KAITSEVÄE AKADEEMIA

Strateegia ja innovatsiooni õppetool

**JAANUS KAKK**

8 õhuväe põhikursus

# KAITSEVÄES KASUTATAVATE TEISALDAVATE ELEKTRIGENERAATORITE MAANDUSTAKISTUS

LÕPUTÖÖ

Juhendaja

MSc Tanel Tärgla

Tartu 2019

**AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud uurimistöö iseseisvalt. Kõik uurimistöö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, seisukohad ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

Annan uurimistöö positiivsele hindele kaitsmise korral Kaitseväe Akadeemiale tasuta loa (lihtlitsents) enda koostatud uurimistöö reprodutseerimiseks, säilitamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks, sealhulgas digitaalarhiivi lisamiseks kuni autoriõiguse kehtivusaja lõppemiseni.

……..

/kuupäev, uurimistöö autori nimi ja allkiri/

Allkirjastatud digitaalselt 22.05.2019

Juhendaja nõusolek kaitsmisele lubamise kohta

……..

/kuupäev, juhendaja nimi ja allkiri/

Allkirjastatud digitaalselt 22.05.2019

## UURIMISTÖÖ LÜHITUTVUSTUS

Uurimistöö autor: Jaanus Kakk

Uurimistöö pealkiri: Kaitseväes kasutatavate teisaldatavate elektrigeneraatorite maandustakistus

Juhendaja(d): Tanel Tärgla

Uurimistöö tüüp: Lõputöö

Lehekülgede arv: 32

Kirjanduse ja allikate arv: 11

Tabelite arv: 0

Jooniste arv:17

Lisade arv:5

Uurimistöö kirjutamise keel: Eesti keel

Märksõnad: Maandustakistus, maandusvarras, maandur

Teema valiku põhjendus: Eesti kaitseväes on kõikidele kompaniidele ette nähtud generaator, et tagada maastikul üksusele elektri olemasolu. Hangetes ei olnud täpsustatud, milline peab olema generaatori maandusvarras. Siiani pole veel uuritud, kas need maandusvardad, mida kaitseväes kasutatakse, tagavad kasutajatele ohutuse.

Töö eesmärgiks on välja selgitada Eesti kaitseväes kasutatavate teisaldatavate elektrigeneraatorite maandurite maandustakistust ning hinnata nende ohutust kasutajale.

Annotatsioon: Töös mõõdeti Eesti kaitseväes kasutatavate teisaldavate generaatorite maandusvarraste maandustakistust maastikel. Teostati kaks eksperimenti, mille käigus mõõdeti kuue erineva maandusvarda maandustakistust, et teada saada, kas kasutuses olevad maandurid tagavad ohutuse. Samuti uuriti, kuivõrd paraneb maandustakistus, kui suurendada maandurite arvu või maanduri pikkust.

**SISUKORD**

AUTORIDEKLARATSIOON ..... 2

UURIMISTÖÖ LÜHITUTVUSTUS ..... 3

TABELID JA JOONISED ..... 5

SISSEJUHATUS ..... 6

1. TEOREETILINE OSA ..... 8

1.1. Takistus ..... 8

1.2. Maandur ..... 9

1.3. Rikkevoolukaitse ..... 10

1.4. Maandustakistuse mõõtmisseadmed ..... 11

2. EMPIIRILISED ANDMED ..... 13

2.1.Uurimismeetod ..... 13

2.2.Eksperimendi varustus ..... 13

2.2.1. Maandurid ..... 13

2.2.2. Mõõtmisseade ..... 16

2.3.Eksperimendi kirjeldus ..... 16

2.3.1. Esimene etapp ..... 16

2.3.2. Teine etapp ..... 17

2.4. Andmete analüüsimine ..... 19

2.4.1. Esimese etapi analüüs ..... 19

2.4.2. Teise etapi analüüs ..... 21

2.5. Järeldused ..... 27

KOKKUVÕTE ..... 29

VÕÕRKEELNE RESÜMEE ..... 31

KIRJANDUS JA ALLIKAD ..... 33

LISA ..... 35

**TABELID JA JOONISED**

**Joonis 1**. Valgumistakistus lk 8

**Joonis 2.** Varrastega maandus mõõtmisaparaadi kasutusjuhend lk 11

**Joonis 3**. Varrasteta maanduse mõõtmisaparaadi kasutusjuhend lk 12

**Joonis 4**. Maandusvarras nr 1 lk 13

**Joonis 5.** Maandusvarras nr 2 lk 14

**Joonis 6.** Maandusvarras nr 3 lk 14

**Joonis 7**. Maandusvarras nr 4 lk 14

**Joonis 8.** Maandusvarras 5 lk 15

**Joonis 9**. Maandusvarras 6 lk 15

**Joonis 10.** Autori joonis eksperimendi esimese etapi kirjeldamiseks lk 17

**Joonis 11.** Autori joonis teise eksperimendi esimese etapi kirjeldamiseks lk 18

**Joonis 12.** Autori joonis teise eksperimendi teise etapi kirjeldamiseks lk 19

**Joonis 13.** Kuue erineva maanduri maandustakistuse mõõtmistulemid lk 20

**Joonis 14.** Ääsmäe külas teostatud kuni kolme maandusvardaga mõõtmise tulemused lk 21

**Joonis 15.** Loigu talus teostatud kuni kolme maandusvardaga mõõtmistulemused lk 23

**Joonis 16.** Pällus/Tuulas teostatud kuni kolme maandusvardaga mõõtmistulemused lk 24

**Joonis 17.** Erineval sügavustel maandurite mõõtmis tulemused lk 25

## SISSEJUHATUS

Eesti kaitseväes on kõikidele kompaniidele ette nähtud generaator, et tagada maastikul üksusele elektri olemasolu. Teisaldatavad generaatorid, mida kaitseväes kasutatakse, erinevad üksteisest mõnevõrra, sest need on tellitud erinevatel aegadel ja erinevate hangete kaudu. Hanketingimustes ei olnud täpsustatud, milline peab olema generaatori maandusvarras. Seetõttu oli firmadel, kellelt generaatoreid telliti, võimalik lisada generaatoritele just need maandusvardad, mis olid maksumuselt nende jaoks kõige kasulikumad. Majandus- ja taristuministri poolt välja antud määruses on sätestatud, et tootja peab tagama kasutajale piisava ohutuse vältimaks kahjusid, mida võib põhjustada elektriseade. (Elektriseadmele esitatavad ohutuse nõuded ning elektriseadmele ja elektripaigaldisele esitatavad elektromagnetilisele ühilduvuse nõuded ja vastavushindamise kord 14.07.2015, jõustunud 18.07.2015. – RT I, 17.07.2015, 12 § 4.) Siiani pole veel uuritud, kas need maandusvardad, mida kaitseväes kasutatakse, tagavad piisavalt hea maanduse ehk kasutajatele ohutuse. On leitud, et maanduri takistus, mis tagaks ohutuse, peaks olema vähem kui 25 oomi (Sarosh P.; Hmurcik L. 2016: 1).

Eesti kaitseväes kasutatavad maandusvardad erinevad pikkuse ja tugevuse poolest, mistõttu võivad nad puruneda, kui kasutada neid Eesti maastikel. Kuna vardad on nii erinevad, ei saa olla kindel, et nende maandustakistus on piisavalt väike, et tagada kasutajale ohutus. Peamine ja kõige suurem on oht inimese elule – kui generaator ei ole korralikult maandatud, võib sellega kokku puutuv inimene saada surmava elektrilöögi. On leitud, et inimesele surmav elektrivool läbi südame on 100 mA ja pikaajaline 20 mA vool läbi rindkere peatab hingamise, mille tagajärjel võib surra (Virgil C. B. S. 1998: 15). Hea maandamise korral on tõenäosus saada surmav elektrilöök väiksem. Halb maandus võib põhjustada ka häireid generaatori töös. Elektrivool võib tekitada generaatoris ülepingeid, mistõttu lülitab generaator kas kaitsmed välja või põlevad seal mõned süsteemid läbi. Maandamine tagaks, et elektrivool ei läheks tagasi generaatorisse. Generaatorite ülepinge võib põhjustada probleeme elektritarbijates. Kui tarbijates tekib ülepinge, võivad nad kahjustuda või põlema süttida. On olnud juhtumeid, kus halva maanduse korral tekkis ülepinge ja kaitsmed ei aktiveerunud ning voolutarbija süttis põlema. (Sarosh P.; Hmurcik L. 2016: 2)

Uurimustöö eesmärgiks on välja selgitada Eesti kaitseväes kasutatavate teisaldatavate elektrigeneraatorite maandurite maandustakistus ning hinnata nende ohutust kasutajale.

Eesmärgi saavutamiseks on püstitatud järgnevad uurimisküsimused:

1. Milline on kasutusel olevate teisaldavate generaatorite maandustakistus varrastel sõltuvalt tingimustest?
2. Kuidas tagada maanduriga ohutus kasutajale?

Lõputöö koosneb kahest peatükist. Esimeses antakse lühiülevaate maandustakistusest ning kirjeldatakse, millest see sõltub. Selgitatakse, mis on maandur ja missugune kaitse on seotud maandusega. Teises peatükis kirjeldatakse maandureid. Samuti selgitatakse, kuidas eksperimente läbi viiakse ning tuuakse välja tulemused ja nende põhjal tehtud järeldused.

# 1. TEOREETILINE OSA

## 1.1.Takistus

Elektrijuhi takistust saab määrata potentsiaalide vahe ja voolu tugevuse kaudu valemiga:

$$R = \frac{U}{I}$$

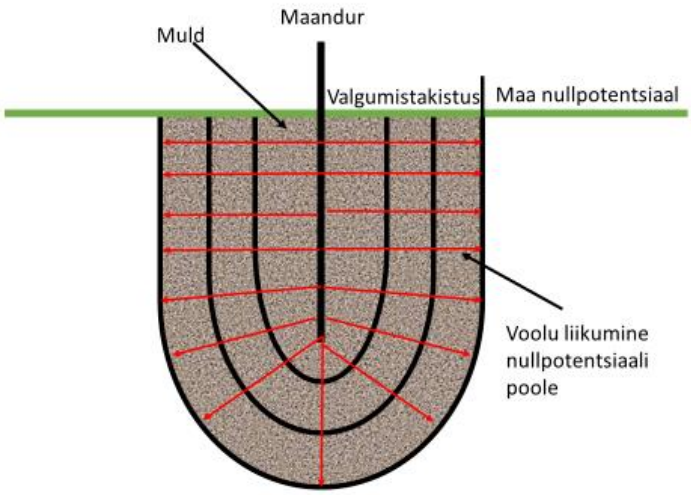
kus $R$ (Ω) – elektrijuhi takistus;

$U$ (V) – potentsiaalide vahe ehk pinge juhi otstel;

$I$ (A) – elektrijuhti läbiva voolu tugevus.

Seda valemit tuntakse kui Ohmi seadust. Takistusühik 1 oom saadakse, kui juhi otstele on rakendatud pinge 1 volt ja teda läbib samal ajal voolutugevus 1 amper. Eritakistus on füüsikaline suurus, mis iseloomustab kindlast materjalist elektrijuhi võimet takistada teda läbivat voolu. See sõltub aine keemilisest koostisest, aatomite paiknemise viisist ja temperatuurist. Näiteks toetemperatuuril (20°C) on raua eritakistus $9{,}68 \times 10^{-8}$ Ωm, vasel $1{,}69 \times 10^{-8}$ Ωm ja ränil $2{,}5 \times 10^{3}$ Ωm. Kui on teada aine eritakistus, saab selle abil arvutada välja kaabli takistuse. Vaja on teada ka kaabli pikkust ja juhtme ristlõike pindala. Takistuse vähendamiseks peavad olema juhtmed piisavalt jämedad. (Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. 2002. 668-700)

Maandustakistus on elektritakistus maanduspunkti ja maapinna vahel. See koosneb peamiselt takistusest maanduri ja maa nullpotentsiaali vahel ehk valgumistakistusest. Valgumistakistus sõltub peamiselt pinnase eritakistusest, maanduri mõõtmetest ja asetusest pinnases (joonis 1). (Oidram, R. 2005)




**Joonis 1**. Valgumistakistus. Autori poolt tehtud Maanduspaigaldiste ehitus PowerPoint põhjal. (Oidram, R. 22.10.2018)

## 1.2.Maandur

Maandur on maandamiseks maasse paigutatud elektrood. Maandureid liigitatakse püstseteks ehk varrasteks ning rõhtsateks ehk lattideks, võredeks või plaatideks. Püstse maanduselektroodi eelised tulenevad sellest, et sügavamate kihtide (üle 0,5–1 m), eritakistus on enamasti väiksem kui pealmistel kihtidel ja sobiva pinnase puhul (pehme ja vähe kive) on nende paigaldamine väga lihtne. Sügavamate kihtide eritakistus ei sõltu palju ka ilmastikust ega aastaajast, selle muutus jääb tavaliselt 5% piiridesse. Püstseid maandureid moodustatakse tavaliselt omavahel kinnituvatest 1–2 m pikkustest varrastest, lisades lülisid vastavalt vajadusele, kuni saavutatakse soovitud takistus. Kui pinnas on pehme (näiteks liiv, mustmuld, raba), võidakse kasutada 10 m puurotsaga varustatud varrast, mis keritakse maa sisse. Varraselektroodi valgumistakistuse homogeense pinnase korral saame leida arvutusvalemiga

$$R_v = \frac{\rho}{\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right)$$

kus $R_v$ (Ω) –valgumistakistus;

$\rho$ (Ωm) – pinnase eritakistus;

$l$ (m) – elektroodi tegevpikkus, elektroodi pikkus, mis asub selles pinnasekihis;

$d$ (m) –elektroodi läbimõõt.

Kuna pinnas ei ole enamasti homogeenne ja selle eritakistus võib ka ajas muutuda, sest sõltub väga palju niiskusest, võib valemi ja tegelikult mõõdetud väärtuse erinevus olla ligi 20%. (Risthein 2004: 36-39)

Valgumistakistuse vähendamiseks kasutatakse mitut omavahel ühendatud varraselektroodi. Kasutades ühesuguseid maandureid, on võimalik nende kogutakistust arvutada valemiga

$$R_{v.res} = \frac{R_v}{\eta n}$$

kus $R_{v.res}$ (Ω) – resulteeruv valgumistakistus;

$R_v$ (Ω) – ühe elektroodi valgumistakistus;

$\eta$ – elektroodide kasutegur, mis sõltub nende arvust paigutusest vahekaugusest ja pinnase eritakistusest;

$n$ – elektroodide arv. (Risthein 2004: 40)

Rõhtsaid maanduselektroode kasutatakse tavaliselt ehituses ja ka siis, kui pinnase sügavamate kihtide eritakistus on palju suurem kui pealmistel kihtidel. Lisaks siis, kui

sügavamad pinnasekihid on liiga kivised, et maandusvarraste paigaldamine sinna oleks liiga kulukas või raske. Kujult on rõhtmaandurid ühe- või mitmekiirelised, suletud kontuurid või võrgutaolised. Ühe- või mitmekiireliste maanduselektroodide ühest punktist tuleb maanduskaabel maa sisse ja sealt lähtuvalt on maandur välja veetud maa sees. Mitmekiirelisel tuleb arvestada ka kiirte omavahelist nurka, et nad üksteise voolu valgumist maasse segama ei hakkaks. Kiired väljuvad ühest punktist ning nende omavaheline nurk ei tohiks olla väiksem kui 60°. Suletud kontuuriga rõhtmaanduril on algus- ja lõppots omavahel koos. Sellist maandurit kasutatakse tihti hoonete ehituses, kus maandur on paigutatud ehitise ümber vundamendi sisse. Võrkmaandur on kasutusel tihti suure pindalaga välispaigaldistes, võrgu augu suurus ei tohiks olla suurem kui 20 m. Sellega tasandatakse kogu maapinna potentsiaali. Ilmastikumõjude vähendamiseks tuleks rõhtmaandurid paigutada sügavamale kui 0,5 meetrit. (Risthein 2004: 29-35 )

Ühe elektroodi valgumistakistust on võimalik ligikaudu välja arvutada. Siin arvestatakse, et pinnas on homogeenne ja leitakse kogu maanduri takistus. Selle välja arvutamiseks kasutatakse sama valemit, mida kasutati püstse maanduri korral. Ainuke erinevus tuleb siis kui kasutatakse ribaelektroodi, mille puhul läbimõõdu asemel kasutatakse ribaelektroodi poolt laiust meetrites. Kuna pinnas ei ole tavaliselt homogeenne ja selle eritakistus võib kõikuda aasta jooksul 30% ulatuses, erinevad mõõtmistulemused tegelikul maastikul tavaliselt üle 20% arvutustest. (Risthein 2004: 29-35 )

### 1.3.Rikkevoolukaitse

Ka isolatsioonmaterjal juhib vähesel määral elektrit. Seetõttu tekib juhtide pingestamisel vool peale faasi- ja neutraaljuhi ka juhtide ja maa vahelises isolatsioonis. Seda nimetatakse lekkevooluks. Väike lekkevool on tavapärane, kuid kui see muutub ohtlikuks inimestele ja seadmetele, nimetatakse seda rikkevooluks. Rikkevool võib tekkida kereühendusel elektriseadmega või maaühendusel toiteliiniga. Rikkevoolu kaitselüliti on mõeldud inimeste, esemete ja hoonete kaitseks kokkupuute eest ohtliku pingega. Lüliti reageerib rikkevoolule maa suhtes. Kaitse toimimiseks peavad olema seadmed korralikult maandatud. See tähendab, et maandustakistus peab olema väiksem kui puutepinge ja rikkevoolukaitse rakendumisvoolu milliamprite suhe. (Teemets, R. 2004: 10-16; 38)

$$R_A \leq \frac{U_p}{I_{\Delta n}}$$

kus $R_A$ (Ω) – pingealdis juhtivate osade, kaitsejuhi ja maanduselektroodi summaarne takistus;

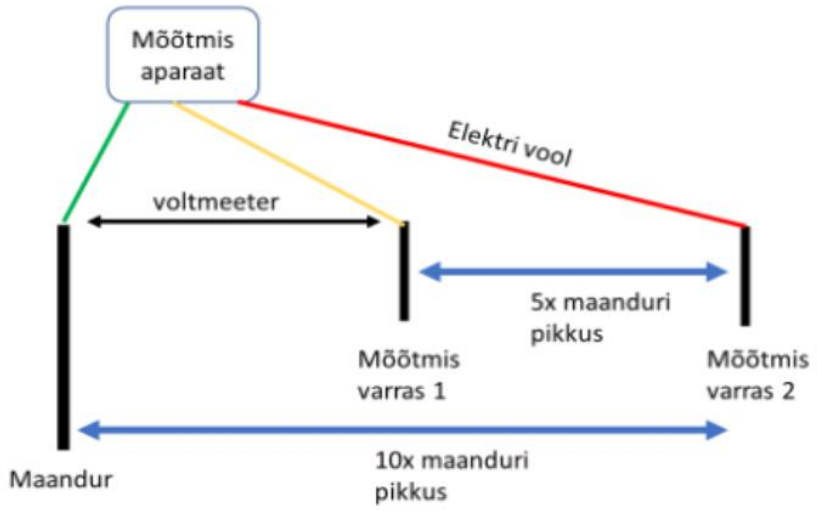
$U_p$ (V) – suurim lubatav puutepinge;

$I_{\Delta n}$ (A) – rikkevoolukaitselüliti nimirakendumisvool.

Kui on olemas rikkevoolukaitse, mille rakendumisvool on 30 mA ja rakendumisaeg on alla 30 ms, siis on inimene suure tõenäosusega rikkevoolu eest kaitstud. Rikkevoolukaitse töötab põhimõttel, et see võrdleb faasi ja voolu mõõtes nende magnetväljasid toroid-magnetahelas. Normaaltöös on need võrdsed, aga kui tekib rikkevool, siis üks või teine pool on võimsam. Mõõtemähises, mis on ühendatud magnetvälja külge, tekib rikkevooluga võrdeline vool ja relee lahutab kaitselüliti kontaktid. Rikkevoolukaitse ei reageeri lühisele ega liigkoormusele. Neid kaitsmeid kasutatakse Eesti kaitseväe käsutuses olevatel generaatorite küljes, mistõttu peab ohutuse tagamiseks veenduma, et generaatorid oleksid hästi maandatud. (Teemets, R 2010)

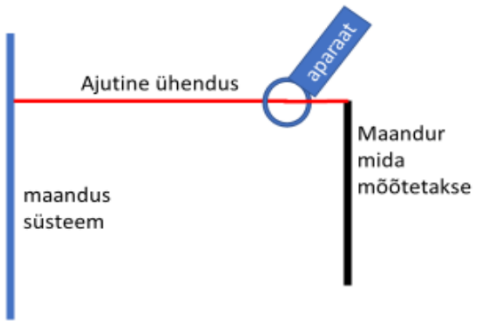
### 1.4.Maandustakistuse mõõtmisseadmed

Kasutatakse varrastega ja varrasteta mõõtmisseadet. Varrastega mõõtmisseadmest väljub kolm juhet, millest üks kinnitub maanduri külge ja teised kaks mõõtmisvarraste külge. Viimased on veetud ühel joonel seadmest välja, ühendatud seadmega kaasas olevatele varrastele ning pandud maa sisse. Kaugema mõõtmisvarda kaugus peab olema vähemalt 10 kordne maanduri pikkus. Mõõtmisel saadetakse pidev vool läbi kaugema juhtme ja leitakse potentsiaalide erinevus maanduri keskmise varda vahel (joonis2).




**Joonis 2.** Varrastega mõõtmisseadme kasutusjuhend. Autori joonis Kewtech KEW4105A kasutusjuhendi põhjal. (Kewtech KEW4105A instruction manual, 22.10.2018)

Varrasteta mõõtmisseadet saab kasutada siis, kui maandur, mida mõõdetakse on ühendatud endast madalama maandustakistusega maandussüsteemi. Sellepärast kasutakse seda tüüpi seadet maandussüsteemide sees olevate maandurite mõõtmiseks. Seda saab kasutada ka uute maandurite mõõtmiseks, aga siis peab olema tagatud ühenduvus madala maandustakistuse süsteemi külge (Joonis 9).




**Joonis 3**. Varrasteta mõõtmisseadme kasutusjuhend. Töö autori joonis põhineb Megger praktilisel kasutusjuhendil. (Getting down to earth 22.10.2018)

# 2. EMPIIRILISED ANDMED

## 2.1.Uurimismeetod

Uurimismeetodiks on välieksperiment. Maandustakistuse mõõtmiseks valitakse sobilik maastik, mille erinevates kohtades mõõdetakse mõõtmisseadmega maandustakistust. Mõõtmisseadme poolt fikseeritud tulemused kirjutatakse paberil olevasse tabelisse. Andmeid töödeldakse edasi programmi Microsoft Excel abil. Toetudes väliekspeimendilt saadud andmetele, leitakse vastused uurimisküsimustele.

## 2.2.Eksperimendi varustus

### 2.2.1. Maandurid

Eksperimendi läbiviimiseks kasutatakse maandusvardaid, sest need on maandurid, mis on Eesti kaitseväes kasutusel. Maandusvarras nr 1 (MV 1): pikkus 80 cm ja diameeter 1,7 cm, maanduskaabli pikkus 5 m, valmistatud roostevabast terasest. Maandur on 2018. aastast Eesti kaitseväes kasutuses olev teisaldavate generaatorite maandusvarras. Ühtlasi vahetab see välja vanemad maandurid. (Joonis 2.)

**Joonis 4.** Maandusvarras nr 1. Töö autori koostatud joonis, 22.10.2018.

Maandusvarras nr 2 (MV 2): pikkus 67 cm ja diameeter 1,7 cm, maanduskaabli pikkus 5 m, valmistatud roostevabast terasest. Maandur on 2018. aastast Eesti kaitseväes kasutuses olev teisaldavate generaatorite maandusvarras. See vahetab välja vanemad maandurid. (Joonis 3.)

**Joonis 5.** Maandusvarras nr 2. Töö autori koostatud joonis, 22.10.2018.

Maandusvarras nr 3 (MV 3): pikkus 52 cm ja diameeter 1,4 cm, maanduskaabel on tavaline elektrijuhe, mille pikkus varieerub 2–4 m. (Joonis 4.)

**Joonis 6.** Maandusvarras nr 3. Töö autori koostatud joonis, 22.10.2018.

Maandusvarras nr 4 (MV 4): pikkus 150 cm ja diameeter 3 cm, maanduskaabel on tavaline elektrijuhe, mille pikkus varieerub 2–4 m. Maandur on keeratava süsteemiga – ühest otsast kruvi ja teises otsas kang, mille abil keeratakse maandur maasse. Varras on seest tühi ja piki varrast on külgedele tehtud augud.(Joonis 5.)

**Joonis 5**. Maandusvarras nr 4. Töö autori koostatud joonis, 22.10.2018.

Maandusvarras nr 5 (MV 5): pikkus 80 cm, diameeter 3 cm. Maanduskaabel on tavaline elektrijuhe, mille pikkus varieerub 2–4 m. Maandur on keeratava süsteemiga – ühest otsast kruvi ja teises otsas kang, mille abil keeratakse maandur maasse. Varras on seest tühi ja piki varrast on külgedele tehtud augud. (Joonis 6.)

**Joonis 7.** Maandusvarras 5. Töö autori koostatud joonis, 22.10.2018.

Maandusvarras 6 (MV6): pikkus 100 cm, diameeter 1 cm ja laieneb ülemises otsas 7 cm. Maanduskaabel on tavaline elektrijuhe, mille pikkus varieerub 2–4 m. Maandur on keeratava süsteemiga – ühest otsast kruvi ja teises otsas kang, mille abil keeratakse maandur maasse. Varras on seest tühi ja piki varrast on külgedele tehtud augud. Maandur on Eesti kaitseväe varustusest väljas. (Joonis 7.)

**Joonis 8**. Maandusvarras 6. Töö autori koostatud joonis, 22.10.2018.

### 2.2.2. Mõõtmisseade

Töös kasutatakse varrastega mõõtmisseadet Kewtech KEW4105A Digital Earth Resistance Tester, sest mõõtmiskohtades, metsades ja lagendikel puudub maandussüsteem.

Kewtech KEW4105A Digital Earth Resistance Tester mõõtmis täpsus. Temperatuuril 18-28°C ja õhuniiskuse kuni 75% korral on maandustakistuse mõõtmisel vahemikus 0-100 Ω mõõtmistäpsus 2% ning mõõtmisel vahemikus 100-1999 Ω on mõõtmistäpsus 5% (Kewtech KEW4105A instruction manual, 22.10.2018)

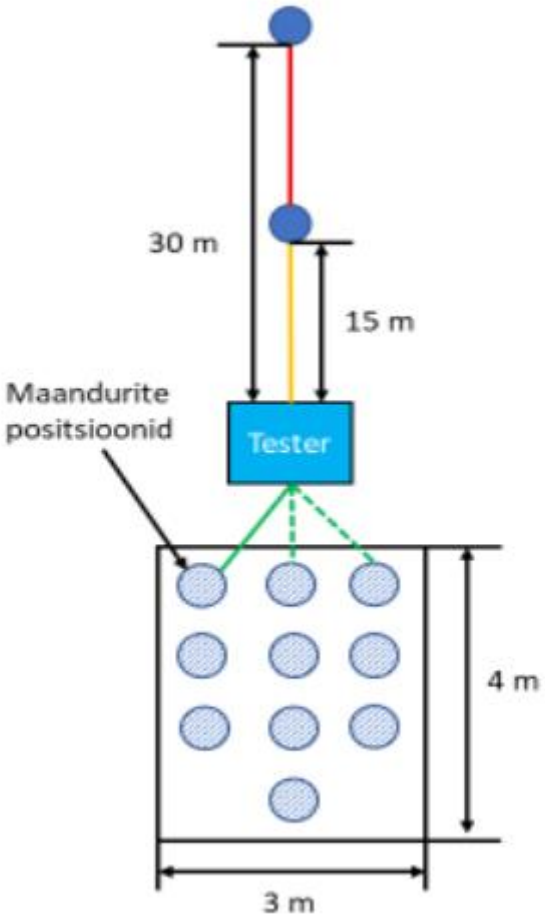
## 2.3.Eksperimendi kirjeldus

Eksperiment on jaotatud kahte etappi:

1. Eksperimendi esimene etapp Harjumaal, Ääsmäe külas, 59°14´48.7″N 24°29´54.3″E
2. Eksperimendi teine etapp Harjumaal neljas erinevas paigas:
   2.1. Harjumaal, Ääsmäe külas, 59°14′48.7″N 24°29′54.3″E
   2.2. Harju maakond, Saue vald, Loigu talu, 59°12′55.7″N 24°34′04.0″E
   2.3. Harju maakond, Pällu/Tuula, 59°14′59″N 24°27′18,5″E
   2.4. Harju maakond, Männiku 59°19′31.4″N 24°41′24.1″E

### 2.3.1. Esimene etapp

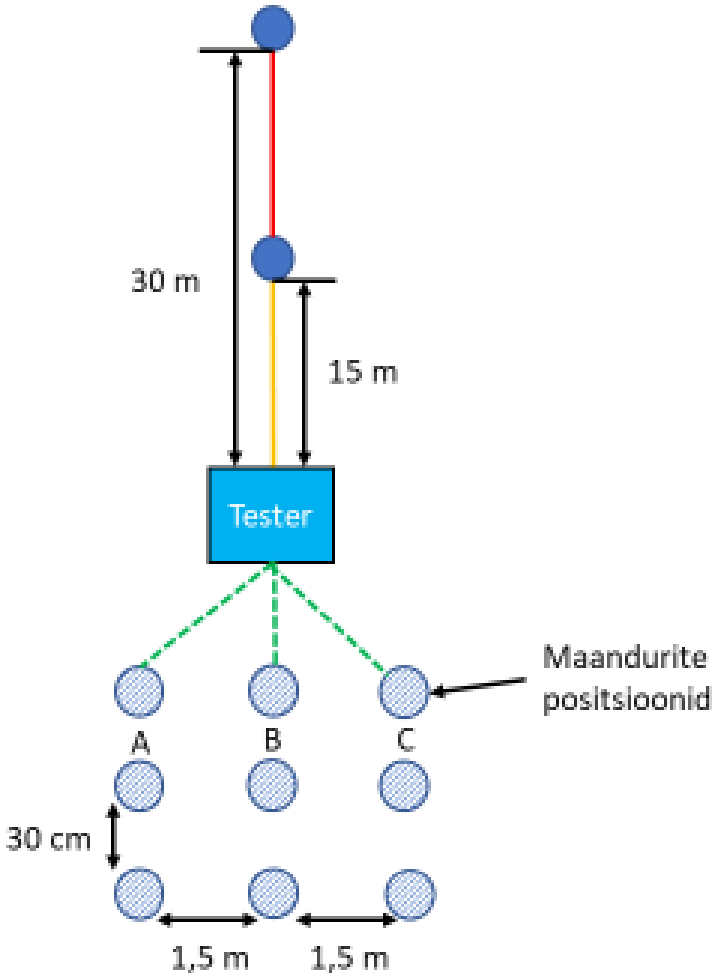
Esimeses etapis mõõdetakse kuue erineva Kaitseväes kasutatava maanduri maandustakistust ühel maastikul. Maastikuks valiti Ääsmäe külas olev lagendik. See lagendik valiti, sest see oli piisavalt suur, et sooritada kõik mõõtmised ühel väljal. Eksperiment viidi läbi neljal erineval päeval 15.–16.09 ja 13.–14.10. Katse alguses seati valmis mõõtmisseade Kewtech KEW4105A, tõmmati laiali seadme külge kinnituvad juhtmed ja ühendati need varraste külge, mis pandi maa sisse. Seadme juurde tekitati 3x4 meetrine ristkülikukujuline ala, mille sees pandi maandurid pinnasesse ja mõõdeti maandustakistus. Enne esimest mõõtmist tehti ka kontrollmõõtmine, millega veenduti, et seade töötab korrektselt. Kontrolli käigus pandi maandur maa sisse ja mõõdeti. Seejärel tõsteti seadmest väljuvat keskmist juhet meeteri võrra kaugemale ja lähemale. Saadud kolme tulemust võrreldi. Erinevus jäi paari oomi juurde, mille põhjal võis järeldada, et seade on korrektselt paigaldatud. Igas alas mõõdeti kõiki vardaid kümme korda. Maandusvardaid 1–3 mõõdeti viies alas ja vardaid 4-6 kolmes ala. Saadud tulemustega leiti varraste keskmine maandustakistus, et vardaid omavahel võrrelda. (Joonis 10)




**Joonis 10.** Autori joonis eksperimendi esimese etapi kirjeldamiseks.

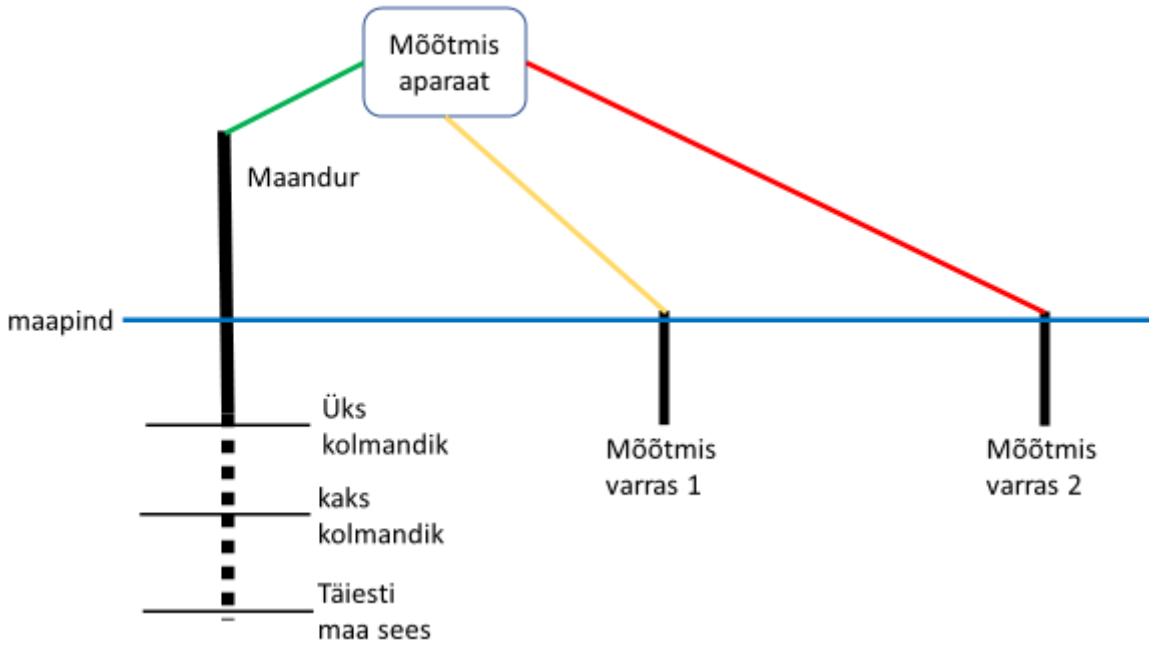
### 2.3.2. Teine etapp

Teises etapis kasutatakse kolme ühesugust maandurit. Maanduriks osutus number 2, sest seda tüüpi maandurit kasutatakse praegu generaatoritel ja neid oli piisavalt. Mõõdeti neljal erineval maastikul, mis valiti välja Maa-ameti mullakaardi rakendust kasutades. Valitud kohad asuvad erinevatel pinnastel. Eksperiment viidi läbi kolmel erineval päeval 31.10 Ääsmäel, 02.11 Loigu talus Männikul, 04.11 Tuulas/Pällus. Katse käigus pandi mõõtmisseade Kewtech KEW4105A valmis ja teostati kontroll. Maandusvardad märgistati tähtedega A, B, C ning need paigaldati maasse üksteisest 1,5-meetriste vahedega. Esialgu mõõdeti vardaid A, B, C eraldi. Seejärel kaht varrast omavahel – AB, AC, BC, ja lõpuks kõiki koos – ABC. Pärast seda tõsteti maandurid umbes 30 sentimeetri võrra edasi ja mõõdeti uuesti. Igal pinnase tüübil vahetati asukohta üks kord. (Joonis 11)




**Joonis 11.** Autori joonis teise eksperimendi esimese etapi kirjeldamiseks.

Tuula/Pällu katse käigus mõõdeti veel maandustakistuse erinevust tulenevalt varraste maa sisse surumise sügavusest. Varras jaotatati kolmeks osaks – esimene osa üks kolmandik, teine kaks kolmandikku ja kolmas täispikkuses. Saadud andmed kirjutati üles ja sisestati programmi Microsoft Excel. (Joonis 12)




**Joonis 12.** Autori joonis teise eksperimendi teise etapi kirjeldamiseks.

### 2.4. Andmete analüüsimine

#### 2.4.1. Esimese etapi analüüs

##### 2.4.1.1. Kasutamine

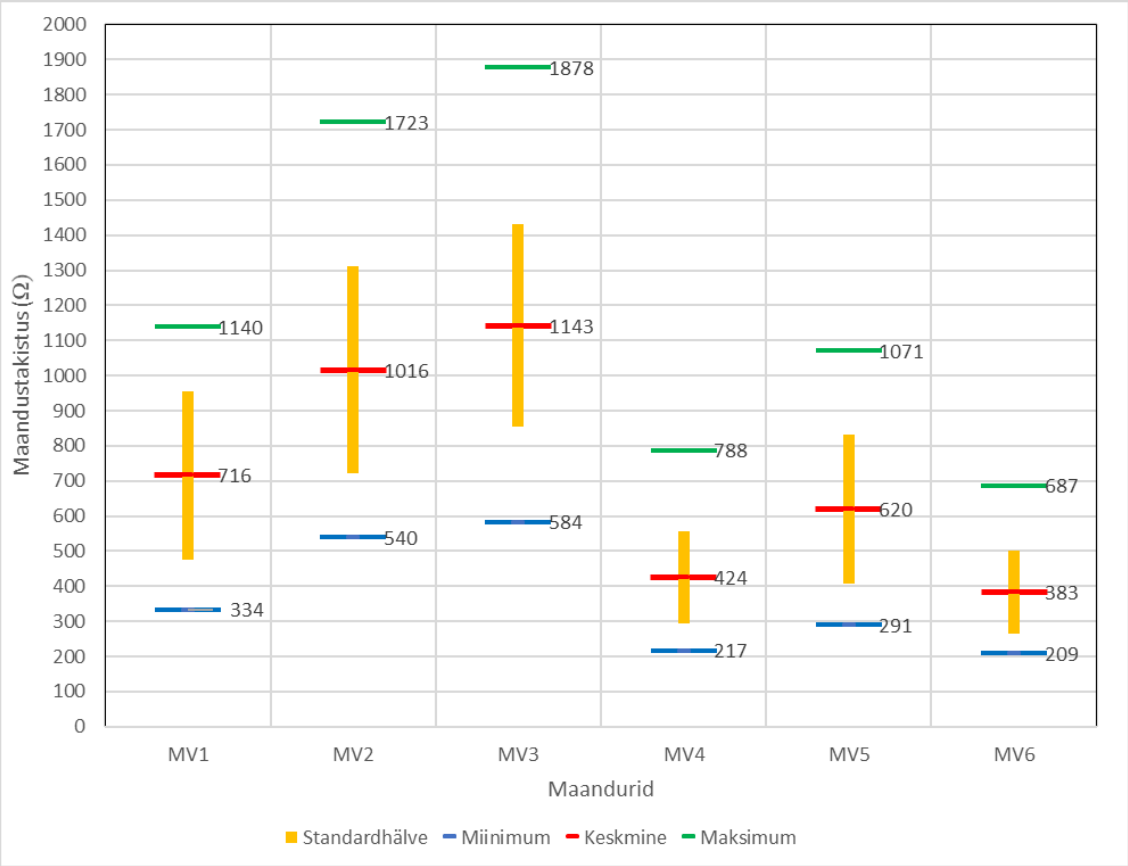
Maandusvardad jagunevad kahte gruppi: maa sisse löödavad (maandusvardad 1–3) ja keeratavad (maandurid 4–6). Maa sisse löödavate eeliseks on see, et neid saab kiiremini maasse panna ja välja võtta. Maandusvardad 1 ja 2 on uued ja neid on disainitud maandamise jaoks. Neil on mugavad haaramissangad ja haamri jaoks mõeldud pea. Maandusvarraste 1 ja 2 miinuseks on, et haamriga mööda lüües võib tabada sangasid, mille tagajärjel võib varda pea küljest murduda. Teiseks on juhe varda küljele kinnitatud väga jäigalt ning võib põrutuste tõttu puruneda. Maandusvarras 3 on kasutamiseks väga halb, sest kujutab endast peenikest metallist varrast. Maa sisse saab selle kergelt, kuid välja võtta on seda keeruline, kui maapind on pisut kõvem.

Maandurid 4–6 on keeratavad. Neid ei saa kasutada kivistel pinnastel. Võib esineda olukordi, kui varras läheb maasse ainult osaliselt. Pehmel pinnasel on nende kasutamine sobilik ja nende jaoks pole vaja lisavahendeid. Maandurite 4 ja 5 erinevus seisnes pikkuses ja seepärast oli maandurit 4 keerulisem korralikult maa sisse saada. Teiseks ei olnud nende kruvipea üks pidev kruvi, vaid hoopis poollehed, mis olid keevitatud nurkade all. Maandureid 4 ja 5 kasutades jäid kivid nende lehtede vahele ja maandur

maasse kinni. Kruvilehed läksid kõveraks ning neid tuli tangidega tagasi sirgeks väänata. Maandur 4 on pikk ja seest tühi, mistõttu võib see kergesti kõveraks minna. Kõveruse tõttu tekitab maandur maasse liiga laia auga ja see ei saa piisavalt head kontakti pinnasega. Maandur 6 on disaini poolest väga hea, sest see on koonusekujuline – see surub maandurit nagu kiilu maa sisse, mis omakorda tagab hea kontakti ümbritseva pinnasega, kuid samas teeb maa sisse keeramise füüsiliselt raskemaks. Maandur 6 kruvipea on hea disainiga, sest kruviots algab kohe tipust ja on järjepidev. Tänu sellele ei jäänud see maandur maa sisse kinni.

#### 2.4.1.2. Maandustakistuse analüüs

Teostati esimese etapi mõõtmised ja saadi järgmised tulemused.




**Joonis 13.** Kuue erineva maanduri maandustakistuse mõõtmistulemid. Joonis põhineb Lisa 1 andmetel.

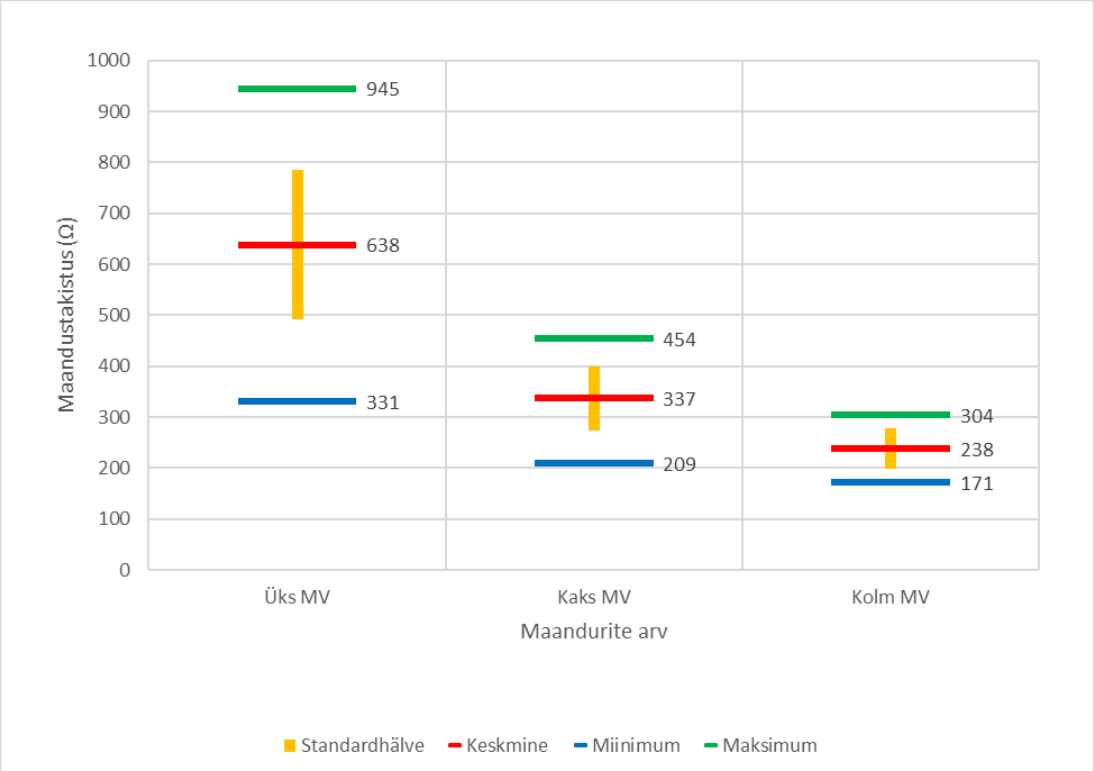
Mõõtmistel saadud maandustakistus maandusvardal 1 on keskmiselt 716 oomi, aga standardhälve 239. Mõõtmistulemuste kõikumine on väga suur – miinimumist 334 oomi kuni 1140 oomini. Maandusvardal 2 on maandustakistus keskmiselt 1016 oomi ja standardhälve 296. Mõõtmistulemuste kõikumine on 540–1723 oomi. Maandusvardal 3

on maandustakistus keskmiselt 1143 oomi ja standardhälve 287. Mõõtmistulemuste kõikumine on 584–1878 oomi. Löödavate varraste mõõtmistulemused on väga kõrged ja näitavad, et sellel pinnasel ei suuda need tagada vajalikku maandustakistust. Maandusvardal 4 on maandustakistus keskmiselt 424 oomi ja standardhälve on 131. Mõõtmistulemuste kõikumine jääb 217 ja 788 oomi vahele. Maandusvardal 5 on maandustakistus keskmiselt 620 oomi ja standardhälve 213. Mõõtmistulemuste kõikumine jääb 291 ja 1071 oomi vahele. Maandusvardal 6 on maandustakistus keskmiselt 383 oomi ja standardhälve 119. Mõõtmistulemuste kõikumine on 209–687 oomi. (Vaata Lisa 1) Keeratavate maandurite tulemused on paremad kui löödavate, aga jäävad siiski suhteliselt kõrgeks. Parima maanduri (6) ja halvima maanduri (3) keskmiste tulemuste vahe on 760 oomi. Maandur 6 saab pinnasega parema kontakti. Kuigi pikkus määrab maandurite juures palju, on maandur 4 halvema tulemusega kui maandur 6, sest keeramisel tekkinud vahed pinnasega tegid maanduri 4 maandustakistuse suuremaks.

### 2.4.2. Teise etapi analüüs

#### 2.4.2.1. Mitme maanduri mõõtmine

Teostati teise etapi mõõtmised ja saadi joonisel 14 esitatud tulemused.

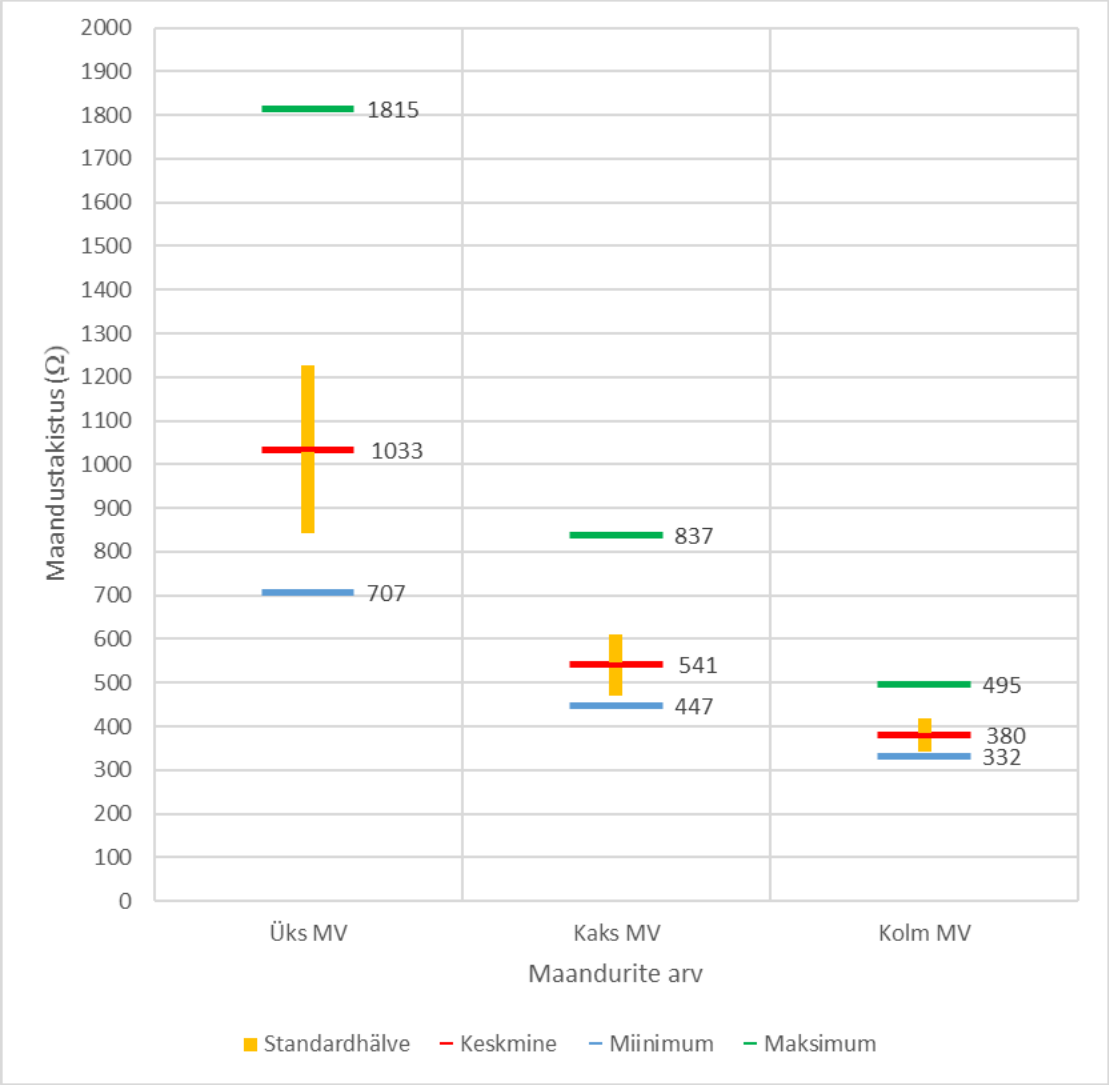



**Joonis 14.** Ääsmäe külas teostatud kuni kolme maandusvardaga mõõtmise tulemused. Joonis Lisas 2 esitatud andmete põhjal.

Teise etapi esimene mõõtmine teostati 31. oktoobril 2018 Harjumaal, Ääsmäe külas koordinaatidel 59°14′48″N 24°29′54″E. Sellel päeval sademed puudusid, kuid maapind oli märg. Pinnase tüübiks on seal gleistunud leostunud muld keskmise liivsavi lõimisega. Mõõtmistulemused vardal A: maandustakistus keskmiselt 613 oomi, standardhälve129, kõikumine 359–823 oomini. Vardal B takistus keskmiselt 675 oomi, standardhälve 159, kõikumine 439–872 oomini. Vardal C takistus keskmiselt 626 oomi, standardhälve 150, kõikumine 331–945 oomini. Ühe vardaga on keskmine maandustakistus 638 oomi ja standardhälve 147. (Vaata Lisa 2) See tulemus on 378 oomi võrra madalam esimeses etapis sama vardaga samal pinnasel mõõdetud keskmisest maandustakistusest. Sellest järeldub, milline osatähtsus on niiskel maapinnal.

Tulemused kahe vardaga mõõtmisel: AB keskmine maandustakistus on 346 oomi standardhälve 61, kõikumine 255–437 oomini. AC keskmine takistus on 329 oomi, standardhälve 57 ja kõikumine 236–437 oomini. BC keskmine maandustakistus on 337 oomi, standardhälve 72 ja kõikumine 209–454 oomini. Kahe vardaga mõõtmistulemuste keskmine maandustakistus on 337 oomi ja standardhälve 63. Seega kahte varrast kasutades vähenes takistus ühe vardaga võrreldes umbes kaks korda (47% võrra) ja standardhälve vähenes 57% võrra.

Mõõtmistulemused kolme vardaga: ABC keskmine maandustakistus on 238 oomi, standardhälve 40 ja tulemuste kõikumine 171–304 oomini. Kolme varrast kasutades vähenes maandustakistuse tulemus ühe vardaga võrreldes umbes kolm korda (63% võrra) ja standardhälve vähenes 73% võrra ning kahe vardaga võrreldes 29% võrra ja standardhälve 36%. (Vaata Lisa 2)




**Joonis 15.** Loigu talus teostatud kuni kolme maandusvardaga mõõtmistulemused. Joonis Lisas 3 esitatud andmete põhjal.

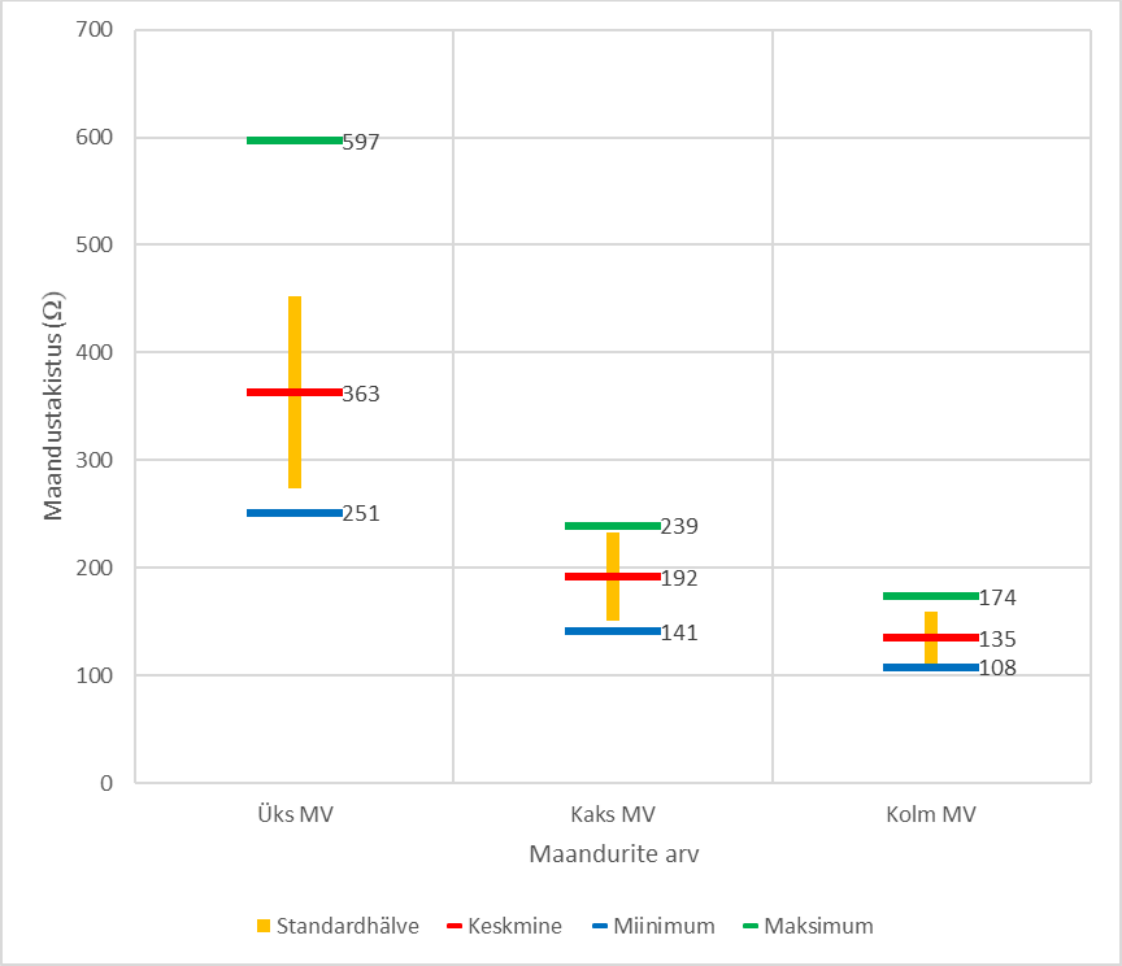
Teine mõõtmine teostati 2. novembril 2018 Harjumaal, Saue Vallas, Loigu talu juures, koordinaatidel 59°12′55″N 24°34′04″E. Mõõtmiste ajal sadas vihma ja maapind oli märg. Pinnase tüübiks on seal rähkne saviliiv.

Mõõtmistulemused vardal A: keskmine maandustakistus 996 oomi, standardhälve 178, tulemused kõikusid 707–1430 oomini. Mõõtmistulemused vardal B: keskmine maandustakistus 1053 oomi ja standardhälve 220, tulemused kõikusid 828–1815 oomini. Mõõtmistulemused vardal C: keskmine maandustakistus 1051 oomi ja standardhälve 179, tulemused kõikusid 802–1416 oomini. Ühe vardaga on keskmine maandustakistus sellel pinnasel 1033 oomi ja standardhälve 192. Võrreldes Ääsmäel tehtud mõõtmistega on Loigu talus tehtud mõõtmised 350 oomi võrra kõrgemad, mis võib tuleneda sellest, et Loigu talu pinnas on liivasem ja liiv on mullast halvem elektrijuht.

Tulemused kahe vardaga mõõtmisel: AB keskmine maandustakistus on 542 oomi, standardhälve 78, tulemuste kõikumine 451–837 oomini. AC keskmine maandustakistus 544 oomi, standardhälve 66, tulemuste kõikumine 447–662 oomini. BC mõõtmisel keskmine maandustakistus 536 oomi, standardhälve 66, tulemuste kõikumine 448–681 oomini. Kahe vardaga mõõtmise keskmine sellel pinnasel on 541 oomi ja standardhälve 69. Kahe varda puhul kahanes maandustakistus umbes poole (48%) võrra ja standardhälve 64% võrra, mis on võrreldes Ääsmäel tehtud mõõtmistega sama palju.

Mõõtmistulemused kolme vardaga mõõtmisel: ABC keskmine takistus 380 oomi ja standardhälve 38, tulemused kõikusid 332–495 oomini. Kolme varrast kasutades vähenes takistus umbes kolm korda (63% võrra) võrreldes ühe maanduri kasutamisega. Võrreldes kahe varda keskmise takistusega kahanes tulemus 30% võrra. Kasutades kolme maandurit on standardhälve 80% võrra väiksem kui ühe maanduriga ja 45% võrra väiksem kui kahe maanduriga. (Vaata Lisa 3)

Kolmas mõõtmine teostati 2. novembril 2018 Harjumaal, Männikul koordinaatidel 59°19′31″N 24°41′24″E. Sellel päeval oli kerge vihmasadu ja pinnas oli niiske. Pinnase tüübiks on seal puhas liiv leedemuld. Sellel pinnasel seadmega mõõtmisel tulemusi ei saadud, mis tähendab, et takistus oli üle 2000 oomi, sest see on Kewtech KEW4105A Digital Earth Resistance Tester-i maksimum.




**Joonis 16.** Pällus/Tuulas teostatud kuni kolme maandusvardaga mõõtmistulemused. Joonis Lisas 4 esitatud andmete põhjal.

Neljas mõõtmine toimus 4. novembril Harju maakonnas, Pällus/Tuulas, koordinaatidel 59°14′59″N 24°27′18″E. Mõõtmispäeval sademed puudusid, aga maapind oli märg. Pinnase tüübiks on seal õhuke madalsoomuld.

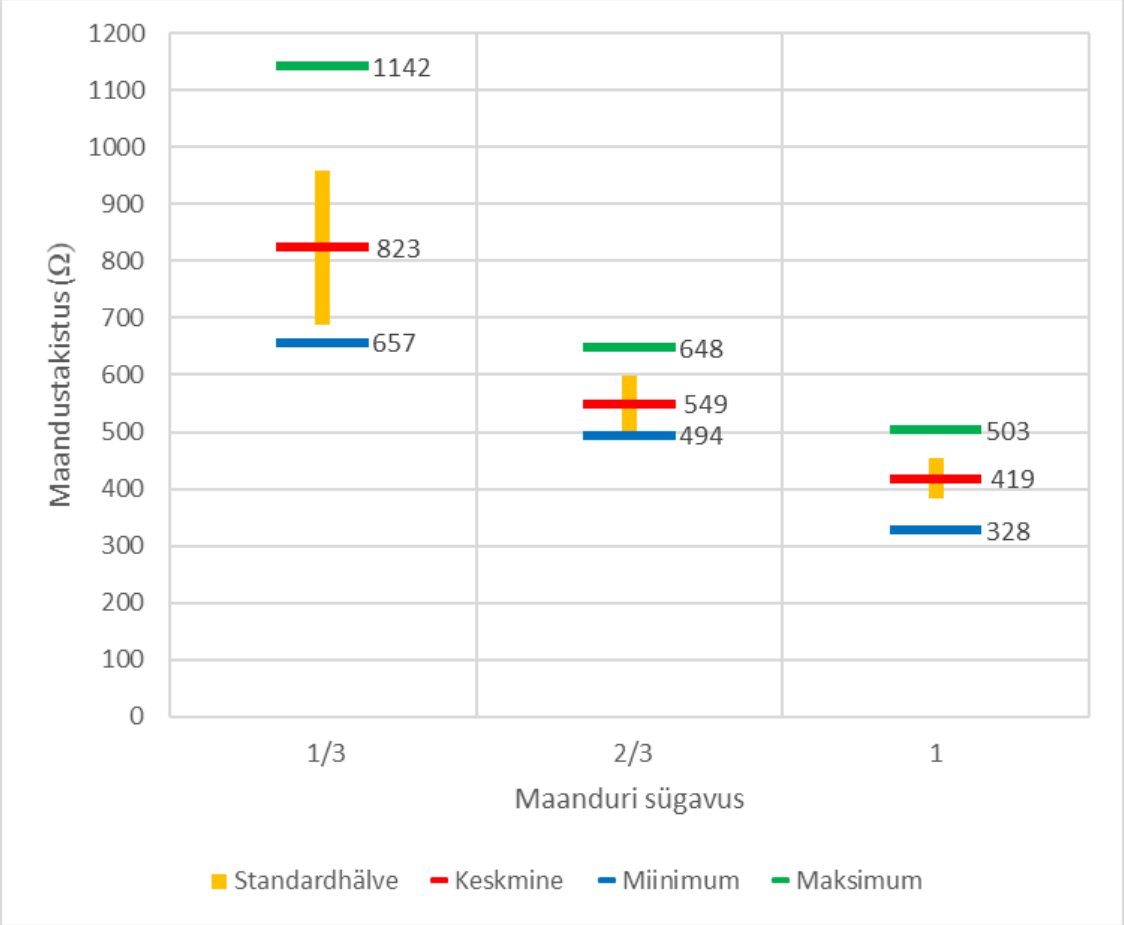
Mõõtmistulemused vardal A: keskmine maandustakistus 374 oomi, standardhälve 94, tulemused kõikusid 256–548 oomini. Mõõtmistulemused vardal B: keskmine maandustakistus 366 oomi, standardhälve 107, tulemused kõikusid 251–597 oomini. Mõõtmis tulemused vardal C: keskmine maandustakistus 349 oomi, standardhälve 65, tulemused kõikusid 258–448 oomini. Ühe vardaga maandustakistuse keskmine sellel pinnasel on 363 oomi ja standardhälve 89.

Tulemused kahe vardaga maandustakistuse mõõtmisel: AB keskmine takistus 198 oomi, standardhälve 48, tulemuste kõikumine 141–297 oomini. AC mõõtmisel keskmine maandustakistus 193 oomi, standardhälve 36, tulemuste kõikumine 146–238 oomini. BC mõõtmisel keskmine maandustakistus 184 oomi, standardhälve 38, tulemuste kõikumine

141–239 oomini. Kahe maanduriga mõõtmise keskmine takistus sellel pinnasel on 192 oomi ja standardhälve 40. Võrreldes ühe vardaga kahanes takistus sarnaselt eelmiste katsetega umbes poole (47%) võrra ja standardhälve 55% võrra.

Mõõtmistulemused kolme vardaga: ABC keskmine maandustakistus on 135 oomi ja standardhälve 25, tulemused kõikusid 106–174 oomini. Kolme varrast kasutades vähenes takistus ootuspäraselt umbes kolm korda (63% võrra) võrreldes ühe maanduri kasutamisega. Võrreldes kaht varrast kasutades kahanes keskmine takistus 30% võrra. Kolme maandurit kasutades on standardhälve 72% väiksem kui ühe maanduriga ja 39% väiksem kui kahe maanduriga. (Vaata Lisa 4)

### 2.4.2.2. Erineva s maandurite mõõdetud takistus




**Joonis 17.** Erineval sügavustel maandurite mõõtmis tulemused. Joonis Lisas 5 esitatud andmete põhjal.

**Varraste sügavuse erinevuse mõju maandustakistusele.**

Mõõtmine toimus 4. novembril Harju maakonnas, Pällus/Tuulas, koordinaatidel 59°14′59″N 24°27′18″E. Mõõtmispäeval ei sadanud, aga maapind oli märg. Pinnase

tüübiks on seal õhuke madalsoomuld. Mõõtmine toimus samaaegselt, kui mõõdeti mitme maanduri mõju maandustakistusele. Selletõttu on täissügavuse mõõtmistulemused samad kui esimesed kakskümmend (A, B, ja C) tulemust. Ühe kolmandiku mõõtmistulemusteks saadi keskmine takistus 823 oomi, standardhälve 136 ja tulemuste kõikumine jäi vahemikku 657–1142 oomi. Kahe kolmandiku mõõtmistulemusteks saadi keskmine maandustakistus 549 oomi, standardhälve 48 ja tulemuste kõikumine jäi vahemikku 494–628 oomi. Täispikkuses maanduri maa sisse panemisel saadi keskmiseks maandustakistuseks 419 oomi, standardhälve 36 ja tulemuste kõikumine jäi vahemikku 328–503 oomi. Sügavust arvestades kahanes maandustakistus ühte kolmandikku kahe kolmandikuga võrreldes umbes 33% võrra ja standardhälve 65% võrra. Surudes varda täiesti maa sisse kahanes maandustakistus veelgi umbes 24% võrra ja standardhälve 26% võrra. Ühe kolmandiku ja täissügavuse maandustakistuse erinevuseks saadi umbes 49% ja standardhälbeks 74%. (Vaata Lisa 5)

### 2.5. Järeldused

Esimese etapi eksperiment näitas, et praegused maandusvardad ei taga kasutaja ohutust. Maandurite maandustakistus osutus tegelikkuses palju kõrgemaks ohutuks peetavast 25 oomist. Maanduri 3 maandustakistus oli keskmiselt 1143 oomi ja maanduril 6 383 oomi. Erinevus nende kahe maanduri vahel seisneb mõõtmetes. Maandur 3 oli 51 cm pikkune ja laiuselt 1,4 cm läbimõõduga. Maandur 6 oli 1 m pikkune ja koonusekujuline, ülemine osa oli 7 cm läbimõõduga. Tulemuste erinevust mõjutab eriti just maandur 6 koonuse kuju, sest see võimaldas maanduril maaga paremat ühendust saada.

Teiseks ilmnes esimeses etapis mõõtmistulemuste väga suur erinevus. Näiteks maanduri 2 maandustakistuse maksimum oli 1723 oomi. Samas muutes varda asukohta ainult kolme meetri ulatuses langes maandustakistus 540 oomini. Sellest tulenevalt ei saa järeldada, et lähestikku asuvate maandurite maandustakistus on sarnane. Autori arvates peaks ohutuses veendumiseks alati mõõtma iga maanduri maandustakistust just selles kohas, kuhu see on paigaldatud.

Teise etapi eksperimentidest selgus, et maandurite hulka tõstes maandustakistus langeb. Kasutades ühe maandusvarda asemel kaht maandusvarrast paranes tulemus umbes kaks korda. Kasutades ühe asemel kolme paranes tulemus umbes kolm korda. Need suhted ühe kahe ja kolme varda vahel kehtivad kõigi kolme erineva pinnase kohta. Näiteks Loigu talus tehtud mõõtmisel saadi ühe maanduri keskmiseks maandustakistuseks 1033

oomi ja kolme varda keskmiseks 380 oomi ehk maandustakistus langes 63% võrra. Sama juhtus ka Pällu/Tuula pinnasel, kus ühe varda takistus oli 363 oomi ja kolme varda takistus 135 oomi – maandustakistus langes 63% võrra. Kuigi maandusvarraste lisamisel langeb maandustakistus protsendiliselt sama palju erinevatel pinnastel, ei saa kindlalt öelda, kui palju oleks vaja maandusvardaid, sest pinnas määrab ära selle alguspunkti. Samas saab arvutada ligilähedaselt, kui palju vardaid oleks vaja. Kui näiteks ühe varda maandustakistus on 600 oomi, siis läheks vaja umbes 25 sellist varrast, et saavutada maandustakistus 25 oomi. Loigu talus saadi kolme vardaga maanduri keskmiseks maandustakistuseks 380 oomi, samas Pällu/Tuula pinnasel tuli ühe vardaga maandustakistus 363 oomi. Sellest võib järeldada, et ühel pinnasel võib minna vaja vähem vardaid, aga see ei tähenda, et teisel pinnasel nendest piisaks. Üldiselt võib järeldada, et olemasolevate maandusvarrastega soovitud maandustakistuse saavutamine on üsna ebareaalne. Kuid sellele vaatamata teeb autor soovituse võtta kasutusele vähemalt kaks maandusvarrast, soovitatavalt isegi kolm. See tagaks hetkeolukorraga võrreldes umbes 2-3 korda väiksema maandustakistuse ja samas ei oleks väga suur lisatöö paigaldajatele.

Maandurite sügavuse erinevuse mõõtmisel leiti, et tähtis on maanduri pikkus ehk see osa, mis on maaga ühenduses. Maandur 2, mis on 67 cm pikkune, kasutatakse umbes 60 cm ehk maandusjuhtme ühenduskohani. Maandur lükati ühe kolmandiku võrra maa sisse. Keskmiseks maandustakistuseks Pällu/Tuula pinnasel saadi 832 oomi. Kui aga suruti maandusvarras kaks kolmandiku ulatuses maa sisse, langes maandustakistus 33% võrra. Kui maandur lükati täielikult maa sisse, langes maandustakistus 49% võrreldes ühe kolmandikuga. Sellest võib järeldada, et lisaks maandurite arvu tõstmisele on võimalik maandustakistust vähendada valides pikema maandusvarda. Lisaks võib öelda, et väga tähtis on kasutada olemasolevaid vardaid kogu pikkuses maa sisse paigaldatuna.

## KOKKUVÕTE

Uurimustöö eesmärgiks on välja selgitada Eesti kaitseväes kasutatavate teisaldatavate elektrigeneraatorite maandurite maandustakistus ning hinnata nende ohutust kasutajale. Uurimiseks viidi läbi eksperiment, mille käigus mõõdeti erinevatel pinnastel Eesti kaitseväes kasutusel olevate maandurite maandustakistust. Maandustakistuse vähendamiseks katsetati maandurite arvu suurendamist.

Esimesele uurimisküsimusele – Milline on praegu kasutuses olevate teisaldavate generaatorite varrastel maandustakistus sõltuvalt tingimustest? – vastuse saamiseks teostati eksperiment, mille käigus mõõdeti maastikul kuue erineva maanduri maandustakistust. Mõõtmistulemuste keskmised olid maandusvardal 1 718 oomi, maandusvardal 2 1016 oomi, maandusvardal 3 1143 oomi, maandusvardal 4 424 oomi maandusvardal 5 620 oomi ja maandusvardal 6 383 oomi. Saadud tulemused näitavad, et praegu kasutuses olevate maandurite maandustakistus ei ole lähedalgi ohutuks peetavale 25 oomile. Samuti selgus, et mõõtmistulemuste kõikumine on väga suur. Paigaldades maandurit pool meetrit eemale võib takistus muutuda lausa sadade oomide võrra.

Teisele uurimisküsimusele – Kuidas tagada maanduriga ohutus kasutajale? – vastamiseks teostati kaks erinevat eksperimenti maandusvardaga 2. Esimese eksperimendiga uuriti, kui palju paraneb maandustakistus, kui lisada juurde maandusvardaid. Eksperiment teostati neljal erineval pinnasel, et näha, kui palju mõjutab pinnase valik tulemust. Tulemused kinnitasid teooriat, et mida liivasem pinnas, seda suurem takistus. Esimene mõõtmine teostati Ääsmäe külas, kus ühe maandusvarda maandustakistuse keskmine oli 638 oomi. Teine mõõtmine teostati Loigu talus, kus ühe maanduri keskmine maandustakistus oli 1033 oomi. Kolmas mõõtmine teostati Männikul, kus täpset tulemust ei saadud, kuna aparaat ei mõõda nii suurt maandustakistust, nagu seal oli. Millest võis järeldada, et maandustakistus oli üle 2000 oomi. Neljas mõõtmine teostati Tuula tee ääres, kus ühe maandusvarda keskmiseks maandustakistuseks saadi 363 oomi. Mõõdeti tulemusi kuni kolme vardaga ja leiti, et kui kasutada ühe maandusvarda asemel kaht maandusvarrast, paraneb tulemus umbes poole võrra ja kui kasutada ühe asemel kolme, paraneb tulemus umbes kolm korda. See kehtib kõigi kolme erineva pinnase kohta. Sellest võib järeldada, et maandustakistuse parandamiseks võib suurendada maandurite arvu. Ideaalolukorra, alla 25 oomi,

saavutamiseks võib olenevalt pinnasest vaja minna üle 20 maandusvarda, mis ei ole praktikas mõistlik lahendus. Hetkeolukorra parendamiseks teeb autor soovituse võtta kasutusele vähemalt kaks maandusvarrast, soovitatavalt isegi kolm. See tagaks umbes kaks kuni kolm korda väiksema maandustakistuse ja samas ei oleks väga suur lisatöö paigaldajatele.

Teise eksperimendiga võrreldi maanduri maandustakistuse erinevust tulenevalt sellest, kui sügavale seda maandurit surutakse. Selle põhjal saab välja tuua, et oluline on maandusvarras korrektselt maa sisse suruda. Maandustakistus mõjutab ka maanduri pikkus. Kui maandur oli umbes ühe kolmandiku jagu maa sisse surutud, siis maandustakistus oli 823 oomi. Kui aga maandur oli täielikult maa sees, paranes maandustakistus umbes poole võrra ehk langes 419 oomi peale. Seega on väga tähtis maandusvarraste korrektne kasutamine – paigaldamine kogu pikkuses maa sisse.

Selgus, et ei ole üht kindlat maandurit, mis suudaks alati tagada kasutaja ohutuse. Maandustakistus sõltub väga palju pinnase koostisest ja niiskusest, mistõttu tuleks alati mõõta maandurite maandustakistust, et veenduda ohutuses. Selle teostamiseks on vajalik tagada elektripaigaldise ülematele maandustakistuse mõõtmise võimekus.

Järgnevates uurimustes võiks keskenduda rõhtsatele maanduritele. Antud uurimuses selgus, et maandustakistust saab muuta peamiselt kahel viisil: maandurite arvu ja pikkusega. Rõhtsad maandurid saavad olla pikemad, sest neid ei lööda maa sisse, vaid kaevatakse. Rõhtsad maandurid ei pea olema ka jäigad, mis teeb need kompaktsemaks.

## VÕÕRKEELNE RESÜMEE

GROUND RESISTANCE OF THE REMOVABLE ELECTRIC GENERATOR USED IN DEFENCE FORCES

*SUMMARY*

The reason for doing this thesis was the fact that Estonian defence forces use a variety of electric generators that have different kinds of grounding rods. Until now, the ground resistance of these grounding rods had not been measured in real world environment, so it is not known whether user safety is provided.

The aim of this thesis was to find out the ground resistance of the Estonian defence forces' removable electric generator grounding electrode and to evaluate their safety for the user. To achieve this goal two research questions were raised.

The first research question was the following - what is the ground resistance of the currently used removable generator grounding rods? In order to answer the question, an experiment was conducted where all six different grounding rods where measured out on the field in Ääsmäe village. The averages of the measured results were - on grounding rod one 718 ohm, on grounding rod two 1016 ohm, on grounding rod three 1143 ohm, on grounding rod four 424 ohm, on grounding rod five 620 ohm, on grounding rod six 383 ohm. The results show that currently used grounding rods are not even close to the 25 ohm that is considered safe. Secondly, the author discovered that the fluctuations in the results between measurements were very high. It was enough to change the position of the electrode by half a meter, after which the resistance could change by hundreds of ohms.

The second research question was the following – How to ensure the safety of the user with a grounding electrode? In order to answer the question, two different experiments were performed with grounding rod two. In the first experiment the author investigated how much the ground resistance changes if you increase the grounding rods. The experiment was conducted on four different soils to see how much the choice of soil affects earth resistance. The tests confirmed the theory that the more sand you have in the soil, the higher the ground resistance is. The first measurement was carried out in Ääsmäe village, where the average earth resistance of one electrode was 638 ohms. The second measurement was carried out in Loigu farm, where the average earth resistance of one electrode was 1033 ohms. The third measurement was carried out in Männiku

where the tester could not get a result, which means that earth resistance was higher than 2000 ohms. The fourth measurement was carried out at the Tuula road, where average earth resistance of one electrode was 363 ohms. The test was done up to three electrodes simultaneously and the results were the following - if you use two earthing rods instead of one, the grounding resistance decreased by about 47%. In case you use three instead of one, the grounding resistance decreased by about 63%. That applied to all three different soils. From this, it can be concluded that in order to decrease ground resistance you need to add more grounding rods. In order to achieve an ideal, less than 25 ohms, more than 20 grounding rods may be required depending on the soil, which in practice is not a reasonable solution. To improve the current situation, the author makes a recommendation to use at least two grounding rods, preferably even three. This would provide about two to three times less ground resistance and at the same time would not increase the installers' workload.

In the second experiment, the author compared the differences of grounding resistance that result from forcing the electrode into different depths. This experiment showed how important it is to push the electrode properly into the ground. It also shows how length affects the electrode's grounding resistance. When the grounding rod was pushed one-third into the ground, the ground resistance was on average 823 ohms, and once the electrode was properly in the ground, the resistance improved by 49%, dropped to 418 ohms. So it is very important to use the grounding rod correctly - installing it all the way into the ground.

The author found that there is no one specific grounding rod that would always ensure the safety of the user. Grounding resistance is more dependent on soil composition and moisture. Therefore, the grounding resistance should always be measured before every use. To do this, it is necessary to ensure the ability of the electrical installation managers to measure the ground resistance.

The author proposes a new research should be done on horizontal electrodes, as it appears from this thesis that there are two ways to change ground resistance with electrodes. The first is to increase the number of electrodes. The second is to increase the length because horizontal electrodes do not have to be rigid which means that they can be made more compact.

## KIRJANDUS JA ALLIKAD

**Elektriseadmele esitatavad ohutuse nõuded ning elektriseadmele ja elektripaigaldisele esitatavad elektromagnetilisele ühilduvuse nõuded ja vastavushindamise kord.** 14.07.2015, jõustunud 18.07.2015. – RT I, 17.07.2015, 12 § 4.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/119022019006> (05.05.2019)

**Getting down to earth.** Megger

<https://content.megger.com/getattachment/97c49611-6ab2-4c36-8e3f-4aad7681e249/Application-guide-Getting-down-to-earth.pdf?_ga=2.46170210.470613376.1540119505-1017460614.1520411565> (22.10.2018)

**Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.** 2002. Fundamentals of physics.-8th ed., Vol. 2 pp. 668-700.

**Kewtech KEW4105A instruction manual.**

<https://www.kewtechcorp.com/sites/default/files/pdf/instruction_manuals/KEW4105_Manual.pdf> (22.10.2018)

**Oidram, R.** 2005. Maanduspaigaldiste ehitus. <http://petz.planet.ee/elekter/Maanduspaigaldiste-ehitus.pdf>

**Risthein, E.** 2004 Maandamine ja potentsiaaliühtlustus. Tallinn: EETEL-EKSPERT OÜ

**Sarosh, P.; Hmurcik, L.** 2016 Preventable Ground Wire Accidents And Fires – IEEE Xplore. Juuni

<http://ieeexplore.ieee.org/document/7555833/> (28.03.2018)

**Teemets, R.** 2010 Elektriaparaadid. Tallinna Tehnikaülikool. pp. 50-52

<http://www.ene.ttu.ee/elektriajamid/oppeinfo/materjal/AAR3340/2_5_Rikkevoolukaitselyliti.pdf> (22.10.2018)

**Teemets, R.** 2004 Elektripaigaldised. Tallinn: EETEL-EKSPERT OÜ

**Trifunovic, J.; Kostic, M.** 2013 Analysis of influence of imperfect contact between grounding electrodes and surrounding soil on electrical properties of grounding loops. – Electrical Engineering, Vol. 96, No. 3, pp 255-265.

**Virgil, C. B. S.** 1998 Overview of electrical hazards, Worker deaths by elecrocution – National Institute for Occupational Safety and Health. Mai

<https://www.cdc.gov/niosh/docs/98-131/pdfs/98-131.pdf> (28.03.2018)

# LISA

## Lisa 1 Esimese etapi andmed.

| asukoht | Harju maakond, Saue Vald, Ääsmäe küla | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 59°14´48´´N 24°29´54´´E | | | | | | | |
| Muld | Kog: gleistunud leostunud muld keskmise liivsavi lõimisega | | | | | | | |
| kuupäev | 15.-16.09.18 | | | 13.-14.10.18 | | | | |
| ilmastik | sademed puudusid | | | sademed puudusid | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | MV2 | MV3 | | MV1 | | MV4 | MV5 | MV6 |
| 1 | 829 | 1001 | | 953 | | 672 | 942 | 569 |
| 2 | 1099 | 1050 | | 661 | | 451 | 1070 | 578 |
| 3 | 896 | 1183 | | 334 | | 318 | 975 | 687 |
| 4 | 628 | 1158 | | 826 | | 339 | 1071 | 557 |
| 5 | 755 | 1062 | | 965 | | 321 | 291 | 363 |
| 6 | 1004 | 1147 | | 944 | | 452 | 620 | 209 |
| 7 | 820 | 1250 | | 853 | | 217 | 587 | 401 |
| 8 | 828 | 836 | | 816 | | 229 | 776 | 313 |
| 9 | 1022 | 687 | | 1117 | | 268 | 823 | 555 |
| 10 | 952 | 1275 | | 779 | | 368 | 576 | 350 |
| 11 | 1393 | 1217 | | 1140 | | 415 | 526 | 310 |
| 12 | 810 | 854 | | 829 | | 420 | 519 | 330 |
| 13 | 614 | 957 | | 713 | | 566 | 454 | 305 |
| 14 | 1109 | 1142 | | 1033 | | 483 | 715 | 380 |
| 15 | 978 | 1114 | | 907 | | 408 | 551 | 313 |
| 16 | 866 | 833 | | 947 | | 534 | 543 | 434 |
| 17 | 890 | 1157 | | 853 | | 450 | 542 | 378 |
| 18 | 1522 | 1288 | | 510 | | 324 | 402 | 250 |
| 19 | 987 | 1187 | | 502 | | 548 | 609 | 417 |
| 20 | 1160 | 1252 | | 391 | | 456 | 561 | 325 |
| 21 | 1004 | 916 | | 618 | | 788 | 537 | 354 |
| 22 | 1226 | 1079 | | 436 | | 437 | 483 | 337 |
| 23 | 575 | 894 | | 479 | | 320 | 576 | 311 |
| 24 | 550 | 584 | | 408 | | 363 | 389 | 261 |
| 25 | 540 | 613 | | 389 | | 463 | 356 | 278 |
| 26 | 552 | 639 | | 408 | keskmine | 424.4 | 619.8 | 382.6 |
| 27 | 550 | 813 | | 378 | standardhälve | 131.1 | 212.8 | 119.0 |
| 28 | 784 | 1076 | | 394 | min | 217 | 291 | 209 |
| 29 | 631 | 1020 | | 464 | max | 788 | 1071 | 687 |
| 30 | 721 | 881 | | 413 | | | | |
| 31 | 917 | 1090 | | 541 | | | | |
| 32 | 1235 | 899 | | 516 | | | | |
| 33 | 1249 | 1049 | | 635 | | | | |
| 34 | 1194 | 1200 | | 666 | | | | |
| 35 | 1076 | 1580 | | 576 | | | | |
| 36 | 1316 | 1567 | | 613 | | | | |
| 37 | 980 | 1172 | | 757 | | | | |
| 38 | 1322 | 1272 | | 866 | | | | |
| 39 | 1045 | 1224 | | 658 | | | | |
| 40 | 992 | 1349 | | 647 | | | | |
| 41 | 1445 | 1333 | | 1105 | | | | |
| 42 | 1283 | 1394 | | 900 | | | | |
| 43 | 1723 | 1497 | | 580 | | | | |
| 44 | 1288 | 1504 | | 1078 | | | | |
| 45 | 1649 | 1819 | | 1077 | | | | |
| 46 | 1195 | 1878 | | 653 | | | | |
| 47 | 1504 | 1291 | | 1110 | | | | |
| 48 | 1015 | 1694 | | 911 | | | | |
| 49 | 935 | 901 | | 533 | | | | |
| 50 | 1143 | 1247 | | 901 | | | | |
| keskmine | 1016.0 | 1142.5 | | 715.7 | | | | |
| standardhälve | 295.7 | 287.3 | | 239.3 | | | | |
| min | 540 | 584 | | 334 | | | | |
| max | 1723 | 1878 | | 1140 | | | | |

## Lisa 2 Teise etapi Ääsmäe andmed

| asukoht | Harju maakond, Saue Vald, Ääsmäe küla | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 59°14´48´´N 24°29´54´´E | | | | | | | |
| kuupäev | 31.10.2018 | | | | | | | |
| ilmastik | sademed puudusid (maapind märg) | | | | | | | |
| Muld | Kog: gleistunud leostunud muld keskmise liivsavi lõimisega | | | | | | | |
| Varras | MV2 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | A | B | C | AB | AC | BC | ABC | |
| | 723 | 825 | 945 | 413 | 437 | 454 | 304 | |
| | 765 | 860 | 748 | 431 | 403 | 416 | 295 | |
| | 823 | 813 | 690 | 437 | 404 | 388 | 290 | |
| | 722 | 800 | 669 | 412 | 376 | 381 | 278 | |
| | 500 | 819 | 761 | 338 | 331 | 415 | 256 | |
| | 359 | 810 | 827 | 274 | 276 | 424 | 226 | |
| | 788 | 718 | 694 | 402 | 392 | 367 | 275 | |
| | 744 | 872 | 793 | 422 | 405 | 424 | 291 | |
| | 543 | 811 | 638 | 346 | 315 | 368 | 243 | |
| | 587 | 790 | 615 | 359 | 323 | 357 | 245 | |
| | 554 | 739 | 591 | 339 | 310 | 340 | 235 | |
| | 683 | 712 | 736 | 370 | 378 | 373 | 264 | |
| | 742 | 698 | 382 | 380 | 277 | 261 | 212 | |
| | 574 | 456 | 331 | 309 | 236 | 209 | 171.2 | |
| | 697 | 488 | 598 | 288 | 347 | 284 | 223 | |
| | 599 | 474 | 487 | 274 | 294 | 256 | 200 | |
| | 500 | 492 | 564 | 283 | 290 | 279 | 203 | |
| | 522 | 510 | 456 | 282 | 270 | 257 | 193.7 | |
| | 443 | 611 | 552 | 266 | 274 | 305 | 207 | |
| | 528 | 439 | 569 | 255 | 300 | 266 | 200 | |
| | 478 | 440 | 507 | 380 | 274 | 253 | 188.6 | |
| keskmine | 613.0 | 675.1 | 626.3 | 345.7 | 329.1 | 337.0 | 238.1 | |
| standardhälve | 128.7 | 159.3 | 149.9 | 60.9 | 57.1 | 72.0 | 40.1 | |
| min | 359 | 439 | 331 | 255 | 236 | 209 | 171.2 | |
| max | 823 | 872 | 945 | 437 | 437 | 454 | 304 | |
| | | | | | | | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 varda keskmine | 638.2 | 2 MV keskmise langus võrreldes 1 MV | 47.2% |
| 1 varda standardhälve | 146.6 | 2 MV standardhälve langus võrreldes 1 MV | 57% |
| 2 varda keskmine | 337.3 | 3 MV keskmise langus võrreldes 1 MV | 62.7% |
| 2 varda standardhälve | 63 | 3 MV standardhälve langus võrreldes 1 MV | 72.7% |
| 3 varda keskmine | 238.1 | 3 MV keskmise langus võrreldes 2 MV | 29.4% |
| 3 varda standardhälve | 40.1 | 3 MV standardhälve langus võrreldes 2 MV | 36.4% |

## Lisa 3 Teise etapi Loigu talu andmed

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| asukoht | Harju maakond, Saue Vald, Loigu talu | | | | | | | |
| | 59°12´55´´N 24°34´04´´E | | | | | | | |
| kuupäev | 02.11.2018 | | | | | | | |
| ilmastik | Kerge vihmasadu; uduvihm | | | | | | | |
| Muld | K: rähkne saviliiv | | | | | | | |
| Varras | MV2 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | A | B | C | AB | AC | BC | ABC | |
| | 825 | 840 | 1024 | 451 | 493 | 478 | 336 | |
| | 930 | 884 | 844 | 490 | 477 | 448 | 332 | |
| | 1300 | 888 | 921 | 565 | 574 | 469 | 373 | |
| | 839 | 901 | 944 | 478 | 480 | 480 | 342 | |
| | 1129 | 828 | 1047 | 515 | 582 | 476 | 366 | |
| | 1015 | 937 | 910 | 523 | 522 | 480 | 359 | |
| | 1096 | 946 | 1416 | 541 | 662 | 586 | 416 | |
| | 877 | 1040 | 943 | 508 | 497 | 515 | 361 | |
| | 929 | 1064 | 843 | 533 | 485 | 489 | 357 | |
| | 810 | 1162 | 802 | 511 | 447 | 494 | 345 | |
| | 1430 | 1815 | 1050 | 837 | 644 | 681 | 495 | |
| | 953 | 1162 | 915 | 562 | 508 | 528 | 377 | |
| | 962 | 969 | 901 | 526 | 505 | 485 | 358 | |
| | 1189 | 914 | 1238 | 553 | 647 | 542 | 406 | |
| | 1122 | 1006 | 1216 | 565 | 630 | 565 | 416 | |
| | 885 | 996 | 1300 | 496 | 555 | 568 | 378 | |
| | 707 | 1300 | 1281 | 490 | 486 | 660 | 375 | |
| | 882 | 1085 | 1134 | 524 | 549 | 599 | 390 | |
| | 1107 | 1187 | 1258 | 596 | 608 | 598 | 420 | |
| | 930 | 1137 | 1041 | 569 | 531 | 584 | 397 | |
| keskmine | 995.9 | 1053.1 | 1051.4 | 541.7 | 544.1 | 536.3 | 380 | |
| standardhälbe | 178 | 220.4 | 179.2 | 78.1 | 65.5 | 66.3 | 38 | |
| min | 707 | 828 | 802 | 451 | 447 | 448 | 332 | |
| max | 1430 | 1815 | 1416 | 837 | 662 | 681 | 495 | |
| | | | | | | | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 varda keskmine | 1033.4 | 2 MV keskmise langus võrreldes 1 MV | 47.7% |
| 1 varda standardhälve | 192.1 | 2 MV standardhälve langus võrreldes 1 MV | 64% |
| 2 varda keskmine | 540.7 | 3 MV keskmise langus võrreldes 1 MV | 63.2% |
| 2 varda standardhälve | 69.1 | 3 MV standardhälve langus võrreldes 1 MV | 80.2% |
| 3 varda keskmine | 380 | 3 MV keskmise langus võrreldes 2 MV | 29.7% |
| 3 varda standardhälve | 38 | 3 MV standardhälve langus võrreldes 2 MV | 45% |

## Lisa 4 Teise etapi Tuula/Pällu andmed

| asukoht | Harju maakond, Pällu/Tuula | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N 59°14’59” E 24°27’18” | | | | | | | |
| kuupäev | 04.11.2018 | | | | | | | |
| ilmastik | sademed puudusid (maapind märg) | | | | | | | |
| Muld | M’’: õhuke madalsoomuld | | | | | | | |
| Varras | MV2 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | A | B | C | AB | AC | BC | ABC | |
| | 418 | 427 | 396 | 222 | 215 | 212 | 149.2 | |
| | 400 | 416 | 375 | 216 | 205 | 204 | 144.1 | |
| | 454 | 460 | 418 | 240 | 230 | 225 | 159.8 | |
| | 434 | 417 | 448 | 224 | 233 | 222 | 156.5 | |
| | 444 | 328 | 420 | 202 | 228 | 190.1 | 143.2 | |
| | 406 | 404 | 393 | 216 | 212 | 206 | 147.4 | |
| | 503 | 523 | 410 | 270 | 238 | 239 | 171.1 | |
| | 548 | 597 | 366 | 297 | 232 | 234 | 173.6 | |
| | 334 | 277 | 276 | 154.3 | 153.3 | 149.5 | 109.2 | |
| | 299 | 324 | 288 | 180.2 | 168 | 145.1 | 121.3 | |
| | 269 | 263 | 270 | 154.9 | 156.3 | 160.4 | 110.1 | |
| | 256 | 251 | 288 | 144.3 | 154.6 | 141 | 107.5 | |
| | 294 | 252 | 321 | 141.2 | 158 | 142.2 | 108.9 | |
| | 263 | 275 | 301 | 156.1 | 164.9 | 152.2 | 114.5 | |
| | 286 | 283 | 258 | 150.6 | 145.9 | 143.9 | 107.6 | |
| keskmine | 373.9 | 366.5 | 348.5 | 197.9 | 192.9 | 184.4 | 134.9 | |
| standardhälbe | 94.1 | 107 | 64.8 | 48.4 | 35.8 | 37.6 | 24.6 | |
| min | 256 | 251 | 258 | 141.2 | 145.9 | 141 | 107.5 | |
| max | 548 | 597 | 448 | 297 | 238 | 239 | 173.6 | |
| | | | | | | | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 varda keskmine | 363 | 2 MV keskmise langus võrreldes 1 MV | 47.2% |
| 1 varda standardhälve | 89 | 2 MV standardhälve langus võrreldes 1 MV | 54.5% |
| 2 varda keskmine | 191.8 | 3 MV keskmise langus võrreldes 1 MV | 62.8% |
| 2 varda standardhälve | 40.5 | 3 MV standardhälve langus võrreldes 1 MV | 72.4% |
| 3 varda keskmine | 134.9 | 3 MV keskmise langus võrreldes 2 MV | 29.6% |
| 3 varda standardhälve | 24.6 | 3 MV standardhälve langus võrreldes 2 MV | 39.3% |

**Lisa 5 Teise etapi sügavuste erinevuse tabel**

| asukoht | Harju maakond, Pällu/Tuula | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | N 59°14’59” E 24°27’18” | | | | | |
| kuupäev | 04.11.2018 | | | | | |
| ilmastik | sademed puudusid (maapind märg) | | | | | |
| Muld | M’’: õhuke madalsoomuld | | | | | |
| Varras | MV2 | | | | | |
| | | | | | | |
| | 1/3 | 2/3 | 1 | | | |
| | 1142 | 591 | 418 | | | |
| | 796 | 511 | 427 | | | |
| | 803 | 532 | 396 | | | |
| | 771 | 509 | 400 | | | |
| | 766 | 518 | 416 | | | |
| | 739 | 501 | 375 | | | |
| | 972 | 626 | 454 | | | |
| | 1010 | 623 | 460 | | | |
| | 727 | 566 | 418 | | | |
| | 842 | 573 | 434 | | | |
| | 767 | 595 | 417 | | | |
| | 657 | 546 | 448 | | | |
| | 893 | 583 | 444 | | | |
| | 1044 | 496 | 328 | | | |
| | 669 | 494 | 420 | | | |
| | 700 | 544 | 406 | | | |
| | 798 | 512 | 404 | | | |
| | 680 | 512 | 393 | | | |
| | 743 | 507 | 410 | | | |
| | 949 | 648 | 503 | | | |
| keskmine | 823.4 | 549.4 | 418.6 | | | |
| standardhälve | 135.6 | 48.2 | 35.5 | | | |
| min | 657 | 494 | 328 | | | |
| max | 1142 | 648 | 503 | | | |
| | | | | | | |
| | | | | keskmine | standardhälbe | |
| kahanemis protsent 1/3 ja 2/3 vahel | | | | 33.3% | 64.5% | |
| kahanemis protsent 1/3 ja 1 vahel | | | | 49.2% | 73.8% | |
| kahanemis protsent 2/3 ja 1 vahel | | | | 23.8% | 26.2% | |