EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Matti Kapanen

ELEKTRIÕHULIINIDE PROJEKTEERIMISTULEMUSTE VÕRDLUS ERINEVATE STANDARDITE ALUSEL

COMPARISON OF DISTRIBUTION LINES DESIGN RESULTS BY DIFFERENT STANDARDS

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendajad: professor Andres Annuk, *PhD*
Heigo Luik, *energeetikaehituse divisjoni projekteerimisosakonna juhataja*

Tartu 2023

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö	
Autor: Matti Kapanen		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Elektriõhuliinide projekteerimistulemuste võrdlus erinevate standardite alusel			
Lehekülgi: 79	Jooniseid: 21	Tabeleid: 19	Lisasid: 3
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika, 4.17. Energeetikaalased uuringud, 4.8. Elektrotehnika ja elektroonika, T140 Energeetika Juhendaja(d): Andres Annuk ja Heigo Luik Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2023			
Antud magistritöö eesmärk on anda ülevaade Eestis Nõukogude Liidu ajal kehtinud standardi ning tänapäeval kehtiva standardite erinevustest tuginedes 110 kV õhuliini juhtmete projekteerimisele. Eesmärk saavutatakse projekteerides üks 110 kv õhuliini lõik, mis on jagatud kaheks sarnaseks osaks. Üks osa on projekteeritud Nõukogude Liidu aegse standardi Elektriseadmete Ehituse Eeskirjad järgi ja teine on projekteeritud EVS-EN 50341-1 standardi ja Elering AS õhuliinide projekteerimise nõuete järgi. Töö käigus on koostatud õhuliini pikiprofiil, 3D mudel, juhtmete ehituse aegsed pingutuse ja ripete tabelid ja juhtmete koormuste tabelid. On koostatud ka õhuliinide maksumuse erinevuse analüüs tuginedes projekteeritud õhuliinile. Magistritöö tulemusi on võimalik kasutada 110 kV õhuliini projekteerimisel ja ehitamisel Eestis.			
Märksõnad: 110 kV õhuliin, juhtmete pingutuse tabelid, õhuliini juhtmete projekteerimine			

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Matti Kapanen		Curriculum: Energy Application Engineering	
Title: Comparison of Distribution Lines Design Results by Different Standards			
Pages: 79	Figures: 21	Tables: 19	Appendixes: 3
Department / Chair: Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering, 4.17 Energetic Research, 4.8. Electrical Engineering and Electronics, T140 Energy research Supervisors: Andres Annuk, Heigo Luik Place and date: Tartu, 2023			
The aim of this master's thesis is to provide an overview of the differences between the standards in Estonia that were in place during the Soviet era and the current standards, based on the design of 110 kV overhead lines conductors. The goal is achieved by designing a section of a 110 kV overhead line, which is divided into two similar parts. One part is designed according to the Soviet-era „Elektriseadmete Ehituse Eeskirjad“ *standard, and the other is designed according to EVS-EN 50341-1 standard and Elering AS requirements for design of high voltage overhead lines. In the scope of the thesis, a longitudinal profile of the overhead line, a 3D model, tables of wire tension and wire loads were compiled. Analysis of the difference in the costs of overhead lines based on the designed overhead line has also been prepared. The results of the master's thesis can be used in the design and construction of 110 kV overhead lines in Estonia.*			
Keywords: *Overhead line, conductor tension tables, design of overhead line conductors*			

SISUKORD

SISUKORD....4
1 LÜHENDITE LOETELU....7
2 SISSEJUHATUS....10
3 KIRJANDUSE ÜLEVAADE....12
3.1 Teemakohased teadustööd ja väljaanded Eestis....12
3.2 Teemakohased teadustööd ja väljaanded maailmas....13
3.3 Kirjanduse ülevaate kokkuvõte....14
4 ÕHULIINIDE PROJEKTEERIMISEST ÜLDISELT....15
4.1 Eestis ja lähiriikides kasutatavad õhuliinide projekteerimise standardid....15
4.2 Õhuliinide projekteerimine kuluefektiivsuse vaatepunktist....16
5 PROJEKTEERITAVA ÕHULIINI ÜLDKIRJELDUS....16
5.1 Õhuliini üldkirjeldus ja tehtava töö piiritlus....16
5.2 Kasutatavad õhuliini mastid....18
5.3 Juhtmed ja piksekaitsetrossid....21
5.3.1 Juhtmete tehnilised andmed....21
5.3.2 Piksekaitsetrosside tehnilised andmed....22
6 110 kV ÕHULIINIDE PROJEKTEERIMISE ÜLDTINGIMUSED....25
6.1 110 kV õhuliinide projekteerimise lähteandmed....25
6.1.1 Õhuliini ripete ja tõmbejõudude arvutusmetoodika....26
6.1.2 Õhuliini juhtme roome kontseptsioon....29
7 NÕUKOGUDE LIIDU AEGSE ÕHULIINI PROJEKTEERIMINE....32
7.1 „Elektriseadmete Ehituse Eeskirjade“ üldine kirjeldus....32
7.2 Projekteerimise üldtingimused (EEE)....32
7.3 Kliimatingimused Eestis EEE järgi....33
7.4 Arvutused „Elektriseadmete Ehituse Eeskirjade“ järgi....34
7.4.1 EEE arvutusmetoodika üld alused ja nõuded....34
7.4.2 Juhtmetele mõjuvad kliimast tingitud koormused....35
7.4.3 Tuule ja jäite koormus....35
7.4.4 Mastidele mõjuvate juhtme koormuste arvutuse metoodika....37
7.4.5 Mastidele juhtmetest põhjustatud normatiivsed koormused....38

7.4.6 Õhuliinile mõjuvad arvutuslikud koormused 39
7.4.7 Liini armatuurile põhjustatud koormused 39
8 KAASAEGSE 110 kV ÕHULIINI JUHTMETE PROJEKTEERIMINE 40
8.1 Projekteerimise üld põhimõte 40
8.2 Kaasaegse õhuliini projekteerimise tehnilised lähteandmed Eestis 40
8.3 EVS-EN 50341 standardi üldine kirjeldus 42
8.4 Töökindluse nivoo määramine 42
8.5 Tuulesurve juhtme baaskõrgusel 43
8.5.1 Tuule baaskiiruse leidmine 43
8.5.2 Keskmise ja suurima tuulesurve leidmine 45
8.6 Juhtmetele mõjuvad tuulekoormused 45
8.7 Juhtmete kõrvalekalle 47
8.8 Jäitekoormused 47
8.9 Tuule ja jäite koostoime 48
8.10 Isolaatorkomplektidele toimivad koormused 50
9 TULEMUSTE ANALÜÜS 51
9.1 Tehtud arvutuste selgitus 51
9.2 Kaasaegsed ja NL aegsed kliimatingimused projekteerimiseks 51
9.3 110 kV õhuliini arvutuste tulemused 53
9.3.1 Juhtmete mehaanilised koormused ja ripped 53
9.3.2 Juhtmete projekteerimine 58
9.3.3 Mastidele juhtmetest tekitatavad koormused 61
9.3.4 Juhtmete koormused isolaatorkettidele 65
10 ÕHULIINIDE MAKSUMUSE ANALÜÜS 66
10.1 Maksumuse analüüs 66
10.2 Õhuliini projekteerimise, ehituse ja hoolduse kuluefektiivsus 68
11 KOKKUVÕTE 70
KASUTATUD KIRJANDUS 72
LISAD 75
Lisa 1. Juhtmete ja piksekaitsetrosside pingutamise tabelid 76
Lisa 2. Projekteeritud õhuliini pikiprofiil 77
Lisa 3. Piksekaitsetrossi koormused mastile 78

Lisa 4. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks 79

1 LÜHENDITE LOETELU

A – juhtme ristlõige

a – ühe visangu pikkus

B^2 – tausta tegur

B_I – vähendustegur

b_j – jäite paksus

C_c – juhtme tuuletakistuse tegur

C_{dir} – tuule suunategur

C_x – külgtakistuse tegur

c_0 – orograafiategur

d – juhtme või trossi läbimõõt

D – juhtme ekvivalentne läbimõõt kui juhe on kaetud jäitega

E – juhtme elastsusmoodul

EEE – „Elektriseadmete Ehituse Eeskirjad“

F – juhtme või trossi pikilõike pindala kaaluvisangus

G – juhtme ühe meetri kaal

G_c – juhtme mehaanilise resonantsi tegur

G_i – isolaatorketi kaal

G_k – juhtmete omakaalust vertikaalne koormus

G_{n1} – isolaatorketile tekitatud koormus juhtme omakaalust

G_{n1} – püstkoormus

G_{n2} – on jäitest tingitud püstkoormus

h – baaskõrgus maapinnast

h_i – juhtme kinnituspunkti baaskõrgus maapinnast

$I_v(h)$ – turbulentsi intensiivsus baaskõrgusel maapinnast

J – jäitekoormus juhtme pikkusühiku kohta

J_3 – nimijäitekoormus

J_{50} – 50 aastase kordusperioodiga piirjäitekoormus

J_{150} – 150 aastase kordusperioodiga piirjäitekoormus

K_l – visangu pikkuse mõju tuule rõhule arvestav tegur

k – juhtme võnkedünaamikat arvestav tegur

k_p – maksimumtegur

k_r – maastikutüübitegur

L_1, L_2 – mastiga külgneva visangu pikkused

L_R – taandatud visang

L_k – kaaluvisang

L_n – ankrupiirkonna n-nda visangu pikkus

L_t – tuulevisang

L_{w1}, L_{w2} - mastiga külgnevate visangute panus kaaluvisangusse sõltuvalt jäitest

m_{n1} – juhtme või trossi pikkusühiku mass

m_{n2} – juhtme/trossil oleva jäite normatiivne mass

n – ülekoormustegur

n_i – osajuhtmete arv samal kõrgusel

P – tuulekoormus (normatiivne)

P_n – jäitest põhjustatud koormus

Q_{W50} – 50 aastase kordusperioodiga piirtuulekoormus

Q_{Wc_V} – traaversi suunas mõjuv tuulejõud

Q_{Wx} – keskmine tuulejõud liini elemendile

Q_{wc} – horisontaalne tuulekoormus juhtmele

q – normatiivse tuule rõhk vaadeldavas režiimis

$q_h(h)$ – on keskmine tuulesurve baaskõrgusel maapinnast

$q_p(h)$ – suurim tuulesurve baaskõrgusel maapinnast

R^2 – resosantsreaktsiooni tegur

z_0 – maapinna ebatasasuse tegur

t – juhtme lõplik temperatuur

t_0 – juhtme esialgne temperatuur

$tg\gamma$ – juhtmetele ja trosside kaldenurk sõltuvalt neile mõjuvast tuulekoormusest

$V_h(h)$ – tuule keskmine kiirus baaskõrgusel maapinnast

V_{IH} – suure tõenäosusega tuulekiirus

V_{IL} – väikese tõenäosusega tuulekiirus jäitega koostoimel

$V_{b,0}$ – tuule baaskiirus

X_r – juhtmete raskuskeskmete kaugus mastist

α – visangu tuulerõhu ebaühtlust arvestav tegur

δ – jäite erimahtuvus

η – juhtme joonpaisumistegur

γ – juhtme lõplik erikoormus

γ_0 – juhtme esialgne erikoormus

γ_J – jäitekoormuse osavarutegur

ρ – õhu tihedus

ρ_j – jäite tihedus

σ – juhtme lõplik pingsus

σ_0 – juhtme esialgne pingsus

φ – kõrvalekalde nurk

φ_t – nurk õhuliini telje ja tuule suuna vahel

Ψ_J – jäitekoormuste kombinatsioonitegur

Ψ_w – tuulekoormuste kombinatsioonitegur

2 SISSEJUHATUS

Eesti põhivõrgu valdaja Elering AS-le kuulub ligikaudu 5000 km 110-330 kV õhuliini. 110 kV õhuliine on Eestis ligikaudu 3300 km. 110 kV õhuliinidest on täielikult rekonstrueeritud ainult väike osa. Tihtipeale vahetatakse välja ainult amortiseerunud või korrigeerimist nõudev õhuliini üks mast või mõne masti pikkune lõik.

Teema on Eestis aktuaalne, kuna Nõukogude Liidu ajal ehitatud kõrgepinge õhuliinide eluiga on jõudmas lõpule ning Eestis on planeeritud tulevikus palju õhuliinide rekonstrueerimise töid. Uued õhuliini detailid on arvutatud kehtiva EVS-EN 50341-1 standardi ning Eesti siseriiklike erinõuete EVS-EN 50341-2-20 järgi. Vana õhuliini osa ja mastid on projekteeritud ja ehitatud üle 35-e aasta tagasi Nõukogude Liidus ja selle ajal kehtiva Elektriseadmete Ehituse Eeskirjade (*Правила Устройства Электроустановок*) järgi. Erinevate standardite kasutamine toob sisse arvutuslike koormuste ja projekteerimis põhimõtete erinevused ühes õhuliini mastis, mis jääb kahe erineva standardi arvutusmetoodika vahele.

Lõputöö sisuks on mehaaniliste koormuste mõju arvutamine õhuliinide juhtmetele, isolaatorkettidele ning juhtmetest põhjustatud koormused mastile. Eestis kehtiva standardi EVS-EN 50341-1 ning Elektriseadmete Ehituse Eeskirjade (edaspidi EEE) järgi ühe 110 kV õhuliini kahe samasuguse lõigu näitel. Lõputöö mahus võetakse arvesse ka Eesti põhivõrgu valdaja Elering AS ettevõtte siseseid täiendavaid nõudeid õhuliinide ehitamisele ja projekteerimisele. Lõputöö eesmärgiks on tuua välja põhjalik ülevaade, analüüs ning võrdlus kahe standardi poolt kirjeldatud arvutusmetoodikate vahel ning tuua välja standardite nõuete majanduslik mõju õhuliini ehitamisele.

Analüüsi tarbeks projekteeritakse üks fiktiivne 110 kV õhuliini lõik ning arvutatakse õhuliini juhtmetele, isolaatorkettidele ja mastidele juhtmetest mõjuvad mehaanilised koormused hetkel Eestis kehtivate EVS-EN standardite ja Nõukogude Liidu ajal kehtiva EEE standardi metoodika järgi ning koostatakse ka juhtmete paigaldus ja tõmbe tabelid mõlema standardi alusel. Selle põhjal analüüsitakse ka õhuliinile maksumust mõjutavaid aspekte ja antakse suurusjärk, kui palju erinesid Eestis kahel erineval ajastul ehitatud õhuliinid. Kuna mastidele ja vundamentidele mõjuvate koormuste arvutamine on Eestis ja Euroopas ehitusinseneri töö, siis mastide konstruktsiooni elementidele ja vundamentidele mõjuvaid koormusi lõputöös ei käsitleta.

Autor valis lõputöö teema eelkõige enesearendamise eesmärgil, kuna on ise igapäevaselt seotud 110-330 kV õhuliinide projekteerimisega, kuid ei ole nii põhjalikult õhuliini juhtmete arvutusi teinud. Tööalaselt on kasutusel eriprogramm, mis teeb lõputöös käsitletud arvutused programmi siseselt õigete sisendite abil, kuid et programmist ja selle töö põhimõttest aru saada peab tegema arvutused paralleelselt ka käsitsi, et tekiks enesekontrolli võimalus.

Lõputöö jooniste tegemiseks on autor kasutanud programme AutoCAD ja PLS-CADD. Tabelite ja arvutuste tegemiseks on kasutatud programmi Microsoft Excel ning osaliselt ka PLS-CADD. Autor on kasutanud lõputöö kirjutamisel temale kätte saada olevaid nii Nõukogude Liidu aegseid kui ka kaasaegseid õhuliini projekte, raamatuid, teaduslikke artikleid, lõputöid ning kehtivaid standardeid ning on neile ka viidanud.

3 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Kirjanduse ülevaate koostamisel on autor otsinud infot teadusartiklitest, Eestis tehtud teadustöödest, Eestis ning välismaal välja antud teemakohastest raamatutest, kehtivatest standartidest ning Elektriseadmete Ehituse Eeskirjade (*Правила Устройства Электроустановок,* edaspidi *ПУЭ/*PUE) [1], [2] põhjal 1985 a väljaandest. Kuna Elektriseadmete Ehituse Eeskirjade (edaspidi EEE) ja kaasaegsete standardite erinevusi uurivat teadustööd ei ole Eestis veel tehtud, siis on lõputöö esimene selle teemaline teadustöö.

Teemakohasteks teadusartikliteks võib lugeda artikleid, mis kirjeldavad kindlaid õhuliini töö režiime ja stressi olukordi. Näiteks jäite tekkimine juhtmetele ja tuule koormuse mõjumine õhuliinile. Teadusartiklite ja muude allikate otsimisel tuleb silmas pidada seda, et allikad vastaksid kas EEE, EVS-EN või IEC standardite nõuetele. Tähelepanelik tuleb olla teiste riikide väljaannete osas, väljaarvatud dokumendid, mis pärinevad Eestist, Euroopast või Venemaalt, kuna teistes riikides võib mastile mõjuvate koormuste arvutusmetoodika põhineda nende siseriiklikele nõuetele, mida lõputöö ei käsitle. Töös ei võrrelda standardeid, mida Eestis ei kasutata.

Põhilisteks info allikateks lõputöö kirjutamiseks on EEE ja kaasaegsed standardid EVS-EN 50341-2-20:2018 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 2-20: Eesti [3], EVS-EN 50341-1:2013/AC:2014 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 1 [4]. Kuna EEE on koostatud Nõukogude liidu PUE, 5-nda väljaande põhjal, siis kasutatakse ka PUE standardit. Nendest allikatest võetakse võrdluse aluseks vajalikud andmed nagu kliima tingimused, alustingimused ja varutegurid. Neid andmeid kasutatakse valitud masti tüüpide valikul ja juhtmete koormuste arvutamisel. Arvutamis meetodid võetakse samuti eelmainitud standartidest. Samuti kasutatakse lõputöö kirjutamisel erinevate mastide ja õhuliinide projekteerimisega tegelevate asutuste valmisprojekte.

3.1 Teemakohased teadustööd ja väljaanded Eestis

Eestis, Tallinna Tehnikaülikoolis on koostatud magistritöö [5], mis kirjeldab 35-110 kV õhuliinide projekteerimise ja ehitamise meetodeid. Lõputöös kirjeldatakse EVS standardi põhjal õhuliini juhtmete arvutamise meetodit. Antud lõputöö erinevus olemasolevast lõputööst on see, et Tallinna Tehnikaülikoolis kirjutatud magistritöö kirjeldab 35-110 kV õhuliini projekteerimist ja arvutusi ainult EVS-EN 50341-1 standardi põhjal kuid käesolev lõputöö

kirjeldab õhuliini projekteerimist vastavalt EVS-EN 50341-1 ja EEE nõuetele ja esitab võrdlused nende standardite vahel.

Teine Eestis tehtud sarnane magistritöö on koostatud samuti Tallinna Tehnikaülikoolis [6]. Töös on räägitud samuti õhuliini juhtmetele mõjuvatest koormustest kuid see piirdub ainult standardite EVS-EN 50341-1 ja EVS-EN 50341-2-20 arvutustega. Töö kirjeldab kaetud õhuliini juhtmete paigaldamisest Elektrilevi OÜ võrgustandardi tarbeks. Magistritöös on mainitud ka, et vanade õhuliinide rekonstrueerimisel kaasaegset standardit kasutatakse ainult juhul, kui on siseriiklikud erinõuded vastavalt täiendatud. See kehtib näiteks Läti õhuliinide standardi kohta, kuid Eestis vastavaid täiendusi siseriiklikule standardile tehtud ei ole.

Eesti Maaülikoolis ja Tallinna Tehnikaülikoolis on koostatud käesoleva lõputööga samas suunas olevaid loengumaterjale [7] [8], mida on autor kasutanud töö koostamisel. Loengumaterjalide kasutamisel on neile ka viidatud.

Lõputöös on kasutatud ka Elering AS ettevõtte siseseid õhuliinide projekteerimise, ehitamise ja hooldamise juhiseid „Dokumendiseeria 700“ [9].

3.2 Teemakohased teadustööd ja väljaanded maailmas

Välismaal on avaldatud mitmeid teadusartikleid, mis kirjeldavad erinevaid tuule koormuse olukordi ja tuule mõju mastile ja masti armatuurile. Neid teadusartikleid kasutades tuleb lõputöö kirjutamise ajal jälgida seda, et need arvutused oleksid vastavad PUE või EVS-EN standarditele. Tehtud uuringutest ja teadusartiklitest saab kasutada ka neid arvutusi, mida standardid ei käsitle. Näiteks juhul kui EVS-EN 50341 standard või EEE ei kirjelda juhtme jääkdeformatsiooni kontseptsiooni, siis tuleb see leida kasutades muid usaldusväärseid allikaid.

Cigré õhuliinide uurimiskomisjon (*Cigré study committee on Overhead Lines*) on koostanud õhuliini projekteerimise põhimõtteid kirjeldav raamatusari „*Cigre Green Books*“. [10] Raamatusarjas on kirjeldatud põhjalikult õhuliini projekteerimisega seotud keerulisi probleeme, mida EVS-EN 50341-1 standard käsitleda ei pruugi. Selliseks probleemiks on näiteks õhuliini juhtme jääkdeformatsiooni ja sellest tuleneva rippe arvutamine. Raamatusari tugineb eelkõige IEC 60826 standarditele, kuid kuna EVS-EN 50341-1 standardis kirjeldatud arvutusmetoodika on väga sarnane IEC 60826 standardi metoodikale, siis autori arvates võib kasutada raamatusarja väärtuste leidmiseks, mida EVS-EN 50341-1 standard ei kirjelda. Raamatusarja väljaannetes kirjeldatud probleemide lahenduste variante on kasutatud ka lõputöö tulemuse saavutamiseks.

3.3 Kirjanduse ülevaate kokkuvõte

Elektriõhuliinide projekteerimise EVS-EN 50341-1 standardi ja Elektriseamete Ehituse Eeskirjade alusel ning koormusarvutuste võrdlusele sarnasel teemal on tehtud Eestis kaks magistritööd. Nendest kumbki ei räägi põhjalikult EEE nõuetest, millega tuleb arvestada vana õhuliini osalisel rekonstrueerimisel Eestis. Samuti ei too ükski mainitud töö välja erinevusi kahe erineva standardiga ehitatud õhuliini vahel ning ei võrdle erineval ajastul projekteeritud õhuliinide maksumusi.

4 ÕHULIINIDE PROJEKTEERIMISEST ÜLDISELT

4.1 Eestis ja lähiriikides kasutatavad õhuliinide projekteerimise standardid

Paljud maailmas kehtivad standardid ja arvutusmetoodikad on loomult deterministlikud ja püüavad kõiki sündmusi ette näha. Paljud standardite põhimõtted on kirjeldatud teiste kehtivate standardite näitel. Erinevusteks on kliimast ja maapinnast tulenevad kitsendused, mis on kirjeldatud riikide siseriiklike erinõuetega [11]. Kuna 110-330 kV õhuliinid on riikliku tähtsusega ja osaliselt ka rahvusvahelised, siis sõltub nende ehitus ja maksumus ka piirkonna geopoliitilisest olukorrast.

Eestis on lõputöö kirjutamise ajal enamus olemasolevatest 110 kV õhuliinidest ehitatud Nõukogude Liidu ajal ning nende elu iga hakkab jõudma lõpule. Seda on näha suurest hulgast riigihangetest, millega on nõutud olemasolevate õhuliinide gabariitide korrastamine, kogu õhuliini rekonstrueerimine või üksikute mastide vahetamine vanal liinil. Valiku variandiks on ka amortiseerunud õhuliini asendamine kaabelliiniga, kuid seda veel enamasti linna piires, kuna kaabelliini ehitamine on kordades kallim õhuliini ehitusest [12]. Mainides kaabelliini, siis võib välja tuua selle, et Eestis ei ole enda kehtivat standardit 110 kV kaabelliinide ehitamisele ja projekteerimisele. Elering AS, kellele enamus Eestis ehitatud ja ehitatavaid 110 kV maakaabelliinid kuuluvad, nõuab 110 kV kaabellinide ehitamise järgida EEE nõudeid.

Igas Balti riigis on õhuliinide arvutusmetoodikad erinevad. Eestis kasutatakse EVS-EN 50341-1 standardit, koos siseriiklike erinõuetega. Lätis on kasutusel siseriiklike erinõuete standardi asemel LEK [13] standardit, mis on nii-öelda „hübriid“ versioon Nõukogude Liidu aegsest standardist *Правила Устройства Электроустановок* (EEE) ning Euroopa standarditest. Läti riigis kasutatakse LEK standardit ka vanade õhuliinide rekonstrueerimisel. Leedus on ainu-kehtivaks õhuliinide projekteerimise standardiks siiamaani EEE. Lähi naabritest võib veel välja tuua Soome, kus kehtivad sarnaselt Eestile samuti nende endi siseriiklikud erinõuded koos EVS-EN 50341-1 üldnõuete standardiga.

Nõukogude Liidu aegsed õhuliinid on projekteeritud Elektriseadmete Ehituse Eeskirjade alusel, mille sisu erineb kaasaegsest nõuetest rahvusvaheliste standardites ning siseriiklikes erinõuetes. Autori teada ei ole Eestis keegi põhjalikult uurinud õhuliinile mõjuvaid arvutuslikke koormusi kahe erineva standardi näitel. Samuti on huvitavaks aspektiks seoses õhuliinide ehitusega ka ehituse maksumus, mida käesolev lõputöö samuti uurib.

4.2 Õhuliinide projekteerimine kuluefektiivsuse vaatepunktist

Õhuliini omanikule/projekti tellijale on oluline õhuliini maksimaalne töökindlus ning võimalikult väike vajadus ehitusjärgsele hooldamisele, kuid inseneri/projekteerija töös on üheks olulisemaks sisendiks on ka ehitatava objekti kuluefektiivsus. See tähendab, et kuigi projekteeritud objekt peab olema töökindel, peab see olema samal ajal ka võimalikult odav ilma töökindlust ohverdamata. Juhtmete kaal ja juhtmetest põhjustatud koormused mastile on määravaks lähteandmeks mastide konstruktsiooni elementide ja läbi selle ka mastide vundamentide projekteerimisele, seega võib öelda, et kõrgepinge õhuliini ehituse maksumus, kui vaadata õhuliini ehitust ainult insenertehnilisest vaatepunktist sõltub kõige rohkem juhtmete koormusest mastidele ning mastide valikust.

Töökindluse ja maksumuse suhte paika saamine on iga projekti üks alustalasid ning õhuliini projektid ei ole selle koha pealt erand. Kõrgepinge õhuliinid on enamasti üle 10 km pikad ja neis on tavaolukorras üle 20 masti. Pikemate 330 kV õhuliinide puhul üle 400 masti. Õhuliini projekti koostamisel tuleb jälgida igat väiksemat detaili ja selle detaili hinna ja töökindluse suhet. Võib näiteks võtta mastide seibid, mis on ühe kaupa üsna väike ja võrdlemisi odav detail. Kui arvestada, et ühele 330 kV ankrumastile on ettenähtud paigaldada ~1000 seibi, siis isegi seibi terase klassi või mõõdu üle dimensioneerimine võib viia projekti maksumuse suurenemiseni mitme saja tuhande euro võrra. Seda selletõttu, et seibi muutmine toob kaasa ka poltide muutumise ning selle kaudu ka kogu masti konstruktsiooni elementide ümberprojekteerimise.

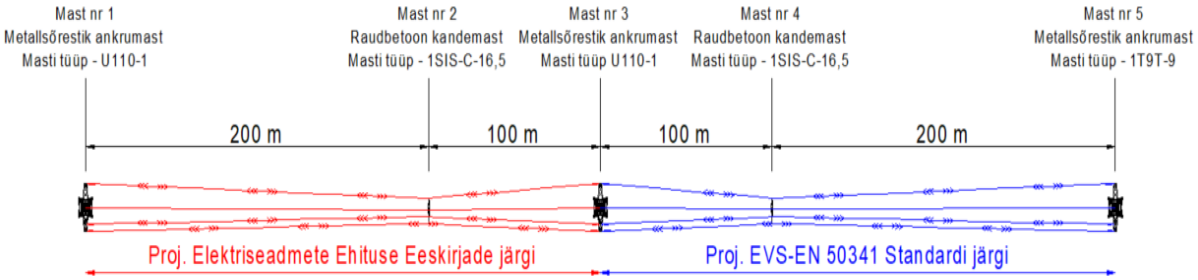
5 PROJEKTEERITAVA ÕHULIINI ÜLDKIRJELDUS

5.1 Õhuliini üldkirjeldus ja tehtava töö piiritlus

Õhuliin koosneb üldistatult õhuliini mastidest, mastide vundamentidest, mastide maandusest, juhtmetest ja trossidest ning juhtmete armatuurist. Käesolev lõputöö teeb arvutused mehaanilistele koormustele, mis mõjuvad õhuliini juhtmetele ning arvutab juhtmete endi koormused mastidele. Mastide ja vundamentide tugevus kontrolli arvutusi lõputöö ei käsitle.

Õhuliini koormuste arvuliste väärtuste määramiseks on vaja projekteerida näidis õhuliin või kasutada olemasoleva õhuliini näidet, mille järgi teostada analüüs. Lõputöös on projekteeritud fiktiivne 110 kV õhuliin, mille abil on peegeldatud olemasoleva 110 kV õhuliini lõigu

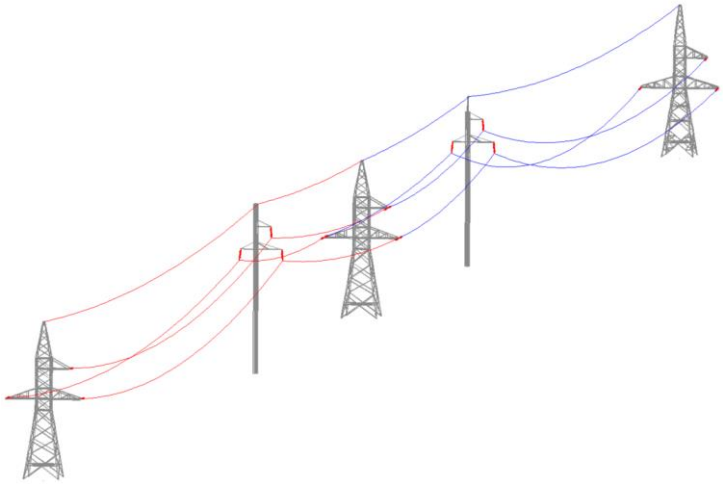
erinevused arvutuslike koormuste lõikes. Järgnev skeem (Joonis 1.) kirjeldab näidis õhuliini visangute pikkusi ja maste.



Joonis 1. Arvutatava õhuliini üldskeem

Lõputöös arvutatakse kaks visangut ühe-ahelalisest õhuliinist kaasaegse EVS-EN 50341-1 standardi järgi ja kaks visangut EEE järgi. Ehk üks ankruvisang EVS-EN 50341-1 ja teine ankruvisang EEE järgi. Mõlemad õhuliini lõigud on visangute pikkuse poolest identsed, kuid on erinevad masti tüüpide poolest. Nõukogude liidu aegsel õhuliini lõigul on kasutuses vene tüüpprojektide järgi [14] ehitatud mastid U110-1. Kaasaegse õhuliini lõigu peal on kasutatud Elering AS 110 kV uuemate õhuliinide ehitusel kasutatavad õhuliini mastid 1SIS-C-16,5 ja 1T9T-9 [15]. Kõik mastid õhuliinile on valitud eeldusega, et neile sobib AS-240 juhe, mis on sarnaste omadustega kaasaegsele juhtmele 242-AL1/39-ST1A. Kaasaegsed mastid on valitud võimalikult sarnased Nõukogude Liidus projekteeritud mastidele. Tehtud on üks lihtsustus seoses kandemastidega, kus on kasutatud sama pikka kandemasti mõlema liini osa puhul, et vältida suuri kõrguse erinevusi kahe õhuliini vahel. Projekteeritud õhuliini lõigul ei esine ühtegi õhuliini suunamuutust.

Järgnevalt (Joonis 2.) on toodud üldskeemi illustreeriv 3D õhuliini mudel ning õhuliini masti tüüpe ja mastide vaheliste visangute pikkust kirjeldav tabel.



Joonis 2. Projekteeritud õhuliini mudeli 3D vaade

Tabel 1. Arvutatava õhuliini mastitabel

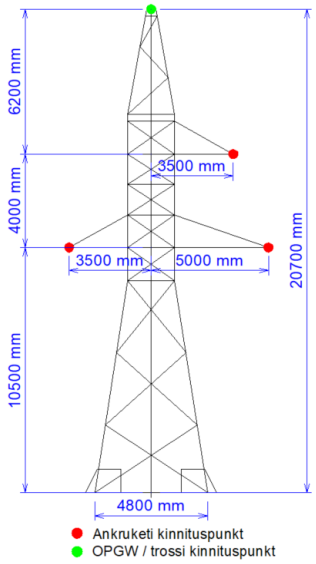
Masti jrk nr	**Masti tüüp**	**Visangu pikkus (m)**	**Märkused**
1	U110-1		Arvutused EEE järgi
		200	
2	1SIS-C-16,5		
		100	
3	U110-1		
		100	Arvutused EVS-EN 50341 standardi järgi
4	1SIS-C-16,5		
		200	
5	1T9T-9		

5.2 Kasutatavad õhuliini mastid

Õhuliini mastide ja vundamentide projekteerimisel on aluseks olemasolev maapinna reljeef, geoloogia ning ristumised erinevat tüüpi teede ja muude õhuliinidega. Lisaks maapinnal asuvatele kitsendustele tuleb arvestada ka õhuliinil ilmastiku tingimustega. Järgnevalt on kirjeldatud lõputöös kastutatavad mastid.

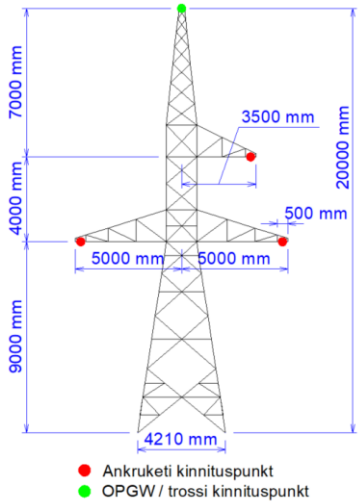
Nurga-ankrumast U110-1 – Tegemist on vabalt seisva üheahelalise A-tüüpi metallsõrestik nurga-ankrumastiga, mis on maksimaalselt mõeldud juhtmetele AS-240. Mast on

projekteeritud Nõukogude Liidus aastal 1968 ning masti kataloogile on tehtud korrektuur aastal 1973. [14] U110-1 masti enam tänapäeval Eestis uutel õhuliinidel ei kasutata, kuid seda võib näha enamustel rekonstrueerimata ühe-ahelaistel 110 kV õhuliinidel.



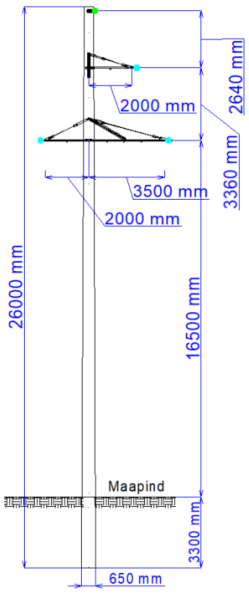
Joonis 3. Masti U110-1 üldjoonis [14]

Nurga- ankrumast 1T9T-9 – Tegemist on vabalt seisva üheahelalise A-tüüpi metallsõrestik nurga-ankrumastiga, mis on maksimaalselt mõeldud ühe osajuhtmega AS-240 juhtmetega ahelale. Mast on projekteeritud 2021 aastal. Mast on üks 1TxT mastide seeria esindajatest, mis on kasutuses tänapäeva õhuliinide rekonstrueerimise või uute õhuliinide ehituse projektides.



Joonis 4. Masti 1T9T-9 üldjoonis [15]

Kandemast 1SIS-C-16,5 – Tegemist on vabalt seisva üheahelalise I-tüüpi raudbetoonkandemastiga, mis on maksimaalselt mõeldud ühe osajuhtmega AS-240 juhtmetega ahelale. Mast on projekteeritud 2020 aastal ning oli esimest korda kasutuses L300 õhuliini rekonstrueerimisel. Mast 1SIS-C-16,5 on sisuliselt modifikatsioon Nõukogude Liidu raudbetoon kandemastist [16]. Mastil on kasutusel sama raudbetoontüvi, mida kasutatakse Nõukogude Liidu raudbetoon kandemastidel, kuid on muudetud masti traaverseid, et need oleksid vastavuses tänapäeva Eesti ja Euroopa nõuetega.



Joonis 5. Masti 1SIS-C-16,5 üldjoonis [17]

Järgnevas tabelis on koondatud mastide juhtmete ja piksekaitsetrosside kinnituspunktide kõrgused, mida kasutatakse lõputöös arvutuste tegemisel.

Tabel 2. Juhtmete ja piksekaitsetrosside kinnituspunktide kõrgused mastidel

Mast	**Alumise juhtme kinnituspunkti kõrgus maapinnast (m)**	**Ülemise juhtme kinnituspunkti kõrgus maapinnast (m)**	**Piksekaitsetrossi kinnituspunkti kõrgus maapinnast (m)**
U110-1	10,5	14,5	20,7
1T9T-9	9,0	13,0	20,0
1SIS-C-16,5	16,5	19,9	22,5

5.3 Juhtmed ja piksekaitsetrossid

5.3.1 Juhtmete tehnilised andmed

Vastavalt Elering AS nõuetele [18] tuleb Eestis uue 110 kV õhuliini ehitamisel kasutada lõhestatud faasis 242-AL1/39-ST1A juhtmeid ning kui on üks juhe faasis, siis võib kasutada 152-AL1/25-ST1A teras-alumiiniumjuhtmeid. Lõputöös on arvutused tehtud juhtmetega ACSR 242/39 Hawk üks juhe faasi kohta, kuna autori kogemuse põhjal on kõik uued Elering AS võrgus olevad 110 kV õhuliinid projekteeritud ja ehitatud ACSR 242/39 Hawk juhtmega.

Joonis 6. ACSR juhe [19]

Tänapäeva õhuliini ehitades pingutatakse ACSR 242/39 Hawk juhtmed tavaolukorras 18250 N-ga juhtme pingsusele 65 N/mm² aasta keskmisel temperatuuril +5°C [17]. Seda põhimõtet on kasutatud ka lõputöös arvutuste tegemisel. Praegustes olemasolevate õhuliinide juhtmetes on pingsus juba aja jooksul vähenenud ning see jääb vahemikku 50-54 N/mm². Nõukogude Liidu ajal pingutati juhtmeid esialgse pingsusega 65-80 N/mm². Mitmete vanade õhuliinide juhtmeid on ka tänapäeval pingutatud, kuid juhtme vahetusi on tehtud vähe. Juhtmete pingutamisel tuleb esile probleem, et juhe venimisel kaotab enda esialgsed mehaanilised omadused ning selle korduv pingutamine ei ole jätkusuutlik tegevus. Seda põhjusega, et juhtme alumiiniumosa võib ühel hetkel nõrgemast kohast katkeda ja põhjustada katkestusi õhuliini töös.

Lõputöö arvutustes kasutatavate juhtmete tehnilised andmed on toodud järgnevas tabelis.

Tabel 3. ACSR 242/39 HAWK juhtme tehnilised andmed [19]

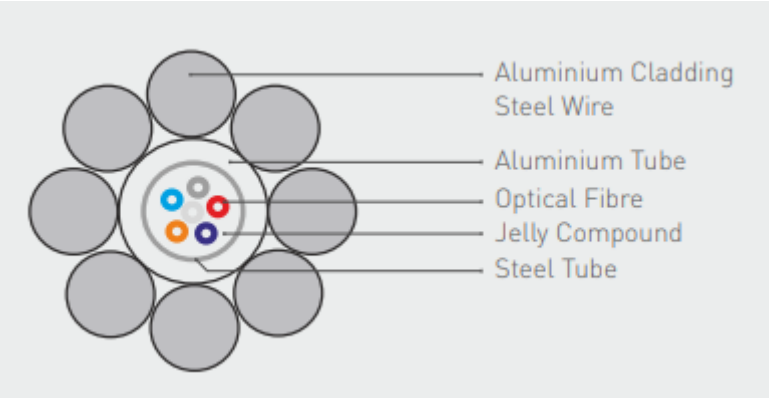
Nimetus	**Spetsifikatsioon**	**Ühik**
Vastav standard	EN 50182	-
Mark	ACSR 242/39 Hawk	-
Nominaalne purustusjõud	84,90	kN
Elektriline takistus	0,1200	Ω/km
Mass	976	kg/km
Kiudude arv		
Alumiinium	26	tk
Teras	7	tk
Ristlõige		
Alumiinium	242,00	mm^2
Teras	39,50	mm^2
Kogu	281,00	mm^2
Diameeter		
Alumiinium	3,44	mm
Teras	2,68	mm
Kogu	21,80	mm
Esialgne elastsusmoodul	61000	N/mm^2
Lõplik elastsusmoodul	76000	N/mm^2
Juhtme joonpaisumistegur	$19,2*10^{-6}$	1/K

5.3.2 Piksekaitsetrosside tehnilised andmed

Tänapäeval uued 110 kV õhuliinid on kõik varustatud piksekaitsetrossi OPGW-ga, milles on sees ka optilised kiud, milles liigub nii alajaamade vahelist infot kui ka andmeside ühenduse pakkujate signaale. OPGW piksekaitsetrossis olevad optilised kiud on asetatud veekindlasse roostevabast terasest želee taolise täidisega torusse. Roostevabast terasest toru on omakorda alumiiniumtorus, mis tagab nii parema elektrilise juhtivuse kui annab ka muljumiskaitset sees olevatele kiududele. OPGW juhtme välimine kiht on spiraali keeratud ja terasega kaetud alumiinium traadid või alumiinium sulamist traadid. Alumiinium on valitud nii selle heade

elektriliste kui ka mehaaniliste omaduste pärast. Alumiiniumkiud on väga vastupidavad tõmbele ning need on kaalu poolest kerged [20].

Piksekaitsetrossid valiti nii Nõukogule Liidu ajal, kui ka tänapäeval õhuliinil esineva suurima lühisvoolu ja piksekaitsetrossi termilise taluvuse järgi. Sealjuures tuleb arvestada ka lühisvoolu tugevuse vähenemisega õhuliini keskel.



Joonis 7. Piksekaitsetrossi OPGW ristlõige [20]

Kui OPGW ei ole projekti erinõuetega nõutud, siis tuleb kasutada terasest piksekaitsetrossi või suure lühisvoolu tõttu alajaama lähistel vajadusel ka ACSR juhtmeid. Nõukogude Liidu aegsetel 110 kV õhuliinidel on üldiselt kasutuses piksekaitsetross TK-50 [21]. Piksekaitsetross TK-50 on lihtsustamise mõttes kasutuses ka mõlemal lõputöö mahus projekteeritud õhuliini lõigul.

Piksekaitsetrossi ripped ja tõmbejõud projekteeritakse enamasti peale juhtmete projekteerimist ning reguleeritakse aasta keskmise pingusse järgi, et tagada nõutud õhkvahemikud trosside ja juhtmete vahele. Reeglina on õhuliinide projekteerimisel kasutatud põhimõtet, et trossi aasta keskmine ripe on 0,5 m võrra väiksem kui ülemisel õhuliini juhtmel.

Tabel 4. Piksekaitsetrossi TK-50 tehnilised andmed [22], [21]

Nimetus	**Spetsifikatsioon**	**Ühik**
Vastav standard	GOST 3063-80	-
Mark	TK50 (S50)	-
Nominaalne purustusjõud	54,3	kN
Elektriline takistus	230	Ω/km
Mass	417,5	kg/km
Ristlõige		
Kogu	48,64	mm^2
Diameeter		
Kogu	9,10	mm
Esialgne elastsusmoodul	76250	N/mm^2
Lõplik elastsusmoodul	85800	N/mm^2
Piksekaitsetrossi joonpaisumistegur*	$11,7*10^{-6}$	1/K
*Kasutatud terase andmeid		

6 110 KV ÕHULIINIDE PROJEKTEERIMISE ÜLDTINGIMUSED

6.1 110 kV õhuliinide projekteerimise lähteandmed

See lõputöö osa kirjeldab töö lõikes kasutatud üldisi mõisteid ning väärtusi, mille arvutusmetoodika ei muutu standardite lõikes.

Õhuliinide arvutamisel on kasutatud järgnevaid mõisteid, mis on standardite lõikes samad ning nende arvutusmetoodika ei muutu:

- Tuulevisang – mastiga külgnevate visangute pikkuste summa jagatud kahega [8];

$$L_t = \frac{L_1 + L_2}{2} \tag{6.1.}$$

kus, L_t – tuulevisang (m);

L_1 ja L_2 – mastiga külgnevate visangute pikkus (m).

- Kaaluvisang – mastiga külgnevate juhtmete raskuskeskmete omavaheline kaugus [8];

$$L_k = X_{r1} + X_{r2} \tag{6.2.}$$

kus, L_k – kaaluvisang (m);

X_r – juhtmete raskuskeskmete kaugus mastist (m).

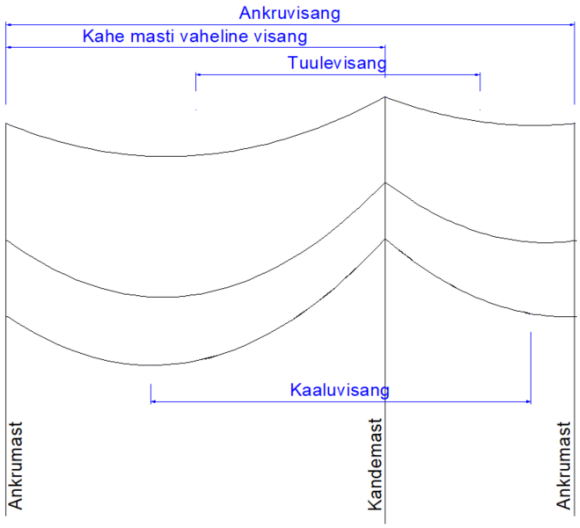
- Ankruvisang – visangute pikkuste summa ankrumastist ankrumastini;
- Taandatud visang – lihtsustatud viis teha õhuliini arvutusi tasasel maapinnal pikemate ankruvisangute korral. Taandatud visang on leitav valemiga [4]:

$$L_R = \sqrt{\frac{\sum L_n^3}{\sum L_n}} \tag{6.3.}$$

kus, L_R – taandatud visang (m);

L_n – ankrupiirkonna n-nda visangu pikkus (m).

Järgnevalt on toodud erinevaid visanguid visualiseeriv joonis ning tabel lõputöös arvutatud visangutega.



Joonis 8. Visanguid visualiseeriv joonis

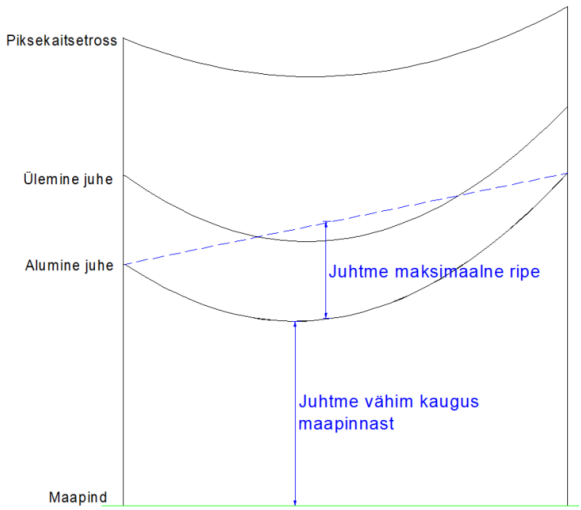
Tabel 5. Projekteeritud õhuliini visangute tabel

Masti nr	Masti tüüp		Visangu pikkus (m)	Kaalu-visang (m)	Tuule-visang (m)	Ankru-visang (m)	Taandatud visang (m)
1	AM	U110-1					
			200			300	300
2	KM	1SIS-C-16,5		210	300		
			100				
3	AM	U110-1		32	200		
			100			300	300
4	KM	1SIS-C-16,5		210	300		
			200				
5	AM	1T9T-9					

6.1.1 Õhuliini ripete ja tõmbejõudude arvutusmetoodika

Üheks olulisemaks õhuliini projekti osaks on ripete ja tõmmete tabel, kuid kuna juhtmete ripete tabeli koostamist ei kirjelda EEE ega ka EVS-EN 50341 standard, siis on ripete arvutus kirjeldatud selles peatükis ning seda arvutusmetoodikat võib kasutada mõlema õhuliini lõigu projekteerimisel.

Õhuliini juhtmetele ja piksekaitsetrossidele tuleb koostada õhuliini projekti mahus ripete ja tõmbejõudude tabelid ning profiilid. Tabelites peavad olema kirjeldatud kõik koormusjuhtumid ning nende ajal esinevad arvutuslikud jõud juhtmetele ja masti elementidele. Profiilidele kantakse juhe standardiga või erinõuetega määratud maksimaalsel temperatuuril.



Joonis 9. Juhtme ripet selgitav joonis

Jooniselt 9. nähtub, et juhtme suurima rippe asukoht sõltub õhuliini juhtme kinnituspunktide kõrguslikust erinevusest. Ehk juhtme maksimaalne ripe ei ole tavaliselt kunagi visangu keskel, kuna nii mastidel juhtme kinnitused kui ka maapinna profiil masti all on enamasti erineva absoluutkõrguse väärtusega.

Juhtmete maksimaalse rippe visangus arvutamiseks sõltuvalt juhtme temperatuurist on vaja teada juhtmele mõjuvat tõmbejõudu kindlal juhtme temperatuuril. Selleks kasutatakse „juhtme oleku võrrandit“ (*state change equation*) [23]:

$$\sigma^3 - \sigma^2 \cdot \left(\sigma_0 - \alpha \cdot E \cdot (t - t_0) - \frac{a^2 \cdot \gamma_0^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_0^2} \right) = \frac{a^2 \cdot \gamma^2 \cdot E}{24} \qquad (6.4.)$$

kus, a – visangu pikkus (m);

η – juhtme joonpaisumistegur (1/°C);

E – juhtme elastsusmoodul (N/mm^2);

σ – juhtme lõplik pingsus (N/mm^2);

σ_0 – juhtme esialgne pingsus (N/mm^2);

γ – juhtme lõplik erikoormus (N/m*mm^2);

γ_0 – juhtme esialgne erikoormus (N/m*mm^2);

t – juhtme lõplik temperatuur (°C);

t_0 – juhtme esialgne temperatuur (°C).

Antud võrrandi teisendamisel vastavalt allikas [23] kirjeldatud protseduuri järgides saab juhtme oleku võrrandi teisendada kujule:

$$\sigma^3 - \sigma^2 \cdot A = B \tag{6.6.}$$

Võrrandi kuju on sisu poolest kuupvõrrand, mille avaldamine on samuti kirjeldatud samas allikas. Kui on teada valemis kirjeldatud algandmed, siis on võimalik arvutada avaldades kuupvõrrandi juhtme lõplik pingsus, mis on aluseks rippe arvutamiseks ning läbi selle ka õhuliini masti kõrguste ja tüüpide määramiseks ning mõjutab olulisel määral õhuliini maksumust.

Juhtme/piksekaitsetrossi esialgne erikoormus, milleks on erikoormus juhtme omakaalust avaldub järgmise valemiga [24]:

$$\gamma_0 = \frac{G}{A} \tag{6.7.}$$

kus, G – juhtme ühe meetri kaal (kg/m*10);

A – juhtme ristlõige (mm^2).

Avaldades olukorravõrrandist juhtme lõpliku pingsuse on võimalik arvutada juhtmele/piksekaitsetrossile mõjuva tõmbejõu järgneva valemiga [8]:

$$T_j = \sigma \cdot A\ (N) \tag{6.8.}$$

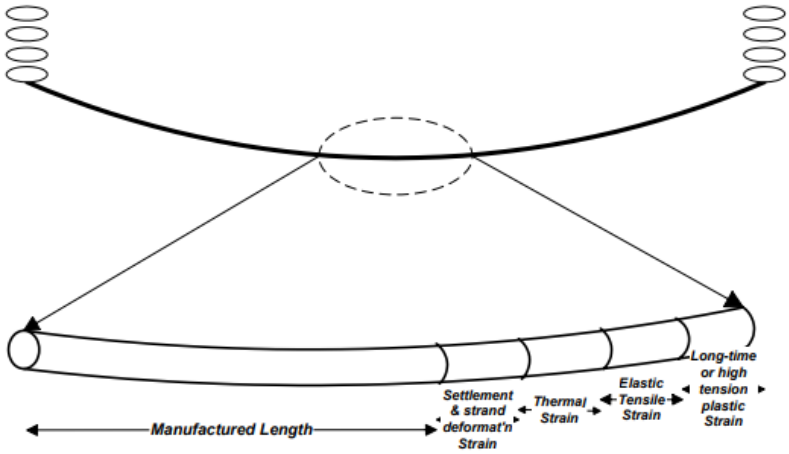
Ning teades tõmbejõu väärtust on võimalik arvutada visangu madalaim punkt, ehk ripe. Ripe f arvutatakse järgneva valemiga [8]:

$$f = \frac{a^2 \cdot G}{8 \cdot T_j}\ (m) \tag{6.9.}$$

6.1.2 Õhuliini juhtme roome kontseptsioon

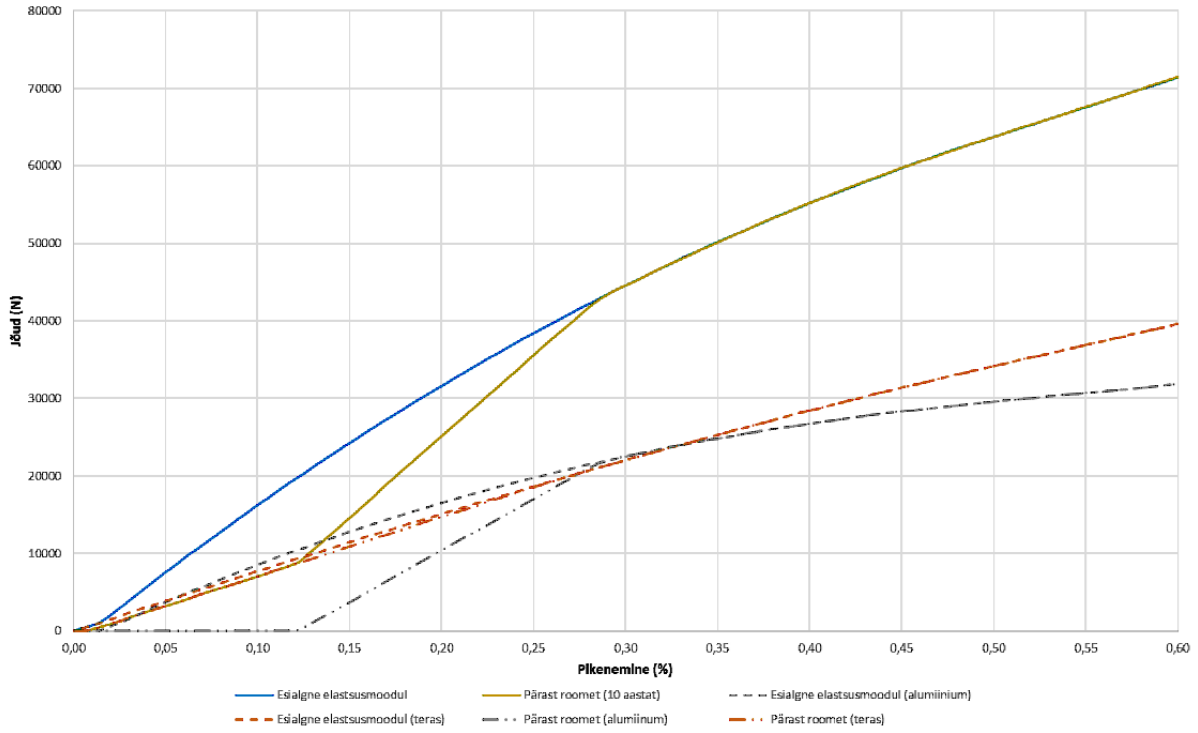
Juhtme roome ehk juhtme jääkdeformatsioon on oluline juhtme parameeter, mida tuleb arvestada nii õhuliini projekteerimisel kui ka ehitamisel ja hooldamisel. Juhtme roomet kirjeldatakse projektides juhtmete pingutamise ja ripete tabelites juhtme rippena pärast roomet.

Juhtme roome mõiste tähendab seda, et juhe pikeneb aja jooksul juhtme töö temperatuuri, ilmastiku tingimuste ning sellele mõjuva tõmbe tõttu. Jääkdeformatsiooni tõttu veninud juhtme pikkus ei naase enam algolekusse erinevalt soojuspaisumisest tingitud venimisest.



Joonis 10. Juhtme venimise diagramm [11]

Juhtme ripe oleneb suurel määral juhtme termomehaanilistest omadustest. Kuna ACSR juhtmed on teras kiududest südamikuga ning väljas on alumiinium kiud, siis toimub materjalide venimine eri juhtme osades erinevalt. Juhtme roome toimub juhtme pikenemisel nii lühiajalise mehaanilise pinge olukorras, kui ka pikaajalise normaalkoormuse tingimustes. Suurem osa juhtme pikenemisest tuleb kohe peale juhtme paigaldamist järgneva 100 tunni jooksul. Juhe venib esimese 10-100 tunni vahel sama palju kui järgneva 100-1000 tunni jooksul [11].



Joonis 11. ACSR 242/39 HAWK juhtme ja juhtme materjalide venimine

Graafikul (Joonis 11.) on kujutatud ACSR 242/39 HAWK juhtme jääkdeformatsiooni vastavalt sellele mõjuvale mehaanilisele pingele. Eestis on nõutud ACSR 242/39 HAWK juhet pingutada kuni 60 N/mm² peale, mis on ~20000 N (18265 N), seda loetakse ühtlasi ka aasta keskmiseks juhtme pingsuseks +5 °C juures. Kui lugeda graafikut, siis võib öelda, et ACSR 242/39 juhe venib jäädavalt 10 aasta jooksul ~10%. Seejuures venib jäädavalt ainult juhtme alumiinium osa, ehk välimine kiht. Terases suurt jääkdeformatsiooni ei esine. Teoorias peaks juhtme terasest osa tõmbuma tagasi peaaegu enda algsele pikkusele, kui sellelt eraldada alumiiniumkiud, ehk terasest kiududel tekib vähe jääkdeformatsiooni.

Ameerika Ühendriikides koostatud õhuliinide projekteerimise juhend [11], millele vihjavad nii EVS-EN 50341-1 standard kui ka Elering AS 700 dokumendiseeria lubab juhtme roomest põhjustatud rippe arvutamisel kasutada lihtsustatud meetodit, kus lisatakse juhtme paigaldustemperatuurile +30...+35 °C, mis on sisu poolest juhtme venimisele ekvivalentne juhtme temperatuuri tõus. Mõnes mõttes on lihtsustatud meetodi kasutamine ka õigem ja riskivabam, kuna juhtme elastsusmoodul määratakse katse meetodil, kuid katsetel olevat juhtme temperatuuri ning muid katsetulemust mõjutavad tegurid õhuliini projekteerijateni ei

jõua. Selle tõttu annab elastsusmooduliga keeruliste arvutuste tegemine roome leidmiseks kahe-materjalise juhtme jaoks samuti üsna kaheldava tulemuse.

Tallinna Tehnika Ülikoolis aastal 2020 koostatud magistritöös [6] on kasutatud kesk pinge kaetud õhuliini juhtmete roome kirjeldamiseks venimise ekvivalentset temperatuuri +15°C, mis oli valitud koostöös Elektrilevi OÜ esindajaga. Käesoleva lõputöö autor kontrollis ACSR 242/39 HAWK juhtme roome ekvivalentset temperatuuri tõusu lõputöös seatud tingimustel eriprogrammiga ning sai tulemuseks 22,4 °C, kuid arvutuste tegemiseks kasutab autor lihtsustatud meetodit ning ekvivalentset temperatuuri tõusu 25 °C.

Vastavalt standardi EVS-EN 50341 Eesti siseriiklike erinõuete osale võib roomet juhtmetel kompenseerida pingutades juhtmed üle standardiga sätestatud juhtmete baaspinge väärtuse, milleks on 45...60 N/mm². Eestis 110 kV õhuliinide projekteerimisel ja ehitamisel pingutatakse ACSR 242/39 HAWK juhtmed ~65 N/mm², mis tagab selle, et ligikaudu aasta möödudes saavutab õhuliini juhe baaspingsuse maksimaalse väärtuse 60 N/mm² ning väheneb aja möödudes tänu juhtme venimisele veelgi. Üle 65 N/mm² kohta ei tohi juhet pingutada, kuna siis on oht pingutada üle masti enda konstruktsiooni elemendid piirkoormusjuhtumite puhul.

Vastavalt allikale [11] on võimalik juhtme roomet peale juhtme paigaldust mõnevõrra ära hoida juhtme pingutamisega enne paigaldust, kuid seda lahendust autori teada Eestis õhuliinide ehitamisel ei ole kasutatud.

7 NÕUKOGUDE LIIDU AEGSE ÕHULIINI PROJEKTEERIMINE

7.1 „Elektriseadmete Ehituse Eeskirjade“ üldine kirjeldus

Alates sellest peatükist on lõputöö jaotatud mõtteliselt kaheks osaks. Üks osa, mis kirjeldab Elektriseadmete Ehitamise Eeskirjade järgi tehtud arvutusi ning teine osa kirjeldab EVS-EN 50341-1 standardiga sätestatud arvutusmetoodikat.

Elektriseadmete Ehitamise Eeskirjad lühendatult EEE (vene keeles *Правила Устройства Электроустановок*, lühendatult *ПУЭ)* on Nõukogude Liidu ajal koostatud juhised elektriseadmete projekteerimiseks, ehitamiseks ja hooldamiseks. EEE-d on kasutatud Eesti territooriumil õhuliinide projekteerimiseks Nõukogude Liidu ajal ning lõputöö kirjutamise ajal kasutatakse seda ka olemasolevate NL ajal ehitatud 110 kV õhuliinide hoolduseks. Eesti keelde tõlgitud viimane väljaanne on välja antud aastal 1986 ning koosneb neljast raamatust [2]:

1) „Üldeeskirjad;“
2) „Üldlevinumad elektriseadmed;“
3) „Üle 1000 V õhuliinid, jaotlad ja alajaamad;“
4) „Elektrieriseadmed.“

Lõputöö kirjeldab õhuliinide juhtmetele ja juhtmetest mastidele põhjustatud mehaaniliste koormuste arvutusmetoodikaid, mis on kirjeldatud EEE kolmandas osas „Üle 1000 V õhuliinid, jaotlad ja alajaamad“.

EEE on koostanud NSV Liidu Energeetika ja Elektrifitseerimise Ministeerium ning NSV Liidu Montaaži- ja Eriehitustööde Ministeeriumi organisatsioonid [2].

7.2 Projekteerimise üldtingimused (EEE)

EEE projekteerimise lähteandmed on kogutud nii palju kui võimalik EEE Eesti keelsetest köidetest. Andmed, mis ei ole tuletatud EEE põhjal (näiteks juhtmete mehaanilised andmed) on arvutatud teadusallikate põhjal, võetud muudest kehtivatest standarditest või Elering AS 700 seeria nõuetest. EEE-le vastavad kliimatingimused võetakse õhuliinitarindite arvutamisel ja valikul kliimakaardilt [2]. Andmed, mis ei ole kliimakaardil kirjeldatud on arvutatud või uuritud järgnevas peatükis.

Tabel 6. Projekteerimise lähteandmed EEE järgi

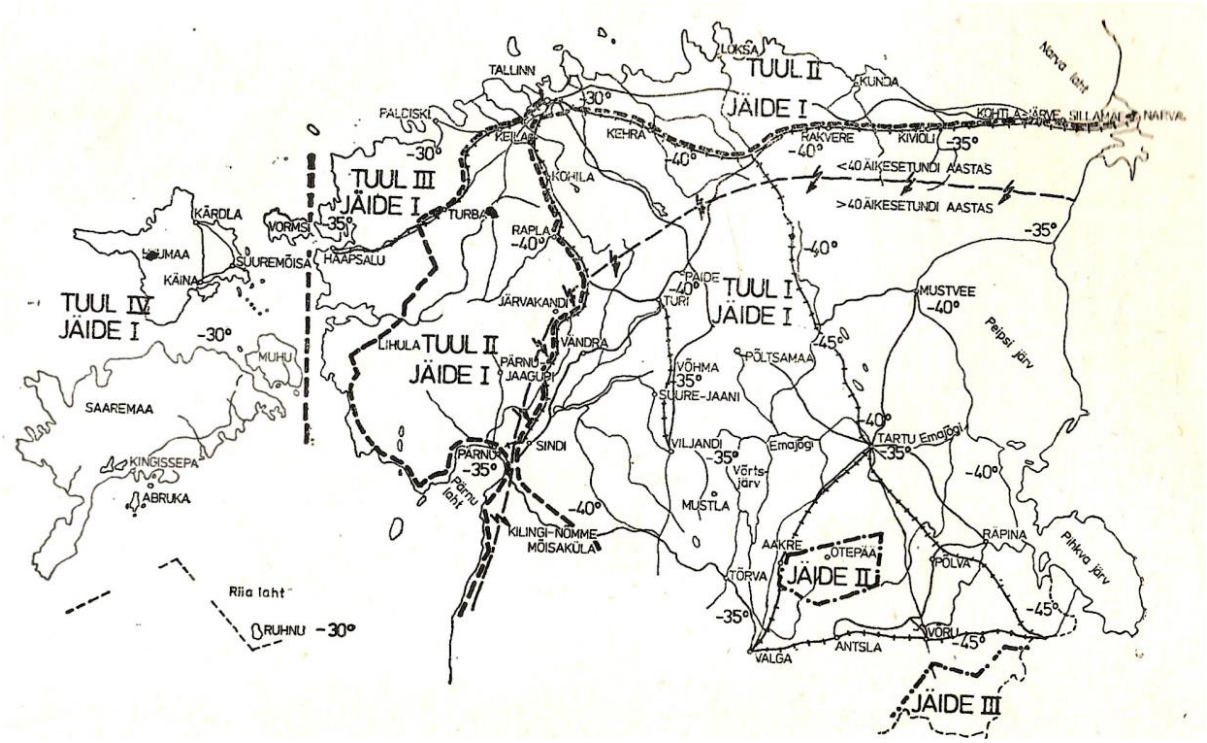
Jäite piirkond	I
Tuule piirkond	II
Tuule rõhk vastavalt tuule piirkonnale*	0,40 kPa
Tuule kiirus vastavalt tuule piirkonnale	25 m/s
Konstantne õhutihedus	1,225 kg/m³
Jäite paksus (10 aastase kordsus perioodiga)	5 mm
Jäite tihedus	900 kg/m³
Aasta keskmine temperatuur	+5 ℃
Maksimaalne õhutemperatuur	+35 ℃
Maksimaalne juhtme temperatuur	+35 ℃
Minimaalne õhutemperatuur	-45 ℃
*Ülemise juhtme ja piksekaitsetrossile rakendub ka juhtme kõrgusele vastav parandustegur	

7.3 Kliimatingimused Eestis EEE järgi

EEE sätestab eraldi kliimatingimused tuginedes ENSV kliimaatlasele [25].

Arvutuslikud õhutemperatuurid tuleb võtta kõikidele pingetele tegelike vaatlusandmete järgi ja ümardatakse lähima viiega jaguva arvuni [2]. Eesti territooriumil on pikaajalise vaatluse järgi õhu maksimaalne temperatuur olenevalt vaatluse all oleva piirkonna asukohast +28℃...+35℃. Minimaalseks temperatuuriks on -29℃...-43℃. Ning aasta keskmine temperatuur on +4℃...+6℃ [25].

Lõputöös projekteeritud näidis õhuliin asub Lääne-Eestis, mis tõttu kehtivad selle projekteerimisel lähteandmete tabelis toodud temperatuurid.



Joonis 12. Eesti kliimakaart [2]

7.4 Arvutused „Elektriseadmete Ehituse Eeskirjade“ järgi

7.4.1 EEE arvutusmetoodika üld alused ja nõuded

Elektriseadmete Ehituse Eeskirjad panevad paika kaks projekteerimise põhimõtet/põhivalemit. Üheks on see, et õhuliinide juhtmed ja trossid arvutatakse lubatud pingete meetodil. Lubatud pingete meetod tähendab seda, et Nõukogude Liidu aegsetes käsiraamatutes on toodud iga juhtme ja trossi tüübi kohta neile lubatud mehaaniline pinge. Seda tuleb näha kui lubatud mehaanilist pinget ja projekteerida õhuliin vastavalt [2], [21]. Isolaatorid ja liini armatuur projekteeritakse purustavate koormuste meetodil. Purustavad koormused on sarnased tänapäevasele projekteerimise üldvalemile, et arvutuslik koormus peab olema väiksem kui on maksimaalne elemendi mehaanilise pinge taluvus. Mõlema meetodi puhul võetakse arvutuse aluseks normatiivsed koormused [2].

Eestis õhuliini mastide, vundamentide ja muude masti elementide projekteerimisel tuleb arvestada neile mõjuvaid koormusi seadmetest sh. trossid, juhtmed isolaatorketid jm, mastide montaaži seadmete kaalust ning ka ilmastikust ja muudest erisituatsioonidest tekkivaid koormusi nagu jää, tuule ja nende koostoime koormusi [2].

Juhtmetele ja mastidele mõjuvate koormuste põhilisteks tunnussuurusteks on nende arvutuslikud väärtused. Mis on kirjeldatud vastavates peatükkides.

Selleks, et vältida normatiivsete koormuste kõrvalekallet projekteeritud väärtustest ehitamisel ilmnenud probleemidega seoses, tuleb korrutada normatiivsed väärtused veel ülekoormusteguriga. [2]

EEE sätestab õhuliinidele järgnevad talitlused [2]:

- Õhuliini normaalrežiim – õhuliini seisund katkemata juhtmete ja trosside korral;
- Õhuliini avariirežiim – õhuliini seisund, kui on katkenud mõni juhe või piksekaitsetross;
- Õhuliini montaaži režiim – kirjeldab õhuliini olukorda juhtmete ja trosside paigaldamise ajal.

7.4.2 Juhtmetele mõjuvad kliimast tingitud koormused

Normaalrežiimis töötava õhuliini projekteerimisel tuleb arvestada järgmisi kliimatingimuste kombinatsioone [2]:

1) Suurim temperatuur, tuul ja jäide puuduvad;
2) Vähim temperatuur, tuul ja jäide puuduvad;
3) Temperatuur võrdne aasta keskmisega, tuul ja jäide puuduvad;
4) Juhtmed ja trossid kaetud jäitega, temp. -5 °C, tuul puudub;
5) Tuule rõhk võrdne suurima normatiivse väärtusega q_{max}, temp. -5 °C, jäide puudub;
6) Juhtmed ja trossid kaetud jäitega, temp. -5 °C, tuule rõhk $0{,}25q_{max}$ (tuule kiirus $0{,}5v_{max}$).

Seejuures ei võeta Eesti kliima tingimustes tuule rõhku kunagi jäitega koostoimel üle 0,30 kPa [2].

7.4.3 Tuule ja jäite koormus

Ristisuunas juhtmetele või trossidele mõjuv normatiivne tuulekoormus P leitakse iga arvutusliku režiimi jaoks järgneva valemiga [2]:

$$P = \alpha \cdot K_l \cdot C_x \cdot q \cdot F \cdot sin^2\varphi_t, (N) \qquad (7.1.)$$

Kus, α – visangu tuulerõhu ebaühtlust arvestav tegur;

K_l – visangu pikkuse mõju tuule rõhule arvestav tegur;

C_x – külgtakistuse tegur;

q – normatiivse tuule rõhk vaadeldavas režiimis;

F – juhtme või trossi piki lõike pindala visangus (m^2);

φ_t – nurk õhuliini telje ja tuule suuna vahel.

Visangu tuulerõhu ebaühtlust arvestav tegur α, visangu pikkuse mõju tuule rõhule arvestavat tegurit K_l ja külgtakistuse tegurit C_x tuleb võtta vastavalt visangule ja vastavalt EEE nõuetele sõltuvalt õhuliini visangute pikkusest ja juhtmete ristlõikest sõltuvalt.

Juhtmete ja trosside tuulekoormuse arvutamisel tuleb tuule suunaks õhuliini suhtes võtta 90° [2].

Kuna projekteeritud õhuliini alumiste juhtmete raskuskese asub alla 15 meetri kõrgusel, siis rakendub alumiste juhtmete arvutusele tuule rõhu väärtus $q = 0{,}40\ kPa$. Ülemistele juhtmetele ja piksekaitsetrossile rakendub tuule rõhu parandustegur 1,25. Ehk ülemisele juhtmele ja piksekaitsetrossile kehtib tuule rõhu väärtus $q = 0{,}50\ kPa$.

Tuule ja jäite koostoimel tuleb juhtme või trossi ristlõike pindalale F lisada ka jäite paksus. Arvestades seejuures, jäite silindrilist kuju, jäite tihedust 0,9 g/cm³ kohta ja jäite paksust 5 mm I (esimeses) jäiterajoonis.

Liini teljega risti olev tuulerõhk õhuliini juhtmetele mõjutab juhtmete kõrvalekallet kandemastis, juhul kui juhtme kandekinnitused lubavad juhtme liikuvust liini teljega risti suunas. Juhtme kõrvalekallet saab arvutada järgneva valemiga [2]:

$$tg\gamma = \arctan[kP/(G_{n1} + 0{,}5 \cdot G_i)] \qquad (7.2.)$$

kus, $tg\gamma$ – juhtmetele ja trosside kaldenurk sõltuvalt neile mõjuvast tuulekoormusest;

k – juhtme võnkedünaamikat arvestav tegur;

P – tuulekoormus (normatiivne) (N);

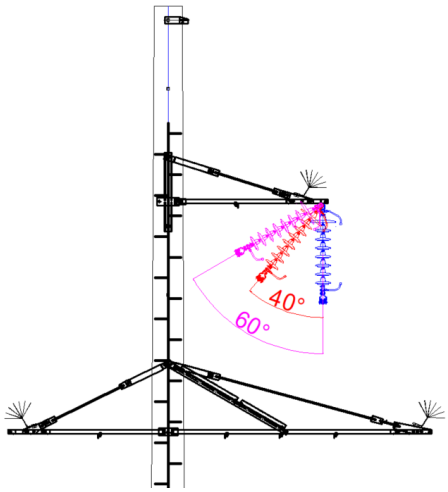
G_{n1} – isolaatorketile tekitatud koormus juhtme omakaalust (N);

G_i – isolaatorketi kaal (N).

Lõputöös kasutatakse tuule rõhu väärtuseid 0,40 (alumisel juhtmel) ja 0,50 kPa (ülemisel ja piksekaitsetrossil), seega on juhtme võnkedünaamikat arvestava teguri *k* väärtused vastavalt 1 ja 0,9.

Isolaatorketile tekitatud koormus juhtme omakaalust G_{n1} võetakse vertikaalne koormus juhtmete omakaalust mastile, mis arvutatakse järgnevas peatükis.

Arvestades sellega, et 110 kV kandekett koosneb tavatingimustes (mitte saastavas keskkonnas ja kui ei ole eritingimusi isolaatorketi lekkeraja pikkusele) kaheksast U70BS [26], [3] klaasisolaatorist ja muust isolaatorketi armatuurist, siis on isolaatorketi kaal G_i võetud lõputöös 50 kg.



Joonis 13. Juhtme kõrvalekalle kandemastis

7.4.4 Mastidele mõjuvate juhtme koormuste arvutuse metoodika

Vastavalt EEE nõuetele tuleb mastide, vundamentide ja nende elementide arvutamisel arvestada püsikoormustega, kestevkoormuste, lühiajaliste ja eriliste koormustega.

Püsikoormusteks peetakse koormuseid õhuliini tarindite, juhtmete, trosside ja seadmete omakaalust. Ja ka juhtmete ja trosside tõmbest aasta keskmisel temperatuuril olukorras, kus ei puhu ei tuult ja õhuliini juhtmetel puudub jäide [2].

Kestevkoormuste hulka kuuluvad pinnase ebaühtlase deformatsiooni mõjust tingitud koormused ning betooni vajumisest ja roomavusest tulenevad koormused [2].

Lühiajalised koormused on mastidele, juhtmetele ja trossidele tuulerõhust ning jäitest põhjustatud lisatõmbest aasta keskmisel temperatuuril ning koormused juhtmete ja trosside paigaldamisel [2].

Erilised koormused on erinevad kriitilised olukorrad, mis võivad liinile mõjuda. Näiteks juhtmete katkemine või maa värinatest tekkivad koormused. Millest viimast Eestis õhuliinide projekteerimisel arvestama ei pea [2].

Mastidele mõjuvatest koormustest on analüüsitud lõputöös ainult juhtmete koormused mastidele ning tõmbejõud nii püsikoormuste kui ka lühiajaliste koormuste jaotuses.

Mastidele kanduv juhtmete ja trosside normatiivne tuulekoormus on leitud eelnevas peatükis juhtmetele mõjuva tuulekoormusena. Sama valem kehtib ka mastidele juhtmete poolt tekitatava tuulekoormusena. Juhtme või trossi piki lõikepind leitakse tuulevisangule vastaval pikkusel.

7.4.5 Mastidele juhtmetest põhjustatud normatiivsed koormused

Juhtmete ja trosside omakaalust põhjustatud püstkoormus avaldub valemiga [2]:

$$G_{n1} = 10 \cdot m_{n1} \cdot L_k \tag{7.3.}$$

kus, G_{n1} – püstkoormus (N);

m_{n1} – juhtme või trossi pikkusühiku mass (kg/m);

L_k – kaaluvisang (m);

10 – raskuskiirenduse ümardatud väärtus m/s².

Juhtmete ja trosside jäitest tingitud püstkoormus avaldub valemiga [2]:

$$G_{n2} = 10 \cdot m_{n2} \cdot L_k \tag{7.4.}$$

kus, G_{n2} – on jäitest tingitud püstkoormus (N);

m_{n2} – juhtme/trossil oleva jäite normatiivne mass (kg/m).

Mastitarinditel jäitest põhjustatud normatiivne püstkoormus avaldub valemiga [2]:

$$P_n = 6 \cdot b \cdot \delta \tag{7.5.}$$

kus, P_n – jäitest põhjustatud koormus (N/m²);

b – jäitekihi paksus (mm);

δ – jäite erimahtuvus (g/cm³).

EEE juhiste järgi juhul kui juhtmete taandatud raskuskese paikneb kuni 25 meetri kõrgusel, ei võeta mastitarinditele tekkivat jäidet arvesse.

7.4.6 Õhuliinile mõjuvad arvutuslikud koormused

Arvutuslike koormuste leidmiseks tuleb korrutada eelnevates peatükkides leitud normatiivsed koormused ülekoormusteguriga *n*. Arvutuslikud koormused on aluseks mastide konstruktsiooni elementide projekteerimisele. Ülekoormustegurite väärtused on toodud järgnevas tabelis.

Tabel 7. Ülekoormustegurid arvutuslike koormuste arvutamiseks [2]

Jrk nr	Koormuse liik	Ülekoormustegur *n*
1	Koormus õhuliini tarindite, juhtmete, trosside ja seadmete omakaalust	1,1
2	Koormus juhtme ja trosside jäitest	2
3	Koormus tuule rõhust mastitarindeile, kui on jäide juhtmetel ja trossidel	1
4	Koormus tuule rõhust mastitarindeile, kui jäidet juhtmetel ja trossidel ei ole	1,2
5	Koormus juhtmetele kui neil on jäide (tuul puhub)	1,4
6	Koormus juhtmetele kui neil ei ole jäidet (tuul puhub)	1,2

7.4.7 Liini armatuurile põhjustatud koormused

Liini armatuuri tugevuse määramisel tuleb arvutada juhtmetele mõjuv kas püstine või horisontaalne tõmbejõud (olenevalt isolaatorketi olemusest) ning see tuleb läbi korrutada armatuuri tugevusteguriga. Tugevustegur kirjeldab armatuurile ja õhuliini juhtmele mõjuva koormuse suhet. Normaalrežiimis peab olema suhe vähemalt 2,5 [2].

8 KAASAEGSE 110 KV ÕHULIINI JUHTMETE PROJEKTEERIMINE

8.1 Projekteerimise üld põhimõte

EVS-EN 50341-1 standardile vastavalt tuleb kontrollida liini komponendi purunemist tingimusel, et arvutuslik koormus liini mis tahes elemendile peab olema väiksem kui elemendi arvutuslik kandevõime.

EVS-EN 50341-1 standard jagab koormused kaheks grupiks, milleks on normväärtused ja arvutuslikud väärtused. Normväärtuste arvutamisel tuleb kasutada standardites toodud arvutusmetoodikaid. Arvutuslikud koormused saadakse normväärtuste alusel kasutades osavarutegureid, mis on seotud otseselt õhuliini töökindlusnivooga, mille määravad Elering AS tehnilised nõuded.

Vajadusel tuleb teostada ka elemendi vastupidavuskontroll ka katsetega. See kehtib nii elektriliste kui ka mehaaniliste parameetrite kohta.

8.2 Kaasaegse õhuliini projekteerimise tehnilised lähteandmed Eestis

EVS-EN 50341 standardi järgi arvutuste tegemise käigus tuleb kinni pidada kõikidest kehtivatest siseriiklikest nõuetest sealhulgas õhuliini omaniku erinõuetest. Lõputöös on valitud kasutamiseks Eesti põhivõrgu valdaja Elering AS erinõudeid õhuliinide projekteerimisele. Vastavalt Eleringi 700 seeria dokumendile „700 Tehnilised juhised“ [9] on õhuliini projekteerimisel, ehitamisel ja hooldusel kohustuslik kinni pidada dokumendiseeria (700) projekteerimisnõuetest, materjali- ja kvaliteedistandarditele ning töömeetoditele.

Järgnevalt on järjestatud Eesti Vabariigis (Elering AS kuuluvate) 110 kV õhuliinide projekteerimisel kehtivad nõuded nende tähtsuse järjekorras:

1) Õhuliini omaniku tehnilised nõuded;
2) Siseriiklikud erinõuded (EVS-EN 50341-2-20);
3) Euroopa ühised eeskirjad (EVS-EN 50341-1);
4) Seadmete tootjate poolsed suunised.

Järgnevasse tabelisse on koondatud projekteerimise andmed lähtudes eelpool toodud pingereast.

Tabel 8. Projekteerimise lähteandmed tänapäeva õhuliinile

Lähteandmed	**Väärtus**	**Viide standardile, mille tingimusega arvestatud**
Töökindlus nivoo	2	Elering 701
Maastikutüüp	II	EVS-EN 50341-1
Omakaalu osavarutegur	1,00	EVS-EN 50341-2-20
Piirtuulekoormuse osavarutegur	1,25	EVS-EN 50341-2-20
Piirjäitekoormuse osavarutegur	1,25	EVS-EN 50341-2-20
Tuulekoormuse kombinatsioonitegur	0,40	EVS-EN 50341-2-20
Jäitekoormuse kombinatsioonitegur	0,35 (0,7 kordse piirtuulekoormusega)	EVS-EN 50341-2-20
Tuule baaskiirus	21,0 m/s	EVS-EN 50341-2-20
Konstantne õhutihedus	1,25 kg/m³	EVS-EN 50341-2-20
Jäite paksus	10 mm	EVS-EN 50341-2-20
Jäite tihedus (klaasjas jää)	0,9 g/cm³	EVS-EN 50341-2-20
Aasta keskmine temperatuur	+5 ºC	EVS-EN 50341-1
Maksimaalne õhutemperatuur	+35 ºC	EVS-EN 50341-1
Maksimaalne juhtme temperatuur	+80 ºC	Elering 701
Minimaalne temperatuur	-40 ºC	EVS-EN 50341-1
Tuuletakistustegur	1,0	EVS-EN 50341-2-20
Tuuletakistustegur klaasja jäitega juhtmele	1,0	EVS-EN 50341-2-20
Tuule suunategur	1,0	EVS-EN 50341-2-20

Kuna EVS-EN 50341 standardis kirjeldatud arvutuslikud kliimatingimused ja koormuste arvutused on põimunud ühiste peatükkide alla, siis on lõputöös jäädud standardisarnasele lähenemisele arvutuste tegemisel. Seega järgnevates peatükkides on kirjeldatud nii kliimatingimuste määramine kui ka koormuste arvutamise viis järjest alustades algandmetest.

8.3 EVS-EN 50341 standardi üldine kirjeldus

EVS-EN 50341 standardiseerias on kaks osa, mida Eestis kasutatakse. EVS-EN 50341-1 on standardi osa, kus on toodud üldnõuded ning täpne arvutamis juhis õhuliinidele mõjuvatest koormustest. EVS-EN 50341-2-20 on standardi siseriiklike erinõuete osa, mis kehtib Eestis asuvatele objektidele. Siseriiklikke erinõudeid tuleb jälgida kliima tingimuste ning muude asukohapõhiste kitsenduste määramisel Eestis.

EVS-EN 50341 standardi peatüki nr 4 järgi tuleb õhuliini projekti mahus arvestada järgnevate õhuliinile mõjuvate koormustega ja koormustele mõjuvate olukordadega [4]:

1. Püsikoormused – koormused mastide, isolaatorkomplektide ja teiste paigaldatud seadmete omakaalust. Kaasaarvatud juhtmete kaal mastiga külgnevates visangutes;
2. Tuulekoormused – tuulest põhjustatud koormused, mis arvestavad õhuliini geograafilist asukohta, tuule baaskiirust, tuule keskmist kiirust, keskmist- ja suurimat tuulesurvet;
3. Jäitest põhjustatud koormused – määratakse vastavalt õhuliini geograafilisele asukohale;
4. Tuule ja jäite kombineeritud koormused;
5. Temperatuuri mõju koormusetele;
6. Avariikoormused – Arvutustesse arvestatakse erinevad juhtmete või trosside katkemise kombinatsioonid (nt üks juhe katkenud);
7. Ohutuskoormused.

Lõputöös on neist käsitletud koormused, kuni viienda punktini, kuna avariikoormused ja ohutuskoormused on arvutused mastide elementidele endile ja lõputöös kirjeldatakse ainult juhtmetes tekkivaid ja juhtmetest põhjustatud mehaanilisi koormusi.

8.4 Töökindluse nivoo määramine

Töökindluse nivoo tuleb määrata vastavalt õhuliini omaniku nõuetele. Kuna lõputöö kirjeldab Elering AS võrgus ehitatava näidis 110 kV õhuliini ehitust, siis tuleb arvestada Elering AS 700 dokumendiseeria töökindluse nivoo nõuetega.

Tabel 9. Töökindluse nivood [18]

Töökindluse nivoo	Ilmastikutingimuste kordusperiood T, aastad	Liini nimipinge
1	50	≤ 110 kV haruliin (tupikalajaama)
2	150	≤ 110 kV tavaliin
3	500	> 110 kV

Lõputöös on tegu kahe alajaama vahelise rekonstrueeritava õhuliini lõiguga, seega on töökindluse nivoo 2.

8.5 Tuulesurve juhtme baaskõrgusel

Juhtmetele mõjuvate tuulekoormuste leidmiseks on vaja arvutada tuulesurve ning leida juhtmete baaskõrgused.

8.5.1 Tuule baaskiiruse leidmine

Tuule baaskiiruse ja suures hulgas muude arvutuste tegemiseks on vaja teada juhtmete baaskõrgust h maapinnast. Vastavalt Eesti siseriiklikele erinõuetele tuleb juhtmete baaskõrgus maapinnas arvutada järgmise valemiga [3], [4]:

$$h = \frac{\sum_i n_i \cdot d_i \cdot h_i}{\sum_i n_i \cdot d_i} \tag{8.1.}$$

kus, h_i – juhtme kinnituspunkti baaskõrgus maapinnast;

d_i – juhtmete läbimõõt;

n_i – osajuhtmete arv samal kõrgusel.

Liinil pole lõhestatud juhtmeid faasi kohta, seega on n_i väärtus 1.

Tuule keskmine kiirus baaskõrgusel maapinnast väljendub järgneva seosega [4]:

$$V_h(h) = V_{b,0} \cdot C_{dir} \cdot c_0 \cdot k_r \cdot \ln\left(\frac{h}{z_0}\right), \text{ m/s} \tag{8.2.}$$

kus, $V_h(h)$ – tuule keskmine kiirus baaskõrgusel maapinnast (m/s);

$V_{b,0}$ – tuule baaskiirus (m/s);

C_{dir} – tuule suunategur;

c_0 – orograafiategur;

k_r – maastikutüübitegur;

h – baaskõrgus maapinnast;

z_0 – maapinna ebatasasuse tegur.

Tuule suunateguri c_{dir} väärtus tuleb arvutuste sooritamiseks võtta Eesti siseriiklike erinõuete standardist ning selleks on 1,0 [4].

Orograafiategur c_0 sõltub pinnareljeefist. Lõputöös on lihtsustamise mõttes maapind tasane, seega orograafiategur on 1,0 [4].

Maapinna ebatasasus tuleb määrata EVS-EN 50341-1 standardis kirjeldatud tabelile. Lõputöös kasutatakse z_0 väärtust 0,05 ning maastikutüüp on 2.

Tabel 10. Maastikutüübid ja maapinna ebatasasused [4]

Maastikutüüp	Selgitus	z_0
0	Meri või avamerele avatud rannikuala	0,003
1	Järved või olulise taimestikuta ja takistusteta tasane maa	0,01
2	Avatud maastik madala taimestikuga, nagu hein, ja üksikute takistustega (puud, hooned), mille omavaheline kaugus on vähemalt nende 20 kordne kõrgus	0,05
3	Alad ühtlase taimkattega või hoonestusega või üksikute takistustega, mille omavaheline kaugus ei ületa nende 20kordset kõrgust (nagu külad, äärelinnad, põlismets)	0,3
4	Alad hoonestustihedusega vähemalt 15 % ja hoonete keskmise kõrgusega üle 15 m	1

Maastikutüübi teguri k_r arvutamiseks tuleb kasutada maapinna ebatasasuse tegurit. Tegur on leitav valemiga [4]:

$$k_r = 0{,}189 \cdot \left(\frac{z_0}{0{,}05}\right)^{0{,}07} = 0{,}189 \quad (8.3.)$$

Tuule baaskiirus on kogu Eestis 21 m/s [3].

8.5.2 Keskmise ja suurima tuulesurve leidmine

Tuulesurve juhtmetele põhjustab ristisuunalist koormust õhuliini juhtmetele ning suurendab juhtmetes tekkivat tõmbejõudu.

Keskmine tuulesurve baaskõrgusel maapinnast avaldub valemiga [4]:

$$q_h(h) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_h^2(h) \quad (8.4.)$$

kus, $q_h(h)$ – on keskmine tuulesurve baaskõrgusel maapinnast (h), (N/m²);

ρ – õhu tihedus, (kg/m³).

Suurim tuulesurve baaskõrgusel maapinnast on võimalik arvutada järgmiselt [4]:

$$q_p(h) = [1 + 7 \cdot I_v(h)] \cdot q_h(h) \quad (8.5.)$$

kus, $q_p(h)$ – suurim tuulesurve baaskõrgusel maapinnast;

$I_v(h)$ – turbulentsi intensiivsus baaskõrgusel maapinnast.

Turbulentsi intensiivsus baaskõrgusel maapinnast $I_v\ (h)$ on leitav järgneva valemiga [4]:

$$I_v(h) = \frac{1}{\left[c_0 \cdot ln\left(\frac{h}{z_0}\right)\right]} \quad (8.6.)$$

8.6 Juhtmetele mõjuvad tuulekoormused

Lõputöös kirjeldatud õhuliinil on tegemist mastidega, millel ei toimu õhuliini suunamuutust, seega võib arvestada risti traaversiga (liini telje suunal) mastile avalduvat tuulejõudu $Q_{Wc_U} = = 0, (N)$ [4].

Traaversi suunas mõjuv tuulejõud õhuliini suunamuutuse nurga puudumisel avaldub valemiga [4]:

$$Q_{Wc_V} = q_p(h) \cdot G_c \cdot C_c \cdot d \cdot cos^2\varphi \cdot (L_1 + L_2)/2 \quad (8.7.)$$

kus, Q_{Wc_V} – traaversi suunas (risti liini teljega) mõjuv tuulejõud;

G_c – juhtme mehaanilise resonantsi tegur (visangutegur);

C_c – juhtme tuuletakistuse tegur (või jõu kordaja);

d – juhtme läbimõõt;

L_1, L_2 – mastiga külgneva visangu pikkused;

φ – traaversi pikitelje ja tuule suuna vaheline nurk.

Mehaanilise resonantsi tegur on leitav valemiga [4]:

$$G_c = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(h) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(h)} \tag{8.8.}$$

kus, k_p – maksimumtegur, mis on määratletud kui reaktsiooni muutliku osa suurima väärtuse suhe tema standardhälbesse;

B^2 – tausta tegur, mis arvestab surve täieliku korrelatsiooni puudumist visangus;

R^2 – resosantsreaktsiooni tegur, mis arvestab turbulentsi resonantsi vibratsiooniga.

Maksimumtegur k_p väärtuseks on soovituslikult 3 [4].

Tausta tegur B^2 arvutatakse [4], [27]:

$$B^2 = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{L_m}{L(h)}} \tag{8.9.}$$

kus, L_m – kahe mastiga piirneva visangu keskmine pikkus;

$L(h)$ – turbulents juhtmete baaskõrgusel h, mis avaldub valemiga [4], [27]:

$$L(h) = 300 \cdot \left(\frac{h}{200}\right)^{0{,}67 + 0{,}05 \cdot ln(z_0)} \tag{8.10.}$$

Kuna resonantsreakstiooni tegurit R^2 Eesti siseriiklike erinõuetega eraldi määratud ei ole, siis võib selle väärtuseks lugeda 0, kuna liini juhtmete puhul võib resonantsi tuule suunas ignoreerida.

8.7 Juhtmete kõrvalekalle

Analoogselt Nõukogude Liidu aegse õhuliini arvutamisele tuleb arvutada ka tänapäevase standardi järgi juhtmete kõrvalekalle, et kontrollida pingestatud juhtmete ja masti osade vahelisi õhkvahemikke. Juhtmete kõrvalekalle standardi EVS-EN 50341-1 järgi arvutatakse järgneva seosega [4]:

$$\varphi = arctan\left(\frac{Q_{wc}}{G_k}\right) \tag{8.11.}$$

kus, φ – kõrvalekalde nurk;

Q_{wc} – horisontaalne tuulekoormus juhtmele;

G_k – juhtmete omakaalust vertikaalne koormus.

8.8 Jäitekoormused

Juhtmetele mõjuvad lisaks tuulekoormustele ka jäitekoormused. Jäitekoormused põhjustavad õhuliini juhtmeile vertikaalseid lisakoormusi, mis samuti mõjutavad tõmbejõudu juhtme sees. Jäitekoormuste mõju õhuliini juhtmetele EVS-EN 50341 standardi järgi on kirjeldatud siin peatükis.

Mastile avalduv vertikaalkoormus iga osajuhtme jäitest avaldub valemiga [4]:

$$Q_l = J \cdot (L_{w1} + L_{w2}) \tag{8.12.}$$

kus, J – jäitekoormus juhtme pikkusühiku kohta, (N/m);

L_{w1}, L_{w2} - mastiga külgnevate visangute panus kaaluvisangusse sõltuvalt jäitest.

Jäitekoormus pikkusühiku kohta on leitav valemiga [3]:

$$J = 9{,}82 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_j \cdot \pi \cdot b \cdot \left(d \cdot b_j\right) \tag{8.13.}$$

kus, b_j – jäite paksus (mm);

d – juhtme või trossi läbimõõt (mm);

ρ_j – jäite tihedus g/cm³.

Avalduv tuule jõud jäitega juhtmele avaldub analoogselt jäiteta juhtme arvutusele. Kuna Eesti siseriiklikud erinõuded ütlevad, et jäitega kaetud juhtme tuuletakistustegur on samane tuuletakistusteguriga ilma jäiteta juhtmeile, siis ainukeseks muutujaks valemites on juhtme ekvivalentne läbimõõt, mis arvutatakse jäitega juhtme puhul järgmiselt [4]:

$$D = \sqrt{d^2 + \frac{4 \cdot J}{9{,}81 \cdot \pi \cdot \rho_j}} \qquad (8.14.)$$

kus, D – juhtme ekvivalentne läbimõõt kui juhe on kaetud jäitega (mm).

8.9 Tuule ja jäite koostoime

Tuule ja jäite koostoime arvutamise eelduseks on määratud töökindlusnivoo, mis määrab ilmastikutingimuste kordusperioodi ning annab ette osavarutegurid, vähendustegurid ning kombinatsioonitegurid. Arvutatavale õhuliinile aktuaalsed tegurid on kirjeldatud järgnevas tabelis.

Tabel 11. Koormusjuhtumite, temperatuuride ja osavarutegurite γ, kombinatsioonitegurite Ψ ja vähendustegurid [4]

Nr	**Koormusjuhtum**	**Temperatuur**	**Vähendustegurid**		**Töökindluse nivoo**	
		°C	Tuulekoormus	Jäitekoormus	2	
					γ_w	Ψ_J
1a	Piirtuulekoormus	-5			1,2	
1b	Vähim temperatuur	-40				
2a	Ühtlane piirjäitekoormus	-5				1,25
2b	Ühtlane piirjäitekoormus,	-5		α = 0,5		1,25
2c	Ebaühtlane piirjäitekoormus,	-5		α_1 = 0,3 α_2 = 0,7		1,25
2d	Ebaühtlane jäitekoormus,	-5		α_3 = 0,3 α_4 = 0,7		1,25
3a	Piirjäitekoormus + nimituulekoormus	-5			1,0	1,25
3d	Suur tuulekoormus + nimijäitekoormus	-5	0,7		1,2	1,0

Eelnevas tabelis kirjeldatud osavaruteguritega piirkoormuste puhul tuleb arvestada enne õhuliini juhtmete pingete analüüsimist [4].

Selleks, et saada 150 aastase kordusperioodiga tuulepiirkoormuse Q_{W150} tuleb kõigepealt leida 50 aastase kordusperioodiga tuulepiirkoormuse Q_{W50} ning teisendada see Q_{W150}-ks koormusjuhtumite tabelis toodud tegurite abil. Q_{W50} on leitav valemiga [4]:

$$Q_{W50} = Q_{Wx} \cdot (q_h/q_p) \tag{8.15.}$$

kus, Q_{W50} – 50 aastase kordusperioodiga piirtuulekoormus;

Q_{Wx} – keskmine tuulejõud liini elemendile.

Valemis toodud tegurid on arvutatud eespool olevates peatükkides. Analoogiliselt leitakse ka 50 aastase kordusperioodiga piirjäitekoormus J_{50}.

Tuule ja jäite piirkoormuste koosmõju leidmisel tuleb arvestada sellega, et ühe olemasolul ei esine teist. Seega tuleb koosmõju arvutada vähima tõenäosusega tuulekiiruse ja piirjäitekoormuse ning suurima tõenäosusega tuulekiiruse ja nimijäitekoormusega [4].

EVS-EN 50341-1 standard kirjeldab piirjäitekoormuse ja suure tõenäosusega tuulekiiruse koostoimet ning nimijäitekoormuse ja väikese tõenäosusega tuulekiiruse koostoimet. Selleks, et leida esimene on vaja tuletada piirjäitekoormus jäitekoormuse osavaruteguri abil. Piirjäitekoormuse valem on [4]:

$$J_{150} = \gamma_I \cdot J_{50} \tag{8.16.}$$

kus, J_{150} – 150 aastase kordusperioodiga piirjäitekoormus (N);

γ_J – jäitekoormuse osavarutegur.

Jäitekoormuse osavaruteguri väärtuseks on töökindlusnivooga 2 võetud 1,25.

Selleks, et leida suure tõenäosusega tuulekiirus tuleb kasutada järgnevat valemit [4]:

$$V_{IH} = V_{50} \cdot \sqrt{\Psi_w} \tag{8.17.}$$

kus, V_{IH} – suure tõenäosusega tuulekiirus (m/s);

Ψ_w – tuulekoormuste kombinatsioonitegur.

Tuulekoormuste kombinatsioonitegur vastavalt 2-sele töökindlusnivoole on 0,4.

Järgmisena leitakse nimijäitekoormuse ja väikese tõenäosusega tuulekiiruse koostoime. Selleks arvutatakse järgneva valemiga nimijäitekoormus [4]:

$$J_3 = \Psi_I \cdot J_{50} \quad (8.18.)$$

kus, J_3 – nimijäitekoormus (suure tõenäosusega koormus) teoreetilise kordusperioodiga 3 aastat (N);

Ψ_J – jäitekoormuste kombinatsioonitegur;

Jäitekoormuste kombinatsiooniteguri Ψ_J väärtuseks teisele töökindluse nivoole vastavalt on 0,7.

Seonduvalt nimijäitekoormusega väikese tõenäosusega tuulekiirus on leitud piirkiiruse ning vähendusteguri B_I abil. Tuleb teostada järgnev arvutus [4]:

$$V_{IL} = V_{150} \cdot B_I \quad (8.19.)$$

kus, V_{IL} – väikese tõenäosusega tuulekiirus jäitega koostoimel (m/s);

B_I – vähendustegur.

Vähendustegur B_I võetakse töökindlusnivoole vastavalt 0,7.

8.10 Isolaatorkomplektidele toimivad koormused

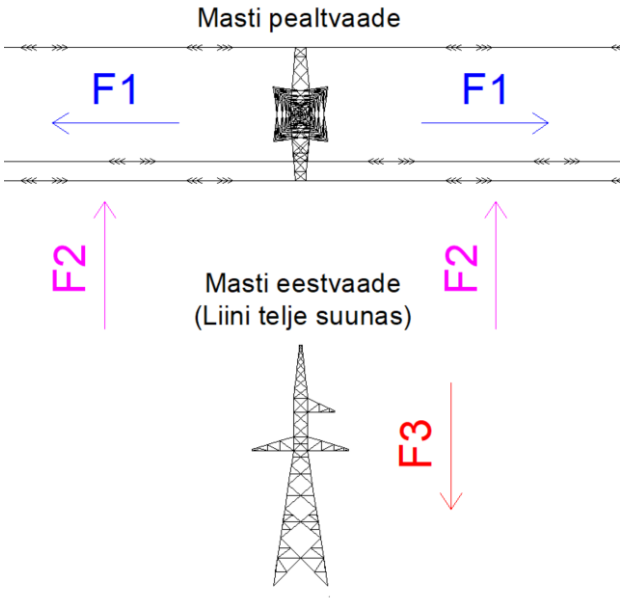
EVS-EN 50341-1 standard kirjeldab isolaatorkomplektidele toimivate koormuste arvutusi, kuid ütleb ka seda, et tuleb järgida siseriiklike erinõuete suuniseid, mis täpsustavad EVS-EN 50341-1 standardis öeldut ning annab ette osavarutegurid isolaatorkomplektide elementide mehaanilisele tugevusele. Osavarutegur erinevat tüüpi isolaatorkettidele on läbivalt 2,0 [4].

Elering AS dokumendiseeria 700 järgi tuleb 110 kV isolaatorkomplektidel arvestada 70 kN mehaanilise kande-tugevusega kandeisolaatorkettides ning 120 kN tõmbe-tugevusega tõmbekettides [18]. Arvestades viimast fakti on leidnud autor, et lõputöös ei ole otstarbekas kirjeldada isolaatorkomplektidele mõjuvate koormuste arvutusi, kui Eestis asuvate 110 kV õhuliinide omanikud on ise määranud minimaalse isolaatorkomplekti tugevuse, millega tuleb arvestada nii mastide kui ka õhuliini juhtmete projekteerimisel.

9 TULEMUSTE ANALÜÜS

9.1 Tehtud arvutuste selgitus

Arvutused on tehtud osaliselt käsitsi ja osaliselt ka õhuliini projekteerimis eriprogrammi abil. Eriprogramm arvutab õhuliinide parameetrid sarnaselt eeltoodud kirjeldusele. Järgneval joonisel on kirjeldatud lihtsustatud skeem arvutatavatest koormustest õhuliinile. F1 on märgitud õhuliini juhtmetest mastile mõjuva tõmbejõu vektor. F2 on juhtmete tuule ja jäite koormusest põhjustatud liini teljega risti olev koormus mastile ning F3 tähistab juhtmetest vertikaal suunal tekkivaid koormusi.



Joonis 14. Lihtsustatud skeem – arvutatavate koormuste vektorid

9.2 Kaasaegsed ja NL aegsed kliimatingimused projekteerimiseks

Peatükis kirjeldatakse standardite lõikes erinevusi samades tingimustes ehitatud õhuliini kliimatingimusi.

Järgnev koondtabel kirjeldab erinevusi kaasaegsete ning NL aegsete kliimatingimuste vahel samas piirkonnas asuva õhuliini arvutamiseks.

Tabel 12. Kliimatingimused EVS-EN 50341 standardi ja Elering AS nõuete ning NL aegse standardi järgi projekteeritud õhuliinil

Parameeter	**Väärtus - kaasaegsed nõuded**	**Väärtus - Nõukogude Liidu aegsed nõuded**	**Ühik**
Aasta keskmine temperatuur	+5	+5	°C
Minimaalne õhu temperatuur	-40	-45	°C
Maksimaalne juhtme temperatuur	+80	+35	°C
Jäite paksus	10	5	mm
Jäite tihedus	0,9	0,9	g/cm³

Tabelist nähtub, et õhuliini projekteerimisel kasutuses olev aasta keskmine temperatuur on mõlemate nõuetega sätestatud +5 °C. Kui see fakt panna paari sellega, et ka NL ajal pingutati 110 kV õhuliini juhtmeid üldjuhul 40-65 N/mm² pingsusega (erijuhtudel ka 80 N/mm²), siis võib selle koha pealt öelda, et aja jooksul õhuliini ehitamise ja projekteerimise üld põhimõtted muutunud ei ole.

Tuule kiirust ei ole tabelis mainitud põhjusega, et tuule kiiruse määramise metoodika on standardite lõikes erinev. EVS-EN standard nõuab tuulekiiruse arvutamise juhtmete kaalutud keskmise kõrguse alusel. EEE järgi tuleb võtta igale juhtme kõrgusele vastav tuulekiirus.

Suuremad erinevused kliima tingimustes, mis tõsiselt mõjutavad õhuliini projekteerimist, ehitamist ja selle maksumust on juhtme maksimaalne temperatuur ning jäite paksus. Juhtme temperatuuri suur erinevus tagab selle, et kaasaegsed projekteeritud mastid tuleb projekteerida kõrgemad olenevalt õhuliiniga ristuva objekti iseloomust ja sellega ristumisel nõutavast õhkvahemikust. Jäite paksus lisab suurt arvutusliku massi erinevust jäitega kaetud õhuliini juhtmele, mis omakorda mõjutab mastile mõjuvaid nii vertikaal kui horisontaal suunalisi koormusi, mis on juhtmetest põhjustatud. See mõjutab masti tüve ja traaversite mehaanilist tugevust ning samuti ka isolaatorkettidele mõjuvat jõudu.

9.3 110 kV õhuliini arvutuste tulemused

Peatükis on rakendatud eelnevalt tutvustatud standardite arvutusmetoodika lõputöös projekteeritud õhuliinile.

9.3.1 Juhtmete mehaanilised koormused ja ripped

Esimesena on arvutatud õhuliini juhtmetes tekkivad pingsus ning tõmbejõud, millele tuginedes kontrollitakse koormusjuhtumi sobivust juhtmete maksimaalsele tõmbele. Kontrollitakse ka masti konstruktsiooni ja ka tõmbe-isolaatorkettide mehaanilist tugevust. Samas tabelis on toodud välja ka maksimaalne ripe visangus, mis tekib kindlat koormusjuhtumit rakendades projekteeritud õhuliinile. Rippe arvutamisel on mõlema tabeli puhul arvestatud ka juhtme jääkdeformatsiooni. See on kirjeldatud visangu ripe pärast roomet lahtris.

Vastavalt EEE nõuetele tuleb juhtmes tekkivate mehaaniliste koormuste arvutamisel kasutada järgnevaid koormusjuhtumeid: [2]

- I – Suurim temperatuur (+35 °C), arvestades, et tuul ja jäide puuduvad;
- II – Väikseim temperatuur (-45 °C), arvestades, et tuul ja jäide puuduvad;
- III – Aasta keskmine temperatuur (+5 °C), arvestades, et tuul ja jäide puuduvad;
- IV – Temperatuuril -5 °C, arvestades, et juhtmed on kaetud jäitega. Seejuures jäite paksus on 5 mm (10 aastase perioodi jooksul).

Vastavalt kaasaegsetele nõuetele on arvutud juhtmetele mõjuvad mehaanilised parameetrid arvutada järgmiste koormus režiimidega [3], [4], [18]:

- I – Suurim temperatuur (+80 °C), arvestades, et tuul ja jäide puuduvad;
- II – Väikseim temperatuur (-40 °C), arvestades, et tuul ja jäide puuduvad;
- III – Aasta keskmine temperatuur (+5 °C), arvestades, et tuul ja jäide puuduvad;
- IV – Temperatuuril -5 °C, arvestades, et juhtmed on kaetud jäitega. Seejuures jäite paksus on 10 mm (50 aastase perioodi jooksul);
- V – Suurim temperatuur (+60 °C), arvestades, et tuul ja jäide puuduvad.

Koormusjuhtum V on arvutatud lisaks, kuna see on määratud EVS-EN 50341-2-20 standarditega. Koormusjuhtum I arvutamisel on kasutatud Elering AS dokumendiseeria 700 nõudeid.

Näidiseks võib veel tuua välja Enefit Connect AS (Elektrilevi OÜ) erinõuded 20 kV juhtmete temperatuurile, milleks on samuti 60 °C [28].

Järgenvalt on arvutatud kaks tabelit, millest esimene kirjeldab arvutustulemusi koormusjuhtumitele EEE järgi ning teine kirjeldab juhtmete arvutust EVS-EN 50341 standardi järgi. Tabelites kõik koormusjuhtumid on arvutatud arvestades juhtme esialgse pingsusega 65 N/mm².

Tabel 13. Nõukogude Liidu aegsed koormusjuhtumid I-IV ankruvisangus 1-3 juhtmele ACSR 242/39 HAWK

	Koormusjuhtumid			
	I	**II**	**III**	**IV**
Juhtme pingsus ankruvisangus 1-3 (N/mm²) Ankruvisangu pikkus 300 m	49	101	65	67
Tõmbejõud juhtmes ankruvisangus 1-3 (N) Ankruvisangu pikkus 300 m	13750	28287	18265	20154
Ripe visangus 1-2 (m) Visangu pikkus 200 m	3,52	1,71	2,67	2,35
Ripe visangus pärast roomet 1-2 (m) Visangu pikkus 200 m	4,15	2,01	3,34	3,00
Ripe visangus 2-3 (m) Visangu pikkus 100 m	0,89	0,43	0,67	0,55
Ripe visangus pärast roomet 2-3 (m) Visangu pikkus 100 m	1,05	0,51	0,98	0,81

Tabel 14. Kaasaegsel õhuliinil arvestatavad koormusjuhtumid I-VI ankruvisangus 3-5 juhtmele ACSR 242/39 HAWK

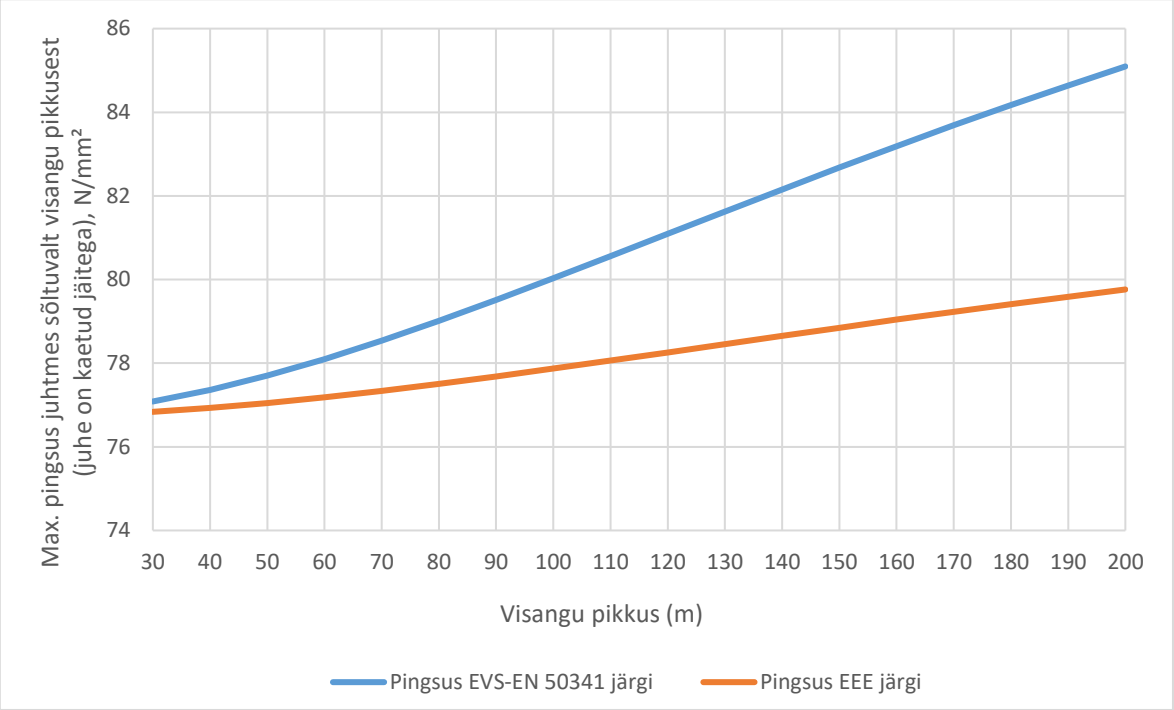
	Koormusjuhtumid				
	I	**II**	**III**	**IV**	**V***
Juhtme pingsus ankruvisangus 3-5 (N/mm²) Ankruvisangu pikkus 300 m	35	96,9	65	61	40
Tõmbejõud juhtmes ankruvisangus 3-5 (N) Ankruvisangu pikkus 300 m	9802	27238	18265	21856	11218
Ripe visangus 3-4 Visangu pikkus 100 m	1,25	0,45	0,67	0,48	1,09
Ripe visangus pärast roomet 3-4 Visangu pikkus 100 m	1,51	0,55	0,98	0,72	1,34
Ripe visangus 4-5 Visangu pikkus 200 m	4,93	1,77	2,67	2,12	4,31
Ripe visangus pärast roomet 4-5 Visangu pikkus 200 m	5,61	2,19	3,34	2,80	5,06
* - Arvutatud lisaks ka EVS-EN 50341-1 standardiga sätestatud maksimaalse temperatuuriga 60 °C					

Eri tabelites võib omavahel võrrelda koormusjuhtumeid I, II, III ja IV. Kaasaegsete tulemuste tabelist võib võrrelda ka V koormusjuhtumit ning NL aegset koormusjuhtumit IV.

Tabelitest 12 ja 13 saab tuletada, et arvutustes nõutud suurimal temperatuuril on palju rangem EVS-EN 50341 standard, mis tähendab, et kui vaadata ainult arvutustes nõutud suurima temperatuuri aspekti, siis peab kaasaegse õhuliini projekteerimisel arvestama ka suuremate ripetega visangutes.

Üldiselt on 110 kV õhuliinide projekteerimisel tänapäeval kõige kriitilisemateks olukordadeks maksimaalne temperatuur juhtme ripete seisukohast ning maksimaalne juhtme pingsus jäitega kaetud juhtmel. Seda peegeldavad ka saadud tabelid.

Järgnev graafik kirjeldab lõputöös projekteeritud jäitega kaetud õhuliini juhtme pingsust sõltuvalt visangu pikkusest kasutades mõlema standardi nõudeid samale juhtmele. Graafikul on andmed toodud juhtme esialgse pingsuse 65 N/mm² juures ja arvestades, et temperatuur on -5 °C.



Joonis 15. ACSR 242/39 HAWK juhtme pingsuse sõltuvus visangu pikkusest

Juhtme pingsust hakkab rohkem mõjutama jäide tingimusel, et õhuliini visangud ACSR 242/39 Hawk juhtme korral on pikemad kui 70 m, mis on 110 kV õhuliini puhul väga tavapärane visangu pikkus kui arvestada, et tasapinnalisel maapinnal ja ilma ristumisteta õhuliini trassis on 110 kV õhuliinide mastide vahelised visangud umbes 150-250 m.

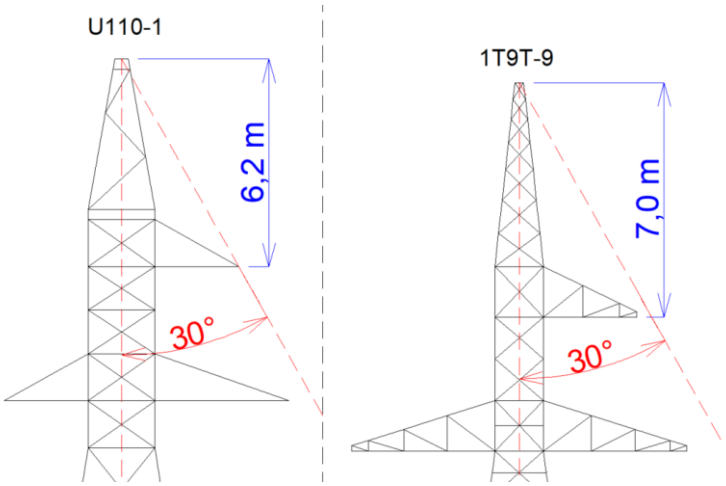
Käesolevas lõputöös projekteeritud mastid on valitud ACSR 242/39 HAWK juhtmetele seega nende mastidega ei teki probleemi juhtmete üle pingutamisega, kui järgida masti konstruktori poolt etteantud maksimaalsete tuule ja kaaluvisangute väärtusi. Juhtmete ehituseaegse mehaanilise pinge väärtuse kontrollimine on oluline, kui kasutatakse masti olukorras milleks see projekteeritud ei ole. Näiteks on vajalik mastile, mis on projekteeritud ühe osajuhtme tarbeks, paigaldada kahe osajuhtmega faasijuhid.

Eelnevalt graafikult (Joonis 15.) saab välja lugeda ka seda, et tänapäeva arvutusmetoodika järgi on arvutuslik juhe suurema pingsusega kui seda on NL aegse standardiga. Kuna kaasaegse

standardi järgi on jäitega kaetud juhtme pingsuse normatiivsed väärtused suuremad kui on NL standardiga sätestatud, siis see mõjutab mastide konstruktsioonide tugevust.

Juhtmete ja piksekaitsetrosside pingutamisel tuleb alati jälgida ka nende omavahelisi õhkvahemikke. Kuna piksekaitsetrossi materjal on teine ja läbimõõt on üldjuhul väiksem kui juhtmel ja piksekaitsetrossi venimine temperatuuri tõusu ja erinevate koormusolukordade tõttu on suurem, siis üldiselt projekteeritakse piksekaitsetross peale juhtmete analüüsimist. Seda põhimõttega, et piksekaitsetrossi maksimaalne ripe visangus on ~0,5 m väiksem kui seda on juhtmetel. Seega sõltub õhuliini piksekaitsetrossi pingsus juhtmete rippest ning piksekaitsetrossi pingsuse arvutuslik väärtus erineb standardite lõikes EVS-EN standardi ning EEE kliimatingimuste ja juhtme maksimaalse temperatuuri tõttu. Eriti on see olukord tähelepanu vajav tingimusel, et ülemised õhuliini juhtmed ei ole jäitega kaetud, kuid piksekaitsetross on.

Piksekaitsetrossi pingsus mõjutab omakorda ka piksekaitsetrossi vertikaalset kaugust juhtmetest. Piksekaitsetrossi vertikaalne kaugus juhtmetest on oluline parameeter ka piksekaitsenurga vaatenurgast. Mida madalamal on piksekaitsetross, seda suurem on tõenäosus, et õhuliini juhtmed visangu keskel satuvad äikeselisel perioodil piksekaitsenurgast välja poole ja suureneb äikese tabamuse tõenäosus faasijuhtidesse. Piksekaitsetrossi arvutuslikust kõrgusest on mõjutatud õhuliini masti traaversite pikkused, mis peaksid tänapäeva nõuete järgi olema lühemad, kuna arvutuslik piksekaitsetross asub visangu keskel madalamal. Või siis peab kaasaegsetel mastidel olema pikem trossipüstak, mis tagab selle, et piksekaitsetross asub kogu visangus kõrgemal ja seega piksekaitsenurga alla jääb suurem ala.

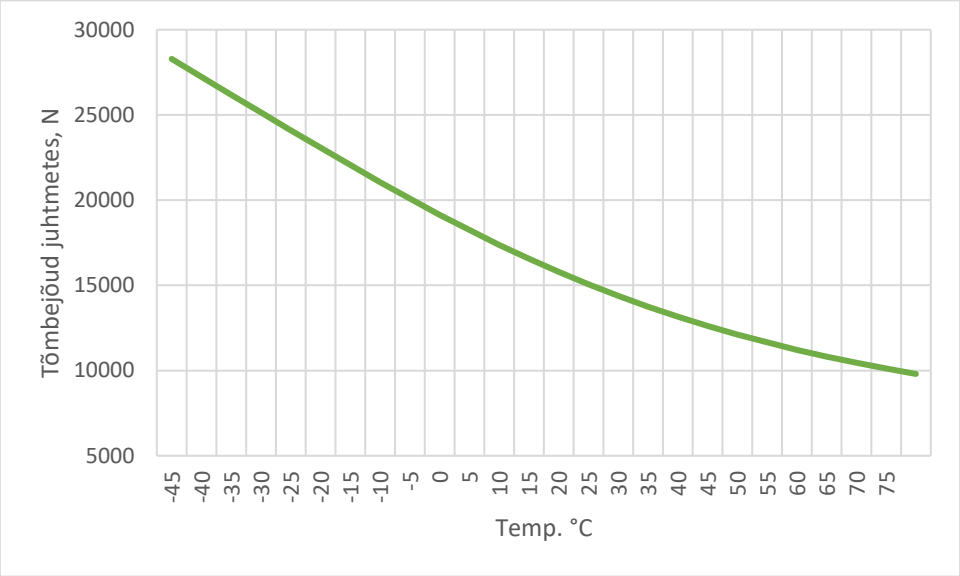


Joonis 16. Piksekaitsenurk ja trossipüstakute pikkus ankrumastidel

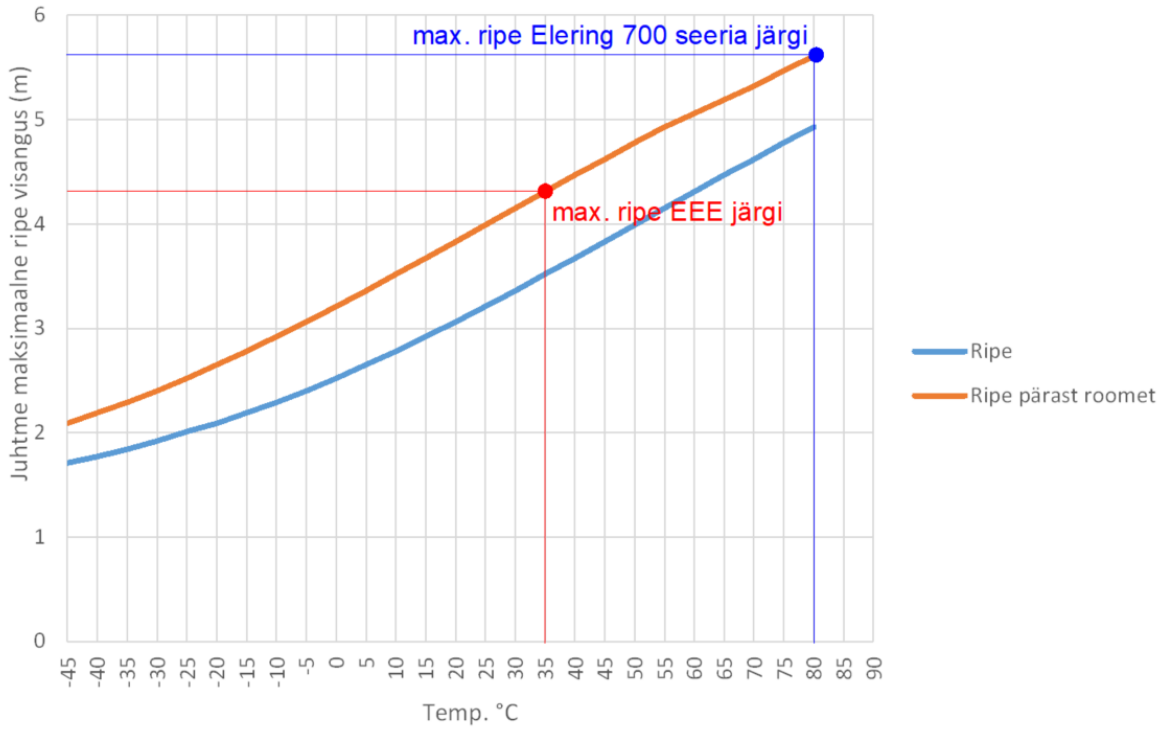
U110-1 mastil võib maksimaalselt normaaltingimustes kasutada terasest TK-50 piksekaitsetrossi, mis on läbimõõduga 9,1 mm. Tänapäeva 1TxT mastide trossipüstakud on projekteeritud perspektiiviga, et need kannatavad vajadusel ka suurema läbimõõduga ACSR faasijuhtide koormuseid [14], [15].

9.3.2 Juhtmete projekteerimine

Lõputöö mahus on koostatud ripete tabelid igale visangule ning pingutustabelid igale ankruvisangule, mille alusel on täidetud eelnevalt tutvustatud koormusjuhtumite tabelid 13 Ja 14. Ripete tabelid on leitavad lisadest. Ripete tabelite tulemuste visualiseerimiseks on koostatud graafikud, mis näitavad tõmbejõudu juhtmes ja rippe sõltuvust temperatuurist. Graafikud on koostatud põhimõtetega, et juhe ACSR 242/39 Hawk asub 300 m pikkuses ankruvisangus, kus on kaks ankrumasti ja üks kandemast. Juhtmetel jäidet ei ole ning on pingutatud aasta keskmise temperatuuri +5 °C juures 18250 N-ga.



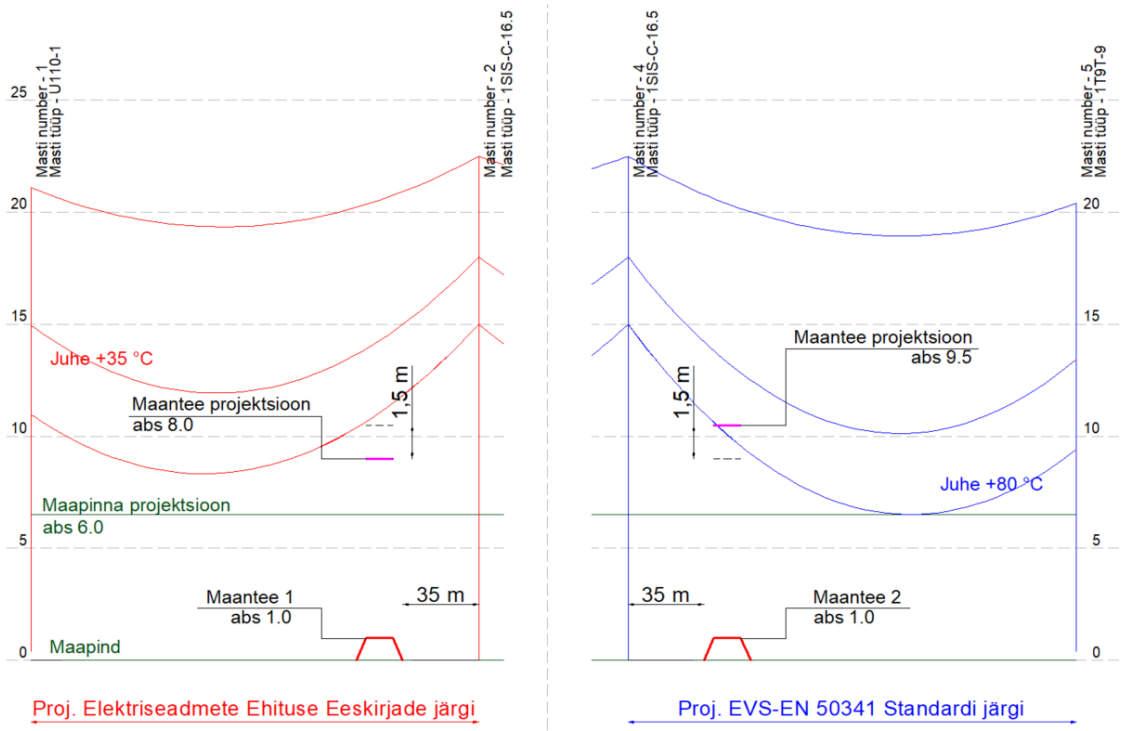
Joonis 17. Juhtmest põhjustatud tõmbejõud mastile sõltuvalt juhtme tempratuurist



Joonis 18. Juhtme maksimaalne ripe visangus sõltuvalt temperatuurist

Ripete tabelite tulemusi analüüsides võib järeldada, et juhtmele mõjuv tõmbejõud tingimusel, et juhtmel puudub jäide, standardite lõikes ei muutu. Kuid muutub maksimaalne ripe visangus. Näidisena toodud 200 m pikkuses visangus erineb ripe rohkem kui 1 m võrra. See on projekteerimise ja projekti eelarve koostamise koha pealt mõjukas erinevus, millest sõltub otseselt kasutatavate mastide pikkus ja selle kaudu ka mastide ehitamise, transportimise kui ka paigaldamise hind.

Ripete erinevuse visualiseerimiseks on koostatud ka projekteeritud õhuliini pikiprofiil, kus näidatud õhuliini juhe EEE-ga nõutud 35 °C juures ning Elering AS nõuetega 80 °C juures. Juhe on pingutatud aasta keskmise temperatuuri juures ja 18250 N-ga. Piksekaitsetross on pingutatud samuti aasta keskmisel temperatuuril, aga 11000 N-ga. Mõlemal profiili osal on arvestatud ka õhuliini juhtme venimist. Kogu õhuliini profiil on leitav lõputöö lisadest.



Joonis 19. Projekteeritud õhuliini profiili väljavõte

Koostatud õhuliini profiililt (Joonis 19.) nähtuvad mitmed asjaolud, mille põhjal saab kinnitust eelnevalt teoorias kirjeldatud osa, kuid ka antud lõputöös veel mainimata olnud tegur, mis mõjutab tänapäeva ja NL aegse õhuliini maksumust. Nimelt nõutavad vertikaalsed kaugused ristuvatest objektidest. Kuna lõputöö ei ole suunatud õhkvahemike erinevuste välja toomisele, siis erinevusi vertikaalsete kauguste lõikes vaadatakse läbi juhtmete projekteerimise tingimuste erinevuse ning neist räägitakse antud lõputöös vähe. Üldpõhimõte õhkvahemikega on see, et NL ajal nõuti õhuliini projekteerimisel väiksemat vertikaalset õhkvahemiku ristuvate objektidega.

Õhuliini profiili lugedes saab kinnitust eelnevalt mainitud juhtme temperatuuri olulisus mastide kõrgusele. Profiilile on kantud üks maanteega ristumine mõlemale liini osale samale kaugusele kande mastist. Maanteega ristumisel on minimaalne vahekaugus maantee ja õhuliini juhtmel EEE järgi 7,0 m ning tänapäeva nõuetega (EVS-EN 50341-2-20 + Elering AS 700 seeria) on 8,5 m, millest 0,5 m on varu Elering AS nõuete järgi. Vaadeldes NL aegset õhuliini, siis sellel on nõuetekohane vahekaugus tagatud, kui maantee asub 35 m kaugusel mastist. Aga kui vaadata õhuliini, mis on projekteeritud tänapäeva nõuete järgi, siis õhkvahemik ei anna enam nõutud tulemust. See tähendab seda, et tuleb paigaldada pikem ankrumast juba ainult juhtmete projekteerimise vaatenurgast.

9.3.3 Mastidele juhtmetest tekitatavad koormused

See peatükk kirjeldab juhtmetest tekitatud koormusi mastile. Kuna piksekaitsetrossi arvutused on analoogsed juhtmete omadega, siis on piksekaitsetrossile mõjuvate koormuste tabelid toodud lisades. Faasijuhtmete koormuste analüüs annab lõputöös soovitud tulemuse kätte.

EEE järgi on nõutud arvutada järgmised mastile juhtmetest põhjustatud koormused:

- I – Juhtmete koormus mastile omakaalust (tuul ja jäide puuduvad)
- II – Tuulekoormus (jäide puudub)
- III – Jäitekoormus (5 mm) (tuul puudub)
- IV – Tuulekoormus + jäitekoormus
- V - Jäitekoormus + 0,25 * normatiivne tuulekoormus

Kaasaegsete nõuete järgi on nõutud arvutada järgmised mastile juhtmetest põhjustatud koormused:

- I – Koormus juhtmete omakaalust (tuul ja jäide puuduvad)
- II – Nimituulekoormus (jäide puudub)
- IIa – Piirtuulekoormus (jäide puudub)
- III – Nimijäitekoormus (10 mm) (tuul puudub)
- IIIa – Piirjäitekoormus (tuul puudub)
- IV – Piirjäitekoormus + nimituulekoormus
- V – Suur tuulekoormus + nimijäitekoormus

EEE järgi tuleb igale juhtmele arvutada eraldi tuulekoormus olenevalt juhtme kinnituse kõrgusest mastil. Lõputöös on teinud autor lihtsustuse, kus on arvutuste tegemisel kasutatud juhtmete kinnituste kõrguste kaalutud keskmist. Autor pidas lihtsustuse tegemist vajalikuks lihtsama võrdlemise nimel, kuna EVS-EN 50341 standardi järgi tuleb arvutada juhtmetele mõjuv tuulejõud juhtmete kinnituste kaalutud keskmise alusel ja lihtsustatud kujul tuleb ka EEE arvutuste järgi üks väärtus kolme asemel. Järgnevalt on toodud tabelid, mis kirjeldavad mastidele juhtmetest mõjuvaid koormusi kahe standardi arvutuste järgi.

Tabel 15. Mastile mõjuvad juhtmete koormused vastavalt EEE arvutustulemustele

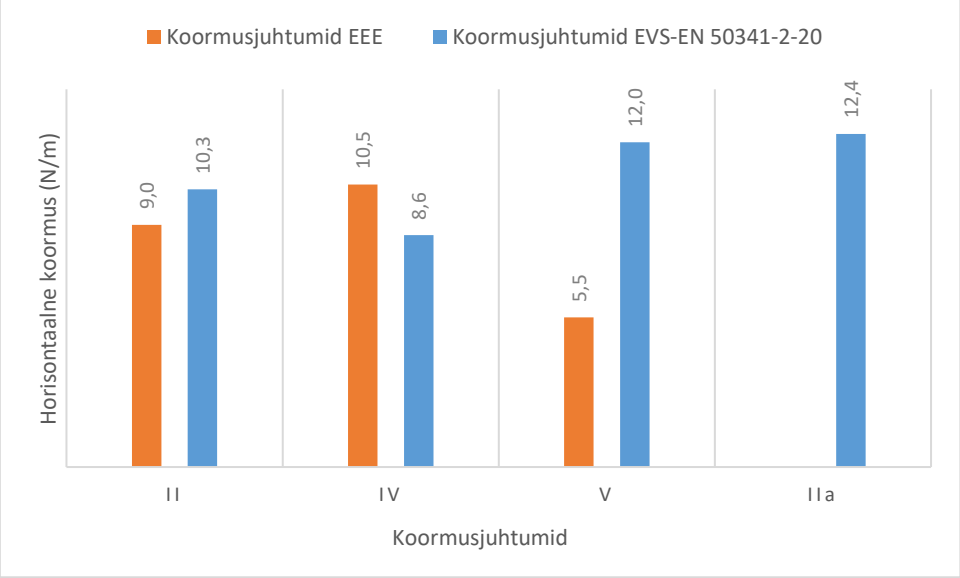
Koormusjuhtumid – EEE		**Normatiivsed koormused**		Ülekoormus-tegur	**Arvutuslikud koormused**	
		Liini teljega risti olev koormus N/m	Vertikaalne koormus N/m		Liini teljega risti olev koormus N/m	Vertikaalne koormus N/m
I	Koormus juhtmete omakaalust (tuul ja jäide puuduvad)	0	9,8	1,1	0	10,7
II	Tuulekoormus (ilma jäiteta)	7,5	0	1,2	9,0	0
III	Jäitekoormus (5 mm) (ilma tuuleta)	0	13,3	2,0	0	26,6
IV	Tuulekoormus + jäitekoormus	7,5	9,8	1,4	10,5	13,7
V	Jäitekoormus + 0,25*norm. tuulekoormus	4,0	13,3	1,4	5,5	18,6

Tabel 16. Mastile mõjuvad juhtmete koormused vastavalt EVS-EN 50341-1 ja EVS-EN 50341-2-20 arvutustulemustele

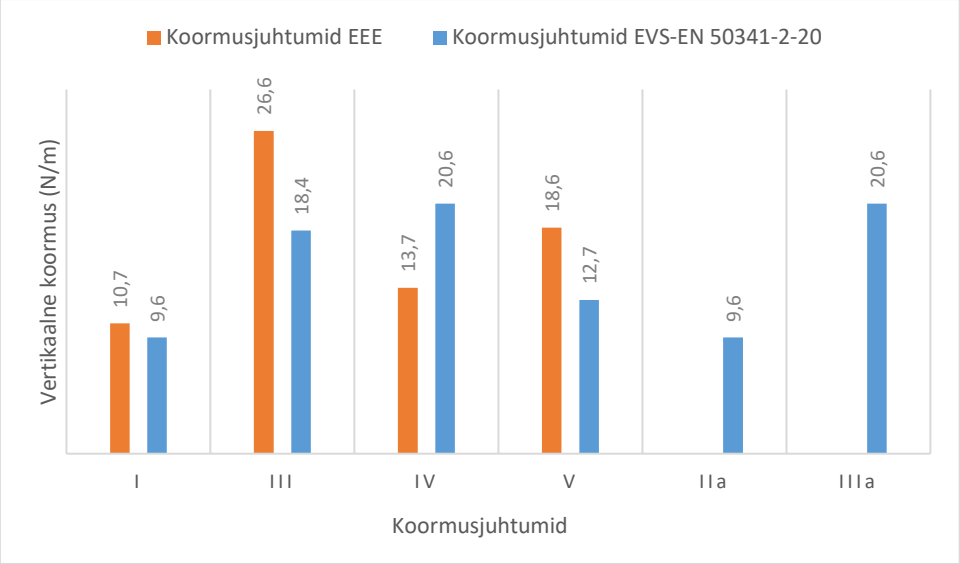
Koormusjuhtumid – EVS-EN 50341-2-20		Liini teljega risti olev koormus (N/m)	Vertikaalne koormus (N/m)
I	Koormus juhtmete omakaalust (tuul ja jäide puuduvad)	0	9,6
II	Nimituulekoormus (jäide puudub)	10,3	0
IIa	Piirtuulekoormus (jäide puudub)	12,4	9,6
III	Nimijäitekoormus (10 mm) (tuul puudub)	0	18,4
IIIa	Piirjäitekoormus (tuul puudub)	0	20,6
IV	Piirjäitekoormus + nimituulekoormus	8,6	20,6
V	Suur tuulekoormus + nimijäitekoormus	12,0	12,7

Mõlemas standardis on kirjeldatud erinevad (varu)tegurid, mis tuleb arvestada sisse olenevalt standardist, kas algandmetele või tulemustele. EEE ütleb, et tuleb korrutada normatiivsed koormused ülekoormusteguriga, et saada arvutuslikud koormused. EVS-EN 50341 standardi järgi tuleb arvutada osavarutegurid sisse juba algandmetele ning kasutada tuule ja jäite koostoimel kombinatsioonitegurit. EN standardi väärtused tuleb võtta vastavalt seadme töökindlusnivoole, kuid EEE järgi tuleb ülekoormustegurid rakendada kõikidele õhuliini elementidele samamoodi ühiselt olenemata õhuliini olemusest.

Eelnevate tabelite (Tabelid 15 ja 16) visualiseerimiseks on koostud ka graafikud, mis kujutavad horisontaalseid ja vertikaalseid koormusi mastidele juhtmete kaalust erinevatel koormustingimustel.



Joonis 20. Liini teljega risti suunas olev koormus juhtmetest mastile



Joonis 21. Vertikaalsed koormused juhtmetest mastile

Graafikutel (Joonised 20 ja 21) on toodud mõlema standardi juhtmete koormuste väärtused, millega peavad arvestama mastide konstruktsioonide projekteerijad.

Kuna väärtused graafikutel on toodud N/m, siis kehtivad samad numbrid igale masti visangu pikkusele. Selleks, et saada teada kindlale mastile mõjuva koormuse väärtus tuleb korrutada väärtus mastile mõjuva tuulevisangu väärtusega, mille tulemusena saadakse igale mastile eraldi „koormuspuud“, mis on 110 kV õhuliini projekti lahutamatu osa.

Arvutustulemuste põhjal võib öelda, et suurim väärtus horisontaal suunal mõjuvale jõule tuleb EVS-EN 50341-1 standardiga kehtestatud metoodika alusel, kuid vertikaalse jõuvektori suunal on rangem EEE 6 N/m võrra. Vertikaal suunal mõjuvale jõule juhtmel oleva jäite puhul rakendub EEE järgi ülekoormustegur 2,0, mis on ka suure erinevuse põhjustajaks.

Tabel 17. ACSR 242/39 HAWK juhtmete kõrvalekalle kandemastides tuule mõjul lõputöös projekteeritud õhuliini näitel

Kandemast	Juhtmete kõrvalekalle mastis
Mast nr 2 (EEE)	34°35’
Mast nr 4 (EVS-EN 50341-1)	47°4’

Kõrvalekalle on suurem kandemastis nr 4, kus on juhtmed projekteeritud EVS-EN 50341-1 standardi järgi.

9.3.4 Juhtmete koormused isolaatorkettidele

Isolaatorkettide arvutamisel leidis autor, et tänapäeva õhuliini projekteerides ei pea projekteerijad enam ise arvutama isolaatorkettidele mõjuvat mehaanilist jõudu, kuna selle sätestavad õhuliini omaniku nõuded. EEE-ga oli arvutus nõutud, kuid enamus saada olevaid tüüpdetaile olid projekteeritud samaselt tänapäevale purustavale jõule 110 kV kandekettidel 70 kN ja tõmbekettidel 120 kN [18], [21]. Seega võib öelda, et isolaatorkettidele mõjuvad arvutuslikud koormused ei mõjuta õhuliini maksumuste erinevust, kuna kasutatavad isolaatorketid on üsna sarnased.

10 ÕHULIINIDE MAKSUMUSE ANALÜÜS

10.1 Maksumuse analüüs

Autori teada, ei ole Eestis tehtud teadustööna majanduslikku analüüsi kahe õhuliini vahel, mis on projekteeritud ja ehitatud samasse geograafilisse asukohta, kuid kahe erineval ajal kehtinud standardi järgi. Käesolev peatükk annab ülevaate kõikidest lõputöös tehtud arvutustulemustest, kuid keskendub rohkem õhuliinide maksumuse erinevuse analüüsile. Analüüs keskendub lõputöö muudele osadele sarnaselt juhtmetest tingitud mehaaniliste koormuste erinevustele õhuliinide projektis.

Lõputöö on välja selgitanud, et tänapäeva õhuliinide projekteerimisel tuleb arvestada pikemate mastidega erinevate objektidega ristumisel, mis on tingitud juhtmete maksimaalse temperatuuri erinevusest, mida õhuliini projekti profiil kirjeldama peab. Sellest tulenevalt on mõjutatud õhuliini mastide endi kui ka nende ehitamise ja transportimise hind. Igale projektile tuleb küsida mastide kohta hinnapakkumist, mis võib varieeruda olenevalt tehasest, kuid hind langeb suurusjärku 20 000 € ühe 1T9T-9 (NL liidu masti U110-1 ekvivalent) vabalt seisva metall-sõrestik ankrumasti kohta ning 8 000 € ühe 1SIS-C-16,5 (NL liidu masti PB 110-3 ekvivalent) vabalt seisva raudbetoon kandemasti kohta. Kui õhuliinile paigaldada 10 meetrit kõrgendusega ankrumast 1T9T-19, siis lisandub kõrgenduseta masti hinnale ~10 000 €.

Tabel 18. Mastide hinnad koos masti kõrgendustega

Mastide tüübid	Ühe masti hind (€)
U110-1 (kõrgenduseta) 1T9T-9 (kõrgenduseta)	~20 000
U110-1+5 (kõrgendus +5 m) 1T9T-14 (kõrgendus +5 m)	~25 000
U110-1+9 (kõrgendus +9 m) 1T9T-19 (kõrgendus +10 m)	~30 000
U110-1+14 (kõrgendus +14 m) 1T9T-24 (kõrgendus +15 m)	~35 000

Võttes aluseks lõputöös projekteeritud kolme masti pikkused õhuliini lõigud on koostatud võrdlemiseks järgnev tabel, kus on kirjeldatud ka kõrgendusega masti paigaldust maanteega ristumisel.

Tabel 19. Mastide hindade võrdluse tabel

Mast	Masti hind (€)	Mastide kogus (tk)	EVS-EN järgi projekteeritud õhuliini mastide maksumus (€)	EEE järgi projekteeritud õhuliini mastide maksumus (€)
1SIS-C-16,5	~8000	2	8000	8000
U110-1	~20000	2	-	40 000
1T9T-9	~20000	1	20 000	-
1T9T-19	~30000	1	30 000	-
		Kokku	**58 000**	**48 000**

Tabeli 19 tulemused näitavad, et tänapäeval projekteeritud õhuliini hind mastide valiku vaatepunktist oleks 1,2 korda suurem, kui seda oli NL ajal projekteeritud õhuliinil.

Teiseks ehituse hinda mõjutavaks faktoriks on kliimategurid ning neid arvestavad tegurid standardite lõikes. Eriti mõjukaks on osutunud jäitekihti arvestavad koormusjuhtumid, mille normatiivsed väärtused tuleb läbi korrutada EEE järgi ülekoormustegurida 2,0. Nii suur ülekoormustegur põhjustab selle, et juhtmetest põhjustatud maksimaalne vertikaalne koormus mastile on 110 kV õhuliinil EEE-ga sätestatud arvutuste järgi suurem ~6 N/m, mis oleks eriti mõjukas juhul, kui on utiliseeritud masti 1T9T-9 maksimaalset kaaluvisangut 405 m. [15] Arvestades seda, et NL õhuliinide mastide tüüpprojektid juba arvestavad sisse EEE (*ПУЭ)* nõuded, siis ei tohiks praeguse õhuliini ehituse maksumust (kui on kasutatud NL mastid), see parameeter mõjutada, kuid tõenäoliselt 1TxT seeria mastid ei sobiks täitma EEE nõudeid ning vajaksid täiendavat kontrollimist. NL mastide konstruktsiooni elemendid, mis on mõjutatud juhtmetest tuleneva vertikaalsest pingest on projekteeritud mehaaniliselt tugevamana, kui seda on tänapäeva mastidel, mis lisab NL mastidele juurde hinda. Kuna mastide konstruktsiooni elementide kontrollimisel mehaaniliste pingete vaatepunktist ei ole autoril elektriinsenerina kogemust, siis ei ole autor piisavalt pädev, et anda selle kohta põhjalikum ülevaade.

Autor kirjeldas ka isolaatorkettide arvutusi, kuid jõudis järeldusele, et 110 kV isolaatorkettide ja trosside purustavad koormused on määratud nii NL ajal kui tänapäeval samad. Mis tähendab, et isolaatorkettide maksumuse erinevus on minimaalne.

Kõiki eelnevaid punkte arvesse võttes saab väita, et tänapäeva nõuete järgi on õhuliinide ehitamine kallim ning kõige suuremaks mõjutajaks on kliimatingimuste erinevus ja juhtme maksimaalse temperatuuri väärtus, millega peab projekteerimisel arvestama. Võttes näiteks lõputöös projekteeritud kaks üheahelalise 110 kV õhuliini lõiku, milledel on kõigest 3 masti, siis tuleb praeguste nõuete järgi paigaldada lõigule pikem ankrumast, kui seda oleks olnud vaja NL nõuete järgi ning selle tõttu tõuseb selle lõigu kaasaegsete nõuete järgi maksumus 10000 € võrra ainult masti enda maksumuse pealt, millele tuleb arvestada juurde ka pikema masti ehitamise, transportimise kulud ja lisada veel ka vundamendi ehitamise kulud. Autor arvab, et arvestades kõik eelnevalt toodud erinevusi võib väita, et tänapäeva nõuete (EVS-EN 50341-1 ja Elering AS) järgi ehitatud 110 kV õhuliin on ~1,5 korda kallim, kui seda oli NL ajal ja EEE järgi ehitatud õhuliin.

10.2 Õhuliini projekteerimise, ehituse ja hoolduse kuluefektiivsus

Eestis on kõrgepinge õhuliinide tänapäevastes projekteerimis- ja hooldamisnõuetes sees suured varu tegurid. Suured varud tulevad Elering AS karmidest projekteerimisnõuetest, mis on ettevõtte siseselt analüüsitud ja valitud kõige optimaalsemad. Karmid nõuded on põhjendatud, kuna Elering AS on võrgu omanik, kes peab õhuliini peale ehitustööde lõppu ka hooldama. Kuid kui õhuliini projekti nõuetes on sees varud nii vertikaalsetel õhkvahemikel kui ka juhtmete maksimaalsel temperatuuril, siis need nõuded koostoimel suurendavad üldist varu veelgi, mis autori meelest ei ole uue õhuliini hooldamise vaatepunktist kuluefektiivne lähenemine. Nõukogude Liidu ajal on ehitatud õhuliine samas piirkonnas (Eestis, Lätis, Leedus ja Venemaal) ka leebemate nõuetega. Need õhuliinid püsivad veel ka tänapäeval ohutuna ning neid hooldatakse nende õhuliinide ehitusaegsete (EEE) nõuete järgi tänaseni. Autor on teadlik, et see on tingitud sellest, et ka mastid olid projekteeritud EEE järgi ja kui rakendada tänapäeva nõudeid EEE-ga projekteeritud mastide peal, siis on oht ületada NL aegsete mastide ja/või masti vundamentidele arvestatud maksimaalseid koormusi. Kuid autor juhib tähelepanu ka sellele, et NL aegsete õhuliinide ehitamisel kasutati nii väiksemaid vertikaal õhkvahemike, kui ka väiksemat juhtme maksimaalset temperatuuri, mis ei põhjusta probleeme õhuliini tööle ning õhuliin oli ja on tänaseni ohutu ümbritsevale keskkonnale.

Elering AS dokument 702 ütleb: „*Alati tuleb juhinduda üldiselt aktsepteeritud nõuetest ja üldtunnustatud headest tavadest. Töövõtja poolt üle antud õhuliin peab tagama kestva ja pideva töö kõrge ökonoomsuse ja madalate hoolduskuludega kogu liini projekteeritud tööea jooksul.*“ [29]

Lõputöö autori ettepanek hooldustööde kuluefektiivsuse vaatepunktist on õhuliini hooldustöödel tänapäeva nõuete järgi ehitatud õhuliinide amortiseerumisel kasutada leebemaid nõudeid juhtmete maksimaalsele temperatuurile ja/või välis õhkvahemikele ristuvate objektidega.

Elering AS võrgus ehitatavatele 110 kV õhuliinidele kehtib nõue, et tuleb rakendada vertikaalõhkvahemike projekteerimisel standardi väärtusele veel 0,5 m varu [18]. Autor arvab, et hooldusperioodil võiks analüüsida selle nõude leevendamist olukorras, kus on gabariidi rikkumine alla 15 cm. Seda põhjusega, et kui tuleb parandada 15 cm gabariiti, siis tuleb hooldusealuse õhuliini projekteerimisel parandada praeguste nõuete alusel 65 cm gabariidirikkumist ning see nõuaks juba halvemas olukorras ka uue, kõrgema masti paigaldamist. Kuigi 15 cm gabariidi rikkumine ei ole ohtlik ümbritsevale keskkonnale suurte ehituseaegsete varutegurite tõttu.

Karmimad (praegused) varutegurid projekteerimisel ja leebemad (kui praegused projekteerimisnõuded) ehitusjärgse hoolduse nõuded tagaksid selle, et uus õhuliin on projekteeritud ja ehitatud vastupidavaks, kuid selle hooldus oleks tulevikus vähem vajalik ja selle kaudu ka odavam õhuliini omanikule.

11 KOKKUVÕTE

Lõputöö keskendub 110 kV õhuliini juhtmete projekteerimisele võrreldes Nõukogude Liidu ajal kehtinud standardit Elektriseadmete Ehituse Eeskirjad ning kaasaja nõuete arvutusmetoodikat arvestades nii EVS-EN 50341 kui ka õhuliini omaniku erinõuetega. Lõputöös kirjeldatakse 110 kV õhuliini juhtmete projekteerimist arvestades erinevaid juhtmete väliskeskkonna kliimast tingitud koormusjuhtumeid.

Lõputöö esimene osa keskendub projekteeritava fiktiivse õhuliini andmete määramisele ning kasutatavate õhuliini elementide valikule ja valikute põhjendamisele. Lõputööga projekteeriti üks viiest mastist koosnev 110 kV õhuliini lõik, mis jagati kaheks osaks. Üks lõik projekteeriti NL õhuliini ehitamise ja projekteerimise standardi järgi Elektriseadmete Ehituse Eeskirjad (lühendatult EEE), mis on eestikeelne versioon venekeelsest standardist *Правила Устройства Электроустановок* ning teine kaasaegsete nõuete järgi. Kaasa arvatud 110 kV õhuliini omaniku nõuded, kelleks on lõputöös valitud Elering AS. Õhuliini osad, mida kasutati valiti võimalikult sarnased mõlema projekteeritud õhuliini lõigu osa puhul, kuid jälgiti ka päris maailmas esinevaid olukordi, kus see otstarbekas oli. Lihtsustused ja üldistused, mis tehti parameetrite määramisel on tehtud eesmärgiga, et õhuliini erinevate standardite alusel projekteeritud lõigud oleksid võimalikult sarnased.

Järgnevas lõputöö osas on täpsustatud väärtused, mis ei muutu standardite lõikes nagu erinevate visangute pikkused ja juhtmete rippe sõltuvus temperatuurist. Juhtmete rippe arvutusmetoodika kirjeldamisel on kirjeldatud ka ACSR juhtme roome ehk jääkdeformatsiooni kontseptsiooni.

Peale mitte muutuvate väärtuste ja arvutuste määramist jagati lõputöö mõtteliselt kaheks osaks, kus esimene osa kirjeldab arvutusmetoodikat Elektriseadmete Ehituse Eeskirjade järgi ning teine osa EVS-EN 50341 standardi alusel. Peatükid on sisu poolest lõputöö teoreetiline osa ning kirjeldavad arvutusi, mille abil on saadud tulemused, et koostada viimases lõputöö osas kirjeldatud analüüs.

Lõputöö viimane osa on projekteerimise ja arvutus tulemuste analüüs, kus tuuakse välja mõjukamad erinevused tulemuste vahel pidades silmas õhuliini lõikude maksumuse erinevusi. Lõputöö selgitab välja viimases peatükis, et suuremad erinevused EEE ja EVS-EN 50341 standardite alusel projekteeritud õhuliinil tulenevad kliimatingimustest ja juhtmete

maksimaalsest temperatuurist, millega tuleb arvestada juhtmete kandmisel õhuliini pikiprofiilile.

Kliimatingimustest on suuremad erinevused jäite paksuses ning tuule kiiruses. Suureks arvutustulemuste mõjutajaks on ka erinevad (varu)tegurid, millega tuleb arvestada õhuliini projekteerimisel. Samuti erineb standardite lõikes ka nende rakendamine.

Juhtmete maksimaalse temperatuuri määravad tänapäeval EVS-EN standardid, kui õhuliini omanik ise seda määranud ei ole. EEE järgi tuleb juhtmete projekteerimisel arvestada juhtmete maksimaalse temperatuuriga 35 °C, mis on ühtlasi ka väliskeskkonna maksimaalne temperatuur. Elering AS nõuete järgi tuleb võtta juhtme maksimaalseks temperatuuriks 80 °C. Suurem juhtmete arvutuslik temperatuur põhjustab suuremad projekti järgsed juhtmete ripped visangus ning selle tõttu tuleb paigaldada samasugusel liini lõigul tänapäeval kõrgemad mastid kui seda olid NL ajal olevad mastid.

Õhuliini maksumuse analüüsi tulemusena jõuti järeldusele, et kui ehitada Eestis samasugune õhuliin samasse geograafilisse asukohta, kuid erinevate nõuete järgi, siis tuleb kaasaegsete nõuete järgi projekteeritud õhuliini maksumus ligikaudu 1,5 korda kallim, kui seda oleks NL aegsete nõuete järgi projekteeritud õhuliin.

Kuna lõputöö keskendub ainult juhtmete projekteerimisele, siis on sellega kaetud väike osa õhuliini projekti tervikust. Seega on võimalik käesolevat magistritööd laiendada mitmes erinevas suunas nii elektriinsenerina kui ka ehitus- või mehaanikainsenerina. Elektriinseneri valdkonda jääks näiteks välisõhvahemike erinevuste võrdlus, mida magistritöös mainiti väga põgusalt või põhjalikum masti siseõhkvahemike kontroll arvestades. Ehitus- või mehaanikainsenerina võib seda lõputööd laiendada masti vundamendi või masti enda konstruktsiooni projekteerimise ja kontrollimise vaatepunktist tuginedes lõputöös saadud mehaaniliste koormuste tulemustele.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] **Venemaa Föderatsiooni Energeetika Ministeerium**, ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. Издание 7, 2006.

[2] Elektriseadmete Ehituse Eeskirjad. Üle 1000 V õhuliinid, jaotlad ja alajaamad, Tallinn, 1986.

[3] **Eesti Standardimis- ja Akredeteerimiskeskus**, EVS_EN_50341_2_20_2018_et Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV osa 2-20, 2018.

[4] **Eesti Standardimis- ja Akredeteerimiskeskus**, EVS-EN 50341-1 2013 - Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 1 Üldnõuded. Ühised eeskirjad, 2013.

[5] **K. Roon**, Õhuliinijuhtmete projekteerimise- ja paigaldamise meetodid 35-110 kV võrgus. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn 2021.

[6] **R. Rusin**, Kaetud õhuliini juhjtmete paigaldustabelite koostamine Elektrilevi OÜ võrgustandardi tarbeks. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn 2020.

[7] **J. Lepa, K. Jürjenson ja A. Annuk**, Energiavarustus, Tartu. Eesti Maaüliool, 2012.

[8] **P. Raesaar**, Õhuliinide projekteerimise küsimusi, 2010.

[9] **Elering AS**, *700 TEHNILISED JUHISED*, 10.03.2017.

[10] **CIGRE's Study Committee**, „Green Books,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.cigre.org/GB/publications/green-books. [Kasutatud 04 2023].

[11] **CIGRE**, Sag-Tension Calculation Methods for Overhead Lines, 2016.

[12] „Riigihangete Register,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/. [Kasutatud 05 2023].

[13] **Latvijas Elektrotehniskā komisija**, *Latvijas Energostandarts*, 2011.

[14] **ИНСТИТУТ ЭНЭРГОСЕТЬПРОЕКТ**, *Универсальные стальные опоры вл 110 и 150 kB N3.407-68/73, Рабочие чертежи том 10,* 1973.

[15] **TMV LINE**, *Single Circuit Tension Tower, Line Angle 37…90 deg Strength Calculation Report*, 2021.

[16] **ИНСТИТУТ ЭНЭРГОСЕТЬПРОЕКТ**, *Типовые конструкции серия… промежуточные угловые и анкерно -угловые железобетонные опоры bл 110-500 kB высокопрочнойстержневой арматурой класса A VI Выпуск 1,* 1978.

[17] **LEONHARD WEISS OÜ**, *Töö nr 10353, ELERINGI KIISA PIIRKONNA ÕHULIINIDE L504, L505, L506, L357, L017/L185, L180/L181, L183/L184, L086, L182, L206 ÜMBEREHITUS.*

[18] **Elering AS**, *701 Projekteerimine,* 12.04.2020.

[19] **Prysmian Group**, *Product Catalogue.*

[20] **OPTINOR**, „OPGW COMPOSITE OPTICAL CABLE,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.nordencommunication.com/pdf?pdf=/uploads/datasheet/datasheet-18-opgw-composite-optical-cable.pdf. [Kasutatud 05 2023].

[21] **Госэнергоиздат**, *Справочник по электрическим сетям высокого напряжения,* 1962.

[22] **ООО Профметиз**, „Грозотрос ТК-50, ТК-70, ТК-35 по ГОСТ 3063-80,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://profmetiz.ru/kanat/35-kanat-3063.html. [Kasutatud 05 2023].

[23] **R. E. Pinto**, *State Change Equation,* 2012.

[24] **POWER LINE SYSTEMS**, „Elevated Temperature Creep of AAC, AAAC, ACAR, AACSR, & ACSR Conductors,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.powline.com/technotes/Elevated_Temperature_Creep.pdf. [Kasutatud 05 2023].

[25] Eesti NSV kliimaatlas, 1969.

[26] **AIZ**, „Glass Insulators for Overhead Power Transmission Lines,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.aiz.lt/media/com_eshop/files/file_573b48e656f4d_AIZ_-glass-insulators.pdf. [Kasutatud 05 2023].

[27] **Eesti Standardimis- ja Akredeteerimiskeskus**, *EVS-EN 1991-1-4:2005/AC:2010 "Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktsioonide koormused. Osa 1-4: Üldkoormused. Tuulekoormus"*.

[28] **Elektrilevi OÜ**, *0,4 - 20 kV VÕRGUSTANDARD - 20 kV ÕHULIINID,* 2016.

[29] **Elering AS**, *702 EHITAMINE,* 10.03.2017.

LISAD

Lisa 1. Juhtmete ja piksekaitsetrosside pingutamise tabelid

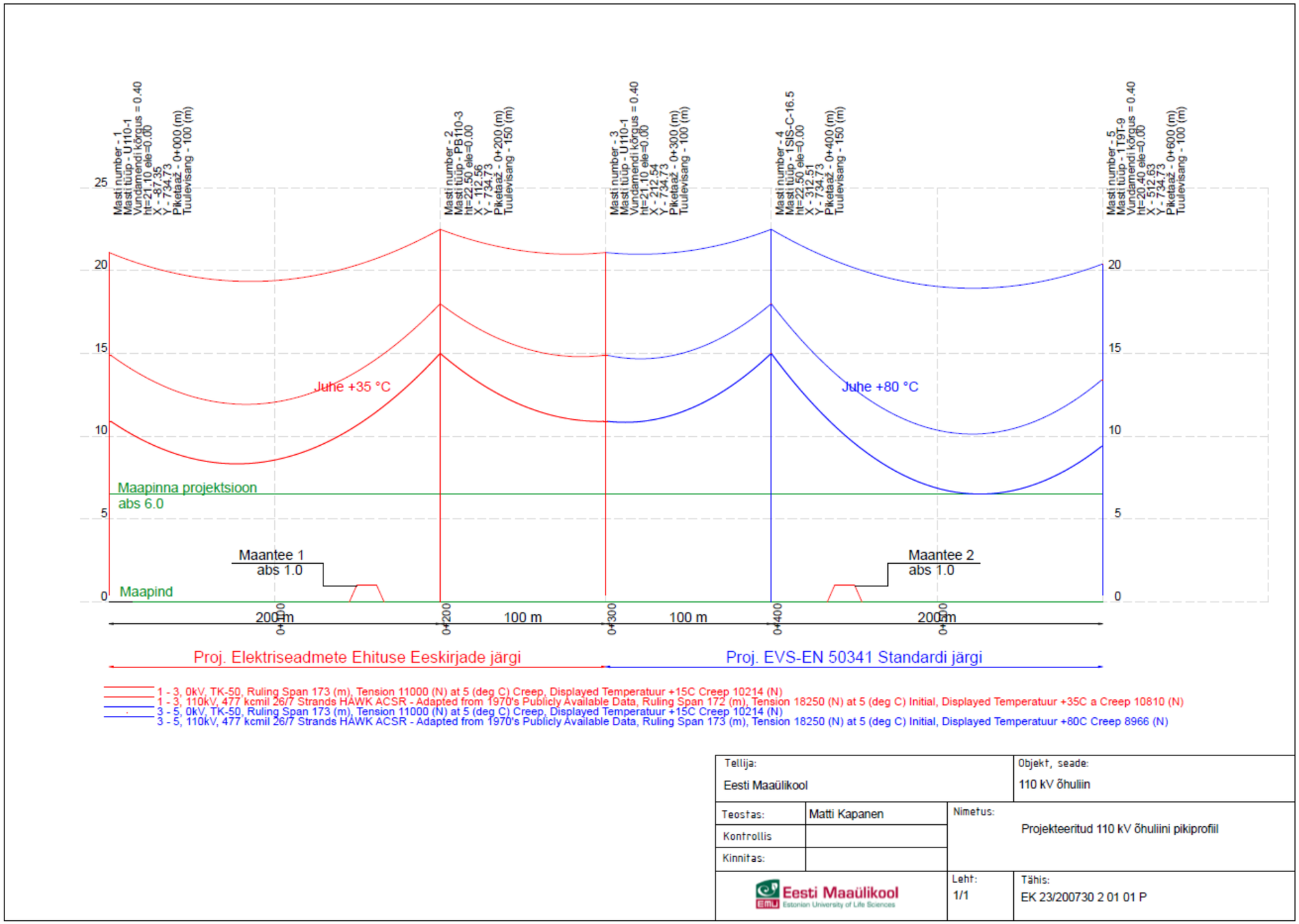
Faasijuht ACSR 242/39 Hawk																												
Ankruvisang 300 meetrit mastid 1-3																												
Temperatuur (°C)		-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	-0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Tõmbejõud juhtmes (N)		28287	27238	26190	25142	24096	23076	22061	21063	20095	19147	18259	17382	16568	15794	15060	14383	13750	13162	12620	12113	11655	11218	10826	10456	10117	9802
Juhtme pingsus (N/mm²)		101	97	93	89	86	82	79	75	72	68	65	62	59	56	54	51	49	47	45	43	41	40	39	37	36	35
Juhtme ripe (f) (m)	Mastid 1-2	1,71	1,77	1,84	1,92	2,01	2,09	2,19	2,29	2,4	2,52	2,65	2,78	2,92	3,06	3,21	3,36	3,52	3,67	3,83	3,99	4,15	4,31	4,47	4,62	4,78	4,93
Juhtme ripe pärast roomet (fr) (m)	visang 200 (m)	2,09	2,19	2,29	2,4	2,52	2,65	2,78	2,92	3,06	3,21	3,36	3,52	3,67	3,83	3,99	4,15	4,31	4,47	4,62	4,78	4,93	5,06	5,19	5,32	5,47	5,61
Juhtme ripe (f) (m)	Mastid 2-3	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,58	0,61	0,64	0,67	0,7	0,74	0,77	0,81	0,85	0,89	0,93	0,97	1,01	1,05	1,09	1,13	1,17	1,21	1,25
Juhtme ripe pärast roomet (fr) (m)	Visang 100 (m)	0,53	0,55	0,58	0,61	0,64	0,67	0,7	0,74	0,77	0,81	0,85	0,89	0,93	0,97	1,01	1,05	1,09	1,13	1,17	1,21	1,25	1,3	1,34	1,39	1,45	1,51

Faasijuht ACSR 242/39 Hawk																												
Ankruvisang 300 meetrit mastid 3-5																												
Temperatuur (°C)		-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	-0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Tõmbejõud juhtmes (N)		28309	27261	26213	25165	24120	23100	22073	21075	20095	19148	18247	17382	16555	15781	15047	14370	13723	13135	12593	12086	11620	11191	10791	10421	10082	9767
Juhtme pingsus (N/mm²)		101	97	93	90	86	82	79	75	72	68	65	62	59	56	54	51	49	47	45	43	41	40	38	37	36	35
Juhtme ripe (f) (m)	Mastid 3-4	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,58	0,61	0,64	0,67	0,7	0,74	0,77	0,81	0,85	0,89	0,93	0,97	1,01	1,05	1,09	1,13	1,17	1,21	1,25
Juhtme ripe pärast roomet (fr) (m)	visang 100 (m)	0,53	0,55	0,58	0,61	0,64	0,67	0,7	0,74	0,77	0,81	0,85	0,89	0,93	0,97	1,01	1,05	1,09	1,13	1,17	1,21	1,25	1,3	1,34	1,39	1,45	1,51
Juhtme ripe (f) (m)	Mastid 4-5	1,69	1,75	1,82	1,9	1,98	2,07	2,16	2,27	2,38	2,49	2,62	2,75	2,88	3,03	3,17	3,32	3,48	3,64	3,79	3,95	4,11	4,27	4,43	4,58	4,74	4,89
Juhtme ripe pärast roomet (fr) (m)	visang 200 (m)	2,07	2,16	2,27	2,38	2,49	2,62	2,75	2,88	3,03	3,17	3,32	3,48	3,64	3,79	3,95	4,11	4,27	4,43	4,58	4,74	4,89	5,00	5,13	5,26	5,41	5,55

Piksekaitsetross TK-50																												
Ankruvisang 300 meetrit mastid 1-3																												
Temperatuur (°C)		-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	-0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Tõmbejõud juhtmes (N)		15619	15111	14618	14125	13647	13184	12721	12273	11840	11407	11004	10601	10214	9841	9491	9155	8828	8515	8225	7950	7683	7438	7201	6978	6771	6575
Juhtme pingsus (N/mm²)		312	302	292	283	273	264	254	245	237	228	220	212	204	197	190	183	177	170	165	159	154	149	144	140	135	132
Juhtme ripe (f) (m)	Mastid 1-2	1,57	1,62	1,68	1,74	1,8	1,86	1,93	2	2,07	2,15	2,23	2,31	2,4	2,49	2,58	2,68	2,78	2,88	2,98	3,08	3,19	3,3	3,4	3,51	3,62	3,73
Juhtme ripe pärast roomet (fr) (m)	visang 200 (m)	1,86	1,93	2	2,07	2,15	2,23	2,31	2,4	2,49	2,58	2,68	2,78	2,88	2,98	3,08	3,19	3,3	3,4	3,51	3,62	3,73	3,82	3,94	4,06	4,18	4,31
Juhtme ripe (f) (m)	Mastid 2-3	0,39	0,41	0,42	0,43	0,45	0,47	0,48	0,5	0,52	0,54	0,56	0,58	0,6	0,62	0,65	0,67	0,7	0,72	0,75	0,77	0,8	0,83	0,85	0,88	0,91	0,93
Juhtme ripe pärast roomet (fr) (m)	visang 200 (m)	0,47	0,48	0,5	0,52	0,54	0,56	0,58	0,6	0,62	0,65	0,67	0,7	0,72	0,75	0,77	0,8	0,83	0,85	0,88	0,91	0,93	0,96	1,13	1,51	1,92	2,24

Piksekaitsetross TK-50																												
Ankruvisang 300 meetrit mastid 3-5																												
Temperatuur (°C)		-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	-0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Tõmbejõud juhtmes (N)		15619	15111	14618	14125	13647	13184	12721	12273	11840	11407	11004	10601	10214	9841	9491	9155	8828	8515	8225	7950	7683	7438	7201	6978	6771	6575
Juhtme pingsus (N/mm²)		312	302	292	283	273	264	254	245	237	228	220	212	204	197	190	183	177	170	165	159	154	149	144	140	135	132
Juhtme ripe (f) (m)	Mastid 3-4	0,39	0,41	0,42	0,43	0,45	0,47	0,48	0,5	0,52	0,54	0,56	0,58	0,6	0,62	0,65	0,67	0,7	0,72	0,75	0,77	0,8	0,83	0,85	0,88	0,91	0,93
Juhtme ripe pärast roomet (fr) (m)	visang 100 (m)	0,47	0,48	0,5	0,52	0,54	0,56	0,58	0,6	0,62	0,65	0,67	0,7	0,72	0,75	0,77	0,8	0,83	0,85	0,88	0,91	0,93	0,96	1,13	1,51	1,92	2,24
Juhtme ripe (f) (m)	Mastid 4-5	1,57	1,62	1,68	1,74	1,8	1,86	1,93	2	2,07	2,15	2,23	2,31	2,4	2,49	2,58	2,68	2,78	2,88	2,98	3,08	3,19	3,3	3,4	3,51	3,62	3,73
Juhtme ripe pärast roomet (fr) (m)	visang 200 (m)	1,86	1,93	2	2,07	2,15	2,23	2,31	2,4	2,49	2,58	2,68	2,78	2,88	2,98	3,08	3,19	3,3	3,4	3,51	3,62	3,73	3,82	3,94	4,06	4,18	4,31

Lisa 2. Projekteeritud õhuliini pikiprofiil



Lisa 3. Piksekaitsetrossi koormused mastile

Koormusjuhtumid EVS-EN 50341-2-20 Piksekaitsetross TK-50		Liini teljega risti olev koormus N/m	Vertikaalne koormus N/m
I	Koormus juhtmete omakaalust (tuul ja jäide puuduvad)	0,0	4,9
II	Nimituulekoormus (jäide puudub)	5,1	0,0
IIa	Piirtuulekoormus (jäide puudub) (töökindlusnivoo 2)	6,1	0,0
III	Nimijäitekoormus (10 mm) (tuul puudub)	0,0	10,2
IIIa	Piirjäitekoormus (tuul puudub) (töökindlusnivoo 2)	0,0	11,5
IV	Piirjäitekoormus + nimituulekoormus	7,2	11,5
V	Piirtuulekoormus + nimijäitekoormus	8,8	6,8

Koormusjuhtumid EEE Piksekaitsetross TK-50		Normatiivsed koormused		Ülekoormus-tegur	Arvutuslikud koormused	
		Liini teljega risti olev koormus N/m	Vertikaalne koormus N/m		Liini teljega risti olev koormus N/m	Vertikaalne koormus N/m
I	Koormus juhtmete omakaalust (tuul ja jäide puuduvad)	0,00	4,60	1,1	0,0	5,1
II	Tuulekoormus (ilma jäiteta)	4,61	0,00	1,2	5,5	0,0
III	Jäitekoormus (5 mm) (ilma tuuleta)	0,00	6,89	2,0	0,0	13,8
IV	Tuulekoormus + jäitekoormus	3,98	4,9	1,4	5,6	6,9
V	Jäitekoormus + 0,25*norm. tuulekoormus	2,99	6,89	1,4	4,2	9,6

Lisa 4. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Matti Kapanen,

(sünnipäev pp/kuu/aa 21.04.1996)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „ELEKTRIÕHULIINIDE JUHTMETE PROJEKTEERIMISTULEMUSTE VÕRDLUS ERINEVATE STANDARDITE ALUSEL,“
mille juhendajad on professor Andres Annuk ja Heigo Luik,
   1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
   1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
   1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor *allkirjastatud digitaalselt*
allkiri

Tartu, 2023

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Andres Annuk / *allkirjastatud digitaalselt*

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

Heigo Luik / *allkirjastatud digitaalselt*

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev)*