



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TOITEKATKESTUSKAHJUDE HINDAMISE MEETODID JA NENDE RAKENDATAVUS EESTI ELEKTRISÜSTEEMIS

OUTAGE COST ASSESSMENT METHODS AND APPLICATION IN ESTONIAN
ELECTRICITY SYSTEM

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kristen Sokk

Üliõpilaskood: 163068AAVM

Juhendaja: doktorant Henri Manninen
dotsent Jako Kilter

Tallinn 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

| | |
|---|----------------------------------|
| <i>Autor:</i> Kristen Sokk | <i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö |
| <i>Töö pealkiri:</i> Toitekatkestuskahjude hindamise meetodid ja nende rakendatavus Eesti elektrisüsteemis | |
| <i>Kuupäev:</i> 11.01.2019 | 77 lk |
| <i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool | |
| <i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond | |
| <i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehatroonika instituut | |
| <i>Töö juhendaja(d):</i> doktorant Henri Manninen, dotsent Jako Kilter | |
| <i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Magistritöö eesmärgiks oli analüüsida maailmas kasutusel olevaid põhivõrkude katkestuskahjude hindamise meetodeid ning koostada Eesti tingimustele sobilik katkestuskahju arvutusmetoodika. Magistritöös anti kõigepealt lühiülevaade tänapäevasest elektrisüsteemist ja võrgus toimunud muutustega seotud probleemidest ning mõjust varustuskindlusele. Selgitati elektrikatkestuste tekkepõhjuseid ning kirjeldati ja toodi näiteid katkestuste võimalikest sotsiaalsetest ja majanduslikest tagajärgedest. Kirjeldati Eesti elektritarbijate struktuuri ning võimalikke kahjusid, mis erinevatele tarbijagrupidel katkestuse tõttu tekkida võivad. Seejärel toodi magistritöös välja maailmas levinud katkestuskahju arvutusmeetodid ning kirjeldati nende meetodite eeliseid ja puuduseid. Meetodite abil arvutati ühes põhivõrgu 110 kV alajaamas toimunud katkestuse kahju suurus. Saadud kahjuhinnanguid võrreldi ning hinnati erinevate meetodite täpsust ja kasutatavust põhivõrgus toimunud katkestuse kahju arvutamisel.</p> <p>Magistritöö tulemusena koostati Eesti põhivõrgu jaoks sobiv katkestuskahju arvutusmetoodika. Metoodika võimaldab rakendada katkestusest põhjustatud kahjude suuruseid võrgu töökindluse hindamiseks, võrguinvesteeringute põhjendamiseks ja arengu plaanimiseks. Koostatud metoodika abil saab hinnata katkestuse majanduslike tagajärgi oluliselt täpsematel alustel, kui siiani on seda tehtud. Selleks kombineeriti maailmas enimlevinud meetodid ühtsesse Eesti tingimusi arvestavasse raamistikku, milles konkreetse meetodi kasutamise määrab algandmete kvaliteet. Metoodika abil võimalikult täpsete tulemuste saamiseks tuleks koostada uuem koormusstruktuur, kus on antud põhivõrgu alajaamadega ühendatud liinide elektritarbimine sektorite kaupa, mille alusel saab teada liini taha ühendatud tarbijasektorite osakaalud, et neid rakendada katkestuskahju arvutamisel.</p> | |
| <i>Märksõnad:</i> katkestuskahju, põhivõrk, andmata energia, varustuskindlus, andmata energiaühiku hind, tarbijate struktuur. | |

ABSTRACT

| | |
|---|--|
| <i>Author:</i> Kristen Sokk | <i>Type of the work:</i> Master Thesis |
| <i>Title:</i> Outage cost assessment methods and application in Estonian electricity system | |
| <i>Date:</i> 11.01.2019 | <i>77 pages</i> |
| <i>University:</i> Tallinn University of Technology | |
| <i>School:</i> School of Engineering | |
| <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics | |
| <i>Supervisor(s) of the thesis:</i> PhD student Henri Manninen, Associate Professor Jako Kilter | |
| <i>Abstract:</i> <p>The purpose of this Thesis was to analyze different outage cost calculation methods used in the world and develop a suitable methodology for outage cost calculation in Estonian transmission system.</p> <p>In this Thesis a brief overview was given about modern electricity system and the problems related to network changes and its impact on reliability of electricity supply. The structure of Estonian electricity consumers and the potential losses that may arise for different consumer groups due to interruption were described.</p> <p>This Thesis presents the most common outage cost assessment methods that are used in many countries and have been thoroughly analyzed in the literature. Methods were tested by calculating cost of an interruption that occurred in one Estonian 110 kV substation. Cost estimates were then compared and the accuracy and usability of different outage cost calculation methods were assessed. As a result of this thesis, outage cost assessment methodology was developed for Estonian transmission system. This methodology can be used to measure damages caused by interruption to evaluate network reliability, justify network investments and plan grid development. Quality of input data is important for each outage cost calculation method. For the most accurate outage cost results, a new customer load structure should be developed. This structure should show each power line's (that is connected to the transmission system substations) electricity consumption by sectors, which will be used to determine the shares of the consumer sectors connected to the line in order to apply them in outage cost calculation.</p> | |
| <i>Keywords:</i> outage cost, transmission grid, cost of energy not supplied, load structure, reliability, energy not served. | |

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

| | |
|-------------------------------|---|
| Lõputöö teema: | Toitekatkestuskahjude hindamise meetodid ja nende rakendatavus Eesti elektrisüsteemis |
| Lõputöö teema inglise keeles: | Outage cost assessment methods and application in Estonian electricity system |
| Üliõpilane: | Kristen Sokk, 163068AAVM |
| Eriala: | Elektroenergeetika |
| Lõputöö liik: | magistritöö |
| Lõputöö juhendaja: | dotsent Jako Kilter, doktorant Henri Manninen |
| Lõputöö ülesande kehtivusaeg: | 01.09.2019 |
| Lõputöö esitamise tähtaeg: | 03.01.2019 |

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Ülekandevõrkude kaheks peamiseks töökindluse näitajaks on andmata jäänud energia hulk ning rikete arv, mis võimaldavad hinnata võrgu töökindlust eelnevate ja järgnevate perioodidega. Samas ei ole võimalik nende baasil selgitada investeringute vajadusi võrguelementidele, sest mõlemal puudub otsene seos tekkinud rikke tegeliku majandusliku kahjuga. Seetõttu kasutatakse investeringute põhjendamiseks fiktiivset suurust, katkestuskahju väärtust, mis hindab võimaliku rikke tagajärjel tekkinud majandusliku kahju, kuid mille määramine sõltub suurel osal kasutatavast metoodikast.

2004. aastal koostas TTÜ Elektroenergeetika Instituut aruande pealkirjaga „Eesti elektritarbijate toitekatkestustest tingitud majandusliku kahju hindamine“, milles kirjeldati erinevate katkestuskahju mõjutegurite väärtusi ja koostati arvutusmetoodika kahjude väljaarvutamiseks. Kahjuks on see aruanne koostatud juba 14 aastat tagasi ning seetõttu tuleks keskenduda sama teema kaasajastamisele, mis hõlmaks endas kirjanduses väljatoodud meetodite analüüsimist ning rakendada neid tänapäevastes tingimustes.

2. Töö eesmärk

Lõputöö eesmärgiks on analüüsida maailmas kasutusel olevaid põhivõrkude katkestuskahjude hindamise meetodeid ning koostada Eesti tingimustele sobilik metoodika.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Otsida kirjanduse analüüsil tuginedes maailmas kasutusel olevaid põhivõrkude katkestuskahjude hindamise meetodeid
- Analüüsida erinevaid meetodikaid ning hinnata nende sobivust Eesti põhivõrgu kontekstis
- Rakendada erinevaid meetodikaid Elering ASi 2017. aasta rikkestatistikale ning hinnata rikest tekkinud majanduslikku kahju
- Teostada analüüs eri meetodikate tulemuste osas Eesti põhivõrgule ning koostada meetodika katkestuskahjude hindamiseks (juba juhtunud rikked, tõenäolised tuleviku rikked)

4. Lähteandmed

Magistritöös kasutatavad lähteandmed kogutakse:

- AS Elering andmebaasidest
- Erialasest kirjandusest
- Interneti andmebaasidest
- Juhendajalt

5. Uurimismeetodid

- Kirjanduse analüüs
- Andmebaaside andmete statistiline analüüs (Eleringi rikete statistika jms)
- Tabelarvutused Excelis

6. Graafiline osa

Tekstijoonised

7. Töö struktuur

Tiitelleht

- Autorideklaratsioon
- Referaadid
- Sisukord
- Lõputöö ülesanne
- Eessõna
- Sissejuhatus
- Üldkirjeldus
 - Elektrisüsteem
 - Elektrikatkestus elektrisüsteemis (Mis on elektrikatkestus, mis on liitumispunkti katkestus)
 - Elektrikatkestuse tagajärjed

- Katkestuskahjud
 - Kirjanduse analüüs
 - Meetodite võrdlus ja analüüs
 - Meetodite sobivus Eesti põhivõrgu konteksti
- Eesti põhivõrgu katkestuskahjude hindamise metoodika
 - Eesti eripärad / süsteem, tarbijate struktuur
 - Metoodika rakendamine tuginedes 2017. aasta rikkeandmetel
 - Tulemuste analüüs ja metoodika koostamine
- Kokkuvõtte ja järeldused
- Kirjanduse loetelu
- Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

- Erialased raamatud
- Teadusartiklid (IEEEExplore, ScienceDirect andmebaasid)
- Aruanded (TTÜ „Eesti elektritarbijate toitekatkestustest tingitud majandusliku kahju hindamine“, CIGRE, ENTSO-e, IEEE)
- Elektriturseadus
- Standardid

9. Töö etapid ja ajakava

20.02.2018-28.02.2018 – vormistuse nõuetega tutvumine, täpne sisukord ja kirjanduse otsimine

28.02.2018-13.03.2018 – kirjandusega töötamine, esimeste peatükkide koostamine („Üldkirjeldus“)

13.03.2018-06.09.2018 – töö põhiosa kirjutamine („Katkestuskahjud“ ja „Eesti põhivõrgu katkestuskahjude hindamise metoodika“)

06.09.2018-20.09.2018 – peatükkide kirjutamise lõpp, meetodite võrdlus ja analüüs

20.09.2018-01.10.2018 – vormistamise lõpetamine, töö lõppvariandi saatmine juhendajale

01.10.2018-10.12.2018 – paranduste tegemine ja töö retsensendile saatmine

17.12.2018 – töö deklareerimise tähtaeg OIS-s

SISUKORD

| | |
|--|----|
| LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE..... | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| LÕPUTÖÖ ÜLESANNE | 5 |
| EESSÕNA..... | 10 |
| SISSEJUHATUS | 11 |
| 1. TÄNAPÄEVA ELEKTRISÜSTEEM..... | 13 |
| 1.1 Elektrisüsteem ja selles toimuvad arengud | 13 |
| 1.2 Elektrikatkestuse tõttu tekkinud kahjud | 16 |
| 1.3 Töökindluse väärtus | 20 |
| 2. KATKESTUSKAHJU MAKSUMUSE ARVUTAMINE..... | 24 |
| 2.1 Eesti elektritarbijate struktuur | 24 |
| 2.1.1 Kodutarbijate sektor..... | 26 |
| 2.1.2 Äri- ja avaliku sektori tarbijad | 27 |
| 2.1.3 Tööstussektor | 29 |
| 2.1.4 Põllumajandussektor..... | 30 |
| 2.2 Toimunud katkestusjuhtumite analüüs | 31 |
| 2.3 Kliendiuuringutel põhinevad meetodid | 32 |
| 2.3.1 Kliendiuuringud | 32 |
| 2.3.2 Katkestuskahju erinäitajad..... | 35 |
| 2.4 Analüütilised meetodid | 41 |
| 2.5 Katkestuskahju arvutamine varustuskindluse piirkondade järgi | 43 |
| 3. METOODIKA RAKENDAMINE EESTI PÕHIVÕRGUS | 46 |
| 3.1 Kliendiuuringute meetodika..... | 46 |
| 3.1.1 Andmata energia hind (CENS) | 50 |
| 3.1.2 Katkestuskulu (COC) | 53 |
| 3.1.3 Andmata energia hind (VOLL ja IEAR) | 54 |
| 3.2 Analüütilised meetodid | 55 |
| 3.2.1 Lisandväärtus..... | 55 |
| 3.2.2 Majapidamiste sissetulek | 57 |
| 3.2.3 Leibkonna sissetulek | 59 |
| 3.2.4 Valitud alajaama katkestuskahju analüütilise meetodi abil..... | 60 |
| 3.2.5 Varustuskindluse piirkonnad..... | 61 |
| 3.3 Katkestuskahju hinnangute võrdlus | 61 |

| | |
|--|----|
| 3.4 Katkestuskahju määramise protsess..... | 65 |
| KOKKUVÕTE | 69 |
| SUMMARY | 72 |
| KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU | 75 |

EESSÕNA

Lõputöö teemal „Toitekatkestuskahjude hindamise meetodid ja nende rakendatavus Eesti elektrisüsteemis“ kirjutati põhivõrgu ettevõtte Elering AS algatusel. Lõputöö teema täpsem sõnastus pärineb töö juhendajalt Henri Manninenilt. Täna juhendajat toetava suhtumise eest.

Lähteandmed võeti Elering AS andmebaasidest, Statistikaameti andmebaasidest ja 2003. aastal TTÜ Elektroenergeetika Instituudi poolt koostatud aruandest pealkirjaga „Eesti elektritarbijate toitekatkestustest tingitud majandusliku kahju hindamine“. Töö teoreetiline osa pärineb maailmas teostatud katkestuskahju teemalistest uuringutest, teadusartiklitest, standarditest ja erialasest kirjandusest. Magistritöös analüüsiti maailmas kasutusel olevaid põhivõrkude katkestuskahjude hindamise meetodeid. Meetodeid rakendati ühes Eesti põhivõrgu 110 kV alajaamas toimunud katkestusel ning töö tulemusena koostati Eesti tingimustele sobilik katkestuskahju arvutusmetoodika.

Autori kontaktandmed: kristen.kallus@gmail.com

SISSEJUHATUS

Kaasaegse ühiskonna normaalseks funktsioneerimiseks on hädavajalik töö- ja häiringukindel elektrisüsteem. Eesti 110-330 kV elektrivõrk loodi suures osas aastatel 1955-1985 eesmärgiga tagada Peterburi ja Riia elektriga varustatus. Hiljem muutusid linnastumise tõttu põhilisteks tarbimiskeskusteks Tallinn, Tartu ja Pärnu ning seetõttu laienes ka põhivõrk nendesse piirkondadesse. Praegu kuulub Eesti sünkroonselt töötavasse ühendsüsteemi BRELL, millesse kuuluvad lisaks Eestile veel Venemaa, Valgevene, Läti ja Leedu. Siseriiklikke võimsusvoogude liikumine toimub Narva- Tallinn ning Narva- Tartu suunal. Narva poolt Tallinna suunas liikuv võimsusvoog toidab põhilist tarbimispiirkonda ehk Harjumaad ja Tallinna. Narva- Tartu suund täidab ekspordi ja transiidi eesmärki Venemaalt Lätisse, Leetu ja Kaliningradi. Baltikumi seovad Euroopa elektrituruga alalisvooluühendused EstLink1 ja EstLink 2, mis ühendavad Eesti ja Soome. Tulevikus on plaanis Eesti Venemaa elektrisüsteemist desünkroniseeruda ja sünkroniseeruda Euroopa elektrisüsteemiga (kas Põhjamaade või Mandri Euroopa süsteemiga). Seega toimub võimsusvoogude ümbersuunamine Euroopa suunas. Selleks rajatakse uusi ülekandeliine, näiteks Eesti-Läti kolmas ühendus ja plaanitakse neljandat ühendust ning tugevdatakse ja lisatakse juurde siseühendusi. Selliste suurte muutuste juures peab säilima elektrisüsteemi kõrge varustuskindluse tase. [1] Lisaks peab elektrisüsteemi pidevalt hooldama. Näiteks plaanitakse demonteerida viimane Eesti elektrisüsteemi 220 kV õhuliin, mis on 55 aastat vana ja jõudnud amortiseerumisperioodi lõpuni. Eesti elektrisüsteemile avaldab suurt mõju ka Euroopa Liidu kliimapoliitika, mille üheks eesmärgiks on kasvuhoonegaaside emissioonide vähendamine. Sel põhjusel vähendatakse lähiajal Eesti suurimate elektrijaamade ehk Eesti ja Balti elektrijaamade tootmist, kuna nimetatud jaamad toodavad elektrit põlevkivist, mille käigus eraldub arvestatav kogus süsihappegaasi (2015. aastal oli CO₂ emissioon kümme miljonit tonni Eesti Energia andmetel). Aastaks 2025 suletakse Eesti elektrijaamas 489 MW jagu tootmisvõimsust ja Balti elektrijaamas 130 MW [2]. Kliimapoliitika propageerib tugevalt ka taastuvenergia osakaalu suurendamist, mistõttu on võrku lisandunud palju tuuleelektrijaamu, põhiliselt Lääne-Eesti ja Põhja-Eesti rannikualadele ning areneb biokütuste abil elektri ja soojuse koostootmine. [3]

Ülalmainitud muutusi arvesse võttes on vajalik olemasolevat elektrivõrku järjepidevalt arendada. See tähendab omakorda suuri investeeringuid. Arengu plaanimisel ja projekteerimisel ning jooksva käidu juhtimisel on vaja säilitada kõrge varustuskindluse tase. Kõrge elektrivarustuskindluse tase on üks olulisemaid kriteeriume, sest suurte piirkondade elektrikatkestusel on tõsised tagajärjed, näiteks katkeb ettevõtete äritegevus, tööstustes katkeb tootmine, haiglate puhul satuvad ohtu inimesed jne. Katkestusest põhjustatud kahjum võib ületada elektri hinna mitmekümne kordselt. [4]

Näitena saab tuua 14.08.2003 toimunud katkestuse, mis hõlmas endas Põhja-Ameerika Suure Järvistu piirkonda, Ontariot ja New Yorki. Katkestus kestis kaks päeva ja tekkinud kahjude kogumaksumuseks USA-s oli erinevatel hinnangutel 4-10 miljardit dollarit, millest suurima kahju moodustasid saamata jäänud kasum ja kaotatud sissetulekud 3,1-5,2 miljardi väärtuses. Toidu ja muude kaupade rikenemise tõttu tekkinud kahjud jäid vahemikku 380- 940 miljonit ning riigiasutustele tekkinud lisakulud, nagu ületunnid, esmaabiteenused jne hinnati 15-100 miljonile dollarile. Kanada teatel langes sisemajanduse koguprodukt augustis 0,7%. [5] Seega sõltub elektrisüsteemi varustuskindlusest riigi majanduse toimimine ning elektrisüsteemi tehtavates investeeringutes tuleb lisaks seadmete hinnale ja käidukuludele arvestada varustuskindluse väärtust. Ehk vajalik on saavutada optimaalne varustuskindluse tase, millega on leitud kompromiss varustuskindluse taseme ja investeeringute maksumuse vahel. [4] Elektrivõrgu varustuskindlust on lihtne hinnata- ülekandevõrkudes on varustuskindluse põhiliseks näitajaks andmata energiakogus ja rikete arv. Paraku puudub nendel näitajatel seos elektrikatkestuse poolt tekitatud majandusliku kahjuga.

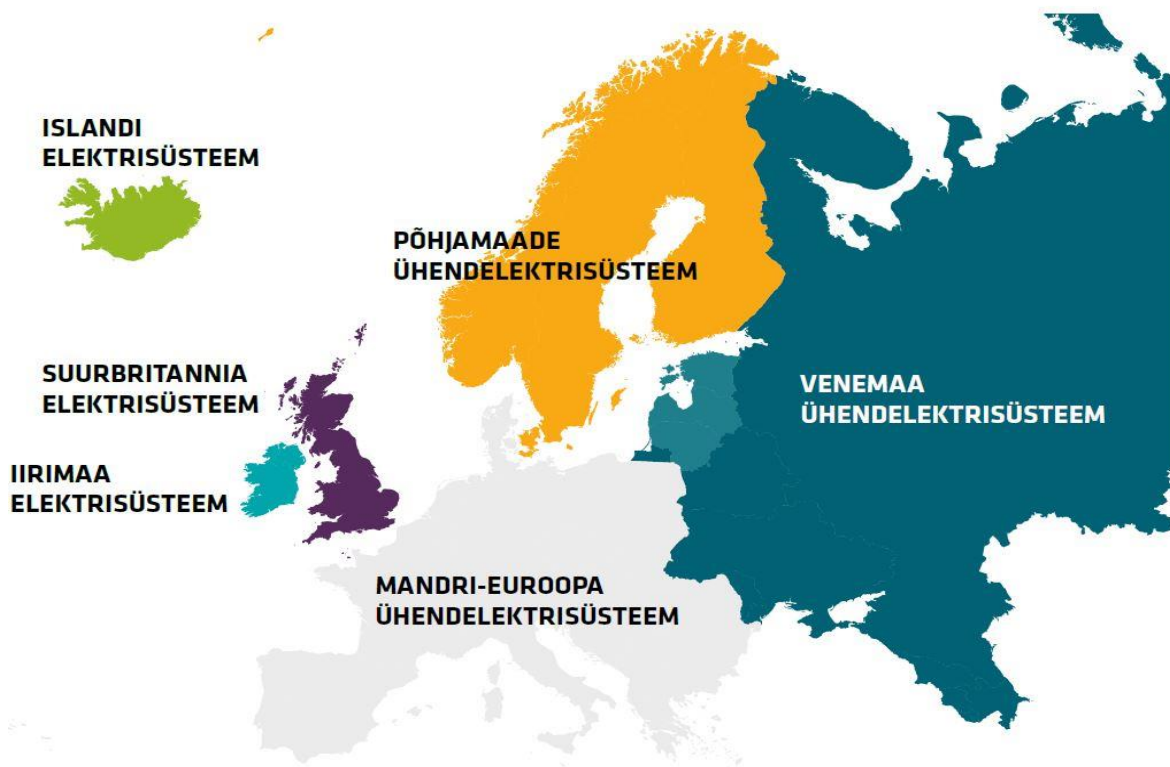
Katkestusest põhjustatud majandusliku kahju ehk katkestuskahju väärtuse leidmiseks on maailmas kasutusel mitmeid erinevaid meetodeid, mida käesolevas töös analüüsitakse ja ühe põhivõrgus toimunud katkestuse näitel rakendatakse. Magistritöös selgitatakse kõigepealt tänapäevase elektrisüsteemi ehitust, selle stabiilsuse kriteeriume ning võrgus toimunud muutustega seotud probleemidest ja kuidas need varustuskindlust mõjutavad. Kirjeldatakse ja tuuakse näiteid süsteemis esineda võivate katkestuste sotsiaalsetest ja majanduslikest tagajärgedest. Kirjeldatakse Eesti elektritarbijate struktuuri ning tarbimise iseloomu ja võimalikke kahjusid, mis erinevatele tarbijagruppidele katkestuse tõttu tekkida võivad. Lisaks tuuakse töös välja erinevad maailmas kasutusel olevad meetodid katkestuskahju väärtuse arvutamiseks. Analüüsitakse meetodite eeliseid ja kitsaskohti ning sobivust erinevate tarbijagruppide kahjude arvutamiseks. Näitena rakendatakse neid meetodeid Eesti põhivõrgus toimunud katkestuse kahju arvutamiseks. Erinevate meetodite abil leitud kahjuhinnanguid võrreldakse ja antakse hinnang meetodite kasutatavusele ja täpsusele põhivõrgus toimunud katkestuse kahju arvutamisel. Magistritöö tulemusena koostati Eesti põhivõrgu jaoks sobiv katkestuskahju arvutusmetoodika.

1. TÄNAPÄEVA ELEKTRISÜSTEEM

Selleks, et mõista toitekatkestuskahjude olulisust, on vaja kõigepealt tutvustada elektrisüsteemi tervikuna, selles esineda võivate häiringute ulatust ja mõju ning mida see majanduslikust ja sotsiaalsest küljest endaga kaasa toob. Peatükis 1.1 kirjeldatakse lühidalt tänapäevast elektrisüsteemi, selle nõrkuseid ja tugevusi ning süsteemis toimuvaid arenguid. Peatükis 1.2 selgitatakse elektrikatkestuste tekkepõhjuseid ja tagajärgi erinevatele tarbijagruppidele ning tuuakse mõned näited maailmas esinenud tõsisematest katkestustest. Peatükis 1.3 räägitakse lähemalt võrgu töökindlusest ja selle väärtusest.

1.1 Elektrisüsteem ja selles toimuvad arengud

Elektrisüsteemi moodustavad elektrijaamad ja elektritarbijad ning neid omavahel ühendav elektrivõrk. Tänapäeval on naaberriikide elektrisüsteemid omavahel ühenduses ja sel moel tekkinud suuri süsteeme nimetatakse ühendsüsteemideks. [6] Järgneval joonisel 1.1 on kujutatud mitmest ühendsüsteemist koosnevat Euroopa elektrisüsteemi:



Joonis 1.1 Euroopa ühendsüsteemid [1]

Suurtel süsteemidel on mitmeid eeliseid. Elektrisüsteemide ühendamine vähendab kulusid ja tõstab töökindlust, näiteks elektrijaama rikke korral on võimalik tarbijaid toita teisest sama süsteemi jaamast [6]. Süsteemide ühendamise majanduslik tulu on suurem, kui ühendamiseks rajatavate vajalike elementide (nt. alajaamad, liinid) kulud. Ühendsüsteemides on võimalik kasutada suurema nimivõimsusega seadmeid, mistõttu tulevad kulud energiaühiku kohta väiksemad. Ühendsüsteemis toimub ka elektrijaamade vaheline koormuse jaotamine, et jaamade töö oleks võimalikult optimaalne. [7] Ühendatud süsteemide korral väheneb vajaminev reserv, sest ühendsüsteemi liikmel on vajadusel võimalik pakkuda oma reservi teisele liikmele [6]. Näitena saab tuua 10. septembri aastal 2014, mil lülitus rikke tõttu välja Eestit ja Soomet ühendav alalisvooluühendus EstLink 2 ja hiljem ka EstLink 1. Võimsuse puudujäägi katmiseks osutas abi Valgevene energiasüsteem, kust edastati Eestisse elektrienergiat kella kümnest hommikul kuni südaööni kokku 1400 MWh. Varasemalt, aastal 2008, oli Eesti aidanud Valgevenet, kui toimus rike BelGRES elektrijaamas. [8] Suured ühendsüsteemid on ka eelduseks vabale elektriturule ehk elektrit ostetakse seal, kus on odavam ja see eeldab, et elektrienergiat on võimalik edastada suurte vahemaade taha. Elektrituru arenemisel muutuvad arvatavasti märgatavalt ka ülekantavad võimsused. Sageduse hoidmiseks ja avariisituatsioonide jaoks vajalik reserv võib paikneda seal, kus hind on madalam. [7] Ühendsüsteemide eeliseks on veel võimalus kasutada naabersüsteemide taastuvenergiat ja säästa seeläbi keskkonda, selle asemel, et toota elektrienergiat mõne taastumatu allika abil. Süsteemide vaheline koostöö suurendab ka investeeringuid vaesematesse riikidesse, loob uusi töökohti ja soodustab riikidevahelist äritegevust. [8]

Ühendsüsteemidel on lisaks nimetatud eelistele ka olulisi miinuseid. Süsteemide ühendamiseks peab vähem kaasaegseid süsteeme uuendama, et need vastaksid nõuetele. Personal peab olema professionaalne ja ajakohaste teadmistega. Süsteemide ühendamine hõlmab endas poliitilist külge: riikidevahelised poliitilised suhted võivad muutuda ning kogu töö ja investeeringud võivad osutuda edutuks. [8] Kuna ühendsüsteemid on väga suured ehk elemente on palju ja need on omavahel tihedalt seotud, siis võib avariiolukord hakata laviinitaolise protsessina levima ning tagajärgede likvideerimine on äärmiselt kallis, keeruline ja aeganõudev. Seega on väga oluline süsteemi stabiilsuse ehk generaatorite sünkroontöö ja vajaliku pingetaseme säilitamine. Generaatorid võivad sünkronismi kaotada kõigest mõne sekundiga ja tulemuseks võib olla saartalitluse teke ehk süsteem jaotub mitmeks erineva sagedusega alasüsteemideks. Sagedus peab olema terves energiasüsteemis sama (nt. Euroopa sünkroonalas on sagedus 50 Hz) ja selleks on vaja, et elektrienergia tarbimine ja tootmine oleksid igal ajahetkel tasakaalus. Sageduse hoidmiseks tõstetakse või vähendatakse generaatorite võimsust või lülitatakse koormust välja. Süsteemis on

hädaolukorraks kuumreserv ehk osa generaatoritest on normaalolukorras alakoormatud. Lisaks generaatorite sünkroontööle on väga oluline pingestabiilsus ehk pinge peab olema elektrivõrgu sõlmedes lubatud piirides. Erinevalt sagedusest on pinge lokaalse iseloomuga ja sõltub reaktiivvõimsuste bilansist. Näiteks kui mõnesse sõlme liigub rohkem reaktiivvõimsust, siis peaks ka pinge kasvama. Juhul, kui pinge ei kasva, on tegu pinge mittestabiilsusega. Kui pinge mittestabiilsus laieneb teistesse süsteemiosadesse, siis on tegu pinge kollapsiga. Olukord, mis lõpeb pinge mittestabiilsusega, võib kesta mõned sekundid kuni mõnikümmend minutit. Selleks, et pingestabiilsus oleks süsteemis tagatud, peab võrgus olema piisav reaktiivvõimsuse varu ja koordineeritud pinge reguleerimisseadmete omavaheline töö. [7]

Tänapäevastes elektrisüsteemides on pingestabiilsusel järjest suurem rõhk, sest elektrivõrgud muutuvad üha keerukamateks ja suuremateks, riikidevahelisi ühendusi ehitatakse juurde, esineb elektrit genereerivate seadmete ja ülekandeseadmete väljalülitumisi. [7] Koormus võrgule kasvab, näiteks aastaks 2030 prognoositakse Tallinna piirkonnas põhivõrgu alajaamade summaarseks tippkoormuseks 940-1390 MW. Aastal 2010 oli summaarseks tippkoormuseks 590 MW, seega peaks 20 aasta jooksul Tallinna piirkonna koormus kahekordistuma. [8] Kuna elektriturg on avatud, siis pole enam nii oluline, kus elektrit toodetakse vaid oluline on ülekande füüsiline võimalikkus. Seega on ikkagi vaja ülekandevõimalusi võrku lisada ja olemasolevat võrku tugevdada. [7] Näiteks Eestis on praegu käimas Eesti-Läti kolmanda ühenduse ehitamise projekt, rekonstrueeritakse ka juba olemasolevad Eesti-Läti 330 kV liinid. Aastal 2016 juba paigaldati Tsirguliina alajaama ja Eesti-Läti piiri vahelisele liinilõigule kõrgtemperatuuriline komposiitsüdamikuga juhe, mille abil on võimalik üle kanda suuremaid võimsusvooge. [9]

Võrku mõjutab ka taastuvenergiaallikate osakaalu kiire kasv tänu Euroopa Liidu energia- ja kliimapoliitikale. Väga laialdaselt on levinud tuuleenergia kasutus ja seal on probleemiks allika stohhastiline iseloom, mis eeldab piisava reservvõimsuse olemasolu, kui ilm on tuulevaikne või tuul on liiga tugev. Seega peab süsteemis olema elektrijaamu, mida saab reguleerida vastavalt tuulejaamade poolt toodetava võimsuse muutusele. Hea variant on elektrituulikute kompenseerimiseks kasutada hüdroelektrijaamu, kuna need sobivad nii tipp-, kui baaskoormuse jaoks ja hüdroagregaadi võimsus on vastava veeressursi olemasolul nullist kuni saja protsendini kiiresti muudetav. [6] Taastuvenergia mõjutab mitte ainult elektrivõrku vaid ka elektriturgu. Näiteks on üheks probleemiks riikides erinevad taastuvenergia arendamise meetmed, toetussüsteemid ja põhimõtted ehk mõne riigi tootjad võivad sattuda ebavõrdsesse turupositsiooni. [10]

Jaotusvõrgus kogub populaarsust veel hajatootmine ehk väiksema võimsusega jaamad, mis kasutavad taastuvenergiaallikad nagu päike ja tuul, lisanduvad veel hüdrojaamad, soojusjaamad ja koostootmisjaamad [7]. Kuna hajatootmine eeldab, et võimsusvood on kahesuunalised, siis põhjustab see probleeme just jaotusvõrgus, sest see sai loodud elektri tarbijateni viimiseks, mitte selle genereerimiseks. Näitena võib tuua olukorra, kus ühes piirkonnas on hajatootjate poolt genereeritud toodang suurem kui tarbimine. Sel juhul tuleb toodetud elektrienergia saata teise piirkonda, kus see ära tarbitakse, mistõttu võivad tekkida suured ülekandevoovad ühest võrguosast teise ning mõningatel liinidel võib tekkida ülekoormus. Selline olukord võib tekitada häiringuid ka põhivõrgus, mis on ohuks kogu elektrisüsteemi stabiilsusele. Seega on vajalikud investeeringud jaotusvõrgu ümberehituseks. Seoses kahesuunalisuste võimsusvoogudega tekivad elektrivõrgus kõrgemad nõudmised kaitse-, juhtimis- ja automaatikaseadmetele. Samuti ei esitata hajatootmiseseadmete poolt toodetud elektri kvaliteedile nii kõrgeid nõudmisi, kui suureenergeetikas. [11]

1.2 Elektrikatkestuse tõttu tekkinud kahjud

Elektrikatkestus on standardi EVS-EN 50160:2010 järgi defineeritud kui seisund, milles pinge on liitumispunktis alla 5% etalonpingest. Sama standard liigitab toitekatkestused plaaniliseks ja avariiliseks. Plaanilise toitekatkestuse korral on elektrivõrgu kasutajaid katkestusest informeeritud ehk toimub näiteks võrgu remont, hooldus või ehitatakse uut võrku. Avariilise toitekatkestuse põhjuseks on püsiva või mööduva loomuga rikked, mille põhjustavad tavaliselt välised sündmused, seadmete tõrked või häiringud. [12] Elektrikatkestusi põhjustavad väga tihti ilmastikunähtused, näiteks tugeva tuulega liinidele langenud puud, äike, talvel õhuliinide jäätumine- liini ümber koguneb raske jääkiht ja liin ei kannata mehaaniliselt koormust välja, põhjamaades on probleemiks laiaulatuslikud katkestused lumetormide tõttu. Rikkeid tekitavad veel isolatsiooni läbilöögid, lülitite rikked (võimsuslülitid, lahklülitid), releekaitse vead, inimfaktorist tingitud vead (näiteks kaevetöödel kopaga maakaabli vigastamine, valed lülitused), vananenud seadmed. Loomad põhjustavad samuti võrgus katkestusi oma tegevustega ja pingestatud osadele ronimisega, kus nad hukuvad. Palju rikkeid põhjustavad linnud, kes ehitavad mastidele pesi ja tassivad pesasse traate ja muud prahti, mis tekitab ülelööki. Pesad soodustavad väljaheidete sattumist isolaatorketile, mistõttu võib ka tekkida ülelööki. Sobiv näide on Eesti põhivõrgu 2016. aasta statistika, mille kohaselt jäi Eleringi võrgus tekkinud rikete tõttu andmata 67,3 MWh energiat, millest 36 MWh oli seadmete vananemisest põhjustatud andmata energia. 21,2 MWh andmata jäänud energiakoguse põhjustas rike Ida-Virumaa alajaamas. Liinidele langenud puude pärast jäi andmata 15 MWh ja

tegevusi ringi planeerida. Katkestuse kestusel on oluline mõju tagajärgedele. Kui katkestuse kestuseks on ainult sekund, siis tööstuses katkevad juba tundlikud protsessid ja infosüsteemides on võimalik andmekadu. Minutilise katkestuse puhul võivad tööstuslikud protsessid katkeda. [15] 15 minutilise katkestusel lõpetavad kauplused toimimise ja inimeste tavapärased tegevused on häiritud. Mitmetunnistel katkestustel on tööstustel suured kahjud, mobiilne side on häiritud. 24 tunnilisel katkestusel veevarustus lakkab, kui juhtub olema talv, siis jahtuvad ehitised. Mitmepäevaste katkestuste puhul lõpetab ühiskond normaalse toimimise- koolid, töökohad suletakse, tööstus ei toimi. Majanduslikud kahjud ulatuvad nii laiaulatuslikul katkestusel siis juba miljonitesse eurodesse. [7]

Mõningad näited suurtest süsteemiavariidest:

- 4. november 2006, Saksamaa.

Kell 21.39 lülitati E.ON NETZ poolt välja kaks 380 kV kõrgepingeliini selleks, et laev pääseks nende alt läbi. Lülitus põhjustas omakorda ühe teise töös oleva kõrgepingeliini ülekoormuse. Dispetser otsustas seepeale ülekoormatud liiniga alajaamas ühendada kaks eraldi töötanud latisektsiooni, mis põhjustas omakorda lülituste ja ülekoormuste laviini, mistõttu jagunes UCTE ühendsüsteem kolmeks erineva sagedusega alamsüsteemiks. Häiring arenes 20 sekundiga. Ühendsüsteemi idaosas tekkis suur võimsuse puudujääk ja selle tulemuseks oli 15 miljoni tarbija väljalülitumine. Sageduste erinevus alamsüsteemide vahel oli suur ja mitmed katsed süsteemi uuesti sünkroniseerida ei õnnestunud. Olukorda halvendasid tuuleturbiinid ja koostootmisjaamad, mis lülitusid sageduse langemisel välja ja kui sagedus tõusis, siis lülitusid nad automaatselt sisse tagasi. See suurendas alamsüsteemides sageduse erinevust. Kuna tuulikud ja koostootmisjaamad olid ühendatud jaotusvõrku, siis põhivõrgu dispetseritel puudus nende üle kontroll. Ühendsüsteemi normaaltöö suudeti taastada kell 23.57. Kahe tunni jooksul oli toiteta 5 miljonit Prantsusmaa tarbijat, samuti oli Saksamaal toiteta mitu miljonit tarbijat, Belgias, Hollandis, Hispaanias ja Itaalias olid toiteta paarsada tuhat tarbijat. Raudteetranspordis olid pikad viivitused, metroos evakueeriti inimesed. Täpset infot katkestuse kogumaksumuse kohta pole saadaval, aga näiteks ainuüksi restoranide ja baaride riknenud toit ja saamata jäänud tulu oli 139 miljonit dollarit [5]. [7]

- 28. september 2003, Itaalia

Süsteemiavarii algas ühest Šveitsi ja Itaalia vahelisest ülekandeliinist, mis lülitus välja ülekuumenemise tõttu (ülekuumenemine suurendab liini ripet ja seetõttu puudutas liini puulatvu, mis polnud liinide alt ära koristatud). Selle tulemusena kuumentes teine

ülekanedeliin ka üle ja puudutas samamoodi puulatvu ning lülitus välja. Üle koormusid ülejäänud Šveitsi-Itaalia liinid ja veel neli Prantsusmaa- Itaalia vahelist liini. Kuna reaktiivvõimsust oli liiga vähe, siis pinget taastada ei suudetud ja Itaalia elektrisüsteem kustus. Avarii laienemine toimus 28 minutiga. Süsteemi taastamiseks kulus 24 tundi. Katkestusest olid mõjutatud 60 miljonit inimest, metroo oli vaja evakueerida, rongides olid lõksus 30 000 inimest. [7] Andmata energia oli umbes 200 000 MWh ja katkestuse maksumuseks oli hinnanguliselt 1,2 miljardit eurot [5].

- 14.august 2003, Suur Järvistu, Ontario ja New York
Kaks tundi enne suure avarii algust lülitati üks 345 kV liin remonttööde jaoks välja. Järgnevalt lülitati releekaitse Suure Järvistu piirkonnas ka teised 345 kV liinid välja ülekoormuse ja süsteemi võnkumise tõttu. Oma osa oli ka liinide alt koristamata puudel, mille tõttu tekkis vähemalt ühel korral lühis, kui liinijuhtmed puude latvu puudutasid. Avarii laienes kaskaadselt. Toite kaotas 61800 MW jagu tarbijaid ehk umbkaudu 50 miljonit inimest. 16 tunni pärast suudeti taastada toide 48 800 MW ulatuses, New York oli elektrita 29 tundi. Normaalne olukord suudeti saavutada alles peale kahte päeva. Andmata energia oli umbes 350 000 MWh ja katkestuse maksumus jäi 4-10 miljardi dollari vahele [5]. Kustus 263 elektrijaama. Avarii piirkond hõlmas nelja süsteemioperaatorit. Hilisem analüüs näitas lisaks koristamata jäetud liinialustele, et süsteemioperaatorite vaheline koostöö oli ebapiisav, puudused ilmsesid alarmide käsitlemises operatiivjuhtimissüsteemides. Oluline roll oli ka ühel süsteemioperaatoril, kelle hallatavas piirkonnas avarii algas, aga kelle operatiivjuhtimissüsteem ei olnud täielikult töös ning seetõttu polnud võimalik liinide väljalülitumisi jälgida. [7]

Eelnevatest näidetest on näha, et ulatuslikud süsteemiavariid algavad tavaliselt lokaalsest häiringust, mis pole eriti märkimisväärne ühendsüsteemi mõistes. Hullemal juhul hakkabki lokaalne häiring süsteemis kaskaadselt laienema kuni tulemuseks on süsteemisosa või terve süsteemi mittestabiilsus ja katkestuskahjud on ülimalt suured. Näidetest on näha, kui tähtis roll on võrgu hooldusel ja hoolikal planeerimisel, et tagatud oleks nõutav töökindluse tase. [13] Eestis pole süsteemi kustumist juhtunud, aga on toimunud suuri piirkondlikke avariisid, mis on juhtunud tormide tõttu. Viimati oli selline torm 2011 aasta jõuludel, kus põhivõrgu liinidele langes 17 puud ja suurematest piirkondadest jäi kolmeks tunniks toiteta Viljandi ja seitsmeks tunniks Väike-Maarja. [16]

Katkestuse tagajärjed võivad olla nii sotsiaalsed kui majanduslikud, otsesed ja kaudsed, mõjud võivad kesta lühikest aega või pikemalt. Tagajärjed sõltuvad ka sellest kas katkestus on laiaulatuslik

või lokaalne. Otseseid mõjud on selgelt põhjustatud katkestusest ja neid on lihtne kindlaks teha ja rahaliselt hinnata, kuigi osade mõjude puhul tekib väärtuse hindamisel probleeme (näiteks kas inimelu on võimalik üldse rahaliselt hinnata). Raskem on kindlaks teha ja seejärel hinnata kaudseid mõjusid. Kaudsed kulud tulevad välja pikema aja jooksul ja nende seos katkestusega ei pruugi olla nii selge, näiteks kulud tagavarasüsteemide paigaldamiseks, äritegevuse ümberpaiknemine jne. Samuti on raske liigitada kaudseid mõjusid majanduslikeks või sotsiaalseteks, näiteks kuritegevus katkestuse ajal. Tagajärgede ulatus, pika- või lühiajalisus võib sõltuda ka võrgu konfiguratsioonist. Kahjud on võimalik jagada tarbijate järgi kategooriateks arvestades tarbimise eripärasid, näiteks tarbitud energiakogus, tarbimise kellaeg jne. Näitena saab tuua tööstustarbijad, kommertstarbijad ja kodutarbijad. Tööstus- ja kommertstarbijate jaoks on otsesed kahjud saamata jäänud tulu, tööjõu kulud, kapital, tootmise seisakud ja taaskäivitamise aeg, andmekadu, negatiivsed mõjud või kahjustused vahetoodangule. Kaudseteks kahjudeks on viivitusega tarne; kui tootja toodab lõpptoodangut, siis selle toodangu kadu mõjutab omakorda lõpptarbijat negatiivselt. Kodutarbijatele on otsesteks kuludeks näiteks rahalised kulud nagu riknenud toit, andmekadu, piiratud tegevused katkestuse ajal, kaotatud vaba aeg, ärritus, ruumide ja kinnisvara kahjustused, ohutuse ja tervise aspekt. Kaudseteks kahjudeks näiteks kaupade ostmise piirangud. Lisaks kahjude kuludele on veel võimalikud ennetavad kulutused, milleks on tagavara generaatorid, patareid jne ning investeeringud võrgu hooldusesse maksude abil (võrgu tariifid). [17]

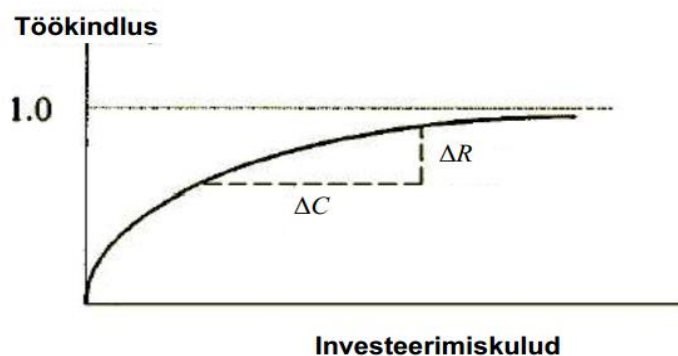
1.3 Töökindluse väärtus

On mõisteta, et elektrisüsteemi kaasajastamisel (süsteemide ühendamine suurteks ühendsüsteemideks, ehitatakse rohkem välisühendusi, lisanduvad muutliku loomuga taastuvenergiaallikad, koormus võrgule kasvab) suurenevad ka investeeringud. Eesmärgiks on tagada tarbijatele nõutav töökindlus ja kvaliteet, hoides selleks tehtavad kulutused minimaalsed. Töökindlus on üks olulisem kriteerium käidu juhtimisel, võrgu planeerimisel ja projekteerimisel. Võrgu töökindluseks (ehk varustuskindluseks) nimetatakse elektrisüsteemi võimet täita elektrivarustuse ülesandeid minimaalsete katkestustega ja võimalikult pika aja jooksul. [7] Töökindlus on määratud võrgu objektide (näiteks liin) ja nende juurde kuuluvate osade (näiteks lülitusseadmed jne) töökindlusega, elektrivõrgu konfiguratsiooniga, reserveerimise võimalustega, talitluse kriteeriumitega (näiteks liini maksimaalne edastusvõime ja kui palju liini koormatakse) ning objektide kasutusega [13]. Seevastu häiringukindluse all mõeldakse elektrisüsteemi võimet häiringute mõjul normaaltalitus säilitada ehk säilitada süsteemi stabiilsus. Normaaltalitus võib ainult lühiajaliselt häiritud olla (automaatikaseadmete töö ajaks) [13]. Häiringukindlus ja stabiilsus

on ajas muutuvad, aga töökindlus kirjeldab pikemat ajavahemikku, näiteks aastat. Häiringukindluse ja töökindluse tagamine algab talitluse planeerimisest, et minimeerida häiringute mõju talitlusele. Elektrisüsteemi töökindlust ja häiringukindlust iseloomustatakse erinevate näitajatega, nt. katkestuste sagedus, katkestuste keskmine kestus, katkestusteta toite aeg. Nende näitajate abil saab väljendada elektrivarustuse kvaliteeti, aga mitte häiringute mõju ja tagajärgede ulatust. [7]

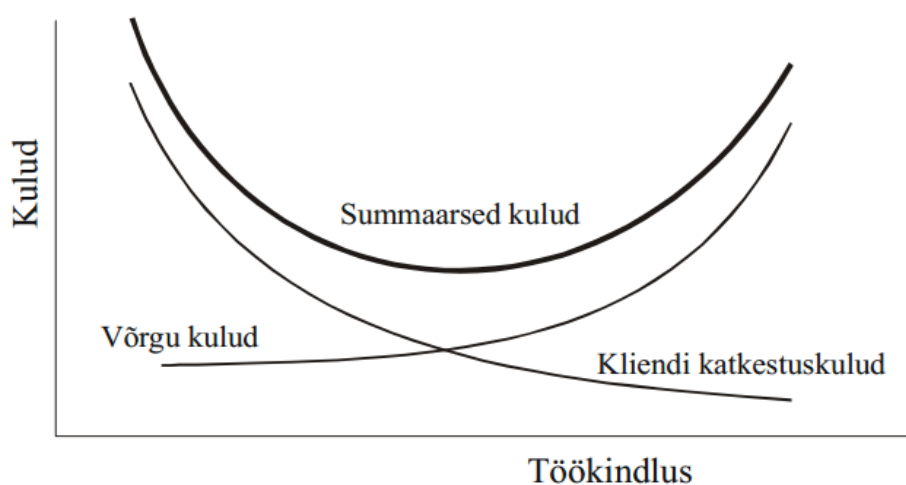
Viimasel ajal on hakatud töökindlusele järjest suuremat rõhku panema, sest tarbijate elektriseadmed on muutunud palju keerulisemaks, ühiskonnas on rõhk efektiivsusel ja seega on ka tarbijate ootused elektritoite katkematusel kõrgemaks tõusnud. Näitena saab tuua taaslülitusautomaatikast põhjustatud lühikatkestused, mida umbes 15 aastat tagasi peeti tühisteks, aga tänapäeval võivad need põhjustada häireid arvutites ja tööstuslikes protsessides. Elektriettevõtelt nõutakse varustuskindluse aruandeid ja ka äri- ning tööstuskliendid uurivad enne liitumist töökindluse näitajaid. Kehtestatud on trahvid elektrivarustajatele, kui nad ei suuda täita nõutavat töökindlust. Seega on vajalik võrgu planeerimisel ja investeeringute tegemisel arvestada lisaks seadmete hinnale ja käidukuludele töökindluse väärtusega. Töökindluse nõudest tuleneb ka võrgu konfiguratsioon. Töökindluse kulu ongi nõutava töökindluse taseme hoidmiseks tehtavad investeeringud, püsikulud jms ning töökindluse väärtus on nendest investeeringutest saadav rahaline kasu nii tarbijale kui varustajale. Tarbijad on alati huvitatud kõrgemast töökindlusest. Elektriettevõtetele seonduv kõrgem töökindlus suuremate kulutustega, mis ei pruugi nende vaatepunktist majanduslikult kõige tasuvam olla. Sellegi poolest on elektriettevõtetal huvi töökindlust tõsta, sest lisaks heale mainele on vaja täita seadusega kehtestatud kvaliteedinõuded ja klientidega sõlmitud lepingutingimusi, vastasel juhul esitatakse võrguettevõttele suured kahjunõuded, mis ületavad töökindlusesse tehtavate investeeringute summa. [13]

Töökindluse ja investeeringukulude omavahelist seost kirjeldab hästi joonis 1.2, kus ΔR on töökindluse juurdekasv ning ΔC on selle juurdekasvu teostamiseks tehtavad investeeringud [13]:



Joonis 1.2 Töökindluse ja investeeringukulude seos [13]

Jooniselt 1.2 on näha, et kui suureneb töökindluse juurdekasv ΔR , siis kasvavad investeeringukulud ΔC . Jooniselt paistab veel fakt, et olenemata investeeringute suurusest ei saa töökindlus olla kunagi 100%, sest pole võimalik ette ennustada kõiki võimalikke juhuseid, mis võivad viia elektrikatkestuseni. Investeeringukulud pole kunagi null, sest ka olemasolevat töökindluse taset on vaja hoida. Kuna investeeringute rahastus tuleb tariifidest, siis kajastub töökindluse tõstmine tarbijate elektriarvetes. Seevastu vähenevad katkestusest tingitud kulud. Seega tuleb saavutada selline töökindluse tase, mis on majanduslikult optimaalne. Alloleval joonisel 1.3 on näha, et töökindluse tase on optimaalne siis, kui on tasakaal võrgukulude ja tarbijate katkestuskulude vahel. Nii on tagatud minimaalsed summaarsed kulud. [13]

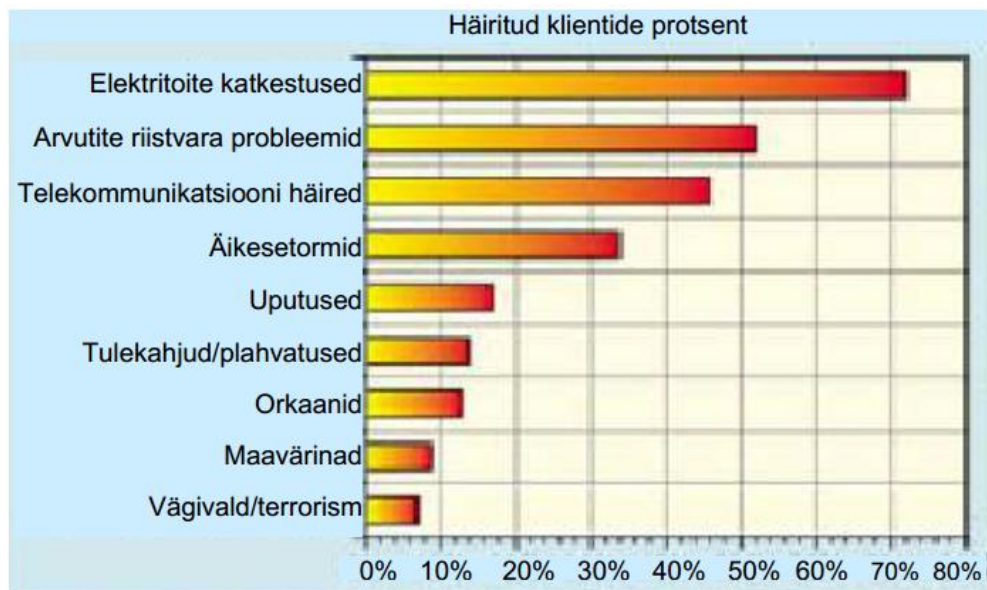


Joonis 1.3 Optimaalne töökindluse tase [13]

Töökindluse väärtust on raske hinnata, aga selle olulisuse paremaks mõistmiseks on joonisel 1.4 näha tegurid, mis kõige rohkem häirivad ettevõtete tegevust. Nagu näha, siis on esimesel kohal elektritoite katkestused, kus häiritud klientide protsentuaalne osakaal on suurim. Töökindluse taseme ja selleks vajaminevate investeeringute hindamise meetodid on juba piisavalt heal tasemel välja töötatud. Probleemiks on kasude hindamine, sest osad töökindlusest tulenevad kasud/kahjud on subjektiivsed, mitte majanduslikud. Majanduslike kulude ja tulude hindamisel soovitatakse lähtuda turust ja turujõust. Nii saaks koostada nõudluskõvera, mis näitaks sõltuvust tarbimise ja elektrivarustuse niinimetatud turuhinna vahel. Sellised traditsioonilised tulude ja kulude kõverad pole eriti head, sest elektriga varustatus on vaatamata avatud turule monopolne, klientuur on kindel ja ei ole ka täiesti selge, mismoodi mõjutab turg töökindlust ja selle väärtust. Seega kasutatakse töökindluse otsese hindamise asemel toitekatkestusest tekkinud rahalise kahju hindamist. Elektriettevõtte katkestuskulude alla loetakse toite taastamiseks tehtavad kulutused ja saamata jäänud müügitulu. Klientide katkestuskuludeks on rahalises väärtuses näiteks katkestuse tõttu katki läinud seadmed, toodang, mis jäi andmata, riknenud tooraine, toit jms. Tuleb märkida,

et tavaliselt on tarbijate kulud märgatavalt suuremad, kui elektriettevõtete kulud katkestuse korral.

[17]



Joonis 1.4 Tarbijate tegevust häirivad tegurid [13]

2. KATKESTUSKAHJU MAKSUMUSE ARVUTAMINE

Katkestuskulude leidmiseks on vaja kõigepealt kindlaks teha tarbijatele katkestuse tõttu tekkinud kahjud ja siis need rahas väärtustada. Eelnevalt on selgitatud, et katkestusest põhjustatud kahjud on väga erinevad (otsesed, kaudsed, sotsiaalsed, majanduslikud) ja katkestuskahju on tihedalt seotud tarbija elektrist sõltuvusega. Katkestuskahjude hindamiseks on loodud mitmeid meetodeid. Neid meetodeid võib liigitada kui [14]:

- Reaalselt toimunud katkestusjuhtumite analüüsid
- Kliendiuringutel põhinevad meetodid
- Kaudsed analüütilised meetodid

Kõikide nimetatud meetodite rakendamiseks on vajalik elektritarbijad eelnevalt kategoriseerida, kuna tarbijate erinevusest sõltuvad katkestuse tagajärjed ja katkestuskahju suurus. Tarbijate kategoriseerimist käsitleb peatükk 2.1. Reaalselt toimunud katkestusjuhtumite analüüsi kasutatakse laiaulatuslike ja pikaajaliste katkestuste korral. Meetodi eeliseks on reaalselt toimunud sündmus, mitte teoreetiline lähenemine, puuduseks on raskesti üldistatavad tulemused, kuna uuritakse kindlat juhtumit konkreetses piirkonnas. Meetodit on lähemalt kirjeldatud peatükis 2.2. Kliendiuringutel põhinevad meetodid on kõige populaarsemad, kuna nende abil on võimalik hinnata lisaks majanduslikele kahjudele ka rahaliselt raskesti väärtustatavaid kahjusid. Meetodi puhul on probleemiks uuringu kallis maksumus ja ajakulukus. Pikemalt selgitatakse metoodikat peatükis 2.3. Analüütiliste meetodite puhul kasutatakse katkestuskahju arvutamiseks majanduslikke näitajaid ja muud statistilist infot (näiteks inimeste sissetulekute statistikat, ettevõtete lisandväärtuse statistikat). Eeliseks võrreldes teiste meetoditega on lihtne andmete kättesaadavus ja kiirus, aga puuduseks on mitmed piiravad eeldused, mida kirjeldatakse peatükis 2.4. Alternatiivne meetod katkestuskahju arvutamisel on varustuskindluse piirkondade metoodika, kus katkestuskahju määramisel kasutatakse selle varustuskindluse piirkonna keskmist tarbijate struktuuri, kuhu uuritav võrguosa kuulub (peatükk 2.5). [14]

2.1 Eesti elektritarbijate struktuur

Katkestuskahjude hindamisel jagatakse tarbijad gruppideks. Reaalsuses on siiski iga tarbija jaoks katkestuskahju suurus erinev, sest kahjud sõltuvad paljudest erinevatest faktoritest nagu näiteks kui palju klient elektrit tarbib, kas on tagavaratoide olemas, kui sõltuv on tarbija elektrist jne. Kuna tarbijaid on väga palju, siis pole kahjude hindamine eraldi iga tarbija kohta mõistlik ja tuleb luua üldised kategooriad. Praeguseks pole tarbijate kategoriseerimise kohta üldist metoodilist juhendit

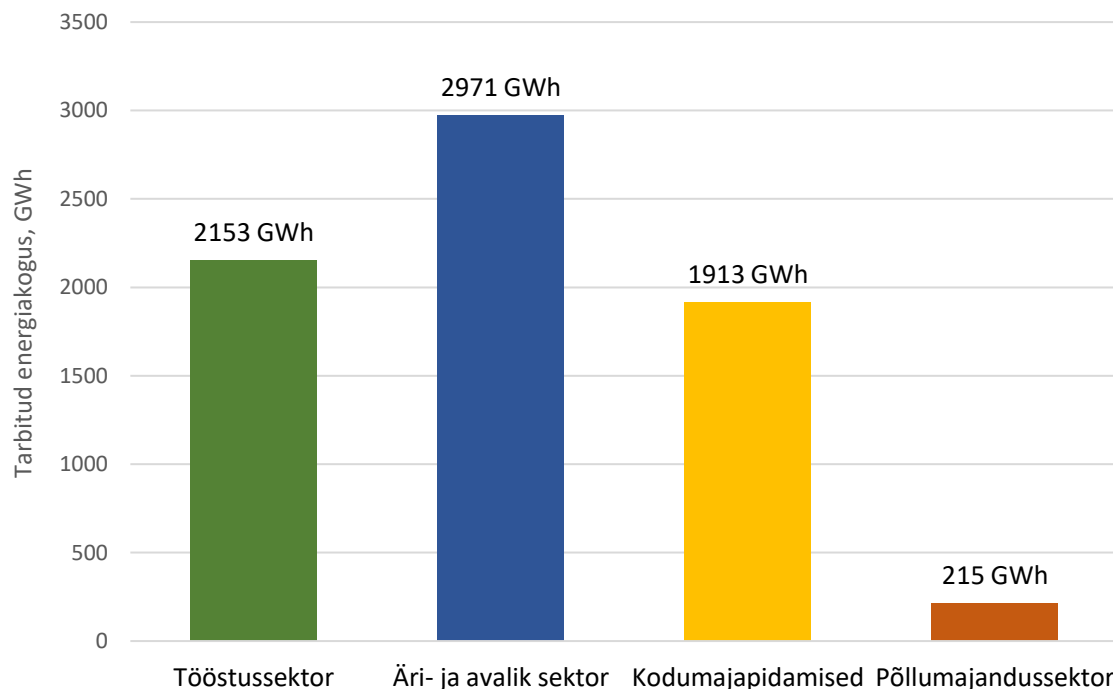
olemas. Maailmas tehtud uuringutes on tarbijaid kategoriseeritud vastavalt vajadusele arvestades erinevaid tingimusi nagu näiteks andmete kättesaadavus. [17] Eesti tarbijakategooriate koostamisel on arvestatud varasemat katkestuskahjude uuringut ja info kättesaadavust Statistikaametist, et hiljem oleks võimalik töös arvutusi teostada. Valitud kategooriad on levinud variant paljudes uuringutes.

Eesti elektritarbijad on kategoriseeritud järgnevate sektorite kaupa [17]:

- Tööstussektor, kuhu kuuluvad paljud erinevad alasektorid, nt masinaehitus, rauatööstus; transport.
- Äri- ja avalik teenindussektor, kuhu kuuluvad nt. kontorid, kaubandus, ühiskondlikud hooned, tervishoid.
- Kodutarbijate sektor, kuhu kuuluvad eramud, kortermajad ja suvilad.
- Põllumajandussektor, kuhu kuuluvad taime- ja loomakasvatus ning kalandus.

Statistikaameti andmetel oli sektorite lõpptarbimine 2016. aasta seisuga kokku 7252 GWh [18]. Edasises töös kasutatakse Statistikaameti 2016. aasta andmeid, sest paljudel juhtudel polnud värskemaid andmeid saadaval.

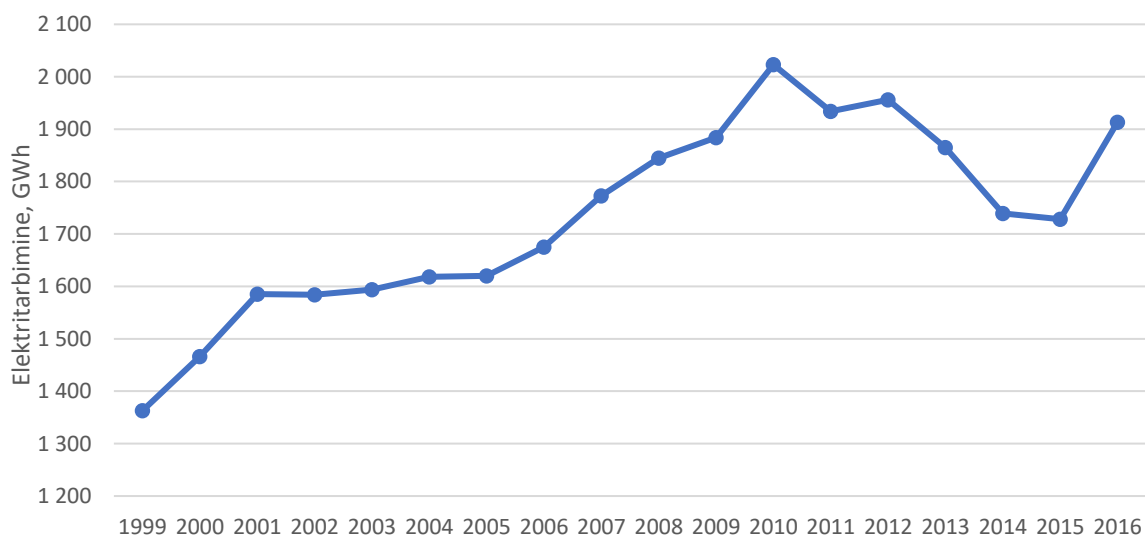
Eesti tarbijakategooriate energiatarbimist 2016. aasta kohta on kujutatud alloleval joonisel 2.1:



Joonis 2.1 Eesti tarbijasektorite energiatarbimine aastal 2016 [18]

2.1.1 Kodutarbijate sektor

Kodumajapidamiste elektrienergia tarbimine aastatel 1999- 2016 on kujutatud alloleval joonisel 2.2. Majapidamiste sektori osakaal oli kogu Eesti elektritarbimisest 26,2% (1913 GWh) 2016. aasta seisuga. [18] Elektriga varustatud majapidamisi on peaaegu 100%, ainult 0,3% majapidamistest puudub elektriühendus. Sektori energiatarbimine erilist langustrendi kuni aastani 2010 ei näita. Selle põhjuseks oli pidevalt suurenev elektriseadmete kasutamine – tehnika arenes ning osteti järjest rohkem elektroonikakaupu nagu telerid, pliidi, külmkapid, arvutid, mobiiltelefonid, tolmuimejad, pesumasinad jne. Isegi majanduslangus aastal 2009 ei peatanud majapidamiste energiakasutuse tõusu. Tarbimine näitab kerget pidurdumist peale aastat 2011 ja see on arvatavasti seletatav energiaefektiivsemate seadmete kasutuselevõtuga. [19]



Joonis 2.2 Kodumajapidamiste elektrienergia tarbimine [18]

Majapidamise elektritarbimise saab jaotada kolme gruppi [20]:

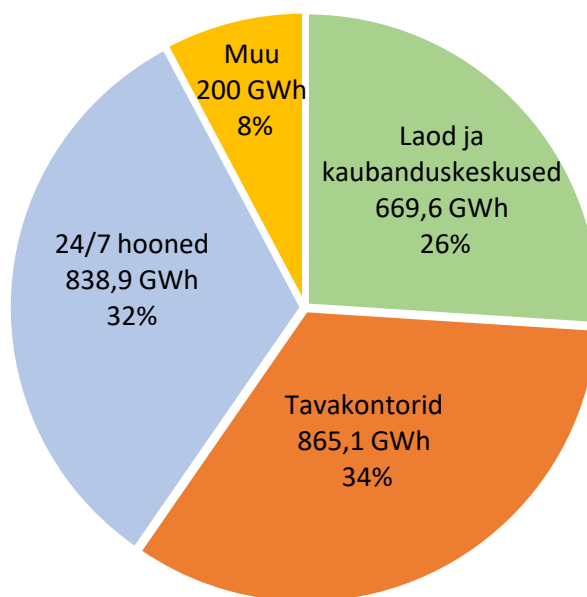
- Toiduvalmistamiseks kuluv elektrienergia, mille osakaal majapidamise elektritarbimisest on umbes 30%. Põhilised elektrit tarbivad seadmed selles grupis on külmkapid, nõudepesumasinad, ahjud, veekeetjad, kohvimasinad ja ventilatsioon.
- Hügieeniks kuluv elektrienergia, mille osakaal on üsna suur- 56%. Siia gruppi kuuluvad näiteks pesumasinad, tolmuimejad, vee soojendamine, pörandaküte, vannitoa valgustus, triikraud.
- Vaba aja veetmiseks kuluv elektrienergia, mille osakaal on vähim- 13%. Energiakasutus tuleneb valgustusest, televiisoritest, muusikakeskustest, arvutitest jms.

Majapidamised tarbivad kõige rohkem elektrit tööpäeviti hommikul kella seitsmest kaheksani ja õhtul kella seitsmest üheksani ning puhkepäevadel kella kaheteistkümnest kaheni ja õhtul samuti

seitsmest üheksani. Hommikul kasutatakse üldiselt toiduvalmistamiseks vajalikke seadmeid, aga õhtul lisanduvad nendele seadmetele pesumasinad, tolmuimejad, elektroonika jms. [20] Võib eeldada, et majapidamistele oleks katkestuskahju hommikul ja õhtul suurem, kui näiteks öösiti, mil inimesed magavad või tööpäeviti kell kaks, kui enamik inimesi pole kodus. Suurimat katkestuskahju võib ilmselt oodata õhtuse katkestuse korral, kuna siis kasutatakse kõige rohkem erinevaid elektriseadmeid- vabaaja veetmiseks televiisorid, muusikakeskused, söögitegemiseks erinevad seadmed, hügieeni valdkonnast kasutatakse pesumasinaid jne. [15] Majapidamiste katkestuskahju on üks keerulisemaid, mida hinnata, sest selles sektoris on kõige rohkem subjektiivseid faktoreid (näiteks vaba aeg või ebamugavus), mida on rahaliselt raske väärtustada. Katkestuskahjude arvutamisel koheldakse majapidamissektorit kui üht suurt homogeenset gruppi ehk alasektoreid majapidamiste puhul ei tekitata. [14]

2.1.2 Äri- ja avaliku sektori tarbijad

Äri- ja avaliku sektori elektritarbimine oli aastal 2016 kogu Eesti elektritarbimisest 40,7 % (2971 GWh) [18]. Äri ja avaliku sektori tarbijaklasside osakaalud on näha joonisel 2.3.



Joonis 2.3 Äri- ja avaliku sektori tarbijaklasside osakaalud 2012 aasta kohta [21]

Sektori elektritarve on põhiliselt hoonetest põhjustatud- kontorid, kaubanduskeskused, koolid, raamatukogud, ministeeriumid jne. Tallinna Tehnikaülikooli poolt teostatud uuringu [21] „Tarbimise juhtimine“ kohaselt oli 2012 aasta andmete järgi äri ja avaliku sektori elektritarve 2572 GWh, millest 66% moodustasid büroohooned. Ülejäänud 34% sektori elektritarbimisest moodustasid hulgi- ja jaekaubandus 26% ning muud tarbijad 8% nagu on näha jooniselt 2.3.

Büroohooned jagunevad tavakontoriteks, kus töötatakse kaheksa tundi päevas ja viis päeva nädalas ning 24/7 avatud kontoriteks, kus töö on vahetustes. Parema info puudumisel tuleb eeldada, et uuringus käsitletud büroohooned on tüüpilised büroohoonete tarbijaklassi esindajad. Sel juhul on büroohoonete näol tegemist suurte ja stabiilsete elektritarbijatega, ehk nende elektritarve on läbi aasta samas suurusjärgus. Tööpäeviti ja päevasel ajal on elektritarbimine suurem ning öösiti ja puhkepäevadel on tarbimine natuke väiksem. Ilmastik avaldab samuti tarbimisele mõju, näiteks suvel tarbitakse elektrienergiat natuke vähem kui talvel, kuna elektrikütet ei kasutata. Kaubanduskeskuste puhul on koormus läbi aasta sama, pole ka talvist ja suvist erinevust. Koormus ei sõltu kaubanduskeskuste puhul nädalapäevast, kuna keskused on tavaliselt avatud nii töö kui puhkepäevadel. Põhilised elektritarbijad hoonetes on ventilatsiooniseadmed, jahutus, valgustus, serverid, kontoritehnika, elektriküte jms. Suurim energiatarbimise osakaal on paljudel juhtudel valgustusel. [21]

Sektori katkestuskahju suurusele on raske üldist hinnangut anda, kuna sektor koosneb paljudest erinevatest tarbijatest ja katkestuskahju suurus sõltub tarbija iseloomust (kas tegu on näiteks haigla, väiksema või suure ettevõttega, kooliga, lõbustusasutusega, ministeeriumiga, hotelliga). Kahjude arvutamisel on seega erinevalt kodutarbijatest vajalik luua alasektoreid. Kahjud on tavaliselt suuremad majapidamiste- ja põllumajandussektorist [14]. Oluline roll on otsesel ja kaudsetel kahjudel. Näiteks ettevõtte puhul oleks katkestuse korral otseseks kuluks tööjõukulud, andmekadu vms. Nüüd sõltub katkestuskahju suurus sellest kui palju ettevõtte palka maksab töötajatele ja kas on vaja teha ületunde kahju kompenseerimiseks (lisakulu), maksta trahvi ületatud tähtaja eest. Kaudseid kahjusid on raskem arvutada, näiteks saamata kasumit või langenud mainet. Palju sõltub ettevõtte tegevusalast, näiteks kui ettevõtte osutab olulist finantsteenust, on ka katkestuskulud suuremad mõne väiksema toidupoje katkestuskahjust. Kahjude arvestamise muudavad keeruliseks ühiskondlikud tarbijad (nt. haiglad, reovee käitlemine), kellel on katkestuse korral mõjud kolmandatele pooltele või on kaudseid kahjusid raske hinnata. Näiteks USA kaitseministeeriumi kulud kaheksatunnise ja pikema katkestuse korral on riigile 180 000 dollarit ühe päeva kohta aastal 2015, tervishoius oli vastav number 690 000 dollarit [22]. Nädalapäevade lõikes võib eeldada, et sektori katkestuskulud on suuremad nädala sees tööaegadel ja väiksemad nädalavahetustel, mil asutused ei tööta tavaliselt. Siin on jällegi erandeid, näiteks kaubanduskeskused, mille küllastajate arv võib nädalavahetustel ja tööpäeva õhtutel olla suurem ja seega on katkestuse korral saamata jäänud tulu suurem kui nädala sees tööajal. Lisaks tuleb sektori katkestuskulude kindlaks tegemisel arvestada tagavara generaatoreid jms, mille korral ei pruugi näiteks tunnil katkestusel muud kahju tekkida peale tagavaratoite maksumuse.

2.1.3 Tööstussektor

Tööstus on defineeritud kui valdkond, mis tegeleb loodusvarade kaevandamise ja töötlemisega, energia, masinate, seadmete, tööriistade ja tarbekaupade tootmisega ning põllumajandussaaduste ja tööstuse enda valmistatud toodete töötlemisega. Selle definitsiooni alusel jaguneb tööstussektor paljudeks erinevateks alasektoriteks, mida on näha tabelist 2.1, kus on antud alasektorite 2016 aasta lõpptarbimine ja osakaal Eesti kogu tarbitud elektrienergiast. Tabelist on näha, et tööstusektori elektrienergia tarbimine moodustas kogu Eesti lõppenergiatarbimisest 29,7%. [18] Tegu on suuruselt teise suurima elektritarbimisega sektoriga Eestis. Tabelist 2.1 on näha, et tööstustest on suurima elektritarbimisega puidutööstus, mis 2016. aasta andmete kohaselt tarbis 412 GWh elektrienergiat ja paberitööstus, mis tarbis 403 GWh. See on tingitud mehaanilistest protsessidest, mida puidutööstuses on palju (näiteks purustamine, mehaaniline eel- ja järeltöötlemine). Mehaanilised protsessid töötavad tänu elektriajamitele, mille käitamine nõuab palju elektrienergiat. Puitu töötlevas tööstuses on elektrienergia osakaal toote omahinnast umbes 4-12 %. [23] Mehaanilisi protsesse on ka teistes suure elektritarbimisega sektorites, näiteks masinaehitus, toiduainetööstus.

Tabel 2.1 Tööstusektori jaotumine alasektoriteks [18]

| 2016 aasta tööstusektori alasektorid | Elektrienergia, GWh | Osakaal kogu lõpptarbimisest, % |
|--|---------------------|---------------------------------|
| Raua- ja terasetööstus | 1 | 0,014 |
| Keemiatööstus | 114 | 1,56 |
| Mitteraudmetallide tööstus | 5 | 0,068 |
| Muude mittemetallsetest mineraalidest toodete tootmine | 161 | 2,21 |
| Transpordivahendite tootmine | 67 | 0,92 |
| Masinaehitus | 294 | 4,03 |
| Mäetööstus | 18 | 0,25 |
| Toiduaine- ja tubakatööstus | 320 | 4,38 |
| Paberitööstus ja trükindus | 403 | 5,52 |
| Puidutööstus | 412 | 5,64 |
| Ehitus | 83 | 1,14 |
| Tekstiili- ja nahatööstus | 74 | 1,01 |
| Mujal liigitamata tööstus | 200 | 2,74 |
| Lõpptarbimine tööstussektoris | 2153 | 29 |

Tööstusektori katkestuskahjud on suured sarnaselt äri ja avaliku sektori katkestuskahjudele. Tööstusektorit iseloomustavad suurimad katkestuskahjud juba mõne sekundilise katkestuse puhul (võrreldes teiste sektoritega), kuna tööstuslikud protsessid on tundlikud. Näitena saab tuua suure USA piimatööstuse, kes lasi paigaldada katkestuste puhuks tagavaratoiteks 15 MW mikrovõrgu,

kuna isegi lühiajaline katkestus võib põhjustada tehase töös 12 tunnise pausi, kuna seadmed on vaja puhastada ja uuesti steriliseerida [22]. Tööstussektoris on sarnaselt äri- ja avaliku sektori puhul katkestuskahjude määramisel oluline, mis valdkonnas tarbija tegutseb, millised on otsesed kahjud ja kui suurt mõju omavad kaudsed kahjud.

2.1.4 Põllumajandussektor

Põllumajandussektori lõpptarbimine aastal 2016 oli 215 GWh, mis moodustas kogu lõpptarbimisest 2,9%. Kuna Statistikaamet erinevate põllumajandusharude elektritarbimise kohta statistikat ei koosta, siis on Tallinna Tehnikaülikooli uuringus „Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud“ [24] leitud arvutuslikult erinevate põllumajanduskultuuride ja linnu/loomakasvatuse elektrienergia tarbimine 2016 aasta kohta (andmed on tabelis 2.2 ja 2.3).

Tabel 2.2 Erinevate põllukultuuride aastane elektritarbimine [24]

| Põllukultuur | Kasvuala, ha | Arvutuslik elektritarbimine, GWh/a |
|--------------------------------|--------------|------------------------------------|
| Nisu | 169700 | 52,7 |
| Oder | 131400 | 29,5 |
| Rukis | 14300 | 2,2 |
| Kaer | 35000 | 7,9 |
| Kartul | 5800 | 12,2 |
| Sibul | 202 | 1,0 |
| Katmikalal kasvavad kultuurid: | | |
| Kurk | 66 | 8,6 |
| Tomat | 146 | 19,0 |
| Muu köögivili | 23 | 3,0 |
| Lilled | 9,5 | 2,8 |
| Kokku | | 138,8 |

Tabel 2.3 Linnu- ja loomakasvatuse elektritarbimine [24]

| Looma/linnukasvatus | Arv, tuh | Arvutuslik elektritarbimine, GWh/a |
|---------------------|----------|------------------------------------|
| Piimalehmad | 90,6 | 41,2 |
| Kuldid ja emised | 24,6 | 17,3 |
| Broilerid | 1206,1 | 0,4 |
| Munade aastatoodang | 20439,6 | 4,6 |
| Kokku | | 63,5 |

Arvutuslik elektritarbimine oli seega kokku 202,3 GWh aastal 2016, mis võrreldes Statistikaameti tulemusega (215 GWh) on üsna lähedane tulemus. Põllumajandussektoris ei kasutata suuri elektrienergiakoguseid vajavaid seadmeid peale valgustuse, ventilatsiooni, elektrikütte,

lõpsmismasinate, viljakuivatite jms, mis ei tarbi teiste sektoritega võrreldes märkimisväärselt elektrit. Mahukam elektritarbimine on sellistel põllumajandustarbijatel nagu suured loomafarmid ja kasvuhooned, mis vajavad rohkem elektriseadmeid kui näiteks nisupõld. Ilmselt on ka selliste tarbijate kahjud katkestuse korral suuremad. Kuna põllumajandussektorile on iseloomulik tööde tegemine jooksvalt läbi nädala päevasel ajal, siis katkestuskahju on suurem hommikupoole ja pärastlõunal ning ei sõltu eriti sellest kas on tööpäev või nädalavahetus [25].

2.2 Toimunud katkestusjuhtumite analüüs

Katkestusjuhtumite analüüsi eeliseks on reaalne sündmus, mitte hüpoteetiline lähenemine. Seda meetodit kasutatakse laiaulatuslikemate ja pikaajalisemate katkestuste korral. Katkestusjuhtumite analüüsid on põhjalikud ja koosnevad üldjuhul mitmest osast. Ühe osa moodustab elektrisüsteemi analüüs, kus tehakse kindlaks katkestusele eelnev seisund ning katkestuse laienemise etapid ja põhjused. Leitakse andmata energiakogus ja toite kaotanud klientide arv erinevatele katkestusest mõjutatud piirkondadele. Analüüsil hinnatakse ka süsteemi taastamise protsessi, tuuakse kindlasti välja süsteemi nõrkused ja soovitud elektrisüsteemi töökindlamaks muutmiseks. Lisaks tehnilisele küljele uuritakse katkestuse mõjusid ühiskonnale. Tehakse kindlaks nii otsesed majanduslikud mõjud (nt. riknenud toit, ületunni tasud, kaotatud toodang, müügitulu) kui ka kaudsed mõjud, näiteks kindlustusjuhtumid, hädaabikulud, katkestusest mõjutatud tööstuse toodangu hilinemine võib tähendada häiringuid teiste ettevõtete töös, kes ei pruugi üldse katkestuse piirkonnas olla. Analüüsides on selgunud, et paljusid kahjusid on väga raske rahaliselt väärtustada ja kaudsed kahjud on palju suuremad otsestest kahjudest. Kuna süsteemi kustumine tähendab kriisiolukorda, siis antakse ülevaade ja hinnang riigiasutuste kriisiolukorrale reageeringule. Analüüsitakse mõjusid kriitilise tähtsusega infrastruktuuri üksustele, näiteks veevarustus, kommunikatsioon, finantsinstitutsioonid, riigiasutused, tervishoid, transport jms. Lisaks majanduslikele mõjudele uuritakse ka sotsiaalseid tagajärgi nagu avalikuse reageering ja käitumine kriisiolukorras, näiteks vandalism. [26]

Meetodil on mitmeid miinuseid. Esiteks pole info kogumiseks võimalik ette valmistada, sest suured avariid tekivad ilma ette hoiatamata. Teiseks on laiaulatuslike katkestusjuhtumite analüüsimine on ajamahukas protsess ja analüüsi teostamine on kallis. Seega on analüüsitud ainult väga mastaapseid katkestusi. Analüüsi tulemusi on raske üldistada, sest uuritakse üht kindlat juhtumit ühes kindlas piirkonnas. Laiaulatuslike avariide esinemistõenäosus on üsna väike ning juhtumi analüüs on pigem tagantjärele tarkus. [14] Eestis ei saa katkestusjuhtumite analüüsi meetodit

rakendada, sest laiaulatuslikemaid avariisid ei ole toimunud ja seega seda meetodit käesolevas töös rohkem ei kajastata. [13]

2.3 Kliendiuuringutel põhinevad meetodid

Meetodi rakendamise aluseks on kliendiuuring, mille abil saadakse katkestuskahjude info iga kliendi kohta, kes uuringus osales. Peale klientide katkestuskahjude kindlakstegemist ja hindamist arvutatakse tarbijakategooriatele kahju näitajad ehk katkestuskahjude erinäitajad (*interruption cost indices*).

2.3.1 Kliendiuuringud

Kliendiuuringu läbiviimine ja andmetöötlus on väga ajamahukas ja kallis töö, eriti kui see viiakse läbi intervjuu vormis. [27] Kliendiuuringuteks tuleb vastavalt tarbijakategooriale koostada küsitluse vorm. Vormi koostamisel tuleb veenduda, et küsimused on arusaadavalt ja üheselt mõistetavalt koostatud. Arvestada tuleb erinevate probleemidega nagu näiteks strateegilised vastused, küsimusele vastamata jätmine jne. [13] Tuleb teha kompromiss küsitluse pikkuse ja põhjalikkuse vahel, et oleks tagatud piisav vastajate arv. Tavaliselt koostatakse kõigepealt esialgne küsimustik, tehakse prooviküsitlus, mille tulemusi kasutades tehakse küsimustikus parandused. Seejärel teostatakse lõplik kliendiuuring. [28]

Küsitlusteks on loodud erinevaid lähenemisviise, kuidas küsitletavalt informatsioon kätte saada. Erinevatele tarbijate kategooriatele sobivad erinevad meetodid, aga praeguseeni pole täiesti kindlaks määratud, millisele tarbijagrupile mis meetod täpsemalt sobib, antud on ainult soovitusel (näiteks [28] *CEER* ehk *Council of European Energy Regulators* poolt loodud dokument „Guidelines of Good Practice on Estimation of Costs due to Electricity Interruptions and Voltage Disturbances“, 2010). Nimetatud dokument soovib kasutada tarbijakategooriate koostamisel Euroopa Ühenduse majandustegevusalade statistilist klassifikaatorit NACE, kuna tegemist on rahvusvaheliselt ühtlustatud klassifikaatoriga. Tarbijakategooriates (tarbimissektorites) peab kliendiuuringute puhul tekitama alakategooriad (tarbijaklasse), näiteks tööstussektoris metallitööstus, tekstiilitööstus jne, mis võimaldab teha suurema täpsusega kahjuhinnanguid. [28] Eraldi sektorina tasuks välja tuua suurtarbijad nende suure osakaalu tõttu elektritarbimises ja seega ka katkestuskahjudes [17].

Kliendiuuringul on vaja arvestada lisaks eemärgile, mahule, ajakulule, klientide eripärale nende küsitluse suhtumist ja vastamise kompetentsust. Kõikidel eelnimetatud põhjustel kasutatakse

erinevate tarbimiskategooriate puhul erinevaid lähenemisviise ja erinevalt sõnastatud küsimustikke. Vaatamata küsitlusega kaasnevale probleemidele (ajakulu, liialdatud vastused, mahukus jne) leitakse, et klient oskab kõige paremini tekkinud kahjusid hinnata. Eeliseks on veel võimalus koostada küsitlus vastavalt elektriettevõtte konkreetsele vajadusele. Samuti on kliendiuring siiani parim variant väärtustamaks raskesti hinnatavaid kahjusid, näiteks kodutarbijate puhul ebamugavuse hindamine. [13]

Järgnevalt on kirjeldatud tuntumaid kliendiuringutel põhinevaid meetodeid:

- otsese kalkulatsiooni meetod (*Direct Costs*)
- tarbijate valikutel põhinev uuring (*Stated Choice*)
- kombineeritud analüüs (*Conjoint Analysis*)

Otsese kalkulatsiooni meetod

Otsese kalkulatsiooni meetodi puhul antakse kliendile ette erinevad katkestuste stsenaariumid, näiteks erineva pikkusega ja algusajaga katkestused jne. Iga stsenaariumi puhul palutakse kliendil teha kindlaks vastava stsenaariumi tagajärjed ja määrata tekkinud kulud. Meetodis arvestatakse ainult rahalist kahju. Seda meetodit rakendatakse põhiliselt tööstuste, äri ja avaliku teeninduse ning suurtarbijate puhul, sest nende puhul on kahjud üldjuhul materiaalsed ja selgelt kindlaks tehtavad. [14] Meetod peaks andma täpsed vastused kulude kohta, sest vastavad hinnangud annavad tarbijad ise. Probleemiks võivad osutuda võimalikud strateegilised vastused, kuna kliendid teavad, et nende vastuseid võidakse kasutada uute regulatsioonide väljatöötamisel. Küsimustikud on üsna kompleksed ja neile vastamine ei ole arvatavasti kiire ja lihtne. Majapidamiste jaoks pole see meetod eriti sobilik, sest hindamisel tekib probleem, kuidas väärtustada rahas vaba aja kadu jms. [27]

Mõningates uuringutes palutakse klientidel oma kulud kategoriseerida või siis on kategooriad ette antud. Erinevate kulukategooriate puhul on kaks eelist. Kuna klientidel on suure tõenäosusega vähe kogemusi laialdaste katkestustega, siis saaksid kliendid kulusid kategoriseerides ülevaate erinevatest kahjude tüüpidest ja tagajärgedest ning annaks neile informatsiooni suuremate kulukomponentide kohta. [14]

Võimalikud kategooriad tööstuste jaoks on [27]:

- saamata jäänud toodang (siinkohal on vaja arvestada ka varusid, näiteks tooraine näol);
- alternatiiv kaotatud toodangule nagu ületunnid selle tasategemiseks, teise tootja teenuste/kaupade kasutamine;
- kahjustatud seadmed, materjalid, toodang jms

- taaskäivitamise kulud
- trahvid
- kulud, mis seotud tervise ja ohutusega

Võimalikud kategooriad kommertstarbijatele [27]:

- kaotatud tööaeg
- ületöö kulud
- andmete taastamise kulud
- kahjustatud seadmed, kaubad
- trahvid
- kulud, mis on seotud tervise ja ohutusega

Tarbijate valikutel põhinev meetod

Tarbijate valikutel põhinevate uuringute puhul määratakse katkestuskahju kulude põhjal, mis on tuletatud tarbijate valikutest, mida nad teoreetilise katkestuse korral teeksid. Sellist lähenemist kasutatakse tavaliselt kodutarbijate ja väiksemate ettevõtete puhul. [27] Kõige levinum meetod selleks on tinglik hindamismeetod, kus inimesele antakse ette konkreetne stsenaarium ja küsitakse otse, mis see tema jaoks väärt on. Stsenaariumi kirjeldus peab olema põhjalik ja realistlik. Sellel meetodil on kaks lähenemisviisi. Esimene viis on nõusolek maksta (*Willingness to Pay*) ehk kui palju oleks tarbija nõus maksma, et vältida katkestust või tõsta töökindluse taset. Teine viis on nõusolek aktsepteerida (*Willingness to Accept*) ehk kui palju raha tuleks tarbijale pakkuda kompensatsiooniks töökindluse vähenemise eest või töökindluse sama taseme eest, selle asemel, et töökindluse taset tõsta. [14]

Meetodi eeliseks on, et tarbija mõõdab töökindluse rahalist väärtust vastavalt tema nõudmistele ja vajadustele ja hindab sinna sisse ka mitterahalise kahju. [13] Eeliseks on ka küsitluse lihtsus vastaja seisukohast. Tavaliselt on stsenaariumi kohta ainult üks väärtuse kohta käiv küsimus, mitte erinevad kulude kategooriad, nagu otsese kalkulatsiooni meetodis. See lihtsustab tunduvalt küsimustele vastamist. Miinuseks on küsitletavate võimalikud strateegilised vastused lootusega tulemusi enda kasuks mõjutada. [27]

Kombineeritud analüüs

Strateegiliste vastuste vähendamiseks on kasutusel teine sama levinud meetod- kombineeritud analüüs, kus kliendid väljendavad oma eelistust erinevate hüpoteetiliste stsenaariumite puhul. Seega ei küsita kliendilt otse, palju tema kahjud kokku maksavad või palju ta on nõus kompensatsiooniks saama või maksma katkestuse vältimiseks. Kliendil palutakse valida

katkestusstsenaariumi valikvastustest sobivaim, anda oma reiting või siis reastada vastusevariandid eelistatuimast kuni kõige vähem eelistatud variandini. Kõige levinum on valikvastuste versioon selle lihtsuse tõttu. Igale katkestusstsenaariumi vastusevariandile vastab rahaline väärtus (näiteks kompensatsioon või kulu), mille abil saab intervjueeritavate vastustest tuletada ökonomeetriliste mudelite abil nõusoleku maksta/aktsepteerida väärtused. Selle meetodi puhul määravad intervjueerijad hinna. Õige hinna määramine ei pruugi kuigi lihtne olla. Inimesed pole täielikult teadlikud hinnangust, mille nad annavad ja see võib vähendada tulemuste õigsust. Ökonomeetrilised mudelid kulude hindamiseks on selle meetodi puhul üsna keerukad ja tulemusi võib olla raske põhjendada. [27]

Tarbija valikutel põhineva meetodi ja kombineeritud meetodi abil saab infot erinevate töökindluse tasemete kohta ilma, et katkestus oleks toimunud ja tarbijal on võimalik enda jaoks hinnata erinevaid võimalusi ilma reaalse töökindluse taseme muutuseta. Samuti arvestavad mõlemad meetodid mitterahalisi kahjusid. Meetoditel on ka ühine probleem. Nõusolek maksta või aktsepteerida väärtused peaksid teoorias olema võrdsed. Läbiviidud küsitlustest tuleb aga välja, et nõusolek maksta lähenemise puhul on saadud väärtused alati väiksemad, kui nõusolek aktsepteerida lähenemise puhul. Selle tingib psühholoogiline efekt, kus tarbija seisukohast on tal juba teenus, mille eest ta maksab ja seega soovitakse selle teenuse kadumise eest suuremat tasu, mitte teenuse säilitamise eest lisa maksta. Sellistel meetoditel on küsimuse üheks vastusevariandiks „ei tea“, et küsitletavat ei peaks sundima vastama. Reaalsuses antakse sel juhul tihti nõusolek maksta küsimuse puhul vastuseks „ei tea“ ja see raskendab õige tulemuseni jõudmist. Varasematest nõusoleku maksta/aktsepteerida uuringutest on veel välja tulnud „protestivaid vastuseid“, kus näiteks on küsitud, kui palju oleks klient nõus maksuma, et katkestust ja sellega kaasnevat kahjust vältida. Vastuseks on antud null, kuigi teatakse, et katkestus tekitab kahjusid. Tulemused sõltuvad ka tarbijate oskusest end hüpoteetilistesse situatsioonidesse asetada, seda eriti juhul, kui uuritavas piirkonnas esineb katkestusi väga harva. Seepärast soovitatakse lisada küsitluse küsimused, kas kliendil on varasemaid kogemusi katkestustega. [27]

2.3.2 Katkestuskahju erinäitajad

Kliendiuringute abil saadud klientide katkestuskahjude andmed on niinimetatud „toorandmed“, mis näitavad konkreetsele kliendile põhjustatud kahju teatud katkestuse stsenaariumi korral. Toorandmetele peab kõigepealt teostama kvaliteedikontrolli, näiteks eemaldama ilmselgelt valed, vigased või ekstreemsed vastused jms. Seejärel on vaja andmed teisendada kujule, mille abil oleks võimalik kahjusid omavahel võrrelda. Selleks normaliseeritakse klientide katkestuskahjud mõne

parameetri suhtes, näiteks aastase energiatarbimise suhtes. See protsess on aluseks erinevate katkestuskahju erinäitajate leidmiseks. [27]

Põhilised erinäitajad on [13]:

- Kliendi erikahjufunktsioon *CDF* (*Customer Damage Function*), mis on teatud tarbimissektori või konkreetse piirkonna klientide katkestuskahju funktsioonina katkestuse kestusest.
- Andmata energia hind *CENS* (*Cost of Energy Not Supplied*) ehk andmata energiaühiku hind, mis on leitud keskmisena üle võimalike katkestuste vahemiku. Kasutatakse, kui ei teata katkestuskestuste tõenäosust.
- Andmata energia hind *VOLL* (*Value of Lost Load*), mis on andmata energiaühiku hind, mille leidmisel on arvestatud erinevate katkestuste esinemise tõenäosuseid.
- Andmata energia hind *IEAR* (*Interrupted Energy Assessment Rate*), mis leitakse oodatava aastase katkestuskulu ja oodatava andmata energia suhtena.
- Katkestuskulu *COC* (*Customer Outage Cost*), mis on katkestuse tõttu tekkinud eeldatav kogukulu uuritavasse võrku või võrguosasse ühendatud tarbijatele.

Kliendi erikahjufunktsioon

Katkestuskahju saab esitada funktsioonina katkestuse kestusest. Seda funktsiooni nimetatakse kliendi erikahjufunktsiooniks (*customer damage function- CDF*). Erikahjufunktsioon leitakse tavaliselt tarbimissektorite kaupa, näiteks tööstustarbivad, teenindustarbivad, kodutarbijad. [27] Väga soovituslik on jagada tarbimissektorid omakorda tarbimisklassideks (näiteks tööstustarbivate sektoris oleks metallitööstus, puidutööstus jne omaette klassid), kuna klassidel on erinev energiatarbimine. Vastasel juhul annab lihtsalt suure tarbimissektori kohta antud kulude hinnang liiga üldise tulemuse. [14]

Kliendi erikahjufunktsiooni koostamine toimub järgnevalt:

- Nagu eelnevalt öeldud, tuleb leida uuritava kliendihulga iga kliendi katkestuskahju erinevate katkestuse kestuste jaoks. Seda tehakse kliendiuuringute abil.
- Seejärel saadud katkestuskahjud normaliseeritakse kas aastase energiatarbimise või tippkoormuse suhtes [13]:

$$CIC_{ae} = \frac{CIC_x(r_i)}{E_x} \quad (2.1)$$

või

$$CIC_l = \frac{CIC_x(r_i)}{L_x} \quad (2.2)$$

kus CIC_{ae} - *Customer Interruption Cost* ehk kliendi erikatkestuskahju aastase energiatarbimise kohta (€/kWh) ja CIC_i on kliendi erikatkestuskahju aastase koormustipu suhtes (€/kW)

$CIC_x(r_i)$ - konkreetse kliendi x katkestuskahju erinevate katkestuse kestuste r_i korral,

E_x - selle kliendi aastane tarbitud energiakogus, kWh,

L_x - aastane tippkoormus, kW.

- Järgmine samm on leida sektori y kliendi keskmine erikatkestuskahju $C_{E,y}(r_i)$ (Eur/kWh) või $C_{L,y}(r_i)$ (Eur/kW) [13]:

$$C_{E,y}(r_i) = \frac{\sum_{x=1}^n CIC_{ae}}{n} \quad (2.3)$$

või

$$C_{L,y}(r_i) = \frac{\sum_{x=1}^n CIC_i}{n} \quad (2.4)$$

kus n – y sektori uuritud klientide arv.

$C_{E,y}(r_i)$ või $C_{L,y}(r_i)$ jada on y tarbimissektori keskmine erikahjufunktsioon (**Sector Customer Damage Function SCDF**) ehk sektori y kliendi keskmine katkestuskahju tarbitud kilovatt-tunni või aastase koormustipu kohta erinevate katkestusaegade r_i korral.

Iga sektori erikahjufunktsioonide $C_{E,y}(r_i)$ ja $C_{L,y}(r_i)$ suhe on enamvähem konstantne, seega võib kirjutada [13]:

$$C_{E,y}(r_i) = \frac{C_{L,y}(r_i)}{LF_y * 8760} \quad (2.5)$$

ja

$$C_{L,y}(r_i) = C_{E,y}(r_i) * LF_y * 8760 \quad (2.6)$$

kus LF_y - koormustegur tarbimissektorile y .

- Kindla koormuspunkti j (nt. alajaama) katkestuskulude arvutamiseks on erikahjufunktsioon [13]:

$$C_{E,j}(r_i) = \sum_{y=1}^{ny} C_{E,y}(r_i) * \frac{E_{yj}}{E_j} = \sum_{y=1}^{ny} \frac{C_{L,y}}{LF_y * 8760} * \frac{E_{yj}}{E_j} =$$

$$= \sum_{y=1}^{ny} C_{E,y}(r_i) * w_{yj} = \sum_{y=1}^{ny} \frac{C_{L,y}}{LF_y * 8760} * w_{yj} \quad (2.7)$$

või

$$\begin{aligned} C_{L,j}(r_i) &= \sum_{y=1}^{ny} C_{L,y}(r_i) * \frac{L_{yj}}{L_j} = \sum_{y=1}^{ny} (C_{E,y}(r_i) * LF_y * 8760) * \frac{L_{yj}}{L_j} = \\ &= \sum_{y=1}^{ny} C_{L,y}(r_i) * w_{yj} = \sum_{y=1}^{ny} (C_{E,y}(r_i) * LF_y * 8760) * w_{yj} \end{aligned} \quad (2.8)$$

kus E_{yj} - y sektori tarbijate aastane keskmine elektritarbimine uuritavas tarbimispiirkonnas (koormuspunktis) j , kWh,

E_j - toitepiirkonna j keskmine aastane kogutarbimine, kWh,

L_{yj} - y sektori tarbijate koguvõimsus j -nda toitepiirkonna koormustipu ajal, kW,

L_j - j -nda toitepiirkonna keskmine aastane koormustipp, kW,

ny - sektorite arv,

w_{yj} – kaalutegur.

Kaalutegur on y sektori tarbimise osakaal j -nda toitepiirkonna kogutarbimisest [13]:

$$w_{yj} = \frac{E_{yj}}{E_j} \quad (2.9)$$

või y sektori tarbijate koguvõimsuse osakaal j -nda toitepiirkonna koormustipus [13]:

$$w_{yj} = \frac{L_{yj}}{L_j} \quad (2.10)$$

$C_E(r_i)$ või $C_L(r_i)$ jada on uuritava toitepiirkonna (koormuspunkti) keskmine erikahjufunktsioon (**Composite Customer Damage Function CCDF**).

- Kui pole võimalik täpselt koormuspunkti tarbijate osakaalu hinnata, saab erikahjufunktsioonina kasutada kogu riigi keskmist erikahjufunktsiooni [17]:

$$C_E(r_i) = \frac{\sum_{y=1}^{ns} C_{E,y}(r_i) * E_y}{\sum_{y=1}^{ns} E_y} \quad (2.11)$$

või

$$C_L(r_i) = \frac{\sum_{y=1}^{ns} C_{L,y}(r_i) * L_y}{\sum_{y=1}^{ns} L_y} \quad (2.12)$$

kus E_y - y sektori aastane kogutarbimine, kWh,

L_y - y sektori aastane koormustipp, kW,

ns - tarbimissektorite arv.

Meetod on lihtne, aga katkestuskahjude hinnangud on sellisel viisil arvatuna väga ligikaudsed, kuna arvestatakse tarbijate struktuuri terve riigi kohta, mis ei iseloomusta konkreetse koormuspunkti tarbijate struktuuri. [17]

Andmata energia hind IEAR, VOLL ja CENS

Tuntuimad andmata energial põhinevad katkestuskahjude erinäitajad on *IEAR* (*Interrupted Energy Assessment Rate*), *VOLL* (*Value of Lost Load*) ja *CENS* (*Cost of Energy Not Supplied*). Nimetatud näitajate arvutamise aluseks on erikahjufunktsioonid. *IEAR* on andmata energiaühiku hind, mis on tarbija aastase oodatava katkestuskulu ja aastase oodatava andmata energiahulga suhe. *VOLL* on andmata energiaühiku hind, mis leitakse erineva kestusega katkestuste esinemiste tõenäosuste abil. Kui puudub info tõenäosuste kohta, kasutatakse keskmist näitajat *CENS*. Nimetatud näitajatest on täpsemad *VOLL* ja *IEAR*, kuna need arvestavad süsteemi töökindluse näitajaid. *VOLL* ja *CENS* määratakse laiemalt tervele tarbimissektorile ja riigile või ainult konkreetsele võrgu osale (nt kindlale piirkonnale, koormuspunktile). Suurus *IEAR* määratakse üldiselt lokaalselt ehk mingi konkreetse võrgu või võrguosa jaoks. Nii *VOLL*, *IEAR* kui *CENS* puhul on tegu näitajatega, mis on suunatud tuleviku poole. [17]

Näitajate *IEAR*, *VOLL* ja *CENS* määramisel on aluseks uuritava võrguosa erikahjufunktsioon $C_{L,j}(r_i)$ (valem 2.8). Kasutades nimetatud erikahjufunktsiooni, avaldub *IEAR* (€/kWh) sõlmele j [17]:

$$IEAR_j = \frac{ECOST_j}{EENS_j} = \frac{\sum_{i=1}^N L_{ji} \lambda_i C_{L,j}(r_i)}{\sum_{i=1}^N L_{ji} \lambda_i r_i} \quad (2.13)$$

Kus $ECOST_j$ – sõlmele j arvatud eeldatav katkestuskulu, €,

$EENS_j$ – uuritavale sõlmele j leitakse eeldatav andmata energiakogus, kWh,

L_{ji} – sõlmes j katkestatud koormuse suurus i -ndal juhul, kW,

λ_i – i -nda katkestuse sagedus,

$C_{L,j}(r_i)$ – toitepiirkonna erikahjufunktsioon, mis on normaliseeritud aastase koormustipu järgi, €/kW,

N – katkestusjuhtumite arv aastas,

r_i – i -nda katkestuse kestus tundides.

Andmata energia maksumus kogu ülekandevõrgu jaoks [17]:

$$IEAR_j = \sum_{j=1}^{NB} IEAR_j * q_j \quad (2.14)$$

Kus q_j – j-nda sõlme koormuse osakaal võrgu kogukoormusest,

NB – selle võrgu koormuspunktide arv.

Andmata energia hinna $VOLL$ leidmisel on kaks etappi. Kõigepealt leitakse koormuspunktile j andmata energia hind $VOLL$ erinevate katkestuste kestuste r_i korral (€/kWh) [29]:

$$VOLL(r_i) = \frac{C_{L,j}(r_i)}{LF * r_i} \quad (2.15)$$

Kus LF – uuritava kliendihulga koormustegur,

r_i – i-nda katkestuse kestus tundides.

Seejärel leitakse eeldatav andmata energia hind $EVOLL$ (*Expected Value of Lost Load*) koormuspunktile j , kasutades erineva kestusega katkestuste esinemise tõenäosuseid [29]:

$$EVOLL = \sum_{i=1}^N VOLL(r_i) * p(r_i) \quad (2.16)$$

Kus $p(r_i)$ – katkestuse, mille kestvus on r_i , esinemise tõenäosus,

N – katkestuste arv.

Kui ei ole infot katkestuskestuste tõenäosustest, siis on võimalik need lugeda ühtlaselt jaotatuks üle vaadeldava kestuste vahemiku [2]. Selline andmata energia keskmine hind ($CENS$ ehk *Cost of Energy Not Supplied*, €/kWh) üle võimalike katkestuste vahemiku avaldub valemiga [13]:

$$CENS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{C_{L,j}(r_i)}{LF * r_i} \quad (2.17)$$

kus N – erikahjufunktsiooni punktide arv,

LF – uuritava kliendihulga koormustegur,

Planeerimisarvutustes on soovitatav realistlikemate tulemuste saavutamiseks kasutada väärtuseid $VOLL$ ja $IEAR$, kuna need kasutavad katkestusjuhtumite tõenäosusjaotust ja süsteemi töökindluse näitajaid. [17]

Katkestuskulu COC

Võrgu või võrguosa katkestuskulu COC on võimalik avaldada, kasutades selleks andmata energia hinda $CENS$ [13]:

$$COC = \sum_{y=1}^{ny} E_y * CENS_y \approx E * CENS \quad (2.18)$$

kus n_y – tarbijasektorite arv,

E_y – võrgu või võrguosa energiakogus, mis sektori y tarbijatele andmata jäi, kWh,

E – võrgu või võrguosa tarbijatele andmata jäänud energiakogus, kWh,

$CENS_y$ – sektori y tarbijatele andmata energia hind, €/kWh,

$CENS$ – riigi keskmine andmata energia hind, €/kWh.

2.4 Analüütilised meetodid

Analüütiliste meetodite puhul puudub kontakt klientidega. Selle asemel kasutatakse kahjude määramiseks statistilist infot nagu näiteks ettevõtete lisandväärtus, inimeste sissetulek, sisemajanduse koguprodukt. Meetodid on lihtsamad ja nende elluviimine võtab vähem aega, kui kliendiuuringute korraldamine. Andmeid on lihtne leida ja need on kõigile kättesaadavad ning seega pole ka uuringu maksumus nii suur. Suurimaks miinuseks on lihtsustatud ja seetõttu kohati ebarealistlikud eeldused. Meetodi abil saab rohkem üldiseid ja keskmisi tulemusi, mis on probleemiks, kuna enamjaolt otsitakse kliendikeskseid tulemusi. Probleemseim on kodutarbijate katkestuskahjude hindamine, kuna selles sektoris esineb kõige rohkem kahjusid, mida on raske statistika abil rahaliselt hinnata (näiteks vaba aja kadu). [27]

Levinuim meetod tööstus- ja kommertstarbijate kahjude hindamiseks on lisandväärtuse meetod (*Gross Value Added approach*). Kodutarbijate puhul kasutatakse majapidamiste sissetulekul põhinevat meetodit (*Household Income*). [14] Lisandväärtuse meetodit kasutatakse eelkõige tööstus- ja kommertstarbijate katkestuskahjude arvutamiseks. Katkestuskahjude arvutamiseks on sisendandmetena vajalik statistiline info, mida on lihtne leida ja see muudab meetodi teostamise kiiremaks ja odavaks. Meetodi põhimõtteks on sisend-väljund loogika, kus tootmisprotsessi sisendiks on tööjõud, kapital, materjalid ja elektrienergia ning väljundiks on protsessi lõppedes mingi konkreetne toode/teenus. Väljundiga kaasneb lisandväärtus (*Gross Value Added- GVA*) ehk toodang rahalises väärtuses, mis saadakse lõpptoodangu müügihinnast tootmiskulu maha lahutamisel. Elektrikatkestuse korral väheneb või katkeb tootmine ja kaob ka lisandväärtus. [30] Seda lisandväärtust kasutatakse katkestuskahju leidmisel [30]:

$$CENS = \frac{GVA_i}{EC_i} \quad (2.19)$$

kus GVA_i - aastane kogulisandväärtus i -ndas tarbimissektoris, miljonit eurot,

EC_i - aastane elektritarbimine i -ndas tarbimissektoris, GWh.

Kogulisandväärtuse asemel on varasemalt kasutatud ka sisemajanduse kogutoodangut. Kogutoodanguga võrreldes on kogulisandväärtuse eeliseks sisse arvestamata jäetud maksud ja toetused toodete ja teenuste eest. Meetodi põhiliseks probleemiks on eeldus, et elektritoite puudumisel pole ettevõtetel võimalik lisandväärtust luua, kuigi tegelikkuses on võimalik, et ettevõtte tegevus ei sõltu elektritoitest 100%. Tulemuseks on sellisel juhul liiga suur katkestuskahju väärtus. Samas ei arvesta lisandväärtuse meetod muid võimalikke kulusid, näiteks riknenud materjalide ja kahjustunud seadmete kulu. Meetod eeldab veel, et kaotatud toodangut pole võimalik hiljem järgi toota, mis ei pruugi tegelikkuses nii olla. [30]

Majapidamiste katkestuskahju analüütiline arvutamine on keerulisem protsess, kuna majapidamistel puudub võrreldes teiste sektoritega otseselt mõõdetav väljund. Üks variant majapidamisesektori katkestuskahjude leidmiseks oleks leibkonnaliikme keskmise sissetuleku ja elektritarbimise võrdlus [31]:

$$CENS = \frac{ST}{A} \quad (2.20)$$

kus ST - leibkonnaliikme aastane keskmine sissetulek, €,

A - leibkonnaliikme keskmine aastane elektritarbimine, kWh.

Teine variant majapidamisesektori katkestuskahju arvutamiseks on majapidamiste sissetulekul põhinev meetod, mille põhimõte on vaba aja rahaline hindamine. Meetod põhineb teoorial, et tavainimene ei saa kasu ainult rahast või ostetud kaubast. Lisandub ka aeg. Näitena saab tuua televiisori. Kui inimene lihtsalt omab televiisorit, siis ei esinda see televiisor üksinda kasu või lisaväärtust, sest inimesel on vaja televiisori vaatamiseks ka aega. Seega on väärtuse tekitamisel sisendiks nii raha televiisori ostmiseks kui ka aeg selle vaatamiseks. Meetod võrdleb inimese sissetulekut vaba ajaga. Optimaalsel juhul on inimese ühe tunni netotöötasu võrdne ühe tunni vaba ajaga. Eeldatakse, et kui inimene töötab optimaalsest rohkem tunde, siis väheneb selle võrra sissetulek, aga tõuseb vaba aja väärtus, sest rohkem töötunde tähendab vähem puhkeaega. Ka kodutööde aja hind võetakse võrdseks vaba aja hinnaga, sest katkestuse ajal tegemata kodutööd on vaja teha hiljem ja seega väheneb selle arvelt puhkeaeg. Reaalsuses tekib probleem nende inimeste aja hindamisega, kes tööl ei käi, näiteks lapsed, tudengid ja pensionärid. Nende puhul on välja pakutud ühe variandina ühe tunni tasu pooleks jagamine. Meetod sobib ainult elektrist sõltuvate puhkeaja tegevuste hindamiseks ja muid võimalikke kulusid, näiteks riknenud toit, ei arvestata. [14] Ei arvestata ka ühe tegevuse teisega asendamist ehk elektrist sõltuv vaba aja tegevus vahetatakse välja elektrist mitte sõltuva tegevuse vastu [32].

2.5 Katkestuskahju arvutamine varustuskindluse piirkondade järgi

Alternatiiviks eelnevalt kirjeldatud meetoditele oleks katkestuskahjude arvutamine varustuskindluse piirkondade järgi. Varustuskindluse piirkondade näol on tegemist võrgu tüüpsete osadega, millele rakendatakse vastavaid tüüplahendusi näiteks võrgu konfiguratsiooni, rikete likvideerimise jms osas. Meetodiga oleks võimalik hinnata katkestuskahju olukorras, kus ei ole teada uuritava koormuspunkti või võrguosa koormusstruktuur. Varustuskindluse piirkonnad määratakse erinevate näitajate abil. Üheks selliseks näitajaks on asustustihedus ehk klientide arv käidupiirkonna pindala ühiku kohta (tk/km^2). Kuna inimeste paiknemisest sõltub tarbimise iseloom, siis on teine oluline näitaja tarbimistihedus ehk aastane keskmine tarbimine käidupiirkonna pindalaühiku kohta (MWh/km^2). Asustustiheduse näitaja peegeldab klientide hulka, tarbimistihedus kirjeldab tarbimise ulatust ja seetõttu need näitajad korrutatakse, et saada täpsem tulemus. Kasutatakse teisi näitajaid, näiteks võrgu tihedus km/km^2 , tippkoormustihedus (MW/km^2), hoonestustihedus. [33]

Inimeste paiknemist ja tarbimise iseloomu arvestades saab Eestis eristada nelja asustustiheduse piirkonda [33]:

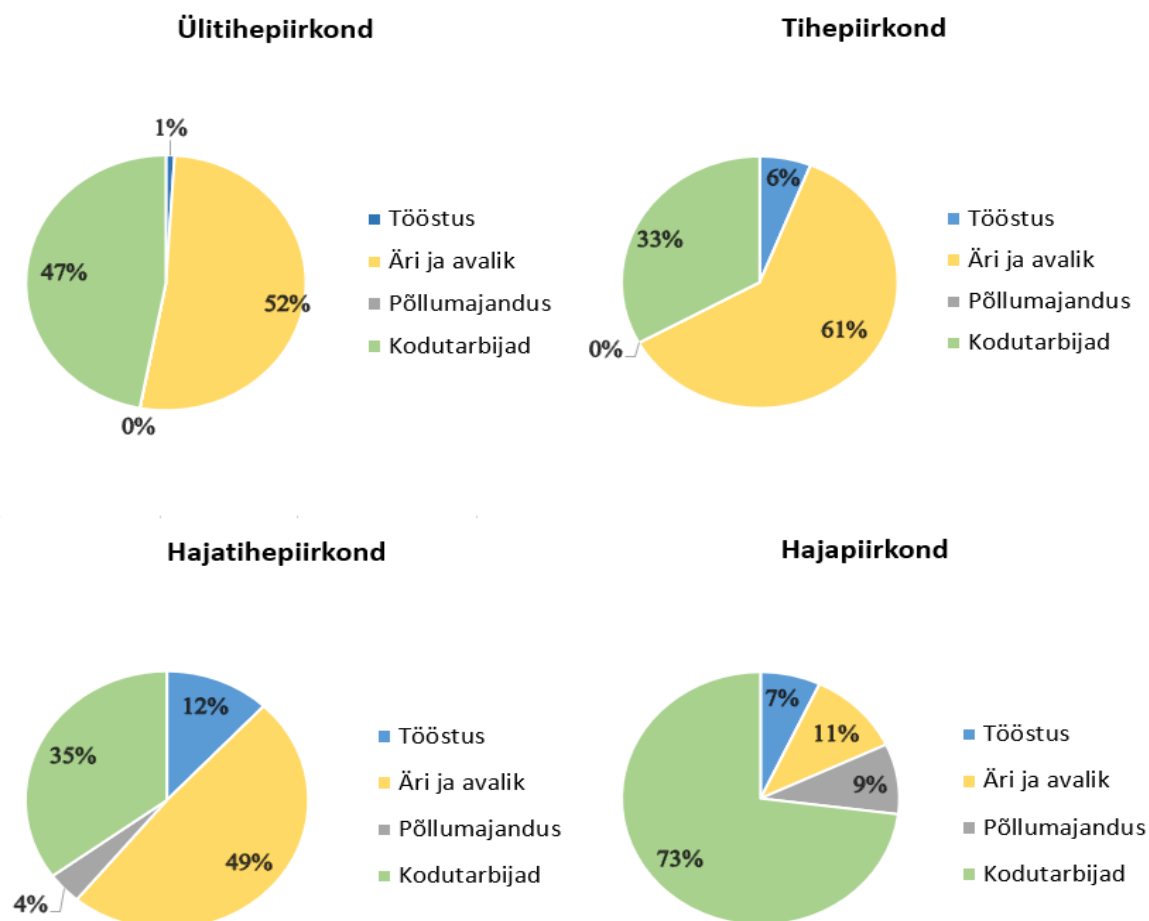
- Ülitihedupiirkond, mida iseloomustab väga tihe kõrghoonestus, sillutatud tänavavõrgustik, suur osakaal koormusest on äri ja avalikul sektoril ning vähesel määral on kodutarbijaid (korterimajad). Siia kuulub kolm suurimat kasvupiirkonda ehk Tallinna, Pärnu ja Tartu kesklinnad.
- Tihedupiirkond, kus on tihe hoonestus (peamiselt mitmekorruseline). Ka siin domineerib äri ja avaliku sektori osakaal koormusest, aga kodutarbijate osakaal on suurem, kui ülitihedupiirkonnas. Kõikjal on sillutatud tänavad. Tihedupiirkonnad on näiteks linnaosade ja äärelinnade keskused, üle 4000 elanikega keskused, tehnopargid, liftidega korterimajadega linnaosad.
- Hajatihedupiirkond, milles on segatüüpi hoonestus ehk eramud, ridaelamud, keskmised ja väiksemad korterimajad, sillutatud tänavavõrgustik. Tarbimine on kohalikule majandusele vastav segatarbimine. Hajatihedupiirkond on näiteks alevid ja alevikud, aiandusühistud, vähema kui 4000 elanikuga linnad ja üle 4000 elanikega linnade äärelinnad.
- Hajapiirkond, kus eramud paiknevad väiksemate gruppidenä. Teedevõrku iseloomustavad pinnaseteed ja sillutatud teid on kuni $2 \text{ km}/\text{km}^2$. Tarbimine on samuti kohalikule majandusele vastav segatarbimine (talumajad, teenindustevõtted, põllumajandusettevõtted).

Elektrilevil on välja toodud piirkondade määramiseks leitud näitajate soovitatavad vahemikud (tabel 2.4). Elektrilevi andmetel annab kõige parema tulemuse näitaja klienti-GWh/km⁴. [33]

Tabel 2.4 Asustustiheduse näitajate vahemikud varustuskindluse piirkondadele [33]

| | Ülitihepiirkond | Tihepiirkond | Hajatihepiirkond | Hajapiirkond |
|---|-----------------|---------------|------------------|--------------|
| Hoonestustihedus m ² /m ² | üle 2 | 0,2...2 | 0,05...0,2 | alla 0,05 |
| KP võrgu koormustihedus MW/km ² | üle 10 | 1...10 | 0,2...1 | alla 0,2 |
| Tarbimistihedus GWh/km ² | üle 40 | 1...40 | 0,1...1,3 | alla 0,1 |
| Klientide tihedus klienti/km ² | üle 10000 | 1500...10000 | 10...1500 | alla 10 |
| klienti-GWh/km ⁴ | üle 400000 | 2000...400000 | 1...2000 | alla 1 |
| Asustustihedus elaniku/km ² | üle 10000 | 3000...10000 | 300...3000 | alla 300 |

Alloleval joonisel 2.4 on näha Elektrilevi poolt tellitud uuringus [33] „Elektrilevi kesk- ja madalpingevõrgu varustuskindluse näitajad ja muutuste mõjurid erinevates varustuskindluse piirkondades üleminekul kaablivõrgule“ leitud Eesti tarbimissektorite osakaalud varustuskindluse piirkondades.



Joonis 2.4 Tarbijasektorite osakaalud varustuskindluse piirkondade järgi [33]

Osakaalude abil on võimalik määrata piirkondade katkestuskahju suurus. [33] Tarbijasektorite osakaalude abil leitud katkestuskahju väärtused on allolevas tabelis 2.5:

Tabel 2.5 Katkestuskahju väärtused erinevate varustuskindluse piirkondade kohta

| Varustuskindluse piirkond | <i>CENS, €/kWh</i> | <i>CD, €/kW</i> |
|----------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Ülitihedipiirkond | 4,75 | 0,37 |
| Tihedipiirkond | 4,94 | 0,42 |
| Hajatihedipiirkond | 4,73 | 0,47 |
| Hajapiirkond | 3,96 | 0,42 |
| Keskmine | 4,60 | 0,42 |

3. METOODIKA RAKENDAMINE EESTI PÕHIVÕRGUS

3.1 Kliendiuuringute meetodika

Eestis on kliendiuuringutel põhineva meetodika rakendamine raskendatud kliendiuuringute puudumise tõttu. Viimati korraldatud kliendiuuring toimus aastal 2003 ehk 15 aastat tagasi. Nii pika perioodi puhul on muutunud nii majandustingimused kui tehnoloogia ning raha väärtus on langenud inflatsiooni tõttu. Tolleaegse raha väärtuse saab tarbijahinnaindeksi muutust arvestades tänapäevasesse vääringusse korrigeerida. Samas on 2003. aasta kliendiuuringu suurima miinusena välja toodud uuringu teostamise liiga lühike aeg ja väike maht, mis mõjutab tulemuste usaldusväärsust. Tehtud kliendiuuring sobib pigem katseuuringuks, mille alusel teostada uus täpsem ja mahukam uuring. Parema puudumisel tuleb käesolevas töös kasutada 2003 aasta kliendiuuringu abil leitud erikatkestuskahjude väärtuseid (tabel 3.1 ja 3.2), milleks on tarbijasektorite erikahjufunktsioonid ja nende põhjal leitud andmata energiaühiku hind *CENS* (€/kWh) ning katkestatud võimsusühiku hind *CD* (€/kW) ehk *Cost of Interrupted Demand*. [17]

Tabel 3.1 2003 aasta erikatkestuskahjud erinevate katkestusaegade korral tarbijasektorite ja kogu riigi kohta [17]

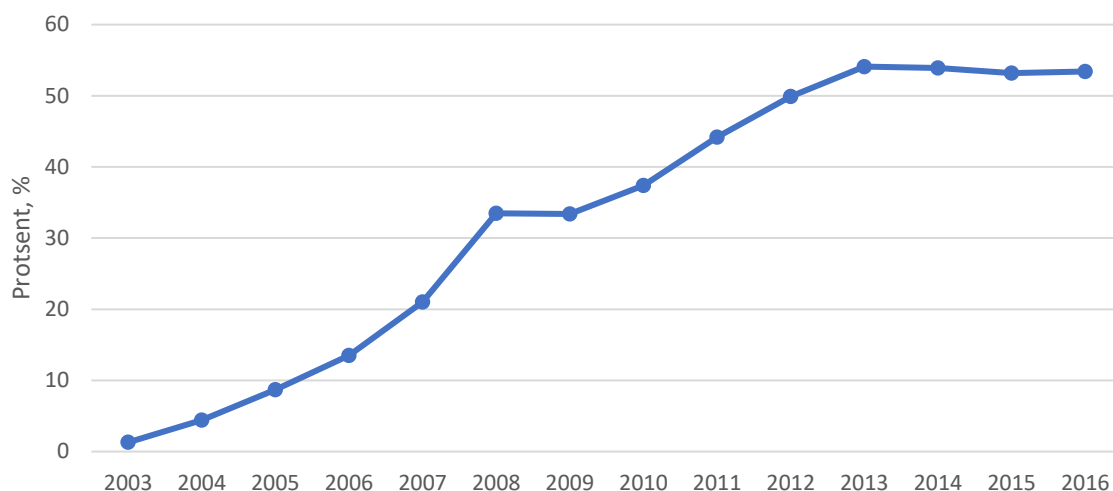
| Sektor | Tööstus | | Teenindus | | Põllumajandus | | Majapidamised | | Kogu riik | |
|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|-------------|--------------|
| | SCDF, kr/kW | SCDF, kr/kWh | SCDF, kr/kW | SCDF, kr/kWh | SCDF, kr/kW | SCDF, kr/kWh | SCDF, kr/kW | SCDF, kr/kWh | ACDF, kr/kW | ACDF, kr/kWh |
| 2 sekundit | 7,87 | 0,00180 | 3,53 | 0,0007 | 3,10 | 0,0006 | 3,50 | 0,0007 | 5,15 | 0,00110 |
| 1 minut | 17,79 | 0,00338 | 4,07 | 0,0008 | 3,38 | 0,0006 | 3,76 | 0,0007 | 8,02 | 0,00170 |
| 20 minutit | 18,41 | 0,00421 | 15,64 | 0,0030 | 8,39 | 0,0016 | 8,11 | 0,0015 | 14,14 | 0,00300 |
| 1 tund | 38,17 | 0,00873 | 40,65 | 0,0077 | 24,04 | 0,0046 | 21,35 | 0,0041 | 33,26 | 0,00690 |
| 2 tundi | 48,58 | 0,01111 | 74,01 | 0,0141 | 49,06 | 0,0093 | 45,18 | 0,0086 | 54,70 | 0,01110 |
| 4 tundi | 68,78 | 0,01572 | 129,19 | 0,0246 | 81,13 | 0,0154 | 86,94 | 0,0165 | 91,64 | 0,01840 |
| 8 tundi | 107,40 | 0,02447 | 248,68 | 0,0473 | 133,90 | 0,0255 | 172,84 | 0,0329 | 167,52 | 0,03340 |
| 24 tundi | 153,77 | 0,03542 | 333,90 | 0,0635 | 210,00 | 0,0400 | 261,30 | 0,0497 | 238,72 | 0,04760 |

Tabel 3.2 2003 aasta keskmine andmata energia hind ja katkestatud võimsusühiku hind [17]

| Sektor | CENS, kr/kWh | CD, kr/kW |
|-----------------------|--------------|-----------|
| Tööstussektor | 39,8 | 13,3 |
| Äri- ja avalik sektor | 56,2 | 3,53 |
| Põllumajandussektor | 37,0 | 3,1 |
| Kodumajapidamised | 36,7 | 3,5 |
| Kogu riik | 43,3 | 7,22 |

Selleks, et 2003. aasta katkestuskahjud sektorite kaupa (tabelis 3.2) ning erikatkestuskahjud erinevate katkestusaegade korral tarbijasektorite ja kogu riigi kohta (tabelis 3.1) oleksid tänapäevases vääringus, tuleb need kõigepealt ümber arvutada eurodeks (kurss: 1 euro = 15,64664

krooni) ja seejärel korrigeerida tarbijahinnaindeksi muutusega. [34] Joonisel 3.1 on näha tarbijahinnaindeksi muutus vahemikus 2003-2016:



Joonis 3.1 Tarbijahinnaindeksi muutus [34]

Vaadeldavas ajavahemikus on tarbijahinnaindeksi muutuseks 58,6 %. Seega tuleb 2003. aasta katkestuskahjud (tabelist 3.1 ja 3.2) lisaks valuutakursile läbi korrutada ka 1,586-ga. Näitena tuuakse teenindussektori kahe sekundilise katkestuse katkestatud võimsusühiku hinna (3,53 kr/kW) korrigeerimine tänapäevasesse vääringusse:

$$C_{L,teenindus}(2 \text{ sek}) = \frac{3,53 \text{ kr/kW}}{15,64664 \text{ kr}} * 1,586 = 0,36 \text{ €/kW}$$

Tarbijahinnaindeksiga ja valuutakursiga korrigeeritud tarbimissektorite keskmise kliendi erikatkestuskahjud, mille jada moodustab sektori keskmise kliendi erikahjufunktsiooni *SCDF*, on tabelis 3.3 ning joonistel 3.2 ja 3.3 ning andmata energia hind *CENS* ja katkestatud võimsusühiku hind *CD* sektorite kaupa on näha tabelis 3.4.

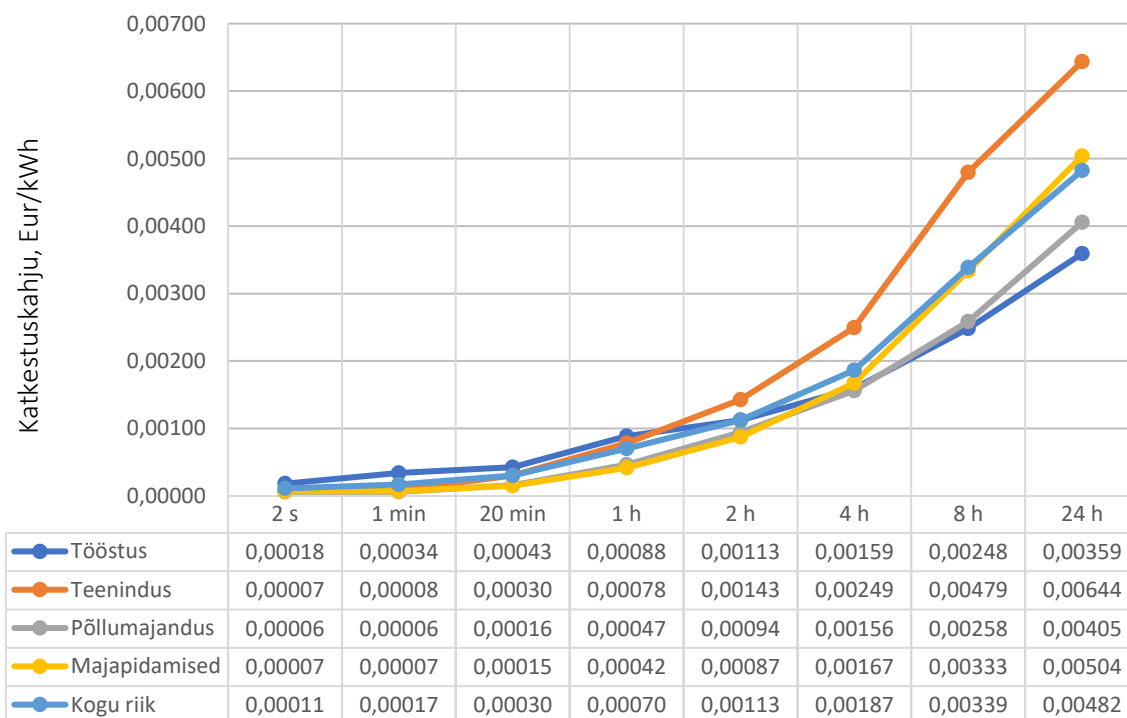
Tabel 3.3 2016 aasta erikatkestuskahjud erinevate katkestusaegade korral tarbijasektorite ja kogu riigi kohta

| Sektor | Tööstus | | Teenindus | | Põllumajandus | | Majapidamised | | Kogu riik | |
|------------|------------|-------------|------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|------------|-------------|
| | SCDF, €/kW | SCDF, €/kWh | SCDF, €/kW | SCDF, €/kWh | SCDF, €/kW | SCDF, €/kWh | SCDF, €/kW | SCDF, €/kWh | ACDF, €/kW | ACDF, €/kWh |
| 2 sekundit | 0,80 | 0,00018 | 0,36 | 0,00007 | 0,31 | 0,00006 | 0,35 | 0,00007 | 0,52 | 0,00011 |
| 1 minut | 1,80 | 0,00034 | 0,41 | 0,00008 | 0,34 | 0,00006 | 0,38 | 0,00007 | 0,81 | 0,00017 |
| 20 minutit | 1,87 | 0,00043 | 1,59 | 0,00030 | 0,85 | 0,00016 | 0,82 | 0,00015 | 1,43 | 0,00030 |
| 1 tund | 3,87 | 0,00088 | 4,12 | 0,00078 | 2,44 | 0,00047 | 2,16 | 0,00042 | 3,37 | 0,00070 |
| 2 tundi | 4,92 | 0,00113 | 7,50 | 0,00143 | 4,97 | 0,00094 | 4,58 | 0,00087 | 5,54 | 0,00113 |
| 4 tundi | 6,97 | 0,00159 | 13,10 | 0,00249 | 8,22 | 0,00156 | 8,81 | 0,00167 | 9,29 | 0,00187 |
| 8 tundi | 10,89 | 0,00248 | 25,21 | 0,00479 | 13,57 | 0,00258 | 17,52 | 0,00333 | 16,98 | 0,00339 |
| 24 tundi | 15,59 | 0,00359 | 33,85 | 0,00644 | 21,29 | 0,00405 | 26,49 | 0,00504 | 24,20 | 0,00482 |

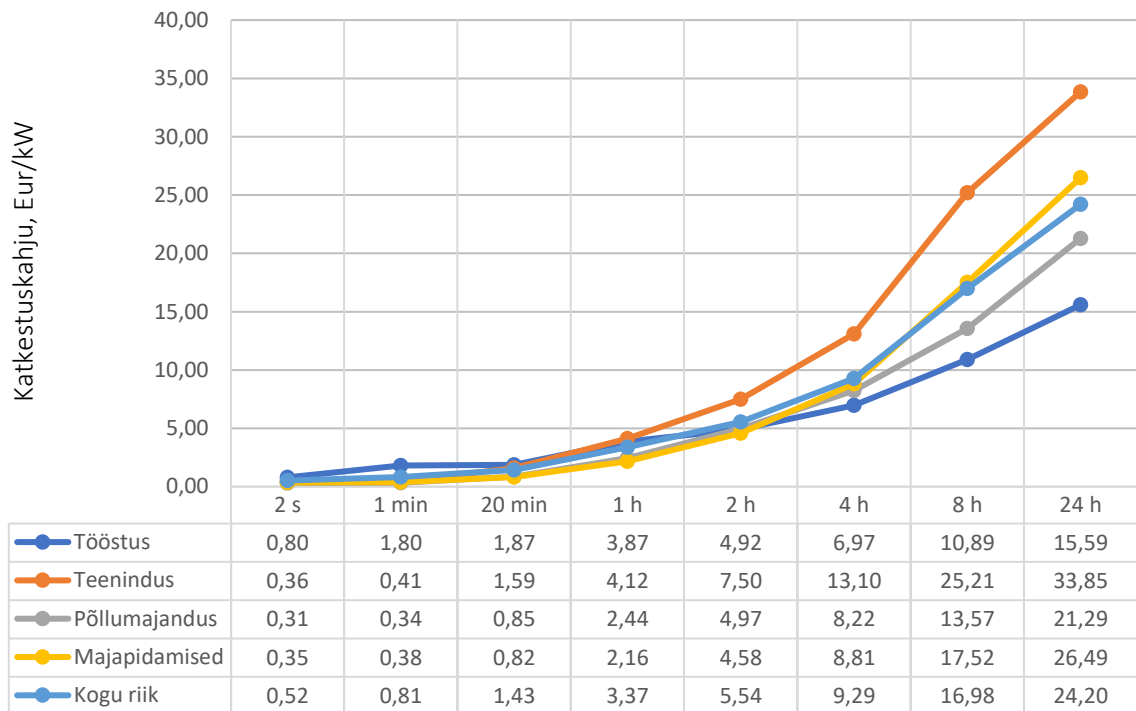
Tabel 3.4 2016 aasta keskmine andmata energia hind ja katkestatud võimsusühiku hind

| Sektor | CENS, €/kWh | CD, €/kW |
|-----------------------|-------------|----------|
| Tööstussektor | 4,03 | 1,35 |
| Äri- ja avalik sektor | 5,70 | 0,36 |
| Põllumajandussektor | 3,75 | 0,31 |
| Kodumajapidamised | 3,72 | 0,35 |
| Kogu riik | 4,39 | 0,73 |

2003. aasta uuringu tulemuste järgi on Eestis suurimad kahjuhinnangud teenindussektoril ja tööstussektoril, mis on loogiline, kuna tegemist on elektritarbijatega, kellel esinevad katkestuste korral suuremad kahjud (nii otsesed kui kaudsed) ja kes on elektritoitest sõltuvamad võrreldes põllumajandussektori ja majapidamiste sektoriga. Tööstussektoril on suurim kahju katkestatud võimsusühiku kohta, kuna tööstusseadmed on tundlikud ja hetkeline katkestus võib juba häiringuid põhjustada. Teenindussektoril on suurim andmata energiaühiku hind, kuna kahjud tulevad välja pikemate katkestusaegade korral kui mõni sekund (näiteks külmutusseadmed sulavad üles alles teatud aja möödumisel). Tabelitest 3.3 ja 3.4 on näha, et põllumajandustarbijate ja kodumajapidamiste katkestuskahjud jäävad üsna samasse suurusjärku.



Joonis 3.2 2016 aasta erikahjufunktsioon tarbijasektorite ja kogu riigi kohta, normaliseeritud aastase kogutarbimise järgi

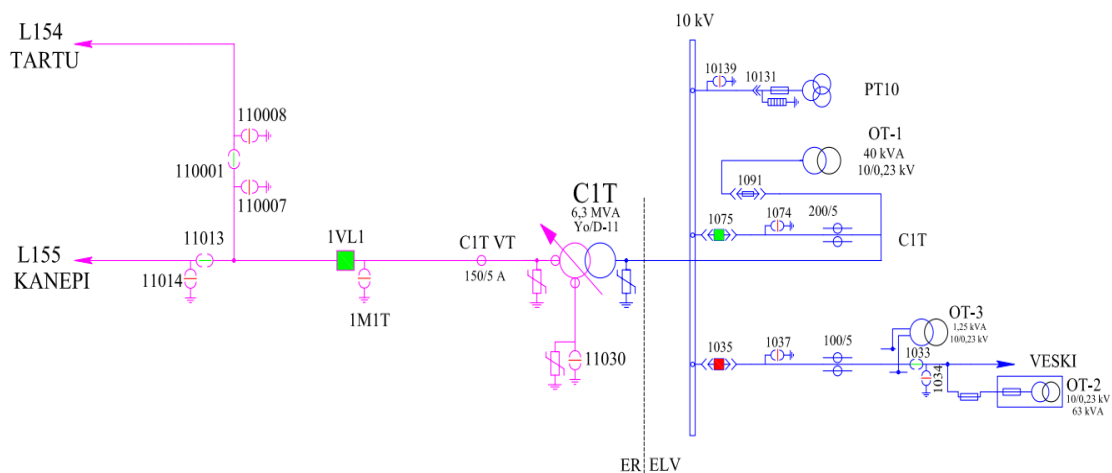


Joonis 3.3 2016 aasta erikahjufunktsioon tarbijasektorite ja kogu riigi kohta, normaliseeritud aastase tippkoormuse järgi

Põhivõrgu seisukohast pakub huvi tarbimiskohas toimunud konkreetse katkestuse maksumus. Selleks on vaja teada kaht väärtust: tarbimiskohta ühendatud klientide katkestuse tõttu tekkinud kulusid energiaühiku kohta ja klientidele katkestuse tõttu andmata jäänud energiakogust. Info andmata jäänud energia kohta tarbimiskohtades on olemas. Andmata energiakogus määratakse katkestuse pikkust arvestades SCADA 5 minuti keskmiste mõõteandmete järgi: kui katkestuse pikkuseks on kuni 2 tundi, siis arvutatakse andmata energia katkestusele ca 5 minutit eelneva koormuse järgi. Pikema kui kahetunnise katkestuse korral võetakse andmata energiakoguse määramisel aluseks koormusgraafik, mille abil leitakse vastavalt tööpäeva või puhkepäeva samasuguse katkestuse aja ja perioodi keskmine. [35] Probleemiks on klientide katkestuskahju kindlaks tegemine. Selleks on alustuseks vaja teada tarbimiskoha tarbijate struktuuri ehk kui suur osakaalu moodustavad tarbimisest näiteks tööstustarbijad, majapidamised, teenindustarbijad, põllumajandustarbijad. Lisaks tarbija tüübile on vaja teada ka nende katkestuse tõttu saamata jäänud energiakoguseid ehk mitu kWh jäi katkestuse tõttu tarbijagruppidele andmata. Nii oleks võimalik iga tarbijagrupi saamata jäänud kilovatt-tunnid siduda kliendiuringuga kindlaks tehtud andmata kilovatt-tunni hinnaga. Hetkel on põhivõrgul olemas jaotusvõrgu ettevõtte Elektrilevi OÜ poolt koostatud 110 kV alajaamade elektritarbimise struktuur aastate 2012-2015 kohta [36]. Struktuuris on välja toodud tööstustarbijate, kodumajapidamiste, põllumajanduse ning eraldi

teenindussektori ja avaliku sektori elektritarbimine 110 kV alajaamade kohta kuude kaupa. Struktuuri alusel saab leida tarbijasektorite osakaalud uuritava alajaama tarbimisest ja rakendada neid osakaale katkestuskahju arvutamisel. Töös ei saa kasutada 2015 aasta 110 kV alajaamade elektritarbimise andmeid, kuna need ei olnud terve aasta kohta terviklikud, seega kasutati arvutustes 2014 aasta andmeid.

Töös nimetatud meetodeid rakendatakse ühes Eesti põhivõrgu 110/10 kV alajaamas 22.05.2018 kell 12:58 toimunud avariilisele katkestusele kestusega 42 minutit, mille põhjustas trafo C1T väljalülitumine 10 kV võrku läbiva lühise tõttu. Kuna alajaamas on ainult üks trafo, kaotasid toite kõik 10 kV latile ühendatud tarbijad (alajaama skeem on joonisel 3.4). Eleringi poolt jäi andmata 1,176 MWh elektrienergiat. [37]



Joonis 3.4 Katkestuskahju arvutusnäitena kasutatava 110/10 kV alajaama normaalskeem [38]

Kasutades selle alajaama 2014. aasta koormusstruktuuri ning 2016. aasta jaoks korrigeeritud Eesti tarbijasektorite erikatkestuskahjusid erinevate katkestusaegade korral ja nendele sektoritele andmata energia hinda, saab leida alajaamas toimunud 42 minutilise katkestuse maksumuse. Katkestuse maksumuse arvutamiseks kasutatakse peatükis 2.3.2 kirjeldatud näitajaid *CENS*, *COC*, *VOLL* ja *IEAR*.

3.1.1 Andmata energia hind (*CENS*)

Andmata energiaühiku hind *CENS* leitakse peatükis 2.3.2 nimetatud valemi 2.17 abil, kus $C_{L,j}(r_i)$ on kindla koormuspunkti j ehk valitud alajaama katkestuskahjud kilovati kohta konkreetsete katkestuskestuste r_i korral:

$$CENS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{C_{L,j}(r_i)}{LF * r_i}$$

Seega on kõigepealt vaja leida valitud alajaamale $C_{L,j}(r_i)$ väärtuste jada. Selleks on vaja tabelis 2.6 näidatud tarbijasektorite n_y erikatkestuskahjud $C_{L,y}(r_i)$ erinevate katkestusaegade r_i korral kilovati kohta korrigeerida teguriga w_{yj} , mis on valitud alajaama sektori y tarbimise osakaal selle alajaama kogutarbimisest (valem 2.8):

$$C_{L,j}(r_i) = \sum_{y=1}^{n_y} C_{L,y}(r_i) * w_{yj}$$

Seega on valitud alajaamale erikahjufunktsiooni koostamiseks kõigepealt vaja teada sektorite osakaale, mille saab leida selle alajaama 2014. aasta koormusstruktuuri järgi. Alajaama 2014. aasta elektritarbimine tarbijasektorite kaupa on antud allolevas tabelis 3.5:

Tabel 3.5 Selle alajaama 2014. aasta elektritarbimine sektorite kaupa [36]

| Tarbimise periood | Tööstus, kWh | Äri ja avalik, kWh | Põllumajandus, kWh | Majapidamised, kWh |
|-------------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Jaanuar | 8640 | 151456 | 71009 | 339757 |
| Veebruar | 15038 | 134287 | 63407 | 263301 |
| Märts | 8382 | 135998 | 68828 | 247739 |
| Aprill | 8327 | 124637 | 74872 | 210768 |
| Mai | 17022 | 126578 | 60391 | 186918 |
| Juuni | 8505 | 123370 | 56014 | 172480 |
| Juuli | 9839 | 128530 | 57740 | 176035 |
| August | 8099 | 142084 | 78050 | 191268 |
| September | 9309 | 122169 | 71085 | 190105 |
| Oktoober | 10840 | 134851 | 78782 | 231739 |
| November | 11927 | 139034 | 82422 | 252952 |
| Detsember | 10993 | 149684 | 92155 | 326604 |
| Kokku | 126920 | 1612677 | 854756 | 2789666 |

Valitud alajaama aastane elektrienergia kogutarbimine 2014. aasta kohta on seega 5384019 kWh. Sektori osakaalu alajaama elektritarbimisest saab, kui sektori aastane elektritarbimine jagada alajaama aastase elektritarbimisega. Seega on alajaamas tööstussektori osakaal 2%, äri ja avaliku sektori osakaal on 30%, majapidamiste osakaal on 52% ja põllumajandussektori osakaal on 16%. Järgnevas tabelis on valemi 2.8 abil leitud alajaama tarbijasektorite kahjud erinevate katkestuskestuste korral, mille alusel on saadud lõplikud erikatkestuskahjud valitud alajaamale (tabel 3.6):

Tabel 3.6 Valitud alajaama erikatkestuskahjud erinevate katkestuse kestuste korral

| Katkestuse kestus | Tööstus | | Äri ja avalik | | Põllumajandus | | Majapidamised | | Valitud AJ | |
|-------------------|-------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|-------------|------------|
| | CCDF, €/kWh | CCDF, €/kW | CCDF, €/kWh | CCDF, €/kW | CCDF, €/kWh | CCDF, €/kW | CCDF, €/kWh | CCDF, €/kW | CCDF, €/kWh | CCDF, €/kW |
| 2 sekundit | 0,000004 | 0,02 | 0,00002 | 0,11 | 0,00001 | 0,05 | 0,00004 | 0,18 | 0,00008 | 0,36 |
| 1 minut | 0,00001 | 0,04 | 0,00002 | 0,12 | 0,00001 | 0,05 | 0,00004 | 0,20 | 0,00008 | 0,43 |
| 20 minutit | 0,00001 | 0,04 | 0,00009 | 0,47 | 0,00003 | 0,14 | 0,00008 | 0,43 | 0,00022 | 1,08 |
| 1 tund | 0,00002 | 0,09 | 0,00023 | 1,23 | 0,00007 | 0,39 | 0,00022 | 1,12 | 0,00056 | 2,83 |
| 2 tundi | 0,00003 | 0,12 | 0,00043 | 2,25 | 0,00015 | 0,79 | 0,00045 | 2,37 | 0,00108 | 5,53 |
| 4 tundi | 0,00004 | 0,16 | 0,00075 | 3,92 | 0,00025 | 1,31 | 0,00087 | 4,57 | 0,00194 | 9,96 |
| 8 tundi | 0,00006 | 0,26 | 0,00144 | 7,55 | 0,00041 | 2,15 | 0,00173 | 9,08 | 0,00372 | 19,04 |
| 24 tundi | 0,00008 | 0,37 | 0,00193 | 10,14 | 0,00064 | 3,38 | 0,00261 | 13,72 | 0,00527 | 27,61 |

Selguse mõttes teostatakse valitud alajaama kahesekundilise katkestuse võimsusühiku maksumuse (0,36 €/kW) arvutusnäide, kasutades avaldist 2.8:

$$\begin{aligned}
 C_{L,j}(r_i) &= C_{L, \text{valitud AJ}}(2 \text{ s}) = \sum_{y=1}^{ny} C_{L,y}(r_i) * w_{y,j} = \\
 &= C_{L, \text{tööstus}}(2s) * w_{y, \text{tööstus}} + C_{L, \text{äri}}(2s) * w_{y, \text{äri}} + C_{L, \text{pöld}}(2s) * w_{y, \text{pöld}} + C_{L, \text{kodu}}(2s) * w_{y, \text{kodu}} = \\
 &= 0,80 \text{ €/kW} * \frac{2\%}{100\%} + 0,36 \text{ €/kW} * \frac{30\%}{100\%} + 0,31 \text{ €/kW} * \frac{52\%}{100\%} + 0,35 \text{ €/kW} * \frac{16\%}{100\%} = \\
 &= 0,36 \text{ €/kW}
 \end{aligned}$$

Katkestuskahjud ülejäänud katkestusaegadele (1 minut, 20 minutit, 1, 2, 4, 8 ja 24 tundi) arvutatakse samamoodi.

Kasutades valemis 2.17 valitud alajaama erikatkestuskahjusid kilovatti kohta (ülal olevast tabelis 2.11), avaldub sellele alajaamale leida andmata kilovatt-tunni hinna *CENS*:

$$\begin{aligned}
 CENS &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{C_{L, \text{valitud AJ}}(r_i)}{LF * r_i} = \\
 &= \frac{1}{6} * \left(\frac{1,08 \text{ €/kW}}{0,5 * 0,33 \text{ h}} + \frac{2,83 \text{ €/kW}}{0,5 * 1 \text{ h}} + \frac{5,53 \text{ €/kW}}{0,5 * 2 \text{ h}} + \frac{9,96 \text{ €/kW}}{0,5 * 4 \text{ h}} + \frac{19,04 \text{ €/kW}}{0,5 * 8 \text{ h}} + \frac{27,61 \text{ €/kW}}{0,5 * 24 \text{ h}} \right) = \\
 &= 4,96 \text{ €/kWh}
 \end{aligned}$$

Valemis 2.17 kasutatud koormustegur *LF* väärtusega 0,5 on leitud valitud alajaama aasta keskmise koormuse ja maksimaalkoormuse suhtena. Alajaamale andmata kilovatt-tunni hinna *CENS* arvutamisel ei kasutatud erikahjufunktsiooni lühiajalistele katkestustele (2 sekundile ja 1 minutile) vastavaid punkte, kuna need kirjeldavad rohkem katkestatud võimsusühiku hinda. Korrutades

leitud andmata kilovatt-tunni hinna 22.05.2018 toimunud katkestuse tõttu andmata jäänud energiakogusega, on tulemuseks konkreetse katkestuse maksumus (tabel 3.7).

Tabel 3.7 Valitud alajaama 22.05.2018 toimunud katkestuse maksumus andmata energia hinna *CENS* alusel

| | | |
|--|---------------|----------|
| Valitud alajaama andmata energiaühiku hind <i>CENS</i> | 4,96 | €/kWh |
| Andmata energiakogus | 1176 | kWh |
| Valitud alajaama katkestuskahju: | 5836,2 | € |

3.1.2 Katkestuskulu (COC)

Teine võimalik variant on leida tarbijasektorite osakaale kasutades nende saamata jäänud energiakogust kogu alajaamale andmata jäänud energiakogusest (antud näites 1176 kWh) ja seejärel kasutada vastava sektori keskmise tarbija andmata energiaühiku hindu *CENS* (tabelist 3.4) 22.05.2018 toimunud katkestuse maksumuse määramiseks (valem 2.18):

$$COC = \sum_{y=1}^{ny} E_y * CENS_y$$

Ülal olevat valemit kasutades leitakse näitena tööstussektorile andmata jäänud energiakoguse maksumus. E_y on tööstussektorile andmata jäänud energiakogus (antud näites on tööstussektori osakaal 2,37% ehk 27,7 kWh andmata jäänud 1176 kWh-st) ja $CENS_y$ on tööstussektori andmata energiaühiku hind:

$$COC_{tööstus} = E_y * CENS_y = 27,7 \text{ kWh} * 4,03 \text{ €/kWh} = 111,8 \text{ €}$$

Teostades sellise arvutuskäigu ka teistel sektoritel ja liites saadud tulemused kokku, on vastuseks valitud alajaamas toimunud katkestuse maksumus. Arvutustulemused on tabelis 3.8.

Tabel 3.8 Valitud alajaama 22.05.2018 toimunud katkestuse maksumus *COC* meetodika abil

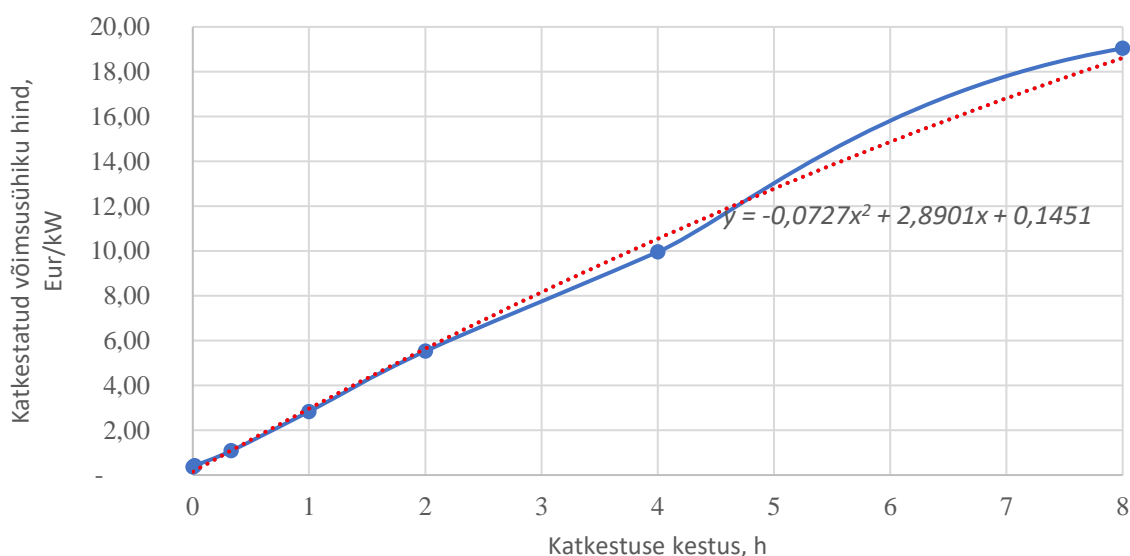
| Sektor | Sektori osakaal alajaamas, % | Sektorile andmata energia, kWh | <i>CENS</i> , €/kWh | <i>COC</i> , € |
|---|------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------|
| Tööstussektor | 2,36 | 27,7 | 4,03 | 111,8 |
| Äri ja avalik sektor | 29,95 | 352,2 | 5,70 | 2006,6 |
| Põllumajandussektor | 15,88 | 186,7 | 3,75 | 700,2 |
| Kodumajapidamised | 51,81 | 609,3 | 3,72 | 2266,7 |
| Katkestuse maksumus valitud alajaamas: | | | | 5085,4 |

Võrdluseks leitakse valitud alajaamas toimunud katkestuse kahju suurus kasutades riigi keskmist andmata energia hinda tabelist 3.4 (4,39 €/kWh). Valitud alajaamas toimunud 42 minutilise katkestuse maksumus leitakse valemi 2.18 järgi:

$$COC \approx E * CENS = 1176 \text{ kWh} * 4,39 \text{ €/kWh} = 5162,6 \text{ €}$$

3.1.3 Andmata energia hind (VOLL ja IEAR)

Kolmanda variandina on võimalik leida valitud alajaama 42 minuti katkestuse tõttu tekkinud kahju kasutades valitud alajaamale leitud erikahjufunktsiooni, millele on lisatud trendijoon. Trendijoon on vajalik, kuna erikahjufunktsioon koosneb punktikogumist, mille moodustavad kindlatele katkestusaegadele (2 sekundit, 15 minutit, 1, 2, 4, 8 ja 24 tundi) vastavad võimsusühiku hinnad, aga teada on vaja 42 minutilisele katkestusele vastavat võimsusühiku hinda. Trendijoon esitab selle punktikogumi funktsioonina, mille abil saab teada 42 minuti katkestuskahju väärtuse. Erikahjufunktsioon ja selle trendijoon on joonisel 3.5:



Joonis 3.5 Valitud 110/10kV alajaama katkestuskahju funktsioonina katkestuse kestusest

Seega oleks 42 minutilise (ehk $r_i = x = 0,7$ tundi) katkestuse võimsusühiku hind:

$$y = C_{L,j}(r_i = 0,7) = -0,0262 \cdot 0,7^2 + 2,5857 \cdot 0,7 + 0,3731 = 2,13 \text{ €/kW}$$

ning avaldise 2.16 järgi:

$$VOLL(r_i) = \sum_{i=1}^N \frac{C_{L,j}(r_i)}{LF * r_i} * p(r_i) = \frac{C_{L,j}(r_i)}{LF * r_i} = \frac{2,13 \text{ €/kW}}{0,5 * 0,7 \text{ h}} = 6,08 \text{ €/kWh}$$

Koormustegurina LF on arvestatud valitud alajaama aasta keskmise koormuse ja maksimumkoormuse suhet.

Kuna katkestus on toimunud, siis selle esinemise tõenäosus $p(r_i)$ on 1 ja samuti on ka katkestuste arv N võrdne ühega. Seega valitud alajaama katkestuskahju oleks:

$$1176 \text{ kWh} * 6,08 \text{ €/kWh} = \mathbf{7150,1 \text{ €}}.$$

Saadud tulemus on suurim võrreldes valitud alajaamale koostatud erikahjufunktsiooni abil leitud katkestuskahju väärtusega (5836,2 €) ja sektorite osakaalude abil leitud katkestuskahjuga (5085,4 €). See on seletatav asjaoluga, et tegemist on tulevikku suunatud valemiga, mis ei sobi eriti hästi juba toimunud katkestuse maksumuse arvutamiseks, kuna matemaatilisest küljest vaadates võetakse mitmed valemis sisalduvad tegurid ühega võrdseks: antud juhul on juba toimunud katkestuse esinemise tõenäosus $p(0,7h)$ võrdne ühega ja katkestuste arv N on samuti võrdne ühega. Sama probleem on näitajaga $IEAR$, mis on samuti tulevikku suunatud ja mille rakendamisel juba toimunud katkestusele taanduvad välja mitmed tegurid, nagu avaldisest 2.13 näha on:

$$IEAR = \frac{ECOST}{ENS} = \frac{\sum_{i=1}^N L_{ji} \lambda_i C_{L,j}(r_i)}{\sum_{i=1}^N L_{ji} \lambda_i r_i} = \frac{L_{ji} * C_{L,j}(r_i)}{L_{ji} * r_i} = \frac{C_{L,j}(r_i)}{r_i}$$

Kuna arvutatakse konkreetse katkestuse kahju, siis $\lambda_i=1$ ja $N=1$ ning tänu sellele taandub välja tegur L_{ji} ehk katkestatud koormuse suurus. Järgi jääb lihtsalt 42 minutilisele katkestusele vastava võimsusühiku hinna (2,13 €/kW) läbijagamine katkestuse kestusega, mis ei anna õiget tulemust, sest võimsusühiku hind 2,13 €/kW vastab juba katkestusele kestusega 42 minutit.

3.2 Analüütilised meetodid

3.2.1 Lisandväärtus

Lisandväärtust kasutades arvutatakse Eesti põllumajandus-, tööstus-, äri ja avalikule sektorile peatükis 2.4 kirjeldatud valemi 2.19 järgi katkestuskahju väärtus kilovatt-tunni kohta. Lisandväärtuse andmed võeti Statistikaameti andmebaasist [40]. Avaldise 2.19 järgi on näiteks põllumajandussektori katkestuskahju:

$$CENS = \frac{GVA_{põllumajandus}}{EC_{põllumajandus}} = \frac{465,1 \text{ milj. €}}{215 \text{ GWh}} = 2,16 \text{ €/kWh}$$

Allolevas tabelis 3.9 on näha ka tööstus- ning äri- ja avaliku sektori katkestuskahjude suurust:

Tabel 3.9 Lisandväärtuse põhjal arvatud tarbijasektorite katkestuskahjud aastal 2016

| Tarbijasektor | Lisandväärtus, miljonit eurot | Lõpptarbimine, GWh | Kogutarbimise osakaal, % | CENS, Eur/kWh |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------|
| Põllumajandussektor | 465,1 | 215 | 2,9 | 2,16 |
| Tööstussektor | 5209,6 | 1953 | 30,2 | 2,42 |
| Äri ja avalik teenindus | 13044,9 | 3019 | 40,7 | 4,32 |

Üldiselt arvatakse, et avaldise 2.19 järgi arvatud katkestuskahju on hea alguspunkt tööstus- ja äri ja avaliku sektori kahjude hindamisel. Probleem tekib selle meetodi kasutamisel, kui soovitakse

hinnata tarbijaklasside katkestuskahjusid. Näitena on toodud Eesti tööstussektori ning äri ja avaliku sektori tarbijaklassid (alasektorid), millele arvutati lisandväärtuse meetodil katkestuskahjud (tabelid 3.10 ja 3.11).

Tabel 3.10 Tööstussektori tarbijaklasside katkestuskahjud arvutatuna lisandväärtuse meetodil

| 2016 aasta andmed Tööstussektori alasektorid | Elektrienergia, GWh | Lisandväärtus, miljonit eurot | CENS, Eur/kWh |
|---|------------------------|----------------------------------|------------------|
| Toiduainete, joogi-, tubakatootmine | 322,4 | 399,5 | 1,24 |
| Tekstiili-, rõiva-, nahktoodete tootmine, nahatöötlemine | 74,5 | 188,4 | 2,53 |
| Puidutöötlemine; paberi, pabertoodete tootmine, trükindus | 814,7 | 631,4 | 0,77 |
| Koksi ja puhastatud naftatoodete tootmine | 237,9 | 57,6 | 0,24 |
| Keemia- ja farmaatsiatoodete tootmine | 115,2 | 126,1 | 1,09 |
| Kummi- ja plasttoodete tootmine | 160,8 | 103,5 | 0,64 |
| Muude mittemetalletest mineraalidest toodete tootmine | 94,3 | 152,1 | 1,61 |
| Metallitootmine | 13 | 19,9 | 1,53 |
| Metalltoodete tootmine | 125,7 | 343,8 | 2,74 |
| Arvutite, elektriseadmete ja transpordivahendite tootmine | 199,4 | 481,2 | 2,41 |
| Ehitus | 83,3 | 1216,2 | 14,60 |
| Mäetööstus | 18 | 200,5 | 11,14 |

Tabel 3.11 Äri ja avaliku sektori tarbijaklasside katkestuskahjud arvutatuna lisandväärtuse meetodil

| 2016 aasta andmed Äri ja avaliku sektori alasektorid | Elektrienergia, GWh | Lisandväärtus, miljonit eurot | CENS, Eur/kWh |
|---|------------------------|----------------------------------|---------------|
| Veevarustus ja kanalisatsioon, jäätmekäitlus | 122,8 | 175,2 | 1,43 |
| Hulgi- ja jaekaubandus | 817,6 | 2380,2 | 2,91 |
| Veondus ja laondus | 280,7 | 1436 | 5,12 |
| Majutus ja toitlustus | 246 | 378,0 | 1,54 |
| Info ja side | 129,9 | 1031,0 | 7,94 |
| Finants- ja kindlustustegevus | 14,2 | 712,4 | 50,17 |
| Kinnisvaraalaane tegevus | 665,2 | 1971,2 | 2,96 |
| Kutse-, teadus- ja tehnikalaane tegevus | 61,5 | 973,7 | 15,83 |
| Haldus- ja abitegevused | 43,8 | 718,9 | 16,41 |
| Avalik haldus ja riigikaitse | 290,5 | 1339,9 | 4,61 |
| Haridus | 59,4 | 877,1 | 14,77 |
| Tervishoid ja sotsiaalhoolekanne | 143,2 | 764,4 | 5,34 |
| Kunst, meelelahutus ja vaba aeg | 43,5 | 285,8 | 6,57 |
| Muud teenindavad tegevused | 19,4 | 175,7 | 9,06 |

Meetodi miinuseks on väga suured katkestuskahju väärtused, mis on saadud madala elektritarbimisega sektorites. Näiteks tabelis 3.10 hakkab silma ehituse ja mäetööstuse kõrge katkestuskulu vastavalt 14,60 €/kWh ja 11,14 €/kWh ning paberi ja puidutööstuse väga madal katkestuskahju 0,77 €/kWh. Tuleb vaadata elektritarbimist sektorite kaupa ja nii on näha, et tegelikult on suurima elektritarbimisega sektoril kõige väiksem katkestuskahju väärtus, mille tingib arvutusvalemis lisandväärtuse läbijagamine sektori mahuka elektritarbimisega, mistõttu on matemaatiliselt vastuseks väike katkestuskahju suurus. Äri ja avaliku sektori katkestuskahjust tabelis 3.11 silmatorkav finants- ja kindlustustegevuse katkestuskahju suurusega 50,17 €/kWh ja veevarustuse katkestuskahju suurusega 1,43 €/kWh. Lisaks eeldab meetod, et kui toimub katkestus siis katkeb ettevõtte tegevus 100%, mis ei pruugi nii olla. Selleks, et saada õigem tulemus, on üheks võimalikuks variandiks teha kindlaks, kui palju sõltub tarbija elektrist. Igas sektoris on protsessid, mida loetakse ettevõtte tegevuse seisukohalt kriitiliselt tähtsaks. Sellise protsessi näiteks saab tuua külmutamise (elektritoitel), mis on tunduvalt olulisem toiduainete tööstuses, kui näiteks tekstiilivabrikus. Protsessid, mida kriitiliseks ei peaks lugema, on näiteks valgustus- kui tööstuses kaob mõneks ajaks valgustus, aga muuks tööstus elektrit ei tarbi, siis see pole ka tootmise seisukohalt kriitilise tähtsusega. [30] Keskmiselt on tööstussektoris kriitilise tähtsusega 80,9% tarbitavast elektrienergiast. Äri ja avalikus sektoris on keskmine 68,2% tarbitavast elektrienergiast, põllumajandussektoris 68,2%. [41]. Neid määrasid rakendades oleks katkestuskahju väärtus tööstussektorile 1,96 €/kWh ning äri- ja avalikule sektorile 2,96 €/kWh ja põllumajandusele 1,48 €/kWh. Võrdluseks on äri ja avaliku sektori kliendiuuringu abil leitud tulemus 5,70 €/kWh, tööstussektoril 4,03 €/kWh, põllumajandusel 3,75 €/kWh. Nagu näha on erinevused üsna suured. Erinevusi tekitab kindlasti fakt, et mõõdetakse ainult andmata jäänud toodangust tekkivat kahju ning ei arvestata muid võimalikke kahjusid nagu riknenud materjalid ja seadmed jms, mis on (eriti tööstussektoris) väga tõenäolised tekkima.

3.2.2 Majapidamiste sissetulek

Meetodi rakendamiseks on kõigepealt vaja teada, kui palju Eesti inimene puhkeaja ja majapidamise peale päevas aega kulutab. Allolevas tabelis 3.12 on kirjas Eesti inimese ajakulu erinevate tegevuste peale, mis on leitud Statistikaameti 2010 aastal korraldatud uuringus [42]. Vaba aja tegevuste seas on mitmeid tegevusi, mis elektrikasutusest ei sõltu. Seega ei arvata meetodi rakendamisel füüsilistele harjutustele, mängudele (mängude alla ei lähe arvutimängud) ja produktiivsele puhkusele kuluvat aega. Füüsilised harjutused on kõik sportlikud tegevused nagu jooksmine, matkamine jms, produktiivne puhkus on tegevused nagu näiteks kalastamine, seenel/marjul

käimine, jaht. Samuti ei arvestata ka passiivset puhkust ja vaba ajaga seotud liikumist. Passiivne puhkus tähendab näiteks lihtsalt lõõgastumist, mitte midagi tegemist, päevitamist. [43] Kõik ülejäänud tabelis 3.12 nimetatud vabaaja tegevused arvestatakse elektrist sõltuvaks. Järelikult on elektrist sõltuva vaba aja tegevustele kuluv aeg päevas 4,25 tundi ehk 253 minutit. Lisades vabale ajale majapidamisele kuuluva aja, saame ajakuluks 7,72 tundi ehk 462 minutit.

Tabel 3.12 Eesti keskmise inimese ajakulu tegevuste kaupa ööpäeva kohta

| Tegevused | Ajakulu, tundides | Ajakulu, minutites |
|--|-------------------|--------------------|
| Isiklik tegevus | 11,21 | 673 |
| Tasustatud töö | 2,63 | 157 |
| Õppimine | 0,63 | 38 |
| Majapidamine ja perekond | 3,48 | 209 |
| Vabatahtlik töö ja nõupidamised | 0,20 | 13 |
| Vaba aeg: | 5,78 | 347 |
| suhtlus, meelelahutus, kultuur | 0,74 | 43 |
| passiivne puhkus | 0,52 | 31 |
| füüsilised harjutused, mängud ja produktiivsed tegevused | 0,67 | 41 |
| hobid ja arvutiga seotud tegevus | 0,65 | 39 |
| meedia (TV, muusika jms) | 2,86 | 171 |
| vaba ajaga seotud liikumine | 0,37 | 22 |
| Piiritlemata ajakasutus | 0,07 | 4 |

Arvestades, et aastal 2016 oli keskmine netotöötasu 924 eurot ja kuus on keskmiselt 22 päeva ja tööpäeva pikkus on 8 tundi, on keskmine netotunnitasu 5,25 eurot [44]. Rahvaarv aastal 2016 on 1315944 inimest, kellest majanduslikult aktiivseid ja mitteaktiivseid oli vastavalt 648928 ja 667016 inimest [45]. Nende andmete alusel on nüüd võimalik arvutada majapidamissektori 2016 aasta lisandväärtus ja selle alusel katkestuskahju. Majapidamissektori aastase lisandväärtuse leidmiseks tuleb leida majanduslikult aktiivsete ja mitteaktiivsete inimeste vaba aja ja majapidamistööde aastane maksumus. Majanduslikult aktiivse inimese lisandväärtus leitakse, kui ühe päeva vaba aja ja majapidamistööde aeg korrutatakse netotunnitasuga ja seejärel korrutatakse see aasta päevade arvuga (365). Lõpuks korrutatakse leitud ühe majanduslikult aktiivse inimese aastane lisandväärtus majanduslikul aktiivsete inimeste arvuga. Sama arvutusprotsess kehtib ka majanduslikult mitteaktiivsetele inimestele, aga erinevuseks on netotöötunnitasu, mis mitteaktiivsete inimeste puhul jagatakse kahega. [32]

Majanduslikult aktiivsete ja mitteaktiivsete inimeste lisandväärtused:

$$GVA_{aktiivsed} = 5,25 \text{ €/h} * 7,72 \text{ h} * 365 * 648928 = 9599,9 \text{ mln €}$$

$$GVA_{mitteaktiivsed} = \frac{5,25}{2} \text{ €/h} * 7,72 \text{ h} * 365 * 667016 = 4933,7 \text{ mln €}$$

Majapidamise sektori lisandväärtus:

$$\begin{aligned} GVA &= GVA_{aktiivsed} + GVA_{mitteaktiivsed} = \\ &= 9599,8 \text{ mln } \text{€} + 4933,7 \text{ mln } \text{€} = 14533,6 \text{ mln } \text{€} \end{aligned}$$

Tulemused on allolevas tabelis 3.13:

Tabel 3.13 Majapidamise sektori 2016 aasta lisandväärtus ja katkestuskahju

| | |
|---|-------------|
| Majapidamise sektori lisandväärtus, miljonit eurot | 14533,6 |
| Majapidamise sektori lõpptarbimine, GWh | 1913 |
| CENS, Eur/kWh | 7,60 |

Majapidamiste lisandväärtust kasutades saadi katkestuskahju hinnaks 7,60 €/kWh kohta (valem 2.19). Tõenäoliselt hindab meetod majapidamiste kahjusid üle, kui võrrelda saadud tulemust teiste sektorite katkestuskahju väärtustega (nii kliendiuuringute abil kui analüütiliselt leitud kahjud). Väärtust on võimalik korrigeerida vaba aja tegevuste elektrist sõltuvuse määraga, mis CEPA uuringu kohaselt on Euroopas keskmiselt 58,3%. Põhjamaadele (sealhulgas Eestile) on see väärtus pisut kõrgem ehk 63,1%. See on seletatav kliimaga- põhjapool on külmem ja kauem pimedam, mistõttu on vaba aja tegevused rohkem elektrist sõltuvad kui lõunapool. [41] Kasutades 63,1% määra, on Eesti majapidamise sektori katkestuskahju väärtuseks:

$$CENS = \frac{GVA}{EC} * \text{elektrist sõltuvuse määr} = \frac{14533,6 \text{ milj. } \text{€}}{1913 \text{ GWh}} * \frac{63,1\%}{100\%} = 4,79 \text{ €/kWh}$$

3.2.3 Leibkonna sissetulek

Värskema info puudumisel tuleb kasutada Statistikaameti 2011 aasta andmeid, mille kohaselt on leibkonnaliikme keskmine elektritarbimine 1506 kWh [42]. Kui võrrelda 2011 aasta majapidamiste lõpptarbimist 2016 aasta lõpptarbimisega (vastavalt 1934 GWh ja 1913 GWh), siis võib teha eelduse, et leibkonnaliikme keskmine elektritarbimine pole märkimisväärselt muutunud ja edasistes arvutustes kasutatakse 2011 aasta leibkonnaliikme keskmist elektritarbimist. Leibkonnaliikme keskmine sissetulek ühes kuus on 633 eurot 2016 aastal, ehk aasta keskmine on 7596 eurot. Kasutades avaldist 2.20, on kodumajapidamiste jaoks andmata energiaühiku CENS hinnaks:

$$CENS = \frac{ST}{A} = \frac{7596}{1913} = 5,04 \text{ €/kWh}$$

Meetod annab sarnase tulemuse vaba aja tunnipalgaga võrdlemisel leitud energiaühiku hinnaga (4,79 €/kWh), aga probleemiks on info kättesaadavus. Leibkonnaliikme keskmise kuusissetuleku info on Statistikaametil olemas, aga elektritarbimise kohta värsket info puudub.

3.2.4 Valitud alajaama katkestuskahju analüütilise meetodi abil

Selguse mõttes on tabelis 3.14 välja toodud lõplikud tarbijasektorite andmata energiaühiku hinnangud, mis analüütiliselt leiti (sektorite andmata energiaühiku hinnana kasutati kriitilise elektritarbimise määra abil leitud väärtuseid).

Tabel 3.14 Sektorite analüütiliselt leitud andmata energiaühiku hinnad

| Sektor | CENS, €/kWh |
|----------------------|-------------|
| Äri ja avalik sektor | 2,96 |
| Tööstussektor | 1,96 |
| Põllumajandussektor | 1,48 |
| Kodumajapidamised | 4,79 |

Ka siin on võimalik leida riigi keskmine andmata energiaühiku hind. Selleks tuleb sektorite andmata energiaühiku hinnad korrutada vastavalt sektorite elektritarbimise osakaaluga kogutarbimisest. Tööstussektori elektrienergia tarbimine moodustas kogu Eesti lõppenergiatarbimisest 29,7%, äri ja avalik sektor moodustas 40,7%, põllumajandussektor 2,9% ja kodumajapidamised 26,2%. Seega on Eesti riigi keskmine andmata energiaühiku hind:

$$CENS_{riigi\ keskmine} = 2,95 * 0,407 + 1,96 * 0,297 + 1,48 * 0,029 + 4,79 * 0,262 = 3,09 \text{ €/kWh}$$

Kasutades tarbijasektoritele lisandväärtuse meetodil leitud katkestuskahjude väärtuseid tabelist 2.19, saab arvutada katkestuskahju suuruse valitud 110/10 kV alajaamas 22.05.2018 toimunud katkestusele kestusega 42 minutit, kus andmata energia oli 1,176 MWh. Siin leiti katkestuskahju suurus kasutades katkestuskulu COC meetodit, mille arvutuskäik on sama, nagu peatükis 3.1.2. Tulemused on allolevas tabelis 3.15:

Tabel 3.15 Uuritava alajaama analüütiliselt leitud katkestuskahju

| Sektor | Sektori osakaal valitud AJ-s, % | Sektorile andmata energia, kWh | CENS, Eur/kWh | Andmata energia hind, € |
|--|---------------------------------|--------------------------------|---------------|-------------------------|
| Tööstussektor | 2,36 | 27,7 | 1,96 | 54,2 |
| Äri ja avalik sektor | 29,95 | 352,2 | 2,96 | 1042,6 |
| Põllumajandussektor | 15,88 | 186,7 | 1,48 | 275,5 |
| Kodumajapidamised | 51,81 | 609,3 | 4,79 | 2918,5 |
| Uuritavas alajaamas toimunud katkestuse maksumus: | | | | 4290,8 |

Viimasena võib arvutada valitud alajaamas toimunud katkestuse maksumuse, kasutades analüütiliselt leitud riigi keskmist andmata energiaühiku hinda:

$$Katkestuskahju = 3,09 \text{ €/kWh} * 1176 \text{ kWh} = 3622,9 \text{ €}$$

3.2.5 Varustuskindluse piirkonnad

Näitliku arvutusena saab kasutada eelnevalt valitud 110/10 kV alajaamas 22.05.2018 toimunud mitteplaanilist katkestust kestusega 42 minutit, kus andmata energia oli 1,176 MWh. Valitud 110/10 kV alajaam kuulub Elektrilevi andmetel hajapiirkonda. Elektrilevil on määratud varustuskindluse piirkonnad, millest on võimalik lähemalt lugeda Tallinna Tehnikaülikooli poolt teostatud uuringust „Elektrilevi kesk- ja madalpingevõrgu varustuskindluse näitajad ja muutuste mõjurid erinevates varustuskindluse piirkondades üleminekul kaablivõrgule“ [33]. Aruandes „Elektrilevi OÜ hajavarustuskindluse piirkondade võrguinvesteeringute eesmärgid, realiseerimise meetodid ja nende valikukriteeriumid“ on näidatud varustuskindluse piirkondadeks jagatud alajaamade nimekiri. [39]

Hajapiirkonnas andmata energiaühiku hind on 3,96 €/kWh (tabelist 2.19). Seega on nimetatud katkestuse tõttu andmata energia hind:

$$CENS = 3,96 \text{ €/kWh} * 1176 \text{ kWh} = 4659,5 \text{ €}$$

3.3 Katkestuskahju hinnangute võrdlus

Töös eelnevalt analüüsitud meetodite põhjal valitud alajaamale leitud katkestuskahju väärtused on koondatud allolevasse tabelisse:

Tabel 3.16 Valitud alajaama katkestuskahju suurused

| Metoodika | | Valitud alajaama energiaühiku hind, €/kWh | Valitud alajaama katkestuskahju, € |
|--|---|---|------------------------------------|
| Kliendiuuringul põhinevad meetodid | Valitud alajaamale leitud andmata energiaühiku hind <i>CENS</i> | 4,96 | 5836,2 |
| | Valitud alajaamale leitud andmata energiaühiku hind <i>VOLL</i> | 6,08 | 7150,1 |
| | Katkestuskulu <i>COC</i> | kasutati kliendiuuringu põhjal leitud Eesti tarbijasektorite energiaühiku hindu | 5085,4 |
| | Riigi keskmine energiaühiku hind | 4,39 | 5162,6 |
| Analüütilisel infol põhinevad meetodid | Katkestuskulu <i>COC</i> | kasutati analüütiliselt leitud Eesti tarbijasektorite energiaühiku hindu | 4290,8 |
| | Riigi keskmine energiaühiku hind | 3,09 | 3622,9 |
| Varustuskindluse piirkonnad | | 3,96 | 4659,5 |

Kliendiuuringul põhinevatest meetoditest andsid sarnase tulemuse valitud alajaamale leitud andmata energiaühiku hinna *CENS* abil arvatud kahjuhinnang 5836,2 €, katkestuskulu *COC*

metoodika, mis andis katkestuskahjuks 5085,4 € ning riigi keskmise andmata energiaühiku hinna abil saadud katkestuskahju 5162,6 €. Erinevalt riigi keskmisest energiaühiku hinnast arvestavad COC ja CENS metoodika alajaama tarbijate struktuuri. Andmata energiaühiku hind *CENS* arvutati valitud alajaamale koostatud erikahjufunktsiooni ja koormusteguri põhjal. Eriahjufunktsioon koostati vastavalt alajaama tarbijate struktuurile (kasutati 2014. aasta tarbijate struktuuri). Koormustegurina kasutati alajaama aasta keskmise koormuse ja maksimaalkoormuse suhet. Tuleb märkida, et koormusteguris pole võimalik kasutada katkestusele eelnevat reaalselt koormust (see võib anda matemaatiliselt suurema kahjuhinnangu, kui koormus oli enne katkestust madalam, kui keskmine koormus ja vastupidi). Lisaks arvutatakse *CENS* arvutusvalemi järgi (valem 2.17) alajaama energiaühiku hind keskmisena üle katkestuste vahemiku ja seega on ka lõplik katkestuse kahjuhinnang (5836,2 €) rohkem keskmine. Katkestuskulu *COC* metoodika kasutab tarbijasektorite keskmise kliendi andmata kilovatt-tunni hindu ja nendele sektoritele andmata energiakoguseid. Energiakogused leiti tarbijasektorite osakaalude abil, mis leiti 2014. aasta koormusstruktuuri alusel. Osakaalude abil leiti kogu andmata energiakogusest sektoritele andmata energiakogused, mis korrutati vastavalt iga sektori andmata energiaühiku hinnaga. Seega tuleneb katkestuskahju hinnang otseselt sektorite osakaaludest, mis annab täpse kahjuhinnangu. Osakaalude kasutamine on praegusel momendil raskendatud juhtudel kus lülitub välja näiteks alajaama üks latisektsioon/liin, aga teised jäävad töösse (töös kasutatud näites jäid kõik alajaama tarbijad toiteta). Sellisel juhul pole palju abi 2014. aasta koormusstruktuurist, kuna see kajastab terve alajaama, mitte lattide koormusstruktuuri. Jaotusvõrgu ettevõttelt tuleb küsida täpsem koormusstruktuur ehk kus on teada iga liini taha ühendatud tarbijate struktuur. Kui katkestusele eelnev koormusstruktuur on teada, tuleb kasutada katkestuskulu *COC* meetodit, sest arvutused on lihtsamad ja vähem aeganõudvad ning tulemus täpsem kui *CENS* meetodi puhul. Lisaks katkestuskulu *COC* ja andmata energiaühiku hinna *CENS* meetodile leiti katkestuskahju ka riigi keskmise andmata energiaühiku hinna alusel. Riigi keskmine energiaühiku hind ei kajasta absoluutselt alajaama tarbijate struktuuri ja annab seeläbi väga ligikaudse katkestuskahju hinnangu. Riigi keskmist energiaühiku hinda võib kasutada juhul, kui muude meetodite rakendamine pole võimalik. Silmatorkav on kliendiuringu põhjal valitud alajaamale leitud andmata energiaühiku hind *VOLL* 6,08 €/kWh, mille põhjal on saadud katkestuskahju 7150,1 €, mis on teiste katkestuskahju hinnangutega võrreldes suurim. Siin on põhjuseks tulevikku suunatud *VOLL* arvutusvalem (valem 2.16), mis ei sobi hästi juba toimunud katkestuse arvutamiseks, kuna matemaatilisest küljest vaadates võetakse mitmed valemis sisalduvad tegurid ühega võrdseks: antud juhul on juba toimunud katkestuse esinemise tõenäosus võrdne ühega ja katkestuste arv N

on samuti võrdne ühega. Seega pole soovitatav *VOLL* meetodikat kasutada juba toimunud katkestuse kahju arvutamisel.

Väikseimad katkestuskahju hinnangud saadi analüütiliste meetodite abil. *COC* meetodika andis kahjuhinnanguks 4290,8 €, mis on lähedane varustuskindluse piirkondade meetodi abil leitud kahjuhinnanguga (4659,5€). *COC* meetodika töötab samal põhimõttel nagu eespool kirjeldati: sektoritele andmata energiakogused (leitud koormusstruktuuri alusel saadud sektorite osakaalude abil) korrutati sektoritele analüütiliselt leitud energiaühiku hindadega. Arvatavasti on tegemist alahinnatud katkestuskahju suurusega, sest lisandväärtuse meetod arvestab ainult andmata jäänud toodangust tekkivat kahju, aga ei arvesta muid kahjusid nagu katki läinud seadmed, riknenud materjalid, halvaks läinud toit jms, mida kliendiuuringul põhinevad meetodid arvesse võtavad. Analüütiliselt on kõige keerulisem leida majapidamiste sektori katkestuskahju hinnangut, mis on küll struktuurilt homogeenne sektor, aga puudub selgelt mõõdetav väljund, nagu nt. tööstustarbijatel lisandväärtus. Majapidamiste energiaühiku hind (4,79 €/kWh) leiti vaba aja tunnipalgaga võrdlemisel, mis eeldab, et vaba aega on üldse võimalik rahas väärtustada. Ühtlasi oli analüütiliselt leitud kodutarbijate andmata energiaühiku hind suurem teiste sektorite analüütiliselt leitud andmata energiaühiku hindadest. Kuna töös kasutatud katkestuskahju arvutusnäites on alajaamas majapidamissektoril väga suur osakaal (52%), siis on ka kahjuhinnang sellest kõige rohkem mõjutatud. Kõige väiksema kahjuhinnangu alajaamas toimunud katkestusele andis analüütiliselt leitud riigi keskmise andmata energiaühiku hind, kuna seal ei arvestata alajaama sektorite osakaale vaid arvestati sektorite osakaale kogu riigi tarbitud elektrienergiakogusest. Kuna analüütiliselt kõrge energiaühiku hinnaga kodutarbijate sektori osakaal kogu riigi tarbimisest on väiksem (26%), kui uuritavas alajaamas (52%) ning analüütiliselt leitud madala energiaühiku hinnaga tööstussektori osakaal tunduvalt suurem riigi tarbimisest kui konkreetse alajaama tarbimisest, siis oli tulemuseks üsna madal energiaühiku hind riigi kohta ja seega ka madal katkestuskahju suurus konkreetsele alajaamale. Analüütiliselt leitud põllumajandussektori madal energiaühiku hind eriliselt riigi keskmist energiaühiku hinda ei mõjutanud (osakaal 2,9%), see madaldas pigem valitud alajaama katkestuskahju, kus põllumajandussektori osakaal oli 15%. Kliendiuuringu baasil leitud keskmine energiaühiku hinna ja *COC* meetodi puhul saadud kahjuhinnangud omavahel nii palju ei erinevad, sest kliendiuuringu abil leitud sektorite andmata energiaühiku hindade vahel ei olnud nii suuri erinevusi kui analüütiliselt leitud hindade puhul. Arvestades lisandväärtuse meetodiga kaasnevaid probleeme, tuleb katkestuskahju arvutamisel kasutada tarbijasektorite kliendiuuringu baasil leitud energiaühiku hindu.

Kõikidest töös kasutatud meetoditest andis kliendiuuringul põhinevatest meetoditest väiksema, aga analüütilistest meetoditest suurema katkestuskahju hinnangu varustuskindluse piirkondade metoodika (4659,5 €). Varustuskindluse piirkondadele määratud energiaühiku hinnad on leitud tarbijasektorite osakaale arvestades, aga need osakaalud pole konkreetse võrguosa (alajaama, liini vms) kohta vaid iseloomustavad selle varustuskindluse piirkonna keskmist tarbijate struktuuri, kuhu uuritav võrguosa kuulub (joonis 2.4). Seetõttu annab see meetod rohkem keskmise tulemuse võrreldes *CENS* või *COC* meetoditega, kus on võimalik kasutada konkreetse võrguosa tegelikku, mitte keskmist tarbijate struktuuri. Piirkondade andmata energiaühiku hinna leidmisel on kasutatud kliendiuuringu põhjal saadud andmata energiaühiku hindu ja seega on meetodi abil leitud kahjuhinnangud täpsemad, kui lisandväärtuse baasil arvatud katkestuskahju hinnangud. Varustuskindluse piirkondade meetodi abil on katkestuskahju leidmine kiire ja kerge (kui jätta välja riigi keskmise energiaühiku hinna alusel leitavad kahjuhinnangud). Põhjuseks on arvutuste lihtsus, sest teadma peab ainult katkestusel andmata jäänud energiakogust ja varustuskindluse piirkonda kuhu võrguosa kuulub. Probleemseks võib osutada varustuskindluse piirkondadesse jagatud alajaamade nimekiri, mis on aastast 2014 ja võib sisaldada vananenud infot [39], seega tuleks küsida jaotusvõrgu ettevõttelt uus nimekiri.

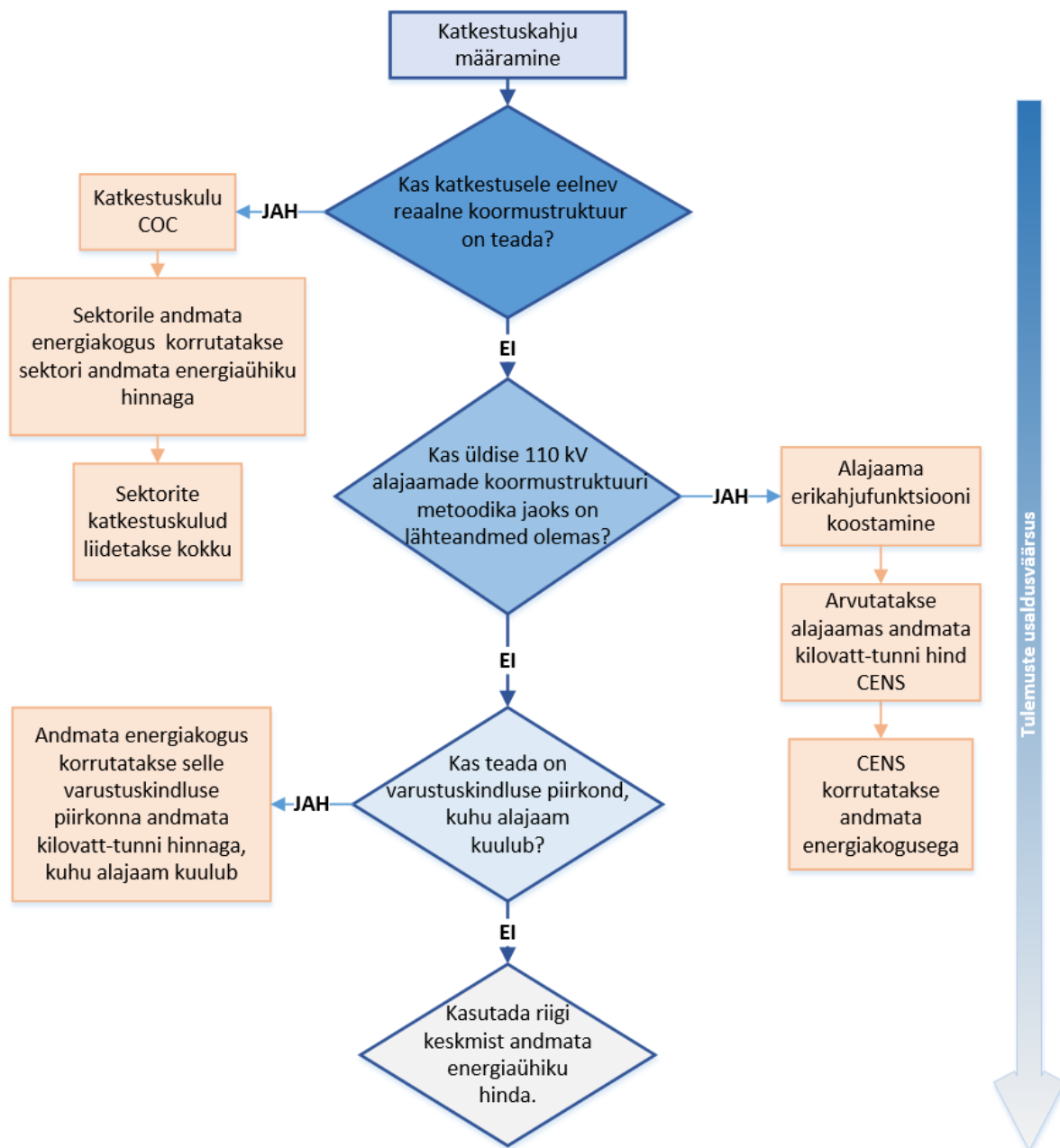
Arvutustulemuste põhjal saab kokkuvõtvalt öelda, et soovitatav on kasutada katkestuskahju arvutamisel katkestuskulu *COC* metoodikat ehk konkreetse katkestuse kogu andmata jäänud energiakogusest arvutatakse igale tarbijasektoritele tema osakaalu abil andmata energiakogused eraldi, mis korrutatakse vastava tarbijasektori andmata energiaühiku hinnaga, mille tulemuseks on katkestuse maksumus igale sektorile. Meetod on lihtne ja ei ole aeganõudev ning ära jääb üldistavate tegurite kasutamine (näiteks *CENS* meetodis koormustegur, mis pole seotud konkreetse katkestuse võimsusega või riigi keskmise energiaühiku/ varustuskindluse piirkonna energiaühiku hinna kasutamine, mis ei arvesta toite kaotanud võrguelemendi tarbijate struktuuriga). Osakaalude leidmisel on hetkel aluseks 2014 aasta 110 kV alajaamade koormusstruktuur. Kuna võib eeldada, et muutused koormusstruktuuris on olnud aastatel 2014-2018 marginaalsed, siis saab koormusstruktuurist leitud osakaalud piisavalt täpseks lugeda. Sellegipoolest tuleb meetodi edasiseks rakendamiseks küsida jaotusvõrgu ettevõttelt värskem ja täpsem koormusstruktuur, kus on antud põhivõrgu alajaama liinide elektritarbimine sektorite kaupa sarnaselt 2014. aasta 110 kV alajaamade struktuurile. Tuleb jällegi rõhutada, et sektorite andmata energiaühiku hinnana tuleb kasutada kliendiuuringu põhjal saadud väärtuseid, kuna need arvestavad ka muid kahjusid, mida analüütiliselt on väga raske kindlaks teha.

3.4 Katkestuskahju määramise protsess

Alloleval joonisel 3.6 on näha eelnevate arvutuste põhjal koostatud skeem, kus katkestuse toimumisel algab katkestuskahju määramise protsess. Skeemi koostamisel arvestati meetodi arvutustulemuste täpsust (täpsus on skeemil kujutatud ülalt alla kahanevas suunas), mida hinnati meetodite rakendamisel ühes põhivõrgu alajaamas toimunud katkestusel. Nagu skeemilt näha, saab täpseima kahjuhinnangu katkestuskulu *COC* meetodi abil. Põhjuseks on meetodi hea rakendatavus juba toimunud katkestusel- sektoritele andmata energiakogused korrutatakse vastavalt sektorite andmata energiaühiku hindadega. Siinkohal on oluline koostada koostöös jaotusvõrguettevõttega ajakohane koormusstruktuur põhivõrgu alajaamadega ühendatud liinide kohta, mille alusel saab sektorite osakaalud sektoritele andmata energiakoguste arvutamiseks. Juhul, kui pole võimalik seda meetodikat kasutada, tuleb rakendada *CENS* meetodit, kus alajaamale koostatakse erikahjufunktsioon, mille alusel leitakse alajaamale andmata energiaühiku maksumus keskmisena üle katkestuste vahemiku. Kuna *CENS* näol on tegu rohkem tulevikku suunatud meetodikaga (kirjeldati täpsemalt peatükis 3.3), siis on sellest ka arvutustulemused mõjutatud. Sellegi poolest arvestab *CENS* meetodika tarbijate struktuuri ja see on eeliseks varustuskindluse piirkondade ja riigi keskmise andmata energiaühiku meetodika ees.

Varustuskindluse piirkondade meetodit tuleb rakendada siis, kui pole teada tarbijate struktuuri katkestusel, aga on teada, millisesse varustuskindluse piirkonda kuulub võrguelement, kus katkestus esines. Varustuskindluse piirkondade meetodikas on piirkonna energiaühiku hinna arvutamisel arvestatud piirkonna keskmist tarbijate struktuuri, kuhu element kuulub ehk arvestatud pole konkreetse võrguelemendi tarbijate struktuuri. Seega annab meetodika ligikaudsema kahjuhinnangu. Riigi keskmist energiaühiku hinda võib kasutada kõige viimases järjekorras, kuna see ei kajasta absoluutselt piirkonna tarbijate struktuuri ning seega on kahjuhinnang ligikaudsem võrreldes varustuskindluse piirkondade meetodikaga.

Iga nimetatud meetodi rakendamiseks peab teadma katkestusel andmata energiakogust. Praegu määratakse andmata energiakogus katkestuse pikkust arvestades *SCADA* 5 minuti keskmiste mõõteandmete järgi: kui katkestuse pikkuseks on kuni 2 tundi, siis arvutatakse andmata energia katkestusele ca 5 minutit eelneva koormuse järgi [35]. Pikema kui kahetunnise katkestuse korral võetakse andmata energiakoguse määramisel aluseks koormusgraafik, mille abil leitakse vastavalt tööpäeva või puhkepäeva samasuguse katkestuse aja ja perioodi keskmine [35].



Joonis 3.6 Katkestuskahju arutamise skeem

Katkestuskahju määramise protsess toimub järgmiselt:

1. Kontrollida, kas katkestusele eelnev reaalne koormusstruktuur on teada?

See tähendab, et olemas on selline koormusstruktuur, kus on teada igasse põhivõrgu alajaama ühendatud liini tarbijate struktuur ehk kui suure osa konkreetse liini taha ühendatud tarbijate koguelektritarbimisest moodustavad tööstussektor, põllumajandussektor, äri ja avalik sektor ning kodumajapidamised. Nii on võimalik leida sektorite osakaalud kogutarbimisest, mille alusel saab arvutada katkestusel andmata energiakogusest tarbijasektoritele andmata energiakogused.

- **JAH** - kasutada katkestuskahjude määramiseks katkestuskulu *COC* meetodikat.

Tööstus-, äri ja avaliku, kodumajapidamis- ja põllumajandussektorile andmata energiakogus tuleb läbi korrutada vastava sektori andmata energiaühiku hinnaga. Nii on tulemuseks andmata energiakoguste maksumus (katkestuskulud) sektorite kaupa. Sektorite katkestuskulud tuleb kokku liita ja tulemuseks on katkestuse maksumus.

Sektorite andmata energiaühiku hinnad on tabelis 2.7 (need on leitud 2003. aasta kliendiuuringu alusel ja teisedandatud tänapäevasesse vääringsusse). Võimalik on kasutada ka sektorite analüütiliselt leitud energiaühiku hindu, aga eelistatud on kliendiuuringute abil leitud väärtused, kuna seal on arvesse võetud muid kahjusid (nt. riknenud toit, materjalid, kahjustunud seadmed), mida analüütiliste meetoditega ei saa arvestada.

- **EI**- valida katkestuskahjude määramiseks üldine 110 kV alajaamade koormusstruktuuril põhinev meetodika

2. Kas üldise 110 kV alajaamade koormusstruktuuri meetodika jaoks on lähteandmed olemas?

Üldine koormusstruktuur on aastast 2014, kus on 110 kV alajaamade elektritarbimise andmed kuu kaupa tööstussektori, kodumajapidamiste, põllumajandussektori ning eraldi teenindus- ja avaliku sektori kohta (teenindussektori ja avaliku sektori elektritarbimine tuleb kokku arvestada, kuna nendele sektoritele pole eraldi erikahjufunktsioone ja andmata energiaühiku hindu).

- **JAH**- leida alajaamale andmata energiaühiku hind *CENS*

Uuritava alajaama sektorite igakuised tarbitud energiakogused tuleb kokku liita, et saada iga sektori aastased tarbitud energiakogused. Sektorite tarbitud energiakogused kokku liites saab teada uuritava alajaama 2014. aasta kogutarbimise. Nüüd on võimalik arvutada uuritava alajaama tarbijasektorite osakaalud kogutarbimisest. Osakaalud on vajalikud uuritava alajaama erikahjufunktsiooni koostamiseks (valemi 2.8 järgi).

Uuritava alajaama erikahjufunktsiooni koostamise aluseks on Eesti riigi tööstus-, põllumajandus-, äri ja avaliku sektori ning majapidamissektori katkestuskahjud erinevate katkestuse kestuste korral (ehk teisisõnu erikahjufunktsioonid), mis on antud tabelis 2.6. Iga sektori katkestuskahjud erinevate katkestuse kestuste korral tuleb läbi korrutada vastava sektori osakaaluga kogutarbimisest ning sel moel saadud väärtused tuleb kokku liita erinevate katkestusaegade kaupa (näide peatükist 3.1.1). Tulemuseks on uuritava alajaama erikahjufunktsioon, mille põhjal saab arvutada selle alajaama andmata energiaühiku hinna *CENS* kasutades valemit 2.17.

Valemi 2.17 rakendamiseks tuleb lisaks uuritava alajaama erikahjufunktsioonile leida ka selle alajaama koormustegur. Koormustegur on uuritava alajaama aasta keskmise koormuse ja maksimaalkoormuse suhe, mille saab SCADA andmete alusel (rakendus SCADA Exporter). Katkestuskahju maksumus leitakse andmata energiakoguse läbikorrutamisel alajaamale leitud *CENS* väärtusega.

- EI- kasutada varustuskindluse piirkondade metoodikat

3. Kas on teada varustuskindluse piirkond, kuhu alajaam kuulub?

- JAH

Varustuskindluse piirkondade andmata energiaühiku hinnad on antud tabelis 2.5. Sealt tuleb valida selle piirkonna andmata energiaühiku hind, kuhu alajaam kuulub. Katkestuskahju maksumuse arvutuskäik on väga lihtne: andmata energiakogus tuleb läbi korrutada selle piirkonna andmata energiaühiku hinnaga, kuhu alajaam kuulub.

- EI- kasutada riigi keskmist andmata energiaühiku hinda

4. Riigi keskmine andmata energiaühiku hind

Riigi keskmine andmata energiaühiku hind on 4,39 €/kWh. See väärtus tuleb korrutada katkestusel andmata energiakogusega ning tulemuseks on katkestuse maksumus.

Sel moel saadud katkestuskahju hinnang on üsna ligikaudne, kuna meetod ei arvesta tarbijate struktuuri.

KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärgiks oli koostada sobiv metoodika põhivõrgus toimunud katkestusest tekkinud kahju hindamiseks. Katkestuskahjude määramine on muutunud järjest olulisemaks, kuna elektrisüsteemid muutuvad keerulisemaks ja suuremaks, koormus võrgule kasvab ja ühiskond on elektrist üha sõltuvam. Tänu keerulisematele elektriseadmetele on oluline mõju juba ka lühiajalistel katkestustel. Seetõttu peab katkestuskahjude suurusega arvestama juba elektrivõrgu planeerimisarvutustes.

Maailmas on kasutusel palju erinevaid katkestuskahju arvutusmetoodikaid. Käesolevas töös on toodud levinuimad metoodikad, mida kasutatakse paljudes riikides ja mida on kirjanduses põhjalikult analüüsitud. Kõikide meetodite puhul tuleb tarbijad kategoriseerida, kuna tarbijate erinevusest sõltuvad katkestuse tagajärjed ja seega katkestuskahju suurus. Üldiselt jagunevad katkestuskahju arvutusmeetodid kliendiuuringutel või analüütilisel infol põhinevateks meetoditeks. Kliendiuuringu alusel koostatakse tarbijasektoritele erikahjufunktsioonid, mis on teatud tarbimissektori (või konkreetse piirkonna) klientide katkestuskahju funktsioonina katkestuse kestusest. Eriahjufunktsioonide alusel on võimalik arvutada tarbijasektoritele või konkreetsele koormuspunktile andmata energiaühiku hind *CENS*, *VOLL* või *IEAR*. *CENS* leitakse keskmisena üle võimalike katkestuste vahemiku, *VOLL* arvestab katkestuste esinemise tõenäosuseid ja *IEAR* leitakse oodatava aastase katkestuskulu ja oodatava andmata energia suhtena. Analüütiliste meetodite puhul kasutatakse andmata energiaühiku hinna määramisel statistilist infot, näiteks ettevõtete lisandväärtus, sektorite aastased tarbitud energiakogused jms.

Eestis teostati viimati suuremahuline katkestuskahjude kliendiuuring aastal 2003, mille alusel koostati erikahjufunktsioonid äri ja avalikule sektorile ning tööstus-, põllumajandus- ja majapidamissektorile, mille põhjal arvutati nimetatud sektoritele andmata kilovatt-tunni hind. Kuna magistritöö raames ei koostatud uut kliendiuuringut, tuli töö arvutuslikus osas kasutada 2003 aastal leitud kahjuhinnanguid. Selleks, et 2003 aasta kahjuhinnangud vastaksid tänapäevasele väärangule, arvutati 2003 aastal tarbijasektoritele leitud erikahjufunktsioonid ning andmata kilovatt-tunni hinnad kroonidest eurodeks ning korrigeeriti tarbijahinnaindeksiga. Nende andmete põhjal oli käesolevas töös võimalik arvutada ühes põhivõrgu alajaamas 2018. aastal toimunud 42 minutilise katkestuse maksumus, kus andmata energiakoguseks oli 1176 kWh. Kasutades tänapäevasesse väärangusse teisendatud Eesti tarbijasektorite erikahjufunktsioone, koostati sellele konkreetsele alajaamale tema tarbijate osakaalude abil erikahjufunktsioon. Valitud alajaama sektorite osakaalud saadi 2014 aasta 110 kV alajaamade koormusstruktuuri alusel. Võib eeldada, et alajaama koormusstruktuuri muutused aastatel 2014-2018 on marginaalsed ja seega on selle

alusel leitud sektorite osakaalud piisavalt täpsed. Erikahjufunktsiooni abil arvutati alajaamale andmata kilovatt-tunni hind *CENS*, mis korrutati andmata energiakogusega (1176 kWh) ja tulemuseks oli katkestuse maksumus (5836,2 €). Teise variandina kasutati *COC* meetodit ehk arvutati tarbijasektorite osakaale kasutades sektoritele andmata energiakogused kogu 1176 kWh-st, mis alajaamas andmata jäi. Sektoritele andmata energiakogused korrutati seejärel läbi sektorile vastava andmata energiaühiku hinnaga. Sellisel viisil leitud sektorite katkestuskahjud liideti kokku ja katkestuse maksumuseks oli 5085,4 €. Võrdluseks arvutati katkestuse maksumus riigi keskmist energiaühiku hinda kasutades, mis andis alajaamas toimunud katkestuse kahjuhinnanguks 5162,6 €. *VOLL* ja *IEAR* kasutamine osutus problemaatiliseks, kuna tegu on tulevikku suunatud valemitega, mille rakendamisel juba toimunud katkestusele muutis nendes valemites paljud tegurid ühega võrdseks, mis andis kokkuvõttes kaheldava väärtusega tulemused (*VOLL* meetod andis katkestuskahjuks 7150,1 €, mis oli töös arvatud kahjuhinnangutest suurim). Seega on soovitatav näitajaid *VOLL* ja *IEAR* kasutada tulevikustsenaariumides, mitte toimunud katkestustel.

Analüütilistel meetoditel määrati lisandväärtuse abil tööstus-, põllumajandus- ja äri ning avaliku sektori energiaühiku maksumus, kus sektori katkestuskahju energiaühiku kohta leitakse sektori aastase lisandväärtuse läbijagamisel aastase energiatarbimisega. Sektorite aastased lisandväärtused ja tarbitud energiakogused leiti Statistikaameti andmebaasist. Kuna meetod eeldab, et ilma elektritoiteta pole ettevõttel võimalik lisandväärtust luua, siis korrutati andmata energiaühiku hinnad sektorite elektrist sõltuvuse määraga, et saada realistlikumad tulemused. Majapidamiste andmata energiaühiku hind arvutati kahel viisil: leibkonnaliikme keskmise sissetuleku ja elektritarbimise võrdlusel ning vaba aja tunnipalgaga võrdlemisel. Neist kahest andis kõige adekvaatsema tulemuse vaba aja tunnipalgaga võrdlus, kuna andmed olid värskemad ning arvutustes rakendati vaba aja tegevuste elektrist sõltuvuse määra. Valitud alajaamas toimunud katkestuse maksumuse leidmiseks kasutati samuti *COC* meetodit, kus sektoritele andmata energiakogused korrutati analüütiliselt leitud energiaühiku hindadega, mille järgi oli katkestuskahju suuruseks 4290,8 €. Analüütiliselt leitud riigi keskmist energiaühiku hinda kasutades saadi katkestuskahju suuruseks 3622,9 €. Viimasena määrati katkestuse maksumus varustuskindluse meetodit kasutades, mille kohaselt kuulus valitud alajaam hajapiirkonda ehk andmata energiaühiku hind oli 3,96 €/kWh ning katkestuse maksumus seega 4659,5 €. Tegu on ainsa meetodiga lisaks riigi keskmisele energiaühiku hinnale, mis ei eelda koormusstruktuuri kasutamist.

Teostatud arvutuste põhjal leiti, et kõige täpsema katkestuskahju hinnangu annab töös analüüsitud katkestuskahju arvutusmeetoditest katkestuskulu *COC* meetod, kuna kahjuhinnang tuleneb otseselt sektoritele nende osakaalude abil leitud andmata energiakogustest, mis korrutatakse läbi

vastavalt sektori andmata energiaühiku hindadega. Andmata energiaühiku hinnana on soovitatav kasutada kliendiuuringu põhjal leitud tulemusi, kuna seal arvestatakse erinevalt analüütilistest meetoditest muid võimalikke kadusid nagu riknenud materjalid, kahjustatud seadmed jne, mida on statistika põhjal väga raske kindlaks teha. Võimalikult täpsete tulemuste saamiseks tuleb koostöös jaotusvõrguettevõttega koostada koormusstruktuur, kus on antud põhivõrgu alajaamadega ühendatud liinide elektritarbimine sektorite kaupa sarnaselt 2014. aasta 110 kV alajaamade struktuurile. Piisavalt täpse tulemuse andis ka andmata energiaühiku hinna *CENS* meetodika, aga seal on kitsaskohaks rohkem tulevikku suunatud *CENS* arvutusvalem, kus alajaama energiaühiku hind leitakse keskmisena üle katkestuste vahemiku ja seega on ka lõplik katkestuse kahjuhinnang (5836,2 €) rohkem keskmine. Teiseks on andmata energiaühiku *CENS* arvutuskäik üsna pikk ja ajakulukas võrreldes katkestuskulu *COC* meetodiga. Kui nimetatud kahte meetodit pole võimalik rakendada, on soovitatav kasutada varustuskindluse piirkondade meetodit. Varustuskindluse piirkondadele määratud energiaühiku hinnad on leitud tarbijasektorite osakaale arvestades, aga need osakaalud pole konkreetse võrguosa (alajaama, liini vms) kohta vaid iseloomustavad selle varustuskindluse piirkonna keskmist tarbijate struktuuri, kuhu uuritav võrguosa kuulub. Viimase variandina on võimalik kasutada riigi keskmisi näitajaid, aga need annavad vaid umbkaudse kahjuhinnangu, kuna keskmised näitajad ei kirjelda mitte kuidagi piirkonna elektritarbimist.

Töös koostatud meetodika abil on põhivõrgu ettevõttel võimalik arvutada katkestustest põhjustatud kahjude maksumused ja arvestada neid elektrivõrgu planeerimisel ja võrguinvesteeringute tegemisel. Võrguarenduse põhieesmärgiks on jätkuvalt kõrge varustuskindluse taseme tagamine, aga kuna selleks tehtavad investeeringud on kallid, tuleb leida optimaalseim lahendus, mis on ühiskonnale kõige kasulikum. Seetõttu tuleb lisaks seadmete hinnale ja käidukulude maksumusele arvestada ka tarbijatele katkestusest tekkinud kahjude suurust, mida on koostatud meetodika põhjal võimalik teha.

SUMMARY

The purpose of this Thesis was to develop a suitable methodology for outage cost calculation in transmission system. Outage cost assessment has become increasingly important as the electrical systems become more complex and larger, the load on the system grows and society becomes more dependent on electricity. Due to more complicated electrical equipment, short-term interruptions also have a significant impact.

There are many different methods for outage cost assessment in the world. This Thesis presents the most common methodologies used in many countries and which have been thoroughly analyzed in the literature. Consumers have to be categorized in all methods because different consumers, for example industries or households, have different consequences (and therefore costs) due to outage. In general, outage cost calculation methods can be divided as analytical information based methods and client survey based methods. Client survey based methods purpose is to develop customer damage functions, which are certain customer sector (or a region) outage costs as a function of outage duration. Based on customer damage functions, a price of energy not served *CENS*, *VOLL* or *IEAR* is calculated. *CENS* is calculated as an average over different outage durations, *VOLL* takes into account the probabilities of interruptions and *IEAR* is found as a relation between expected outage cost and expected energy not served. Analytical information based methods use statistical information, for example gross value added, annual energy consumption of a sector etc, to calculate cost of energy not served.

In Estonia, the last large-scale client survey was conducted in 2003. Based on this survey, a customer damage function and cost of kilowatt-hour not supplied were calculated for agriculture, industries, households and service sector. Since it was not possible to conduct another survey, outage cost estimates from year 2003 were used in this Thesis. In order to make 2003's cost estimates current to the present, those damage functions and kilowatt-hour prices were calculated from kroons to euros and corrected by the consumer price index. Now it was possible to calculate a cost for an interruption that occurred in one 110 kV substation in year 2018. Interruption duration was 42 minutes and the amount of energy not supplied was 1176 kWh. First step was to create a customer damage function for this substation, using each customer sector share from substation total energy consumption. Data about customer sectors shares were obtained from the load structure of 110 kV substations (this load structure is from year 2014). Using substation damage function, a cost of energy not supplied *CENS* was calculated. *CENS* was multiplied with the amount of energy not served (1176 kWh) and the total cost of interruption was then 5836,2 €. Second method that was used to calculate outage cost was *COC* method, where the amount of energy not

served for each customer sectors were directly found from total 1176 kWh of unserved energy in substation using sectors shares derived from the 2014 load structure. In this case, the total outage cost was 5085,4 €. For comparison, cost of outage in this substation was also found using country's average price of unsupplied kilowatt-hour, which resulted in outage cost of 5162,6 €. *VOLL* and *IEAR* methods turned out to be difficult to use on an outage that has already happened, because these methods were developed for future scenarios.

Outage cost was also calculated analytically. Unserved kilowatt-hour prices for industry, agriculture and service sectors were calculated by dividing each sector's annual gross value added by its annual energy consumption. Data about gross value added and energy consumption was found from Statistics Estonia. Method assumes that electricity interruption results in total shutdown of production and therefore 100% loss of gross value added, which may not be true in reality. For this reason, a substitutability factor (this factor represents the average percentage of the amount of electricity that is critical for production) was used in calculations. Household sector's unserved kilowatt-hour price was calculated using leisure time and net hourly wage. This price was then also multiplied by household sector substitutability factor. To calculate outage cost, *COC* method was used again, where each sector's amount of energy not supplied was multiplied by sector's analytically found unserved kilowatt-hour prices. Total outage cost was 4290,8 €. Using country's analytically calculated average price of unsupplied kilowatt-hour, cost of interruption was 3622,9 €. Outage cost was also calculated using service reliability area method, according to which the selected substation belonged to a rural service reliability area, where the price of unserved kilowatt-hour is 3,96 €/kWh and therefore the cost of outage is 4659,5 €. This is the only method in addition to country's average price of unsupplied kilowatt-hour method, which does not require knowledge about customer sectors load structure.

As a result of this Thesis, it was found that *COC* method gives most precise outage cost assessment, because outage cost is calculated directly by finding sectors unserved amount of energy from total amount of unserved energy using sectors shares. Sectors unserved energy amounts are then multiplied by each sector's price of unsupplied kilowatt-hour respectively. It is recommended to use customer survey based kilowatt-hour prices, because those take into account indirect losses, such as damaged equipment, spoiled materials, which are very hard to assess analytically. For future use, it is necessary to develop a more precise load structure in cooperation with distribution system operator, which shows customer sector's load structure of each power line that is connected to transmission system substation. Good enough outage assessment was also obtained by using *CENS* method, but it gives more average outage cost result (5836,2 €), because *CENS*

(equation 2.17) is calculated as an average over outage durations. Secondly, CENS calculation is quite long and time-consuming compared to *COC* method. If neither of these methods can not be implemented, it is advisable to use less precise service reliability area method, where area's average load structure is taken into account. The last option is to use the country's average indicators, but these provide only an approximate cost assessment, since the average figures do not describe in any way the region's electricity consumption.

Using the methodology developed in this Thesis, the transmission network operator is able to calculate the costs of damages caused by interruptions and consider those costs when developing and investing in the grid. The main goal of grid development is to ensure a high level of security of supply, but because the investments in the grid are expensive, the optimal solution that is most useful to society must be found. Therefore, in addition to equipment and operation costs, the amount of damage caused by interruptions to consumers must be taken into account.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Elektrituru käsiraamat, Tallinn: Eleringi toimetised nr 1/ 2016 (13), 2016. [WWW]
<https://elering.ee/elektrituru-kasiraamat> (16.08.2018)
2. Narva elektrijaama sulgemine Eestit elektrita ei jätaks.- *Äripäev*. [WWW]
<https://www.aripaev.ee/uudised/2018/06/12/narva-elektrijaama-sulgemine-eestit-elektrita-ei-jataks> (16.08.2018)
3. Eesti elektri ülekandevõrgu arengukava aastani 2032. Tallinn: Elering, 2017.
4. Elektrilevi OÜ kesk- ja madalpingevõrgu varustuskindluse näitajad ja muutuste mõjurid erinevates varustuskindluse piirkondades. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2013. [WWW]
(14.09.2018)
5. Royal Academy of Engineering: Counting the cost: the economic and social cost of electricity shortfalls in the UK, november 2014.
6. Valdma, M. Energeetika: Energiasüsteemid, 2011 [WWW]
http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV0160/HORISONT_5_2011_mati_valdma_energiasusteemid.pdf (05.03.2018)
7. Meldorf, M., Kilter, J. Elektrisüsteemi stabiilsus. Tallinn, 2011.
8. Astapov, V. Technical-Economic Analysis of Distributed Generation Units in Power Systems: doktoritöö. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2015.
9. Eesti elektrisüsteemi varustuskindluse aruanne 2017. Tallinn: Elering, 2017. [WWW]
https://elering.ee/sites/default/files/public/Elering_VKA_2017.pdf (8.04.2018)
10. Eleringi elektrituru visioon Tallinn. [WWW]
https://elering.ee/sites/default/files/attachments/Eleringi%20elektrituru%20visioon_0.pdf
(13.07.2018)
11. Arengufond: Elektrivõrgu tänane olukord ja võimalikud arengustsenaariumid, 2013. [WWW]
https://energiatalgud.ee/img_auth.php/1/12/Eesti_Arengufond._Elektriv%C3%B5rgu_t%C3%A4nane_olukord._V%C3%B5imalikud_arengustsenaariumid.pdf (17.03.2018)
12. Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused. Osa 3: Terminid ja määratlused: EVS-EN 50160:2010.
13. Raesaar, P. Elektrivõrkude töökindlus. Tallinn, 2010 [WWW]
https://energiatalgud.ee/img_auth.php/a/a8/Raesaar%2C_P._Elektriv%C3%B5rkude_t%C3%B6%C3%B6kindlus._Tallinn_2010.pdf (06.03.2018)
14. Kuckshinrichs, W., Schröder, T. Value of Lost Load: An Efficient Economic Indicator for Power Supply Security?, 2015. [WWW]
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2015.00055/full> (11.04.2018)
15. Ratha, A., Iggland, I., Andersson, G. Value of Lost load: how much is supply security worth?, 2013. [WWW] <https://ieeexplore.ieee.org/document/6672826/> (25.03.2018)

16. Eesti elektrisüsteemi varustuskindluse aruanne 2012. Tallinn: Elering, 2012. [WWW] https://elering.ee/sites/default/files/public/Elering_Varustuskindluse_aruanne_2012.pdf (8.04.2018)
17. Eesti elektritarbijate toitekatkestustest tingitud majandusliku kahju hindamine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2004.
18. Statistikaameti andmebaas. [WWW] http://pub.stat.ee/px-web.2001/Database/Majandus/02Energeetika/02Energia_tarbimine_ja_tootmine/01Aastastatistika/01Aastastatistika.asp (17.08.2018)
19. Raudjärv, R., Kuskova, L. Energiatarbimine kodumajapidamistes, 2013. [WWW] <https://www.stat.ee/dokumendid/68623>
20. Rosin, A., Möller, T., Lehtla, M., Hõimoja, M. Analysis of household electricity consumption patterns and economy of water heating shifting and saving bulbs, 2009.
21. Rosin, A., Drovtar, I., Link, S., Himoja, H., Mölder, H., Möller, T. Tarbimise juhtimine, , Tallinn: Eleringi toimetised nr 3/ 2014 (8), 2014. [WWW] https://elering.ee/sites/default/files/attachments/Tarbimise_juhtimine_0.pdf (16.07.2018)
22. Maloney, P. Microgrid knowledge: What is the Value of Electric Reliability? [WWW] <https://microgridknowledge.com/power-outage-costs-electric-reliability/> (08.08.2018)
23. Rosin, A. Tarbimise juhtimise võimalused tööstuses, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2017. [WWW] https://www.ttu.ee/public/e/energeetikateaduskond/Instituudid/elektrotehnika_instituut/smartgrid/Loeng_TarbimiseJuhtimineToostuses.pdf (08.08.2018)
24. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud: uurimistöö. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2017. [WWW] <https://elering.ee/ulekandevorgu-koormuste-staatilised-ja-dunaamilised-karakteristikud>
25. Schellenberg, J. Evaluating the Total Cost of Outages, San Diego: Distribution Reliability Working Group, 2012. [WWW] <http://grouper.ieee.org/groups/td/dist/sd/doc/2012-07-04-Evaluating-the-Total-Cost-of-Outages.pdf> (21.07.2018)
26. Office of Technology Assessment at the German Bundestag. What happens during a blackout?, 2011.
27. Study on Estimation of Costs due to Electricity Interruptions and Voltage Disturbances. SINTEF Energy Research, 2010.
28. Guidelines of Good Practice on Estimation of Costs due to Electricity Interruptions and Voltage Disturbances. Council of European Energy Regulators, 2010. [WWW] https://www.ceer.eu/documents/104400/3729293/C10-EQS-41-03_GGP+interruptions+and+voltage_7-Dec-2010.pdf/7dec3d52-934c-e1ea-e14b-6dfe066eec3e?version=1.0 (02.04.2018)
29. Losa, I. Regulation of continuity of supply in the electricity sector and cost of energy not supplied, 2009.
30. The Value of Lost Load (VoLL) for Electricity in Great Britain. London Economics, 2010.
31. Köks, A. Energia infrastruktuuri töö- ja häirekindlus ning energia kättesaadavus: magistritöö. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2015.

32. Rey, L., Linares, P. The costs of electricity interruptions in Spain. Are we sending the right signals?, Alcoa Foundation, 2012. [WWW] <https://eforenergy.org/docpublicaciones/documentos-de-trabajo/WPFA05-2012.pdf> (14.07.2018)
33. Valtin, J., Tammoja, H., Raesaar, P. Elektrilevi kesk- ja madalpingevõrgu varustuskindluse näitajad ja muutuste mõjurid erinevates varustuskindluse piirkondades üleminekul kaablivõrgule: projekt. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2013. https://www.elektrilevi.ee/-/doc/6305157/ettevottest/uuringud/Elektrilevi_varustuskindluse_naitajad_muutuste_mojurid_yleminekul_kaablivorgule.pdf
34. Statistikaameti andmebaas. [WWW] <https://www.stat.ee/stat-tarbijahinnaindeksi-muutus> (16.07.2018)
35. Eleringi sisematerjalid: Elektripaigaldiste käidu kord, 2017.
36. Eleringi sisematerjalid: 110 kV alajaamade tarbijate struktuur.
37. Eleringi sisematerjalid: 2017. aasta rikkestatistika.
38. Eleringi siseveeb: alajaamade skeemid. [WWW] <http://esdh.elering.sise/> (29.07.2018)
39. Valtin, J., Tammoja, H., Raesaar, P. Elektrilevi OÜ hajavarustuskindluse piirkondade võrguinvesteeringute eesmärgid, realiseerimise meetodid ja nende valikukriteeriumid: projekt. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2014. https://energiatalgud.ee/img_auth.php/0/07/Tallinna_Tehnika%C3%BClikool._Hajavarustuskindluse_piirkondade_v%C3%B5rguinvesteeringute_eesm%C3%A4rgid%2C_realiseerimise_meetodid_ja_nende_valikukriteeriumid._2014.pdf
40. Statistikaameti andmebaas. [WWW] [http://pub.stat.ee/px-web.2001/database/Majandus/15Rahvamajanduse_arvepidamine/06Sisemajanduse_koguprodukt_\(SKP\)/09sisemajanduse_koguprodukt_tootmise_meetodil/09sisemajanduse_koguprodukt_tootmise_meetodil.asp](http://pub.stat.ee/px-web.2001/database/Majandus/15Rahvamajanduse_arvepidamine/06Sisemajanduse_koguprodukt_(SKP)/09sisemajanduse_koguprodukt_tootmise_meetodil/09sisemajanduse_koguprodukt_tootmise_meetodil.asp) (26.08.2018)
41. Cambridge Economic Policy Associates (CEPA) Ltd. Study on the Estimation of the Value of Lost Load of Electricity Supply in Europe, 2018.
42. Statistikaameti andmebaas. [WWW] <http://pub.stat.ee/px-web.2001/Database/Sotsiaalelu/01Ajakasutus/01Ajakasutus.asp> (28.08.2018)
43. Tikva, P. Eesti statistika kvartalikiri: Kulutused- kas nõistlik tarbimine või kulutamine?. Tallinn: Statistikaamet, 2009. https://www.stat.ee/valjaanne-2009_eesti-statistika-kvartalikiri-4-09 (28.08.2018)
44. Statistikaameti andmebaas [WWW] http://pub.stat.ee/px-web.2001/database/Majandus/12Palk_ ja_toojeukulu/01Palk/02Aastastatistika/02Aastastatistika.ika.asp (11.10.2018)
45. Statistikaameti andmebaas [WWW] <http://pub.stat.ee/px-web.2001/Database/Sotsiaalelu/15Tooturg/02Heivatud/02Aastastatistika/02Aastastatistika.asp> (11.10.2018)