



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Äikesest põhjustatud liinide rikked

Eesti põhivõrgus

Elektroenergeetika õppekava
Energiasüsteemide õppetool
Magistritöö

Õppetooli juhataja	prof.	H.Tammoja
Juhendaja	dots.	Ü.Treufeldt
Konsultandid	emerdots.	T.Metusala
		S-E. Enno
Lõpetaja		Ü.Pärnat

Tallinn 2015

Autori deklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

Autor: Üllar Pärnat

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: ÄIKESEST PÕHJUSTATUD LIINIDE RIKKED EESTI PÕHIVÕRGUS

Kuupäev: 27.05.2015

70 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Energeetika

Instituut: Elektroenergeetika

Õppetool: Energiasüsteemid

Töö juhendaja: Ülo Treufeldt

Töö konsultandid: Tiit Metusala, Sven-Erik Enno

Sisu kirjeldus:

Töö eesmärgiks on uurida äikesest põhjustatud liinide rikkeid ja anda hinnang liinide välgukindlusele.

Töö on jaotatud kuueks peatükiks. Esimeses peatükis selgitatakse äikese ja välgu kujunemist. Teises peatükis on kirjeldatud välkude mõju elektriliinidele. Kolmandas peatükis on esitatud viimased andmed Eesti äikesekliima. Neljandas peatükis tutvustatakse NORDLIS äikesedetektorite võrgustiku. Viiendast peatükist on leitav töö kandev osa, mis sisaldab endas äikesest põhjustatud rikete analüüsi meetodikat ja ka tulemusi. Kuuendas peatükis antakse ülevaade automaatselt äikese rikete registreerimisest, ning selgitatakse andmete päringuks vajaliku liinkoridori laiuse valikut.

Peamise töös tehtud järeldusena võib tõdeda, et liinide välgukindlus on hea, sõltudes peamiselt piirkonna välgutihedusest.

Märksõnad: Äike, välk, impulsid, NORDLIS äikesedetektorite võrgustik, välgulöökide tihedus, äikese põhjustatud rikete statistika, liinide välgukindlus

Summary of the diploma work

<i>Author:</i> Üllar Pärnat	<i>Kind of the work:</i> Master thesis
<i>Title:</i> LIGHTNING CAUSED OUTAGES IN ESTONIAN POWER GRID TRANSMISSION LINE NETWORK	
<i>Date:</i> 27.05.2015	70 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Faculty of Power Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering <i>Chair:</i> Energy Systems	
<i>Tutor of the work:</i> Ülo Treufeldt <i>Consultants:</i> Tiit Metusala, Sven-Erik Enno	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of this thesis is to analyze lightning caused outages and make assessments about the protection level of transmission lines.</p> <p>The main part of the thesis consists of six chapters. Initiation of lightning and flash is discussed in the first chapter. In the second chapter lightning attachment to transmission lines is pointed out. The third chapter gives an overview about the lightning climate of Estonia. Working principles of NORDLIS Lightning Detection Network are explained in the fourth chapter. The fifth chapter is the most significant part of the thesis where outage rate of lines are shown and discussed. The working principles of lightning correlator tool are explained in the sixth chapter. Also estimation of choosing the right width of line corridor is concluded.</p> <p>In conclusion, protection level of transmission lines is high enough. Lightning attachment to power lines is dependent on the lightning flash density of the area.</p>	
<i>Key words:</i> Lightning, flash, strokes, NORDLIS Lightning Detection Network, lightning flash density, statistics of lightning caused outages, protection level of transmission lines	

Sisukord

Autori deklaratsioon	2
Lõputöö kokkuvõte	3
Summary of the diploma work	4
Lõputöö ülesanne	6
Eessõna	7
Sissejuhatus	8
1. Äikese ja välgu kujunemine	10
1.1. Äikesepilve ehitus	11
1.2. Välg	12
1.2.1. Välgu kujunemine.....	15
1.2.2. Välgu põhjustatud elektromagnetväljad	17
1.2.3. Välgu tabamispunkti kujunemine	18
2. Välgu mõju elektriliinidele	19
2.1. Õhuliinide välgukindlus	20
2.2. Liini osad, mida välg võib tabada	22
2.2.1. Piksekaitsetrossid	22
2.2.2. Maandamismeetmed välgu toime vähendamiseks	24
3. Eesti äikesekliima	25
3.1. Negatiivsete välgulöövide voolu tippväärtuse esinemine	28
4. NORDLIS äikesedetektorite võrgustik	29
4.1. Äikesedetektorite võrgu tööpõhimõte	30
4.1.1. Sündmuste avastamise efektiivsus	31
4.1.2. Välguvoolu tippväärtus	31
4.1.3. Välguvoolu polaarsus	31
4.1.4. Impulsside kordsus	32
4.1.5. Sündmust registreerinud detektorite arv	33
4.1.6. Impulsside ja välgude kellaajad	34
5. Äikesest põhjustatud liinide rikked	35
5.1. Liinide rikete statistika	35
5.1.1. Rikete registreerimine ja identifitseerimine süsteemioperaatori poolt.....	36
5.2. Rikete andmete töötlus ja analüüs	37
5.2.1. Rikkeid põhjustanud välguimpulsside polaarsus ja asukoha määramise täpsus.....	43
5.2.2. Äikesest põhjustatud rikete toimumise aeg	45
5.3. Hinnang põhivõrgu liinide äikesekindlusele	47
6. Automaatne äikese rikete identifitseerimine	50
6.1. Liinikoridori laiuse valik	52
Kokkuvõte	54
Kirjandus	56
Lisad	59
L.1. Süsteemioperaatori poolt tõeselt määratud äikese põhjustatud rikked	60
L.2. Äikese põhjustatud rikked, mis ei leidnud kinnitust (Äike -> teadmata põhjus).....	65
L.3. Teadmata põhjusega rikked, mille põhjuseks on äike (Teadmata põhjus-> äike)...	66
L.4. Liinidel esinenud äikesest põhjustatud rikete arv	67

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema: **Äikesest põhjustatud liinide rikked Eesti põhivõrgus**
Üliõpilane: **Üllar Pärnat, 132736**
Lõputöö juhendaja: **Ülo Treufeldt**
Õppetool: **Energiasüsteemid**
Õppetooli juhataja: **Heiki Tammoja**
Lõputöö esitamise tähtaeg: **27.05.2015**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Töö on oluline põhivõrgu ettevõttele Elering AS. Kuna töötulemused aitavad hinnata nii äikesest põhjustatud rikete määramise täpsust, kui ka töös antakse ülevaade liinide välgukindlusest.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida äikesest põhjustatud liinide rikkeid ja anda hinnang liinide välgukindlusele.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Püstitatud eesmärgi saavutamiseks on lahendatud järgmised ülesanded:

1. Süsteemioperaatori poolt registreeritud äikese rikete tegelikusele vastavuse kontrollimine.
2. Äikesest põhjustatud liinide rikete statistika analüüs.
3. Liinide rikete jaotus seoses välgulöökide tihedusega

Lähteandmed:

Keskkonnaagentuurist välgulöökide andmed. Elering AS-ilt liinide rikete andmed

Lõputöö konsultandid (vajadusel):

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Eessõna

Käesolev uurimus sai idee 2014. aasta suvel kui töö autor viibis praktikal põhivõrgu ettevõttes Elering AS. Autor teostas rike statistika analüüsi Eleringi liinide spetsialisti Väino Milt'i juhendamisel. Üheks liinidel esinevaks rikeks oli äikese põhjustatud rikked, mis hakkas kohe huvi pakkuma. Seeläbi saigi sellest rikete tabelist töö alusosa.

Töö alusmaterjalideks on Keskkonnaagentuurist taotletud välgulöövide andmed perioodi 2005-2014 kohta. Lisaks on saadud Eleringist andmed liinide rikete kohta (*MS Exceli* tabeli kujul) ning liinide kaardikiht programmis *ArgGIS* kuvamiseks.

Autor soovib tänada Väino Milt'i ja Eleringi liinide spetsialisti Priit Jürgenson'i kes mõlemad aitasid nii algandmete hankimisega kui ka vastasid tekkinud küsimustele. Lisaks sooviks tänada ka töö konsultante emeriitdotsenti Tiit Metusala't ja ka Sven-Erik Enno't materjalide ja nõuannete eest.

Lõputöö autori andmed:

Elukoht: Kase tn. 3, Audru v., Pärnumaa, 88301. Tel: +372 51 91 5559, e-post: ullar100@hotmail.ee

Sissejuhatus

Äike on atmosfäärinähtus mida tuntakse peamiselt temaga kaasnevate välkude tõttu. Välgud võivad tekitada ohtu nii inimesele kui ka varale. Kuna õhuliinid on enamasti ümbritsevatest objektidest kõrgemad on suur tõenäosus, et välk tabab just neid. Välgu tagajärjel võib tekkida isolaatorketi ülelööki mille tulemusena lülitub liin välja. Siiski toimub enamusel juhtudel koheselt edukas taaslülitamine.

Käesolev uurimus sai idee 2014. aasta suvel kui töö autor viibis praktikal põhivõrgu ettevõttes Elering AS. Autor teostas rikete statistika analüüsi Väino Milt'i juhendamisel. Üheks liinidel esinevaks rikeks oli äikese põhjustatud rikked, mis hakkas kohe huvi pakkuma. Seeläbi saigi sellest rikete tabelist töö alusosa.

Tehtud töö on oluline kuna annab ülevaate äikesest põhjustatud riketest ning lubab teha järeldusi liinide välgukindluse kohta. Täpsustuseks võib öelda, et arvesse on võetud vaid ainult välkudest põhjustatud rikked. Äikesega kaasneva võivate tugevate tuulte ja murduvate puude tagajärjel esinevaid rikkeid ei ole arvestatud.

Äikese andmete analüüs on võimalik äikese detektoritevõrgustike arenemise tõttu viimastel aastatel. Nende andmete abil on võimalik iseloomustada piirkondade välgulööki tihedust ning otsida võimalike rikkeid põhjustanud välgulööki. Töö kandvaks osaks ongi geoinfosüsteemi *ArcGIS* abil välkude andmete kuvamine ja analüüs.

Liinidega seotud andmete töötlemisel ja esitamisel on aluseks võetud P. Taklaja doktoritöö, kus on tehtud määramata rikete analüüs [1] ning Austrias läbiviidud uuring äikesest põhjustatud liinide rikete kohta [2].

Töö eesmärgiks on uurida äikesest põhjustatud liinide rikkeid ja anda hinnang liinide välgukindlusele. Püstitatud eesmärgi saavutamiseks on lahendatud järgmised ülesanded:

1. Süsteemioperaatori poolt registreeritud äikese rikete tegelikusele vastavuse kontrollimine.
2. Äikesest põhjustatud liinide rikete statistika analüüs.
3. Liinide rikete jaotus seoses välgulööki tihedusega.

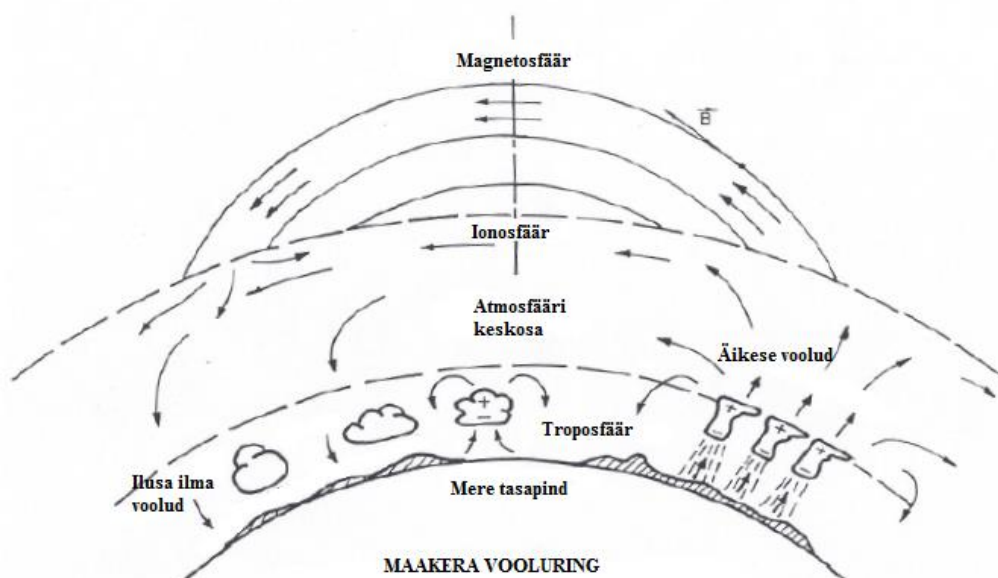
Töö on jaotatud kuueks peatükiks ja need omakorda alapeatükkideks. Esimeses peatükis selgitatakse äikese ja välgu kujunemist kuni välgulöögi tekkimiseni. Teises peatükis on kirjeldatud välkude mõju elektriliinidele, ning antud ülevaade näitajatest mida tuleks jälgida välgukindla liini projekteerimisel. Kolmandas peatükis on esitatud viimased andmed Eesti äikesekliima kohta põhinedes välgulöövide tihedusele, mis annab täpsema ülevaate äikese intensiivsusest. Neljandas peatükis tutvustatakse NORDLIS äikesedetektorite võrgustiku ja seletatakse lahti parameetrid mis iseloomustavad välkude registreerimist.

Viiendast peatükist on leitav töö kandev osa, mis sisaldab endas äikesest põhjustatud rikete analüüsi meetodikat ja ka tulemusi. Esmalt on antud ülevaade kõikidest liinidega seotud rikestest. Seejärel on esitatud info andmete töötlemise viisidest ning ka saadud tulemused. Lõpuks antakse andmete põhjal hinnang põhivõrgu tööle. Kuuendas peatükis antakse ülevaade automaatselt äikese rikete registreerimisest, ning selgitatakse andmete päringuks vajaliku liinkoridori laiuse valikut.

1. Äikese ja välgu kujunemine

Laengute liikumist atmosfääris kirjeldab hästi maakera vooluringi teooria, mille kohaselt elektriväli ja vool liiguvad nii atmo-, ionos- kui ka magnetosfääris. Arvatakse, et maapind on negatiivse laenguga ja atmosfäär positiivse laenguga. Atmosfääril on juhtivad omadused maapinnast 50 km ulatuses. Juhtivateks osakesteks on ioonid, mis on tekkinud kosmiliste kiirte ja maakera loomuliku radioaktiivsuse mõjul (loomulik radioaktiivsus mõjub maapinnast kuni 3 km kõrguseni). Arvatakse, et alates 60 km-st (ionosfäär) esinevad vabad elektronid mis muudavad selle piirkonna ka juhtivaks (nim. ka samapotentsiaalipind). Maapinna ja ionosfääri potentsiaalide vahe on 300 kV ning elektrivälja tugevuseks maapinna lähedal on umbes 100 V/m [3].

Kuna atmosfääri alaosa ei ole piisavalt hea isolaator siis läbib ilusate ilmadega seda ionosfäärist maapinda kulgev vool $2,7 \mu\text{A}/\text{km}^2$ -kohta (1,5 kA kogu maakera pinna kohta). Maakera vooluringi katkemist aitab vältida äike, ehk siis maakeral on igal ajahetkel ca 1500 äikesekollet millest igaühes eraldub umbes 1 A voolu ionosfääri. Äikesega kaasnevad pilv- maa välgud tagavad maakera pinna negatiivse laengu säilimise. Voolud kulgevad atmosfääris peamiselt vertikaalselt, kuid esinevad ka horisontaalsed voolud mis liiguvad mööda maapinda ja ionosfääris (joonis 1.1) [3].



Joonis 1.1. Maakera vooluring (nooled näitavad voolude liikumise suunda) [3]

Voolude liikumised moodustavadki maakera vooluringi (joonis 1.1) [3]:

- troposfääris liiguvad äikese voolud vertikaalselt ionosfääri ja ilusa ilma voolud tagasi maapinnale;
- ionosfääris kulgevad voolud horisontaalselt ümber maakera;
- magnetosfääris liiguvad voolud pikki maa magnetvälja jõujooni vastas poolusele.

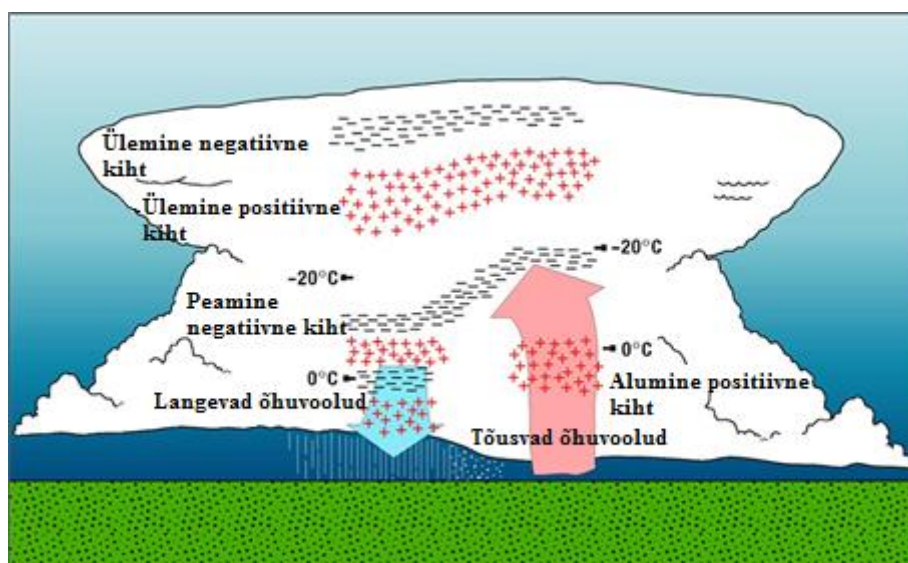
Troposfääris on peamiseks elektrivälja allikaks äike. Seevastu ionosfääris tekitab elektrivälja päikese soojus, mille tagajärjel tekivad loodete tuuled mis kannavad endas ionosfääri plasmad (ioone koos neutronitega). Loodete mõjul tekib ionosfääris horisontaalne potentsiaalide vahe 5-15 kV, mille tulemuseks on horisontaalsed voolude liikumised Magnetosfääris põhjustab horisontaalset voolude kulgemist päikesetuul [3].

1.1. Äikesepilve ehitus

Välgud tekivad meie kliimas enamasti suvisel perioodil rünksajupilvedes. Rünksajupilvede puhul on eriline nende massiivsus. Pilve alumine pind on tüüpiliselt mõnesaja meetri kõrgusel maapinnast, kuid tipud võivad ulatuda 8-12 km kõrgusele (harvemini kuni 15 km kõrgusele). Kuna pilv kõrgub niivõrd kõrgele on selle ala- ja ülaosas väga erinevad tingimused. Alaosas on temperatuur plusspoolel ning vesi on piiskade kujul, samas kui pilve tipus võib olla isegi 50...60 kraadi külma ja esinevad jääkristallid. Lihtsustatult omandavad pilve alaosas olevad veepiisad negatiivse laengu ja pilve ülaosas paiknevad jääkristallid positiivse laengu. Pilve edasisel arengul kasvavad laengud järjest suuremaks, mistõttu kasvab ka elektrivälja tugevus. Kriitilist piiri ületades toimub sädelahendus välgu kujul. Esimesed välgud on tavaliselt pilvesisesed ehk lahendused toimuvad eri laenguga pilveosade vahel. Juhul kui pilve negatiivsesse alaossa on kogunenud suurem hulk laenguid indutseeritakse maapinnale positiivseid laenguid ning tekivad esimesed pilv-maa välgud [4].

Laengute ülekandumine toimub enamasti pilve keskosas, kus temperatuur on nulli ümber. Selles piirkonnas põrkuvad tõusvate ja laskuvate õhuvoolude abil veepiisad, lumekruubid ning jääkristallid. Mõned osakesed purunevad väiksemateks, kuid võib toimuda ka osakeste omavaheline liitumine. Siiski ei ole laengute ülekandumisel ühtset reeglit, kuid kergemad ja külmemad osakesed saavad enamasti positiivse laengu ja raskemad ning soojemad osakesed negatiivse laengu. Tegelikuses on tegemist keeruka süsteemiga ning vastupidiselt üldlevinud

teooriale, mille järgi on pilves ainult üks positiivsete- ja negatiivsete laengutega kiht on seal tegelikkuses hoopis 4...6 vaheldumisi paiknevat kihti (joonis 1.2) [4].



Joonis 1.2. Laenguga kihtide jaotus äikesepilves [5]

Lisaks tõusvatele ja langevatele õhuvooludele mõjutavad laengute paiknemist pilves ka valgud, kuna nende põhjustatud sädelahenduste tagajärjel liiguvad laengud ühest pilve osast teise või pilvest maapinda (toimub laengute vahetus) [4].

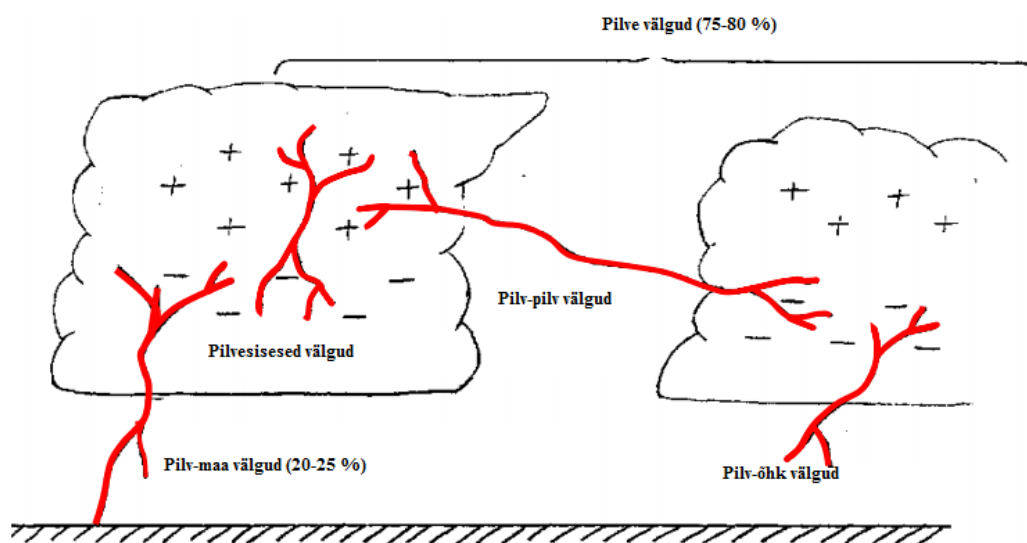
Kuigi pilvedes on mitmeid kihte on siiski olulisemateks kihtideks peamine negatiivselt laetud kiht ja ülemine positiivse laenguga kiht, sest neist lähtub enamus välgulöökidest (joonis 1.2) [4].

1.2. Välg

Välg on võimas atmosfääri sädelahendus. Välgude puhul teatakse enamasti pilv-maa välgulööke, kuid tegelikkuses esineb rohkem välgu tüüpe [4]:

- erinimeliste laengutega pilve osade vahel tekkivad välgud (pilvessisesed välgud);
- erinevate pilvede vahel esinevad välgud (pilv-pilv välgud);
- äikesepilve ja maapinna vahelised välgud (pilv-maa välgud);
- pilve ja ümbritseva õhu vahelised välgud (pilv-õhk välgud).

Nendest välkudest 75-80 % moodustavad pilve välgud ja kõigest 20-25 % on välgud mis jõuavad maapinnani (joonis 1.3) [4].



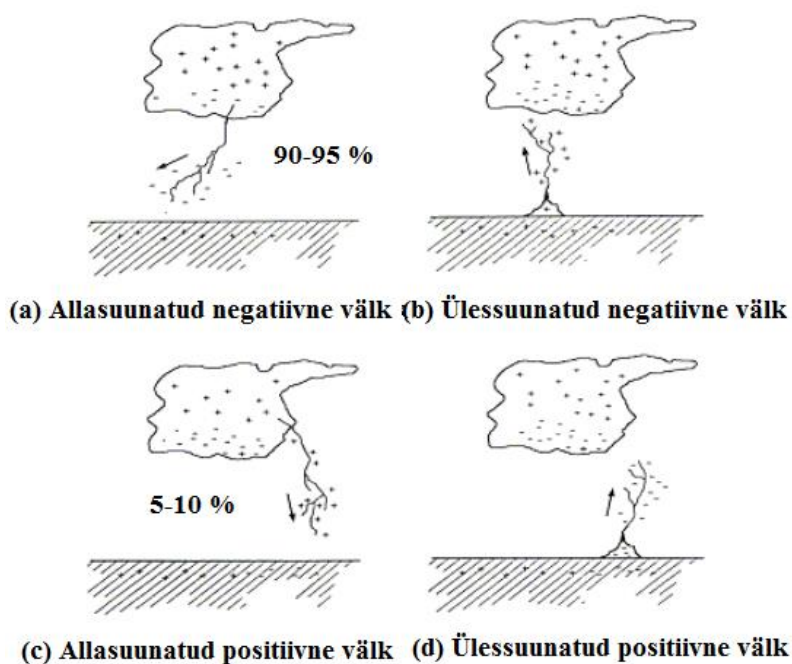
Joonis 1.3. Erinevad välgutüübid ja nende jagunemine [6]

Siiski esineb ka äikesepilvi milles välkude suhtarv võib eeltoodust oluliselt erineda. Siinjuures esineb kaks äärmust, sest nii väga nõrkade kui ka väga tugevate äikeste puhul võivad ülekaalus olla pilve välgud. Nõrkade äikeste puhul on piiranguks nõrk elektriväli pilves, mistõttu ei saagi esineda üle mõne üksiku pilve välgu. Väga tugevate äikeste puhul on põhjuseks võimsad tõusvad õhuvoolud, mistõttu pilve negatiivselt laetud alaosa on maapinnast niivõrd palju kõrgemal et läbilööki ei teki. Samas esineb palju pilve välke [4].

Vaatluse teel on võimalik eristada vaid, kas tegemist on pilve või pilv-maa välguga. Täpsema määranu võimaldab anda välgudetektor eristades kas tegemist on pilve- või pilv-maa välguga ning andes infot ka polaarsuse kohta [4].

Ohtlikuteks ja kahjustusi tekitavateks välkudeks on siiski pilv-maa välgud. Pilv-maa välgud on tavaliselt negatiivse laenguga (välgulöögil kandub negatiivne laeng pilvest maapinnale) moodustades kõigest pilv-maa välkudest 90-95 %. Kõigest 5-10 % pilv-maa välkudest on positiivse laenguga. Positiivne pilv-maa välk saab alguse pilve tipu osast ning on seega oluliselt pikem ja võimsam võrreldes tavapärase negatiivse pilv-maa välguga [4,7].

Pilv-maa välgud võivad olla kas allasuunatud (liider liigub pilvest maa poole) või ülessuunatud (liider liigub maandatud objektist pilve suunas)(joonis 1.4) [7].



Joonis 1.4. Pilv-maa välgud ning nende liidrite arenemise suund: (a) ja (c) puhul on maapinda ülekantava laengu polaarsus võrdne liidri polaarsusega, (b) ja (d) puhul on maapinda kantava laengu polaarsus vastupidine liidri polaarsusest [7]

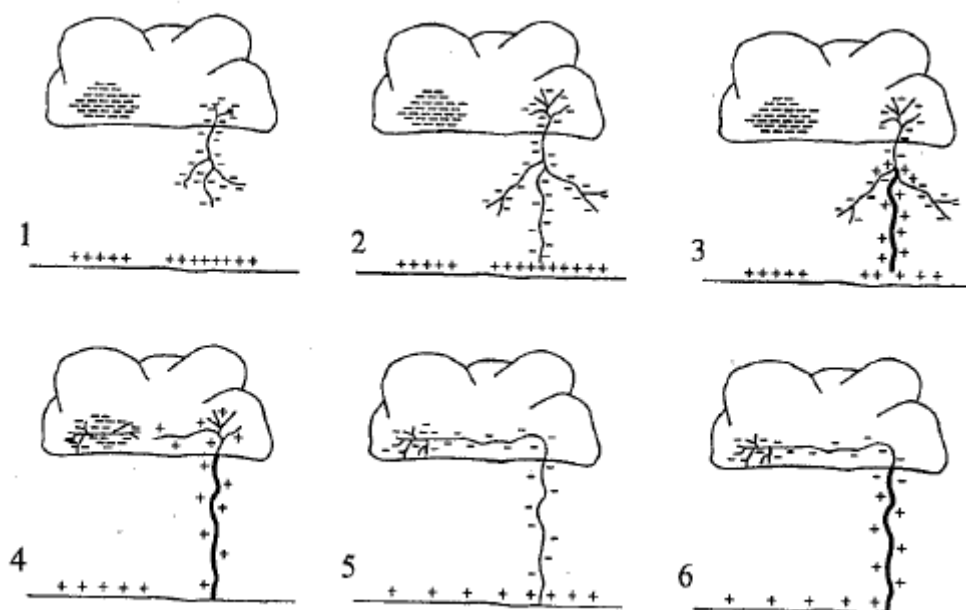
Kuigi positiivseid pilv-maa välke esineb harva on siiski mõned juhtumid mis soodustavad nende teket [7]:

- äikesepilve hajumise faas;
- talvised äikesed;
- suure mõõtmeliste konvektiivsete tormide hajuv tagala ;
- tugevamad äikesetormid;
- tehastest või metsa tulekahjudest tõusev suits.

Antud juhul vaadeldakse edaspidi vaid allasuunatud välke, kuna ülessuunatud välgud lähtuvad ainult objektidest mis on vähemalt 100 m kõrgused või asuvad mäetippudes (pilvedele lähemal) [7].

1.2.1. Välgu kujunemine

Kuna välg on vaid hetkeline nähtus, siis inimsilm suudab eristada vaid lühiajalist valgussähvatust. Tegelikult on välg tunduvalt keerukam ja koosneb mitmest erinevast etapist. Järgnevalt on kirjeldatud välgu etappe enamlevinud negatiivse pilv-maa välgu näitel. Välgu areng hakkab pihta kui elektrivälja tugevus pilve ja maapinna vahel ületab õhu läbilöögi tugevuse. Maapinna suunas hakkab teed otsima negatiivne liider, mis on sisuliselt elektronide kogum mis otsib tulevase välgukanali jaoks lühimat teekonda. Liidri liikumine on hüppeline, läbides miljondiku sekundiga kuni 50 meetrit, seejärel peatudes ja otsides objekti mida tabada. Maapinnani jõudmiseks võib liider teha isegi kuni 10 000 hüpet. Tavaliselt toimub ka mitmeid liidri harunemisi, mis on hiljem nähtavad kui välgu harud. Kui liider läheneb maapinnale siis tema negatiivne laeng tõrjub maapinnal oleva negatiivse laengu ja tõmbab ligi positiivse laengu. Selle tulemusena hakkab positiivne laeng negatiivsele liidri vastu liikuma, moodustades positiivse laenguga kanali (striimer). Selliseid striimereid tekib tavaliselt mitmeid, enamasti saavad nad alguse maapinnast kõrgematelt objektidelt. Liidriga kohtub tavaliselt vaid üks striimer, moodustades juhtiva välgukanali pilve ja maapinna vahel. Mööda kanalit voolab negatiivne laeng pilvest maapinda ning seejärel toimub positiivne vastulöök. Positiivne laeng sööstab mööda tekkinud kanalit maapinnalt pilve kiirusega kuni paarsada tuhat kilomeetrit sekundis. Voolutugevus tõuseb mõne mikrosekundi jooksul 30 kiloamprini (keskmine esmaste välgulöövide voolutugevus) ning temperatuur välgukanalis on kuni 30 000 kraadi. Ühtlasi on vastulöögi etapp ainuke mida inimsilm suudab fikseerida, samas jääb arusaamatuks vastulöögi liikumissuund mis on maapinnalt pilve mitte vastupidi. Välgu etapid on nähtavad joonisel 1.5 [3,4].

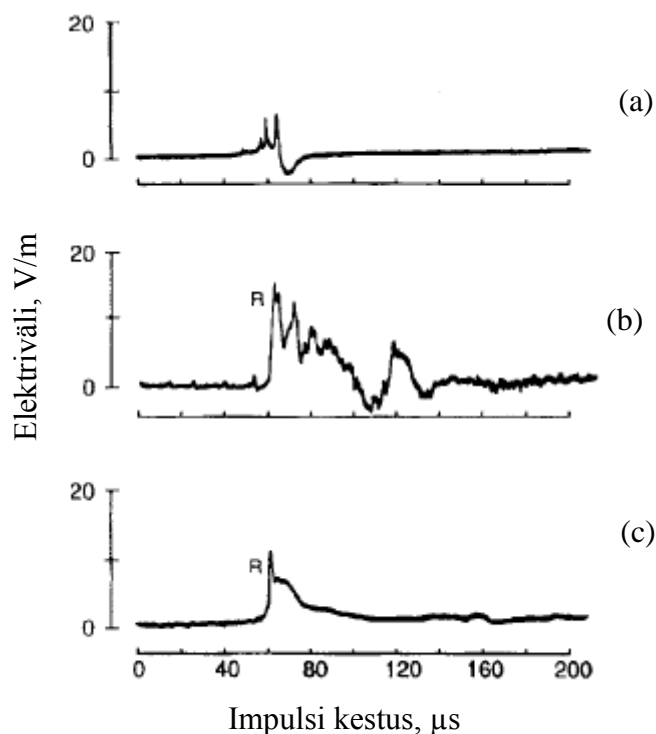


Joonis 1.5. Välgu kujunemise etapid: 1 – liider otsib teed maapinnani;
 2 – negatiivne laeng voolab maapinnale; 3 – toimub vastulöök;
 4 – positiivne laeng kantakse pilve; 5 – areneb jätkuliider;
 6 – toimub edasine vastulöök (järellöök) [8]

Välgud koosnevad impulssidest, ehk siis vastavalt vastulöövide arvule on määratud impulsside arv. Kui peale esimest impulssi on elektrilaengud pilves veel piisavalt tugevad, siis võib esineda veel impulsse. Järgnevad impulsid kasutavad eelnevat kanalit, kuid enamasti nende tabamispunktid ei kattu. Järellöövide tekkemehhanism on sarnane esmase välgulöögi tekkimisele. Järellöögi impulss on tippväärtusega 10-15 kA (keskmine järellöövide voolutugevus), ning saavutab tippväärtuse vähem kui mikrosekundiga ning poolväärtusajaks on mõnikümmend sekundit. Impulsile võib järgneda mõned millisekundid kestev vool tugevusega 100 A kuni mõned kiloamprid. Kestva voolu komponendi puhul voolab vool kestvalt pilvest maapinda. Sellised positiivsed välgud on peamised kahjustuste tekitajateks, põhjustades metsatulekahjusid, läbi põletades liinide kaitsetrosse jne. Kestva voolu komponenti sisaldavad 30...50 % kõigist negatiivsetest pilv-maa välkudest. Eestis koosneb välg enamasti 1-2 impulssist [3, 4, 7].

1.2.2. Välgu põhjustatud elektromagnetväljad

Välkudega kaasnevad elektri- ja magnetväljad, mida registreeritakse äikesedetektorite abil. Tekkivate väljade puhul esinevad korduvad mustrid. Näiteks on välguvoolu impulsside kujud vaatamata mõningatele muutustele siiski üsna sarnased (joonis 1.6) [9].



Joonis 1.6. Väguga kaasnenud kolme impulsi kujud:

- (a) – voolukuju eelneb läbilöögile pilves;
- (b) – voolukuju kuulub esmasele impulsile;
- (c) – voolukuju kuulub välgu järelimpulsile [9]

Joonisel 1.6 esitatud voolukujud on salvestatud sagedusvahemikus 1 kHz kuni 1 MHz sündmuseid registreeriva lairiba antennide poolt. Voolukuju (a)-ga kaasneb pulss, mis oli kiiratud esmase läbilöögi poolt pilves. Voolukuju (b) kirjeldab lainekuju, mis on omane vastulöögile. Voolukuju (c) on iseloomulik järellöökidetele [9].

Joonisel 1.6 (b) on näha, et esmasele vastulöögile eelnevad väikese amplituudiga pulsud, need on põhjustatud liidri viimasest orienteerimisest enne vastulöögi toimumist. Vastulöögid kiirgavad vahemikus mõni kuni mõnikümmend kilohertsi ning on atmosfääris suurimate

raadiohäiringute tekitajateks. Kõrgematel sagedustel ei ole enam peamisteks kiirgusallikateks vastulöögid vaid hoopis liider ning pilvedes tekkivad läbilöögid [9].

1.2.3. Välgu tabamispunkti kujunemine

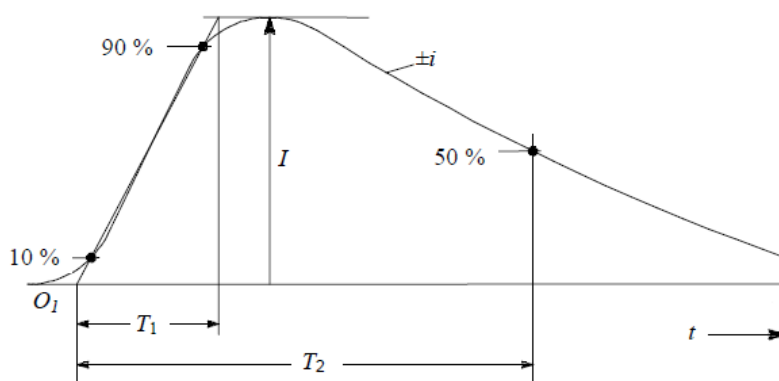
Nagu juba eespool mainitud siis kõigist välkudest vaid 20-25 % on pilv-maa välgud, mis võivad tabada maapinda või sellel asuvaid objekte. Välk üritab maapinnani jõuda võimalikult lühikest teekonda pidi, otsides väikesema takistusega piirkondi. Maapinna lähedale jõudes arenevad talle striimerid vastu. Striimerid võivad alguse saada nii maapinnalt kui ka kõrgematelt objektidelt. Kergemini arenevad striimerid just kõrgematelt objektidelt näiteks erinevatelt mastidelt ja hoonetelt, kuna seal on väli enamasti kontsentreeritum. Striimer jõuab tavaliselt enne välguga kohtumist tõusta lähteobjektist mõnekümne meetri kõrgusele. Seega mida kõrgemalt objektilt striimer alguse saab, seda suurem on tõenäosus kohtumaks liidriga. Eriti headeks välkude sihtmärkideks on näiteks teletornid ja pilvelõhkujad, mis võivad juba ühe äikese jooksul saada mitmeid tabamusi. Siiski ei pea see loogika 100 % paika, välgutabamuse võib saada ka kõrgemate puude naabruses olev madalam puu või hoone. Puude ja mastide puhul oleneb palju ka pinnase eritakistusest, kuna niiskem ja savine pinnas juhivad paremini voolu kui kuivem ja liivasem pinnas. Seetõttu võib juhtuda, et tabamuse saab hoopis orus paiknev puu, kuigi oruserval olevad puud on pilvele lähemal [4].

Välgu teekonna valikut mõjutab ka õhu elektritakistus, milles esineb nii veidi paremini kui ka halvemini juhtivaid piirkondi. Kuna välk valib paremini juhtiva tee, siis võibki tulemuseks olla see et halvema juhtivusega õhu piirkond suunab liidrit kõrgematest objektidest ja nendelt lähtuvatest striimeritest mööda. Tulemuseks on see, et välk tabab maapinda või mõnda madalamat objekti [4].

2. Välgu mõju elektriliinidele

Elektrivõrkudele välkude poolt tekitatavad häiringud võib jagada kahte klassi. Esimeseks klassiks on transientliigpinged, mis on põhjustatud aktiiv- (põhjustatud välguvoolust) ja induktiivosast (põhjustatud välguvoolu amplituudi kiirest muutumisest). Hetkel kui pinge saavutab amplituudväärtuse tekib elektrikaar, liini rike, või voolab vool kaitseseadmesse (liigpingepiirik). Juhul, kui liigpinge tagajärjel voolab vool mõnda liinielementi või liigpingepiirikusse võetakse kasutusele teine klass. Teise klassi häiringud põhjustavad seadmete kuumenemist ja seega ka kahjustamist. Ülekuumenemise ja võimalike plahvatustega on seotud välgu laeng ja integraaltoime. Välgu kogulaengu moodustavad kõikide impulsside laengud ning impulssidele järgneda võivate kestvate vooludega kaasnevad laengud. Tegelikult võib olla keerukas nende klasside vahel vahet teha. Selleks oleks vaja näha, nende välguvoolu kuju. Kuid see on võimalik ainult spetsiaalsete mõõtmiste abil [10].

Oluliseks aspektiks on ka välguvoolu parameetrite hulk, kuid siiski kasutatakse enamasti lihtsustatud välguvoolu impulsi kuju (joonis 2.1).



Joonis 2.1. Voolu impulsi kuju ja parameetrid; O_1 – virtuaalne algus, I – voolu tippväärtus, T_1 – frondi kestus, T_2 – poolväärtusaeg [8]

Joonisel 2.1 on esitatud ka voolu impulsi enamlevinud parameetrid. Paraku suudavad detektorid registreerida ainult välguvoolu tippväärtust. Ülejäänud parameetrite uurimiseks kasutatakse spetsiaalseid rakette mis kutsuvad välke esile, ning lisaks ka mõõteseadmeid mis on paigutatud kõrgete hoonete või mastide tippu [10].

Võib öelda, et välguvoolu tippväärtus on impulsi olulisem näitaja. Ühtlasi esineb ka ülejäänud impulsi parameetrite ja tippväärtuse vahel korrelatsioon. Näiteks on tehtud järeldus, et peamisteks liigpingega seotud näitajateks on voolu tippväärtus ja maksimaalne voolu kasvamise kiirus (di/dt_{\max}). Kuna di/dt_{\max} korreleerub nii negatiivse-, kui ka positiivse välguvoolu tippväärtusega arvatakse, et voolu tippväärtus on peamine liigpingete tekke põhjustaja. Samas ka kogulaeng ja integraaltoime, mis põhjustavad kuumenemist ning isegi plahvatamist on tugevalt seotud positiivse välgude tippväärtusega. Ei saa arvestama jätta ka negatiivseid välke millega kaasneb mitmeid järellööke, mis võivad kokkuvõttes ka kuumutada tabamispunkti [10].

2.1. Õhuliinide välgukindlus

Välg tekitab õhuliinides kiire tõusuga liigpingeid, mis on peamiselt põhjustatud välgu otselöökidest faasijuhtmetesse või siis vastasuunalistest ülelööökidest mastist faasijuhtmetesse. Madalamate nimipingetega võrkudes esineb ka indutseeritud liigpingeid, mille põhjuseks on välgulöök liini lähedusse [11].

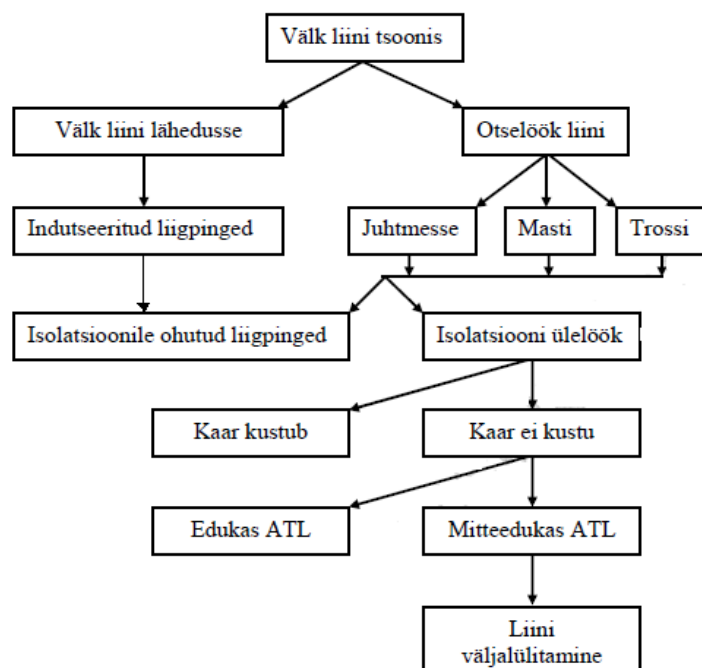
Välgu otselöögid faasijuhtmesse on võimalikud ainult juhul, kui tekib trossist läbimurre ehk välg lööb trossist mööda. Juhul kui välguvoolu tippväärtus on piisavalt suur toimub isolaatorketi ülelööök. Ülelööök võib toimuda ainult ühel faasil või ka mitmel faasil, võimalikud on ka faaside vahelised ülelöögid. Trossist läbimurde võimalikus sõltub trossi asendist faasijuhtmete suhtes [12].

Indutseeritud liigpingete korral lööb välg liini lähedusse, otseselt liini elemente tabamata. Faasijuhtmesse võidakse indutseerida pinge mis ületab isolaatorketi impulsstaluvuspinget põhjustades isolaatorketi ülelöögi. Siiski 110 kV ja kõrgemate nimipingetega liinide puhul on isolaatorketi impulsstaluvuspinge kõrgem (110 kV liinidel IEC 60071-1 kohaselt 450 või 550 kV) välgu löögi tagajärjel indutseeritud liigpingest, mis võib olla 250-300 kV [12, 13].

Vastasuunalised ülelöögid võivad esineda juhul, kui välg tabab otse masti või siis masti lähedusse trossi. Kui masti potentsiaal tõuseb kõrgemaks isolaatorketi impulsstaluvuspingest

toimubki vastassuunaline ülelöök. Ülelöök võib toimuda ühte või mitmesse faasijuhtmesse, kuid see on pigem juhusliku iseloomuga [12].

Välgulöökide võimalikud tabamispunktid ning nende põhjustatud tagajärjed on esitatud joonisel 2.2.



Joonis 2.2. Välgulöökide tabamispunktid ja nende tagajärjed [8]

Jooniselt 2.2 on näha, et indutseeritud liigpinged on isolatsioonile ohutud, samas kui otselöögist liini võib tekkida isolatsiooni ülelöök. Isolatsiooni ülelöögi tagajärjel tekkiv kaar võib kustuda iseenesest või on vajalik automaatne taaslülitus. Juhul kui taaslülitus on edukas jääb liin sisselülitatuks, ning mitteeduka taaslülitamise korral jääb liin väljalülitatuks.

Standardi EVS-EN 50341-1:2013 kohaselt iseloomustatakse õhuliinide välgukindlust piksekaitsetrossis moodsalöögi määraga ja välguimpulsi põhjustatud vastassuunaliste ülelöökide määraga. Need väärtused sõltuvad käidutingimustest, liinide isolatsiooni elektrilisest tugevusest ja järgnevatest näitajatest [11]:

- välgulöökide tihedus;
- õhuliini kõrgus;
- faasijuhtmete paigutus;

- piksekaitsetrosside olemasolu;
- masti maandus
- liigpingepiirikute kasutamine õhuliinidel.

Käesolevas töös vaadeldaksegi õhuliinide välgukindlust välgulöökide tiheduse seisukohast.

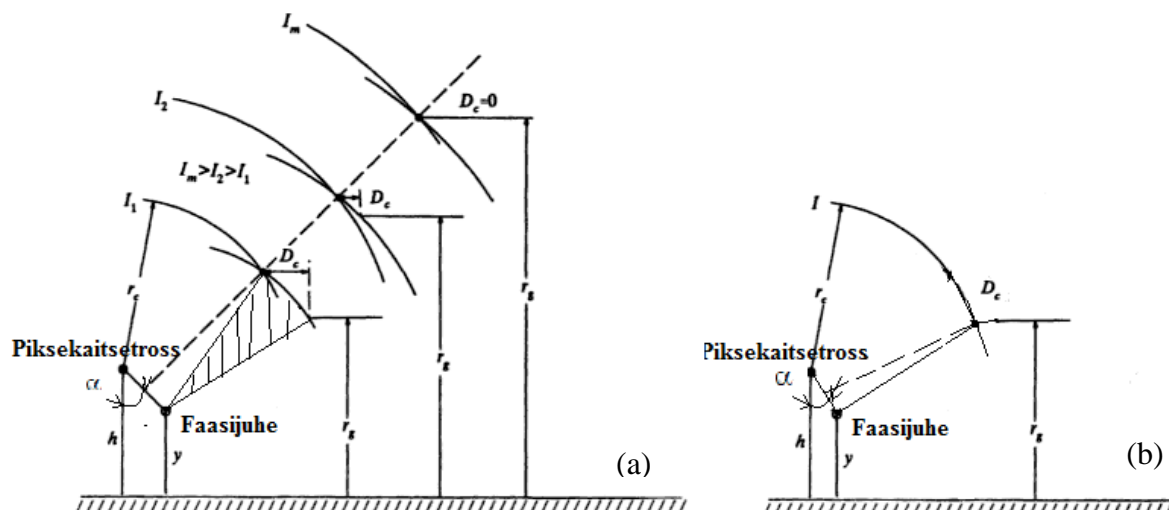
2.2. Liini osad, mida välg võib tabada

Nagu eespool juba mainitud võib välg tabada juhtmesse, masti või trossi. Piksekaitsetrossi puudumisel tabab välg enamasti äärmist või ülemist faasijuhet. Siiski on liinid alates pingest 110 kV enamasti varustatud piksekaitsetrossiga. 110 kV liinide puhul on trossist läbimurde tõenäosus väga väike (üks ülelök 100 km liini kohta üheksa aasta jooksul). Enamus ülelööke on põhjustatud välgulöökidest masti. 330 kV liinidel on ülelöökide arv tunduvalt väiksem, kuna isolaatorketi elektriline tugevus on suurem. Kuid välgust masti põhjustatud ülelöökide arv on samas suurusjärgus kui trossi läbimurdest põhjustatud ülelöökide arv [14].

Oletatakse, et liini tabavatest välgulöökidest pooled tabavad masti või trossi masti lähedal ning pooled trossi visangut [14].

2.2.1. Piksekaitsetrossid

Vältimaks välgulöökide tabamist liinidesse on piksekaitsetrossi paigutamisel oluline tema asukoht faasijuhtmete suhtes. Selle tulemusena on võimalik vältida isolaatorite ülelööki põhjustavate välkude sattumist faasijuhtidega kokkupuutesse. Olulisemaks näitajaks on siinjuures trossi kaitsenurk α . Mida väiksem on kaitsenurk, seda paremini on faasijuhid kaitstud (joonis 2.3) [13].



Joonis 2.3. Liini kaitsenurk: (a) – juhe on välkude eest kaitsmata (viirutatud ala);
(b) – juhe on kaitstud [15]

Faasijuhid on täielikult kaitstud, kui piksekaitsetrossi ja faasijuhet ümbritsevad sfäärid kohtuvad samas punktis maapinnaga paralleelse joonega (joonisel 2.3 (b)). Välg ei taba faasijuhte ka väga kõrgete voolu tippväärtuste korral, kuna mida suurem on vool seda suurem on välgulöögi orienteerimiskaugus objektist (joonisel 2.3 (a)). Sel juhul tabab välg kas piksekaitsetrossi või lööb maapinda. Lisaks oleneb faasijuhtide kaitstud ka masti kõrgusest. Seega võib kõrgematel mastidel olla võrreldes madalamatega suurem kaitsenurk saavutamaks samat kaitsetaset [13].

Näiteks 110 kV liini puhul, mille isolatsiooni impulsstaluvuspinge on 550 kV, valgumistakistus on 10Ω ja trossi ja juhtmete vaheline sidestustegur 15 % kriitiline välguvool on 65 kA. Kui selline välguvool tabab masti siis tekkiva pingemiplusi tagajärjel võib isolatsioon deformeeruda. 65 kA-se või tugevama voolutugevusega välke on 15 % kõigist välgudest. Juhul kui välg tabab trossi visangusse, toimub välguvoolu hajumine mõlemas suunas ning ülelööki mastist juhtmesse ei toimu. Ülelöögi toimumiseks peaks välguvoolu väärtus olema kaks korda suurem ehk siis 130 kA, kuid sellise voolutugevusega välgud on väga haruldased [13].

2.2.2. Maandamisemeetmed välgu toime vähendamiseks

Piksekaitse projekteerimisel tuleb arvestada ka võimalike vastassuunaliste ülelöökidega. Seega on oluline ka mastide maandamine. Juhul kui välg tabab masti tõuseb masti potentsiaal, mis oleneb välguvoolu tugevusest, mastide valgumistakistusest ja trosside ja juhtmete vahelisest sidestusest [13].

Alajaamade lähedal liini isolatsiooni vastassuunaliste ülelöökide vähendamiseks ühendatakse liini lõpumastide maandus kokku alajaama maanduskontuuriga [16].

Välgu toime vähendamine mastidele sõltub pinnase eritakistusest. Metall- ja raudbetoonmastide puhul on nõutavad valgumistakistused sõltuvalt pinnase eritakistusest [16]:

- pinnase eritakistuse kuni 100 Ωm korral $R_E = 10 \Omega$;
- pinnase eritakistuse üle 100 Ωm kuni 500 Ωm korral $R_E = 15 \Omega$;
- pinnase eritakistuse üle 500 Ωm kuni 1000 Ωm korral $R_E = 20 \Omega$;
- pinnase eritakistuse üle 1000 Ωm kuni 5000 Ωm korral $R_E = 30 \Omega$.

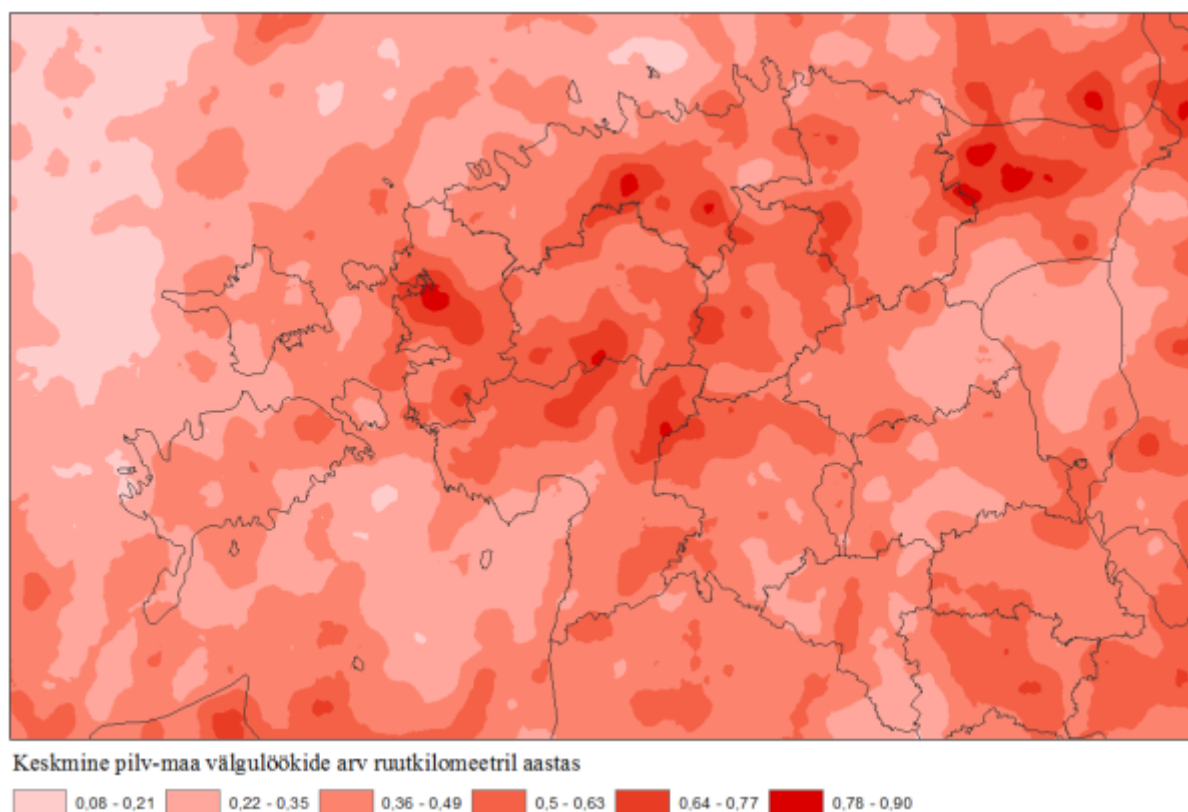
Üle 45 m kõrguste piksekaitsetrossidega varustatud mastide korral, peab maandustakistus olema eeltooduist kaks korda väiksem [16].

3. Eesti äikesekliima

Oluliseks näitajaks iseloomustamaks tõenäosust, et liinil võib toimuda äikesest põhjustatud ülelööki on äikese esinemistihedus. Selle leidmiseks kasutatakse enamasti äikesepäevade- või äikesetundide arvu. Kuid praeguseks on väga levinud detektoritevõrgustikud, mis suudavad registreerida äikese esinemise välguimpulsside täpsusega. Võrreldes eeltoodud variantidega annab see hea ülevaate välkude tegelikust tihedusest, kuna äikesepäevade ja –tundide puhul ei ole teada äikese tegelik intensiivsus.

Eestis alustas äikesedetektorite võrgustik tööd 2005 aastal. Seega on olemas juba kümne aasta andmestik, mis annab piisavalt täpse ülevaate välkude tihedusest Eesti territooriumil.

Perioodil 2005-2013 on välgulöökide keskmiseks tiheduseks saadud 0,41 välgulööki ruutkilomeetri kohta aastas. Välgulöökide tihedus varieerus vahemikus 0,09...0,88 lööki ruutkilomeetri kohta aastas. Välgulöökide keskmisest suurem tihedus (üle 0,5 välgu ruutkilomeetri kohta) esineb edela-kirde suunalises vööndis, mis ulatub Pärnumaalt Ida-Virumaale. Suurima välgulöökide tihedusega alad (0,78...0,88 lööki ruutkilomeetri kohta) paiknevad Pärnumaa kaguosas, Raplamaal Järvakandi piirkonnas, Ida-Virumaa lääneosas, Läänemaal Haapsalu lähedal ning Harjumaal Saku ja Kose piirkonnas. Madalaima välgulöökide tihedusega ala paiknes mandri Eestist loode suunas merel. Mandril esineb vähem välgulööke Jõgevamaa idaosas, Tartumaal ning Peipsi järvel. Välgulöökide tihedus on esitatud joonisel 3.1 [17].

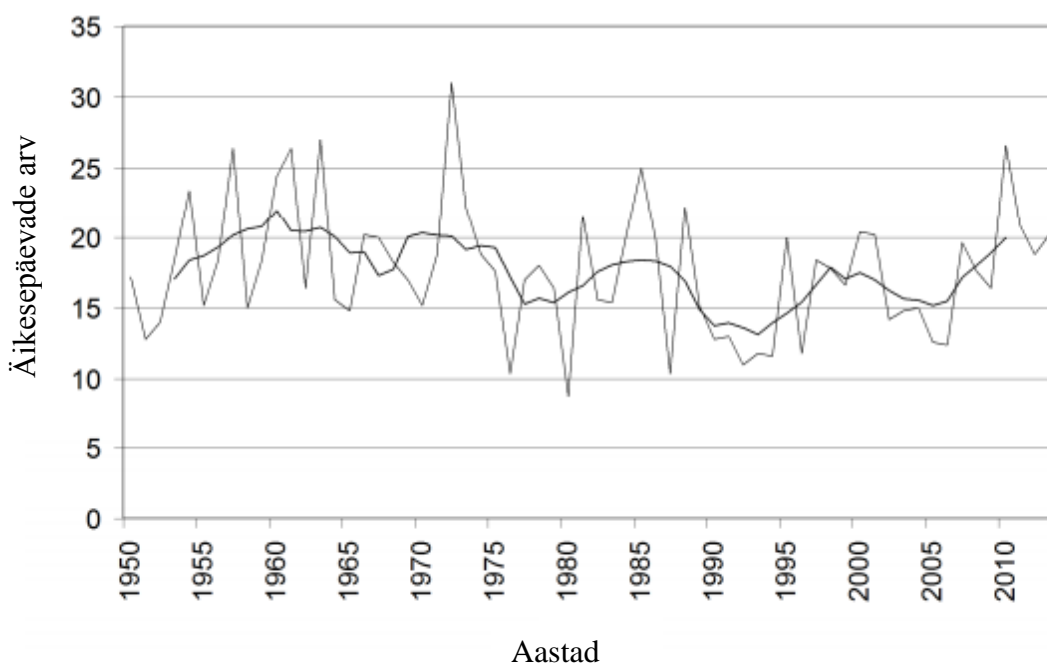


Joonis 3.1. Keskmine pilv-maa välgulöökide aastane tihedus perioodil 2005–2013 [17]

Siiski tuleks tähele panna, et eri aastatel varieerub välgude arvukus oluliselt. Näiteks 2006. aastal registreeriti kõigest 17 000 pilv-maa välku, samas kui 2007. aastal oli sama näitaja 57 000 välku. Esineda võib ka üksikuid tugevamaid tormi mille mõju pilv-maa välgulöökide arvukusele on märkimisväärne, näiteks 28. juulil 2011 esinenud tormi mille jooksul registreeriti ainult 13 098 pilv-maa välgulööki [17,18].

Esitatud keskmine välgulöökide tihedus $0,41 \text{ 1/(km}^2 \cdot \text{a)}$ on oluliselt madalam, kui kasutatakse liinide piksekaitse arvutustes (vastavalt $0,6...1,7 \text{ 1/(km}^2 \cdot \text{a)}$). Seega tuleks jälgida, mis suunas tulevikus need arvud liiguvad.

Vaatamata sellele, et 2005. aasta kandis esines madalam äikese aktiivsus on siiski märgata aktiivsuse kasvu. Seda kinnitab asjaolu, et perioodil 2010-2013 registreeriti ligi 83 000 välku rohkem kui eelneval viiel aastal. Kuna detektorite käigusoleku periood on veel lühike on võimalik kontrollida äikese esinemise sagedust äikesepäevadel alusel (joonis 3.2) [17].



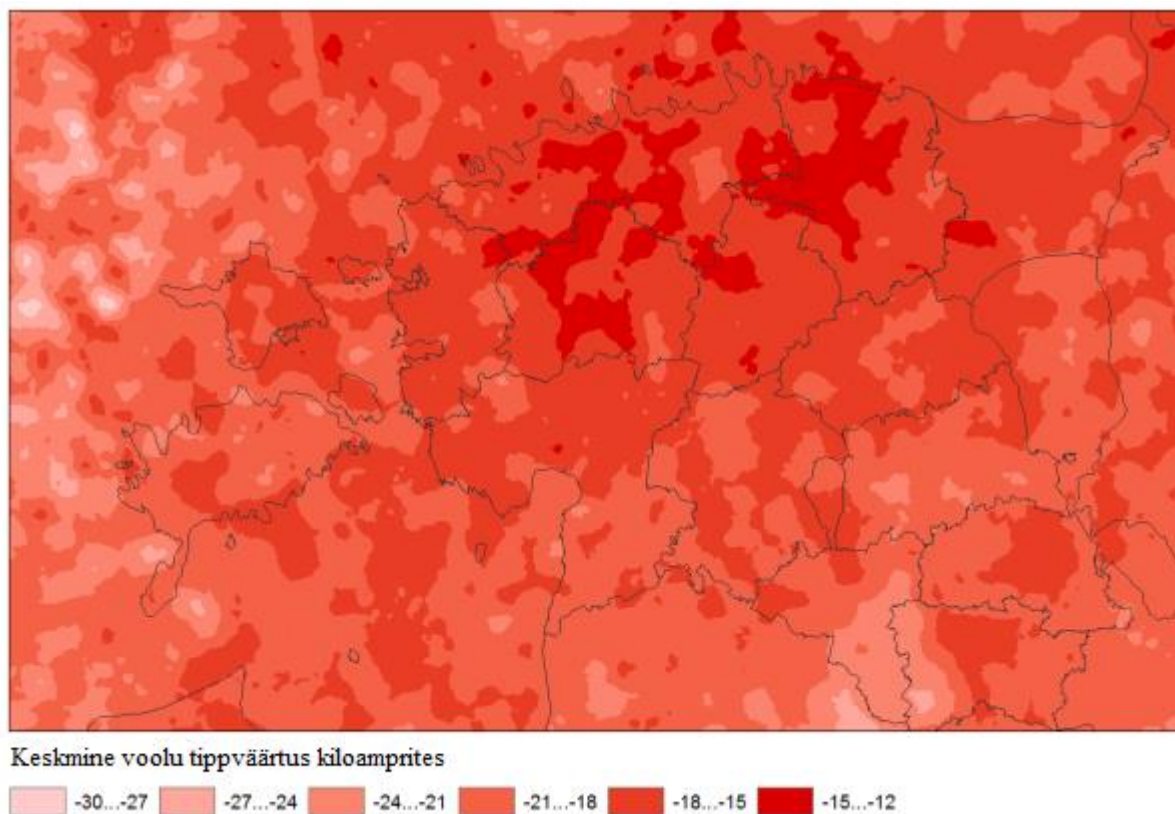
Joonis 3.2. Keskmise äikesepäevade arv aastas ning seitsme aasta keskmine summa (silutud joon) perioodil 1950-2013 [19]

Ka joonis 3.2 kinnitab, et 2005-2006 oli äikese aktiivsus madalam ning praegu on käsil kõrgema aktiivsusega periood. Huvitav on asjaolu, et äikeseaktiivsus kõigub ajajooksul perioodiliselt. Seda illustreerib hästi seitsme aasta keskmine äikesepäevade arv, mille maksimumid või siis miinimumid saavad iga 10-15 aasta tagant. Sarnane tendents esineb ka ülejäänud balti riikides. Põhjuseks on perioodiliselt muutuv õhu liikumine Põhja-Euroopa kohal [19].

Välgulöövide tihedust on uuritud ka Soomes (0,34 perioodil 1998-2007) ja Rootsis (0,03...0,4 perioodil 1987-2000), seega võib järeldada et Eesti kohta kirja pandud tihedus 0,41 välgulööki ruutkilomeetri kohta on tõene [17].

3.1. Negatiivsete välgulöökide voolu tippväärtuse esinemine

Välgude esinemise tihedusele lisaks on võimalik illustreerida ka näiteks välgulöökide voolu tippväärtuste esinemist (joonis 3.3).

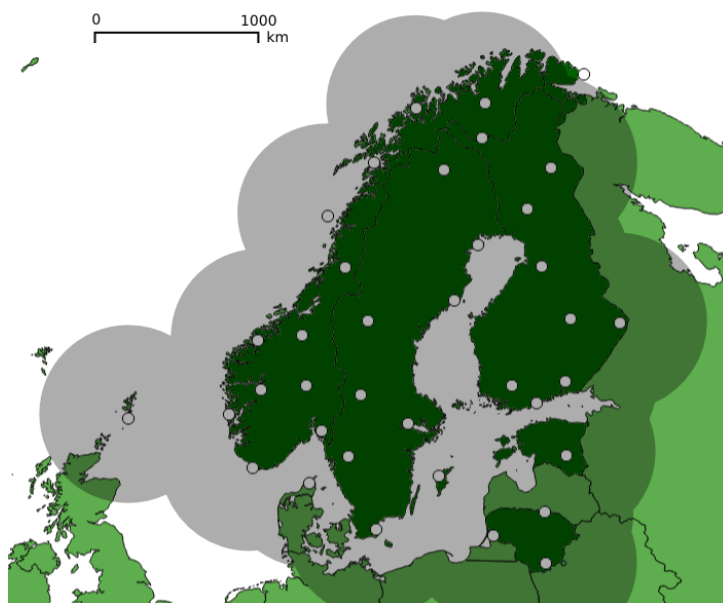


Joonis 3.3. Negatiivsete pilv-maa välgulöökide keskmine voolu tippväärtus perioodil 2005–2013 [17]

Jooniselt 3.3 selgus, et maismaal jääb voolu tippväärtus vahemiku -12...-21 kA. Ei esine piirkondi, kus voolu tippväärtus oleks oluliselt suurem võrreldes ülejäänud piirkonnaga. Lõuna- ja Kagu Eestis esinevad kaardi järgi suurema voolu tippväärtusega välgud, kuid pigem on põhjuseks asjaolu et see piirkond asub võrgustiku äärealal. Seetõttu on mõned nõrgemad välgud jäänud registreerimata, ning see moonutab andmestiku [17].

4. NORDLIS äikesedetektorite võrgustik

NORDLIS (*Nordic Lightning Information System*) on põhjamaade äikesedetektorite võrgustik, mille liikmeteks on Eesti, Soome, Rootsi, Norra ja Leedu. NORDLIS võrku kuulub 37 detektorit (joonis 4.1).



Joonis 4.1. Äikesedetektorite paiknemine ja nende tööpiirkond [20]

NORDLIS võrgustik on loodud 2002 a. Eesti sai liikmeks 2005 a., peale seda kui Tartu lähedale Tõraverre paigaldati pikalaineline detektor VAISALA LS7000. Eestis asuv detektor on ühendatud Soomes paikneva keskserveriga, kus toimub ka andmetöötlus [21,22].

Saadavad andmed on algselt mõeldud ilmastiku jälgimiseks, kuid üha enam kasutatakse andmeid ka muudes valdkondades [22]:

- elektri- ja sidevõrkude haldamine (võimalik otsida välgulöögi kohta liinidesse ja uurida, kas liinid paiknevad kõrgendatud välgulöökide ohuga piirkonnas);
- kindlustuskompaniides (võimalik kontrollida, kas tulekahju või muu kahju võis põhjustada välgulöök);
- lennunduses (peamiselt kasutatakse suuremate lennujaamade puhul: lennukite ohust mööda juhtimiseks või vajadusel ka lennuvälja töö peatamiseks).

Ka käesolevas töös vaadeldakse välgulöökide paiknemist liinide suhtes ja otsitakse välgulööke mis on tabanud liine.

4.1. Äikesedetektorite võrgu tööpõhimõte

Äikesedetektorite võrgustik koosneb paljudest detektoritest, mis on paigutatud laiali kogu jälgitavale territooriumile. Detektoriks nim. antennisüsteemi koos seadmeplokkiga. Antennisüsteemi ülesandeks on raadiosignaalide registreerimine. Seadmeplokk analüüsib vastuvõetud signaalide sagedusvahemikku ja signaali kuju (määramaks, kas tegemist on välgulöögiga), ning koostab sündmusest sõnumi mis edastatakse keskserverile. Saadetud sõnum sisaldab sündmuse täpset kellaega, signaali tugevust ja liiki iseloomustavaid parameetreid (pilvede vaheline-, pilv-maa- või maapinnast pilvesse välgulöök). Keskserver analüüsib detektoritest saadud sõnumeid ja arvutab nende alusel välja välgulöögi täpse asukoha ja ka tugevuse. Sündmuse asukoha leidmiseks on vaja andmeid vähemalt kolmelt detektorilt. Asukoha arvutamiseks kasutatakse raadiolainete levimise kiirust (valguse kiirus). Juhul kui mõni detektoritest on registreerinud sündmuse suuna on võimalik leida välgulöögi asukoht väiksema sündmuse registreerinud detektorite arvuga. Välgulöögi tugevus arvutatakse lähtuvalt asukoha kaugusest ja sellega seotud signaali sumbumisest [22].

Detektorid paigutatakse võimalikult ühtlaselt üle uuritava territooriumi. Mida tihedamalt nad paiknevad, seda täpsemaid andmeid saadakse. Siiski on võrgu tihedus kompromiss täpsusest ja hinnast [22].

Välgulöökidel esineb raadiolaineid kahes diapsoonis: lühilainelises (VHF, 10 000-100 000 kHz) ja pikalainelises (LF, VLF, 1-350 kHz). Lühilaineline diapsoon võimaldab väga täpset mõõtmist, kuid puuduseks on tööraadius mis on piiratud otsenähtavusega. Seevastu pikalaineline diapsoon võimaldab jälgida väga laia maaala. Seega võrgustikud koosnevadki enamasti pikalainelistest detektoritest, mis annavad hea ülevaate meteoroloogilistest muutustest (registreerivad peamiselt ainult pilv-maa välke). Lühilainelisi võrke ehitatakse peamiselt suuremate lennujaamade ümbrusesse (nt: Helsingi lennujaam), kuna need võimaldavad registreerida ka pilvesiseseid välke. Võimalik on ehitada ka kombineeritud võrke, kus on kasutusel mõlema lainepikkusega detektorid [22, 23].

Järgnevates alajaotistes on esitatud tähtsamad parameetrid, mis iseloomustavad detektorite võrgu tööd ja selle väljundeid.

4.1.1. Sündmuste avastamise efektiivsus

Salvestatavate sündmuste hulka iseloomustab tegelikult esinenud ja registreeritud sündmuste osakaal (sõltuvalt võrgust kuvatakse ainult välkude või ka nende impulsside andmeid). Välkude avastamise efektiivsus on suurem tema impulsside avastamise efektiivsusest kuna juba ühe impulsi salvestamisest piisab välgulöögi registreerimiseks. Impulsid võivad avastamata jääda juhul, kui nad on liiga nõrgad ehk asuvad allpool detektorite tundlikkuse piiri või siis nendega kaasnevat lainekuju ei loeta välgulöögile kuuluvaks [9,21].

Sündmuste avastamise usaldusväärsus on kõige raskemini kontrollitav, kuna ei teata tegeliku sündmuste arvu. Selle kindlakstegemiseks kasutatakse näiteks Austrias mõõte- ja videotehnikaga varustatud torni ning NORDLIS võrgu puhul teoreetilisi mudeleid. NORDLIS võrgu puhul on pilv-maa välkude avastamise efektiivsus 95 % [2,21,24].

4.1.2. Välguvoolu tippväärtus

Välguvoolu tippväärtus saadakse detektorite mõõdetud signaalide amplituudväärtuste kaudu. Ehk siis välgu poolt kiiratud väljatugevus on võrdeline välguvoolu tippväärtusega maapinnal [a,f].

Mõõtetehnikaga varustatud tornide ja rakettide abil esilekutsutud välkude abil on leitud, et detektorite võrgud mõõdavad välguvoolu tippväärtust väga täpselt [21].

4.1.3. Välguvoolu polaarsus

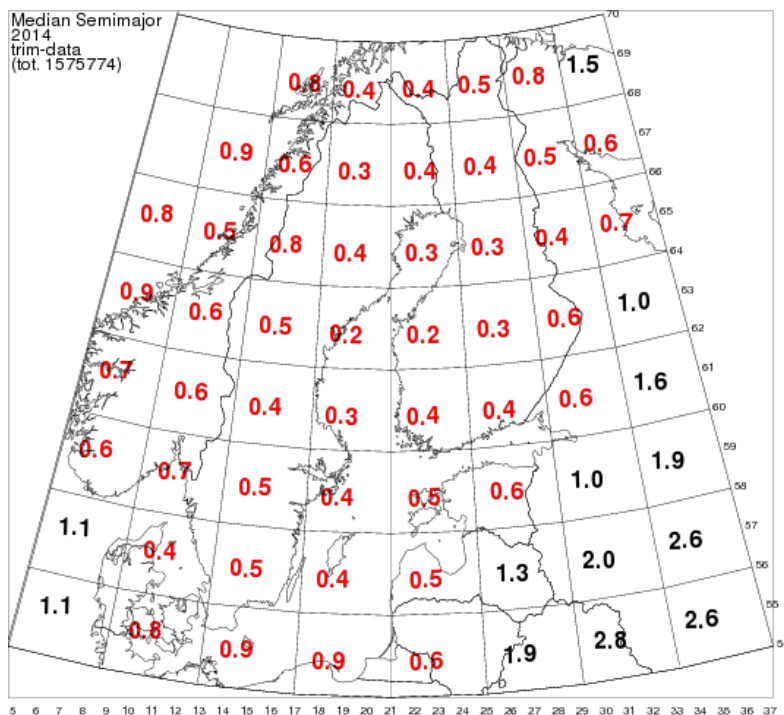
Välgu polaarsus iseloomustab millise elektrilaenguga pilveosast saab välk alguse, ehk siis vastav laeng neutraliseeritakse [21].

4.1.4. Impulsside kordsus

Impulsside kordsus näitab mitmest impulsist koosnes välgulöök. Impulsid koondatakse välgulöökideks kasutades algoritmi mis arvestab nii aega kui ka asukohta. Impulsid omistatakse välkudele, kui nad esinevad ühe sekundi jooksul peale esimest impulssi ja asuvad 10 km raadiuses sellest. Lisaks on kriteeriumiks ka, et ühe välgu impulsside ajaline vahe ei või olla pikem kui 500 ms. Juhul kui impulss sobiks mitmesse välku, valitakse lähim esimene impulss. Impulsid lisatakse välgule isegi juhul, kui need on esmasest impulsist erineva polaarsusega [9, 25].

4.1.5. Asukoha määramise täpsus

Asukoha täpsus väljendatakse ellipsi pikema pooltelje pikkuse abil (ellipsi keskmes on välgu impulsi arvatav asukoht). Välgu impulss asub 50 %-lise tõenäosusega vastavas ellipsikujulises piirkonnas. Seega ei esitata välgu impulsside asukohta täpselt, vaid hinnatakse vastavalt saabuva info täpsusele. Asukoha määramise ebatäpsus on tingitud vigadest detektorite mõõtetulemustes. Lisaks oleneb see võrgu tihedusest ja seega ka detektorite arvust mis sündmust on registreerinud. Sündmust registreerinud detektorite arv sõltub lisaks võrgu tihedusele ka välgu impulsi tugevusest, ehk siis kui tegemist on nõrga välguga suudavad seda registreerida üksnes lähemal olevad vastuvõtjad. Joonisel 4.2 on näha asukoha määramise täpsuse varieerumist detektorite võrgu ulatuses [21].



Joonis 4.2. Asukoha määramise täpsus 2014. a. seisuga
(väärtused on esitatud kilomeetrites)[20]

Jooniselt 4.2 on näha, et suurim asukoha määramise täpsus (0,2-0,3 km) on võrgu keskosas (kesk-Soome), kus asub enim vastuvõtjaid. Eestis on keskmiseks välkude asukoha määramise täpsuseks 0,5-0,6 km.

4.1.5. Sündmust registreerinud detektorite arv

Üldiselt kehtib reegel, et mida rohkem detektoreid on sündmust registreerinud seda täpsem asukoht on võimalik määrata. Tavaliselt on sellised välgud ka suurema voolu tippväärtusega [21].

Keskmiselt sündmust registreerinud detektorite arvu alusel on lihtne hinnata võrgu töötamise efektiivsust [21].

4.1.6. Impulsside ja välkude kellaajad

Esitatavad välkude kellaajad on esimeste impulsside hinnangulised algusajad. Ajad on tuletatud algoritmi abil, mis kasutab detektoritelt saadud signaalide saabumisaegu. Seega aeg mis kulub sündmusel jõudmaks detektorini lahutatakse detektori poolt mõõdetud ajast. Kuna välgu alguspunkt ei ole koheselt teada on ta algusaeg täpsusega 5 μ s, mis on piisavalt täpne eraldamiseks ajaliselt erinevaid impulsse [9].

5. Äikesest põhjustatud liinide rikked

Välja selgitamiseks millised välgulöögid on tekitanud häiringuid liinide töös on keskkonnaagentuurist taotletud välgulöökide andmed perioodi 2005-2014 kohta. Saadud välgude andmed on esitatud impulsside kaupa. Iga impulssi kohta on esitatud järgmised parameetrid:

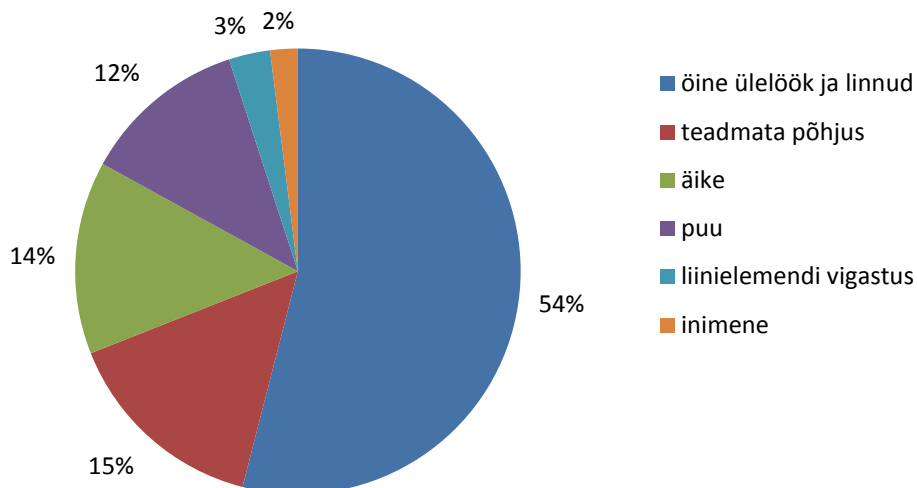
- toimumise kuupäev ja kellaaeg (*UTC*);
- asukohamääranguna pikkus-ja laiuskraad;
- voolu tippväärtus;
- impulsside kordsus;
- asukoha täpsus ellipsi pikema pooltelje pikkuse ja nurgana;
- sündmust registreerinud detektorite arv;
- välgu tüüp.

Välgu andmete võrdlemiseks väljalülitumiste andmetega on kellaajad viidud kohaliku aega, lisaks on välgu tüüpide alt eemaldatud pilve välgud ja alles jäetud vaid pilv-maa välgud.

5.1. Liinide rikete statistika

Liinidega seotud andmete töötlemisel ja esitamisel on aluseks võetud P. Taklaja poolt tehtud määramata rikete analüüs [1] ning Austrias läbiviidud uuring äikesest põhjustatud liinide rikete kohta [2].

Liinide rikete andmed on koondatud AS Elering poolt ühtsesse *MS Exceli* tabelisse. Tabel hõlmab kõiki rikkeid alates 2005-ndast aastast. Antud töös vaadeldakse perioodi 2005-2014, mille jooksul esines 2165 riket. Kuna vaatluse alla on võetud 110-330 kV võrk Eesti territooriumil on esialgsetest andmetest välja jäetud sündmused mille põhjusteks on märgitud: rike Venemaal või Lätis, inimene alajaamas ja põhjus alajaamas. Lisaks on eemaldatud 35 kV merekaablitega seotud rikked. Seega on liinidel toimunud rikete arv 1782. Erinevatest rikestest annab ülevaate joonis 5.1.



Joonis 5.1. Rikete jaotus tekkepõhjuste alusel perioodil 2005-2014

Käesolevas töös võetakse lähemalt vaatluse alla rikked mille põhjuseks on äike (14 % - 244 riket) ja põhjus on teadmata (15% - 277 riket).

5.1.1. Rikete registreerimine ja identifitseerimine süsteemioperaatori poolt

Liinide rikete registreerimine toimub automaatselt REMi (rikkesalvesti) abil. Rikkesalvesti registreerib rikke korral selle esinemise aja, lühisvoolu ning pingelohu väärtused. Rikke asukoha määramine toimub liini mõlemast otsast, kuid siiski esineb olukordi mille puhul määratud piirkonnast rikkekohta ei leita. Peamiselt juhtub see isolaatorketi ülelöökidega korral, kuna tekkivate kaarlahenduste takistused võivad varieeruda laias vahemikus. Samas on isolaatorketi ülelöökidega seotud rikked üsna sagedased ning kuna nende puhul on asukoha määrang ebatäpne on nende põhjust keerukas määrata. Seega jääb lõpliku asukoha ja põhjuse määrang käidukorraldaja välja selgitada (visuaalne vaatlus, toimumise kuupäev/kellaeg jne). Kui siiski ei õnnestu põhjust välja selgitada tehakse märge, kui teadmata põhjus [1].

Uurimaks kas tegemist võis olla äikese põhjustatud sündmusega vaadatakse kas rikkega samal ajal ja piirkonnas on esinenud välgulööke. Välkude andmeid vaadatakse *browseri* vahendusel, kuhu kuvatakse andmed mis pärinevad Soome ilmteenistusest. Kui vaadeldava liini lähedal on esinenud sel ajal äikeseaktiivsust, märgitakse põhjuseks äike.

5.2. Rikete andmete töötlus ja analüüs

Esmalt on vaadeldud juhtumeid, kui põhjusena oli juba kirja pandud äike. Andmete kontrollimiseks on kasutatud programmi *ArcGIS*, kuhu kuvati Eesti territooriumil asuvad põhivõrgu liinid ja ka vastavate aastate välgulöögid. Kontrollimaks kas antud ajal esines tõesti äikese põhjustatud rikkeid teostati atribuudi päring kuupäeva ja kellaaja alusel. Olulisemaks näitajaks siin on kellaage, ehk siis mida täpsem see on seda lihtsam on konkreetset välguimpulssi leida. Perioodi 2012-2014 kohta on olemas andmed ühe sekundi täpsusega. Vanemad andmed on esitatud ühe minutilise täpsusega. Seega on kasutatud sekundilise aja täpsuse puhul päringut ± 1 sekund ja minutilise puhul vastavalt ± 1 minut. Kui ± 1 sekund ei andnud tulemust on kontrollitud ka ± 2 sekundit, juhuks kui on tekkinud kellaaja ümardamisel viga. Kui tulemus on kaardile kuvatud järgneb vastava välguimpulsi valik. Juhul, kui kuvati ainult üks impulss on valik lihtne. Mitme impulsi välgu korral on vaadeldud nende asukoha täpsust ja kaugust liini suhtes, kui siiski jääb kahtlus mitme impulsi vahel on valitud välgu esimene impulss. Tugevama äikese puhul võib selles ajavahemikus esineda rohkem, kui üks välg või äikesekolle, sel juhul on kasutatud rikke oletatavat asukohta. Siiski esines ka olukordi, kui välguimpulsi oli niivõrd palju et ei olnud võimalik kindlat valida. Seljuhul arvestati põhjuseks küll äike, kuid kindla impulsi parameetreid välja ei toodud.

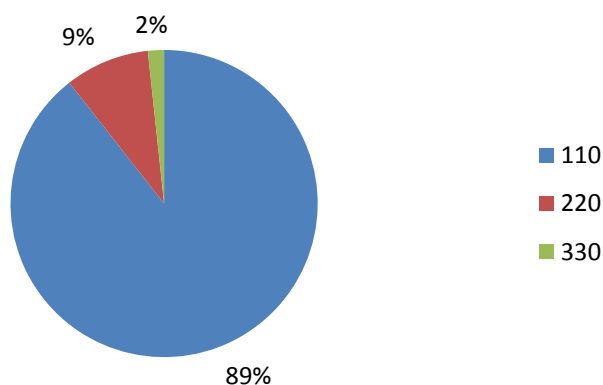
Teadmata põhjusega rikete korral on kontrollitud kõigepealt kas antud päeval ja kellaajal üldse esines äikest. Kui selle päeva ja kellaaja kohta esines välkude andmeid, tehti sarnane päring mida eespool kirjeldati ning vaadati kas vastava liini juures on esinenud välgulööke. Juhul kui olid olemas potentsiaalsed impulsid mis võisid põhjustada liini väljalülitumist, omistati uueks põhjuseks äike. Rikete arvu muutus on esitatud tabelis 5.1.

Tabel 5.1. Rikete arv enne ja pärast äikese andmete kontrolli

Aasta	Enne		Pärast		Muutus	
	Äike	Teadmata põhjus	Äike	Teadmata põhjus	Äike -> teadmata põhjus	Teadmata põhjus-> äike
2005	2	27	4	25	0	2
2006	14	21	11	24	-4	1
2007	26	29	30	25	0	4
2008	10	31	13	28	-1	4
2009	10	27	9	28	-1	0
2010	46	46	44	48	-5	3
2011	48	25	40	33	-9	1
2012	17	34	15	36	-2	0
2013	44	22	41	25	-3	0
2014	28	15	28	15	0	0
Summa	245	277	235	287	-25	15

Kontrolli tulemusena selgus, et süsteemioperaatori poolt kirja pandud äikese põhjustatud rikketest 25 ei olnud äikeselega seotud, seega liigituvad nüüd teadmata põhjuste hulka. Samas teadmata põhjusena kirja pandud juhtumitest 15 osutusid äikese põhjustatuteks (tabel 5.1). Täpsemad andmed rikete kohta on esitatud lisades 1-3. Seega olid perioodil 2005-2014 toimunud rikketest 13 % äikese põhjustatud ja 16 %-il juhtudest oli põhjus teadmata. Kokkuvõtteks võib öelda, et äikese põhjustatud rikked suudetakse enamuses korrektselt registreerida.

Andmestik sisaldas infot liinide kohta pingete vahemikus 110-330 kV. Kõrgemate pingete korral on faasijuhtide omavahelised kaugused, ja kaugused maandatud osade vahel suuremad, seega toimub kõrgematel pingetel vähem ülelööke (joonis 5.2).

**Joonis 5.2.** Äikesest põhjustatud rikete osakaal liinipingete kaupa perioodil 2005-2014

Jooniselt 5.2 on näha et ligi 90% riketest leiab aset 110 kV liinidel. 220 kV pingel on aset leidnud 9 % riketest. Tähele tuleks panna, et hetkel on kasutuses vaid üks 220 kV liin (L206) pikkusega 158 km (andmestik sisaldab ka üksikuid rikkeid liinidelt L205 ja L209, mis on juba demonteeritud). Lisaks puudub liinil L206 piksekaitsetross, mis tõstab oluliselt äikesega seotud rikete arvu. Vaatamata sellele annab joonis 5.2 tõepärase ülevaate rikete hulga seostest nimipingete suhtes.

Uuritavatest juhtudest 94 %-il toimus liini edukas taaslülitamine. Juhtumeid kui liin jäi väljalülitatuks oli 14, millest kolmel oli põhjuseks märgitud isolaatorketi katkemine ja seega juhtme maha kukkumine (katkemised toimusid 110 kV liinidel).

Uuritud on ka voolude tippväärtusi sõltuvalt ülelöögi tüüpidest (tabel 5.2).

Tabel 5.2. Voolude tippväärtused erinevate ülelöögi tüüpide korral

Ülelöögi tüüp	Arv, n	Voolu tippväärtuse mediaan, kA
AB0, AC0, BC0	30	21,2
A0, B0, C0	83	21,7
ABC	8	23,6
AB, AC, BC	4	32,8
ABC0	25	34,6

Huvitav, et voolu tippväärtused ei erinenud oluliselt sõltuvalt ülelöögi tüüpidest. Kõrgemad voolude tippväärtused on küll faas-faas ning kolme faasi ja maa vahelistel lühistel, kuid seegi vahe on vaid 10 kA. Muidugi võib andmeseeriat moonutada ka väike andmete hulk, kuna kõigi äikesekatte puhul ei ole ülelöögi tüüpi või välgu täpseid parameetrid määratud.

Tabelis 5.3 on esitatud liinide rikked aastate kaupa. Kajastatud on liinid millel on toimunud vähemalt 5 ülelööki perioodil 2005-2014 (14 liini)(kõikide liinide andmed on esitatud lisa 4). Selgelt on kõige rohkem ülelööke toimunud liinil 206, põhjuseks on juba eespool mainitud asjaolu et liinil puudub piksekaitsetross. Enamus rikkeid toimus liini 206 puhul 2011 a. suvel, näiteks 9. juulil lülitus liin tunniajase perioodi jooksul koguni neli korda välja. Väljatoodud liinidel esineb äikesest põhjustatud rikkeid aastas korra või korra kahe aasta jooksul.

Tabel 5.3. Äikesest põhjustatud rikked liinide kaupa

Liin	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Kokku
L206			3				8	1	4	2	18
L018/L019/L039	1		2			2	2	1	1	1	10
L134A/B		1	1		3	2				2	9
L173/L176/L177		1	1			1	1	1	2	2	9
L105A/B/C		2	2			2		2			8
L198/L199A/B			2			1	1		4		8
L101		1	3			1	1			1	7
L104B/C						2		1	2	1	6
L192			1	1	1	2				1	6
L195		2	1				1		1	1	6
L044			1			3				1	5
L106D/B		1			1	3					5
L132A/B/C			1		1			1	2		5

Liinide äikesekindluse iseloomustamisel on peamiseks näitajaks rikete arv aastas 100 km liini kohta. Tabelis 5.4 on esitatud liinid millel esineb üle ühe väljalülitumise aastas 100 km kohta (34 liini)(ülejäanud liinide andmed on esitatud lisas 4).

Tabel 5.4. Liinide rikete arv aastas

Liin	Liini pikkus, km	Rikkeid kokku, tk	Rikkeid aastas, tk	Rikkeid 100 km kohta aastas, $1 / (100 \text{ km} \cdot a)$
L070	6,3	3	0,3	4,76
L071	6,3	3	0,3	4,76
L044	11,1	5	0,5	4,50
L195	19,3	6	0,6	3,11
L003	4,2	1	0,1	2,38
L097	10,9	2	0,2	1,83
L196	24,3	4	0,4	1,65
L040	12,6	2	0,2	1,59
L194	19,5	3	0,3	1,54
L012	6,7	1	0,1	1,49
L036	20,1	3	0,3	1,49
L008	6,9	1	0,1	1,45
L198/L199A/B	56,4	8	0,8	1,42
L072	15	2	0,2	1,33
L073	15	2	0,2	1,33
L134A/B	70,7	9	0,9	1,27
L109	16	2	0,2	1,25
L197	24,3	3	0,3	1,23
L018/L019/L039	81,4	10	1	1,23
L147	17,1	2	0,2	1,17
L133A	43,6	5	0,5	1,15

L173/L176/L177	78,9	9	0,9	1,14
L206	158,4	18	1,8	1,14
L167	9	1	0,1	1,11
L101	64,4	7	0,7	1,09
L100A	9,3	1	0,1	1,08
L106D/B	46,6	5	0,5	1,07
L086	19	2	0,2	1,05
L017	28,7	3	0,3	1,05
L110	38,6	4	0,4	1,04
L020/L021	38,8	4	0,4	1,03
L132A/B/C	49,1	5	0,5	1,02
L105A/B/C	78,7	8	0,8	1,02
L035	20	2	0,2	1,00

Kui vaadelda liinide rikete arvu aastas 100 km kohta, siis kerkivad esile lühema pikkusega liinid. Nende puhul on juba ühel või kahel rikkal oluliselt suurem kaal, kui pikemate liinide puhul. Seega 12 suurima rikete arvuga liini 100 km kohta aastas liinipikkused jäävad vahemikku 0-20 km.

Ka selle tabeli puhul on esindatud liin L206 mis on teiste liinidega võrreldes oluliselt pikem (158,4 km). Rikkeid on aastas 100 km kohta 1,14. Samas tuleks tähelepanna ka et liini pinges on 220 kV. 330 kV liine on Eestis 23, millest 10 aastase perioodi jooksul lülitus äikese tõttu välja vaid neli. Seega on nende rikete arvuks 0,06-0,014 riket aastas, mis on väga hea näitaja.

Lisaks eeltoodud tabelitele annab rikete jaotusest hea ülevaate joonis 5.3.



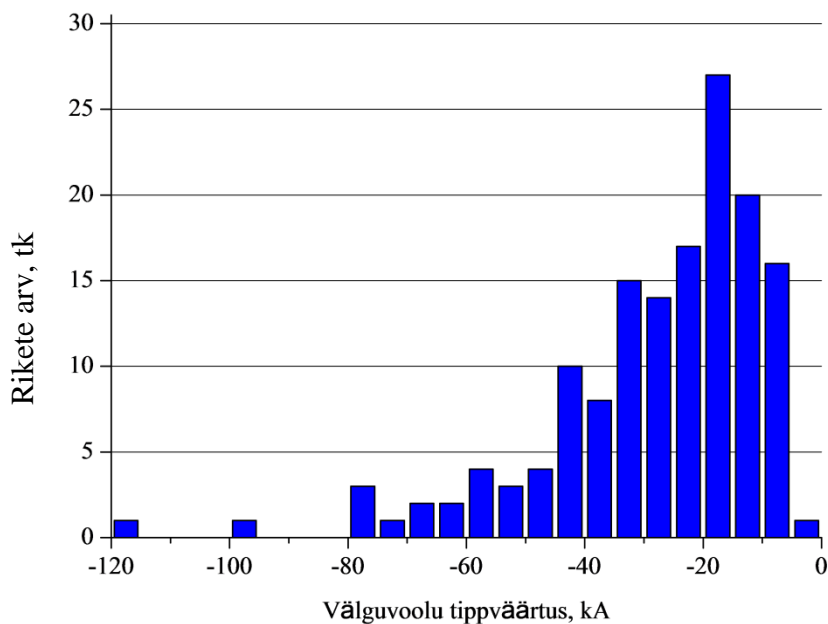
Joonis 5.3. Äikesest põhjustatud rikete geograafiline jaotus perioodil 2005-2014
(sinised jooned – 110 kV liinid, roheline joon – 220 kV liin,
kollased - 330 kV liinid)

Üldiselt võib öelda, et rikked jagunevad ühtlaselt üle Eesti. Samas esineb mõõdukas korrelatsioon välgulöövide tihedusega, ehk siis Lõuna-Eestis on vähem äikesest põhjustatud rikkeid kui Põhja-Eestis. Suurem rikete esinemise tõenäosus on piirkondades, kus välgulöövide tihedus oli üle keskmise ehk siis üle 0,5 löögi ruutkilomeetri kohta aastas (vaata ka joonis 3.1). Samas ei saa öelda, et suurima välgulöövide tihedusega piirkondades esineks oluliselt rohkem rikkeid. Erandiks on 2 piirkonda: Harjumaal Kose ja Aegviidu vaheline piirkond, kus liinil L206 on 20 km pikkune lõik kus on toimunud 18-st rikkest koguni 14. Ning Ida-Virumaal Alutaguse alajaamast 6 km raadiuses on toimunud 7 riket. Kuid ka nendes piirkondades võib rikete suur arv olla põhjustatud muudest teguritest. Siinjuures oleks vajalik rohkem süvitsi minna: osadel liinidel selgelt näha rikete koondumist liinilõikudesse (mastidesse), selleks vajalikud konkreetsed andmed liinide/mastide kohta.

5.2.1. Rikkeid põhjustanud välguimpulsside polaarsus ja asukoha määramise täpsus

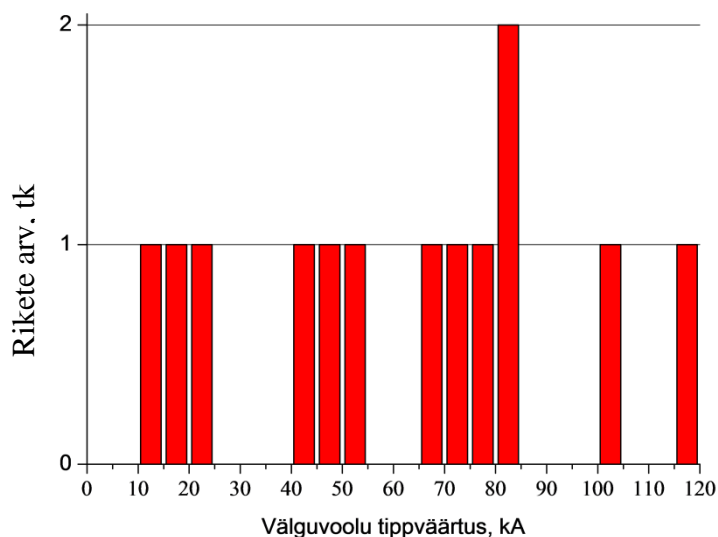
Järgnevalt on lähemalt vaadeldud liine tabanud välguimpulsside tippväärtuseid ja nende registreerimise kauguseid liinidest. Selleks on vaatluse alla võetud 164 impulssi, kuna osadel väljalülitumistel ei saanud konkreetsete impulsside andmeid määrata. Lisaks ei arvestata topelt neid impulsse mis on põhjustanud kahe liini samaaegse väljalülitumise.

Vaatluse alla võetud 164-st impulsist 14 olid positiivse polaarsusega ja 149 negatiivsed (ühel löögil puudus voolutugevuse määrang). Seega on liine tabanud välgulöökidest 8,5 % positiivse laenguga ja 90,9 % negatiivse laenguga, mis kattub kirjanduses toodud hinnanguga et vastav suhe on 10- ja 90 %. Välguvoolude tippväärtuste jagunemine on toodud joonisel 5.4 ja joonisel 5.5.



Joonis 5.4. Liine tabanud negatiivsete välguimpulsside voolude jaotus

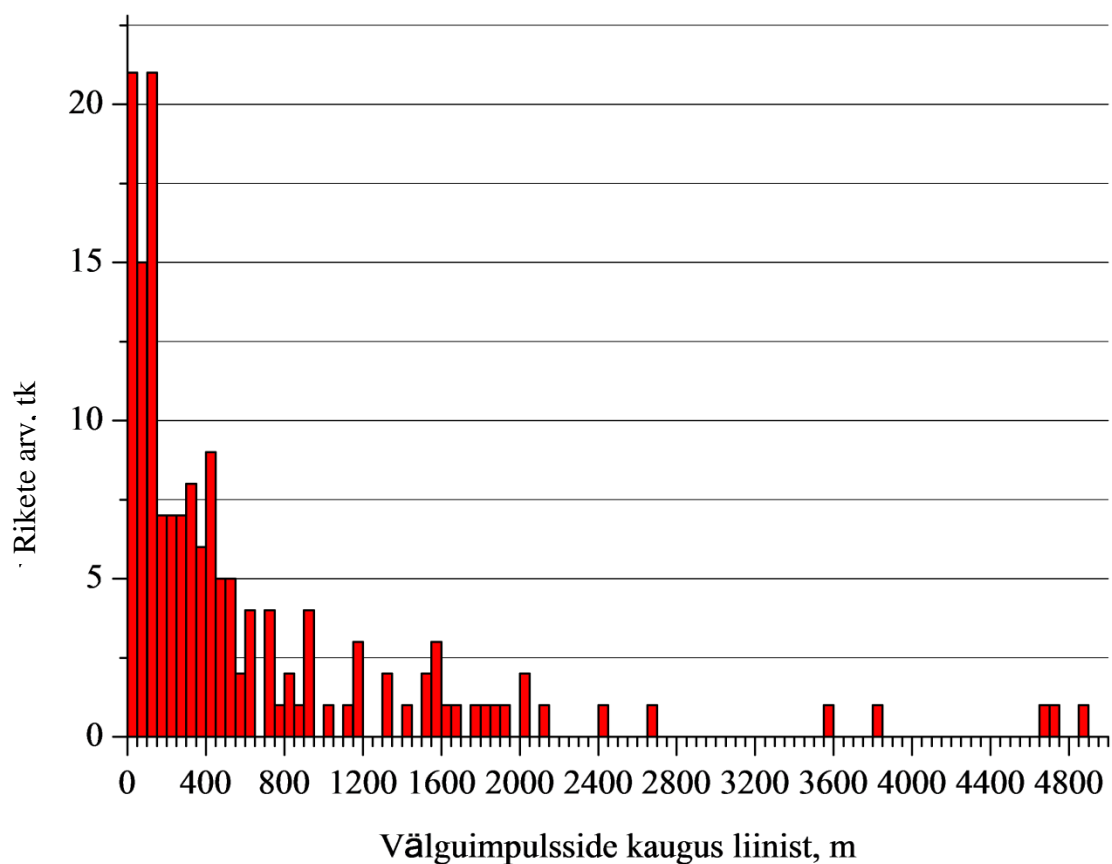
Väljalülitumistest enamuse põhjustasid negatiivsed välguimpulssid voolu tippväärtusega 0-40 kA, kuid esines ka üksikuid suurema tippväärtusega impulsse (-97,6 kA ja -117,3 kA)(joonis 5.4). Välguvoolu tippväärtuste mediaan oli -22,6 kA ehk pooled väljalülitamise põhjustanud impulssidest olid väiksema tippväärtusega ja pooled suuremad



Joonis 5.5. Liine tabanud positiivsete välguimpulsside voolude jaotus

Positiivse laenguga välguimpulsside puhul on voolude tippväärtused jagunenud võrdselt piirkonda 10...85 kA (mediaan 63,7 kA)(joonis 5.5). Samas on positiivsete tippväärtuste hulk niivõrd väike, et kindlat väärtuste vahemiku ei pruugigi tekkida.

Mõõdetud on ka kõige lühemat distantssi pidi välguimpulsside registreerimise kaugus liinidest. Muidugi ei pruugi see olla täpne kaugus liini ja impulsi vahel, kuna impulsi asukoht võib liini suhtes nurga all olla, kuid siiski on see hea moodus saamaks ülevaadet impulsside asukohtade määramise täpsusest liinide suhtes. Saadud tulemused on esitatud joonisel 5.6.

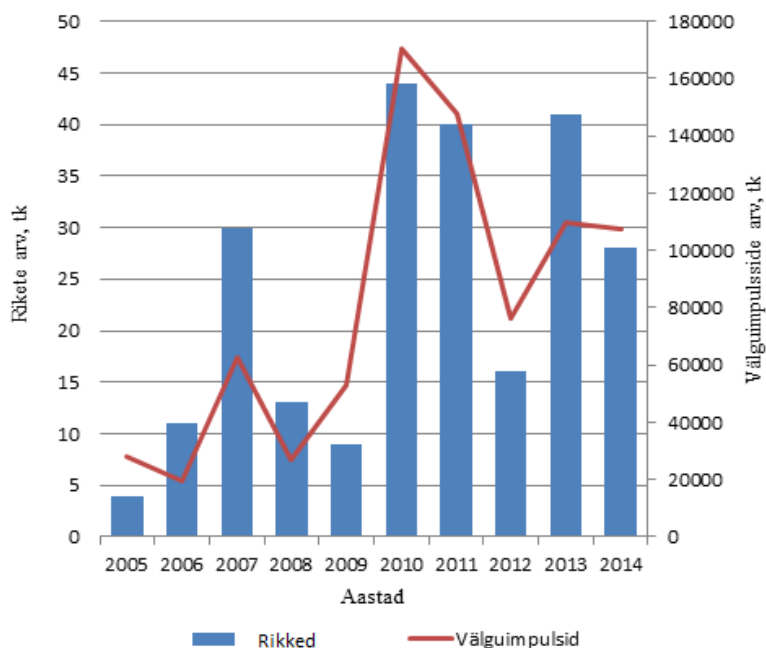


Joonis 5.6. Rikkeid põhjustanud välguimpulsside asukohta täpsus liinide suhtes
(NB! jooniselt on puudu kolm väärtust: 2x7 km ja 17,6 km)

Uuritavatest välguimpulssidest 90% langes vahemikku 0-2000m (joonis 5.6). Mediaan oli üllatavalt hea ehk 343 m. Jooniselt on näha ka et suurema osa välguimpulsside asukoha määramise täpsus oli 400 m või parem. Ka mõõtmiste ajal oli näha, et välgulöögid olid enamasti liinile lähemal, neile omistatud asukoha määrangu täpsusest.

5.2.2. Äikesest põhjustatud rikete toimumise aeg

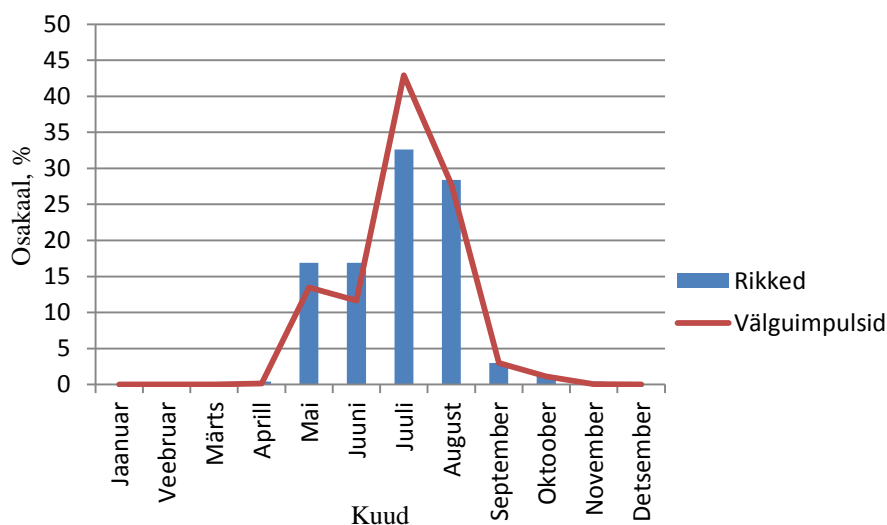
Juhul, kui on teada info rikete toimumise aja kohta on seda võimalik võrrelda välkude esinemise andmetega. Selle põhjal on võimalik teha järeldusi kas äikesest põhjustatud riked on õigesti määratud. Näiteks joonisel 5.7 on võrreldud väljalülitumiste esinemist aastate kaupa välguimpulsside sagedusega võrreldes.



Joonis 5.7. Äikese põhjustatud rikked ning välguimpulsside aastased jagunemised perioodil 2005-2014

Rikete aastased jagunemised järgivad välguimpulsside arvu muutuseid (joonis 5.7). Eriti hästi tuleb see välja viimaste aastate põhjal, kuna igal aastal üritatakse parendada detektorite võrgustiku tööd ja seega ka täpsust.

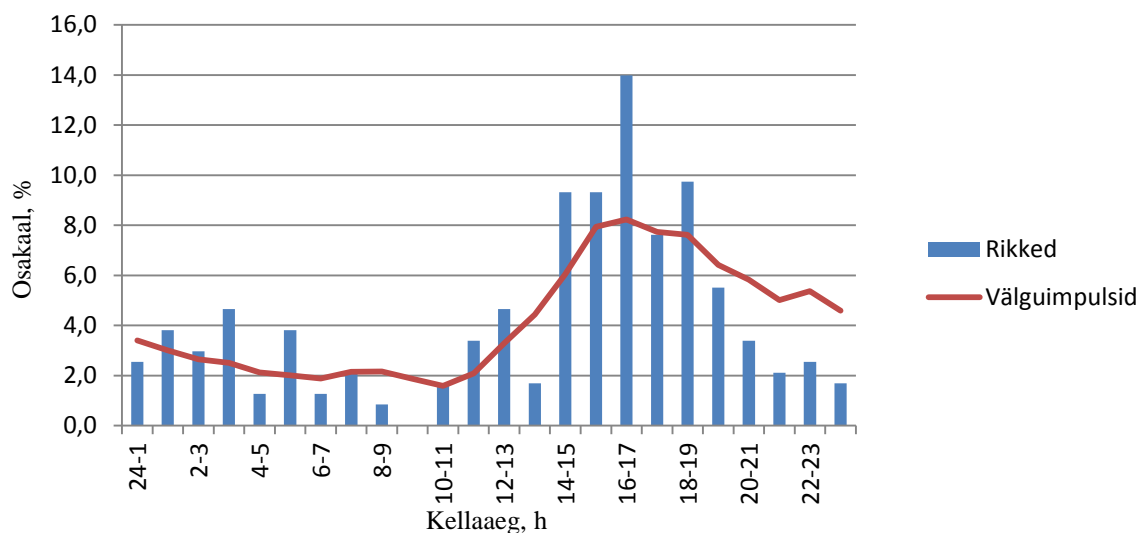
Äikesest põhjustatud rikete kuised jagunemised on esitatud joonisel 5.8.



Joonis 5.8. Äikese põhjustatud rikked ning välguimpulsside kuised jagunemised perioodil 2005-2014

Ka kuude põhiline rikete jaotus näitab tugevat korrelatsiooni välguimpulsside esinemise suhtes (joonis 5.8).

Äikesest põhjustatud rikete ööpäevased jagunemised on esitatud joonisel 5.9.



Joonis 5.9. Äikesest põhjustatud rikete ning välguimpulsside ööpäevased jagunemised perioodil 2005-2014

Kui vaadelda äikesest põhjustatud rikete ööpäevast jagunemist, siis selgub et enamus neist langeb pärastlõunasele ajale. See kattub ka äikese esinemise kõrgajaga samas ajavahemikus (joonis 5.9).

5.3. Hinnang põhivõrgu liinide äikesekindlusele

Ajavahemikus 2005-2014 toimunud 110 kV – 330 kV liinidega seotud riketest 13 % oli põhjustatud äikese poolt. Austrias [2] on liinidel pingetega 110 kV, 220 kV ja 380 kV registreeritud äikese põhjustatud rikete osakaaluks saadud 32 % (välgulöökide tihedus $0,6...2,6 \text{ 1}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) [26]. Portugalis [27] on vastavaks esinemise sageduseks 26 % (liinid nimipingetega 150 kV, 220 kV ja 400 kV)(9-24 äikesepäeva) [28].

Järgnevas tabelis 5.5 on esitatud Eesti, Poola ja Portugali liinidel esinevate rikete arv 100 km kohta aastas.

Tabel 5.5. Rikete arv 100 km liini kohta aastas [27, 29]

	110 kV/150 kV ^a	220 kV	330 kV/380 kV ^a /400 kV ^b
Eesti	0,606	1,329	0,0002
Poola	-	0,26	0,30
Portugal	1,445	0,850	0,582

^aPortugali liinide pinge; ^bPoola liinide pinge

Kuigi erinevate riikide poolt kasutatavad liinide nimipinged on mõnel juhul erinevad, saab andmeid omavahel võrrelda kuna pingete suurusjärgud on samad. Tabelis ülevalt allapoole rikete arv kasvab, kuna ka riigid on vastavalt ekvaatorile lähemal. Muidugi torkab kohe silma tavalult suur rikete arv Eesti 220 kV liinil, kuid selle põhjust on juba eespool mainitud. Üldiselt kehtib ka järeldus, et mida kõrgem on liini nimipinge seda vähem esineb ka äikeset põhjustatud rikkeid. Siin esineb aga väike eripära Poola puhul, kuna enamuse 400 kV liine asuvad Lõuna-Poolas, kus äikeseaktiivsus on ligi kaks korda suurem kui Poola põhjaosas (seal on ülekaalus 220 kV liinid). Üllatav on asjaolu, et Eesti 330 kV liinide äikese rikete arv on pea olematu võrreldes Poola ja Portugaliga.

Edukas taaslülitamine toimus 94 %-il juhtudest. Portugalis on sama näitaja 95 % [27].

110 kV võrgus on liinide rikete arv 100 km kohta aastas 0,606. T. Metusala [14] poolt arvatud ülelöövide arvud 110 kV liinide kohta on esitatud tabelis 5.6.

Tabel 5.6. Ülelöövide arv aastas 100 km liini kohta (välgu tabamisel masti) [14]

Masti maanduse impulsstakistus, Ω	Välguvoolu amplituud, kA	Välgulöövide arv masti, $1/(100 \text{ km} \cdot a)$	Ülelöövide arv aastas, $1/(100 \text{ km} \cdot a)$
10	96	30	0,45
15	64	30	1,05
20	48	30	2,25
30	32	30	6,0

Masti maanduse impulsstakistuste 10..30 Ω korral (aastas 100 km liini kohta on orienteeruvalt 30 lööki mastidesse, tiheduse $1,7 \text{ } 1/(\text{km}^2 \cdot a)$ järgi) on ülelöövide arv mastidesse 0,45..6,0 $1/(100 \text{ km} \cdot a)$. Lisaks võib välgu läbimurde tagajärjel esineda üks ülelööök 100 km liini kohta üheksa aasta jooksul. Seega võib öelda, et registreeritud rikete arv on ligilähedane arvutuste teel saadud väärtustele [14].

330 kV võrgus on ülelöökide arv liini 100 km kohta sõltuvalt masti mõõtmetest impulsstakistuse 10...15 Ω korral vahemikus 0,054...0,75 $1/(100 \text{ km} \cdot a)$. Siiski näitab rikete statistika, et äikesest põhjustatud ülelöökide arv 330 kV liinide puhul on pea olematu [14].

Rikete geograafilise paiknemise ja välgulöökide tiheduse jaotuse vahel ilmnes mõõdukas korrelatsioon. Seega võib oletada et rikete peamiseks põhjuseks on nende piirkondade kõrgem välgulöökide tihedus, kuid vajalikud on täiendavad uuringud.

Kokkuvõtteks võib öelda, et liinide välgukindlus on hea (eriti 330 kV liinide korral). Seda kinnitab ka võrdlus teiste riikidega.

6. Automaatne äikese rikete identifitseerimine

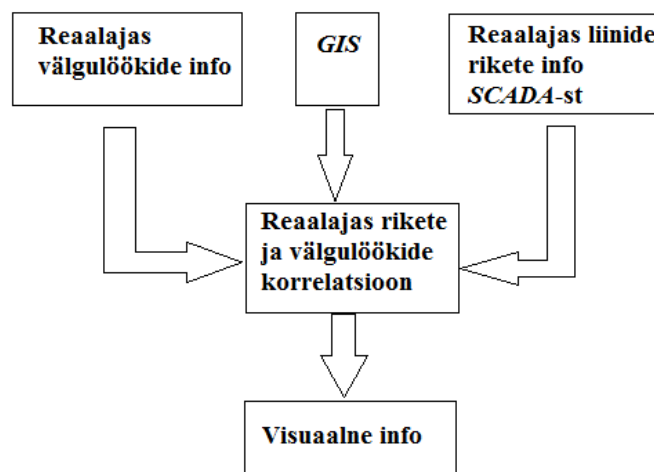
Kuna süsteemioperaatoril on plaan hakata automaatselt äikese rikkeid kindlaks tegema on järgnevalt antud ülevaade juba kasutusel olevatest lahendustest ning antud soovitusi liinikoridori laiuse määramiseks.

Tegelikkuses toimub automaatne äikese rikete kindlakstegemine samadel põhimõtetel nagu käsitsi. Kuid kindlasti on see mugavam ja täpsem. Eeliseks on ka asjaolu, et see toimib reaalajas (kuna välgulöökide asukoha määrangud on üsna täpsed on vajadusel võimalik kiiresti leida rikkekoht). Sellised reaalajas äikese rikete kindlakstegemise võimalused on olemas paljudes riikides (kasutusel ka jaotusvõrgu ettevõtetes) [30].

Äikese rikke kindlakstegemine põhineb järgneval infol [30]:

- info SCADA-st (rikke kellaeg, millisel liinil esines rike (võimalusel ka info rikke asukoha kohta));
- info geosüsteemist (liini asukoht);
- välgulöökide info (esinemis aeg ja asukoht).

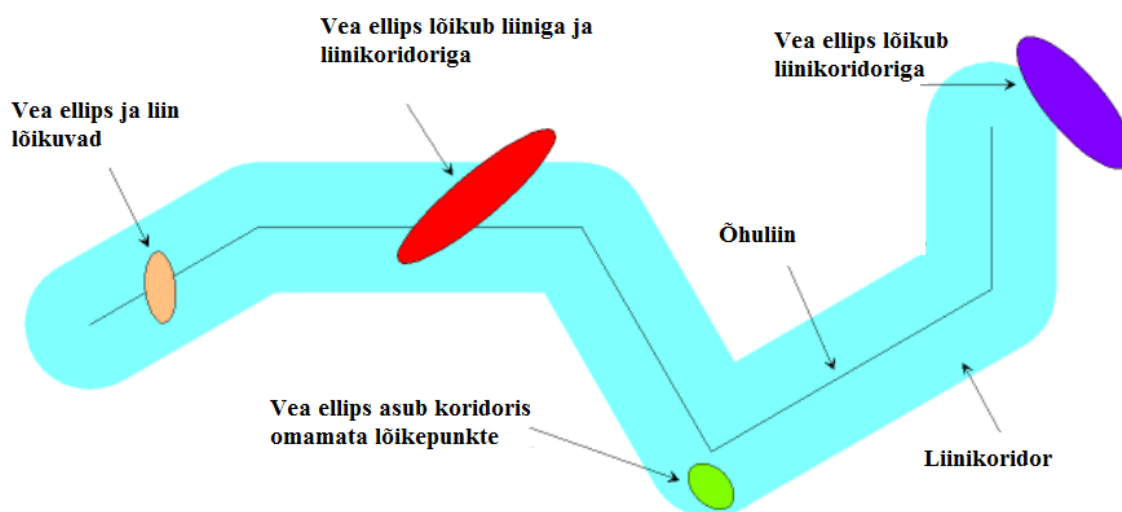
Süsteemi toimimist iseloomustab joonis 6.1.



Joonis 6.1. Äikese rikete info liikumine [30]

Äikese rikke kindlaks tegemiseks toimub esmalt aegade võrdlus. See võimaldab vähendada potentsiaalsete riket põhjustanud välgulöökide arvu ja seega tuleb teha ka vähem arvutusi.

Aegade võrdlus toimub rikke kellaaja ja potentsiaalsete välgulöökide vahel. Välgulöökide kellaajad kontrollitakse *GPS*-i abil ning on millisekundi täpsusega. *SCADA*-st lähtuvad väljalülitamis kellaajad on enamasti mõne kuni mõnekümne millisekundi täpsusega. Tähele tuleks panna, et mida täpsemad on väljalülitamis kellaajad seda lihtsam on leida konkreetsele rikkele vastav välgulöök. Juhul kui on leitud üks või mitu kellaajale vastavat välgulööki toimub edasi andmete ruumiline võrdlus. Ruumilise võrdluse korral on olemas mitmeid võimalusi kuidas seda lahendada. Vea ellipsite kasutamisel arvutab moodul välja kas liinil ja välgulöögi vea ellipsisil esineb löikepunkte. Juhul kui ei esine on järgmiseks sammuks kontrollida kas esineb löikepunkte ellipsi ja liinikoridori vahel või asub ellips liinikoridoris ilma ühegi joonega lõikumata. Kui leitakse löikepunkte siis edasine arvutus peatub ja väljastatakse tulemus. Vea ellipsite võimalikud paiknemised on toodud joonisel 6.2 [30, 31].



Joonis 6.2. Vea ellipsi võimalikud ruumilised paiknemised [30]

Peale ellipsite kasutamise on võimalik otsida rikkeid ka ellipsi keskpunktiks oleva kõige tõenäolisema välgulöögi tabamispunkti alusel. Selleks on vajalik teada uuritava piirkonna detektoritevõrgustiku asukoha määramise täpsust. Näiteks Poolas [29] võeti liinikoridori laiuseks 1 km (võrgustiku asukoha määramise täpsus 150-200 m) ja Austrias [2] 2 km (võrgustiku asukoha määramise täpsus paranenud 350 m-lt 100 m-ni).

Sloveenias [30] kasutatakse ka nn mitme koridori meetodit, mille puhul liinikoridori on laiendatud ja see omakorda kauguse järgi liinist tsoonideks jaotatud.

Ruumilise võrdluse korral ongi olulisem liinikoridori laiuse valik. Juhul kui koridor on liiga kitsas võivad jääda osad potentsiaalsed sündmused kaasamata samas kui liiga laia koridori puhul võivad esineda vigased määrangud [31].

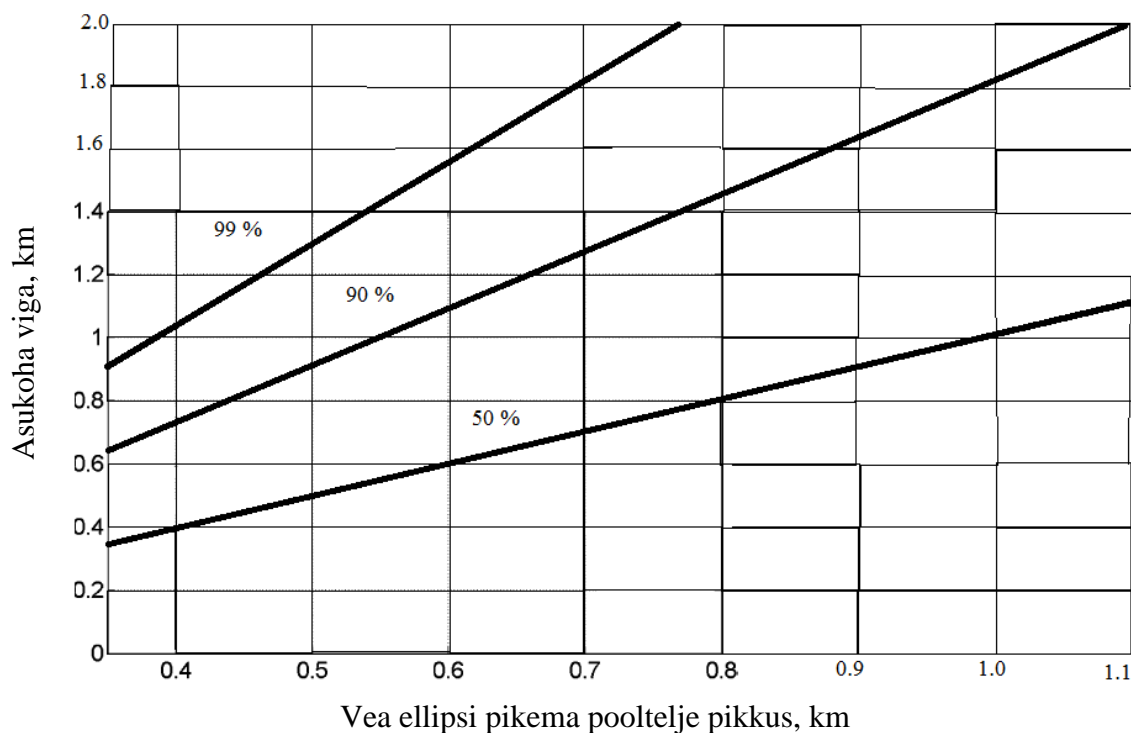
Kui ajaline ja ruumiline kontroll on läbi viidud toimub tulemuste visuaalne kuvamine. Esitatav info võiks sisaldada [32]:

- rikke toimumise kuupäeva;
- rikke toimumise kellaaega (millisekundi täpsusega);
- rikke orienteeruvat asukohta
- liini tähistust millel toimus rike;
- valgustuse parameetreid.

Selline info võimaldab määrata rikke orienteeruvat asukohta, ning valgustuse tippväärtuse alusel saab teha oletusi rikke põhjustatud kahjude kohta.

6.1. Liinikoridori laiuse valik

Nagu juba eespool välja toodud on alates 2014. aastast välgude asukoha määramise mediaan Lääne-Eestis 0,5 km ja Ida-Eestis 0,6 km. Seega kogu Eestit arvesse võttes on see 0,6 km. Kuna vea ellipsid antakse mediaanväärtuste kaudu, ehk siis välgu on 50 % tõenäosusega ellipsiga ette antud piirkonnas, siis jääb liinikoridor laiusega 1,2 km kitsaks. Kui vaadata ka eespool tehtud asukoha vigade mõõtmiseid siis seal selgus, et asukoha viga kuni 2 km esines 90 %-il kõigist mõõtmistest (vea ellipsi pikem pooltelg oli 1,1 km ja väiksem). Seega 0,6 km korral annab 90 %-ine täpsus asukoha veaks kuni 1,1 km (joonis 6.3). Laiendame saadud poole koridori laiust kuni asukoha veani 1,5 km, et oleks lihtsam vaadelda ja arvutada liinikoridoride valgustihedust. Seega asub 0,6 km pooltelje pikkusega vea ellips ligi 99 % tõenäosusega liinikoridoris. Lõplikuks liinikoridori laiuseks jääb seega 3 km (1,5 km kummalegi poole liini) [33].



Joonis 6.3. Asukoha määramise viga sõltuvalt ellipsi täpsusest

(jooned näitavad asukoha määramise sõltuvust ellipsi telje pikkusest erinevatel esinemise tõenäosustel) [33]

Liinikoridori valikul ja rakendamisel tuleks tähele panna kas asjaolu, et detektorite võrgustiku asukoha määramise täpsus ajajooksul paraneb.

Liinikoridori on võimalik kasutada nii potentsiaalsete riket põhjustanud välgulöövide leidmiseks, kui ka välgulöövide tiheduse iseloomustamiseks.

Kokkuvõte

Äike on atmosfäärinähtus, mis kohalikel laiuskraadidel esineb suvekuudel. Vaatamata sellele on äikesega seotud rikete arv kõrge, moodustades Eesti põhivõrgus perioodil 2005-2014 13 % riketest.

Välgulöökide tihedus on üks olulisematest näitajatest, mis mõjutab liinide välgukindlust. Alates 2005 a. on Eesti NORDLIS äikesedetektorite võrgu liige, ning sellest ajast alates on kättesaadavad andmed välguimpulsside kohta. See annab võimaluse hinnata välgulöökide tihedust, mis annab täpseima pildi äikese intensiivsusest. Üheksa aastase perioodi keskmiseks tiheduseks Eestis on saadud $0,41 \text{ 1}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, mis on oluliselt madalam liinide arvutamistel kasutatavatest väärtustest.

Välgud tabavad enamasti liinide maste või piksekaitsetrosse, kuid esineb ka trossist mööda lööke ehk toimub läbimurre. Kõik välgulöögid, mis liine tabavad ei põhjusta aga liinide rikkeid. Rikkeid põhjustavad ainult välgud mille korral tekib isolatsiooni ülelöök, ehk siis ületatakse isolaatorketi impulsstaluvuspinge.

Töö eesmärgiks oli äikesest põhjustatud liinide rikete uurimine ning liinide äikesekindlusele hinnangu andmine. Selleks on teostatud juba registreeritud äikese andmete kontroll ning analüüs. Lisaks on lähemalt vaadeldud rikkeid põhjustanud välkude parameetreid (voolude tippväärtused, asukoha määramise täpsus), ning liinide rikete arvu seost välgulöökide tihedusega. Liinidele äikesekindluse hinnangu andmisel on kõrvutatud Eesti andmeid teiste Euroopa riikide andmetega.

Käesolevas töös on jõutud järgnevate tulemuste ja järeldusteni:

1. Äikese andmete kontrollist selgus, et süsteemioperaator suudab registreerida enamus äikese põhjustatud rikkeid (esineb ka vigu).
2. Kinnitust leidis ka fakt, et kõrgematel pingetel esineb vähem rikkeid.
3. Uuritavatest juhtudest 94 %-il toimus liini edukas taaslülitamine (rikete põhjuseks seega isolaatorketi ülelöök).
4. Välguvoolude tippväärtused ei erinenud oluliselt sõltuvalt ülelöögi tüüpidest.

5. Enim rikkeid perioodil 2005-2014 esines liinil L206 (puudub piksekaitsetross). 14-nel liinil esines 5 või rohkem riket, ehk siis vähemalt üks rike kahe aasta kohta.
6. 34-jal liinil esineb liini 100 km kohta aastas üks või rohkem riket.
7. Rikete jaotus piirkondade alusel korreleerub välgulöökide tihedusega.
8. Liine tabanud negatiivsete välguimpulsside mediaan oli -22,6 kA.
9. Liine tabanud positiivsete välguimpulsside mediaan oli 63,7 kA.
10. Uuritavatest välguimpulssidest 90% asus liini suhtes 0-2000m kaugusel. Asukoha määramise mediaan oli 343 m.
11. Registreeritud rikete ja välguimpulsside esinemise vahel leidis korrelatsioon nii aastate, kuude kui ka ööpäevade korral. Seega võib järeldada, et rikete arv on õigesti määratud.
12. 110 kV võrgus on liinide rikete arv 100 km kohta aastas 0,606.
13. 330 kV võrgus on liinide rikete arv 100 km kohta aastas pea olematu.
14. Võib oletada et rikete peamiseks põhjuseks on vastavate piirkondade kõrgem välgulöökide tihedus, mitte liinide kehv valgukindlus.
15. Eeltoodud näitajaid teiste Euroopa riikidega võrreldes võib öelda, et liinide valgukindlus on hea.

Kuna Elering kavatseb üle minna automaatsele äikese rikete registreerimisele, siis on antud ülevaade sarnasest süsteemist mida kasutatakse mujal. Lisaks on antud soovitus vastava süsteemi rakendamisel valida liinikoridori laiuseks 3 km.

Käesoleva töö tulemusi saab süsteemioperaator kasutada äikese rikete statistika tegelikkusega vastavusse viimiseks, ning edasise äikese rikete määramise meetodika täiendamisesse või automatiseerimisse.

Töö eesmärk ja ülesanded said täidetud, kuid antud teema vajaks täiendavat uurimist.

Kirjandus

- [1] Taklaja, P. 110 kV õhuliinide isolatsiooni töökindluse analüüs ja töökindluse tõstmise meetodid. TTÜ Elektroenergeetika instituut, Tallinn, 2012.
- [2] Diendorfer, G., Pichler, H., Achleitner, G., Broneder, M. Lightning caused outages in the Austrian Power Grid transmission line network. (2014) [Online]
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6973112&openedRefinements%3D*%26filter%3DAND%28NOT%28284283010803%29%29%26pageNumber%3D7%26rowsPerPage%3D100%26queryText%3D%28power+line+communication%29metaData
- [3] Poelman, R. D. On the Science of Lightning: An Overview (2010) [Online]
https://www.google.ee/search?q=On+the+Science+of+Lightning%3A+An+Overview&oq=On+the+Science+of+Lightning%3A+An+Overview&aqs=chrome..69i57j69i59.2350j0j4&sourceid=chrome&es_sm=122&ie=UTF-8#q=on%20the%20science%20of%20lightning%3A%20an%20overview%20poelman
- [4] Välk. [Online]
<http://web.zone.ee/eav/01onv2lk.htm>
- [5] Lightning Basics. The National Severe Storms Laboratory. [Online]
<http://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning/>
- [6] Rakov, A. V. Lightning parameters of engineering interest: Application of lightning detection technologies. (2012) [Online]
<http://www.cigre-thailand.org/tncf/events/Lightning2012/rakov-egat-bangkok-2012-short.pdf>
- [7] Lightning Parameters for Engineering Applications. WG C4.407. Cigre. (2013)
- [8] Treufeldt, Ü. Kõrgepingetehnika. (2014) Loengukonspekt aines AEK 3011.
- [9] Cummins, L. K., Krider, P. E., Malone, D. M. The U.S. National Lightning Detection Network and Applications of Cloud-to-Ground Lightning Data by Electric Power Utilities. (1998) [Online]
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=736207&tag=1
- [10] Cummins, L. K. A Review of Lightning Information for Power Systems Analysis. (2003) [Online]
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1335096

- [11] EVS-EN 50341-1:2013 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 1: Üldnõuded – ühised eeskirjad
- [12] HECO Lightning Performance Analysis. Kahe-Waiiau 138 kV line. Report. (2009)
[Online]
http://hawaiielectriclight.com/vcmcontent/StaticFiles/pdf/EPRI_HECO_Rpt_033109.pdf
- [13] Kiessling, F., Nefzger, P., Nolasco, F.J., Kaintzyk, U. Overhead Power Lines: Planning, design, construction. Springer. (2003)
- [14] Metusala, T. OÜ Põhivõrgu 110 kV ja 330 kV liinide äikesekindluse analüüs. (2008)
- [15] Hileman, R. A. Insulation Coordination for Power Systems. (1999)
- [16] EVS-EN 50341-2-20:2015 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 2-20: Eesti siseriiklikud erinõuded (SEN)
- [17] Eiber, L. Pilv-maa välgulöökide klimatoloogia ja seos tsirkulatsioonitüüpidega Eestis 2005–2013. (2014) [Online]
https://dspace.utlib.ee/dspace/bitstream/handle/10062/42754/Eiber_Laura.pdf?sequence=1
- [18] Enno E. S. A climatology of cloud-to-ground lightning over Estonia, 2005–2009. Atmospheric Research. (2010) [Online]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809510002334>
- [19] Enno E. S. Thunderstorm and lightning climatology in the Baltic countries and in northern Europe. (2014) [Online]
http://dspace.utlib.ee/dspace/bitstream/handle/10062/40504/enno_sven_erik_2.pdf?sequence=4
- [20] Suuline info Antti Mäkelä-lt
- [21] Mäkelä, A., Tuomi, J. T., Haapalainen, J. A decade of high-latitude lightning location: Effects of the evolving location network in Finland. (2010) [Online]
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009JD012183/pdf>
- [22] Kaugseire – äikesedetektorid. Riigi ilmateenistus. [Online]
<http://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/mootetehnika/kaugseire/aikesedetektorid>
- [23] Mäkelä, A., Enno E. S., Haapalainen, J. Nordic Lightning Information System: Thunderstorm climate
of Northern Europe for the period 2002–2011. Atmospheric Research. (2014) [Online]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016980951400009X>
- [25] Mäkelä, A. THUNDERSTORM CLIMATOLOGY AND LIGHTNING LOCATION APPLICATIONS IN NORTHERN EUROPE. (2011) [Online]

https://www.google.ee/search?q=THUNDERSTORM+CLIMATOLOGY+AND+LIGHTNING+LOCATION+APPLICATIONS+IN+NORTHERN+EUROPE&oq=THUNDERSTORM+CLIMATOLOGY+AND+LIGHTNING+LOCATION+APPLICATIONS+IN+NORTHERN+EUROPE&ags=chrome..69i57.890j0j4&sourceid=chrome&es_sm=122&ie=UTF-8

- [26] Diendorfer, G. Ground Flash Density and Lightning Exposure of Power Transmission Lines. (2003) [Online]
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1304476
- [27] Almeida, de B. A. S., Loureiro, C., F. P. Maciel Barbosa, M. P. F., Pestana, R. Historical Data Analysis of Lightning and its Relation with the Portuguese Transmission System Outages. (2009) [Online]
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractAuthors.jsp?arnumber=5282070>
- [28] Rodrigues, B. R., Mendes, F. M. V., Catalão, S. P. J. Lightning Data Observed With Lightning Location System in Portugal. (2010) [Online]
<http://webx.ubi.pt/~catalao/getPDF.pdf>
- [29] Laboda, M., Lenarczyk, K. Correlation between recorded CG lightning discharges and shut-downs of selected HV overhead power transmission lines in Poland. (2014) [Online]
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6973114
- [30] Kosmač, J., Milev, G., Toroš, Z. EVALUATION OF LIGHTNING PARAMETERS CORRELATED WITH DISTRIBUTION LINE FAULTS. (2009) [Online]
<http://www.dii.unipd.it/~pesavento/download/ISH2009/Papers/Paper-G-29.pdf>
- [31] Djurica, V., Kosma, J., Milev, G. A MULTIPLE POWER LINE CORRIDOR AND LIGHTNING ERROR-ELLIPSE SPATIAL PROCESSOR FOR REAL-TIME CORRELATOR. (2008) [Online]
- [32] Kosmač, J. Djurica, V. Babuder, M. Automatic Fault Localization Based on Lightning Information. (2006) [Online]
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1709548
- [33] Lafkovići, A. Hussein, M.A., Janischewskyj, W., Cummins, L. K. Evaluation of the Performance Characteristics of the North American Lightning Detection Network Based on Tall-Structure Lightning. (2008) [Online]
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4603132>

Lisad

1. L.1. Süsteemioperaatori poolt tõeselt määratud äikese põhjustatud rikked
2. L.2. Äikese põhjustatud rikked, mis ei leidnud kinnitust (Äike -> teadmata põhjus)
3. L.3. Teadmata põhjusega rikked, mille põhjuseks on äike (Teadmata põhjus-> äike)
4. L.4. Liinidel esinenud äikesest põhjustatud rikete arv

L.1. Süsteemioperaatori poolt tõeselt määratud äikese põhjustatud rikked

Kuupäev	Kellaeg	Liini nr.	Välguvoolu tippväärtus, kA	Valitud impulss ^a	Asukoha määramise täpsus (kaugus/nurk)	Mõõdetud kaugus liinidest, km
08.07.2005	4:23	L037/L038	15,6	3	1,9/112	0,134
04.11.2005	12:52	L019/L039	-67,2	2	0,7/44	1,543
23.05.2006	19:22	L106D/B	-9	1	0,5/167	0,274
26.05.2006	14:12	L195	-42,4	2	0,3/34	0,914
10.07.2006	14:19	L105A/B/C	-9,9	1	2/131	1,438
29.07.2006	14:04	L173/L176/L177	-49	2	0,4/2	0,157
21.08.2006	16:16	L195	-30,2	3	0,3/109	0,011
21.08.2006	16:19	L194	-44	1	0,6/32	1,168
21.08.2006	16:19	L101	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
28.08.2006	18:33	L147	-64,6	2	1,8/140	2,677
01.10.2006	18.35	L105B/C	Ei saa valida konkreetset impulssi			
01.10.2006	19:12	L134A/B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
27.04.2007	8:48	L189/L188/L027	49,1	1	0,5/41	0,521
09.05.2007	15:34	L021/L020	0 (määramise viga)	1	3/81	1,839
15.05.2007	7:33	L141	-7	2	0/117	0,356
15.05.2007	10:18	L192	-41,1	3	0,4/100	0,398
26.05.2007	11:24	L134A/B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
26.05.2007	11:54	L101	Ei saa valida konkreetset impulssi			
26.05.2007	12:02	L131A/B	-15,2	1	0,3/42	0,405
26.05.2007	12:08	(L205)/L206	Ei saa valida konkreetset impulssi			
27.05.2007	18:11	L106A/L057	-7,6	1	0,9/53	0,045
27.05.2007	19:51	L025/L026	-32,8	2	0,3/81	0,031
28.05.2007	17:57	L101	-20,6	6	0,4/54	0,019
29.05.2007	1:48	L018/L019/L039	-18,4	1	0,4/164	0,350
29.05.2007	23:12	L132A/B/C	-24,6	4	0,3/122	0,105
30.05.2007	0:10	(L205)/L206	-10,2	4	0,3/85	0,054
12.08.2007	6:38	L012	-38,1	1	0,3/154	0,266
21.08.2007	11:21	L141	-13,1	4	0,9/107	0,138
21.08.2007	11:33	L105B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
21.08.2007	11:38	L105B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
22.08.2007	7:19	L018/L019/L039	Ei saa valida konkreetset impulssi			
22.08.2007	10:43	L101	Ei saa valida konkreetset impulssi			
22.08.2007	10:56	L194	-36,1	7	0,3/19	0,020
22.08.2007	10:56	L195	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
22.08.2007	11:32	(L205)/L206	Ei saa valida konkreetset impulssi			

22.08.2007	12:05	L198/L199A/B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
22.08.2007	14:00	L115/L115A	Ei saa valida konkreetset impulssi			
24.08.2007	6:18	L198/L199A/B	-24,7	3	0,3/19	0,048
17.06.2008	14:18	L167	-60,4	1	0,4/60	1,183
17.06.2008	14:18	L008	-43,2	3	0,3/19	0,437
23.06.2008	15:13	L036	101,1	1	1,6/155	4,660
27.06.2008	12:46	L017	-50,8	2	0,4/19	0,538
27.06.2008	12:48	L110	Ei saa valida konkreetset impulssi			
04.07.2008	15:06	L133A	-16,8	2	1/142	0,646
18.08.2008	1:19	L070	-21,3	4	0,7/101	0,109
18.08.2008	1:19	L071	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
29.08.2008	0:4(4->2)	L003	-57,3	1	8,4/117	1,764
13.06.2009	16:37	L133A	Ei saa valida konkreetset impulssi			
13.06.2009	16:37	L134A/B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
13.06.2009	17:23	L192	-28,2	3	0,5/79	0,464
13.06.2009	18:20	L020/L021	-18,2	4	0,3/96	0,152
13.06.2009	18:39	L103	Ei saa valida konkreetset impulssi			
27.06.2009	21:20	L134A/B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
27.06.2009	21:3(5->6)	L134A/B	-15,8	3	2,7/161	3,804
16.07.2009	18:04	L132A/B/C	Ei saa valida konkreetset impulssi			
04.10.2009	20:03	L106D/B	-35,4	1	1,2/164	1,931
08.05.2010	20:02	L124A	40,1	1	0,8/74	1,043
13.05.2010	15:10	L116	Ei saa valida konkreetset impulssi			
13.05.2010	15:10	L118	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
13.05.2010	15:43	L097	Ei saa valida konkreetset impulssi			
13.05.2010	15:49	L097	-15,2	1	1,7/132	0,203
13.05.2010	16:15	L072	-37,6	3	1,3/132	0,547
13.05.2010	16:15	L073	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
13.05.2010	16:15	L104B/C	-27,9	0	0,6/105	1,513
13.05.2010	18:52	L018/L019A	-56	3	0,4/28	0,739
13.05.2010	22:05	L104B/C	-22,6	1	0,6/97	0,849
16.05.2010	22:08	L103	-31	1	0,5/93	0,132
17.05.2010	4:49	L101	-18,3	2	1,2/142	2,046
08.07.2010	14:48	L192	-19,7	2	0,4/98	0,403
08.07.2010	16:06	L134A/B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
08.07.2010	17:30	L147	Ei saa valida konkreetset impulssi			
08.07.2010	17:44	L044	Ei saa valida konkreetset impulssi			
08.07.2010	17:44	L040	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
08.07.2010	17:50	L043	Ei saa valida konkreetset impulssi			
08.07.2010	17:50	L044	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
08.07.2010	18:02	L044	Ei saa valida konkreetset impulssi			
09.07.2010	5:21	L356	Ei saa valida konkreetset impulssi			
15.07.2010	16:00	L149	Ei saa valida konkreetset impulssi			
15.07.2010	16:55	L106B/D	-37,2	4	1,3/137	0,134
15.07.2010	17:26	L106B/D	-21,7	0	0,6/12	1,114
15.07.2010	17:59	L133A	-17,1	9	0,4/40	0,061
15.07.2010	18:19	L106B/D	-18,2	3	0,5/171	0,132
15.07.2010	19:00	L198/L199A/B	-34,6	2	0,7/143	0,437
15.07.2010	19:09	L134A/B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
15.07.2010	20:44	L143A/B	-12,6	0	2,5/134	0,380
18.07.2010	18:28	L086	13,5	3	0,5/55	0,949
28.07.2010	2:14	L109	54,1	1	0,7/139	0,705

29.07.2010	16:56	L159A/B	-8,8	2	5,6/153	0,628
29.07.2010	17:39	L105A	-11,2	1	1,6/133	0,015
29.07.2010	19:49	L110	-27,8	2	0,3/176	0,012
03.08.2010	22:00	L173/L176/L177	Ei saa valida konkreetset impulssi			
03.08.2010	23:50	L019A	-20,7	2	0,5/31	0,820
04.08.2010	00:24	L017	82	1	0,5/44	1,690
05.08.2010	12:15	L154/L155	-15,8	1	1,6/138	1,308
08.08.2010	22:39	L192	Ei saa valida konkreetset impulssi			
14.08.2010	7:20	L025/L026	-19,5	0	1/139	0,648
17.08.2010	18:54	L043	76,7	0	1/134	0,219
11.06.2011	14:43	L036	-31,8	1	0,5/16	0,405
11.06.2011	14:57	L189/L188/L027	-44,4	4	0,5/26	0,797
11.06.2011	16:26	L175/175A	Ei saa valida konkreetset impulssi			
13.06.2011	7:27	L195	-8,6	2	2,1/164	0,274
21.06.2011	14:21	L062	-77	0	0,9/138	0,315
21.06.2011	15:40	L198/L199A/B	-27,7	0	0,4/70	0,119
30.06.2011	20:52	L019B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
09.07.2011	12:25	L131A/B	-11,2	1	0,4/79	0,089
09.07.2011	15:27	L206	-14,5	1	1,2/141	0,101
09.07.2011	15:45	L206	Ei saa valida konkreetset impulssi			
09.07.2011	16:11	L206	Ei saa valida konkreetset impulssi			
09.07.2011	16:31	L206	-8,8	0	0,5/56	0,022
12.07.2011	00:18	L357	-29,7	1	2,1/71	0,300
12.07.2011	5:26	L206	Ei saa valida konkreetset impulssi			
12.07.2011	5:48	L196	-46,2	1	0,9/147	1,171
21.07.2011	4:19	L173/L176/L177	-14,5	3	0,7/9	0,613
21.07.2011	16:57	L018/L019A	Ei saa valida konkreetset impulssi			
26.07.2011	14:51	L033/L107C	-40,3	0	0,4/153	0,117
26.07.2011	18:02	L065	Ei saa valida konkreetset impulssi			
27.07.2011	22:43	L033/L107C	Ei saa valida konkreetset impulssi			
28.07.2011	0:10	L189/L188/L027	-29,1	0	0,7/43	1,564
28.07.2011	3:00	L209	Liin demonteeritud			
28.07.2011	14:59	L101	Ei saa valida konkreetset impulssi			
28.07.2011	15:09	L206	Ei saa valida konkreetset impulssi			
28.07.2011	15:27	L187	-22,6	7	0,6/55	0,074
28.07.2011	16:13	L135	-8,4	3	0,9/88	0,052
28.07.2011	16:44	L070	-10,5	1	1,5/124	0,375
28.07.2011	16:44	L071	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
28.07.2011	20:59	L143A/B	-13,3	2	24/169	7,016
29.07.2011	13:29	L196	-33,6	2	0,3/51	0,074
29.07.2011	15:27	L182	-11,8	1	0,5/51	0,199
29.07.2011	15:29	L209	Liin demonteeritud			
29.07.2011	16:27	L184	-9,2	0	0,5/51	0,199
09.08.2011	8:45	L035	-39,6	0	0,5/11	0,531
09.08.2011	14:41	L171	-14,2	1	0,4/168	0,327
09.08.2011	14:43	L035	-29,8	1	0,4/168	0,227
09.08.2011	14:43	L036	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
10.08.2011	16:30	L206	-8	0	0,6/71	0,124

24.09.2011	12:58	L206	-16,5	1	0,9/140	0,470
21.05.2012	16:20	L109	Ei saa valida konkreetset impulssi			
26.06.2012	19:18	L105A	-19,2	1	1,8/136	1,582
07.07.2012	18:19	L107A	Ei saa valida konkreetset impulssi			
08.07.2012	18:16	L020/L021	-16,6	1	1,7/165	0,374
17.07.2012	12:09:13	L206	67,9	1	1,4/79	0,402
28.07.2012	22:44	L018/L019A	Ei saa valida konkreetset impulssi			
29.07.2012	16:59	L099	Ei saa valida konkreetset impulssi			
30.07.2012	20:29	L104B/C	Ei saa valida konkreetset impulssi			
07.08.2012	00:38:13	L173/L176/L177	-20,4	4	0,6/11	1,812
07.08.2012	2:09:40	L209	Liin demonteeritud			
07.08.2012	2:17:41	L196	-17,1	0	0,4/51	0,019
07.08.2012	2:17:41	L197	Korraga kaks liini välja (vt. eelmine)			
17.08.2012	16:36	L133A	-6,6	0	0,7/47	0,025
08.09.2012	11:40:1(0->1)	L132A/B/C	-30,7	1	0,4/63	0,301
08.09.2012	18:28:26	L105A	Ei saa valida konkreetset impulssi			
13.05.2013	1:01	L358	-9,5	1	17,7/169	17,603
13.05.2013	1:24	L099	-18,6	0	0,8/127	0,012
17.05.2013	7:24	L175	22,1	7	0,6/15	0,542
04.06.2013	1:32:36	L173/L176/L177	-20,2	1	0,9/19	0,345
06.06.2013	15:18	L131A/B	-13,1	0	0,6/73	0,050
07.06.2013	15:48:15	L182	-27,6	2	0,3/149	0,481
07.06.2013	17:18:1(4->5)	L132A/B/C	-48,2	2	0,3/161	0,032
10.06.2013	13:28:47	L173/L176/L177	-43,5	1	0,7/148	0,452
18.06.2013	16:20	L142	-34,4	2	1,2/143	0,345
26.06.2013	13:53:52	L187	-71,2	2	1,3/133	0,123
26.06.2013	14:59:18	L141	-27,3	5	0,9/136	1,618
26.06.2013	16:44:37	L104B/C	-47,9	6	0,5/118	0,004
26.06.2013	16:47	L117/L117A	-41,1	4	2,2/134	0,095
26.06.2013	17:16:26	L138A/B	-56,8	2	0,8/144	0,118
27.06.2013	5:27	L072	-16,3	0	0,5/117	0,011
27.06.2013	5:27	L073	Korraga kaks liini välja (vt. eelmine)			
27.06.2013	5:50:03	L070	-19,1	0	0,5/109	0,063
27.06.2013	5:50:03	L071	Korraga kaks liini välja (vt. eelmine)			
27.06.2013	11:03:03	L099	85	1	2,9/139	0,340
04.07.2013	19:57:40	L132A/B/C	-27,4	1	0,3/120	6,977
05.07.2013	16:21	L104B/C	-7,5	2	1,1/94	0,377
18.07.2013	18:06:56	L206	-26	1	0,3/129	0,403
30.07.2013	21:11	L108A	73,1	1	0,3/164	2,414
09.08.2013	1:22:07	L108B	-13,5	0	0,4/161	0,007
09.08.2013	1:29:58	L180	-31,3	0	0,3/137	0,072
09.08.2013	1:29:58	L181	Korraga kaks liini välja (vt. eelmine)			
09.08.2013	2:33	L206	Ei saa valida konkreetset impulssi			
09.08.2013	2:40	L198	Ei saa valida konkreetset impulssi			
09.08.2013	2:40	L199A/B	Korraga kaks liini välja (vt. eelmine)			
09.08.2013	3:06	L005	-31,9	5	0,6/71	0,943
09.08.2013	3:06	L006A	Korraga kaks liini välja (vt. eelmine)			

09.08.2013	3:16	L197	-31,4	7	0,4/59	0,271
09.08.2013	3:18	L206	-12,8	0	0,6/58	0,453
09.08.2013	3:18	L195	-32	6	0,4/66	0,258
09.08.2013	3:22	L197	Ei saa valida konkreetset impulssi			
09.08.2013	3:30	L206	-16	3	0,3/89	2,026
09.08.2013	3:35	L198	-15	0	0,4/87	0,089
09.08.2013	3:35	L199A/B	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
09.08.2013	5:08	L178	-54,5	4	0,9/64	0,583
09.08.2013	5:09	L018/L019A	-24,1	0	0,9/67	0,054
01.09.2013	15:21:42	L133A	-15,1	1	0,4/68	0,024
10.05.2014	16:32	L142	-10,9	1	3/127	0,139
19.05.2014	18:21:42	L206	-9,4	3	6,6/169	1,585
19.05.2014	18:25:3(5->6)	L206	-19	1	1,6/178	0,886
19.05.2014	19:09:20	L196	-14,3	0	4,8/168	1,898
20.05.2014	20:07: (39->40)	L104B/C	-23	1	0,3/128	0,046
21.05.2014	15:01:04	L134A/B	-31,7	3	0,3/132	0,120
21.05.2014	15:05:04	L134A/B	-28,9	2	0,3/130	0,069
09.06.2014	15:16:26	L101	-25,4	2	0,2/94	0,174
09.06.2014	18:22:22	L100A	117,8	0	0,2/132	0,163
14.06.2014	16:43:05	L044	-42,6	1	0,3/132	0,229
07.07.2014	14:37:00	L194	-52,4	4	0,3/116	0,054
07.07.2014	14:37:00	L195	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
13.07.2014	19:07:35	L173/L176/L177	-8,4	0	0,3/153	0,425
13.07.2014	21:26:51	L019B	-12,5	2	0,2/147	0,070
13.07.2014	23:34:40	L145	-97,6	4	0,8/95	0,111
19.07.2014	16:21:25	L148	-58,4	1	0,5/94	0,930
19.07.2014	17:28:11	L154/L155	-35,6	0	0,5/112	0,150
19.07.2014	19:57:02	L033	-76,9	2	0,7/85	0,348
29.07.2014	14:52:12	L042	-16,7	1	0,6/107	2,143
29.07.2014	18:48:48	L159A/B	-25,9	3	0,4/127	0,174
29.07.2014	21:08:00	L130A/B	-117,3	3	0,6/91	0,123
07.08.2014	14:01:31	L017	-18,1	7	0,2/33	0,194
11.08.2014	23:14:56	L108A/B	-21	0	0,4/61	0,288
13.08.2014	3:06:51	L173/L176/L177	-11,5	1	0,6/63	0,438
13.08.2014	18:27:35	L110	-16,8	0	0,3/67	0,240
13.08.2014	19:07:08	L086	Ei saa valida konkreetset impulssi			
19.08.2014	15:35:5(6->9)	L192	-67,8	2	0,3/107	0,578
20.08.2014	13:14:12	L110	-24,7	2	0,2/99	0,119

^aKui kirjas on 0 siis see näitab, et tegemist on vähemalt kahe impulsiga välguga (liini tabanud impulss on sel juhul järellöögi impulss); 1,2,3.... näitab, et valitud on välgulöögi esimene impulss, ning vastav arv näitab välgulöögi impulsside arvu.

L.2. Äikese põhjustatud rikked, mis ei leidnud kinnitust (Äike -> teadmata põhjus)

Kuupäev	Kellaeg	Liini nr.
26.05.2006	13:51	L005
26.05.2006	13:51	L006A
26.05.2006	14:12	L160
06.08.2006	18:33	L147
02.05.2008	20:03	L108B
13.06.2009	17:23	L065
13.05.2010	17:58	L159A/B
18.07.2010	19:26	L182
08.08.2010	20:05	L206
12.08.2010	18:04	L206
15.08.2010	10:38	L025/L026
21.06.2011	14:22	L157/L158
28.07.2011	00:12	L189/L188/L027
28.07.2011	20:13	L185
28.07.2011	20:19	L106A/L057
29.07.2011	00:07	L132A/B/C
29.07.2011	14:19	L197
29.07.2011	14:19	L157/L158
29.07.2011	14:47	L110
29.07.2011	17:20	L110
12.07.2012	16:40	L014
12.07.2012	18:54	L037/L038
09.08.2013	5:05	L018/L019A
01.09.2013	13:16:41	L037/L038
01.09.2013	15:15:03	L133A

L.3. Teadmata põhjusega rikked, mille põhjuseks on äike (Teadmata põhjus-> äike)

Kuupäev	Kellaaeg	Liini nr.	Välguvoolu tippväärtus, kA	Valitud impulss ^a	Asukoha määramise täpsus (kaugus/nurk)	Mõõdetud kaugus liinidest, km
24.05.2005	18:03	L032	-41,8	1	1/136	0,233
02.07.2005	12:28	L058	-36,9	6	1,2/139	0,705
22.08.2006	15:55	L103	-9,1	5	0,5/75	1,926
28.05.2007	17:57	L020/L021	-22,1	6	0,3/60	0,145
24.06.2007	14:15	L173/L176/L177	-78,6	3	0,5/5	0,048
04.09.2007	17:43	L040	-34,5	5	0/168	1,316
04.09.2007	17:43	L044	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
04.07.2008	19:49	L159A/B	Ei saa valida konkreetset impulssi			
01.08.2008	17:57	L065	-18,1	3	0,5/105	0,002
01.08.2008	17:57	L192	Korruga kaks liini välja (vt. eelmine)			
01.08.2008	18:02	L138A/B	-22,2	1	0,5/108	0,148
08.08.2010	20:04	L506	59,4	1	2,3/148	4,729
15.08.2010	14:50	L154/L155	-11,7	0	1,7/132	3,771
17.08.2010	6:09	L105A	-32,1	1	4,2/157	3,564
02.09.2011	16:15	L042	-17,8	1	2/137	0,226

L.4. Liinidel esinenud äikesest põhjustatud rikete arv

Liini nr.	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Kokku	Liinide pikkus, km	Aastas rikkeid, tk	Rikkeid 100 km kohta, 1/(100 km·a)
L206			3				8	1	4	2	18	158,4	1,8	1,14
L018/L019/L039	1		2			2	2	1	1	1	10	81,4	1	1,23
L134A/B		1	1		3	2				2	9	70,7	0,9	1,27
L173/L176/L177		1	1			1	1	1	2	2	9	78,9	0,9	1,14
L198/L199A/B			2			1	1		4		8	56,4	0,8	1,42
L105A/B/C		2	2			2		2			8	78,7	0,8	1,02
L101		1	3			1	1			1	7	64,4	0,7	1,09
L195		2	1				1		1	1	6	19,3	0,6	3,11
L192			1	1	1	2				1	6	70,4	0,6	0,85
L104B/C						2		1	2	1	6	70,8	0,6	0,85
L044			1			3				1	5	11,1	0,5	4,50
L133A				1	1	1		1	1		5	43,6	0,5	1,15
L106D/B		1			1	3					5	46,6	0,5	1,07
L132A/B/C			1		1			1	2		5	49,1	0,5	1,02
L196							2	1		1	4	24,3	0,4	1,65
L110				1		1				2	4	38,6	0,4	1,04
L020/L021			2		1			1			4	38,8	0,4	1,03
L070				1			1		1		3	6,3	0,3	4,76
L071				1			1		1		3	6,3	0,3	4,76
L194		1	1							1	3	19,5	0,3	1,54
L036				1			2				3	20,1	0,3	1,49
L197								1	2		3	24,3	0,3	1,23
L017				1		1				1	3	28,7	0,3	1,05

L141			2					1		3	30,5	0,3	0,98	
L131A/B			1			1		1		3	32,7	0,3	0,92	
L099							1	2		3	36,6	0,3	0,82	
L159A/B				1		1			1	3	36,9	0,3	0,81	
L033/L107C							2		1	3	46,1	0,3	0,65	
L108A/B								2	1	3	47,2	0,3	0,64	
L154/L155						2			1	3	47,9	0,3	0,63	
L103		1			1	1				3	50,4	0,3	0,60	
L189/L188/L027			1				2			3	66,4	0,3	0,45	
L097						2				2	10,9	0,2	1,83	
L040			1			1				2	12,6	0,2	1,59	
L072						1			1	2	15	0,2	1,33	
L073						1			1	2	15	0,2	1,33	
L109						1		1		2	16	0,2	1,25	
L147		1				1				2	17,1	0,2	1,17	
L086						1			1	2	19	0,2	1,05	
L035							2			2	20	0,2	1,00	
L043						2				2	23	0,2	0,87	
L182						1		1		2	24,4	0,2	0,82	
L065				1		1				2	27,6	0,2	0,72	
L025/L026			1			1				2	31,8	0,2	0,63	
L142									1	1	2	32,4	0,2	0,62
L143A/B						1	1			2	34,4	0,2	0,58	
L138A/B				1					1	2	35,7	0,2	0,56	
L042						1			1	2	42,6	0,2	0,47	
L175/L175A						1		1		2	46,2	0,2	0,43	
L187						1		1		2	47,9	0,2	0,42	
L003				1						1	4,2	0,1	2,38	
L012			1							1	6,7	0,1	1,49	

L008				1						1	6,9	0,1	1,45
L167				1						1	9	0,1	1,11
L100A									1	1	9,3	0,1	1,08
L014							1			1	10,8	0,1	0,93
L184						1				1	14,6	0,1	0,68
L006A								1		1	16,7	0,1	0,60
L180								1		1	18,5	0,1	0,54
L181								1		1	18,5	0,1	0,54
L032	1									1	19,1	0,1	0,52
L107A							1			1	19,7	0,1	0,51
L149						1				1	20,4	0,1	0,49
L124A						1				1	20,5	0,1	0,49
L178								1		1	22,3	0,1	0,45
L171						1				1	22,5	0,1	0,44
L005								1		1	23,6	0,1	0,42
L062						1				1	24	0,1	0,42
L148									1	1	24,3	0,1	0,41
L135						1				1	25,5	0,1	0,39
L115/L115A			1							1	25,8	0,1	0,39
L118						1				1	28,2	0,1	0,35
L145									1	1	28,6	0,1	0,35
L130A/B									1	1	37,6	0,1	0,27
L058	1									1	39,1	0,1	0,26
L117/L117A									1	1	42,6	0,1	0,23
L037/L038	1									1	48,6	0,1	0,21
L106A/L057			1							1	48,6	0,1	0,21
L116						1				1	54,8	0,1	0,18
L357						1				1	70	0,1	0,14
L358									1	1	97,3	0,1	0,10

L506						1					1	107,8	0,1	0,09
L356						1					1	168,9	0,1	0,06
L209							2	1			3	demont		