koondtabel, reastatud E_k hinna järgi kasvavalt

Valgusti nimi BGP281 T25:	P_i, W	Φ_v, lm	S, m	M_k, m	G klass	$P, W/km$	$D_{E_f}, Wh \cdot m^{-2}$	$\bar{L}_{m_f}, cd \cdot m^{-2}$	U_o	U_l	f_{TI}	R_{EI}	$K_{r_f}, €/km$	$K_{kh1_f}, €/km$	$K_{k1_f}, €/km$	$K_{h1_f}, €/km$	$K_{kh_f}, €/km$	$K_{k_f}, €/km$	$K_{h_f}, €/km$	$E_{k_f}, €/km$
LED44-4S/730 PSA DN26 FG	27,1	3 800	48	8	2	569	502	0,50	0,44	0,40	13	0,47	61 042	837	327	509	19 556	8 186	11 369	87 467
LED50-4S/730 PSA DN10 FG	31,2	4 410	49	8	2	624	566	0,50	0,44	0,42	15	0,71	60 714	868	369	499	20 370	9 233	11 137	87 917
LED39-4S/730 PSA DN25 FG	23,8	3 395	46	8	3	524	460	0,54	0,39	0,43	14	0,36	61 739	832	300	532	19 366	7 502	11 864	88 053
LED54-4S/730 PSA DN11 FG	34,0	4 743	48	8	3	714	629	0,51	0,45	0,40	13	0,75	61 042	920	411	509	21 640	10 271	11 369	89 551
LED54-4S/730 PSA DX65 FG	34,0	4 679	48	8	n/a ¹¹	714	629	0,51	0,50	0,51	15	0,62	61 042	920	411	509	21 640	10 271	11 369	89 551
LED44-4S/730 PSA DN08 FG	27,1	3 774	44	8	1	623	548	0,52	0,56	0,53	15	0,72	62 500	913	357	556	21 334	8 931	12 403	90 867
LED70-4S/730 PSA DM11 FG	46,1	6 043	50	8	2	922	819	0,50	0,45	0,40	13	0,84	60 400	1 024	535	489	24 284	13 369	10 915	91 481
LED56-4S/730 PSA DM12 FG	35,4	4 917	46	8	3	779	684	0,50	0,53	0,41	15	0,88	61 739	978	446	532	23 022	11 159	11 864	91 709
LED74-4S/730 PSA DM10 FG	49,2	6 315	48	8	3	1 032	910	0,51	0,46	0,41	13	0,85	61 042	1 104	595	509	26 232	14 863	11 369	94 143
LED51-4S/730 PSA DW65 FG	31,9	4 392	42	8	1	765	675	0,50	0,52	0,62	15	0,84	63 333	1 023	441	582	24 007	11 013	12 994	94 467
LED70-4S/730 PSA DX52 FG	46,1	5 905	46	8	4	1 014	890	0,50	0,40	0,41	14	0,70	61 739	1 113	581	532	26 395	14 532	11 864	95 082
LED69-4S/730 PSA DX70 FG	45,3	4 920	45	8	n/a	997	895	0,50	0,49	0,61	15	0,80	62 111	1 127	584	543	26 724	14 597	12 127	95 825
LED50-4S/730 PSA DM70 FG	31,2	3 735	40	8	n/a	780	693	0,50	0,48	0,69	15	0,83	64 250	1 064	452	611	24 953	11 310	13 643	96 434
LED34-4S/730 PSA DN50 FG	20,6	3 072	36	8	3	578	510	0,50	0,48	0,53	15	0,58	66 389	1 011	332	679	23 456	8 297	15 159	97 316
LED49-4S/730 PSA DM32 FG	30,5	4 435	39	8	4	793	695	0,50	0,56	0,41	10	0,66	64 744	1 081	454	627	25 333	11 340	13 993	97 362
LED49-4S/730 PSA DM52 FG	30,5	4 386	39	8	3	793	695	0,54	0,56	0,44	14	0,47	64 744	1 081	454	627	25 333	11 340	13 993	97 362
LED27-4S/730 PSA DN09 FG	17,9	2 459	35	8	2	518	454	0,51	0,47	0,56	15	0,49	67 000	995	297	699	23 008	7 416	15 592	97 548
LED59-4S/730 PSA DM13 FG	37,6	5 113	41	8	1	902	815	0,51	0,68	0,63	15	0,85	63 780	1 128	532	596	26 608	13 298	13 311	97 566
LED64-4S/730 PSA DN33 FG	41,3	5 510	42	8	6	990	873	0,51	0,41	0,41	8	0,73	63 333	1 153	570	582	27 252	14 258	12 994	97 712
LED35-4S/730 PSA DM65 FG	21,3	3 121	35	8	2	617	540	0,50	0,57	0,59	15	0,49	67 000	1 052	353	699	24 417	8 824	15 592	98 956
LED39-4S/730 PSA DM11 FG	23,8	3 447	34	6	2	691	623	0,51	0,51	0,53	15	0,68	65 412	1 125	406	719	26 201	10 150	16 051	98 974
LED30-4S/730 PSA DN11 FG	20,1	2 660	32	6	3	622	557	0,52	0,52	0,60	15	0,44	66 688	1 128	364	764	26 162	9 108	17 054	100 354
LED44-4S/730 PSA DM10 FG	27,1	3 861	34	6	3	786	709	0,54	0,49	0,51	15	0,75	65 412	1 182	462	719	27 608	11 557	16 051	100 381
LED75-4S/730 PSA DW10 FG	49,9	6 422	42	8	4	1 199	1 060	0,50	0,50	0,40	10	0,79	63 333	1 271	689	582	30 221	17 227	12 994	100 682
LED39-4S/730 PSA DN33 FG	23,8	3 413	32	6	6	738	662	0,50	0,37	0,41	10	0,68	66 688	1 196	431	764	27 838	10 784	17 054	102 031
LED69-4S/730 PSA DM33 FG	45,3	6 159	39	8	6	1 178	1 030	0,52	0,51	0,40	9	0,83	64 744	1 301	674	627	30 835	16 842	13 993	102 865
LED39-4S/730 PSA DM50 FG	23,8	3 369	33	8	3	715	642	0,52	0,44	0,46	15	0,91	68 333	1 159	418	741	26 995	10 458	16 537	103 018
LED34-4S/730 PSA DM32 FG	20,6	3 097	30	6	4	681	612	0,55	0,52	0,40	13	0,59	68 133	1 213	398	815	28 148	9 957	18 191	103 948
LED59-4S/730 PSA DW52 FG	37,6	5 048	36	8	3	1 052	928	0,51	0,51	0,40	12	0,78	66 389	1 285	606	679	30 304	15 144	15 159	104 164
LED44-4S/730 PSA DW10 FG	27,1	3 880	31	6	4	867	777	0,50	0,51	0,42	12	0,76	67 387	1 296	507	789	30 280	12 676	17 604	105 251
LED30-4S/730 PSA DM12 FG	20,1	2 663	29	6	3	682	615	0,55	0,56	0,63	15	0,60	68 931	1 245	402	843	28 868	10 050	18 818	105 556
LED64-4S/730 PSA DM31 FG	41,3	5 569	36	8	6	1 155	1 020	0,52	0,55	0,42	7	0,61	66 389	1 345	665	679	31 794	16 635	15 159	105 654

¹¹ Andmed pole saadaval.

Valgusti nimi BGP281 T25:	P_i,W	Φ_v, lm	S, m	Mk, m	G klass	P, W/km	D_E, Wh·m⁻²	L_m, cd·m⁻²	U_o	U_I	f_{TI}	R_{EI}	K_r, €/km	K_{kh1}, €/km	K_{k1}, €/km	K_{h1}, €/km	K_{kh}, €/km	K_k, €/km	K_h, €/km	E_k, €/km
LED25-4S/730 PSA DN10 FG	16,5	2 224	28	6	2	593	523	0,52	0,42	0,68	15	0,37	69 786	1 215	342	873	28 035	8 545	19 490	105 674
LED34-4S/730 PSA DM13 FG	20,6	2 986	29	6	1	702	633	0,55	0,67	0,74	15	0,76	68 931	1 255	412	843	29 118	10 300	18 818	105 806
LED54-4S/730 PSA DM30 FG	34,0	4 757	34	8	4	985	888	0,50	0,64	0,41	6	0,66	67 647	1 299	580	719	30 551	14 500	16 051	105 811
LED44-4S/730 PSA DM33 FG	27,1	4 007	30	6	6	894	803	0,54	0,47	0,41	12	0,78	68 133	1 339	524	815	31 289	13 098	18 191	107 090
LED39-4S/730 PSA DX52 FG	23,8	3 368	29	6	4	810	730	0,51	0,41	0,68	15	0,66	68 931	1 319	476	843	30 718	11 900	18 818	107 406
LED25-4S/730 PSA DX65 FG	16,5	2 190	27	6	n/a	609	542	0,50	0,52	0,74	15	0,57	70 704	1 260	354	906	29 073	8 861	20 212	107 734
LED39-4S/730 PSA DW52 FG	23,8	3 375	28	6	3	858	756	0,54	0,51	0,40	15	0,72	69 786	1 366	493	873	31 815	12 325	19 490	109 454
LED49-4S/730 PSA DW50 FG	30,5	4 131	31	8	3	976	874	0,52	0,51	0,43	14	0,95	69 839	1 359	571	789	31 870	14 266	17 604	109 568
LED64-4S/730 PSA DX10 FG	41,3	5 375	32	6	3	1 279	1 150	0,52	0,40	0,41	14	0,86	66 688	1 513	749	764	35 768	18 714	17 054	109 960
LED35-4S/730 PSA DM31 FG	21,3	3 100	27	6	6	787	700	0,50	0,59	0,42	8	0,54	70 704	1 363	458	906	31 651	11 439	20 212	110 311
LED59-4S/730 PSA DW30 FG	37,6	4 876	30	6	3	1 240	1 110	0,50	0,55	0,41	13	0,70	68 133	1 542	727	815	36 364	18 173	18 191	112 165
LED34-4S/730 PSA DM30 FG	20,6	3 023	26	6	4	784	706	0,53	0,64	0,40	7	0,58	71 692	1 400	460	941	32 478	11 488	20 990	112 238
LED20-4S/730 PSA DN08 FG	13,1	1 727	24	6	1	549	484	0,52	0,54	0,83	15	0,32	73 917	1 335	317	1 019	30 653	7 915	22 739	112 888
LED22-4S/730 PSA DM52 FG	14,4	1 986	23	6	3	619	557	0,50	0,57	0,78	15	0,41	75 174	1 426	363	1 063	32 806	9 078	23 727	116 439
LED22-4S/730 PSA DW65 FG	14,4	1 913	22	6	1	648	582	0,50	0,52	0,78	15	0,74	76 545	1 491	380	1 112	34 297	9 491	24 806	119 456
LED25-4S/730 PSA DW50 FG	16,5	2 124	20	6	3	823	732	0,50	0,56	0,67	15	0,85	79 700	1 701	479	1 223	39 249	11 963	27 287	127 918
LED16-4S/730 PSA DM65 FG	11,2	1 432	19	6	2	596	526	0,50	0,46	0,53	15	0,44	81 526	1 629	342	1 287	37 270	8 547	28 723	127 971
LED16-4S/730 PSA DN50 FG	11,2	1 450	19	6	3	596	526	0,50	0,35	0,78	12	0,36	81 526	1 629	342	1 287	37 270	8 547	28 723	127 971
LED18-4S/730 PSA DM50 FG	12,7	1 562	19	6	3	673	594	0,51	0,56	0,78	15	0,85	81 526	1 675	388	1 287	38 415	9 692	28 723	129 116