



**Kaido Kõvamees**

**ELEKTROMAGNETVÄLJAD  
ALAJAAMADES – MÕÕTMISED,  
ANALÜÜS, NÕUETELE VASTAVUS**

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut

Elektritehnika eriala

Tallinn 2022

## **Autori deklaratsioon ja lihtlitsents**

Mina, Kaido Kõvamees, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendajad: Heljut Kalda, Nikolai Dorovatovski (allkirjastatud digitaalselt).

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Kaido Kõvamees, sünnikuupäev: 28.02.1985 annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Elektromagnetväljad alajaamades – mõõtmised, analüüs, nõuetele vastavus“:

1. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
2. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

(allkirjastatud digitaalselt)  
(kuupäev digiallkirjas)

# SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	4
1. ELEKTROMAGNETVÄLJAD, NENDE BIOLOOGILISED MÕJUD.....	6
1.1. Elektri- ja magnetväljad.....	6
1.1.1. Elektri- ja magnetväljade olemus.....	6
1.1.2. Magnetvälja ja elektrivälja karakteristikud.....	8
1.2. Ülimadala sagedusega väljade bioloogilised mõjud.....	10
1.3. Piirnormid töö- ja elukeskkonnas.....	14
1.3.1. Kiirgusohutust sätestavad seadusandlikud aktid.....	14
1.3.2. Rakenduslikud väärtused ja piirväärtused.....	15
2. PRAKTILISED MÕÕTMISED ALAJAAMADES.....	20
2.1. Elektromagnetväljade mõõtmine.....	20
2.2. Elektromagnetvälja allikad alajaamades.....	21
2.3. Mõõtmiseks kasutatud seadmed ja mõõtmismeetod.....	22
2.4. Mõõtetulemused alajaamades.....	25
2.4.1. Harku alajaam.....	26
2.4.2. Tabasalu alajaam.....	28
2.4.3. Rakvere alajaam.....	30
3. ALAJAAMADE KIIRGUSOHUTUSE VASTAVUS NÕUETELE.....	33
3.1. Mõõtetulemuste analüüs.....	33
3.2. Ohutusplaan.....	34
KOKKUVÕTE.....	38
SUMMARY.....	40
VIIDATUD ALLIKAD.....	42
LISAD.....	45
Lisa 1. Mõõtmistulemused Harku alajaamas.....	46
Lisa 2. Mõõtmistulemused Tabasalu alajaamas.....	47
Lisa 3. Mõõtmistulemused Rakvere alajaamas.....	48

## SISSEJUHATUS

Töökeskkonnas puutume kokku elektromagnetväljadega, mida ei ole ei kuulda ega näha. Elektromagnetväljal ei ole omapärast lõhna, seda ei saa katsuda. Sageli alahinnatakse selle mõju, ohtlikkust ja sellega kaasnevaid terviseprobleeme ning ohtu töökeskkonnale. Siinses töös tuleb vaatluse alla madalsageduslik elektromagnetkiirgus, kehtivad piirväärtused ning alajaamas viibivaid inimesi varitsevad elektri- ja magnetväljadega seotud ohud. Oluline on, et alajaamas vajalikke töid tegevad elektrikud oleksid teadlikud, milliseid terviseriske toob kaasa kokkupuude suure tugevusega elektri- ja magnetväljadega, ning millised on nende olulisemad allikad alajaama territooriumil. Eriti tähtis on see nende jaoks, kellel on meditsiiniline implantaat, või kes kasutavad kehal kantavat elektroonilist meditsiiniseadet. Üks võimalusi töötajate teadlikkuse tõstmisel on koostada igale alajaamale ohutusplaan, kus on näidatud suurema ohuga piirkonnad.

Lõputöö eesmärk on tuua välja meetodika, mida saaks rakendada alajaamades elektri- ja magnetväljade ohu hindamiseks ning luua alajaamadele ohutusplaani koostamise alused kolme Elering AS alajaama näitel. Läbiviidud mõõtmiste ja analüüsi alusel on võimalik tulevikus koostada töötajatele juhised, millistes alajaama piirkondades on ohtlik pikemalt viibida ja millistes mitte. Elering AS on Eesti riigile kuuluv ettevõtte, mille põhitegevuseks on elektri ja gaasi ühendussüsteemi haldamine. Ettevõtte peamine ülesanne on kindlustada Eesti tarbijatele kvaliteetne elektrivarustus.

Töö esimeses osas antakse lühiülevaade elektri- ja magnetväljade olemusest ja karakteristikutest ning ülimaldala sagedusega väljade bioloogilistest mõjudest. Tuuakse välja, millised on teaduslikult tõestatud ohud inimesele mitteioniseeriva kiirguse korral sagedusel 50 Hz. Seejärel käsitletakse Euroopa Liidu direktiivi, kus on esitatud töötervishoiu ja tööohutuse miinimumnõuded seoses töötajate kokkupuutega elektromagnetväljadega tulenevatest riskidest (Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv 2013/35/EL) [1], ja Eesti siseriiklikke määrusi „Töötervishoiu ja tööohutuse nõuded elektromagnetväljadest mõjutatud töökeskkonnale, elektromagnetväljadega kokkupuute piirnormid ja rakendusväärtused ning elektromagnetväljade mõõtmise kord“ nr 44, mis on vastu võetud 01.04.2016 [2], ning „Mitteioniseeriva kiirguse piirväärtused elu- ja puhkealal, elamutes ning ühiskasutusega hoonetes, õpperuumides ja mitteioniseeriva kiirguse tasemete mõõtmine“ nr 38, mis on vastu võetud 21.02.2002, millest töös lähtuti [3].

Töö teises osas kirjeldatakse elektromagnetväljade mõõtmismetoodikat ja kuidas mõõtmisi läbi viia. Elektri- ja magnetväljade mõõtmismetoodika leidmiseks töötati läbi standard elektri- ja magnetväljade mõõtmise kohta (IEC 61786-2:2014) [4]. Lisaks konsulteeriti ka Terviseameti

kesklabori füüsikalabori ja Inspecta Estonia OÜ töötajatega. Saadud infot, lisaks standardites ja määrustes olevale infole, rakendati töös mõõtmismetoodika koostamisel ja mõõtmiste läbiviimisel alajaamades. On välja toodud ka olulisemad elektromagnetvälja allikad alajaamades. Antakse ülevaade mõõtmiste läbiviimiseks kasutatud seadmetest Maschek ESM-100 ja Velleman DEM50. Lühidalt on välja toodud seadmete omadused, seadme mõõtetäpsus ja mõõtepiirkond. Tuuakse välja ka mille alusel valiti alajaamas elektri- ja magnetvälja mõõtmiseks mõõtepunktid. Seejärel esitatakse mõõtmiste tulemused Elering AS-ile kuuluvates Harku, Tabasalu ja Rakvere alajaamades koos joonistega, kus on ära märgitud mõõtepunktide asukohad.

Töö kolmandas osas analüüsitakse mõõtetulemuste põhjal töötingimuste vastavust määrustega kehtestatud nõuetele ja esitatakse soovitusel ohutusplaani koostamiseks alajaamadele. Töös on toodud nädisohutusplaan Rakvere alajaama näitel, mis põhineb mõõdetud tulemustel. Käesolev töö toob kokkuvõtvalt välja elektromagnetväljadega seonduvad teaduslikult tõendatud ohud inimesele ja annab ülevaate millise tugevusega elektri- ja magnetväljad alajaamades esinevad.

# 1. ELEKTROMAGNETVÄLJAD, NENDE BIOLOOGILISED MÕJUD

## 1.1. Elektri- ja magnetväljad

### 1.1.1. Elektri- ja magnetväljade olemus

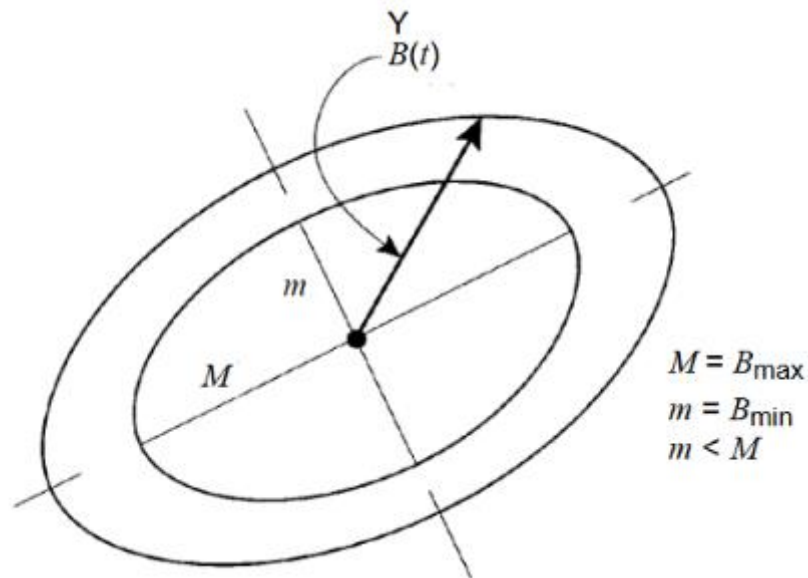
Elektriväli on ruumis leviv pidev väli, mille tekitab elektrilaeng, ja see mõjutab teisi ruumis paiknevaid elektrilaenguid. Elektriväljaga on tihedalt seotud magnetväli ning koos moodustavad need elektromagnetvälja. Elektrivälja tekitajateks on elektriliselt laetud osakesed (elektrilaeng) või ajas muutuv magnetväli. Nimetatud allikad võivad tekitada elektrivälja nii koos kui ka eraldiseisvalt. Elektrivälja, mille tekitab magnetväli, nimetatakse pööriselektriväljaks. Elektriväli, mis eksisteerib alati elektrilaengute ümber, on oma omaduselt materiaalne objekt. Elektronide ehk elektrilaengute kulgemisel juhtmes liigub ka iga üksik elektroni ümbritsev isiklik energiaväli, mis kõik kokku moodustavad juhtme ümber liikuvate laengute energiavälja nn magnetvälja. Levimiskiirus on 300 000 km/s. Elektriväli mõjutab elektriliste jõududega teisi samas ruumis asuvaid laenguid. Ühes ja samas ruumipunktis võib samaaegselt eksisteerida mitu välja. Elektriväli on vektorväli ja seda kirjeldatakse laetud keha ümbritseva ruumi iga punkti kohta antud vektoritega, elektrivälja tugevustega. [5] [6]

Magnetväli on füüsikaline üldmudel sellest, kuidas toimub vastastikmõju liikuvate elektrilaengute ja/või magnetiliste omadustega ainete vahel. Magnetväli on vektorväli, kuna igas konkreetses punktis on määratud nii selle suurus (tugevus) kui ka suund. Magnetväli on üks elektromagnetvälja avaldusvormidest. Taustsüsteemis, mille suhtes välja tekitav elektrilaeng liigub ning elektrivälja tugevus muutub, ilmneb magnetväli. Seega esineb koos magnetväljaga alati ka elektriväli. Kui ühes ruumipunktis eksisteerib korraga mitu erinevat magnetvälja, siis liituvad nende väljade magnetinduksioonid vastavalt superpositsiooni printsipile (nagu vektorid). [6]

Elektri- ja magnetväljasid tekitavad elektriliinid, elektrijõul töötavad seadmed ja transpordivahendid. Neid väljasid iseloomustavad nende tugevus, sagedus, lainekuju ja polarisatsioon. Elektri- ja magnetväljasid iseloomustavad suurused on olulised selleks, et määrata kindlaks nõudmised seadmetele, mida kasutatakse väljade mõõtmiseks. [7]

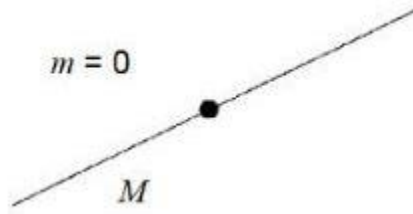
Üldiselt võib kolmefaasilise elektriliini ruumipunktis tekitatud välja esitleda pöörleva vektorina, mis joonistab ellipsi iga voolutsükli kohta juhhis (Joonis 1). Maksimaalset väljatugevust ja suunda näitavad

ruutkeskmine väärtus (RMS) ja ellipsi suurpooltelje  $M$  (Joonis 1) suund. Sarnaselt kirjeldavad välja miinimumi väärtust ja suunda ruutkeskmine väärtus ja ellipsi väikepooltelje  $m$  (Joonis 1) suund. Selliseid väljasid nimetatakse elliptiliselt polariseerituteks. [7]

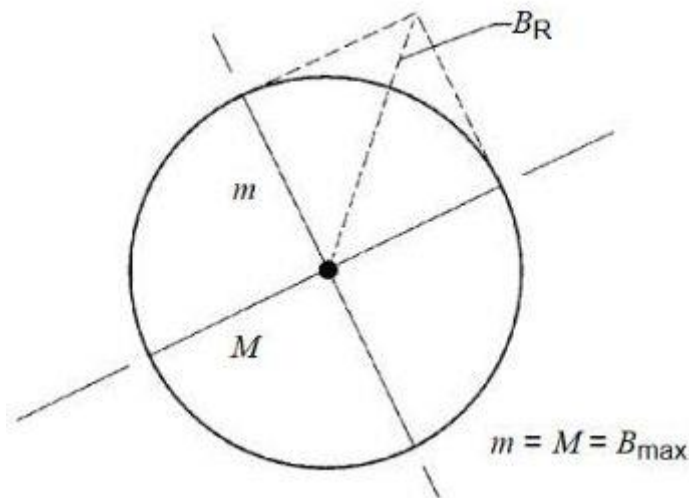


Joonis 1. Magnetväli elliptilise polarisatsiooni korral:  $M$  – ellipsi suurpoolteljesuunaline magnetvootiheduse komponent,  $m$  – ellipsi väikepoolteljesuunaline magnetvootiheduse komponent,  $B$  – magnetvootihedus [7]

Elektriliinidest eemal esinevad väljad võivad olla mitme allika tekitatud, mis ei pruugi omada sama algfaasi. Seega võivad elliptiliselt polariseeritud väljad esineda mitmel pool keskkonnas (näiteks kodus, tööl). Sõltuvalt juhi kujust ja pingest juhisis võib välja polarisatsioon antud ruumipunktis varieeruda lineaarsest ( $m = 0$ ) kuni ringikujulise polarisatsioonini ( $m = M$ ) (Joonis 2 ja Joonis 3). Kirjeldatud mitmefaasiline välja olukord eeldab, et väljas puuduvad harmoonikud. Kui väljas esineb olulisel määral harmoonikuid, siis on ka polarisatsioon oluliselt keerulisem. Harmoonikuid põhjustab mittelineaarne koormus elektrisüsteemis. [7]



Joonis 2. Magnetväli lineaarse polarisatsiooni korral:  $M$  – ellipsi suurpoolteljesuunaline magnetvootiheduse komponent,  $m$  – ellipsi väikepoolteljesuunaline magnetvootiheduse komponent [7]



Joonis 3. Magnetväli ringikujulise polarisatsiooni korral:  $M$  – ellipsi suurpoolteljesuunaline magnetvootiheduse komponent,  $m$  – ellipsi väikepoolteljesuunaline magnetvootiheduse komponent,  $B$  – magnetvootihedus [7]

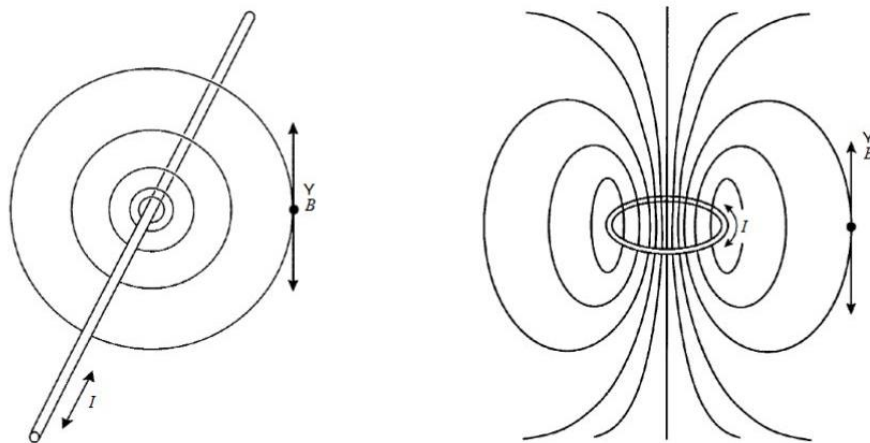
### 1.1.2. Magnetvälja ja elektrivälja karakteristikud

Kolmefaasilise liini magnetvälja tugevus muutub maapinna lähedal aeglaselt sõltuvalt mõõtepunkti kõrgusest. Näiteks 500 kV liini puhul muutub magnetvälja tugevus liini all ligikaudu 1 m kõrgusel maapinnast vähem kui 2% kui mõõtepunkti kõrgus muutub 10%. Kaugemates punktides välja ühetaolisus kasvab. [7]

Punktides, mis paiknevad liinist kaugel, muutub tasakaalus või peaaegu tasakaalus vooludega üheaheelalise kolmefaasilises liini puhul magnetvälja tugevus vastavalt suhtele  $1/r^2$ , kus  $r$  on kaugus liinist külgsuunas (eeldatakse, et  $r$  on oluliselt suurem kui juhtmete vahekaugus). Voolude tasakaalu vähenedes omandab magnetvälja tugevuse vähenemine kuju  $1/r$ . Kaheaheelalise tasakaalus vooludega kolmefaasilises liini puhul, millel on madal reaktiivtakistus (st identsed või peaaegu identsed

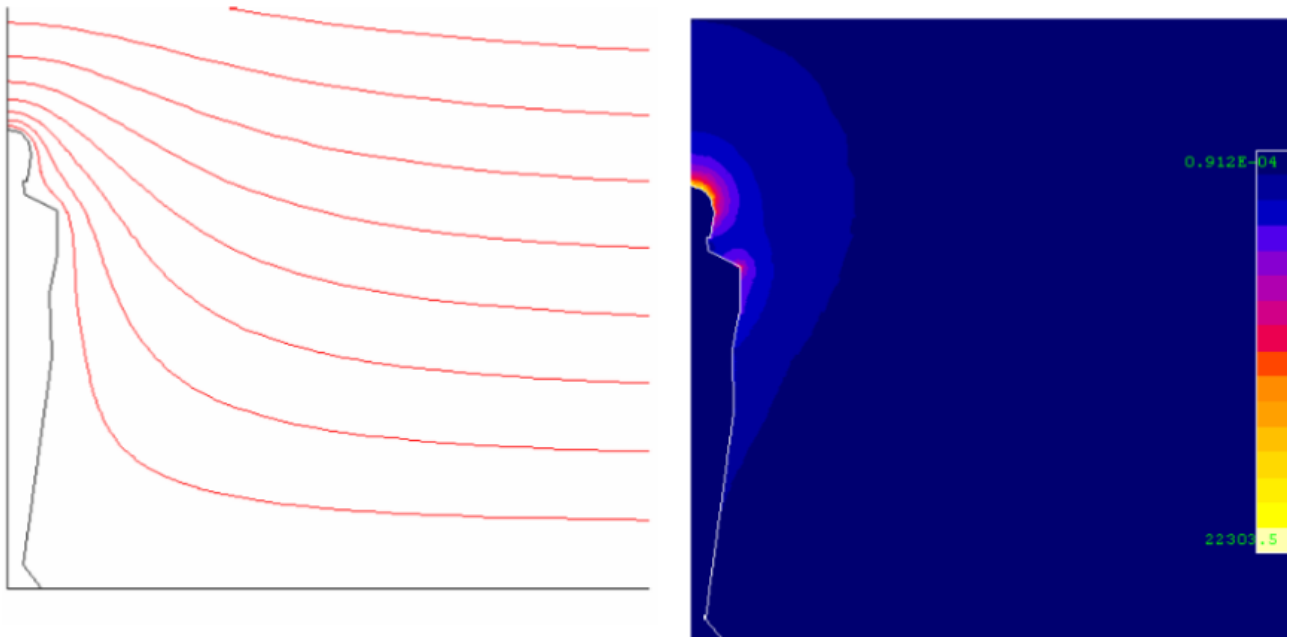
koormusvoolud mõlemas ahelas), väheneb magnetvälja tugevus vastavalt suhtele  $1/r^3$ , kus samuti eeldatakse, et  $r$  on oluliselt suurem kui juhtmete vahekaugus. Magnetvälja tugevuse muutumine ajas on funktsioon koormusvoolu muutumisest, näiteks kui on suur tarbimine, siis koormusvoolud tõusevad, ja tekitatakse suuremaid magnetväljasid. [7]

Teised tavaliselt kohatavad magnetväljade allikad on sirged juhid (näiteks ühendused maandussüsteemidega/elektroodidega) ja ligikaudu ringikujulised juhtmekeerud (näiteks trafodes, mootorites, monitorides) ühefaasiliste vooludega. Selliste allikate jõujooned ja vektorid on kujutatud joonisel 4 (Joonis 4). Magnetväljad on tavaliselt lineaarselt polariseeritud ja vektorite võnkumine sõltub voolude lainekujust. Sinusoidsed voolud tekitavad sinusoidseid magnetväljasid, mille puuduvad harmoonikud, ning mitte-sinusoidsed magnetväljad võivad olla harmoonikuterohked. Magnetvälja tugevused, mida tekitavad voolud lõpmata pikas sirges juhtmes ja ringikujulises juhtmekeerus, vähenevad vastavalt seostele  $1/r$  ja  $1/r^3$ , kus  $r$  on kaugus välja allikast (viimasel juhul eeldatakse, et  $r$  on oluliselt suurem kui ringikujulise juhtmekeeru raadius). [7]

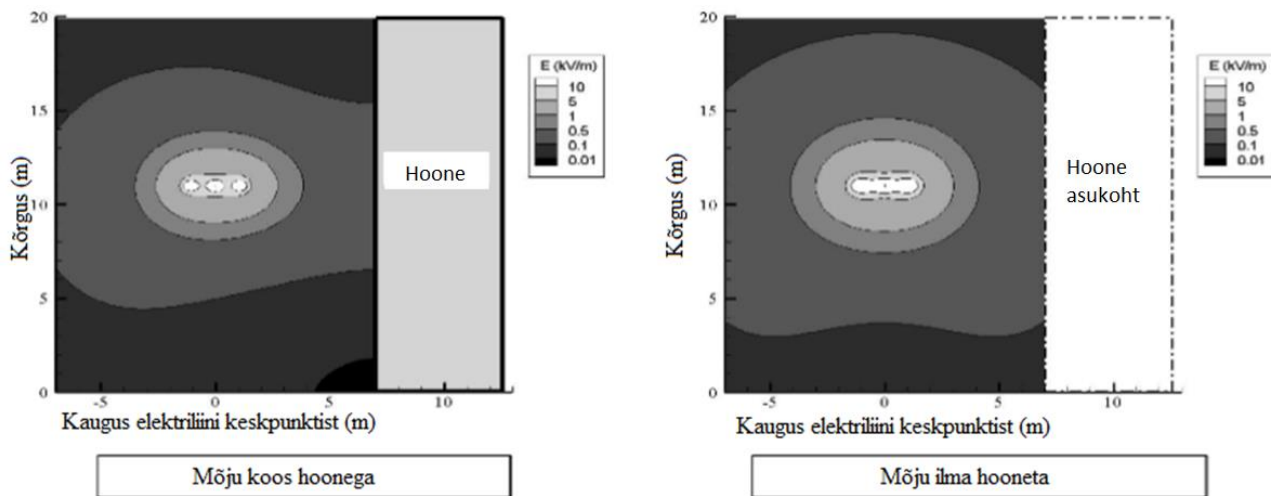


Joonis 4. Magnetväli, mille tekitab sirge ja ringikujuline juht [7]

Kolmefaasilise liini elektrivälja tugevus muutub maapinna lähedal aeglaselt sõltuvalt mõõtepunkti kõrgusest. Elektriväli on mõjutatud enamike objektide poolt, vastupidiselt magnetväljale. Seda nimetakse lähedusefektiks ja see tuleneb erinevusest elektrilaengu jaotuses erinevates objektides. Näiteks inimene 50 Hz elektriväljas mõjutab elektrivälja jaotust (vt Joonis 5). Sama fenomen esineb ka suurte objektide (näiteks ehitiste) puhul (vt Joonis 6). [7]



Joonis 5. Elektrivälja häirimine inimese poolt [7]



Joonis 6. Elektrivälja häirimine hoone tõttu [7]

## 1.2. Ülimadala sagedusega väljade bioloogilised mõjud

Elektromagnetkiirguse spekter hõlmab erineva sagedusega väljasid alates staatilistest elektri- ja magnetväljadest kuni röntgenkiirguseni. Elektromagnetväljasid iseloomustavad nende sagedus ja lainepikkus, mis on omavahel pöördvõrdelises seoses. Elektromagnetkiirguse spektri saab jaotada mitteioniseerivaks ja ioniseerivaks kiirguseks. Mitteioniseeriva kiirguse energia on liiga väike, et

lõhkuda keemilisi sidemeid ja tekitada ioone [8]. Tabelis (Tabel 1) on välja toodud kokkuvõtvalt elektri – ja magnetvälja võimalikud toimed vastavalt sagedusvahemikele.

Tabel 1. Kehalist toimet avaldava kokkupuute piirnorme ületava kokkupuutega seotud toimed ja sümptomid [9]

Väli	Sagedus	Võimalikud sümptomid ja toimed
Staatilised magnetväljad	0...1 MHz	Iiveldus ja peapööritus, meditsiiniseadmete häirimine. Toime verevoolule, pulsile ja aju talitlusele (võimalik voolutugevus üle 7 T). Närvide stimulatsioon ja lihaste kokkutõmbed (kiired liigutused).
Madalsageduslikud magnetväljad	1 Hz...10 MHz	Häiringud meditsiiniseadmetes. Visuaalsed tajud. Stimulatsioon närvides, mis põhjustavad kihelust ja valu. Lihaste kokkutõmbed ja südame arütmia.
Madalsageduslikud elektriväljad	1 Hz...10 MHz	Elektrilöökk, pindmised põletushaavad (objektide puudutamine).
Kõrgsageduslikud väljad	Alates 100 kHz	Meditsiiniseadmete häirimine. Soojustunne, ülekuumenemine. Elektrilöökk, pindmised või sügavad põletushaavad (objektide puudutamine).

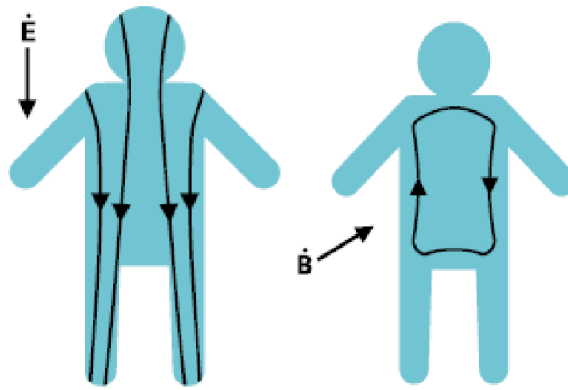
Elektrivoolu ülekandevõrkude genereeritavad 50 Hz väljad kuuluvad ülimaldate sageduste sagedusalasse, mis on vahemikus 1 Hz...300 Hz [10]. Ülimaldate sageduste sagedusala väljadel on pikk lainepikkus. Näiteks sagedusele 50 Hz vastab lainepikkus 3500 km [8]. Ülimaldate sageduste väljad on enamjaolt seotud inimese loodud allikatega, mida on arvukalt ja mille hulka kuuluvad näiteks elektrivoolu ülekandesüsteemid, elektri- ja elektroonikaseadmed, tööstusseadmed. Keskkonnas on ülimaldate sageduste sagedusala väljade tase väga madal ning üldine elanikkond puutub kokku väljatugevustega, mis jäävad vahemikku 5...50 V/m elektrivälja ja 0,01...0,2  $\mu$ T magnetväljade puhul. Oluliselt suuremate väljatugevustega puutuvad inimesed kokku lühiajaliselt töökeskkonnas. [10]

Elektromagnetkiirgusega kokkupuute mõju hinnatakse tavaliselt elektri- ja magnetvälja tugevuse kaudu, mida mõõdetakse inimese ümber. Samas bioloogilisi mõjusid põhjustavad kehasisesed elektri- ja magnetväljad, mida on keeruline otseselt mõõta. Lisaks tuleb arvestada, et elektri- ja magnetvälja toime mehhanismid on erinevad. Seega tuleb määrata mõlemad, et täielikult kirjeldada kokkupuudet elektromagnetväljaga. [10]

Elektriväli, mis on madala sagedusega, tekitab kehapinnale ebaühtlased laengud, kehas moodustuvad sisemised elektriväljad. Need omakorda võivad tekitada kehas elektrivoolusid. Ülimadala sagedustega sagedusalasse kuuluv elektriväli nõrgeneb oluliselt kehas ning indutseeritud elektriväli kasvab välise välja sageduse ja objekti suuruse kasvades. Läviväärtusi ületava indutseeritud elektrivälja korral stimuleeritakse erutuvaid rakke (närvirakud, lihasrakud), indutseeritakse nii elektrivoolusid ning mõjutatakse seeläbi organismi. Tekkiv kehasisene vool on väike ning üldjuhul ei läbista rakumembraani, liikudes peamiselt rakkude vahel [11]. Tavapärase kokkupuude elamute ülimadalasse sagedusalasse kuuluvate elektriväljadega indutseerib kehas väga väikeseid elektriväljasid, samas kui kokkupuude töökeskkonnas ja otse kõrgepingeliinide all võib mõnes koes tekitada elektrivälja suurusjärgus 1 mV/m [10].

Magnetväljade peamine mõju on kehasisese elektrivoolu indutseerimine [11]. Magnetvälja puhul on kehas indutseeritud voolutihedus otseselt seotud välise magnetvälja magnetvoo tihedusega. Laboratoorsed uuringud ja teoreetilised arvutused on näidanud, et suured voolutihedused põhjustavad akuutseid bioloogilisi mõjusid. [8] Üldiselt on need madala sagedusega elektromagnetväljade puhul ajutised ja kaovad väljast eemaldudes [12].

Muutuvas elektriväljas on inimese pea kohal elektriväli suurem kui jalgade juures maapinnal. Potentsiaalide vahe kutsub esile laengute liikumise, mille tulemusel tekivad inimese kehas mikrovoolud. Joonisel on välja toodud lihtsustatud kujul, kuidas kujutatakse elektrivälja ja magnetvälja kehas indutseeritud voolusid (Joonis 7). [5]



Joonis 7. Elektrivälja ja magnetvälja indutseeritud voolud kehas:  $E$  – elektriväli,  $B$  – magnetvootihedus [10]

Üks väliste ülimaldala sagedusega väljade kaudne mõju on nii meditsiiniliste implantaatide (näiteks südamestimulaator, sisekõrvaimplantaat) kui ka kehal kantavate elektrooniliste meditsiiniseadmete (näiteks glükoosisensor, insuliinipump, kuuldeaparaat) töö häirimine. Võimalik on ka vastastikune toime passiivsete meditsiiniseadmetega (näiteks liigeseproteesid, tihvtid, metallist plaadid või traadid). Ohustatud inimeste hulka kuuluvad ka rasedad töötajad. [9]

Kaudsed mõjud väljenduvad ka sädelahendusena või kontaktvooluna, kui inimene puutub kokku elektromagnetväljas asuva objektiga ning kumbki neist ei ole korralikult maandatud [12]. Kontaktvoolud võivad tekitada elektrišoki või põletuse, juhul kui katsutav elektriväljas elektrit juhtiv objekt asub elektromagnetväljas ja läheduses olev objekt on maandatud. [9]

Ulatuslikud uuringud viimaste aastakümnete jooksul ei ole leidnud, et pikaajaline kokkupuude madala sagedusega elektromagnetväljadega omaks kahjulikku mõju tervisele. Epidemioloogilised uuringud on viidanud võimalusele, et pikaajalist kokkupuudet 50...60 Hz magnetväljadega (näiteks elamud kõrgepingeliinide vahetus läheduses) võib seostada lapseas leukeemiasse haigestumise riski suurenemisega. Samas võivad neid tulemusi selgitada kallutatud uuritavate valikul, kaasuvad asjaolud ja juhus. Ühtlasi ei ole laboratoorsed uuringud leidnud biofüüsikalist mehhanismi ja ka laboratoorsed katsed rakkude ja katseloomadega ei toeta seda hüpoteesi. Ei ole leitud olulist seost madala sagedusega elektromagnetväljade ja täiskasvanute vähi vahel ning puuduvad tõendid, et kokkupuude madala sagedusega elektromagnetväljadega põhjustab Parkinson'i tõbe, arenguhäireid, viljakusprobleeme või südame-veresoonkonna haigusi. [13]

### 1.3. Piirnormid töö- ja elukeskkonnas

#### 1.3.1. Kiirgusohutust sätestavad seadusandlikud aktid

Rahvusvaheline mitteioniseeriva kiirguse eest kaitsmise komisjon (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, ICNIRP) on rahvusvaheline organisatsioon, mis töötab välja ja levitab teadustulemustel baseeruvaid nõuandeid kokkupuute vähendamiseks elektromagnetväljadega. Selle eesmärgiks on kaitsta nii inimesi kui ka keskkonda mitteioniseeriva kiirguse negatiivsete mõjude eest. Erinevate erialade eksperdid (näiteks bioloogid, epidemioloogid, arstid, füüsikud ja keemikud) töötavad koos ICNIRP'iga ja selle sees, et hinnata mitteioniseeriva kiirgusega kokkupuutumise riske ja töötada välja juhiseid kokkupuute piiramiseks. Nõuanded põhinevad bioloogilisi mõjusid ja elektromagnetkiirguse toimetehhanisme käsitlevatel teaduslikel publikatsioonidel kogu mitteioniseeriva kiirguse spektri ulatuses. Need avaldatakse suuniste, ülevaadete ja avaldustena, mis on tasuta avalikult kättesaadavad. [13]

Eesti Vabariigis on töökeskkonna piirnormid seoses elektromagnetväljadega kehtestatud määrusega „Töötervishoiu ja tööohutuse nõuded elektromagnetväljadest mõjutatud töökeskkonnale, elektromagnetväljadega kokkupuute piirnormid ja rakendusväärtused ning elektromagnetväljade mõõtmise kord“ nr 44, mis on vastu võetud 01.04.2016 [2]. Elu- ja puhkealal lubatud piirnormid on välja toodud „Mitteioniseeriva kiirguse piirväärtused elu- ja puhkealal, elamutes ning ühiskasutusega hoonetes, õpperuumides ja mitteioniseeriva kiirguse tasemete mõõtmine“ määruses nr 38, mis on vastu võetud 21.02.2002 [3]. Nimetatud määrused on ka käesoleva töö aluseks. Määrustest on leitud piirväärtused ja normid, mida peab jälgima tööandja töökeskkonnas, et tagada ohutus ja seadusega vastavus. Vastavad suunised ja nõudmised on ka saadaval Euroopa liidu direktiivis 2013/35/EL millel põhinevad Eestis kehtivad määrused [1].

Elektromagnetväljas olemine võib põhjustada otsest biofüüsikalist mõju inimese organismile. Vastavalt uuringutele on kehtestatud kokkupuute piirnormid. Nende ületamisel mõjutavad elektromagnetväljad inimese tervist ja ohutust kokkupuute korral lühiajaliselt.

Elektromagnetväljade puhul tuleb eristada elektri- ja magnetväljasid. Need mõjutavad inimest erinevalt ja neile on kehtestatud eraldi piirnormid. Elektrilaengute tekitatud väli on elektriväli, mille tugevus on sõltuvuses allika pingest. Mida suurem pinge, seda suurem elektriväli tekib. Elektrivoolus liikuvad laengud tekitavad omakorda sellega kaasneva magnetvälja. Magnetvälja tugevus on sõltuvuses voolutugevusest.

Elektrijuhi pingestatuse korral (näiteks elektri kaabel) ja kui selle kaudu voolutarbimist ei toimu, esineb kaabli ümber ainult elektriväli. Kui elektrijuhi hakatakse läbi juhtima ka voolu (näiteks allika külge ühendatud juhtme küljes on omakorda tarbija), siis ümbritseb elektrijuhti nii elektriväli kui ka magnetväli. Kõrgepingeliinidel on elektriväli suhteliselt konstantse suurusega, kuna elektripinged üldjuhul muutub vähe. Magnetväli on muutuva suurusega, kuna sõltub voolutugevusest. Oluline on elektromagnetväljade juures sagedus, kuna erinevatel sagedusvahemikel on erinevad otsesed ja kaudsed mõjud, samuti on piirnormid erinevad. [11]

Olemasolevad kokkupuute piirmäärad on väljendatud baaspiirangutena ja nende peamine eesmärk on vältida neuroloogilisi efekte sisemise voolutiheduse piiramise kaudu. Keskkonnas esinevad magnetvoolutihedused, mille indutseeritud voolutihedused kehas ületavad baaspiiranguid, on suurusjärgu võrra suuremad kui need, millega tavaolukorras kokku puututakse. Erandiks on teatud töökohad, kus tugevad elektriväljad võivad hetkeliselt põhjustada voolutihedusi, mis on piirnormide lähedased. [8]

### **1.3.2. Rakenduslikud väärtused ja piirväärtused**

Töökeskkonnas rakendatakse erinevate sädelahenduste ja sisemise elektrivälja piiramisel allapoole kokkupuute piirnorme välise elektrivälja madalaid rakendusväärtusi (Tabel 2). Tingimusel, et kasutatakse konkreetseid kaitsemeetmeid, on kõrgetest rakendusväärtustest allapoole jäävate elektriväljatugevuste juures häirivad sädelahendused välditud ning kehasisene elektriväli ei ületa kokkupuute piirnorme. [14]

Tabelis 2 esitatud elektriväljatugevuse väärtused on elektriväljatugevuse ruutkeskmised väärtused. Need on sinusoidsete väljade puhul võrdsed tippväärtustega, mis on jagatud ruutjuurega 2-est. [14]

Rakendusväärtused väljendavad elektriväljatugevuse suurimat väärtust, mis on arvatud või mõõdetud töötaja seisukohas. See on ruumiline tippväärtus elektriväljas asuva isiku kogu kehal. Seega tuleb hinnata kõiki asukohti, kus töötaja võib tööülesannete täitmisel viibida. Sel moel hinnatakse elektriväljaga kokkupuutumise ohutust ning piirnormide järgimist. [14]

Tabel 2. 1 Hz – 10 MHz elektriväljaga kokkupuute rakendusväärtused töökeskkonnas [14]

<b>Sagedusvahemik</b>	<b>Elektriväljatugevuse madalad rakendusväärtused, V/m (RMS)</b>	<b>Elektriväljatugevuse kõrged rakendusväärtused, V/m (RMS)</b>
$1 \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,0 \times 10^4$	$2,0 \times 10^4$
$25 \leq f < 50 \text{ Hz}$	$5,0 \times 10^5 / f$	$2,0 \times 10^4$
$50 \leq f < 1,64 \text{ kHz}$	$5,0 \times 10^5 / f$	$1,0 \times 10^6 / f$
$1,64 \leq f < 3 \text{ kHz}$	$5,0 \times 10^5 / f$	$6,1 \times 10^2$
$3 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	$1,7 \times 10^2$	$6,1 \times 10^2$

Tabelis (Tabel 2) välja toodud infost on näha, et madala rakendusväärtuse 50 Hz korral on elektrivälja madal rakendusväärtus 10 000 V/m ja kõrge rakendusväärtus 20 000 V/m.

Elektriväljatugevuse madalad rakendusväärtustega (Tabel 2) on silmas peetud väliseid elektrivälju, mille puhul ei ületa sisemine elektrivälja kokkupuute piirnorme ja töökeskkonnas on piiratud erinevad sädelahendused. Kõrgete rakendusväärtuste puhul on häirivad sädelahendused ja sisemise elektrivälja piirnorme ei ületata kui on kasutusele võetud kaitsemeetmed. [9]

Elektrivälja madalaid rakendusväärtusi võib ületada (Tabel 2), kui see on põhjendatud tööprotsessi tõttu ega ületata meelelist toimet avaldava kokkupuute piirnorme sisemise elektrivälja puhul. Kasutatakse kaitsemeetmeid sädelahenduse ja kontaktvoolu tekkimiseks (varjestus, maandamine, potentsiaalide ühtlustamine). Töötajaid peab sellisel juhul teavitama töökeskkonnas varitsevatest ohtudest. Kui tööd ei ole võimalik teisiti teha, siis võib ajutiselt ületada ka meelelist toimet avaldava kokkupuute piirnorme ja ei ületata kehasisese elektrivälja kokkupuute piirnorme. [2]

Magnetväljadega kokkupuute madalad rakendusväärtused on tuletatud meelelist toimet avaldava kokkupuute piirnormidest ning kehtivad sagedustele, mis on madalamad kui 400 Hz. Sagedusel, mis on kõrgemad kui 400 Hz, on rakendusväärtused tuletatud kehasisese elektrivälja puhul kehalist toimet avaldava kokkupuute piirnormidest. Seega on kõrged rakendusväärtused seotud pea ja kehatüve perifeersete ja autonoomsete närvikiudude elektrilise stimuleerimisega. Nende järgimisega tagatakse, et kehalist toimet avaldavaid kokkupuute piirnorme ei ületata. Samas, kui sagedustel alla 400 Hz ületab pea kokkupuute madalaid rakendusväärtusi, on siiski võimalikud mõjud, mis on seotud mõnede ajufunktsioonide lühiajaliste muudatustega ning häiretega silma võrkkestas. [14]

Kokkupuute rakendusväärtused jäsemete puhul on seotud kudede elektrilise stimuleerimisega ning on tuletatud kehalist toimet avaldava kokkupuute piirnordist kehasisese elektrivälja puhul. Arvesse on võetud asjaolu, et magnetvälja mõju jäsemetele on, võrreldes mõjuga kogu kehale, nõrgem. [14]

Tabelis (Tabel 3) esitatud magnetvoo tiheduse väärtused on magnetvoo tiheduste ruutkeskmised väärtused. Need on sinusoidsete väljade puhul võrdsed tippväärtustega, mis on jagatud ruutjuurega 2-est. [14]

Rakendusväärtused väljendavad magnetvoo tiheduse suurimat väärtust, mis on arvatud või mõõdetud töötaja asukohas. See on ruumiline tippväärtus magnetväljas asuva isiku kogu kehal. Seega tuleb hinnata kõiki asukohti, kus töötaja või tööülesannete täitmisel viibida. Sel moel hinnatakse magnetväljaga kokkupuutumise ohutust ning piirnordide jälgimist. [14]

Tabel 3. 1 Hz-10 MHz magnetvälja kokkupuute rakendusväärtused töökeskkonnas. [14]

<b>Sagedusvahemik</b>	<b>Magnetvoo tihedus Madalad rakendusväärtused, <math>\mu\text{T (RMS)}</math></b>	<b>Magnetvoo tihedus Kõrged rakendusväärtused, <math>\mu\text{T (RMS)}</math></b>	<b>Magnetvoo tihedus Jäsemete kokkupuute rakendusväärtused lokaalse magnetvälja puhul, <math>\mu\text{T (RMS)}</math></b>
$1 \leq f < 8 \text{ Hz}$	$2,0 \times 10^5/f^2$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$8 \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^4/f$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$25 \text{ Hz} \leq f < 300 \text{ Hz}$	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3,0 \times 10^5/f$	$3,1 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$3 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$

Madal rakendusväärtus sagedusel 50 Hz on  $1000 \mu\text{T}$ , kõrgväärtus  $6000 \mu\text{T}$ . Rakendusväärtus lokaalse magnetvälja puhul on  $18\,000 \mu\text{T}$ .

Magnetvälja puhul võib ületada madalaid rakendusväärtusi (Tabel 3) tingimusel, et ei ületada meelelist toimet avaldava kokkupuute piirnorme sisemise elektrivälja puhul. Magnetvälja madalad rakendusväärtused on seotud meelelist toimet avaldavate mõjudega, kõrged rakendusväärtused kehalist toimet avaldavate mõjudega. [1]

Elukeskkonna elektrivälja ja magnetvälja piirväärtused on välja toodud tabelis (Tabel 4).

Tabel 4. Elektri- ja magnetvälja piirväärtused elukeskkonnas, kus f on sagedus [3]

Sagedus	Elektrivälja tugevus, V/m	Magnetvootihedus, $\mu\text{T}$
0,025...0,8 kHz	250/f	5/f

Elukeskkonna piirväärtus 50 Hz juures on elektrivälja tugevus 5000 V/m ja magnetvootihedus 100  $\mu\text{T}$ .

Töö- ja elukeskkonnale on kehtestatud erinevad piirväärtused, mida ei tohi ületada. Järgnevas ülevaatlikus tabelis (Tabel 6) on välja toodud kui palju erinevad maksimaalsed elektri- ja magnetvälja lubatud väärtused omavahel elukeskkonna ja töökeskkonna puhul. Seda tuleb arvesse võtta tehes mõõtmisi erinevates keskkondades, kuna on kehtestatud väärtused on erinevad. Ajalist piirangut, kui kaua konkreetse väärtusega elektri- ja magnetväljas viibida tohib, ei ole antud, vastava info kinnitamiseks konsulteeriti ka Terviseameti kesklabori füüsikalabori töötajaga.

Võib lähtuda sellest, et kuna piirangud on antud elu- ja puhkealal, elamutes ning ühiskasutusega hoonetes, õpperuumides, siis võib elektriväljas suurusega 5000 V/m ja magnetvootiheduse 100  $\mu\text{T}$  viibida ööpäevringselt. Enne eespool kehtestatud määrust lähtuti 1990. a juhistes (IRPA 1990 Nr 15), mis kehtis 50/60 Hz sagedusel oleva magnetvälja puhul. Sealse info kohaselt lähtuti piirangutest, mis on toodud välja tabelis (Tabel 5) [5].

Tabel 5. Varasemalt kehtinud 50 Hz magnetvoo tiheduse lubatud piirväärtused ja seal lubatud viibimise aeg [5]

Magnetvälja mõju kestus inimestele	Maksimaalne lubatav magnetvoo tihedus
Töötajad: <ul style="list-style-type: none"> <li>kogu tööpäeva (8 tunni) jooksul</li> <li>lühiajaliselt.</li> </ul>	500 $\mu$ T 5000 $\mu$ T
Tavainimesed: <ul style="list-style-type: none"> <li>24 tundi järjest</li> <li>Mõni tund päevas</li> </ul>	100 $\mu$ T 1000 $\mu$ T

Eelneva info kokkuvõtteks on esitatud tabelis (Tabel 6) lubatud elektri- ja magnetvälja piirväärtused nii elu- kui töökeskkonnas. Tabelis oleva info alusel on hea võrrelda kui palju erinevad piirväärtused omavahel erinevad. Elu- ja puhkealal on elektrivälja tugevus töökeskkonnaga võrreldes kaks korda, magnetvootihedus lausa kümme korda väiksem. Töökeskkonnas on antud ka kõrgväärtused, mida elukeskkonnas ei ole. Töökeskkonnas on kehtestatud kõrgemad väärtused, kuna need on otseselt seotud sellega, millal elektri- või magnetvälja toime hakkab inimesele mõjuma. Selleks, et tagada ohutud ja inimese tervist mittekahjustavad keskkonnatingimused, on vaja nendest piirväärtustest kinni pidada.

Tabel 6. Elektri- ja magnetväljade piirväärtuste võrdlus 50 Hz korral

Keskkond	Elektrivälja tugevus, V/m	Magnetvootihedus, $\mu$ T
Elu- ja puhkeala	5000	100
Töökeskkond	10 000	1000
Kõrgväärtus	20 000	6000

## 2. PRAKTILISED MÕÕTMISED ALAJAAMADES

### 2.1. Elektromagnetväljade mõõtmine

Mõõtmismetoodika teoreetilise osa aluseks on võetud standard IEC 61786-2:2014. Selles on kirjeldatud, kuidas teha mõõtmisi 1 Hz...100 kHz elektri- ja magnetväljade puhul, lähtudes inimese kokkupuutest elektri- ja magnetväljadega. Käesolev standard katab magnetväljasid tugevusega 0,1  $\mu$ T kuni 200 mT vahelduvvoolu korral (1  $\mu$ T...10 T alalisvoolukorral) ja 1 V/m kuni 50 kV/m elektrivälja puhul. Standard sobib väljade mõõtmisel seadmete puhul, mis töötavad sagedusel 50 Hz ja 60 Hz ning tekitavad oma tööga kaasnevaid elektri- ja magnetväljasid. Standardis on välja toodud, et kasutada tuleks kolme telje mõõtmisüsteemi, et saada tervikpilt olukorrast. Mõõteseade peaks olema kalibreeritud, et oleks teada, milline on mõõdetava seadme mõõteviga, kas seade on töökorras ja tema mõõdetavat näitu võib tõeseks pidada. [4]

Enne mõõtmist peaks teadma, millised seadmed kõige kõrgemaid elektri- ja magnetvälju tekitavad. Tuleks ära määrata allikad, kus on kõige suuremad väljad, ja millisel koormusel need töötavad. Mõõtmise ajal tuleks ära määrata ka keskkonnatingimused, kus mõõtmine toimub (temperatuur, õhuniiskus), arvestada tuleks ka piirkondadega, kuhu inimene võib tööülesandeid täites sattuda. Mõõdetava objekti ja mõõtmisseadme vahel võiks olla vahekaugus 20 cm. [4]

Elektrivälja mõõtmisel tuleks eriti jälgida mõõteseadme läheduses olevaid objekte ja inimesi, kuna need võivad põhjustada märkimisväärseid häiringuid mõõtetulemuses (vt Joonis 5 ja Joonis 6). Mõõtja ja mõõteseadme vahel peaks olema minimaalselt kaks meetrit. Elektriväljad on väga kergesti mõjutatavad juhtivatest objektidest, isegi siis, kui need on halvad elektrijuhid (nt puud, aiad, hooned, taimkate). Kui mõõtmise korral ei ole võimalik lähedal olevaid objekte liigutada, siis võiks mõõtesondi ja objekti vaheline kaugus olla kolm korda suurem kui mõõdetav objekt või vähemalt 1 meeter. Objektid, mida ei ole võimalik liigutada, tuleks ära märkida. Elektrivälja mõõtmisel võib tekkida vigu kui õhuniiskus ületab 70%. [4]

Magnetväli on heade läbimisomadustega, seega selle mõõtmisel piiranguid standardis välja ei toodud. Magnetvälja puhul on oluline mõõtesondi ja mõõdetava objekti vaheline kaugus. Magnetväli sumbib väga kiiresti, seega mida lähemal allikale olla, seda suurem on mõõdetav väärtus. Seega magnetvälja mõõtmise puhul on asukoht, kus mõõtmine toimub, väga oluline.

Standardis (IEC 61786-2:2014) on välja toodud mõõtmiss kõrgus: 0,5 m...1 m...1,5 m ja kaugus objektist 0,3 m [4].

Enne mõõtmise alustamist tuleks kirjalikult fikseerida järgmist [4]:

- millisel objektil mõõtmine teostati;
- milliseid seadmeid mõõdeti ja kus need alajaamas asuvad;
- mõõteseadme mõõtmisvahemik, kõrgus ja kaugus mõõdetavast seadmest;
- ilmastikuolud mõõtmise ajal (õhuniiskus ja temperatuur) ning mõõtmise läbiviimise kellaeg.

Mõõtmistulemuste analüüsimisel tuleks jälgida madalaid ja kõrgeid rakendusväärtusi, mille järgi saab hinnata mõõdetud tulemusi. [4]

## **2.2. Elektromagnetvälja allikad alajaamades**

Alajaamades on üheks suurimaks elektromagnetväljade allikaks alajaama sisenevad ja väljuvad ülekande- ja jaotusliinid, mis on vastavalt alajaama tüübile näiteks 330 kV pingel või 110 kV pingel. Mida suurem pinge, seda suurem on ka elektrivälja ülekandeliini läheduses. Antud töös tehti mõõtmisi nimetatud pingestmetel olevates alajaamades. Kõige kõrgema elektrivälja saab kõrgepingeliinide all olles, mida ligemale ülekandeliinile minna seda kõrgem on ka elektrivälja. Magnetvälja on sõltuvuses ülekandeliini läbivast voolust. Ka alajaama kaablikanalites asuvad kaablid on olulised elektrivälja tekitajad. Kõrged elektriväljad koonduvad ka lahkülilitite, maanduslülitite ja võimsuslülitite juurde. Võimsuslülitid on elektriahelate lahutamiseks, normaaltalitusel on nende ülesanne koormusvoolude sisse- ja väljalülitamine ning avariolukorras riket põhjustava seadme või võrgu osa ülejäänud võrgust eraldamine. Lahküliliti on kaitselahutusvahemike loomiseks. Sellega saab elektri ahelat avada ja sulgeda peale võimsuslülitiga elektri ahela lahutamist, pingetus olukorras. Maanduslüliti on kasutuses koos võimsuslülitiga ja lahkülilitiga. Seda kasutatakse ohutuse tagamiseks ja vältimaks pingevalust olukorda, kui mingil põhjusel peaks lahküliliti olema ühendatud. Tänu maandusele saavad kaitsed rakenduda. [15] [16]

Lisaks eelnevalt välja toodud elektromagnetväljade allikatele on üheks seadmeks alajaamas, kus esineb tavapärasest suuremaid elektromagnetvälju, trafo. Samuti reaktor, kus enamasti on valdavalt tugevad magnetväljad.

Trafo on elektromagnetiline seadis, mida kasutatakse vahelduvvoolu pinge muutmiseks, sealjuures sagedust muutmata. Kuna tarbijad vajavad erineva nimiväärtusega allikapinget, siis on trafod ühed olulised komponendid elektriülekande ja jaotusseadmete juures. Suurema pingega on kuluefektiivsem teostada elektri ülekannet ja vool on selle juures väiksem sama ülekande võimsuse korral. Trafod koosnevad vähemalt kahest mähisest, mis asuvad terassüdamikul. Elektri allikaga

ühendatud mähist nimetatakse primaarmähiseks ja tarbijale energiat andvat mähist sekundaarmähiseks. Vahelduvvool tekitab primaarmähises trafo magnetahelas vahelduva magnetvoo. Osa tekkinud magnetvoost ei sulgu magnetahelasse ja tekib puistevoog, mis moodustub põhiliselt primaarmähise magnetväljast. Primaarmähise magnetvoog kutsub esile sekundaarmähises allikapinge. Primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvud on erinevad. Primaar- ja sekundaarmähise allikapinged on võrdelised mähiste keerdude arvuga. [5]

Reaktoreid kasutatakse elektroenergeetikas induktiivvoolu ehk induktiivse reaktiivvõimsuse tarbijatena. Reaktorite puhul eristatakse piki- ja põikreaktoreid (jada- ja rööplülituses). Põikreaktoreid nimetatakse ka šuntreaktoriteks. Pikireaktoreid kasutatakse lühisvoolude piiramiseks. Põikreaktoreid on otstarbekas kasutada elektrivõrkude koormussõlmedes pinge reguleerimiseks. Need võimaldavad kompenseerida kõrgepingeliinide liigset laadimisvõimsust, vähendavad väikese koormusega ülekandeliinide energiakadu ning aitavad tagada ratsionaalsed pingenihood ja vähendada ülekande energiakadu, mille tõttu väheneb ka kalli kommutatsiooni aparatuuri kasutusintensiivsus.

Parimad on juhitavad põikreaktorid, kuna nende induktiivtakistust on võimalik kiirelt ja sujuvalt, täpse suuruse ulatuses reguleerida. Neid kasutatakse ülikõrgepinge ülekandeliinide läbilaskevõimse suurendamisel, samuti pinge ja reaktiivvõimsuse reguleerimiseks.

Reaktorid jagunevad püsiparameetritega ja muutuvate parameetritega reaktoriteks. Püsiparameetritega reaktorid on kasutuses tugevvoolutehnikas. Seal kasutatakse õhk- ja ferromagnetsüdamikuga induktiivpoole, mis leiavad kasutust tavatöö ja avariitalitluse voolutõugete ning lühisvoolude piiramisel. Muutuvate parameetritega reaktorid on ferromagnetsüdamikuga juhitavad ka küllastusreaktorid. Reguleerimiseks kasutatakse vastuparalleellülituses olevaid türistore ja mähiste väljavõtete ümberlülitit. [5] [17]

### **2.3. Mõõtmiseks kasutatud seadmed ja mõõtmismeetod**

Elektri- ja magnetvälja mõõtmiseks kasutati seadet Maschek ESM-100. Seade on võimeline mõõtma samaaegselt nii elektri- kui magnetvälja sõltumata välja suunast. Mõõtetulemus kuvatakse seadme digitaalsel ekraanil kõikide väljade summaarse väärtusena kõikidel telgedel mõõdetud tulemustest lähtuvalt koos mõõdetava väärtuse ühikuga. Mõõdetav sagedusvahemik on 5 Hz...400 kHz. Mõõtepiirkond on 1 nT...20 mT magnetvälja puhul ja 0,1 V/m...100 kV/m elektrivälja puhul. Tootja lubab, et seadet on lihtne kasutada, mis aitab vältida mõõtmisvigu. [17] [18]. Seadmepild on valikuline

FFT funktsioon [17]. FFT (*Fast Fourier Transform*) on algoritm, mida kasutatakse signaalitöötles, ja mis arvutab diskreetse Fourier' teisenduse digiteeritud signaalide jaoks. Fourier' teisendus teisendab funktsiooni, mis on mõõdetud ajateljel, selle sagedusspektrit iseloomustavaks funktsiooniks [19].

Seadme omadused [17]:

- sagedusvahemik 5 Hz...400 kHz;
- mõõtepiirkond 1 nT...20 mT ja 0,1 V/m...100 kV/m;
- kuuekanaliline FFT ja ostilloskoobi funktsioon;
- mõõtetäpsus  $\pm 5\%$ ;
- standardiseeritud mõõtmine ICNIRP, direktiiv 2013/35/EU;
- lisatoiteta 24 h mõõtmise võimalus;
- nelja filtri valik;
- 1D mõõtmistugi;
- IP65;
- mällu salvestamise võimalus;
- töötemperatuur:  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- optilise kaabliga ühendamine arvutiga ja tarkvara liides.

Seadmega tuleb kaasa vastav tarkvara, millega on võimalik reaalajas jälgida ja salvestada graafikuid mõõtetulemustest. Arvutiga ühendub seade läbi pika optilise kaabli, mis tagab häiringuteta mõõtmistulemuse ja võimaluse seadmest eemalduda mõõtmise ajal. Selline võimalus on vajalik elektrivälja mõõtmisel, kuna igasugune inimfaktor mõõteseadme juures mõjutab mõõtmistulemust (Joonis 5). Tarkvara võimaldab ka näha iga kolmel teljel mõõdetud tulemust ja kõigi kolmel teljel mõõdetud tulemuste summat.

Mõõtmisel kasutatav seade oli Inspecta Estonia OÜ poolt kalibreeritud 08.04.2022. Kalibreerimisel kasutati QMW-1310, QMW-1366 meetodit. Kasutuses olid standardpunktid. Kalibreerimise kohta anti mõõtmistulemuste paber, mis kinnitas, et seade vastab tehase poolt kirja pandud mõõtetäpsusele.

Õhuniiskuse mõõtmiseks kasutasin Velleman DEM501 digitaalset termo-hüdroomeetrit. Seade mõõdab õhuniiskust mahtuvusliku sensoriga. Suhtelise niiskuse mõõtepiirkond 0%...100% ja temperatuuri mõõtepiirkond  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [18]

Niiskuse mõõtmistäpsus [18]:

- piirkonnas (40%...60%)  $\pm 2,0\%$  ( $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ );
- piirkonnas (20%...40%)  $\pm 3,0\%$  ( $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ );
- piirkonnas (60%...80%)  $\pm 3,0\%$  ( $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ );
- piirkonnas (0%...20%)  $\pm 4,0\%$  ( $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ );
- piirkonnas (80%...100%)  $\pm 4,0\%$  ( $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ );

Temperatuuri mõõtmistäpsus: piirkonnas ( $-20\text{ °C} \dots +70\text{ °C}$ )  $\pm 1,0\text{ °C}$ .

Seadme töötemperatuur  $-20\text{ °C} \dots +70\text{ °C}$ .

Lähtudes sellest, et alajaamades on pinge sagedus 50 Hz, siis valiti ESM-100 seadmelt nimetatud sageduseks sobiv mõõtepiirkond. Vastavalt mõõdetava väärtuse suurusele kuvas mõõteseadme tulemuse ekraanile koos mõõtühikuga. Vastavalt standardile fikseeriti mõõtmise kellaaeg, õhuniiskus ja temperatuur mõõdetavas keskkonnas. Selleks, et mõõta elektri- ja magnetvälju kindlaksmääratud kõrgusel, kasutati mõõteseadmega koos statiivi. Mõõtmise ajal viibiti mõõteseadmest eemal ning seade oli ühendatud arvutiga tootjapoolse valguskaabli abil. Seadme külge ühendatud valguskaabel andis võimaluse mõõteseadmest eemalduda, mis tagas mõõtetulemuse mittemõjutamise mõõtja poolt (Joonis 8). Mõõteseadme tarkvara andis võimaluse reaajas jälgida mõõtmistulemust ning väljatugevuse muutust. Mõõtmiskõrguseks valiti 1,5 m ja objektist kaugus oli valdavalt  $\sim 20\text{ cm}$ . Seade mõõtis aktiivselt reaajas elektri- ja magnetvälja ning kuvas mõõdetava tulemuse arvutis olevasse Graph ESM-100 tarkvarasse. Mõõtetulemus fikseeriti, kui oldi mõõteseadmest eemal ja mõõtja ei mõjutanud mõõtetulemust. Mõõdetavatest tulemustest fikseeriti suurim näit. Igas mõõtepunktis tehti üks mõõteseria. Seade kuvas mõõdetava aja vältel keskmiselt 20 mõõtetulemust, mis olid ühesugused. Mõõtmispunktid valiti vastavalt sellele, milline allikas on kõige suurema tõenäosusega suurima elektromagnetvälja tekitaja, ja millisesse piirkonda võib alajaamas viibiv inimene sattuda. Samuti teostati kontrollmõõtmine seadmega alajaama territooriumil, seadet käes hoides, et tuvastada kus kohas võib leiduda suuri elektromagnetväljasid. Suuremate allikate puhul tehti mõõtmisi mitmest punktist, arvestades ka ohutustnõudeid, mis kehtisid Elering AS alajaamades. Mõõtmistulemused on välja toodud lisades olevates tabelites (Lisa 1, Lisa 2, Lisa 3).



Joonis 8. Elektri- ja magnetväljade mõõtmine: 1– mõõteseade ESM-100, 2 – optiline kaabel, 3 – statiiv, 4 – arvuti mõõtmis tarkvaraga

## 2.4. Mõõtetulemused alajaamades

Mõõtmise läbiviimiseks valiti kolm Elering AS-ile kuuluvat alajaama: Harku, Tabasalu ja Rakvere. Alajaamad valiti vastavalt sellele, millele oli ligipääs. Lisaks oli oluline leida erineva pingestmel töötavad alajaamad, et teha mõõtmisi erinevates tingimustes. Harku alajaam, mõõtmiseks oli valikus 330 kV pingestmel töötav osa, osutus valituks selletõttu, et seal on suured koormused ja 330 kV pingest tingitud kõrgeid elektriväljad. Samuti on seal suure võimsusega trafo (200 MVA). See andis hea võimaluse viia läbi mõõtmisi trafo piirkonnas. Tabasalu alajaam osutus valituks selle tõttu, et pingeste on eelnevast erinev (110 kV) ning tegemist on väiksema alajaamaga. Rakvere alajaamas, teostati mõõtmisi 330 kV ja 110 kV alal. Sealne mõõtmine andis võimaluse võrrelda mõõdetud mõõtmistulemusi teiste eelnevalt nimetatud alajaamadega, kus olid samad pingestmed. Mõõtetulemuste võrdlemisel peab arvesse võtma asjaolu, et alajaamade koormused on erinevad. Ilmastikuolud olid kõigis kolmes alajaamas mõõtmise ajal sarnased, õhutemperatuur ja õhuniiskus fikseeriti eraldi iga mõõdetava objekti kohta.

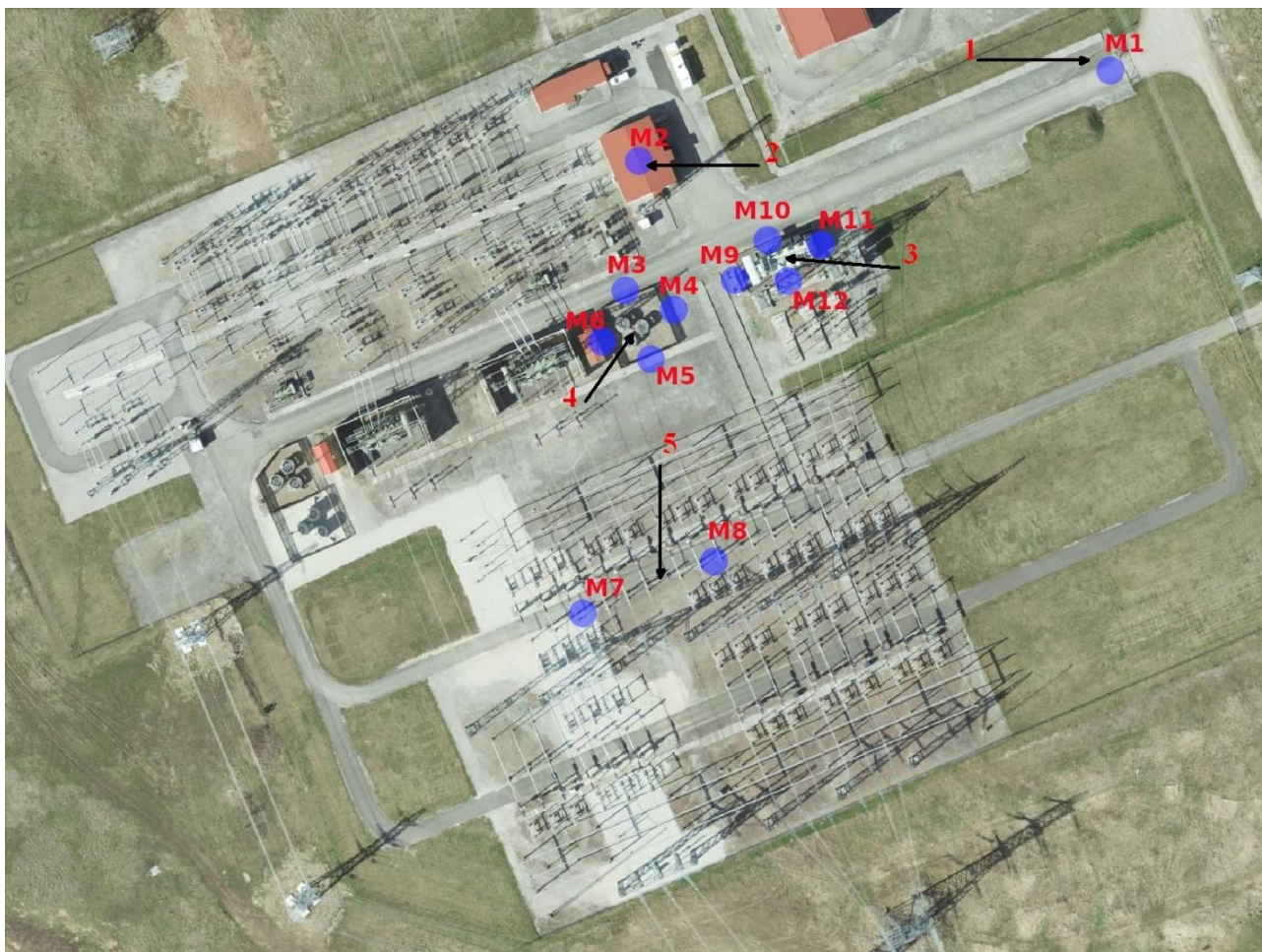
Mõõtepunktid valiti vastavalt juhendaja soovitudele. Lisaks lähtuti teoreetilistest teadmistest, kus võivad elektromagnetväljad kõige suuremad olla. Lähtuti ka sellest, millise seadme juures oli nähtavad ligipääsu piirangud (šuntreaktor) ja kus on inimesel kõige suurem oht nimetatud väljadesse sattuda. Samuti valiti mõõtepunkt alajaama sissepääsu juures selleks, et fikseerida olukord, milline on väljade tugevus alajaama territooriumile sisenedes. Mõõdeti ka elektromagnetväljade tugevust käigutee alal, kuna tavapäraselt loetakse seda ala ohutuks. Töö käigus mõõdeti üle ka hoonesisene elektri- ja magnetväljade tugevus, et välja uurida kui tugevad väljad on alajaamas olevas hoones. Mõõtepunktide valikul lähtuti ka ohutusest tulenevatest piirangutest. Kuna kõrgepinge lattide juures on suur läbilöögi oht (elektrilöögi oht), siis seadis see mõõtmisele piirangud. Analüüsides nende läheduses olevate väljade tugevust võib saada aimu, kui tugevad väljad seal piirkonnas olla võivad, arvestades teadmise, et elektromagnetväli suureneb allikale lähemale minnes kiiresti. Kõikide mõõtepunktide valikus pidi lähtuma ettevõtte seatud piirangutest ja nõuetest, et tagada ohutus mõõtmisel. Samuti seati ajaline piirang mõõtmiste läbiviimiseks.

Mõõtepunktide joonistel (Joonis 9, Joonis 11, Joonis 13) on välja toodud alajaamade aerofotod, mis on võetud Maa ameti lehelt [20]. Joonistele on märgitud objektid ja mõõtepunktid, kus mõõtmised tehti. Mõõtmistulemused on välja toodud graafiliselt tulpdiagrammi abil iga alajaama kohta eraldi (Joonis 10, Joonis 12, Joonis 14). Sinise värviga on märgitud elektriväli, rohelisega magnetväli. Esimesel vertikaal teljel on märgitud elektrivälja tugevus (V/m) ja teisel teljel magnetvootihedus ( $\mu\text{T}$ ). Horisontaal teljel on mõõtepunktid. Mõõtetulemused on esitatud Lisades (Lisa 1, Lisa 2, Lisa 3).

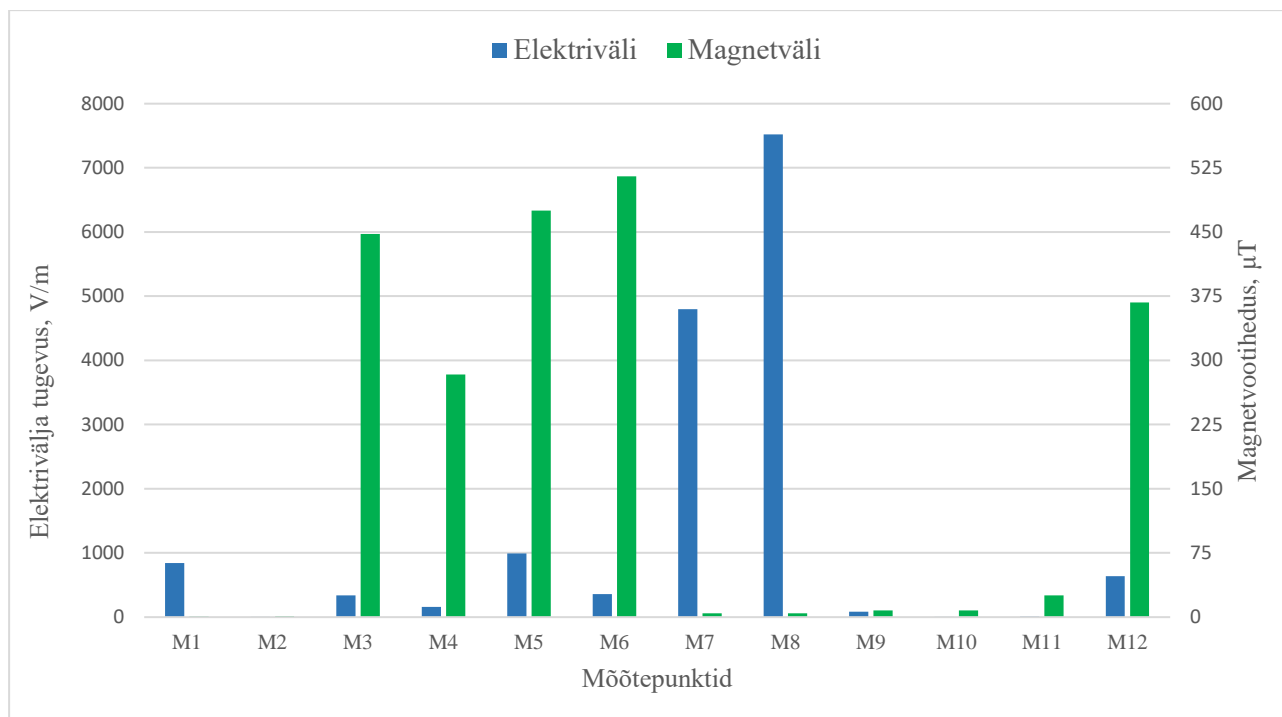
#### **2.4.1. Harku alajaam**

Mõõtmised tehti 13.04.2022 ajavahemikus 12.00-14.00. Mõõtmise hetkel oli õhutemperatuur väljas ( $12,1 \pm 1,0$ ) °C ja siseruumis ( $18,3 \pm 1,0$ ) °C. Mõõdetud õhuniiskus oli väliskeskkonnas 32,4% ja ruumisiseses keskkonnas 38,9%. Mõõtmisi tehti 12 mõõtepunktis, mis on välja toodud joonisel 9 (Joonis 9). Mõõtmiskõrgus oli 1,5 m ja objektist kaugus 0,2 m. Mõõtmistulemused on välja toodud lisa 1 (Lisa 1).

Mõõtetulemustest on näha (Joonis 10), et kõige tugevamad magnetväljad olid reaktori ümbruses ja kõige kõrgemad elektriväljad 330 kV sisse tulevate kõrgepinge õhuliinide all. Trafo juures (M12, Joonis 9) saadi mõõtmistulemuseks tugev magnetväli, mis oli tingitud maapealsest kaablist. Alajaama hoones mõõdetud elektromagnetvälja väärtused olid madalad (M2, Joonis 9). Alajaama sissepääsu värava juures (M1) mõõdetud elektrivälja suurus on tingitud üleval olevatest kõrgepinge õhuliinidest.



Joonis 9. Mõõtepunktid Harku alajaamas: 1– alajaama sissepääs, 2 – juhtimiskeskus, 3 – trafo, 4 – reaktor, 5 – lahklülitid



Joonis 10. Harku alajaama elektri- ja magnetvälja mõõtmistulemused

Lähtudes joonisel (Joonis 10) väljatoodud mõõtetulemustest ja töös esitatud rakendusväärtustest (Tabel 2, Tabel 3) võib järeldada, et rakenduslike väärtuste ületamist mõõtmisel ei tuvastatud.

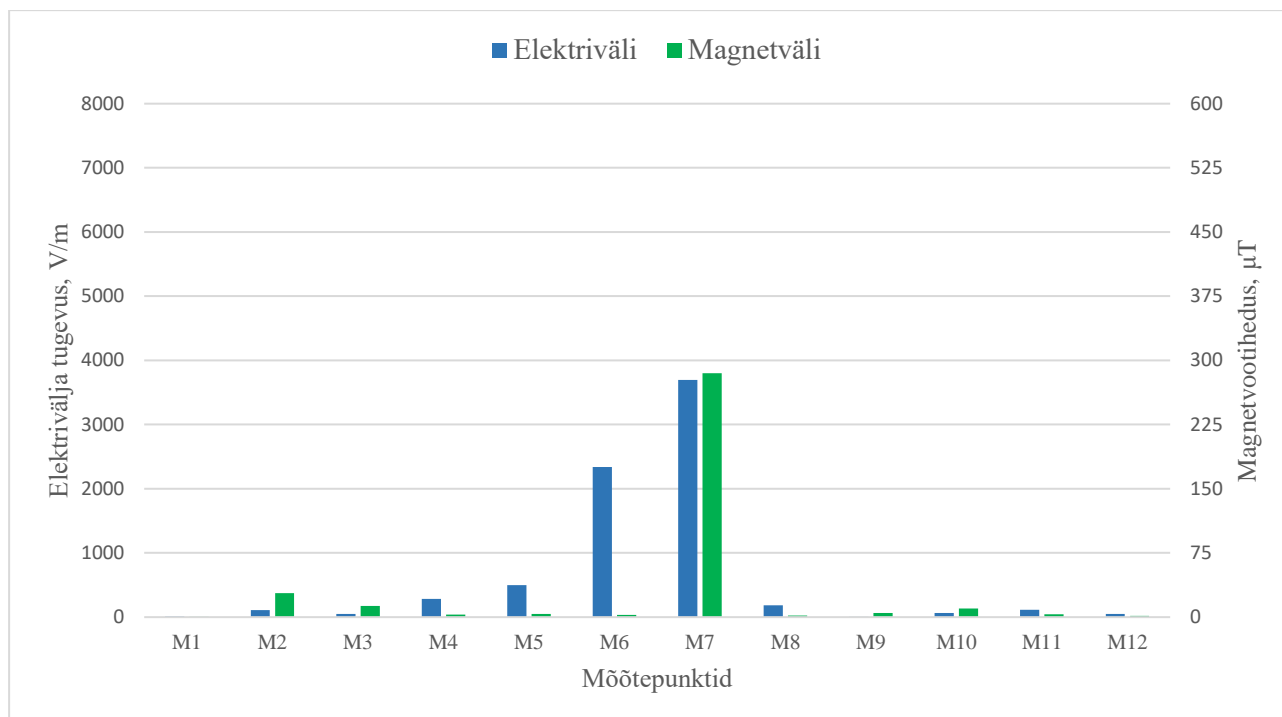
#### 2.4.2. Tabasalu alajaam

Mõõtmised tehti 13.04.2022 ajavahemikus 14.10-14.50. Mõõtmise hetkel oli õhutemperatuur väljas ( $10,1 \pm 1,0$ ) °C. Mõõdetud õhuniiskus oli 38.9%. Mõõtmisi teostati 12 mõõtepunktis, mis on välja toodud all oleval joonisel (Joonis 11). Mõõtmiskõrgus oli 1,5 m ja objektist kaugus 0,2 m. Mõõtmistulemused on välja toodud lisa 2 (Lisa 2).

Tabasalu alajaamas kõige kõrgemad elektrivälja väärtused mõõdeti punktis M6 ja M7 (Joonis 11, Joonis 12) võimsuslüliti juures redeli peal. Mõõtepunktis M7 oli ka võrdlemisi tugev magnetväli. Trafode mõõtepunktides olid valdavalt madalad elektri- ja magnetväljad, samuti alajaama sissepääsu värava ees.



Joonis 11. Mõõtepunktid Tabasalu alajaamas: 1 – alajaama sissepääs, 2 – trafo C2T, 3 – trafo C1T, 4 – 110 kV liini lahtrid



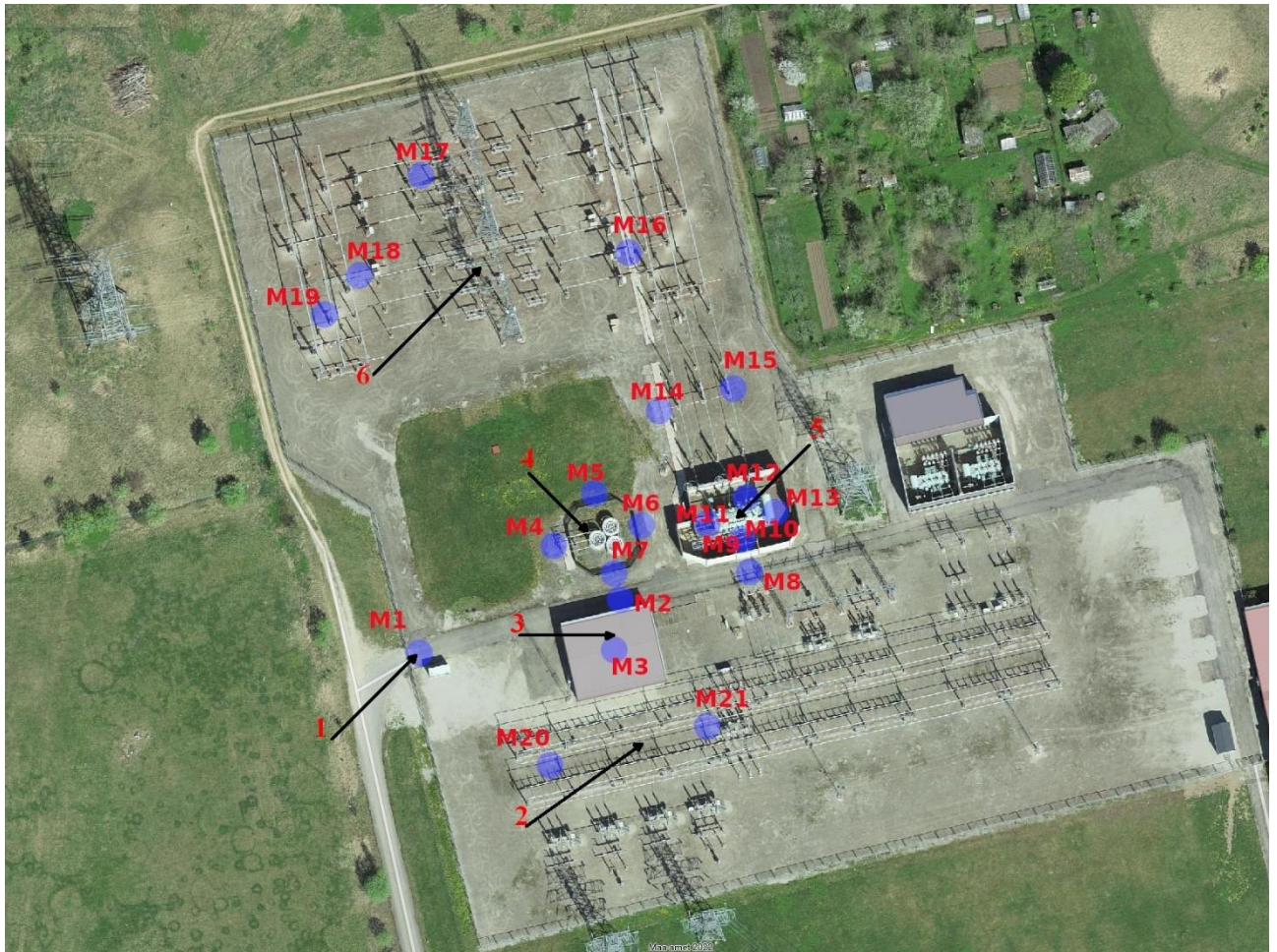
Joonis 12. Tabasalu alajaama elektri- ja magnetvälja mõõtmistulemused

Joonisel (Joonis 12) väljatoodud mõõtetulemustest võib järeldada, et alajaamas olevad elektromagnetväljad vastavad kehtestatud rakenduslikele väärtustele (Tabel 2 ja Tabel 3).

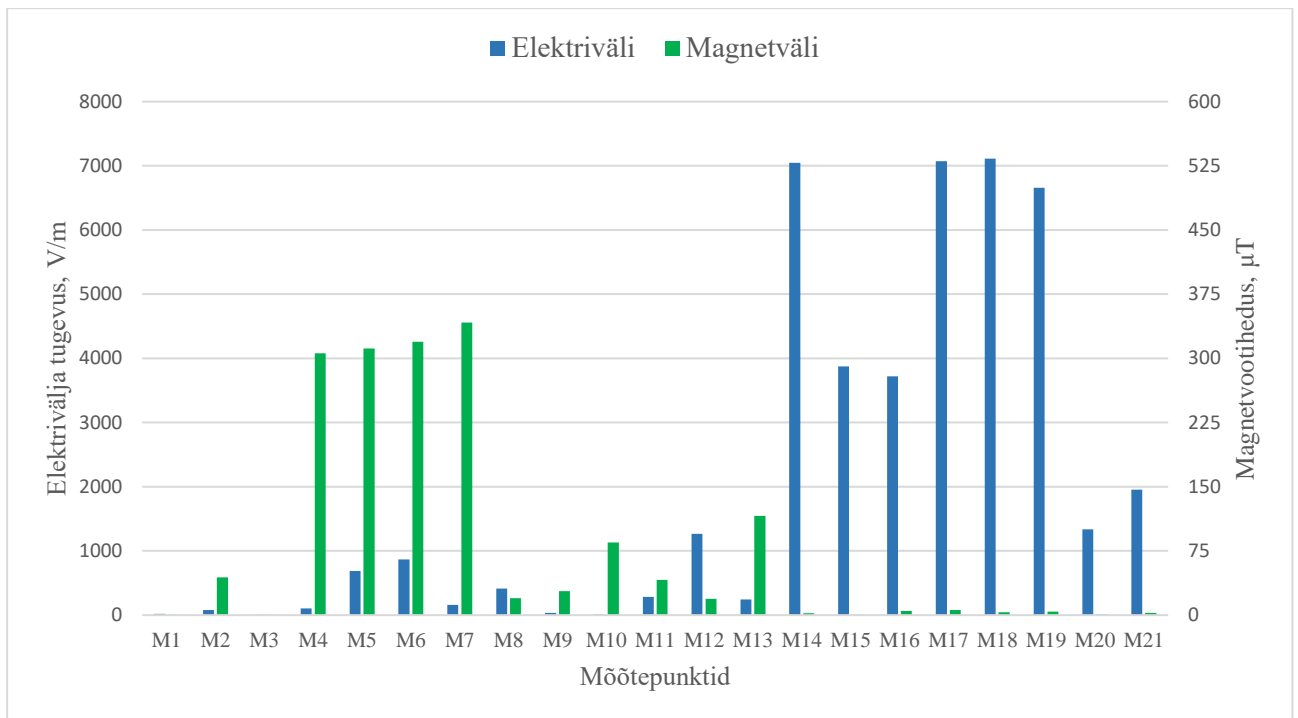
### 2.4.3. Rakvere alajaam

Mõõtmised tehti 19.04.2022 ajavahemikus 12.45-14.15. Mõõtmise hetkel oli õhutemperatuur väljas ( $12,8 \pm 1,0$ ) °C ja siseruumis ( $22,4 \pm 1,0$ ) °C. Mõõdetud õhuniiskus oli väliskeskkonnas 40,3% ja siseruumis 23,4%. Mõõtmisi tehti 21 mõõtepunktis, mis on välja toodud all oleval joonisel (Joonis 13). Mõõtmiskõrgus oli 1,5 m ja objektist kaugus 0,2 m. Mõõtmistulemused on välja toodud lisa 3 (Lisa 3).

Rakvere alajaama mõõtmistulemuste tulppiagrammist (Joonis 14) on näha, et kõige tugevamad magnetväljad esinesid reaktori ümbruses. 330 kV kõrgepinge liinide all olevates mõõtepunktides olid kõige kõrgemad elektriväljad. 110 kV alal (M20, M21, Joonis 13) olid võrreldes eelnevaga (330 kV mõõtepunktid) elektriväljad madalamad. Samuti olid elektri- ja magnetväljad võrdlemisi madalad trafo ümbruses. Sissekäigu juures (M1, Joonis 13) ja alajaama hoones (M3, Joonis 13) olevates mõõtepunktides olid elektri- ja magnetväljad madalad.



Joonis 13. Mõõtepunktid Rakvere alajaamas: 1 – alajaama sissepääs, 2 – 110 kV liini lahtrid, 3 – juhtimiskeskus, 4 – reaktor, 5 – trafo, 6 – 330 kV liini lahtrid



Joonis 14. Rakvere alajaama elektri- ja magnetvälja mõõtmistulemused

Joonis (Joonis 14) annab ülevaate kuidas erinevad 330 kV (M14-M19) ja 110 kV (M20 ja M21) alal teostatud mõõtetulemused. Mõõtmise käigus rakenduslike väärtuste ületamist ei tuvastatud ja töökeskkond on vastavuses kehtestatud elektromagnetväljade normidega (Tabel 2 ja Tabel 3).

### 3. ALAJAAMADE KIIRGUSOHUTUSE VASTAVUS NÕUETELE

#### 3.1. Mõõtetulemuste analüüs

Lähtudes joonistel (Joonis 10, Joonis 12, Joonis 14) esitatud elektri- ja magnetväljade mõõtmistulemustest, on selgelt näha, kuidas erinevad piirkonnad alajaamas omavad erineva tugevusega elektri- ja magnetväljasid. Kõrgema pingestmega alajaamas on kõrgemad elektriväljad kui madala pingega alajaamas (Joonis 10 ja Joonis 12). Harku alajaamas oli maksimaalne elektrivälja mõõtetulemus 7500 V/m ja Tabasalu 110 kV alajaamas 3700 V/m. Oluline on ka asukoht, kus mõõdetakse. Otse kõrgepingekaablite ja sisselülitatud lahkülitite juures on kõrged elektriväljad, kuna vahekaugus maapinna ja elektrivälja allika vahel on väiksem kui kõrgemal asuvate õhuliinide puhul. Sellest lähtuvalt näitasid tehtud mõõtmised ka kui tähtis on liini maagabariit (juhtme kaugus maapinnast). Mõõtetulemused näitasid, et kõrged elektrivälja mõõdetud suurused olid ka kaablikanalite peal ja selle läheduses (Joonis 13 mõõtepunktid M14 ja M16). Seega isik, kes alajaamas viibib, ei pruugi osatagi ohtu märgata, kuna kaablikanalid on kaetud ja otsest kõrgepingele omast häält nendest ei kosta. Mõõtmistulemustest saab järeldada, et kõige suuremad magnetvälja tugevused on reaktorite ümbruses. Kui reaktorist eemal mõõta (M2, M7, Joonis 13) siis magnetvälja tugevus väheneb kiiresti. Trafode ümbruses esinesid kõrged elektriväljad seal kus olid õhuliinid. Magnetväljasid valdavalt ei esinenud v.a Harku mõõtepunktis M12 (Joonis 9), kus mõõtmistulemust mõjutasid trafo juures olevad kaablid. Kaabli pealt lisamõõtmise tegemisel oli tulemuseks väga tugev magnetväli väärtusega 1450  $\mu$ T. Magnetväli ületas magnetvoo tiheduse madala rakendusväärtuse. Kuna magnetvälja tugevus langeb kaugusega seda tekitavast allikast kiiresti, siis mõõtepunktis M12 magnetvälja tugevus, mõõtetulemus 1,5 m kõrguselt, langes kiiresti väärtuseni 368  $\mu$ T. Mõõtmine tehti pidades silmas seda, kui keegi peaks kaabli peale astuma või seal vahetus läheduses viibima. Seega sellest võib järeldada, et tegemist on ohuallikaga, mida algselt ei pruugi osata märgata. Alajaama hoone sees, kus asub juhtimisautomaatika, kaitseautomaatika ja akud, olid elektri- ja magnetväljad väga madalad (Lisa 1, M2 ja Lisa 3, M3). Mõõdetud elektri- ja magnetväljade väärtused ei ületanud elu- ja puhkeala piirnorme, seega võib seal viibida pikemat aega.

Tabasalu 110 kV alajaamas mõõdetud tulemused olid väiksema väärtusega. Elektri- ja magnetvälja rakendusväärtuste ületamist ei esinenud. Mõõtmiste ajal olid mõlemad trafod (C1T ja C2T) töös. Võrreldes trafode elektriväljade mõõtmistulemusi on näha, et väärtused on erinevad. C1T elektrivälja on suuresti madalam kui C2T mõõdetud arv väärtus. Elektrivälja tugevuse erinevus võis olla tingitud kõrval olevate objektide kauguse erinevusest (lähedusefekt) mõõtepunktide suhtes, täpsema info

saamiseks oleks tarvis läbi viia täiendavaid mõõtmisi. Magnetvälja tugevus oli tingitud sellest, et trafod töötasid erineva koormusega. Mõõtmise ajavahemikul oli C1T trafo koormus 4 MW ja C2T koormus 9,7 MW. Andmed koormuse kohta pärinevad Elering ASi dispetšeritelt saadud infol. See kinnitab teoreetilist osa elektromagnetväljade tugevuse kohta.

Rakvere alajaama näitel on näha, et kõige kõrgemad elektriväljad asuvad kõrgepinge liinide all olevates mõõtepunktides (Joonis 13). Sama tulemus on ka Harku alajaama korral. Rakvere alajaama mõõtetulemuste tulpdiaagrammi (Joonis 14) põhjal on hästi näha, kuidas elektriväljad on kõrged 330 kV alal (M16...M19) ja madalad 110 kV osas (M20, M21). Põhilised magnetvälja allikad on, sarnaselt Harku alajaamale, reaktori ümbruses. Mõõtetulemused on sarnased. Elektrivälja tugevus on tühine, kuna lähedal ei asu ühtegi kõrgepinge allikat. Mõõdetud trafo ümbruses suuri väljasid ei esine. Trafo müratõkke sein ees mõõdetud käigu tee alal (M8) on hästi väikesed väljad, mis ei ole ohtlikud. Võttes arvesse M9 punkti mõõteväärtusi, on näha, et müratõkke sein mõõteväärtust ei mõjuta, kuna magnetvälja mõõdetav suurus ei muutunud ( $20 \mu\text{T}$  ja  $28 \mu\text{T}$ ) väga palju, mõõtetulemuse suurenemine on tingitud magnetvälja allikale lähemale minekust. Elektrivälja väärtuse muutus on arvatavasti tingitud asjaolust, et mõõtepunkt M8 on lähemal lahklülititele kui mõõtepunkt M9. Lisaks punkt M9 on lähemal trafole. Vastavalt teooriale ja seal välja toodud joonisele (Joonis 6) võib järeldada, et trafo olemasolu mõjutab elektrivälja ja selle tõttu on selle väärtus madalam.

Kõikide mõõdetud alajaamade sissepääsu käigulal ei tuvastanud tugevaid elektri- ja magnetväljasid. Suurimad väljad asusid neid tekitavate allikatele vahetus läheduses ja nende puhul piirnormide ületamist ei tuvastatud.

Mõõtmistulemuste infost võib järeldada, et 330 kV alajaamades valitsevad suuremad väljad ning 110 kV alajaamas on väljad nõrgemad. See kinnitab teadmist, et elektrivälja on sõltuvuses pingest ja magnetvälja suurus oleneb voolu suurusel.

## **3.2. Ohutusplaan**

Tulenevalt kehtivast määrusest peab tööandja läbi viima riskianalüüsi, mille käigus selgitatakse välja elektromagnetväljade allikad ning hindama sellest tulenevaid riske ja ohte töötajatele. Kaitse- ja ennetusmeetmete valimisel tuleks lähtuda riskihindamise tulemustest. Selleks, et tagada ohutu töökeskkond ja teavitada alajaamas viibivaid isikuid sealsetest elektromagnetväljade tekitatud ohtudest, on käesoleva töö eesmärk koostada visuaalne ohutusplaan elektromagnetväljade kohta alajaamades. Selle koostamiseks rakendatakse töös välja toodud mõõtmismetoodikat, elektri- ja magnetväljade madalaid ja kõrgeid rakendusväärtusi, mis on määrusega kehtestatud töökeskkonnale

[14]. Plaani koostamisel on arvesatud töös väljatoodud mõõtmiste tulemusel leitud ohtlikumad piirkonnad, kus elektri- ja magnetväljad on kõige suuremad.

Ohutusplaani koostamisel tuleks eraldi hinnata ohtu neile isikutele, kes on madalsageduslike väljade puhul suuremas riskigrupis. Samuti tuuakse välja piirkonnad, kus on oht rakendusväärtuste ületamiseks. Kui suure elektri- või magnetväljadega ala on juba eelnevalt piiratud ei ole sellisel juhul täiendavaid meetmeid vaja. Üks meetmetest, mida võimalusel rakendada, oleks töid teha siis, kui alajaam töötab väiksema koormusega. Selle järelduse saab teha jälgides alajaama koormusi teatud aja vältel, mille tulemusel on näha, millisel ajavahemikult on koormus kõige madalam.

Kui rakendusväärtusi ei ületata ja puuduvad olulised kaudselt mõjust tingitud riskid, ei ole töökeskkonnas vaja täiendavaid meetmeid rakendada. Vastasel juhul tuleks võtta kasutusele täiendavaid meetmeid, milleks võivad olla tehnilised lahendused. Need vähendavad riske otse riski põhjustava allika juures ning on tavapäraselt kindlamad kui korralduslikud meetmed, kuna ei sõltu inimese tegevusest. Selleks tuleks kasutada ligipääsu tõkestamist ja piiramist: varjestus, kaitsepiirded, kaitseblokeeringud.

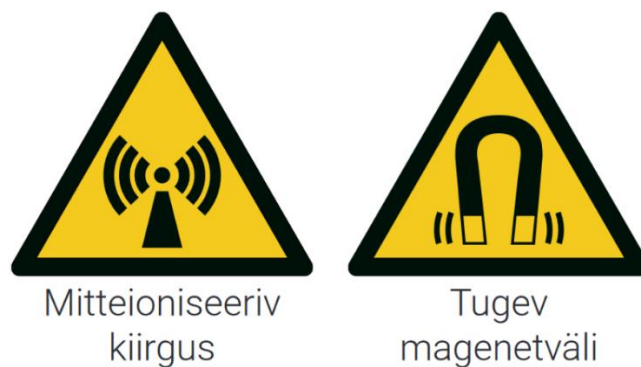
Varjestuse abil saab tõhusalt vähendada allika tekitatud elektromagnetvälju ning seda kasutatakse sageli juba seadme väljatöötamisel. Madalsageduslikel elektriväljade puhul saab kasutada Faraday puuri põhimõtet. Välja allikas paigutatakse juhtivasse kinnisesse ümbrisesse. Tavapäraselt valmistatud juhtivast materjalist (nt metallvõrk) või ka muid materjale (keraamika, plast, klaas, mis sisaldab metallvõrku või kaetud metallkihiga). Varjestuse tõhususe tagamiseks peab see olema katkematu. Vahe- või liitekohad peavad olema väiksemad kui elektromagnetvälja lainepikkus.

Raskem on varjestada magnetvälju, mida ei saa üldiselt varjestada, neid peab eemale juhtima. Selle tõttu saab kasutada aktiivvarjestust, mille puhul on kasutusel vastastiku magnetvälja tekitamiseks lisamähis. Tavaliselt on see solenoidi kujul. Väljade vastastikuse nõrgestamise tulemusena väheneb magnetvootihedus allikast kaugenedes kiiresti.

Kaitsepiirded on üks võimalus riske maandada, kuna on tõhusad ja soodsad lahendused, mis takistavad isiku ligipääsu või juhusliku sattumist ohuallika lähedale. Kaitsepiirete valimisel peaks arvestama nende koosmõju väljadega. Selle tõttu võib teatud tingimustes olla kasulik kasutada mittemetalseid materjale, näiteks puidust piirdeid tugeva staatilise magnetvälja puhul. Samuti tuleks metallsete piirete puhul arvestada võimalike sädelahendustega ning kontaktvoolu ja metallpiirdele sobiva maandusega. Kaitseblokeeringuga saab tõkestada tugevatele väljadele ligipääsu. Näiteks redelite puhul saab kasutada redelipiiret, mille eemaldamine ei ole ilma lahti lukustamiseta võimalik.

Suuremate elektromagnetväljade puhul peaks olema kasutusel ka ohumärgid ja -teavitused (Joonis 15 ja Joonis 16). See annaks visuaalselt informatsiooni isikutele, millised ohud neid alale sisenedes valitsevad. Kasutuses võiks olla hoiatus tugevate magnet- ja elektriväljade kohta. Eraldi võiks alajaama alale sissepääsu juures välja tuua ka märgistuse, mis hoiatab isikuid kellel on siiratud meditsiiniline seade (Joonis 16). Samuti ohumärgis neile, kellel on metallist implantaate (Joonis 16) [9].

Käesolevas töös on toodud näide, milline võiks ohutusplaan välja näha. See on tehtud Rakvere alajaama põhjal, arvestades töös välja toodud mõõtetulemuste analüüsi ja suurimate elektri- ja magnetväljade asukohti (Joonis 17). Kuna visuaalne pilt on universaalselt mõistav, siis on võetud ohutusplaani aluseks alajaama aerofoto. Ohutusplaanile on märgitud värvikoodiga, millised alad on ohtlikumad ja millised on ohutumad. Punasega on märgitud alad, mis on kõige suuremate mõõtmistulemustega. Kollased on kohad, kus peaks olema teadlik võimalikest ohtudest, ja rohelisega on märgitud alad, kus mõõtmistulemused suuri elektri- ja magnetväljade suurusi ei näidanud. Ohutusplaani koostamisel saab rakendada teoreetilisi aluseid ja välja tuua suurimad elektromagnetväljade allikad. Täpsema ohu määramiseks tuleks läbi viia, vastavalt töös välja toodud metoodikale, täiendavad mõõtmised, et hinnata ohu suurust.



Joonis 15. Hoiatusmärgid: mitteioniseeriv kiirgus ja tugev magnetväli [11]



Aktiivse siirdatud  
südameseadmega isikute  
sisenemine keelatud



Metallist implantaatidega  
isikute sisenemine keelatud

Joonis 16. Hoiatusmärgid: risk südameseadmega isikutele ja metallist implantaatide korral [11]



Joonis 17. Ohutusplaan Rakvere alajaama näitel. Punane – kõrgendatud ohuga ala; kollane – ohtlik ala; roheline – väheohtlik ala

## KOKKUVÕTE

Töös toodi välja madalsageduslike elektromagnetväljade otsesed ja kaudsed mõjud inimese tervisele ning selgitati, miks tuleb järgida rakenduslike madal- ja kõrgväärtusi, tagada määrustega vastavus ja eelkõige ohutus. Töös leiti üles kõige tugevamaid välju tekitavad seadmed alajaamas ja tehti mõõtmised selleks, et võrrelda nende poolt tekitatavate elektri- ja magnetväljade suuruste vastavust kehtivate määrustega. Mõõdeti ära elektri- ja magnetväljade tugevused ning fikseeriti kirjalikult tabelisse. Üheski mõõdetavas alajaamas ei leitud mõõtmismetoodikat kasutades rakendusväärtuste ületamist. Töös on näha, et madalama pingeastmega alajaamades on väiksemad elektri- ja magnetväljad ning oht inimese tervisele on väiksem madalsagedusliku mitteioniseeriva kiirguse osas.

Töös on välja toodud elu- ja puhkeala piirnormid selleks, et võrrelda neid töökeskkonnas kehtestatud piirnormidega ja millised on nende piirväärtused võrreldes keskkonnaga, kus inimene võib viibida 24 h. Mõõtmistulemused töökeskkonna piirnormide ületamist ei tuvastatud. Elu- ja puhkeala piirnormidega võrreldes on alajaamas mõõdetud väärtused ohuallikate juures suuremad kui piirväärtused ette näevad, kuid kuna alajaam ei ole ligipääsetav kõrvalistele isikutele ning sealsel territooriumil ei viibita pikemat aega, siis see ei ole vastuolus kehtivate määrustega. Tegemist ei ole elu- ega puhkealaga. Rakendusväärtuste ületamist võib ette tulla juhul, kui minnakse kõrgepingeliinidele lähemale või rikutakse ohutusreegleid ja satutakse aiaga piiratud reaktori juurde. Sel juhul tekib väga suur läbilöögi oht, sädelahendus. Nendes piirkondades mõõtmistulemused puuduvad, kuna käesolevas töös ei olnud selleks luba, ka ei olnud see töö eesmärk. Sellised kohad võiks olla vastavalt märgistatud, et tuua esile ohu allikas. Magnetväljade puhul on sellised alad piiratud aiaga, mis takistab isikute ligipääsu väga kõrgete magnetväljadega alale.

Käesolevast tööst võib järeldada, et elektromagnetväljaga seotud ohte peab arvestama alajaamades ning tegelema nende riskide vähendamisega ja seal töötavate inimeste teavitamisega. Tuleb järgida piirnorme, et tagada ohutu töökeskkond. Tuleb läbi viia kontrollmõõtmisi vastavalt väljatoodud metoodikale ja võrrelda neid kehtivate rakendusväärtustega, et alajaamas töid tegevatele isikutele oleks tagatud ohutu töökeskkond. Lisaks tuleb arvesse võtta, et elektri- ja magnetvälja tugevused on pidevas muutumises olenevalt alajaama koormusest ja ilmastikuoludest. Tuleb arvestada ka kui kaugel ollakse mitteioniseeriva kiirguse välja allikast, kuna see määrab ära mitteioniseeriva kiirguse tugevuse. Tehtud mõõtmistes on hästi näha, kuidas kaugusest sõltub väga palju väljatugevuse suurus. Elektri- ja magnetväljad ei ole eriti kauguleulatuvad, seega rakendades nõutud ohutusvahemike, on välja mõju minimaalne. Eriti oluline on tagada riskigrupi kuuluvate isikute ohutus ja teavitada neid ohu allikatest ja piirkondadest alajaamas, kus on kõige ohtlikum viibida. Kasutades töös välja toodud

metoodikat ja ohutusplaani, saab tulevikus teistes alajaamades läbi viia vajalikud mõõtmised ja töös oleva teooria alusel luua ohutusplaan. Kuna mõõtetulemused sõltuvad alajaama koormusest, tuleks tulevikus valida mõõtmiseks aeg, mil alajaama koormus on kõige suurem.

Riskide vähendamiseks ja alajaama territooriumil viibivate töötajate teadlikkuse tõstmiseks on soovitatav rakendada hoiatusmärke ja -teavitusi ning töös välja pakutud visuaalset ohutusplaani. Näiteks aia külge kinnitada silt „Mitteioniseeriv kiirus!“, „Meditsiinilise seadmega või metallimplantaadiga isikutele sisenemine keelatud“. Reaktori külge silt, lisaks kõrgepinge tähisele – „Tugev magnetväli!“. Samuti ära märgistada trafode juures maapinnal olevad kaablid vastava märgistusega kui mõõtmistulemuse tagajärjel leitakse kõrge elektromagnetväli ja alajaamas viibijatel on võimalik selle kaabli peale sattuda.

## SUMMARY

In the working environment we come to contact with electromagnetic fields that cannot be heard or seen. The effects of this field, its dangers and the health problems that are connected with it are often underestimated. The thesis “*Electromagnetic Fields in Electrical Substations – Measurement, Analysis, Compliance with Requirements*” discusses low frequency electromagnetic fields, the basis for limiting exposure and the dangers to people who work in electrical substations. It is important for the electricians working in substations to be aware of the health risks related to exposure to strong electric and magnetic fields and the most significant sources of these fields in substations. It is particularly important to those people who have a medical implant or who use an electronic medical device that is worn on the body. One possibility to raise the awareness of the workers is to prepare a safety data sheet for every substation where the areas with the highest danger are shown.

The aim of the thesis was to present a methodology that could be used to assess the dangers of electric and magnetic fields and to develop the principles for compiling a safety data sheet for substations based on the example of three substations of Elering AS. In the future it will be possible to compile guidelines for the workers where in the substation it is dangerous to be and where not, based on the measurements and analysis carried out in this thesis. Elering AS is a company in Estonia that operates the electricity and gas system. Its main mission is to guarantee high-quality energy supply to the Estonian consumers.

In the first part of the thesis a short overview is given of the nature and characteristics of electric and magnetic fields and the biological effects of extremely low frequency fields. The scientifically proven dangers of non-ionizing radiation at the frequency 50 Hz are discussed. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council and the Estonian regulations „Töötervishoiu ja tööohutuse nõuded elektromagnetväljadest mõjutatud töökeskkonnale, elektromagnetväljadega kokkupuute piirnormid ja rakendusväärtused ning elektromagnetväljade mõõtmise kord“ nr 44 (01.04.2016) and „Mitteioniseeriva kiirguse piirväärtused elu- ja puhkealal, elamutes ning ühiskasutusega hoonetes, õpperuumides ja mitteioniseeriva kiirguse tasemete mõõtmine“ nr 38 (21.02.2002) that are the basis of this work are introduced.

In the second part of the thesis the measurement methodology is described and the most significant sources of electromagnetic fields in substations are presented. The standard IEC 61786-2:2014 was studied to find the best methodology for measurement of electric and magnetic fields. In addition, the Health Board (The Laboratory of Physics) and Inspecta Estonia OÜ were consulted. An overview is

given of the devices Maschek ESM-100 and Velleman DEM501 that were used in the measurements. Then the results of the measurements that were carried out in three different substations are presented. The results show that the electric and magnetic field strengths are dependent of the distance from the field source and the load of the substation at the time of the measurement which is in accordance with theory. It is also shown that the electric and magnetic field strengths are lower in 110 kV substations than in 330 kV substations.

In the third part of the thesis the compliance of the working conditions to the regulations is analysed based on the measurement results. It is concluded that all the measured field strengths were in accordance with the regulations for the working environment. The field strengths exceeded the norms for living and recreational areas, but the substations are not accessible to unauthorised persons and the workers do not stay there for long periods of time. It is recommended to carry out control measurements in substations considering the weather conditions and the load of the substation. Additionally, recommendations for compiling a safety data sheet for substations are presented. Warning signs like “Nonionizing radiation!” and “Strong magnetic field!” and a visual safety data sheet should be displayed prominently in the substation and near the most important field sources.

## VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Euroopa Liidu Teataja, "Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv 2013/35/EL," 2013. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=celex%3A32013L0035>. [Accessed 01. mai, 2022].
- [2] "Töötervishoiu ja tööohutuse nõuded elektromagnetväljadest mõjutatud töökeskkonnale, elektromagnetväljadega kokkupuute piirnormid ja rakendusväärtused ning elektromagnetväljade mõõtmise kord," [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/107042016004?leiaKehtiv>. [Accessed 03. mai, 2022].
- [3] "Mitteioniseeriva kiirguse piirväärtused elu- ja puhkealal, elamutes ning ühiskasutusega hoonetes, õpperuumides ja mitteioniseeriva kiirguse tasemete mõõtmine," [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/163816>. [Accessed 03. mai, 2022].
- [4] *IEC 61786-2:2014 Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 2: Basic standard for measurements*, Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014.
- [5] J. Järvik, *Üldelektrotehnika*, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2014, p. 468.
- [6] E. Kirsman, "Füüsika põhivara," [Online]. Available: <https://opik.kirsman.ee/gymna/g3/elektri-ja-magnetvali/>. [Accessed 15. aprill, 2022].
- [7] Eesti Standardimis- ja akrediteerimiskeskus, *EVS-EN 61786-1:2014 Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings --Part 1: Requirements for measuring instruments*, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2014.
- [8] A. Ahlblom and M. Feychting, "Electromagnetic radiation," *British Medical Bulletin*, vol. 68, pp. 157-165, 2003.
- [9] Euroopa Komisjon, "Elektromagnetväljade direktiiv 2013/35/EL rakendamise hea tava mittesiduv juhend. 1. osa. Praktiline juhend," 2014. [Online]. Available:

<https://op.europa.eu/et/publication-detail/-/publication/c6440d35-8775-11e5-b8b7-01aa75ed71a1>. [Accessed 04. aprill, 2022].

- [10] S. Kottou, D. Nikolopoulos, E. Vogiannis, D. Koulougliotis, E. Petraki and P. H. Yannakopoulos, "How Safe is the Environmental Electromagnetic Radiation?," *Journal of Physical Chemistry & Biophysics*, vol. 4, no. 3, p. 146, 2014.
- [11] I. Avi, "Töötervishoid ja tööohutus elektromagnetväljadega kokkupuutel," 2017. [Online]. Available:  
[https://www.ti.ee/sites/default/files/TI\\_tootervishoid\\_ja\\_toohutus\\_elektromagnetvaljadega\\_kokkupuutel\\_est\\_web.pdf](https://www.ti.ee/sites/default/files/TI_tootervishoid_ja_toohutus_elektromagnetvaljadega_kokkupuutel_est_web.pdf). [Accessed 14. aprill, 2022].
- [12] Statnett, "High-Voltage installations Guide for work in electromagnetic fields," [Online]. Available: <https://www.statnett.no/contentassets/8af42257c6d9402fa073e20fe1de3ca8/Guide-for-work-in-electromagnetic-fields>. [Accessed 16. aprill, 2022].
- [13] ICNIRP, "International Commission on Non-Ionising Radiation Protection," [Online]. Available: <https://www.icnirp.org/en/frequencies/low-frequency/index.html>. [Accessed 16. aprill, 2022].
- [14] "Töötervishoiu ja tööohutuse nõuded elektromagnetväljadest mõjutatud töökeskkonnale, elektromagnetväljadega kokkupuute piirnormid ja rakendusväärtused ning elektromagnetväljade mõõtmise kord Lisa 2 mittesoojuslik mõju," [Online]. Available: [https://www.riigiteataja.ee/akti/1051/2201/8011/VV\\_44m\\_lisa2.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/akti/1051/2201/8011/VV_44m_lisa2.pdf#). [Accessed 2. aprill, 2022].
- [15] T. Kalmet, "Eesti ülekandevõrgu alajaamade SF6 võimsuslülitite seisundi hindamise metodoloogia arendamine ja analüüs," 2021. [Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/611f475c-9d6a-4f17-9646-4020d829d40b>. [Accessed 14. aprill, 2022].
- [16] R. Teemets, "TTÜ elektriajamid õppeinfo," [Online]. Available: <http://www.ene.ttu.ee/elektriajamid/oppeinfo/materjal/AAV3340/>. [Accessed 14. aprill, 2022].

- [17] Maschek, "ESM-100 H/E Fieldmeter," [Online]. Available: <https://www.maschek.de/en/products/esm-100-h-e-fieldmeter>. [Accessed 01. april, 2022].
- [18] Velleman, "Digital Temperature and Humidity Meter," [Online]. Available: <https://www.velleman.eu/products/view?id=421062>. [Accessed 16. april, 2022].
- [19] "Techopedia," 12 november 2020. [Online]. Available: <https://www.techopedia.com/definition/7292/fourier-transform>. [Accessed 05. mai, 2020].
- [20] Maa-amet, "geoportaal.maaamet," [Online]. Available: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>. [Accessed 20. april, 2022].

## **LISAD**

Lisa 1. Mõõtmistulemused Harku alajaamas

Lisa 2. Mõõtmistulemused Tabasalu alajaamas

Lisa 3. Mõõtmistulemused Rakvere alajaamas

## Lisa 1. Mõõtmistulemused Harku alajaamas

Mõõtepunkt nr	Asukoht	Elektrivälja tugevus, V/m	Magnetvälja tugevus, $\mu\text{T}$
M1	Alajaama väravaesine	841 $\pm$ 42	0,90 $\pm$ 0,05
M2	Hoone sees	1,80 $\pm$ 0,09	1,20 $\pm$ 0,06
M3	Reaktori põhjapoolne külg	338 $\pm$ 17	448 $\pm$ 22
M4	Reaktori idapoolne külg	160,6 $\pm$ 8,0	284 $\pm$ 14
M5	Reaktori lõunapoolne külg	994 $\pm$ 50	475 $\pm$ 24
M6	Reaktori läänepoolne külg	360 $\pm$ 18	515 $\pm$ 26
M7	Võimsuslülit	4800 $\pm$ 240	4,40 $\pm$ 0,22
M8	Liinialune käigutee	7520 $\pm$ 380	4,65 $\pm$ 0,23
M9	Trafo C2T läänepoolne külg	86,6 $\pm$ 4,3	8,0 $\pm$ 0,40
M10	Trafo C2T põhjapoolne külg	5,60 $\pm$ 0,30	8,0 $\pm$ 0,40
M11	Trafo C2T idapoolne külg	10,80 $\pm$ 0,50	25,3 $\pm$ 1,3
M12	Trafo C2T lõunapoolne külg	636 $\pm$ 32	368 $\pm$ 18

## Lisa 2. Mõõtmistulemused Tabasalu alajaamas

Mõõte-punkt nr	Asukoht	Elektrivälja tugevus, V/m	Magnetvälja tugevus, $\mu\text{T}$
M1	Alajaama väravaesine	11,8 $\pm$ 0,6	0,10 $\pm$ 0,01
M2	Trafo C2T põhjapoolne külg	109,9 $\pm$ 5,5	28,1 $\pm$ 1,4
M3	Trafo C2T idapoolne külg	47,6 $\pm$ 2,4	13,2 $\pm$ 0,7
M4	Trafo C2T lõunapoolne külg	284 $\pm$ 14	3,10 $\pm$ 0,16
M5	Trafo C2T lääne poolne külg	499 $\pm$ 25	3,60 $\pm$ 0,18
M6	Võimsuslüüti 1VL2	2337 $\pm$ 117	2,60 $\pm$ 0,13
M7	Võimsuslüüti 1VL5	3697 $\pm$ 184	285 $\pm$ 14
M8	Trafo C1T läänepoolne külg	182,6 $\pm$ 9,1	1,90 $\pm$ 0,10
M9	Trafo C1T põhjapoolne külg	6,40 $\pm$ 0,32	4,80 $\pm$ 0,24
M10	Trafo C1T idapoolne külg	65,3 $\pm$ 3,3	10,0 $\pm$ 0,5
M11	Trafo C1T lõunapoolne külg	116,1 $\pm$ 5,8	3,30 $\pm$ 0,17
M12	Alajaama käiguala	48,4 $\pm$ 2,4	1,40 $\pm$ 0,07

### Lisa 3. Mõõtmistulemused Rakvere alajaamas

Mõõte-punkt nr	Asukoht	Elektrivälja tugevus, V/m	Magnetvälja tugevus, $\mu\text{T}$
M1	Alajaama väravaesine	18,4 $\pm$ 0,9	0,10 $\pm$ 0,01
M2	Hoone ja reaktori vaheline ala	80,8 $\pm$ 4,0	44,1 $\pm$ 2,2
M3	Hoone sees	1,30 $\pm$ 0,07	0,10 $\pm$ 0,01
M4	Reaktori läänepoolne külg	105,6 $\pm$ 5,3	305 $\pm$ 15
M5	Reaktori põhjapoolne külg	690 $\pm$ 35	312 $\pm$ 16
M6	Reaktori idapoolne külg	866 $\pm$ 43	319 $\pm$ 16
M7	Reaktori lõunapoolne külg	159,1 $\pm$ 8,0	342 $\pm$ 17
M8	Trafo C2T ees olev käiguala	430 $\pm$ 21	19,9 $\pm$ 1,0
M9	Trafo C2T müratõkkeseina ääres	33,9 $\pm$ 1,7	28,0 $\pm$ 1,4
M10	Trafo C2T lõunapoolne külg	8,0 $\pm$ 0,4	85,0 $\pm$ 4,3
M11	Trafo C2T läänepoolne külg	286 $\pm$ 14	41,0 $\pm$ 2,1
M12	Trafo C2T põhjapoolne külg	1265 $\pm$ 63	19,0 $\pm$ 1,0
M13	Trafo C2T idapoolne külg	244 $\pm$ 12	116,0 $\pm$ 5,8
M14	Kaabli kanali pealne	7047 $\pm$ 352	2,40 $\pm$ 0,12
M15	Lahklüliti (3L1T L2)	3874 $\pm$ 194	0,20 $\pm$ 0,01
M16	Võimsuslüliti (3V16)	3719 $\pm$ 186	5,00 $\pm$ 0,30
M17	Lattide alune	7070 $\pm$ 354	6,00 $\pm$ 0,30
M18	Kaablikanali pealne	7111 $\pm$ 356	3,40 $\pm$ 0,17
M19	Maanduslüliti (M26)	6660 $\pm$ 333	4,00 $\pm$ 0,20
M20	110 kV kapi esine	1336 $\pm$ 67	0,90 $\pm$ 0,05
M21	110 kV lattide juures	1955 $\pm$ 98	2,60 $\pm$ 0,13