



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

330/110 kV ÕHULIINI MAANDUSE PROJEKTEERIMINE

330/110 kV TRANSMISSION LINE GROUNDING SYSTEM DESIGN

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Ranno Kivistik

Üliõpilaskood: 176786AAVM

Juhendaja: Paul Taklaja, vanemlektor

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Ranno Kivistik

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: 330/110kV õhuliini maanduse projekteerimine

Kuupäev: 24.05.2019

73 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): vanemlektor Paul Taklaja

Töö konsultant (konsultandid): Heigo Luik – Leonhard Weiss Energy AS projekteerimise valdkonna kõrgepinge sektorijuht

Sisu kirjeldus:

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida kõrgepingeliini maanduspaigaldise projekteerimiseks vajalikke teoreetilisi aluseid ja arvutusmeetodeid. Töö tulemusena saadakse ülevaade peamistest vaatenurkadest ja aspektidest, mida peab arvesse võtma maanduspaigaldise projekteerimisel.

Töö on jaotatud kolmeks osaks, mis annavad ülevaate maanduspaigaldise projekteerimisest. Töö kahes põhiosas on vaatluse all maanduspaigaldise projekteerimine inimese ohutuse seisukohast ja liini töökindluse seisukohast.

Inimese ohutuse seisukohast uuritakse puute- ja sammupingete arvutamist programmiga XGSLab. Näidisenä on uuritud ühe masti maanduspaigaldise puute- ja sammupingete seisukohalt. Programm aitab hinnata ka maandustakistuse väärtust, mis on liini töökindluse hindamise üks parameetreid.

Liini töökindluse seisukohalt uuritakse vastusuunaliste ülelöövide sõltuvust masti maandustakistusest. Lisaks maandustakistusele vaadeldakse ka teisi töökindlust mõjutavaid parameetreid. Vastusuunaliste ülelöövide määra arvutamiseks kasutatakse programmi IEEE Flash.

Töö tulemusel selgus, et sõltuvalt pinnase eritakistusest ja lühisvoolu suurusest võib ohutu maanduspaigaldise konfiguratsioon ja ehitus muutuda väga palju. Samuti saab tööst järeldada, et mastide maanduspaigaldisel on suur roll liini töökindluse parandamisel.

Märksõnad: maandustakistus, puutepinge, sammupinge, vastusuunaliste ülelöövide määr, piksekaitsetrossist möödalöögi määr.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Ranno Kivistik	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> 330/110kV overhead transmission line grounding system design	
<i>Date:</i> 24.05.2019	73 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Senior Lecturer Paul Taklaja	
<i>Consultant(s):</i> Heigo Luik – Leonhard Weiss Energy AS sector manager of high voltage design field	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of this thesis is to analyse the theoretical basis and calculation methodologies of overhead transmission line grounding system. Thesis gives an overview of the main viewpoints and aspects required for transmission line grounding design.</p> <p>Thesis is divided into three parts, which give an overview of grounding system design. Two main parts of the thesis examine the grounding system from the viewpoint of human safety and lightning performance of the transmission line.</p> <p>The main aspects of human safety are touch and step voltages, which are analyzed using XGSLab software. As an example safe grounding system of one tower has been designed. XGSLab also calculates the footing resistances of the towers, which are one of the inputs to evaluate the lightning performance of the line.</p> <p>Evaluation of the lightning performance of the line examines the impact of the footing resistance, while discussing the other relevant parameters. Backflash rate of the transmission line is calculated using the IEEE Flash software.</p> <p>As a result the thesis concludes that safe configuration of the grounding system may strongly vary depending on the soil parameters and fault current. Thesis also confirms the fact that footing resistances play a large role in improving the lightning performance of the transmission line.</p>	
<i>Keywords:</i> grounding resistance, touch voltage, step voltage, backflash rate, shielding failure flashover rate.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	330/110kV õhuliini maanduspaigaldise projekteerimine
Lõputöö teema inglise keeles:	330/110kV overhead transmission line grounding system design
Üliõpilane:	Ranno Kivistik, 176786AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Paul Taklaja
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	üks aasta
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019

/allkirjastatud digitaalselt/

Üliõpilane (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Maanduspaigaldis on õhuliini osa, mille peamine eesmärk on tagada liini töökindlus, kaitse pikselöögi eest ning inimeste ohutus rikkeolukorras. Käesoleva lõputöö teema ajendiks on konkreetne vajadus lahendada Elering AS poolt käivitatud suurprojekti Harku-Lihula-Sindi 330/110kV kõrgepingeliini maanduspaigaldis. Harku-Lihula-Sindi 330/110kV kõrgepingeliini projekteerimis- ja ehitustööd teostavad Empower AS ja Leonhard Weiss Energy AS. Minu eesmärgiks on uurida, milliseid aspekte ja suursi tuleb arvestada maanduspaigaldise projekteerimisel ning leida võimalikud arvutusmeetodid ja töövõtted, mida kasutada, et tagada projekteeritava kõrgepingeliini maanduspaigaldise vastavus nõuetele ja kehtivatele standarditele.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida ja projekteerimisse kaasata kõrgepingeliinide maanduspaigaldiste projekteerimiseks vajalikud teoreetilised alused, töövõtted ja arvutuslikud lahenduskäigud. Uurimise tulemusena saadud info põhjal teostan praktilised näidisarvutused, Harku-Lihula-Sindi 330/110kV kõrgepingeliini lähteandmete alusel, mida saab kasutada edasisel projekteerimistööl.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Maanduspaigaldiste projekteerimisel tuleb peamiselt lähtuda neljast vaatenurgast:

- 1) Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt maandusjuhi mehaanilisest tugevusest ja korrosioonikindlusest.

- 2) Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt maanduspaigaldist läbiva voolu termilisele toimele
- 3) Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt inimese ohutusest.
- 4) Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtudes liini töökindlusest.

4. Lähteandmed

- Elering AS Harku-Lihula-Sindi hankedokumendid
- Elering AS 330 kV ja 110 kV liinide projekteerimisele esitatavad nõuded
- Ehitusgeoloogiline uuring
- Pinnase eritakistuse mõõteprotokollid
- Elering AS perspektiivsed lühisvoolud ja väljalülitusajad

5. Uurimismeetodid

Töö põhiosaks on teostada maandusarvutused ning puute- ja sammupinge kontroll õhuliini mastidele programmiga XGSLab, tuginedes ehitusgeoloogilistele uuringutele ja pinnase eritakistuse mõõteprotokollidele. Masti maandustakistuste alusel saab hinnata liini töökindlust arvutades vastusuunaliste ülelööride määra. Vastusuunaliste ülelööride määr arvutatakse programmiga IEEE Flash. Töö tulemusena selgub kui palju mõjuvad pinnaseparameetrid ja lühisvool maanduspaigaldise konfiguratsiooni ning kui suur osakaal liini töökindluse hindamisel on mastide maandustakistusel.

6. Graafiline osa

Sammu- ja puutepingete 3D visualiseerimine (töö põhiosas).

7. Töö struktuur

- 1) Sissejuhatus
- 2) Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt maandusjuhi vastupidavusest
- 3) Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt inimese ohutusest.
- 4) Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtudes liini töökindlusest.
- 5) Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Peamisteks allikateks on raamatud, teadusartiklid, aruanded, mõõteprotokollid, seadusandlikud aktid. Viidet töö peamistele kirjanduse allikatele:

- EVS-EN 50341-1 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV – Osa 1: Üldnõuded - Ühised eeskirjad

- EVS-EN 50341-2-20 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV – Osa 2-20: Eesti siseriiklikud erinõuded (SEN)
- CIGRE TB 063 Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines
- EVS-EN 50522:2010 Üle 1 kV nimivahelduvpingega tugevvolupaigaldiste maandamine

9. Lõputöö konsultandid

Heigo Luik – Leonhard Weiss Energy AS Projekteerimise valdkonna kõrgepinge sektorijuht

10. Töö etapid ja ajakava

- 1) kirjanduse läbitöötamine (15.03.2019)
- 2) lähteandmete kogumine (22.03.2019)
- 3) teoreetilise osa kirjutamine (29.03.2019)
- 4) arvutuste/modelleerimise teostamine (5.04.2019)
- 5) uuringu tulemuste kirjeldamine (12.04.2019)
- 6) järelduste kirjutamine (19.04.2019)
- 7) kokkuvõtte koostamine (26.04.2019)
- 8) töö esimene versioon valmis, juhendajale läbilugemiseks saatmine (3.05.2019)
- 9) paranduste sisseviimine (10.05.2019)
- 10) juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (17.05.2019)
- 11) töö lõplik versioon valmis (24.05.2019)

SISUKORD

EESSÖNA.....	10
SISSEJUHATUS	11
1. Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt maandusjuhi vastupidavusest	12
1.1 Maandusjuhi mehaaniline tugevus.....	13
1.2 Maandusjuhi termiline tugevus	14
1.3 Lühisvoolu jagunemise põhimõtted lühisekohas.....	15
1.3.1 Lühisvoolu jagunemine 220 kV liini näitel.....	17
1.3.2 Lühisvoolu jagunemine 138 kV liini näitel.....	18
1.3.3 Lühisvoolu jagunemine käsiraamatu näitel	19
1.3.4 Lühisvoolu jagunemise kokkuvõte	20
2. Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt inimese ohutusest	22
2.1 Programmi XGSLab tutvustus	23
2.2 Pinnase eritakistus	26
2.2.1 Wenner'i meetod	26
2.3 Vundamentide kasutamine maanduritena.....	27
2.4 Vundamentide modelleerimine XGSLab-is	29
2.4.1 Seenvundamendi modelleerimine	30
2.4.2 Vaivundamendi modelleerimine	33
2.4.3 Vundamentide modelleerimise kokkuvõte	35
2.5 Mastide maandustakistuste arvutamine	35
2.6 Mastide puute- ja sammupingete modelleerimine	38
2.6.1 Puute- ja sammupinged ainult vundamendi korral.....	39
2.6.2 Puute- ja sammupinged vundamendi ja ühe potentsiaaliühtlustusringi korral.....	41
2.6.3 Puute- ja sammupinged vundamendi ja kahe potentsiaali-ühtlustusringi korral.....	42

2.6.4 Puute- ja sammupinged vundamendi ja maanduspaigaldise korral	42
2.6.5 Puute- ja sammupinged vundamendi, maanduspaigaldise ja potentsiaaliühtlustusringi korral	43
2.6.6 Puute- ja sammupinged kariloomade ohutuse seisukohalt.....	44
2.7 Ohutu maanduspaigaldise projekteerimise kokkuvõte	46
3. Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt liini töökindlusest.....	47
3.1 Piksekaitsetrossist möödalöögid.....	49
3.2 Vastusuunalised ülelöögid	50
3.3 Vastusuunaline ülelööök ja CIGRÉ meetod.....	51
3.4 Programmi IEEE Flash tutvustus	53
3.5 Vastusuunaliste ülelöökide määra analüüs	57
3.6 Liini töökindluse kokkuvõte	59
Kasutatud kirjandus.....	60
KOKKUVÕTE	63
SUMMARY	64
LISAD	65

EESSÕNA

Lõputöö teema „330/110kV õhuliini maanduse projekteerimine“ valisin ajendatuna töötamisest projekteerijana Leonhard Weiss Energy AS-is. Konkreetne vajadus maanduspaigaldise uurimiseks tulenes Elering AS suurprojekti Harku-Lihula-Sindi 330/110 kV kõrgepingeliini projekteerimistöödest.

Käesolev töö koondab kokku maanduspaigaldise projekteerimisega seotud teadmised mis olen omandanud töö, koolis ja iseseisva õppimise tulemusena.

Täna lõputöö juhendajat Paul Taklajat, kes oli abiks lõputöö juhendamisel ja suunamisel. Samuti tänan oma tööandjat Heigo Luike Leonhard Weiss Energy AS-ist vajalike töövahendite ja teoreetilise abi eest.

Täiendavalt tänaksin oma pere ja lähedasi, kes on mind kooliteel toetanud ja aidanud.

Ranno Kivistik

ranno.kivistik@gmail.com

+372 53 983 108

SISSEJUHATUS

Maanduspaigaldis on õhuliini osa, mille eesmärk on tagada liini töökindlus, kaitse pikselöögi eest ja inimese ohutus rikkeolukorras. Käesolev lõputöö uurib maanduspaigaldisele esitatavaid nõudeid ning arvutusmeetodeid, millega maanduspaigaldise projekteerimisülesandeid lahendada. Samuti otsitakse kirjandusest vastuseid projekteerimise käigus tekkinud küsimustele – näiteks lühisvoolu jagunemine lühisekohas.

Töö on jaotatud kolmeks põhiosaks sarnaselt standardis EVS-EN 50341-1:2013 püstitatud kolmele maanduspaigaldise põhinõudele, mille kohaselt peab maanduspaigaldis [1]:

- a) tagama mehaanilise tugevuse ja korrosioonikindluse, pidades kinni lubatud vähimatest mõõtmetest ning termiliselt vastu pidama suurimale arvutuste teel saadud lühisvoolule;
- b) tagama personali ohutuse, mis puutub maalühise kestel tekkivatesse sammu- ja puutepingetesse.
- c) maanduspaigaldis peab tagama liini töökindlusest tulenevad nõuded (piksekaitsetrossist möödalöögi määr, vastusuunaliste ülelöökide määr).

Töö esimeses peatükis uuritakse milliseid nõudeid tuleb järgida, et ehitatav maanduspaigaldis peaks vastu mehaanilistele jõududele, korrosioonile ja maanduspaigaldist läbivate voolude termilisele toimele. Samuti uuritakse peatükis voolu jagunemist lühisekohas piksekaitsetrosside ja maa vahel, mis on varasemalt projekteerimisel olnud murekoht.

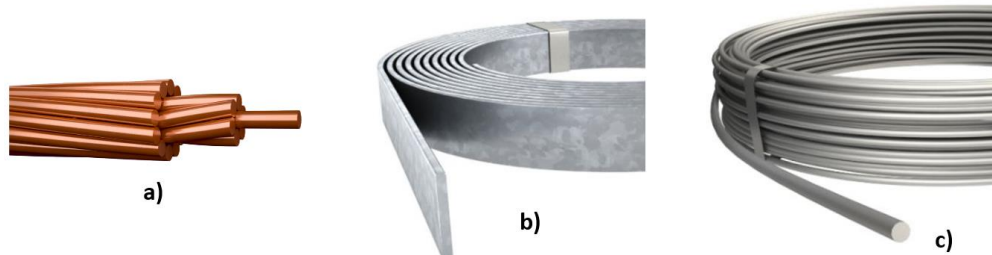
Teises peatükis vaadeldakse inimese ohutuse seisukohast ohutute puute- ja sammupingete tagamist lühise korral masti maanduspaigaldises. Peatükis modelleeritakse kaheaheelalise 110kV õhuliini maanduspaigaldist piirkonnas, kus inimese viibimine on väga tõenäoline. Peatükis uuritakse mastide vundamentide kasutamist maanduritena ja töötatakse välja nõuetekohane ohutu maanduspaigaldise lahendus konkreetsesse asukohta. Puute- ja sammupingete modelleerimiseks kasutatakse tarkvara XGSLab.

Kolmandas peatükis uuritakse maanduspaigaldise dimensioneerimist liini töökindluse seisukohast. Äikese korral on oluline tagada maanduspaigaldise efektiivne toimimine, et vältida ja minimeerida isolatsiooni ülelööke. Liini töökindlust kirjeldatakse piksekaitsetrossist möödalöökide ja vastusuunaliste ülelöökide määraga. Peatükis vaadeldakse millised tegurid mõjutavad vastusuunaliste ülelöökide määra ning kuidas mõjutab masti maandustakistus liini töökindlust äikese korral. Uuritakse töökindluse hindamiseks kasutatavaid meetodeid ja hinnatakse vaadeldava liini töökindlust programmiga IEEE Flash.

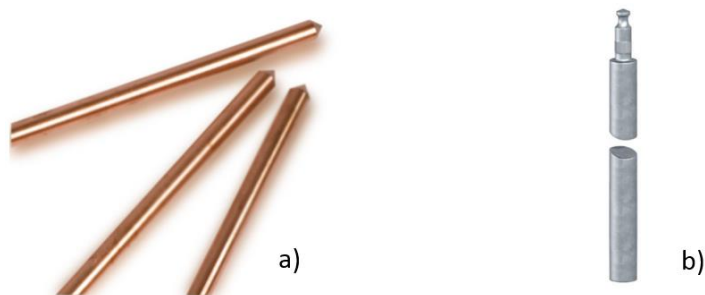
1. Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt maandusjuhi vastupidavusest

Maanduspaigaldiseks nimetatakse maandurite, maandusjuhtide ja potentsiaaliühtlustusjuhtide omavahel juhtivalt ühendatud kohalikku, piiratud ulatusega elektripaigaldist. Enamasti koosneb maanduspaigaldis pinnasesse kaevatud või sellesse surutud ühest või mitmest rõht-, püst- või kaldelektroodist. Maandusjuhi ehk elektroodi vastupidavust hinnatakse kolmest vaatenurgast – mehaaniline tugevus, korrosioonikindlus ja termiline tugevus. Maandusjuhile esitatavad nõuded on sätestatud standardis EVS-EN 50341-1:2013 [1].

Maandureid saab jaotada paigaldusviisi järgi rõhtmaanduriteks ning püst- ja kaldmaanduriteks. Samuti saab maandureid liigitada nende ristlõikekuju järgi, näiteks riba, ümarjuht, osajuhtidest koosnev juhe. Ehituspraktikas on levinuimad rõhtmaandurid paljast vasest kiudjuhid ja kuumtsingitud terasest ümar- ja ribajuhid (Joonis 1.1). Püstmaanduritena kasutatakse kuumtsingitud ja galvaanilise vaskmantliga terasest püstvarraselektroode (Joonis 1.2).



Joonis 1.1 Levinuimad rõhtmaandurid: a) Paljast vasest osajuhtidest koosnev juhe; b) kuumtsingitud terasest ribajuht; c) kuumtsingitud terasest ümarjuht [2]



Joonis 1.2 Terasest püstvarraselektroodid: a) galvaanilise vaskmantliga; b) kuumtsingitud [2]

1.1 Maandusjuhi mehaaniline tugevus

Mehaanilise tugevuse all mõistetakse maandusjuhi vastupidavust mehaanilistele jõududele ja korrosioonile. Maanduselektroodid peavad vastu pidama nii paigaldamisaegsetele, kui ka tavatalitluses esinevatele mehaanilistele jõududele. Maandusjuhi valikul sätestab standard EVS-EN 50341-1:2013 minimaalsed lubatavad juhtide ristlõiked tulenevalt elektrijuhtivusest ja mehaanilisest tugevusest, milleks on [1]:

- Vase puhul 16mm²
- Alumiiniumi puhul 35mm²
- Terasa puhul 50mm²

Korrosioonikindluse seisukohalt peavad pinnasega vahetult kokku puutuvad maanduselektroodid olema materjalidest, mis on võimelised vastu pidama korrosioonile (keemilistele või bioloogilistele mõjutustele, oksüdeerumisele, galvaaniliste paaride tekkimisele ja elektrolüüsile). Standardi jaotises G.2 on täpsustatud maanduritele materjal ja vähimad mõõtmed mehhaanilise tugevuse ja korrosioonikindluse seisukohalt, sõltuvalt nende tüübist [1].

Tabel 1.1 Maanduselektroodide materjal ja vähimad mõõtmed mehhaanilise tugevuse ja korrosioonikindluse tagamiseks [1]

Maanduselektroodi tüüp		Materjal		Vähimad mõõtmed				
				Põhimaterjal			Kate	
				Diameeter mm	Ristlõige mm ²	Paksus mm	Üksik-mõõtmine µm	Keskmine µm
Rõht- maandurid	Kiudjuht	Vask	paljas	1,8 ^a	25	-	-	-
	Riba	Teras	kuumtsingitud	-	90	3	-	70
	Ümarjuht			10	-	-	-	50
Püst- maandurid	Ümarjuht	Teras	galvaanilise vaskmantliga	14,2	-	-	90	100
	Ümarjuht	Teras	kuumtsingitud	16	-	-	63	70

^a Üksiku kiu läbimõõt

Lisaks maanduri materjali nõuetekohasusele tuleb pöörata tähelepanu valitud maandurite ühendamisele. Maanduselektroodide võrgu juhtivate osade kokkuühendamisel ühtseks võrkmaanduriks peavad ühenduslülid olema selliste mõõtmetega, mis tagavad neile elektroodidega võrdse elektrilise juhtivuse ning mehaanilise ja termilise tugevuse. Maandurid ja nende ühendused ei tohi moodustada galvaanilisi paare [1].

Galvaanilised paarid tekivad erinevate metallide kokku ühendamisel. Maanduspaigaldises on põhiliseks ohuks vasest ja vaskmantliga terase kokku ühendamine tsingitud terasega. Galvaanilise ehk elektrokeemilise korrosiooni vältimiseks peaks maanduspaigaldise ehitama ühest materjalist. Kui see ei ole võimalik, tuleb korrosioonikahjustuste vähendamiseks ja vältimiseks kasutada spetsiaalseid tinatatud ühendusklemme ja korrosioonitõrjelinti elektrolüütide eemale hoidmiseks ühenduskohast [3].

1.2 Maandusjuhi termiline tugevus

Standardi EVS-EN 50341-1:2013 jaotises G.3 kirjeldatud meetodikale, tuleb vähem kui 5s jooksul katkestatavate maaühendusvoolude korral maandusjuhi ja maandurite ristlõige arvutada valemi (1.1) abil [1].

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t_F}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (1.1)$$

kus A – maanduri ristlõige, mm^2 ,

I – juhi voolu efektiivväärtus, A ,

K – materjalikonstant, $A \cdot \frac{\sqrt{s}}{mm}$,

β – materjalikonstant, $^{\circ}C$,

t_F – maaühendusvoolu kestus, s ,

θ_i – ümbritsev temperatuur, $^{\circ}C$,

θ_f – maksimaalne lühisel lubatav lõpptemperatuur, $^{\circ}C$.

Tabel 1.2 Materjalikonstandid maandusjuhi ja maandurite arvutamiseks [1]

Materjal	$\beta / ^{\circ}C$	$K / A \cdot \frac{\sqrt{s}}{mm}$
Vask	234,5	226
Alumiinium	228	148
Teras	202	78

Vastavalt lähteandmetele peavad maandusjuhid vastu pidama lühisvoolude termilisele toimele 1 s kestel. Maksimaalsed lühisvoolud pingetel 330 kV ja 110 kV on vastavalt 40 kA ja 25 kA. Lühise suurus lühisekohas sõltub asukohast ja vaadeldava punkti lühistakistusest. Täpsed lühisvoolud liini lõikes täpsustatakse Elingiga projekteerimise käigus. Kuna on teada, et lühisvoolud liini lõikes varieeruvad ei ole otstarbekas dimensioneerida kogu liini mastide maanduskontuure 40 kA

suurusele lühisvoolule. Sellest tulenevalt on termilise taluvuse seisukohast arvatud maandusjuhtide vajalikud ristlõiked erinevate võimalike lühisvoolude korral.

Tavaoludes, kui maandusjuht asub õhus ja maandur pinnases, võib juhi algtemperatuuriks võtta 20 °C ja lõpptemperatuuriks 300 °C [1]. Betoonelementides paiknevate maandusjuhtide lubatud kuumenemine on 60 °C [4]. Järgnevalt on arvatud valemi (1.1) alusel maandusjuhi minimaalsed ristlõiked pinnases (vt. Tabel 1.3) ja betoonelementides (vt. Tabel 1.4).

Tabel 1.3 Maanduri vajalik ristlõige temperatuuri tõusul 20°C kuni 300°C

Lühisvoolu suurus kA	Juhi vajalik ristlõikepindala masti maanduspaigaldist läbivale voolule mm ²	
	Teras	Vask
2	28	10
4	57	20
6	85	30
8	114	41
10	142	51
12	170	61
20	284	103
25	355	128
40	568	205

Tabel 1.4 Maanduri vajalik ristlõige temperatuuri tõusul 20°C kuni 80°C

Lühisvoolu suurus kA	Juhi vajalik ristlõikepindala masti maanduspaigaldist läbivale voolule mm ²	
	Teras	Vask
2	52	19
4	105	39
6	157	57
8	210	77
10	262	96
12	315	115
20	524	192
25	655	240
40	1048	385

1.3 Lühisvoolu jagunemise põhimõtted lühisekohas

Maanduspaigaldise dimensioneerimisel termilise tugevuse ja inimese ohutuse seisukohalt masti läheduses on oluline maanduspaigaldist läbiv vool. Maandatud neutraaliga võrgus tekib maanduspaigaldist läbiv vool ühe- ja kahefaasilise maalühise korral. Maalühisvoolu kirjeldatakse nulljärgnevusvoolude summaga $3I_0$, mille väärtuse annab võrguettevõtja. Nulljärgnevusvoolu arvutamiseks kasutatav lühistakistus sisaldab endas piksekaitsetrossi, maapinna ja masti

maandustakistuste mõju. Seega sisaldab nulljärgnevusvoolude summa $3I_0$ endas nii piksekaitsetrosse kui maanduspaigaldist läbivat voolu. Kahe piksekaitsetrossiga liini korra kasutatakse nulljärgnevustakistuse arvutamiseks valemit (1.2) [5].

$$Z'_{0S2E} = Z'_{0S} - \frac{3(Z'_{CE})^2}{Z'_{EE}} \quad (1.2)$$

kus Z'_{0S} - nulljärgnevustakistus piksekaitsetrossideta liini korral
 Z'_{CE} - faasijuhtide ja piksekaitsetrosside vastastikune näivtakistus,
 Z'_{EE} - piksekaitsetrosside vastastikune näivtakistus

Suurused Z'_{0S} , Z'_{CE} , Z'_{EE} avalduvad vastavalt valemitega (1.3), (1.4) ja (1.5) [5]:

$$Z'_{0S} = R'_0 + jX'_0 = \frac{R'_1}{n_2} + \frac{3}{4} \pi f \mu_0 + jf \mu_0 \left(3 \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_B D_M^2}} + \frac{\mu_T}{4n_2} \right) \quad (1.3)$$

$$Z'_{CE} = \frac{\pi f \mu_0}{4} + jf \mu_0 \cdot \ln \left(\frac{\delta}{D_{ME}} \right) \quad (1.4)$$

$$Z'_{EE} = \frac{R'_E}{2} + \frac{\pi f \mu_0}{4} + jf \mu_0 \cdot \left[\ln \left(\frac{\delta}{\sqrt{r \cdot D_{EE}}} \right) + \frac{\mu_E}{8} \right] \quad (1.5)$$

kus R'_0 – faasijuhi takistus, Ω/km ,
 n_2 – lõhisfaasijuhtide arv,
 f – sagedus, Hz ,
 μ_0 – magnetiline konstant, $4\pi \cdot 10^{-4} H/km$,
 r_B – faasijuhi ekvivalentne raadius, m ,
 D_M – faasijuhtide geomeetriline vahekaugus, m ,
 μ_T – faasijuhi magnetiline läbitavus,
 δ – maasulgevoolu teekonna pikkus, m ,
 ρ_E – maapinna keskmine eritakistus, Ωm ,
 D_{ME} – faasijuhtide ja piksekaitsetrosside keskmine geomeetriline vahekaugus,
 R'_E – piksekaitsejuhi takistus, Ω/km ,
 μ_E – piksekaitsejuhi magnetiline läbitavus,
 r – piksekaitsejuhi raadius, m .

Maasulgevoolu teekonna pikkuse δ ja faasisuhtide ja piksekaitsetrosside keskmine geomeetrilise vahekauguse D_{ME} arvutamiseks kasutatakse valemeid (1.6) ja (1.7). D_{ME} arvutamisel tuleb arvestada liini konfiguratsiooniga [5].

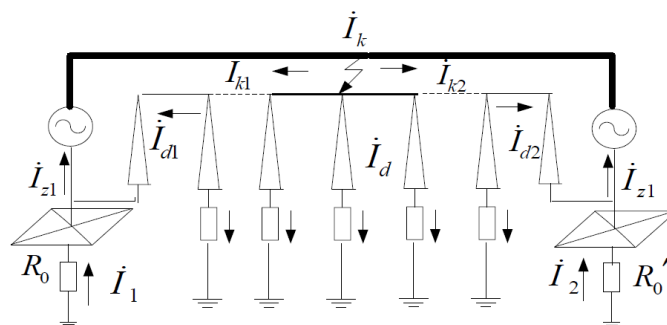
$$\delta = \frac{1,85}{\sqrt{\frac{2\pi f \mu_0}{\rho_E}}} \quad (1.6)$$

$$D_{ME} = \sqrt[6]{D_{AE1} \cdot D_{BE1} \cdot D_{CE1} \cdot D_{AE2} \cdot D_{BE2} \cdot D_{CE2}} \quad (1.7)$$

Elering AS kasutab lühiste arvutamiseks programmi CAPE, mille tutvustuses [6] on peatükk liini keskel toimuva lühise kohta - *midline fault analysis*. Programmi arvutusmeetod tugineb sõlmejuhtivuste maatriksil ja Thevenin'i ekvivalentidel. Piksekaitsetrosside mõju võtab programm arvesse trosside juhtivuse arvestamisega nulljärgnevustakistuse arvutamisel, kuid trosside voolu eraldi välja ei arvutata. Piksekaitsetrosside ja masti maanduspaigaldist läbiva voolu saab eraldada käsitsi liinikonstantide tabelist. Mastide maandustakistuste arvestamiseks ja voolude jagunemise kuvamiseks tuleb arvutusmetoodikat modifitseerida. Sellest tulenevalt on puute- ja sammupingete uurimiseks voolude jagunemist lühisekohas vaja lähemalt uurida [6].

1.3.1 Lühisvoolu jagunemine 220 kV liini näitel

Voolude jagunemist konkreetsel liinil on uuritud allikas [7]. Lühis 220 kV liinil toidetakse mõlemast alajaamast. Lühisvoolud liiguvad mööda faasisuhtmeid lühisekohta ning avalduvad seal punktis lühisvooluna \dot{I}_k (vt. Joonis 1.3) mis siis jaguneb piksekaitsetrossidesse ja masti maanduspaigaldisse. Kuna piksekaitsetrossid dimensioneeritakse taluma kogu lühisvoolu \dot{I}_k on need termilise tugevuse seisukohalt suure ristlõikega ja sellest tulenevalt väiksema takistusega. Seega voolab suurem osa lühisvoolust \dot{I}_k mööda piksekaitsetrosse (\dot{I}_{k1} ja \dot{I}_{k2}) lähipaiknevatesse mastide ja alajaamade maanduspaigaldisse. Ainult murdosa voolust läbib rikkeline masti maanduspaigaldist. Vool \dot{I}_d (vt. Joonis 1.3) on masti maanduspaigaldist läbiv vool [7].



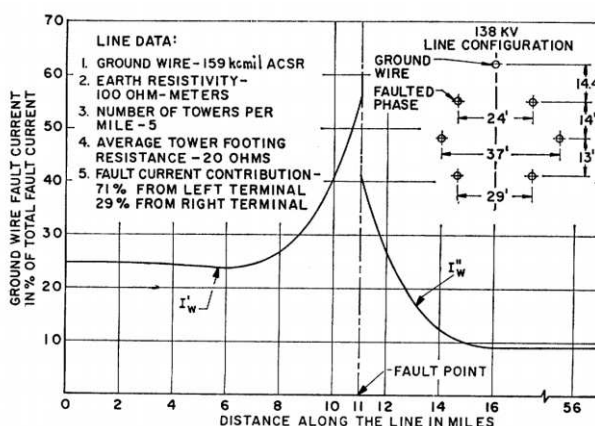
Joonis 1.3 Analüüs kasutatud lühisvoolu jagunemise põhimõtteskeem lühise korral [7]

Allikas [7] on simulatsiooni on kantud 25,77 km pikk 220 kV liin mis sisaldab 61 masti. Võttes arvesse liini parameetrid, visangute pikkused (200-450 m), mastide maandustakistused ($4-20 \Omega$), pinnase eritakistuse ($500 \Omega\text{m}$) on analüüsi käigus selgunud, et piksekaitsetrossi mööda voolab umbes 7 korda suurem osa lühisvoolust, kui rikkeline masti maanduspaigaldises. Simulatsioonis tekib lühis liini keskel, mastis 11. Arvutusliku lühisvoolu väärtus rikkelses mastis on 16,9 kA ja masti maanduspaigaldist läbiv vool 2,2kA. Seega voolab 14,7 kA piksekaitsetrosse mööda õhuliini teistesse mastidesse [7].

Ühe näite põhjal ei ole õige järeldada, et maanduspaigaldist läbiv vool on $1/8$ kogulühisvoolust. Masti maanduspaigaldist läbiva voolu väiksust mõjutab asjaolu, et uuritud jagunemine toimus liini keskel ja maapinna eritakistus oli küllatki suur - $500 \Omega\text{m}$ - mille tulemusena võib suurem osa lühisvoolust liikuda mööda piksekaitsetrosse tagasi alajaama väikese takistusega maanduspaigaldisse. Eling AS mudelites on võetud keskmiseks pinnase eritakistuseks $100 \Omega\text{m}$, mis peaks suurendama masti maanduspaigaldist läbiva voolu suurust.

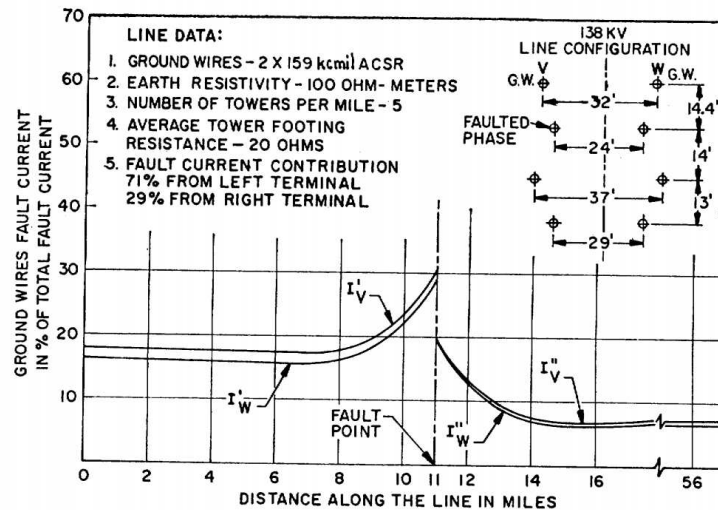
1.3.2 Lühisvoolu jagunemine 138 kV liini näitel

Allikas [8] on uuritud 138 kV liini, mis on 56 miili ehk 90 km pikk. Pinnase eritakistus on $100 \Omega\text{m}$ ja keskmine masti maandustakistus 20Ω . Maste on ühes miilis 5 masti, visangu pikkus ≈ 300 m. Lühisekoht asub 11 miili ehk 17,7 km kaugusel esimesest alajaamast. Arvutustulemustest selgus, et ühe piksekaitsetrossiga konfiguratsiooni korral liigub $\approx 55\%$ lühisvoolust mööda piksekaitsetrossi esimese alajaama suunas ja $\approx 41\%$ teise alajaama suunas. Rikkelse masti maanduspaigaldist läbib 4% allesjäänud lühisvoolust (vt. Joonis 1.4). Igas järgnevas mastis liigub osa voolu läbi masti maanduskontuuri kuni, lühisvool piksekaitsetrossis läheneb liini lõikes konstantsele väärtusele umbes 3 miili ehk 5 km kaugusel lühisekohast [8].



Joonis 1.4 Lühisvoolu jagunemine ühe piksekaitsetrossi korral [8]

Kaheaheelalise liini korral on piksekaitsetrosside resulteeruv takistus väiksem ning masti maanduspaigaldist läbiv vool väheneb veelgi. Saadud tulemuste kohaselt liigub 58% lühisvoolust mööda piksekaitsetrosse esimesse alajaama suunas ning ca 40% lühisvoolust teise alajaama suunas ning alles jäänud 2% liigub masti maanduspaigaldisse [8].

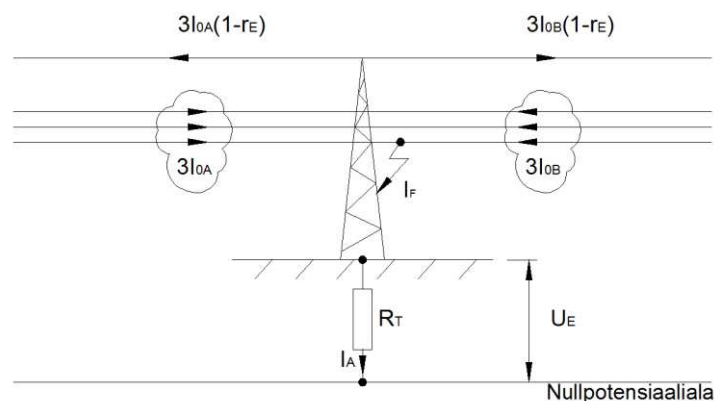


Joonis 1.5 Lühisvoolu jagunemine kahe piksekaitsetrossi korral [8]

Antud simulatsioonis on keskmine masti maandustakistus 20Ω . Väiksemate masti maandustakistuste näiteks ca 5Ω puhul on masti maanduspaigaldist läbiv vool suurem.

1.3.3 Lühisvoolu jagunemine käsiraamatu näitel

Liini keskel tekkivat lühist toidetakse kahest süsteemiosast (vt. Joonis 1.6). Süsteemiosad A ja B toidavad lühist nulljärgnevusvooludega $3I_{0A}$ ja $3I_{0B}$. Lühisekohas avaldub lühisvool I_F voolude $3I_{0A}$ ja $3I_{0B}$ summana. Mastis jaguneb vool kolmeks osaks: masti maanduspaigaldist läbiv vool I_A ning mööda piksekaitsetrosse voolav vool $3I_{0A}(1-r_E)$ ja $3I_{0B}(1-r_E)$, kus r_E on piksekaitsetrosse arvestav vähendustegur. Masti maandustakistus on R_T ning maanduspinge U_E [5].



Joonis 1.6 Lühisvoolu jagunemise põhimõtteskeem lühise korral [5]

Piksekaitsetrosse arvestava teguri r_E arvutamiseks kasutatakse valemit (1.8), mis arvestab piksekaitsetrossi impedantsi ja faasijuhtmete ja piksekaitsetrossi vastastikust impedantsi. Tulemusena saadakse tegur, mis kirjeldab maasulgevoolude ja piksekaitsetrossi voolude suhet. Liini konfiguratsioon ja piksekaitsetrosside arv võetakse arvesse Z_{CE} ja Z_{EE} . Maanduspaigaldist läbiv vool I_E arvutatakse valemiga (1.9) [5].

$$r_E = \frac{I_E}{3I_0} = \frac{1 - I_{ES}}{3I_0} = 1 - \frac{Z_{CE}}{Z_{EE}} \quad (1.8)$$

kus I_{ES} - piksekaitsetrossi vool,

$3I_0$ – nulljärgnevusvoolude summa,

Z_{CE} – faasijuhtide ja piksekaitsetrosside omavaheline impedants,

Z_{EE} – piksekaitsetrosside impedants

$$I_E = r_E \cdot I_F \quad (1.9)$$

Eelnevatele valemitele tuginedes on käsiraamatus toodud tüüpsete trossimarkide kasutamisel levinud piksekaitsetrossi tüübist tulenevad vähendustegurid järgmised:

Tabel 1.5 Piksekaitsetrosside vähendustegurid [5]

Piksekaitsetrossi tüüp	AL1/ST1A						BZ II		ST1A	
Piksekaitsetrossi ristlõige	304/49	264/34	243/39	184/30	97/56	44/32	50	70	50	70
Vähendustegur r_E	0,61	0,62	0,62	0,62	0,70	0,77	0,75	0,69	1	0,97

1.3.4 Lühisvoolu jagunemise kokkuvõte

Liinil tekkiva maalühise korral sulgub vooluring läbi piksekaitsetrosside, masti maanduspaigaldiste ja maapinna kaudu. Sellest tulenevalt ei liigu kogu maalühise korral tekkiv nulljärgnevusvool läbi masti maanduspaigaldise, vaid jaguneb piksekaitsetrosside ja masti maanduspaigaldiste vahel. Eelmistes peatükkides toodud näidete põhjal selgus, et masti maanduspaigaldist läbiv vool sõltub paljudest teguritest - maapinna takistus, mastide takistus, piksekaitsetrosside takistus, lühise kaugus alajaamadest ja visangute pikkus.

Allikates [9], [10] ja [11] on lähemalt kirjeldatud voolude jagunemist selgitavat tausta ja teooriat. Kuna tegu on keerukate arvutustega saab voolude täpset jagunemist arvutada vaid programmidega ning ka sellisel juhul peavad kätte saadavad olema kõik vajalikud algandmed.

Harku-Lihula-Sindi projektis kasutatavad piksekaitsetrossid varieeruvad lõiguti sõltuvalt lühisvoolude suurusest ja nende termilisest toimest. Antud lõputöös kasutatakse edaspidi lühisvoolu jagunemise hindamiseks käsiraamatus [5] ja Rootsi põhivõrgu ettevõtte Svenska Kraftnät standardites kasutatud suurust, mis kahe piksekaitsetrossi korral on ca 40% lühisvoolust [12]. Võrreldes eelmistes peatükkides maanduspaigaldist läbiva voolu osakaalu kogu lühisvoolust - 13% (vt.1.3.1) ja 4% (vt. 1.3.2) on Rootsi standardis mainitud 40% tunduvalt suurem, seega peaks antud number arvestama kõikide võimalike olukordadega ja tekkiv viga on positiivses suunas. See tähendab, et maanduspaigaldis projekteeritakse vastu pidama ja ohutu olema suurematele lühisvooludele, kui seal tegelikult tekkida saab. Vajadusel saab täpsemate arvutuste olemasolul vaadeldavat numbrit vähendada.

2. Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt inimese ohutusest

Inimese ohutus sõltub inimkeha läbiva voolu suurusest. Voolu suurus sõltub omakorda inimesele rakendatud pingest ja inimese takistusest. Inimene võib pinge alla sattuda peamiselt kahel viisil. Esimene võimalus on puudutada pinge alla sattunud seadet käega. See tähendab, et vool liigub inimese käest jalgadesse. Teine võimalus on astuda kahe erineva potentsiaaliga punkti vahel. Sellises olukorras läbib vool inimese jalgu. Sõltuvalt pinge alla sattumise viisist on inimese takistus erinev, ning seega ka inimese keha läbiv vool. Standardis EVS-EN 50341-1:2013 on eelpool kirjeldatud pinge alla sattumise viisid defineeritud vastavalt puutepinge ja sammupinge.

Puutepinge all mõistetakse maaühendusel tekkinud maanduspinge osa, mille alla võib inimene sattuda, eeldades, et vool läbib inimese keha käest jalgadesse, kui rõhtkaugus pingealti osani on 1m. Sammupinge all mõistetakse maaühendusel tekkinud maanduspinge osa, mille alla võib inimene sattuda 1m pikkuse sammu korral, eeldades, et vool läbib inimese keha jalast jalga. Maanduspinge all mõistetakse pinget maanduspaigaldise ja nullpotentsiaaliala vahel [1].

Inimkeha takistus on väiksem, kui vool liigub käest jalgadesse ning voolu teekonnale jääb ka süda, seetõttu võetakse projekteerimisel aluseks ohutu puutepinge, kuna selles olukorras tekivad ohtlikumad voolud. Kui maanduspaigaldises on tagatud lubatav puutepinge on automaatselt tagatud ka lubatav sammupinge.

Lubatava puutepinge suurus sõltub ka rikke kestusest ehk ajast, mil inimese keha läbib vool. Standard EVS-EN 50341-1:2013 sätestab lubatavad puutepinge väärtused sõltuvalt rikke kestusest ja tüüpsetest paikadest.

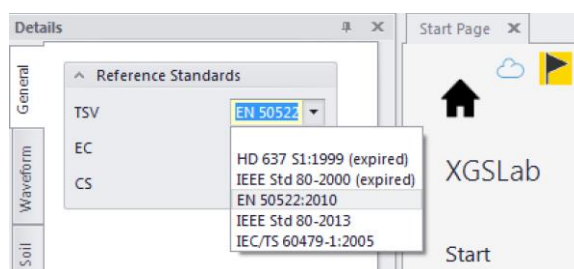
Järgnevates peatükkides vaadeldakse puute- ja sammupinge arvutamist programmiga XGSLab konkreetse maanduspaigaldises etteantud andmete alusel ja uuritakse ohutu maanduspaigaldise projekteerimist mõjutavaid parameetreid.

2.1 Programmi XGSLab tutvustus

Maandusarvutusteks kasutatav programm on arendatud Itaalia ettevõtte SINT Ingegneria Srl poolt. Programmi arendamine algas aastal 1990. Arvutusalgoritmid tuginevad Fourier'i reaksarendusele, Green'i funktsioonidele, Maxwell'i võrranditele ning Sommerfeld'i integraalidele. Programmil on neli moodulit, mis erinevad oma eesmärgi ja võimekuse poolest [13]:

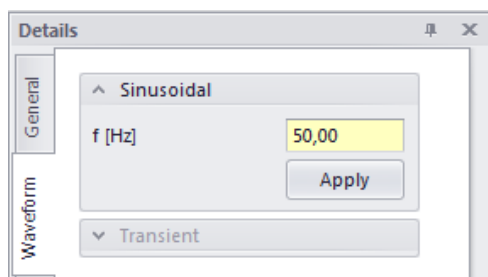
- GSA – Ground System Analysis - maanduspaigaldise arvutused võrgusagedusel, võimaldab uurida maanduspinget, lekkevoolu, maapinna potentsiaali, puute- ja sammupinget.
- GSA_FD – Ground System Analysis in the Frequency Domain - eelneva mooduli koosseisu lisandub võimekus analüüsida protsesse sagedustel kuni 10 MHz, katoodkaitse arvutused, magnetvälja ja elektromagnetiliste häiringute arvutused.
- XGSA_FD – Over and Underground System Analysis in the Frequency Domain - laiendab eelneva mooduli võimekust ka õhuliinidele. Lisanduvad äikesetoimeliste protsesside arvutustööriistad ja maaühendusvoolude jagunemise arvutused.
- XGSA_TD - Over and Underground System Analysis in the Time Domain, laiendab eelneva mooduli võimekusi siirdeprotsesside uurimiseks.

Lõputöös kasutatav moodul on GSA_FD. Simulatsiooni lähteandmena määratakse kasutatav standard, mille alusel arvutatakse lubatavad puute- ja sammupinged. Programm sisaldab viite standardit, millele tuginedes kuvatakse arvutustulemused. Käesolevas simulatsioonis kasutatakse standardit EN 50522:2010. Joonis 2.1 näitab programmi standardite valiku võimalusi.



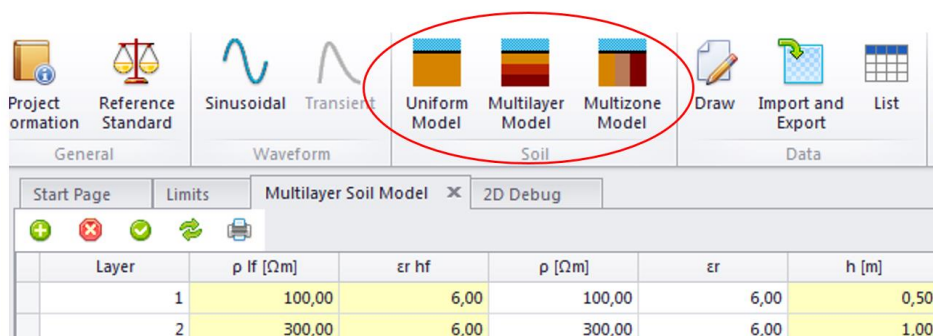
Joonis 2.1 Kasutatava standardi valimine XGSLab-is

Järgmise lähteandmena määratakse lühisvoolu lainekuju ja sagedus, mille juures maanduspaigaldise käitumist uuritakse. Puute- ja sammupingete arvutused teostatakse võrgusagedusel. GSA_FD moodulis ei saa uurida maanduspaigaldise käitumist siirdeprotsesside korral.



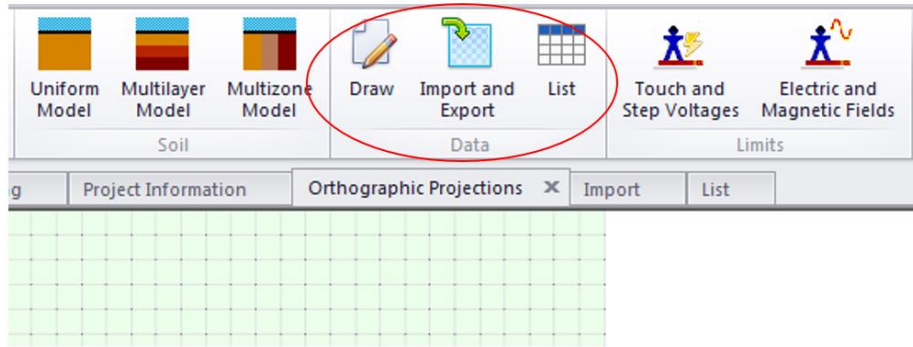
Joonis 2.2 Lainekuju valimine XGSLab-is

Pinnaseparameetrite arvesse võtmiseks on kolm erinevat võimalust. *Uniform* mudelit kasutatakse, kui vaadeldav maanduspaigaldis asub ühetaolises pinnases. *Multilayer* mudelit kasutatakse, kui maanduspaigaldis asub pinnases, kus pinnasekihid vahelduvad maanduspaigaldise ristlõikes – näiteks pealmine kiht muld, sügavamal kruus. *Multizone* mudelit kasutatakse olukordades, kus maanduspaigaldis läbib erinevate pinnastega piirkondi - näiteks kaablitega paralleelkulgeva maandusjuhi takistuse arvutamisel, kus kaabel võib kulgeda liivas, soos, päekivis ja vees. Pinnasekihtide põhiparameetriteks on pinnase eritakistus, pinnase magnetiline läbitavus ja pinnasekihi paksus.



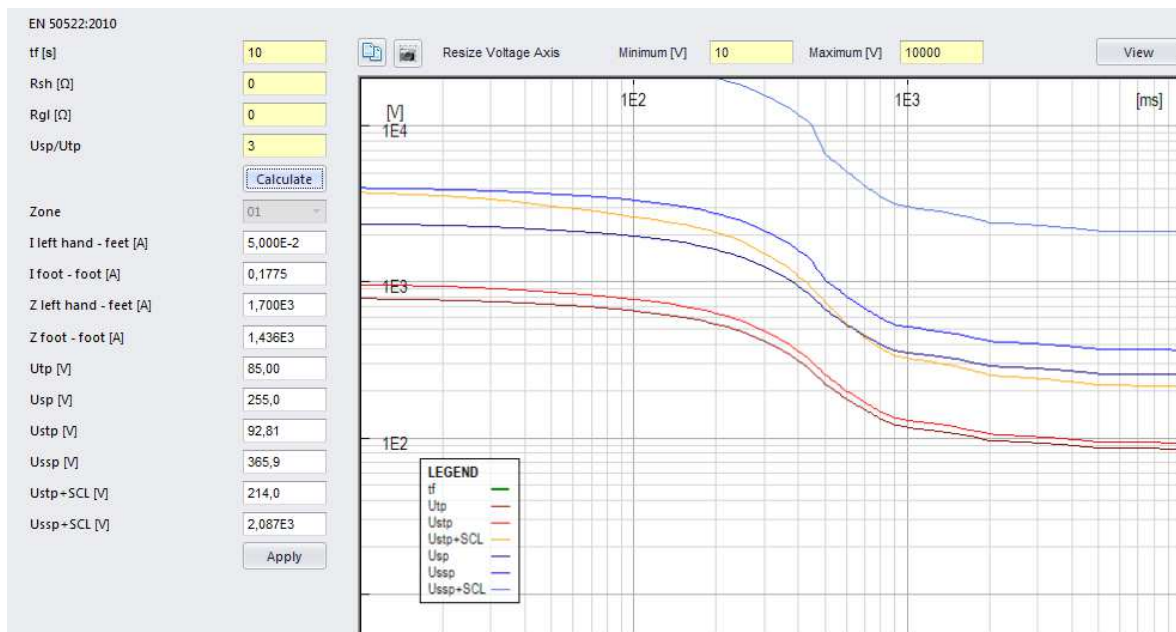
Joonis 2.3 Pinnasekihtide sisestamine XGSLab-is

Maanduspaigaldise füüsiline kuju, konfiguratsioon ja materjalid sisestatakse programmi kas käsitsi või .DXF joonise alusel. Käsitsi määratakse maanduspaigaldise parameetrid elementide tabeli ja joonistustööriista abil. Joonise importimisel võetakse elektroodide koordinaadid joonisest ning eri *layer*-l asuvate elektroodide ristlõiked ja materjal täpsustatakse programmis.



Joonis 2.4 Maanduspaigaldise kuju sisestamine XGSLab-i

Järgmise sammuna arvutatakse lubatavad puute- ja sammupinged. Sisestatakse rikke kestus, kinda ja jalanõu takistus ning puute- ja sammupinge lubatud suhe. Sammupinged ei ole standardites määratletud, seega on kasutajal võimalik määrata mitu korda on lubatav sammupinge suurem lubatavast puutepingest. Sisestatud andmete põhjal koostab programm graafiku standardijärgsete lubatud puute- ja sammupinge väärtustest sõltuvalt maalühisvoolu kestusest.



Joonis 2.5 Lubatava puute- ja sammupinge arvutamine XGSLAB-is

Inimese ohutuse seisukohalt on kõige ohtlikum südant läbiv vool. Lubatav sammupinge võib olla kümneid kordi suurem, kui puutepinge, sest vool liigub jalast jalga ja süda ei jää voolu teekonnale. Samuti suurendab lubatavat pinget jalanõude jadatakistus sammupinge puhul. Standardi IEC 60479-1:2005 tabelis 12 on toodud südant läbiva voolu kordaja väärtuseks 0,04 (maaühenduse kestus 0,5 sekundit), kui vool läbib inimese keha vasakust jalast paremasse jalga. Tuginedes sellele suurusele võib puute- ja sammupinge vaheline kordaja olla ligikaudu 20. Varasematele

rahvusvahelistele standarditele tuginedes, kasutatakse programmi vaikeväärtusena sammu ja puutepinge suhtena kordajat 3, mida loetakse konservatiivseks ja ohutuks [13].

2.2 Pinnase eritakistus

Erinevad pinnased omavad erinevat eritakistust. Sõltuvalt pinnase tüübist, osakeste suurusest, osakeste tihedusest ja niiskussisaldusest muutub ka pinnase eritakistus. Tabel 2.1 kajastab pinnase eritakistuse mõõtmisel sageli saadud tulemuste väärtusi vahelduvvoolu puhul [1]:

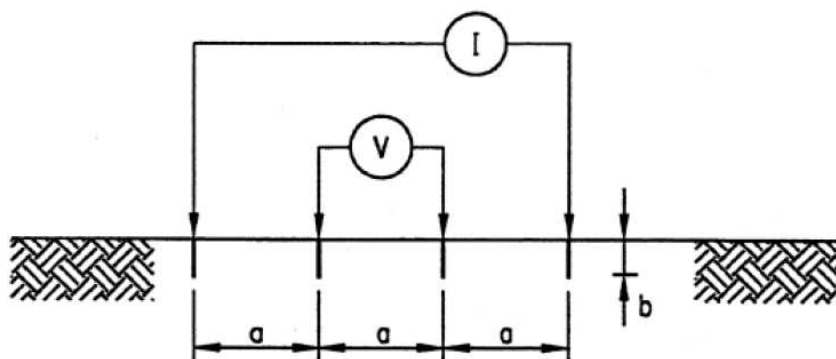
Tabel 2.1 Pinnase eritakistused [1]

Pinnase tüüp	Pinnase eritakistus Ωm
Soine pinnas	5 kuni 40
Liivsavi, savi, mustmuld	20 kuni 200
Liiv	200 kuni 2000
Kruus	2000 kuni 30000
Murenenud kivim	Alla 1000
Liivakivi	2000 kuni 3000
Graniit	kuni 50000
Moreen	kuni 30000

2.2.1 Wenner'i meetod

Üks levinuimaid meetodeid pinnase eritakistuse mõõtmiseks on Wenner'i meetod. Pinnase tüübile tuginevate eritakistuste alusel tehtud maandusarvutused on ligikaudsed ja ei arvesta kohaliku pinnase eripäraga, seetõttu annab pinnase eritakistuse mõõtmine konkreetses asukohas täpsema tulemuse.

Wenner'i meetod tugineb pinnase takistuse mõõtmisel nelja järjestikuse sirgjoonelisel paigaldatud elektroodi abil. Elektroodid surutakse maasse sügavusele b ja elektroodidel on võrdne vahekaugus a . Kaks keskmist elektroodi on pingelektroodid ja mõõdavad elektroodide vahelist pinget. Kaks välimist elektroodi on vooluelektroodid, mis mõõdavad pinnast läbivat voolu. Nende väärtuste põhjal saadakse takistus R . Wenner'i meetodi põhimõtteskeem on toodud järgneval joonisel (vt. Joonis 2.6) [3].



Joonis 2.6 Wenner'i meetodi skeem [3]

Mõõtetulemusest ja elektrootide paigutusest arvutatakse pinnase eritakistus valemiga (2.1) [3]:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.1)$$

kus ρ_a – pinnase eritakistus Ωm ;

R – mõõdetud takistus Ω ;

a – elektrootide vaheline kaugus m ;

b – elektrootide sügavus m .

Väikeste vahekauguse korral voolab suurem osa voolust mööda pinnase pindmist kihti, kuid vahekauguste suurendamisel läbib vool pinnast sügavamalt. Üldiselt lähtutakse sellest, et mõõdetud takistus väljendab pinnase takistust sügavusel a . Seega saadakse pinnase eritakistuse arvutustel pinnase eritakistus sügavusel a [3].

2.3 Vundamentide kasutamine maanduritena

Standardi EVS-EN 50341-1:2013 kohaselt on juhtivast materjalist mastid põhimõtteliselt maandatud oma vundamendi kaudu ja maandussüsteemi ühe osana võib kasutada betoonvundamentide terasarmatuuri ja terasvaiu. Vundamendimaandureid võib vaadelda kui maanduselektroode, mis paiknevad vundamenti ümbritsevas pinnases [1].

Teadaolevalt võttis vundamendi kasutamise maandurina kasutusele Herb Ufer, kes Teise maailmasõja ajal projekteeris maanduspaigaldise lõhkeainete hoidlale Tucsonis, Arizona osariigis. Maanduspaigaldis pidi kaitsma hoonet ja selle sisu staatiliste ja äikesetoimeliste voolude mõjule. Tema läbiviidud katsed näitasid, et betoneeritud maandusjuhid tagavad madalama ja püsivama maandustakistuse võrreldes otse pinnasesse süvistatud elektrootidega, eriti kuivemates pinnastes.

Sellest tulenevalt viidatakse kirjanduses sageli vundamentmaanduritele kui Uferi maandurile (Ufer grounding) [14].

1977. aastal avaldati IEEE artikkel, kus uuriti suurte voolude (0,5...2,6 kA) mõju betoneeritud maandusjuhtidele. Uurimustöö tulemusena kinnitati vundamentmaandurite madalat maandustakistust, kuid avastati, et suurte voolude toimel võib betoonelement kahjustada saada või lausa hävineda [14].

1975. aastal viidi läbi uurimustöö, mille käigus inspekteeriti 1414 kõrgepinge masti vundamente, mis toimisid vundamentmaanduritena. Uurimine näitas, et 90 vundamenti olid mõranenud. Sellele uuringule tuginedes on standardis IEEE Std 80 (alajaamade maanduspaigaldised) pühendatud peatükk, mis arutab vundamentmaandurite kasutamise positiivseid ja negatiivseid külgi [14].

Standardile IEEE Std 80 tuginedes, on betoon hügrokoopne (vettimav) materjal, mis käitub pinnases pooljuhtiva materjalina. Sõltuvalt niiskusesisaldusest on betooni eritakistus 30-200 Ωm . Kuna maandusjuhi maandustakistuse puhul on kõige kriitilisem just elektroodi vahetult ümbritsev pinnas, on betoneeritud maandusjuhi takistus väiksem vahetult pinnasesse süvistatud elektroodist. Betooni madala eritakistuse tõttu käitub betoneeritud maandusjuht sarnaselt maandusjuhile, mis paikneb pinnases, mille eritakistust on kemikaalidega vähendatud [3].

Projekteerimise seisukohalt on vundamentmaanduritel eeliseid ja puudusi, mis on loetletud järgnevates punktides ja millega tuleb arvestada:

- Vundamentmaanduri madal takistus on seletatav betooni suure ristlõike ning betooni madalama eritakistusega võrreldes, maasse süvistatud elektroodi ning seda ümbritseva pinnasega. Lisaks sellele imab betoon niiskust, mis tagab selle hea juhtivuse ka kuivades oludes [14].
- Vundamentmaanduri kahjustused on seletatavad betooni mittehomoogeense koostise ja niiskusesisalduse tõttu. Suurte maaühendusvoolude korral leiab vool koha, kus takistus betooni ja ümbritseva pinnase vahel on väikseim. Seda kohta läbiv vool aurustab betoonis sisalduva vee ning tekkinud rõhk põhjustab betooni murenemise ja mõranemise [14].
- Vundamentmaanduri kahjustusi saab seletada ka sarruse/armatuuri korrosiooni tõttu. Väikese alalisvoolu korral võib teras hakata roostetama ning roostes terase ruumala võib paisuda kuni 2,2 korda suuremaks algsest seisundist. Tekkivad rõhud, kuni 35 MPa,

tekitavad betooni murenemise ja mõranemise. Korrosiooni tekkelävi on 60V alalispinget, seega võib üldiselt jätta alalisvoolu poolt tekitatava korrosiooni mõjud arvestamata [3].

- Vundamendi eraldamine ehitisest on ebapraktiline ja peaaegu võimatu, sest isegi metalse ühenduse vältimisel on voolurada tagatud läbi betooni [14].

Kuna kõrgepingeliini masti ei ole võimalik isoleerida vundamendist, sest mast kinnitub ankrupoltidega otse vundamendile ja see tekitab metallilise ühenduse, ei vaadelda vundamente eraldiseisvate ja maandussüsteemist eraldatud elementidena. Ka majanduslikel kaalutlustel pole mõistlik ehitada maanduskontuuri arvestamata vundamente, sest elektrilise ühenduse tõttu toimivad need tahes tahtmata loomulike maanduritena. Seega tuleb projekteerimisel arvestada eeltoodud aspektidega ja projekteerida vundamendid algusest peale maanduritena toimima. Üheks sammuks on vundamendi sarruse kokku keevitamine, et tagada hea elektriühendus mööda sarrust. Teiseks meetmeks on sarruse elektrilise ühenduse tagamine mastiga. Selleks võib kasutada maandusjuhti, mis ühendab vundamendi sarrust mastiga, luues ankrugrupi ühendusele täiendava elektrilise ühenduse [14].

2.4 Vundamentide modelleerimine XGSLab-is

Vaadeldavas projekti lõigus on mastide vundamendid projekteeritud STRICTO PROJECT OÜ poolt. Erinevate koormusjuhtumite korral mõjuvad mastidele erinevad jõud. Need jõud kanduvad edasi masti vundamenti. Vundamentidele võivad mõjuda nii survekoormused, kui ka üleslükkekoormused. Näiteks nurgamasti puhul mõjub liini telje sisenurka jäävatele vundamentidele survekoormus ja välisnurka jäävatele vundamentidele üleslükkekoormus. Samas võib avariolukorras katkenud juhtmete tõttu koormuste jagunemine drastiliselt muutuda ning vundamendid peavad taluma ka neid koormusi vastavalt lähteülesandes ja standardites sätestatud korrale. Tulenevalt vundamentidele mõjuvatest jõududest varieeruvad vundamendi lahendused kogu projekti lõikes. Valdav osa vundamentidest on projekteeritud vaivundamentidena, kus mastile mõjuvad koormused suunatakse pinnasesse läbi injeksioonvaiade.

Vundamentmaandurite puhul on tegu betooni valatud elektroodidega. Programm võimaldab elektroode katta erinevate materjalidega, et saada võimalikult täpseid tulemusi. Andmebaasis on ka valikus niiske betoon, mille eritakistus jääb vahemikku 30...90 Ωm ning vaikeväärtus on 60 Ωm .

Arvutusalgoritm vaatleb elektroode elementidena ja seab elemendi mõõtmetele teatud piirangud. Elektrood, maandusjuht võib olla pikem kui element, sellisel juhul jagab programm elektroodi pikkuse lubatud pikkusega elementideks. Siiski on oluline arvestada, milliste elementide kuju juures

annab programm täpseid tulemusi. Üldiselt peab elemendi läbimõõt olema väike võrreldes elemendi pikkusega. Kasutusjuhendis on täpsustatud tingimusi, mille alusel programmis kontrollitakse elementide pikkuse ja läbimõõdu suhteid. Soovituslik elementide pikkuse ja läbimõõdu suhe avaldatakse võrrandiga (2.2) ja kohustuslik suhe võrrandiga (2.3) [13].

$$l > \max[8d; 4(d + 2t_c)] \quad (2.2)$$

$$l > \max[2d; 2(d + 2t_c)] \quad (2.3)$$

kus l – elemendi pikkus, m ,

d – elemendi diameeter, m ,

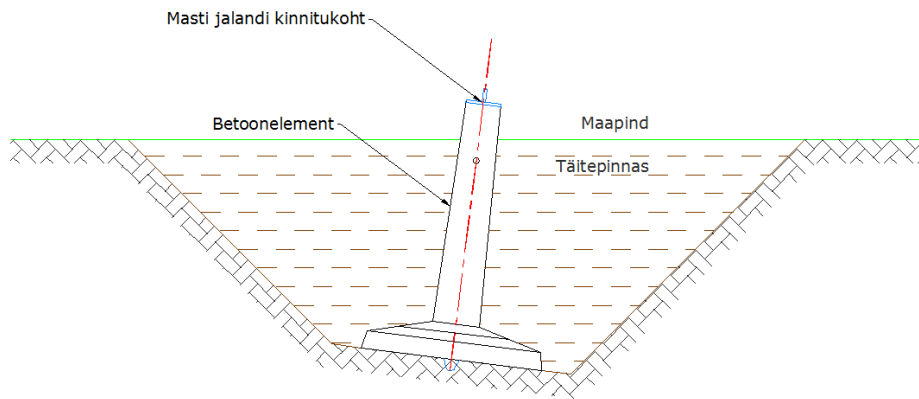
t_c – kattekihi diameeter, m .

Niiske betooni mõju uurimiseks vundamendi maandustakistusele on ZWCAD tarkvaraga konstrueeritud vundamentide metallsete osade lihtsustatud mudelid seenvundamendi ja vaivundamendi korral. Seenvundamendi üldised mõõtmed on järgmised, sügavus on 2,5 m ja vundamendi talla mõõtmed on 1,5x1,5 m. Vaivundamendi vaiade keskmine pikkus on 10 m. Mõõtmete poolst annavad määratud suurused piisava täpsusega kujutise vundamendi olemusest.

Enne simulatsioonide teostamist on teada, et sarruse ja betooni ristlõike suurendamine vähendab maandustakistust. Mõju suurus oomides on teadmata. Simulatsioonitulemustest selgus, kui otstarbekas on vundamendi täpne kirjeldamine ja modelleerimine maandustakistuse seisukohalt.

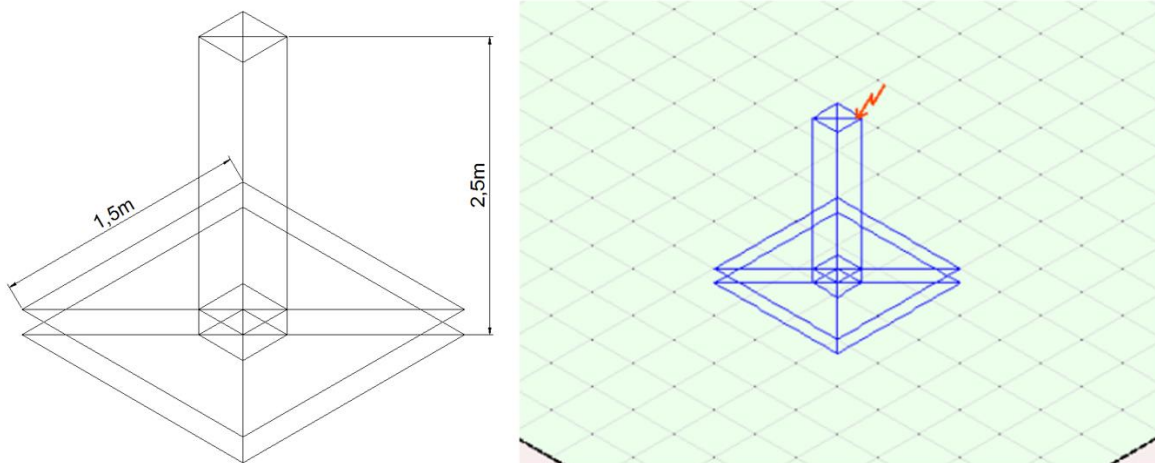
2.4.1 Seenvundamendi modelleerimine

Kohtades, kus injektsioonvaiad ei ole ehituslikus mõttes põhjendatud kasutatakse seenvundamente. Seenvundamendid võivad olla tulenevalt nende mõõtmetest kas valmiselementid, mis transporditakse kohapeale otse tehastest või elemendid, mis ehitatakse ja valatakse masti asukohas. Seenvundamentide lahendused erinevad üksteisest vundamendi mõõtmetelt. Järgnevalt on esitatud seenvundamendi lihtsustatud põhimõttejoonis (vt. Joonis 2.7) STRICTO PROJECT OÜ projektist nr S1803. Betoelement TVS1550E, pärineb TTÜ tööst "Kõrgepingeliini mastide vundamentide tüüpelemendid".



Joonis 2.7 Seenvundamendi TVS1550E põhimõttejoonis

Seenvundament paikneb väikesel alal ning selle kokkupuutepind ümbritseva pinnasega on piiratud. Joonis 2.8 kujutab mudelisse sisestatud seenvundamendi lihtsustatud kuju ja mõõtmeid. Vundamendi taldmiku suurus on 1,5x1,5 m ja sügavus 2,5 m.



Joonis 2.8 Seenvundamendi sarruse lihtsustatud mudel ZWCAD-is ja impordituna XGSLab-i

Sarruse ristlõike ja selle kattekihi paksuse mõju vundamendi maandustakistustusele, on esitatud simulatsioonitulemuste tabelis (vt. Tabel 2.2) Mõju uurimiseks kasutati konstantset pinnase eritakistust 100 Ωm . Lühikeste elementide tõttu piirab elemendi pikkuse ja läbimõõdu suhe kattekihi paksust. Simulatsiooni ei saanud sisestada kattekihte, mis läheneksid reaalsele vundamendile.

Tabel 2.2 Vundamendi maandustakistus pinnase eritakistuse 100 Ω m korral

Simulatsiooni nr	Elektroodi elemendi diameeter mm	Elektroodi elemendi ristlõige mm ²	Kattekihi paksus mm	Vundamendi maandustakistus Ω
1	10	78,54	0	7,434
2	15	176,71	0	7,322
3	20	314,16	0	7,242
4	10	78,54	5	7,367
5	15	176,71	5	7,254
6	20	314,16	5	7,173
7	10	78,54	10	7,332
8	15	176,71	10	7,233
9	20	314,16	10	7,156
10	10	78,54	15	7,312
11	15	176,71	15	7,219
12	20	314,16	15	7,122

Seenvundamendi uurimisele seadis piirid selle elementide võrdlemisi väike pikkus ja sarruse väike ristlõige. Simulatsioonist selgus, et sarruse ristlõike suurendamine ja betoonikihi muutmine vähendab resulteerivat maandustakistust, kuid seda nii minimaalselt, et selle mõju võib põhimõtteliselt arvestamata jätta. Mõju väiksus on kirjeldatav liiga väikese pinnase eritakistuse valikuga. Antud simulatsioonis oli pinnase eritakistus 100 Ω m ja betoonikihi eritakistus 60 Ω m, mis on peaaegu võrdsed, ehk vundamendi sarrus paiknes põhimõtteliselt pinnases. Sellest tulenevalt korrigeeriti katset nii, et tulemus oleks selgemalt nähtav, ning korrati katset pinnase eritakistuse 500 Ω m korral. Sellele vaatamata oli esimesele katsele tuginedes betoonikihi arvestamata jätmisel tekkiv viga positiivses suunas ehk arvutuslikult alahinnatakse tegelikku maandustakistust. Kuna sarruse ristlõikepindala ei muutnud märgatavalt simulatsioonitulemust, kasutatakse antud töös sarruse diameetrina 10mm.

Tabel 2.3 Seenvundamendi maandustakistus pinnase eritakistuse 500 Ω m korral

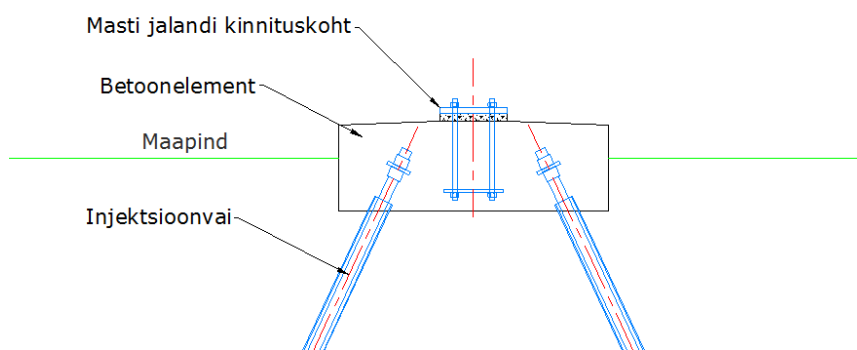
Simulatsiooni nr	Elektroodi elemendi diameeter mm	Elektroodi elemendi ristlõige mm ²	Kattekihi paksus mm	Vundamendi maandustakistus Ω
1	10	78,54	0	37,15
2	10	78,54	5	36,33
3	10	78,54	10	35,87
4	10	78,54	15	35,12

Tulemustest on näha, et suurema pinnase eritakistuse korral vähendab elektroodi ümbritseva betooni lisamine vundamendi maandustakistust rohkem, kui seda väiksema pinnase eritakistuse

korral. Iga lisanduv 5 mm betooni vähendab vundamendi maandustakistust ca 0,7 Ω . Kuna programmi poolt seatud tingimused piiravad vundamendi täpse kuju matkimist, annab sarruse lihtsustatud kujutis hea ülevaate vundamendi maandustakistusest. Tekkiv positiivne viga kompenseerib viga, mille käigus on vundamendi maandustakistust üle hinnanud. Näiteks pinnase eritakistuse mõõtmine niisketes oludes. Seega eeldatakse edasises töös, et betoonikihi arvestamata jätmise seenvundamendi puhul on aktsepteeritav ja see annab piisava täpsusega tulemuse, mis kajastab vundamendi takistust tegelikust suuremana.

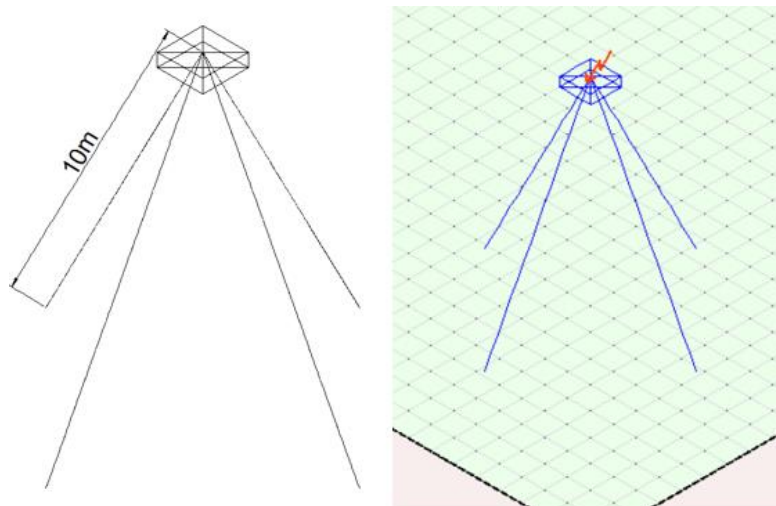
2.4.2 Vaivundamendi modelleerimine

Injektsioonvaiad kujutavad endast pikki (vaadeldavas projektis 4..20 m) vardaid, mis puuritakse maasse ning mille ümber pumbatakse betoon. Betoon tugevdab varrast ning loob hea kontakti maapinnaga. Vaivundamentide lahendused erinevad üksteisest peamiselt vaiade pikkuste ja arvu poolest. Järgnevalt on esitatud vaivundamendi lihtsustatud põhimõttejoonis, mis pärineb STRICTO PROJECT OÜ projektist nr S1803.



Joonis 2.9 Vaivundamendi põhimõttejoonis

Sarnaselt eelnevale simulatsioonile viidi identne katse läbi ka vaivundamendi korral. Vaivundamendi puhul on maasse süvistatud suure ristlõikega pikad vardad, mille puhul peaks olema muutused betooni lisamisel ümber vaia paremini märgatavad. Samuti ei tohiks piiravaks faktoriks osutada programmi poolt esitatavad tingimused. Kuna vaivundament võtab enda alla tunduvalt suurema ala ja kokkupuutepind ümbritseva maapinnaga on suurem, peaks nägema väiksemaid maandustakistusi võrreldes seenvundamendiga. Eelnevast simulatsioonist selgus, et maanduri ristlõige ei muuda oluliselt maandustakistust. Simulatsioonis on näidised kasutatud enamlevinud injektsioonvaia SupAnchor T73/56 mõõtmeid, mille ristlõige on 1369 mm² [15]. Pinnase eritakistuseks on võetud 500 Ω m.



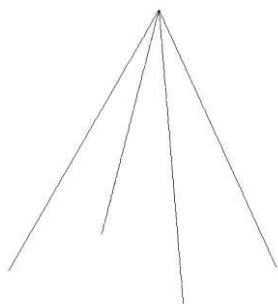
Joonis 2.10 Vaivundamendi sarruse lihtsustatud mudel ZWCAD-is ja impordituna XGSLab-i

Tulemustest (vt. Tabel 2.4) selgus, et pikkade vaimaandurite puhul vähendab betoonikihi lisamine vundamendi maandustakistust. Olenevalt puurpea suurusest, mis varieerub vahemikus 130...225 mm, on eeldatav vaia katva betoonikihi paksus vahemikus 30...80 mm, mis tulemuste tabelis viitab simulatsioonidele nr 4 – nr 7. Selles vahemikus mõjutab betoonikihi lisamine tulemust *ca* 1,7 Ω võrra. Kui jätta betoonikiht arvestamata, on maandustakistuste vahe *ca* 3,3 Ω . Maandustakistuse suurusjärgus 20 Ω korral pole erinevus 3,3 Ω väga suur. Sellegipoolest eeldatakse täpsemate tulemuste nimel ülejäänud simulatsioonides, et vaimaandureid ümbritseb betoonikiht paksusega 30 mm.

Tabel 2.4 Vaivundamendi maandustakistus pinnase eritakistuse 500 Ω m korral

Simulatsiooni nr	Elektroodi elemendi diameeter mm	Elektroodi elemendi ristlõige mm ²	Kattekihi paksus mm	Vundamendi maandustakistus Ω
1	42	1385,44	0	22,49
2	42	1385,44	10	21,88
3	42	1385,44	20	21,38
4	42	1385,44	30	20,86
5	42	1385,44	40	20,53
6	42	1385,44	50	20,16
7	42	1385,44	100	19,16
8	42	1385,44	200	17,95

Lõputöös mittekajastatud katsete käigus selgus, et vaivundamendi maandustakistust mõjutavad eelkõige injektsioonvaiad ning nende parameetrid: vaiade arv, kattekihi paksus ja pikkus. Sellest tulenevalt kasutatakse edaspidistes simulatsioonides elementide arvu ja arvutusmahtude vähendamiseks vaivundamentide modelleerimiseks lihtsustatud mudelit, mis arvestab ainult vaiu, sest betoonelement ja selle sarrus, kuhu vaiad kinnituvad ja millele toetub mast on võrreldes vaiade geomeetriliste mõõtmetega väga väike.



Joonis 2.11 Vaivundamendi lihtsustatud kujutis nelja injektsioonvaia puhul

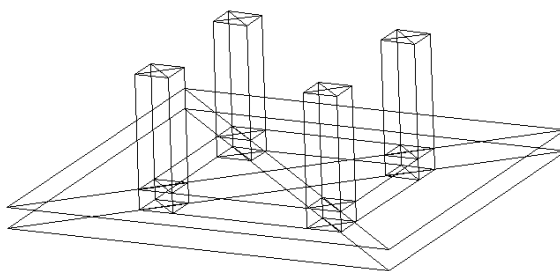
2.4.3 Vundamentide modelleerimise kokkuvõte

Katsetulemused kinnitavad, et vaivundamendid tagavad parema maandustakistuse, kui seenvundamendid. See on seletatav suuremate geomeetriliste mõõtmetega ning suurema kokkupuutepinnaga ümbritseva pinnasega.

Pinnase eritakistuse 500 Ω m korral on vundamentide maandustakistus seenvundamendi korral ca 35 Ω ja vaivundamendi korral ca 20 Ω ehk vaivundamendid tagavad sellises olukorras 15 Ω võrra parema maandustakistuse. Edasistes simulatsioonides kasutatakse vundamentide kujutamiseks peatükkides 2.4.1 ja 2.4.2 välja töötatud põhimõtteid. Tulenevalt masti tüübist ja konkreetsest vundamendi lahendusest muudetakse vajadusel vundamentide arvu ning varraste pikkusi vastavalt vaadeldava masti vundamendiprojektile.

2.5 Mastide maandustakistuste arvutamine

Mastide maandustakistuse arvutamiseks ja täiendavate maanduselektroodide vajaduse hindamiseks on mastid tüüpide järgi joonestatud 3D mudelina ZWCAD-i ning imporditud XGSLabi. Järgnevalt on näidatud mastitüübi 11S0T, kaheaheelaline 110kV kandemast, ZWCAD-i mudel.



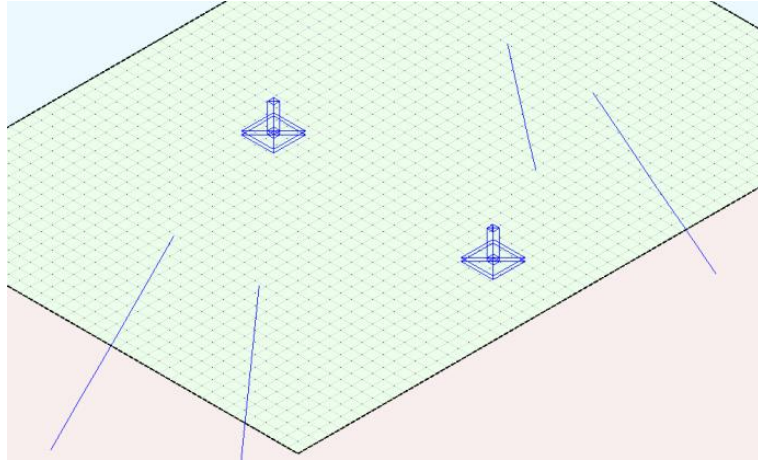
Joonis 2.12 Mastitüübi 11S0T 3D mudel

Importides mudelid XGSLab-i on võimalik hinnata vundamentide takistust erinevate pinnase eritakistuste korral. Järgnevad tabelis on esitatud simulatsioonitulemused. Arvutuslikud maandustakistused on ümardatud üles lähima suurusjärguga väärtuseni.

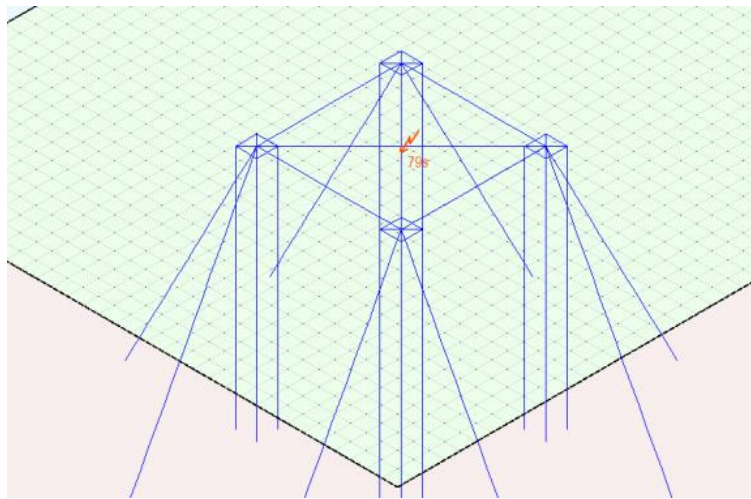
Tabel 2.5 Mastide vundamentide maandustakistused erinevate pinnase eritakistuste korral

Pinnase eritakistus Ω_m		50	100	150	200	250	300	350	400	500	1000	2000
Masti maandustakistus erinevate mastitüüpide korral Ω	1S0I	4	6	8	10	15	15	20	20	25	45	95
	1T6T	2	2	4	4	4	8	8	8	8	15	30
	11S0T	4	6	8	10	15	15	20	20	25	45	95
	1T6T	2	2	4	4	4	8	8	8	8	15	30
	31S0G	2	2	4	4	4	8	8	8	8	15	30
	31S1G	2	2	4	4	4	8	8	8	8	15	30
	31S0Y	2	2	4	4	4	8	8	8	8	15	30
	31S0P	2	2	4	4	4	8	8	8	8	15	30
	31S1P	2	2	4	4	4	8	8	8	8	15	30
	31T5Y	2	2	4	4	4	8	8	8	8	15	30
	31T9Y	2	2	4	4	4	8	8	8	8	15	30

Simulatsioonitulemustest selgus, et mastide 1S0I ja 11S0T (Joonis 2.12) maandustakistused kasvavad sõltuvalt pinnase eritakistustest teistest mastidest kiiremini. See on põhjendatud faktiga, et need vundamendid paiknevad väikesel alal ja koosnevad ainult betoonelemendist. Ülejäänud vundamendilahendused põhinevad vaiadel ja vundamendi-vaia kombinatsioonidel, mis tagavad hea maandustakistuse. Tuleb tähele panna, et vaadeldava täpsusega maandustakistuse ümardamise korral, ei ole vaiade arv mingil hetkel enam määrav, kuna tihedalt paigutatud vaiade valgumisalad kattuvad. Osad vaivundamendi lahendused kasutasid 4 vaia (Joonis 2.13), osad 24 (Joonis 2.14) vaia ja tabelis (vt. Tabel 2.5) toodud väärtusteni ümardamisel ei ole erinevusi märgata.



Joonis 2.13 Mastitüübi 31S0G mudel XGSLab-is



Joonis 2.14 Mastitüübi 31T5Y mudel XGSLab-is

2.6 Mastide puute- ja sammupingete modelleerimine

Käesolevas peatükis uuriti konkreetsetes asukohtas paikneva masti maanduspaigaldise dimensioneerimist, et tagada inimese ohutus puute- ja sammupingete seisukohalt. Maaühenduse tekkimine liinil on juhuslik suurus, samuti on juhuslik ka inimese paiknemine masti läheduses. Sellest tulenevalt arvutatakse puute- ja sammupinged kohtades, kus inimeste viibimise tõenäosus on suur – asulad, linnad ja külad. Kariloomade ohutuse seisukohalt vaadeldakse puute- ja sammupingeid ka karjamaadel asuvate mastide korral. Järgnevalt on lähemalt uuritud mastitüübi 11S0T (Joonis 2.12) puute- ja sammupingeid.

On teada, et masti maanduspaigaldist läbib vool 1,5 kA. Samuti on teada, et pinnase eritakistused: 90 Ωm (pindmised 4 m) ja sügavamal 120 Ωm (alates 4 m sügavusel). Arvutustes arvestatakse, et lühise väljalülitusaeg on 0,6 s. Eeldatakse, et masti läheduses paiknevad inimesed kannavad jalanõusid takistusega 1000 Ω ja lubatav puute- ja sammupinge vaheline kordaja on 3 (vt. ptk 2.1). Kattepinnas ehk SCL (Soil covering layer) on antud simulatsioonis kirjeldatud 15 cm paksuse ja 2000 Ωm eritakistusega killustikukihina masti ümbruses, kuid killustiku paigaldamist soovitakse vältida.

Eelpool nimetatud lähteandmete põhjal saadakse XGSLab-iga arvutada lubatud puute- ja sammupinged (Joonis 2.15), kus

U_{tp} – Lubatud puutepinge V;

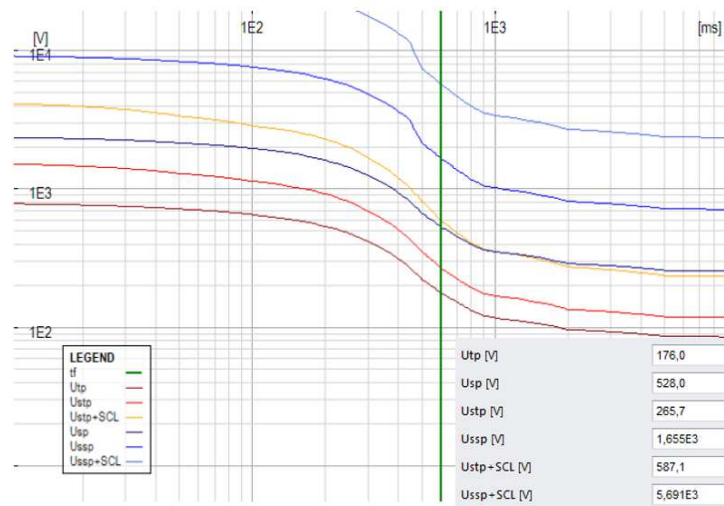
U_{sp} – Lubatud sammupinge V;

U_{stp} – Lubatud puutepinge jalanõudega V;

U_{ssp} – Lubatud sammupinge jalanõudega V;

$U_{stp} + SVL$ – Lubatud puutepinge jalanõude ja kattepinnasega V;

$U_{ssp} + SCL$ – Lubatud sammupinge jalanõude ja kattepinnasega V;

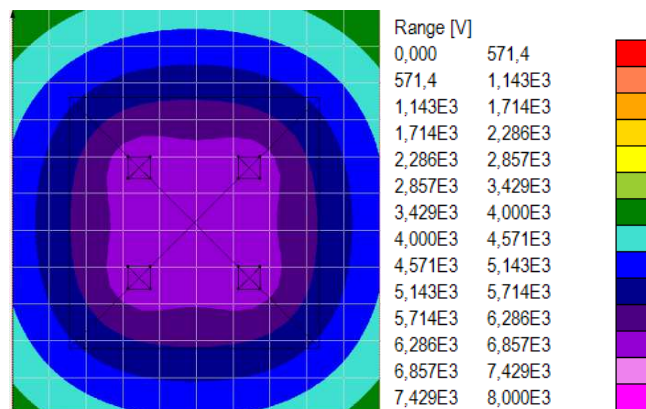


Joonis 2.15 Lubatavad puute- ja sammupinged vaadeldavas asukohas

Antud simulatsioonis on eeldatud, et inimesed kannavad jalanõusid. Sellest tulenevalt vaadeldakse suurusid U_{stp} ja U_{ssp} , mis on lubatud puute- ja sammupinged arvestades jalanõude takistust. Kui potentsiaaliringide ja maanduselektroodidega ei ole võimalik lubatavaid puute- ja sammupingeid tagada, on üheks võimalikuks lahenduseks katta masti ümbritsev maapind suure eritakistusega kattepinnasega.

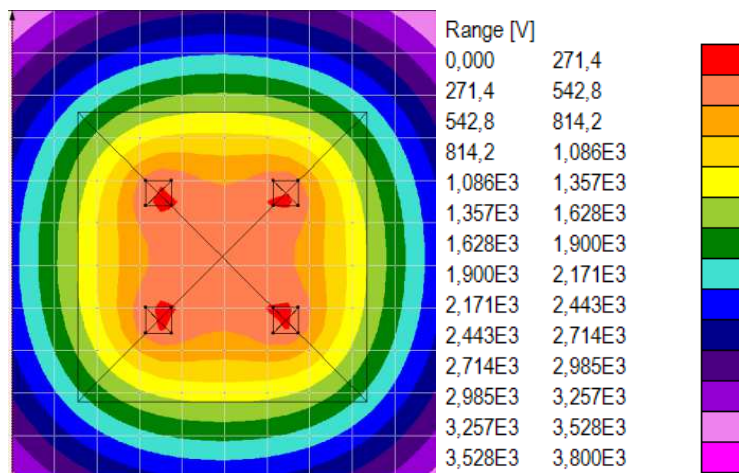
2.6.1 Puute- ja sammupinged ainult vundamendi korral

Maalühise korral tekitab maanduspaigaldist läbiv vool masti ümbritseva maapinna potentsiaali tõusu, mida võrreldakse kaugel asuva nullpotentsiaalalaga. Antud simulatsioonis, kus maanduspaigaldise takistus oli $4,7 \Omega$ tõusis arvutuslik maapinna potentsiaal masti lähedal 7429...8000 voldini (Joonis 2.16), mis tähendab, et lillas alas varieerub maapinna pinge 600 V. Nõuetekohane lubatav puutepinge on 265 V ja sammupinge 1655 V. Seega on masti ümbruses tagatud sammupinge, kuid puutepinget peab lähemalt uurima.



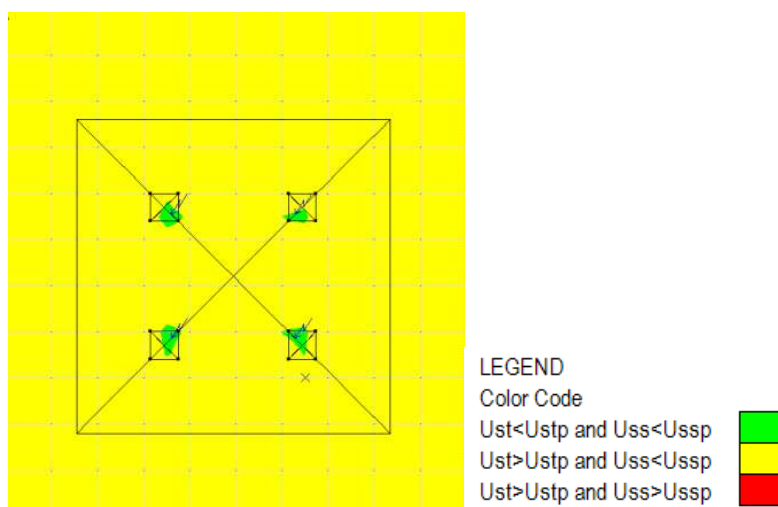
Joonis 2.16 Maapinna potentsiaali tõus

Puutepinge lähemaks uurimiseks on programmis eraldi tööriist, millega saab täpsustada joonise legendil kuvatavaid vahemike (Range). Samuti peab puutepingete täpseks hindamiseks valima õige referentspunkti, millega pingeid võrreldakse, mis antud juhul on masti jalandid. Joonis 2.17 kujutab maapinna potentsiaali tõusude muutust vaadeldavas vahemikus. Antud juhul on puutepinge seisukohalt ohutud kohad punasega tähistatud alad, sest nendes alades muutub puutepinge lubatud piirides. Reaalselt ei ole hetkel lubatavad puutepinged tagatud, kuna puutepinged peavad olema tagatud pingealtidest osadest 1 m kaugusel.



Joonis 2.17 Puutepingete samapotentsiaali piirkonnad

Kuna kirjudelt piltidelt on raske tulemusi välja lugeda, on programmis eraldi tööriist *Safe Areas*, mis hindab ohutuid ja ohtlikke alasid, võrreldes puutepinge korral mastijalandite ja nende ümbruse vahelisi pingeid ja sammupingete korral üksteisest meetri kaugusel asuvate punktide pinget. Edaspidi lähtume lahenduse sobivuse hindamisel tööriista *Safe Areas* tulemustest.



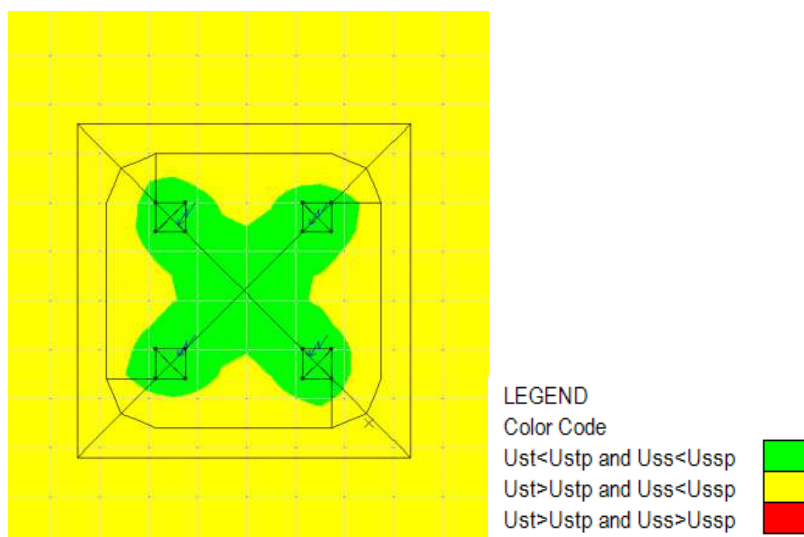
Joonis 2.18 Puute- ja sammupingete ohutud ja ohtlikud alad ainult vundamendi korral

Joonis 2.18 illustreerib puute- ja sammupingete ohutuid alasid masti ümbruses, kui maanduspaigaldise moodustab ainult vundament. Roheline tähendab, et puutepinged rohelistes piirkondades on normide kohased. Kollane tähendab, et sammupinged kollastes piirkondades on nõuetekohased. Punane tähendab, et nõuetekohane puute- ja sammupinge pole tagatud.

Selgus, et antud pinnase eritakistuse, maanduspaigaldist läbiva voolu ja vundamentmaanduri korral on nõuetekohased sammupinged tagatud. Puutepinged on tagatud ainult masti jalgade kinnituskohtades ja mitte meetri kaugusel masti konstruktsioonist. Seega puutepinged tagatud ei ole. Sellest tulenevalt uuritakse järgmistes peatükkides võimalikke meetmeid ohutu puutepinge tagamiseks mastis.

2.6.2 Puute- ja sammupinged vundamendi ja ühe potentsiaaliühtlustusringi korral

Ohutu puutepinge tagamiseks on antud mudelis paigaldatud 30 cm sügavusele ja 1 m kaugusele masti jalanditest potentsiaaliühtlustusring. Selle tulemusena laieneb nõuetekohase puutepingega piirkond masti keskel ja jalandite ümbruses (Joonis 2.19).

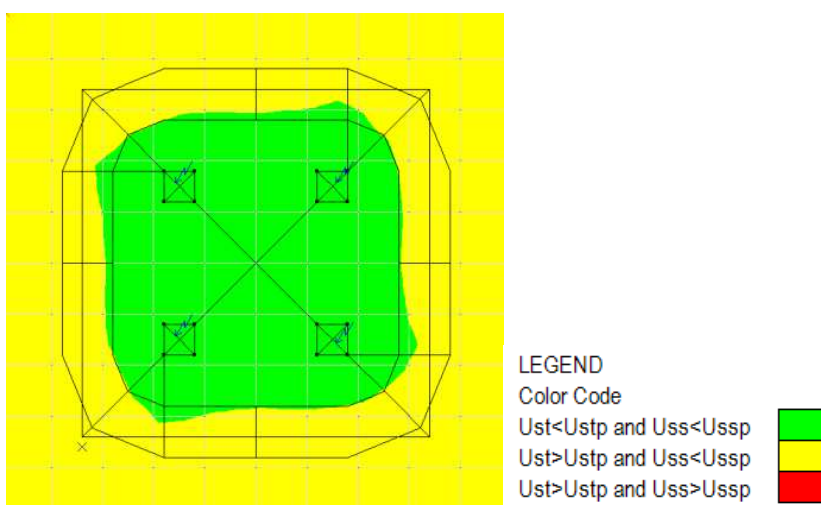


Joonis 2.19 Puute- ja sammupingete ohutud ja ohtlikud alad vundamendi ja ühe potentsiaaliühtlustusringi korral

Antud lahendus ei rahulda puutepinge tingimusi, sest 1 m kauguselt masti puudutades võib inimene sattuda ikkagi ohtliku pinge alla. Sellest tulenevalt peab leidma lahenduse puutepinge probleemile. Kuna pinnaseritakistus on suhteliselt väike, ei pruugi teise pinnalähedase potentsiaaliringi lisamine olukorda lahendada ja võiks kaaluda maanduskontuuri rajamist, et vähendada masti maandustakistust ja tagada potentsiaalide ühtlasem jagunemine. Uurimise huvides vaadeldakse järgnevalt ka kahe potentsiaaliühtlustusringiga lahendust.

2.6.3 Puute- ja sammupinged vundamendi ja kahe potentsiaali-ühtlustusringi korral

Joonis 2.20 illustreerib ohutuid alasid kahe potentsiaaliühtlustusringi korral. Katsetulemustest selgub, et kahe potentsiaalühtlustusringiga saavutatakse lubatava puutepinge seisukohalt sobiv lahendus, kuid potentsiaaliühtlustusring peaks tagama samapotentsiaaliala vähemalt niikaugele kuhu see on paigaldatud. Seega ei ole tegu hea lahendusega, kuna välimine potentsiaaliring ei laienda lubatavate puutepingete ala endani.

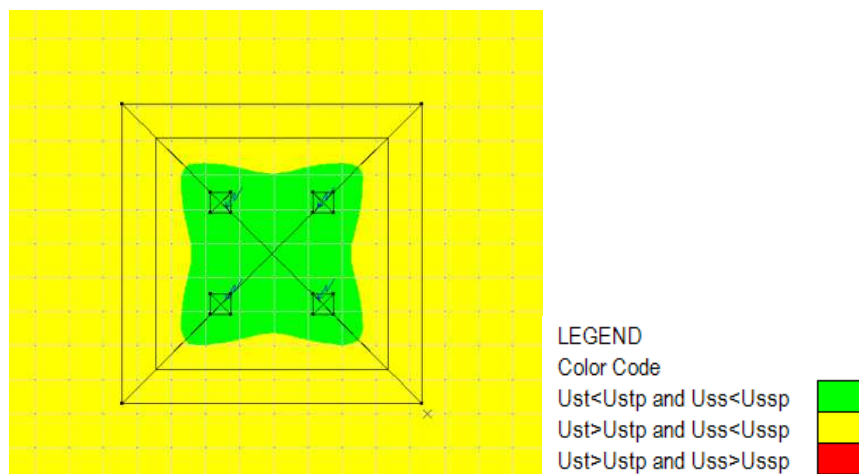


Joonis 2.20 Puute- ja sammupingete ohutud ja ohtlikud alad vundamendi ja kahe potentsiaali-ühtlustusringi korral

2.6.4 Puute- ja sammupinged vundamendi ja maanduspaigaldise korral

Käesolevas simulatsioonis uuritakse olukorda, kus vundamendi taldmikust 1 m kaugusele ja 1 m sügavusele maapinnast paigaldatakse nelinurkne maanduselektrood, mille nurkadesse paigaldatakse 4,5m pikkused vertikaalelektroodid. Lisatud maanduskontuur vähendab masti maandustakistust ning vähendab masti ümbritseva maapinna potentsiaali tõusu. Samuti peaks sügavale paigaldatud elektrood ühtlustama maapinna potentsiaalide jagunemist ning tagama masti ümber inimesele ohutu puutepinge.

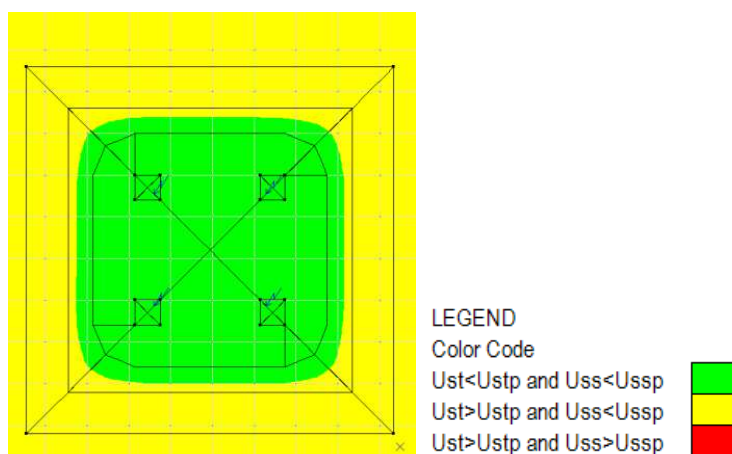
Tulemustest selgus, et sügavale paigaldatud maanduselektroodid ühtlustavad küll potentsiaalide jagunemist maapinnal (Joonis 2.21) ja sellise lahenduse puhul on puutepinged masti lähiümbruses (alla 1 m) lubatud piirides, kuid igas, mastist 1 m kaugusel asuvas, punktis ei ole nõutav puutepinge tagatud. Selleks, et parandada kirjeldatud lahenduse (Joonis 2.21) puutepingete jagunemist masti lähiümbruses lisatakse järgmises mudelis lahendusele potentsiaaliühtlustusring.



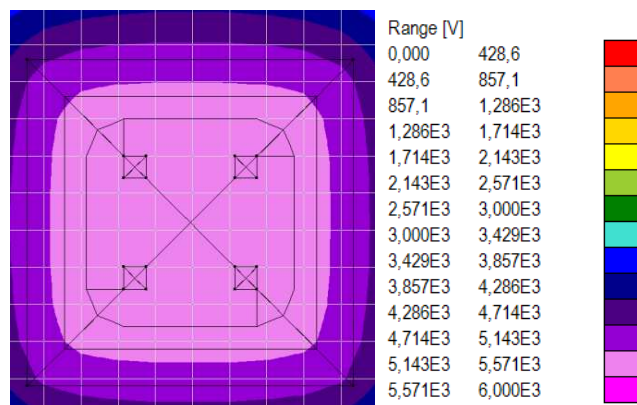
Joonis 2.21 Puute- ja sammupingete ohutud ja ohtlikud alad vundamendi ja maanduspaigaldise korral

2.6.5 Puute- ja sammupinged vundamendi, maanduspaigaldise ja potentsiaaliühtlustusringi korral

Lisades eelmises peatükis käsitletud lahendusele potentsiaaliühtlustusringi 1 m kaugusele masti jalanditest ja 30 cm sügavusele selgus, et lubatud puutepinged on tagatud mastist 1 m kaugusel (vt. Joonis 2.22). Võrreldes viimast lahendust esimesega, selgus, et maanduspaigaldise takistus kahanes $3,7 \Omega$ -ni ehk lisandunud maanduskontuuri tõttu langes masti takistus 1Ω võrra. Sellest tulenevalt langes ka maapinna potentsiaali tõus masti lähiümbruses. Kui esimeses katses tõusis maapinna potentsiaal 8000 V-ni, siis viimase lahenduse korral 5500 V-ni ja elektrodide paiknemise tõttu oli potentsiaalide jaotumine tunduvalt ühtlasem (vt. Joonis 2.23)



Joonis 2.22 Puute- ja sammupingete ohutud ja ohtlikud alad vundamendi, maanduspaigaldise ja potentsiaaliühtlustusringi korral

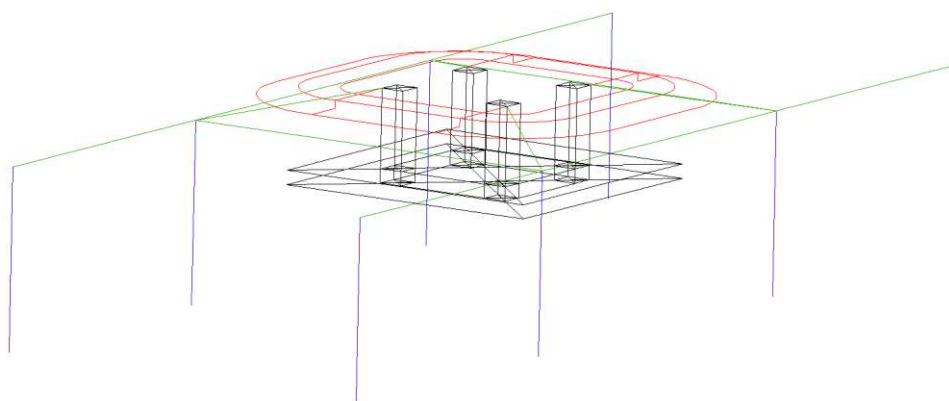


Joonis 2.23 Maapinna potentsiaali tõus vundamendi, maanduspaigaldise ja potentsiaali-ühtlustusringi korral

2.6.6 Puute- ja sammupinged kariloomade ohutuse seisukohalt

Karjamaadel tuleb masti maanduspaigaldised dimensioneerida nii, et masti läheduses asuvad loomad ei satuks rikke korral eluohtlikusse olukorda. Selleks kasutatakse tavaliselt kolme potentsiaaliringi, mis paigaldatakse üksteisest meetri kaugusele. Kaks sisemist, masti poolsemat ringi paigaldatakse 30 cm sügavusele ja välimine 50 cm sügavusele. Kuna kariloomade pikkuse tõttu võib loom sattuda pingealti osa külge kaugemalt kui 1 m, peab loomade puhul olema puutepinge masti ümbruses olema tagatud 3 m raadiuses.

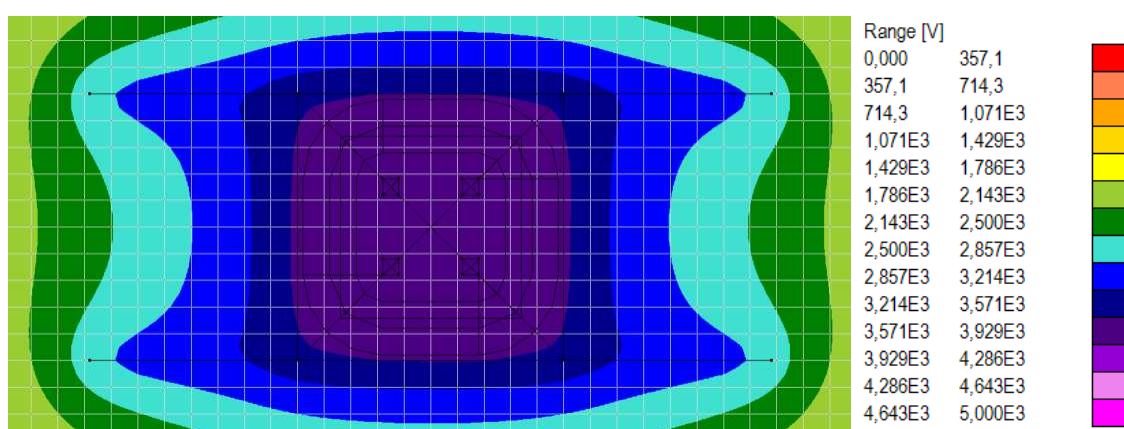
Kariloomade kaitseks projekteeritud masti maanduspaigaldise algandmed – pinnase eritakistus ja lühisvool ning selle kestus on samad mis eelmistes simulatsioonides. Muudetud sammu- ja puutepinge vaheline kordaja 2-ks, sellisel juhul on ohutu sammupinge tagatud kahekordse puutepinge korral. Jalanõude takistust sellises olukorras ei arvestata.



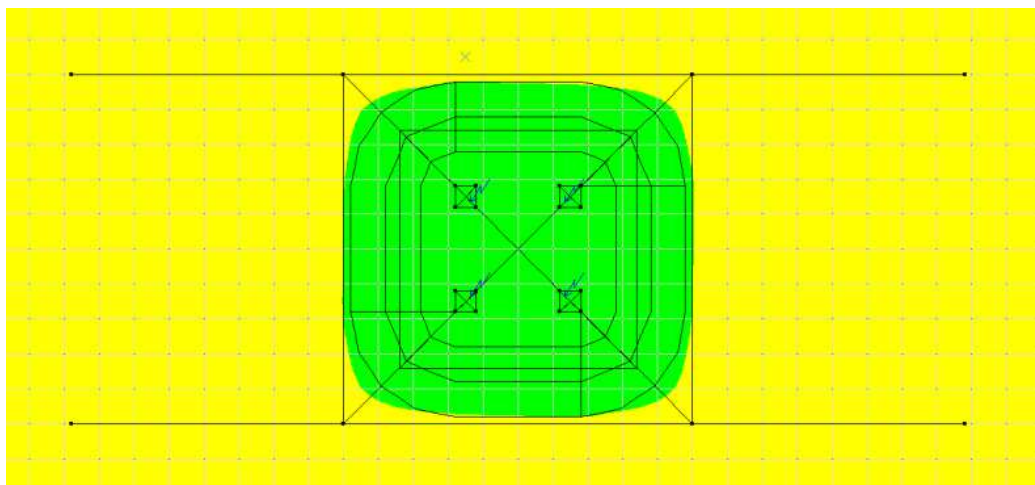
Joonis 2.24 Maanduspaigaldise konfiguratsioon kariloomade kaitseks

Maanduskontuuri on täiendatud 8 m kiirtega, mille otstes on 4,5 m pikkused maandusvardad. Joonis 2.24 illustreerib kariloomade kaitseks projekteeritud maanduspaigaldise konfiguratsiooni, Punasega on kujutatud potentsiaaliühtlustusringid, rohelisega maanduskontuur, sinisega maandusvardad ja mustaga vundamendielement.

Simulatsioonitulemustest selgus, et lisandunud kontuuride tõttu väheneb maanduspaigaldise takistus 2,5 Ω -ni, mille tulemusel tõuseb potentsiaal masti ümbruses 3800 V ning maapinna potentsiaalide jagunemine on ühtlasem (vt. Joonis 2.25). Masti lähiümbruses on potentsiaalide vahemik 3570...3800 V piires, mis tähendab 230 V erinevuse juures on puutepinged tagatud. Kariloomade puute- ja sammupingete ohutud alad on kuvatud joonisel (vt. Joonis 2.26).



Joonis 2.25 Maapinna potentsiaali tõus kariloomade kaitseks mõeldus maanduspaigaldise puhul



Joonis 2.26 Puute- ja sammupingete ohutud ja ohtlikud alad kariloomade kaitseks

Simulatsiooni tulemusena selgus, et ohutud puutepinged on antud lahendusega tagatud mastist 3m kaugusel. Mastist kaugemal, kollasel alal on tagatud sammupingena lubatud kahekordne puutepinge.

2.7 Ohutu maanduspaigaldise projekteerimise kokkuvõte

Inimese ohutuse seisukohalt on antud peatükis uuritud vundamentide kasutamist maandurina ning simuleeritud maanduspaigaldises tekkivaid puute- ja sammupingeid. Programmiga XGSLab on võimalik modelleerida masti maanduspaigaldises tekkivaid potentsiaale ning hinnata lahenduse ohutust. Programmi abil saab konstrueerida optimaalse maanduspaigaldise ja kontrollida selle vastavust standardile. Programmi abil arvutatavaid mastide maandustakistuste väärtusi saab kasutada edasisel projekteerimisel - näiteks liini äikesekindluse hindamiseks.

Sobiva maanduspaigaldise konfiguratsiooni leidmiseks simuleeriti maanduspaigaldises tekkivaid puute- ja sammupingeid erinevate maanduspaigaldise konfiguratsioonide korral. Katsete tegemisel alustati kõige minimalistlikuma lahendusega ehk ainult vundamendiga. Iga järgneva katsega täiendati maanduspaigaldist kuni jõuti sobiva lahenduseni. Katsete lühikirjeldused ja kokkuvõtted on kirjeldatud järgnevas tabelis (vt. Tabel 2.6). Inimese ohutuse seisukohalt osutus sobivaks lahenduseks peatükis 2.6.5 kirjeldatud lahendus ning kariloomade seisukohalt peatükis 2.6.6 kirjeldatud lahendus.

Tabel 2.6 Simulatsioonide lühikirjeldus ja kokkuvõte

Katse nr /ptk	Maanduspaigaldise konfiguratsioon					
	Vundament	Potentsiaali-ühtlustus-ringide arv	Täiendav maandus-kontuur	Puute-pinge tagatud	Sammu-pinge tagatud	Sobiv lahendus
1 / 2.6.1	Jah	-	-	Ei	Jah	Ei
2 / 2.6.2	Jah	1	-	Ei	Jah	Ei
3 / 2.6.3	Jah	2	-	Jah	Jah	Ei
4 / 2.6.4	Jah	-	Jah	Ei	Jah	Ei
5 / 2.6.5	Jah	1	Jah	Jah	Jah	Jah
6 / 2.6.6	Jah	3	Jah	Jah	Jah	Jah

3. Maanduspaigaldise dimensioneerimine lähtuvalt liini töökindlusest

Elektriliini töökindluse all mõistetakse liini varustuskindlust. Kui liinil tekib rike, lülitatakse liin välja ning liini varustuskindlus väheneb. Mida vähem on rikkeid, seda töökindlam on liin. Võrguettevõtete üheks eesmärgiks on minimeerida rikkeid liinidel, et tagada võimalikult suur varustuskindlus.

Õhuliinidel tekkivate rikete kohta on üleilmselt tehtud hulgaliselt uuringuid. Käesolevas lõputöös tuginetakse eelnevatele Eestis läbiviidud õhuliinide töökindlust uurivatele töödele ja analüüsidele. Maanduspaigaldise ja liini töökindluse seisukohalt huvitavad meid peamiselt äikesetoimelised protsessid. Äikesetoimelisi protsesse on arutletud Ü.Pärnati 2015. aasta magistritöös – „Äikesest põhjustatud liinide rikked Eesti põhivõrgus“ [16] ja P.Taklaja 2012. aasta doktoritöös - „110kV õhuliinide isolatsiooni töökindluse analüüs ja töökindluse tõstmise meetodid“ [17].

Allikale [16] tuginedes suudetakse äikese põhjustatud rikked enamuses korrektselt registreerida. Ajavahemikul 2005-2014 toimunud põhivõrgu rikestest 13% olid põhjustatud äikese poolt. Äikesest põhjustatud rikete osakaal sellel perioodil jagunes liinipingete kaupa järgmiselt [16]:

- 110kV liinid – 89%
- 220kV liinid – 9%
- 330kV liinid - 2%

330 kV liinide äikesest põhjustatud rikked on haruldased, kuna liini õhkvahekiht on piisavad äikesetoimeliste ülelöövide vältimiseks. Eesti ainsa 158 km pikkuse 220 kV liini äikesetoimeliste rikete arv on muljetavaldavalt suur, kuid seletatav piksekaitsetrossi puudumisega. 110 kV rikete arv on seletatav liinide paljususe ja väikeste õhkvahekihtidega [16]. Allika tulemustest järeldatakse, et äikesetoimelised protsessid mõjutavad peamiselt 110 kV liine. Kõikidest rikestest on äikese poolt põhjustatud 12% 110 kV võrgu rikestest. Allika [17] kohaselt on aastatel 2005-2009 toimunud rikestest põhjustatud äikese poolt 8%. Erinevus kahe allika vahel tuleneb sellest, et aastatel 2010-2014 esines rohkem äikest.

Standardi EVS-EN 50341-1:2013 järgselt on põhilisteks liini töökindlust kirjeldavateks suurusteks piksekaitsetrossist möödalöögi määr ja vastusuunaliste ülelöövide määr. Need suurused sõltuvad järgnevatest näitajatest [1]:

- Liini isolatsiooni elektriline tugevus

- Pilve ja maa vaheliste välgulöökide tihedus
- Õhuliini kõrgus
- Juhtmete paigutus
- Piksekaitsetrosside olemasolu
- Masti maandustakistus
- Liigpingepiirikute paigaldamine õhuliinile

Maandamismeetmeid välgu toime vähendamiseks on kirjeldatud standardis EVS-EN 50341-2-20:2018 ning need on järgmised [18]:

- Vähendamaks välgu otselöökide arvu juhtmesse tuleb liinid nimipingega 110 kV ja kõrgem varustada kas ühe või mitme piksekaitsetrossiga. Kaitsenurga suurus ei tohi olla üle 30°;
- Liini isolatsiooni vastusuunalise ülelöögi tõenäosuse vähendamiseks alajaama lähedal tuleb õhuliini lõpumasti maandus alajaama maanduskontuuriga kokku ühendada. Seejuures võib ühendus olla teostatud ka piisava ristlõikega piksekaitsetrossi kaudu;
- Vastusuunaliste ülelöökide määr sõltub pinnase eritakistusest. Vastusuunaliste ülelöökide määra võib lugeda vastuvõetavaks, kui metall- ja raudbetoonmastide maanduse valgumistakistus R_E ei ületa järgmisi väärtusi:
 - pinnase eritakistuse kuni 100 Ωm korral $R_E = 10 \Omega$;
 - pinnase eritakistuse üle 100 Ωm kuni 500 Ωm korral $R_E = 15 \Omega$;
 - pinnase eritakistuse üle 500 Ωm kuni 1000 Ωm korral $R_E = 20 \Omega$;
 - pinnase eritakistuse üle 1000 Ωm kuni 5000 Ωm korral $R_E = 30 \Omega$.
- Üle 45 m kõrguste piksekaitsetrossidega varustatud mastide korral, peab maandustakistus olema eeltooduist kaks korda väiksem.

Käesoleva peatüki eesmärgiks uurida, kas standardis [18] toodud soovituslikud mastide maandustakistused sõltuvalt pinnase eritakistusest tagavad lähteülesandes nõutavad vastusuunaliste ülelöökide määrad, milleks on 330 kV puhul 0,35 ja 110 kV puhul 3,25. Lisaks uuritakse, kas valdavalt vaimaanduritel põhineva liini puhul on vajadust kasutada töökindluse tagamiseks lisamaandureid.

Piksekaitsetrossist möödaloogi ja vastusuunaliste ülelöökide määra arvutamiseks viidatakse standardis [1] CIGRÉ publikatsioonile nr 63 „Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines“ [19]. Põhivõrgu äikekindlust on 2008. aastal hinnanud T.Metusala – „OÜ Põhivõrgu 110kV ja 330kV liinide äiksekindluse analüüs“ [20]. Peatükkides uuritakse CIGRÉ metodikale tuginevat liini töökindluse hindamist ning IEEE Flash programmi.

3.1 Piksekaitsetrossist möödalöögid

Piksekaitsetrossist möödalöök ehk *shielding failure* on nähtus, kus äike tabab vaatamata piksekaitsetrosside olemasolule faasijuhet. Piksekaitsetrossist möödalöövide arvu kirjeldatakse suurusega *SFR* ehk *shielding failure rate*. Sõltuvalt välguvoolu tippväärtusest võib tekkida olukord, kus faasijuhis tekkiv pingeimpulss ületab isolaatoriketi ülelöögitugevuse ning tekib isolaatoriketi ülelööök, mida kirjeldatakse suurusega *SFFOR* ehk *shielding failure flashover rate*. Piksekaitsetrossist möödalööke ja sellest tingitud ülelööke kirjeldatakse ülelöövide arvuga 100 km liini kohta aastas [21]. Eelpool toodud suurusi *SFR* ja *SFFOR* arvutatakse CIGRÉ meetodil järgnevate valemitega [19]:

$$SFR = 2N_g L_l \int_{I_{min}}^{I_{max}} D_C f(I) dI \quad (3.1)$$

$$SFFOR = 2N_g L_l \int_{I_C}^{I_{max}} D_C f(I) dI \quad (3.2)$$

kus N_g – äikesetabamuste tihedus piirkonnas,

L_l – liini pikkus,

D_C – faasijuhi kaitsmata ala pikkus,

I_{max} – maksimaalne välguvool, mille korral D_C läheneb nullile,

I_{min} – minimaalne välguvool, 2-3 kA,

I_C – minimaalne isolaatoriketi läbilöögitugevust ületav vool

Faasijuhi kaitsmata ala pikkuse D_C ja maksimaalse välguvoolu I_{max} väärtused sõltuvad piksekaitsetrosside ja faasijuhtmete geomeetrisest paiknemisest. Täpsemalt on kasutatavat elektrogeomeetrisest meetodikat kirjeldatud allikas [19] ja [21]. Minimaalne ülelööki põhjustav vool I_C avaldub valemiga (3.3) [19].

$$I_C = 2 \frac{U_{CFO}}{Z_{surge}} \quad (3.3)$$

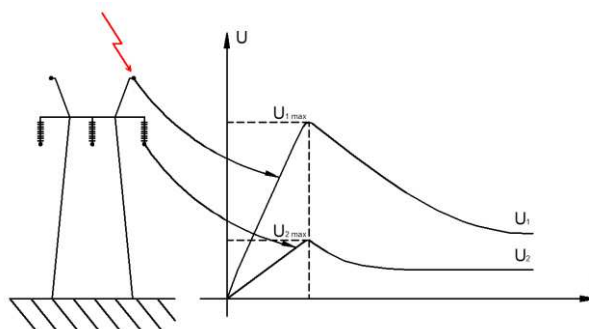
kus U_{CFO} – kriitiline ülelöögipinge,

Z_{surge} – faasijuhtme impedants.

Valemite (3.1), (3.2) ja (3.3) alusel pole masti maandustakistus otseselt seotud piksekaitsetrossist möödalöövide ja nende poolt põhjustatud ülelöövide määra arvutamisel. Sellest tulenevalt käesolevas töös piksekaitsetrossist möödalöövide poolt põhjustatud ülelööke lähemalt ei uurita.

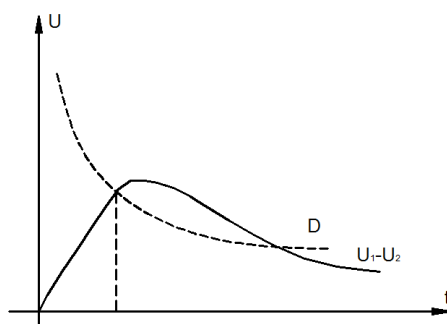
3.2 Vastusuunalised ülelöögid

Vastusuunaline ülelök ehk *backflashover (BFO)* on nähtus, kus äikesetabamuse korral piksekaitsetrossi või masti toimub isolaatorketi ülelök faasijuhtmesse. Ülelöögi poolt põhjustatud elektrikaare toimel tekib väikese takistusega kaaresammas, mis põhjustab liinil võrgusagedusliku maalühise, mille tõttu lülitatakse liin releekaitse poolt välja. Välgutabamus masti või piksekaitsetrossi tekitab järsu liigpingeimpulsi, mis tõstab pinget masti konstruktsioonil ja piksekaitsetrossidel. Välguvoolu lainekuju illustreerib karakteristik U_1 (Joonis 3.1). Arvestades piksekaitsetrosside, masti konstruktsiooni ning faasijuhtide vahelist mahtuvuslikku ja induktiivset sidetust, indutseeritakse faasijuhtmetesse sarnase kuju, kuid madalama amplituudiga pingeimpulss. Faasijuhtmetesse indutseeritud pingeimpulssi kirjeldab karakteristik U_2 (Joonis 3.1) [22].



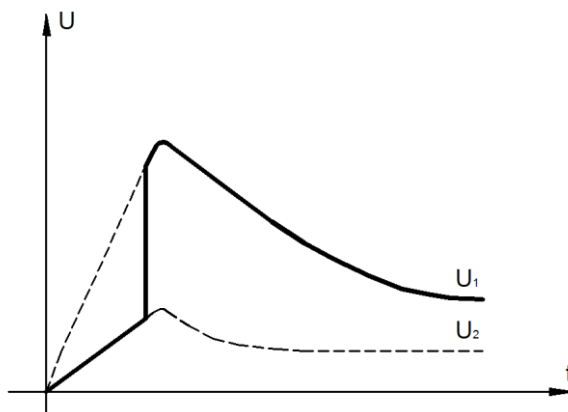
Joonis 3.1 Masti ja faasijuhtme liigpingeimpulsid välgutabamuse korral [22]

Faasijuhtidesse indutseeritud pinge sõltub juhtmete ja piksekaitsetrosside vahelisest sidetustegurist, mis omakorda sõltub liini geometriast [9]. Mida väiksem on sidetustegur, seda suurema tõenäosusega ülelök toimub. Sellest tulenevalt on ülelöögid sagedasemad piksekaitsetrossidest kaugel asuvates faasijuhtides, sest kauguse suurenedes sidetustegur väheneb [11].



Joonis 3.2 Isolaatoritele mõjuv pingeimpulss [22]

Liini isolaatoritele rakendatud pingemipluss moodustub impulsside U_1 ja U_2 vahest ja on kirjeldatud karakteristikuga U_1-U_2 (Joonis 3.2). Karakteristik D kujutab isolaatorite läbilöögitugevust. Punktis, kus pinge ületab isolaatorite läbilöögitugevuse, tekib vastusuunaline ülelööök mastist faasijuhti [22]. Vastusuunalise ülelöögi mõjul tekib faasijuhti hüppeline pingetõus, mille karakteristik on kirjeldatud graafikul jämeda joonega (Joonis 3.3) [22].



Joonis 3.3 Vastusuunalise ülelöögi poolt põhjustatud pingemipluss faasijuhis [22]

3.3 Vastusuunaline ülelööök ja CIGRÉ meetod

Suurim potentsiaalide vahe tekib välgutabamuse asukohas ja potentsiaalid vähenevad liikudes tabamuse kohast kaugemale. Sõltuvalt tabamuse asukohast võib ülelööök tekkida kas liinivisangus või mastis. Kuna liinivisangu keskel on õhkvahemikud suurimad on ka läbilöögitugevus suurim. Sellest tulenevalt lihtsustatakse uuritavat situatsiooni ja jäetakse kõrvale visangusisesed ülelöögid ning vaadeldakse ainult ülelööke liiniisolaatoritel mastis. Suurim potentsiaalide vahe tekib liiniisolaatoritel, kui äike tabab masti. Arvutades vastusuunaliste ülelöökkide määra ainult masti tabavate äikeselöökkide korral, saadakse tunduvalt suurem ülelöökkide määr, kui arvestatakse kõiki tabamuste asukohti liini lõikes. Sellest tulenevalt on liini vastusuunaliste ülelöökkide määr 60% masti tabavate põhjal arvatud ülelöökkidest. Vastusuunaliste ülelöökkide arvutamiseks CIGRÉ meetodil kasutatakse valemit (3.4). Vastusuunalise ülelöögi väärtus näitab, kui suure tõenäosusega tabab masti äikeselööök, mis ületab kriitilise voolu I_C vastusuunalise ülelöögi tekkeks [19].

$$BFR = 0,6N_L \int_0^{\infty} \int_{I_C}^{\infty} f\left(\frac{I}{t_f}\right) f(t_f) dI dt_f \quad (3.4)$$

kus N_L – liini tabavate äikeselöökkide arv 100 km kohta aastas,

I_C – kriitiline vool, mille korral tekib ülelööök,

$f\left(\frac{I}{t_f}\right)$ – frondi kestusest tuleneva äikesevoolu tippväärtuse tingliku tõenäosuse jaotustihedus,

$f(t_f)$ – frondi kestuse jaotustihedus.

Valemis 3.4 toodud suurus N_L sõltub piirkonna äikesetihedusest, liini kõrgusest ja laiusest. Funktsioonid $f\left(\frac{I}{t_f}\right)$ ja $f(t_f)$ kirjeldavad äikeseseimpulsi parameetrite esinemise tõenäosust, mille hindamiseks kasutatakse käsiraamatus toodud äikeseimpulsi keskmisi ja mediaanväärtusi. Kriitiline vool I_C avaldub valemiga (3.5) [19].

$$I_C = \frac{U_{50NS} - U_{PF}}{K_{SP} \left[R_e(1 - C) + \frac{\alpha_T Z_T (T_A - T_T)}{t_f} \right]} \quad (3.5)$$

kus $U_{50NS} - U_{PF}$ - kriitiline ülelöögipinge,

K_{SP} – lähipaiknevate mastide vähendustegur äikesevoolu tippväärtusele,

C – piksekaitsetrosside ja faasijuhtide vaheline sidestustegur,

$T_A - T_T$ – pingeimpulsside saabumisaegade vahe isolaatorketil,

Z_T – masti impulsstakistus,

t_f – frondi kestus.

Masti impulsstakistuse Z_T hindamiseks on välja töötatud valemid, mis lähendavad masti kuju geomeetrilisele kujunditele – näiteks kooniline mast (*Sargent's cone*), silindriline mast (*Hileman's cylinder*). Masti impulsstakistus sõltub peamiselt masti geomeetristest mõõtmetest - kõrgusest, keskkoha raadiusest ja jalandite vahelisest kaugusest [23]. Valemis (3.5) suurused R_e ja α_T arvutatakse valemitega (3.6) ja (3.7) järgmiselt [19]:

$$\alpha_T = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} \quad (3.6)$$

$$R_e = \frac{Z_g R_i}{Z_g + 2R_i} \quad (3.7)$$

kus R_i – masti maanduse impulsstakistus,

Z_g – piksekaitsetrosside impulsstakistus.

Suurused R_i ja Z_g arvutatakse valemitega (3.8) ja (3.9) järgmiselt [19]:

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I_R}{I_g}}} \quad (3.8)$$

$$I_g = \frac{\rho E_g}{2\pi R_0^2} \quad (3.9)$$

kus R_0 – masti maanduse arvutuslik või mõõdetud maandustakistus,

ρ – pinnase eritakistus,

E_g – pinnase läbilöögigradient, 400 kV/m.

Kokkuvõttes arvestab valemi (3.5) murru lugeja tekkiva kriitilise pingega isolaatorketil ning murru nimetaja võtab arvesse äikesepulsile mõjuva takistuse, mis sisaldab endas piksekaitsetrosside, masti ja masti maandustakistust. Mida suurem on masti maandustakistus, seda suurem on tekkiv pinge isolaatorketil ja seda tõenäolisemalt tekib vastusuunaline ülelöök [19].

Vastusuunaliste ülelöökide määra arvutamine on arvutusmahukas protsess. Kuna töö eesmärgiks on hinnata maandustakistuse mõju vaadeldava liini lõikes, ehk arvutuse algandmed muutuvad tulenevalt masti kõrgusest, pinnase eritakistusest, maandustakistusest on töös kasutatud erialakirjandusest leitud programmi nimega IEEE Flash.

3.4 Programmi IEEE Flash tutvustus

IEEE Flash programmi on kasutatud äikesetoimeliste rikete uurimiseks ja hindamiseks alates 1980-ndate keskpaigast ning programmi on pidevalt arendatud [24]. Viimane programmi uuendus pärineb aastast 2013. Programmi kasutatakse piksekaitsetrossist möödalöögi ja vastusuunaliste ülelöökide määra arvutamiseks. Järgnevalt on loetletud programmi sisestatavad lähteandmed ning nende põhimõtted, eeldused ja lihtsustused:

- Äikesetormide eeldused – äikese esinemist piirkonnas kirjeldatakse äikesepäevade arvu või äikesetundide arvu aastase väärtusega [25].
- Äikeselöökide tihedus – äikesepäevade ja äikesetundide arvu alusel arvutatakse äikeselöökide tihedus. Eestis oli ajavahemikul 2005-2013 äikeselöökide keskmiseks tiheduseks 0,41 äikeselööki ruutkilomeetri kohta aastas [16]. Pikemaajaline statistika näitab, et Eesti keskmine äikeselöökide tihedus on ca. 1,7 1/(km² · a) [20].

- Äikeselöögi liini tabamuste arv – Äikesepäevade arvu alusel hinnatakse äikese liini tabamise tõenäosust saja kilomeetri kohta. Liini ümber maapinnale kujutatakse ala, mida tabav äikeselöök loetakse liinitabamuseks. Ala hindamisel lähtutakse järgnevast valemist [26]:

$$N_L = 0,004T^{1,35}(b + 4h^{1,09}) \quad (3.10)$$

kus N_L – liini tabamuste arv,

T – äikesepäevade arv,

h – keskmine piksekaitsetrosside kõrgus, m ,

b – keskmine äikesekaitsetrosside vaheline kaugus, m .

- Äikeseimpulsside arv – äikeselöök võib sisaldada mitut erinevat äikeseimpulssi, mille kestus on mõõdetav mikrosekundites. 55% äikeselöökidest sisaldavad üle ühe impulsi. Impulsside arvu mediaanväärtus on 3 [26].
- Äikeseimpulsi parameetrid – äikeseimpulsi amplituudid ja lainekuju on juhuslik suurus, mis määratakse käsiraamatutes esitatud tüüpikarakteristikute järgi. Äikeseimpulsi tipuväärtuse mediaaniks on 31 kA ja frondi kestus 2 μs [25].
- Isolaatorite isolatsioonitugevus – pinge, mille ületamisel toimub isolatsiooni ülelööök arvutatakse valemiga (3.11) [25]:

$$U_{FO}(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}}\right)W \quad (3.11)$$

kus $U_{FO}(t)$ – ülelöökipinge sõltuvus frondi kestusest,

t – frondi kestus,

W – isolaatorketi pikkus või sädevahemike õhkvahe.

- Masti geomeetria – masti impulsstakistus sõltub masti geomeetriast. Lihtsustatud lähenemise alusel kirjeldatakse masti mõõtmeid masti keskmise raadiusega. Keskmise raadiuse arvutamiseks kasutatakse valemit (3.12) ning masti impulsstakistuse arvutamiseks valemit . [25]

$$R_{avg} = \frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{h_1 + h_2} \quad (3.12)$$

kus r_1 – masti tipu raadius, m ,

r_2 – masti keskkoha raadius, m ,

r_3 – masti põhja raadius, m ,

h_1 – kõrgus masti põhjast keskkohani, m ,

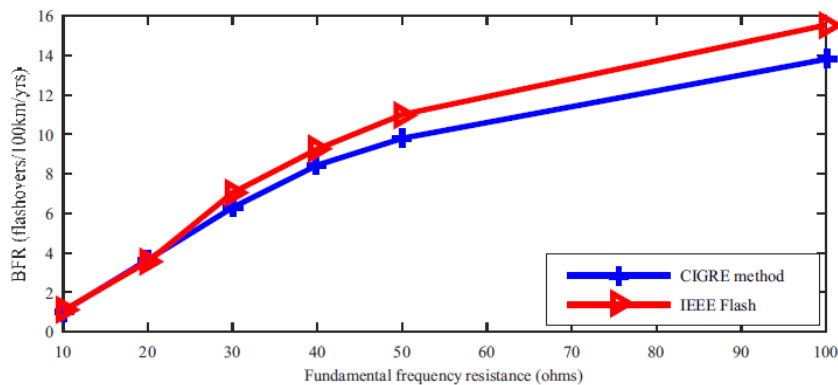
h_2 – kõrgus masti keskkohast tipuni, m .

$$Z_{avg} = 60 \log_e \cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{R_{avg}}{h_1 + h_2} \right) \right) \quad (3.13)$$

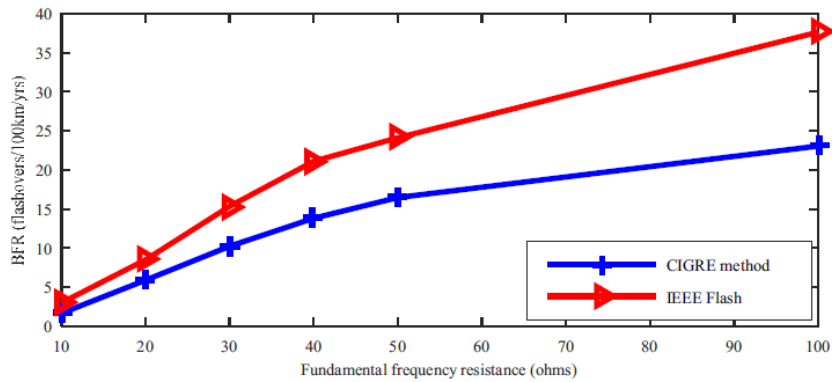
Allikale [27] tuginedes annab IEEE Flash võrreldes CIGRÉ meetodiga kõrgemad vastusuunaliste ülelööride määrad. Allikas uuriti ühe – ja kaheaheelalise 230 kV liini vastusuunaliste ülelööride määrasid sõltuvalt arvutusmeetodist. Järgnevalt on toodud võrdluse lähtesuurused (vt. Joonis 3.4) ja tulemustena saadud vastusuunaliste ülelööride määrad üheaheelalise (vt. Joonis 3.5) ja kaheaheelalise (vt. Joonis 3.6) korral [27].

Data description	Values
Critical flashover voltage, CFO	960 [kV]
Soil resistance, R_0	10, 20, 30, 40, 50, 100 [Ω]
Overhead ground wire height, h	30, 49 [m]
Phase conductor height, y	24, 42 (highest phase) [m]
Power frequency factor, K_{pf}	0.40, 0.70

Joonis 3.4 Arvutusmeetodi võrdluse lähteandmed [27]



Joonis 3.5 Vastusuunaliste ülelööride määrad üheaheelalise liini korral [27]



Joonis 3.6 Vastusuunaliste ülelöökide määrad kaheahelalise liini korral [27]

Katsetulemustest järeldeb, et IEEE Flash annab mõlema liini konfiguratsiooni korral kõrgemad tulemused kui CIGRÉ meetod. Millest erinevused tekivad ei ole allikas kirjeldatud. Võib eeldada, et IEEE Flash meetodi äikeseparameetrid ja masti maandustakistuse arvestamine on lihtsustatud ning erinevused tekivad lineariseeritud tüüpgraafikute kasutamisest. Katsetulemuste põhjal võib järeldebada, et IEEE Flashi saab kasutada CIGRÉ meetodi asemel, sest arvutuslik vastusuunaliste ülelöökide määr on suurem kui CIGRÉ meetodil saadud tulemus, seega on tekkiv viga positiivses suunas, ning arvutuste alusel saadakse liini vastusuunaliste ülelöökide määra suurema, kui see tegelikult on. Graafikutelt on näha, et tekkiv viga maandustakistuse 10 Ω läheduses, ei ole kuigi suur ning IEEE Flash programmiga saadakse piisava täpsusega tulemused.

3.5 Vastusuunaliste ülelöökide määra analüüs

Liini töökindluse analüüsimiseks on arvatud levinumate mastitüüpide vastusuunaliste ülelöökide määrad programmiga IEEE Flash. Liin koosneb 80% ulatuses kandemastidest ning ülejäänud 20% moodustavad ankrumastid. Kandemastid jagunevad vabaltseisvateks, vantmastideks ning avariid piiravateks vantmastideks. Ankrumastid on valdavalt ühesuguse ehitusega, kuid sõltuvalt liini nurga suurusest on mastide mehaaniline tugevus erinev. Tulenevalt liini mastide sisaldusest on arvatud nelja erineva mastitüübi vastusuunaliste ülelöökide määr. Liini trassist ja maapinna pikiprofiilist sõltuvalt varieeruvad ka mastide kõrgused, mis on arvutustes samuti arvesse võetud. Peamiste mastitüüpide joonised ja põhimõõdud on esitatud töö lisades ning need pärinevad Empower AS projektist KPL1707K0.

Lisaks mastide tüübile ja kõrgusele on arvutustes arvesse võetud masti pinnase eritakistus ja sellest tulenev maandustakistus. Liini lõikes jääb pinnase eritakistus vahemikku 50...2000 Ω m. Tulenevalt pinnase eritakistusest ja masti tüübist on arvatud mastide maandustakistused, mis valdavalt jäävad vahemikku 2...30 Ω (vt. Tabel 2.5). Valdavalt paiknevad mastid pinnases 50...150 Ω m ning mastide maandustakistus jääb vahemikku 4...8 Ω . Üksikud mastid paiknevad ka liivases pinnases eritakistusega 1000...2000 Ω m ning nende maandustakistus on vahemikus 15...30 Ω .

Mastide vastusuunaliste ülelöökide määra arvutustulemused sõltuvalt masti tüübist, kõrgusest ja masti maandustakistusest ning on toodud lisas 1. Tabelist selgus, et lisaks maandustakistusele avaldab märgatavat mõju vastusuunaliste ülelöökide määrale ka masti kõrgus. Mida kõrgem on mast seda kõrgem on ka ülelöögi tekkimise tõenäosus. Liini vastusuunaliste ülelöökide määrad on arvatud eraldi 330 kV liinile ja 110 kV liinile. Arvutuste tulemusena peab selguma, kas liin vastab esitatud töökindluse nõuetele. Suurim vastusuunalise ülelöögi määr saadakse kõrgete mastide korral. Järgnevalt on esitatud vastusuunaliste ülelöökide määrad 330 kV (vt. Tabel 3.1) ja 110 kV (vt. Tabel 3.2) korral.

Arvutuse tulemusena on vastusuunaliste ülelöökide määraks saadud 330kV liini korral 0,29 ning 110 kV liini korral 2,60. Võttes arvesse, et IEEE Flash programmiga arvatud suurused on mõnevõrra suuremad nõutud CIGRÉ meetodil põhinevad tulemused, võib öelda, et tegelikud suurused on saadud tulemustest mõnevõrra väiksemad. Lähteülesandes nõutud vastusuunaliste ülelöökide määrad olid 330 kV puhul 0,35 ja 110 kV puhul 3,25. Seega võib arvutustulemuste põhjal öelda, et projekteeritud liin vastab töökindluse nõuetele. Tuleb arvestada, et kaheaheelaliste 330 kV ja 110 kV liinidel toimub valdav osa ülelöökidest 110 kV liini, sest isolatsioonitugevus on 110 kV puhul on tunduvalt väiksem.

Tabel 3.1 110 kV liini vastusuunaliste ülelöökide määr arvutustulemuste põhjal

Masti tüüp ja kirjeldus	Osakaal 100 km liinist %	Masti kõrgus	Pinnase eritakistus Ωm	Arvutuslik maandus-takistus Ω	BFR 100 km kohta	Mastide BFR osakaal
31TxY - Nurga-ankrumast (x tähistab nurga suuruste vahemikku)	2	45	50	2	1,23	0,02
	12	45	150	4	1,9	0,23
	6	45	300	8	3,6	0,22
	1	45	1000	15	7,23	0,07
31S0Y - Vabaltseisev kandemast	15	39	150	4	1,42	0,21
	20	39	300	8	2,73	0,55
	4	39	600	10	3,51	0,14
	1	39	1500	20	7,81	0,08
31S0G - Vant kandemast ja avariid piirav mast	4	43,5	100	2	1,13	0,05
	17	43,5	150	4	1,76	0,30
	14	43,5	300	8	3,37	0,47
	1	43,5	1000	15	6,01	0,06
31S1G - Vant kandemast (kuni 20° nurk)	1	44,2	150	4	1,93	0,02
	1	44,2	300	8	3,65	0,04
	1	44,2	2000	30	14,71	0,15
Kokku	100					2,60

Tabel 3.2 330 kV liini vastusuunaliste ülelöökide määr arvutustulemuste põhjal

Masti tüüp ja kirjeldus	Osakaal 100 km liinist %	Masti kõrgus	Pinnase eritakistus Ωm	Arvutuslik maandus-takistus Ω	BFR 100 km kohta	Mastide BFR osakaal
31TxY - Nurga-ankrumast (x tähistab nurga suuruste vahemikku)	2	45	50	2	0,14	0,00
	12	45	150	4	0,19	0,02
	6	45	300	8	0,33	0,02
	1	45	1000	15	0,66	0,01
31S0Y - Vabaltseisev kandemast	15	39	150	4	0,18	0,03
	20	39	300	8	0,32	0,06
	4	39	600	10	0,66	0,03
	1	39	1500	20	0,95	0,01
31S0G - Vant kandemast ja avariid piirav mast	4	43,5	100	2	0,12	0,00
	17	43,5	150	4	0,2	0,03
	14	43,5	300	8	0,31	0,04
	1	43,5	1000	15	0,69	0,01
31S1G - Vant kandemast (kuni 20° nurk)	1	44,2	150	4	0,18	0,00
	1	44,2	300	8	0,3	0,00
	1	44,2	2000	30	1,64	0,02
Kokku	100					0,29

3.6 Liini töökindluse kokkuvõte

Allikas [16] on uuritud aastatel 2005-2014 toimunud rikkeid põhivõrgu liinidel ning arvatud äikese poolt põhjustatud rikete arvud sõltuvalt rikete arvust liinil ja liini pikkusest. Äikese poolt põhjustatud rikete arvuks 100 km kohta aastas on saadud 110 kV liinide puhul 0,606 ning 330 kV liinide puhul 0,1 [16]. Saadud väärtused võib lugeda vastusuunaliste ülelööride määraga võrdseks. Käesoleva töö raames saadud vastusuunaliste ülelööride väärtus 2,60 (110 kV) on neli korda suurem ja 0,29 (330 kV) on kolm korda suurem 2005-2014 aastatel toimunud rikestest.

Kolme-nelja kordne erinevus on põhjendatav sellega, et aastatel 2005-2014 oli aasta keskmiseks äikesetiheduseks $0,41 \text{ 1/(km}^2 \cdot \text{a)}$ [16]. Antud arvutustes kasutati äikesetihedusena allikas [20] toodud suurust $1,7 \text{ 1/(km}^2 \cdot \text{a)}$, mis on tugineb pikaajalisemale statistikale. Kuna äikesetihedus erineb arvutuste lõikes pea 4 korda, on sellega seletatavad ka proportsionaalsed erinevused käesolevas töös saadud tulemustega.

Standardis kirjeldatud maandustakistused, mis tagavad vastuvõetava ülelööride määra sõltuvalt pinnase eritakistuses, ei taga antud olukorras lähteülesandes määratud normi, sest pinnase eritakistusele vastavad maandustakistused on liiga suured. Projekteerides liini standardis toodud soovituslike maandustakistuse väärtustega oleks vastusuunalise ülelöögi väärtused olnud 110 kV puhul 6,24 ja 330 kV puhul 0,62. Kuna mastide loomulik maandus vaimaandurite näol tagab tunduvalt parema maandustakistuse, kui standardis nõutud, on liini vastusuunaline ülelööride lähteülesandes kirjeldatud normide piires.

Arvutustulemuste põhjal ei saa öelda, et standardis toodud seosed oleks valed, vaid pigem on liinidele esitatavad nõuded muutunud karmimaks. Antud situatsioonis olid mastide vundamendid valdavalt lahendatud vaivundamentidega, mis tagavad hea loomuliku maanduse ja madala maandustakistuse, mille tõttu saavutati nõuetele vastav vastusuunaliste ülelööride määr täiendavate maanduskontuurideta. Kui vaadeldav liin oleks ehitatud kasutades valdavalt seenvundamente, oleks mastide maandustakistuste suurused lähenenud standardis nimetatud väärtustele ning vastusuunaliste ülelööride määr oleks lähenenud suurustele - 110 kV puhul 6,24 ja 330 kV puhul 0,62. Sellises olukorras oleks lähteülesandes nõutud väärtuste tagamiseks vajalik kasutada maanduskontuure.

Kasutatud kirjandus

- [1] "Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 1: Üldnõuded. Ühised eeskirjad," *EVS-EN 50341-1:2013*.
- [2] A. E. Elekter, "Esvika kataloog." [Online]. Available: <https://www.esvika.ee/kataloog/>.
- [3] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," *IEEE Std 80-2013 (Revision IEEE Std 80-2000/ Inc. IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)*, pp. 1–226, 2015.
- [4] "Hankedokumendid," *Elering AS*.
- [5] F. Kiessling, P. Nefzger, J. F. Nolasco, and U. Kaintzyk, *Overhead power lines : planning, design, construction*. Berlin ; New York : Springer, 2003.
- [6] Mark Enns, "Theory of Line Constants Computation," 1998.
- [7] L. Yong-ling, L. Yang, Z. Zhi-cheng, and T. Feng-bo, "Simulation research on distribution of short-circuit current of transmission lines after lightning flashover," in *2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA)*, 2013, pp. 813–816.
- [8] C. F. Desieno, P. P. Marchenko, and G. S. Vassell, "General Equations for Fault Currents in Transmission Line Ground Wires," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, no. 8, pp. 1891–1900, Nov. 1970.
- [9] M. Vintan and A. Buta, "Ground Fault Current Distribution on Overhead Transmission Lines," *Facta Univ. - Ser. Electron. Energ.*, vol. 19, 2006.
- [10] M. Vintan, "Evaluating transmission towers potentials during ground faults," *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 9, pp. 182–189, 2008.
- [11] M. Vintan, I. Mihiu, and I. Borlea, "COUPLING FACTOR INFLUENCE ON AC OVERHEAD LINE GROUND FAULT CURRENTS," *J. Sustain. ENERGY*, vol. 1, pp. 2067–5534, 2010.
- [12] TNS Telestöörningsnämnden, "Meddelanden från TELESTÖRNINGSNÄMNDEN, NR 20, Utgåva 4," 2019.
- [13] "XGSLab rel. 8.3.1 User's Guide," *SINT Ing. Srl*.

- [14] W. K. Switzer, "Practical Guide to Electrical Grounding," 1999.
- [15] "SupAnchor, Self Drilling Anchor System - T73." [Online]. Available: <http://www.supanchor.com/content/?162.html>.
- [16] Ü. Pärnat, "Äikesest põhjustatud liinide rikked Eesti põhivõrgus," TTÜ Elektroenergeetika instituut, 2015.
- [17] P. Taklaja, "110 kV õhuliinide isolatsiooni töökindluse analüüs ja töökindluse tõstmise meetodid," TTÜ Elektroenergeetika Instituut, 2012.
- [18] "Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 2-20: Eesti siseriiklikud erinõuded (SEN)," *EVS-EN 50341-2-20:2018*.
- [19] W. Cigre, "33-01,," *Guid. to Proced. Estim. Light. Perform. Transm. lines,* CIGRE Broch., vol. 63, 1991.
- [20] T. Metusala, "OÜ PÕHIVÕRGU 110kV ja 330kV liinide äiksekindluse analüüs," 2008.
- [21] N. Malcolm and R. K. Aggarwal, "Assessment of shielding performance of 69/138 kV transmission lines exposed to lightning strikes," in *2015 IEEE Power Energy Society General Meeting*, 2015, pp. 1–5.
- [22] S. Talaei Mobarakei, T. Sami, and B. Porkar, "Back Flashover phenomenon analysis in power transmission substation for insulation coordination," in *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2012, pp. 170–174.
- [23] S. de Castro Assis, W. do Couto Boaventura, J. O. S. Paulino, and R. L. Markiewicz, "Lightning Performance of Transmission Line with and without Surge Arresters: Comparison between a Monte Carlo method and field experience," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 149, pp. 169–177, 2017.
- [24] W. Chisholm, "The IEEE Flash Program: A Structure for Evaluation of Transmission Lightning Performance," *IEEE Trans. Power Energy*, vol. 121, pp. 914–917, 2001.
- [25] J. T. Whitehead *et al.*, "Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. Estimating lightning performance of transmission lines. II. Updates to analytical models," *IEEE Trans. Power Deliv. (Institute Electr. Electron. Eng. (United States))*, vol. 8:3, 1993.

- [26] "A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, no. 4, pp. 918–932, 1985.
- [27] T. Thanasaksiri, "Comparison of CIGRE Method and IEEE-Flash Software for Back-flashover Rate Calculations," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 86, pp. 445–448, 2016.

KOKKUVÕTE

Maanduspaigaldis on õhuliini osa, mille eesmärk on tagada liini töökindlus, kaitse pikselöögi eest ja inimese ohutus rikkeolukorras. Lõputöös uuriti maanduspaigaldisele esitatavaid nõudeid ja arvutuskäike nõuetekohase maanduspaigaldise projekteerimiseks.

Töö esimeses põhiosas uuriti maandusjuhtidele esitatavaid nõudeid mehaanilise tugevuse, korrosioonikindluse ja termilise tugevuse seisukohalt. Maandusjuhi valikul tuleb veenduda, et kasutatavad materjalid vastaksid standardis esitatud nõuetele. Alla viie sekundi jooksul väljalülitatavate lühiste korral on vaja täiendavalt arvutada maandusjuhi minimaalne lubatav ristlõige. Peatükis uuriti ka lühisvoolu jagunemist lühisekohas, sest on maanduspaigaldist läbiv vool on maandusjuhi valiku ja inimese ohutuse üks tähtsamaid lähtesuursi.

Töö teises põhiosas keskenduti maanduspaigaldise dimensioneerimisele inimese ohutuse seisukohast. Maanduspaigaldises tekkivad puute- ja sammupinged sõltuvad masti maandustakistusest ja seda läbivast voolust. Peatükis uuriti masti vundamentide kasutamist maandurina ning nende arvutuslikku maandustakistust programmiga XGSLab. Töö tulemusena selgus, et vundamendid tagavad hea maandustakistuse ja nende kasutamisel maanduritena ei ole enamasti vaja täiendavaid maanduskontuure rajada. Puute – ja sammupingete arvutamiseks kasutati programmi XGSLab. Simulatsioonidega töötati välja kaheaheelalise 110 kV masti maanduspaigaldis, mis vastab inimese ohutusele seatud nõuetele. Samuti uuriti masti maanduspaigaldist kariloomade ohutuse seisukohalt. Töö tulemusena selgus, et kohtades, kus inimeste viibimine on tõenäoline, on tarvis rajada täiendav maanduskontuur ning kasutada potentsiaaliühtlustusringe. Peatükis leitud vundamentide maandustakistused on algandmeteks liini töökindluse hindamisel.

Töö kolmandas peatükis uuriti liini töökindluse hindamise meetodeid ja arvutati välja liinilõigu vastusuunaliste ülelööride määr programmiga IEEE Flash. Teema uurimine oli oluline, kuna projekteerimisülesandes sätestati vastassuunaliste ülelööride määr, kuid standard EVS-EN 50341-2-20:2018 ei kajasta konkreetseid väärtusi vastusuunaliste ülelööride hindamiseks vaid annab nõutavad maandustakistuste väärtused sõltuvalt pinnase eritakistusest. Seega ei olnud arvutusliku tõestust, et standardis kirjeldatud mastide maandustakistuste tagamisel on tagatud ka nõutav ülelööride määr. Töö tulemusena selgus, et standardis EVS-EN 50341-2-20:2018 loetletud nõuded ei tagaks lähteülesandes nõutud vastusuunaliste ülelööride määra. Vaivundamentide väikesed maandustakistused tagavad siiski lähteülesandes nõutud väärtused. Üksikud suure eritakistusega asukohad suurendavad ülelööride arvu masti seisukohalt, kuid liini kui terviku töökindlust oluliselt ei halvenda.

SUMMARY

Grounding system of a transmission line is responsible of ensuring proper reliability levels, lightning performance and human safety in fault cases. Thesis discusses and gives an overview of the requirements and calculation methods for proper grounding system design.

In the first chapter of the thesis mechanical strength, corrosion resistance and minimal cross-section in terms of thermal capacity is analyzed. When choosing the grounding system material, the requirements presented in standards must be met. Minimal allowable cross-section of an electrode must be calculated if the fault clearance time is under 5 seconds. Chapter also discusses the distribution of fault currents in fault location, because the fault current in the grounding system is one of the main values when choosing grounding electrodes and evaluating human safety.

Second chapter of the thesis investigates grounding system design from the perspective of human safety. Touch and step voltages of the grounding system depend on the fault current and tower grounding resistance. Chapter discusses the use of foundations as a grounding device and grounding resistances of the foundations were calculated using XGSlab. As a result it was found, that foundations provide a good grounding resistance and the use of additional grounding electrodes is often not necessary. Touch and step voltages were calculated using XGSlab software. Proper grounding system of a 110 kV double circuit tower was developed using the simulations to ensure human safety during the faults. Safety of the cattle was also discussed. As a result it was concluded that additional grounding electrodes and potential grading electrodes must be used to ensure human safety. Grounding resistances calculated in this chapter were used to estimate the lightning performance of the transmission line in chapter three.

In the third chapter the transmission line lightning performance estimation methods were investigated and the backflash rate was calculated using the IEEE Flash software. Investigation of the matter was necessary because the technical task requirements stated a permissible value of backflash rate, but the standard used for grounding system design does not mention backflash rate values but only gives requirements considering soil resistivity and grounding resistance. Relationship between the specific backflash rate value and grounding resistance was unknown. As a result it was determined, that the requirements stated in the standard EVS-EN 50341-2-20:2018 would not meet the requirements set by the technical task. However, the low grounding resistance provided by injection foundations met the set backflash rate. Few locations with high soil resistance increase the backflash rate of a tower, but do not have a large impact on the total line lightning performance.

LISAD

Lisa 1 110 kV liini vastusuunaliste ülelöökide määra arvutustulemused

Lisa 2 330 kV liini vastusuunaliste ülelöökide määra arvutustulemused

Lisa 3 Masti 31TxY üldjoonis

Lisa 4 Masti 31S0Y üldjoonis

Lisa 5 Masti 31S0G üldjoonis

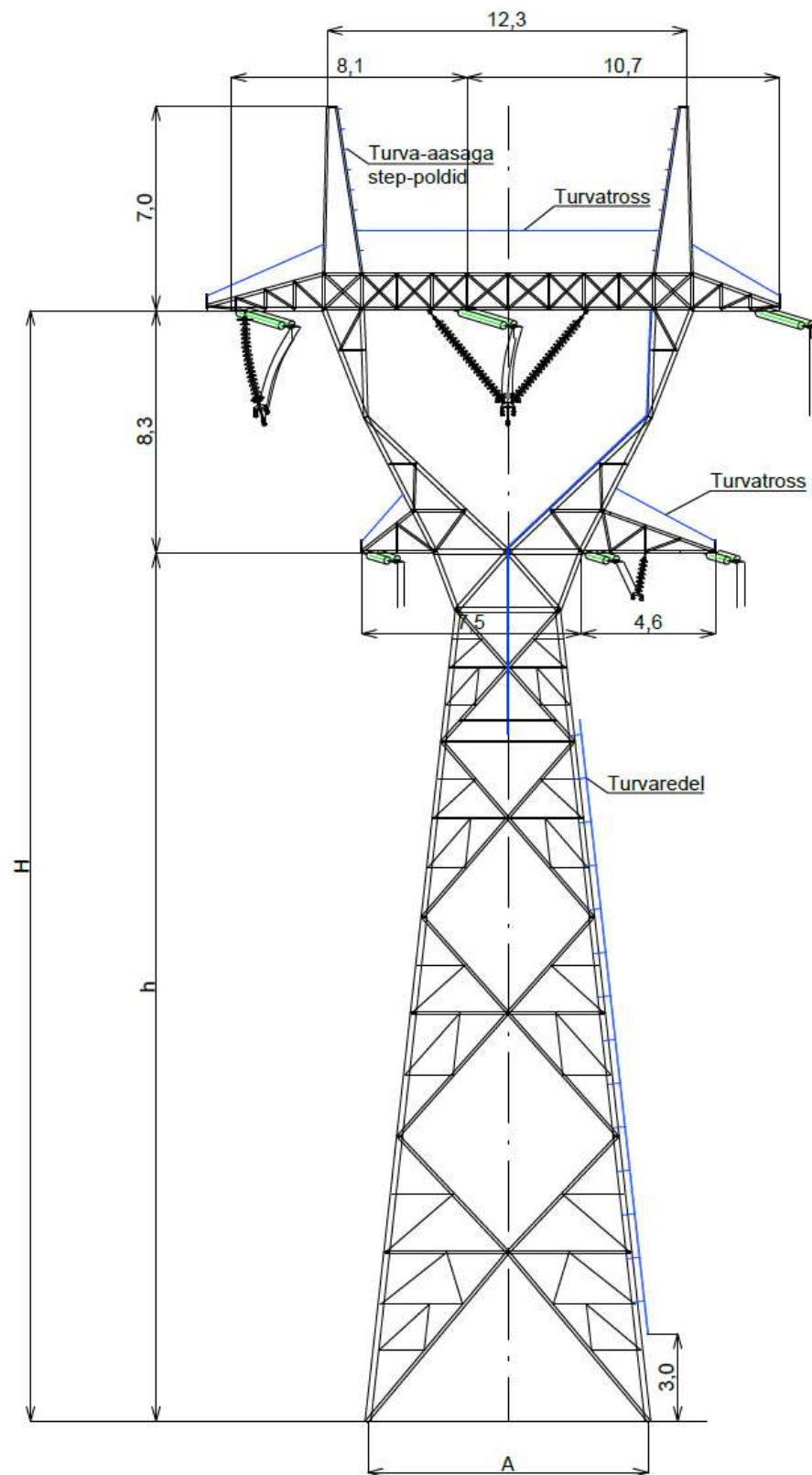
Lisa 6 Masti 31S1G üldjoonis

Masti tüüp ja kirjeldus	Ülemiste traaversite kõrgus m	Alumiste traaversite kõrgus m	110 kV juhtmete kõrgus m	Piksekaitsetrossi kõrgus m	Masti jalandite vahekaugus m	Juhi number	110 kV juhtmete koordinaadid		Piksekaitsetrosside koordinaadid		110 kV liini BFR sõltuvalt masti impulsstakistusest							
							X m	Y m	X m	Y m	2 Ω	4 Ω	6 Ω	8 Ω	10 Ω	15 Ω	20 Ω	30 Ω
31TxY - Nurga-ankrumast (x tähistab nurga suuruste vahemikku)	38	29,7	29,7	45	9	1	-4,8	29,7	-6,15	45	1,23	1,9	2,7	3,6	4,58	7,23	9,89	14,5
						2	2,7	29,7	6,15	45								
						3	7,4	29,7	-	-								
	35	26,7	26,7	42	8,5	1	-4,8	26,7	-6,15	42	1,02	1,63	2,38	3,23	4,18	6,76	9,37	13,91
						2	2,7	26,7	6,15	42								
						3	7,4	26,7	-	-								
	32	23,7	23,7	39	7,8	1	-4,8	23,7	-6,15	39	0,83	1,38	2,08	2,89	3,8	6,3	8,86	13,33
						2	2,7	23,7	6,15	39								
						3	7,4	23,7	-	-								
	29	20,7	20,7	36	7,2	1	-4,8	20,7	-6,15	36	0,6	1,08	1,71	2,46	3,32	5,74	8,26	12,67
						2	2,7	20,7	6,15	36								
						3	7,4	20,7	-	-								
	26	17,7	17,7	33	6,5	1	-4,8	17,7	-6,15	33	0,46	0,89	1,47	2,18	3	5,34	7,8	12,12
						2	2,7	17,7	6,15	33								
						3	7,4	17,7	-	-								
	23	14,7	14,7	30	6,4	1	-4,8	14,7	-6,15	30	0,3	0,66	1,17	1,82	2,59	4,85	7,26	11,5
						2	2,8	14,7	6,15	30								
						3	7,4	14,7	-	-								
31S0Y - Vabaltseisev kandemast	39	30	28,4	43,5	7,75	1	-4,9	28,4	-7,15	39	0,91	1,42	2,03	2,73	3,51	5,64	7,87	11,93
						2	0	28,4	7,15	39								
						3	4,9	28,4	-	-								
	36	27	25,4	40,5	7,3	1	-4,9	25,4	-7,15	36	0,83	1,27	1,95	2,74	3,64	6,14	8,72	13,22
						2	0	25,4	7,15	36								
						3	4,9	25,4	-	-								
	33	24	22,4	37,5	6,85	1	-4,9	22,4	-7,15	33	0,6	1,12	1,77	2,54	3,41	5,83	8,34	12,74
						2	0	22,4	7,15	33								
						3	4,9	22,4	-	-								
	30	21	19,4	34,5	6,4	1	-4,9	19,4	-7,15	30	0,46	0,66	1,17	1,82	2,59	4,85	7,26	11,5
						2	0	19,4	7,15	30								
						3	4,9	19,4	-	-								
	27	18	16,4	31,5	5,95	1	-4,9	16,4	-7,15	27	0,29	0,59	1,01	1,54	2,16	4	6,01	9,74
						2	0	16,4	7,15	27								
						3	4,9	16,4	-	-								
31S0G - Vant kandemast ja avariid piirav mast	39	30	28,4	43,5	15	1	-4,1	28,4	-7,8	43,5	1,13	1,76	2,51	3,37	4,31	6,87	9,45	13,98
						2	0	28,4	7,8	43,5								
						3	4,1	28,4	-	-								
	37	28	26,4	41,5	15	1	-4,1	26,4	-7,8	41,5	1,01	1,60	2,31	3,14	4,05	6,56	9,11	13,59
						2	0	26,4	7,8	41,5								
						3	4,1	26,4	-	-								
	35	26	24,4	39,5	15	1	-4,1	24,4	-7,8	39,5	0,89	1,44	2,12	2,91	3,80	6,25	8,76	13,19
						2	0	24,4	7,8	39,5								
						3	4,1	24,4	-	-								
	33	24	22,4	37,5	15	1	-4,1	22,4	-7,8	37,5	0,77	1,28	1,92	2,68	3,54	5,94	8,42	12,80
						2	0	22,4	7,8	37,5								
						3	4,1	22,4	-	-								
	31	22	20,4	35,5	15	1	-4,1	20,4	-7,8	35,5	0,64	1,11	1,72	2,45	3,28	5,63	8,08	12,40
						2	0	20,4	7,8	35,5								
						3	4,1	20,4	-	-								
	29	20	18,4	33,5	15	1	-4,1	18,4	-7,8	33,5	0,52	0,95	1,53	2,22	3,03	5,32	7,73	12,01
						2	0	18,4	7,8	33,5								
						3	4,1	18,4	-	-								

Masti tüüp ja kirjeldus	Ülemiste traaversite kõrgus m	Alumiste traaversite kõrgus m	110 kV juhtmete kõrgus m	Piksekaitse-trossi kõrgus m	Masti jalandite vahekaugus m	Juhi number	110 kV juhtmete koordinaadid		Piksekaitsetrosside koordinaadid		110 kV liini BFR sõltuvalt masti impulsstakistusest							
							X m	Y m	X m	Y m	2 Ω	4 Ω	6 Ω	8 Ω	10 Ω	15 Ω	20 Ω	30 Ω
31S0G - Vant kandemast ja avariid piirav mast	27	18	16,4	31,5	15	1	-4,1	16,4	-7,8	31,5	0,40	0,79	1,33	1,99	2,77	5,01	7,39	11,61
						2	0	16,4	7,8	31,5								
						3	4,1	16,4	-	-								
31S1G - Vant kandemast (kuni 20° nurk)	39	29,5	28,5	44,2	15	1	-4,1	28,51	-10,5	44,2	1,25	1,93	2,74	3,65	4,65	7,34	10,03	14,71
						2	0	28,51	10,5	44,2								
						3	4,1	28,51	-	-								
	37	27,5	26,5	42,2	16	1	-4,1	26,51	-10,5	42,2	1,11	1,75	2,51	3,39	4,36	6,99	9,64	14,26
						2	0	26,51	10,5	42,2								
						3	4,1	26,51	-	-								
	35	25,5	24,5	40,2	17	1	-4,1	24,51	-10,5	40,2	0,97	1,56	2,29	3,12	4,06	6,63	9,24	13,80
						2	0	24,51	10,5	40,2								
						3	4,1	24,51	-	-								
	33	23,5	22,5	38,2	18	1	-4,1	22,51	-10,5	38,2	0,83	1,38	2,06	2,86	3,77	6,28	8,85	13,35
						2	0	22,51	10,5	38,2								
						3	4,1	22,51	-	-								
	31	21,5	20,5	36,2	19	1	-4,1	20,51	-10,5	36,2	0,69	1,19	1,83	2,60	3,47	5,92	8,45	12,89
						2	0	20,51	10,5	36,2								
						3	4,1	20,51	-	-								
	29	19,5	18,5	34,2	20	1	-4,1	18,51	-10,5	34,2	0,55	1,01	1,61	2,33	3,18	5,57	8,06	12,44
						2	0	18,51	10,5	34,2								
						3	4,1	18,51	-	-								
	27	17,5	16,5	32,2	21	1	-4,1	16,51	-10,5	32,2	0,41	0,82	1,38	2,07	2,88	5,21	7,66	11,98
						2	0	16,51	10,5	32,2								
						3	4,1	16,51	-	-								

Masti tüüp ja kirjeldus	Ülemiste traaversite kõrgus m	Alumiste traaversite kõrgus m	330 kV juhtmete kõrgus m	Piksekaitsetrossi kõrgus m	Masti jalandite vahekaugus m	Juhi number	110 kV juhtmete koordinaadid		Piksekaitsetrosside koordinaadid		330 kV liini BFR sõltuvalt masti maandustakistusest								
							X m	Y m	X m	Y m	2 Ω	4 Ω	6 Ω	8 Ω	10 Ω	15 Ω	20 Ω	30 Ω	
31TxY - Nurga-ankrumast (x tähistab nurga suuruste vahemikku)	38	29,7	38	45	9	1	-8,1	38	-6,15	45	0,14	0,19	0,26	0,33	0,41	0,66	0,95	1,64	
						2	0	38	6,15	45									
						3	10,7	38	-	-									
	35	26,7	35	42	8,5	1	-8,1	35	-6,15	42	0,11	0,16	0,22	0,29	0,37	0,6	0,88	1,55	
						2	0	35	6,15	42									
						3	10,7	35	-	-									
	32	23,7	32	39	7,8	1	-8,1	32	-6,15	39	0,1	0,15	0,2	0,27	0,34	0,57	0,84	1,49	
						2	0	32	6,15	39									
						3	10,7	32	-	-									
	29	20,7	29	36	7,2	1	-8,1	29	-6,15	36	0,08	0,12	0,17	0,23	0,3	0,51	0,76	1,39	
						2	0	29	6,15	36									
						3	10,7	29	-	-									
	26	17,7	26	33	6,5	1	-8,1	26	-6,15	33	0,06	0,1	0,13	0,2	0,26	0,46	0,76	1,31	
						2	0	26	6,15	33									
						3	10,7	26	-	-									
	23	14,7	23	30	6,4	1	-8,1	23	-6,15	30	0,05	0,08	0,12	0,17	0,23	0,42	0,65	1,25	
						2	0	23	6,15	30									
						3	10,7	23	-	-									
31S0Y - Vabaltseisev kandemast	39	30	35	43,5	7,75	1	-9	35	-7,15	39	0,13	0,18	0,24	0,31	0,39	0,62	0,9	1,57	
						2	0	35	7,15	39									
						3	9	35	-	-									
	36	27	32	40,5	7,3	1	-9	32	-7,15	36	0,12	0,17	0,22	0,29	0,36	0,59	0,86	1,51	
						2	0	32	7,15	36									
						3	9	32	-	-									
	33	24	29	37,5	6,85	1	-9	29	-7,15	33	0,1	0,14	0,19	0,25	0,32	0,53	0,78	1,41	
						2	0	29	7,15	33									
						3	9	29	-	-									
	30	21	26	34,5	6,4	1	-9	26	-7,15	30	0,08	0,12	0,15	0,22	0,28	0,48	0,78	1,33	
						2	0	26	7,15	30									
						3	9	26	-	-									
	27	18	23	31,5	5,95	1	-9	23	-7,15	27	0,07	0,1	0,14	0,19	0,25	0,44	0,67	1,27	
						2	0	23	7,15	27									
						3	9	23	-	-									
	31S0G - Vant kandemast ja avariid piirav mast	39	30	35	43,5	15	1	-9,7	35	-7,8	43,5	0,15	0,20	0,26	0,33	0,41	0,64	0,92	1,59
							2	0	35	7,8	43,5								
							3	9,7	35	-	-								
37		28	33	41,5	15	1	-9,7	33	-7,8	41,5	0,14	0,19	0,24	0,31	0,38	0,61	0,88	1,53	
						2	0	33	7,8	41,5									
						3	9,7	33	-	-									
35		26	31	39,5	15	1	-9,7	26	-7,8	39,5	0,12	0,16	0,21	0,27	0,34	0,55	0,80	1,43	
						2	0	26	7,8	39,5									
						3	9,7	26	-	-									
33		24	29	37,5	15	1	-9,7	24	-7,8	37,5	0,10	0,14	0,17	0,24	0,30	0,50	0,80	1,35	
						2	0	24	7,8	37,5									
						3	9,7	24	-	-									
31		22	27	35,5	15	1	-9,7	22	-7,8	35,5	0,09	0,12	0,16	0,21	0,27	0,46	0,69	1,29	
						2	0	22	7,8	35,5									
						3	9,7	22	-	-									
29		20	25	33,5	15	1	-9,7	20	-7,8	33,5	0,08	0,11	0,14	0,17	0,23	0,40	0,50	1,23	
						2	0	20	7,8	33,5									
						3	9,7	20	-	-									

Masti tüüp ja kirjeldus	Ülemiste traaversite kõrgus m	Alumiste traaversite kõrgus m	330 kV juhtmete kõrgus m	Piksekaitsetrossi kõrgus m	Masti jalandite vahekaugus m	Juhi number	110 kV juhtmete koordinaadid		Piksekaitsetrosside koordinaadid		330 kV liini BFR sõltuvalt masti maandustakistusest							
							X m	Y m	X m	Y m	2 Ω	4 Ω	6 Ω	8 Ω	10 Ω	15 Ω	20 Ω	30 Ω
31S0G - Vant kandemast ja avariid piirav mast	27	18	23	31,5	15	1	-9,7	18	-7,8	31,5	0,07	0,09	0,12	0,15	0,20	0,33	0,46	1,19
						2	0	18	7,8	31,5								
						3	9,7	18	-	-								
31S1G - Vant kandemast (kuni 20° nurk)	39	29,5	35	44,2	15	1	-9,2	35	-10,5	44,2	0,17	0,22	0,28	0,35	0,43	0,66	0,94	1,61
						2	1	35	10,5	44,2								
						3	10,2	35	-	-								
	37	27,5	33	42,2	16	1	-9,2	33	-10,5	42,2	0,16	0,21	0,26	0,33	0,40	0,63	0,90	1,55
						2	1	33	10,5	42,2								
						3	10,2	33	-	-								
	35	25,5	31	40,2	17	1	-9,2	31	-10,5	40,2	0,14	0,18	0,23	0,29	0,36	0,57	0,82	1,45
						2	1	31	10,5	40,2								
						3	10,2	31	-	-								
	33	23,5	29	38,2	18	1	-9,2	29	-10,5	38,2	0,12	0,16	0,19	0,26	0,32	0,52	0,82	1,37
						2	1	29	10,5	38,2								
						3	10,2	29	-	-								
	31	21,5	27	36,2	19	1	-9,2	27	-10,5	36,2	0,11	0,14	0,18	0,23	0,29	0,48	0,71	1,31
						2	1	27	10,5	36,2								
						3	10,2	27	-	-								
	29	19,5	25	34,2	20	1	-9,2	25	-10,5	34,2	0,10	0,13	0,16	0,19	0,25	0,42	0,52	1,25
						2	1	25	10,5	34,2								
						3	10,2	25	-	-								
	27	17,5	23	32,2	21	1	-9,2	23	-10,5	32,2	0,09	0,11	0,14	0,17	0,22	0,35	0,48	1,21
						2	1	23	10,5	32,2								
						3	10,2	23	-	-								

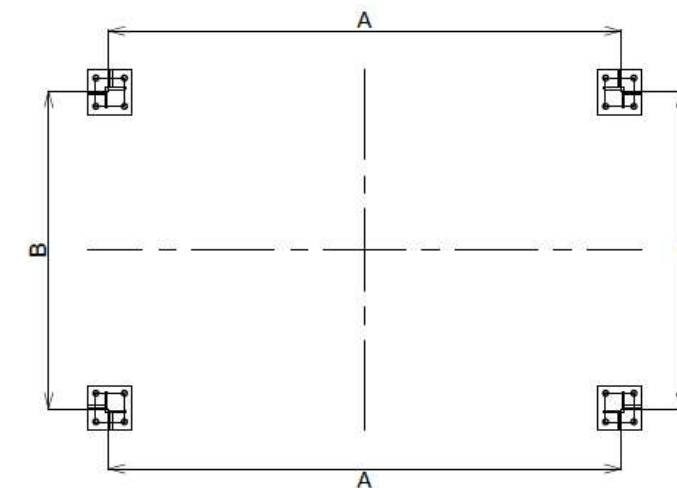
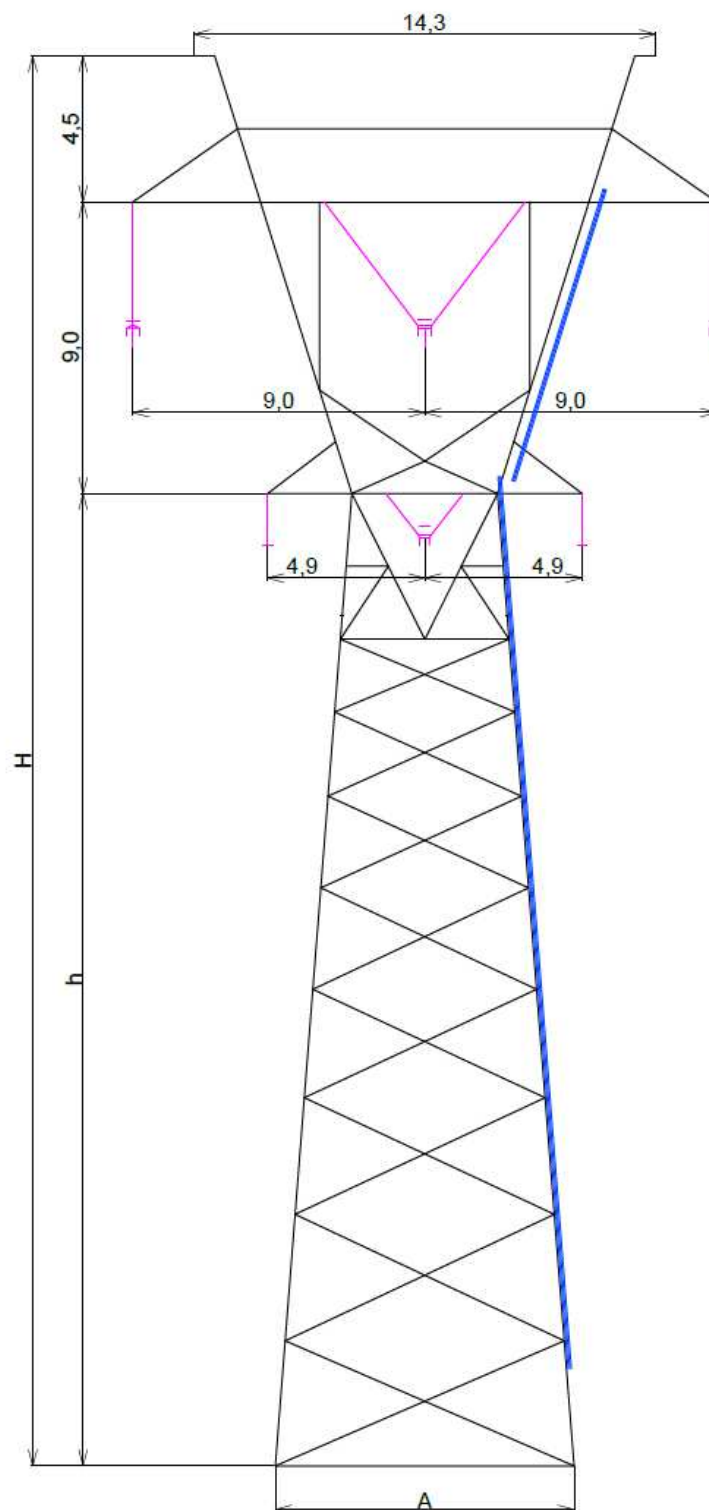


H/h	A
38/29,7	9,1
35/26,7	8,5
32/23,7	7,8
29/20,7	7,2
26/17,7	6,5
23/14,7	6,4




1. Materjalid vastavalt standardile EN 10025-2:
 - Valtsprofiilid - S355J0,
 - Torud - S355K2,
 - Plaadid - S355J2.
2. Detailide kuumtsinkimine vastavalt standardile EVS-EN ISO 14713:
 - Materjali paksus ≤ 6 mm - miinimum 85 µm, keskmine 95±5 µm,
 - Materjali paksus > 6 mm - miinimum 100 µm, keskmine 115±5 µm,
 - Poldid, mutrid ja seibid kuumtsinkida - 45±5 µm.
3. Poldide ja mutrite omadused ning mõõdud vastavalt järgmistele standarditele:
 - Poldide mehaanilised omadused - EVS-EN ISO 898-1:2013,
 - Poldide mõõdud - EVS-EN ISO 4014:2011 ja DIN 7990,
 - Mutrite mehaanilised omadused - EVS-EN ISO 898-2:2013,
 - Mutrite mõõdud - EVS-EN ISO 4032:2012.
4. Keevitamine vastavalt standardile EVS-EN ISO 5817 - kvaliteediklass B.

  		Projekti teeris/Kuupäev R.Rusin/05.01.2018
Oojekt Harku-Sindi 330/110 kV õhuliini ehitus Tüüplahendused		Kontrollis/Kuupäev J.Karin/05.01.2018
Joonise nimi Mastid Vabaltseisev Y nurga-ankrumast 31TxY - üldjoonis		Kooskõlastas Joonestas
Projekti number KPL1707K0	Staadium Joonise number PP EL-7-01-03-1	Muudatus ----
Leht 1	Leht 1	Mõõtkava 1:200
		Formaati A3

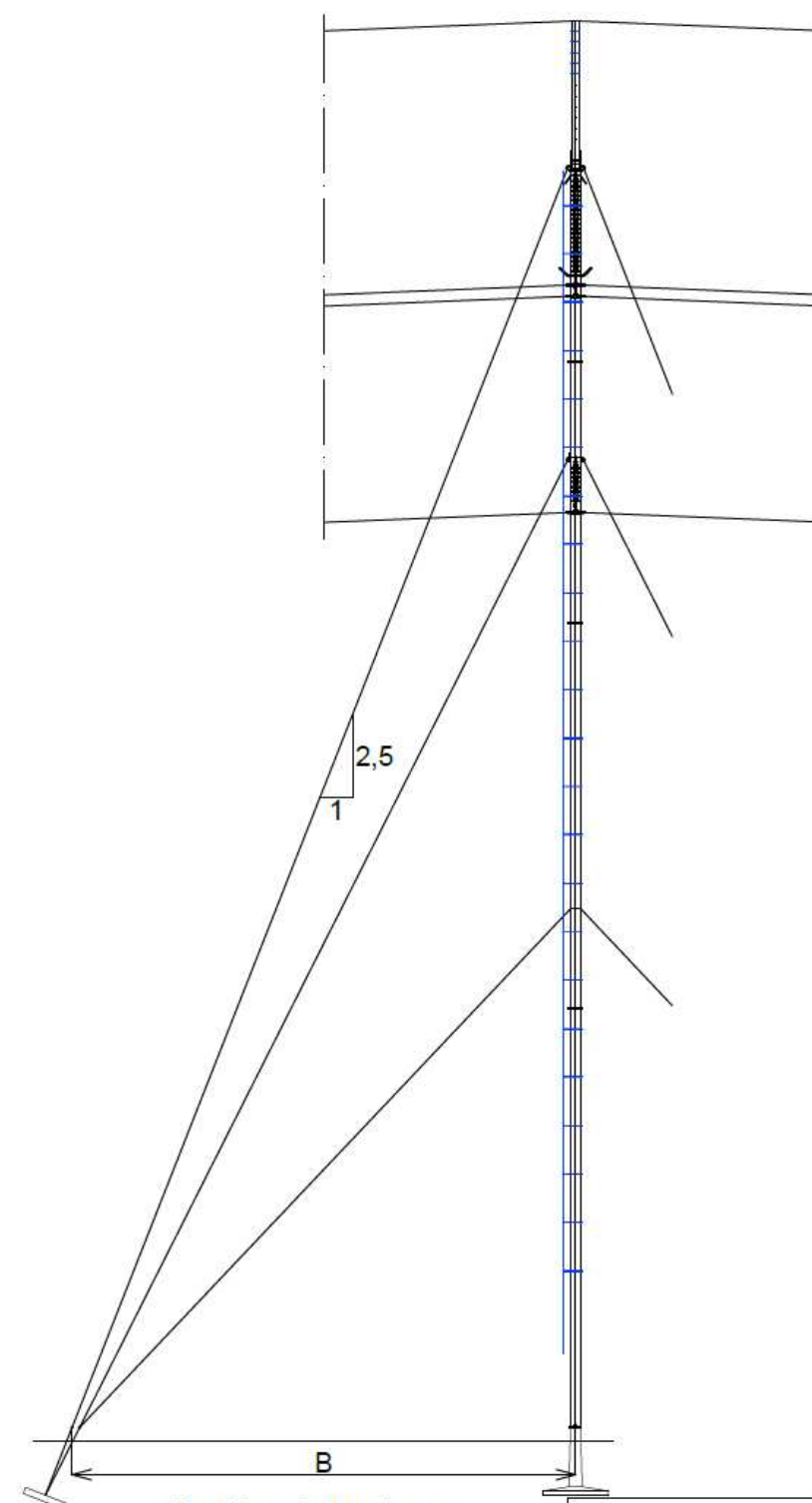
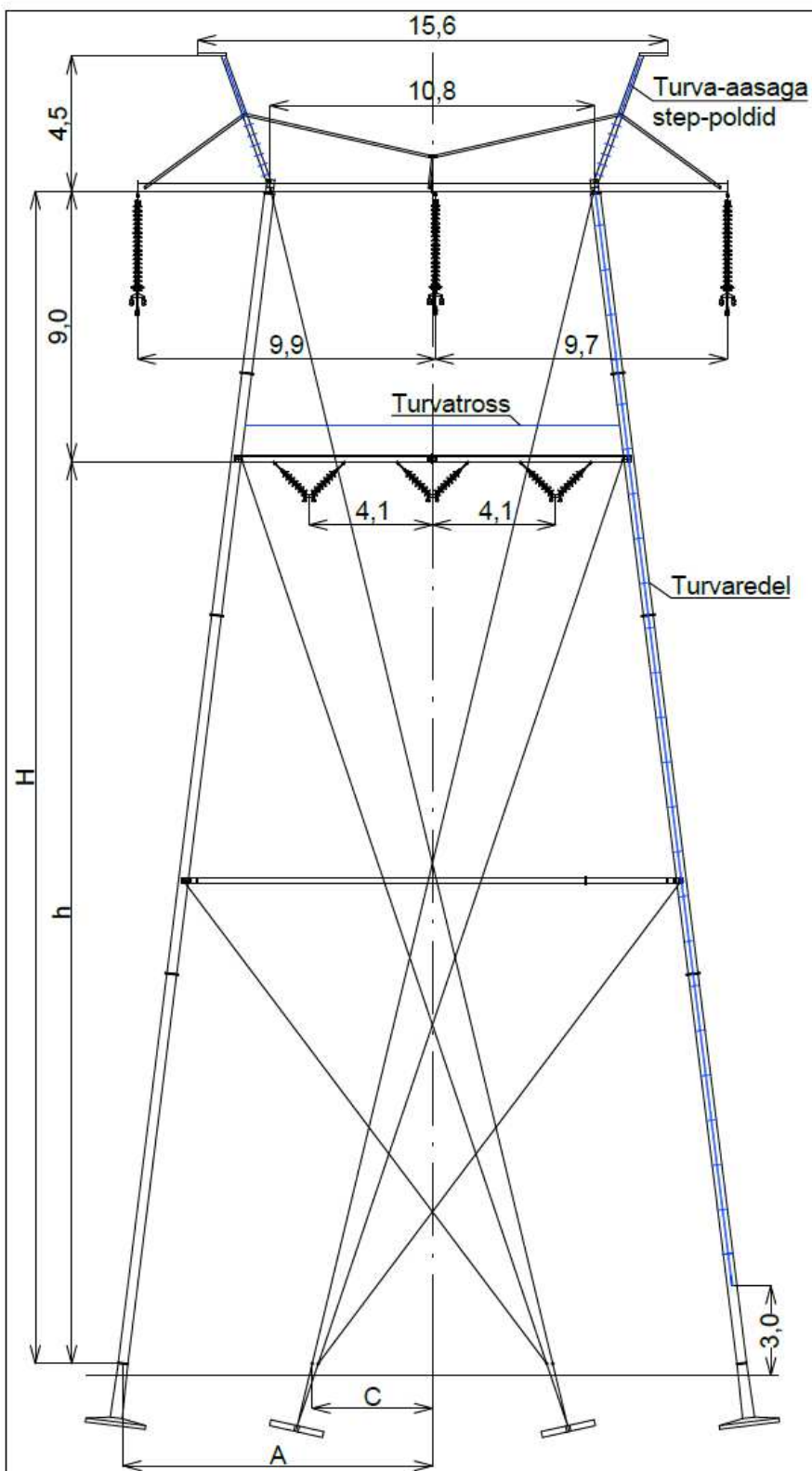
H/h	A	B
39/30	9,5	6,0
36/27	9,0	5,6
33/24	8,5	5,2
30/21	8,0	4,8
27/18	7,5	4,4



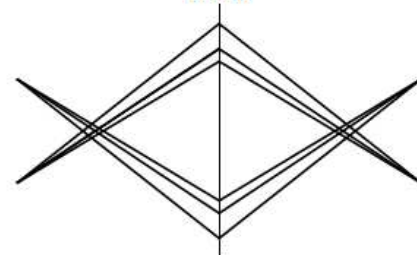
- Materjalid vastavalt standardile EN 10025-2:
 - Valtsprofiilid - S355J0,
 - Torud - S355K2H,
 - Plaadid - S355J2.
- Detailide kuumtsinkimine vastavalt standardile EVS-EN ISO 14713:
 - Materjali paksus ≤ 6 mm - miinimum 85 μm , keskmine 95 ± 5 μm ,
 - Materjali paksus > 6 mm - miinimum 100 μm , keskmine 115 ± 5 μm ,
 - Poldid, mutrid ja seibid kuumtsinkida - 45 ± 5 μm (375 kg/m³).
- Poltide ja mutrite omadused ning mõõdud vastavalt järgmistele standarditele:
 - Poltide mehaanilised omadused - EVS-EN ISO 898-1:2013,
 - Poltide mõõdud - EVS-EN ISO 4014:2011 ja DIN 7990,
 - Mutrite mehaanilised omadused - EVS-EN ISO 898-2:2013,
 - Mutrite mõõdud - EVS-EN ISO 4032:2012.
- Keevitamine vastavalt standardile EVS-EN ISO 5817 - kvaliteediklass C.

Muudatus	Kuupäev	Muudatuse sisu	Projekteeris	Kontrollis			
  							
Objekt			Projekteeris/Kuupäev				
Harku-Sindi 330/110 kV õhuliini ehitus			R.Rusin/13.09.2018				
Tüüplahendused			Kontrollis/Kuupäev				
Joonise nimi			Koostööstas				
Mastid			Joonestas				
Vabaltseisev Y kandemast 31S0Y üldjoonis							
Projekti number	Staadium	Joonise number	Muudatus	Leht	Leht	Mõõtkava	Formaat
KPL1707K0	PP	EL-7-01-02-16-1	----	1	1	1:200	A3

H/h	A	B	C
39/30	10,3	15,6	4,0
37/28	10,0	14,8	3,5
35/26	9,8	14,0	3,0
33/24	9,5	13,2	2,6
31/22	9,3	12,4	2,1
29/20	9,0	11,6	1,6
27/18	8,8	10,8	1,1

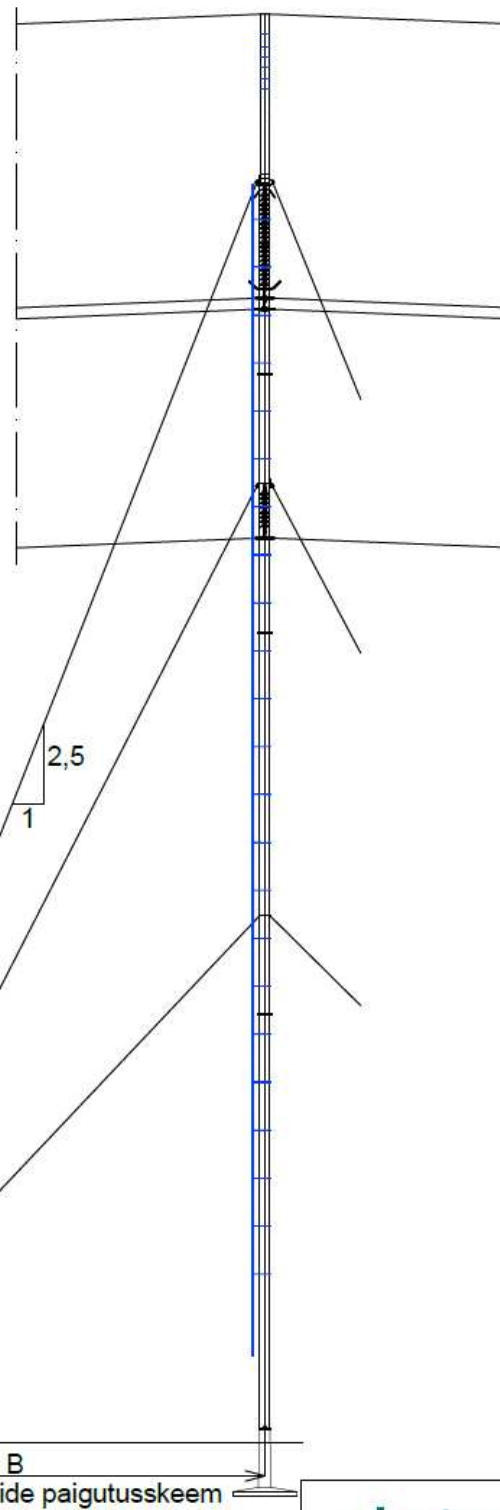
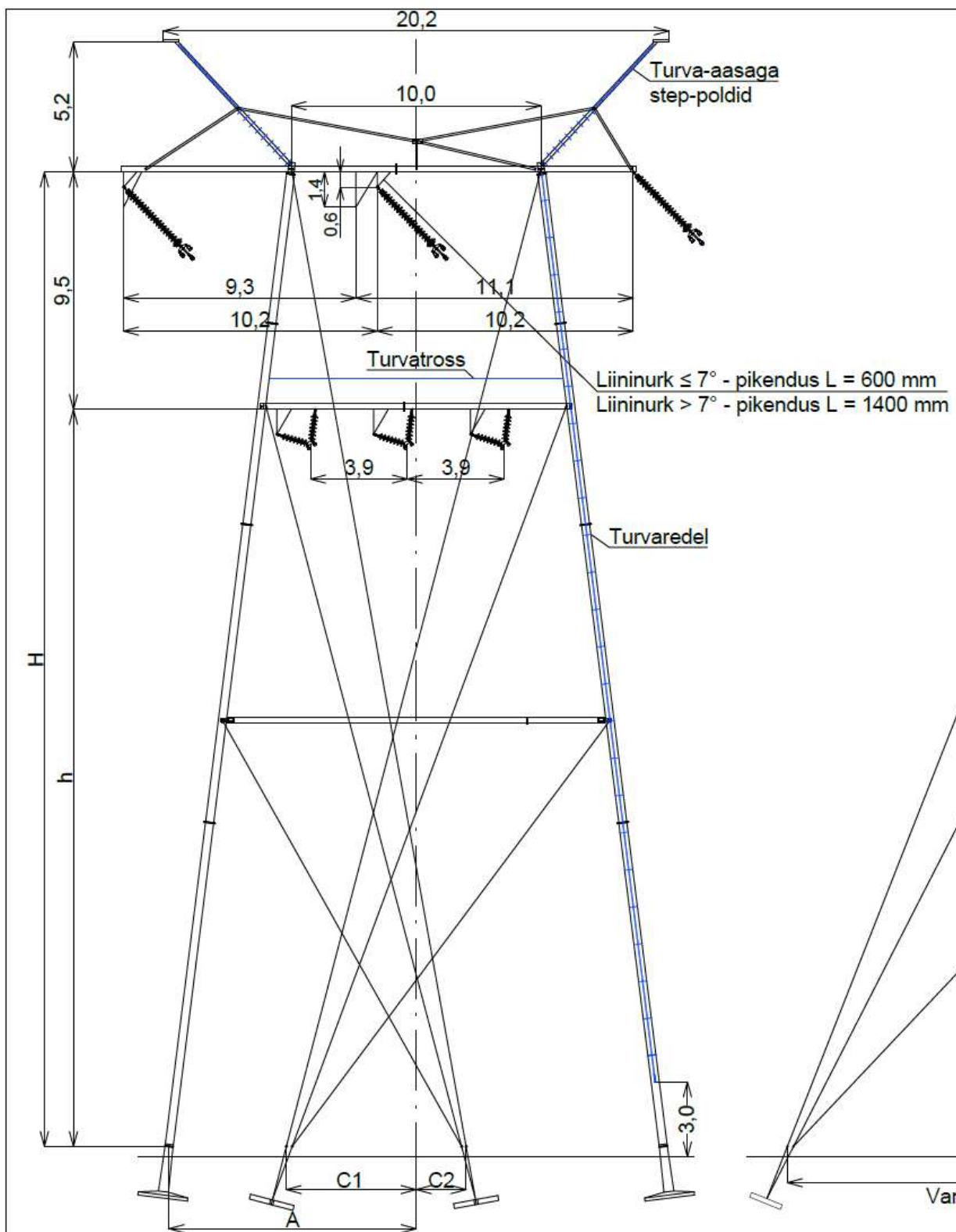


Vantide paigutuskeem
1:500



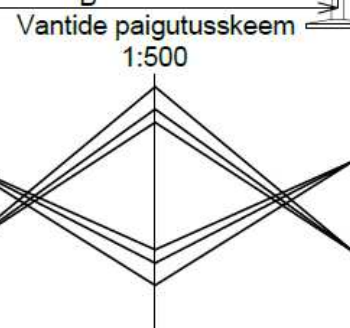
- Materjalid vastavalt standardile EN 10025-2:
 - Valtsprofiilid - S355J0,
 - Torud - S355K2,
 - Plaadid - S355J2.
- Detailide kuumtsinkimine vastavalt standardile EVS-EN ISO 14713:
 - Materjali paksus ≤ 6 mm - miinimum 85 μm , keskmine 95 ± 5 μm ,
 - Materjali paksus > 6 mm - miinimum 100 μm , keskmine 115 ± 5 μm ,
 - Poldid, mutrid ja seibid kuumtsinkida - 45 ± 5 μm .
- Poltide ja mutrite omadused ning mõõdud vastavalt järgmistele standarditele:
 - Poltide mehaanilised omadused - EVS-EN ISO 898-1:2013,
 - Poltide mõõdud - EVS-EN ISO 4014:2011 ja DIN 7990,
 - Mutrite mehaanilised omadused - EVS-EN ISO 898-2:2013,
 - Mutrite mõõdud - EVS-EN ISO 4032:2012.
- Keevitamine vastavalt standardile EVS-EN ISO 5817 - kvaliteediklass B.

		Projektskeem/Kuupaev R.Rusin/05.01.2018
Ojekt Harku-Sindi 330/110 kV õhuliini ehitus Tüüplahendused		Kontrollis/Kuupaev J.Karin/05.01.2018
Joonise nimi Mastid Vant kandemast 31S0G - üldjoonis		Kooskõlastas Joonestas
Projekti number KPL1707K0	Staadium PP	Joonise number EL-7-01-01-1
Muudatus ---	Leht 1	Leht 1
Mõõtkava 1:200		Formaati A3



H/h	A	B	C1	C2
39/29.5	9.9	15.6	5.2	2.0
37/27.5	9.6	14.8	4.7	1.8
35/25.5	9.4	14.0	4.2	1.4
33/23.5	9.1	13.2	3.6	1.0
31/21.5	8.9	12.4	3.1	0.6
29/19.5	8.6	11.6	2.6	0.2
27/17.5	8.4	10.8	2.1	0.0

- Materjalid vastavalt standardile EN 10025-2:
 - Valtsprofiilid - S355J0,
 - Torud - S355K2,
 - Plaadid - S355J2.
- Detailide kuumtsinkimine vastavalt standardile EVS-EN ISO 14713:
 - Materjali paksus ≤ 6 mm - miinimum 85 μm , keskmine 95 \pm 5 μm ,
 - Materjali paksus > 6 mm - miinimum 100 μm , keskmine 115 \pm 5 μm ,
 - Poldid, mutrid ja seibid kuumtsinkida - 45 \pm 5 μm .
- Poltide ja mutrite omadused ning mõõdud vastavalt järgmistele standarditele:
 - Poltide mehaanilised omadused - EVS-EN ISO 898-1:2013,
 - Poltide mõõdud - EVS-EN ISO 4014:2011 ja DIN 7990,
 - Mutrite mehaanilised omadused - EVS-EN ISO 898-2:2013,
 - Mutrite mõõdud - EVS-EN ISO 4032:2012.
- Keevitamine vastavalt standardile EVS-EN ISO 5817 - kvaliteediklass B.



		Projektsuupäev R.Rusin/05.01.2018	
Objekt Harku-Sindi 330/110 kV õhuliini ehitus Tüüplahendused		Kontrollsuupäev J.Karin/05.01.2018	
Joonise nimi Mastid Vant kandemast 31S1G - üldjoonis		Koostaja Joonestaja	
Projekti number KPL1707K0	Istaadiumi Joonise number PP EL-7-01-01-5	Muudatus ----	Leht 1 / 1
Mõõkava 1:200		Formaati A3	