



EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

**Tõnu Heinmets**

**Kalli-Lõpe 10 kv fiidri rekonstrueerimine**

RECONSTRUCTION OF KALLI-LÕPE 10 kV FEEDER

Magistritöö

Energiakasutuse õppekava

Juhendajad: professor Andres Annuk, *PhD*

Karl Martin Põldsam, *MSc*

Tartu 2021

|  |               |                           |            |
|--|---------------|---------------------------|------------|
| Eesti Maaülikool<br>Kreutzwaldi 1, Tartu 51014   |               | Magistritöö lühikokkuvõte |            |
| Autor: Tõnu Heinmets   |               | Õppekava: Energiakasutus  |            |
| Pealkiri: Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimine  |               |                           |            |
| Lehekülgi: 68  | Jooniseid: 19 | Tabeleid: 17              | Lisasid: 9 |
| Õppetool: Energiakasutuse õppetool<br>ETIS-e teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika, 4.17 Energeetikaalased uuringud.<br>CERC S-i kood: T140 Energeetika<br>Juhendaja(d): professor Andres Annuk, Karl Martin Põldsam<br>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2021  |               |                           |            |
| <p>Magistritöös on kirjeldatud ja analüüsitud Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise elektriprojekti, projekteerimise protsessi ja projekteerimise käigus tekkinud probleemide lahendamist. Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise projekt on Elektrilevi OÜ keskpinge võrgu rikkekindluse parandamise investeeriguprojekt. Elektriprojekti koostamisel on võetud aluseks Elektrilevi OÜ projekteerimisülesanne nr. 27188, Elektrilevi OÜ „Elektripaigaldise projekti koostamise juhend J352“, „Eesti Energia (0,4...20) kV võrgustandard“ ning Eesti Vabariigi seadused “Ehitusseadustik“, “Seadme ohutuse seadus”, õigusaktid ja standardid. Maakaablitrassi projekteerimisel lahendati maakaabli trassid riigitee 19205 Tammaru-Mihkli tee ja kohalikule omavalitsusele kuuluva Järve tee servas. Õhuliini üleminekuid maakaablisse projekteeriti kolm, millega seoses projekteeriti kolmele mastile liigpingepiirid. Õhuliini rekonstrueerimisel on esitatud piirjuhtumite kohta mastide tugevusarvutused. Projekteerimise käigus teostati vajalikud muudatused lähteülesandest.</p> |               |                           |            |
| Märksõnad: keskpingevõrk, rekonstrueerimine, kaetud juhe, maakaabelliin, õhuliin   |               |                           |            |

|  |             |  |               |
|--|-------------|--|---------------|
| Estonian University of Life Sciences<br>Kreutzwaldi 1, Tartu 51014   |             | Abstract of Master's Thesis                |               |
| Author: Tõnu Heinmets  |             | Curriculum: Energy Application Engineering |               |
| Title: Reconstruction of Kalli-Lõpe 10 kV Feeder   |             |  |               |
| Pages: 68  | Figures: 19 | Tables: 17                                 | Appendixes: 9 |
| Chair: Chair of energy application engineering<br>Field of research: 4. Natural Sciences and Engineering, 4.17 Energetic Research<br>CERC S code: T140 Energy Research<br>Supervisors: professor Andres Annuk, Karl Martin Põldsam<br>Place and date: Tartu 2021   |             |  |               |
| <p>The aim of this Master's thesis is to describe and analyze the reconstruction project of Kalli-Lõpe 10 kV feeder. The reconstruction of Kalli-Lõpe 10 kV feeder is Elektrilevi OÜ investment project for improving the medium voltage network. The design of the electrical project is based on Elektrilevi OÜ's design task no. 27188, Elektrilevi OÜ "Elektripaigaldise projekti koostamise juhend J352", "Eesti Energia (0,4...20) kV võrgustandard" and laws of the Republic of Estonia "Ehitusseadustik", "Seadme ohutuse seadus", legislations and standards. The underground cables' route design were solved on the side of the state road 19205 Tammaru-Mihkli tee and local authority road Järve tee. Three overhead line transitions to the underground cable were designed, which required surge arresters to three masts. For the reconstruction design of overhead lines, the strength calculations for boundary cases are presented. Necessary changes to the design task were made in the work process.</p> |             |  |               |
| Keywords: medium-voltage network, reconstruction, covered conductor, underground cable, overhead line  |             |  |               |

# SISUKORD

|  |    |
|--|----|
| TÄHISED JA LÜHENDID .....                                | 6  |
| SISSEJUHATUS .....                                       | 8  |
| 1. ELEKTRILEVI OÜ VÕRGUINVESTEERINGUD .....              | 9  |
| 1.1. Elektrilevi OÜ investeerigute põhimõtted .....      | 9  |
| 1.2. 2021 aasta võrguinvesteeringud.....                 | 10 |
| 2. KESKPINGE ELEKTRIVÕRGUD.....                          | 11 |
| 2.1. Keskpinge õhuliinid .....                           | 11 |
| 2.1.1. Keskpinge õhuliinide ehitus.....                  | 11 |
| 2.1.2. Paljasjuhtmega õhuliinid.....                     | 11 |
| 2.1.3. Kaetud juhtmega õhuliinid.....                    | 12 |
| 2.1.4. Mastide tüübid.....                               | 13 |
| 2.1.5. Liigpingepiirikud ja sädevahemikud .....          | 14 |
| 2.2. Keskpinge maakaabelliinid.....                      | 16 |
| 2.2.1. Keskpinge maakaablid.....                         | 16 |
| 2.2.2. Keskpinge maakaabelliinide ehitus .....           | 18 |
| 2.2.3. Keskpinge harukapp .....                          | 20 |
| 3. KALLI-LÕPE 10 kV FIIDRI REKONSTRUEERIMINE.....        | 23 |
| 3.1. Rekonstrueeritav võrk .....                         | 23 |
| 3.2. Kalli-Lõpe 10 kV fiidri keskpinge elektrivõrk ..... | 24 |
| 3.3. Maakaabelliin.....                                  | 25 |
| 3.3.1. Maakaabelliini trassi projekteerimine .....       | 25 |
| 3.3.2. Maakaabelliini ehitus.....                        | 28 |
| 3.4. Õhuliin.....  | 28 |
| 3.4.1. Õhuliini ehitus.....                              | 28 |
| 3.5. Õhuliini mastide tugevusarvutused .....             | 30 |
| 3.5.1. Mastide tugevusarvutused ja koormusjuhtumid.....  | 30 |
| 3.5.2. Kandemasti tugevusarvutused.....                  | 31 |
| 3.5.3. Tõmmitsaga masti tugevusarvutused .....           | 35 |
| 3.5.4. Toega nurgamasti tugevusarvutused .....           | 37 |
| 3.5.5. Kandemast M55 tugevusarvutused .....              | 40 |
| 3.5.6. Lõpumast M49 tugevusarvutused .....               | 43 |
| 3.5.7. Nurgamast M53 tugevusarvutused.....               | 47 |
| 3.5.8. Nurga-ankrumast M61 tugevusarvutused.....         | 51 |

|  |    |
|--|----|
| KOKKUVÕTE .....  | 54 |
| KASUTATUD KIRJANDUS .....                              | 56 |
| LISAD .....  | 59 |
| Lisa A. Asendiplaan.....                               | 60 |
| Lisa B. Keskpinge normaalskeem .....                   | 61 |
| Lisa C. Kibura HL M38 seadmete paigutusjoonis.....     | 62 |
| Lisa D. Kibura HL M49 seadmete paigutusjoonis .....    | 63 |
| Lisa E. Metsavahi HL M12A seadmete paigutusjoonis..... | 64 |
| Lisa F. Ristmeväli RV-1.....                           | 65 |
| Lisa G. Ristmeväli RV-2.....                           | 66 |
| Lisa H. Ristmeväli RV-3.....                           | 67 |
| Lisa I. Lihtlitsents .....                             | 68 |

## TÄHISED JA LÜHENDID

|                |   |
|----------------|---|
| $A$            | - ekvivalentne postmasti ristlõikepindala $\text{mm}^2$ ;   |
| $a$            | - tõmmitsa/toe kinnituskoha kaugus liinisuunalise jõu rakenduspunktist $\text{m}$ ;               |
| $A_1$          | - masti ristlõike pindala tõmmitsa kinnituskohas $\text{mm}^2$ ;                                  |
| $A_{pol}$      | - posti projektsiooni pindala tuule suunaga risti olevale vertikaaltasapinnale $\text{m}^2$ ;     |
| $b$            | - jäite paksus $\text{mm}$ ;  |
| $C_c$          | - juhtme tuuletakistustegur;  |
| $C_{pol}$      | - posti tuuletakistustegur;   |
| $d$            | - juhtme läbimõõt $\text{mm}$ ;   |
| $d_1$          | - masti läbimõõt tõmmitsa kinnituskohas $\text{mm}$ ;   |
| $d_e$          | - ekvivalentne läbimõõt $\text{mm}$ ;   |
| $d_{maa}$      | - masti läbimõõt maapinna või madalaima arvutatava osa lõikes $\text{mm}$ ;                       |
| $d_{maa}$      | - masti läbimõõt maapinna või madalaima arvutatava osa lõikes $\text{mm}$ ;                       |
| $d_{ül}$       | - masti ladva läbimõõt $\text{mm}$ ;  |
| $F$            | - vertikaalsuunas avalduv raskuskiirendusest tekkiv jõud arvestades keha massi $\text{N}$ ;       |
| $F_{juhe}$     | - juhtmete massist tekkiv vertikaalsuunaline jõud $\text{N}$ ;                                    |
| $F_{jääide}$   | - piirjääitekoormusel juhtmetel esineva jääte massist tekkiv vertikaalsuunaline jõud $\text{N}$ ; |
| $f_{md}$       | - posti arvutuslik paindekandevõime $\text{N}/\text{mm}^2$ ;                                      |
| $f_{mk}$       | - posti normpaindetugevus $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  |
| $F_{post}$     | - posti massist tekkiv vertikaalsuunaline jõud $\text{N}$ ;                                       |
| $F_{traavers}$ | - traaversi massist tekkiv vertikaalsuunaline jõud $\text{N}$ ;                                   |
| $G_c$          | - juhtmete mehaanilise resonantsi ehk visangutegur;   |
| $G_{pol}$      | - posti mehaanilise resonantsi tegur;   |
| $H_{maa}$      | - masti arvutatava osa kõrgus $\text{m}$ ;  |
| $H_{maa}$      | - masti kõrgus maapinnast $\text{m}$ ;  |
| $K$            | - tõmmitsa kalle;   |
| $L_1, L_2$     | - külgnevate visangute pikkused $\text{m}$ ;  |
| $L_n$          | - ankrupiirkonna $n$ -nda visangu pikkus $\text{m}$ .   |
| $L_R$          | - arvutuslik taandatud visangu pikkus $\text{m}$ ;  |

|                 |  |
|-----------------|--|
| $m$             | - vaadeldava keha mass kg;   |
| $M_t$           | - Tõmmitsast postile mõjuv paindemoment on leitav valemiga $N \cdot m$   |
| $n$             | - juhtmete arv;  |
| $Q_G$           | - postmasti suunaline jõud N;  |
| $q_p$           | - suurim tuulesurve juhtmele baaskõrgusel $N/m^2$ ;  |
| $Q_s$           | - masti postile mõjuv surve N;   |
| $Q_t$           | - toe kaal kN;   |
| $Q_{Wc}$        | - mastile mõjuv jõud tuulekoormusest N;  |
| $Q_{Wc(T1)}$    | - külgneva visangu $L_1$ tõmbejõud nurgposti suunas N;   |
| $Q_{Wc(T2)}$    | - külgneva visangu $L_2$ tõmbejõud nurgposti suunas N.   |
| $Q_{Wc(Tr)}$    | - nurgamasti toe suunas mõjuv resulteeriv tõmbejõud N;   |
| $Q_{Wpol}$      | - liini suunaga risti olev tuulejõud postile N;  |
| $r_e$           | - ekvivalentne raadius mm;   |
| $S$             | - tõmmitsa ankurduspunkti kaugus mastist m;  |
| $S_{juhe}$      | - juhtme ristlõige $mm^2$ ;  |
| $T$             | - masti postile mõjuv liinisuunaline tõmme N;  |
| $T_1, T_2$      | - külgnevate visangute tõmbejõud N;  |
| $T_r$           | - nurga suunas mõjuv tõmbejõud N;  |
| $T_t$           | - Tõmmitsale mõjuv tõmme on leitav valemiga N;   |
| $T_{vert}$      | - liinijuhtmete tõmbejõuga vertikaalsuunas N;  |
| $W_1$           | - vastupanumoment tõmmitsa kinnituskohas $mm^3$ ;  |
| $y_{MI}$        | - puidu osavarutegur;  |
| $\alpha$        | - liini suuna muutus $^\circ$ ;  |
| $\beta$         | - tõmmitsa (või toe) ja masti vaheline nurk $^\circ$ .   |
| $\gamma$        | - tõmbejõuga külgneva visangu ja nurga suunas mõjuva resulteeriva tõmbejõu vaheline nurk on leitav valemiga $^\circ$ ; |
| $\lambda$       | - saledustegur;  |
| $\sigma_{juhe}$ | - liinijuhtme mehaaniline pinge $N/mm^2$ ;   |
| $\sigma_p$      | - paindepinge vertikaaljõududest $N/mm^2$ ;  |
| $\sigma_r$      | - paindepinge ristsuunalistest horisontaaljõududest $N/mm^2$ ;   |
| $\Psi_W$        | - tuulekoormuste kombinatsioonitegur;  |
| $\omega$        | - murdumistegur.   |

## SISSEJUHATUS

Elektrilevi OÜ investeeringute käigus demonteeritakse kõige rohkem vananenud paljasjuhtmelist õhuliini, mis asendatakse ilmastikukindla õhu- või maakaabliga. 2020. aasta lõpuks oli Elektrilevi OÜ võrgust 71 % ilmastikukindel ja seatud eesmärkide kohaselt peab 2023. aastaks olema ilmastikukindel 77% võrgust. [1]

Elektrilevi OÜ 2021. aasta investeeringute üldmaht oli 34,6 miljonit eurot [3]. Antud magistritöö on koostatud Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise projekti kohta. Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise objekt on ära märgitud Elektrilevi OÜ kodulehel 2021. aasta ühe suurima investeerimisobjektina Pärnumaal [2].

Magistritöö esimese pooles on kirjeldatud Elektrilevi OÜ keskpingeinvesteeringuid ja keskpinge elektrivõrkude maakaablite ja õhuliinide ehitust. Magistritöö teises pooles on kirjeldatud ja analüüsitud Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise elektriprojekti projekteerimise protsessi ja projekteerimise käigus tekkinud ning lahendatud probleeme.

Elektriprojekti koostamisel on võetud aluseks Elektrilevi OÜ projekteerimisülesanne nr. 27188, Elektrilevi OÜ „Elektripaigaldise projekti koostamise juhend J352“, „Eesti Energia (0,4...20) kV võrgustandard“ ning Eesti Vabariigi seadused „Ehitusseadustik“, „Seadme ohutuse seadus“, õigusaktid ja standardid.

01.01.2021 jagunes Elektrilevi OÜ ettevõtte kaheks: Elektrilevi OÜ ja Enefit Connect OÜ. Peale ettevõtte jagunemist on Elektrilevi OÜ võrguinvesteeringutel projektide tellijaks Enefit Connect OÜ. Kuna antud töö lähteülesanne koostati ja töö saavutas lõplikule kinnitamisele esitamiseks valmiduse enne ettevõtte jagunemist, siis on töös tellijana märgitud ettevõtte Elektrilevi OÜ.



# 1. ELEKTRILEVI OÜ VÕRGUINVESTEERINGUD

## 1.1. Elektrilevi OÜ investeerigute põhimõtted

Majandus- ja Kommunikatsiooniministeriumi koostatud Energiamaajanduse arengukavas (ENMAK) on seatud eesmärgiks viia varustuskindluse näitaja SAIDI<sub>kogu</sub> 90 minutini aastaks 2030, põhjustamata seejuures tarbijatele olulisi lisa võrgutasusid. Elektrilevi OÜ tellitud uurimustöös LEP17034 jõuti järeldusele, et selle eesmärgi saavutamine pole Elektrilevi OÜ hetke eelarve juures saavutatav. [3]

Varustuskindluse suurendamiseks kasutatavad tehnoloogiad on [3]:

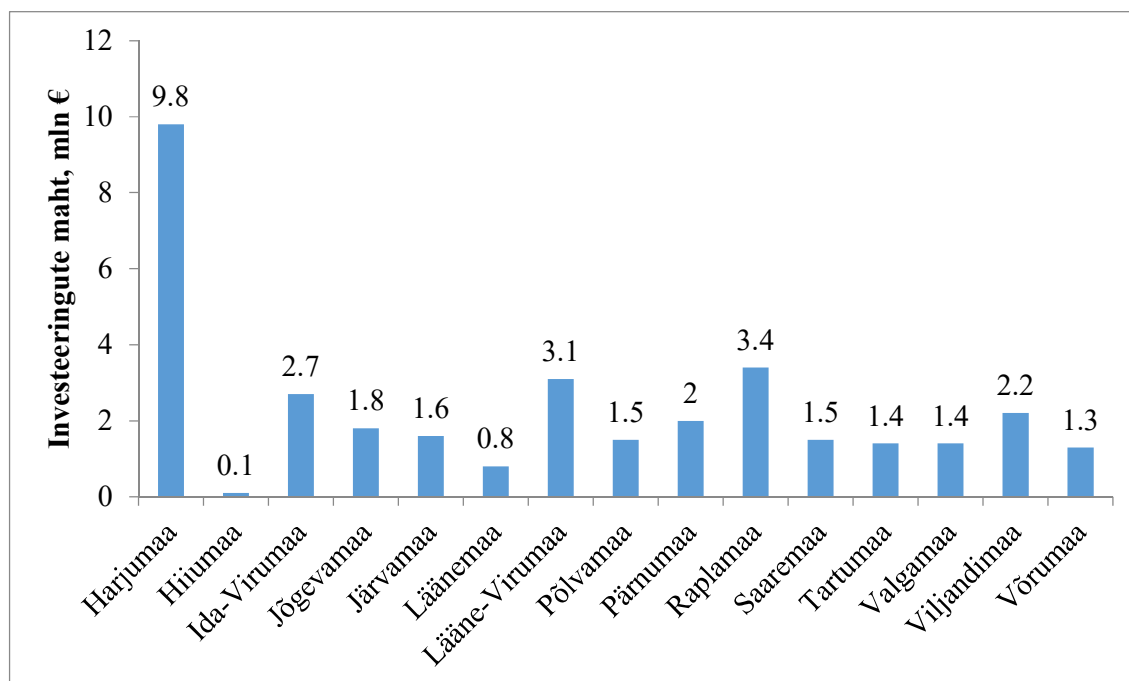
- 1) Paljasjuhtmete asendamine ilmastikukindlamate kaetud juhtmete ja õhukaablitega;
- 2) Võrgu automatiseerimine – rakendatakse ainult eluiga mitte ületanud varaklassidele;
- 3) Keskpingeliinide viimine ennetavalt paigaldatud kaablitorudesse;
- 4) Ebavajaliku võrgu kasutusest kõrvaldamine (keskmiselt ca 3% ulatuses).

Ilmastikukindel elektrivõrk tagab suurema rikkekindluse. Et tõsta töökindlust ja vähendada tehnilist riski, vajab täiendavaid investeeringuid eelkõige hajapiirkond, kus paikneb suur hulk paljasjuhtmetega ja tööea ületanud mastidega õhuliine. Piirkonda alainvesteeringute suurendamine suurendab lähiaastatel märgatavalt katkestuste hulka ja seab lõpptulemusena ohtu kogu võrgu stabiilsuse. SAIDI<sub>kogu</sub> 90 stsenaarium on saavutatav ainult täiendavate investeerigutega hajapiirkonda. Kuid liigsete investeeringute tegemine hajapiirkonda pole majanduslikult otstarbekas ja on vajalik saavutada ühiskondlik kokkulepe, kas SAIDI<sub>kogu</sub> 90 eesmärk aastaks 2030 on mõistlik. Hajapiirkonna võrgu kulud katavad peamiselt hajatihe- ja tihepiirkonna kliendid, sest võrgu kõigile klientidele kehtivad ühtsed tariifid. Uurimustöö LEP18003 lõpparuande kohaselt oleks vajalik jõuda kokkulepeteni investeerigu mahtude osas võimalikult kiiresti. [3]

## 1.2. 2021 aasta võrguinvesteeringud

Elektrilevi OÜ võrguinvesteeringute kava koostamisel võetakse arvesse liini ja alajaamaga ühendatud klientide hulka, elutähtsa teenuse osutajaid, liini seisukorda ja potentsiaalset rikkeohtu, looduslikke tingimusi kui ka teiste infrastruktuuride paralleelseid uuendamise plaane jne. Investeeringusobjektide valikul arvestatakse kogu Eestiga. [2]

Elektrilevi OÜ investeeringute käigus demonteeritakse kõige rohkem vananenud paljasjuhtmelist õhuliini, mis asendatakse ilmastikukindla õhu- või maakaabliga. 2020. aasta lõpuks oli Elektrilevi OÜ võrgust 71% ilmastikukindel ja seatud eesmärkide kohaselt peab 2023. aastaks olema ilmastikukindel 77% võrgust. [1]



**Joonis 1.1.** Elektrilevi OÜ 2021. aasta investeeringud maakondade lõikes [3].

Elektrilevi OÜ 2021. aasta investeeringute üldmaht oli 34,6 miljonit eurot ja maakondade lõikes on investeeringute mahud toodud joonisel 1.1. Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise objekt on ära märgitud Elektrilevi OÜ kodulehel 2021. aasta ühe suurima investeeringusobjektina Pärnumaal. [2]

## 2. KESKPINGE ELEKTRIVÕRGUD

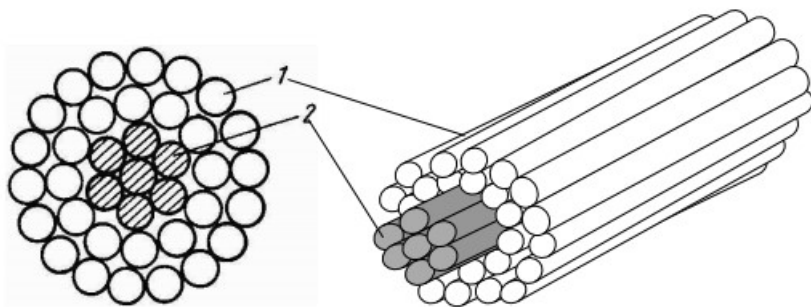
### 2.1. Keskpinge õhuliinid

#### 2.1.1. Keskpinge õhuliinide ehitus

Et tagada varustuskindlus elektrivõrgu klientidele on väga oluline, et õhuliinid oleksid mehaaniliselt vastupidavad. Suur osa riketest on põhjustatud mehaanilistest riketest nagu katki läinud juhtmed, murdunud postid, kahjustatud isolatsioon ja seadmed jne. Paljud nendest riketest on rohkem või vähem vältimatud. Nende rikete tihedust on võimalik vähendada, kui elektriliinide mehaanilised osad on konstrueeritud vastu pidama mitte ainult tavatingimustele vaid ka sagedasti esinevatele, ilmastikust tingitud, eritingimustele. Õhuliinid peavad olema konstrueeritud vastu pidama, mitte halvimatele võimalikele ilmastikutingimustele vaid suure tõenäosusega esinevatele halvadele ilmastikutingimustele. Majanduslikult oleks halvimatele võimalikele tingimustele vastupidava õhuliini ehitamine liiga kulukas ja ebamõistlik. [4]

#### 2.1.2. Paljasjuhtmega õhuliinid

Juhtmaterjal peaks olema hea elektrijuhtivusega, mehaaniliselt tugev, vastupidav keemilisele toimele ja odav. Kuna ükski juhtmaterjal eraldi ei vasta kõigile neile tingimustele, siis on vajalik kasutada kompromisslahendusi. Paljasjuhtmed on terasalumiiniumjuhtmed, kus voolujuhtivaks materjaliks on alumiinium, mida mehaaniliselt on tugevdatud terasega. [5]



**Joonis 2.1.** Teras-alumiiniumjuhtme ristlõige. 1 – alumiiniumjuht; 2 – terassüdamik e. kandetross. [6]

Peamiselt on tegemist traatidest kihiti kokkukeerutatud köisjuhtmetega [5]. Joonisel 2.1 on kujutatud paljasjuhtme ristlõige.

Paljasjuhtmetega õhuliinide rikkesagedus on kõige suurem. Metsas on paljasjuhtmetega õhuliinide rikkesagedus ligikaudu 10 korda suurem maakaabelliinist või kaetud juhtmega ja õhukaabliga õhuliinidest. Tee äärsetel aladel ja avamaal on rikkesagedus suurem rikkekindlamatest lahendustest 5-10 korda. [7]

### 2.1.3. Kaetud juhtmega õhuliinid

Peamiselt toodetakse ühe- kuni kolmekihilisi kaetud juhtmeid. Ühekihilistes juhtmetes kasutatakse 1,6 - 2,3 mm paksuse XLPE või HDPE isolatsiooniga alumiiniumsulamist juhtmeid. Õhem isolatsioon vähendab juhtme läbimõõtu, mis omakorda vähendab tuule- ja jäitekoormusi ning vibratsiooni, kuid suurendab kulumist. Levinumad ühekihilised kaetud juhtmemargid on SAX ja PAS. Mitmekihilistest kaetud juhtmetest on levinumad juhtmemargid BLX ja BLL. Vanemate ühekihiliste SAX ja PAS kaetud juhtmete võrdlus mitmekihiliste BLL ja BLX kaetud juhtmetega on esitatud tabelis 2.1. [7]

**Tabel 2.1.** SAX ja PAS kaetud juhtmete võrdlus BLL ja BLX kaetud juhtmetega [7]

| SAX ja PAS  | BLL ja BLX                          |
|---|-------------------------------------|
| Vibratsioonitundlikud   | Vibratsioonikindlad                 |
| Madal roomekindlus  | Suur roomekindlus                   |
| Isoleerkiht libiseb metallosal  | Puudub kihtide libisemine           |
| Veekindluse tagamine kulukas  | EVA mastiks tagab niiskuskindluse   |
| Määrdes tekivad mikromullid, kus areneb koroonalahendus ja intensiivistub roome | Kattekiht on UV kiirguse kindel     |
| Kattekiht pole keskkonnasõbralik  | Kattekihi materjal on taaskasutatav |
| Voolujuhti kattev teip pundub   | -                                   |

SAX ja PAS juhtmed on madala roomekindlusega XLPE kihi suure süsiniku sisalduse tõttu ja suurele elektriväljatugevuse tõttu juhtme pinnal, mille tulemusel kattekiht muutub hapraks ega võimalda pikka kontakti maandatud objektiga. BLL ja BLX juhtmed on suurema roomekindlusega tänu kulumiskindlale HDPE väliskihile ja pooljuhtivale sisekihile, mis vähendab elektrivälja tugevust juhtme pinnal. Seetõttu on võimalik pikaajaline kontakt maandatud objektidega (kuni mitu kuud). [7]

Kulumiskindluse seisukohalt on parimaks valikuks kolmekihilised kaetud juhtmed BLX ja BLL. Ühekihilised juhtmed on 10 kV pingega elektrivõrkudes vastuvõetava kulumiskindlusega vähemalt 3,3 mm isolatsioonikihi paksuse puhul. [7]

Vastavalt J3301 võrgustandardile tuleb Elektrilevi OÜ ehitusprojektides kasutada kahe ristlõikega kaetud juhet: BLL 62 FeAl (juhtme standardile vastavalt CCST 62-AL1/ST1A W) ja BLL 99 FeAl (juhtme standardile vastavalt CCST 99 AL1/ST1A W). Tabelis 2.2 on toodud kaetud juhtmete BLL62 ja BLL99 tehnilised andmed. [8]

**Tabel 2.2.** Kaetud juhtmete BLL62 ja BLL99 tehnilised andmed [9]

| Juhtme nimetus                                       |           | CCST 62 AL1/ST1A W<br>(BLL62) | CCST 99 AL1/ST1A W<br>(BLL99) |
|--|-----------|-------------------------------|-------------------------------|
| Voolujuhi nimetus vastavalt standardile EVS-EN 50182 |           | 54-AL1/9-ST1A                 | 85-AL1/14-ST1A                |
| Juhtme ristlõige                                     |           | 62 mm <sup>2</sup>            | 99 mm <sup>2</sup>            |
| Juhtme kogu diameeter                                |           | 10,1 mm                       | 12,8 mm                       |
| Kaabli kogu diameeter                                |           | 15,5 mm                       | 18,2 mm                       |
| Mass   | voolujuht | 216,1 kg/km                   | 343,6 kg/km                   |
|  | juhe      | 340 kg/km                     | 504 kg/km                     |
| Minimaalne katketugevus                              |           | 18,64 kN                      | 29,22 kN                      |
| Esialgne elastsusmoodul                              |           | 59000 N/mm <sup>2</sup>       | 59000 N/mm <sup>2</sup>       |
| Lõplik elastsusmoodul                                |           | 78000 N/mm <sup>2</sup>       | 78000 N/mm <sup>2</sup>       |
| Joonpaisumistegur                                    |           | 19,2 x 10 <sup>-6</sup>       | 19,2 x 10 <sup>-6</sup>       |
| Aasta keskmine pinge (EDS)                           |           | 45 N/mm <sup>2</sup>          | 45 N/mm <sup>2</sup>          |

Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise projektis on kasutatud paljasjuhtmega õhuliini asendamisel kaetud juhet CCST 99 AL1/ST1A W ehk BLL 99.

#### 2.1.4. Mastide tüübid

Sirgetele liinilõikudele püsitatakse **kandemastid**. Mastide vastupidavust tuleb kontrollida standartsetele koormusjuhtumitele. Kandemastide liinisuunaliste tõmmete erinevuste minimeerimiseks on soovitatav teha ankrukinnituste vahel visangud võimalikult võrdsetena taandatud (arvutusliku) visanguga  $L_R$ . Kõrvuti asuvate visangute puhul on soovitatav visangute vahekorra vahemik  $1 \cdot L_R \dots 1,5 \cdot L_R$  või  $0,8 \cdot L_R \dots 1,2 \cdot L_R$ . Kui visangute erinevus ei jää antud vahemike piiridesse tuleb arvutuslikult kontrollida, et tõmmete vahe ei ületaks

tõirale ega mastile lubatavat liinisuuaniilist jõudu ja näha ette täiendavad meetmed masti kindlustamiseks. [10]

**Nurgamaste** kasutatakse liini pöördnurkadel. Tõirisolaatorite kasutamisel ei tohi mõjuvad jõud ületada tõirade vastupidavust ja rippisolaatorite puhul tuleb tagada juhtme ja masti väikseim lubatud vahekaugus. Nurgamastide puhul tuleb mast kindlustada nurga suunas mõjuva jõu  $T_r$  vastu. [10]

Õhuliini viimase mastina üleminekul kaabelliinile, pingutamata visangule või haruliini algusesse koos samale mastile kinnitatud tüviliiniga on vajalik paigaldada **lõpumast**. Lõpumast peab olema kindlustatud juhtmete ühepoolsele suurimale tõmbejõule. Juhul, kui lõpumasti arvutustulemuste kohaselt ei vasta üks post tugevustingimusele on soovitatav kasutada portaalmaste, mis koosnevad mitmest jäigalt ühendatud postist. [10]

**Ankrumastid** paigaldatakse liini kogu tõmbejõu ankurdamiseks mõlemal poolel. Ankrumaste on vajalik paigaldada sirge liini pikkade lõikude ja/või suurte kõrgusvahedega visangute kinnitamiseks, juhtmemargi muutumisel ja muudel juhtudel, kus on vaja kindlalt vältida külgnevates liiniosades tekkivate vigastuste mõju ja juhtme alla langemist. Ankrumastid kindlustatakse mõlema külgneva visangu suunal kui lõpumastid. Muudeks juhtumiteks võivad olla ristumised taristutrassidega nagu avalik raudtee, riigi põhimaantee jne. Üle 2 km pikkused ankurdamata liinilõigud pole soovitatavad. [10]

**Nurga-ankrumastid** paigaldatakse liini pöördnurkadele, kui sellel esineb ka vajadus liini ankurdamiseks. Nurga-ankrumastidel kasutatakse standardikohaselt testitud eritraaverseid või mõlema liinisuuuna jaoks eraldi lõputraaversit, mis on suurematel nurkadel ( $\sim 45^\circ$  ja enam) on soovitamam. Nurga suunas mõjuvate jõudude vastu tuleb mast kindlustada analoogselt nurgamastile. [10]

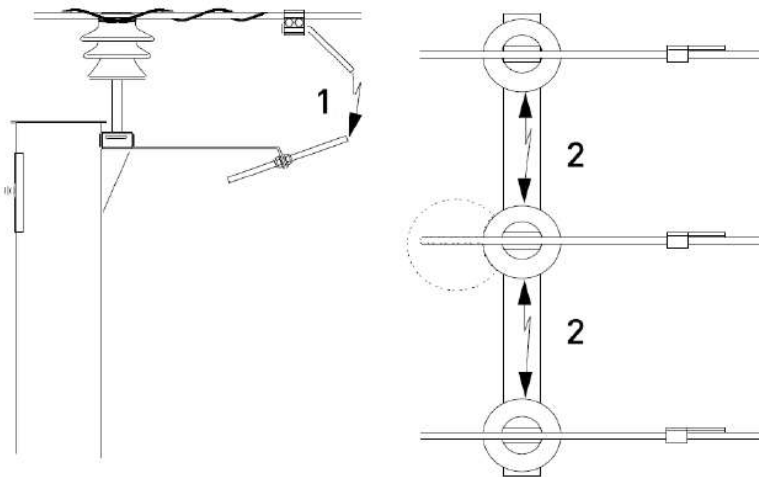
### 2.1.5. Liigpingepiirikud ja sädevahemikud

Pikselööök liini või liini läheduses indutseerib liinis liigpinge. Liigpinge tekib kõigis faasides ning faasi ja maa vaheline liigpinge võib ulatuda mitmesaja kilovoldini. Lähima masti juures tekitab liigpinge traavesi ja juhtme vahel kaarleeklahenduse, millest tekib võrgu sagedusega lühisvool suurusega ligikaudu mitu kiloampri. Lühisvoolu suurus sõltub lühisevõimsusest ja lühisekoha kaugusest piirkonnaalajaamast. Ioniseerunud õhust põhjustatuna tekib faaside vahel elektrikaar, mis liigub piki juhtmeid koormuse suunas.

Paljasjuhtmega õhuliinidel toimub kaarleegi liikumine vabalt ja liigpingepiirikud paigaldatakse seadmete juurde. Kaetud juhtmetega liinil takistab kaarleegi vaba liikumist isolatsioonikiht. Kui alajaamas fiidrikaitse ei rakendu piisavalt kiiresti, siis kaarleek põletab isolatsioonikihti augu ja jääb seal põlema kuni juhtme vigastamiseni või läbipõlemiseni. Vigastuste vältimiseks tuleb kaetud juhtmetega liinidele kasutada vajalikes kohtadesse kaarleegikaitsevahemikud. Nende ülesandeks on luua atmosfäärsete liigpingete ja kaarleegile võimalikult ohutu lahendustee juheta ja ka liini teisi elemente vigastamata. [7]

Kaetud juhtmetega liinidel paigaldatakse liigpingete kaitseks sädevahemikud ehk sädemikud ja liigpingepiirikud. [8, 11]

Joonisel 2.2 on kujutatud sädevahemik. Juhtmetele monteeritakse isolatsiooni läbistavate klemmidega kaitseelektroodid. Et kaarleek ei vigastaks isolaatorit monteeritakse vastuelektrood, moodustades sädevahemiku (1), kuhu kaarleek saab isolaatorilt siirduda. Tekib faasidevaheline lühis traaversi kaudu (2), millest rakenduvad kaitsevahemikud piirkonnaalajaamas. [7]

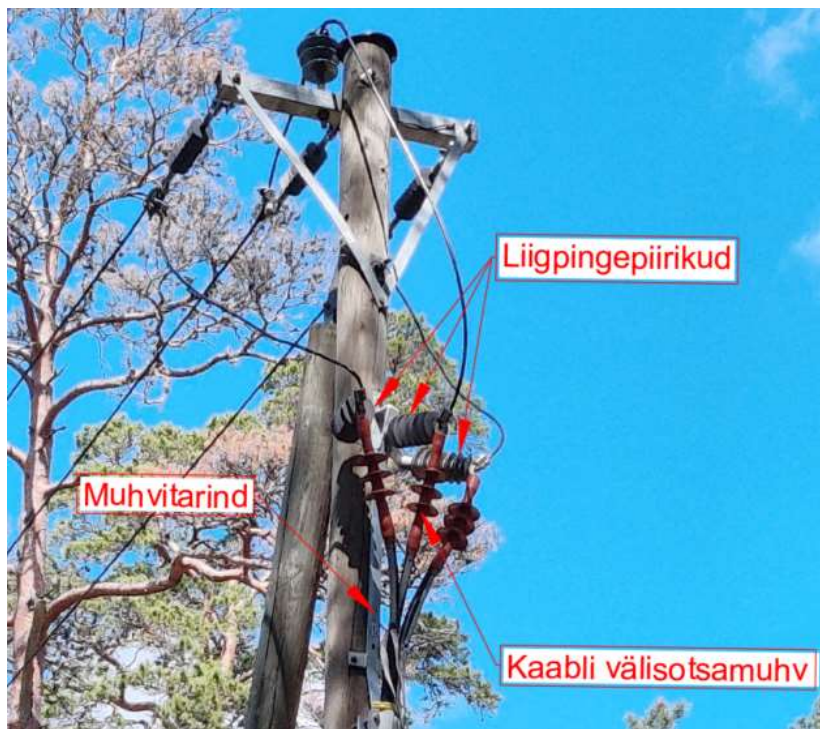


**Joonis 2.2.** Sädevahemik. 1- sädevahemik; 2- faaside vaheline lühis traaversi kaudu. [7]

Sädemikud tuleb kaetud juhtmetega õhuliinidel avamaastikul ja kõrgendikul ette näha igasse kolmadasse masti ehk üle kahe masti. Kõrgendiku tipus tuleb sädemikud paigaldada igasse masti. Sädemikega puitmaste pole vaja maandada. [8]

Keskpinge kaabelliin, mis läheb üle õhuliiniks, peab olema kaitstud atmosfäärsete ülepingete eest metalloksiid-liigpingepiirikutega, mis paigaldatakse kaablite otspunkti. Nõuetekohaselt maandatud terasest muhvitarindit võib kasutada liigpingepiirikute

maandusjuhina juhul, kui muhvitarind kujutab endast elektriliselt konstruktiivset tervikut ja selle vähim ristlõige liigpinge kulgemise teekonna kitsamail kohal on 50 mm<sup>2</sup>. [11]



**Joonis 2.3.** Liigpingepiirikud mastil.

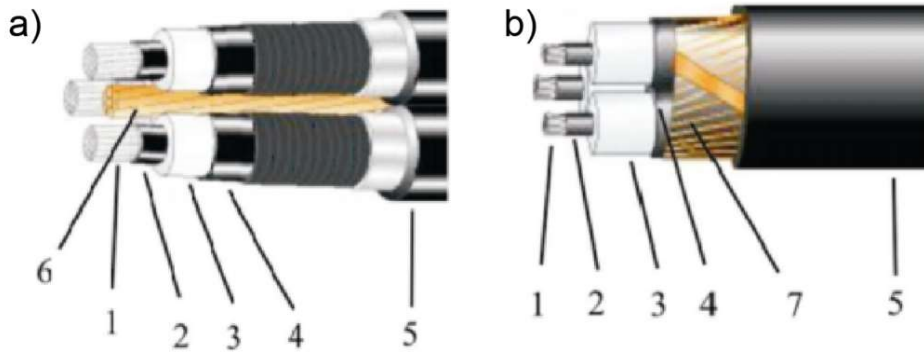
Joonisel 2.3 on kujutatud tugipostiga kindlustatud lõpumast, millele on paigaldatud keskpinge liigpingepiirikud üleminekul õhuliinilt maakaabelliinile.

## **2.2. Keskpinge maakaabelliinid**

### **2.2.1. Keskpinge maakaablid**

Kaablite konstruktsioon on suhteliselt keerukas, sõltudes nimipingest, soonte arvust, materjalist ning töötingimustest. Mehaaniliste vigastuste, korrosiooni ja niiskuse eest kaitseb kaabli sooni spetsiaalne mantel. Kaablis ei tohi niiskus levida ka piki- ja ristsuunas, milleks on kaablis juhi kiudude vahel veetõke. Isolatsioonimaterjalidena kasutatakse polüvinüülkloriidi (PVC) ja polüeteeni (PE, PEX, XLPE). Mantli materjaliks on plii, alumiinium, plastmass või kumm. Korrosiooniohtlikus keskkonnas ja vee all kasutatakse tavaliselt pliiimantliga kaableid. Kaablimantli kaitseks on kaitsesoomus. Metallmantlit korrosiooni eest ja kaitsesoomust kaitstakse välismantliga, mis on valmistatud bituumeniga immutatud kiudmaterjalist või plastmassist. [5]





**Joonis 2.4.** Keskpinge kaablite konstruktsiooni näited. 1- juht; 2- pooljuhtiv juhikate; 3- isolatsioon; 4- pooljuhtiv isolatsioonikate; 5- välismantel; 6- keskjuhe; 7- kontsentriiline juht. [5]

Joonisel 2.4 on kujutatud keskpinge kaablite konstruktsioonide näited. Joonisel a) on kolmesooneline ümber keskjuhtme keerutatud keskpingekaabel AHXAMK-W. Joonisel b) on kolmesooneline keskpingekaabel AHXCMK-WTC. [5]

AHXAMK-W kaabel on ette nähtud paigaldamiseks maa alla, kohtkindlana sise- ja välisruumidesse, riulitele ning torudesse. Kaablil on vasest keskjuhe, mis maandatakse mõlemas kaabli otsas ja loob laia maandussüsteemi. Konstruktsiooniliselt on antud kaabel alumiiniumist valmistatud ümara, keerutatud ja tihendatud veekindla juhtmega, mida ümbritseb pooljuhtiv kopolümeerkompaund. Isolatsiooniks on võrkstruktuuriga polüeteen, mida ümbritseb pooljuhtiv veel üks kiht pooljuhtivat kopolümeerkompaundi. Piki- ja ristsuunaline veetõke takistab niiskuse levimist. Välismantel on polüeteenist. [5]

AHXCMK-WTC kaablit paigaldatakse kaablikanalisse, otse pinnasesse ja vette. Eriti sobib antud kaabel kündmiseks pinnasesse. Faasisooned on kaablil kokku keerutatud ja seotud pooljuhtiva lindiga. Antud kaablil on ka vasest kontsentriiline juht, mis täidab sama ülessannet, kui AHXAMK-W kaablil vasest keskjuht. Kontsentriiline juht koosneb paralleelsetest vasktraatidest ja vasest kontaktlindist. [5]

Kuna keskpinge kaablitel on kaabli kogu diameeter arvestades juhi ristlõiget suur, siis tuleb projekteerimisel paigaldada üldjuhul kaablid suurema diameetriga (160 mm) kaitsetorudesse.

## 2.2.2. Keskpinge maakaabelliinide ehitus

Elektrilevi OÜ praktika on tänasel päeval kõik maakaablid võimalusel paigaldada kogu ulatuses kaitsetorusse.

Vastavalt standardile EVS-EN 61386-24:2010 jaotatakse kaablikaitsetorud kolmeks tüübiks 250N, 450N ja 750N. [12]

Kaablikaitsetorusid 450N kasutatakse järgmisel juhudel [12]:

- Reeglina kõigis tihe- ja hajaasutusega piirkondades, kus kaevetöid esineb harva.
- Ristumisel teiste maa-aluste kommunikatsioonidega.
- Ristumisel teedega, kui vahekaugus teepinnast kaablini on vähemalt 1,0 m.
- Kõnni- ja kergliiklusteede all, kui vahekaugus teepinnast kaablini on üle 0,5 m.

Kaablikaitsetorusid 750N kasutatakse järgmisel juhudel [12]:

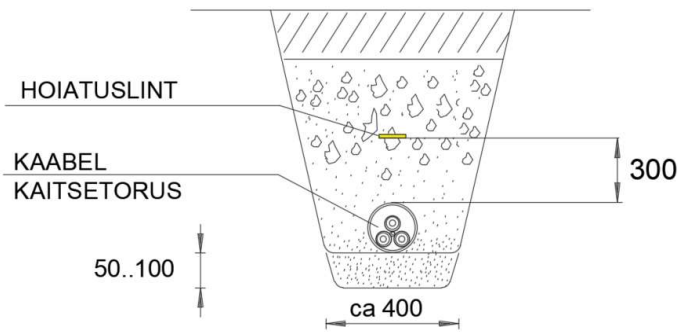
- Läheduses asuvate rohkete allmaarajatiste ja sagedate kaevetöödega piirkondades.
- Ristumisel teedega, kui kaugus teepinnast kaablini on 0,5...1,0 m.
- Sõiduteede all, tiheda liiklusega õue- ja parkimisaladel või kohtades, kus on suur mehaanilise mõju tõenäosus.
- Õue- ja pargialadel, kui kaugus maapinnast kaablini on 0,3...0,5 m.

Puurimistorusid kasutatakse kinnises paigalduses [12]:

- Kinnist paigaldusviisi rakendatakse ristumisel raudteede, tiheda liiklusega teede ning kraavidega.
- Põhinõuded kinnise meetodi kohta on toodud joonisel. Läbimise parameetrid määrata olenevalt ehitaja kasutuses olevatest mehhanismidest.

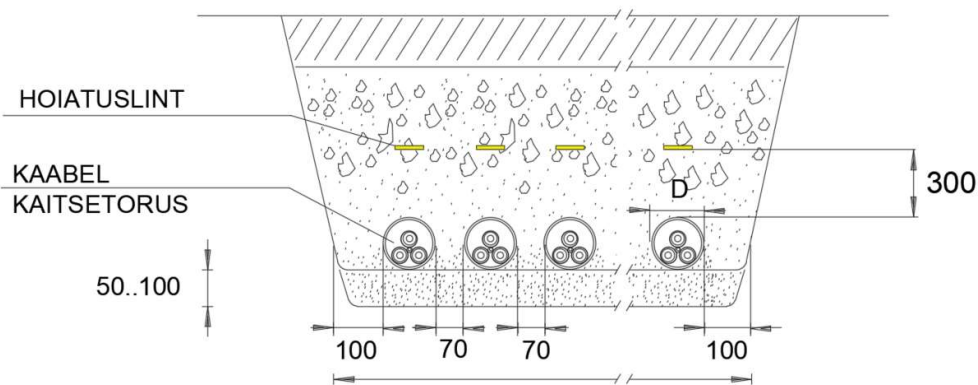
Maakaabli paigaldamisel kaevisesse peab kaevise laius võimaldada kaabli ja kaablikaitsetoru takistuseta paigaldust, täitepinnasega täitmist, pinnase tihendamist, kaitse- ja hoiatuslinde paigaldamist ja käsitsi kaevamisel töötaja ohutut liikumist kaevise põhjal. Kaevise pealne laius määrata vastavalt pinnase varisemisnurgale. Piiratud ruumi korral ja pehme pinnase korral tuleb kaevise seinad kindlustada. [11]

Soovitav kaevise laius ühe kaabli paigaldamisel on toodud joonisel 2.5.



**Joonis 2.5.** Ühe kaabli paigaldus kaevises kaitsetorus. Mõõdud millimeetrites. Joonis ei ole mõõtkavas. [11]

Soovitav kaevise laius rööpsete kaablitrasside rajamisel samasse kaevisesse joonisel 2.6.



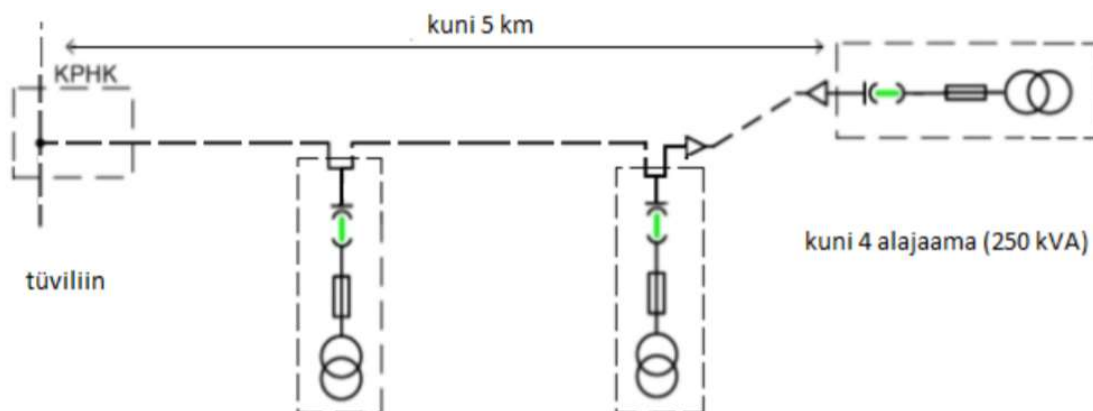
**Joonis 2.6.** Mitme kaabli paigaldus ühises kaevises kaitsetorudes. Mõõdud millimeetrites. Joonis ei ole mõõtkavas. [11]

Kaabli paigaldussügavus on üldjuhul 0,7 m. Raudtee all, sõidutee all, tiheda liiklusega õuealal, parkimisplatsi all, künnimaal on paigaldussügavus 1,0 m. Ristumisel sissesõiduteedega, jalgteel ja õuealal, mitteharitaval maal on paigaldussügavus 0,7 m. Kui kaevise sügavus on alla 0,7 m, tuleb kasutada täiendavaid kaitseviise (näiteks kaablikaitsetorud, betoonist kaablikanalid, betoonaluse tegemine, jne). Kaevise täitmisel tuleb täitepinna tihendada. Paigaldatavast kaablist 300 mm kõrgemale tuleb paigaldada elektrikaabli hoitatuslint. [11]

Projekteerimisel tuleb arvestada ka kaablite painderaadiusi. Üldjuhul ei tohi mitmesoonelise kaabelliini painderaadius olla väiksem, kui 12-kordne kaabli läbimõõt. Kaitsetoru valikul tuleb arvestada, et torus peab olema vähemalt 30% vaba ruumi. [11]

### 2.2.3. Keskpinge harukapp

Keskpinge haruliini ühendamiseks tüviliiniga on üheks võimaluseks kasutada keskpinge harukappi. Keskpinge harukapp on ilma lülitus- ja kaitseaparatuurita kapp keskpingekaablite ühendamiseks. Ühenduste teostamiseks kasutatakse puutekindlaid nurkpistikuid või poltühendusi. Joonisel 2.7 on kirjeldatud keskpinge haruliini ühendamist tüviliiniga harukapi abil. [13]



**Joonis 2.7.** Keskpinge harukapi (KPHK) paigalduse skeem. [13]

Keskpinge harukappi kasutatakse, kui ühte alajaama toitva haruliini pikkus on üle 100 m või liiniharu kaudu saab toite kuni neli väikese võimsusega (kuni 250 kV·A) komplektalajaama. Haruliini kogupikkus perspektiivi arvestades ei tohiks ületada 5 km. [13]

Elektrilevi OÜ poolt on heakskiidetud Piperon OÜ toodetud SMK 1250 ja ABB toodetud HDC-A 24630 keskpinge harukapid [14].

Tabelis 2.3 on esitatud Elektrilevi OÜ poolt heakskiidetud harukappide tehnilised andmed. Keskpinge harukapp HDC-A 24630 sobib kasutamiseks kuni 24 kV pingel ehk praktikas kuni 20 kV liinidel. Harukappi SMK1250 saab kasutada kuni 42 kV pingel ehk praktikas kuni 35 kV liinidel. Gabariitide poolest on mõlemad harukapid sarnaste mõõtmetega.

**Tabel 2.3.** Elektrilevi OÜ poolt heakskiidetud harukappide tehnilised andmed [15, 16]

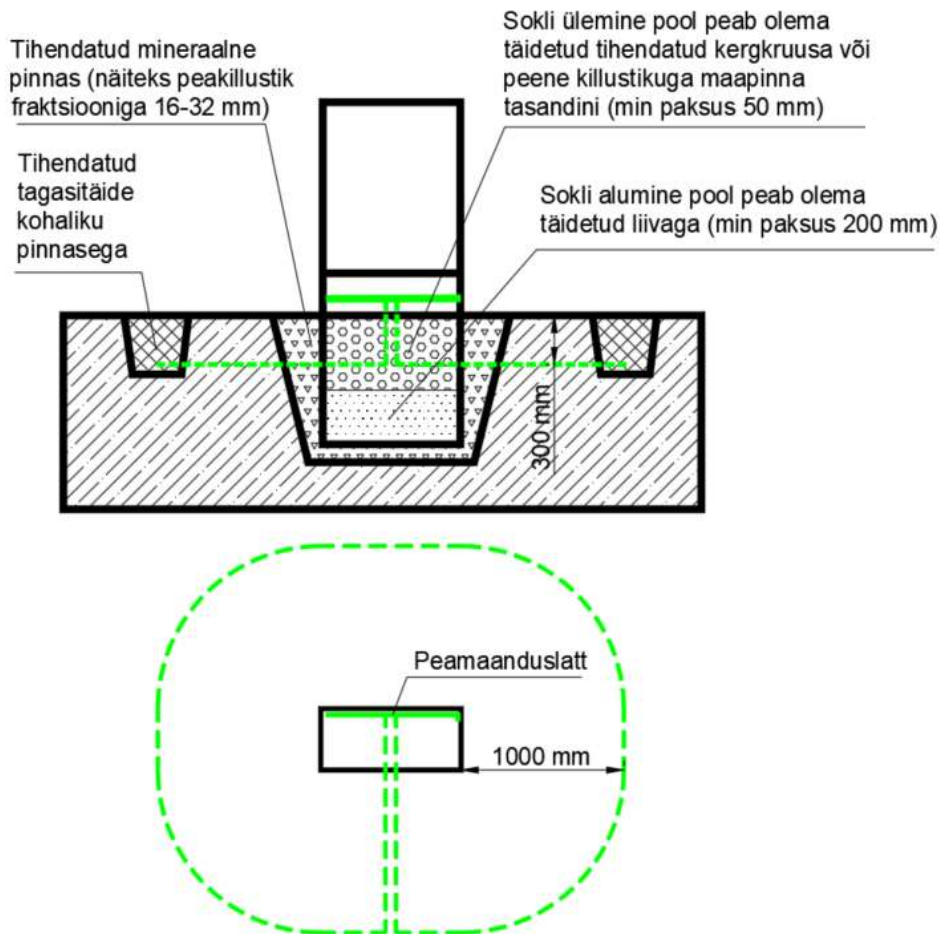
|  |                      |            |             |
|--|----------------------|------------|-------------|
| Tootja   |                      | Piperon OÜ | ABB         |
| Harukilp   |                      | SMK 1250   | HDC-A 24630 |
| Nimipinge kV                                     |                      | Kuni 42    | 24          |
| Nimivool, A                                      |                      | 1250       | 630         |
| Ühendatavate kaablite ristlõige, mm <sup>2</sup> |                      | 25-1200    | 25-630      |
| Mõõdud   | Kõrgus, mm           | 2200       | 1293        |
|  | Kõrgus pinnasest, mm | 1200       | 993         |
|  | Laius, mm            | 850        | 996         |
|  | Sügavus, mm          | 600        | 522         |

Joonisel 2.8 on kujutatud vasakul oleval pildil SMK 1250 ja paremal oleval pildil HDC-A 24630 keskpinge harukapp.



**Joonis 2.8.** Keskpinge harukapp SMK 1250 (vasakul) ja HDC-A 24630 (paremal [15]).

Keskpinge harukapile tuleb ehitada alati kohapealne maandus- ja potentsiaalitasanduselektrood. Kaablite maandusjuhid tuleb ühendada harukapi maanduspaigaldisega. Potentsiaalitasanduselektrood paigaldatakse ümber harukapi puutepingete vähendamiseks. Potentsiaalitasanduselektrood tuleb paigaldada harukapist 1 meetri kaugusele ja ligikaudu 300 mm sügavusele pinnasessse nagu näidatud joonisel 2.8. [17]



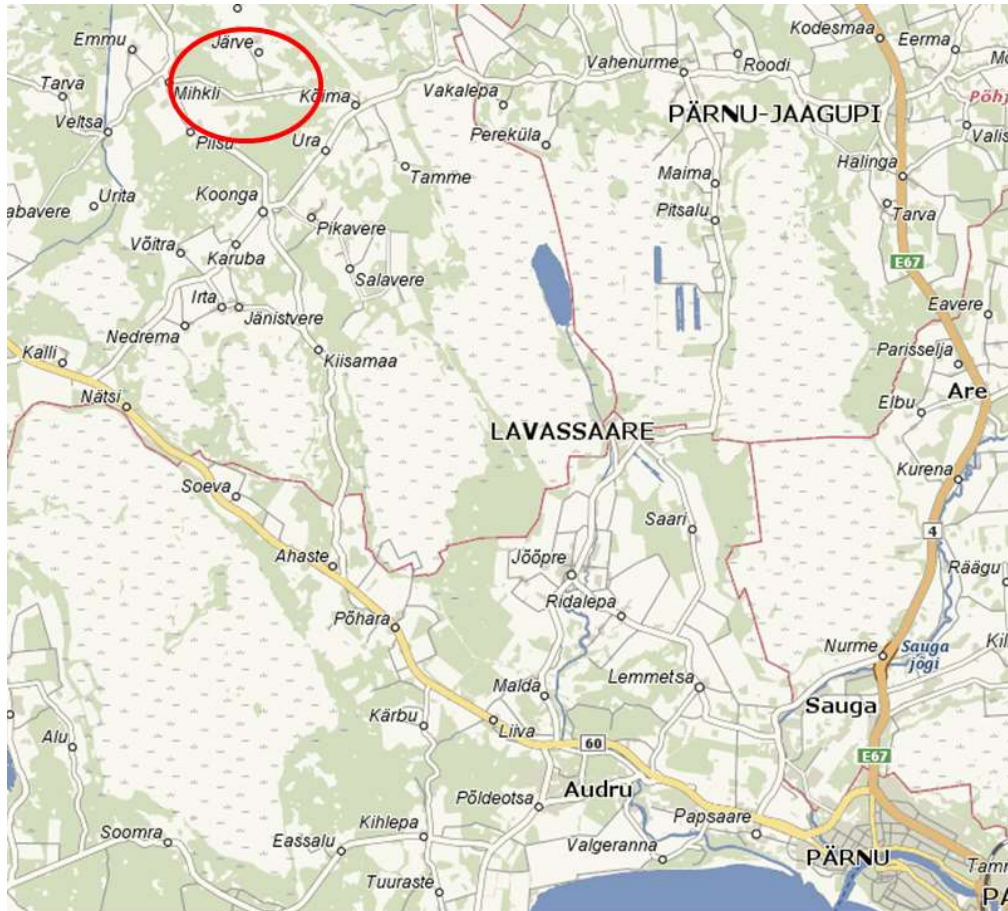
**Joonis 2.9.** Keskpinge harukapi potentsiaalitasanduselektroodi paigaldusjoonis. [17]

Nagu kirjeldatud joonisel 2.9 tuleb harukapi ümber tagasitäiteks kasutada tihendatud mineraalset pinnast. Potentsiaalitasanduselektroodi kaevise tagasitäiteks võib kasutada kohalikku tihendatud pinnast. Harukapi sokli ülemine pool peab olema täidetud tihendatud kergkruusa või peene killustikuga. Harukapi sokli alumine pool peab olema täidetud liivaga. [17]

## 3. KALLI-LÕPE 10 kV FIIDRI REKONSTRUEERIMINE

### 3.1. Rekonstrueeritav võrk

Elektrilevi OÜ lähteülesandes esitatud Kalli-Lõpe 10 kV fiidri elektrivõrgu rekonstrueerimise asukoht on Järve külas Lääneranna vallas Pärnu maakonnas. Joonis 3.1 on punase ringiga märgitud rekonstrueeritava elektrivõrgu asukoht kaardil.



**Joonis 3.1.** Rekonstrueeritava keskpinge elektrivõrgu asukoht.

Kalli-Lõpe 10 kV rekonstrueerimise tehnilised näitajad on toodud tabelis 3.1. Projekteeriti 1,389 km paljasjuhtme trassi asendamist kaetud õhuliini juhtmega BLL-99. Projekteeritud maakaabelliini trassi kogupikkus on 4,266 km. Paljasjuhtmega 10 kV õhuliini demonteerimist projekteeriti 3,5 km trassi ulatuses. Maakaabelliini põhiliinilt projekteeriti haruliin, mille ühendus projekteeriti keskpinge harukapis. Lisaks projekteeriti võrgu ümberehitus maaomaniku soovil, mille käigus tõsteti keskpinge õhuliin eemale haritavalt põllumaalt. Sellega kaasnes 0,072 km AS-35 paljasjuhtmega trassi projekteerimist ja SAX-

35 kaetud juhtme demonteerimist 0,047 km trassi ulatuses. Projekti asendiplaan on esitatud lisas A.

**Tabel 3.1.** Kalli-Lõpe 10 kV rekonstrueerimise tehnilised näitajad

| Nimetus   | Mark             | Kokku | Ühik |
|---|------------------|-------|------|
| Projekteeritud 10 kV õhuliini rekonstrueerimine | BLL-99           | 1,389 | km   |
| Projekteeritud 10 kV õhuliini                   | AS-35            | 0,072 | km   |
| Projekteeritud 10 kV maakaabelliin              | Al 3x25 (24 kV)  | 1,51  | km   |
| Projekteeritud 10 kV maakaabelliin              | Al 3x120 (24 kV) | 2,756 | km   |
| Projekteeritud 10 kV harukappe                  | HK1805           | 1     | tk   |
| Demonteeritav 10 kV õhuliin                     | AS-35            | 3,5   | km   |
| Demonteeritav 10 kV õhuliin                     | SAX-35           | 0,047 | km   |

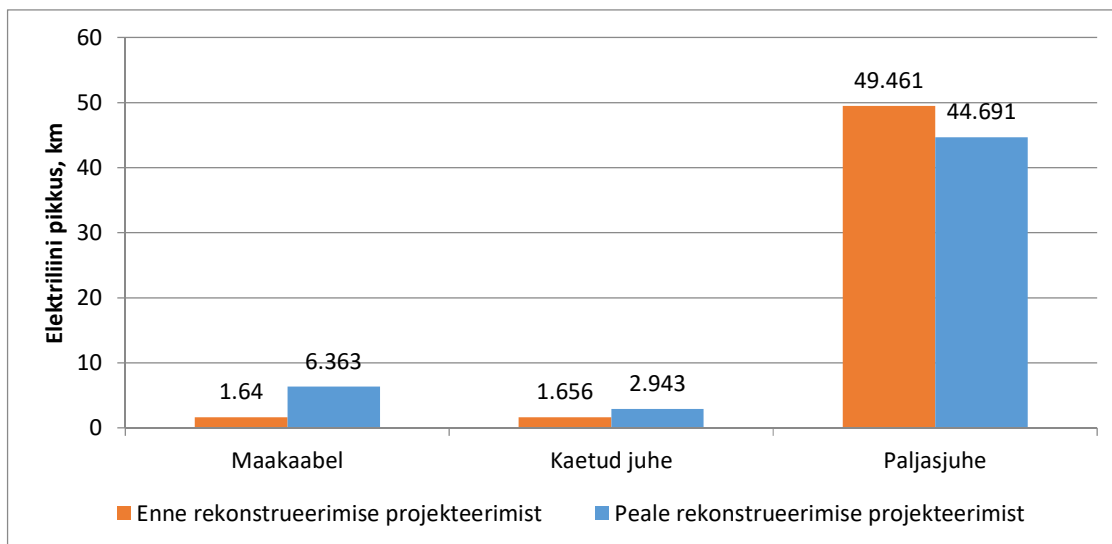
Märkus. Elektriliinide pikkused on esitatud trasside pikkustena.

Rekonstrueerimise projekt hõlmas kokku 26-te katastriüksust. Lisaks maaomanikele oli erinevatel kinnistutel ka kolm rentniku kellega oli vajalik projektlahendus kooskõlastada. Riigiasutustest kooskõlastati projektlahendus Maanteeametiga, Keskkonnaametiga, Maaametiga ja Riigimetsa Majandamise Keskusega. Maanteeamet, Veeteede Amet ja Lennuamet ühendati 1. jaanuaril 2021 ühtseks Transpordiametiks [18]. Antud töö riigiteed puudutav osa kooskõlastati aastal 2020 Maanteeametiga.

### 3.2. Kalli-Lõpe 10 kV fiidri keskpinge elektrivõrk

Kalli-Lõpe 10 kV fiidri keskpinge normaalskeemi parandus on esitatud lisas B. LÕPE 110/10 kV pealajaamast algavast Kalli fiidrist varustatakse elektrienergiaga 4 kioskalajaama, 15 komplektalajaama ja 21 mastalajaama. Enne rekonstrueerimise projekteerimist oli keskpinge fiidriskeemil 49,461 km paljasjuhtmega õhuliini, 1,656 km kaetud juhtmega õhuliini ja 1,64 km maakaabelliini. Peale rekonstrueerimise projekteerimist on keskpinge fiidriskeemil 44,691 km paljasjuhtmega õhuliini, 2,943 kaetud juhtmega õhuliini ja 6,363 km maakaabelliini.





**Joonis 3.2.** Keskpinge fiidriskeemi elektriliinide juhtmete osakaal enne ja peale rekonstrueerimise projekteerimist.

Joonisel 3.2 on esitatud Kalli-Lõpe 10 kV fiidri keskpinge fiidriskeemi elektriliinide juhtmete osakaal enne ja peale rekonstrueerimise projekteerimist. Jooniselt on näha, et peale investeerigut on paljasjuhtme osakaal kogu võrgust endiselt kõrge. Maakaabelliini osakaal suurenes 8,68 %, kaetud juhtme osakaal suurenes 2,31 % ja paljasjuhtmega õhuliini osakaal vähenes 10,99 %. Peale võrgu rekonstrueerimise projekteerimist suurenes ka elektrivõrgu liinide kogupikkus 1,24 km. Seda asjaolu tõttu, et maakaabelliini osakaalu suurendamisel projekteeriti trassid võimalikult ulatuslikult ühiskasutatavale maale.

### 3.3. Maakaabelliin

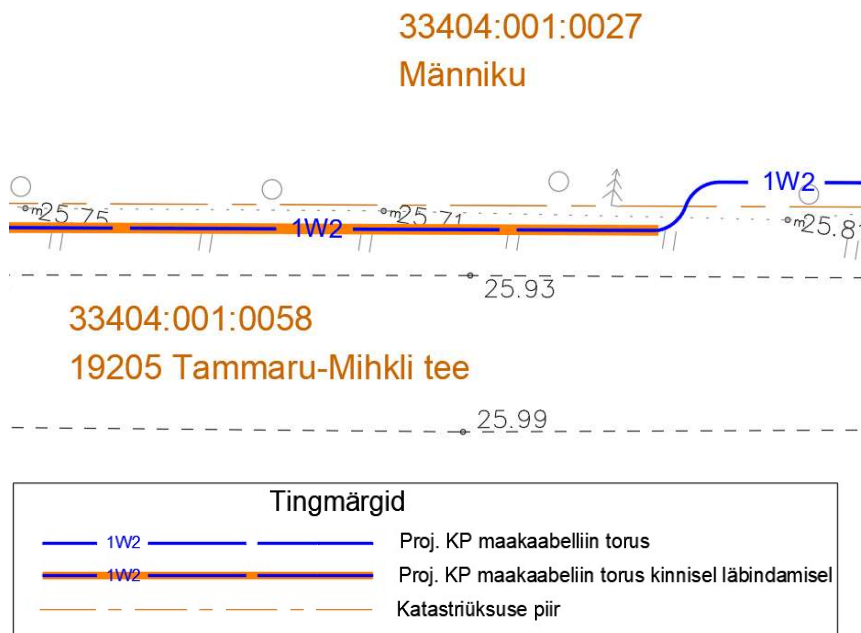
#### 3.3.1. Maakaabelliini trassi projekteerimine

Elektrilevi OÜ eelistab maakaabelliinide trasside valikul kergesti ligipääsetavaid kohti, milleks on enamasti tee ääred ja tee mulded [11].

Eesti riigile kuuluvatel teedel, mis kuuluvad Maanteeameti teeregistrisse on vajalik kooskõlastada Maanteeametiga (peale 01.01.2021 Transpordiametiga). Maanteeameti juhendi „Nõuded tehnovõrkude ja -rajatiste teemaale kavandamisel“ punkti 2.3.4 kohaselt ei ole teega rööpse tehnovõrgu paigaldamine tee muldesse lubatav. Juhendi kohaselt võib rajada piki teemaad kulgevaid tehnovõrke ainult, siis kui majanduslikult põhjendatud alternatiivsed lahendused puuduvad. [19]

Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise projektlahenduses oli vajalik rajada maakaabelliin teeregistris oleva kõrvalmaantee 19205 Tammaru-Mihkli tee tee serva. Kaablitrass oli lähteülesandes ette nähtud kulgema piki teemaad. Teemaale kaablitrassi projekteerimisel oli teekatte serva ja kinnistu piiri vahelise ala kitsaim koht 1,9 m ja kõige laiem koht 4,1 m. Suuremas osas oli teemaal ruum ligikaudu 3 meetri ulatuses. Sellistes tingimustes keeldus Maanteeamet lahtisel kaevel kaablitrassi rajamise kooskõlastamisest teemaale. Kinnisel meetodil kaablitrassi rajamisele andis Maanteeamet nõusoleku.

Kinnisel läbindamisel on maakaabelliini paigaldus oluliselt kallim lahtisest kaevest. Kogu ulatuses maakaabelliini rajamine 19205 Tammaru-Mihkli tee servas oleks tähendanud ligikaudu 2,7 km kinnist läbindamist. Elektrilevi OÜ kuraatoriga nõu pidamisel otsustati, et ehituse maksumuse vähendamise eesmärgil oli vajalik minna läbi rääkima erakinnistu omanikega võimalusest kaabelliini paigaldamiseks lahtisel kaevel erakinnistutele. Kaabelliini paigalduseks saadi erakinnistu omanikega kokkuleppele kohtades, kus pole selleks maapealseid takistusi nagu puud või teerajatised.



**Joonis 3.3.** Projekteeritud asendiplaani väljavõte 19205 Tammaru-Mihkli tee servas.

Joonisel 3.3 on kujutatud olukord, mis illustreerib kaablitrassi 19205 Tammaru-Mihkli tee servas. Männiku kinnistule projekteeritud kaabelliin on lahtisel paigaldusel ja enne kinnistul asuvat kuuske on viidud trass üle teemaale kinnisele läbindamisele. Antud olukorda kirjeldab ka joonisel 3.4 kujutatud piltjoonis.



**Joonis 3.4.** Piltjoonis maakaablitrassist 19205 Tammaru-Mihkli tee servas. Joonis on illustreeriv ja ei ole mõõtkavas.

Sarnaseid üleminekuid kinnisele läbindamisele projekteeriti piki 19205 Tammaru-Mihkli tee teemad kulgeva trassi ulatuses kuus trassilõiku ja saavutati erakinnistu omanikega kokkuleppe lahtiseks kaeveks ligikaudu 1,4 km trassi pikkuses.

19205 Tammaru-Mihkli tee ja Järve tee ristmikule paigaldati keskpinge harukapp. Harukapist projekteeriti piki Järve tee teemaad kulgev maakaablitrass lahtisel kaevel. Kaablitrass projekteeriti lahtisel kaevel ja kogu ulatuses minimaalselt 1 meetri sügavusele. Kaablitrassi kaugus teekatte servast projekteeriti minimaalselt 2 meetri kaugusele. Ristumisel Järve teega Lossipõllu kinnistu juures paigaldatakse kaabel kinnisel läbindamisel. Riigiteedega ristumistel on vajalik esitada ristmevälja joonised, mis toodud lisades F-H.

### **3.3.2. Maakaabelliini ehitus**

Maakaabelliinid on projekteeritud kogu ulatuses kaitsetorusse. Lahtised kaeveld projekteeritud maakaabelliinid kulgevad piki tee servi ja toru tüübiks on lahtiste kaevete osas valitud 450N. Kinnisel läbindamisel paigaldatav kaitsetoru on puurimistoru, mille jäikusklass on 1250N [12]. Teedega ristumised ja riigi kõrvalmaatee teemaal rööpselt teega kulgev maakaablitrass projekteeriti kinnisel läbindamisel.

Maakaabelliini vähim paigaldussügavus kinnisel läbindamisel tee muldes on projekteeritud 1,5 meetrit. Vähim paigaldussügavus liiklusemärgi posti all on projekteeritud 2,0 meetrit. [19]

Järve teega paralleelne kaablitrass kulgeb kohalikule omavalitsusele kuuluvas tee muldes ja tee kraavi põhjas ja vähimaks paigaldussügavuseks on projekteeritud 1,0 meetrit.

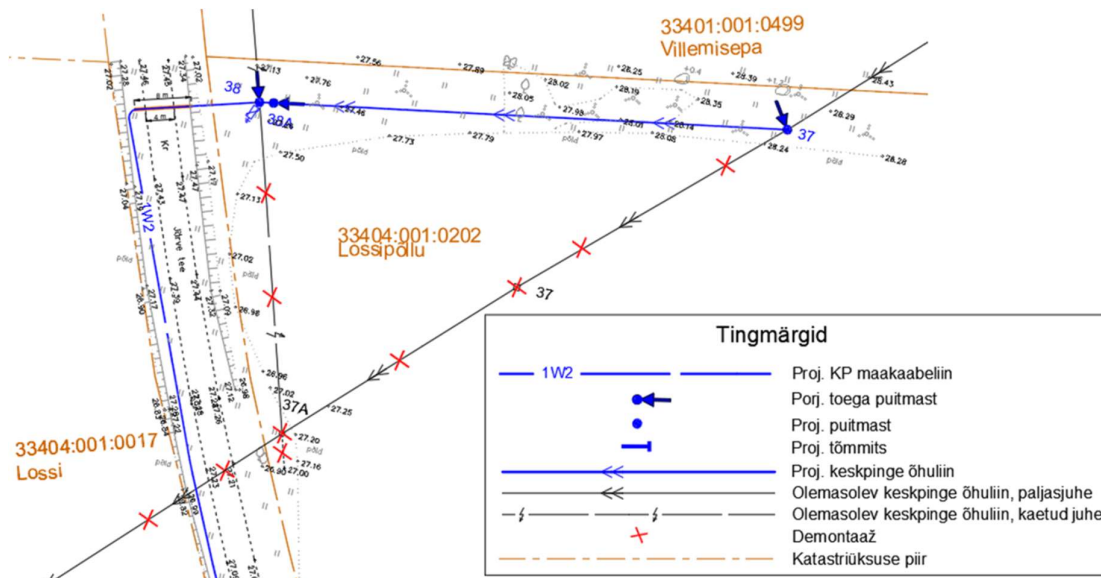
Järve tee ja Tammaru-Mihkli tee ristumikul tee äärsele alale on projekteeritud keskpinge harukapp HK1805. Tüviliin kulgeb Tammaru-Mihkli tee servas ja haruliin Järve tee servas.

## **3.4. Õhuliin**

### **3.4.1. Õhuliini ehitus**

Paljasjuhtmega õhuliini kahe liinilõigu demonteerimisega oli vajalik projekteerida allesjäävate õhuliinide viimased mastid projekteerida lõpumastideks või ankrumastideks. Sellega seoses projekteeriti Kibura haruliinist hargneva Metsavahi haruliinile uus toega puitmast M1. Kibura haruliini mast M18A asendati uue tõmmitsaga kindlustatud puitmastiga. Kibura haruliini mast M32 asendati uue toega puitmastiga.

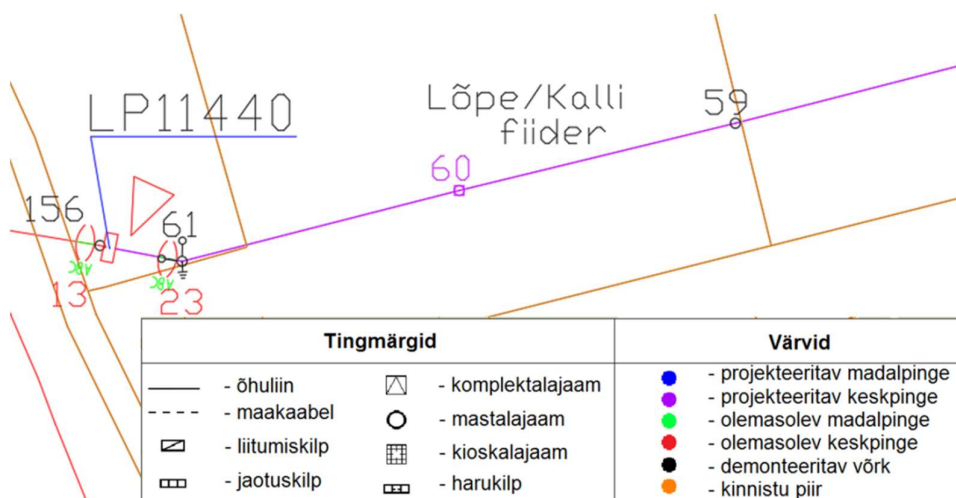
Lossipõllu kinnistul oli vastavalt lähteülesandele planeeritud demonteerida õhuliin alates mastist 37A Järve tee suunal. Kuna maaomanik ei suhtunud lisa tugielementide paigaldamisse haritavale põllumaale positiivselt oli vajalik leida alternatiivne lahendus. Maaomaniku ja Elektrilevi OÜ planeerijaga läbirääkimisel otsustati tõsta ümber allesjääv õhuliin Lossipõllu kinnistul haritavalt põllumaalt võimalikult kinnistu piiri äärde. Joonisel 3.5 on asendiplaanist väljavõte Lossipõllu kinnistul projekteeritud võrgu ümberehitusest.



**Joonis 3.5.** Asendiplaani väljavõte Lõssipõllu kinnistul projekteeritud võrgu ümberehitusest.

Joonisel 3.5 on näha, et Lõssipõllu kinnistule projekteeriti puidust toega nurgamast 37 ja toega lõpumastid M38 ja M38A.

Lähteülesandes nähti ette õhuliini paljasjuhtme asendamine kaetud õhuliini juhtmega BLL 99 kuni mastini M156. Kuna nurgamast M61 vajab tugielementide paigaldamist ja õhuliini juhtmemargi muutumisel oleks olnud vajalik M156 projekteerida ankrumastiks, siis oleks pidanud ebaotstarbekalt palju tugielemente paigaldama kahele järjestikusele õhuliini mastile. Elektrilevi OÜ planeerijaga läbirääkimisel otsustati muuta lahendust ja lõpetada õhuliini rekonstrueerimine mastis M61. Mast M61 projekteeriti nurga-ankrumastiks. Joonisel 3.6 on toodud väljavõtte lähteülesande asendiplaanist nurgamasti M61 juures.



**Joonis 3.6.** Nurgamast M61. Väljavõtte lähteülesande asendiplaanist.

Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimisel projekteeriti 3 kaabelliini üleminekut õhuliinile, seega oli vajalik näha ette liigpingepiirikud kolmele mastile. Liigpingepiirikud projekteeriti Kibura haruliini mastidele M38 ja M49 ning Metsavahi haruliini mastile M12. Metsavahi haruliini mastile M12 oli vajalik ruumi puuduse tõttu olemasoleval mastil paigaldada lisaks eraldi kaablimast M12A. Liigpingepiirikutega mastide seadmete paigutusjoonised on toodud lisades C-E.

Mastide tugevusarvutused on esitatud peatükis 3.5.

### 3.5. Õhuliini mastide tugevusarvutused

#### 3.5.1. Mastide tugevusarvutused ja koormusjuhtumid

Elektrilevi OÜ normdokument „J3301 20 kV õhuliinide täpsustavad nõuded projekteerimiseks“ sätestab normdokumendi „P339 0,4 - 20 kV võrgustandard - 20 kV õhuliinid“ alusel täpsustavad nõuded kaetud juhtmega keskpinge õhuliinide projekteerimiseks. Vastavalt normdokumendi J3301 punktile 3.27 on vajalik esitada piir ja erijuhtumitele (pikim visang, suurim nurk, suurim naabermastide kõrguste vahe, ristumised ja lähispaiknemised, mastide paigaldustingimused jne) masti tugevusarvutused. [8]

**Tabel 3.2.** Kombinatsioonitegurid vastavalt koormusjuhtumitele [10]

| Nr | Koormusjuhtum                          | Temperatuur | Kombinatsioonitegurid     |                           |
|----|--|-------------|---------------------------|---------------------------|
|    |  | °C          | Tuulekoormus,<br>$\Psi_W$ | Jäitekoormus,<br>$\Psi_I$ |
| 1  | Piirtuulekoormus                       | -5          | 1,0                       |                           |
| 2  | Piirjäitekoormus                       | -5          |                           | 1,0                       |
| 3  | Piirjäitekoormus +<br>nimituulekoormus | -5          | 0,4                       | 1,0                       |
| 4  | Vähim temperatuur                      | -40(-30*)   |                           |                           |
| 5  | Avariikoormused                        | +5          | 0,4                       |                           |
| 6  | Ehitus- ja<br>hooldekoormused          | -20         |                           |                           |

Mastide tugevusarvutustel kasutatavad kombinatsioonitegurid on toodud tabelis 3.2. Vähima temperatuuri ning ehitus- ja hoolduskoormuse juhtumitel tuule- ja jäitekoormusi arvesse ei võeta. Arvutustes arvestatakse vähimaks temperatuuriks Eestis mandril -40 °C ja Lääne-Eesti saartel -30 °C. [10]

Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise projektis projekteeriti kandemastid, tõmmitsatega kindlustatud lõpumast, toega nurgmast ja tõmmitsatada kindlustatud nurga-ankrumast. Valemid ja arvutuskäik piirjuhtumite arvutamiseks on toodud peatükkides 3.5.2 - 3.5.8. Kuna esinevate piirjuhtumite olukordades on raskeimaks koormusjuhtumiks kõigis olukordades piirjäitekoormus+nimituulekoormus, siis on arvutuskäigud esitatud vastavale koormusjuhtumile.

### 3.5.2. Kandemasti tugevusarvutused

Mastile külgnevate visangute juhtmetele nimituulekoormusest jäite olemasolul mõjuv jõud on leitav valemiga [10]

$$Q_{Wc} = n \cdot q_p \cdot \Psi_W \cdot G_c \cdot C_c \cdot (d + 2b) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{L_1 + L_2}{2}, \quad (3.1)$$

kus  $Q_{Wc}$  on mastile mõjuv jõud tuulekoormusest N;

$n$  - juhtmete arv;

$q_p$  - suurim tuulesurve juhtmele baaskõrgusel (641 N/m<sup>2</sup>);

$G_c$  - juhtmete mehaanilise resonantsi ehk visangutegur ( $G_c = 0,7$ );

$C_c$  - juhtme tuuletakistustegur ( $C_c = 1,0$ );

$d$  - juhtme läbimõõt, mm;

$\Psi_W$  - tuulekoormuste kombinatsioonitegur ( $\Psi_W = 0,4$ );

- $b$  - b jäite paksus ( $b = 10$  mm).  
 $L_1, L_2$  - külgnevate visangute pikkused – nende keskväärtus on nn tuulevisang, m.

Liini suunaga risti olev tuulejõud puitpostmastile nimituulekoormusel on leitav valemiga [10]

$$Q_{Wpol} = q_p \cdot G_{pol} \cdot C_{pol} \cdot A_{pol} \cdot \Psi_W, \quad (3.2)$$

- kus  $Q_{Wpol}$  on liini suunaga risti olev tuulejõud puitpostmastile N;  
 $G_{pol}$  - postmasti mehaanilise resonantsi tegur, mille väärtuseks on 1,0;  
 $C_{pol}$  - postmasti tuuletakistustegur (naturaalpuidust postidele  $C_{pol} = 0,9$ , neljakandilistele raudbetoonpostidele  $C_{pol} = 1,4$ );  
 $A_{pol}$  - postmasti projektsiooni pindala tuule suunaga risti olevale vertikaaltasapinnale m<sup>2</sup>.

Postmasti projektsiooni pindala tuule suunaga risti olevale vertikaaltasapinnale on leitav valemiga [10]

$$A_{pol} = 0,5 \cdot (d_{\text{ül}} \cdot d_{\text{maa}}) \cdot 10^{-3} \cdot H_{\text{maa}}, \quad (3.3)$$

- kus  $d_{\text{ül}}$  on masti ladva läbimõõt mm;  
 $d_{\text{maa}}$  - masti läbimõõt maapinna või madalaima arvatava osa lõikes mm;  
 $H_{\text{maa}}$  - masti arvatava osa kõrgus (tavaliselt tipust maapinnani) m.

Maapinna (või muus arvatavas) lõikes mastile mõjuv paindemoment  $M$  leitakse valemiga [10]

$$M = Q_{Wc} \cdot H_{\text{maa}} + 0,5 \cdot Q_{Wpol} \cdot H_{\text{maa}}, \text{ N} \cdot \text{m}. \quad (3.4)$$

Puitposti vajalik läbimõõt peab vastama tugevustingimusele [10]

$$\sigma_r \cdot \sigma_p \leq f_{md}, \quad (3.5)$$

- kus  $f_{md}$  on posti arvutuslik paindekandevõime N/mm<sup>2</sup>;  
 $\sigma_r$  - paindepinge ristsuunalistest horisontaaljõududest N/mm<sup>2</sup>;  
 $\sigma_p$  - paindepinge vertikaaljõududest N/mm<sup>2</sup>.



Puitposti arvutuslik paindekandevõime on leitav valemiga [10]

$$f_{md} = \frac{f_{mk}}{y_{M1}}, \quad (3.6)$$

kus  $f_{mk}$  on posti normpaindetugevus (kreosoot immutusega postil  $f_{mk} = 41,8 \text{ N/mm}^2$  [8]);  
 $y_{M1}$  - puidu osavarutegur ( $y_{M1} = 1,50$ ).

Paindepinge ristsuunalistest horisontaaljõududest on leitav valemiga [10]

$$\sigma_r = \frac{M \cdot 10^3}{W}, \quad (3.7)$$

kus  $W$  on arvutatava lõike vastupanumoment  $\text{mm}^3$ .

Arvutatava lõike vastupanumoment on leitav valemiga [10]

$$W = 0,1 \cdot d_{maa}^3, \quad (3.8)$$

kus  $d_{maa}$  on masti läbimõõt maapinna või madalaima arvutatava osa lõikes mm.

Paindepinge vertikaaljõududest kandemastile on leitav valemiga [10]

$$\sigma_p = \frac{\omega \cdot Q_G}{A}, \quad (3.9)$$

kus  $\omega$  on murdumistegur tabelist 3.3 sõltuvalt saledustegurist  $\lambda$ ;

$Q_G$  - postmasti suunaline jõud, mis koosneb juhtmete, tarvikute, masti enese ja montööri kaalust (viimase puhul arvestada, et maksimaalsel tuulekiirusel masti otsa ei ronita) N;

$A$  - ekvivalentne postmasti ristlõikepindala  $\text{mm}^2$ .

Saledustegur  $\lambda$  on leitav valemiga [10]

$$\lambda = \frac{2 \cdot H_{maa} \cdot 10^{-3}}{i}, \quad (3.10)$$

kus  $i$  on inertsraadius mm.

**Tabel 3.3.** Standardsete puitpostide murdumistegur  $\omega$  sõltuvalt saledustegurist  $\lambda$  [10]

|           |      |      |      |      |      |      |      |      |                    |      |      |     |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|------|------|-----|------|------|------|
| $\lambda$ | 200  | 210  | 220  | 230  | 240  | 250  | 260  | 270  | 280                | 290  | 300  | 310 | 320  | 330  | 340  |
| $\omega$  | 18   | 19,5 | 21,2 | 22,8 | 24,6 | 26,5 | 28,4 | 30,4 | 32,4               | 34,6 | 36,8 | 39  | 41,4 | 43,8 | 46,4 |
| $\lambda$ | 350  | 360  | 370  | 380  | 390  | 400  | 410  | 420  | > 420              |      |      |     |      |      |      |
| $\omega$  | 48,9 | 51,6 | 54,4 | 57,2 | 60   | 63   | 68   | 73   | $\lambda^2 : 2400$ |      |      |     |      |      |      |

Inertsraadius  $i$  on leitav valemiga [10]

$$i = 0,25 \cdot d_e, \quad (3.11)$$

kus  $d_e$  on ekvivalentne läbimõõt mm.

Postmasti ekvivalentne ristlõikepindala on leitav valemiga [10]

$$A = \pi \cdot r_e^2, \quad (3.12)$$

kus  $r_e$  on ekvivalentne raadius mm.

Postmasti ekvivalentne raadius  $r_e$  on leitav valemiga [10]

$$r_e = 0,5 \cdot d_e, \text{ mm.} \quad (3.13)$$

Postmasti ekvivalentne läbimõõt  $d_e$  on leitav valemiga [10]

$$d_e = \frac{d_{\text{ül}} + 2 \cdot d_{\text{maa}}}{3}, \text{ mm.} \quad (3.14)$$

Postmasti vertikaalsuunalise jõu arvutamisel on arvestatud juhtme, jäite, traaversi ja posti enda kaaluga. Postmasti suunaline jõud on leitav valemiga [10]

$$Q_G = F_{juhe} \cdot F_{j\ddot{a}ide} \cdot F_{traavers} \cdot F_{post}, \quad (3.15)$$

kus  $F_{juhe}$  on juhtmete massist tekkiv vertikaalsuunaline jõud N;

$F_{j\ddot{a}ide}$  - piirj\ddot{a}itekoormusel juhtmetel esineva j\ddot{a}ite massist tekkiv vertikaalsuunaline jõud N;

$F_{traavers}$  - traaversi massist tekkiv vertikaalsuunaline jõud N;

$F_{post}$  - posti massist tekkiv vertikaalsuunaline jõud N.

Piirj\ddot{a}itekoormusest tekkiv vertikaalsuunaline jõud kordusperioodiga 50 a leitakse valemiga [10]

$$F_{j\ddot{a}ide} \approx 0,0277 \cdot b \cdot (d + b) \cdot \left(\frac{L_1 + L_2}{2}\right), \text{ N.} \quad (3.16)$$

Maa suhtes vertikaalsuunas avalduv raskuskiirendusest tekkiv jõud arvestades keha massi on leitav valemiga [20]

$$F \approx 9,81 \cdot m, \quad (3.17)$$

kus  $F$  vertikaalsuunas avalduv raskuskiirendusest tekkiv jõud arvestades keha massi N;  
 $m$  - vaadeldava keha mass kg.

Kandemasti tugevusarvutused on teostatud mastile M55.

### 3.5.3. Tõmmitsaga masti tugevusarvutused

Tõmmitsaga kindlustatud masti postidel peab tõmmitsa kinnituskohas peab olema täidetud tingimus [10]

$$\frac{T \cdot a}{0,95 \cdot W_1} + \frac{Q_s}{A_1} \leq f_{md}, \quad (3.18)$$

kus  $T$  on masti postile mõjuv liinisuunaline tõmme N;  
 $0,95$  - tegur, mis arvestab masti posti ristlõike nõrgenemist tõmmitsa kinnituspoldi kohal;  
 $a$  - tõmmitsa/toe kinnituskoha kaugus liinisuunalise jõu rakenduspunktist (tõmmitsal 0,3 m ja toel 0,5 m) m;  
 $W_1$  - vastupanumoment tõmmitsa kinnituskohas mm<sup>3</sup>;  
 $A_1$  - masti ristlõike pindala tõmmitsa kinnituskohas mm<sup>2</sup>;  
 $Q_s$  - masti postile mõjuv surve N;  
 $K$  - tõmmitsa kalle;

Lõpu- ja ankrumasti juhtmete tõmme on arvutatav taandatud visangu mõistes. Taandatud visang leitakse valemiga [10]

$$L_R = \sqrt{\frac{\sum L_n^3}{\sum L_n}}, \quad (3.19)$$

kus  $L_R$  on arvutuslik taandatud visangu pikkus m;  
 $L_n$  - ankrupiirkonna n-nda visangu pikkus m.

Mastile mõjuv liinisuunaline tõmme kolme juhtme poolt on leitav liinijuhtme mehaanilise pinge kaudu valemiga [4]

$$T = 3 \cdot \sigma_{juhe} \cdot S_{juhe}, \quad (3.20)$$

kus  $\sigma_{juhe}$  on liinijuhtme mehaaniline pinge N/mm<sup>2</sup>;  
 $S_{juhe}$  - juhtme ristlõige mm<sup>2</sup>.

Vastupanumoment tõmmitsa kinnituskohas on leitav valemiga [10]

$$W_1 = 0,1 \cdot d_1^3, \quad (3.21)$$

kus  $d_1$  on masti läbimõõt tõmmitsa kinnituskohas mm.

Masti ristlõike pindala tõmmitsa kinnituskohas on leitav valemiga [10]

$$A_1 = 0,25 \cdot \pi \cdot d_1^2, \text{ mm}^2. \quad (3.22)$$

Kui tõmmitsa kinnituskoha kõrgus erineb tõmbe rakenduspunkti kõrgusest, siis leitakse mastile mõjuv surve valemiga [10]

$$Q_s = Q_G + \frac{H_{maa}}{H_{maa} - a} \cdot K \cdot T, \quad (3.23)$$

kus  $H_{maa}$  on masti kõrgus maapinnast m.

Tõmmitsa kalle  $K$  on leitav valemiga [10]

$$K = \frac{S}{H_{maa}} = \frac{1}{\tan\beta}, \quad (3.24)$$

kus  $S$  on tõmmitsa ankurduspunkti kaugus mastist m;

$\beta$  - tõmmitsa (või toe) ja masti vaheline nurk. Kahe harali paigutatud tõmmitsa puhul arvestada kallet nende maapinnal asuvaid kinnituskohi ühendava sirge ja tõmbe  $T$  suuna lõikumispunkti ning tõmmitsate mastil asuva kinnituspunkti vahel °.

Tõmmitsaga mast peab samuti vastama tugevustingimusele 3.5 [10]. Tõmmitsate trossidest vertikaal- ja horisontaalsuunaliste mõjuvate jõududega mastile ei ole antud arvutustes arvestatud kuna need ei avalda arvutustulemustele suurt mõju.

Tõmmitsaga masti paindepinge arvutamisel vertikaalsuunalistest jõududest tuleb lisaks arvestada ka liinijuhtmete tõmbejõuga vertikaalsuunas  $T_{vert}$ , mis on leitav valemiga [4]

$$T_{vert} = T \cdot \tan(90^\circ - \beta), \text{ N}. \quad (3.25)$$

Paindepinge vertikaaljõududest tõmmitsaga mastile on leitav valemiga

$$\sigma_p = \frac{\omega \cdot (Q_G + T_{vert})}{A}, \text{N/mm}^2. \quad (3.26)$$

Tõmmitsa 25 mm<sup>2</sup> terastrossi tõmbetugevus on 17,5 kN [21]. Vajalik tõmmitsate arv tuleb arvutada vastavalt tõmmitsatrossile avalduvast liinisuunalisest tõmbejõust [10].

Tõmmitsale mõjuv tõmme  $T_t$  on leitav valemiga [10]

$$T_t = \frac{T}{\sin\beta}, \text{N}. \quad (3.27)$$

Tõmmitsast postile mõjuv paindemoment  $M_t$  on leitav valemiga [10]

$$M_t \approx 0,6 \cdot T \cdot a, \text{Nm}. \quad (3.28)$$

Tõmmitsaga masti postile ristsuunalistest horisontaaljõududest mõjuv paindepinge on leitav valemiga [10]

$$\sigma_r = \frac{(M + M_t) \cdot 10^3}{W}, \text{N/mm}^2. \quad (3.29)$$

Tõmmitsaga masti tugevusarvutused on teostatud lõpumastidele M49 ja M61.

#### 3.5.4. Toega nurgamasti tugevusarvutused

Nurgamastidele mõjuvate tuulejõudude arvutamisel tuleb arvestada liini suuna muutust, tuule suuna langemisnurka mastist paremal ja vasakul, lisaks ka külgnevate visangute pikkusi ja juhtmete paigutust [10]. Toega mast jaguneb põhipostiks ja tugipostiks.

Toega masti tuleb analoogselt tõmmitsaga mastile kontrollida tugevustingimusega 3.17. [10]



Nurgamasti toe suunas mõjuv resulteeriv tõmbejõud nimituulekoormusest liinijuhtmetele on leitav valemiga

$$Q_{Wc(T_r)} = Q_{Wc(T_1)} + Q_{Wc(T_2)}, N. \quad (3.32)$$

kus  $Q_{Wc(T_r)}$  on nurgamasti toe suunas mõjuv resulteeriv tõmbejõud N;  
 $Q_{Wc(T_1)}$  - külgneva visangu  $L_1$  tõmbejõud nurgposti suunas N;  
 $Q_{Wc(T_2)}$  - külgneva visangu  $L_2$  tõmbejõud nurgposti suunas N.

Nurgamastile külgnevate visangute juhtmetele nimituulekoormusest jäite olemasolul mõjuv tõmbejõud nurgaposti suunas on avaldatav valemist 3.1 ja tuleb arvestada mõlema visangu suhtes nurka  $\gamma$ .

$T_1$  tõmbejõuga külgneva visangu ja nurga suunas mõjuva resulteeriva tõmbejõu  $T_r$  vaheline nurk  $\gamma$  on leitav valemiga [4]

$$\gamma = \arccos\left(\frac{T_r^2 + T_1^2 - T_2^2}{2 \cdot T_r \cdot T_2}\right), \circ. \quad (3.33)$$

Liinilõigu  $L_1$  juhtmetele mõjuvast tuulejõust resulteeriva tõmbejõu  $T_r$  suunas on leitav valemiga

$$Q_{Wc(T_1)} = n \cdot 179,5 \cdot (d + 2b) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\gamma), N. \quad (3.34)$$

Liinilõigu  $L_2$  juhtmetele mõjuvast tuulejõust tekkiva tõmbejõu resulteeriva tõmbejõu  $T_r$  suunas on leitav valemiga

$$Q_{Wc(T_2)} = n \cdot 179,5 \cdot (d + 2b) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{L_2}{2} \cdot \sin(180 - \gamma - \alpha), N. \quad (3.35)$$

Juhtmetele mõjuva tuulejõu jõuvektor jaguneb toe- ja põhiposti vahel, mistõttu tuleb see jagada kaheks komponendiks  $Q_{Wc1}$  ja  $Q_{Wc2}$ . [22]

Põhipostile mõjuv tõmbejõud visangute juhtmetele mõjuvast nimituulekoormusest jäite olemasolul  $Q_{Wc1}$  on leitav valemiga

$$Q_{Wc1} = \frac{Q_{Wc(T_r)}}{2}, N. \quad (3.36)$$

Tugipostile mõjuv tõmbejõud visangute juhtmetele mõjuvast nimituulekoormusest jäite olemasolul  $Q_{Wc}$  on leitav valemiga

$$Q_{Wc2} = \frac{Q_{Wc(T_r)}}{2} \cdot \sin(90^\circ - \beta), \text{ N.} \quad (3.37)$$

Toega masti põhipostile ja toele nimituulekoormusest mõjuv tuulejõud vastavalt  $Q_{Wpol}$  ja  $Q_{Wtugi}$  analoogselt kandemastile valemiga 3.2.

Maapinna (või muus arvutatavas) lõikes masti toele ja põhipostile mõjuv paindemoment  $M$  leitakse analoogselt kandemastile valemiga 3.4.

Paindepinge vertikaaljõududest põhipostile on leitav valemiga 3.8, kuid tugipostile leitakse kasutades valemit

$$\sigma_p = \frac{\omega \cdot Q_s}{A}, \text{ N/mm}^2. \quad (3.38)$$

Kuna tugipost on põhipostist pikem, siis erineb tugipostil ka murdumistegur  $\omega$  ja ekvivalentne ristlõike pindala  $A$ .

Toega nurgamasti tugevusarvutused on teostatud nurgamastile M53.

### 3.5.5. Kandemast M55 tugevusarvutused

Mast M55 on pikimate visangutega kandmemast, mille visangu pikkused on  $L_1 = 131$  m ja  $L_2 = 134$  m. Koormusjuhtum kandemasti arvutamisel on nimituulekoormus + piirjäitekoormus. Kandemastiks M55 on valitud kreosoot immutusega klass 4 post pikkusega 11 meetrit. Masti M55 posti andmed on toodud tabelis 3.4.

**Tabel 3.4.** Kandemasti M55 klass 4 puitposti andmed [10, 23]

| Pikkus         | Ülemine läbimõõt     | Alumine läbimõõt     | Läbimõõt maapinnal    | Tihedus                | Posti mass      |
|----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------|
| $H, \text{ m}$ | $d_{ül}, \text{ mm}$ | $d_{al}, \text{ mm}$ | $d_{maa}, \text{ mm}$ | $\rho, \text{ kg/m}^3$ | $m, \text{ kg}$ |
| 11             | 190                  | 250                  | 246                   | 550                    | 230             |

Mastile külgnevate visangute juhtmete nimituulekoormusest jäite olemasolul mõjuv jõud on leitav valemiga 3.1

$$Q_{Wc} = 3 \cdot 641 \cdot 0,4 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot (18,2 + 2 \cdot 10) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{131 + 134}{2} = 2725,3 \text{ N.}$$



Postmasti projektsiooni pindala tuule suunaga risti olevale vertikaaltasapinnale arvutatakse valemiga 3.3

$$A_{pol} = 0,5 \cdot (190 \cdot 246) \cdot 10^{-3} \cdot 9 = 1,962 \text{ m}^2.$$

Liini suunaga risti olev tuulejõud puitpostmastile M55 on leitav valemiga 3.2

$$Q_{Wpol} = 641 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,962 \cdot 0,4 = 452,75 \text{ N}.$$

Mastile mõjuv paindemoment  $M$  arvutatakse valemiga 3.4

$$M = 2725,3 \cdot 9 + 0,5 \cdot 452,75 \cdot 9 = 26568 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Arvutatava lõike vastupanumoment on arvutatud valemiga 3.8

$$W = 0,1 \cdot 246^3 = 1488693,6 \text{ mm}^3.$$

Paindepinge ristsuunalistest horisontaaljõududest on arvutatud valemiga 3.7

$$\sigma_r = \frac{26568 \cdot 10^3}{1488693,6} = 17,85 \text{ N/mm}^2.$$

**Arvutuslik paindepinge ristsuunalistest horisontaaljõududest kandemastile M55 on  $\sigma_r = 17,85 \text{ N/mm}^2$ .** Tulemus on kantud tabelisse 3.6.

Postmasti ekvivalentne läbimõõt on arvutatud valemiga 3.14

$$d_e = \frac{190 + 2 \cdot 246}{3} = 227,3 \text{ mm}.$$

Inertsraadius  $i$  on arvutatud valemiga 3.11

$$i = 0,25 \cdot 227 = 56,83 \text{ mm}.$$

Murdumistegur  $\omega$  valitakse vastavalt saledustegurile tabelist 3.3.

Saledustegur  $\lambda$  on arvutatud valemiga 3.10

$$\lambda = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{56,83} = 316,72.$$

Vastavalt saledustegurile  $\lambda = 316,72$  on tabelist 3.3 valitud vastav murdumistegur  $\omega = 41,4$ .

Postmasti ekvivalentne raadius on arvatud valemiga 3.13

$$r_e = 0,5 \cdot 227 = 113,67 \text{ mm.}$$

Postmasti ekvivalentne ristlõikepindala on arvatav valemiga 3.12

$$A = \pi \cdot 113,67^2 = 40589,7 \text{ mm}^2.$$

Masti M55 vertikaalsuunas avalduvad jõud on arvatud valemitega 3.15, 3.16 ja 3.17 ning arvutustulemused on kantud tabelisse 3.5.

**Tabel 3.5.** Vertikaalsuunas avalduvad jõud

|                                 | Juhe, $F_{juhe}$ | Jäide, $F_{j\ddot{a}ide}$ | Traavers, $F_{traavers}$ | Post, $F_{post}$ | Kokku, $Q_G$ |
|---------------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|------------------|--------------|
| Vertikaalsuunas avalduv jõud, N | 1751             | 3105                      | 149                      | 2256             | 7261         |

Paindepinge vertikaaljõududest on arvatud valemiga 3.9

$$\sigma_p = \frac{41,4 \cdot 7261}{40589,7} = 7,41 \text{ N/mm}^2.$$

**Arvutuslik paindepinge vertikaaljõududest kandemastile M55 on  $\sigma_p = 7,41 \text{ N/mm}^2$ .**

Tulemus on kantud tabelisse 3.6.

**Tabel 3.6.** Kandemasti M55 tugevustingimus vastavalt valemile 3.5.

|                                    | $\sigma_r$ | $\sigma_p$ | $\sigma_r + \sigma_p \leq f_{md}$ |   |       |
|------------------------------------|------------|------------|-----------------------------------|---|-------|
| Kandemasti post, N/mm <sup>2</sup> | 17,85      | 7,41       | 25,26                             | ≤ | 27,87 |

Tabelis 3.6 on esitatud kandemasti M55 tugevustingimus. Kandemastiks valitud kreosoot immutusega pikkusega 11 meetrit klass 4 puitpost vastab tugevustingimusele 3.5.

### 3.5.6. Lõpumast M49 tugevusarvutused

Mast M49 on projekteeritud lõpumastiks.

Taandatud visang arvutatakse valemiga 3.19

$$L_R = \sqrt{\frac{80^3 + 99^3 + 99^3 + 99^3 + 127^3 + 131^3 + 134^3 + 128^3 + 132^3 + 119^3 + 120^3 + 119^3}{80 + 99 + 99 + 99 + 127 + 131 + 134 + 128 + 132 + 119 + 120 + 119}}$$
$$= \sqrt{\frac{19620913}{1387}} \approx 119 \text{ m.}$$

Lõpumastis M49 on taandatud visangu pikkus 119 m.

Elektrilevi OÜ võrgustandardis P339 20 kV õhuliinid lisas 1 esitatud kaetud juhtmete paigaldustabelite abil on võimalik leida vastavalt taandatud visangule vajalikud suurused juhtmetest mastile mõjuvate koormuste leidmiseks. Kaetud juhtmete paigaldustabelites on visangupikkuste samm 10 m. Paigaldustabelite andmed on kohandatud lineaarse interpoleerimise teel vastavaks M49 taandatud visangule tabelarvutusprogrammiga Excel ning kantud tabelisse 3.3. [10]

**Tabel 3.7.** Taandatud visangu pikkusele 119 m juhtme CCST ACSR 99-AL1/ST1A W interpoleeritud suurused koormusjuhtumil piirjätekoormus + nimituulekoormus.

|                                      |         |
|--------------------------------------|---------|
| Taandatud visang, m                  | 119     |
| Erikoormus, N/(mm <sup>2</sup> ·m)   | 0,1297  |
| Mehaaniline pinge, N/mm <sup>2</sup> | 97,435  |
| Ripe, m                              | 2,27353 |
| Vertikaalne koormus, N/m             | 12,38   |
| Horisontaalne koormus, N/m           | 8,86    |

Masti M49 postiks valiti kreosoot immutusega, pikkusega 11 meetrit ja klassist 5 puitpost. Klass 5 puitposti andmed on toodud tabelis 3.8.

**Tabel 3.8.** Pikkusega 11 meetrit klass 5 puitposti andmed [10, 23]

| Pikkus | Ülemine läbimõõt | Alumine läbimõõt | Läbimõõt maapinnal | Tihedus        | Posti mass |
|--------|------------------|------------------|--------------------|----------------|------------|
| $H, m$ | $d_{ül}, mm$     | $d_{al}, mm$     | $d_{maa}, mm$      | $\rho, kg/m^3$ | $m, kg$    |
| 11     | 210              | 270              | 266                | 550            | 278        |

Masti M49 tugielementideks on valitud tõmmitsad. Tõmmitsaga kindlustatud mastidel peab tõmmitsa kinnituskohas olema täidetud tugevustingimus 3.18.

Mastile mõjuv liinisuunaline tõmme kolme juhtme poolt on arvutatud liinijuhtme mehaanilise pinge kaudu valemiga 3.20

$$T = 3 \cdot 97,435 \cdot 99 = 28938 \text{ N.}$$

Vastupanumoment tõmmitsa kinnituskohas on arvutatud valemiga 3.21

$$W_1 = 0,1 \cdot 210^3 = 926100 \text{ mm}^3.$$

Posti läbimõõt tõmmitsa kinnituskohas on valitud posti tipu läbimõõt  $d_l = 210 \text{ mm}$ .

Masti ristlõike pindala tõmmitsa kinnituskohas on arvatav valemiga 3.22

$$A_1 = 0,25 \cdot \pi \cdot 210^2 = 34636 \text{ mm}^2.$$

Masti M49 vertikaalsuunas avalduvad jõud on arvutatud valemitega 3.15, 3.16 ja 3.17 ning arvutustuleused on kantud tabelisse 3.9.

**Tabel 3.9.** Vertikaalsuunas avalduvad jõud

|                                 | Juhe, $F_{juhe}$ | Jäide, $F_{jäide}$ | Traavers, $F_{traavers}$ | Post, $F_{post}$ | Kokku, $Q_G$ |
|---------------------------------|------------------|--------------------|--------------------------|------------------|--------------|
| Vertikaalsuunas avalduv jõud, N | 529              | 937                | 304                      | 2727             | 2727         |

Tõmmitsa kalle on arvutatud valemiga 3.24

$$K = \frac{9}{6} = 1,5.$$

Tõmmitsa ja posti vahelise nurga  $\beta$  avaldatakse valemist 3.24

$$K = \frac{1}{\tan\beta} \rightarrow \tan\beta = \frac{1}{K} \rightarrow \beta = \arctan\left(\frac{1}{1,5}\right) = 33,69^\circ.$$

Mastile mõjuv surve arvutatakse valemiga 3.23

$$Q_s = 2727 + \frac{9}{9 - 0,3} \cdot 1,5 \cdot 28938 = 49401 \text{ N.}$$

Masti M49 arvutatud tugevustingimus 3.18

$$\frac{28938 \cdot 0,3}{0,95 \cdot 926100} + \frac{49401}{34636} \leq 27,87 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 11,25 \leq 27,87 \text{ N/mm}^2.$$

**Masti M49 tõmmitsa kinnituskohas on täidetud tugevustingimus 3.18 ja arvutustulemus on kantud tabelisse 3.10.**

Masti M49 puitposti on vajalik kontrollida tugevustingimusega 3.5.

Liinjuhtme tõmbejõust vertikaalsuunas mõjuv jõud arvutatakse valemiga 3.25

$$T_{vert} = 28938 \cdot \tan(90^\circ - 33,69^\circ) = 43407 \text{ N.}$$

Pikkusega 11 m klass 5 puitposti ekvivalentne ristlõike pindala ja murdumistegur on arvutatud analoogselt kandemastile M55 tabelarvutusprogrammiga Excel ja väärtuseks saadi vastavalt  $A = 48046 \text{ mm}^2$  ja  $\omega = 34,6$ .

Paindepinge vertikaaljõududest on leitav valemiga 3.26

$$\sigma_p = \frac{34,6 \cdot (2727 + 43407)}{48046} = 34,50 \text{ N/mm}^2.$$

**Masti M49 paindepinge vertikaaljõududest on  $\sigma_p = 34,50 \text{ N/mm}^2$ . Tulemus on kantud tabelisse 3.10.**

Tõmmitsast mastile mõjuv paindemoment on arvutatud valemiga 3.28

$$M_t \approx 0,6 \cdot 28938 \cdot 0,3 = 5209 \text{ Nm.}$$

Paindemoment ristsuunalistest horisontaaljõududest  $M$  ja vastupanumoment  $W$  on arvatud analoogselt kandemastile M55 tabelarvutusprogrammiga Excel ja väärtuseks on vastavalt  $M = 9748 \text{ Nm}$  ja  $W = 1882110 \text{ mm}^3$ .

Tõmmitsaga masti postile ristsuunalistest horisontaaljõududest mõjuv paindepinge on arvatud valemiga 3.29

$$\sigma_r = \frac{(9748 + 5209) \cdot 10^3}{1882110} = 7,95 \text{ N/mm}^2.$$

Masti M49 paingepinge ristsuunalistest horisontaaljõududest on  $\sigma_r = 7,95 \text{ N/mm}^2$ . Tulemus on kantud tabelisse 3.9.

**Tabel 3.10.** Lõpumast M49 tugevustingimused

|   | $\sigma_r$ | $\sigma_p$ | $\sigma_r + \sigma_p \leq f_{md}$ |   |       |
|---|------------|------------|-----------------------------------|---|-------|
| Lõpumasti posti tugevustingimus tõmmitsa kinnituskohas, N/mm <sup>2</sup> | 9,87       | 1,38       | 11,25                             | ≤ | 27,87 |
| Tõmmitsaga lõpumasti post, N/mm <sup>2</sup>                              | 7,95       | 34,50      | 42,45                             | ≤ | 27,87 |

Tabelis 3.10 esitatud tugevustingimustest selgub, et ühest valitud postist ei piisa lõpumastile mõjuva paingepinge tagamiseks. Tuleb lisada teine post ja projekteerida kahest postist koosnev portaalmast. Kahe posti normpaindetugevus traaversi jäiga kinnituse korral on  $f_{md} = 55,74 \text{ N/mm}^2$ , mis täidab tugevustingimuse. Lõpumast M49 joonis on toodud lisas C lehel 2.

Tõmmitsale mõjuv tõmme on arvatud valemiga 3.27

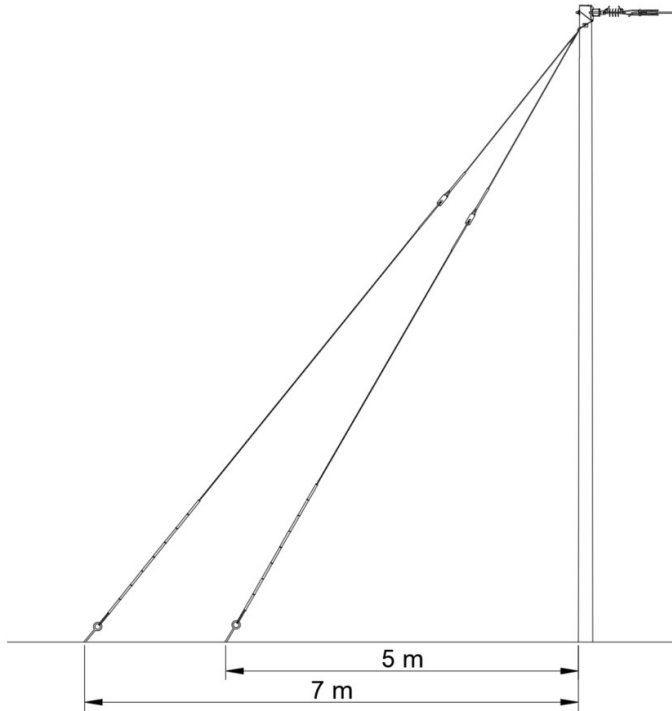
$$T_t = \frac{28938}{\sin(33,69^\circ)} = 52169 \text{ N}.$$

Kuna ühe 25 mm<sup>2</sup> tõmmitsatrossi tõmbetugevus on 17,5 kN avaldub vajalik tõmmitsate arv

$$\frac{T_t}{17500 \text{ N}} = \frac{52169}{17500 \text{ N}} = 2,98 \approx 3.$$

Jäiga kinnituse korral pinnasesse on vajalik tõmmitsate arv masti kindlustamiseks 3. Kuna projekteeritud mast on kahest postist koosnev portaalmast, siis on vajalik mõlemad postid sümmeetriliselt kindlustada tõmmitsatega, et tagada ühtlane tõmbejõud. Sellleks on projekteeritud mastil kokku 4 tõmmitsat, millest mõlemalt postile paigaldatakse 2.

Tõmmitsa paar on projekteeritud samasse kinnituskohta ühel mastil ja üksteise alla üks tõmmitsa ankur 5 meetri ja teine 7 meetri kaugusele masti postist. Tõmmitsate paigutus on kirjeldatud joonisel 3.8.



**Joonis 3.8.** Tõmmitsate paiknemist kirjeldav joonis.

Et tagada jäik kinnitus pinnases tuleb kaevik täita kruusa ja kividega ning tihendada. Nõrga pinnase puhul tuleb kasutada kvaliteetset tagasitäidet või betooni [8].

### **3.5.7. Nurgamast M53 tugevusarvutused**

Mast nr 53 on projekteeritud nurgamastiks. Tõmbe arvutamiseks juhtmes lähtutakse Elektrilevi OÜ võrgustandardis P339 20 kV õhuliinid lisas 1 esitatud kaetud juhtmete paigaldustabelites esitatud suurustest.

**Tabel 3.11.** Visangu pikkustele 99 m ja 127 m juhtme CCST ACSR 99-AL1/ST1A W interpoleeritud suurused koormusjuhtumil piirjätekoormus + nimituulekoormus

|                                    |         |        |
|------------------------------------|---------|--------|
| Visang                             | $L_1$   | $L_2$  |
| Visangu pikkus, m                  | 99      | 127    |
| Erikoormus, N/(mm <sup>2</sup> ·m) | 0,1297  | 0,1297 |
| Pinge, N/mm <sup>2</sup>           | 97,435  | 99,168 |
| Ripe, m                            | 2,27353 | 2,545  |
| Vertikaalne koormus, N/m           | 12,38   | 12,38  |
| Horizontaalne koormus, N/m         | 8,86    | 8,86   |

Mõlema visangu liinisuunalised tõmbejõud on arvatatud tabelarvutusprogrammiga Excel kasutades valemit 3.20 ja väärtusteks saadi  $T_1=27472$  N ja  $T_2=29453$  N. Liini suunamuutuseks on nurgamastis M53  $\alpha = 31^\circ$ .

Nurgamasti resulteeriv nurga suunaline tõmbejõud  $T_r$  on arvatatud valemiga 3.30

$$T_r = \sqrt{27472^2 + 29453^2 - 2 \cdot 27472 \text{ N} \cdot 29453 \cdot \cos(31^\circ)} = 15332 \text{ N.}$$

Nurgamasti põhipostiks on valitud pikkusega 11 meetrit klass 5 puitpost, mille andmed on kirjeldatud tabelis 3.8. Nurgamasti tugipost on klassist 5 pikkusega 13 meetrit. Tugiposti andmed on kirjeldatud tabelist 3.12.

**Tabel 3.12.** Pikkusega 13 meetrit klass 5 puitposti andmed [10, 23]

| Pikkus  | Ülemine läbimõõt | Alumine läbimõõt | Läbimõõt maapinnal | Tihedus                    | Posti mass | Vertikaalsuunas avalduv jõud |
|---------|------------------|------------------|--------------------|----------------------------|------------|------------------------------|
| $H$ , m | $d_{ül}$ , mm    | $d_{al}$ , mm    | $d_{maa}$ , mm     | $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> | $m$ , kg   | $F_{tugipost}$ , N           |
| 13      | 210              | 290              | 286                | 550                        | 360        | 3531                         |

Toe ankrupositsiooni kaugus maapinnal on põhipostist  $b=6$  meetrit ja kinnituspunkti kaugus mõjuva tõmbejõu asukohast on  $a=0,5$  m. Toe ja põhiposti vaheline nurk on leitud valemiga 3.24 kasutades tabearvutusprogrammi Excel ja tulemuseks saadi  $\beta = 35,22^\circ$ .

Toele mõjuv surve on arvatatud valemiga 3.31

$$Q_s = 3531 \cdot \sin(35,22^\circ) + \frac{9}{9 - 0,5} \cdot \frac{15332}{\sin(35,22^\circ)} = 30187 \text{ N.}$$



Toega masti M53 on kontrollitud analoogselt tõmmitsaga mastile M49 tugevustingimusega 3.18 ja arvutused teostatud tabelarvutusprogrammis Excel ning kantud tabelisse 3.13.

Tugipostiga toetatud mastidel peab tugi vastama masti tugevustingimusele 3.5. Tugiposti posti vastupanumoment on arvatud kasutades valemit 3.8 tabelarvutusprogrammiga Excel ja väärtuseks saadi  $W = 2339366 \text{ mm}^2$ .

Paindepinge ristsuunalistest horisontaaljõududest arvutatakse eraldi põhipostile ja tugipostile kasutades valemit 3.7.

$T_1$  tõmbejõuga külgneva visangu ja nurga suunas mõjuva resulteeriva tõmbejõu  $T_r$  vaheline nurk  $\gamma$  on arvatud valemiga 3.33.

$$\gamma = \arccos\left(\frac{15332^2 + 27472^2 - 29453^2}{2 \cdot 27472 \cdot 29453}\right) = 81,65^\circ.$$

Liinilõigu  $L_1$  juhtmete mõjuvast tuulejõust resulteeriva tõmbejõu  $T_r$  suunas on arvatud valemiga 3.34

$$Q_{Wc(T_1)} = 3 \cdot 179,5 \cdot (18,2 + 2 \cdot 10) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{99}{2} \cdot \sin(81,65^\circ) = 1023 \text{ N}.$$

Liinilõigu  $L_2$  juhtmete mõjuvast tuulejõust resulteeriva tõmbejõu  $T_r$  suunas on arvatud valemiga 3.35

$$Q_{Wc(T_1)} = 3 \cdot 179,5 \cdot (18,2 + 2 \cdot 10) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{127}{2} \cdot \sin(180^\circ - 81,65^\circ - 31^\circ) = 1224 \text{ N}.$$

Nurgamasti toe suunas mõjuv resulteeriv tõmbejõud nimituulekoormusest liinijuhtmete on arvatud valemiga 3.32

$$Q_{Wc(T_r)} = 1023 + 1224 = 2247 \text{ N}.$$

Nurgamasti põhipostile mõjuv ristsuunaline tõmbejõud nimituulekoormusest on sama lõpumasti postiga M49  $Q_{Wpol} = 494 \text{ N}$ . Nurgamasti tugipostile mõjuv ristsuunaline tõmbejõud nimituulekoormusest on arvatud analoogselt lõpumasti postiga M49 ja arvutustulemuseks saadi  $Q_{Wtugi} = 486 \text{ N}$ .

Põhipostile mõjuv tõmbejõud visangute juhtmete mõjuvast nimituulekoormusest jäite olemasolul  $Q_{Wc1}$  on arvatud valemiga 3.36

$$Q_{wc1} = \frac{2247}{2} = 1123,5 \text{ N.}$$

Tugipostile mõjuv tõmbejõud visangute juhtmetele mõjuvast nimituulekoormusest jäite olemasolul  $Q_{wc2}$  on leitav valemiga 3.37

$$Q_{wc2} = \frac{2247}{2} \cdot \sin(90^\circ - 35,2^\circ) = 918,14 \text{ N.}$$

Maapinna lõikes põhipostile mõjuv paindemoment  $M$  on arvatud kasutades valemit 3.4

$$M_{post} = 1123,5 \cdot 9 + 0,5 \cdot 494 \cdot 9 = 12339 \text{ N} \cdot \text{m.}$$

Maapinna lõikes tugipostile mõjuv paindemoment  $M$  on arvatud kasutades valemit 3.4

$$M_{tugi} = 918,14 \cdot 10,4 + 0,5 \cdot 486 \cdot 10,4 = 12083 \text{ N} \cdot \text{m.}$$

Masti tugipostist põhipostile mõjuv surve on arvatud valemiga 3.28 ja väärtuseks saadi  $M_t = 4599,5 \text{ N} \cdot \text{m.}$

Põhiposti ja tugiposti paindepinge rist-suunalistest horisontaaljõududest on arvatud kasutades valemeid vastavalt 3.7 ja 3.29 kasutades tabelarvutusprogrammi Excel ja väärtusteks saadi vastavalt  $\sigma_{r(post)} = 9,00 \text{ N/mm}^2$  ja  $\sigma_{r(tugi)} = 5,17 \text{ N/mm}^2$ . Arvutustulemused on kantud tabelisse 3.13.

Toest nurgamasti postile mõjuv paindepinge vertikaaljõududest on arvatud kasutades valemit 3.9 tabelarvutusprogrammiga Excel ja väärtuseks saadi  $\sigma_{p(post)} = 8,51 \text{ N/mm}^2$  ning kantud tabelisse 3.12.

Tugiposti murdumistegur ja ekvivalentne ristlõike pindala on arvatud tabelarvutusprogrammiga Excel analoogselt kandemastile ja väärtusteks saadi vastavalt  $\omega = 41,4$  ja  $A = 53366 \text{ mm}^2$ .

Paindepinge vertikaaljõududest on arvatud tugipostile kasutades valemit 3.9

$$\sigma_{p(tugi)} = \frac{41,4 \cdot 30187}{53365} = 23,42 \text{ N/mm}^2.$$

**Tabel 3.13.** Nurgamast M53 tugevustingimused

|   | $\sigma_r$ | $\sigma_p$ | $\sigma_r + \sigma_p \leq f_{md}$ |   |       |
|---|------------|------------|-----------------------------------|---|-------|
| Nurgamasti posti tugevustingimus toe kinnituskohas, N/mm <sup>2</sup> | 8,71       | 0,87       | 9,59                              | ≤ | 27,87 |
| Toega nurgamasti post, N/mm <sup>2</sup>                              | 9,00       | 8,51       | 17,51                             | ≤ | 27,87 |
| Toega nurgamasti tugi, N/mm <sup>2</sup>                              | 5,17       | 23,42      | 28,57                             | ≤ | 27,87 |

Tabelist 3.13 selgub, et projekteeritud toega nurgamasti tugipost ei vasta tugevustingimusele 3.5. Töö autor jääb seisukohale, et projekteeritud masti ei ole vaja muuta kuna arvutused on teostatud raskematele tingimustele, kui sätestab hetkel kehtiv juhend. Arvutused on teostatud suurima tuulesurvega juhtmele baaskõrgusel 10 meetrit  $q_p = 641 \text{ N/m}^2$ . Vastavalt uuele täpsustavale Elektrilevi OÜ juhendile „20 kV õhuliinide täpsustavad nõuded projekteerimiseks“, mis hakkas kehtima peale projekti esitamist, on nõutud kasutada arvutustes suurimat tuulesurvet Eesti tingimustes  $q_p = 500 \text{ N/m}^2$ . Lisaks on vastavalt uuendatud juhendile puidu osavaruteguriks 1,4 varasema 1,5 asemel. Seega uue juhendi kohaselt on puitposti paindekandevõime 29,8 N/mm<sup>2</sup>.

Antud toega nurgamast projekteeriti tugevustingimusele mittevastav kuna esialgsete arvutuste puhul projekteerimise ajal ei arvestatud tugiposti erinevatest parameetritest põhipostist. Tugipost on valitud 13 meetri pikkune, et saavutada soovituslik paigaldussügavus vähemalt 2 meetrit. 12 meetrine tugi seda ei taganud. Tugipost on pikem ja kaalub rohkem, mis muudab ka murdumusiteguri suuremaks. Tugipostide projekteerimisel on soovitatav jälgida, et tugipost ei läheks liiga pikaks.

### 3.5.8. Nurga-ankrumast M61 tugevusarvutused

Mast M61 on projekteeritud nurga-ankrumasiks. Suunal mast M49 on taandatud visang ankrumasti arvutuse teostamisel M49 masti arvutusega sama ja saab kasutada tabelis 3.3 esitatud interpoleeritud suurusi. Arvutuslikult erineb M61 ankrumast suunal M49 ankrumisangu poolest, mis on 119 m. Arvustulemused on toodud tabelis 3.14.

**Tabel 3.14.** Nurga-anrkumasti M61 ankrumasti arvatud tugevustingimused suunal mast M49.

|   | $\sigma_r$ | $\sigma_p$ | $\sigma_r + \sigma_p \leq f_{md}$ |        |       |
|---|------------|------------|-----------------------------------|--------|-------|
| Ankrumasti posti tugevustingimus tõmmitsa kinnituskohas | 9,87       | 1,40       | 11,26                             | $\leq$ | 27,87 |
| Tõmmitsaga ankrumasti post                              | 9,90       | 35,0       | 44,90                             | $\leq$ | 27,87 |

Tabelis 3.14 esitatud arvutustulemustest selgub, et sarnaselt lõpumastiga M49 on vajalik kasutada rohkem, kui ühte posti ankrumasti kindlustamiseks. Suunal M156 on projekteeritud ankrumasti tugevusarvutustel on lähtunud samuti juhtmest CCST ACSR 99-AL1/ST1A W kuna perspektiivis asendatakse olemasolev AS-50 õhuliini juhe ka kaetud juhtmega.

Kuna masti M61 puhul on tegu nurga-ankrumastiga on projekteeritud kolmest mastist koosnev portaalmast, mis on kindlustatud tõmmitsatega suunal M49, M156 ja masti nurk. Projekteeritud mastiga analoogne mast looduses on kujutatud joonisel 3.9.



**Joonis 3.9.** Kolmest postist koosnev mast.

Joonisel 3.9 kujutatud mastil on erinevalt mastist M61 liini hargnemine. Kolmese portaalmasti põhimõte on analoogne ja samuti on mastil juhtme üleminek BLL kaetud juhtmelt paljasjuhtmele.

## KOKKUVÕTE

Magistritöös on kirjeldatud ja analüüsitud Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise elektriprojekti, projekteerimise protsessi ja projekteerimise käigus tekkinud probleemide lahendamist. Kalli-Lõpe 10 kV fiidri rekonstrueerimise projekti raames projekteeriti 3,5 km paljasjuhtmega õhuliini demonteerimist, 1,389 km paljasjuhtmega õhuliini asendamist kaetud juhtmega õhuliiniga, 4,266 km maakaabelliini paigaldust ja keskpinge harukapp. Lisaks projekteeriti maaomaniku soovil keskpinge õhuliini ümberehitus, millega kaasnes paljasjuhtmega õhuliini trassi projekteerimist 0,072 km ja kaetud juhtmega õhuliini demonteerimist 0,047 km. Õhuliini üleminekuid maakaablisse oli lähteülesandes ette nähtud kolm, seega projekteeriti kolmele mastile liigpingepiirikud.

Maakaabli trassi projekteerimisel riigitee 19205 Tammaru-Mihkli tee servas andis Maanteeamet nõusoleku ainult kinnisel meetodil kaabli paigaldusele. Ehituse maksumuse vähendamise eesmärgil saavutati erakinnistu omanikega kokkuleppe maakaabli paigalduseks lahtisel kaevel ligikaudu 1,4 km ulatuses 2,7 km pikkusest trassist.

Lähteülesande lahendust muudeti Lossipõllu kinnistul mast M38 projekteerimisel ja kaetud juhtmega õhuliini asendamisel mastini M156. Lossipõllu kinnistul projekteeriti olemasoleva õhuliini ümberehitus, mille raames tõstetakse õhuliini mastid haritavalt põllumaalt võimalikult kinnistu piiri äärde. Kaetud õhuliini asendamisel mastini M156 oleks pidanud projekteerima antud masti ankrumastiks. Kuna mastile M156 eelnev mast oli nurgamast M61, oleks pidanud kahele järjestikusele mastile paigaldama ebaotstarbekalt palju tugielemente. Mast M61 projekteeriti nurga-ankrumastiks ja paljasjuhtme asendamist kaetud juhtmega vähendati ühe mastivahe võrra.

Tugevusarvutused teostati lõpumastile M49, nurgamastile M53, kandemastile M55 ja nurga-ankrumastile M61. Lõpumast M49 projekteeriti kahest postist koosnev protaalmast, mille kindlustamiseks on vajalik paigaldada 4 tõmmitsat. Nurgamasti M53 tugevustingimuse arvutustulemustes ei vastanud nurgamasti tugi puitposti paindekandevõimele. Töö autor jäi seisukohale, et projekteeritud masti ei ole vaja muuta kuna vastavalt uuendatud juhendile on tugipost tugevustingimusele vastav. Kandemastiks M55 projekteeritud kreosoot immutusega pikkusega 11 meetrit klass 4 puitpost oli arvutuslikule tugevustingimusele vastav. Nurga-ankrumasti tugevustingimuse arvutustulemuste põhjal projekteeriti suunal mast M49 analoogne ankrumast nagu

lõpumast M49. Kuna masti M61 puhul on tegu nurga-ankrumastiga on projekteeritud kolmest mastist koosnev portaalmast, mis on kindlustatud tõmmitsatega suunal M49, M156 ja masti nurk.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Elektrilevi OÜ. (2021). Kolmveerand Elektrilevi võrgust on peatselt ilmastikukindel. [www] <https://www.elektrilevi.ee/et/avaleht/-/news/2021/03/31/kolmveerand-elektrilevi-vorgust-on-peatselt-ilmastikukindel> (10.05.2021).
2. Elektrilevi OÜ. (s.a). 2021. aasta investeeringud. [www] <https://www.elektrilevi.ee/et/ettevotest/elektrilevi-tutvustus?modal=investeeringud-maakonni> (10.05.2021).
3. Uurimustöö LEP18003 lõpparuanne. (2018). Jaotusvõrgu tasakaalustatud varustuskindluse tase ühiskondliku kogutoodangu alusel. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. [www] <https://www.elektrilevi.ee/et/ettevotest/elektrilevi-tutvustus?modal=uuringud-analysid> (10.05.2021).
4. **Gönen, T.** (2009). Electric power transmission system engineering: analysis and design. CRC Press.
5. **Meldorf, M., Tammoja, H., Treufeldt, Ü., ja Kilter, J.** (2007). Jaotusvõrgud. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.
6. **Teemets, R.** (2010). Keskpinge võrkude ehitus. [www] [http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV3340/EIVar\\_3\\_Keskpingevorgud.3.2\\_KPV\\_ehitus.Konspekt.2010kevad.pdf](http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV3340/EIVar_3_Keskpingevorgud.3.2_KPV_ehitus.Konspekt.2010kevad.pdf) (10.05.2021).
7. Lepingu nr Lep14071 lõpparuanne. (2014). Elektrilevi OÜ hajavarustuskindluse piirkondade võrguinvesteeringute eesmärgid, realiseerimise meetodid ja nende valikukriteeriumid. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. [www] <https://www.elektrilevi.ee/et/ettevotest/elektrilevi-tutvustus?modal=uuringud-analysid> (10.05.2021).
8. J3301 20 kV õhuliinide täpsustavad nõuded projekteerimiseks. (kehvtiv alates 23.02.2021). - *Enefit Connect OÜ*. [www] [https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/0e048eeb56ee5e29c2257a69002ff64e/\\$FILE/J3301%2020%20kV%20%C3%B5huliinide%20t%C3%A4psustavad%20n%C3%B5uded%20projekteerimiseks.%20ver.2.pdf](https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/0e048eeb56ee5e29c2257a69002ff64e/$FILE/J3301%2020%20kV%20%C3%B5huliinide%20t%C3%A4psustavad%20n%C3%B5uded%20projekteerimiseks.%20ver.2.pdf) (10.05.2021).
9. J3301 lisa 1. Kaetud juhtmete arvutuste lähteandmed ja erijuhtumite arvutusmetoodika seletuskiri. - *Elektrilevi OÜ*. [www] [https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/0e048eeb56ee5e29c2257a69002ff64e/\\$FILE/J3301%20lisa%201.%20Kaetud%20juhtmete%20arvutuste%20l%C3%A4hteandmed%20ja%20erijuhtumite%20arvutusmetoodika%20seletuskiri.pdf](https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/0e048eeb56ee5e29c2257a69002ff64e/$FILE/J3301%20lisa%201.%20Kaetud%20juhtmete%20arvutuste%20l%C3%A4hteandmed%20ja%20erijuhtumite%20arvutusmetoodika%20seletuskiri.pdf) (10.05.2021).
10. P339 0,4 - 20 kV võrgustandard - 20 kV õhuliinid. (kehvtiv alates 16.12.2016). - *Elektrilevi OÜ* [www]



- [https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/0e048eeb56ee5e29c2257a69002ff64e/\\$FILE/P339%200,4-20%20kV%20v%C3%B5rgustandard\\_20%20kV%20%C3%B5huliinid.%20ver.3.pdf](https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/0e048eeb56ee5e29c2257a69002ff64e/$FILE/P339%200,4-20%20kV%20v%C3%B5rgustandard_20%20kV%20%C3%B5huliinid.%20ver.3.pdf)  
(10.05.2021).
11. P338 0,4 - 20 kV võrgustandard - 20 kV kaabelliinid. (kehtiv alates 23.02.2021). – *Elektrilevi OÜ* [www]  
[https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/c4e9c373b527be26c2257b0a00476b06/\\$FILE/P338%200,4-20%20kV%20v%C3%B5rgustandard\\_20%20kV%20kaabelliinid.%20ver.5.pdf](https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/c4e9c373b527be26c2257b0a00476b06/$FILE/P338%200,4-20%20kV%20v%C3%B5rgustandard_20%20kV%20kaabelliinid.%20ver.5.pdf) (10.05.2021).
12. Pipelife Eesti AS. (s.a). Hooneväline kaablikaitse. [www]  
<https://www.pipelife.ee/Infra/Hoonevalinekaablikaitse.html> (10.05.2021).
13. J343 Juhend keskpinge võrgus lülitus- ja kaitseseadmete valikuks ning haruliinide ühendamiseks tüviliinidega. (kehtiv alates 17.03.2017). – *Elektrilevi OÜ*. [www]  
[https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/82019cab6044edaec22577bc001c2304/\\$FILE/J343%20Juhend%20keskpinge%C3%B5rgus%20l%C3%BClitus-%20ja%20kaitseseadmete%20valikuks%20ning%20haruliinide%20%C3%BChendamiseks%20t%C3%BCviliinidega.%20ver.4.pdf](https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/82019cab6044edaec22577bc001c2304/$FILE/J343%20Juhend%20keskpinge%C3%B5rgus%20l%C3%BClitus-%20ja%20kaitseseadmete%20valikuks%20ning%20haruliinide%20%C3%BChendamiseks%20t%C3%BCviliinidega.%20ver.4.pdf) (10.05.2021).
14. Elektrilevi OÜ heakskiidetud KP harukapid. (sisestamise kuupäev 19.12.2017). – *Elektrilevi OÜ*. [www]  
<https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/677ff6659e7b018ec2257e190041c2bd?OpenDocument> (10.05.2021).
15. ABB AB Kabeldon. (2011). Product selection guide: Kabeldon cable cabinet, 12–36 kV. [www] [https://library.e.abb.com/public/5a4f4eec061cc9dfc1257b130057be6d/HDC-A\\_630\\_brochure\\_Eng\\_2011-02-25.pdf](https://library.e.abb.com/public/5a4f4eec061cc9dfc1257b130057be6d/HDC-A_630_brochure_Eng_2011-02-25.pdf) (10.05.2021).
16. Piperon OÜ. (viimati uuendatud 29.03.2021). Keskpinge kaablijaotuskapp SMK 1250. [www]  
<http://www.piperon.com/et/kataloogid/nexans-power-accessories> (10.05.2021).
17. P393 Nõuded keskpinge mastlülituspunktide, keskpinge kaablivõrgu harukilpide, lõpumuhvide, alajaamade ja madalpingevõrgu maanduspaigaldiste ehituseks. (kehtiv alates 21.04.2016). – *Elektrilevi OÜ*. [www]  
[https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/026bc788e165f2b3c22572cf004a9b7c/\\$FILE/P393%20N%C3%B5uded%20keskpinge%20mastl%C3%BClituspunktide,%20keskpinge%20kaabliv%C3%B5rgu%20harukilpide,%20l%C3%B5pumuhvide,%20alajaamade%20ja%20madalpinge%20v%C3%B5rgu%20maanduspaigaldiste%20ehituseks.%20ver.4.pdf](https://www8.energia.ee/public/ee043.nsf/b5c70e1888b8a801c2256e4e002ca8dc/026bc788e165f2b3c22572cf004a9b7c/$FILE/P393%20N%C3%B5uded%20keskpinge%20mastl%C3%BClituspunktide,%20keskpinge%20kaabliv%C3%B5rgu%20harukilpide,%20l%C3%B5pumuhvide,%20alajaamade%20ja%20madalpinge%20v%C3%B5rgu%20maanduspaigaldiste%20ehituseks.%20ver.4.pdf) (10.05.2021).
18. **Simson, K.** (2020). Millega tegeleb Transpordiamet?. [www]  
<https://transpordiamet.ee/uudised/millega-tegeleb-transpordiamet> (10.05.2021).

19. Nõuded tehnovõrkude ja -rajatiste teemaale kavandamisel. – *Maanteeamet*. [www] [https://www.mnt.ee/sites/default/files/content-editors/Failid/Juhendid/projekteerimine/nouded\\_tehnovorkude\\_teemaale\\_kavandamisel\\_0.pdf](https://www.mnt.ee/sites/default/files/content-editors/Failid/Juhendid/projekteerimine/nouded_tehnovorkude_teemaale_kavandamisel_0.pdf) (10.05.2021).
20. Engineering ToolBox. (2005). Force. [www] [https://www.engineeringtoolbox.com/force-d\\_990.html](https://www.engineeringtoolbox.com/force-d_990.html) (10.05.2021).
21. Ensto. (s.a). Tõmmitsa komplekt SHS25K.150L. [www] <https://www.ensto.com/et/electricity-distribution-networks/tooted/ohuliinide-tarvikud/madalpinge-ohuliinide-tarvikud/ensto-tarvikud-madalpinge-ohuliinidele/tommitsatarvikud/shs25k.150l> (10.05.2021).
22. Engineering ToolBox. (2008). Vector Addition. [www] [https://www.engineeringtoolbox.com/vector-addition-d\\_320.html](https://www.engineeringtoolbox.com/vector-addition-d_320.html) (10.05.2021).
23. **Meier, E.** (s.a). The wood database: scots pine. [www] <https://www.wood-database.com/scots-pine/> (10.05.2021).

**LISAD**

**Lisa A. Asendiplaan**

## **Lisa B. Keskipiinge normaalskeem**

## **Lisa C. Kibura HL M38 seadmete paigutusjoonis**

## **Lisa D. Kibura HL M49 seadmete paigutusjoonis**

## **Lisa E. Metsavahi HL M12A seadmete paigutusjoonis**



**Lisa F. Ristmeväli RV-1**

**Lisa G. Ristmeväli RV-2**

**Lisa H. Ristmeväli RV-3**

## Lisa I. Lihtlitsents

Mina, \_\_\_\_\_ Tõnu Heinmets \_\_\_\_\_,  
(*autori nimi*)

sünniaeg 10.07.1991,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

\_\_\_\_\_ Kalli-Lõpe 10 kv fiidri rekonstrueerimine \_\_\_\_\_,  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on professor Andres Annuk ja Karl Martin Põldsam \_\_\_\_\_,  
(*juhendaja(te) nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

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

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

Lõputöö autor Tõnu Heinmets /allkirjastatud digitaalselt/ \_\_\_\_\_  
(*allkiri*)

Tartu, \_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)

---

### Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

professor Andres Annuk /allkirjastatud digitaalselt/ \_\_\_\_\_  
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

Karl Martin Põldsam /allkirjastatud digitaalselt/ \_\_\_\_\_  
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)