

ENERGEETIKA. ELEKTROTEHNIKA. MÄENDUS D54

# **110kV õhuliinide isolatsiooni töökindluse analüüs ja töökindluse tõstmise meetodid**

PAUL TAKLAJA

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
Energeetikateaduskond  
Elektroenergeetika instituut

**Doktoritöö on lubatud kaitsmisele filosoofiadoktori kraadi taotlemiseks energia- ja geotehnika erialal 15. mail 2012**

**Juhendajad:** Rein Oidram, emeriitdotsent,  
Elektroenergeetika instituut,  
Tallinna Tehnikaülikool

Ivo Palu, dotsent,  
Elektroenergeetika instituut,  
Tallinna Tehnikaülikool

**Oponendid:** Juhani Tellinen, tehnikadoktor,  
GAMGA OY, arendusdirektor, Soome

Kalle Kilk, PhD,  
AS Elering, varahaldusjuht, Eesti

Doktoritöö kaitsmise aeg: 18. juuni 2012

Deklaratsioon

Deklareerin, et käesolev väitekiri, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli filosoofiadoktori kraadi taotlemiseks ja selle alusel pole varem taotletud akadeemilist kraadi.

Allkiri

Autoriõigus: Paul Taklaja, 2012  
ISSN 1406-474X  
ISBN 978-9949-23-299-4 (publication)  
ISBN 978-9949-23-300-7 (PDF)

THESIS ON POWER ENGINEERING,  
ELECTRICAL ENGINEERING, MINING ENGINEERING D54

**The study of 110 kV power grid  
reliability and the measures to decrease  
insulation failures**

PAUL TAKLAJA

**TUT**  
PRESS



## EESSÕNA

Käesolev väitekiri põhineb AS Elering poolt tellitud teadustööl „AS Elering 110 kV õhuliinide isolatsiooni töökindluse analüüs ja töökindluse tõstmise meetodid”. Vastav teadustööleping Tallinna Tehnikaülikooli ja AS-i Elering vahel sõlmiti 15. septembril 2009. Leping lõppes 15. juunil 2011 lõpparuande esitamisega AS-ile Elering. Väitekirja autor oli ajavahemikul 15.09.2009 kuni 15.02.2011 lepingu põhitäitja ning 15.02.–15.06.2011 lepingu vastutav täitja.

Perioodil 2009–2010 tegeles autor peamiselt AS-ilt Elering saadud rikkeandmete töötlemise ja analüüsiga ning uurimistööks vajalike katsete läbiviimiseks TTÜ kõrgepingelabori ettevalmistamisega:

1. uute juht- ja toiteseadmete (tarnija firma HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH) monteerimine ning seadistamine kõrgepingetrafo-kaskaadile;
2. kõrgepingetrafo-kaskaadi mõteseadmete olulisel määral täiendamine, lisades võimaluse mõõta voolusid kõrgepingeahelas;
3. parameetrite salvestamise süsteemi oluline täiendamine.

2011. aasta kevadel oli seega võimalik TTÜ kõrgepingelaboris läbi viia põhiline osa kõrgepingelistest katsetest. Kogutud andmete ja saadud tulemuste põhjal koostas autor lepingu vastutava täitjana teadustöö lõpparuande AS-ile Elering ning aasta hiljem, kevadel 2012, kasvasid viidatud uurimusest välja ingliskeelsed artiklid ja käesolev väitekiri.

Autor on tänulik AS Elering juhatuse esimehele Taavi Veskimäele, endise OÜ Põhivõrk juhatuse esimehele Lembit Valile, AS Elering Võrguhalduse osakonna liinide eksperdile Väino Miltile, TTÜ Elektroenergeetika instituudi emeriit-dotsendile Rein Oidramile, dotsent Ivo Palule, doktorant Jaan Niitsoole ja magistrant Marko Rannamaale olulise panuse eest nii lepingulise teadustöö kui ka väitekirja valmimisse.

Eriline tunnustus kuulub teadustöö lepingu tellijale AS-ile Elering, tänu millele sai TTÜ Elektroenergeetika instituut kõrgepingelabori kõrgepingetrafo-kaskaadile uued juhtseadmed, mis olid vajalikud antud uurimuse läbiviimiseks ning mida saab jätkuvalt kasutada nii õppe- kui ka teadustöös.

Samuti kuulub eriline tänu autori perekonnale ja lähedastele, kes olid mõistvad, toetavad ja hoolivad erinevatel pingelistel ning kiiretel aegadel.

Tallinn, 14.mai 2012

Paul Taklaja

# SISUKORD

1	SISSEJUHATUS.....	7
2	LIINIISOLAATORID.....	8
2.1	Klaasisolaatorid.....	10
2.2	Komposiitisolaatorid.....	16
2.3	Klaas- versus komposiitisolaatorid.....	27
2.4	Liiniisolaatorite asetused.....	28
2.5	Nõuded isolaatoritele ja isolaatorite valik.....	29
3	ISOLAATORITE SAASTUMINE, SAASTLAHENDUS.....	31
3.1	Isolaatorite saastumise viisid.....	33
3.2	Isolaatorite saastlahendus.....	37
3.3	Isolaatorite saastatuse määramine.....	42
4	RIKKED.....	46
4.1	Rikete registreerimine ja määramine.....	46
4.2	Andmete töötlus ja analüüs.....	47
4.3	Rikete kohta tehtavad järeldused.....	66
5	LABORATOORSED MÕÕTMISED.....	68
5.1	Katseseadmed.....	68
5.2	Mõõtemetodid.....	69
5.3	Katsetatavad isolaatorid.....	70
5.4	Mõõtetulemused.....	71
5.5	Mõõtmistulemuste järeldused.....	88
6	MÄÄRAMATA RIKETE VÄHENDAMISE ABINÕUD.....	90
7	JÄRELDUSED JA SOOVITUSED.....	101
	KOKKUVÕTE.....	103
	ABSTRACT.....	105
	PUBLIKATSIOONID.....	107
	KASUTATUD KIRJANDUS.....	108
	LISA A Tabelid ja joonised.....	111
	LISA B Elulookirjeldus.....	120
	LISA C Curriculum Vitae.....	123

# 1 SISSEJUHATUS

Käesolev uurimus kasvas välja konkreetsest probleemist. Eesti ülekandesüsteemi operaatoril, AS-il Elering, oli tekkinud probleem seoses määramata rikete (isolatsiooni ootamatu ülelööki) arvu tõusuga 110 kV ülekandevõrkudes. Kuna selliste rikete osakaal oli viimastel aastatel näidanud kasvutrendi, siis oli süsteemioperaator huvitatud määramata rikete põhjuste väljaselgitamisest, et leida sellele probleemile lahendus. Igale süsteemioperaatorile on määramata rikete arvu minimeerimine või sootuks elimineerimine väga tähtis, kuna iga rike võib põhjustada süsteemioperaatori ja tema klientide elektriseadmetele tõrkumisi või purunemisi, mis omakorda võib väljenduda otsestes rahalistes kahjudes. Probleemi võimalike tekkepõhjusteni jõudmiseks püstitas autor koostöös süsteemioperaatoriga rea loogilisi küsimusi, mis olid seotud nii tehnika kui ka ümbritseva keskkonnaga ning hakkas neile uurimistöö käigus vastuseid otsima.

1. Mis on määramata rikete (isolatsiooni ülelöökid) peamised põhjused, kas:
  - a) isolaatorite vananemine (klaas- ja komposiitisolaatorite eluiga),
  - b) purunenud ehk nn nullisolaatorid ketis (klaasisolaatorite puhul),
  - c) saaste (linnud, põldude väetamine ja kahjurite tõrje, tööstus, kombineeritud saaste vms),
  - d) lindude tekitatud lühised läbilennul juhtmete vahelt,
  - e) putukate kogunemisest põhjustatud nähtused,
  - f) ämblike poolt moodustatud võrkude niiskumine?
2. Milline on saaste mõju isolaatoritele (klaas- ja komposiitisolaatoritele)?
3. Kuidas muutuvad nii klaas- kui ka komposiitisolaatorite elektrilised parameetrid ajas ja saastetingimustes?
4. Kas lindude ekskrementsaaste korral annab komposiitisolaatorite kasutamine positiivsemaid tulemusi?
5. Kuidas vähendada isolatsiooni ülelöökid arvu?
6. Kas lindude kolooniate piirkondi tuleks hakata lugema kõrgema saastetasemega piirkondadeks?

Süsteemioperaator oli kogunud infot määramata rikete kohta aastatel 2005–2009. Käesoleva uurimuse raames on süstematiseeritud ja analüüsitud olemasolevat andmestikku ning seda võrreldud nii erialakirjanduses olevaga kui ka teiste riikide praktikatega; läbi viidud arvukalt katseid ja laboratoorseid mõõtmisi; kirjeldatud ja võrreldud nii klaas- kui ka komposiitisolaatorite põhilisi parameetreid (töökindlus, eluiga, saastetaluvus jms). Vajalikud kõrgepingelised katsed viis töö autor läbi TTÜ Elektroenergeetika instituudi kõrgepinge laboris.

Antud uurimuse eesmärgiks ongi leida määramata rikete tekkepõhjustused ning välja selgitada moodused, kuidas vastavaid rikkeid saab minimeerida ja/või ära hoida, et suurendada 110 kV ülekandeliinide töökindlust.

Väitekiri koosneb seitsmest peatükist, millest kaks esimest (*Peatükid 2 ja 3*) on teoreetilised kirjeldused, mis täies mahus põhinevad läbitöötatud eriala-kirjandusel, moodustades loogilise aluspõhja töö ülesehitusele ning selle erinevate osade paremale mõistmisele ja seoste loomisele.

Teises peatükis antakse üksikasjalik ülevaade liiniisolatoritest: mis isolaatorid üldse on ja milleks neid vaja läheb, millistest materjalidest isolaatoreid peamiselt valmistatakse, millised põhierinevused on ülekandevõrgu õhuliinidel kasutatavatel klaas- ja komposiitisolaatoritel, milliseid isolaatorite asetusi õhuliini mastidel kasutatakse ning millised nõuded on isolaatorite valikul kõige määravamad.

Kolmandas peatükis keskendutakse isolaatorite saastumisele ja saastlahendusele, tuues välja saastumise erinevad viisid ja selle, kui võrd oluline näitaja on isolaatorite saastetaluvus. Samuti selgitatakse saastlahenduse mõistet ning seda, kuidas määratakse isolaatorite saastatust. Kirjeldatakse nii saastlahenduse olemust kui ka vastava protsessi toimumise käiku. Empiiriliste valemite abil on esile toodud põhiparameetrid, millede muutmiste kaudu saab muuta ka isolaatorite saastlahenduspinge väärtuseid.

Neljanda peatüki põhiteemaks on rikked: defineeritakse määratud ja määramata rikked ning kirjeldatakse rikete registreerimise protsessi, töödeldakse ja analüüsitakse süsteemioperaatorilt saadud alginfot. Antud peatükis on esitatud uurimistöö käigus koostatud määramata rikete erinevaid sõltuvusgraafikuid ja tabeleid (atmosfääritingimused, sh päikese loojumised ja -tõusud, rändlindude pesitsusperioodid jms) ning analüüsitud ka õhu kaudu leviva ja isolaatori pinnale sadestuva saaste ja suurte lindude väljahajajate (mis langemisel ühtse joana ning möödumisel isolaatorist võib lühistada traaversit ja faasijuhti) võimalikku mõju rikete tekkele. Samas osas on määratud ka rikketüübid ja kõige tõenäolisemad rikete põhjustajad.

Viiendas peatükis tutvustatakse laboratoorsetes uuringutes kasutatud kõrgepingelabori seadmeid ning nende põhiparameetreid, samuti selgitatakse tehtud katsete meetodikaid. Laboratoorsete mõõtmiste eesmärgiks on kontrollida, kas rikkestatistika ning kirjanduse põhjal tehtud oletused ja järeldused peavad paika. Katsetatavatele isolaatoritele luuakse laboris looduses valitsevatele tingimustele võimalikult sarnased tingimused ning saadud tulemused fikseeritakse. Samas peatükis tuuakse välja ka mõõtmistulemuste järeldused.

Kuuendas peatükis esitab autor määramata rikete vähendamise abinõud – nii teadaolevad kui ka uuenduslikud – ning seitsmendas peatükis toob veel kord välja konkreetseid järeldused ja annab soovitusi 110 kV ülekandeliinide töökindluse tõstmiseks, sh pakub välja õhuliinimasti uut tüüpi konstruktsiooni koos isolaatorite vastavate asetustega.



## 2 LIINIISOLAATORID

### *ISOLAATORID*

Isolaatoreid vajatakse gaasilise isolatsiooni puhul pingestatud juhtide toetamiseks, et faasisjuhtide vahekaugused maandatud osade ja muude pingestatud osade vahel oleksid piisavad. Levinuimad isoleergaasid on õhk ja elegaas (SF<sub>6</sub>). Kui elegaasi kasutatakse seadmete siseisolatsioonina, siis õhku kasutatakse nii seadmete sise- kui ka välisolatsioonina.

Isolaatorid, mis toetavad pingestatud faasisjuhte, peavad olema heade elektriliste, mehaaniliste, termiliste ja keemiliste omadustega. Isolaatorite valmistamise materjale ja tüüpe (*Joonis 2.1*) on mitmeid.

Põhilised tahkedielektrikud, mida kasutatakse isolaatorites, on keraamika, klaas ja polümeerid. Need dielektrikud sisaldavad 4-valentseid aatomeid (keraamilistes ja klaasis räni ning polümeersetes süsinik), millel on võime moodustada laiendatud struktuure. Põhiline ja fundamentaalne dielektrikute omavaheline erinevus seisneb nende stabiilsuses. [1]

### *KERAAMIKA JA KLAAS*

Tugev keemiline (erimeliste laengute vaheline elektrostaatiline tõmbejõud) side räni ja hapniku vahel, mis seob kokku keraamilisi – portselani ja klaasi – dielektrikuid, annab kõrge sulamistemperatuuri, mehaanilise tugevuse (kuid samuti ka hapruse) ja keemilise „inertsuse” (madal reageerimisvõime teiste keemiliste ühenditega) ning vastupidavuse. Neil on samuti suur pinna vaba energia\* – termodünaamilise energia hulk, mis määrab pinna „kleepuvuse”, st kui tugevalt saasteained pinnaga nakkuvad, mistõttu on keraamilised isolaatorid märguvad (hüdrofiilsed) ja kergesti saastuvad. [1]

### *POLÜMEERID*

Polümeerid on aga vastupidiselt keraamilistele molekulaarselt nõrgalt seotud. Nad kõik lagunevad kuumuse (mõnesaja kraadi juures Celsiuse skaala järgi) toimel, mõne pinda kahjustab isegi vähene päikese ultraviolettkiirgus ning kõik nad on talitlustingimustel, mis põhjustavad isolaatori pinnal elektrilisi osalahendusi, võimelised reageerima atmosfääris oleva hapnikuga. Kõige tõsisem

---

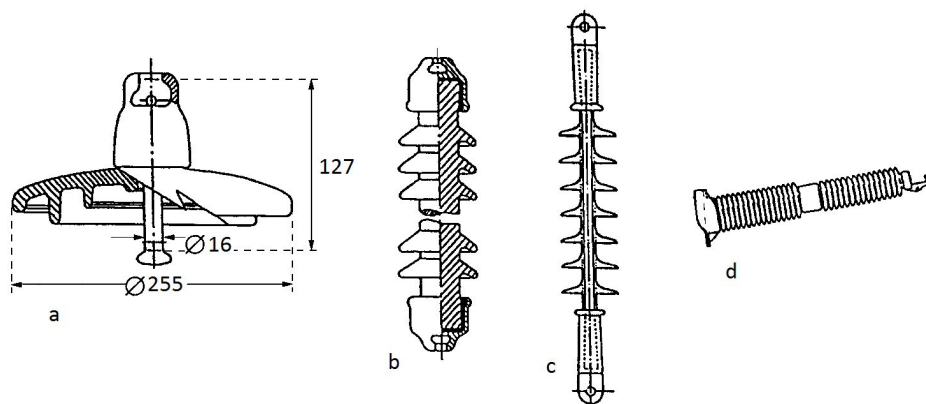
\* Molekuli lähenemisel tahkele kehale tekib vastastikmõju pinna aatomitega ja molekul kinnitub teatud tõenäosusega pinnale – toimub adsorptsioon. Adsorptsiooni nähtus on seotud sellega, et molekulidevahelised jõud faaside piirpinnal ei ole kompenseeritud, järelikult piirikihil tekib energia ülejääk – pinna vaba energia. Adsorbaadi molekulide pinnatõmbe tulemusena pinna vaba energia väheneb, seega on adsorbaadi protsessid energeetiliselt kasulikud. [51]

puudus on see, et nende baaselement – süsinik – on hea elektrijuht enamikus oma kombineeritud vormides. Erinevad pinnale mõjuvad tegurid, eriti kõrgetemperatuurilised elektrilahendused, mis põhjustavad isolaatoritel juhtivate radade teket (roomejälgi), võivad omakorda põhjustada isolaatorite ülelööke ja muuta lõpuks isolaatori kasutuskõlbmatuks. [1, 2]

Kuigi polümeerid on väga elastsed ja mitte haprad, on nende peamiseks eeliseks väike pinna vaba energia. Termodünaamiliselt, süsiniku skelettidega seotud vesinikuaatomite väline kiht, mis polümeeridel on suunatud atmosfääri poole, võimaldab nende vastupidavust märgumisele (hüdrofoobsed) ja saastele suuremal määral, kui see keraamika puhul tavaliselt võimalik on. [1]

## LIINIISOLAATORITE PÕHITÜÜBID

Joonisel (Joonis 2.1) on toodud kõrgepingeõhuliinidel kasutatavate isolaatorite põhitüübid. Kuna antud töö eesmärgiks on uurida õhuliiniisolaatoritel toimuvaid määramatat rikked, siis alljärgnevalt vaadeldakse ainult õhuliiniisolaatoreid.



Joonis 2.1 Õhuliiniisolaatorid: [3]

- portselanist või klaasist valmistatud taldrikisolaator (cap and pin insulator),
- portselanist valmistatud õhuliini varrasisolaator (long-rod insulator),
- õhuliini komposiitisolaator (composite insulator),
- portselanist valmistatud õhuliini tugiisolaator (line post insulator).

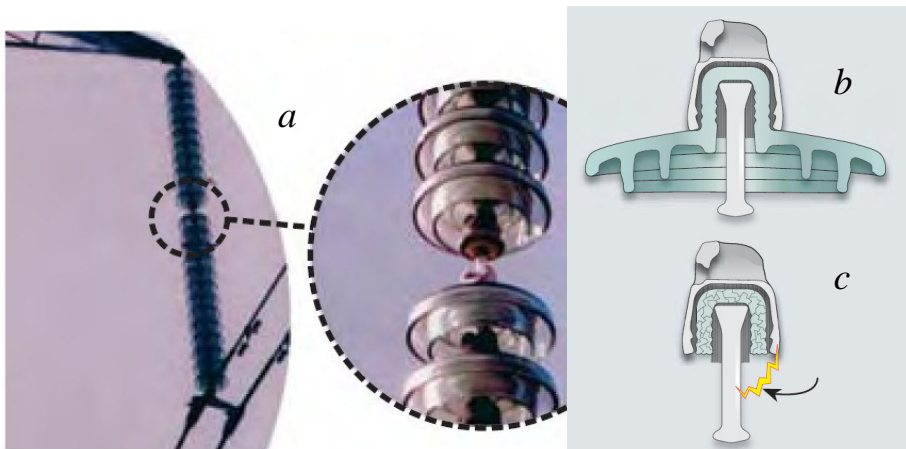
### 2.1 Klaasisolaatorid

Klaasi kui materjali olekut on raske defineerida. Rahvakeeli võiks klaasi olekut defineerida kui 'tahkunud vedelikku' [4]. Nagu eelpool mainitud, baseeruvad isolaatorite klaasid ränihenditel. Klaasid käituvad nii mõnelgi juhul kui üle jahutatud, tahkunud vedelikud ehk klaasil puudub aatomite kaugkorrastatus. Klaasi molekulid moodustavad erineva tasemega korrastatusi sõltuvalt tugevasti sellest, kui kiiresti sulaklaasi on jahutatud. Vastavalt sellele on ka erinevalt

jahutatud klaaside tihedused erinevad – kiirel jahutamisel on tihedus väikesem kui aeglasel jahutamisel. Aeglasel jahutamisel saadud klaas on mehaaniliselt nõrk materjal, kuna pinnal asetsevad mikropraod, mis saavutades kriitilise piiri, võivad vabalt areneda pikki isolaatorit. Seetõttu kasutatakse isolaatorite valmistamisel termiliselt karastatud klaasi, kus pinna mikropragude tekkimist takistatakse pinnale surve tekitamisega. Klaasi karastatakse, soojendades seda üle siirdetemperatuuri ja siis järsult pinda jahutades, põhjustades pinnal kiirema kahanemise kui sisemuses, mistõttu jääb sisemus välimise pinna poolt mehaanilise surve alla. See protsess parandab klaasi mehaanilist tugevust ca 3–4 korda. [1]

Isolaatoris kasutatava klaasi ja metalli termilised paisumistegurid erinevad üksteisest vaid ca 35% [5] (portselanil ca 2,8 korda), mis teeb klaasisolaatorid temperatuuride kõikumiste tsüklitele väga vastupidavateks.

Karastatud klaasi üks paremaid omadusi on see, et karastatud klaas on mehaaniliselt dünaamilises tasakaalus, mitte staatilises. Pinna surve ja sisemuse tõmbe tõttu on isolaatorisse salvestunud märkimisväärne kogus potentsiaalset mehaanilise pinge energiat. Kui see pinge vabastada, nt liigse välise mehaanilise või elektrilise koormusega, siis pudeneb terve isolaatori klaas väikesteks kuubikuteks [1]. See klaasisolaatorite eripära teeb katkiste taldrikisolaatorite avastamise liinimastil kaugvaatluse teel väga lihtsaks (Joonis 2.2, a) ja seetõttu ka vähe kulukaks [6].



Joonis 2.2 a) purunenud klaasiga isolaator isolaatorketis [6],  
 b) terve klaasiga isolaator,  
 c) purunenud klaasiga isolaator.

Taldrikisolaatorid (Joonis 2.2, b) ei kaota lõhkemise tagajärjel oluliselt oma mehaanilist tugevust (alles jääb ca 80%), kuna isolaatorimütsis olevad klaasitükid ei pääse mütsist välja (Joonis 2.2, c). See tähendab, et klaasist taldrik-

isolaatori purunemisel isolaatorketis kett ei katke ning faasijuht ei kuku maha (Joonis 2.2, a). [6, 7]

Ühe või kahe isolaatori purunemine, nn nullisolaatorid ketis (8-ne isolaatorkett) muudab küll pinge jagunemist ja lekkevoolude suurust, kuid pole keti elektrilisele talitluskindlusele veel otseselt ohtlik, kui tegu pole just saastatud piirkonnaga. See annab süsteemioperaatorile aega ajatada liini väljalülitamist hoolduseks süsteemioperaatorile sobivale ajale. Üldjuhul on selleks ajaintervalliks mõned kuud, mõningatel juhtudel ka aastad.

Taldrikisolaatorite miinimumarv, mis suudab puhastes tingimustes lühiajaliselt veel tagada 110 kV õhuliinil piisavat isolatsiooni (et ei tekiks ülelööki suurima lubatava kestevpinge puhul), on 2 standardisolaatorit. See on muidugi väga äärmuslik juhtum, kuid on ilmekaks näiteks, et klaasisolaatorkett on oma omadustelt – isegi juhul, kui osa isolaatoritest on purunenud – väga töökindel.

Klaasisolaatori mehaanisele tugevusele avaldavad märkimisväärset mõju isolaatori tootmisprotsess ja käidus erinevate saastes sisalduvate soolade ladestumine isolaatorile, mis põhjustavad niiskuse ning lekkevoolude abil mütsil ja tikul erosiooni (Joonis 2.3).

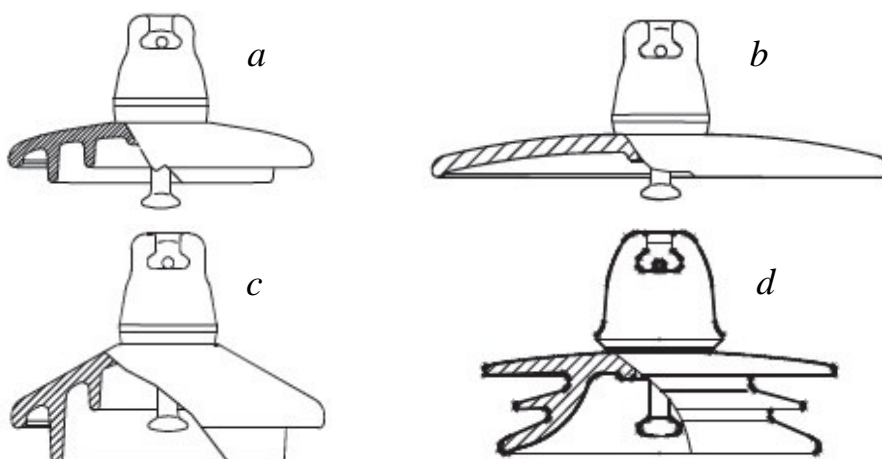


Joonis 2.3 Klaasist taldrikisolaatori tiku [2] ja mütsi erosioon.

Klaasi suhteline dielektriline läbitavus on 5–7, temperatuuri tõustes vähenevad takistus ja läbilöögitugevus oluliselt, kaonurga tangens suureneb temperatuuri tõustes ning sageduse vähenedes [7]. Klaasisolaatorite läbilöögipinge välis-temperatuuridel on aga sedavõrd suur, et seda pole siiani suudetud täpselt määrata. Siit järeldub, et klaasisolaatorid taluvad väga hästi kõikvõimalikke liigpingeid. Harvadel juhtudel, kui tugevalt saastunud klaasisolaatoril toimub pidev saastlahendus saaste kihi ja isolaatori pinna vahel, võib lokaalse temperatuuri tugeval tõusmisel toimuda isolaatori soojuslik läbilöök.

Klaasisolaatorite põhilisteks miinusteks on märgumine ja kerge saastumine. Sellest tulenevad ka märkimisväärsed energiakaod (võrreldes komposiitisolaatoritega) märgunud ning saastunud isolaatoritel. Isolaatorite saastumist

saab aga mõjutada isolaatorite kuju (profiili) muutes (Joonis 3.2), mistõttu on kasutuses mitmesuguse erineva kujuga isolaatoreid olenevalt sellest, millist tüüpi saastega on tegu. Klaasist taldrikisolaatoreid toodetakse põhiliselt nelja erineva profiiliga (Joonis 2.4).



Joonis 2.4 Levinuimad klaasitaldrikisolaatorite profiilid [8]:

- a) standardprofiil,
- b) aerodünaamiline ehk lametaldrikprofiil,
- c) uduvastane ehk tugevalt ribiline profiil,
- d) vahelduva seeliku diameetriga profiil.

#### Standardprofiil

Standardprofiil on n-ö 'kirik keset küla variant', mis sobib hästi vähese ja keskmise saastatusega piirkondadesse, kus pole niivõrd olulised lekkeraja pikkus ega isolaatori aerodünaamilisus (ehk õhu teel leviva saaste mittedadestumine). Antud profiili tüüp leiab laialdasemat kasutust ja on peaaegu muutumatul kujul olnud kasutuses juba ca 100 aastat. [1, 6, 8]

#### Aerodünaamiline profiil (lametaldrikprofiil)

Aerodünaamiline profiil on vajalik siis, kui isolaatori saastumine toimub põhiliselt õhu teel levivate saastaosakeste kaudu. See profiil kogub võrreldes teiste profiilidega kõige vähem õhu teel levivat saastet (Peatükk 3, Joonis 3.2). Sellel isolaatoril on ka hea isepuhastusvõimekus (tuulte ja vihmade abil). Leiab peamiselt kasutamist kõrbetes ning kohtades, kus esineb pikki põuaperioode. [1, 6, 8]

#### Uduvastane profiil (tugevalt ribiline profiil)

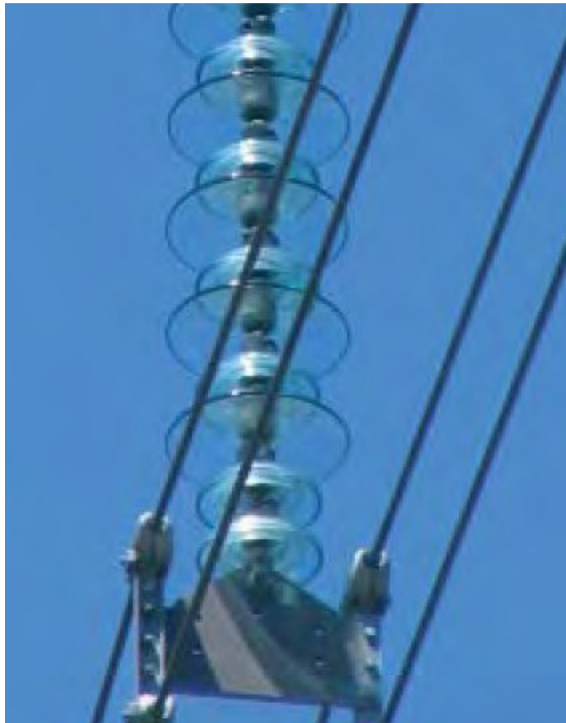
Tugevalt ribilisi isolaatori profiile kasutatakse kohtades, kus vajatakse võimalikult pikka lekkerada. Peamiselt on sellisteks paikadeks ookeanide ranniku- ja piirkonnad ning alad, kus esineb tihti suure soolasisaldusega udu/kastet/sademeid. Kohtades, kus enamik saastest levib tuulega ja pole kõrge soola-

sisaldusega, ei anna tugevalt ribiliste isolaatorite kasutamine positiivseid tulemusi, kuna need saastuvad (ribide juurest, isolaatori alt) oluliselt kergemini kui standard- või aerodünaamilise profiiliga isolaatorid (*Peatükk 3, Joonis 3.2*). [1, 6, 8]

#### *Vahelduva seeliku diameetriga profiil*

Vahelduva seeliku diameetriga isolaatori profiil on eelnevatest noorim. Vahelduva diameetriga seelikute kasutamisel suureneb isolaatori kohta lekkeraja pikkus ning paraneb ka paduvihma- ja jäätetaluvus. Kuna isolaatori alumine osa pole enam (tugevalt) ribiline, siis ei kogune sinna ka suurel määral õhu teel levivat saastet. Põhiline osa saastest koguneb nüüd seelikute vahele ning horisontaalsete seelikute vahel toimub isepuhastumine paremini kui vertikaalsete ribide puhul. Kuna enamus saastest asub isolaatori metallmütsist ja tikust kaugemal (suuremal diameetril), võrreldes tugevalt ribilise isolaatoriga, siis ei põhjusta saaste ka nii suuri lekkevoolusid. [1, 6, 8]

Vahelduva diameetriga isolaatori seeliku kasutamine annab positiivseid tulemusi kõikide profiilide puhul. Näiteks Kanadas kasutatakse õhuliinide jäite- ja paduvihmataluvuse suurendamiseks standardsete ja aerodünaamiliste isolaatorite järjestikkust asetust ketis (*Joonis 2.5*).



*Joonis 2.5 Vahelduva diameetriga isolaatorite kasutamine isolaatorketis [6].*

## *KLAASISOLAATORI PLUSSID JA MIINUSED*

Klaasisolaatorite oluliste omaduste esile toomiseks ning kiire ülevaate saamiseks on allpool loetletud ning igas loetelupunktis ka lühidalt kirjeldatud klaasisolaatorite plusse ja miinuseid. [1, 2, 7, 8, 9]

Plussid:

- inertsed erinevatele keemilistele ühenditele (saastele),
- kõrge temperatuuritaluvus, elektrihaar ei kahjusta oluliselt isolaatori pinda,
- visuaalsel vaatlusel kerge tuvastada mehaaniliselt riknenud isolaatorit,
- hea mehaaniline vastupidavus saastele,
- hea mehaaniline taluvus temperatuuri muutumiste tsüklitele,
- keti hea töökindlus, üksiku isolaatori purunemise suhteline mõju keti töökindlusele on väike,
- olnud kaua aega kasutuses, ca 100 aastat – head ja vead hästi teada,
- oodatav pikk eluiga, ca 50–60 aastat (klaas otseselt ei aegugi, vananemist põhjustavad saaste, metallosade erosioon, armeeriva tsemendi rabestumine),
- odav hind,
- läbipaistev, sulandub hästi taustaga,
- lihtne utiliseerida, sest põhikomponendid klaas ja metall on hõlpsasti taaskasutatavad materjalid.

Miinused:

- märguv ehk hüdrofiilne, kogub kergemini saastet,
- suuremad lekkevoolud ehk kaod (märgumisel, saastumisel),
- suur kaal, vajavad suurema kandevõimega maste, raskem monteerida,
- kuna isolaatorketid paigaldatakse enamasti rippele, on vajalikud suuremõõtmelised mastid,
- mehaanilise tugevuse vähesus ülikõrgepingeliinides kasutamiseks,
- saadaval vaid tõmbele (isolaatori suhtes, mitte dielektriku suhtes) töötavad (ripp-) taldrikisolaatorid,
- suur diameeter, võimalikud esteetilisuse probleemid,
- ei talu vandalismi, on haprad.

## 2.2 Komposiitisolaatorid

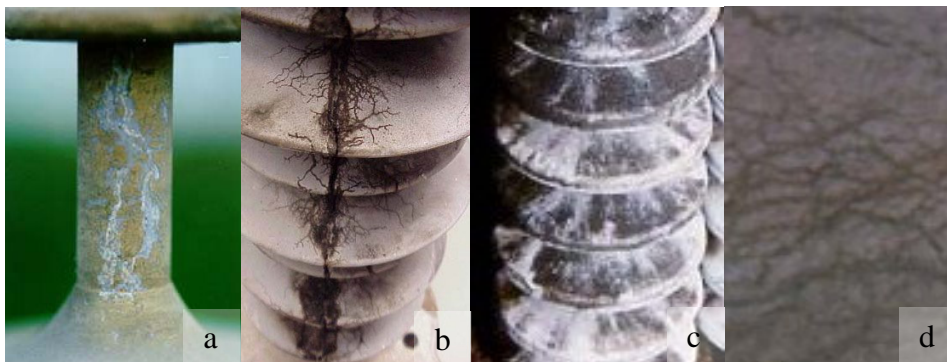
Mittekeraamilistes isolaatorites kasutatakse klaasi ja portselani asemel polümeere. Komposiitisolaatorid valmistatakse peamiselt mehaanilist koormust kandvast klaasfiibervardast ja seda katvast polümeerkihist ning seelikutest, mis annavad isolaatorile suure elektrilise tugevuse. Esimesed sellise ehitusega komposiitisolaatorid võeti ülekandevõrkudes kasutusse pea pool sajandit tagasi, juba 1970ndatel aastatel. Põhilised komposiitisolaatorite eelised on: [1, 2, 9, 10]

- kerge kaal, mis vähendab ehitus- ja transpordikulusid,
- parem vastupidavus vandalismile: mitte haprad, vaid elastsed,
- suurem tugevuse ja kaalu suhe, mis võimaldab ehitada pikemaid isolaatoreid,
- parem taluvus saastele,
- väiksema diameetri tõttu paistavad vähem silma ning on seetõttu esteetilisemad.

Esmased komposiitisolaatorite välikasutamise kogemused olid negatiivsed, kuna esines mitmeid tõrkeid. Tüüpilisteks probleemideks olid: [1, 2, 9, 10]

- saastunud isolaatorite ribidel esinevad roomejäljed ehk juhtivad rajakesed ja erosioon, mis põhjustasid ülelööke (*Joonis 2.6*),
- isolaatori pinnal mikropragude teke ja pinnastruktuuri kahjustused ehk nn kriidistumine, mis põhjustasid saaste kogunemist, osalahendusi ja ülelööke (*Joonis 2.6*),
- saastlahenduspinge vähenemine ja lisanduv altisus saastumisele põhjustasid ülelööke,
- mehaanilise tugevuse vähenemine, mis tegi keeruliseks tegelikult vajamineva mehaanilise tugevusega isolaatori määramise,
- isolaatorite metallotsakute lahti tulemine varda küljest,
- varda ja ribide ühenduskohtade vigastumised ja purunemised,
- vee sisseimbumine vardasse, mis põhjustas elektrilisi ja mehaanilisi tõrkeid.





Joonis 2.6 Komposiitisolaatorite kahjustusi [2]:

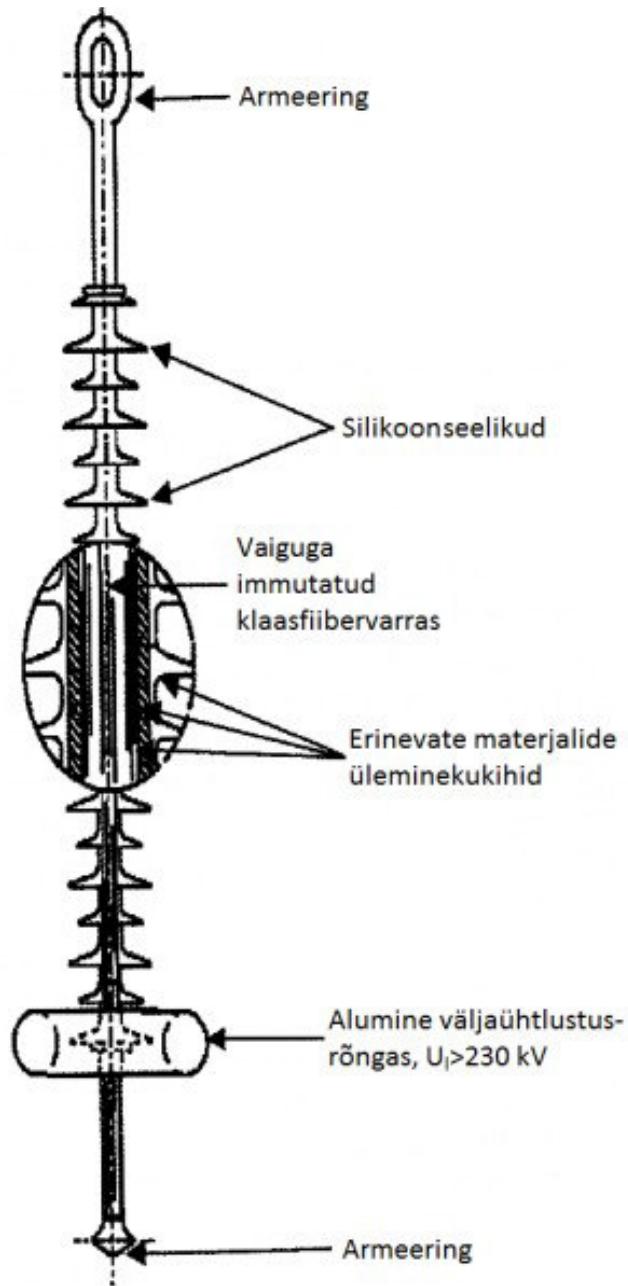
- a) Erosioon (erosion).
- b) Roome jäljed (tracking).
- c) Kriidistumine (chalking).
- d) Mikropraod (crazing).

Tänu ilmnunud tõrgetele on tehtud komposiitisolaatorite vallas ulatuslikke uurim-  
 guid ning nende tulemusel on välja töötatud parendatud nn teise- ja kolmanda  
 põlvkonna isolaatorid. Parendatud isolaatoritel vähendati isolaatorite ribidel  
 esineda võivate juhtivate radade tekke hulka, suurendati taluvust koroonale ning  
 täiendati metallotsakute fiibervardale kinnitumiste viise. Parema arusaamine  
 tõrkemehhanismidest ja mehaanilise tugevuse ning aja omavahelistest sõltu-  
 vustest on viinud uue konfiguratsiooniga komposiitisolaatorite valmistamiseni,  
 mille eeldatavaks elueaks on planeeritud ca 20–30 aastat. [1, 2, 9, 10]

Komposiitisolaatorite omadustest on klaasisolaatoritega võrreldes keerulisem  
 üldist kokkuvõtet teha, kuna puuduvad n-õ standardsed komposiitisolaatorid. Iga  
 tootja arendab ning kasutab isolaatorite valmistamisel erinevaid materjale,  
 pinnakujuksid ja monteerimisviise. Suured erinevused on ka sama tootja eri-  
 nevatel aegadel valmistatud isolaatoritel. Eelnevast tulenevalt on tuleviku-  
 ennustuste tegemine komposiitisolaatorite kohta oluliselt raskendatud, kuna  
 kasutatavad ajaloolised andmed ei kehti uute kasutusse võetavate materjalide  
 kohta. Seega on komposiitisolaatorite puhul keeruline näha ette nende käitumist  
 tavatalitlusel ning prognoosida isolaatori võimalikku eluiga. Küll aga saab ära  
 tuua isolaatorite põhilised komponendid ning nende mõjud isolaatori talitlus-  
 kindlusele ja elueale.

Komposiitliiniisolaatori põhilisteks komponentideks on (Joonis 2.7):

- armeering (metallotsakud),
- varras,
- seelikud,
- väljaühtlustusrõngad.

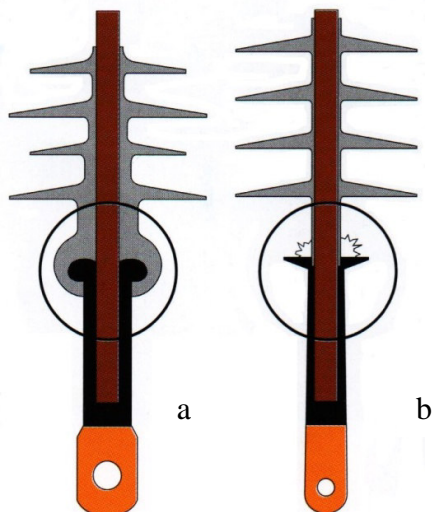


Joonis 2.7 Tüüpiline silikoonkattega komposiitisolaator. [9]

### Armeering (metallotsakud)

Armeering on mehaanilist jõudu üle kandvaks ühenduslüliks isolaatori ning juhtme ja traaversi vahel. Viimastega kinnitamiseks võib tellida erinevaid otsikuid. Materjaliks on enamuses galvaniseeritud teras, alumiinium, pronks või nende sulam. Vardale kinnitamiseks kasutatakse kas kiilumist (Joonis 2.8, b) või pressimist (vormpinnaga stantsimist) (Joonis 2.8, a) vardale ühtlase survega. Käidukogemused näitavad, et pressmenetlusel kinnitatud metallotsakutega valmistatud komposiitisolaatorid on töökindlamad (esineb vähem varda habrasmurde, kuna armeeringu surve vardale on ühtlane).

Eriti tähtis koht on kolme materjali varras-armeering-seelik kokkupuutepunkt. Armeering peab olema valmistatud elektrivälja ühtlustava kujuga (võimalikult suure raadiusega ümar kuju), et vähendada osalahenduste tekke võimalusi armeeringu ja varda ning seeliku vahel (Joonis 2.8, a). Elektrivälja mõju kattedmaterjalile saab vähendada, kui suurendada seeliku materjali paksust lähenedes armeeringule (Joonis 2.8, a). Väga oluline on ka see, kuidas kolme materjali kokkupuutepunkt on tihendatud (kuidas ära hoida vee tungimine isolaatorisse). Parimaks on hinnatud konstruktsiooni, kus seeliku materjal ulatub armeeringu peale (Joonis 2.8, a). [11]

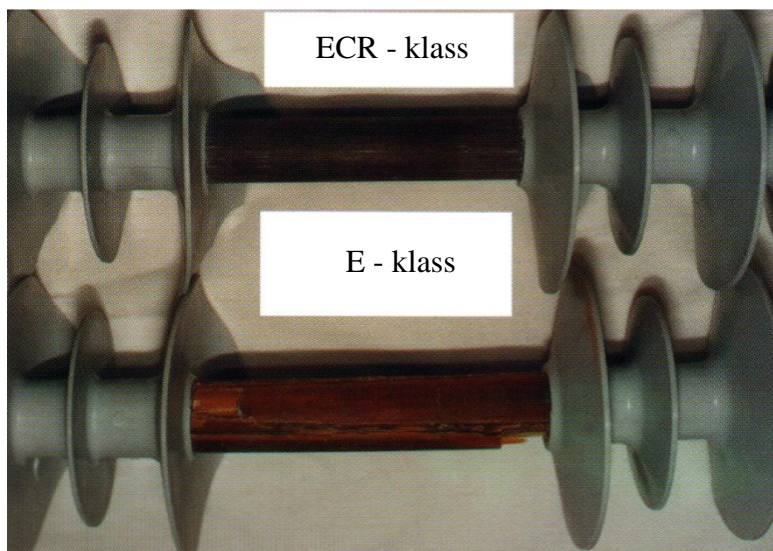


Joonis 2.8 Erineva kujuga armeeringud [11]:

- a) suurema raadiusega armeering (parendatud disainiga komposiitisolaator): armeering on kinnitatud vardale pressmenetlusel, seeliku materjal katab osaliselt armeeringut, seeliku materjali paksus kasvab lähenedes armeeringule, vahelduva diameetriga seelikud;
- b) väiksema raadiusega armeering (tüüpilise disainiga komposiitisolaator): armeering on kinnitatud vardale kiilmenetlusel, seeliku materjal ei kata armeeringut, seeliku materjali paksus ei muutu lähenedes armeeringule, mittevahelduva diameetriga seelikud.

### Varras

Varras on ette nähtud mehaanilise jõu vastuvõtmiseks ja on enamasti valmistatud epoksüüd- või polüestervaiguga seotud fiiberklaaskiududest. Vardaid toodetakse kas pidevprotsessil või teatud pikkusega partiide kaupa. Ühtlane klaaskiudude jaotus tagab võrdse koormamise ja ühtlane immutamine annab hea painduvuse fiibrite ja vaigu vahel. Epoksüüdvaik annab paremaid tulemusi, polüester on aga odavam. Klaasfiibreid jaotatakse keemilise koostise ja kasutusotstarbe järgi klassidesse. Komposiitisolaatorite varraste valmistamisel kasutatakse enamasti E-klassi klaasfiibreid, et vähendada habrasmurdumiste ohtu. Veelgi paremaid tulemusi annab aga ECR-klassi klaasfiibervarraste kasutamine (Joonis 2.9). Fiiberklaaskiududest valmistatud vardasse ei tohi jääda vaiguga immutamisel tühemikke (osalahenduste tekke vältimiseks), varras ei talu ka niiskust (suureneb juhtivus ja fiibritega paralleelsesesse poori tunginud vesi toimib kui nõel-elektrood; osalahendused), varras kahjustub kergemini radiaalsele survele (armeeringu kinnitusviis on oluline, parimad on ühtlase survega pressmeetodil kinnitatavad armeeringud). Varraste mehaanilised omadused degradeeruvad aja jooksul, kuna osade fiibrite struktuurivead kasvavad talitlusel kriitilise piirini ja läbi kaitsva seeliku materjali tungib siiski mõningal määral niiskust. [1, 11]

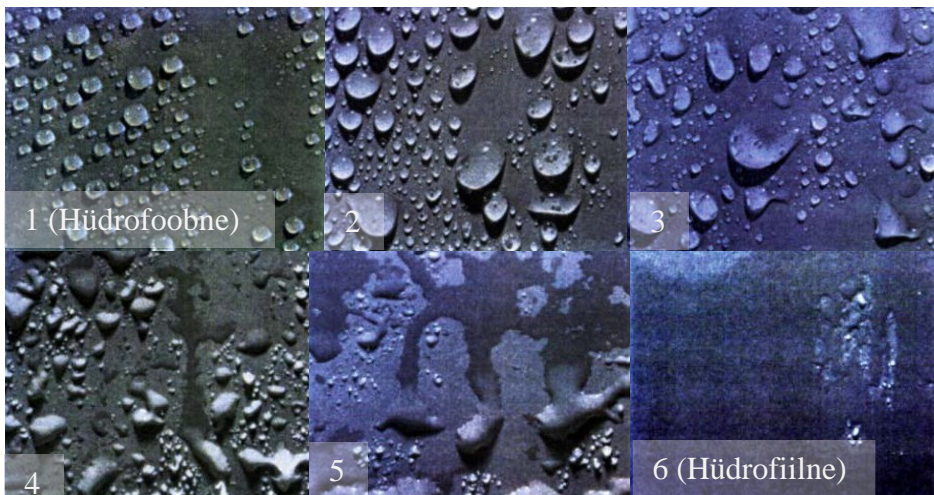


Joonis 2.9 ECR ja E-klassi varraste näidised peale 96-tunnist lämmastikhappe testi. [11]  
ECR – puuduvad habrasmurrud, säilinud on mehaaniline tugevus.

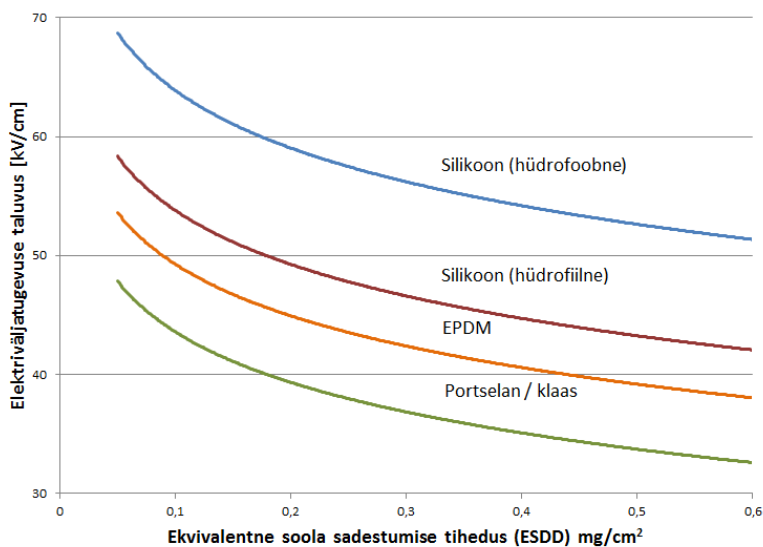
### Seelikud

Seelikud on ette nähtud vajaliku lekkeraja pikkuse saavutamiseks ja varda kaitseks. Seelikute pinnakonfiguratsioon peab tagama õhu teel leviva saaste minimaalse sadestumise (Joonis 3.2) ja tõrjuma vett (olema hüdrofoobsed) (Joonis 2.10), nii kondenseerunud kui ka sademevett. Kuna varda kattmaterjal (millest on valmistatud ka seelikud) on kontaktis atmosfääriga, on kattmaterjali omadused isolaatori talitluskindlusel määravaimad. Peamisteks kattmaterjali-

deks on kas etüleen propüleen kopolümeer (EPM), etüleen propüleen dieen monomeer (EPDM) või silikoonkumm (silikoonpolümeer ja täiteaine). Silikoonkumm on neist saastumiskindlaim (*Joonis 2.11*). [12] Olgu veel öeldud, et isolaatorite katematerjal ei koosne monomaterjalist, vaid ka erinevatest lisanditest, mille eesmärkideks on parandada isolaatori mehaanilisi, elektrilisi, termilisi ja keemilisi omadusi.



*Joonis 2.10* Komposiitisolaatorite erinevad hüdrofoobsuse astmed kuni hüdrofiilsuseni [2].



*Joonis 2.11* Pinna elektriväljataluvuse ja märgunud isolaatori ESDD vaheline sõltuvus [12].

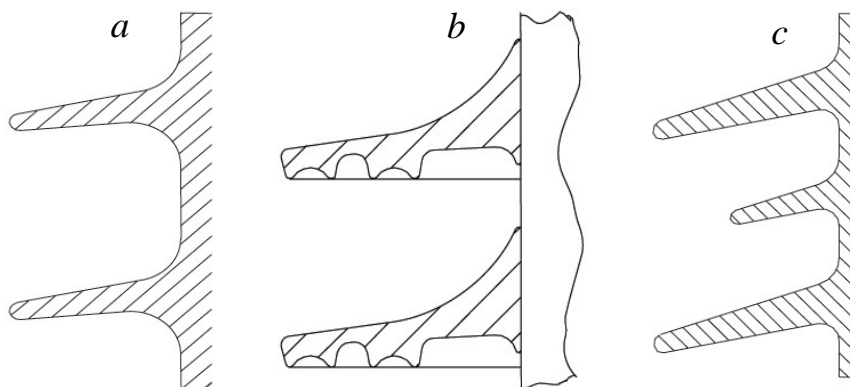
Komposiitisolaatorite talitluskindlust mõjutavad olulisel määral seelikute, varda katematerjalide ja armeeringute paigaldamise viisid: [1, 9, 11]

- Kattematerjal kantakse vardale (osadel isolaatori tüüpidel lisatakse varda ja katematerjali vahele ka täiteainet, mis parandab tihedust, takistab niiskuse sissepääsu ja aitab isolaatoril taastada hüdrofoobsust), misjärel paigaldatakse kaetud vardale rõngakujulise soonega seelikud (silikoon n-õ liimitakse õliga kaetud vardale). Pidev aeglane silikoonõli lekkimine seelikute vahelt takistab niiskuse tungimist seeliku ja kaetud varda vahele. Kaetud varda otstesse kinnitatakse pressmenetluse abil armeeringud. Armeeringute surve tihendab varda, varda katte ja armeeringu omavahel piisaval määral, et armeeringusse ja vardasse ei tungiks niiskust.
- Vardale kantakse ühtne mass silikooni (ehk seelikud ja katematerjal moodustavad ühtse massi, mis ümbritseb varrast). Antud meetod on eelmisest parem, kuna probleeme ei valmista enam seelikute ja kaetud varda ühenduskohad, sest need lihtsalt puuduvad. Seejärel paigaldatakse kaetud vardale ka armeeringud (*Joonis 2.8, b*).
- Vardale paigaldatakse armeeringud, peale mida kantakse vardale ülekatttega (katab osaliselt ka armeeringuid) ühtne mass silikooni (ehk seelikud ja katematerjal moodustavad ühtse massi, mis ümbritseb varrast ja osaliselt ka armeeringuid) (*Joonis 2.8, a*). Viimane paigaldusviis annab parima niiskuskindluse, kuna katematerjal katab osaliselt ka armeeringut ning kolme materjali liitumiskoht on kaetud paksema katematerjaliga. Uuematel isolaatoritüüpidel puudub ka vajadus lisaaine järele varda ja katematerjali vahel, kuna katematerjali on täiendatud täitainete ning lisanditega, mis takistavad roomejälgede ja erosiooni teket ning niiskuse läbitungimist.

Komposiitisolaatoritel mõjutab õhu teel lenduva saaste sadestumist olulisel määral ka see, et seelikute mõõtmed (pindala ehk õhutakistus) on oluliselt väiksemad (diameetrid  $ca$  2 korda, seelikute paksused veelgi enam kordi) kui standardklaasisolaatoritel. Mõnevõrra vähem mängivad õhu teel leviva saaste sadestumisel rolli komposiitisolaatorite profiilid, kuna need ei erine õhu liikumist takistavate omaduste poolest üksteisest oluliselt. Isolaatorite profiilidel on aga olulisem roll veepiiskade seeliku pinnalt minema juhtimisel, selleks on sobivaimad profiilid  $b$  ja  $c$  (*Joonis 2.12*). Kuna aga profiilile  $c$  sadestub õhu teel vähem saastet ning ka paduvihma- ja jäätetaluvus on parem kui profiilil  $b$ , siis sobilikum on kasutada komposiitisolaatorite puhul profiili  $c$ .

Tuleb meeles pidada, et kui on tarvis pikema lekkerajaga isolaatorit, siis tasuks valida isolaator, mis on pikem või millel on rohkem seelikuid, mitte suuremate seelikute diameetritega isolaatoreid, kuna suur seeliku ja varda (varda kaetud osa, mis jääb seelikute vahele) vaheline diameetrite suhe põhjustab suuremaid lekkevoole ning vardal osalahenduste arvu kasvu. [10]

Komposiitisolaatoreid toodetakse erinevate profiilidega, põhilisemateks on:



Joonis 2.12 Levinuimad komposiitisolaatorite profiilid: [13, 14]

- a) aerodünaamiline ehk lametaldrikprofiil,
- b) uduvastane ehk ribiline profiil,
- c) vahelduva seeliku diameetriga profiil.

### Väljäähtlustusrõngad

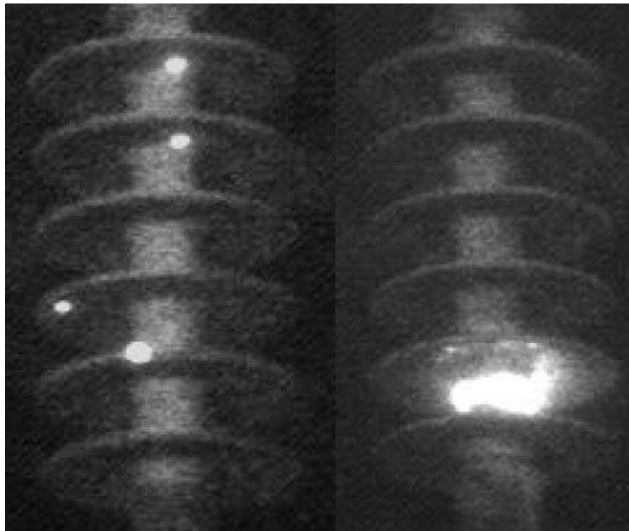
Väljäähtlustusrõngad on kasutusel enamasti liinipingetel 220 kV ja rohkem. Nende kasutamist tingib elektrivälja ebäühtlane jagunemine isolaatoril, st elektrivälja on suurim isolaatori juhtmelähedasel osal. Madalamatel pingetel kasutatakse tihti ainult nn sarvi, mille ülesandeks on võimaliku elektrikaare juhtimine seelikutest eemale. Väljäähtlustusrõngaste kasutamine aitab vähendada osalahenduste määra isolaatoril (Joonis 2.13).



Joonis 2.13 Osalahendused väljäähtlustusrõngata ja väljäähtlustusrõngaga märjal isolaatoril.

## KOMPOSIITISOLAATORITE VANANEMINE

Enamik mittekeraamiliste isolaatorite tehnilisi arendustöid keskendub komposiitisolaatorite vananemisele ja vananemisprotsessi modelleerimismeetodite arendamisele. Kuna elektriülekanne õhuliinid talitlevad saastunud atmosfääris, siis paratamatult saastuvad peale mõnekuulist talitlemist ka isolaatorid. Udu ja hommikune kaste põhjustavad isolaatori märgumist, tekkiv lekkevool jaotub pinnal ebahühtlaselt, mille tulemusel tekivad kuivanud tsoonid ning nendel kuivanud tsoonidel ka osalahendused. Liinide öised jälgimised valgust võimendavate öövaatlusseadmetega näitavad, et märgades oludes toimuvad peaaegu kõigi liinide isolaatoritel osalahendused (*Joonis 2.13* ja *Joonis 2.14*). Ultraviolettkiirguse ja osalahenduste pikaajaline mõju aga halvendavad isolaatorite mehaanilisi ning elektrilisi parameetreid. Peamisteks komposiitisolaatorite vananemise põhjustajateks ongi ultraviolettkiirgus ja osalahendused isolaatori pinnal, mis tähendab, et komposiitisolaatorite eluiga on väga raske määrata. See oleneb tugevalt asjaolust, kui päiksepaistelises ja/või saastunud piirkonnas komposiitisolaator talitleb. Isolaator võib talitleda pika aja vältel eeskujulikult, kui ta asetseb vähese saastega piirkonnas, st osalahenduste määr pinnal on suhteliselt väike (isolaator degradeerub aeglaselt). Nii toimub see enamikes piirkondades nn traditsioonilise ehk õhu teel leviva saaste puhul. Kui aga isolaator asetseb tugevalt saastatud piirkonnas, nt tööstuste või ookeanide lähistel, siis võib degradeerumisprotsess olla oluliselt kiirem ning tõrge isolaatoril võib ilmnedda juba mõne talitluses oldud aasta järel. Tehtud uuringud näitavad, et osad isolaatorid võivad talitleda tõrgeteta 18–20 aastat, samas kui mõned isolaatorid võivad tõrkuda juba mõnekuise talitluse järel. [9]



*Joonis 2.14* Veepiiskadest tekitatud osalahendused (vasak) ja kuiva tsooni põhjustatud osalahendused (parem) [15]



Laboratoorsete andmete ja kirjanduse analüüsimisel on toodud välja järgmised isolaatori vananemise hüpoteesid: [1, 2, 8, 9]

1. Tuul kannab tolmu ja teisi saasteaineid komposiitisolaatori vett tõrjuvale (hüdrofoobsele) pinnale. Mehaaniliste jõudude ja UV kiirguse kombineeritud toime tekitab vähest pinnaerosiooni, mis suurendab pinna-karedust ning soodustab saaste kogunemist pinnale.
2. Difusioon viib polümeerid välja suuremast osast ümbritsevast materjalist ning need seovad pinnale sadestunud saaste. Õhuke polümeeride kiht katab saaste, mille tõttu pind jääb vetthülgavaks (hüdrofoobseks).
3. Kõrge niiskus, udu, kaste või kerge vihm tekitavad isolaatori hüdrofoobsele pinnale veepiisad. Veepiisad võivad voolata järsematelt (nt vertikaalsetelt) pindadelt alla või maha. Teistel, mitte nii järskude pindadega pinna piirkondades, difundeeruvad saasteained veepiiskadega läbi õhukese polümeerikihi ning piisad muutuvad juhtivateks.
4. Vee sattudes piiskade vahelisele kuivale saastele märgub saaste aeglaselt. See viib aga suure takistusega elektrolüüdikihi tekkimiseni ning lekkevoolu komponent muutub mahtuvuslikust aktiivseks.
5. Saaste ebahühtlane jaotumine ja märgumine tekitab ka ebahühtlase kujuga elektrivälja jaotumist mööda isolaatori pinda. Koroonalahendused algavad piiskade ümber, kuhu on koondunud kriitiline hulk elektrivälja jõujooni ehk kohas, kus ületatakse õhu elektriline tugevus. Täiendavaid osalahendusi võib toimuda ka piiskade vahel.
6. Toimuvad osalahendused kulutavad ära õhukese polümeerikihi piiskade ümbert ja kaotavad nii viisi pinna hüdrofoobsuse.
7. Pinna hüdrofoobsuse halvenemine viib piiskade laialivalgumiseni ja juhtiva kihi moodustumiseni suure väljatugevusega piirkonnas. See suurendab lekkevoolu.
8. Lisanduv lekkevool põhjustab suuremat soojuse eraldumist, mille tõttu moodustuvad isolaatori pinnale kuivad piirkonnad.
9. Selles staadiumis on pinnal kuivad alad, märjad ehk juhtivad alad ja hüdrofoobsed pinnad, millel on juhtivad piisad. Sellisel pinnal on elektrivälja kuju tugevalt ebahühtlane.
10. Ebahühtlane elektrivälja jagunemine põhjustab osalahendusi ja elektri-kaari erinevate kuivade tsoonide vahel. Need osalahendused põhjustavad edasist pinna degradeerumist, hüdrofoobsuse kadu ja kuivade alade laienemist.
11. Osalahendused põhjustavad pinna erosiooni, mis kiirendab isolaatori pinna vananemist.

12. Ilmastikuolude muutus, nagu näiteks päikesetõus, vähendab märgumist. Isolaatori pinna kuivades osalahendused lakkavad.
13. Isolaatori hüdrofoobsus taastub, kui osalahendustevaba periood on piisavalt pikk. Üldiselt taastuvad silikoonisolaatorid *ca* 6–8 tunni jooksul, EPDM isolaatorid vajavad taastumiseks *ca* 12–15 tundi.
14. Kirjeldatud protseduuri pidev kordumine põhjustab pinna erosiooni. Pinnakaredus suureneb ja saaste sadestumine kiirendab vananemist.
15. Erosioon tekib osalahenduste poolt põhjustatud temperatuuri tõusu ja keemiliste reaktsioonide tõttu. Pinnatemperatuuri punktmõõtmised näitavad suuremates osalahenduste punktides temperatuure 260°C kuni 400°C.

Hüpoteese toetavad mõõtmised, mille kohaselt isolaatori eluiga on kuiva kliimaga piirkondades pikem kui niiskema kliimaga piirkondades. Saastehulga suurenemine vähendab isolaatori eluiga. Hüpoteesi toetab ka väljajähtlustusrõngaste olemasolul eluiga pikendav mõju isolaatori elueale. [9]

Isolaatorite loomuliku vananemise ja edasiste laboratoorsete uuringute tulemused on näidanud olulisi erinevusi erinevate tootjate poolt toodetud isolaatorite töös. Kui loomulik vananemine tekitab mõnele isolaatoritele tõsiseid kahjustusi, siis teistele see väga ei mõjunud. [9]

#### *KOMPOSIITISOLAATORITE PLUSSID JA MIINUSED*

Komposiitisolaatorite oluliste omaduste esile toomiseks ning kiire ülevaate saamiseks on allpool loetletud ning igas loetelupunktis ka lühidalt kirjeldatud komposiitisolaatorite plusse ja miinuseid. [1, 2, 9, 10, 11, 12]

Plussid:

- mittemärguv ehk hüdrofoobne, kogub raskemini saastet,
- väiksemad lekkevoolud ehk kaod (märgumisel, saastumisel),
- lühiajaliselt talub hästi tugevat saastumist (mõju isolaatori elueale),
- väiksema diameetri ja saledamate seelikute tõttu saastuvad raskemini,
- väiksema diameetri tõttu paistavad vähem silma ning on seetõttu esteetilisemad,
- parem vastupidavus vandalismile: on elastsed, mitte haprad,
- suurem tugevuse ja kaalu suhe, mis võimaldab ehitada pikemaid isolaatoreid,
- kerge kaal, mis vähendab ehitus- ja transpordikulusid,
- saadaval nii varras- kui ka tugiisolaatoritena.

Miinused:

- suhteliselt lühike eluiga, eeldatavalt *ca* 20–30 aastat,
- nõrk temperatuuritaluvus, elektrikaar kahjustab oluliselt isolaatori pinda,
- mitteinertsed erinevatele keemilistele ühenditele (saastele),
- pikaajaline tugev saastatus lühendab oluliselt isolaatori eluiga,
- kaarekahjustused lühendavad oluliselt isolaatori eluiga,
- kahjustunud isolaatoril hüdrofoobsuse kadumine,
- varda habrasmurru puhul (enimlevinud rikke tulemus) kukub faasijuhe maha või traaversile,
- visuaalsel kaugvaatlusel raske tuvastada riknenud isolaatorit,
- isolaatorite seisundi seire ja kontrollimine on kulukas, vaja eriseadmeid,
- olnud vähe aega kasutuses, *ca* 50 aastat, pidevad tehnoloogilised uuendused, pole standardiseeritud isolaatoreid, raske prognoosida isolaatorite talitluskindlust tulevikus,
- kõrge hind.

### **2.3 Klaas- versus komposiitisolaatorid**

Klaasisolaatorite suureks eeliseks on see, et nn toode on lõplikult välja töötatud, st kasutatavad isolaatorid on püsinud pea muutumatuna (tootearenduse mõttes) mitmeid aastakümneid, välja on töötatud ka klaasisolaatorite standardid. Kokkuvõtlikult: *isolaatorite käitumine erinevatel talitlustingimustel on hästi teada ja käidukogemused küllaldased.*

Komposiitisolaatorite suureks miinuseks on, et see nn toode pole veel lõplikult välja töötatud, iga tootjafirma isolaatorid ning isegi ühe ja sama firma erinevad mudelid taluvad talitlustingimusi erinevalt, puuduvad standardiseeritud isolaatorid. Kokkuvõtlikult: *erinevate isolaatorite käitumine erinevatel talitlustingimustel pole hästi teada ning käidukogemused on puudulikud.*

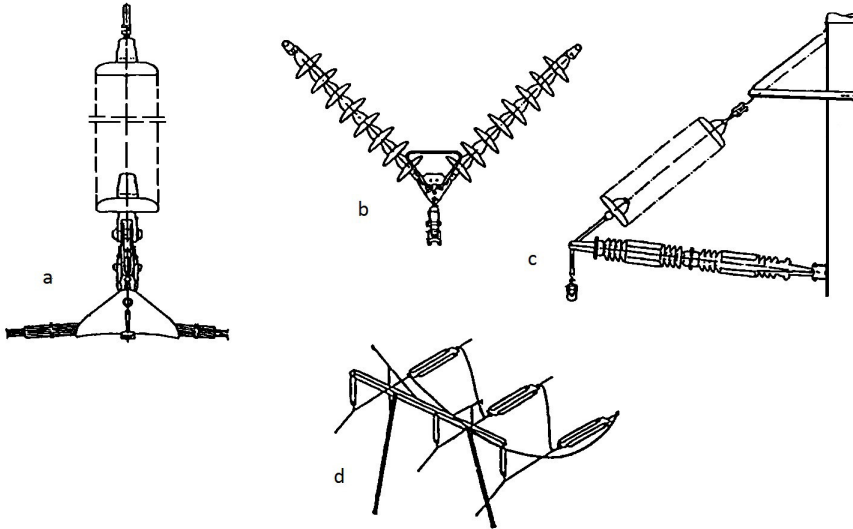
Klaas- ja komposiitisolaatorite omavaheliste võrdluste tulemused olenevad paljuski ka sellest, millistest soovidest ja ootustest isolaatorite valikul süsteemioperaator lähtub.

Kui süsteemioperaatorile on kõige olulisemad näitajad isolaatorite pikemaajaline talitluskindlus, eluiga ja odavus, siis on soovitatav kasutada klaasisolaatoreid.

Kui süsteemioperaatorile on kõige olulisemad näitajad isolaatorite lühemaajaline parem saastekindlus (välja arvatud *saastumisviis b*, *linnu väljaheitejoa põhjustatud ülelök*, *Peatiikk 3.1*), väiksemad kaod ja visuaalne esteetilisus, siis on soovitatav kasutada komposiitisolaatoreid.

## 2.4 Liiniisolaatorite asetused

Liiniisolaatoreid saab traaversi/masti ja liinijuhi vahele asetada mitmel viisil:



Joonis 2.15 Õhuliini isolaatorite võimalikud asetused. [3]

- a) | – vertikaalasetus,
- b) V – asetus,
- c) < – asetus, tugiisolaatori kasutamine,
- d) – – horisontaalasetus transpositsiooni lõigul.

Isolaatorite V ja < asetuste eelised | – vertikaalse asetusega isolaatorite ees on: [3]

- Väiksemad traaversi ja masti mõõtmed, kuna pole tarvis arvestada isolaatorketti liikumisega.
- Faasijuhid võivad paikneda üksteisele lähemal, kuna puudub isolaatorketti liikuvus.
- Kitsama liinikoridori vajadus, kuna traaversi mõõtmed on väiksemad ja faasijuhid paiknevad mastile lähemal.
- Kaldus asendiga isolaatorid isepuhastuvad paremini.
- Isolaatorite pikkust ja samas ka lekkeraja pikkust saab valida märksa vabamalt.

Eesti elektrivõrkudes kasutatakse peamiselt vertikaalasetusega isolaatorkette (kandemastidel) ja horisontaalasetusega isolaatorkette (ankrumastidel). V ja < asetusega isolaatoreid Eestis õhuliinidel veel ei kasutata.

## 2.5 Nõuded isolaatoritele ja isolaatorite valik

Liiniisolaatorite materjaliks on enamasti kas keraamiline materjal (milleks on glasuuritud portselan), klaas või mitmest erinevast materjalist koosnev komposiitmaterjal (klaas- ning komposiitisolaatoritest on lähemalt kirjutatud peatükkides 2.1 ja 2.2).

Eesti 110 kV elektrivõrgus kasutatakse peamiselt klaasist valmistatud taldrikisolaatoreid (tüüp ПС-70Е) (Joonis 2.1, a). Tagamaks nõutavat isolatsiooni, ühendatakse isolaatorid omavahel ketti. Faasi isolaatorketis on üldjuhul 8 taldrikisolaatorit. Viimastel aastatel on süsteemioperaatorfirma hakanud liinidele paigaldama ka komposiitisolaatoreid (Joonis 2.1, c), mille üheks eesmärgiks on soov vähendada määramata rikete arvu liinidel. Komposiitisolaatoritega on hetkel varustatud ca 12 % õhuliinidest. Kuna õhuliiniisolaatorid asuvad väli-tingimustes, siis peavad need taluma mitmesuguseid mõjutusi.

Liiniisolaatoritele mõjuvad käidus:

- võrgus esinevad pinged ja liigpinged,
- mehaanilised koormused,
- ümbritsev keskkond, s.o
  - temperatuur,
  - ultraviolettkiirgus,
  - vihm, kaste, udu,
  - jäide,
  - saastumine.

### *Võrgus esinevad pinged ja liigpinged*

Isolaatorid peavad kestvalt taluma võrgu suurimat lubatavat kestevpinget. Eesti 110 kV nimipingega võrgus on selleks väärtuseks 123 kV (efektiivväärtus). Kuna tegu on liinipingega, siis faasi ja maa vahelise pingega, mis on oluline isolaatorite puhul, saab arvutada  $123/\sqrt{3} \approx 71$  kV. Samuti peavad isolaatorid taluma liigpingeid, milledeks on peamiselt elektrivõrgus esinevad ajutised, lülitus- või äikeseliigpinged. Kui ajutiste ja lülitusliigpingete puhul ei tohi toimuda isolaatoril ülelööki, siis äikeseliigpinge puhul ei tohi toimuda isolaatoril läbilööki. Antud töös on oluline isolaatorile mõjuv kestev faasipinge, sest määramata rikked toimuvad liini tavapingel, mitte ootamatute liigpingete tõttu. Isolaatoritele esitatavad elektrilised nõuded ja erinevad taluvuspinged on toodud standardites *EVS-EN 50341-1* [16] ja *EVS-EN 60071-1* [17].

### *Mehaanilised koormused*

Isolaatori peamiseks mehaaniliseks koormuseks on faasijuhi raskusjõu poolt põhjustatud koormus. Lisakoormusi põhjustavad tuul ja jäide. Kui kandemastide ( | vertikaalasetusega) isolaatorid peavad taluma juhtmete ning ka jäite- ja tuulekoormust, siis ankrumastide isolaatorid ( – horisontaalasetusega) peavad taluma

veel lisaks faasijuhtide tõmbekoormuseid. Isolaatoritele esitatavad mehaanilised nõuded on toodud standardis *EVS-EN 50341-1* [16].

*Ümbritsev keskkond* [1, 8, 9]

#### *Temperatuur*

Õhutemperatuur võib kõikuda laiades piirides (Eestis üldjuhul vahemikus -40 kuni +35 °C [18]), kõrged temperatuurid võivad kiirendada isolaatorite vananemist, temperatuuri fluktatsioon võib ka vähendada isolaatori mehaanilist tugevust.

#### *Ultraviolettkiirgus*

UV kiirgus kiirendab mittekeraamiliste materjalide vananemist. Keraamilistele, portselan- ja klaasisolaatoritele UV kiirgus mõju ei avalda.

#### *Vihm, kaste, udu*

Vihma, kaste või udu tulemusel märgub isolaatori pind, isolaatorile moodustub õhuke juhtiv veekiht, mis vähendab isolaatori ülelöögipinget. Isolaatori märg pind vähendab klaas- ja portselaniisolaatorite ülelöögi pinget *ca* 25%, komposiitisolaatoritel *ca* 15% .

#### *Jäide*

Jää saastunud isolaatori pinnal võib vähendada ülelöögipinget.

#### *Saastumine*

Isolaatorite saastlahenduspinge on tavaliselt madalam isolaatorite kuiv- ja märglahenduspingest ning **saastlahenduspinge on isolaatorite valikul määrav**. Isolaatorid peavad olema keemiliselt inertsed ning mitte reageerima erinevate saastematerjalidega. Juhiseid saastetingimustes kasutatavate keraamiliste- ja klaasisolaatorite projekteerimiseks ja valikuks antakse standardis *IEC 60815-1* [8]. Isolaatorite saastumisest ja saastlahendusest kirjutatakse täpsemalt peatükkides 3.1 ja 3.2.

### 3 ISOLAATORITE SAASTUMINE, SAASTLAHENDUS

Isolaatori elektrilistele ja mehaanilistele parameetritele avaldab tugevat mõju keskkond, kuhu isolaator on paigaldatud. Kui isolaatorid paiknevad saastunud piirkondades, siis nende talitluskindlus halveneb märgatavalt. Seetõttu peetakse isolaatorite puhul nende võimet saastumisele vastu pidada üheks tähtsaimaks näitajaks. Isolaatorite saastumise probleeme on teadvustatud juba üle 50 aasta, kuid enamus uurimistöid selles vallas on valminud alles viimase kolme dekaadi jooksul, seda peamiselt tänu kompaktsemate ja optimeeritud isolatsiooniga ülekandeliinide turule tulekuga. Kuna välisolatsiooni valikul on määravaks teguriks saastlahenduspinge väärtus, siis seetõttu on suurt tähelepanu pööratud isolaatorite saastlahenduse mehhanismide täpsemale väljaselgitamisele. Erinevate uurimusrühmade tööde tulemusena on saadud mitmeid teoreetilisi ja empiirilisi ülelöögimehhanismide mudelid ning valemeid [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]. Kui mudelid, valemid ja nende tulemused erinevadki mõningal määral üksteisest, siis üldised eeldused saastlahenduse tekkeks on neil samad. Isolaatori saastlahenduse tekkeks on vaja isolaatori pinnale sadestada elektrit juhtivat saastet. Elektrit hästi juhtiv saastakiht vähendab isolaatori pinnatakistust ja ülelöögipinget väärtust. Mida suurem on saastakihi juhtivus, seda madalam on isolaatori ülelöögipinget väärtus. Tugevas saastes võib isolaator üle lüüa ka võrgu normaaltalitluspingel. Saasteallikaid ja saastumisviise on mitmeid, samuti mõjutavad saastumist ning saastlahenduspinget ka isolaatori enda omadused ning lisaks veel atmosfääritingimused.

Isolaatorite saastumise viisid: [8]

- isolaatori pinnale sadestub kuiv tahke lahustamata saastakiht:
  - a) *saaste on lahustuv,*
  - b) *saaste on lahustumatu,*
- isolaatori pinnale sadestub juhtiv vedelik:
  - a) *juhtiv udu/kaste, happevihm,*
  - b) *lindude väljaheited,*
- kombinatsioon mõlemast eelnevast saasteviisist.

Saasteallikad:

- tööstus (tolm, tuhk, heitgaasid, keemilised ühendid),
- põllumajandus (mulla erosioon, väetised, kahjuritõrje, õietolm),
- transport (heitgaasid, rehvide/teede kulumine, teede soolamine),
- lindude väljaheited (otsene saastamine, väljaheitejoa põhjustatud lühis),
- meresool (merelt aurustunud veesoolad, mis sisemaale kanduvad),
- kõrbeliivad (sisaldavad aeglaselt lahustuvaid sooli).

Isolaatori omadused, mis mõjutavad saastumist ja saastlahenduspinget:

- materjal (klaas, portselan, komposiit),
- tüüp (taldrik, varras, tugi),
- geomeetrised mõõtmed (pikkus, diameeter, lekkeraja pikkus, seelikute arv/kuju jne),
- asetused traaversil/mastil (— horisontaal; | vertikaal; V asend; < asend),
- valmistamise kvaliteet (erinevad tootjad, tootepartiid, toote generatsioonid).

Atmosfääritingimused, mis mõjutavad isolaatori saastumist ja/või saastlahenduspinget:

- temperatuur,
- õhurõhk,
- suhteline õhuniiskus,
- sademed,
- udu/kaste,
- tuule kiirus.

Nagu näha, mõjutavad isolaatori saastumist ja ülelööginget väga paljud erinevad tegurid. Kõikide nende parameetrite üheaegne arvestamine on väga raske ning komplitseeritud ülesanne, sest vajaliku info kogumine ja töötlemine nõuab palju aega ning ressursse.

Parimad andmed ning mõõtetulemused saab isolaatori saastumise, märgumise ja niiskumise protsesse vastaval liinil mõõtes. Looduses võivad nimetatud protsessid olla küllaltki mitmekesised, mida on laboritingimustes keerukas imiteerida. Seega parima tulemuse annavad testid, mis viiakse läbi looduslikes tingimustes mobiilsete laborite abil. Kuna vastavad meetodid on väga ajamahukad ning kulukad, siis enamik saasteteste tehakse siiski paiksetes kõrgepingelaborites.



### 3.1 Isolaatorite saastumise viisid

Nagu eelpool mainitud, võivad isolaatorid saastuda mitmel moel. Kõige üldisemalt jagatakse isolaatorite saastumisviisid aga kaheks: [8]

- a) isolaatori pinnale sadestub tahke lahustamata saastakiht. Saastakihi niiskumisel sademete, kaste või udu tulemusena muutub saastakiht juhtivaks;
- b) isolaatori pinnale sadestub juhtiv vedelik, milles lahustuvad komponendid puuduvad või neid esineb vähesel määral.

#### *Saastumisviis a)*

kirjeldab enamasti pinnaseerosiooni, kõrbete, tööstuse, põllumajanduse ja ookeanide rannikualade põhjustatud saasteid. Saastumisviisil *a)* on kaks põhikomponenti, *lahustuv saaste (soluble pollution)*, mis moodustab niiskumisel juhtiva elektrolüüdi kihi ja *mittelahustuv saaste (non-soluble pollution)*, mis moodustab siduva kihi (nn kuivatuspaberi efekt) lahustuva saaste ning isolaatori pinna vahele. [8]

- *Lahustuv saaste*  
Lahustuv saaste jagatakse omakorda kergesti lahustuvateks sooladeks ja raskesti lahustuvateks sooladeks. Lahustuva saaste määra mõõdetakse ekvivalentse soola sadestumise tiheduse meetodiga *ESDD (equivalent salt deposit density)* mg/cm<sup>2</sup>.
- *Mittelahustuv saaste*  
Mittelahustuvaks saasteks on tolmu, liiv, tsement, savi, õlid jne. Mittelahustuva saaste määra mõõdetakse mittelahustuvate sadestiste sadestumistiheduse meetodiga *NSDD (non-soluble deposit density)* mg/cm<sup>2</sup>.

#### *Saastumisviis b)*

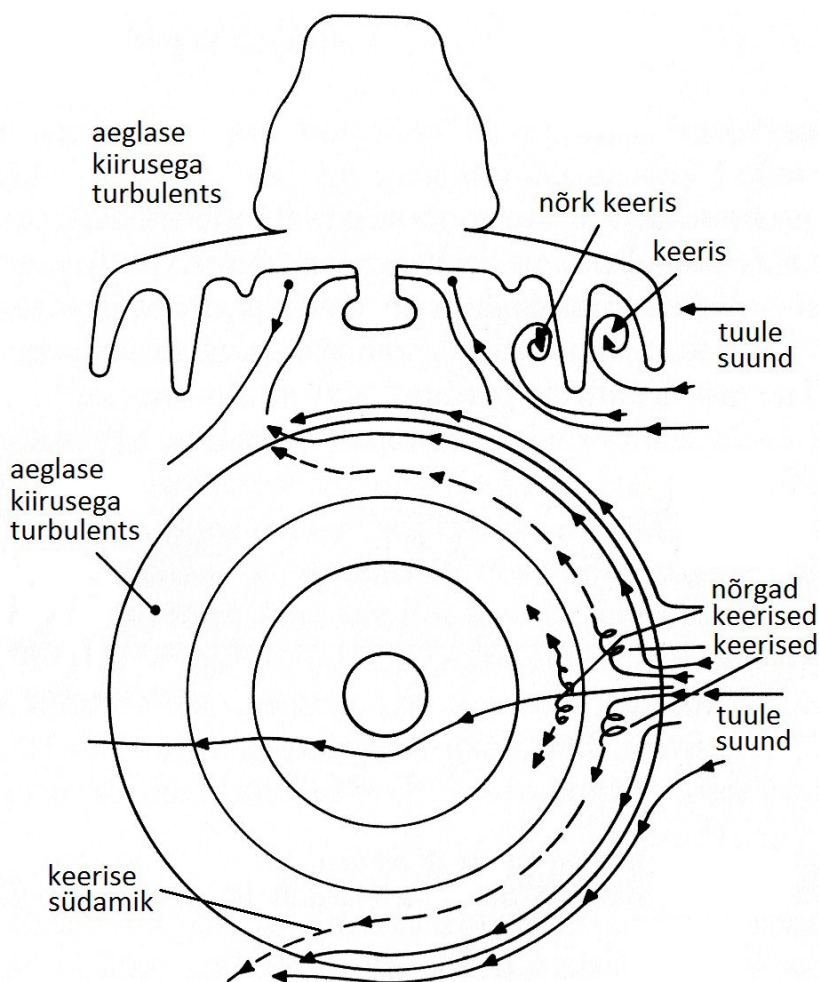
kirjeldab juhtiva udu, lindude väljaheite ning väljaheitejoa (*bird streamer*) ja hüdrofoobse pinna eripära poolt põhjustatud saasteid. [8]

### SAASTE SADESTUMINE ISOLAATORILE

#### *Saastumisviis a)*

puhul toimub isolaatorite saastumine tuule, raskusjõu ja elektrivälja toimel. Peamist mõju avaldab just tuul, sest tuul kannab edasi õhus olevaid saastaosakesi. Saastaosakeste sadestumise intensiivsus on võrdeline õhu kiiruse gradiendiga isolaatori pinnal ja sõltub seega pinna kujust. Mida suurem on tuulesuunaline isolaatori pind, seda rohkem isolaator saastub. Tugevalt ribilise isolaatori pinnal väheneb õhu kiirus järsult, mistõttu selline isolaator saastub intensiivsemalt. [1, 9]

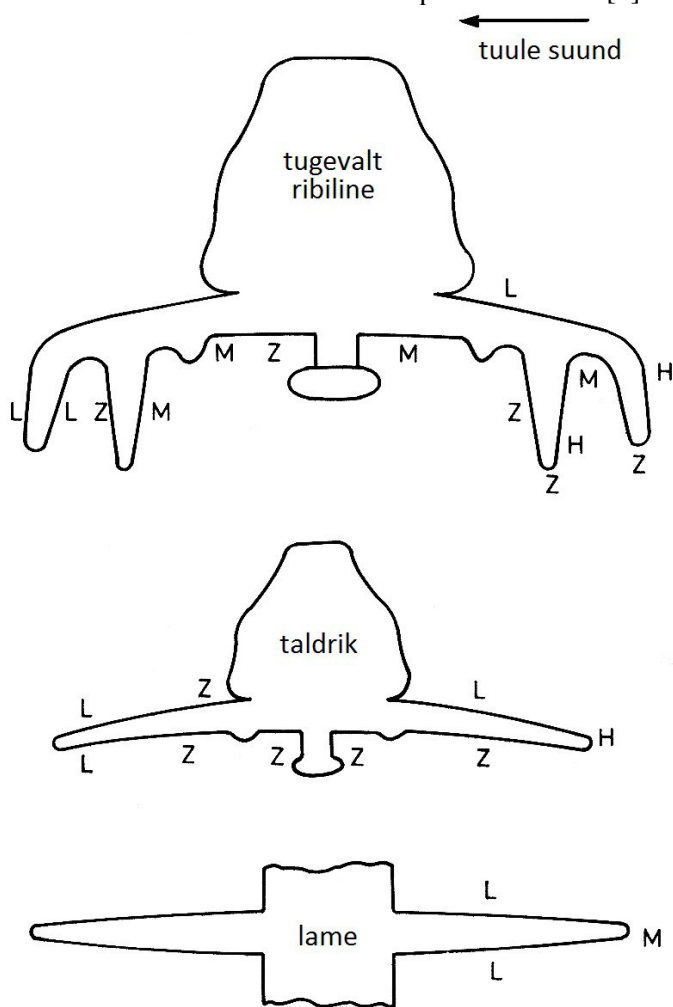
Joonistelt (Joonis 3.1 ja Joonis 3.2) on näha, et enamuse saastest koguneb isolaatori alumisse ossa, kus paiknevad ribad. Isolaatorid, millede seelikutel on ribad minimaalsed või puuduvad (Joonis 3.2 taldrik, lame), koguvad saastet oluliselt vähemal määral. [27]



Joonis 3.1 Tuulevood tugevalt ribilisel taldrikisolaatoril. [27]

B.F. Hamptoni [27] tehtud katsetuste tulemusel selgus, et tugevalt ribiline isolaator võib koguda enam kui kümme korda rohkem saastet kui lameisolaator ning saastetiheduse kontsentratsiooni erinevused võivad isolaatoril olla suuremad kui 100:1.

Suurimad saastekontsentratsioonid paiknevad üldjuhul isolaatori seelikute servadel. Tugevad tuuled ja sademed aga võivad isolaatoreid hoopiski puhastada, seda protsessi nimetatakse isolaatorite isepuhastumiseks. [3]



Joonis 3.2 Isolaatori kuju mõju saaste ladestumise määrale. [27]

- H: tugevalt (heavy)
- M: keskmiselt (medium)
- L: väheselt (light)
- Z: ei ladestu (zero deposit density)

Saastumisviis b)

puhul ei toimu saastumine tuule abil, vaid iga konkreetse saasteallika korral erinevalt.

### *Isolaatorile sadestuv juhtiv vedelik*

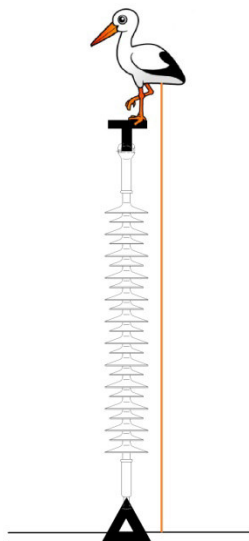
Selleks vedelikuks võib olla ookeanide ranniku lähedal soolasest mereveest kerkinud udu, põldude pritsimine (väetamine), kemikaale sisaldav udu või happevihm. Sellele saastaliigile on omane saastamise lühiajalisus – isolaator muutub puhtast ning vähese juhtivusega olekust lühikese (<1 tund) ajavahemiku jooksul tugevalt saastatuks ning võib toimuda ülelööök. Peale saastamise lõppemist taastub isolaatoril puhas ehk vähese juhtivusega olek. [8]

### *Hüdrofoobse pinna eripära*

Hüdrofoobsed pinnad on dünaamilise iseloomuga, reageerides erinevalt komplekssaaste – nii juhtiva kui ka mittejuhtiva – ning märgumismõju koostoimele. Saastunud hüdrofoobse pinnaga isolaatoritele pole senini koostatud laialdaselt aktsepteeritavat mudelit. [8] Hüdrofoobsete komposiitisolaatorite saastlahenduse hüpoteesid on toodud peatükis 2.2.

### *Lindude väljaheitejoo*

poolt põhjustatud saastlahendused erinevad oluliselt kõikidest eelnevatest saasteviisidest. Antud juhul tekib lindude väljaheitest pidev, hästi juhtiv ( $20\text{--}40\text{ k}\Omega/\text{m}$ )\* saastejuga, mille pikkus on piisav, et möödudes isolaatoritest põhjustada traaversi ja faasijuhi vahel vähenenud õhuvahemikul ülelööök. Sellisel juhul on isolaatori mõõtmetel ja parameetritel ülelöögi tekkele väga vähene või olematu mõju. Väljaheitejuga-saastlahenduse ärahoidmisel annavad suurt mõju linde eemal hoidvad ja juga takistavad seadeldised. [8, 28, 29]



*Joonis 3.3 Linnu väljaheitejoo poolt põhjustatud saastlahendus.*

---

\* Ühik  $\text{k}\Omega/\text{m}$  on pikkusühiku takistus (katkematu väljaheitejoo samba takistus ( $\text{k}\Omega$ ) samba pikkusühiku ( $\text{m}$ ) kohta)

## 3.2 Isolaatorite saastlahendus

### *Saastumisviisi a) korral*

Talitluses olevad õhuliini isolaatorid võivad kattuda teatud aja jooksul saastakihi. Kui isolaatori pind on kuiv, siis saastakiht elektrivoolu ei juhi. Kui aga isolaatori pind niiskub kaste, udu või vihma tulemusena, siis muutub saastakiht juhtivaks (isolaatori pinnale tekib õhuke elektrolüüdikiht) ning aset võib leida järgmine nähtus: [1, 9, 30, 31]

- juhtiva kihi moodustumine,
- kuivade tsoonide teke,
- osalahendused kuivades tsoonides,
- summaarse elektrihaare pikenedamine,
- haare pikenedamine üle terve isolaatori, millele järgneb isolaatori ülelööök.

Üldjuhul pole saastakiht isolaatoril ühtlane. Kui saastakiht hakkab voolu juhtima, siis voolavad mööda seda kihti mitme milliampru suurusega lekkevoolud. Lekkevoolud soojendavad elektrolüüdikihti. Saastakiht hakkab lekkevoolu tõttu ebahütlaselt (kus voolutihedused on suurimad) kuivama, mille tulemusel suurenevad teatud tsoonide takistused. See viib kuivade tsoonide moodustumiseni. Kuivanud tsoonidele jääb nüüd enamus rakendatud pingest. Kuna tsoonide kohal ületatakse õhu elektriline tugevus, toimuvad seal seetõttu kuivanud tsoone lühistavad lahendused. Kui saastakihi takistus ei ületa kriitilist väärtust, siis osalahendused isolaatoril ülelöögini ei arene, vaid toimuvad seni, kuni isolaator kuivab. Kui saastakihi takistus on aga suurem kriitilisest väärtusest, siis arenevad osalahendused tervet isolaatorit lühistavaks haareks. Standard klaas- ja portselantaldrikisolaatorite puhul on täheldatud, et kui lekkevool ületab *ca* 250 mA, siis toimub isolaatoritel suure tõenäosusega ülelööök. [30, 31]

### *Saastumisviisi b) korral*

#### *Isolaatorile sadestuv juhtiv vedelik*

Saastlahenduse ainuke eripära *saastumisviisist a)* on see, et jääb ära nn saastakihi kogunemise ja märgumise protsess, mis tähendab, et isolaatorile sadestub kohe juhtiv vedelikukiht. Ülejäänud saastlahenduse protsessid on samad. [8]

#### *Hüdrofoobse pinna eripära*

Eelmises alapeatükis on selle saastlahenduse eripärad kirjeldatud.

#### *Lindude väljahaitejoad*

Eelmises alapeatükis on selle saastlahenduse eripärad kirjeldatud.

## SAASTLAHENDUSE MUDEL

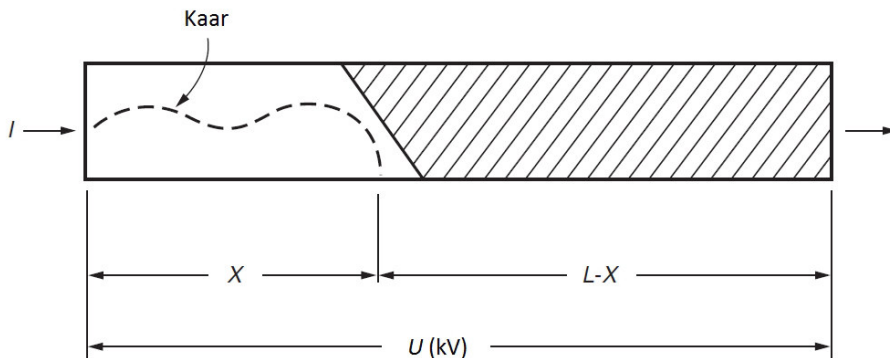
Saastlahenduse mudeleid on välja töötatud mitmeid. Enamik neist on koostatud portselan- ja klaasisolaatorite kohta. Katseandmete ja mudelite baasil on koostatud empiirilised valemid erinevate isolaatoritüüpide (varras, taldrikkett) kohta ning määratud ka vajalikud arvutuskonstandid. Kuna kasutusel olevad komposiitisolaatorid erinevad üksteisest olulisel määral, siis nende kohta puuduvad unifikseeritud mudelid ja arvutuskonstandid. Asjaolu muudab veelgi keerulisemaks komposiitisolaatorite dünaamiline iseloom (nt hüdrofoobsuse kaotus ja hilisem taastumine, vananemine). Tänu dünaamilisusele on väga raske määrata vajalikke konstante valemities.

## LIHTSUSTATUD MUDEL PORTSELAN- JA KLAASISOLAATORITELE

Eeldame, et isolaator on saastunud ühtlase saastakihiga, millel on takistus  $r$  ( $k\Omega/mm$ )\* (Joonis 3.4). Kui isolaatoril toimub osalahendus ehk kui põleb elektrikaar, mis on saastakihiga jadamisi, siis pinget isolaatoril, kui kaar osaliselt lühistab isolaatorit, kujutab valem (3.1): [30]

$$U = U_{kaar}(I, X) + I(L - X) \cdot r \quad (3.1)$$

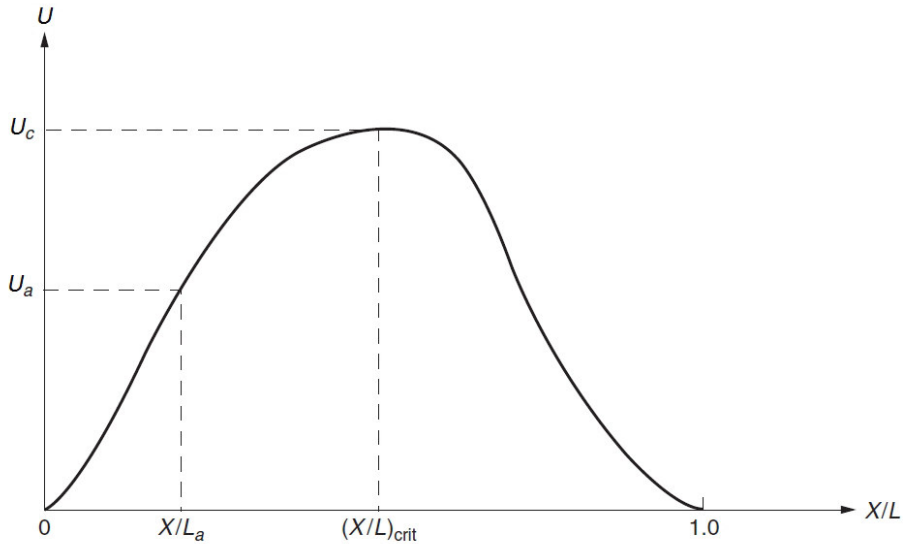
kus funktsioon  $U_{kaar}(I, X)$  on seotud kaare vooluga  $I$  ja kaare pikkusega  $X$ .



Joonis 3.4 Üksiku elektrikaare arenemine saastunud pinnal, lihtsustatud mudel (ühtlane saastakiht, takistusega  $r$  ( $k\Omega/mm$ )). [30]

\* Ühik  $k\Omega/m$  on pikkusühiku takistus (katkematu ühtlase saastakihi takistus ( $k\Omega$ ) saastunud pinnal saastakihi pikkusühiku (m) kohta)

Joonisel (Joonis 3.5) on toodud teatud kindla takistuse  $r$  puhul isolaatorile langeva pinge  $U$  sõltuvus kaarepikkuse ja isolaatori pikkuse  $X/L$  suhte vahel.



Joonis 3.5 Isolaatorile langeva pinge  $U$  ja elektrikaare ning isolaatori pikkuste suhte  $X/L$  vaheline sõltuvus, kui kaar on jadamisi saastakihiga, millel on konstantne takistus  $r$  pikkusühiku kohta. [30]

Rakendatud pingel  $U_a$  puhul ei tohi suhtel  $X/L$  olla suuremaid väärtusi kui  $X/L_a$  ( $L_a$  on lühim kaaretee pikkus (mm) lühistamiseks isolaatorit). Joonisel (Joonis 3.5) toodud kõveral eksisteerib maksimaalne kriitiline pingel  $U_c$ . Pingete, mis on võrdsed või suuremad kui  $U_c$ , puhul võivad suhte  $X/L$  väärtused saada võrdseks ühega, mis tähendab, et toimub isolaatori ülelööb. Kui rakendatud pingel  $U_a$  on väiksem kriitilisest pingest  $U_c$ , siis suhte  $X/L$  väärtused ei saa võrdsustada ühega ehk isolaatori ülelööb pole võimalik. Siit tuleneb, et ülelöögiks vajalik tingimus on see, kui kaarele jääb elektriväljatugevus saab võrdseks kaarest vabale lekerajale jääva elektriväljatugevusega, ehk  $E_k = E_l$ . On pakutud välja mitmeid erinevaid empiirilisi valemeid, mis võiksid sobida valemi (3.1) lahendamiseks. Näiteks, vertikaalse asetusega ning 33kV ja kõrgema pingega keraamiliste ja klaasisolaatorite puhul võib kasutada valemit: [30]

(3.2)

$$U_c = 0,067 \cdot r^{\frac{1}{3}} \cdot L_a^{\frac{2}{3}} \cdot L_s^{\frac{1}{3}}$$

kus  $U_c$  on ülelöögipingel efektiivväärtus (kV),  $L_a$  on lühim kaaretee pikkus (mm) lühistamiseks isolaatorit ja  $L_s$  on lekeraja pikkus (mm) mööda isolaatori pinda. [30]

## LEKKEVOOLUDE TEOORIA

Isolaatori seisukorra hindamisel peetakse oluliseks näitajaks lekkevoolu väärtust, kuna lekkevoolude väärtused olenevad otseselt pinna saastatusest, st isolaatori lekkevoolu abil saab kaudselt hinnata ümbritseva keskkonna saastatust. Lekkevoolu kaudu saastatuse määramisse aga on soovitatav suhtuda teatud ettevaatlikkusega, kuna protsessid isolaatoril võivad olla väga keerukad.

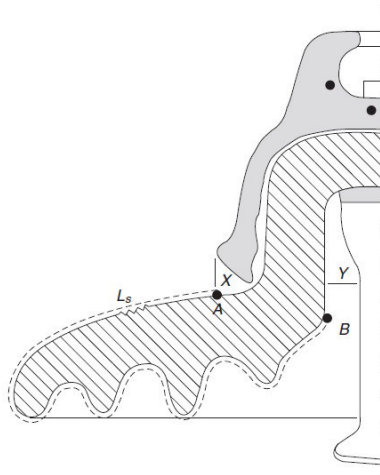
Tuletatud on ka empiiriline valem (3.3) [31], mille abil saab hinnata lekkeraja pikkuse ja liinipinge alusel isolaatori ülelöögi tõenäosust teatud lekkevoolu amplituudväärtuse puhul. Lekkevoolu  $I_{max}$  väärtus amprites vahetult üks periood enne ülelööki [2]

$$I_{max} = \left( \frac{L_s}{U_l \cdot 15,32} \right)^2 \quad (3.3)$$

kus  $L_s$  on lekkeraja pikkus (mm) ja  $U_l$  on liinipinge efektiivväärtus (kV).

### ISOLAATORI MÕÕTMETE MÄÄRAMINE (KUJUTEGUR)

Isolaatori pinna saastumise määramisel tuleb arvestada ka isolaatori mõõtmega. Kuna isegi ühtlase saastekihiga kaetud isolaatoril ei jagune saastetakistus piki pinda ühtlaselt (Joonis 3.7). Olulised mõõtmised on lekkerada  $L_s$  ja pinna gradient, mida väljendatakse kV/  $L_s$  ( $L_s$  mm-tes). Lekkeraja definitsioon on toodud joonisel (Joonis 3.6). X ja Y on eeldatavalt täidetud juhtiva materjaliga. Keskmise ekvivalentse soola sadestustiheduse (ESDD) ja mittelahustuvate sadestiste sadestustiheduse (NSDD) määramisel saastunud isolaatoril on tarvilik määrata ka isolaatori pindala. [30]



Joonis 3.6 Isolaatori geomeetriliste mõõtmete hindamine, kujuteguri määramine.  $L_s$  on lekkeraja pikkus (mm) [30]



Kuna keeruka kujuga isolaatoritel muutub pinnaeritakistus  $\rho_s$  mööda isolaatori pinda, siis kasutatakse mõistet keskmine pinnaerijuhtivus  $\sigma_s$ , mis võrdub kujuteguri  $F_f$  ja isolaatori pinna takistuse  $R_s$  suhtega. Kujutegur  $F_f$  aga võrdub saastunud isolaatori pinnatakistuse  $R_s$  ja keskmise pinnaerijuhtivuse  $\sigma_s$  suhtega. [30]

(3.4)

$$F_f = \frac{R_s}{\sigma_s}$$

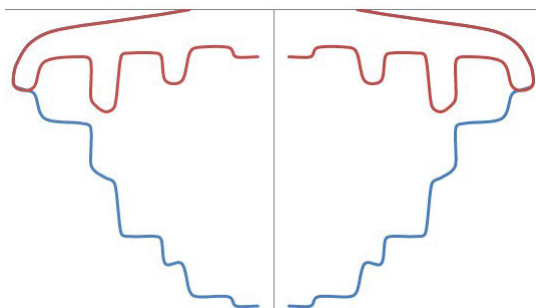
(3.5)

$$F_f = \int_0^{L_s} \frac{dL_s}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

kus  $a$  on isolaatori raadius sõltuvalt joonkoordinaadist  $dL_s$ .

Laboris mõõdetakse isolaatori takistus  $R_s$  teraoommeetriga ning keskmine pinnaerijuhtivus arvutatakse valemite (3.4) ja (3.5) abil.

### KAOVÕIMSUSE ERALDUMINE ÜHTLASELT SAASTUNUD KEERUKA KUJUGA ISOLAATORIL



Joonis 3.7 Isolaatori IIC-70E pinnakuju (punane) ja 'väljavenitatud' pinnakuju (sinine)

Keeruka kujuga isolaatori pinnaerijuhtivust kujutab ilmekalt joonis (Joonis 3.7). Kuna isegi ühtlaselt saastunud isolaatori pinnaerijuhtivus muutub isolaatori teljest kaugematel olevatel aladel, ja seda alade isolaatori teljest kauguse muutumisega proportsionaalselt, st et punktis, kus ala (teatud pinna osa) kaugus teljest on väike, on ka pinnaerijuhtivus väike ja vastupidi (ilmekaim on joonisel sinine joon). Siit tuleneb asjaolu, et pinnaerijuhtivus on isolaatori tiku ja mütsi juures kõige väiksem, mis tähendab seda, et just tiku ja mütsi juures toimub suurem energia eraldumine kui isolaatori pinna äärealadel. Järelikult: esmalt tekivad kuivad tsoonid ja osalahendused just tiku ja mütsi ümber. Osalahenduste teket soodustab ka elektrivälja ebahühtlane jagunemine isolaatoril. Tiku ja mütsi juurde on koondunud enamik elektrivälja jõujoontest, mis soodustab seal korona ja osalahenduste teket.

## ISOLAATORITE SAASTLAHENDUSTESTIDE MEETODID

Lühiülevaade mõningatest laboris kasutatavatest saastumismeetoditest. Peamiselt määratakse isolaatorite võimalikke saastlahenduspingeid laboris, kasutades järgmisi meetodeid:

### *Soola-udu meetod (salt-fog test)*

Antud meetodi puhul pingestatakse isolaator tööpingele, mida hoitakse konstantsena kogu testimise ajal ning isolaatorit saastatakse soolauduga, mille soolasus on vahemikus 2,5–160 kg/m<sup>3</sup>. [30]

### *Märksaastamise meetod (wet-contaminant test)*

Antud testis saastatakse isolaatoreid, piserdades neile märga saastesegu. Isolaator pingestatakse 3–5 minutit peale saastamise lõppu, kui isolaator on endiselt veel niiske. Isolaatori takistus mõõdetakse, misjärel suurendatakse testpinget ülelöögi tekkimiseni. [32]

### *Puhta-udu meetod (clean fog test)*

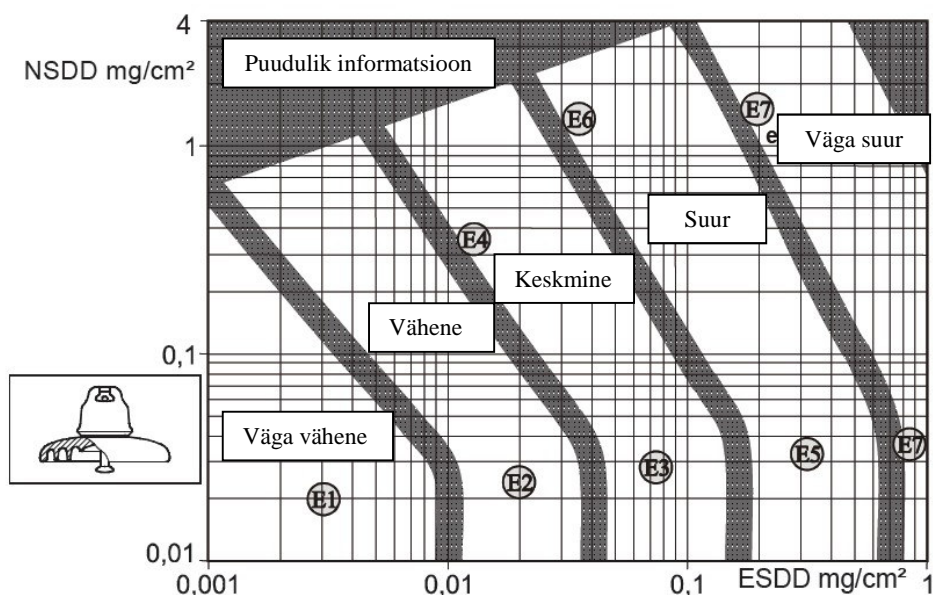
Antud testmeetodit saab jaotada kahte tüüpi: [30]

- a) Mõnes udu-testis saastatakse, kuivatatakse ning seejärel niisutatakse isolaator puhta uduga. Testpinge rakendatakse isolaatoritele siis, kui lekkeraja takistus on jõudnud kõige madalama väärtuseni. See meetodika on välja töötatud peamiselt Saksamaal nimetuse all „eel-saaste meetod” (*pre-deposit method*).
- b) Teist tüüpi testis rakendatakse testpinge kuivadele saastatud isolaatoritele ning seejärel niisutatakse isolaator. Mõõdetakse lekkevoolu ja võimalikku ülelööginget. Seda võib pidada mõistlikuks loodustingimuste simulatsiooniks, kuigi vastav meetod on mõnevõrra keerukam teiste meetoditega võrreldes.

### **3.3 Isolaatorite saastatuse määramine**

Keraamiliste ja klaasisolaatorite saastatust määratakse peamiselt ekvivalentse soola sadestumistiheduse (*ESDD*) ja mittelahustuvate sadestiste sadestumistiheduse (*NSDD*) abil (*Joonis 3.8*). Saastatust määratakse standardi IEC-60815-1 [8] alusel. Komposiitisolaatorite saastatust sel teel määrata ei saa, kuna pole välja töötatud ühtseid komposiitisolaatorite standardeid. Kui standardi IEC-60815-1 [8] eelmises versioonis soovitati saastunud piirkonnas talitlevatel isolaatoritel *ESDD* alusel saastlahenduspinge tõstmiseks pikendada ainult lekkeraja pikkust (isolaatorite profiilide erinevusi ei arvestatud), siis uuendatud standardis (2008) on saastatuse määramisel kasutusel ka *NSDD* väärtus. *NSDD*

on oluline just seetõttu, et tema väärtus oleneb märgataval määral isolaatori profiilist, st kui tugevalt isolaator tahkete mittelahustuvate sadestistega saastub. Kui NSDD väärtused on suured, tuleks lekkeraja pikendamiseks kasutada aero-dünaamilisema profiiliga isolaatoreid (Joonis 3.8 E4, E6, ülemine E7). Kui NSDD väärtused on väikesed, võib kasutada lekkeraja pikendamiseks ribilise või tugevalt ribilise profiiliga isolaatoreid (Joonis 3.8 E1, E2, E3, E5, alumine E7). Tabelis (Tabel 3.1) on toodud soovituslikud lekkeraja pikkused liini- ja faasipinge kohta (suurimal lubataval kestevpingel) (SCD – specific creepage distance on lekkeraja pikkus (mm)/liinipinge (kV), USCD – unified specific creepage distance on lekkeraja pikkus/faasipinge) erineva saastatuse määra korral. [8]



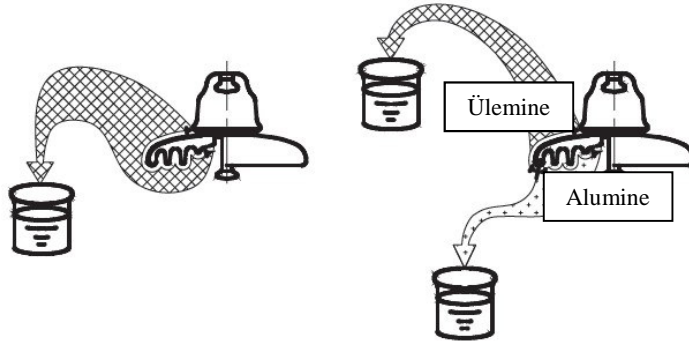
Joonis 3.8 Keraamiliste taldrikisolaatorite saastatuse määramine ESDD ja NSDD abil. [8]

Tabel 3.1 Soovitatavad lekkeraja pikkused erineva saastatuse määra korral. [8]

SCD (mm/kV)	USCD (mm/kV)	Saastatuse määr
12,7	22,0	Väga vähene
16	27,8	Vähene
20	34,7	Keskmine
25	43,3	Suur
31	53,7	Väga suur

**EKVIVALENTSE SOOLA SADESTUMISE TIHEDUSE (ESDD) JA MITTELAHUSTUVATE SADESTISTE SADESTUMISTIHEDUSE (NSDD) MÄÄRAMINE**

ESDD määramisel pestakse terve isolaator või detailsemate andmete saamiseks isolaatori ülemine ja alumine osa eraldi 100–300 cm<sup>3</sup> (või enam, kui vaja) destilleeritud veega (mille mahueri juhtivus peab olema väiksem kui 0,001 S/m). Saastunud pesuveel mõõdetakse seejärel mahueri juhtivus ja temperatuur ning saadud andmete alusel arvutatakse ESDD väärtus. [8]



Joonis 3.9 Taldrikisolaatorite pesemine destilleeritud veega: [8]

- kogu isolaatori pesemine,
- ülemise ja alumise isolaatori osa eraldi pesemine (detailsem tulemus).

Pesuvee erijuhtivuse parandustegur arvutatakse valemiga (3.6):

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b \cdot (\theta - 20)] \quad (3.6)$$

kus:

$\theta$  on pesuvee temperatuur (°C);

$\sigma_{\theta}$  on pesuvee mahueri juhtivus temperatuuril  $\theta$  °C (S/m);

$\sigma_{20}$  on pesuvee mahueri juhtivus temperatuuril 20 °C (S/m);

$b$  on tegur, mis sõltub temperatuurist  $\sigma$ , vastavalt võrrandile (3.7) ja joonisele (Joonis 3.10).

$$b = -3,200 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^3 + 1,032 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^2 - 8,272 \cdot 10^{-4} \cdot \theta + 3,544 \cdot 10^{-2} \quad (3.7)$$

ESDD arvutatakse vastavalt valmle (3.8):

$$ESDD = \frac{V}{A} (5,7 \cdot \sigma_{20})^{1,03} \quad (3.8)$$

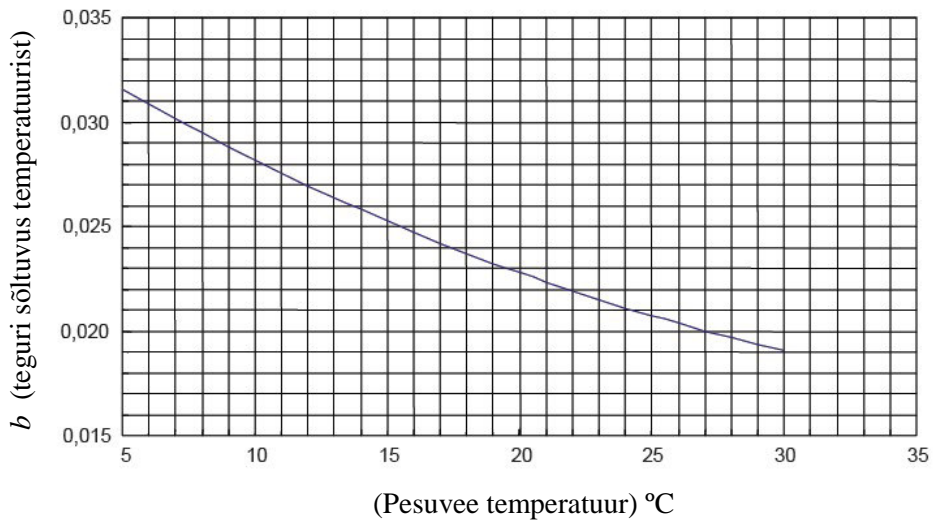
kus:

ESDD on ekvivalentse soola sadestumistihedus isolaatoril (mg/cm<sup>2</sup>);

$\sigma_{20}$  on pesuvee mahueri juhtivus temperatuuril 20 °C (S/m);

$V$  on pesuvee maht (cm<sup>3</sup>);

$A$  on isolaatori seelikupinna pindala (cm<sup>2</sup>).



Joonis 3.10 Teguri  $b$  sõltuvus saastunud pesuvee temperatuurist. [8]

$NSDD$  määramine toimub peale  $ESDD$  määramist, filtreerides saastunud pesuveest välja tahked osakesed, kuivatades ning kaaludes neid (Joonis 3.11). Kasutatav filtripaber võiks olla vähemalt GF/A tüüpi  $1,6 \mu\text{m}$  või sarnane. [8]

$NSDD$  arvutatakse valemiga (3.9)

(3.9)

$$NSDD = 1000 \cdot \frac{(W_f - W_i)}{A}$$

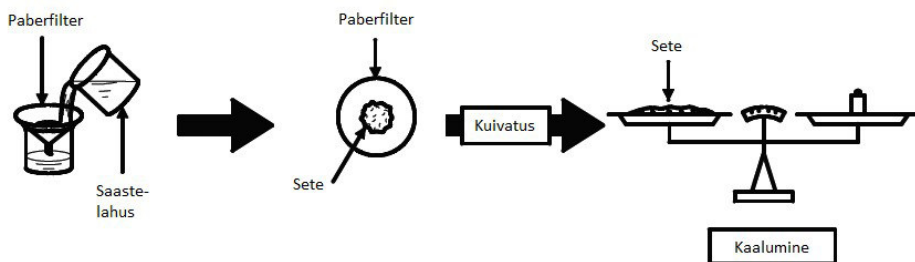
kus:

$NSDD$  on mittelahustuvate sadestiste sadestumise tihedus ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ );

$W_f$  on kuiva filtripaberi ja tahkete sademete kaal (g);

$W_i$  on kuiva filtripaberi kaal (g);

$A$  on isolaatori seelikupinna pindala ( $\text{cm}^2$ ).



Joonis 3.11  $NSDD$  määramine, tahke saaste filtreerimine, kuivatamine ja kaalumine. [8]

## 4 RIKKED

Kui liini normaaltalitluse katkestab tõrge, siis seda liinitõrget nimetatakse sageli rikkeks. Rikke tüüpe ja tekkepõhjuseid on mitmeid. Rikete tagajärjed aga on enamasti samad, milleks on liini talitluse katkemine, erinedes üksteisest vaid tõrke vältuse poolest.

Rikete registreerimine toimub vastavate mõõteseadmete, mis jälgivad reaajas liiniparameetreid, abil. Süsteemioperaatori poolt kasutatavad mõõteseadmed registreerivad liinil toimuva rikke aja, lühisvoolu ja pingelohu ning määravad ka rikke kauguse. Rikete tekkepõhjuste määramine toimub käidukorraldaja poolt kogutud andmete alusel (visuaalne ülevaatus, äikese esinemise andmed jne). Käidukorraldaja selgitab välja, millised sündmused toimusid antud ajal konkreetse rikke koha lähedal. Kogutud info alusel koostab käidukorraldaja rikke põhjuste kohta ekspertarvamuse, mille tulemusena määrataksegi rikke tekkepõhjus (äike, puu liinil, inimeksimus, linnud jms). Kui liinil toimunud rikete põhjuseid ei õnnestu välja selgitada, jäävad rikked määramata (nn määramata rikked).

Rikete, eriti just määramata rikete, suur hulk valmistab süsteemioperaatorile probleeme, sest rikete mõjud võivad kanduda elektrivõrgus edasi ka teistele võrguelementidele ning elektritarvititele, põhjustades neilegi võimalikke tõrkeid.

Vähendamaks rikete arvu, on väga oluline välja selgitada rikete tekkepõhjused, sest kui rikete tekkepõhjused pole teada, on võimatu midagi ette võtta nende rikete ärahoidmiseks. Seega on äärmiselt oluline, et määramata rikete osakaal rikete hulgas oleks võimalikult väike.

Etteruttavalt võib öelda, et Eesti 110 kV õhuülekandeliinidel toimuvad määramata rikked on suures osas (99% juhtudest) mööduva iseloomuga isolatsiooni ülelöögi rikked (*Peatükk 4.2*), kus taasalülitusautomaatika taaspingestab edukalt (99% juhtudest) rikke tulemusena väljalülitunud liini. Rikete tekkepõhjused ja järeldused esitatakse peatükis 4.3.

### 4.1 Rikete registreerimine ja määramine

Süsteemioperaatorile on rikkekoha täpne määramine komplitseeritud, kuna rikkekoha määramise seadmeid ei usaldada, sest määratud piirkonnast rikkekohta sageli ei leita.

Rikkekoha määramise seadmete miinuseks on tõenäoliselt see, et rikkekoha arvutamiseks kasutatakse pinget, voolu ja takistuse väärtusi. Kuna antud juhul pole riketeks metalsed lühised liinidel (*Peatükk 4.2*), vaid hoopiski isolaator-

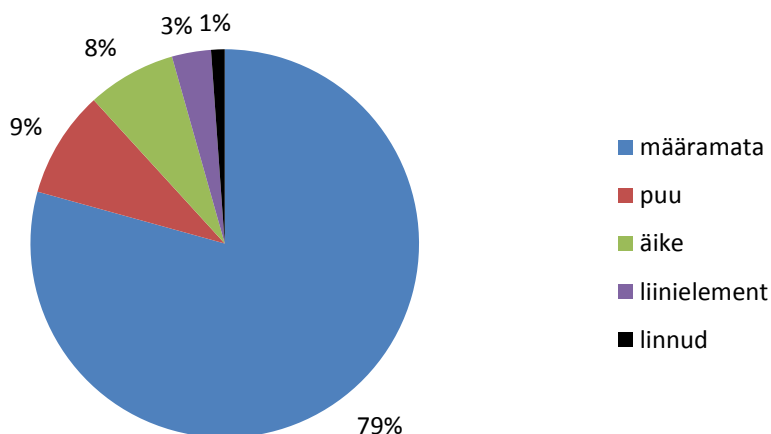
kettide ülelöökidest tulenevad kaarlahendused, millede takistused võivad samalaadsete lühiste korral üksteistest olulisel määral erineda, siis selliste seadmete täpsus pole isolaatorketi ülelöögi koha määramisel rahuldav.

Rikkekohta leidmine visuaalsel teel on samuti raskendatud, kuna kiirelt toimivad kaitseseadmed lülitavad liini välja sedavõrd kiiresti, et elektri kaarest tekitatud jäljed faasijuhtmetel on nähtavad ainult kõrgülevaatuses käigus, kus ülevaataja on juhtmega samal tasapinnal või kõrgemal. Samal põhjusel ei jää kaugvaatluse teel tuvastamiseks vajaliku suurusega jälgi ka isolaatoritele. Rikkekohta leidmine on võimalik ainult päikesepaistelise ilmaga, kasutades suure valgusjõuga optilisi vahendeid (binokkel, pikksilm, digitaalne kaamera).

Rikkekohtade ligikaudseks määramiseks ja statistilise ülevaate saamiseks aga sobisid süsteemioperaatorilt saadud rikkekoha määramise seadme andmed piisavalt hästi. Väga oluliseks infoallikaks osutusid rikete toimumise ajad.

## 4.2 Andmete töötlus ja analüüs

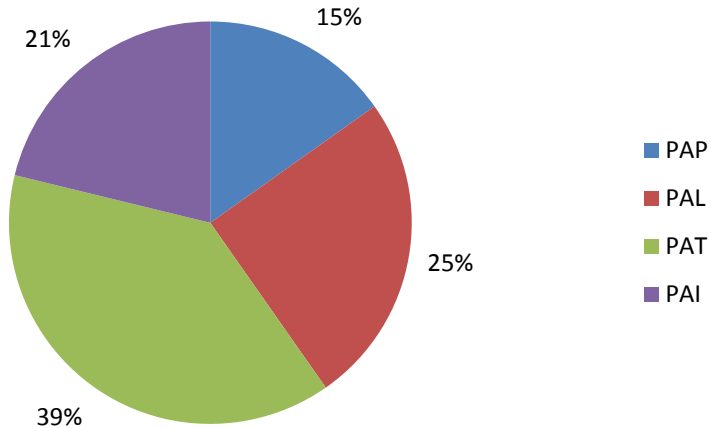
AS Elering registreeris aastatel 2005–2009 110 kV elektrivõrgus kokku 949 riket. Kuna antud töö uurimisobjektiks on 110 kV ülekandeliinid, siis alajaamades ja inimeste poolt põhjustatud rikkeid selles töös ei käsitleta. Ainult ülekandeliinidega seotud rikete arv oli 797. Ülekandeliinide rikete arvu tekkepõhjuste protsentuaalne jaotus on toodud joonisel (Joonis 4.1).



Joonis 4.1 Rikete arv tekkepõhjuste kaupa. Ülekandeliinide rikete jaotus. Kogu 110kV õhuliinide ülekandevõrk, perioodi 2005–2009 summa.

Määramata rikete puhul toimus 99% protsendil juhtudest liini edukas taaspingestamine, mis on tugevaks vihjeks töigale, et rikete põhjuseks on suure töönaosusega isolaatorketi elektriline ülelöök.

Ülekandeliinide määramata rikete jagunemine käidusektorite kaupa on toodud joonisel (Joonis 4.2).



Joonis 4.2 Määramata rikete arv käidusektorite kaupa.

Kogu 110kV õhuliinide ülekandevõrk, perioodi 2005–2009 summa.

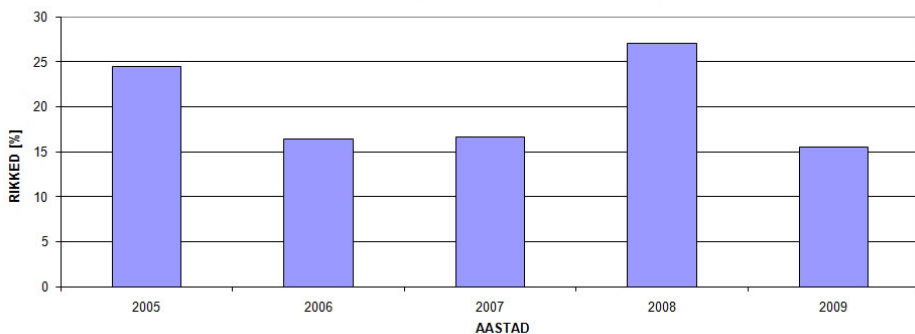
Tasub märkimist, et sektorite PAP (põhjasektor) ja PAI (idasektor) rikkeprotsentide summa on 36%. Sektorite PAL (läänesektor) ja PAT (lõunasektor) rikkeprotsentide summa aga 64%. Seega toimub määramata rikkeid Lõuna-Eestis oluliselt enam kui Põhja-Eestis.

#### MÄÄRAMATA RIKETE TOIMUMISE AEG

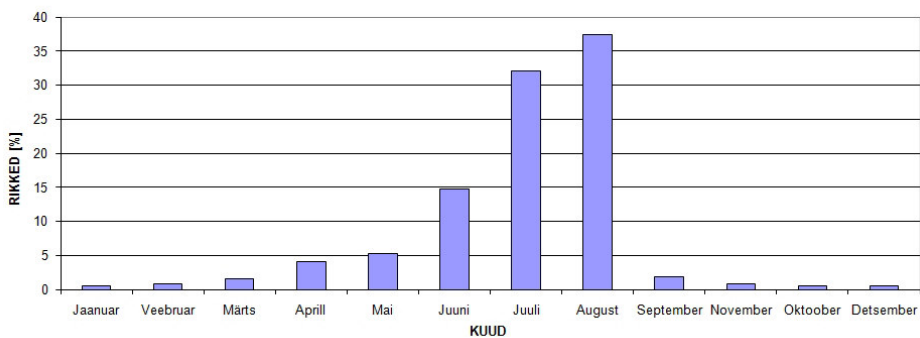
Määramata rikete arvu aastased varieerumised on üsna märkimisväärsed (Joonis 4.3). Aastatel 2005 ja 2008 on toimunud pea poole rohkem rikkeid kui aastatel 2006, 2007 ja 2009. Viie aasta keskmiseks määramata rikete arvuks on ca 125 riket aastas. 110 kV õhuülekandeliinide pikkuseks on Eestis ca 3 415 km. Seega toimub aastas üks määramata rike keskmiselt 27,5 km õhuülekandeliini kohta.

Määramata rikete arvu kuised varieerumised on veelgi märkimisväärsamad (Joonis 4.4). Septembrist märtsini toimub rikkeid väga vähesel määral. Aprillismais on märgata mõningast rikete arvu tõusu. Juunist kuni augusti lõpuni toimub aga väga kiire ja pidev rikete arvu kasv. Määramata rikete aastases koguarvust moodustavad need kolm suvekuud ca 85%.

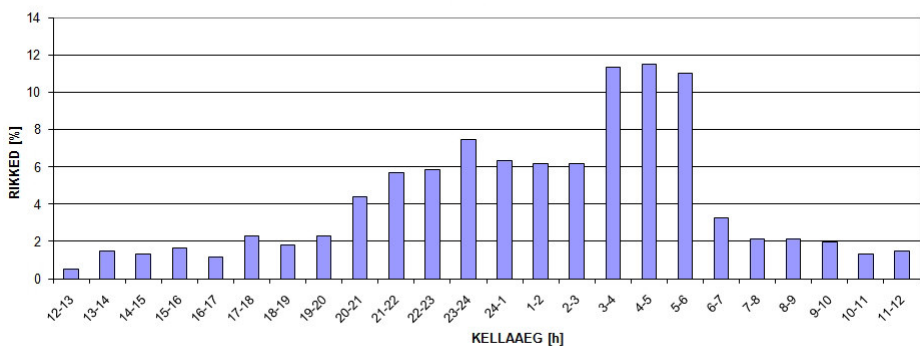




Joonis 4.3 Määramata rikete aastased jagunemised.  
Kogu 110kV õhuliinide ülekandevõrk.  
Perioodil 2005–2009 toimunud rikete aastased jagunemised protsentides.

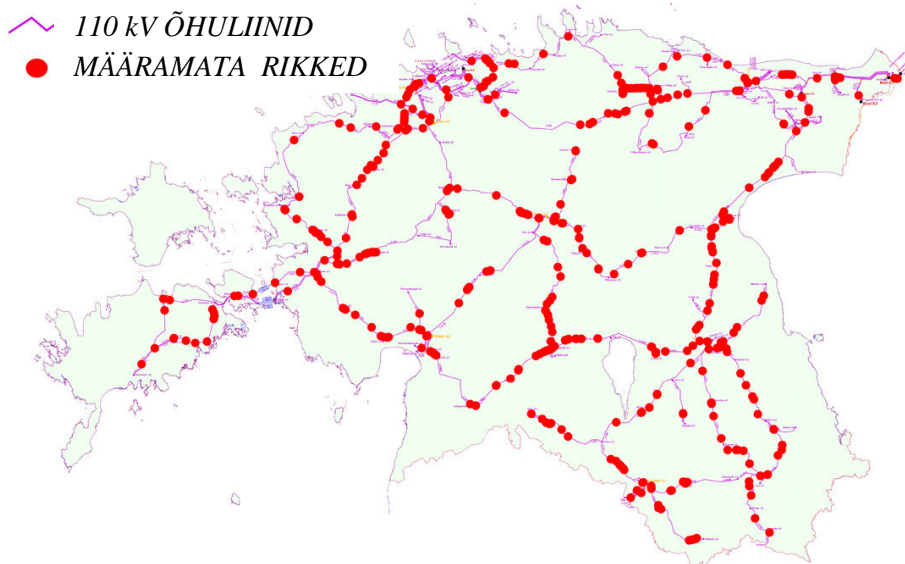


Joonis 4.4 Määramata rikete kuised jagunemised.  
Kogu 110kV õhuliinide ülekandevõrk.  
Perioodil 2005–2009 toimunud rikete kuised jagunemised protsentides.



Joonis 4.5 Määramata rikete ajalised jagunemised ööpäevas.  
Kogu 110kV õhuliinide ülekandevõrk.  
Perioodil 2005–2009 toimunud rikete aastased jagunemised protsentides.

Määramata rikete arvu tunnised varieerumised ööpäevas on samuti väga suured (Joonis 4.5). Kell 06:00 kuni kell 20:00 toimub rikkeid väga vähesel määral. Kell 20:00 õhtul hakkab rikete arv kasvama ja teeb seda kuni keskööni ning jääb siis pea konstantseks kuni kella 03:00-ni öösel (selle seitsme tunni jooksul toimub ca 40% kogu riketest). Peale kella 03:00 toimub taas rikete arvu kiire kasv, seda kuni kella 06:00-ni (selle kolme tunni jooksul toimub ca 35% kogu riketest). Ajavahemikus 20:00 õhtul kuni 06:00 hommikul (kümne tunni jooksul) toimub ca 75% kogu riketest.



Joonis 4.6 Määramata rikete geograafiline jaotus (2005–2009 summa)

#### MÄÄRAMATA RIKETE ARV LIINIDEL

Nagu eelpool mainitud, on viie aasta keskmiseks määramata rikete (ootamatu isolaatori ülelöök) arvuks ca 125 riket aastas ja 110 kV õhuülekandeliinide pikkuseks Eestis ca 3415 km. Aastas toimub üks isolaatori ülelöök keskmiselt 27,5 km õhuülekandeliini kohta. Talutav ülelöökide arv liinidel varieerub riigiti märkimisväärselt, olenevalt liini asukohast ja tähtsusest võib üks talutav ülelöök toimuda 15–300 km õhuülekandeliini kohta aastas [9]. Lääne Euroopa riikides loetakse keskmiseks talutavaks ülelöökide arvuks üks ülelöök 150 km õhuülekandeliini kohta aastas [1]. LISA A Tabel 1 on toodud liinide ülelöökide arvud erinevatel aastatel ning reastatud aastate summa alusel. LISA A Tabel 2 on toodud ülelöönnud isolatsiooniga liinide järjestus, ülelöök  $n$  kilomeetri kohta aastas. Eesti summaarsest ja üksikute liinide väljatoodud (LISA A Tabel 2) arvudest järeldub, et isolatsiooni olukord 110 kV õhuliinidel on pehmelts öeldes kasin, mis tähendab, et toimuvate ülelöökide arv on ilmselgelt liiga suur ja olukord on talumatu.

Võrreldes LISA A tabelleid (*Tabel 1* ja *Tabel 2*) on märgata, et tabelites toodud järjekorrad omavahel ei kattu (kuna *Tabel 2* võtab arvesse ka liinipikkuse), kuid trendid (ehk probleemseimate liinide järjestused) on tabelitel üsnagi sarnased.

Tabelis (*Tabel 4.1*) on toodud 22 enim probleemse õhuliini määramata rikete arvud erinevatel aastatel. Seitsmel neist on viie aasta jooksul toimunud 20 ja enam riket. Rasvase kirjaga toodud liinid on üle viidud komposiitsolaatoritele. Aega (aastates), millal liinidel on kasutatud komposiitsolaatoreid, saab vaadata rasvaselt märgitud rikete järgi.

*Tabel 4.1 Määramata rikked liinidel aastate lõikes.*

	Liin	2005	2006	2007	2008	2009	Kokku
1	L106A/B/D	6	2	8	20	11	47
2	<b>L060/061</b>	9		6	11	8	34
3	L157/158	6	5	6	9	6	32
4	L017	8	2	8	2	6	26
5	<b>L187</b>	11	9	0	2	0	22
6	L058	1			18	2	21
7	<b>L189</b>	4	7	5	3	2	21
8	L105A/B/C	3	8	3	3	1	18
9	L042	3	2	2	9	1	17
10	L173/176/177	6	2	3	2	3	16
11	L037/L038	5	2	2	1	5	15
12	<b>L134A/B</b>	6	3	3	3	0	15
13	L104B/C	2	2		7	2	13
14	L065/192		3		7	2	12
15	L107A/B	6	4		1	1	12
16	L132A/B/C	4	2	1	4	1	12
17	L154/155/156	1	3	3	4	1	12
18	L116	3	2		3	3	11
19	L103	4	2		3	1	10
20	L110/110A	2	1	4	2	1	10
21	L145	2	3	3	2		10
22	<b>L197</b>	3		2	1	4	10

Nagu tabelist (*Tabel 4.1*) ja LISA A tabelitest (*Tabel 1* ning *Tabel 2*) nähtub, pole üleminek klaasisolaatoritelt komposiitsolaatoritele – mis saastuvad raskemini ja mis vähemalt oma eluea alguses peaksid taluma oluliselt paremini erinevaid saastetingimusi – tulemusi andnud. See viitab tugevalt asjaolule, et isolaatorite saastumine toimub väga kiirelt, st et suure tõenäosusega on tegu *saastumisviisiga b*).

Rikkestatistikast nähtub, et rikked ei jaotu ühtlaselt kogu liini ulatuses, vaid kipuvad koonduma teatud kindlatesse liinilõikudesse (mastidesse). Seda kujutavad ilmekalt seitsme enim probleemse liini rikete koondtabelid (*Tabel 4.2* kuni

Tabel 4.8) ja ka joonis (Joonis 4.6). Tabelites on kokku koondatud (kauguse keskväärtused) üksteisele lähedal (kuni  $\pm 3$  km) toimunud rikked. Selliselt koondades väheneb oluliselt rikkekohtade arv ning suureneb probleemseimate liinilõikude (mastide) ülevaatlikkus. Koondtabelitest nähtub, et enamuse määrata rikkeid liinil leiab aset ca kahes suurima rikete arvuga kohas.

Nagu eelpool mainitud, olid toimunud määrata rikked pea eranditult möödavad (99% juhtudel) ühefaasilised maalühised. See, et rikked toimusid liini erinevatel faasidel, ei oma rikete asukohtade koondamisel erilist tähtsust. Seda enam, et rikete jagunemine on faaside vahel küllaltki sarnane (A0 ca 30%, B0 ca 40%, C0 ca 30%) ning kuna kõikide liinide faaside järjestused ei pruugi olla samad (transpositsioon – tagamaks faasijuhtide elektrilist sümmeetriat üksteise, maa või naabersüsteemide suhtes).

Tabel 4.2 Liin L106A/B/D määrata rikete koondtabel.

Rikkeid (tk)	47	Samas kohas (tk)	Kaugus (km)	Arvatav mast (nr)
Liin				
L106A/B/D		25	77,6	57
		6	2,0	9
		6	3,8	17
		2	45,3	121
		2	47,7	115
		2	30,8	137
		2	18,7	85
		2	8,0	36

Tabel 4.3 Liin L060/061 määrata rikete koondtabel.

Rikkeid (tk)	34	Samas kohas (tk)	Kaugus (km)	Arvatav mast (nr)
Liin				
L060/061		13	4,5	23
		7	8,6	42
		3	16,1	13A
		2	6,7	33
		2	2,6	15
		2	24,8	83
		2	11,0	52
		2	0,9	6
		1	21,1	67

Tabel 4.4 Liin L157/158 määrata rikete koondtabel.

Rikkeid (tk)	32	Samas kohas (tk)	Kaugus (km)	Arvatav mast (nr)
Liin				
L157/158		13	55,8	48
		5	45,5	102

		5	31,9	142
		3	21,3	95
		3	10,7	48
		2	63,4	17
		1	3,7	20

Tabel 4.5 Liin L017 määramata rikete koondtabel.

Rikkeid (tk)	26	Samas kohas (tk)	Kaugus (km)	Arvatav mast (nr)
Liin				
L017		13	7,5	38
		8	5,2	27
		2	12,3	62
		1	0,0	1
		1	25,5	121
		1	-	-

Tabel 4.6 Liin L187 määramata rikete koondtabel.

Rikkeid (tk)	22	Samas kohas (tk)	Kaugus (km)	Arvatav mast (nr)
Liin				
L187		16	11,5	47
		2	45,6	175
		2	25,5	100
		2	3,8	18

Tabel 4.7 Liin L058 määramata rikete koondtabel.

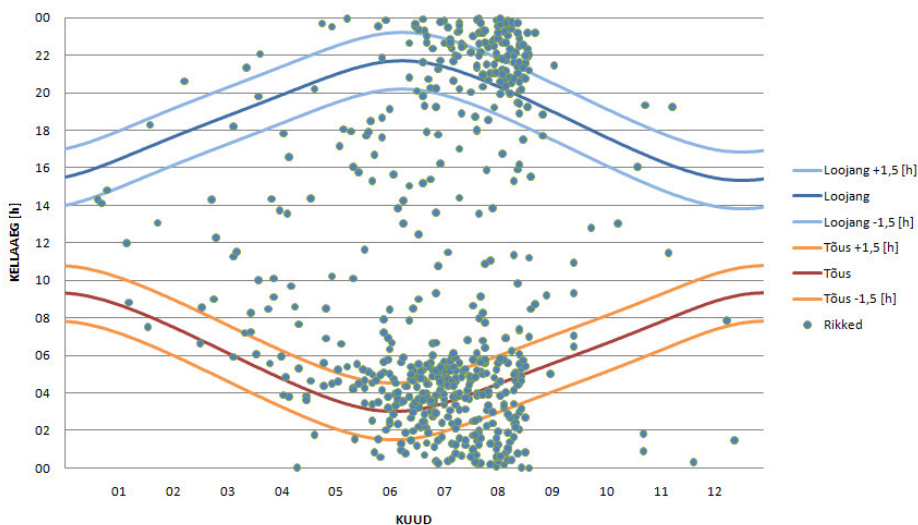
Rikkeid (tk)	21	Samas kohas (tk)	Kaugus (km)	Arvatav mast (nr)
Liin				
L058		18	29,2	120
		2	18,7	78
		1	-	-

Tabel 4.8 Liin L189 määramata rikete koondtabel.

Rikkeid (tk)	21	Samas kohas (tk)	Kaugus (km)	Arvatav mast (nr)
Liin				
L189		16	27,7	103
		4	13,3	49
		1	6,2	23

## MÄÄRAMATA RIKETE, PÄIKESETÕUSUDE JA LOOJUMISTE VAHELISED SEOSSED

Määramata rikete, päikesetõusude ja loojumiste vahel võib märgata korrelatsioone (Joonis 4.7). Korrelatsiooni saab hinnata, kui moodustada päikesetõusu- ja loojumisaegade [33] joonte ümber näiteks  $\pm 1,5$  tunnised nn koridorid hindamaks, kui palju rikkepunkte jääb koridoride sisse- või koridoridest väljapoole.



Joonis 4.7 Määramata rikete, päikesetõusude ja loojumiste vahelised seosed. Kogu 110kV õhuliinide ülekandevõrk. Perioodil 2005–2009 toimunud rikete ajalised jagunemised aastas.

Tabelis (Tabel 4.9) on toodud jooniselt (Joonis 4.7) võetud arvilised näitajad. Veerg 'Pindala (%)' näitab, kui suure osa kuude ja kellaegade risküliku pindalast (Joonis 4.7) moodustavad päev, öö, päikeseloojang ja tõus. Veerud 'Rikked (%)' ja 'Rikked (tk)' näitavad, kui palju rikkeid protsentuaalselt ja arviliselt tükides on toimunud vastava päeva, öö, tõusu või loojangu pindalal. Veerg 'Rikked/pindala (tk/%)' näitab, palju rikkeid pindala protsendiühiku kohta on toimunud. Selle veeru alusel saab hinnata määramata rikete korrelatsiooni suurust nii päikesetõusude kui ka loojangutega. Mida suurem number, seda suurem on ka korrelatsioon.

Tabel 4.9 Määramata rikete, päikesetõusude ja loojangute vahelised seosed.

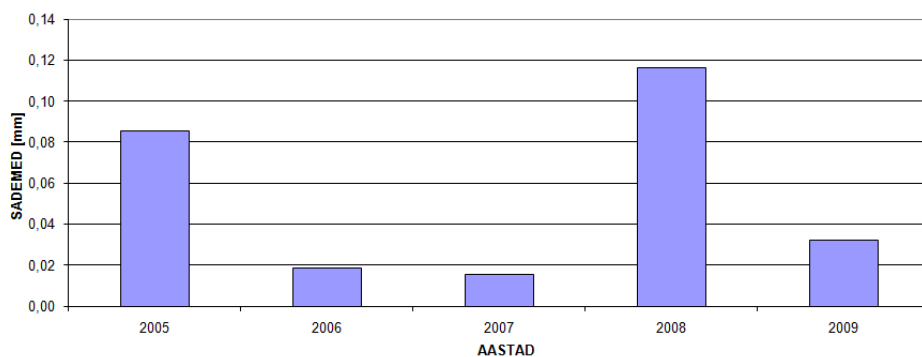
	Pindala (%)	Rikked (%)	Rikked (tk)	Rikked/pindala (tk/%)
Päev	39	21	133	<b>3</b>
Öö	35	28	174	<b>5</b>
Loojang $\pm 1,5$ (h)	13	17	109	<b>8</b>
Tõus $\pm 1,5$ (h)	13	34	216	<b>17</b>

Tabelist on näha, et kõige tugevam korrelatsioon valitseb määramata rikete ja päikesetõusu koridori vahel. Määramata rikete ja päikeseloojangu vaheline korrelatsioon on aga palju nõrgem: üle kahe korra nõrgem, kui seda on päikesetõusude ja määramata rikete vahel.

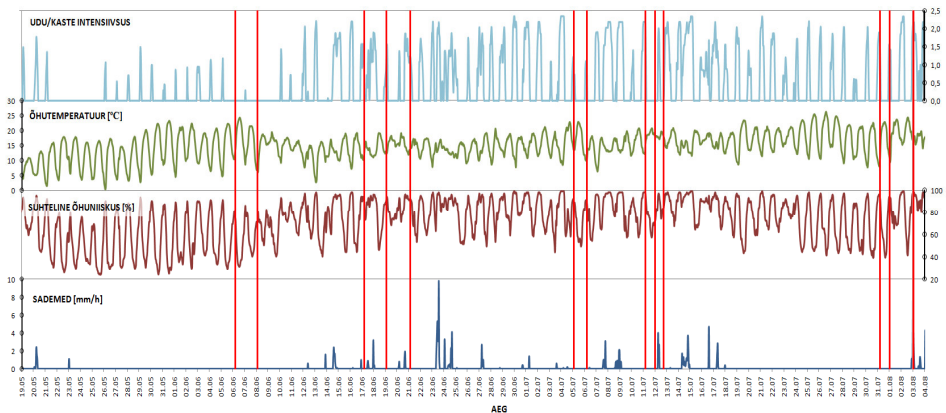
### MÄÄRAMATA RIKETE JA ATMOSFÄÄRITINGIMUSTE VAHELISED SEOSED

*Udu/kaste intensiivsus, õhutemperatuur, suhteline õhuniiskus, sademed*

Määramata rikete toimumisaegade võrdlemine Eesti meteoroloogia ja hüdroloogia instituudist [18] saadud Eesti keskmiste tunniste, nädalaste ning kuiste suhteliste õhuniiskuste, õhutemperatuuride ja sademetega (LISA A, *Joonis. 1* kuni *Joonis. 4*) ei andnud otseseid korreleeruvaid tulemusi. Küll aga võib kvantitatiivselt väita seda, et enamus riketest toimub hommikul (päikesetõusu) ajal, kui suhtelised õhuniiskused ja udu/kaste päevased intensiivsused on suurimad. Erandina leiab mõninga sarnasuse, kui võrrelda omavahel aastas toimunud määramata rikkeid (*Joonis 4.3*) ja suvekuude tunni keskmisi sademete hulki aastas (*Joonis 4.8*). Veendumaks, et selline korrelatsioon ka tegelikult paika peab – et tegu pole juhusliku sarnasusega – on vaja tulevikus koguda võrdlemiseks lisaandmeid.

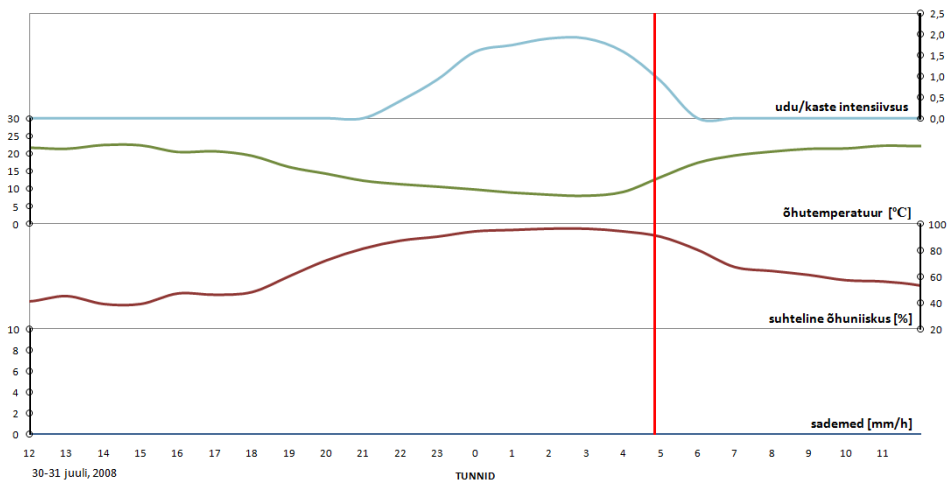


*Joonis 4.8 Suvekuude (aprill - september) tunni keskmine sademete hulk aastas (17 mõõtejaama keskmine).*



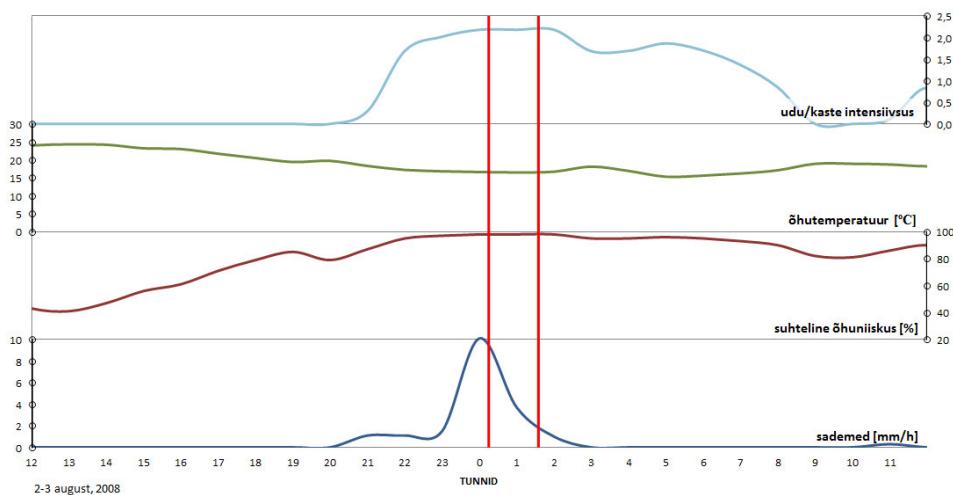
Joonis 4.9 Määramata rikked (punased jooned), õhu udu/kaste intensiivsus, õhutemperatuur, suhteline õhuniiskus, sademed.

Korrelatsiooni tulemused ei parane, kui võrrelda ainult ühel elektriliinil, näiteks L106A/B/D ajavahemikus 19.06.2008 kuni 04.08.2008 toimunud määramata rikkeid lähima mõõtejaama (Pärnu) ilmaandmetega. Joonised (Joonis 4.9 – Joonis 4.12)

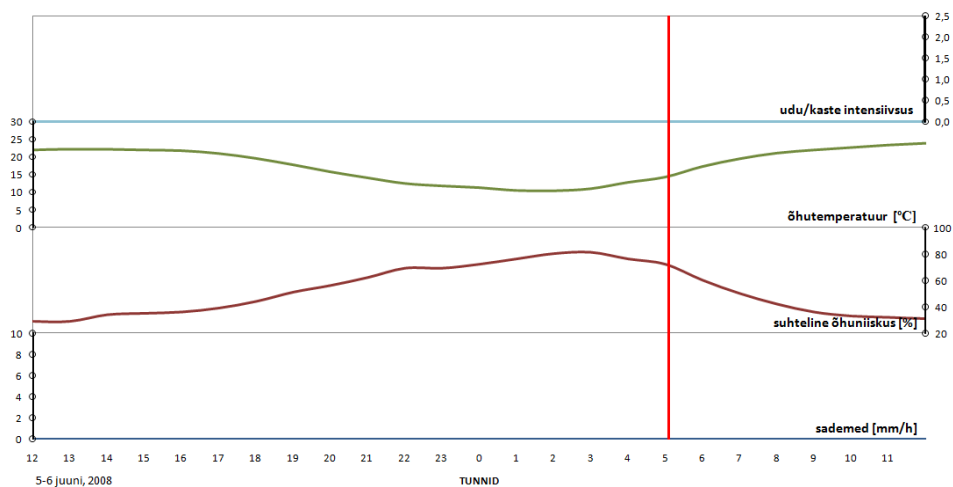


Joonis 4.10 Määramata rikked, õhu udu/kaste intensiivsus, õhutemperatuur, suhteline õhuniiskus, sademed.





Joonis 4.11 Määramata rikked, õhu udu/kaste intensiivsus, õhutemperatuur, suhteline õhuniiskus, sademed.



Joonis 4.12 Määramata rikked, õhu udu/kaste intensiivsus, õhutemperatuur, suhteline õhuniiskus, sademed.

Vaadates jooniseid (Joonis 4.9 kuni Joonis 4.12) on ilmne, et toimunud määramata ricketel puudub sarnane käekiri.

Joonis 4.10 sobib hästi kirjeldama saastunud isolaatori ülelööki peale hommikust päikesetõusu, pea maksimaalse udu/kaste tingimustes. Isolaatori soojusinertsitõttu on isolaatoril peale päikesetõusu madalam temperatuur, kui seda päikese poolt soojendatud ümbritseval õhul ning toimub õhuniiskuse intensiivne kondenseerumine saastunud isolaatorile [9], mis lõpeb isolaatori ülelöögiga. Sellisel viisil toimus 8 ricket 14-st rikest.

*Joonis 4.11* kirjeldab paduvihmas ja pea 100% suhtelise õhuniiskuse tingimustes tekkivaid saastunud isolaatorite ülelööke. Huvitav on siin asjaolu, et isolaatoril toimub ka peale puhastava toimega paduvihma ülelööki. Sellisel viisil toimus 2 riket 14-st rikkest.

*Joonis 4.12* puhul aga ei saa isolaatori ülelööki muul moel põhjendada (pole sademeid ega udu/kastet), kui keegi/miski on isolaatorkeeti vahepeal saastanud või lühistanud (nt traaversil istuva linnu väljaheitejuga). Sellisel viisil toimus 4 riket 14-st rikkest.

*Joonis 4.9* on kõige ülevaatlikum ja toob hästi esile määramata rikete otsese, mittekorreleerumise sademete, suhtelise õhuniiskuse ning udu/kaste intensiivsusega. Näha on, et mitmed rikked toimuvad sellistel päevadel, kus erinevad niiskuskäitajad (mis on saastlahenduse eeldusteks) eelnevatest päevadest oluliselt halvemad on. See viitab tugevalt tõigale, et isolaatoreid on kas vahepeal olulisel määral saastatud või lihtsalt lühistanud (nt traaversil istuva linnu väljaheitejuga).

Jooniste (*Joonis 4.9* kuni *Joonis 4.12*) põhjal ei saa väita, et määramata rikete ja atmosfääritingimuste vahel oleks otsene seos. Üheks mittekorreleerumise põhjuseks võib olla see, et mõõtejaamas ja rikkepunktis valitsevad erinevad atmosfääritingimused. Teiseks mittekorreleerumise põhjuseks võib olla isolaatorite kiire ja paikse saastaja olemasolu (nt *saastumisviis b*, *lindude väljaheitejuga*).

### *ÕHUSAASTE MÕJUD (TÖÖSTUS, PÕLLUMAJANDUS)*

Õhu saastatust ja saastatuse mõju saab hinnata kaudselt, sest mõõtmisi õhusaastatuse (ehk erinevate lenduvate osakeste määra õhu ruumalaühikus) kohta ei teostatud. Seega sisaldab antud alapunkt autori kaudset hinnangut õhusaaste mõjule. Õhu saastatust saab kaudselt hinnata käidust kõrvaldatud keraamiliste ja klaasisolaatorite visuaalse vaatluse ning isolaatori pesemisel saadud pesuvee juhtivuse mõõtmisel ning *ESDD* ja *NSDD* määramisel (*Peatiikk 3.3*). Kuna antud uurimuses kasutati laboratoorsesel mõõtmistel isolaatorite seisundite hindamiseks muid meetodeid, polnud hilisem *ESDD* ja *NSDD* määramine isolaatoritel enam võimalik.

Õhu saastatust (*saastumisviis a*) põhjustavad mitmed tegurid, peamiselt aga:

- tööstus (tolm, tuhk, heitgaasid, keemilised ühendid),
- põllumajandus (mulla erosioon, väetised, kahjuritõrje, õietolm),
- transport (heitgaasid, rehvide/teede kulumine).

Nendest kaks, tööstus ja transport, on aastaringselt küllaltki konstantsed saastajad, millest võib järeldada, et need kategooriad ei tohiks olla suviste määramata rikete arvu kasvu tõusu põhjustajateks. Seda toetab ka teadmine

rikete statistikast: suurlinnades, kuhu on koondunud suurem osa tööstustest ja kus teatavasti puudub põllumajanduslik tegevus, on määramata rikete arv tühine.

Seega võib peamiseks õhusaaste lisaallikas suvekuudel olla põllumajanduslik tegevus. Põhilisteks saasteallikateks võiksid olla kevadkülv, sügisene saagikoristus, soojade ilmade poolt põhjustatud mulla erosioon ja õietolm, mille tuul isolaatoritele kannab.

Kevadkülviks on sobiv aeg olenevalt ilmadest ning erinevatest põllukultuuridest enamasti kas aprilli lõpp või mai algus. Sügisesed saagikoritused aga jäävad enamasti augusti lõppu või septembrisse. Seega on külvide ja saagikoristustega raske põhjendada määramata rikete arvu jõulist kasvu juunist augustini (*Joonis 4.4*).

Õietolmu levib suurel määral teatavasti suve alguses (aprill-mai) [34], kui enamus taimi/puid õide puhkevad, peale mida õietolmu kogused õhus vähenavad. Seega on peamiselt suve algusesse jääva õietolmu levimisega samuti raske seletada määramata rikete arvu jätkuvat kasvu kolmel (juuni, juuli, august) (*Joonis 4.4*) suvekuul.

Väetiste külvamine ning kahjuritõrje (mürkide pritsimine) toimub samuti nagu kevadkülv ja sügisene saagikoristuski enamasti lühiajaliselt, mitte progresseeruvalt kolmel järjestikusel suvekuul. Seega ei saa määramata rikete arvu hüppelist tõusu otseselt seostada kevadiste väetamiste ja kahjuritõrjega. Väetiste (välja arvatud põldude lupjamine klinkritolmuga, mis põhjustab otse olulisel määral tolmutamist) ning kahjuritõrje mõjud ilmnevad peamiselt koos mulla erosiooniga, kuna Eestis kasutatakse väetamiseks ja kahjuritõrjeks enamasti põllutööseadmeid, mis liiguvad mööda maapinda ning külvamine ja pritsimine toimub samuti maapinna lähedal (nt enamasti ei toimu lennukilt mürkide pihustamist ja kui, siis väga vähesel määral).

Pinnase erosiooni mõjusid isolaatori ülelöökid tekkel peetakse üldjuhul tagasihoidlikeks (kui pinnas ei sisalda lisandeid: väetised, mürgid jne), kuna sel teel tekkivate saastekihtide takistus on enamasti suur ning sademed ja kõva tuul puhastavad isolaatoreid sellest saastetüübist üsna efektiivselt [9].

Pinnase erosioon toimub põhiliselt kuivadel, soojadel ja mõõdukalt tuulistel päevadel. Pinnase erosiooni mõju isolaatori saastumisele ja saastlahenduse tekkele on seda suurem, mida kauem on ilmad püsivalt kuivad, soojad ning mõõdukalt tuulised ehk mida rohkem jõuab isolaator saastuda enne, kui ilmad niiskeks või liiga tuuliseks lähevad ning siis kas toimub saastunud isolaatorite isepuhastumine vihmade või tugevate tuulte abil või udu/kaste ja niiskuse kondenseerumisel saastunud isolaatoril – saastlahendus. Seega võib eeldada, et pinnase erosioonist tulenevad isolatsioon ülelöögid toimuvad pikkade kuivade perioodile lõpus, kui isolaatorile kogunenud saast lõpuks niiskub, tekib elektrit

juhtiv elektrolüüdikiht, mis viib soodsatel tingimustel isolaatori ülelöögini. Üldjuhul aga kulub isolaatorite sellisele saastumisele kuid, isegi aastaid [9], mitte päevi ega nädalaid.

Kui vaadata joonist (*Joonis 4.9*) ja eeldada, et ilmaandmed rikkekohtade suhtes peavad paika, siis sellise iseloomuga isolatsiooni ülelööke saaks antud liinil mingil määral seostada vaid augusti lõpus ja septembri alguses toimunud ülelöökidega (12 vihmatu päeva lõpus) – seega ei saa antud juhul pinnaseerosiooni abil toimuvaid saastlahendusi pidada põhilisteks süüdlasteks määramata rikete tekkel.

## *ELUSLOODUSE MÕJU (LINNUD, PUTUKAD, ÄMBLIKUD)*

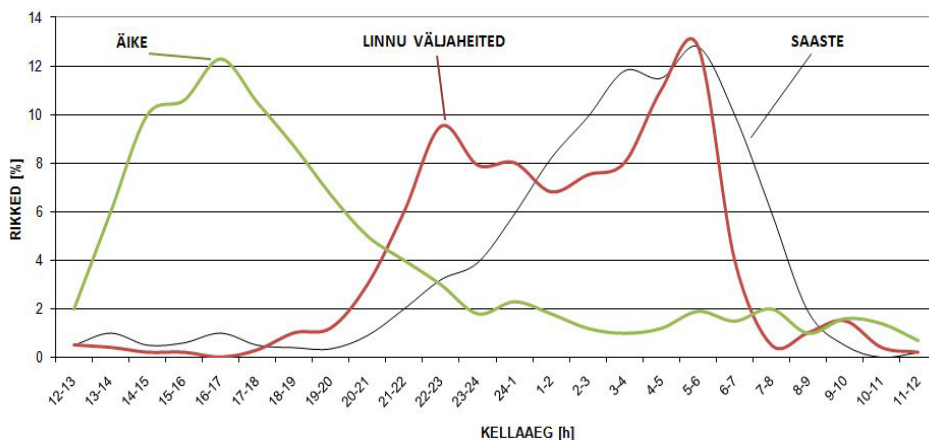
### *LINNUD*

Aastatel 1988–1992 viis USA Florida osariigi elektrienergiakompanii *Florida Power and Light Company* (FPL) läbi uuringu, mis puudutas samuti kõrgepinge õhuliinidel (138 kV, 230 kV ja 500 kV) toimuvaid määramata rikkeid. FIRMAL oli soov välja selgitada rikete tekkepõhjused ning leida vastavad õiged meetmed nende rikete ärahoimiseks. Töö tulemusena selgitati välja, et enamus määramata rikkeid oli põhjustatud suurte lindude väljaheidete poolt. Lindude väljaheidet põhjustavad ülelööke kas isolaatori saastamise teel (saastlahendus), isolaatorketi lühistamise teel (traaversil istuva suure linu väljaheitejuga lühistab omavahel traaversi ning faasijuhi) või nende mõlema lahendustüübi koosmõju tulemuse teel. Määrati ka erinevate rikkepõhjuste (äike, linu väljaheidet, saaste) ja rikete ajalised jaotumised ööpäevas (*Joonis 4.13*). [29]

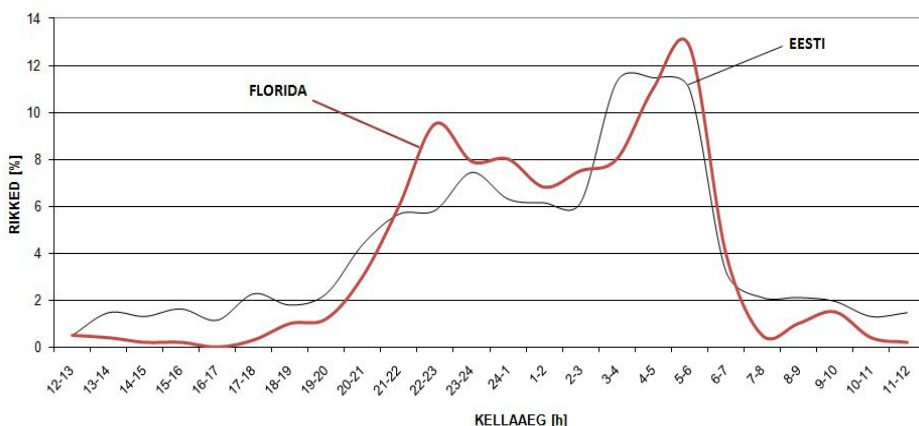
Nagu jooniselt (*Joonis 4.13*) näha, on lindude poolt põhjustatud rikel oma kindel nn käekiri. Rikete arvu kiire kasv toimub enamasti pärast päikeseloojangut, seejärel keskööl veidi taandudes, kuni päikesetõusu aegu toimub taas rikete arvu järsk suurenemine, peale mida rikete arv pea nullini langeb, püsides sellisena kogu päevase aja.

Kuigi linnud võivad väljastada ekskrementide igal ajal, on suure hulga lindude puhul märgatavad teatud nn massi ehk enamuse käitumise seaduspärasused. Päikese loojumisaegset tippu võib seletada osade lindude päevase toitumise lõppfaasiga, st ekskrementide väljastamisega enne uinakut. Päikese tõusuaegset tippu võib aga seletada veelgi suurema osa lindude käitumisega väljutada öösel seeditud toit kohe peale ärkamist, enne päevaseid toimetamisi. [35]

Võrreldes Eestis toimunud määramata rikete ajalisi jagunemisi ööpäevas (*Joonis 4.5*) ja Florida õhuliinidel toimunud lindude saastamisest põhjustatud rikete ajalisi jagunemisi ööpäevas (*Joonis 4.13*), on seos ilmne (*Joonis 4.14*)!



Joonis 4.13 Florida 138 kV, 230 kV ja 500 kV õhuliinide rikete ajalised jagunemised ööpäevas. Perioodil 1988–1992 toimunud rikete ajalised jagunemised ööpäevas, protsentides [29].

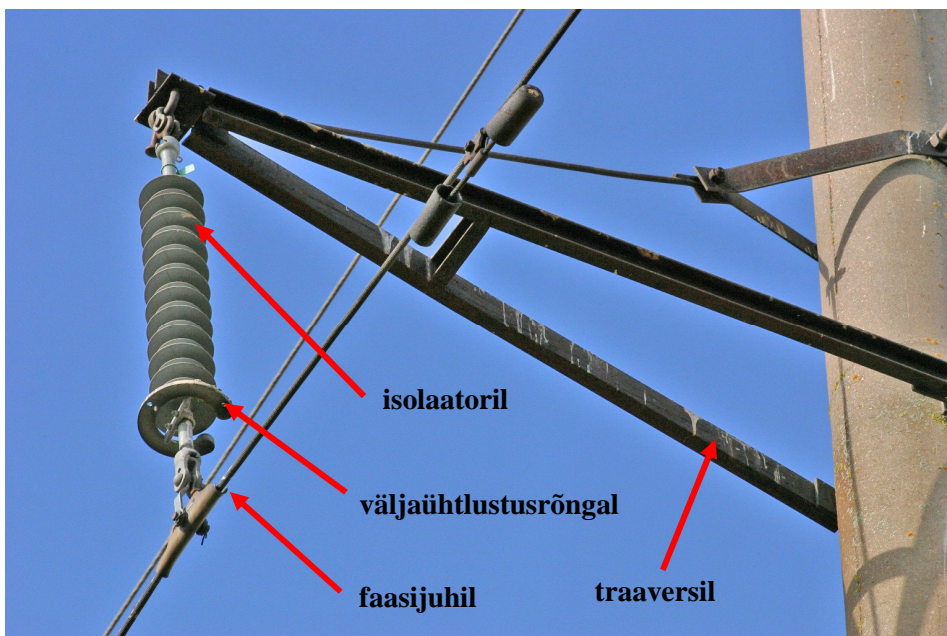


Joonis 4.14 Floridas linnu väljaheitejoa poolt põhjustatud rikked [29] ja Eestis toimunud määramata rikked, rikete ajalised jagunemised ööpäevas. Õhuliinide ülekandevõrk.

Eestis ja Floridas lindude poolt põhjustatud rikete ajaliste jagunemiste graafikult (Joonis 4.14) on näha, et Eestis toimuvate õhtuste ja hommikuste rikete tipud on lamedamad ning üksteisele ka ajalisel lähemal. See on seletatav asjaoluga, et Eesti ja Florida paiknevad erinevatel laius- ja pikkuskraadidel. Florida on ekvaatorile oluliselt lähemal (nt sama lähedal kui Israel) kui Eesti. Floridas muutub aastas päeva pikkus maksimaalselt 4 tundi (talvel minimaalne päeva pikkus 10h, suvel 14h), Eestis aga 12 ja pool tundi (talvel minimaalne päeva pikkus 6h, suvel 18h30min). Eestis toimuvate rikete õhtused ja hommikused maksimumid on üksteisele ajalisel lähemal, kuna suvel (kui toimub enam

riketest (*Joonis 4.4*) on Eestis ööd lühemad kui Floridas. Rikete tippude lame-  
dust saab seletada asjaoludega, et Eestis muutuvad päikesetõusude ja -loojumiste  
kellaajad küllaltki kiiresti (*Joonis 4.7*). Kolme suvekuu (*juuni-juuli-august*)  
jooksul mõlemad *ca 2 tunni võrra* ning suviste 'valgete ööde' tõttu, kui pärast  
päikese loojumist ja enne tõusu kumab päike horisondil kuu aega, st südasuvel  
kuma ei kao, vaid kestab päikeseloojangust päikesetõusuni.

Eeldust, et linnud on rikete peamisteks põhjustajateks, toetab süsteemioperaatori  
ja ka autori poolt teostatud erinevate liinilõikude/mastide pisteline visuaalne  
vaatlus: liinimastidel võib märgata traaversil või masti tipus seisvaid/pesitsevaid  
linde; ülelõõnud isolaatoritel võib tihti märgata lindude väljaheideteid, ülelõõnud  
isolaatoriga mastide ümbruses, mastidel, masti traaversitel ja ka isolaatorile  
kinnituval liinijuhil (*Joonis 4.15*) võib samuti tihti märgata lindude väljaheidete  
jälgi. Süsteemioperaator, suheldes inimestega, kes elavad rikkekohtade lähe-  
duses, on saanud teavet, et rikke toimumise ajal on nähtud liinide läheduses nii  
üksikuid valgeid toonekurgi kui ka toonekureparvi.

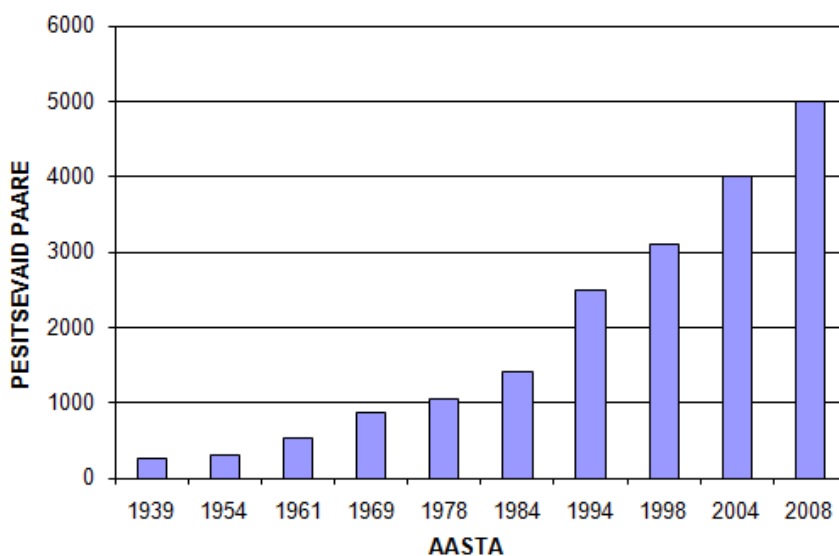


*Joonis 4.15* Linnu väljaheidete jäljed faasijuhil, väljajühtlustusrõngal, isolaatoril,  
traaversil ( L060, M22)

Kuna on ilmne, et enamuse määramata rikete põhjustajateks on linnud, siis antud  
töös putukate ja ämblike poolt põhjustatud võimalikke rikkeid ei käsitleta.

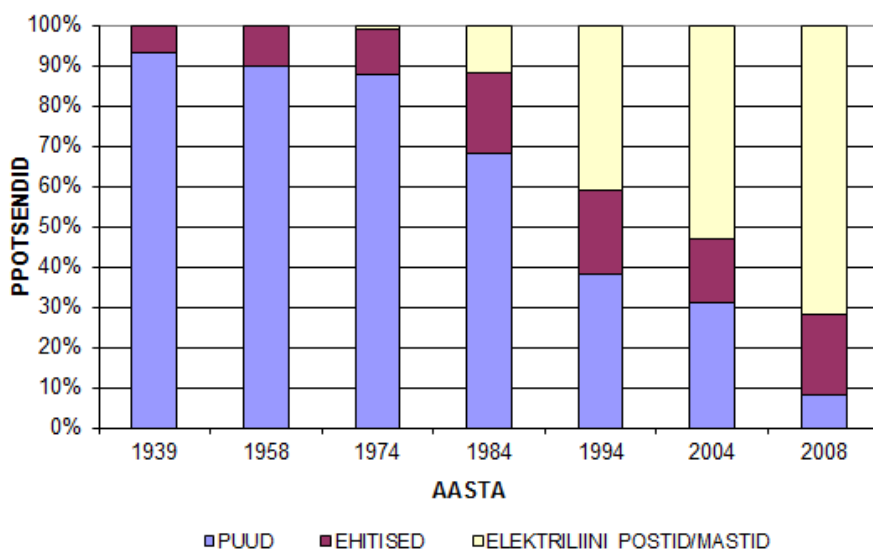
## RÄNDLINNUD (VALGE TOONEKURG)

Ühtedeks põhilisteks rikete põhjustajateks on suure tõenäosusega Eestisse pesitsema saavad suured rändlinnud. Seda saab järelda jooniselt (Joonis 4.4), kust on näha, et enamus rikkeid toimub just suvisel ajal (aprill – august). Ajal, kui pesitsevad rändlinnud viibivad Eestis. Eestis sobib selleks suureks pesitsevaks rändlinnuks kõige paremini valge toonekurg (*ld Ciconia ciconia*) eelkõige seetõttu, et valge toonekurg on Eestis suurim rändlind, kelle arvukus on viimasel ajal kiirelt kasvanud (ca 5000 paarini) (Joonis 4.16). Samuti on see lind kehakaalult (3,2–4,0 kg), kehapikkuselt (1,0–1,2 m) ja tiibade siruulatuselt (ca 2 m) suurim lind, kes eelistab ehitada oma pesa tugevale alusele kõrgetel puudel, telefoni- ja elektripostidel/-mastidel, korstnatel jm. Valged toonekured eelistavad pesa loomisel/ehitamisel üha enam ja enam elektriposte/-maste (juba ca 70% pesadest) (Joonis 4.17). Ka meeldib neile pidada jahti ja varitseda oma saaki kõrgetel puu, korstna või elektriliini masti otsast. [36]



Joonis 4.16 Valge toonekure arvukus Eestis. [37]

Valged toonekured saavad Eestisse pesitsema ja järglasi saada järkjärgult aprilli keskelt kuni poole maini ning lahkuvad taas kas augusti viimastel nädalatel või septembri alguses. See vahemik langeb peaaegu 100%-liselt kokku rikete arvu järsu suurenemise ajaga (Joonis 4.4).



Joonis 4.17 Valge toonekure pesade paiknemine Eestis [37]

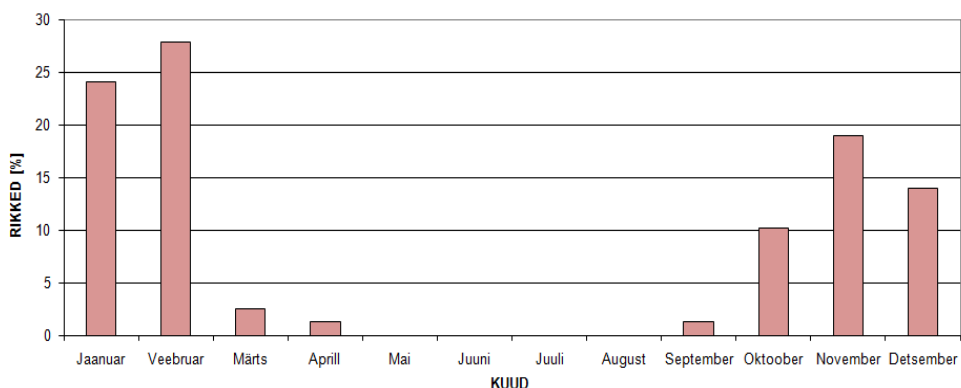
Rikete arvu kasvu võib seletada igakuiselt, võrreldes neid linnu pesitsustavadega – pesategemise perioodi alguses tahavad linnud privaatsust paaritumiseks ning munemiseks. Valge toonekurg paaritub avatud kultuurmaastikul, kus on juurdepääs niisketele aladele. Toonekurg sööb kalu, konni ja putukaid, kuid samas ka väiksemaid roomajaid, närilisi ja väiksemaid linde. Neil on tugev side oma pesakohaga, kasutades sama pesa aastaid. Emaslind muneb enamasti 3–5, harvem kuni 7 muna. Mõlemad vanemad jagavad haudeaega 33–34 päeva, mille järel koorub tavaliselt 2–3 poega. See viitab lisatoidu vajadusele ning sellega seoses ka *juunikuissele* rikete arvu kasvule. Noored linnud saavad täielikult lennuvõimelisteks ca 60 päevaga, mis tähendab, et lendavate lindude arv suureneb *juulis-augustis* ca 2 korda. Augusti lõpus hakkavad linnud kogunema parvedesse ning valmistuma rändeks (kaks kolmandikku noorlindudest lendab ära enne täiskasvanud linde). Linnud moodustavad väiksemaid grupe ja suuremaid parved. Parves võib olla üle 100 linnu, kes kõik soovivad leida parima ülevaatega kohta (näiteks elektriliini mastide otsas) [38], mis on suure tõenäosusega *augustikuiste* rikete lisapõhjuseks.

Nagu juba eelpool mainitud, kinnitavad valgete toonekurgede seotust määramata riketega ka süsteemioperaatori suhtlused rikkekohtade läheduses elavate kohalike inimestega, kes on kinnitanud, et rikete toimumise ajal on nad liinide läheduses näinud kurgi ja ka kureparvi.

Valge toonekure seotust määramata riketega kinnitab ka Israelis, Beit-Sheani orus paiknevate 161 kV õhuliinide kohta tehtud uuring [39]. Beit-Sheani orus paiknevatel õhuliinidel toimus ajal, mil mustad toonekured (valge toonekure

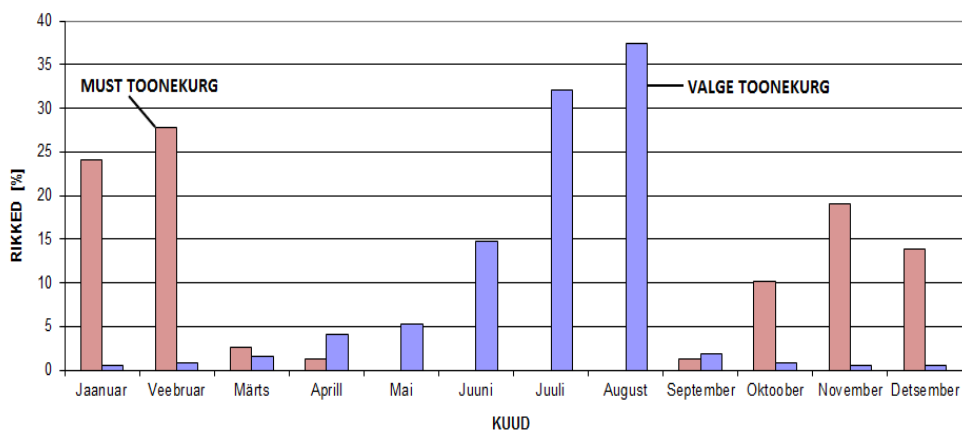


lähisugulased) sinna talvituma saabusid (ca 400 paari), samuti suurel hulgal määramata rikkeid (Joonis 4.18). Nendest ja ka muudest andmetest järeldasid Israeli uurijad, et määramata rikete peamiseks põhjustajateks ongi mustad toonekured.



Joonis 4.18 Mustade toonekurgede poolt talvitumisel põhjustatud rikete kuised jagunemised. Israeli Beit-Sheani org, 161kV õhuliinide ülekandevõrk. Perioodil 2003–2005 toimunud rikete kuised jagunemised protsentides [39]

Joonisel (Joonis 4.19) on toodud Israelis talvituvate mustade toonekurgede ja Eestis suvel pesitsevate valgete toonekurgede poolt põhjustatud isolatsioonirikete kuised jagunemised aastas. Tuleb mainida, et toodud jooniselt (Joonis 4.19) paistab hästi välja toonekureliste rändlindude talvitumise-, rände- ja pesitsemiseajad.



Joonis 4.19 Mustade toonekurgede poolt talvitumisel Israelis, Beit-Sheani orus põhjustatud rikete [39] ja valgete toonekurgede poolt pesitsemise perioodil Eestis põhjustatud rikete kuised jagunemised.

### 4.3 Rikete kohta tehtavad järeldused

Määramata rikete statistilise analüüsi põhjal tehtud rikete omaduste esile toomiseks ning kiire ülevaate saamiseks on allpool loetletud ning igas loetelupunktis ka lühidalt kirjeldatud toimunud rikete tunnuseid.

- Lõuna-Eestis toimub määramata rikkeid oluliselt enam (64%) kui Põhja-Eestis (36%).
- Toimunud määramata rikked olid pea eranditult mööduvad (99% juhtudel) ühefaasilised maalühised.
- Rikete jagunemine on faaside vahel küllaltki sarnane (A0 ca 30%, B0 ca 40%, C0 ca 30%).
- Rikked ei jaotu ühtlaselt kogu liini ulatuses, vaid kipuvad koonduma teatud kindlatesse liinilõikudesse (mastidesse). Enamus määramata rikkeid liinil leiab aset ca 2 suurima rikete arvuga kohas.
- Aastatel 2005 ja 2008 on toimunud pea poole rohkem rikkeid kui aastatel 2006, 2007 ja 2009.
- Määramata rikete aastasest koguarvust moodustavad kolm suvekuud (juuni-juuli-august) ca 85%.
- Kogu määramata riketest ca 75% toimub ajavahemikus kell 20:00 õhtul kuni kell 06:00 hommikul (kümne tunni jooksul).
- Valitseb tugev korrelatsioon määramata rikete ja päikesetõusu vahel. Määramata rikete ja päikese loojumise vaheline korrelatsioon on aga nõrgem.
- Määramata rikete ja atmosfääritingimuste vahel ei valitse otsest seost.
- Tööstuse, põllumajanduse ja transpordi mõju määramata rikete tekkele ei saa pidada saastlahenduste põhilisteks põhjustajateks.
- Üheks põhilisteks rikete põhjustajateks on suure tõenäosusega Eestisse pesitsema saabuvad suured rändlinnud. Eestis sobib selleks suureks pesitsevaks rändlinnuks kõige paremini valge toonekurg.
- Üleminek klaasisolaatoritelt komposiitsolaatoritele – mis saastuvad raskemini ja mis vähemalt oma eluea alguses peaksid taluma oluliselt paremini erinevaid saastetingimusi (va *saastumisviis b* linnu väljahaitejuga) – pole tulemusi andnud. See viitab tugevalt asjaolule, et isolaatorite saastumine toimub väga kiirelt, st suure tõenäosusega on tegu just

*saastumisviisiga b), täpsemalt saastumisviis b) linnu väljaheitejoaga. Kuna Läänemere vee soolasisaldus on madal, siis ei esine Eestis saastumisviis b) isolaatorile sadestuv juhtiv vedelik, ranniku lähedal soolasest mereveest kerkinud udu tõttu saastlahendusi [3]. Eestis pole täheldatud ka suviseid happevihmu. Ebatõenäoline on ka saastumisviis b) hüdrofoobse pinna eripära poolt põhjustatud saastlahendused, kuna talitlevad komposiitisolaatorid, millel määramata rikked on toimunud, on praktiliselt uued, olnud kasutuses vaid mõned kuud või aastad. Järelikult on tegu saastega saastumisviis b) linnu väljaheitejuga.*

Eelnevale toetudes võib järeldada, et määramata rikete peamisteks põhjustajateks on lindude (valge toonekurg) ekskremendid, mis tekitavad isolaatoril ülelööke. Suure tõenäosusega on enamikel juhtudel tegu saastumisviis b) linnu väljaheitejuga riketega.

## 5 LABORATOORSED MÕÕTMISED

Laboratoorsete mõõtmiste eesmärgiks on kontrollida, kas rikkestatistika ning kirjanduse põhjal tehtud oletused ja järeldused peavad paika. Katsetatavatele isolaatoritele luuakse laboris looduses valitsevatele tingimustele võimalikult sarnaseid tingimusi ning saadud tulemused fikseeritakse.

Laboratoorseid mõõtmisi võib klassifitseerida standardseteks ja ebastandardseteks. Et maailma erinevates laborites tehtavate katsete tulemused oleksid üheselt omavahel võrreldavad, on kindlate nähtuste registreerimiseks välja töötatud spetsiaalsed tüüpkatsemeetodid ja standardid. Isolaatorite saastalahenduste ja saastatuse mõõtmise viisid on toodud standardis EVS-EN 60507 [40]. Standardsete katsete miinuseks võivad olla: standardile vastavate katseseadmete kõrge hind, standardi puudumine või jäikus uue olulise nähtuse kirjeldamisel. Plussiks aga otsene võrreldavus teistes laboratooriumides tehtuga. Ebastandardsete katsete miinuseks on otsese võrreldavuse puudumine muudes laborites tehtuga. Tugevuseks aga vabadus valida katse läbiviijal (N: mõne erijuhtumi uurimise puhul) ise vajalikke katsetingimusi ning mõõtemetodeid. Antud juhul aga lasub katse läbiviija õlgadele ka mõnevõrra suurem vastutus, kuna katsemetoodika ja katsete tulemuste analüüsi õigsuse eest vastutab nüüd ainuisikuliselt katsemeetodi autor, mitte rahvusvaheliselt aktsepteeritud standard.

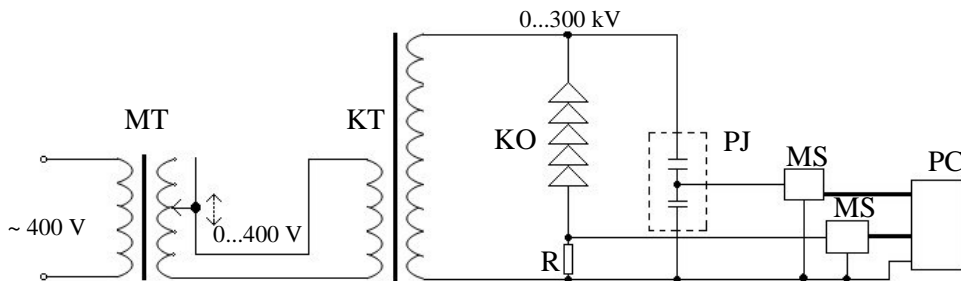
Kuna TTÜ Elektroenergeetika instituudi kõrgepingelabori vahelduvkõrgepinge trafokaskaadi lühisvoolu suurus jääb standardi EVS-EN 60507 [40] kohaselt isolaatorite standardi järgse saastalahenduse uurimiseks liiga väikeseks, tuleb saadud tulemusi juba enne katsete tegemist lugeda ebastandardseteks.

Saadud tulemused ei vasta standarditele, kuid vajalikke järeldusi saab nende alusel siiski teha.

### 5.1 *Katseseadmed*

#### *VAHELDUVKÕRGEPIINGE TRAFOKASKAAD*

Katsete teostamiseks kasutati instituudi kõrgepingelabori vahelduvkõrgepinge trafokaskaadi, mille suurimaks võimalikuks katsepingeks on 300 kV. Trafokaskaadi lühisvool pingel 71 kV on 1 A. Kõrgepinge väärtuste mõõtmisel kasutati pingejagurit (*HighVolt* WMCF 0.1/300) ja mõõteseadet (*HighVolt* MU17) ning lekkevoolude mõõtmiseks kasutati instituudis valmistatud 4  $\Omega$  šunti. Katsete jooksvad pinge- ja voolu hetkväärtused salvestati instituudis komplekteeritud raalil (PC) põhinevale salvestusseadmele. Salvestusseadmel on kaks analoogsisendit pinge maksimaalväärtusega 2 V, ribalaiuse 96kHz ja vertikaalse resolutsiooniga 24 bitti. Minimaalne voolu väärtus, mida mõõte- ja salvestusseadmekomplekt registreerib, on 0,5 mA – seega pingel 71 kV efektiivväärtus (100 kV amplituudväärtus) saab mõõta takistuse suuruseid kuni 200 M $\Omega$ .



Joonis 5.1 Vahelduvkõrgpinge trafokaskaadi ja mõõtesüsteemi põhimõtteskeem.

MT - madalpinge trafo, sujuvalt reguleeritava sekundaarpinge väljavõttega

KT - kõrgpinge trafo

KO - katseobjekt, antud juhul isolaatorid

PJ - pingejagur, mahtvuslik

R - aktiivtakistus, šunt

MS - mõõteseade

PC - raal, andmete salvestus- ja töölusseade

### TERAOOMMEETER

Suuremate takistuste kui 200 MΩ registreerimiseks kasutati teraoommeetrit (TΩ) (Chauvin Arnoux C.A.6547), mille alalispinge testväärtust saab vajadusel muuta vahemikus 0,5–5 kV ning mis suudab mõõta takistuste väärtusi kuni 10 TΩ.

### FOTOAPARAAT

Isolaatorite pinna seisundi ja pinnal toimuvate osalahenduste fotograafiliseks talletamiseks kasutati fotoaparaati CANON 300D.

## 5.2 Mõõtemetodid

### ISOLAATORITE FOTOGRAFEERIMINE

Saastunud isolaatorite fotografeerimine hindamaks isolaatorite saastatust, vananemist, erosiooni, hüdrofoobsust (komposiitisolaatoritel) ja osalahenduste mõju.

### ISOLAATORITE KUIV- JA MÄRGLEKKEVOOLUDE MÕÕTMINE FAASIPINGEL, VÕIMALIKU ÜLELÖÖGI FIKSEERIMINE

Eesmärgiks on trafokaskaadi abil mõõta saastunud isolaatorite kuiv- ja märglekkevoole ning ka võimalikku saastlahendust ehk isolaatori ülelööki. Lekkevoolude suuruste järgi saab hinnata isolaatorite saastatust. Isolaatorid niisutada enne pingestamist nn uduvihma pihustamise teel vihma või kraaniveega (kasutatud vihmavee mahueritakistus oli ca 30 000 Ω·cm, labori kraanivee mahueritakistus on ca 2 800 Ω·cm). Isolaatorid niisutada sellise tasemeni, et saastekiht ei kahjustuks. Enne isolaatori pingestamist oodata ca 2 min, et isolaator jõuaks ühtlaselt niiskuda. Isolaator pingestada 110 kV liinipingega võrgu maksimaalse lubatava pingega faas-maa suhtes  $U_f = 123/\sqrt{3} = 71$  kV. Test

kestab kuiva isolaatori puhul seni, kuni tulemused fikseeritakse ja märja isolaatori puhul seni, kuni isolaator kuivab või lööb üle. Referentsiks määrata ka puhta isolaatori kuiv- ja märglekkevool. Fotografeerida isolaatorite kuivamise protsessi, et toimuvate osalahenduste intensiivsuste järgi hinnata isolaatorite seisukorda.

### *ISOLAATORITE TAKISTUSTE MÕÕTMINE*

Saastunud isolaatoritel mõõta kuiv- ja märgtakistus. Takistuste suuruse järgi saab hinnata isolaatorite saastatust. Takistuste mõõtmiseks kasutatakse teraoommeetrit ( $T\Omega$ ). Isolaatorid niisutatakse enne pingestamist pihustamise teel vihma- või kraaniveega (kasutatud vihmavee mahueritakistus oli ca 30 000  $\Omega\cdot\text{cm}$ , labori kraanivee mahueritakistus on ca 2 800  $\Omega\cdot\text{cm}$ ). Isolaatorit niisutada sellise tasemeni, et saastakiht ei kahjustuks. Enne isolaatori pingestamist oodata ca 2 min, et isolaator jõuaks ühtlaselt niiskuda. Referentsiks määrata ka puhta isolaatori kuiv- ja märgtakistus.

### *ISOLAATORITE LÜHISTAMINE JUHTIVA VEEJOAGA JUGALAHENDUSTE (BIRD STREAMER) MÕÕTMINE*

Lühistada isolaator juhtiva veejoaga, kui isolaatorile on rakendatud suurim lubatav faasipinge 71 kV. Määrata lühistamiseks vajalik vee mahueritakistus, veejoa pikkus, diameeter ja maht. Määrata, kuidas mõjutavad erinevad isolaatorid ja väljajühtlustusrõngaste kasutamine jugalahenduse teket.

### **5.3 Katsetatavad isolaatorid**

	Tootja andmed			
	(CCCP)	(CCCP)	ISOELECTRIC	LAPP
Valmistaja	PC-70E	PC-70E	ISI-ROK	RODURFLEX
Tüüp	Klaas	Klaas	Komposiit	Komposiit
Isolaatorite arv	1	8	1	1
Seelikute arv [tk]	1	8	12 + 11	13
Seeliku(te) diameeter [mm]	255	255	145 + 110	130
Väljajühtlustusrõngaste $\varnothing$ [mm]	-	-	205	351
Isolaatori pikkus [mm]	127	1 016	1 160	1 168
Lekkeraja pikkus [mm]	303	2 424	3 050	2 388
Lühim kaareteepikkus [mm]	250	1 140	850	991
50 Hz ülelöögipinge, kuiv [kV]	70	485	340	380
50 Hz ülelöögipinge, märg [kV]	40	335	265	340
1,2/50 impulsspinge, posit [kV]	100	670	570	620
1,2/50 impulsspinge, negat [kV]	100	695	615	635
Kaal [kg]	3,4	27,2	5,4	4,1

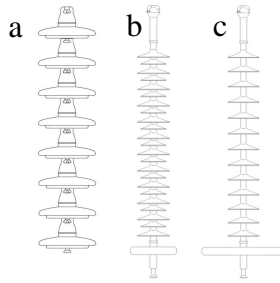
Märkus:

#### ISOELECTRIC

Soovitab komposiitisolaatoritel väljajühtlustuse rõngaid kasutada alates  $U_1 \geq 200$  kV liinipingetel. Kasutatavate rõngaste miinimum diameeter on 20,5 cm. [41]

#### LAPP

Soovitab komposiitisolaatoritel väljajühtlustuse rõngaid kasutada alates  $U_1 \geq 230$  kV liinipingetel. Kasutatavate rõngaste miinimum diameeter on 35,1 cm. [42]



Joonis 5.2 Katsetatavad isolaatorid a) ПС-70Е b) ISOELECTRIC c) LAPP

## 5.4 Mõõtetulemused

### ISOLAATORITE FOTOGRAFEERIMINE

Isolaatorite visuaalse vaatluse tulemusena võib väita, et kõik (olenemata isolaatori tüübist) tugevalt saastunud isolaatorid omavad silmnähtavaid kahjustusi. Komposiitisolaatorite puhul on ekskrementsaaste tulemusena märgata isolaatoril kas heledamaid seelikupinnatsoone, mida põhjustavad peamiselt osalahendused isolaatori pinnal [2], või kohtades, kus saastekiht on paksem, musta värvi söestunud saastet isolaatori pinnal. Viimasel juhul on eeldatavasti tegu jugalahenduse poolt põhjustatud elektrikaare temperatuuri kahjustustega, kus liini avariaautomaatika pole suutnud faasijuhi ja traaversi vahelisele lühisele küllaldase kiirusega reageerida, mille tulemusena on osa isolaatori kattedepinnast söestunud. Elektrikaare põhjustatud temperatuuri kahjustusi komposiitisolaatoritel on täpsemalt käsitletud artiklis [43]. Kahjustunud isolaatori piirkondades on üldjuhul osaliselt halvenenud ka hüdrofoobsus, seda eriti faasijuhile lähemal olevatel seelikutel ja seelikute servadel ning kohtades, kus isolaatori diameeter on väikseim ehk seelikute vahelistel osadel.

LAPP isolaatorite puhul on märgata, et heledamad kahjustunud seelikupinnad asuvad samal joonel, kus jugalahendusest tekkinud lühiskaar on oluliselt väljaühtlustusrõngast kahjustanud. Antud juhul on suure tõenäosusega samuti tegu kaare põhjustatud temperatuurikahjustustega. Kahjustused on laiaulatuslikud, varda kattel on märgata lõhenemisi.

LAPP isolaatorite puhul on hästi näha ka seelikute pinnasaastatust *saasteliik a*), st sadestunud saasta osakesi, mis levivad õhu teel. Osakesed on pinnale seotud polümeeri difusiooni tõttu. Õhuke polümeeride kiht katab saaste, mille tõttu pind jääb vetthülgavaks (hüdrofoobseks).

Klaasisolaatoritel, nagu ka komposiitisolaatoritel, on linnu väljaheitel põhjustanud erosiooni ülemise isolaatori mütsil või siis komposiitisolaatoritel ülemisel armeeringul. Nii klaasisolaatoritel kui ka komposiitisolaatoritel on märgata vee poolt edasi kantud traaversi ja kinnitusdetailide korrosiooni jälgi.

Pildid isolaatoritest on toodud joonistel (Joonis 5.3 kuni Joonis 5.17).

*ISOELECTRIC*



*Joonis 5.3 Seelikupinna saastumine, osa- ja kaarlahenduste kahjustused (heledad ja tumedad laigud). Armeeringu erosioon.*





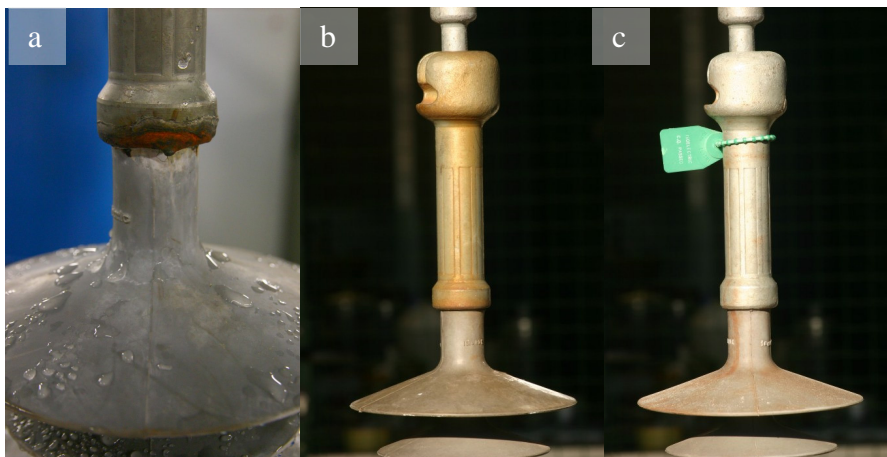
*Joonis 5.4 Seelikupinna saastumine, kahjustumine lahenduste ja osalahenduste tõttu.*



*Joonis 5.5 Väljäähtlustusrõnga kaarekahjustused.*



*Joonis 5.6 Seeliku osaline hüdrofoobsuse kaotus .*



Joonis 5.7 a) erosioon komposiitsolaatori armeeringul , b) armeeringut katab traaversi ja/või kinnitusdetailide – vee poolt edasi kantud korrosiooni saaste, c) suhteliselt puhas armeering.

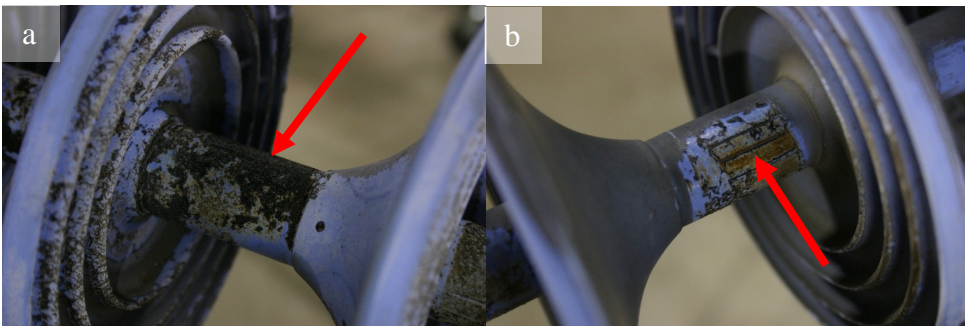
LAPP



Joonis 5.8 Seelikupinna saastumine, kaarekahjustused. Kaare jäljed väljajühtlustusrõngal.



*Joonis 5.9 Seelikupinna saastumine, kaarekahjustused.*



*Joonis 5.10 a) varda katte osaline söestumine, b) katte lõhenemine, kaarekahjustused.*



*Joonis 5.11 a) kaare põhjustatud sulamise jäljed väljäuhtlustusrõngal, b) kaarest kahjustamata isolatori saastumine.*



*Joonis 5.12 Seeliku osaline hüdrofoobsuse halvenemine kahjustunud pinnal. Saastunud pind endiselt hüdrofoobne (tumedam pind).*

## *KLAASISOLAATORID*

### *L131 B*



*Joonis 5.13 Ekskrementide ja traaversi korrosiooni saastejäljed ülemistel isolaatoritel.*



*Joonis 5.14 Ekskrementide ja traaversi (kinnitusdetailide) korrosiooni saastejäljed ülemisel isolaatoril. Ekskrementide põhjustatud erosioon isolaatori mütsil.*

*L017, M38*



*Joonis 5.15 Ekskrementide jäljed ülemistel isolaatoritel. Ekskrementide põhjustatud erosioon ülemise isolaatori mütsil. Faasijuhi kinnitusdetailide korrosioonisaaste jäljed alumisel isolaatoril.*



*Joonis 5.16 Ekskrementide jäljed ülemisel isolaatoril. Ekskrementide põhjustatud erosioon ülemise isolaatori mütsil.*



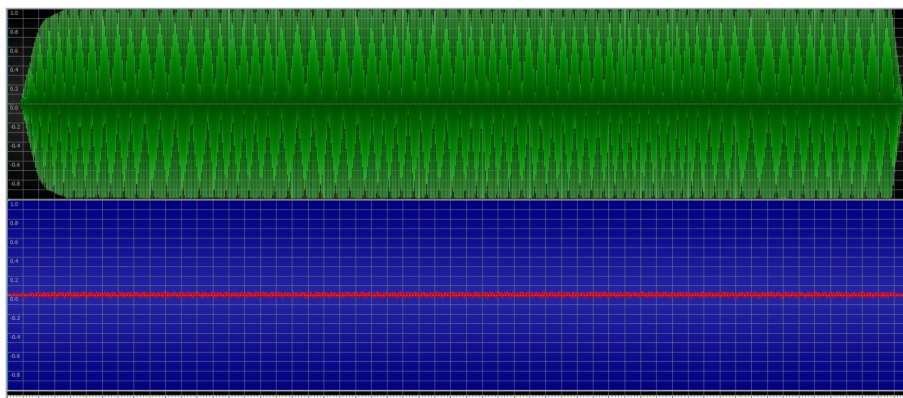
*Joonis 5.17 Faasijuhi kinnitusdetailide või metallse tolmsaaste korrosioonijäljed alumisel isolaatoril.*

### **ISOLAATORITE KUIV- JA MÄRGLEKKEVOOLUDE MÕÕTMINE FAASIPINGEL, VÕIMALIKU ÜLELÖÖGI FIKSEERIMINE**

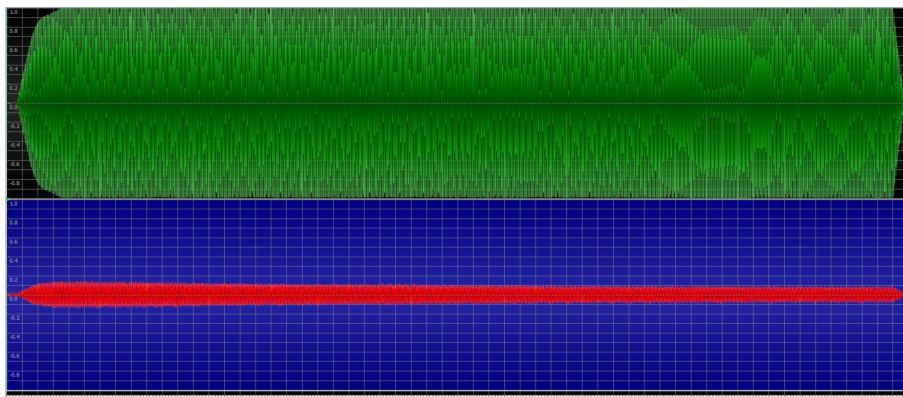
Isolaatorite kuiv- ja märglekkevoolude mõõtmised suurimal lubataval faasipingel trafokaskaadi abil on toodud joonistel (*Joonis 5.18* kuni *Joonis 5.22*). Pinge- ja vooluskaalad on toodud suhtelistes ühikutes, pinge puhul 1 = 101 kV, voolu puhul 1 = 10 mA. Pinge väärtused on joonistatud rohelistena, voolu väärtused punastena. Testide pikkuseks on enamasti ca 10 minutit.

Mõõdetud komposiitisolaatorite kuiv- ja märglekkevoolud on väiksemad kui trafokaskaadi mõõtesüsteemi minimaalsed registreeritavad vooluväärtused, st alla ca 0,5 mA (*Joonis 5.18*).

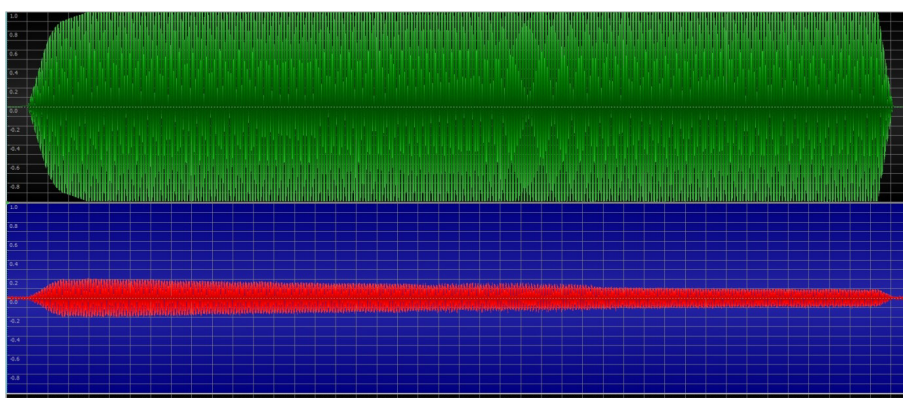
Isolaatorketi kuivlekkevoolud, kus on kaheksa standardklaasisolaatorit ПС-70Е, on *ca* 1 mA. Suurimad märglekkevoolu väärtused puhta keti puhul on *ca* 1,5 mA (niisutades vihmaveega) (Joonis 5.19) ja *ca* 2,0 mA (niisutades kraaniveega) (Joonis 5.20). Saastunud klaasisolaatorite märglekkevoolud ulatusid aga kuni 9,0 ja 9,5 mA (Joonis 5.21 ja Joonis 5.22).



Joonis 5.18 Saastunud LAPP komposiitisolaatori lekkevool, eelniisutatud kraaniveega.

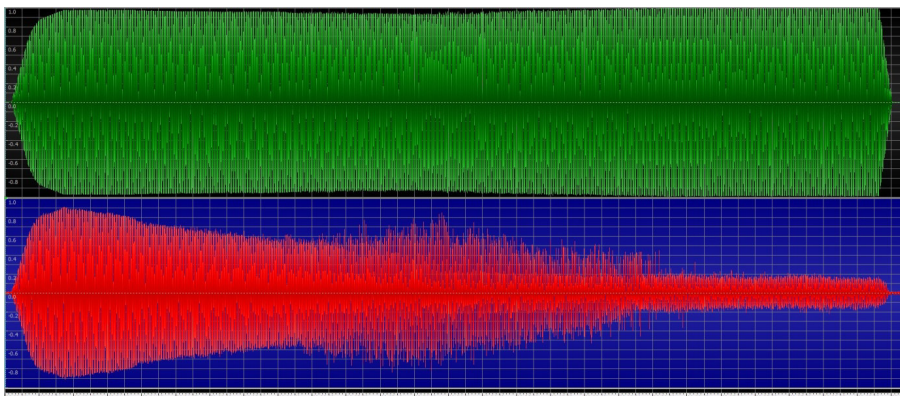


Joonis 5.19 Kaheksa puhta klaasisolaatoriga keti lekkevool, eelniisutatud vihmaveega.

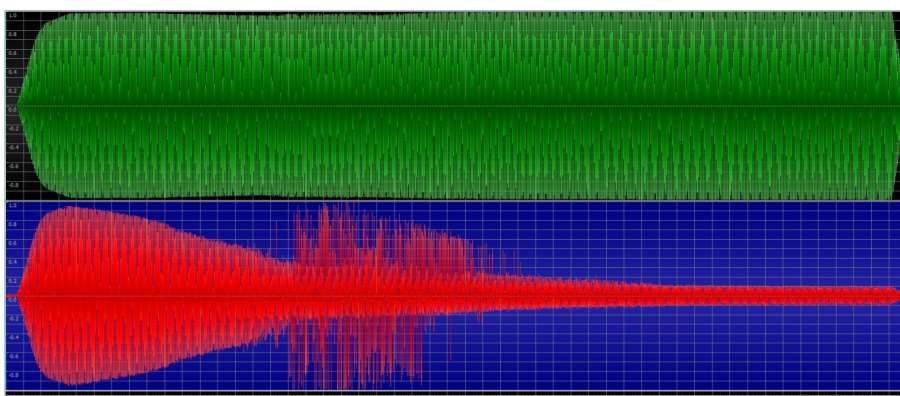


Joonis 5.20 Kaheksa puhta klaasisolaatoriga keti lekkevool, eelniisutatud kraaniveega.





Joonis 5.21 L131B saastunud klaasisolaatoriki lekkevool, eelniisutatud kraaniveega.



Joonis 5.22 L017, M38 saastunud klaasisolaatoriki lekkevool, eelniisutatud kraaniveega.

Ükski katsetatavatest isolaatoritest terves mahus üle ei löönud. Komposiit-isolaatoritel toimusid põhiliselt veepiisakestest põhjustatud ja degradeerunud ehk hüdrofoobsuse kaotanud tsoonide kuivamisel tekkinud osalahendused. Pikemaid roomelahendusi ei esinenud. Saastunud ISOELECTRIC komposiitisolaatorite pinnal toimus oluliselt enam osalahendusi kui saastunud LAPP isolaatoritel. See võib olla ka seotud asjaoluga, et LAPP isolaatorite hüdrofoobsus on säilinud oluliselt paremini ning saaste mõningane difundeerumine veetiljadega läbi polümeeripinna võtab oluliselt kauem aega, kui katsetustel niisutamise ja pingestamise vahele jäi (ca 2 min), lisaks katseage (ca 20 min).

Osalahenduste määrale on oluline mõju ka kasutatavatel väljahtlustusrõngastel. LAPP isolaatorite puhul – väljahtlustusrõngaste kasutamisel – osalahendusi ei registreeritud (testi kestvuseks ca 20 min) (Joonis 5.23). ISOELECTRIC isolaatoritel vähenes oluliselt osalahenduste arv, kuid päris ei lakanud (Joonis 5.24).

Komposiitisolaatorite paremat talumist saastele kujutavad hästi joonised (*Joonis 5.18*) ja (*Joonis 5.22*) – lekkevoolude erinevused saastunud komposiit- ja klaasisolaatorite vahel on märkimisväärsed. Teatavasti on isolaatori ülelöögiks vaja võimalikult suurt lekkevoolu, et arenevat elektrikaart 'elus hoida'. Keraamiliste standard taldrikisolaatorite puhul loetakse selliseks ohtlikuks lekkevoolu väärtuseks *ca* 250 mA [2].

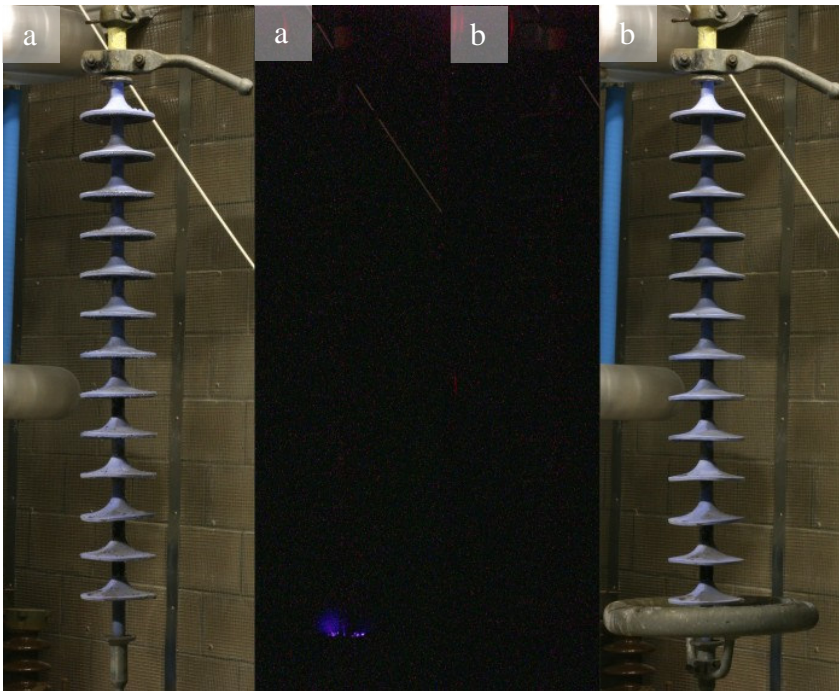
Kuna komposiitisolaatorite lekkevoolud on keraamiliste isolaatorite omadest väiksemad, siis järelikult on väiksemad ka niiskunud isolaatori elektrilised kaod. Kui saastunud klaasisolaatori kuivatab peamiselt tema pinnal voolav lekkevool, siis komposiitisolaatorite pinna kuivatavad üldjuhul tuul ja päike.

Saastunud klaasisolaatoritel esines aga pikemaid roomelahendusi (*Joonis 5.25*) ning ühel juhul ka ketis ühe isolaatori ülelöömist (*Joonis 5.26*). Eelniisutatud saastunud klaasisolaatorite lekkevoolude muutused ajas on toodud joonistel (*Joonis 5.21* ja *Joonis 5.22*). Joonistelt on näha, et alguses, kui isolaatorile on rakendatud faasipinge, hakkab isolaatorite lekkevool vähenema, siis mõneks ajaks suureneb ning siis taas jätkab vähenemist. Lekkevoolude suurenemise põhjuseks on isolaatori kuivamisel tekkivad osalahendused, pikemad roomelahendused ning osade isolaatorite ülelöögid, mis osaliselt lekkerada lühistavad ning seega ka lekkevoole suurendavad. Antud juhtudel osutusid aga lekkevoolu tõusu väärtused liiga väikesteks (ehk kaarega mitte lühistatud saastunud isolaatori takistuse osa oli liiga suur), et tekkinud osalahendused oleksid olnud võimelised arenema tervet isolaatorit lühistavaks lahenduseks.

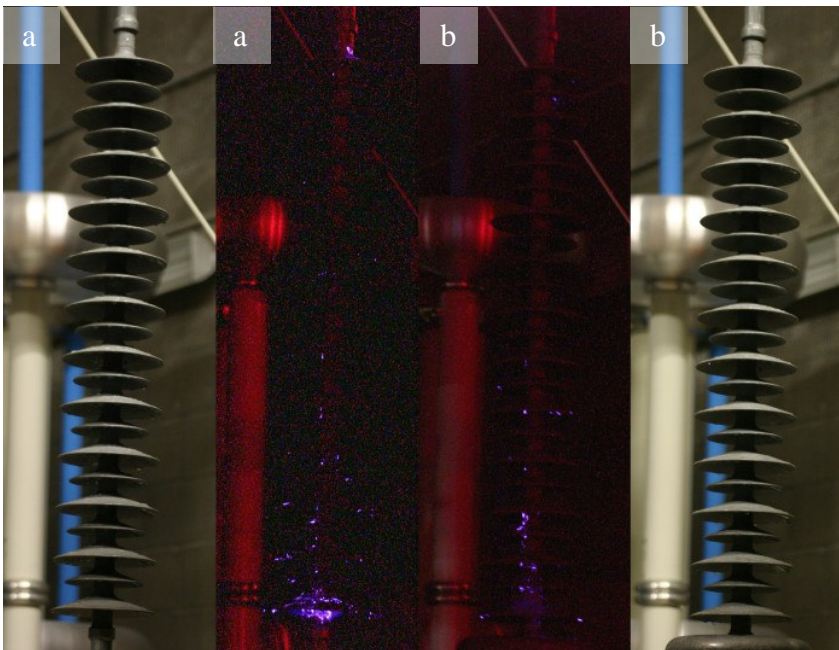
Oluline on siinjuures märkida, et pikemad roomelahendused ja ühel juhul ka ühe isolaatori ülelööök, toimusid põhiliselt just keti puhtaimatel isolaatoritel (*Joonis 5.25* ja *Joonis 5.26*). See on seletatav asjaoluga, et saastunud isolaatorite takistus on väiksem, kui puhaste isolaatorite takistus – seega jaguneb pinge isolaatoritel väga ebahühtlaselt. Suurim pingelang jääb isolaatorile, mille takistus on suurim. Kuna suurem pingelang tähendab ka suuremaid võimsusi, siis vähem saastunud isolaator kuivab enam saastunud isolaatoritest kiiremini, mille tulemusena isolaatori takistus ja pingelang suureneb veelgi ning kui pinge isolaatoril kasvab suuremaks kui isolaatorile ette on nähtud, toimub ülelööök. Osalahenduste või ühe isolaatori ülelöögi edasiseks arenemiseks tervet ketti hõlmavaks ülelöögiks peab lekkevoolu suurus olema piisav, et kaar ei kustuks. Antud mõõtmistel oli suurimaks lekkevoolu tipuväärtuseks *ca* 13 mA, mis on aga oluliselt väiksem väärtus, kui ühe keraamilise standard taldrikisolaatori saastlahenduseks vajalik on – *ca* 250 mA [2]. Rääkimata terve isolaatorketi ülelöömisest, mis vajaks saastlahenduse tekkeks valemi (3.3) [31] alusel lekkevoolu suurust *ca* 1 655 mA.

(3.3)

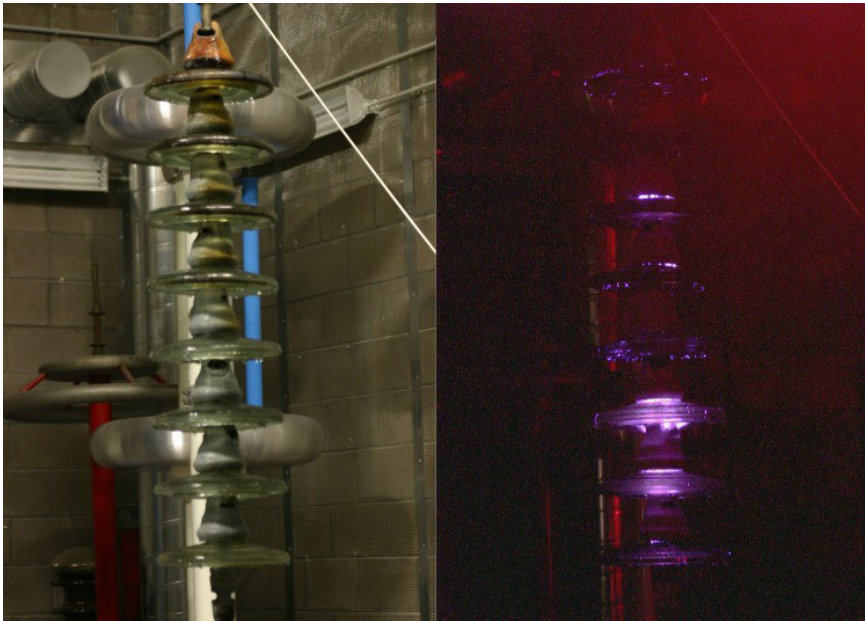
$$I_{\max} = \left( \frac{L_s}{U_l \cdot 15,32} \right)^2 = \left( \frac{2424}{123 \cdot 15,32} \right)^2 \approx 1655 \text{ (mA)}$$



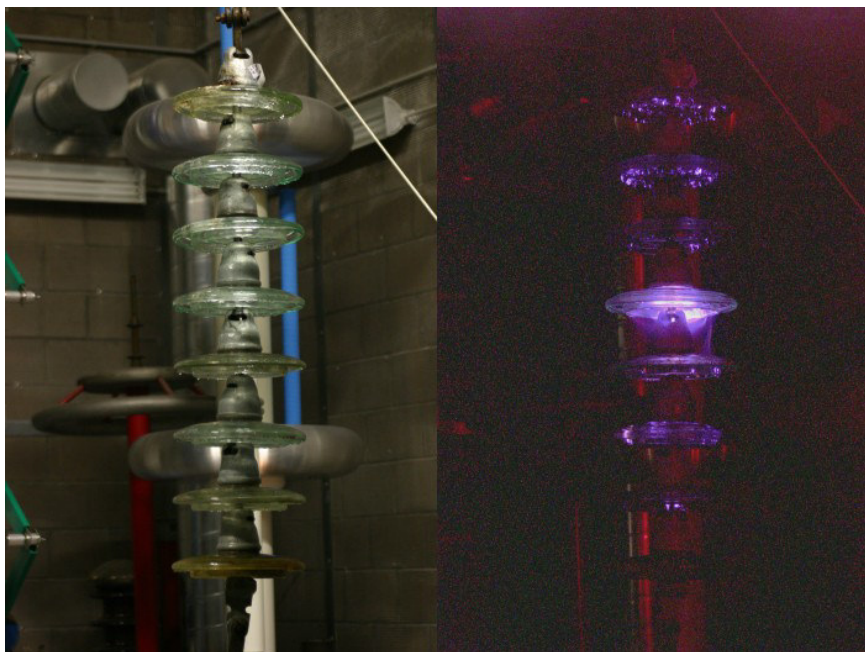
*Joonis 5.23 Osalahendused saastunud komposiitisolaatoril LAPP, eelniisutatud kraaniveega. a) väljäuhtlustusrõngata, b) väljäuhtlustusrõngaga.*



*Joonis 5.24 Osalahendused saastunud komposiitisolaatoril ISOELECTRIC, eelniisutatud kraaniveega. a) väljäuhtlustusrõngata, b) väljäuhtlustusrõngaga.*



*Joonis 5.25 Osalahendused niiskunud saaste kuivamisel, L131B klaasisolaatorkett, eelniisutatud kraaniveega.*



*Joonis 5.26 Osalahendused, nr 5 isolaatoril ülelöögid, niiskunud saaste kuivamisel, L017, M38 klaasisolaatorkett, eelniisutatud kraaniveega.*

Mainimist väärrib ka fakt, et iga järgneva korduskatsega vähenesid mõõdetavad lekkevoolude väärtused ning ka osalahendused isolaatori pinnal. Seega, isegi ettevaatlikul niisutamisel, kui isolaatorilt ei langenud olulisel määral saaste-seguseid juhtivaid veetilgakesi, vaid pinna kuivatasid lekkevool ja osa-lahendused, oli isolaatorile pihustatud veel oluline lekkevoolu vähendav (isolaatorit puhastav) toime. Seega, ka väga vähesel sademehulgal on tugev lekkevoolu vähendav toime ekskrementide poolt põhjustatud isolaatori saastele. Sellest võib järeldada, et suurimad lekkevoolu algväärtused annab suure tõenäosusega isolaatori pinnale kondenseerunud vesi, mitte sademed.

### ISOLAATORITE TAKISTUSTE MÕÕTMINE

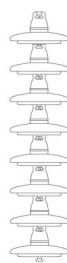
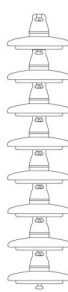
Isolaatorite takistusi mõõdeti teraommeetriga. Mõõdetud takistuste väärtused on kõnekad ning näitavad komposiitisolaatorite paremaid saastetaluvustulemusi. Märgunud saastunud komposiitisolaatorite takistused on suurusjärkude võrra suuremad kui märgunud saastunud klaasisolaatoritel (*Tabel 5.1*).

Klaasisolaatorite puhul mõõdeti ka erinevate isolaatorite märgtakistused ketis. Mõõdetud takistuste alusel arvutati pingejagunemised isolaatoritel, isolaatorite mahtuvuslikku komponenti pingejagunemistel antud juhul ei arvestatud. Sellele vaatamata on saadud tulemused sobilikud võrdlemaks neid trafokaskaadiga teostatud katsete tulemustega. Isolaatorketi L017, M38 ja L131B arvutatud pingejagunemistel ja fotografeeritud (*Joonis 5.25* ning *Joonis 5.26*) osalahenduse määrade vahel on märgata ilmseid seoseid. Suurima takistuse ja pingelanguga (ehk puhtaimatel) isolaatoritel toimub enim lahendus.

*Tabel 5.1 Mõningate saastunud isolaatorite takistused (märgutatud vihmaveega).*

Isolaatorid	$R_{kuiv} [\Omega]$	$R_{märg} [\Omega]$	Märkused
LAPP L178, M5 (1)	$>10 \cdot 10^{12}$	$>10 \cdot 10^{12}$	Suurima kaare kahjustusega, saastunud
LAPP L178, M5 (2)	$>10 \cdot 10^{12}$	$60 \cdot 10^{11}$	Kaare kahjustusega, saastunud
LAPP L178, M4	$>10 \cdot 10^{12}$	$30 \cdot 10^{11}$	Ülalt traaversi roostene, saastunud
ISOELECTRIC 03	$>10 \cdot 10^{12}$	$70 \cdot 10^{11}$	Armeeringul erosioon, saastunud
ISOELECTRIC 01	$>10 \cdot 10^{12}$	$30 \cdot 10^{11}$	Ülalt traaversi roostene, saastunud
ISOELECTRIC 02	$15 \cdot 10^{11}$	$40 \cdot 10^{10}$	Armeeringul erosioon, saastunud
Isolaatorkett	$50 \cdot 10^{11}$	$66 \cdot 10^{08}$	Puhas
Isolaatorkett L131B	$40 \cdot 10^{11}$	$22 \cdot 10^{06}$	Ülalt traaversi roostene, saastunud
Isolaatorkett L017	$30 \cdot 10^{11}$	$15 \cdot 10^{06}$	Ülalt tugevalt väljaheidetega saastunud

*Tabel 5.2 Mõõdetud takistused ning arvutatud pingejagunemised isolaatoritel.*

	Isolaatorkett L017, M38				Isolaatorkett L131B		
	Isol [nr]	R [MΩ]	U [kV]		Isol [nr]	R [MΩ]	U [kV]
	8	1,1	5,3		8	2,4	7,7
	7	2,2	10,7		7	1,6	5,0
	6	2,8	13,6		6	1,9	6,3
	5	3,4	16,5		5	2,7	8,7
	4	1,2	5,8		4	2,3	7,4
	3	2,4	11,7		3	5,2	16,9
	2	1,0	4,9		2	4,0	12,8
	1	0,5	2,4		1	1,9	6,2

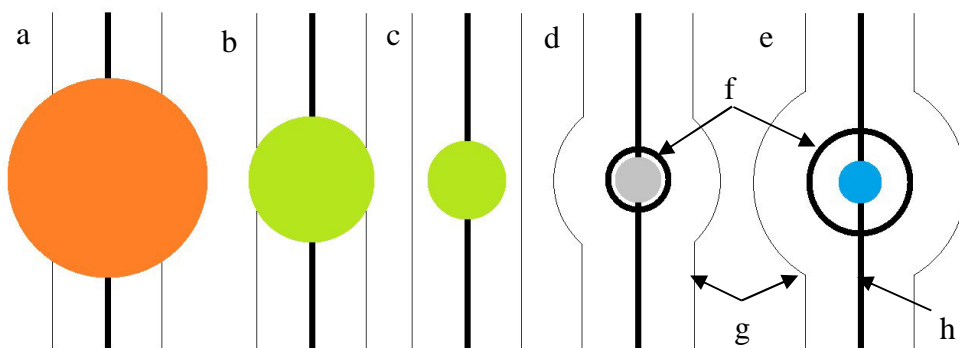
### *ISOLAATORITE LÜHISTAMINE JUHTIVA VEEJOAGA, JUGALAHENDUSE (BIRD STREAMER) MATKIMINE*

Laboris õnnestus matkida jugalahendust traaversi ja faasijuhi ning traaversi ja isolaatori väljäuhtlustusrõnga vahel (Joonis 5.27), kasutades 'linnuna' pritsi, mis pritsis 8 mm diameetrisest düüsis ühtlase joana soolasegust vett (takistusega pikkusühiku kohta *ca* 20 k $\Omega$ /m, referentsiks on võetud standardis IEC 60815-1 toodud väärtus [8]), faasipingel 71 kV. Katsetustel selgus, et vabalt langeva veesamba puhul toimus jugalahendus kuni 0,6 m veesambaga. Pikematel kui 0,6 m jugalahendustel muutub tähtsaks veesamba katkematus ehk veesamba algusosa laiali hajumine, ühtlase joa erinevateks tilgakesteks lagunemine. Vedelikusamba ühtsust mõjutavad pritsi düüsi diameeter, elektriväli, vedeliku viskoossus, õhutakistus ja gravitatsioon. Kuna laboris oli kasutusel vesi, mille viskoossuse muutmine ja mõõtmine osutus tülikaks, siis selleks, et saada pikemat ja ühtlasemat sammast, tõsteti pritsi survet. Suurema surve puhul sai tekitada ka üle 0,6 m pikkuseid jugalahendusi. Vähim kogus soolasegust vett, mida oli vaja 1 m jugalahenduse tekkeks, oli *ca* 80 ml.



*Joonis 5.27 Jugalahendus pritsi – faasijuhi ja pritsi – väljäuhtlustusrõnga vahel.*

Siit võib järeldada, et jugalahenduse toimumine pole lihtsasti aset leidev protsess, vaid selleks peavad kokku langema mitmed soodsad asjaolud. Ekskrementidjuga peab olema piisavalt juhtiv, võimalikult suure diameetri, viskoossuse, surve ja mahuga ning mööduma võimalikult lähedalt faasijuhist ja/või väljäuhtlustusrõngast. Täpsemaid parameetreid on siinkohal raske ära tuua, kuna uuringu raames ei teostatud lindude ekskrementide ja ekskrementide väljastamise uurimisi ning ka vastavat teemat puudutavat kirjandust ei õnnestunud autoril leida.



*Joonis 5.28 Erinevate diameetritega isolaatorid, isolaatori kaitse, väljäuhtlustusrõngaste mõju, faasipingel lahenduskaugus  $h_{50\%}$  metalsetest osadest (faasijuht, väljäuhtlustusrõngad). (rippisolaatorite | vertikaalasetus, pealtvaade)*

*a) isolaatori kate TYCOELECTRONICS  $\phi$  650*

*b) isolaator SEDIVER - NI60D  $\phi$  410*

*c) isolaator IIC-70E  $\phi$  255*

*d) isolaator ISOELECTRIC  $\phi$  145, väljäuhtlustusrõngaga  $\phi$  205*

*e) isolaator LAPP  $\phi$  130, väljäuhtlustusrõngaga  $\phi$  351*

*f) väljäuhtlustusrõngad*

*g) faasipingel lahenduskaugus  $h_{50\%}$  metalsetest maandatud osadest*

*h) faasijuht*

Et uurida isolaatorite väljäuhtlustusrõngaste mõju jugalahendusele, teadmata lindude ekskrementide jugade täpsemaid andmeid, on kasutatud nn võimalikku halvima juhtumi stsenaariumit, st lahenduskaugus  $h_{50\%}$  faasijuhist ja väljäuhtlustusrõngast on määratud maandatud metalltraadi, mis on asetatud faasijuhiga risti ja isolaatoriga paralleelselt, abil. Lahenduskauguse  $h_{50\%}$  väärtuseks faasipingel 71 kV, normaalrõhul ja -temperatuuril on ca 17 cm metalset osast (faasijuhist, väljäuhtlustusrõngast). Väljäuhtlustusrõngaste mõju ohtliku pindala (nn ülelöögi pindala) suurendamisel on näha joonisel (Joonis 5.28). Ülelöögi pindala jääb joonisel (Joonis 5.28, g) toodud peenikeste mustade joonte vahele. Jooniselt on näha, et väljäuhtlustusrõngaste kasutamine (Joonis 5.28, f) suurendab ohtlikku pindala (võrdluseks sobivad isolaatorid c ja e) ehk jugalahenduse toimumise tõenäosust. Mida suurem on väljäuhtlustusrõnga diameeter, seda suurema tõenäosusega toimub jugalahendus, kui lind isolaatori kohal traaversil ekskrementide väljastab (rippisolaatorite | vertikaalasetuse

korral). Kuna 110 kV liinipingel pole isolaatoritel väljaühtlustusrõngaste kasutamine kohustuslik (seda ei nõua ka isolaatorite tootjad), siis antud juhul tuleks lindude poolt põhjustatud rikete vähendamiseks loobuda väljaühtlustusrõngaste kasutamisest.

Rippisolaatorite | vertikaalasetuse korral traaversil on jugalahenduse tekke ärahoidmisel isolaatori olulisimaks parameetriks seeliku või lisakatte diameeter (Joonis 5.28). Mida suurem on diameeter, seda väiksem on üelöögi tõenäosus. Isolaatori või katte diameeter peab jugalahenduse vältimiseks olema piisavalt suur, et jääda ette väljaheitejoale – katkestamaks faasijuhile ohtlikult lähedale suunduvat väljaheitejuga.

## **5.5 Mõõtmistulemuste järelused**

Järgnevalt on välja toodud olulisemad järelused laboris tehtud katsete tulemuste kohta.

- Laboris läbi viidud katsed kinnitavad, et määramata rikete peamiseks põhjustajateks on suure tõenäosusega lindude väljaheitejoa poolt tekitatud mööduvad lühised isolaatoritel. Jugalahenduse tekkimine aga pole sugugi lihtne protsess, selle toimumiseks on vajalik, et langeksid kokku mitmed soodsad asjaolud.
- Linnuväljaheidetega tugevalt saastunud isolaatoritel laboris peale niisutamist ja pingestamist faasipingele üelööke ei toimunud. Toimusid küll osalahendused ning ühel klaastaldrikisolaatorketil ka ühe isolaatori üelööke ketis, kuid terve isolaatori või isolaatorketi üelööke ei toimunud, kuna mõõdetud lekkevoolude väärtused polnud saastlahenduskaare arenemiseks piisavalt suured.
- Suurimad linnu ekskrementsaaste lekkevoolu algväärtused annab suure tõenäosusega isolaatori pinnale kuivanud ekskrementidele kondenseerunud vesi (nn hommikune kaste), mitte sademed, sest juba vähestel sademetel on oluline puhastav toime isolaatori pinnale (ekskrementsaaste lahustuvate osade pinnalt ära kandmisele).
- Katsetustel ei teostatud keerukuse ja aja nappuse tõttu nn kombineeritud linnusaaste katseid, kus juba saastunud isolaatorist oleks mööda suunatud ka juhtiv juga. Võib aga eeldada, et kombineeritud saastel on üelööke soodustav mõju.
- Katsete tulemused näitavad, et väljaühtlustusrõngaste kasutamine vähendab oluliselt osalahenduste arvu niiskunud saastunud isolaatoritel. Seega on väljaühtlustusrõngastel komposiitisolaatorite elueale pikendav mõju.
- Rippisolaatorite | vertikaalasetuse korral traaversil on väljaühtlustusrõngastel jugalahenduse toimumise tõenäosust suurendav mõju. Mida



suurema diameetriga väljaühtlustusrõngas, seda suurema tõenäosusega saab jugalahendus toimuda.

- Jugalahenduste põhjustatud elektrikaared võivad termiliselt kahjustada komposiitisolaatorite katematerjale.
- Traaversi või isolaatori ja faasijuhi kinnitusdetailide korrosioonisaaste isolaatoril, (mida esines pea kõikidel katsetatavatel isolaatoritel ja mida kannab isolaatorile edasi põhiliselt vesi ning elektriväli) mõjutab pingejagunemisi ning elektriväljakuju ühtlust isolaatoril. Mitteühtlane elektriväljakuju võib põhjustada osalahendusi isolaatoritel. Osalahendustel on halvendav mõju komposiitisolaatorite elueale.
- Sarnaselt eelnevale mõjutavad pingejagunemist ning elektriväljakuju isolaatoril ka ekskrement- ja muu saaste ning ka isolaatoripinna kahjustused.

## 6 MÄÄRAMATA RIKETE VÄHENDAMISE ABINÕUD

Nagu eelnevatest peatükkidest järeldub, on Eesti 110 kV elektrivõrgus toimuvate suviste määramata rikete peamiseks põhjustajateks suurte rändlindude (valged toonekured) väljaheidete poolt tekitatud isolaatorite saastlahendused. Kusjuures lindude väljaheidet võivad põhjustada kahte eritüübilist saastlahendust.

Esimesel – *saastumisviis b) juhtiv vedelik* – puhul toimub pigem nn traditsiooniline isolaatori saastamine ehk isolaatori pinnale sadestuvad väljaheidet võivad koos muu saaste ning niiskuse mõjul põhjustada isolaatoril ülelööki.

Teisel – *saastumisviis b) väljaheite juga* – puhul toimub isolaatori ülelööki (lühistamine) elektrit hästi juhtiva linnu väljaheitejoa tõttu.

Süsteemioperaator on osadel liinidel (ca 12% kogu võrgust) klaasisolaatorite asemele paigaldanud komposiitisolaatoreid, mis peaksid vähemalt uena olema paremate omadustega erineva nn traditsioonilise saaste vastu kui klaasisolaatorid, kuid soovitud riketearvu vähenemist pole aga täheldatud (*Tabel 4.1*). Järelkult domineerib rikete toimumisel suure tõenäosusega *saasteviis b) väljaheitejuga* ehk isolaatori lühistamine linnuväljaheitejoaga.

Kui esimesel juhul mõjutavad saastlahenduse pinget suurel määral isolaatori enda parameetrid, siis teisel juhul mõjutavad saastlahenduse võimalikku teket peamiselt isolaatorite asetused liinimastil, masti ning traaversi konstruktsioonid ja linde eemal hoidvad seadeldised. Isolaatori enda parameetrite (peamiselt seeliku diameetri) mõju on vähene või pea olematu.

Olenemata sellest, millise saasteviisiga on lindude puhul tegu, on probleemi tuumaks lindude eemal hoidmine elektriliini mastidest, traaversitest ja isolaatoritest. Oluline on tekitada olukord, kus linnud ei saa või ei taha liinimastidele seisma jääda (hakata sinna ka pesa punuma) või kui see pole välditav, siis vähendada lindude poolt põhjustatud probleeme.

Kuna linnud vajavad mastil seismiseks ja ringi liikumiseks vaba horisontaalset pinda, siis esmajärguline on vähendada selliste vabade ja horisontaalsete pindade määra, eriti nendes kohtades, kus linnu väljaheidet võivad endas potentsiaalselt saastlahendusohu kätkeada. Kuna vaba horisontaalset pinda pakub enamasti traavers, millele isolaator kinnitub, on määrava tähtsusega just traaversi parameetrid (kui suur see mõõtmel on ja kas seda üldse olemas on). Teiseks oluliseks parameetriks on isolaatorite asetused liinimastidel (millise asetuse puhul on jugalahenduse oht väikseim). Seetõttu on soovitusel lindude saastlahenduste vältimiseks toodud traaversi olemasolu või mitteolemasolu ja vastavalt erinevate isolaatorasetuste puhul eraldi. Selline lähenemine on oma iseloomult põhimõtteliselt uut laadi, kuna kirjanduses käsitletakse vaid selliseid linde eemal hoidvaid seadeldisi, mis on mõeldud juba olemas olevatele liinimastidele (traaversiga mastid). Uudse võimaliku lahendusena nn määramata rikete vähendamiseks pakub töö autor välja uut tüüpi liinimasti (traaversita mast) koos vastavate isolaatorite asetustega.

## TRAAVERSIGA ELEKTRILIINIMASTID

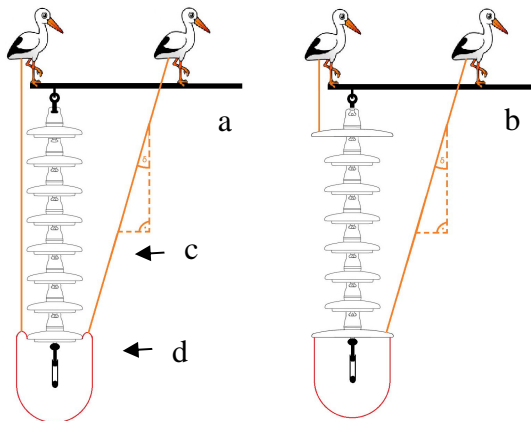
### ISOLAATORITE | VERTIKAALASETUS TRAAVERSIGA MASTIDEL

Antud mastitüübid ja isolaatorite asetused on Eestis enim levinud, mistõttu käsitletakse seda punkti ka põhjalikumalt, tuues eraldi välja, kuidas vähendada jugalahenduste ohtu isolaatorite parameetrite abil ja kuidas hoida linde eemal ohtlikult traaversilõigult.

### JUGALAHENDUSTE VÄHENDAMISE ABINÕUD ISOLAATORI PARAMEETREID MUUTES

Rippisolaatorite | vertikaalasetuse korral on jugalahenduse tekke ärahoidmisel isolaatori olulisimaks parameetriks seeliku diameeter. Mida suurem on isolaatori diameeter, seda väiksem on ülelöögi tõenäosus. Isolaatori diameeter peab jugalahenduse vältimiseks olema piisavalt suur, et jääda ette väljaheitejoale ja katkestada faasijuhile ohtlikult lähedale suunduvat väljaheitejuga.

Linnu pärak, kust väljaheitejuga väljub, asub kindlal (valgel toonekurel ca 5–6 cm) kaugusel jalgadest – seega, kui lind seisaks jalgadega täpselt isolaatori tsentris, siis ei tohiks kõikide uuritavate isolaatorite puhul jugalahendust toimuda? Tegelikuses aga mõjutavad lahenduse teket veel kaks olulist tegurit: a) linnu liikumisvabadus traaversil (ehk traaversi vaba pinna suurus) ja b) väljaheitejoa suund (väljaheide ei pruugi väljuda ning langeda otsejoones maa suunas, vaid võib tuule või linnu pära asendi tõttu liikuda osaliselt ka külgsuunaliselt (Joonis 6.1, c). Joonis on muidugi lihtsustatud, tegelikus elus pulksirgeid ekskrementide jugasid linnud ei väljasta. Joonisel on langemisnurgaks valitud parema näitlikustamise tõttu suhteliselt suur nurk,  $\delta=15^\circ$ .



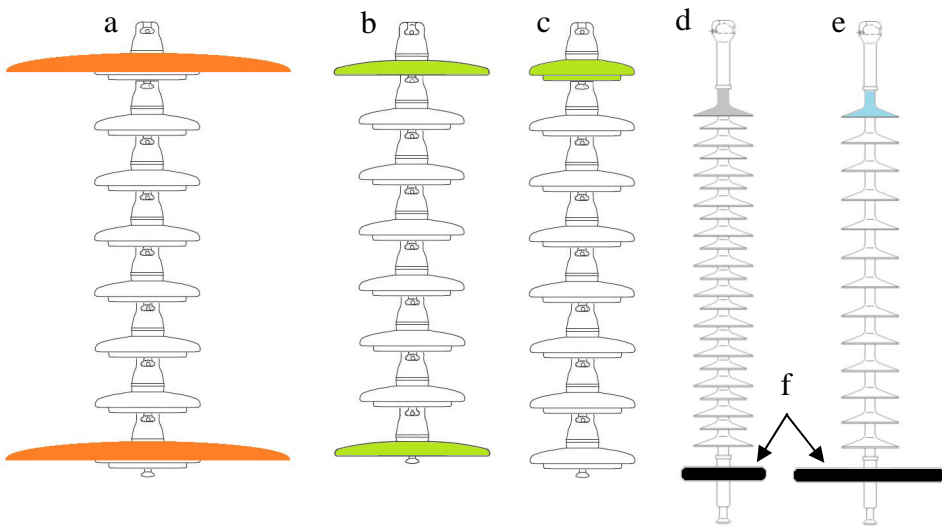
Joonis 6.1 Isolaatorite diameetrite mõju jugalahendusele (rippisolaatorite | vertikaalasetuse korral):

- isolaatorkett,
- isolaatorkett, kus ülemine ja alumine isolaator on asendatud lametaldrikisolaatoritega (joad katkestatakse),
- väljaheitejuga,
- faasipingel lahenduskaugus  $h_{50\%}$  metalsetest maandatud osadest.

Isolaator või isolaatorkett ei pea olema terves ulatuses suurema diameetriga, vaid piisab, kui isolaatorketil vahetada välja ülemine, alumine või mõlemad standardsed klaastaldrikisolaatorid suurema diameetriga lametaldrikisolaatorite vastu (Joonis 6.1, b ja Joonis 6.2, b). Soovitav on aga välja vahetada mõlemad, sest ülemine isolaator kaitseb ühtlasi ka alumisi isolaatoreid saaste eest (ise seejuures rohkem saastudes) ning alumine isolaator pakub lisakaitset osaliselt külgsuunas liikuva joa eest (Joonis 6.1, c).

Suurema diameetriga lametaldrikisolaatorite ketis kasutamise eeliseks on, et need kaitsevad ülejäänud ketti ekskrementidega saastumisest, on visuaalselt transparentsed ja hinnalt odavad. Miinuseks on see, et lametaldrikisolaatorid saastuvad seetõttu tugevalt ning saastumine vähendab mõningal määral terve isolaatorketi saastlahenduspinget. Ekskrementide saaste võib isolaatorimütsil ka erosiooni põhjustada (Joonis 5.7 ja Joonis 5.16). Probleeme võib tekkida ka pakutavate lame- ja standardtaldrikisolaatorite soklite ja tikkude mõõtmetega, nende omavahelise sobivusega.

Jugalahenduste toimumise tõenäosust saab vähendada, paigaldades isolaatoritele selleks ettenähtud spetsiaalsed täiendavad, mittejuhtivast materjalist valmistatud katted, millede diameetrid jäävad üldjuhul vahemikku 450–650 mm (Joonis 6.2, a).



Joonis 6.2 Erinevate diameetritega isolaatorid, isolaatori kaitse, väljäuhtlustusrõngad (rippisolaatorite | vertikaalasetus, külgsuuna):

- a) ülemisel ja alumisel isolaatoril linnukaitse TYCOELECTRONICS  $\phi$  650
- b) ülemine ja alumine isolaator SEDIVER - N160D  $\phi$  410
- c) isolaatorkett ПС-70E  $\phi$  255
- d) isolaator ISOELECTRIC  $\phi$  145, väljäuhtlustusrõngaga  $\phi$  205
- e) isolaator LAPP  $\phi$  130, väljäuhtlustusrõngaga  $\phi$  351
- f) väljäuhtlustusrõngad

Spetsiaalsete katete plussiks on see, et need kaitsevad tervet isolaatorketti saastumise eest ehk katted saastuvad tugevalt, kuid isolaatorid jäävad puhtaks, mistõttu ei vähene ka isolaatorketti saastlahenduspinge. Miinusena võib esile tuua nn tormikindlust ehk kuidas suhteliselt suure pinnaga kate tugevatele tuultele pikema aja jooksul vastu peab. Katte suur horisontaalne pind võib probleemiks kujuneda, võimaldades lindudele lisa liikumisvabadust ja seisukohti isolaatorite kohal. Muidugi ei saa mainimata jätta visuaalseid esteetilisi probleeme ning ka suhteliselt kõrget maksumust.



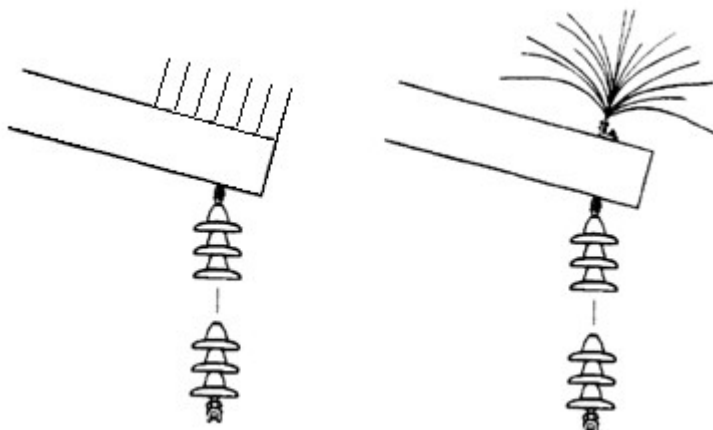
Joonis 6.3 Spetsiaalne kate vähendamaks isolaatori saastumist linnuväljaheidete poolt [44]

Rippisolaatorite vertikaalasetuse puhul traaversiga mastil suurendab väljaühtlustusrõngaste kasutamine väljaheitejoa poolt põhjustatud rikete toimumise tõenäosust.

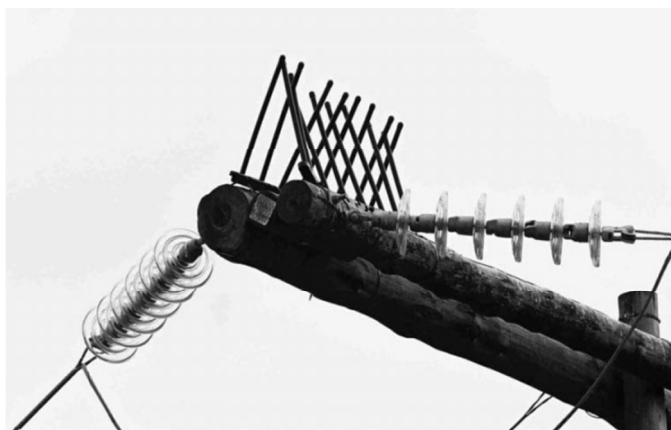
#### *JUGALAHENDUSTE VÄHENDAMISE ABINÕUD, PIIRATES LINNU LIIKUMISE VABADUST TRAAVERSIL*

Linnu liikumisvabadust traaversil (isolaatori kinnituspunkti lähedal) saab piirata selleks ettenähtud nn *kammi* või *luua* abiga (Joonis 6.4). Tuleb meeles pidada, et kammi pikkus või luua ulatus oleksid isolaatori suhtes ülekattega, et vähendada külgsuunas liikuva joa saastlahenduse tõenäosust. 'Rusikareeglina' võiks nn kammi või luua ülekate ulatuda vähemalt *ca* 400 mm isolaatori kinnituskoha punktist. Vähem oluline pole ka traaversi laius (pealtvaates), seda eriti nn kammi puhul. Tuleb hoolitseda ka selle eest, et kammi kõrvale ei jääks liigset vaba pinda. Traaversi laius isolaatori kohal (pealtvaates) on kandemastidel üldjuhul *ca* 100 mm – seega võiks ühe kammi asemel kasutada kahte kammi, mis kinnituvad traaversi äärtele ning asetsevad teineteise suhtes ka kaldu (Joonis 6.5). Kammipiide pikkuseks on üldjuhul *ca* 400 mm ja ühe kammi piide-

vaheliseks vahekauguseks ca 100 mm. Kammipiid peavad olema pikad seetõttu, et eemal hoida suuri ja pikajalgseid linde (nagu valged toonekured). Kirjandusest leiduva info alusel on selliste kammide ja luudade kasutamine olulisel määral aidanud vähendada lindude poolt põhjustatud rikete arvu.



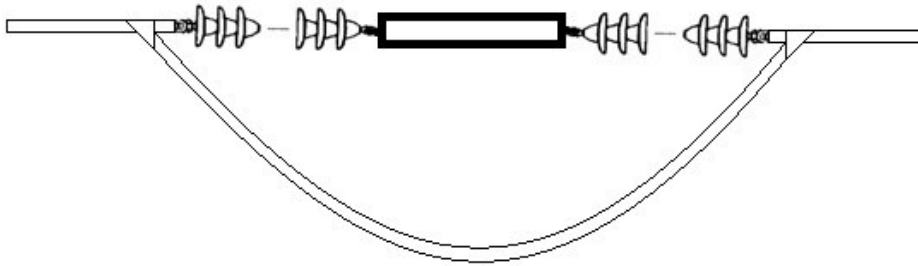
*Joonis 6.4 Linnu liikumisvabadust piirav nn kamm ja luud [29]*



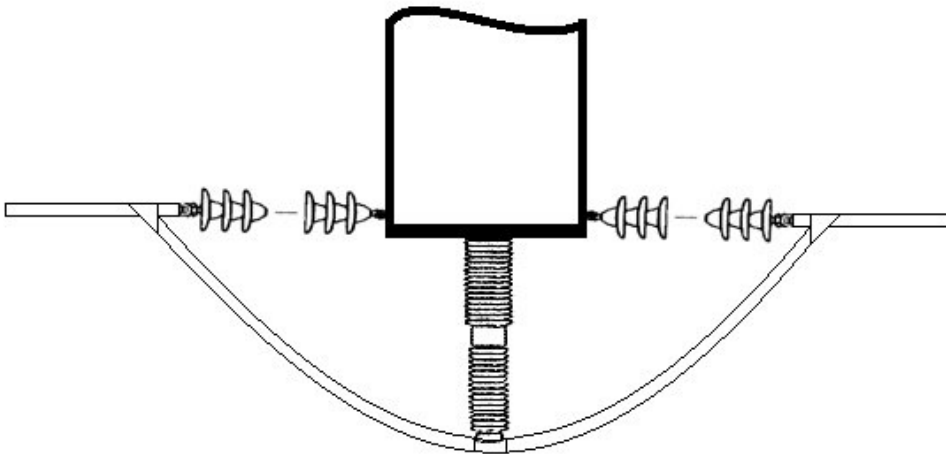
*Joonis 6.5 Linnu liikumisvabadust piiravate nn kammide õige paigutus [45].*

#### *ISOLAATORITE – HORISONTAALASETUS TRAAVERSIGA MASTIDEL*

Isolaatorite – horisontaalasetuse puhul traaversiga mastil on linnuväljaheitejoa saaste puhul põhiprobleemiks traaversi (kuhu linnud võivad seista või pesa teha) all vabalt ripuvad faasijuhtme loogad ankru- ja lõpumastidel (*Joonis 6.5* ja *Joonis 6.6*). Selle probleemi võib lahendada samuti nn kammide ja luudade meetodiga, alternatiivseks võimaluseks on aga tõsta tugiisolaatorite abil faasijuhtme loogad traaversiga samale tasapinnale (*Joonis 6.7*), et need ei jääks ette linnu võimalikule väljaheitejoale.



*Joonis 6.6 Ankrumasti traaversi all vabalt rippuvad faasijuhtme loogad (külgsvaade).*

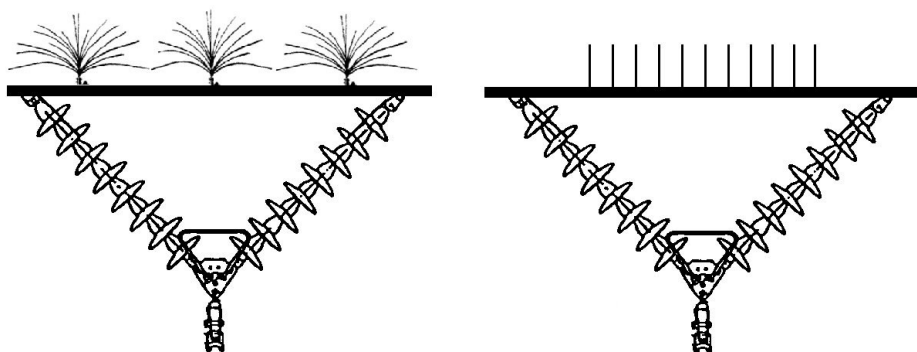


*Joonis 6.7 Ankrumasti faasijuhtme look tõstetud tugiisolaatori abil traaversiga samale tasapinnale (pealtvaade).*

Isolaatorite — horisontaalasetuse puhul ei suurenda väljaühtlustusrõngaste kasutamise väljaheitejoo poolt põhjustatud rikete toimumise tõenäosust, kuna rõngad asuvad traaversitega samal tasapinnal.

#### **ISOLAATORITE V ASETUS TRAAVERSIGA MASTIDEL**

Isolaatorite V asetuse puhul (traaversi olemasolul) on tegu linnu väljaheidete poolt põhjustatud saastlahenduste mõistes ühe rikkealtima asetusega, mis tuleneb sellest, et faasijuhi ja traaversi vahel pole mingisugust tõket väljaheitejoo tõkestamiseks ning seetõttu on ohtlik ülelöögitsoon suurim, võrreldes teiste asetustega traaversiga mastide puhul. Isolaatorite omaduste muutmine antud juhul tulemusi ei anna. Tulemusi võib anda faasijuhi katmine isoleeriva materjaliga, mille paigaldamine aga on problemaatiline faasijuhi liikumise ja faasijuhti hoidvate metallkonstruktsioonide suuruse tõttu. Kõige lihtsamaks ning piisavalt mõjukaks rikete vähendamise abinõuks osutub antud juhul traavesile paigaldatavad ja linnu liikumisvabadust piiravad nn luuad või kammid (*Joonis 6.8*).



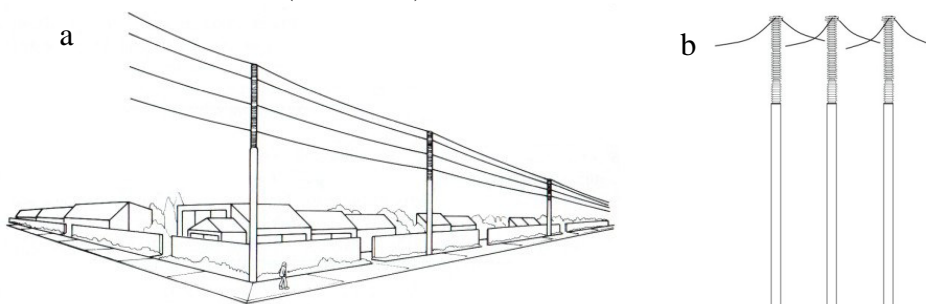
Joonis 6.8 Linnu liikumisvabadust piirav nn luud ja kamm.

Isolaatorite V asetuse puhul traaversiga mastil suurendab väljajühtlustusrõngaste kasutamine väljajehetejoa poolt põhjustatud rikete toimumise tõenäosust.

## TRAAVERSITA ELEKTRILIINIMASTID

### ISOLAATORITE | VERTIKAALASETUS TRAAVERSITA MASTIDEL

Isolaatorite | vertikaalasetusega ilma traaversita mastide puhul on tegu kõige vähem rikkealtima asetusega lindude poolt põhjustatud saastlahendustele, mis tuleneb sellest, et nii liinimast kui ka isolaatorid asetsevad vertikaalselt ehk lindudele meeldiva horisontaalse pinna suhtes halvimas (täisnurkses) kaldes. Ka ei tasu karta, et linnud sooviksid seista faasijuhil või kohas, kus faasijuht isolaatorile kinnitub, sest 110 kV liinipinge on piisavalt kõrge, et tekitada lindudele koroonalahendustega ebamugavustunnet, mis viimased sealt ära peletab. Traaversita masti ja isolaatorite | vertikaalasetuse puhul saab kasutada ainult tugiisolaatoreid, mis kitsendab oluliselt mastidel kasutatavate isolaatoritüüpide arvu. Selliste masti- ja isolaatorite asetustega on võimalik ehitada väga sihvakaid ülekandeliine (Joonis 6.9).



Joonis 6.9 Traaversita masti, isolaatorite vertikaalasetusega ülekandeliinid:

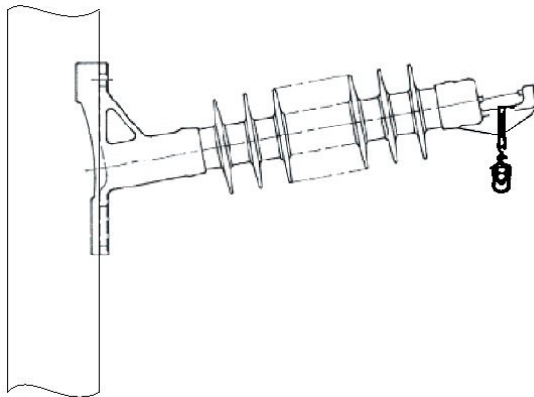
- Isolaatorid asetsevad ühel mastil jadamisi, väga sihvakas disain [46].
- Isolaatorid asetsevad eraldi mastidel.



Tugiisolaatorite vertikaalasetuse puhul traaversita mastil ei suurenda väljaühtlustusrõngaste kasutamine väljaheitejoa poolt põhjustatud rikete toimumise tõenäosust, kuna lindudel ei meeldi pingestatud faasijuhtidel seista ning seega puuduvad ka ohtlikud väljaheitejoad. Kuna antud juhul linnud isolaatoritel seista ei soovi, pole tarvis paigaldada ka linde eemale hoidvaid lisaseadeldisi. Nende liinide peamiseks miinuseks on raskused piksekaitsetrossi paigutamisel ning maandamisel. Mõnevõrra võib valmistada probleeme ka tugiisolaatorite mehaaniliste koormuste talumine. Tuleb tõdeda, et sellised liinid on väga vähe levinud ning eksisteerivad peamiselt ainult paberil.

### *ISOLAATORITE – HORISONTAALASETUS TRAAVERSITA MASTIDEL*

Isolaatorite – horisontaalasetusega traaversita mastidel kasutatakse samuti tugiisolaatoreid. Horisontaalse asetusega tugiisolaatoritega elektriliini põhiliseks positiivseks omaduseks loetakse mastide sihvakust ehk kompaktsust, mistõttu need sulanduvad paremini ümbrusega ja on visuaalselt vähem märgatavad (väiksem visuaalne reostus). Probleeme ei valmista ka isolaatoril väljaühtlustusrõngaste kasutamine. Horisontaalse asetusega tugiisolaatorite kasutamisele kõrgemal pingel (kasutatakse üldjuhul liinipingetel kuni 138 kV) seab piirid ette faasijuhi poolt põhjustatud mehaaniline koormus.



*Joonis 6.10 Horisontaalasetusega liinitugiisolaator [47].*

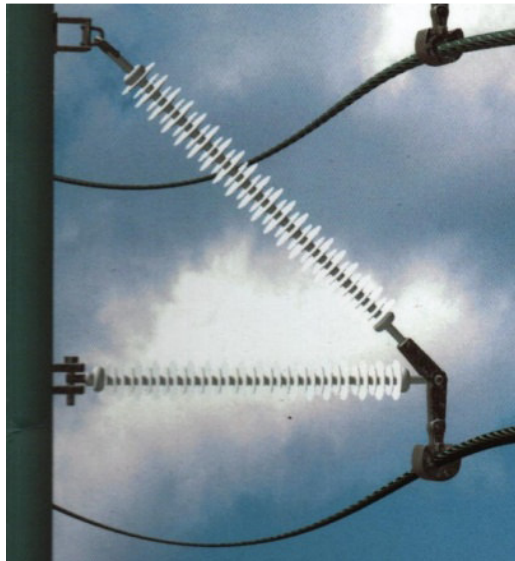
Isolaatorite horisontaalasetusega traaversita mastide peamiseks miinuseks on see, et isolaatorid asetsevad horisontaalselt ehk lindudele meeldivaimas asendis. Isolaatoritele lendavad ja seal juba seisvad linnud võivad põhjustada tiibadega või kehaga lühiseid faasijuhi ja masti vahel. Jugalahenduse lühiseid aga ei toimu, kuna isolaator asub horisontaalselt. Komposiitisolaatorite puhul on ka täheldatud, et linnud võivad olulisel määral mehaaniliselt kahjustada isolaatori kattmaterjali, seelikuid (*Joonis 6.11*).



*Joonis 6.11 Lindude poolt kahjustatud horisontaalasetusega komposiitisolaator [48].*

### *ISOLAATORITE < ASETUS TRAAVERSITA MASTIDEL*

Isolaatorite < asetus traaversita mastil omadused ei erine oluliselt isolaatorite horisontaalasetusega traaversita mastide omast. Põhiline erinevus seisneb selles, et lisatud ülemine rippisolaator tõstab oluliselt isolaatorite komplekti mehaanilist tugevust ning seega saab selliste isolaatorite asetusega liinidel kasutada jämedamaid (raskemaid) faasijuhte ja kõrgemaid nimipingeid.



*Joonis 6.12 Isolaatorite < asetus traaversita mastil [11].*

## ISOLAATORITE V ASETUS TRAAVERSITA MASTIDEL

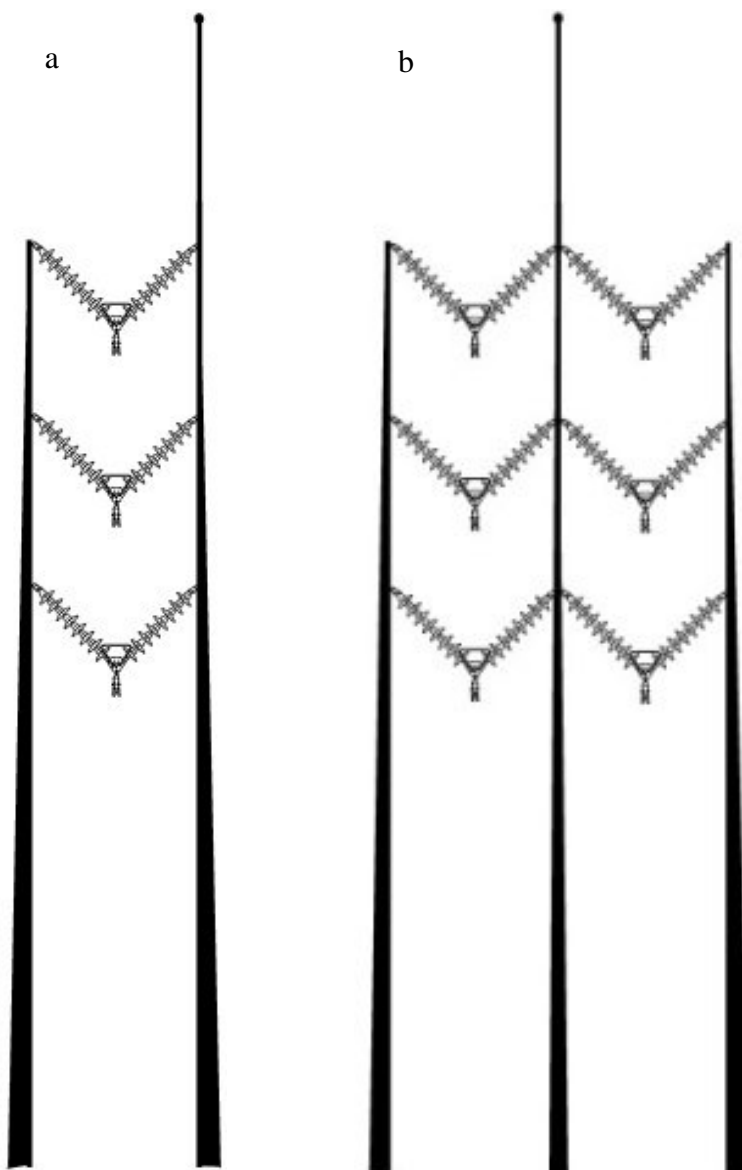
Juhul, kui isolaatorite V asetuse puhul eemaldada traavers, siis on tegu linnu väljaheidete poolt põhjustatud saastlahenduste mõistes ühe kõige vähem rikkealtima lahendusega, sest nüüd puudub lindudel faasijuhi kohal traaversil seismise võimalus sootuks ning seega ei saa ka linnud isolaatoreid saastata ega tekitada väljaheitejoaga lühiseid. Seega ka väljätühtlustusrõngaste kasutamine isolaatoritel ei muuda jugalahendusest tingitud saastlahenduse ohtu, kuna säärane oht lihtsalt puudub. Samal põhjusel pole lindude eemale hoidmiseks tarvis kasutada lindude liikumisvabadust piiravaid nn kamme või luudasid. Kuna isolaatorid asetsevad tugeva kalde all – ca 45°, siis tõenäoliselt ei tekita need lindudes soovi seal seistes puhata. Nagu eelpool mainitud, ei tasu karta, et linnud sooviksid seista kohas, kus faasijuht isolaatorile kinnitub, sest 110 kV liinipinge on piisavalt kõrge tekitamiseks lindudele koroonalahendustega ebamugavustunnet, mis viimased sealt eemale peletab. Kuna isolaatorite V asetusega traaversita liinimasti kohta ei õnnestunud kirjandusest andmeid leida, siis autor skitseeris vastavad võimalikud mastitüübid ise (LISA A *Joonis. 5, Joonis 6.13*). Antud isolaatorite V asetusega traaversita mastitüüpide eelisteks, eriti isolaatorite vertikaalasetusega traaversita mastide ees, on see, et kasutada saab kõiki liini-isolaatorite tüüpe ja materjale. Probleeme ei valmista piksetrossi paigutamine ega maandamine. Kuna isolaatorid on kalde all, siis toimub ka isolaatorite isepuhastumine hõlpsamalt (*Peatükk 2.4*).

Masti konstrueerimisel tuleb vältida avatud sõrestikuga metallarmatuuri kasutamist, et lindudel puuduks võimalus sinna vahele pesapaiga rajamiseks. Masti valmistamisel tuleks kasutada kas kaetud sõrestikku, koonusjat toru, H- või T-kujulise ristlõikega tala. Masti otsad ei tohi olla tõmbid, vaid peavad olema teravad, et linnud ei sooviks sinna istuda.

Asjaolu, miks isolaatorite V asetusega traaversita maste ei õnnestunud kirjandusest leida, on suure tõenäosusega selles, et erinevate isolaatorite asetustega liinimastide projekteerimisel on seni lähtunud pigem liinide sihvakuse ning vajatava minimaalse liinikoridori vaatevinklist, mitte lindude saaste poolt põhjustatud vaatenurgast.

Selle uue – lindude väljaheidete poolt põhjustatud saastlahenduste vähendamine, muutes isolaatorite parameetrite asemel hoopiski mastiparameetreid – lähenemise tõestamiseks tuleb antud isolaatorite V asetusega traaversita mastitüüpidega liinitalitlemist jälgida mõne aasta vältel.

Seega – kui süsteemioperaatorfirma soovib tulevikus põhjalikult rekonstrueerida mõnd liini, kus lindude poolt põhjustatud rikete arv on olnud suur, siis tasuks tõsiselt kaaluda traaversita mastitüüpide ja isolaatorite V asetuse nn prooviliini rajamist, et saada teada, mil määral autori poolt välja käidud hüpoteesid tegelikkuses paika peavad.



*Joonis 6.13 Isolaatorite V asetused taaversita linimastidel (skitseering).  
 a) Üheahelalise liini mastid, toetatud tugevdatud mastidega.  
 b) Kaheahelalise liini mastid, toetatud tugevdatud mastidega.*

## 7 JÄRELDUSED JA SOOVITUSED

Järeldused ja soovitused on järjestatud vastavalt uurimuse sissejuhatuses püstitatud küsimustele.

1. Isolatsiooniütlelöökide peamisteks põhjustajateks on suure tõenäosusega Eestis suvituvad suured rändlinnud. Eestis sobib selleks suureks rändlinnuks kõige paremini valge toonekurg.
2. Saaste mõju isolaatoritele seisneb selles, et isolaatorid saastuvad ja võivad teatud saastatuse juures ka tavatalitluspingel üle lüüa. Klaasisolaatorid saastuvad oluliselt lihtsamini kui komposiitisolaatorid (õhu ja niiskuse teel leviva saaste korral). Tugev saaste võib oluliselt vähendada komposiitisolaatorite eluiga, klaasisolaatorite eluiga saaste oluliselt ei mõjuta (tugevalt saastunud klaasisolaator pole lihtsalt saastatuse tõttu kasutatav, puhtaks pestes on isolaator taas talitluskõlbulik). Vähestes saastetingimustes loetakse klaasisolaatorite oodatavaks elueaks *ca* 50–60 aastat, komposiitisolaatorite puhul aga *ca* 20–30 aastat. Väga tugev saaste võib komposiitisolaatorite eluiga lühendada mõne aastani või isegi mõne kuuni.
3. Kuna peamiseks saasteallikaks on lindude väljaheited *saastumisviis b) linnu väljaheitejuga*, siis olemasolevatele (isolaatorite horisontaal- ja vertikaalasetusega traaversiga mastidega) probleemseimatele liinidele tuleks masti traaversitele paigaldada lindude liikumisvabadust piiravad nn kammid või luuad. Klaasisolaatorite vertikaalasetuse puhul võiks kaaluda ka isolaatorketi ülemise ja alumise isolaatori vahetamist suurema diameetriga lametaldrikisolaatorite vastu või spetsiaalsete isolaatorkatete kasutamist. Vertikaalselt asetatud rippkomposiitisolaatorite puhul tuleks loobuda väljaühtlustusrõngaste kasutamisest ning kaaluda võiks ka spetsiaalsete isolaatorkatete kasutamist. Tulevikus, liinide uuendamisel, võiks kaaluda ka traaversita V isolaatorasetusega liinimastide kasutuselevõttu.
4. Lindude kolooniate piirkondi võib hakata lugema kõrgema saastetasemega piirkondadeks. Oluline on aga seejuures fakt, et tegu pole nn traditsioonilise saastumisviisiga, vaid *saastumisviis b) linnu väljaheitejoaga*. Nimetatud saasteliigi saastlahenduse ärahoidmisel ei ole määravad isolaatorite omadused, vaid hoopiski linde eemal hoidvad seadeldised, väljaheitejuga katkestavad seadeldised, isolaatorite asetused liinimastil ning liinimasti konfiguratsioon (traaversiga, traaversita).
5. Komposiitisolaatorite kasutamine lindude saaste korral *saastumisviis b) linnu väljaheitejuga* positiivseid tulemusi ei anna, kuna selle saastumisviisi korral pole määravad isolaatorite omadused, vaid juba eelnevas punktis loetletud muude seadeldiste omadused.

6. Komposiitisolaatorite elektrilised parameetrid muutuvad saaste-tingimustes vähem kui klaasisolaatoritel. Saastel on aga komposiitisolaatori elueale lühendav toime.

## LISASOOVITUSED

Kohtades, kus isolaatorid mastidele kinnituvad, kasutada korrosioonikindlaid masti osi ning kinnitusdetalle.

Soovitused saaste määra mõõtmisteks:

- Hakata rekonstrueeritavatel liinidel määrama utiliseerimisele minevate klaasisolaatorite *ESDD* ja *NSDD* väärtuseid, et saada teada antud piirkonna (liinimasti ümbruse) saastatust.
- Püstitada kõige probleemsematesse kohtadesse testimiseks mitmesuguse profiiliga isolaatoreid ja jälgida, kui tugevalt vastava profiiliga isolaatorid saastuvad. Määrata nende *ESDD* ja *NSDD* väärtused.
- Püstitada probleemseimatesse kohtadesse õhusaaste (tahkete osakeste) määra mõõtvad spetsiaalsed seadeldised.

## KOKKUVÕTE

Kirjanduse analüüsi tulemusel selgus, et klaas- ja komposiitisolaatorite omavahelised erinevused on märkimisväärsed. Antud uurimustöö kontekstis aga võib olulisemateks erinevusteks lugeda järgmisi peamisi parameetreid:

- a) klaasisolaatori oodatav eluiga on *ca* 60 aastat, osalahendused ja ülelöögid isolaatoril üldjuhul ei kahjusta isolaatorit, riknenud isolaatorit on lihtne tuvastada, kuna on hüdrofiilne, siis ka saastub kergemini, saastunud ja niiskunud isolaatoril on suhteliselt suured kaod, suhteliselt odavahinnalised;
- b) komposiitisolaatorite oodatav eluiga on *ca* 30 aastat, osalahendused ja ülelöögid kahjustavad üldjuhul isolaatorit (vähendades sellega isolaatori eluiga), riknenud isolaatorit on raske tuvastada (eriseadmete vajadus), kuna on hüdrofoobne, siis ka saastub raskemini, saastunud ja niiskunud isolaatoril on suhteliselt väikesed kaod, suhteliselt kallihinnalised.

Rikkestatistika analüüsi tulemusena selgus, et määramata rikked toimuvad peamiselt kolmel suvekuul (juuni-juuli-august), öisel kellaajal (väiksema õhtuse ja suurema hommikuse tõusuga) ning koonduvad üldjuhul teatud liinilõikudesse. Rikked on pea eranditult ühefaasilised (faas-maa) mööduvad lühised (isolatsioonilise ülelööki). Määramata rikete aegrea võrdlemisel kirjanduses toodud andmetega selgus, et rikete peamiseks põhjustajateks on suurte rändlindude ekskrementsaaste – Eestis on selleks linnuks suure tõenäosusega valge toonekurg (*ld Ciconia Ciconia*) – täpsemalt, juhtiva ekskrementjoa poolt põhjustatud lühis liinimasti faasijuhil ja traaversi vahel. Viimast fakti kinnitavad ka laboris läbi viidud katsed.

Kuna rikkeid põhjustab linnu elektrit juhtiv ekskrementjuga, mitte ekskrementide sadestumine isolaatori pinnale (ehk nn traditsiooniline saastumise viis), siis ei anna isolaatorite omaduste muutmine (nt klaasisolaatorite vahetamine komposiitisolaatorite vastu) vastavate rikete korral pea mingit positiivset efekti. Vastupidi, laboris tehtud katsetuste põhjal võib väita, et komposiitisolaatorite väljajähtlustusrõngad võivad hoopiski suurendada ekskrement-jugalahenduse toimumise tõenäosust.

Kui senini on õhuliini erinevate mastide konfiguratsioonid ja isolaatorite asetusi kasutatud saamaks kas sihvakamaid maste või kitsamaid liinikoridore, siis antud väitekirja üheks olulisimaks uuenduslikuks lähenemiseks võib pidada määramata rikete (lindude ekskrementsaaste poolt põhjustatud) vähendamise abinõude korral toodud uut lahendust, milles keskset rolli rikete vähendamisel mängivad just õhuliini mastide konfiguratsioonid (traaversi olemasolu või selle puudumine) ja isolaatorite asetused liinimastidel (horisontaalne, vertikaalne, V või < asetused), mitte isolaatorite enda omadused.

Töös on toodud soovitusel lindude poolt põhjustatud ekskrementsaaste vähendamiseks erinevate mastikonstruktsioonide ja isolaatorite asetuste korral. Kuna Eestis on kasutusel traaversiga õhuliini mastid, kus valdavas enamuses on isolaatorid asetatud vertikaalselt (kandemastid) ning oluliselt vähemal määral asetatud ka horisontaalselt (ankru- ja lõpumastid,) siis töös on peamiselt käsitletud just neid mastitüüpe ja isolaatorite asetusi. Vastavate mastikonstruktsioonide ja isolaatorite asetuste korral loetakse parimaks riket vähendavaks abinõuks masti traaversile nn kammide või nn luudade (piiravad linnu liikumise vabadust traaversil) monteerimist. Mõningal määral aitab rikkeid vähendada ka isolaatoritele spetsiaalsete katete (isolaatorite diameetritest oluliselt suuremate diameetritega) paigaldamine.

Väitekirja teise olulise uuendusena pakub töö autor välja õhuliinimasti uut tüüpi konstruktsiooni koos isolaatorite vastavate asetustega, mille kasutamisel peaks oluliselt vähenema rikete arv, mida põhjustavad lindude ekskrementsaastamised õhuliinidele. Autor loodab, et süsteemioperaator rajab tulevikus mõnda probleemsesse kohta sellise uut tüüpi eksperimentaalse õhuliini – õhuliini, kus mastid on traaversita ja isolaatorid V asetusega – saamaks teada, mil määral aitab uus mastidisain ja isolaatorite asetuse vähendada nn määramata rikete arvu.



## ABSTRACT

Transmission System Operator (TSO) of Estonian electrical power grid, AS Elering, has encountered a problem with indefinite faults in the grid (flashovers on the overhead power line insulators). TSO wanted to find the solution for that problem since every flashover could cause to TSO and its clients a breakdown or malfunctioning of the electrical equipment which in turn can cause the financial loss. Current doctoral thesis grew out from specific problem and therefore the main object of this thesis is to find out the cause of the indefinite faults as well as propose ways to minimize or eliminate the faults.

The author of this Study used data about indefinite faults from 2005 to 2009 collected by TSO, and compiled more detailed analysis based on literature, fault statistics, experiences of the other countries as well as the lab tests to solve the problem. Lab tests were carried out in high voltage lab of TUT Department of Electrical Power Engineering.

Analysis of the literature showed that the differences of the glass and composite insulators are significant. The most important parameters that are relevant in this study are given as following:

- a) the life expectancy of glass insulator is about 60 years; partial discharges and flashovers do not usually injure the insulators; it is easy to visually identify the broken insulators in the insulator string; the dissipated power of contaminated and wetted insulator is relatively high; the prices of glass insulator's are relatively low.
- b) the life expectancy of composite insulator is about 30 years; partial discharges and flashovers can substantially injure the insulators; it is visually difficult to identify the broken insulators (the need for special equipment); the dissipated power of contaminated and wetted insulator is relatively low; the prices of composite insulator's are relatively high.

The faults statistic analyze showed that the indefinite faults will occur mainly (approximately 85% of all indefinite faults) during three summer months (June – July – August). In addition number of faults during 24h period differ significantly and about 75% of indefinite faults occur during 10 hours at night (from 8 p.m. until 6 a.m. with lower peak at 12 p.m. and higher peak at 5 a.m.). When geographically dividing country into two, majority (2/3) of faults occur in South-Estonia and minority (1/3) in North-Estonia. Faults tend to concentrate to certain line segments (towers) – they do not distribute equably to whole line span. Indefinite faults that occurred were by type phase to ground transient faults (99% of events) (insulator's flashovers).

When 24h time profile of indefinite faults in Estonia was compared with other 24h time profiles found in literature, it emerged that the most of the indefinite faults are caused by the excrements of big birds. This “big bird” in Estonia is

most probably White Stork (*Id. Ciconia ciconia*). The faults are induced mainly by highly conductive bird-streamers that are short circuiting the traverse and phase conductor, not by the “traditional” contaminating where pollutants are deposited on the surface of an insulator. This fact was also proved with tests made in high voltage laboratory.

Since faults are caused by the bird-streamers not by the pollutants deposited on the insulator, changing the insulator’s properties (i.e. replacing the glass insulators with composite insulators) will not give any positive results when wanting to decrease the rate of faults. Contrarily, tests made in high voltage laboratory show that using the corona-rings at line-end of composite insulators can substantially increase the probability for successful flashovers induced by bird-streamers.

Until today using the different tower designs and insulator’s positioning’s are mainly driven by the wish to have slim towers or narrower line corridors. One of the new approaches of this dissertation is the concept that tower designs (primarily the existence or non-existence of tower traverse) and insulator’s positioning’s (horizontal-, vertical-, Vee- or sidelong-Vee-string) have significant effect to faults caused by the bird excrements.

The recommendations for decreasing the faults caused by the bird excrements are listed out by different tower design types and by different insulator’s positioning’s. Whereas in Estonia there are in use mainly the overhead power line towers that have traverses and where insulators are predominantly positioned vertically (suspension towers) and in some places also horizontally (anchor or dead-end towers) then in given thesis there are expand upon these tower types and insulator positioning’s. The most potent measure for decreasing the faults when using given tower types and insulator positioning’s, is to install special “brushes” or “combs” on to the traverses (that way limiting and hindering the birds’ mobility on the traverse). Some positive effect can also be achieved using special additional shields “Bird protectors” (shields that are made of nonconductive material and which have considerably larger diameters than insulators have – the “umbrella” effect) on line- and ground-end of an insulator.

Another new approach or innovation of this dissertation is the proposal of a new tower design (tower without traverse where insulators are positioned in Vee-string), design that will presumably decrease or even eliminate (by excluding the possibility for birds to stand over the phase-conductor on the traverse) the faults (insulator flashovers) caused by the bird excrement contamination. The author hopes that in the future when some aged and problematic overhead power line needs to be reconstructed then the system operator will choose constructing at least one experimental overhead power line with this new tower design to know that if and in what extent using this new tower design will help to decrease the faults caused by birds.

## PUBLIKATSIOONID

Antud uurimuse tulemustest on koostatud viis ingliskeelset originaalartiklit. Autor on andnud põhilise panuse loetletud artiklite valmimisse ning on seega artiklite põhiautoriks.

- I. Taklaja, P.; Oidram, R.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2013). Main bird excrement contamination type causing insulator flashovers in 110 kV overhead power lines in Estonia. *Oil Shale*, 2013, Vol. 30, No. 2S, pp. 211-224, Estonian Academy Publishers.
- II. Taklaja, P.; Oidram, R.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2013). Causes of indefinite faults in Estonian 110 kV overhead power grid. *Oil Shale*, 2013, Vol. 30, No. 2S, pp. 225-243, Estonian Academy Publishers.
- III. Taklaja, P.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2012). Wet tests on naturally polluted glass and composite insulators. *PQ2012: 8th International conference: 2012 electric power quality and supply reliability*: June 11–13, 2012, Tartu, Estonia: conference proceedings. IEEE
- IV. Taklaja, P.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2012). Determining the unknown faults of the HV overhead lines. In: *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, Brno, Czech Republic, May 23–25, 2012: IEEE, 2012.
- V. Taklaja, P.; Oidram, R. (2010). The study about indefinite fault causes in Estonian 110 kV power grid. *PQ2010: 7th International conference: 2010 electric power quality and supply reliability*: June 16–18, 2010, Kuressaare, Estonia: conference proceedings (177–184). IEEE

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] J. S. T. Looms, *Insulators for HIGH VOLTAGES*, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1988.
- [2] CIGRE, *Guide for the establishment of naturally polluted insulator test stations*, 2007.
- [3] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen and V. Palva, *High Voltage Engineering*, Tekijät ja Omatieto Oy, 1996, [in Finnish].
- [4] U. Kallavus, *Materjalide uurimismetodid I, Optiline metallograafia*, Tallinn: TTÜ Materjaluuringu teaduskeskus, 2012.
- [5] Department of Physics and Astronomy, *Coefficient of Linear Expansion*, Oklahoma: University of Oklahoma, 2008.
- [6] SEDIVER, *Sediver toughened glass suspension insulators catalog CSA/ANSI*, Canada: Sediver, 2007.
- [7] P. Kulu, J. Kübarsepp, E. Hendre, T. Metusala ja O. Tapupere, *Materjalid*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2001.
- [8] Standard 60815-1, *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 1: Definitions, information and general principles*, IEC, 2008.
- [9] L. Grigsby, *"The Electric Power Engineering Handbook"*, IEEE Press, CRC press LLC, (Chapter 4.3), 2001.
- [10] C. Lumb, *The effect of housing material and profile on the pollution and ageing performance of composite HV line insulators*, Sediver, France.  
[http://www.sevespower.com/corporate\\_technology/pdf\\_publications/SEDOC15999.pdf](http://www.sevespower.com/corporate_technology/pdf_publications/SEDOC15999.pdf), 2009.
- [11] FCI Furucawa composite insulator LTD, *brochure*, 2011,  
<http://www.fcifurukawa.hu>.
- [12] SEDIVER, *Application Guide for Composite Suspension Insulators*, Sediver, Inc., York, SC., 1993.
- [13] Standard 60815-2, *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 2: Ceramic glass insulators for a.c. systems*, IEC, 2008.
- [14] Standard 60815-3, *Selection dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 3: Polymer insulators for a.c. systems*, IEC, 2008.
- [15] W. Vosloo ja J. Holtzhausen, *The electric field of polluted insulators*, Eskom, University of Stellenbosch, South Africa, 2002.
- [16] Standard EVS-EN 50341-1, *Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV - Part 1: General requirements - Common specifications*, IEC, 2009.
- [17] Standard EVS-EN 60071-1, *Insulation co-ordination Part 1: Definitions, principles and rules*, IEC, 2010.

- [18] Eesti meteoroloogia ja hüdroloogia instituut (EMHI), <http://www.emhi.ee>.
- [19] L. Alston ja Zolendziowski, *Growth of Discharges on Polluted Insulation*, *Proc. IEE*, Vol. 110, No 7, July 1963, pp. 1260-1266.
- [20] H. Boehme ja F. Obenaus, *Pollution Flashover Tests on Insulators in the Laboratory and Systems and the Model Concept of Creepage-path-flashover*, CIGRE paper No. 7, June 1969, pp 1-15.
- [21] B. Hampton, *Flashover Mechanism of Polluted Insulation*, *Proc. IEE* Vol 111, No 5, May 1964, pp. 985-990.
- [22] H. Woodson ja A. McIeroy, *Insulators with Contaminated Surfaces*, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* Nov./Dec. 1970, pp 1858-1867..
- [23] F. Rizk, *Mathematical Models for Pollution Flashover*, *Electra* Vol. 78, 1981, pp. 71-103.
- [24] D. Jolly, *Contamination Flashover Part II, Flat Plate Model Tests*, *IEEE Trans. Vol. PAS-90*, No. 6, Nov.1972, pp. 2443-2451.
- [25] R. Sudararajan ja R. Gorur, *Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under d.c. voltage*, *IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. 28*, No. 2, April 1993, pp. 209-219.
- [26] S. Kütt, *Diplomitöö "Isolaatorite ŠŽB-10s saastlahenduskarakteristikute uurimine"*, Tallinn: Tallinna Polütehniline Instituut, Elektrisüsteemide kateeder, 1973.
- [27] D. Walshe, *Windtunnel experiments on the pollution of suspended high voltage insulators*, National Physical Laboratory, Teddington, England, *Aero Rep.* 1083, 1963.
- [28] Y. Zhou, X. Xu, Q. Nie, X. Liang and Z. Guan, *Bird Streamer Caused Flashover in EHV Transmission Line*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.16, No.1, February 2009.
- [29] J. T. Burnham, *Bird streamer flashovers on FPL transmission lines*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.10, No2, 1995.
- [30] E. Kuffel, W. Zaengl ja J. Kuffel, *High Voltage Engineering - Fundamentals*, published by Butterworth-Heinemann, (Chapter 9), Second edition 2000.
- [31] M. Verma, H. Niklasch, H. W., G. Luxa, H. Lipken and H. Schreiber, *The criterion for the pollution flashover and its application to insulation dimensioning and control*, CIGRE report 33-09, 1978.
- [32] H. Al-Dhaferi, *The effect of contamination on insulator flashover characteristics*, Dhahran: King Fahd University of Petroleum & Minerals, 2004.
- [33] Observatory of Tartu, <http://www.aai.ee/>.
- [34] T. Koff, *Pollen analysis of the implementation of the capabilities and limitations (in Estonian)*, TÜ Ecology institute, [http://arhkeskus.ai.ee/public/tiu\\_koff\\_lk105\\_128.pdf](http://arhkeskus.ai.ee/public/tiu_koff_lk105_128.pdf) (page 109).

- [35] R. K. Sayle, *Evaluation of Droppings*, Philadelphia: Clinical Avian Medicine and Surgery, G.T Harrison and L.R. Harrison editors, W.B. Saunders Company, 1986.
- [36] M. Ots, *White Stork - The bird of the year 2004*, <http://www.eoy.ee/projektid/al2004/jutt.htm>.
- [37] M. Ots, *White Stork in Estonia till 2008*, [http://www.eoy.ee/hirundo/sisukorrad/2009\\_1/M.Ots\\_Cic\\_cic.pdf](http://www.eoy.ee/hirundo/sisukorrad/2009_1/M.Ots_Cic_cic.pdf).
- [38] O. Bahat, *Mitigation of transmission lines against bird hazards - the Israeli experience*, Fort-Collins, CO: EDM International Conference on Overhead lines, March 29 - April 1, 2010.
- [39] O. Bahat, *Wintering Black Storks (Ciconia nigra) cause severe damage to transmission lines in Israel - A study on the risk and mitigation possibilities*, Fort-Collins, CO: EDM International Conference on Overhead lines, March 31 - April 3, 2008.
- [40] Standard 60507, *Artificial pollution test on high-voltage insulators to be used on a.c. systems*, IEC, 2002.
- [41] ISOELECTRIC, *Composite insulator catalogue*, ISOELECTRIC, 2009.
- [42] LAPP, *Rodurflex composite insulators catalog*, New York: LeRoy, 2006.
- [43] B. Mazurek, T. Maczka and A. Gmitrzak, *Effect of arc current on properties of composite insulators for overhead lines*, Xi'an: Proceeding of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Xi'an Jiotang University, June 21-26, 2000.
- [44] TYCOELECTRONICS, <http://energy.tycoelectronics.com/>, 2011.
- [45] ESKOM; Chris Rooyen, *The management of Wildlife Interactions with Overhead Power Lines*, <http://www.sapp.co.zw>: Southern African Power Pool Environment Sub-Committee, 13 August 2003.
- [46] EPRI Journal, *Proposed polysil posts*, May 1983.
- [47] LAPP, *Line Compaction Catalog*, LAPP, 2001.
- [48] S. Elizabeth, *Reliability of composite insulators*, Technical meeting on optimization of overhead line infrastructure, July 16, 2008.
- [49] K. Kleinhaus, *Investigation into Possible Mechanisms of Light Pollution Flashover of 275 kV Transmission Lines as a Cause of Unknown Outages*, Stellenbosch: University of Stellenbosch, April 2005.
- [50] Avian Power Line Interaction Committee (APLIC), *Suggested practices for avian protection on power lines*, Washington, D.C and Sacramento, CA: Edison Electric Institute, APLIC and the California Energy Commission, 2006.
- [51] A. Kärkkänen, *Magistritöö "Fotoindutseeritud muutused süsiniku nanotorudest valmistatud kilede elektri juhtivuses erinevates gaasikeskkondades"*, Tartu: Tartu Ülikool, Füüsika-keemiateaduskond, Materjaliteaduse instituut, 2005.

## Tabelid ja joonised

Tabel 1. Määramata rikked liinidel.

	Liin	2005	2006	2007	2008	2009	Kokku
1	L106A/B/D	6	2	8	20	11	47
2	<b>L060/061</b>	9		6	11	8	34
3	L157/158	6	5	6	9	6	32
4	L017	8	2	8	2	6	26
5	<b>L187</b>	11	9	0	2	0	22
6	L058	1			18	2	21
7	<b>L189</b>	4	7	5	3	2	21
8	L105A/B/C	3	8	3	3	1	18
9	L042	3	2	2	9	1	17
10	L173/176/177	6	2	3	2	3	16
11	L037/L038	5	2	2	1	5	15
12	<b>L134A/B</b>	6	3	3	3	0	15
13	L104B/C	2	2		7	2	13
14	L065/192		3		7	2	12
15	L107A/B	6	4		1	1	12
16	L132A/B/C	4	2	1	4	1	12
17	L154/155/156	1	3	3	4	1	12
18	L116	3	2		3	3	11
19	L103	4	2		3	1	10
20	L110/110A	2	1	4	2	1	10
21	L145	2	3	3	2	0	10
22	<b>L197</b>	3		2	1	4	10
23	<b>L033/107C</b>	2	6	1	0	0	9
24	L020/021		2	2	4		8
25	L117/117A		5		1	2	8
26	L131A/B			1	7		8
27	L025/026	4	3				7
28	L142	2	2	2	1		7
29	L102	3		1		2	6
30	L109	1			4	1	6
31	L130A/B	3			1	2	6
32	L159A/B	2	1	1	2		6
33	L172A		6				6
34	L099	1		2	1	1	5
35	L141	2	1	1		1	5
36	L144A/B			1	2	2	5
37	<b>L196</b>			2	1	2	5

38	L198/L199A/B	1		2	1	1	5
39	<b>L011</b>	2		<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	4
40	L018/019/039	2		1	1		4
41	<b>L040</b>	2		2	<b>0</b>	<b>0</b>	4
42	<b>L043</b>	4			<b>0</b>	<b>0</b>	4
43	L071		1	1	1	1	4
44	L101	1		2	1		4
45	L104A	0	1	1	1	1	4
46	L108A					4	4
47	L133B/C		4				4
48	L146		1	1	2		4
49	L148	3		1			4
50	L032	1	2				3
51	L035	1		2			3
52	L044	1		2			3
53	L051		1		1	1	3
54	L119/119A	2		1			3
55	L126				1	2	3
56	L133A	1	1			1	3
57	<b>L143A/B</b>	2			<b>1</b>	<b>0</b>	3
58	L181			1	2		3
59	L194		1		1	1	3
60	L066	2					2
61	L07				1	1	2
62	L097			1		1	2
63	L108B	1				1	2
64	L111		1	1			2
65	L112		1		1		2
66	L115	1				1	2
67	L124A	1				1	2
68	L135				2		2
69	L138A/B	1			1		2
70	L140			1	1		2
71	L147	2					2
72	L149	1			1		2
73	L174			2			2
74	L182			2			2
75	L184					2	2
76	L195	1	1				2
77	LN5				1	1	2
78	L003			1			1
79	L006A		1				1



80	L007					1	1
81	L014				1		1
82	L053				1		1
83	L08		1				1
84	L114			1			1
85	L118				1		1
86	L123	1					1
87	L161		1				1
88	L171				1		1
89	L172/172A	1					1
90	L175	1					1
91	<b>L179</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	1
92	L180				1		1
93	L183			1			1
94	L190	1					1
95	L683			1			1
96	LN3				1		1

Rasvase kirjaga toodud liinid on üle viidud komposiitisolaatoritele. Aega (aastates), millal liinidel on kasutatud komposiitisolaatoreid, saab vaadata rasvaselt märgitud rikete järgi.

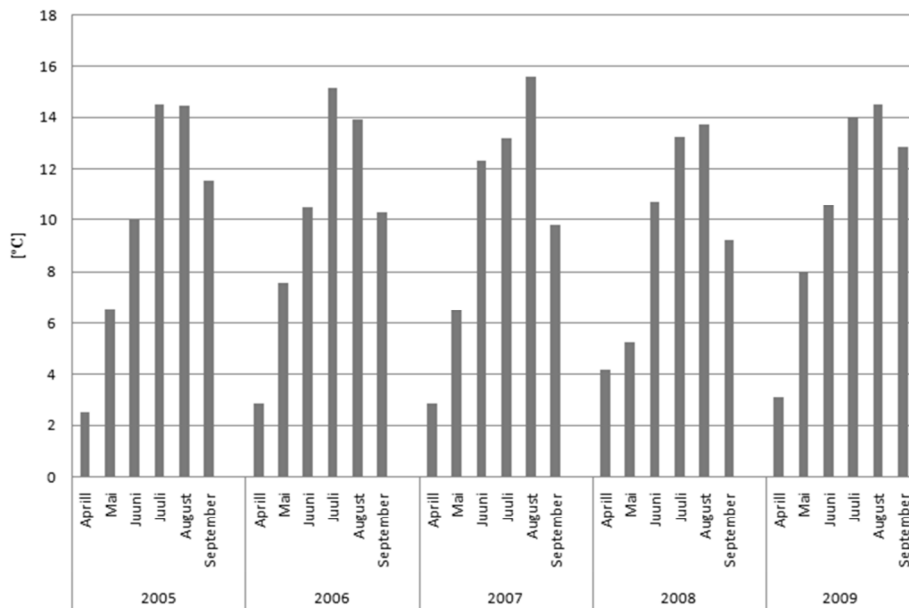
Tabel 2. Määramata rikked liinidel. Üks rike n kilomeetri kohta aastas.

								aastas	
		Liin	2005	2006	2007	2008	2009	Kokku	km/riike
1	2	<b>L060/061</b>	9		6	11	8	34	4,4
2	4	L017	8	2	8	2	6	26	5,5
3	7	<b>L189</b>	4	7	5	3	2	21	7,2
4	53	L051		1		1	1	3	7,9
5	42	L071		1	1	1	1	4	7,9
6	6	L058	1			18	2	21	9,3
7	1	L106A/B/D	6	2	8	20	11	47	9,6
8	3	L157/158	6	5	6	9	6	32	10,4
9	77	LN5				1	1	2	10,5
10	5	<b>L187</b>	11	9	0	2	0	22	10,9
11	38	<b>L011</b>	2		2	0	0	4	10,9
12	22	<b>L197</b>	3		2	1	4	10	12,2
13	36	L144A/B			1	2	2	5	12,3
14	9	L042	3	2	2	9	1	17	12,5
15	30	L109	1			4	1	6	13,3
16	21	L145	2	3	3	2		10	14,4
17	23	<b>L033/107C</b>	2	6	1	0	0	9	15,0
18	40	<b>L040</b>	2		2	0	0	4	15,7
19	33	L172A		6				6	16,0
20	11	L037/L038	5	2	2	1	5	15	16,2
21	61	L07				1	1	2	16,9
22	45	L108A					4	4	18,2
23	52	L044	1		2			3	18,5
24	15	L107A/B	6	4		1	1	12	18,7
25	20	L110/110A	2	1	4	2	1	10	19,3
26	25	L117/117A		5		1	2	8	20,2
27	16	L132A/B/C	4	2	1	4	1	12	20,4
28	50	L032	1	2				3	20,8
29	78	L003			1			1	20,8
30	96	LN3				1		1	20,9
31	87	L161		1				1	21,2
32	84	L114			1			1	21,7
33	8	L105A/B/C	3	8	3	3	1	18	21,9
34	29	L102	3		1		2	6	22,4
35	13	L104B/C	2	2		7	2	13	22,6
36	27	L025/026	4	3				7	22,6
37	28	L142	2	2	2	1		7	23,1
38	26	L131A/B			1	7		8	23,5
39	12	<b>L134A/B</b>	6	3	3	3	0	15	23,6
40	24	L020/021		2	2	4		8	24,3

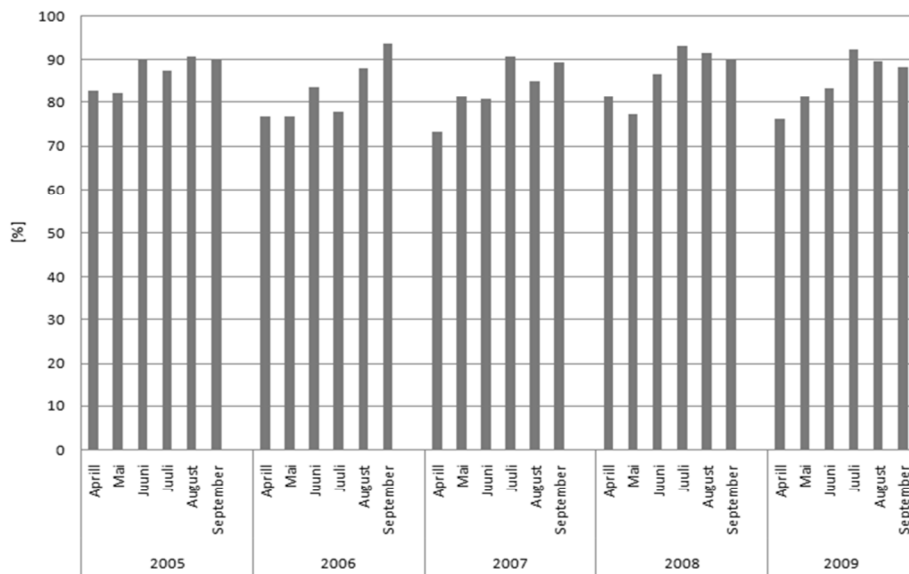
41	37	<b>L196</b>			<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	24,3
42	10	L173/176/177	<b>6</b>	2	3	2	3	<b>16</b>	24,7
43	19	L103	4	2		3	1	<b>10</b>	25,2
44	18	L116	3	2		3	3	<b>11</b>	25,2
45	62	L097			1		1	2	27,2
46	55	L126				1	2	3	27,9
47	41	<b>L043</b>	4			<b>0</b>	<b>0</b>	4	28,8
48	65	L112		1		1		2	29,9
49	64	L111		1	1			2	30,0
50	17	L154/155/156	1	3	3	4	1	<b>12</b>	30,1
51	48	L148	3		1			4	30,4
52	35	L141	2	1	1		1	<b>5</b>	30,5
53	60	L066	2					2	30,7
54	32	L159A/B	2	1	1	2		<b>6</b>	30,7
55	58	L181			1	2		3	30,7
56	44	L104A		1	1	1	1	4	30,8
57	70	L140			1	1		2	30,9
58	31	L130A/B	3			1	2	<b>6</b>	31,3
59	59	L194		1		1	1	3	32,1
60	95	L683			1			1	33,0
61	51	L035	1		2			3	33,5
62	83	L08		1				1	33,6
63	47	L146		1	1	2		4	35,2
64	34	L099	1		2	1	1	<b>5</b>	36,6
65	75	L184					2	2	36,7
66	54	L119/119A	2		1			3	39,3
67	14	L065/192		3		<b>7</b>	2	<b>12</b>	40,8
68	71	L147	2					2	42,9
69	80	L007					1	1	47,0
70	76	L195	1	1				2	47,4
71	67	L124A	1				1	2	51,3
72	81	L014				1		1	54,5
73	66	L115	1				1	2	54,8
74	46	L133B/C		4				4	55,6
75	49	L198/L199A/B	1		2	1	1	5	56,5
76	57	<b>L143A/B</b>	2			<b>1</b>	<b>0</b>	3	57,4
77	94	L190	1					1	57,6
78	73	L174			2			2	57,7
79	86	L123	1					1	58,1
80	74	L182			2			2	61,1
81	68	L135				2		2	64,4
82	56	L133A	1	1			1	3	73,0
83	93	L183			1			1	73,3

84	82	L053				1		1	79,1
85	43	L101	1		2	1		4	80,2
86	63	L108B	1				1	2	81,9
87	79	L006A		1				1	83,8
88	69	L138A/B	1			1		2	89,3
89	92	L180				1		1	92,2
90	39	L018/019/039	2		1	1		4	101,6
91	91	<b>L179</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	1	111,6
92	88	L171				1		1	112,2
93	89	L172/172A	1					1	127,0
94	85	L118				1		1	142,5
95	72	L149	1			1		2	180,6
96	90	L175	1					1	189,6

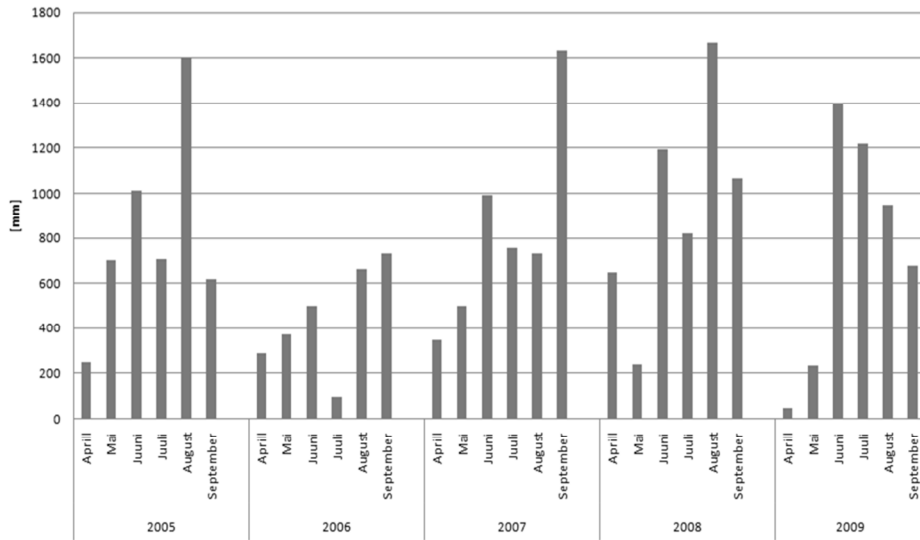
Rasvase kirjaga toodud liinid on üle viidud komposiitisolaatoritele. Aega (aastates), millal liinidel on kasutatud komposiitisolaatoreid, saab vaadata rasvaselt märgitud rikete järgi.



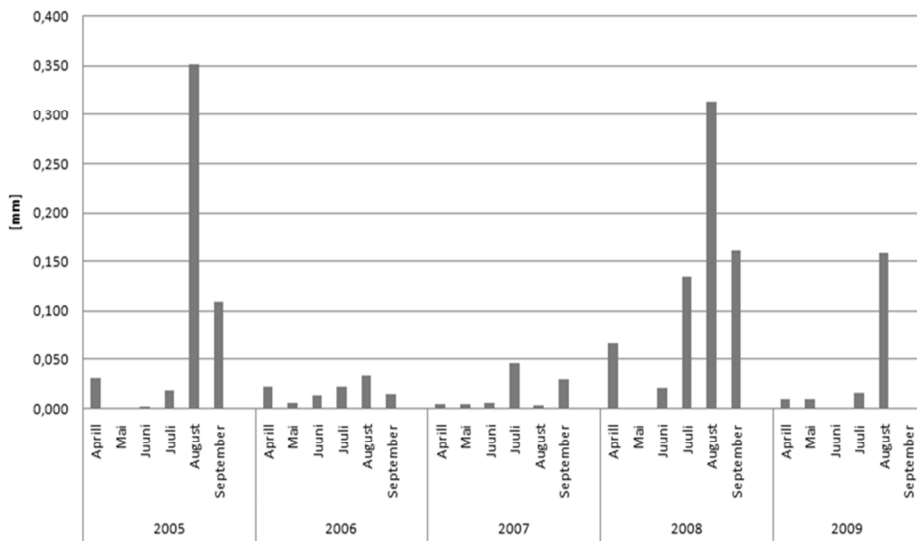
Joonis. 1 Keskmise kuine õhutemperatuur (17 mõõtejaama keskmine üle Eesti)



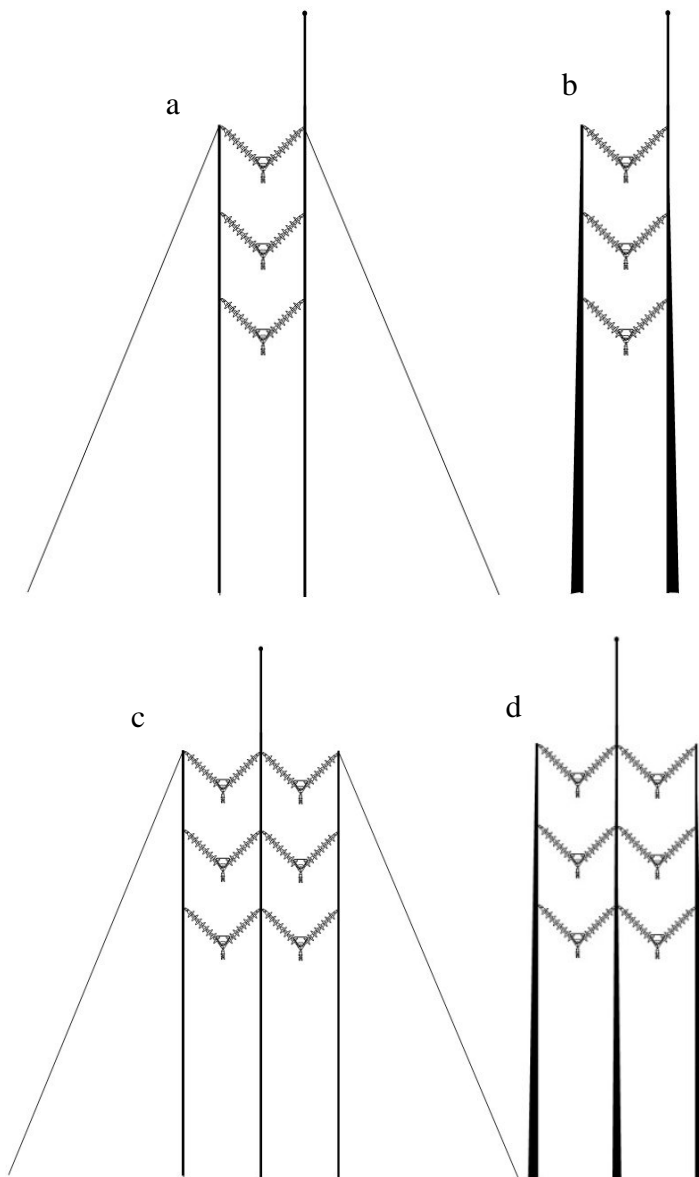
Joonis. 2 Keskmise kuine suhteline õhuniiskus (17 mõõtejaama keskmine üle Eesti)



Joonis. 3 Kuised sademete summad (17 mõõtejaama summad üle Eesti)



Joonis. 4 Kuised tunni keskmised sademed (17 mõõtejaama keskmine üle Eesti)



*Joonis. 5 Isolaatorite V asetused taaversita liinimastidel (skitseering).*  
*a) Üheaahelalise liini mastid, toetatud tõmbetrossidega.*  
*b) Üheaahelalise liini mastid, toetatud tugevdatud mastidega.*  
*c) Kaheaahelalise liini mastid, toetatud tõmbetrossidega.*  
*d) Kaheaahelalise liini mastid, toetatud tugevdatud mastidega.*

## Elulookirjeldus

### Üldandmed

#### Isikuandmed

Ees- ja perekonnanimi Paul Taklaja  
 Sünniaeg ja -koht 07. aprill 1982, Tallinn  
 Kodakondsus Eesti  
 Perekonnaseis Vabaabielus, kaks last

#### Kontaktandmed

Aadress Aiandi 19, 76605 Keila  
 Telefon +372 53 437 743  
 E-posti aadress [paul.taklaja@ttu.ee](mailto:paul.taklaja@ttu.ee)

### Hariduskäik

Õppeasutus (nimetus lõpetamise ajal)	Lõpetamise aeg	Haridus (eriala/kraad)
Tallinna Tehnikaülikool	2007	magistrikraad
Tallinna Tehnikaülikool	2005	bakalaureusekraad
Saue Gümnaasium	2001	keskkool
Keila Gümnaasium	1998	põhikool

### Keelteoskus (alg-, kesk- või kõrgtase)

Keel	Tase
Eesti keel	Emakeel
Soome keel	Kesk-tase
Inglise keel	Kõrgtase

### Täiendusõpe

Õppimise aeg	Täiendusõppe läbiviija nimetus
2011	Lappeenranta University of Technology, Soome
2009	Fachhochschule Stralsund, Saksamaa
2007	Tampereen Sähköverkko OY, Soome

### Teenistuskäik

Töötamise aeg	Tööandja nimetus	Ametikoht
2006 – ...	TTÜ Elektroenergeetika instituut	Laborant
2005 – 2006	OÜ Põhivõrk	Automaatika tehnoloog
2004 – 2005	AS Harju Elekter	Motaažitsehhi tehnik



## Teadustegevus

### Lepingud

07.05.2012 – Leping *Lep12084* „Keskpingeseadme SM6 taluvuskatsed välguimpulsspingele”, Eesti tööstusettevõttega AS Harju Elekter Elektrotehnika (toodab keskpingevõrkudes kasutatavaid seadmeid), vastutav täitja.

20.02.2009–15.06.2011 – Leping *Lep9016* „OÜ Põhivõrk 110 kV õhuliinide isolatsiooni töökindluse analüüs ja töökindluse tõstmise meetodid”, alguses põhitäitja, hiljem vastutav täitja.

### Publikatsioonid

1. Taklaja, P.; Oidram, R.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2013). Main bird excrement contamination type causing insulator flashovers in 110 kV overhead power lines in Estonia. *Oil Shale*, 2013, Vol. 30, No. 2S, pp. 211-224, Estonian Academy Publishers.
2. Taklaja, P.; Oidram, R.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2013). Causes of indefinite faults in Estonian 110 kV overhead power grid. *Oil Shale*, 2013, Vol. 30, No. 2S, pp. 225-243, Estonian Academy Publishers.
3. Haas, A.; Niitsoo, J.; Taklaja, P.; Palu, I. (2012). Analysis of electricity meters under distorted load conditions. *PQ2012: 8th International conference: 2012 electric power quality and supply reliability*: June 11-13, 2012, Tartu, Estonia: conference proceedings. IEEE
4. Taklaja, P.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2012). Wet tests on naturally polluted glass and composite insulators. *PQ2012: 8th International conference: 2012 electric power quality and supply reliability*: June 11-13, 2012, Tartu, Estonia: conference proceedings. IEEE
5. Taklaja, P.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2012). Determining the unknown faults of the HV overhead lines. In: *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, Brno, Czech Republic, May 23-25, 2012: IEEE, 2012,
6. Taklaja, P.; Oidram, R. (2010). The study about indefinite fault causes in Estonian 110 kV power grid. *PQ2010: 7th International conference: 2010 electric power quality and supply reliability*: June 16-18, 2010, Kuressaare, Estonia: conference proceedings (177-184). IEEE

7. Taklaja, P.; Annus, A; Oidram, R. (2008). The study of discharge characteristics of medium voltage overhead line insulators. *In: 5th International Symposium „Topical problems in the field of electrical and power engineering“: doctoral school of energy and geotechnology*, Kuressaare, Estonia, January 14-19, 2008 (24-27). Tallinn University of Technology

### **Kaitstud lõputööd**

Magistritöö: „Keskpinge õhuliini isolaatorite lahendusomaduste uurimine“, 2007, juhendaja dotsent Rein Oidram.

### **Teadustöö põhisuunad**

Kõrgepinge, kõrgepingeisolatsioon, kõrgepingeisolaatorid, liigpinged, piksekaitse, maandus.

## Curriculum Vitae

### General data

#### Personal data

First and last name Paul Taklaja  
 Date and place of birth 07. April 1982, Tallinn  
 Citizen Estonian  
 Family Free marriage, two children

#### Contact information

Address Aiandi 19, 76605 Keila  
 Phone +372 620 3754  
 E-mail [paul.taklaja@ttu.ee](mailto:paul.taklaja@ttu.ee)

### Education

Educational Institution	Graduation year	Education
Tallinn University of Technology	2007	Master's degree
Tallinn University of Technology	2005	Bachelor's degree
Saue Gymnasium	2001	Secondary school
Keila Gymnasium	1998	Primary school

### Language competence/skills (basic-, average- or fluent)

Language	Level
Estonian	Fluent
Finnish	Average
English	Fluent

### Continuing education

Year of course	Name of organisation
2011	Lappeenranta University of Technology, Finland
2009	Fachhochschule Stralsund, Germany
2007	Tampereen Sähköverkko OY, Finland

### Professional employment

Period	Organisation	Position
2006 – ...	TUT, Department of Electrical Power Engineering	Laboratorian
2005 – 2006	OÜ Põhivõrk, Department of Operation and Diagnostics	Industrial engineer
2004 – 2005	AS Harju Elekter, Department of Manufactory	Electrical engineer

## Scientific work

### *Contracts*

07.05.2012 Contract *Lep12084* with Estonian industrial concern (produces equipment for power distribution networks), AS Harju Elekter Elektrotehnika, Executive in chief in study: *The study of MV switchgear panel endurance tests with standard lightning impulse voltages and the measures to improve the panel's lightning withstand voltage.*

20.02.2009 – 15.06.2011 Contract *Lep9016* with Estonian TSO, AS Elering (former OÜ Põhivõrk), Executive in chief in joint study: *The study of 110 kV power grid reliability and the measures to decrease insulation failures.*

### *Publications*

1. Taklaja, P.; Oidram, R.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2013). Main bird excrement contamination type causing insulator flashovers in 110 kV overhead power lines in Estonia. *Oil Shale*, 2013, Vol. 30, No. 2S, pp. 211-224, Estonian Academy Publishers.
2. Taklaja, P.; Oidram, R.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2013). Causes of indefinite faults in Estonian 110 kV overhead power grid. *Oil Shale*, 2013, Vol. 30, No. 2S, pp. 225-243, Estonian Academy Publishers.
3. Haas, A.; Niitsoo, J.; Taklaja, P.; Palu, I. (2012). Analysis of electricity meters under distorted load conditions. *PQ2012: 8th International conference: 2012 electric power quality and supply reliability*: June 11–13, 2012, Tartu, Estonia: conference proceedings. IEEE
4. Taklaja, P.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2012). Wet tests on naturally polluted glass and composite insulators. *PQ2012: 8th International conference: 2012 electric power quality and supply reliability*: June 11–13, 2012, Tartu, Estonia: conference proceedings. IEEE
5. Taklaja, P.; Niitsoo, J.; Palu, I. (2012). Determining the unknown faults of the HV overhead lines. *In: Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, Brno, Czech Republic, May 23–25, 2012: IEEE, 2012,
6. Taklaja, P.; Oidram, R. (2010). The study about indefinite fault causes in Estonian 110 kV power grid. *PQ2010: 7th International conference: 2010 electric power quality and supply reliability*: June 16–18, 2010, Kuressaare, Estonia: conference proceedings (177–184). IEEE

7. Taklaja, P.; Annus, A; Oidram, R. (2008). The study of discharge characteristics of meedium voltage overhead line insulators. *In: 5th International Symposium „Topical problems in the field of electrical and power engineering”: doctoral school of energy and geotechnology*, Kuressaare, Estonia, January 14–19, 2008 (24–27). Tallinn University of Technology

### **Defended theses**

Master thesis in: *The study of discharge characteristics of medium voltage overhead line insulators*, Tallinn University of Technology, Faculty of Power Engineering, Department of Electrical Power Engineering, Chair of High Voltage Engineering, 2007. Tutor of the work: Associate Professor Rein Oidram.

### **Main areas of scientific work**

High voltage, insulation of high voltage, high voltage insulators, overvoltages, lightning protection, earthing.

**DISSERTATIONS DEFENDED AT TALLINN  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ON  
POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING,  
MINING ENGINEERING**

1. **Jaan Tehver**. Boiling on Porous Surface. 1992.
3. **Endel Risthein**. Electricity Supply of Industrial Plants. 1993.
4. **Tõnu Trump**. Some New Aspects of Digital Filtering. 1993.
5. **Vello Sarv**. Synthesis and Design of Power Converters with Reduced Distortions Using Optimal Energy Exchange Control. 1994.
6. **Ivan Klevtsov**. Strained Condition Diagnosis and Fatigue Life Prediction for Metals under Cyclic Temperature Oscillations. 1994.
7. **Ants Meister**. Some Phase-Sensitive and Spectral Methods in Biomedical Engineering. 1994.
8. **Mati Meldorf**. Steady-State Monitoring of Power System. 1995.
9. **Jüri-Rivaldo Pastarus**. Large Cavern Stability in the Maardu Granite Deposit. 1996.
10. **Enn Velmre**. Modeling and Simulation of Bipolar Semiconductor Devices. 1996.
11. **Kalju Meigas**. Coherent Photodetection with a Laser. 1997.
12. **Andres Udal**. Development of Numerical Semiconductor Device Models and Their Application in Device Theory and Design. 1998.
13. **Kuno Janson**. Paralleel- ja järjestikresonantsi parameetrilise vaheldumisega võrgusageduslik resonantsmuundur ja tema rakendamine. 2001.
14. **Jüri Joller**. Research and Development of Energy Saving Traction Drives for Trams. 2001.
15. **Ingo Valgma**. Geographical Information System for Oil Shale Mining – MGIS. 2002.
16. **Raik Jansikene**. Research, Design and Application of Magnetohydrodynamical (MHD) Devices for Automation of Casting Industry. 2003.
17. **Oleg Nikitin**. Optimization of the Room-and-Pillar Mining Technology for Oil-Shale Mines. 2003.
18. **Viktor Bolgov**. Load Current Stabilization and Suppression of Flicker in AC Arc Furnace Power Supply by Series-Connected Saturable Reactor. 2004.

19. **Raine Pajo**. Power System Stability Monitoring – an Approach of Electrical Load Modelling. 2004.
20. **Jelena Shuvalova**. Optimal Approximation of Input-Output Characteristics of Power Units and Plants. 2004.
21. **Nikolai Dorovatovski**. Thermographic Diagnostics of Electrical Equipment of Eesti Energia Ltd. 2004.
22. **Katrin Erg**. Groundwater Sulphate Content Changes in Estonian Underground Oil Shale Mines. 2005.
23. **Argo Rosin**. Control, Supervision and Operation Diagnostics of Light Rail Electric Transport. 2005.
24. **Dmitri Vinnikov**. Research, Design and Implementation of Auxiliary Power Supplies for the Light Rail Vehicles. 2005.
25. **Madis Lehtla**. Microprocessor Control Systems of Light Rail Vehicle Traction Drives. 2006.
26. **Jevgeni Šklovski**. LC Circuit with Parallel and Series Resonance Alternation in Switch-Mode Converters. 2007.
27. **Sten Suuroja**. Comparative Morphological Analysis of the Early Paleozoic Marine Impact Structures Kärđla and Neugrund, Estonia. 2007.
28. **Sergei Sabanov**. Risk Assessment Methods in Estonian Oil Shale Mining Industry. 2008.
29. **Vitali Boiko**. Development and Research of the Traction Asynchronous Multimotor Drive. 2008.
30. **Tauno Tammeoja**. Economic Model of Oil Shale Flows and Cost. 2008.
31. **Jelena Armas**. Quality Criterion of road Lighting Measurement and Exploring. 2008.
32. **Olavi Tammemäe**. Basics for Geotechnical Engineering Explorations Considering Needed Legal Changes. 2008.
33. **Mart Landsberg**. Long-Term Capacity Planning and Feasibility of Nuclear Power in Estonia under Certain Conditions. 2008.
34. **Hardi Torn**. Engineering-Geological Modelling of the Sillamäe Radioactive Tailings Pond Area. 2008.
35. **Aleksander Kilk**. Paljupooluselise püsimagnetitega sünkroongeneraator tuuleagregaatidele. 2008.
36. **Olga Ruban**. Analysis and Development of the PLC Control System with the Distributed I/Os. 2008.
37. **Jako Kilter**. Monitoring of Electrical Distribution Network Operation. 2009.

38. **Ivo Palu**. Impact of Wind Parks on Power System Containing Thermal Power Plants. 2009.
39. **Hannes Agabus**. Large-Scale Integration of Wind Energy into the Power System Considering the Uncertainty Information. 2009.
40. **Kalle Kilk**. Variations of Power Demand and Wind Power Generation and Their Influence to the Operation of Power Systems. 2009.
41. **Indrek Roasto**. Research and Development of Digital Control Systems and Algorithms for High Power, High Voltage Isolated DC/DC Converters. 2009.
42. **Hardi Hõimoja**. Energiatõhususe hindamise ja energiasalvestite arvutuse meetoodika linna elektertranspordile. 2009.
43. **Tanel Jalakas**. Research and Development of High-Power High-Voltage DC/DC Converters. 2010.
44. **Helena Lind**. Groundwater Flow Model of the Western Part of the Estonian Oil Shale Deposit. 2010.
45. **Arvi Hamburg**. Analysis of Energy Development Perspectives. 2010.
46. **Mall Orru**. Dependence of Estonian Peat Deposit Properties on Landscape Types and Feeding Conditions. 2010.
47. **Erik Väli**. Best Available Technology for the Environmentally Friendly Mining with Surface Miner. 2011.
48. **Tarmo Tohver**. Utilization of Waste Rock from Oil Shale Mining. 2011.
49. **Mikhail Egorov**. Research and Development of Control Methods for Low-Loss IGBT Inverter-Fed Induction Motor Drives. 2011.
50. **Toomas Vinnal**. Eesti ettevõtete elektritarbimise uurimine ja soovitude väljatöötamine tarbimise optimeerimiseks. 2011.
51. **Veiko Karu**. Potential Usage of Underground Mined Areas in Estonian Oil Shale Deposit. 2012
52. **Zoja Raud**. Research and Development of an Active Learning Technology for University-Level Education in the Field of Electronics and Power Electronics. 2012.
53. **Andrei Blinov**. Research of Switching Properties and Performance Improvement Methods of High-Voltage IGBT vased DC/DC Converters. 2012