



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

**Õhuliinidele langenud puudest põhjustatud lühisvoolud,  
lühisvooludest tingitud ohud ja ohtude vähendamise võimaluste  
analüüs Elering AS 110 kV elektrivõrgus**

Lepingu nr Lep13034 lõpparuanne

Lepingu vastutav täitja: */allkirjastatud digitaalselt/*  
Paul Taklaja

Tallinn 2013

TEADUSTÖÖ LEPING nr Lep13034

**Õhuliinidele langenud puudest põhjustatud lühisvoolud, lühisvooludest tingitud ohud ja ohtude vähendamise võimaluste analüüs Elering AS 110 kV elektrivõrgus**

Lepingu tellija: Elering AS  
Registrikood: 11022625  
KMRN: EE100889639  
Aadress: Kadaka tee 64, 12915 Tallinn

Lepingu täitja: Tallinna Tehnikaülikool  
Registrikood: 74000323  
KMRN: EE100224841  
Aadress: Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

Lepingu algus: 01. veebruar 2013  
Lepingu lõpp: 30. september 2013

Lepingu vastutav täitja: Paul Taklaja, assistent  
Lepingu põhitäitja: Petri Hyvönen, professor  
Lepingu põhitäitja: Jaan Niitsoo, assistent  
Lepingu põhitäitja: Karl Bussov, magistrant  
Lepingu põhitäitja: Ivar Kiitam, laborant

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Uurimistöö eesmärk</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Eesti ülekande- ja transiitelektrivõrk</b> .....	<b>7</b>
<b>3. Õhuliini põhielemendid ja -parameetrid</b> .....	<b>9</b>
<b>4. Õhuliini kaitsevöönd</b> .....	<b>11</b>
<b>5. Puu ehituse iseloomustus</b> .....	<b>12</b>
5.1. Puu struktuur.....	12
5.1.1. Puukoor.....	12
5.1.2. Malts- ja lülipuit.....	13
5.1.3. Säsi.....	13
5.1.4. Harilik haab.....	14
5.1.5. Hall lepp.....	14
5.1.6. Arukask.....	15
5.1.7. Harilik kuusk.....	15
5.2. Puu niiskus.....	15
<b>6. Puu elektrilised omadused</b> .....	<b>18</b>
6.1. Puu dielektriline läbitavus.....	18
6.2. Puu takistust mõjutavad tegurid.....	19
6.3. Puu takistused .....	22
9.3.1. Takistuste analüüs.....	22
9.3.2. Maandustakistused.....	23
9.3.3. Mahueritakistused.....	24
<b>7. Pinnase eritakistus</b> .....	<b>26</b>
<b>8. Pinge jagunemine puus</b> .....	<b>28</b>
<b>9. Sammu- ja puutepinge</b> .....	<b>31</b>
9.1. Elektrivoolu toime inimesele .....	31
9.2. Sammu- ja puutepinge .....	33
<b>10. Rikked</b> .....	<b>37</b>
10.1. Liini kaitseautomaatika poolt registreeritud rikete ostsillogrammid.....	40
10.2. Liini kaitseautomaatika poolt registreerimata rike.....	46
<b>11. Liinikaitsed</b> .....	<b>47</b>
11.1. Liini kaitseautomaatika sisendid.....	47
11.2. Kaitseautomaatika reageerimine liinile langenud puu rikkele .....	49
<b>12. Soovitused</b> .....	<b>52</b>
<b>13. Kokkuvõte</b> .....	<b>53</b>
<b>Kasutatud kirjandus</b> .....	<b>56</b>

## Sissejuhatus

Töö eesmärgiks on looduses kasvavate elavate puude elektriliste karakteristikute määramine. Elavate puude elektriliste parameetrite määramisel on praktiline huvi võrguoperaatorfirmal Elering AS. Elektrivõrgufirma huvi vastava teema vastu on põhjustatud eelkõige 110 kV õhuliinidele langenud puudest ning nende tekitatud elektrikatkestustest ja võimalikest kahjustustest rikete asukohtades.

Aruande peamiseks eesmärgiks on koostada ülevaade ja analüüs kirjanduses leiduva materjali ning võrgufirmalt saadud andmete baasil. Praktilisi katsemõõtmisi aruande koostamisel ei teostatud. Olulisimaks sihiks on määrata 110 kV õhuliinidele langevate puude elektrilisi karakteristikud teada saamiseks, kui ohtlikud on pinged alla sattunud puud inimestele ning muule elavale ja elutule loodusele rikkekohtades.

Töös on 13 peatükki, millest mõned jaotuvad omakorda alapeatükkideks. Esimesed neli peatükki on tutvustavad: antakse lühiülevaade Eesti ülekande- ja transiitelektrivõrgust ning selle seotusest teiste riikidega. Piiritletakse ja täpsustatakse uurimistöö ülesannet ning probleemi. Samuti kirjeldatakse 110 kV õhuliini ja tuuakse välja selle tähtsamad parameetrid.

Viies peatükk keskendub puu struktuurile ja niiskusele ning on jaotatud üheteistkümneks alapeatükiks. Nendes iseloomustatakse puu põhiosasid ning nende ülesandeid puu elutegevuses. Samuti tutvustatakse lühidalt nelja puuliiki, mis põhjustavad enim rikkeid 110 kV liinidel Eestis. Selgitatakse, kuidas muutub niiskus puus selle ristlõikes ning kõrguses. Tuuakse välja okaspuude ja lehtpuude niiskuse sisalduse erinevused ning niiskuse muutused aastaajaliselt.

Kuuendas peatükis tutvustatakse puu elektrilisi omadusi ning neid mõjutavaid tegureid. Peatükk on jaotatud kuueks alapeatükiks. Vaadeldakse puu dielektrilisi omadusi ning puu takistust mõjutavaid tegureid ja esitatakse olulisemad sõltuvusgraafikud. Tuuakse välja töös vaatluse alla olevate puude takistused ja mahueritakistused septembris, novembris ja märtsis ning neid võrreldakse omavahel.

Seitsmes peatükk keskendub pinnase eritakistusele. Esitatakse erinevate pinnaseliikide eritakistused ning selgitatakse vee mõju pinnase eritakistusele. Samuti tutvustatakse Eesti pinnasemoodi ning tuuakse välja enim levinud pinnaseliik Eestis.

Kaheksandas peatükis selgitatakse, kuidas jaguneb pinge puus, kui see on kokku puutunud kõrgepinge õhuliiniga. Esitatakse puu takistuse muutus jalamilt kuni okste tippudeni tulbipuu näitel ning sellele toetudes selgitatakse, kuidas puus võib pinge jaguneda.

Üheksas peatükk on ehk kõige olulisem, kuna selles käsitletakse sammu- ja puutepingeid ning rikkevoolusid, mis võivad inimest läbida, kui ta on sattunud pinges oleva puu lähedusse. Peatükk on jaotatud kaheks alapeatükiks. Esimeses alapeatükis selgitatakse voolu mõju inimesele. Teises peatükis vaadeldakse sammu- ja puutepingeid ning voolusid, mis tekivad pinge alla sattunud puuga piirnevas pinnases. Esitatakse inimesele ohutud pinge ja voolu piirväärtused, mida võrreldakse võimalike tekkivate voolu ja pinge väärtustega pinge alla sattunud puu läheduses.

Kümnendas peatükis on toodud 2005–2012 aastatel registreeritud õhuliinidele langenud puude poolt põhjustatud rikete statistika ning ülevaade. Samuti analüüsitakse 2012. aasta kaitseautomaatika poolt registreeritud rikete ostsillogramme. Lühidalt kirjeldatakse ka 2012. aastal kaitseautomaatika poolt registreerimata jäänud riket.

Üheteistkümnendas peatükis kirjeldatakse liinidel kasutatavaid kaitse liike ning antakse ülevaade kaitseautomaatikas kasutatavatest kaitsetrafodest.

Kaheteistkümnendas peatükis on kirjas soovitusel, millises suunas võiks edasise uurimise teostada ning millede rakendamisel oleks võimalik kas õhuliinile langevate puude poolt põhjustatud rikkeid vältida või neid varasemas staadiumis tuvastada.

Viimane peatükk on kokku võttev. Lühidalt selgitatakse töö eesmärki, sisu ning selle uurimistöö vajadust. Samuti on välja toodud olulisemad järeldused, mis töö käigus ilmnesisid ning esitatud ka võimalikud uurimistöö edasiarenduse mõtted.

# 1. Uurimistöö eesmärk

Eesti 110 kV õhuliinide rikest moodustavad olulise osa liinidele langenud puud. Tugeva tuule, lume, jäite korral ja/või nende koosmõjul või muudel põhjustel puutuvad puud kokku elektriõhuliinidega, tekitades peamiselt ühefaasilisi lühiseid ning maalühisvoole.

Uurimistöö eesmärgiks on looduses kasvavate elavate puude elektriliste karakteristikute ning neid mõjutavate tegurite määramine. Sellest lähtuvalt soovitakse selgitada pinge jagunemist puus, kui see on sattunud kontakti kõrgepingeõhuliiniga. Samuti üritatakse saada vastust pinge alla sattunud puu ümbruses ilmnevate sammu-, puutepingete ja lühisvoolude võimalikust mõjust inimesele.

Oluline on anda ka võimalikke edasisi suuniseid ja lähtekohti puude poolt põhjustatavate rikete vähendamiseks ja/või vastavate rikete paremaks automaatseks tuvastamiseks rikkeautomaatika poolt.

## 2. Eesti ülekande- ja transiitelektrivõrk

Eesti elektrisüsteem (Joonis 1) ühendab omavahel Eestis paiknevad elektrijaamad, võrguettevõtjad ning elektritarbijad. Eesti elektrisüsteem omakorda kuulub suurde sünkroonselt töötavasse ühendsüsteemi BRELL, mille moodustavad Eestiga vahelduvvooluliine pidi ühendatud naaberriigid Läti ja Vene Föderatsioon ning omakorda nende naaberriigid Leedu ja Valgevene. Alates 2006.a lõpust on Eesti ja Soome vahel ka alalisvooluühendus merekaabelliini Estlink kaudu, mis ühendab Eesti elektrivõrgu põhjamaade elektrisüsteemidega. 2011 aasta alguses alustati Eesti ja Soome vahelise merekaabli Estlink2 ehitustöödega. Estlink2 on teine Eesti ja Soome vahele rajatav merekaabelliin, mille pikkuseks on ca 170 kilomeetrit. [1]

Eesti elektrisüsteemi põhivõrgu osa koosneb:

1540 kilomeetrist 330 kV liinidest

184 kilomeetrist 220 kV liinidest

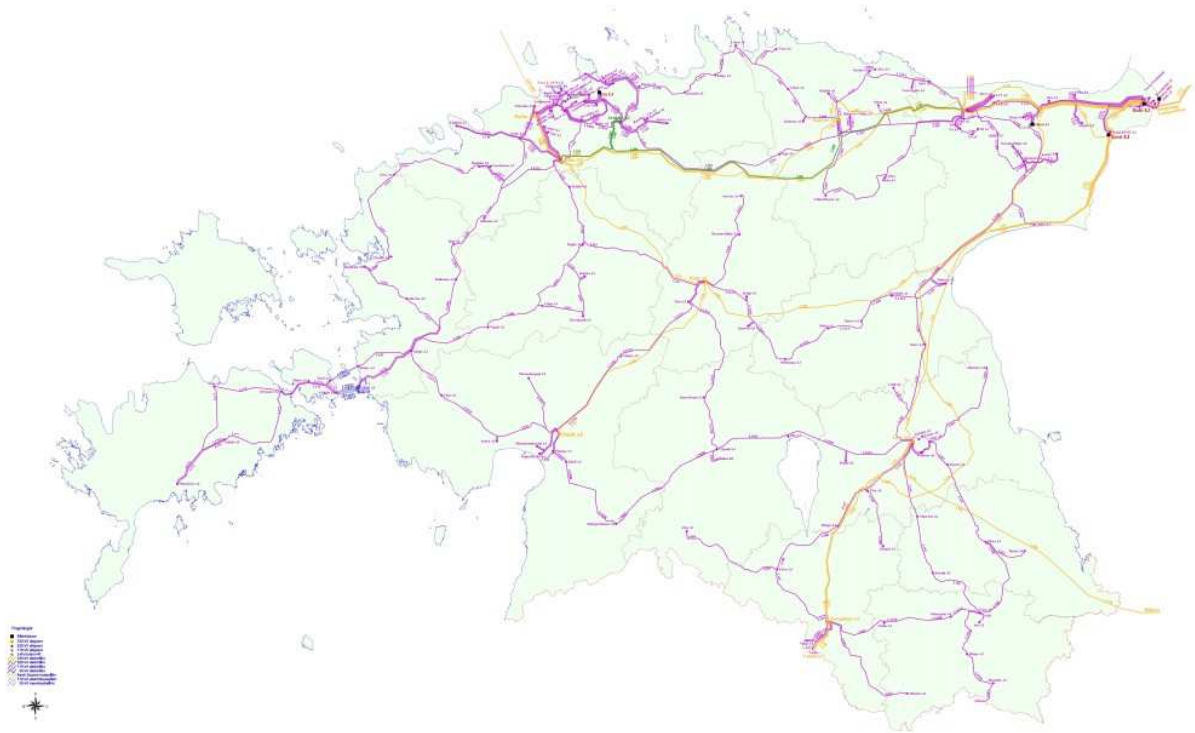
3476 kilomeetrist 110 kV liinidest

61 kilomeetrist 35 kV liinidest

151 alajaamast

Eesti transiitelektrisüsteem on ühendatud Vene Föderatsiooni elektrisüsteemiga läbi kolme 330 kV vahelduvvoolu õhuliiniga. Läti elektrisüsteemiga on ühendus läbi kahe 330 kV vahelduvvoolu õhuliini. Soome elektrisüsteemiga ühendab Eestit, Harku-Espoo  $\pm 150$  kV alalisvoolu merekaabel koos sinna kuuluvate konverteralajaamadega.

Eesti elektrisüsteemi operaatorfirmana toimib Elering AS, mille ülesandeks on planeerida võrgutalitlust ja juhtida elektrisüsteemi selliselt, et alati oleks tagatud võrgu ohutu ning töökindel talitlemine. Elektrienergia ülekande võimaldamise kõrval on Elering AS-i ülesandeks ka võimsusbilansi haldamine, mille eesmärgiks on süsteemi võimsusbilansi igahetkeline tagamine. [1]



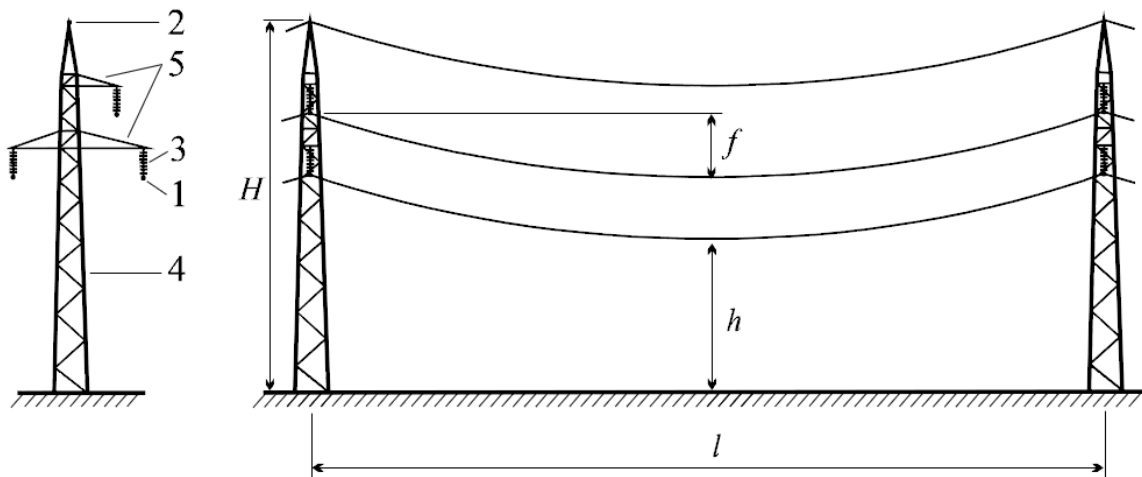
*Joonis 1 Eesti elektrisüsteemi kaart. [1]*



### 3. Õhuliini põhielemendid ja -parameetrid

Elektrienergia ülekandmiseks ning jaotamiseks kasutatakse õhu- ja kaabelliine. Antud töös vaadeldakse lähemalt 110 kV vahelduvvoolu õhuliinide parameetreid. Õhuliinide juhtmed on riputatud isolaatoritega mastidele või vastavatele tarinditele ning paiknevad õhus. Liinid peavad vastu pidama omakaalust, tuulest ja jäitest põhjustatud mehaanilistele koormustele, temperatuuri muutustele ning mitmesugustele keemilistele mõjutustele. Arvestada tuleb ka tuule dünaamilist mõju, mis põhjustab juhtmete vibratsiooni ja vahel ka hüplemist. [2]

Üldjuhul koosneb õhuliin (Joonis 2) juhtmetest (1), ühest või mitmest piksekaitsejuhtmest ehk kaitsetrossist (2), mastidest (Joonis 4), isolaatoritest (3) ja liinitarvikutest ehk liiniarmatuurist. Masti põhiosadeks võivad olla tüves ehk püstik (4), traaversid (5) ja vundamendid või jalandid. Piksekaitsetrossi kasutatakse üldjuhul metall- ja raudbetoonmastidega kõrgema pingega liinidel kogu ulatuses. [2]



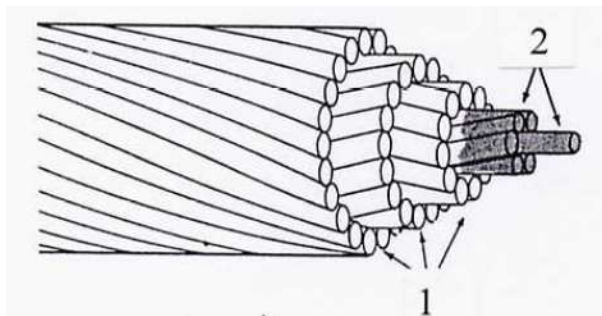
Joonis 2 Õhuliini elemendid [2]

Õhuliini tähtsamad mõõtmed on visangu pikkus  $l$ , juhtmete ripe  $f$ , liini maagabariit  $h$ , masti kõrgus  $H$ , isolaatorketi pikkus, faasidevahelised kaugused jms. Kuna antud töös uuritakse 110 kV õhuliinidel toimuvaid rikkeid, siis töös käsitletakse vaid 110 kV õhuliini põhiparameetreid. 110 kV õhuliinide põhiparameetrid on toodud Tabelis 1. [2]

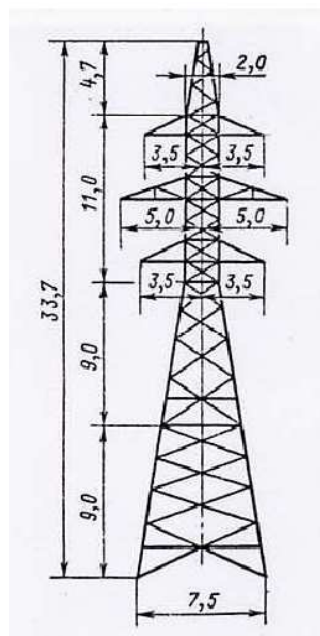
**Tabel 1. 110 kV õhuliini parameetrid.**

Parameeter	Väärtus, m
Visangu pikkus	170...250
Vähim lubatud maagabariit:	
Raskesti juurdepääsetaval alal	5
Hoonestamata alal	6
Hoonestatud alal	7

Eestis kasutatakse õhuliinidel isolatsioonkatteta nn paljasjuhtmeid. Põhivõrkudes kasutatakse tavaliselt alumiiniumist ja terasest kombineeritud terasalumiiniumi- ehk teraljuhtmeid (Joonis 3), mis on ümber galvaniseeritud teraskiududest südamiku punutud ühest või mitmest alumiiniumkiudude kihist koosnevad kombineeritud juhtmed. 110 kV õhuliinidel tuleb koroonast tingitud kadude vähendamiseks kasutada suuremaid ristlõikeid (1x242 mm<sup>2</sup> või 2x242 mm<sup>2</sup> [3]) [2].



**Joonis 3 Teraljuhe (1-alumiinium, 2-teras) [2]**



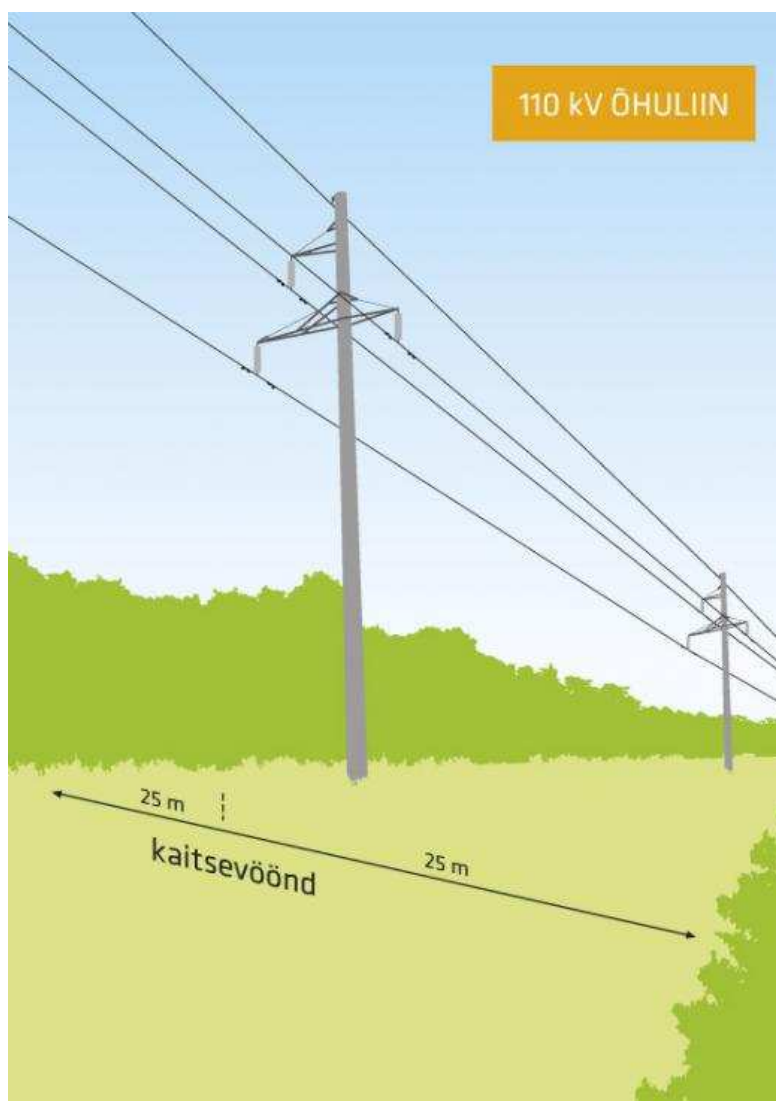
**Joonis 4 Kaheahelaline metallankrumast, 110 kV [2]**

## 4. Õhuliini kaitsevöönd

Kaitsevöönd on erinevaid elektripaigaldisi ümbritsev maa-ala, õhuruum või veekogu, kus ohutuse tagamiseks on kitsendatud selle ala kasutamisevõimalusi. Kaitsevööndi ulatus sõltub elektripaigaldise pingest. [4]

Õhuliini kaitsevöönd on maa-ala ja õhuruum, mida piiravad mõlemal pool piki liini telge paiknevad mõttelised vertikaaltasandid ning mille ulatus mõlemal pool liini telge on: [4]

- 110 kV pingega liinide korral 25 meetrit
- 220 kV ja 330 kV pingega liinide korral 40 meetrit



*Joonis 5 110 kV õhuliini kaitsevöönd [4]*

## 5. Puu ehituse iseloomustus

Liinile langevad puud võivad kahjustada liini mehhaaniliselt ning põhjustada seeläbi liini purunemist. Antud töö käsitleb olukorda, kus puu on õhuliini faasijuhiga kontaktis ning puud läbib rikkevool. Seega pakuvad suuremat huvi puude elektrilised omadused, kui kukkumisest tekitatud mehhaanilised vigastused liinile. Käesolev peatükk tutvustab puu struktuuri ning niiskuse sisaldust.

### 5.1. Puu struktuur

Eestis kasvavaid puid võib laiemalt liigitada okas- ja lehtpuudeks. Okaspuud kuuluvad paljasseemneliste taimede hulka, lehtpuud on aga katteseemnelised. [5] Puude elektriliste omaduste uurimisel tuleb tutvuda ka puu ehitusega. Enamjaolt on erinevat liiki puud sama põhianatoomiaga. Järgnevalt on toodud puu anatoomia tähtsamad ja suuremad osad.

#### 5.1.1. Puukoor

Puu kooreks (Joonis 6 ja Joonis 7) loetakse harilikult kõik kihid, mis asuvad väljaspool kambiumi. Koore osa moodustab tavaliselt *ca* 10% kogu puu mahust. Koor koosneb füsioloogiliselt aktiivsest sisekihist e niinest ja surnud rakkudega väliskihist – korbast. Korba ülesanne on kaitsta puud. [5]

##### 5.1.1.1. Niin

Niin (Joonis 6) ümbritseb kambiumit ja koosneb teatud liiki pehmest rakukoest, sisaldades nii puumahlu juhtivat kui ka tugikude. Niin juhivad puumahlu puutüve kõikidesse osadesse, tüve ristisuunas täidavad sama ülesannet niinest väljuvad säsiikiired. [5]

##### 5.1.1.2. Kambium

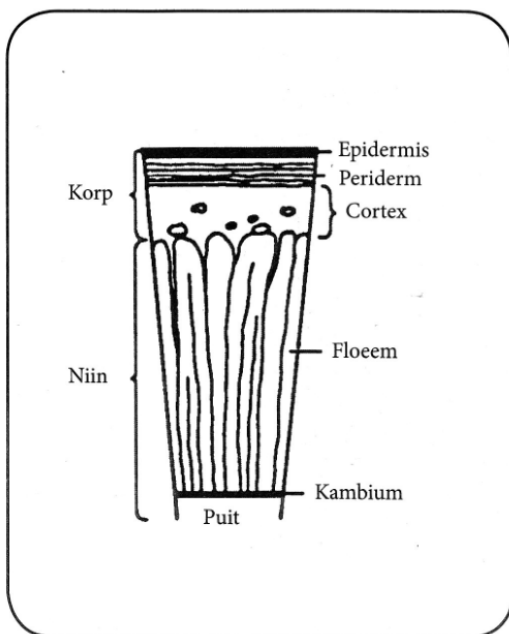
Tüve perifeerses osas, seespool niint ja väljaspool puidukude, asub puidu juurdekasvukiht kambium e mähk (Joonis 6). Kasvuperioodil moodustab see endast sissepoole puidurakke e ksüleemi, millest omakorda moodustuvad aastarõngad. Väljapoole tekitab kambium koorerakke e floeemi. [5]

### 5.1.2. Malts- ja lülipuit

Maltspuit (Joonis 7) on puutüve välimine, heledama värvusega puiduosa, mis koosneb vedelike juhtivatest rakkudest ja seetõttu sisaldab maltspuidu aastarõngaste kevadpuit ka palju niiskust. Lülipuit (Joonis 7) on tüve sisemine, tihti tumedama värvusega osa, mis koosneb surnud rakkudest ning ei võta seetõttu enam osa vedelike transpordist. Lülipuidu niiskussisaldus on maltspuidust märgatavalt madalam. [5]

### 5.1.3. Säsi

Säsi (Joonis 7) on puutüve keskosas asetsev kobe kude, mis kulgeb piki tüve ja mille tipp lõpeb ladvas pungaga. Pungast kasvab puu edasi pikkuses ja sealt saavad alguse ka oksad. Säsi koosneb õhukeseseinalistest rakkudest, mis sisaldavad toitainete tagavarasid. Säsi läbimõõt on 2...5 mm ja selle läbilõike kuju võib olla puuliigiti erinev. [5]



*Epidermis – kattekude, mis paikneb noores kooses, vanades puudes leidub seda ainult puu ülaosades.*

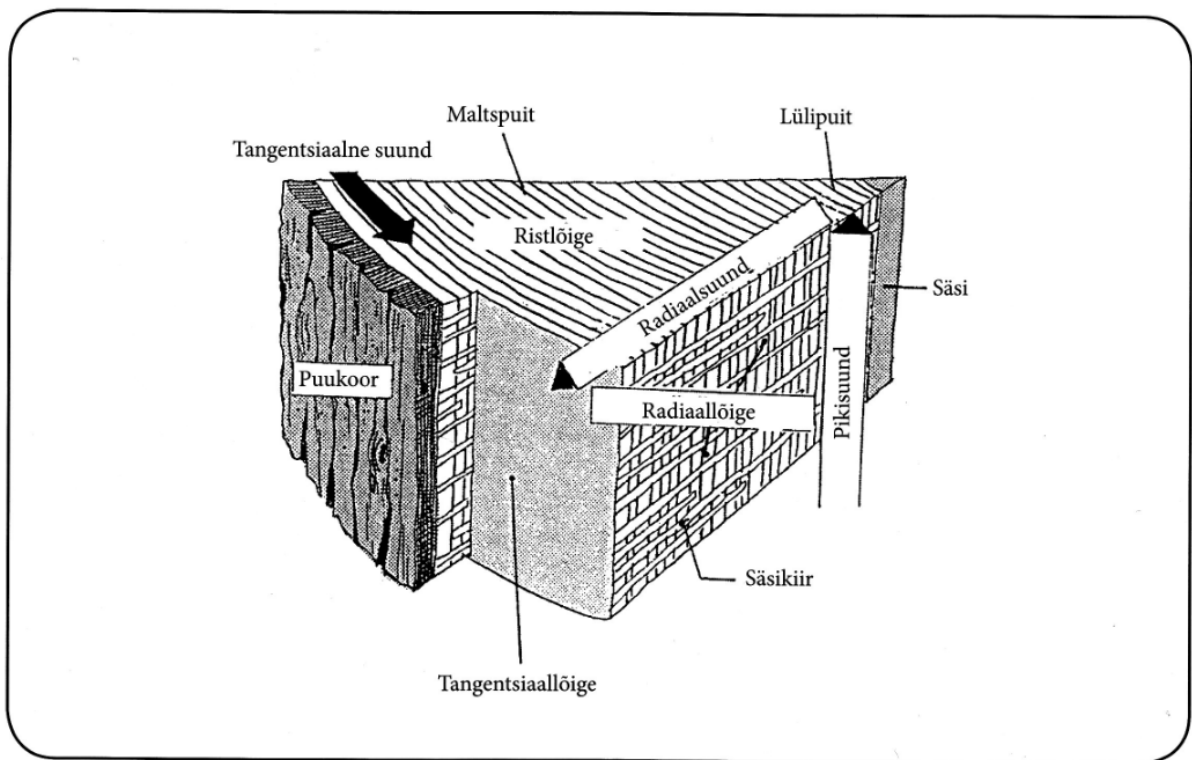
*Periderm – korkkude, vanade puude koore välimine kiht.*

*Cortex – Primaarne koor, puu vananedes kaob, ühinedes peridermiga.*

*Floeem – niineosa, milles toimub puumahlade laskuv vool.*

*Kambium – aktiivne juurdekasvukiht, mis toodab uusi puidurakke endast sissepoole ja niint väljapoole*

**Joonis 6 Puukoore ehitus [5]**



*Joonis 7 Puutüve läbilõige. [5]*

Antud töös keskendutakse neljale puuliigile, mis vastavalt Elering AS-i poolt saadud andmetele põhjustavad enim rikkeid. Nendeks puudeks on harilik haab, hall lepp, harilik kuusk ja arukask. Järgnevalt tutvustatakse toodud puuliike lähemalt.

#### **5.1.4. Harilik haab**

*Populus tremula* e harilik haab on Eestis väga sageli esinev lehtpuu. Haab on pika tüveosaga ja lühikeste üsna rõhtsate harudega. Kasvult kõrge puu. Võib kasvada kuni 30 m kõrguseks. Juurestik on maapinnalähedane. [6] [7]

#### **5.1.5. Hall lepp**

*Alnus incana* e hall lepp on Eestis rohkesti esinev lehtpuu. Lepp on kiirekasvuline, kuid lühiealine. Kasvab harilikult 15 m kõrguseks, harva ka kuni 25 m kõrguseks. Juurestik on hästi arenenud peajuure ja külguurtega, kuid ei tungi sügavale. [6] [8]

### **5.1.6. Arukask**

*Betula pendula* e arukask on levinuim lehtpuu Eestis. Kask ei ole pikaealine puu. Kasvab kuni 30 m kõrguseks. Juurestik on hästi arenenud sammasjuurestik ja pinnapealne. [6]

### **5.1.7. Harilik kuusk**

*Picea abies* e harilik kuusk on Eestis väga sageli esinev ja hariliku männi järel tähtsaim metsapuu. Kasvab kuni 30 m kõrguseks, soodsates tingimustes isegi kuni 60 m kõrguseks. Juurestik on maapinnalähedane ja seetõttu esineb sageli tuulemurdu. [6]

Nagu eespool sai selgitatud, võib puu struktuuri üldiselt jagada kuueks põhiosaks: puukoor, niin, kambium, lüli- ja maltspuit ning säsi. Need osad on kõigil puudel ja neil on sama ülesanne. Eelpool toodud neli puuliiki: harilik haab, hall lepp, arukask ja harilik kuusk – kõik kujutavad oma kasvu poolest ohtu 110 kV õhuliinidele. Nad on Eestis väga levinud puuliigid ning nende juurestik on pinnalähedane, mis soodustab tuulemurdu.

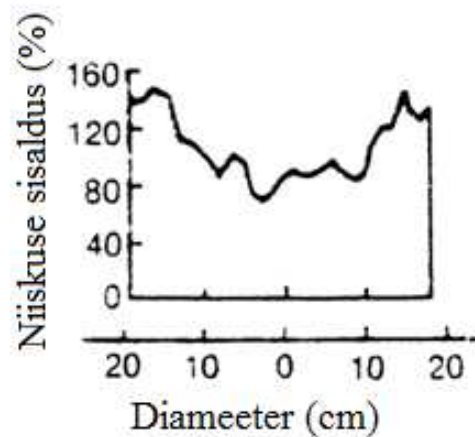
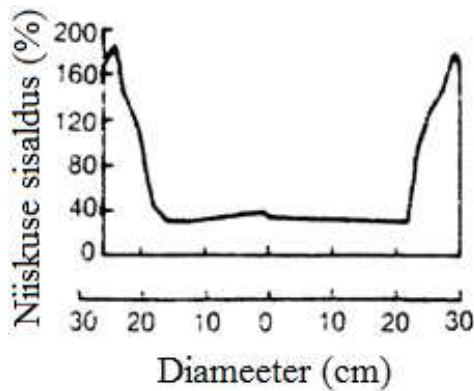
## **5.2. Puu niiskus**

Puidu niiskuseks nimetatakse seal leiduvat vett väljendatuna protsentides tema massist. Seejuures, kui seda väljendada protsentides absoluutselt kuiva puidumassi kohta, saame absoluutse niiskuse sisalduse ning kui tegemist on niiske puidumassiga, siis saame suhtelise ehk relatiivse niiskuse sisalduse. Praktikast kasutatakse enamasti absoluutset niiskuse sisaldust, sest see näitab vee kogust 100 osa absoluutselt kuiva puu kohta. Kui puidu niiskust väljendatakse puidu kuivkaalu kohta, siis võib selle väärtus ulatuda üle 100%...200%-i. [5]

Niiskuse sisaldus puus varieerub. Juured on kõige niiskemad ja oksad on tavaliselt kuivemad kui puutüvi. Puu niiskuse sisaldus erineb ka tüve sees. Okaspuudel on lülipuidu keskmine niiskuse sisaldus 55% ja maltspuidu keskmine niiskuse sisaldus 149%. Samas lehtpuudel ei ole niiskuse sisalduse erinevus tüve sees nii suur. Lehtpuu maltspuidus on niiskuse sisaldus keskmiselt 81 % ja lülipuidus 83% [9]. Kasvava puu erinevates osades on niiskussisaldus jaotunud ebahomogeenselt. Tüve ülemise osa maltspuidu niiskus võib olla tunduvalt suurem kui rinnakõrgusel maltspuidul. Mõõtes niiskust kasvava puu ristlõikes selgub, et niiskus on suurim maltspuidu koorepoolses osas, kus vedelike transport juurtest võrastele on kõige intensiivsem. Ka ilmastiku vaheldus erinevatel aastaaegadel mõjutab puu niiskust, mistõttu selle kõikumine võib olla 10...15%. Eriti suurt niiskuse erinevust kasvava puu läbilõikes on märgata maltspuidu ja lülipuidu vahel. Aastaaegade võrdluses on sügisene maltspuit kordades kuivem kui kevadel kasvanud maltspuit. [5]

Puu niiskuse sisaldus muutub ka tüve kõrguses ja ristlõikes ning ööpäevas ja erinevatel aastaegadel. Okaspuudel suureneb kõrguses niiskussisaldus tüve malts- ja välispuidus, lüli- ja küpspuidus aga on muutus kõrguses vähemärgatav. Maltspuidulistel lehtpuudel (kask, lepp, haab) suureneb niiskuse % tüve kõrguses. Töös vaadeldava hariliku kuuse keskmine niiskus on suurim veebruaris – 146% ja väikseim septembris – 109%. Lehtpuuliikide niiskuse muutused tüve ristlõikes on tühised, küll aga puuliigiti erinevad. Kasel on jaanuaris keskmine niiskus 82%, haaval aga 118%. Uurimuste käigus on selgunud, et puude niiskuse sisaldus on suurem talviti ja väikseim suviti. [5]

Järgnevalt tuuakse mõnede töös vaatluse all olevate puude niiskuse sisaldused tüve ristlõikes ja kõrguse kasvades.

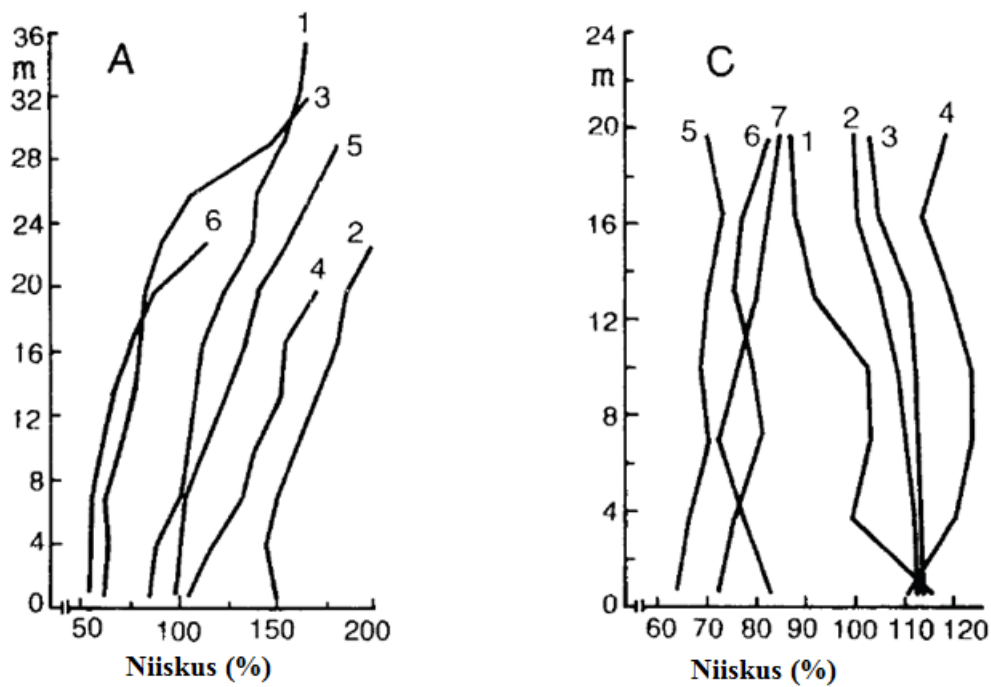


**Joonis 8 Kuusepuu niiskus tüve ristlõikes. [9]**      **Joonis 9 Kase niiskus tüve ristlõikes. [9]**

Joonised (Joonis 8 ja Joonis 9) näitavad kuuse ja kase niiskuse sisaldust tüve ristlõikes. Kuusel eristub selgelt maltspuidu ja lülipuidu niiskuse sisalduse erinevus. Maltspuit on kordades niiskem kui lülipuit. Kasel on aga erinevus vähem märgatav ning väga suurt erinevust ei esine.

Joonisel (Joonis 10) on kujutatud okaspuude ja lehtpuude niiskuse sisalduse muutus puu kõrguse kasvades. Okaspuude korral on märgata, et niiskuse sisaldus kasvab märgatavalt kõrguse kasvades, lehtpuudel aga kõrguse kasvades niiskuse sisaldus alati ei kasva, vaid võib ka langeda ning niiskuse sisalduse muutus on küllaltki väike.





**Joonis 10 Mõnede puude niiskus kõrguse kasvades. A- 1) Kuusk, 2) Valge nulg, 3) Harilik mänd, 4) Must mänd, 5) Balkani mänd, 6) Ebatsuuga. C- 1) Paju, 2) Valge pappel, 3) Värisev pappel, 4) Lepp, 5) Pöök, 6) Kask, 7) Vaher [9]**

Okste niiskuse sisaldus suureneb oksa diameetri vähenedes. Näiteks kuuseoksa niiskus kasvas 58 protsendilt 78%-ni. Samas muutus oksa läbimõõt kuult ühele sentimeetrile. Niiskuse protsentuaalset kasvu saab põhjendada sellega, et sama hulk niiskust, mis voolab puu jämedamates osades, voolab ka peenemates okstes [9].

## 6. Puu elektrilised omadused

Puu elektrilised omadused on tähtsad, kuna nendest sõltuvad tekkinud rikkevoolude suurused. Voolu suurusest sõltub, kas kaitseautomaatika tuvastab rikke ja reageerib sellele või mitte. Lähtuvalt sellest kujutavad rikkevoolud endast ohtu inimestele, kes juhtuvad olema pinge alla sattunud puu läheduses. Puu elektrilisi parameetreid mõjutavaid tegureid on mitmeid.

Puu niiskuse sisaldus mõjutab olulisel määral puu elektrilist juhtivust. Vahet tuleb teha elaval ja surnud puul, sest surnud puud on enamasti väikese niiskuse sisaldusega. Kuivas olekus (niiskus 0...5%) on puit hea isolator. Niiskuse suurenedes tõuseb puidu elektrijuhtivus. Õhukuiva puidu (ca 15% niiskust) eritakistused jäävad pooljuhtide suurusjärku. Kiuseina küllastuspunktis ja sellest niiskemates tingimustes juhib puit suhteliselt hästi elektrit. [5]

Puu elektriline takistus on mittelineaarne funktsioon puu niiskusest ja puule rakendatava pinge sagedusest ning amplituudist. [9] Absoluutselt kuiva puidu eritakistus (kuusk, pöök, tamm jne) on 15°C juures vähemalt  $1,6 \times 10^{14} \Omega\text{m}$ . Nimetatud takistus kehtib vaid ristikiudu kulgevale voolusuunale [5]. Niiskuse sisalduse kasv puus vähendab puu elektrilist takistust ehk parandab juhtivust. [9]

Samuti olenevad puu elektrilised omadused pinge kujust. Vahet tuleb teha vahelduv- ja alalisvoolul. Niiskuse sisaldus mõjutab puu takistust alalisvoolu korral enam kui vahelduvvoolu puhul. Puu elektrilisi parameetreid mõjutavad veel puu tihedus ja temperatuur. [9].

Kuna antud töös uuritakse 110 kV õhuliinidele langevate puude elektrilisi omadusi, siis on peamise vaatluse all puude takistused, kui neid läbib võrgusagedusega vahelduvvool. Alalisvoolu mõju puude elektrilistele omadustele käsitletakse töös põgusalt.

### 6.1. Puu dielektriline läbitavus

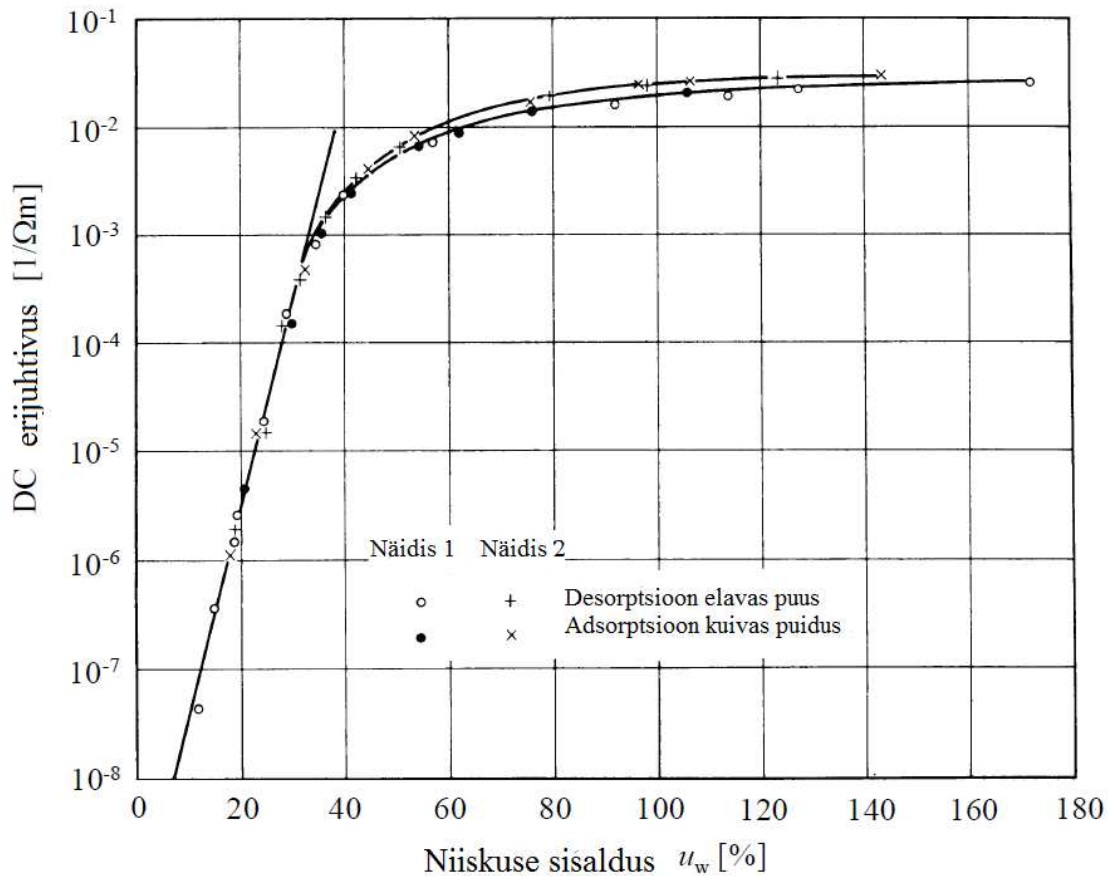
Ainete üheks oluliseks dielektriliseks omaduseks on suhteline dielektriline läbitavus, mis näitab, kui palju suureneb näiteks puitdielektrikuga kondensaatori mahtuvus, võrreldes õhkdielektrikkondensaatoriga. Õhu ja gaaside suhtelise dielektrilise läbitavuse väärtus on ligikaudu 1. Olenevalt puuliigist, puu tihedusest ja puidukiudude suunast on see väärtus kuival puul 2...4, kusjuures pikikiudu on see ligi 1,5 korda suurem kui ristikiudu. Näitena võib tuua absoluutselt kuiva kuuse, mille suhteline dielektriline läbitavus on risti kiudu 2,0 ja tangentsiaalsuunaliselt 3,1. Vahelduvvoolu sageduse kasvades väheneb puidu suhteline dielektriline läbitavus, puidu niiskussisalduse kasvades suureneb ka suhteline dielektriline läbitavus. [5]

## 6.2. Puu takistust mõjutavad tegurid

Puu takistust mõjutavad mitmed tegurid: niiskus, temperatuur, pinge kuju, sagedus jne. Mõnede tegurite mõju on suurem kui teistel. Antud peatükis käsitletaksegi puude takistusi enim mõjutavaid tegureid.

Puu juhtivust mõjutab puu niiskuse sisaldus ja puu rakuseina struktuur ning ehitus. Puu rakuseina ehitus on sarnane klaasplasti ehitusele. Kiu moodustaja puus on kristalses olekus tselluloos. Puu kiu maatriks koosneb mittekristalses olekus tselluloosist, ligniinist ja hemitselluloosist. Laias laastus moodustavad ligniin ja hemitselluloos kumbki 25–30% puu kaalust. Tselluloos moodustab puu kaalust aga 40–50%. [9]

Puu raku keemiline koostis, eriti ligniini sisaldus mõjutab puu takistust. Ligniini sisalduse kasv parandab puu juhtivust. Üldiselt on okaspuudes ligniini sisaldus veidi suurem kui lehtpuudes. Okaspuu kuivmass sisaldab ligikaudu 25–35% ligniini, lehtpuudel on vastav näitaja 17–25%. Puu juhtivus on mittelineaarne funktsioon puu niiskusest ja puule rakendatava pinge sagedusest ning amplituudist. Alalisvoolul, kui puu kiud pole veest küllastunud (puu kiu niiskus kuni 30%) on puu niiskuse ja juhtivuse vahel lineaarne sõltuvus (Joonis 11). Küllastuspunktist (ligikaudu 30%) suurematel niiskustel ei mõjuta niiskuse kasv olulisel määral enam puu juhtivust. Kiu küllastuspunkti ja puu täieliku küllastuspunkti vahel toimub ligikaudu viiekümnekordne juhtivuse suurenemine. Puu kiud on küllastunud, kui kiusein ei suuda enam vett vastu võtta, kuna pole enam ruumi lisanduvale veele. Seinad punduvad ja liigne vesi koguneb rakuõõnde, soontesse ja fibrillide vahelistesse õõnsustesse. [9, 10] Sel juhul läheneb puu elektriline juhtivus teda niisutava vee juhtivusele.



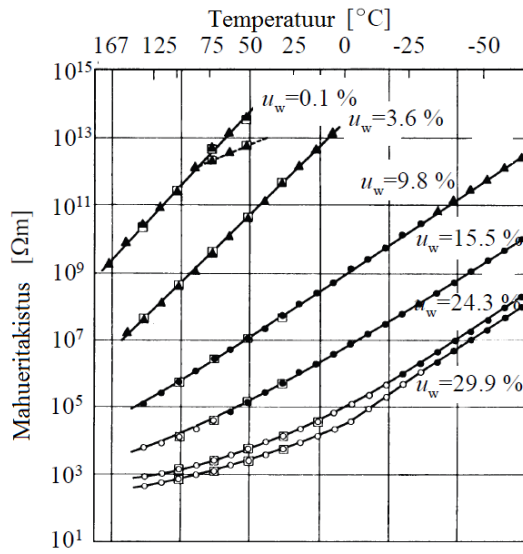
**Joonis 11** Puu mahuerijuhtivuse sõltuvus puu niiskusest alalisvoolu korral. [9]

Vahelduvvoolu korral sageduse kasvades puu juhtivus suureneb (Joonis 12)<sup>1</sup>. Niiskuse sisalduse mõju juhtivusele on vahelduvvoolu korral väiksem kui alalisvoolul. Sageduse mõju juhtivusele väheneb, kui puu niiskuse sisaldus kasvab. Madalatel sagedustel juhtivus paraneb, kui suurendada vahelduvvoolu elektrivälja tugevust. See sõltuvus on suhteliselt lineaarne. Teatud sagedustel juhtivuse sõltuvus elektriväljast kaob. [9]

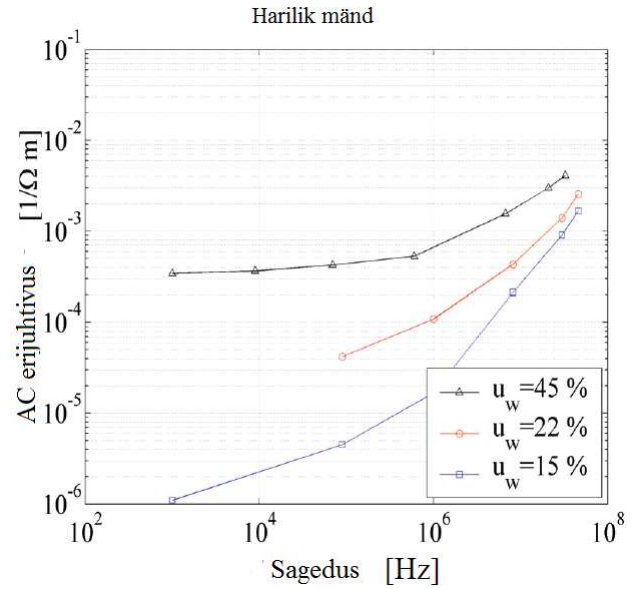
Puu takistus sõltub temperatuurist. Temperatuuri tõustes puu takistus väheneb. See on iseloomulik pooljuhtidele. Temperatuuri mõju takistusele erinevate puu niiskuse sisalduste juures on toodud alloleval joonisel (Joonis 13). Madalatel niiskuse astmetel on sõltuvus lähedane lineaarsele sõltuvusele. Kiu küllastuspunkti (30%) lähedal lineaarne sõltuvus teatud temperatuuridel (0...-10°C) kaob (Joonis 13). See võib olla tingitud vee külmumisest. Puu

<sup>1</sup> Adsorptsioon on lahuste või gaasisegude, antud juhul vee, koondumine tahkise, puu pinnale. Desorptsioon on vastupidine adsorptsioonile [16].

takistus sõltub ka voolu suunast suhtes puu kiududega. Okaspuude puhul on tangentsiaal-suunaline takistus 2,3...4,5 korda suurem kui teljesuunaline takistus. Lehtpuudes on tangentsiaalsuunaline takistus 2,5..8 korda suurem. [9]



**Joonis 13** Puu mahueritakistuse sõltuvus temperatuurist erinevate absoluutniiskuse sisalduste ( $u_w$ ) juures. [9]



**Joonis 12** Hariliku männi erijuhtivuse sõltuvus sagedusest erinevate niiskuse ( $u_w$ ) sisalduste korral. [9]

### 6.3. Puu takistused

Nagu eelpool mainitud, vaadeldakse töös lähemalt nelja erinevat puuliiki: harilik haab, hall lepp, arukask ja harilik kuusk. Kõik nimetatud puud on Eestis sageli esinevad ja Elering AS-i andmete põhjal põhjustavad need liigid ka enim rikkeid. Puude lühikirjeldused on toodud peatükkides 5.1.4. kuni 5.1.7. Selles peatükis käsitletakse kirjanduse põhjal eelpool mainitud puude takistusi.

Tampere Tehnikaülikoolis teostatud doktoritöö raames mõõdeti samade puuliikide takistusi ja maandustakistusi, mis on käsitluse all ka antud uurimuses. Samuti registreeriti puu tipu ja puu jalami mahueritakistused. Doktoritöös mõõdeti vastavaid parameetreid kuuse-, kase- ja haava-puudel. Mõõtmised teostati kolmel ajaperioodil: septembris, novembris ja märtsis. Mõõtmistulemuste kohta koostati koondtabel (Tabel 2) [9]. Käesolevas töös vaadeldakse lisaks mainitutele veel ka leppapuu parameetreid. Kahjuks eelpool nimetatud väitekirjas see puuliik vaatluse alla ei sattunud. Kirjanduses aga leidub siiski mõningaid andmeid ka leppapuu mahueritakistuse kohta.

Kõige tõesem ülevaade on saadud kuuse takistustest, kuna kuuski sattus vaatluse alla enim – 12 puud. Samuti on kuuskede mõõtmised ühtlaselt jaotunud kolme perioodi vahel, igal perioodil neli puud. Mõõdetud kasepuude hulk oli kaks korda väiksem ja puud jagunesid mõõtmisperioodide vahel ebaühtlaselt: septembris kaks, novembris kolm ja märtsis vaid üks puu. Haava korral teostati mõõtmine vaid ühe puu puhul. Vastav mõõtmine toimus septembris [9]. Selle punkti alapeatükkides teostatud analüüs baseerub koondtabelil (Tabel 2).

#### 9.3.1. Takistuste analüüs

Hariliku kuuse takistusi analüüsid on märgata, et septembri ja novembri keskmised tulemused on küllaltki sarnased, samas võivad märtsikuu mõõtmistulemused olla kuni kümme korda suuremad. Septembri- ja novembrikuu puude takistuste suhe on *ca* 1,3; septembris olid takistused suuremad kui novembris. Samas märtsi- ja septembrikuus on puude takistuste suhe *ca* 8,5 ja märtsi ning novembri vastav väärtus on 11,2. Puu takistus varieerus ühe mõõtmisperioodi vältel küllaltki palju. Septembris oli suurima ja vähima mõõdetud takistuse suhe 2,3 ning novembris oli vastav näitaja 2,4 ja märtsis 5,4 korda. See näitab, kui suurtes piirides võib puu takistus tegelikult varieeruda. Suurim takistus mõõdeti märtsikuu – see oli ainus kord, kui õhutemperatuur oli allpool nulli, -10 °C.

Kasepuu takistusi analüüsid on märgata sarnasusi kuusepuuga. Sügisesed takistused on väiksemad kui märtsikuused, seevastu novembrikuised takistused on suuremad kui septembris.

Kase ja kuuse septembrikuu keskmiste takistuste suhe on 1,4 ning novembrikuu kohta on sama näitaja 5,4. Kase kõigi kuude keskmised takistused on suuremad kui vastavate kuude takistused kuusel. Kase novembri ja septembri takistuste suhe on 2,9; märtsi ning septembri vastav näitaja on 12,5 ja märtsi ning novembri suhe on 4,2. Siin tasub silmas pidada, et märtsikuus mõõdeti takistusi ainult ühel kasel, mis on põhjalike järeltuste tegemiseks ebapiisav. Küll saab aimu, mis suurusjärku takistused võivad kuuluda. Kase kõikide mõõtmisperioodide suurimate ja vähimate väärtuste suhteid ei saa välja tuua, kuna mõõtmiste arv oli ebahühtlane. Ainult novembrikuus tehti kolm mõõtmist ning siis tuli suurima ja vähima väärtuse suhe 2,9, mis tõestab jällegi, et puu takistus võib varieeruda suurtes piirides. Sarnaselt kuusega mõõdeti ka kase suurim takistus märtsikuus ning ka seekord oli õhutemperatuur allpool nulli,  $-7^{\circ}\text{C}$ . Kahjuks pole haava takistuste kohta piisavalt mõõteandmeid, et teha usaldusväärseid järeltusi ning leppapuu otsese puu takistuse kohta kirjandusest andmeid ei leidunud. Küll aga võib eeldada, et lepa ja haava takistused jäävad samasse suurusjärku kasega, kuna kõik kolm on lehtpuud ning arvatavasti käituvad need pinge alla sattudes sarnaselt.

### **9.3.2. Maandustakistused**

Analüüsidest kuuse maandustakistusi on märgata, et sügisesed väärtused on madalamad kui märtsikuised. Septembri- ja novembrikuu võrdluses on kuuse keskmine maandustakistus septembrikuus 1,7 korda suurem. Märtsi- ja septembrikuus mõõdetud maandustakistuste suhe on 8,8 ning vastav näitaja märtsikuiste takistuste võrdlemisel novembriga on 15,6. Sügiseste ja märtsikuiste maandustakistuste erinevused on väga suured, mis ilmselt on tingitud sellest, et märtsikuus võis maa olla veel külmunud. Kui sügisel jäi mõõtmiste ajal õhutemperatuur üldjuhul vähemalt 5 kraadi võrra nullist kõrgemale, siis varakevadel oli õhutemperatuur enamikel mõõtmiskordadel  $0^{\circ}\text{C}$  ja korra isegi  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Kase septembrikuu keskmine maandustakistus on peaaegu sama, mis kuusel. Küll aga on novembris maandustakistus kuuse omast 3,2 korda suurem. Märtsikuus sooritatud ühe mõõtmise alusel ei saa midagi kindlat väita. Siiski on see üksik väärtus kuuse märtsikuu keskmisest väärtuses 1,9 korda suurem. Kase novembri- ja septembrikuiste maandustakistuste suhe oli 1,5; märtsi ning septembri takistuste suhe oli 14,9 ja märtsi ning novembri vastav väärtus oli 9,5. Kogutakistuse juures mängib suuremat rolli puu takistus, kuna see on üldjuhul kordades suurem kui maandustakistus.

### 9.3.3. Mahueritakistused

Mahueritakistused mõõdeti samal ajal, kui eelnevalt käsitletud takistused. Eritakistused mõõdeti eraldi nii puu jalamil ja osadel puudel ka puu tipu osas. Mahueritakistused on mõõdetud puu pikisuunas.

Nii kuuse kui ka kase tipu mahueritakistus on väiksem kui jalami eritakistus. Novembri- ja septembrikuus oli jalami eritakistuste suhe kuusel ning kasel sarnane, vastavalt siis 1,6 ja 1,5. Märtsi- ning novembrikuus olid jalami eritakistuste suhted kuusel ja kasel küllalt erinevad, kasel 6,4 ja kuusel 28. Tasub märkida, et märtsis mõõdeti vaid ühe kase eritakistusi. Tipu mahueritakistused muutusid mõõtmisperioodide vahel vähem kui jalami mahueritakistused. Kuusel teostati septembris ainult üks tipu mahueritakistuse mõõtmine ja kasel mitte ühtegi, seepärast ei hakata välja tooma suhteid teiste perioodidega. Küll aga võib tuua kuuse märtsikuise ja novembrikuise tipu mahueritakistuste suhte, mis on 4,8; kasel on vastav näitaja 1,9. Haaval mõõdeti eritakistust vaid korra septembrikuus, jalamil, ning see oli 3,7 korda väiksem kui kase septembrikuine eritakistus. Lepapuu kohta kasutatud uurimuses andmed puuduvad. Mujalt kirjandusest leitud andmete põhjal on lepa keskmine mahueritakistus ligikaudu 200  $\Omega$ m. [11] Võrreldes jalami eritakistuste muutumisega on tipu eritakistuse muutumine sügiseste ja märtsikuiste mõõtmiste vahel tühine.

Puude takistused varieeruvad väga suurtes piirides. Sügisese ja varakevadise takistused võivad erineda üle kümne korra. Olulist rolli mängib ka õhutemperatuur, sest suurimad takistused mõõdeti miinuskraadide korral. Ühes aastases uurimuses mõõdeti vahtra takistusi. Mõõtmistest selgus, et vahtrapuu on kõige juhtivam varajasel ja hilisel kasvuperioodil. Kõige väiksem oli juhtivus talvisel puhkeajal [11]. Võib eeldada, et antud töös käsitletavat puude juhtivused käituvad sarnaselt. Puude maandustakistused erinevad samuti väga palju. Sügisese ja varakevadise maandustakistused võivad erineda kümme korda. Pikisuunaline mahueritakistus oli puudel suurem jalamil ja väiksem tipus.



*Tabel 2 Erinevate puuliikide takistused, maandustakistused, mahueritakistused, puu mõõtmed, õhutemperatuur ja õhuniiskus. [9]*

Puuliik	Aeg	Puu takistus [ $\Omega$ ]	Maandustakistus [ $\Omega$ ]	Tipu eritakistus [ $\Omega$ m]	Jalami eritakistus [ $\Omega$ m]	Puu kõrgus [m]	Puu ümbermõõt [cm]	Temperatuur °C	Õhuniiskus [%]
Kuusk	13.09.2000	23 997	1255	-	46	17	57	14	63
Kuusk	12.09.2000	25 099	3533	-	124	18	59	8	93
Kuusk	11.09.2000	30 382	2855	-	102	17	62	16	63
Kuusk	19.09.2000	55 265	4917	44	149	17	50	14	53
<b>KESKMINE</b>		<b>33 686</b>	<b>3140</b>	<b>44</b>	<b>105</b>				
Kuusk	6.11.2000	12 994	1699	59	234	21	114	6	87
Kuusk	7.11.2000	28 099	2106	72	193	18	70	4	92
kuusk	7.11.2000	29 609	422	58	59	19	65	5	89
Kuusk	7.11.2000	31 978	2898	77	185	16	64	5	90
<b>KESKMINE</b>		<b>25 670</b>	<b>1781</b>	<b>67</b>	<b>168</b>				
Kuusk	6.03.2001	112 280	20995	209	4287	19	103	2	84
Kuusk	8.03.2001	188 236	32867	159	1538	18	53	0	55
Kuusk	7.03.2001	244 740	19281	145	1916	14	53	0	57
Kuusk	8.03.2001	612 647	38171	797	11601	19	80	-10	80
<b>KESKMINE</b>		<b>289 476</b>	<b>27829</b>	<b>328</b>	<b>4836</b>				
Kask	13.09.2000	42 910	3226	-	287	17	51	3	91
Kask	12.09.2000	53 260	4106	-	204	18	51	14	61
<b>KESKMINE</b>		<b>48 085</b>	<b>3666</b>		<b>246</b>				
Kask	8.11.2000	69 373	4277	145	327	18	52	7	98
Kask	8.11.2000	150 524	6838	164	471	17	43	7	82
Kask	8.11.2000	202 110	6153	136	327	18	42	7	82
<b>KESKMINE</b>		<b>140 669</b>	<b>5756</b>	<b>148</b>	<b>375</b>				
Kask	7.03.2001	601 727	54947	289	2422	14	40	-7	74
<b>KESKMINE</b>		<b>601 727</b>	<b>54947</b>	<b>289</b>	<b>2422</b>				
Haab	12.09.2000	33 456	2348	-	65	18	51	15	61
<b>KESKMINE</b>		<b>33 456</b>	<b>2348</b>	<b>-</b>	<b>65</b>				

## 7. Pinnase eritakistus

Peale puu takistuse mõjutab maaihendusvoolu suurust ka pinnase takistus. Pinnas on maakoore ülakiht, mida mööda elektrivool voolab. Pinnase põhikomponendid ränioksiid ja alumiiniumoksiid praktiliselt ei juhi voolu. Voolu juhivad niiskus ning lahustunud soolad, seega on tegemist elektrolüütilise juhtivusega. Pinnase eritakistus sõltub pinnase koostisest (poorsusest), niiskuse ja soolade sisaldusest ning temperatuurist. [12]

**Tabel 3 Erinevate pinnaste eritakistused võrgusagedusel. [12]**

<b>Pinnase liik</b>	<b>Eritakistus <math>\rho_E \Omega m</math></b>
Merevesi	0,2...1,0
Jõevesi	5...100
Soopinnas	5...40
Liivsavi, savi, mustmuld	20...200
Liiv	200...2500
Kruus, killustik	2000...3000
Murenenud kivim	Enamasti alla 1000
Liivakivi	2000...3000
Graniit	Kuni 50000
Moreen	Kuni 30000

Niiskuse sisalduse muutumine võib põhjustada pinnase eritakistuse ajalisi muutusi kuni mõne meetri sügavuseni. Pinnase eritakistus võib tunduvalt muutuda koos sügavuse suurenemisega, kuna tavaliselt koosneb pinnas selgesti eri omadustega pinnasekihtidest. [12] Sammu- ja puutepinget mõjutab pigem pinnase pealmiste kihtide eritakistus. Maandustakistust läbi puu mõjutab ka sügavamate pinnasekihtide eritakistus, kuna puujuured tungivad pinnase sügavamatesse kihtidesse.

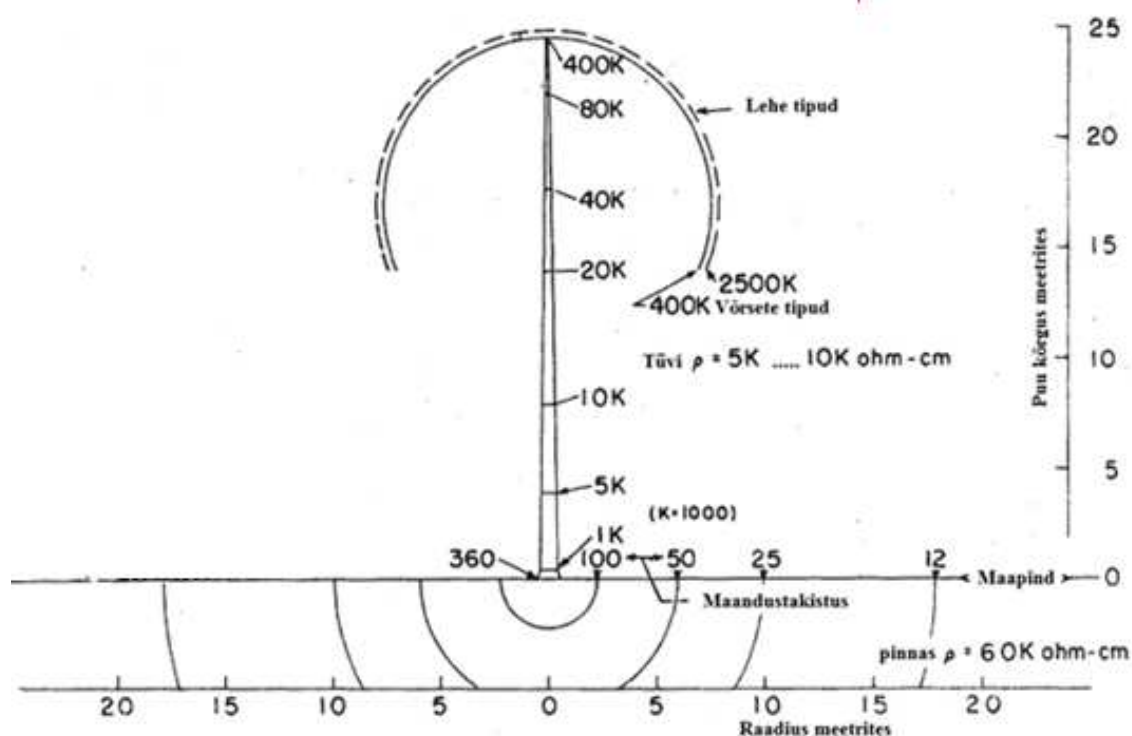
Peamiseks pinnakattematerjaliks Eestis on moreen. Põhja- ja Lääne-Eesti lubjakive katab kividerohke moreen. Lõuna-Eesti liivakivide alal on see suhteliselt kividevaene. Ülejäänud osa pinnakattest koosneb mitmesugustest mineraalsetest (kruus, liiv, viirsavi, veeristik) ja elutekkelistest setetest (turvas, muda) [13].

Moreenil on võrreldes teiste pinnaseliikidega suur eritakistus (Tabel 3), kuid niiskete ja vihmaste ilmadega võib see oluliselt langeda. Vihmaperioodide ajal võib maapinnale koguneda vett ja pinnase pealmise kihi eritakistus võib ligineda pigem vee eritakistusele kui vastavale pinnase liigile. Samuti läbivad 110 kV õhuliinid alaliselt soisemaid ja niiskemaid alasid, kus pinnase eritakistus võib sarnaneda pigem soopinnasele (Tabel 3), mille eritakistus võrreldes moreeni eritakistusega võib olla kuni 6000 korda väiksem.

## 8. Pinge jagunemine puus

Kõrgepinge õhuliiniga kokkupuutesse sattunud puu jääb pinge alla ja seda hakkab läbima vool. Pinge jagunemine puus aga pole ühtlane, kuna puu takistus varieerub. See on tingitud puu niiskusest, ligniini sisaldusest, tüve ning okste läbimõõdust, puu liigist, ilmast jne. Seega tekivad puu erinevates lõikudes ka erineva pingelanguga kohad. Käesoleva töö üheks eesmärgiks on selgitada pinge jagunemisi puus.

Puu maandustakistus muutub tema kõrguse kasvades. [14] Alloleval joonisel (Joonis 14) on toodud tulbipuu takistuste muutus puu kõrguse kasvades. Tulbipuu küll ei kuulu selles töös vaadeldavate puude hulka, kuid antud joonis annab selgust pinge jagunemisest puus. Võttes arvesse eelnevates peatükkides (peatükid 5.1 kuni 5.1.3) käsitletud puude ehitust ja seda, et kõik puud on oma põhiosadelt samase ehitusega, võib eeldada, et ka antud töös vaadeldavates puudes on takistuse muutumine sarnane.



*Joonis 14 Tulbipuu maandustakistus kõrguse kasvades. Parem pool puu tüve on näidatud maandustakistuste väärtused. [14]*

Joonise (Joonis 14) paremal pool on toodud maandustakistused maapinnal ning mööda tüve ja kuni lehe tippudeni. Takistus kasvab puu kõrguse kasvades. Maksimaalne takistus on tüve ülaosas ning võrsete otstes. Antud tulemusi toetab ka J. W. Goodfellow uurimus, kust ilmneb, et okste ja võrsete takistus sõltub selle diameetrist. Suurema diameetriga oksad on paremad juhid. [11] Seega – mida peenem oks, seda suurem takistus. Puutüve jalami ning võrsete takistuste erinevus on ligi 400- kordne.

Puu võib sattuda õhuliiniga kontakti läbi okste ja/või tüve. Okste kokkupuutel liiniga läbib vool puud terviklikult ehk pinge alla sattunud oksast kuni juurteni. Tüvega kokkupuutel ei läbi vool puud terviklikult ja oksad jäävad vooluringist välja. Seega jaguneb pinge mõlemal juhul veidi erinevalt. Teisel juhul satub suurima pinge alla liini ja tüve puutepunkti ümbrus: mida maa poole, seda väiksemaks läheb puu takistus ja samuti ka pingelang puu pikkusühiku kohta. Esimesel juhul on olukord sarnane. Suurima pinge alla satub liiniga kokku puutunud oks ja sealt edasi maa poole pingelang väheneb puu pikkusühiku kohta. Tekkivad pingelangu ja voolu suurused olenevad puu takistusest. Eelnevates peatükkides (7 kuni 9.3.3) on kirjutatud, et puu takistus varieerub väga suurtes piirides ning täpseid voolu ja pinge väärtusi on siinkohal raske välja tuua.

Eeltoodud näidete korral eeldati, et õhuliiniga kontaktis olev puu pole langenud, vaid on normaal-, ehk püstasendis. Tegelikult aga valmistavad probleeme just liinile langenud puud. Puu langeb peamiselt kahel põhjusel, jalami (Joonis 15) või osade juurte (Joonis 16) murdumis(t)e ja/või muldkehast välja rebimise tõttu. Langemise tulemusena võib olulisel määral muutuda puu maandustakistus. Võib juhtuda, et maandustakistus suureneb kordades, mis sellest tulenevalt põhjustab ka võimalike rikkevoolude vähenemist ning pingejagunemise muutust murdunud jalamil ja/või terveks jäänud juurestikus ning seda ümbritsevas muldkehas. Kui juba elava ning mittelangenud puu tüve- ja maandustakistused võivad erineda kordades ning nende suurusi on raske määratleda, siis murdunud tüve- ja juurestikuga puu takistuste määramine on veelgi keerukam.

Piisavalt kõrge pinge alla sattudes hakkab piki puud arenema söerada, mis juhib väga hästi elektrit. Mida kauem on puu pinge all, seda kaugemale söerada areneb, pingesse sattunud puu osa kogutakistus langeb ning rikkevool kasvab. Söeraja tekkimise juures on oluline roll selle arenemise kiirusel. Et rada saaks lõpuni välja areneda, peab see kasvama kiiremini, kui puu jõuab pinge all eralduva kaovõimsuse toimel kuivada. Kuivamisega puu takistus kasvab ja vool väheneb ning söerada ei pruugi lõpuni välja areneda [15]. Kui söerada areneb lõpuni välja, siis kasvab rikkevool nii suureks, et selle registreerib kaitseautomaatika ning liin lülitub välja.

Oluline on aeg, mille jooksul automaatika rikke tuvastab, sest rikkevool kujutab endast ohtu elusolenditele, kes viibivad pinge alla sattunud puu läheduses. Kui puu jääb kauaks pinge alla, siis suureneb tõenäosus, et tekkinud sammu- ja puutepinged võivad ohustada selle puu lähedusse sattunud elusolendeid. Sammu- ja puutepingest kirjutatakse järgnevas peatükis.



*Joonis 15 Puu, mille langemise põhjuseks on jalami murdumine [16]*



*Joonis 16 Puu, mille langemise põhjuseks on osade juurte murdumine ja/või nende muldkehast välja rebimine [17]*

## 9. Sammu- ja puutepinge

Pinge alla sattunud puu ligidal tekivad maapinnal sammupinged ja puu ning maapinna vahel puutepinged. Need pinged on ohtlikud elusolenditele, kes satuvad olema puu läheduses või kontaktis sellega. Kui elusolendit läbib piisava tugevusega elektrivool, võib ta selle tulemusena saada surma. Käesolev peatükk keskendubki sammu- ja puutepingetele ning elektrivoolu toimest inimesele.

### 9.1. Elektrivoolu toime inimesele

Inimese keha juhib elektrivoolu. Kui inimene puudutab pinge all olevat puud, hakkab tema keha läbima vool. Voolu toime sõltub voolu suurusest, kestusest, teekonnast ja inimese füüsilisest seisundist. Voolu suurus sõltub keha elektritakistusest (Joonis 17) ja voolu kulgemise teest läbi keha. Kõige ohtlikumaks peetakse südame piirkonda läbivat voolu. [12]

*Tabel 4. Elektrivoolu mõju inimesele. [12]*

Voolu suurus	Mõju inimesele
Alla 10 mA	Loetakse ohutuks sõltumata kestusest
1 mA	Vool on vaevu tajutav
1-6 mA	Valud ja krambid, kuid inimene on võimeline end vabastama
9 mA	Vabastuslävi, edasi hingamise katkemine ja lämbumine
16 mA	Ülemine piir, mille puhul keskmine inimene suudab end iseseisvalt vooluringist vabastada
20 mA	Respiratoorse muskulatuuri krambid
100 mA	Fibrillatsioonivoolu lävi
50-150 mA	Tugev valu, krambid, fibrillatsioon. Võimalik surm
2 A	Südame seiskumine, siseorganite vigastused. Kindel surm.

Üldiselt algab südame fibrillatsioon, kui vool ületab väärtuse

$$I_{fibr} = (0,12 \dots 0,2)\sqrt{t} \quad (9.1)$$

Kus t- voolu kestus, s. [12]

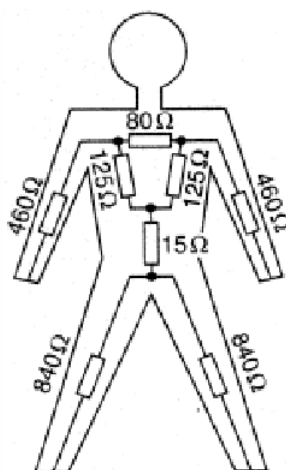
Inimesele loetakse ohutuks voolu 10...20 mA. Suurem vool kutsub esile lihaste krampe, hingamishäireid ja halvemal juhul ka südamelihase värelemise ehk fibrillatsiooni, mille tagajärjel võib lakata vereringe ning aju verevarustus. Kui aju ei saa ligi 5 minuti jooksul verd, võib järgneda surm, kui ei jõuta teha kontrašokki. [12]

Ohtlikkus sõltub voolu suurusest ja kestusest. Kõige ohtlikumaks peetakse voolu, mis läbib südame piirkonda. Inimsüdan läbiva voolu ohutuks kestuseks loetakse aega

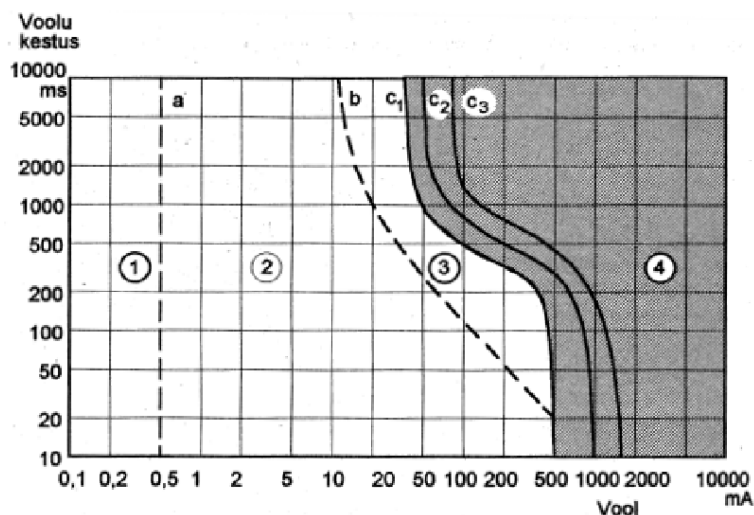
$$t < \frac{10}{I-10} \quad (9.2)$$

$t$  – voolu ohutu kestus sekundites,  $s$

$I$  – voolu efektiivväärtus milliamprites, mA. [12]



**Joonis 17 Inimese kehaosade orienteerivad takistused. [11]**



**Joonis 18 15...100 Hz sagedusega vahelduvvoolu toime sõltuvalt voolu suurusest ja kestusest [11].**

Joonisel (Joonis 18) on toodud vahelduvvoolu toime sõltuvus kestusest. Püstsirgeni  $a$  on voolu toime üldjuhul märkamatu. Sirge  $a$  ja kõvera  $b$  vahele jääva voolu suuruse toime on tavaliselt kahjutu. Kõverate  $b$  ja  $c_1$  vahele jäävate voolu suuruste toimed on tavaliselt ohutud. Kõverast  $c_1$  paremale jäävate voolu suuruste toime on selgelt ohtlik. Kõver  $c_2$  vastab südame fibrillatsiooni tõenäosusele 5%, kõver  $c_3$  tõenäosusele 50%, kõverast  $c_3$  paremal on fibrillatsiooni tõenäosus üle 50%. [12]



## 9.2. Sammu- ja puutepinge

Pinge alla sattunud puu ümbrusse tekivad erinevate potentsiaalidega maa-alad. Kui inimene satub sellesse piirkonda, võivad kahe jala vahel tekkida ohtlikult suured sammupinged. Kui inimene satub kokkupuutesse pinge all oleva puuga, võib puu ja maapinna potentsiaalide erinevuste, ehk puutepinge tõttu, inimest läbida vool. Liiga suured inimest läbivad voolud võivad põhjustada fataalseid tagajärgi.

Kui on teada pinnase eritakistus ja rikke eraldusaeg, saab arvutada lubatava sammupinge väärtused, kasutades valemit:

$$E_S = [R_B + (6\rho_S)] \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (9.3)$$

$R_B$  – inimese keha takistus.

$\rho_S$  – pinnase eritakistus.

$t_s$  – rikke eraldusaeg

$$k = \sqrt{S_B} \quad (9.4)$$

$S_B$  – empiiriline konstant, näitab inimese elektrilise šoki taluvust.

Valemist  $E_S = [R_B + (6\rho_S)] \frac{k}{\sqrt{t_s}}$  (9.3) selgub, et mida väiksem

on pinnase takistus, seda väiksem on lubatav sammupinge.

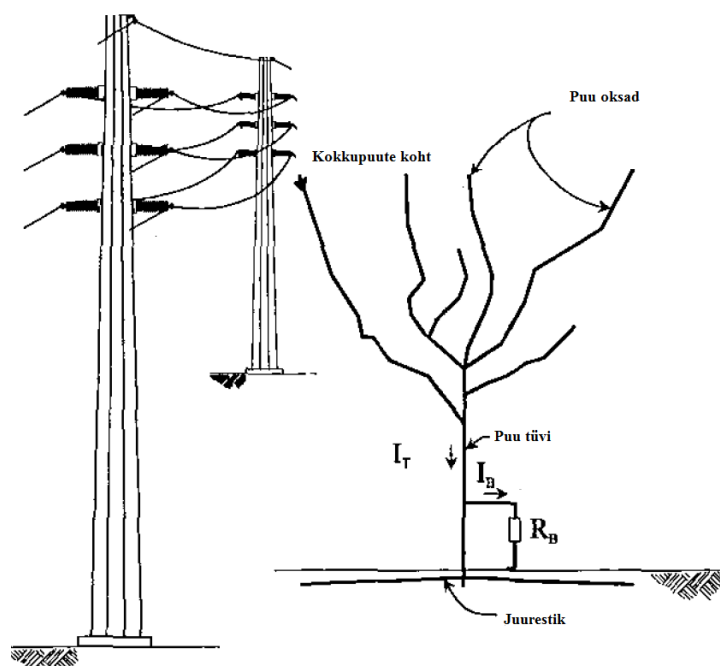
Dalziel leidis oma uurimuses, et elektrilise šoki lävi, mida talub 50 kg kaaluv inimene, on 0,0135. Seega võetakse  $k$  väärtuseks  $k_{50} = 0,116$ . Talutava voolu väärtuse saab arvutada valemiga nr 8.5 [16]

$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (9.5)$$

$I_B$  – inimese keha läbiv vool.

Kui rikke eraldusaeg on  $t=0,5$  s, siis 50 kg kaaluvale inimesele on talutav vool ligikaudu 0,164 A ehk 164 mA. Mida pikemaks läheb rikke eraldusaeg, seda väiksemat voolu inimene talub. Kui eraldusaeg on 3 sekundit, siis on talutav vool 67 mA. [16] Siit ilmneb ka põhjus, miks on vajalik rikke kiire tuvastamine ja rikkekoha väljalülitus.

W. K. Daily uurimuses modelleeriti inimese kontakti puuga, mis oli sattunud kokkupuutesse 138 kV õhuliini faasijuhiga, et saada selgust võimalikest sammupingetest ja inimest läbivatest vooludest.



**Joonis 19 Mudel inimese kokkupuutest pingesse sattunud puuga.  $I_T$ - puud läbiv vool. [15]**

Joonisel (Joonis 19) on kujutatud pinge alla sattunud puud, mille tüve puudutab inimene.  $R_B$  kujutab inimese, kes puudutab pinge alla sattunud puud, elektrilist takistust.  $I_B$  on inimest läbiva voolu suurus ning  $I_T$  on puutüve läbiv voolu suurus. Arvutuslikud tulemused on toodud allolevates tabelites ( Tabel 5, Tabel 6, Tabel 7 ja Tabel 8).

Modelleerimise käigus anti puule ja pinnasele erinevaid eritakistuse väärtusi, mis peaksid kujutama endast võimalikke erinevaid olukordi, mis võivad tekkida, kuna puu takistus varieerub väga laias vahemikus (peatükk 6.3).

**Tabel 5. Tekkiv puutepinge ning keha läbiv vool, kui pinnase eritakistus on  $50 \Omega\text{m}$ . [16]**

Puu eritakistus ( $\Omega\text{m}$ )	Keha läbiv vool (mA)	Puutepinge (V)
$1,72 \times 10^{-8}$	2356	1700
1	620	1580
5	543	592
10	493	331
25	449	143
50	399	73

**Tabel 6. Tekkiv puutepinge ning keha läbiv vool, kui pinnase eritakistus on 100  $\Omega\text{m}$ . [16]**

<b>Puu eritakistus (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>	<b>Keha läbiv vool (mA)</b>	<b>Puutepinge (V)</b>
1,72 x 10 <sup>-8</sup>	3532	2700
1	615	1682
5	535	885
10	499	560
25	444	265
50	391	140

**Tabel 7. Tekkiv puutepinge ning keha läbiv vool, kui pinnase eritakistus on 1000  $\Omega\text{m}$ . [16]**

<b>Puu eritakistus (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>	<b>Keha läbiv vool (mA)</b>	<b>Puutepinge (V)</b>
1,72 x 10 <sup>-8</sup>	2577	4100
1	427	2170
5	312	1890
10	289	1681
25	260	1264
50	235	895

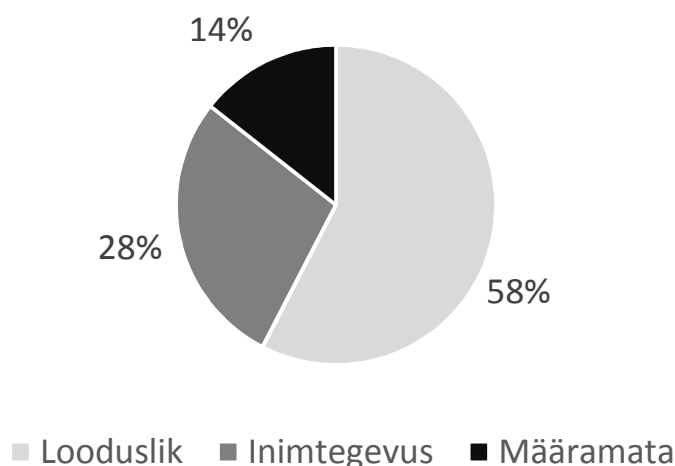
**Tabel 8. Inimesele mitteohtlikud puutepinged ja keha läbivad voolud erinevate pinnase eritakistuste juures ja kui rikke eraldusaeg on 0,5 s, inimese mass 50 kg ja inimese takistus 1000  $\Omega$ . [16]**

Pinnase eritakistus ( $\Omega$ m)	Keha läbiv vool (mA)	Puutepinge (V)
50	164	2132
100	164	2624
1000	164	1143

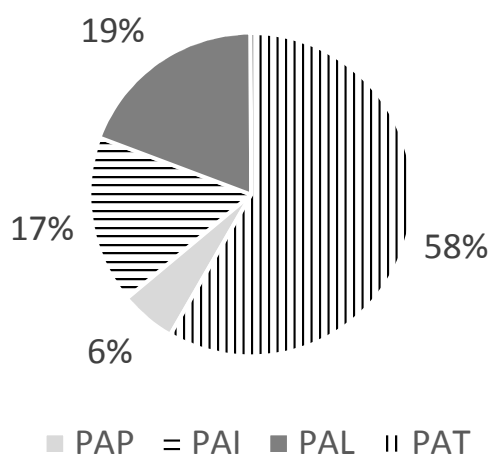
Arvutustulemustest (Tabel 5 kuni Tabel 8) erinevate eritakistuste väärtuste juures on näha, et keha läbivad voolud ja tekkivad puutepinged ületavad inimesele ohutu voolu ja puutepinge piirväärtusi (Tabel 8) 0,5 s rikke eraldusaja korral. Seega, kui inimene puutuks pinge alla sattunud puud, on tekkivad puutepinged suured ning keha läbiks eluohtlik vool. Kui rikke eraldusaeg on pikem kui 0,5 s, siis piirväärtused langevad veelgi ning oht inimesele kasvab. Seega on selliste rikete puhul väga tähtis rikke kiire tuvastamine ja liini väljalülitamine, et vähendada ajavahemikku, mil puu on pinge all.

## 10. Rikked

Elering AS registreeris aastatel 2005–2012 110 kV elektrivõrgus kokku 125 riket, mille põhjustasid õhuliinidele langenud puud (Joonis 20). Sektor „Inimtegevus” joonisel (Joonis 20) näitab inimtegevuse poolt (peamiselt liinikoridori hooldus) põhjustatud puude langetamistest tekkinuid rikkeid, sektor „Looduslik” näitab looduse poolt (tuul, tormid, trombid, jne) põhjustatud puude langemistest tekkinud rikkeid ning sektor „Määramata” näitab rikkeid, mille põhjustasid puud, aga põhjust, miks puud langesid, pole teada.



**Joonis 20 Rikete jaotus tekkepõhjustajate kaupa. Kogu 110kV õhuliinide ülekandevõrk. Perioodi 2005–2012 summa.**



**Joonis 21 Rikete jaotus käidusektorite kaupa. Kogu 110kV õhuliinide ülekandevõrk. Perioodi 2005–2012 summa.**

Jooniselt (Joonis 21) nähtub, et enim rikkeid on toimunud PAT (lõunasektoris) sektoris ning vähim PAP (põhjasektoris) sektoris. Suurima ja vähima rikete arvuga sektorite arvuline

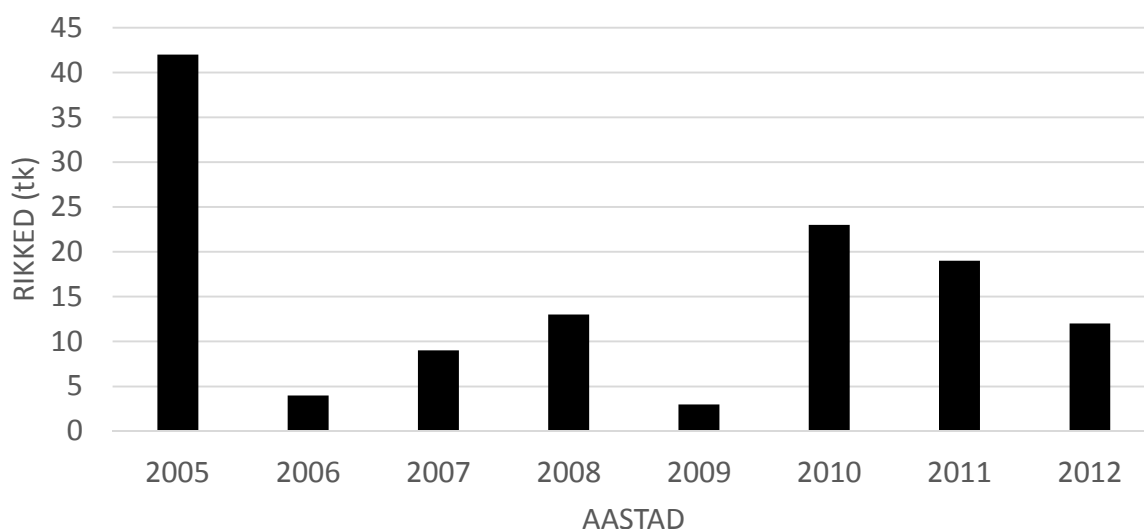
erinevus on ligi kümnekordne. Lõuna-Eestis, ehk PAT ja PAL (läänesektor) sektorites on toimunud 77% riketest ning Põhja-Eestis, ehk PAP ja PAI (idasektor) sektorites 23% riketest.

Õhuliinile langenud puude põhjustatud rikete korral toimus ainult 11% juhtudest liini edukas automaatne taaspingestamine (TLA).

**Tabel 9. 110 kV õhuliinide kogupikkused ning liini pikkus rikke kohta, sektorite kaupa**

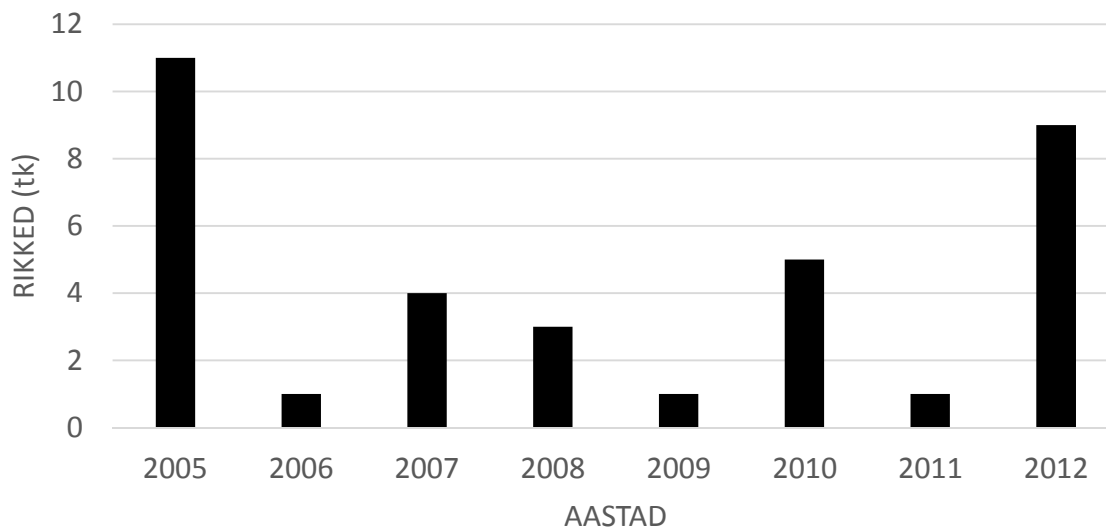
Sektorid	Liinide kogupikkus, km (%)	Kilomeetrit rikke kohta, km/tk
PAP	701 (21%)	100,1
PAL	1027 (30%)	42,8
PAI	873 (26%)	41,6
PAT	813 (24%)	11,1
PAP + PAI	1574 (46%)	56,2
PAL + PAT	1840 (54%)	19,0
PAP + PAL + PAI + PAT	3414 (100%)	27,3

Tabelis (Tabel 9) on käidusektorite kaupa toodud 110 kV õhuliinide kogupikkused ning liinikilomeetri pikkus ühe rikke kohta. Mida suurem on liinikilomeetri pikkus ühe rikke kohta, seda vähem rikkeid vastavas elektrivõrgus esineb. Vastav näitaja (km/tk) annab adekvaatsema tulemuse, kui vaid rikete registreerimine (tk), sest see võtab arvesse ka erinevate käidusektorite liinide kogupikkused. Kuna aga Elering AS-i liinide kogupikkused on käidusektorite vahel siiski suhteliselt võrdselt jaotunud, on ka näitajad (km/tk) (Tabel 9) paremuselt reastatud sarnaselt erinevates sektorites toimunud rikete näitajatega (%) (Joonis 21). Erinevus ilmneb vaid sektorite PAL ja PAI omavahelises järjestuses.



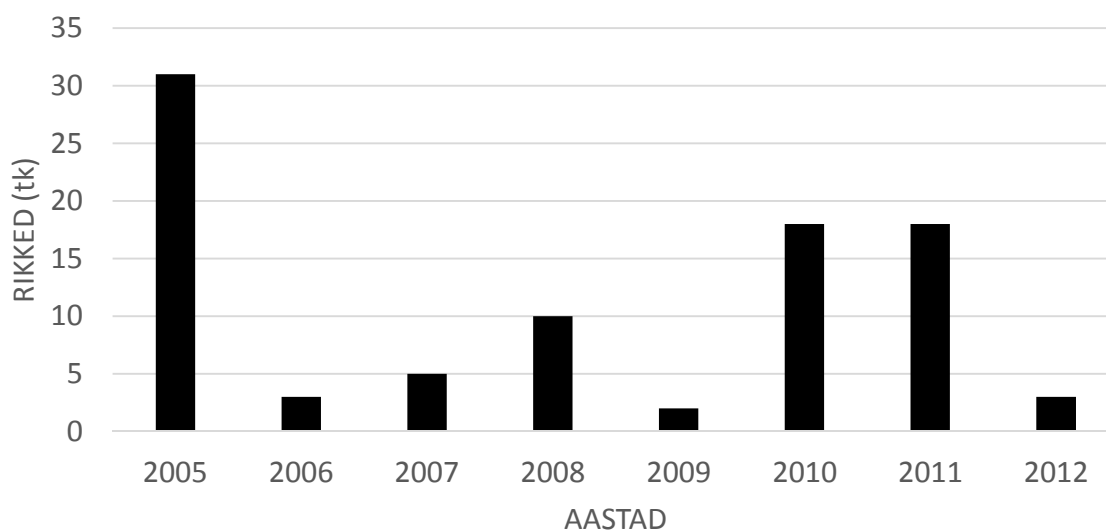
**Joonis 22 Rikete arv aastas. Kogu 110 kV õhuliinide ülekandevõrk.**

Jooniselt (Joonis 22) nähtub, et summaarne rikete arv aastas varieerub sesoonselt märkimisväärselt. Tugevalt varieeruvad on ka aastased inimtegevuse poolt põhjustatud rikete arvud (Joonis 23).



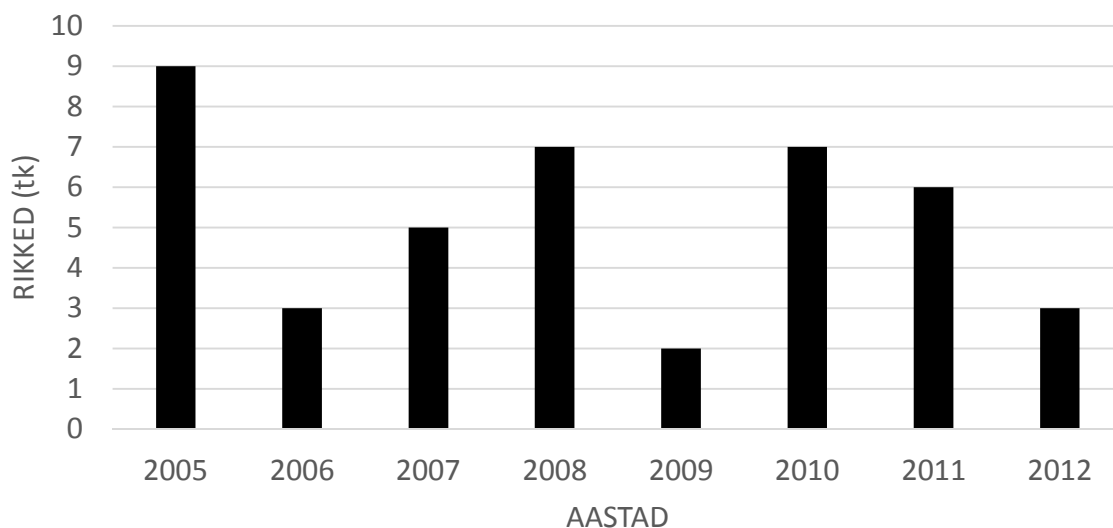
**Joonis 23 Inimtegevuse põhjustatud rikete arv aastas. Kogu 110 kV õhuliinide ülekandevõrk.**

Aastased, looduse poolt põhjustatud (kuhu hulka võib tinglikult lugeda ka määramatud rikked) rikete arvuline jagunemine on toodud joonisel (Joonis 24).



**Joonis 24 Aastased looduslike ja määramata rikete arvu summad. Kogu 110 kV õhuliinide ülekandevõrk.**

2005. aasta suure rikkearvu põhjuseks (Joonis 22 ja Joonis 24) on 09.01.2005 toimunud „jaanuaritorm” mil ühe päeva jooksul leidis aset kokku 22 rikkejuhtumit. Samuti on aastatel 2008, 2010 ja 2011 toimunud väiksemaid torme ja trombe, kus ühel või mitmel lähestikusel päeval on toimunud mitu rikkejuhtumit: 08.06.2008 – kolm juhtumit, 08.08.2010 – seitse juhtumit, 14-15.08.2010 – neli juhtumit ja 26-27.12.2011 – kaksteist juhtumit.



***Joonis 25 Modifitseeritud aastased looduslike ja määramata rikete arvu summad. Toimunud riketest on eemaldatud suuremate tormide ja trombide poolt põhjustatud ühel või mitmel järjestikusel päeval toimunud rikked. Kogu 110 kV õhuliinide ülekandevõrk.***

Kui toimunud looduslikest ja määramata rikete arvu summast eemaldada suuremate tormide ja trombide poolt põhjustatud ühel või mitmel järjestikusel päeval toimunud rikked, siis muutub rikete aastane jaotus oluliselt ühtlasemaks (Joonis 25).

Oluline on märkida, et ca pooled looduslikest ja määramata rikkejuhtumitest on põhjustatud just suuremate trombide ja tormide tõttu.

### **10.1. Liini kaitseautomaatika poolt registreeritud rikete ostsillogrammid**

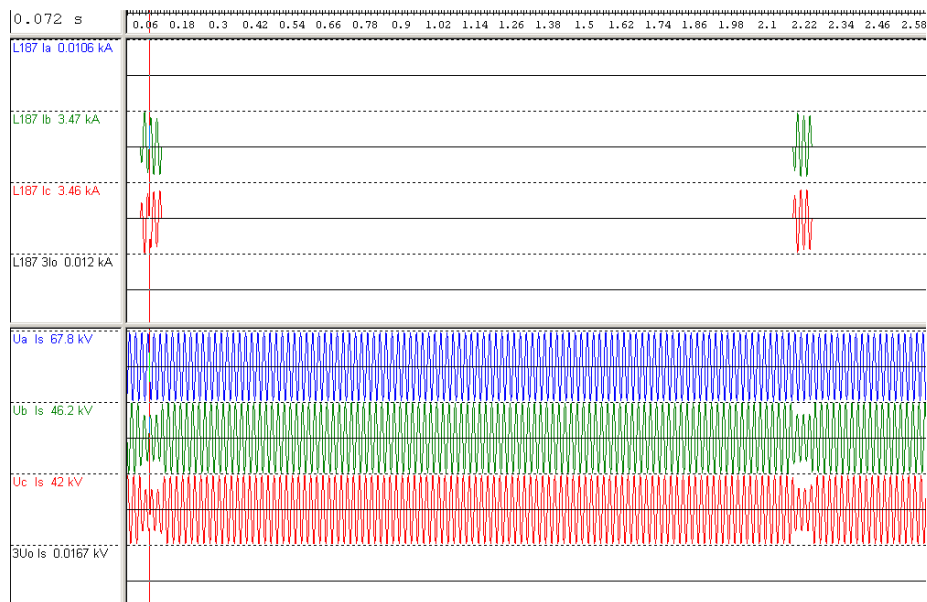
Vaatluse all olevast 12-st lühisest, mis leidsid aset 2012. aastal, on ostsillogrammi andmed 10 kohta, sest liini L051 (Võru AJ – Soo AJ) ja L145/L044 (Tõrva – Valga) lühiste kohta, mis toimusid vastavalt 17.05.2012 kl 10:34 ja 13.02.2012 kl 14:13, ostsillogrammid puuduvad. Soo AJ kohta REMI (automaatne rikkesalvesti) andmeid pole ja Võru AJ-s on REMI registreerinud L143A (Võru AJ – Sõmerpalu AJ) kahe faasi vahelise lühise. L051-l eraldi rikete registreerimise seade puudub.

2012. aasta esimeses pooles registreeritud lühised jagunevad iseloomu järgi kahte gruppi:

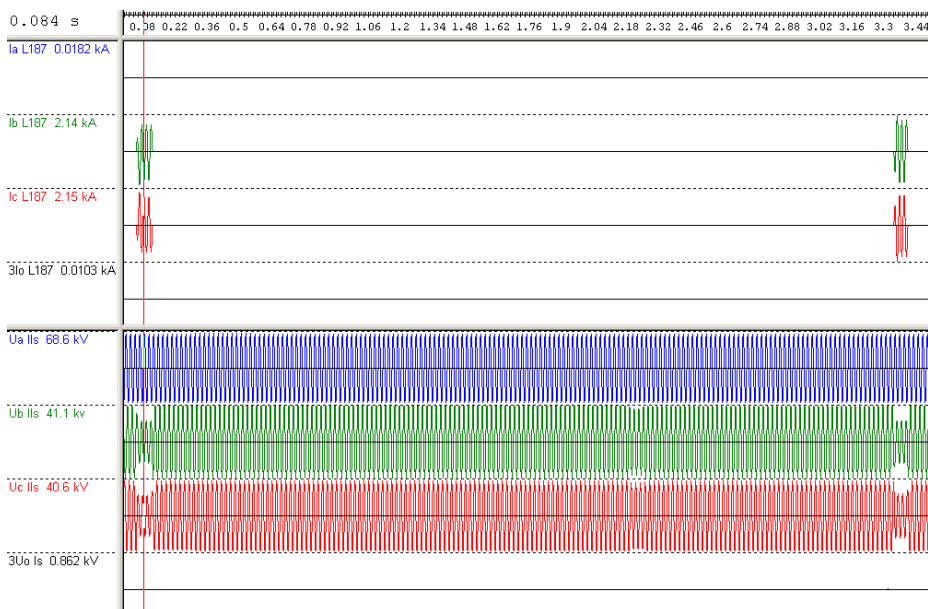


### 1. Faas-faas lühis

Nende puhul on tekkinud järsu tõusuga märkimisväärse suurusega lühisvool (0,7...4 kA), millele relekaitse on reageerinud liini väljalülitamisega 70...180 ms jooksul. Mõnel juhul on peale esialgse lühise väljalülitamist TLA üritanud liini uuesti sisse lülitada 2...6 s jooksul, kuid ilma eduta. Püsiva lühise tõttu on see uuesti välja lülitunud.



**Joonis 26 Püsiv faasidevaheline lühis L187 (Paide-Rapla) 17.06.2012 kl 18:00, Paide REMI salvestus**

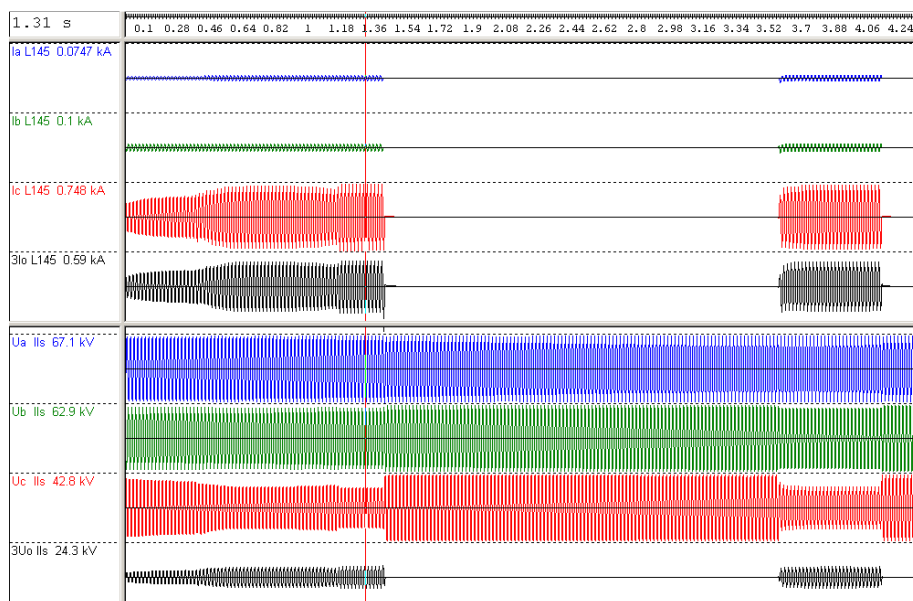


**Joonis 27 Püsiv faasidevaheline lühis L187 17.06.2012 kl 18:00, Rapla REMI salvestus**

Analoogseid (Joonis 26 ja Joonis 27) lühiseid esines neljal korral 11-st. Kuna lühis tekib kahe faasi vahel ja faas-maa lühisele viitav neutraalivool puudub, on mõnevõrra küsitav, kas need lühised on üldse õhuliinile kukkunud puude põhjustatud.

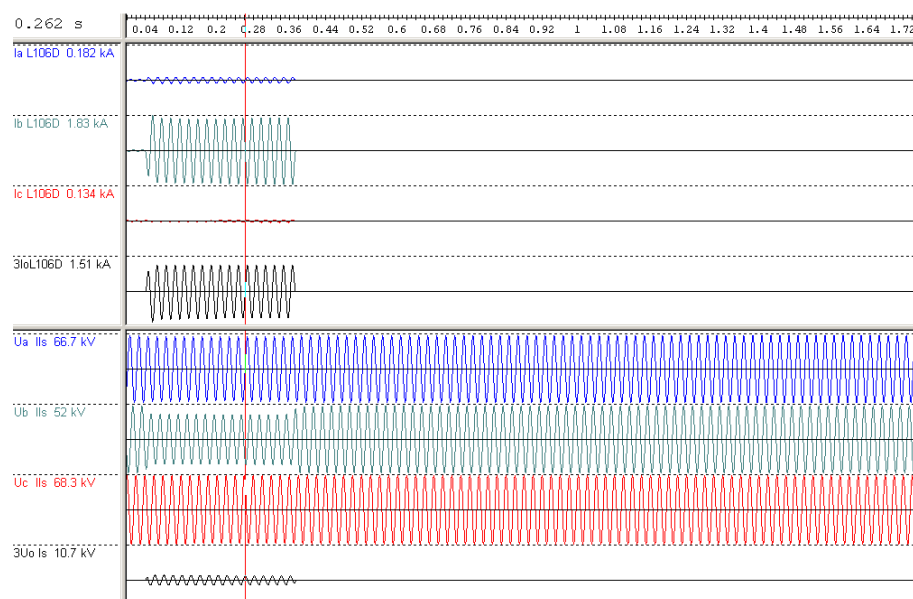
## 2. Faas-maa vahelised lühised

Taolisi lühiseid esines kuuel korral, kusjuures igal korral olid lühistel teatavad iseärasused.



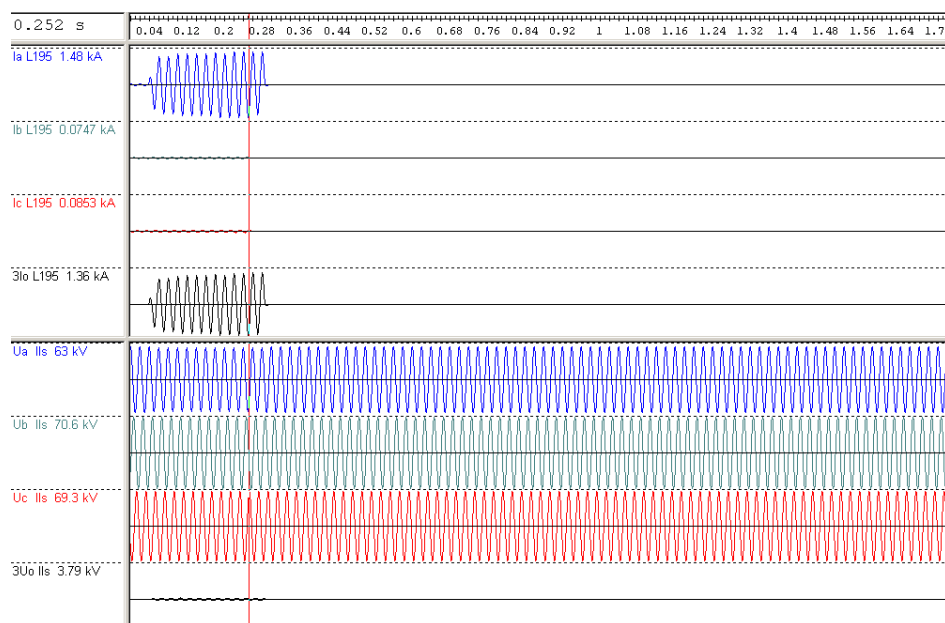
**Joonis 28 Faasi ja maa vaheline lühis L145/L044 04.01.2012. Tõrva REMI salvestus**

Esimene selletaoline lühis toimus Tõrva-Valga liinil L145/L044 04.01.2012. Ilmselt põhjustas lühise puu langemine C-faasile, misjärel hakkas voolutugevus läbi puu järjest suurenema. On aimatav, et vool on suurenenud juba enne ostsillogrammi nullhetke. Releekaitse on liini välja lülitanud hetkel  $t=1,45$  s. Hetkel  $t=3,55$  s on liin uuesti sisse lülitatud, kuid kuna lühis on jätkuv, on see uuesti välja lülitatud  $t=4,15$  s. Lühisvool kasvas ostsillogrammi algusest arvates ca 0,4 kA-st kuni 0,75 kA.

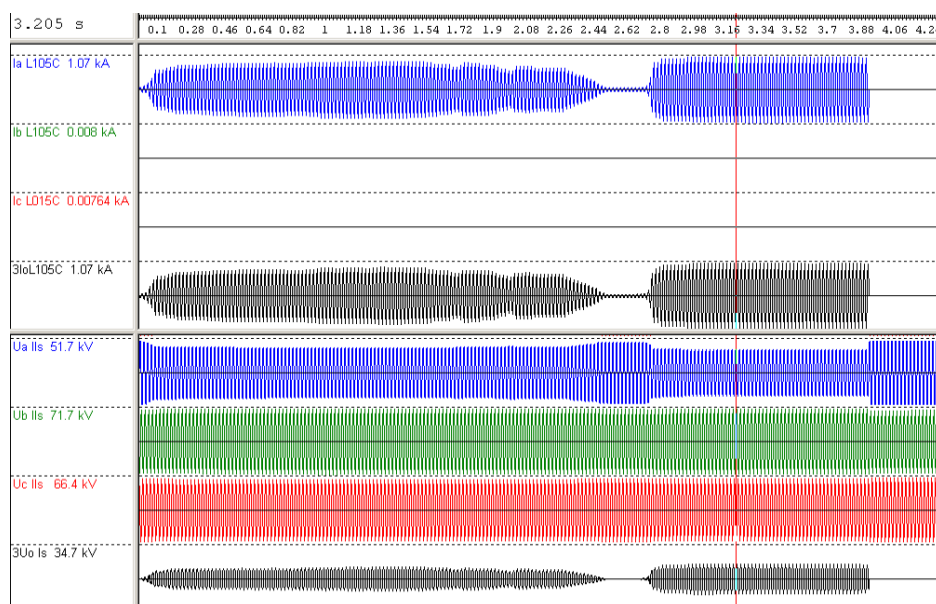


**Joonis 29 Faasi ja maa vaheline lühis L106D/B 09.01.2012. Sindi REMI salvestus**

Joonistel (Joonis 29 ja Joonis 30) on näha tavalist faasi ja maa vahelist lühist. Vool tõuseb järsult väärtuseni 1,4... 1,9 kA ning relekaitse lülitab selle välja 250... 350 ms jooksul. L195 lühise jooksul on näha ka mõningane voolu suurenemine lühise jooksul.

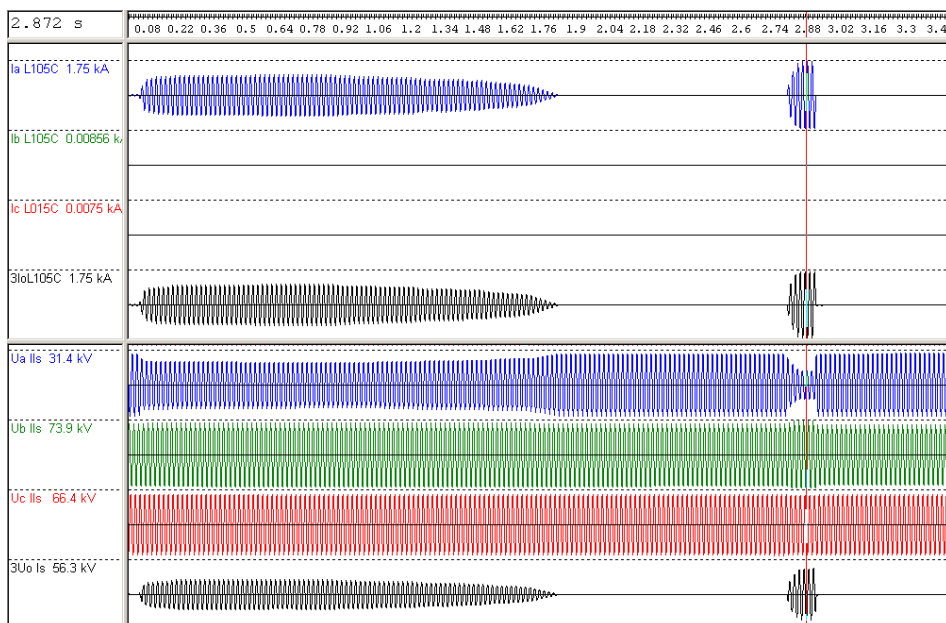


**Joonis 30** Faasi ja maa vaheline lühis L195 12.01.2012. Aruküla REMI salvestus



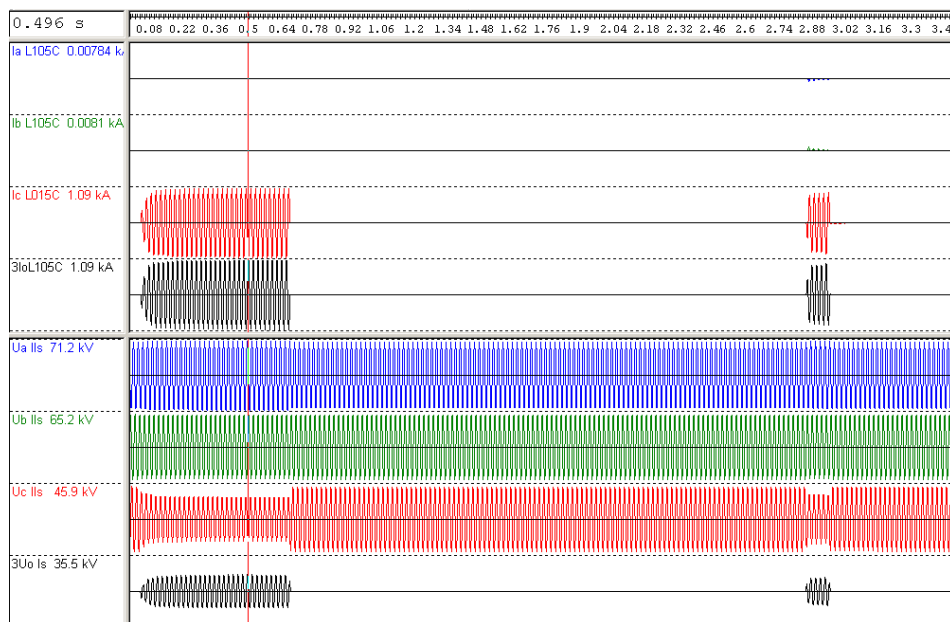
**Joonis 31** Faasi ja maa vaheline lühis L105C 20.01.2012. Viljandi REMI esimene salvestus kl 14:04.08

L105C-l läks A-faasi lühisesse 20.01.2012. REMI on teinud kaks väikese ajavahega salvestust algusaegadega 14:04.08 ja 14:04.16, seega on tegu sisuliselt sama lühisega (Joonis 31 ja Joonis 32). Mõlema salvestuse puhul on iseäralik see, et lühis on kahe osaga. Esimene lühisvool algab järsu tõusuga ning kestab 2,4 s, millest viimase kolmandiku jooksul näitab langevat trendi.



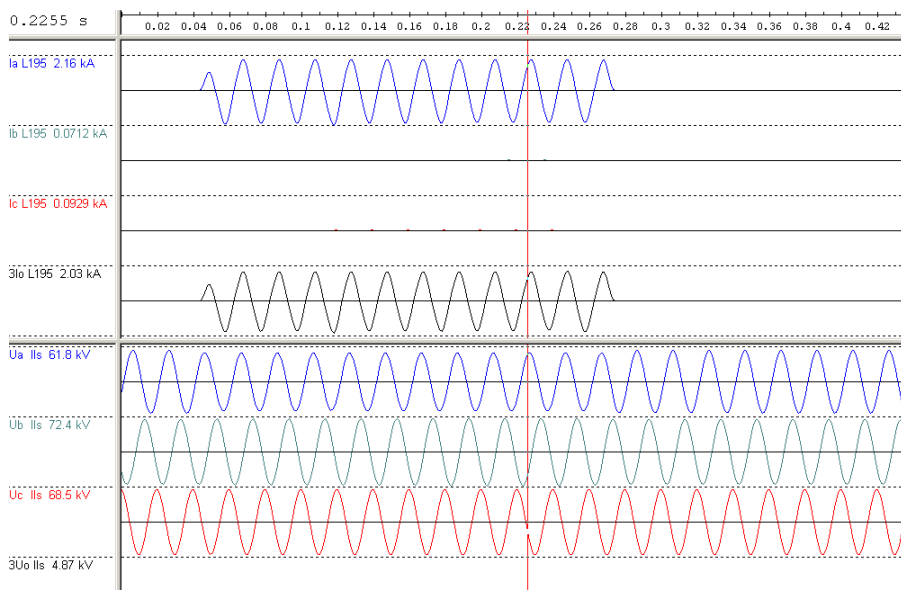
**Joonis 32** Faasi ja maa vaheline lühis L015C 20.01.2012. Viljandi REMI teine salvestus kl 14:04.16

Kohe peale esimese lühise taandumist tekib uus lühis suurusega 1,1 kA, mille automaatika välja lülitab. 4 s peale teise lühise väljalüümist tekib uus järsu tõusu ja aeglase langusega lühis, mille arvvaartus on umbes 1,1 kA. 1 sekund peale selle lõppemist tekib uus järsu tõusu ja suurema vooluga (1,75 kA) lühis, mis 200 ms jooksul välja lülitatakse.



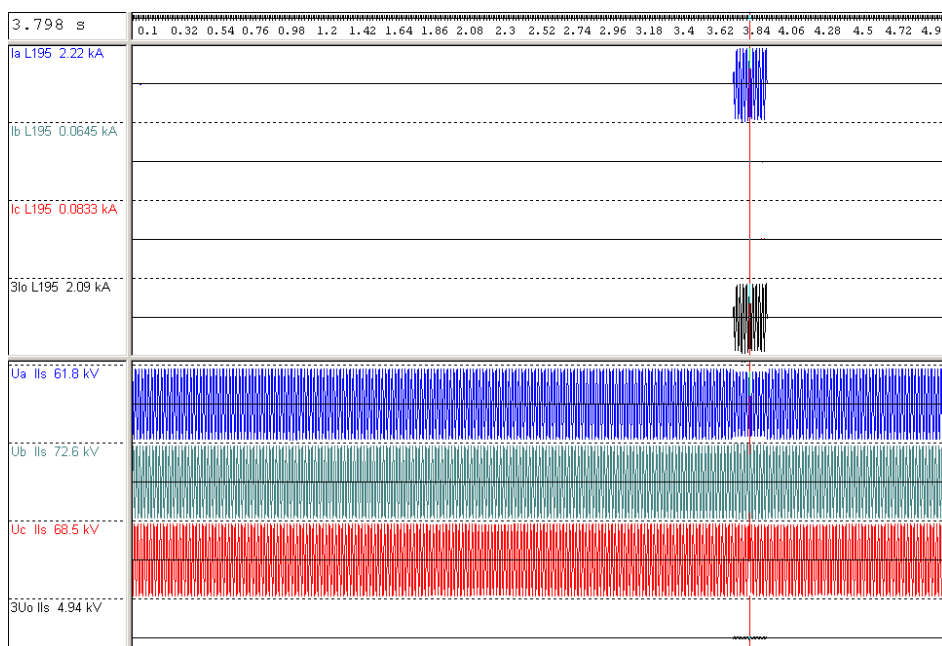
**Joonis 33** Faasi ja maa vaheline lühis L105C 23.01.2012, Viljandi REMI salvestus

Joonis 33 on näha L105C-l 3 päeva hiljem toimunud lühise salvestus, mis sarnaneb eelneva kahe lühise pildiga. Tekib ca 1,1 kA suurune lühis, mille relekaitse välja lülitab ning TLA umbes 2 s möödudes ebaedukalt taaslülitada proovib. Ilmselt on tegu liinile langenud puuga.



**Joonis 34 Faasi ja maa vaheline lühis L195 28.01.2012. Aruküla REMI esimene salvestus kl 14:53.06**

Joonistel (Joonis 34 ja Joonis 35) on näha L195-l 28.01.2012 A-faasis toimunud lühis. Mõlemad salvestused on toimunud lühikese ajavahega, seega on tegu sama lühisega. Lühise mõlemad osad on järsu algusega ning suurenevad kuni 2,2 kA. Releekaitse lülitab lühised u 250 ms jooksul välja. Lühise osade vahele jääb ca 8 s. Ilmselt on tegu puuga.



**Joonis 35 Faasi ja maa vaheline lühis L195 28.01.2012. Aruküla REMI teine salvestus kl 14:53.11**

Eri tüüpi lühiste võrdlemisel selgub ka see, et faas-maa tüüpi lühised antud valimis toimusid eranditult jaanuarikuus ja faas-faas tüüpi lühised hakkasid toimuma alates märtsikuust.

Ostsillogrammidest nähtub, et toimunud rikete kestused varieeruvad 0,25 – 2,5 sekundini. See viitab tõigale, et osa rikkeid on olnud lühema arenguga kui teised ning võib eeldada, et osade rikete esialgne arenemine jäi vaadeldud ostsillogrammide salvestustest välja (Joonis 28 ja Joonis 31).

## **10.2. Liini kaitseautomaatika poolt registreerimata rike**

2012. aastal toimus liinil L182 (Järve – Kiisa) rike, kus kaitseautomaatika ei reageerinud liinile langenud puu poolt põhjustatud ühefaasilisele rikkevoolule. Rikkest, et puu on langenud liinile, teatasid võrguettevõttele kohalikud, Kasemetsa suvilarajooni elanikud. Puu lähiümbruses olev maapind oli silmnähtavalt kuivanud ning seda kattev taimestik osalise põlemise/söestumise tundemärkidega. Toimunud rike oli tõukeks antud uurimustöö algatamiseks, et selgitada välja, kas ja kuidas saaks tulevikus selliseid olukordi vältida.

## 11. Liinikaitised

Elektriliini kaitsemiseks on elektriliinid varustatud erinevat tüüpi kaitseautomaatika seadmetega. Kaitseautomaatika ülesandeks on võimalikult kiirelt ja selektiivselt lülitada välja rikkega liin, kaitstes ning vältides niiviisi rikkekoha edasist kahjustumist ning rikke edasikandumist teistesse elektrisüsteemi elementidesse.

Eesti 110 kV elektrivõrgus kasutatakse liinide kui elementide kaitsemiseks peamiselt kolme liiki kaitseid: voolukaitse, distantkaitse ja diferentsiaalkaitse.

### *Voolukaitse*

Liigvoolukaitse tunnussuurusteks on faasivool, summavool ( $3I_0$ ) ja vastujärgnevusvool. Kui mõni neist nimetatud tunnussuurustest ületab kaitsele seatud sätteväärtuse, siis kaitse rakendub. Liigvoolukaitse on kohustuslik releekaitse, mis kaitseb liini maalühiste ja liigvoolude eest. Voolukaitset kasutatakse üldjuhul reservkaitsmena ning see rakendub juhul, kui põhikaitse tõrgub.

### *Distantkaitse*

Distantkaitse tunnussuurus on takistus, enamasti impedants. Kasutatakse nii faaside vaheliste lühiste kui ka maalühiskaitsena. Distantkaitse on suhteliselt selektiivne ala-(minimaal)kaitse. Kasutatakse nii põhi- kui ka reservkaitsena. Distantkaitse võib olla hetk- või viitkaitse. Selektiivsuse tagamiseks tehakse distantkaitse tavaliselt suunatud kaitsena ja mitmeastmelisena. Samasuunaliste kaitseastmete selektiivsus tagatakse viidetega.

### *Piki-diferentsiaal- ja võrdluskaitse*

Piki-diferentsiaal- ja võrdluskaitse tunnussuurus on voolumoodulite või voolumoodulite ning – faaside (diferentsiaalkaitse) või voolufaasi või elektrilise suuruse suuna (võrdluskaitse) erinevus kaitseobjekti otstes. Võrdluskaitse kasutab sidekanalit, diferentsiaalkaitse ei kasuta.

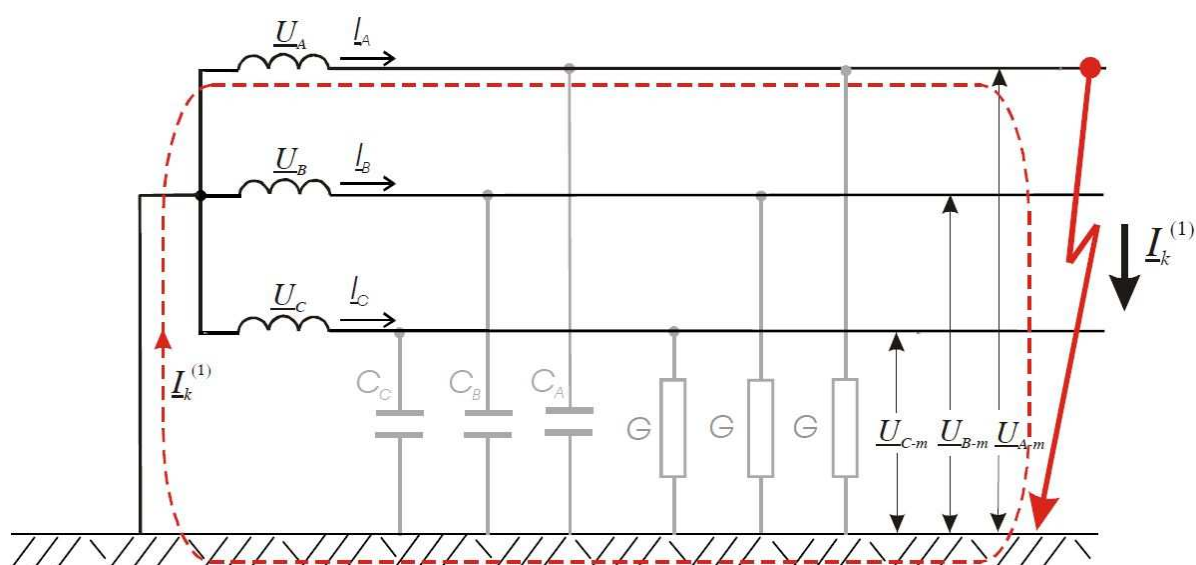
### 11.1. Liini kaitseautomaatika sisendid

Kaitseautomaatika sisendsignaalideks on enamasti pinge- ning voolutrafodest tulevad pinge- ja vooluväärtused ning tänapäeval aina enam ka eritüüpi sidekanalid teiste kaitseautomaatika seadmetega suhtlemisel.

Elektriliini suurima ohuga riketeks on erinevad lühised. Lühiste, eriti metalsete lühiste korral toimub liini faasi(de)s järsk voolu kasv ning rikkekohas ja seda toitvate alajaamade lattidel

oluline pinge vähenemine. Seega on eritiüpi ja –kaugusega lühiste tuvastamisel kaitseautomaatika poolt olulisteks sisenditeks just liini otstesse paigaldatud voolu- ning pingemõõtetrafod. Kui liini lühist toitvate alajaamade lattidel tekkivad pingelohud jäävad üldjuhul suurusjärgu kuni mitmekümned protsendid liini nimipingest, siis rikkega faasijuhtides kulgevad lühisvoolud võivad rikketa faasijuhtide koormusvooludest erineda mitmeid, isegi kümneid ja sadu kordi.

Eesti 110 kV elektrivõrgus on tähtühendusgrupiga trafode neutraal üldjuhul jäikmaandatud. See tähendab, et ühefaasilise lühise korral kulgeb lühisvool ahelas „faas-lühis-maa-neutraal” (Joonis 36).



**Joonis 36 Jäikmaandatud neutraaliga elektrivõrk ühefaasilises A-faasi lühises**

Kuna neutraal on jäikmaandatud, siis ühefaasilise lühise korral ülejäänud – terve isolatsiooniga – faasides pinge faas-maa üldjuhul oluliselt ei muutu. Muutuse suurus oleneb muidugi lühisekoha ning võrgu maandustakistustest ja lühisvoolu suurusest, kuid nendele vaatamata ei esine praktikas jäikmaandatud võrgus terve isolatsiooniga faasides pinge faas-maa tõusu sellisel määral, kui maandamata- või resonantsmaandatud neutraaliga elektrivõrkudes, kus see võib tõusta kuni  $\sqrt{3}$  korda või isegi mõnevõrra rohkem.

Eelnevast võib järeldada, et jäikmaandatud neutraaliga elektrivõrgus ei mõjuta ühefaasilise rikkega lühis oluliselt ülejäänud – terve isolatsiooniga – faaside pinged. Küll aga võib põhjustada ühefaasiline lühis pingelangu – seda liini toitvate alajaamade lattidel. Pingelangu tekitavad väikese takistusega lühised (metalne, elektrikaar) mis põhjustavad suuri lühivoole.



Suure takistusega ühenduse (nt liinile langenud kuivanud puu) korral võivad rikkevoolud olla sedavõrd väikesed, et alajaama lattidel pole pingelang märgatav.

Pingete väärtustest rikke korral, kus puu on langenud liinile, osutub otstarbekamaks jälgida liini faasivoolude muutuseid.

## 11.2. Kaitseautomaatika reageerimine liinile langenud puu rikkele

Antud uurimuse põhiprobleemiks on suure takistusega faas-maa ühendusega rikked, mis põhjustavad suhteliselt väikeste väärtustega rikkevoolusid. Eelpool nimetatud kolmest liinikaitse liigist tuleb sedalaadi rikete tuvastamisel lugeda sobivaimaks *Piki-diferentsiaal- ja võrdluskaitset*. Võrdluskaitsega saab võrrelda liini sisenevaid ja liinist väljuvaid voole. Seega, kui ühe faasi voolus tekib võrreldes teis(t)es faasi(de)s voolava(te) voolu(de)ga piisav erisus, rakendub võrdluskaitse. Võrdluskaitse rakendumine võib tähendada ka vaid häiringusignaali saatmist dispetšerile, mitte liini automaatset väljalülitist.

Et vältida võrdluskaitse väär- või liigrakendumist, tuleb kaitsele seada sobiv sätteväärtus, kus on arvestatud nn tundetuse piiriga, et kaitse ei reageeriks nt signaalimürale või mõõteväärtustele, mis jäävad samasse suurusjärku mõõteahela vea väärtustega. Mõõteahela mõõteulatus ning -viga sõltuvad: nt kaitse analoog-digitaal muunduri ulatusest, ribalaiusest ja vertikaalresolutsioonist, voolutrafol aga peamiselt täpsusklassist, nimivoolust ja -võimsusest.

Eesti 110 kV elektrivõrgus kasutatakse peamiselt kaitsevoolutrafosid, mille täpsusklass on 5P. Kasutatavate voolutrafode primaar-nimivoolud on üldjuhul suurusjärgus 600 – 1000 A ja sekundaar-nimivoolud 1A – rekonstrueeritud alajaamades ja 5A – vanemates alajaamades.

**Tabel 10. Mõõtevoolutrafode lubatavad voolu- ja nurgavead**

Täp- sus- klass	Vooluviga % voolul $I_p/I_{pn}$						Nurgaviga ' voolul $I_p/I_{pn}$				
	0,01	0,05	0,20	0,50	1,00	1,20	0,01	0,05	0,20	1,00	1,20
0,1		0,4	0,2		0,1	0,1		15	8	5	5
0,2		0,75	0,35		0,2	0,2		30	15	10	10
0,2S	0,75	0,35	0,2		0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5		1,5	0,75		0,5	0,5		90	45	30	30
0,5S	1,5	0,75	0,5		0,5	0,5	90	45	30	30	30
1,0		3,0	1,5		1,0	1,0		180	90	60	60
3,0				3,0		3,0					
5,0				5,0		5,0					

Oluline on ka meeles pidada, et kasutatavad kaitsevoolutrafad on peamiselt mõeldud liigkoormus- ja lühisvoolude mõõtmisteks. Põhivõrgus laialt levinud kaitsevoolutrafade tüüp 5P20 täpsuspiiri-nimiprimaarvool on 20, st primaarvoolu suurimat väärtust, milleni voolutrafo peab tagama komposiitveale esitatud nõuded. Samaselt on ka kaitseleeseadmed ette nähtud registreerima ja reageerima peamiselt suurtele, liig- ning lühisvooludele. Kuna oluline on suurte voolude seire, pole kaitsevoolutrafade korral täpsusklass (5P) nii oluline kui nt kommerts-mõõtmiste korral (0,2S) (Tabel 10).

Kuna kaitseleeseadmed on ette nähtud registreerima suuri voole ning seejuures kasutatakse ka mõõtmistel suhteliselt ebatäpseid kaitsevoolutrafosid, siis selline seadmete konfiguratsioon pole kuigi soodus tuvastamiseks just väikeseid voolude erinevusi, mida võivad põhjustada õhuliinile langenud suhteliselt kuivad puud.

**Tabel 12. 600 voolutrafo vooluviga**

$I_p$ (A)	0,2S, $\pm I_p$ (A)	5P, $\pm I_p$ (A)
6	0,05	
30	0,09	
120	0,24	
300	0,60	15
600	1,20	
720	1,44	36

**Tabel 11. 1000A voolutrafo vooluviga**

$I_p$ (A)	0,2S, $\pm I_p$ (A)	5P, $\pm I_p$ (A)
10	0,08	
50	0,15	
200	0,40	
500	1,00	25
1000	2,00	
1200	2,40	60

Tabelites (Tabel 12 ja Tabel 11) on toodud 600 ja 1000 A voolutrafo vooluvead erinevate täpsusklasside 0,2S (mõõtevoolutrafo) ja 5P (kaitsevoolutrafo) korral. Nagu näha, erinevad mõõte- ja kaitsevoolutrafade vooluvead märgatavalt.

Praktiline kogemus liinide piki-diferentsiaal- ja võrdluskaitsete seadistamistel näitab, et kaitsete tundetuse piiriks on üldjuhul 10% voolutrafo nimivoolust. See tähendab, et kaitse ei registreeri liinil summaarseid voolusid, mis jäävad alla 10% voolutrafo nimivoolust. See tähendab, et 600 A voolutrafo korral jäävad märkamatuks liinivoolud alla 60 A ning 1000 A voolutrafo korral vastavalt alla 100 A liinivoolud. Arvestada tuleb ka sellega, et voolutrafade täpsus väheneb väikestel vooludel (Tabel 10) ning 5P täpsusklassiga kaitsevoolutrafade kasutamisel võivad mõõtevead liini voolutrafade 10% koormatuse korral ulatuda kümnetesse ampritesse.

Järelikult, suurendamiseks kaitse täpsust, tuleks kaitsevoolutrafade klassi 5P asemel kasutada voolutrafo tüüpi 0,2S. Sel juhul ulatuksid mõõtevead mõne amprini, mitte kümnetesse ampritesse.

**Tabel 13. Mõõteveavoolule vastav aktiivtakistuse suurus**

I (A)	R (kΩ)
0,5	142
1	71
2	36
15	4,7
30	2,4
60	1,2

Tabelist (Tabel 13) nähtub mõõteveavoolu suurustele vastav aktiivtakistuse suurus, kui liini faasipinge on 71kV. Kui võrrelda neid takistusi eelpool toodud puude takistusi esitava tabeliga (Tabel 2), kus puude mõõdetud takistused varieeruvad vahemikus 12 – 610 kΩ ja keskmiseks takistuseks on 33 kΩ, on ilmne, et 0,2S tüüpi voolutrafode kasutamisel on võimalik tuvastada suur osa õhuliinidele langenud potentsiaalsetest puudest üsna varakult.

Voolutrafode täpsusklassi kõrval on väga oluline ka kaitseautomaatika 10%-lise tundetuse tsooni võimalik vähendamine, sest 110 kV liini korral tähendab 60 A voolu, et liin kannab edasi võimsust 12,8 MW ja 100 A voolu korral – 21,3 MW. Nimetatud ülekandevõimsused pole aga sugugi väikesed sellise nimipinge klassiga õhuliinide jaoks.

## 12. Soovitused

Et vältida õhuliinidele langevate puude poolt põhjustatud rikkeid, tuleb õhuliini koridore korraliselt hooldada. Rikkeandmete analüüsist ilmnes, et üsna märkimisväärse osa rikestest on põhjustatud liinikoridoride hooldajate endi poolt (Joonis 23). Seega on soovitatav hooldustöödel kasutada õigesti koolitatud ning pädevaid töövõtjaid, kes ei langetaks puid õhuliinidele.

Soovitusi õhuliini rikkeautomaatika seadistamisel:

Üks kergemini teostatav tegevus on kaitseautomaatika (piki-diferentsiaal- ja võrdluskaitse) häiresignaali (rikkevoolu)sätete viimine võimalikult madalale tasemele, et kaitse registreeriks õhuliinile langenud puude poolt põhjustatud rikkevoole.

Uurida võimalusi, kuidas vähendada kaitseautomaatika seadmete voolusisendite 10%-list tundetuse tsooni.

Kui võimalik, siis kasutada kaitseautomaatika seadme sisendvoolude mõõtmisel täpsemaid 0,2S tüüpi mõõtevoolutrafosid praeguste 5P asemel.

Tuleb mainida, et rikkeautomaatika seadistamise soovitused vajavad täpsemat ja edasist uurimist ning seadmetel ka praktilist laboratoorsete katsetuste teostamist. See on vajalik veendumaks, kas ning mil määral on soovituste teostamine võimalik hetkel kasutuses oleva seadmepargiga ja kui otstarbekaks see kujuneks.

## 13. Kokkuvõte

Eesti 110 kV ülekandeliinide kogupikkuseks on ca 3 480 km. See on ühtlasi ka põhivõrgu suurima pikkuse ja ulatusega võrk, mis katab suuremalt osalt tervet Eestit, välja arvatud Hiiumaa. Oma ulatuslikkuse ja maagabariidiga, mis ei ületa kindlalt puude kõrgusi, on 110 kV õhuliinid alati puude poolt tekitatavatele riketele. Puud võivad kukkuda liinidele ning tekitada lühiseid. Kuna 110 kV õhuliinidel kasutatakse paljasjuhtmeid, siis on kontakt vahetu ning lühis tekib kohe.

Puud on ehituselt sarnased. Põhiosadeks on puukoor, niin, kambium, malts- ja lülipuit ning säsi. Kõik need osad on puu elutegevuse juures tähtsad ja omavad kindlat rolli. Puul on kolm erinevat suunda: tangentsiaal-, radiaal- ning pikisuund. Kõikides nendes suundades on puu omadused mõnevõrra erinevad. Arukask, hall lepp, harilik haab ning harilik kuusk on Eestis väga levinud puud ning omavad pinnapealset juurestikku, mistõttu on nad alati tugeva tuule korral murduma.

Puidu suhteliseks niiskuseks on puidus leiduva veemassi suhe absoluutselt kuiva puidu massi, mida väljendatakse protsentides. Üldjuhul kasutatakse absoluutset niiskuse sisaldust. Niiskuse sisaldus puus varieerub nii kõrguses kui ka läbilõikes. Okaspuudel kasvab kõrguses niiskuse sisaldus märgatavalt, kuid lehtpuudel võib niiskus mõnevõrra langeda või siis tõusta. Läbilõikes on puu niiskeim osa maltspuit ja kõige kuivem lülipuit. Okaspuude puhul on erinevus väga suur, samas kui lehtpuudel on niiskuse muutus ühtlasem.

Puu elektrilisi omadusi mõjutavaid tegureid on mitmeid. Puu elektriline takistus on mittelineaarne funktsioon puu niiskusest ja puule rakendatava pinge sagedusest ning amplituudist. Enim mõjutab puu elektrilisi omadusi vesi. Kui puu on veest üleküllastunud, võib puu elektrijuhtivus sarnaneda vee omale, sealjuures mõjutab niiskuse sisaldus puu juhtivust rohkem alalis- kui vahelduvvoolu korral. Kuivas olekus on puu hea elektriline isolaator, õhukuiva puidu eritakistus sarnaneb pooljuhtidele. Samuti mõjutab puu juhtivust ligniini sisaldus: mida suurem ligniini sisaldus, seda parem elektrijuht puu on. Okaspuudel on ligniini sisaldus mõnevõrra kõrgem kui lehtpuudel. Sageduse kasvades puu erijuhtivus kasvab. Samuti mängib puu juhtivuse juures rolli puu temperatuur. Temperatuuri kasvades puu takistus väheneb.

Nelja mainitud puuliigi (arukask, hall lepp, harilik haab, harilik kuusk) mõõdetud takistused varieeruvad olulisel määral [9]. Suurimad takistused on mõõdetud märtsikuus ning madalaimad

septembris ja novembris. Kahe kõige suurema takistuse mõõtmise ajal oli temperatuur allpool 0 °C. Kogutakistuse puhul (puu ja pinnase summaarne eritakistus) mängib suuremat rolli puu takistus, kuna see on kordades suurem kui pinnase takistus.

Pinnase eritakistus mängib rolli sammu- ja puutepingete tekkimisel. Peamiselt juhib pinnases voolu seal olev niiskus ja lahustunud soolad. Seega, väga vihmaste ilmade korral võib maapinnale koguneda vesi ning siis ligineb pinnase eritakistus pigem vee omale kui vastavale pinnaseliigile. Eestis enim levinud pinnaseliik on moreen, mis on suure eritakistusega.

Pinge alla sattunud puus jaguneb pinge puu kõrguses erinevalt. Puu takistus on madalaim maapinna lähedal ja kõrgeim tipus ning võrsetes. Seega, pinge alla sattunud puus on suurim pingelang puutekohas ning sealt maa poole pingelangu väärtused puidu pikkusühiku kohta vähenevad. Pinge alla sattunud puus hakkab arenema söerada, mis on hea elektrijuht ja mille tõttu puu kogutakistus väheneb. Söeraja arenemise kiirusel puus on oluline tähtsus. Raja lõpuni arenemiseks peab see toimuma kiiremini, kui puu kuivamine elektrilise kaovõimsuse toimel, kuna puu kuivamisel puu elektriline takistus kasvab ja söeraja areng võib peatuda.

Inimese keha juhib elektrivoolu. Väga tähtis on voolu suurus, mis inimest läbib. 2 A suurune vool on juba inimesele kindlasti surmav ning 16 mA on voolu tase, mille puhul suudab inimene üldjuhul ennast veel ise vooluringist vabastada. Seega, inimene ei talu suuri voolusid ning üldjuhul on vooluga kokkupuutel fataalsed tagajärjed. Pinge alla sattunud puu läheduses võivad tekkida ohtlikud sammu- ja puutepinged, mis on inimesele eluohtlikud. Mida pikemat aega on inimene pinge all, seda väiksemat voolu ta talub. Oluline on rikkekohta toitva liini kiire väljalülitamine.

Töö käigus selgus, et puu takistus varieerub aastaegade lõikes suurtes piirides ning võib omada väärtusi, mis kuuluvad erinevatesse suurusjärgudesse. Puu juhtivust mõjutab enim niiskuse ja ligniini sisaldus ning temperatuur, kus temperatuuri langus tõstab puu takistust ning niiskuse ja ligniini sisalduse kasv parandab juhtivust. Seega, elektrit juhivad paremini ligniinirikkad ning looduslikult niiskemad puud. Okaspuudes on ligniini sisaldus suurem kui lehtpuudes, niiskuse sisaldus on puu välimistes kihtides mõnevõrra suurem – seega võiks eeldada, et okaspuud on üldjuhul juhtivamad kui lehtpuud. Temperatuuri mõju on takistusele küllaltki suur. Miinuskraadidega kasvab puu takistus märgatavalt – seega on talvised puud vähem juhtivamad kui suvised.

Kõrgepingeoõhuliiniga kokkupuutes ja pinge alla sattudes läbib elavat puud vool, kuna elav puu käitub elektrijuhina. Kokkupuutes õhuliiniga satub suurima pingelangu alla puutepunkt ja sealt

maa poole pingelang puu pikkusühiku kohta väheneb. Puu lähedusse sattuvatele elusolenditele võivad tekkivad sammu- ja puutepinged olla eluohtlikud. Lühiste arengus elavas puus mängib suurt rolli puus tekkiv söerada, kuna see on väga hea elektrijuht. Alati söerada ei teki, kuid selle ilmnemisel võivad lühisvoolud kasvada väga suurteks. Kui söeraja areng peatub, siis peatub ka lühisvoolu kasv. Raja arengu kiirus sõltub rakendatud pingest.

Elava puu elektriliste karakteristikute paremaks mõistmiseks on soovitatav teha aastaringsed mõõtmised valitud puudel.

Rikkeandmete statistikast ilmnes, et rikkeid, mida põhjustavad õhuliinidele langenud puud, toimub enim PAT – 58% (lõunasektoris) ja vähim PAP – 6% (põhjasektoris) käidusektoris. Üsna märkimisväärne osa rikestest on põhjustatud liinikoridoride hooldajate endi poolt – ca 30%. Oluline on ka märkida, et ligi pooled looduslikest ja määramata rikkejuhtumitest on põhjustatud just suuremate trombide ning tormide tõttu.

Salvestatud rikete ostsilogrammide kujult küllaltki erinevad. Mõnevõrra tekitavad küsimusi õhuliinidele langenud puude põhjustatud kahefaasilised lühised, kus puuduvad nulljärgnevusvoolu komponendid, mille teket võiks eeldada, kui puu puudutab ühe otsaga maapinda ja teise otsaga õhuliini paljasjuhtmeid. Samas võib see tähendada, et hetkeliselt tekkivad faasidevahelised rikkevoolud on kordi suuremad ning rikke arenemise aeg lühiseks oluliselt lühem, kui seda oleks ainult faas-maa tüüpi rikke korral.

Võib eeldada, et osadel automaatselt salvestatud rikete ostsilogrammidel puudub rikke arenemise algus. Salvestunud rikete kestused jäävad vahemikku 0,25–2,5 sekundit. Praktikast on aga teada, et osadel juhtudel võivad liinile langenud puud olla õhuliini faasijuhiga kontaktis mitmeid minuteid enne, kui rikkevool piisavalt suureks kasvab ning liini välja lülitab.

Uurimistöö lõpus on toodud mõningad rikkeautomaatika seadistamise üldised soovitused, millede teostamise tulemusel võiks paraneda puude poolt põhjustatud rikete automatne tuvastamine. Antud töö raames pole teostatud kaitseautomaatika seadmetele praktilisi ja laboratoorseid teste, kuna see jäi välja konkreetse uuringu mahust. Vastavaid katsetusi võiks aga teostada mõne tulevase uurimistöö raames.

## Kasutatud kirjandus

- [1] Elering AS, „Elering - elektrisüsteem,“ Elering AS, [Võrgumaterjal]. Available: <http://vana.elering.ee/>. [Kasutatud 13 Veebruar 2013].
- [2] E. Tiigimägi, Elektrivõrgud, Tallinn: TTÜ, 1997.
- [3] Elering AS, "Põhivõrguga liitumise tingimused," Elering AS, Tallinn, 2012.
- [4] Elering AS, “Elering - kaitsevöönd,” Elering AS, [Online]. Available: <http://elering.ee/kaitsevoond-3/>. [Accessed 31 10 2013].
- [5] U. V. E. Saarmann, Puiduteadus, Tartu: Eesti Metsaselts, 2006.
- [6] D. M. Owen Johnson, Euroopa Puud, 2004.
- [7] Tartu Ülikool, „Loodusteadusliku hariduse keskuse õpikeskkonnad,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://bio.edu.ee/taimed/oistaim/haab2.htm>.
- [8] Tartu Ülikool, „Loodusteadusliku hariduse keskuse õpikeskkonnad,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://bio.edu.ee/taimed/oistaim/hlepp2.htm>.
- [9] P. Pakkonen, Detection of Incipient Tree Faults on High Voltage Covered Conductor Lines, Tampere: Tampere University of Technology, 2007.
- [10] A. Roos, *Puit ja puitmaterjalid*.
- [11] J. W. Goodfellow, *Understanding how trees cause interruptions*.
- [12] P. R. Rein Oidram, *Alajaamad II osa*, Tallinn, 2013.
- [13] Eesti Instituut, „[www.estonica.org](http://www.estonica.org),“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.estonica.org/et/Loodus/Asend\\_ja\\_looduslikud\\_tingimused/Pinnakate\\_ja\\_mullad/](http://www.estonica.org/et/Loodus/Asend_ja_looduslikud_tingimused/Pinnakate_ja_mullad/). [Kasutatud 25 märts 2013].
- [14] F. M. Defandorf, „Electrical Resistance to the Earth of a live Tree,“ kd. 75, nr 3, 1956.
- [15] J. W. G. P. J. Appelt, „Research on how trees cause interruptions- Applications to vegetation management,“ %1 *IEEE rural Electric Power Conference in Scottsdale*, Scottsdale, 2004.



- [16] W.K.Daily, „Engineering justification for tree trimming,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, kd. 14, nr 4, 1999.
- [17] E. K. Sihtasutus, Eesti õigekeelsusõnaraamat ÕS 2006, Tallinn, 2006.