



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu kolledž

**ERINEVATE LORA KALDEANDURITE
KASUTATAVUSE ANALÜÜS METSAROHKES
KESKKONNAS SMARTPOLE NÄITEL**

**USABILITY ANALYSIS OF DIFFERENT LORA TILT
SENSORS IN FORREST ENVIRONMENTS EXAMPLE OF
SMARTPOLE**

RAKENDUSKÕRGHARIDUSTÖÖ

Üliõpilane: Hendrik Hütt

Üliõpilaskood 178481EDTR

Juhendaja: Sven Oras, lektor

Tartu 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

mai 2022.a

Autor: Hendrik Hütt (*allkiri*)

Töö vastab rakenduskõrgharidustöö esitatud nõuetele

mai 2022.a

Juhendaja: Sven Oras (*allkiri*)

Kaitsmisele lubatud

mai 2022.a

Kaitsmiskomisjoni esimees: Helle Hallik (*allkiri*)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Hendrik Hütt (sünnikuupäev: 05.11.1997)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „ERINEVATE LORA KALDEANDURITE KASUTATAVUSE ANALÜÜS METSAROHKES KESKKONNAS SMARTPOLE NÄITEL“,

mille juhendaja on Sven Oras,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

(allkiri)

mai 2022.a

TALTECH TARTU KOLLEDŽ

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Hendrik Hütt 178481EDTR

Õppekava, peeriala: EDTR17/17 – Telemaatika ja arukad süsteemid

Juhendaja(d): Lektor, Sven Oras

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Erinevate LoRa kaldeandurite kasutatavuse analüüs metsarohkes keskkonnas SmartPole näitel

(inglise keeles) Usability analysis of different LoRa tilt sensors in forrest environments example of SmartPole

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida, kuidas mõjutab metsarohke keskkond LoRa kaldeandurite side- ja andmeedastust
2. Hinnata, kuidas erinevad keskkonnamuutujad mõjutavad LoRa sidevõrgu leviulatust, kõrvutades sideandmeid MyMaps kaardirakendusega
3. Välja tuua erinevad side optimeerimise võimalusi metsarohkes keskkonnas sidekvaliteedi tõstmiseks

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	LoRaWAN sidetehnoloogia ja LoRa seadmetega tutvumine	20.03.22
2.	SmartPole projekti uurimine ja andmete töötlus Excelis	05.04.22
3.	LoRa tugijaamade ja andurite lisamine Google MyMaps kaardikihile ning nende tõlgendamine	18.04.22

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 20. mai 2022.a

Üliõpilane: Hendrik Hütt (allkiri) mai 2022.a

Juhendaja: Sven Oras (allkiri) mai 2022.a

Programmijuht: Helle Hallik (allkiri) mai 2022.a

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISUKORD	6
EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
SISSEJUHATUS	9
1 SMARTPOLE	10
2 LPWAN ÜLEVAADE	13
2.1 LoRaWAN	15
2.2 Tehnilised parameetrid	19
2.3 Erinevad kasutusjuhud	20
3 METOODIKA	21
3.1 Andurite ülevaade	21
3.1.1 SolidusTech	22
3.1.2 RadioBridge	23
3.1.3 NetOP	24
3.2 Asukohad	25
3.2.1 Kutja	26
3.2.2 Virtsjärve	27
3.2.3 Agali	28
4 TULEMUSED	30
4.1 Sideedastused	30
4.1.1 Agali	Tõrge! Järjehoidjat pole määratletud.
4.2 Mõõtmiste sõnumid	38
4.3 Järeldused	40
KOKKUVÕTE	42
SUMMARY	43
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	44

EESSÕNA

Antud rakenduskõrgharidustöö on sõnastatud töö autori Hendrik Hütt algatusel. Töös kasutatud põhilised algandmed pärinevad Enefit Idea Hub'il osalenud SmartPole pilootprojektist, mis on autoriga jagatud usalduses.

Täna Rain Kõivu aitamast põhiliste algandmete jagamise, kasutamise ja selgitamisega.

Asjade internet, LPWAN, LoRa, elektrivõrk, rakenduskõrgharidustöö

Lühendite ja tähiste loetelu

Avg – keskmine (ingl k *average*)

dBm[dBmW] – detsibellmillivatt, väljendatakse võimsust detsibellides (dB) baasvõimsuse 1 millivatt (mW) suhtes

IoT - asjade internet (ingl k *Internet of Things*)

ISM – tööstuslik, teaduslik ja meditsiiniline (ingl k *Industrial, Scientific and Medical*)

LoRa – sidetehnoloogia (ingl k *Long Range*)

LPWAN – madala energiatarbe ja laia ulatusega traadita sidevõrk (ingl k *Low Power Wide Area Network*)

3GPP – 3rd Generation Partnership Project

RSSI – signaalitugevus (ingl k *Received Signal Strength Indication*)

SF – laotustegur (ingl k *Spreading factor*)

SNR – signaali-müra suhe (ingl k *Signal-to-Noise Ratio*)

ToA – eetriaeg (ingl k *Time-on-Air*)

PoE – võrgukaabel (ingl k *Power over Ethernet*)

kV – elektripinge ühik

kb/s – kilobaiti sekundis

SISSEJUHATUS

Asjade interneti (ingl k Internet of Things) ehk IoT turg laieneb eksponentsiaalselt tingituna suurest nõudlusest nutikate mõõtmiste, varade jälgimise, kaugseire ja muude tarkade lahenduste järele, mida kasutatakse tuleviku linnades, tootvates tööstustes ja põllumajanduses. Ericssoni läbi viidud asjade interneti turu-uuringu järgi prognoositakse, et IoT laivõrk kasvab 400 miljonilt ühendatud seadmelt 2016. aastal 2,1 miljardile seadmeni 2022. aastaks. [1]

Oluliseks on muutunud suuremahulised andmekorjed ja seadmete juhtimise rakendused distantsilt. Asjade interneti arenedes pööratakse aina rohkem tähelepanu võrkudele, mis suudavad pakkuda kaugmaa sideühendust akutoitel seadmega. Traadita andmeside tehnoloogiate hulgas on huvi kogumas uus klass madala volutarbe ja laia ulatusega sidetehnoloogiaid ehk LPWAN (ingl k Low Power Wide Area Network). Antud tehnoloogiad põhinevad raadiosidel ja loodud eelkõige andmete kogumiseks distantsilt, ilma püsiva toiteteta.

Ühte tuntumamat LPWAN sidetehnoloogiat, LoRaWAN, testiti Eestis SmartPole projekti sees, mille idee seisneb elektrimastide küljes olevate LoRa kaldeandurite abil jälgida reaajas mastide ja elektriliinide olukorda. Tavapärane elektriliinide ja -mastide kontrollimine on kasutades aja- ja ressursikulukas, mistõttu tasub alternatiivina kaaluda asjade internetiga kaasnevate võimaluste rakendamist. Edukaks LoRa sidevõrgu kasutusele võtmiseks tuleb esmalt katsetada, kuidas saab antud sidetehnoloogia keerulistes tingimustes hakkama. Arvestada tuleb paljude muutujatega, mis võivad mõjutada LoRa seadme eluiga ja sideühenduse kvaliteeti.

Uurimistöö eesmärk on analüüsida, kuidas mõjutab metsarohke keskkond erinevate LoRa kaldeandurite side- ja andmeedastust ning hinnata, kuidas erinevad keskkonnamuutujad mõjutavad LoRa sidevõrgu toimimist. Lisaks avaldatakse saadud tulemuste põhjal arvamust, milliseid side optimeerimise meetodeid saab LoRa puhul rakendada, et metsastes tingimustes sidekvaliteeti tõsta.

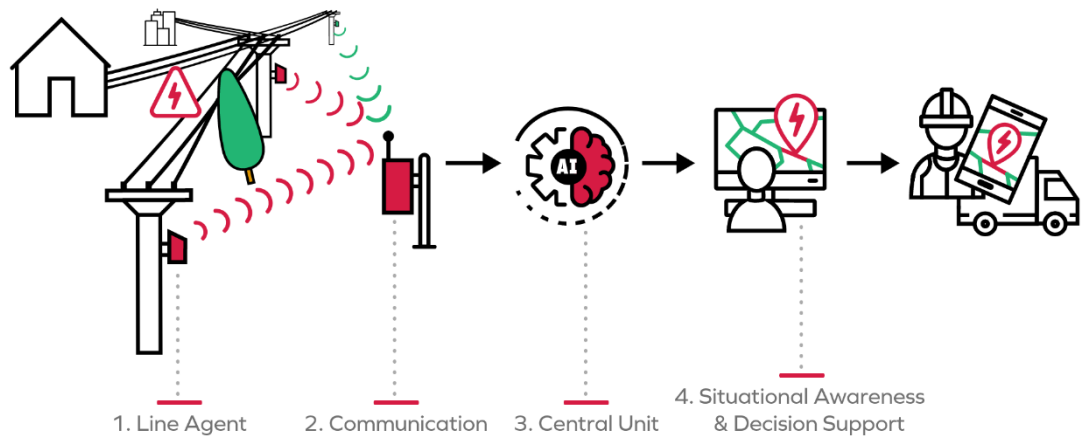
1 SMARTPOLE

Elektri kohalettoimetamise ja elektrivõrgu haldamisega tegelev Elektrilevi vastutab Eestis 95% elektrivõrgu toimimise eest, mis on ka Eesti suurim võrguettevõtte. Elektrilevi hooldab ja uuendab 63 000 kilomeetrit elektriliine ning 25 300 alajaama, et tagada elektrivarustus üle 533 000 elektrivõrguteenuse kliendile. Selleks, et võimalikult paljudele tarbijatele rikke tekkimisel taastada elektrivarustus vähese aja jooksul, investeerib Elektrilevi pidevalt ilmastikukindla võrgu ehitamisse. 2022.aastal investeerib Elektrilevi elektrivõrgu töökindluse parandamiseks ligi 50 miljonit eurot. Planeeritavate investeeringute hulgas on näiteks Valgamaal paiknev Tõrva-Koorküla fiidri rekonstrueerimine, kogumaksumus 945 307 eurot, mille liinilõigu osal testiti ka SmartPole pilootprojekti siseselt LoRa andureid. Fiidri all mõeldakse toiteliini, mis on mõeldud elektrienergia ülekandmiseks ühest jaotusseadmest teise. [2]

Eesti Energia konkursi Enefit Idea hub – The Pitch raames otsitakse igal aastal innovaatilisi ideid uute teenuste ja neid toetavate lahenduste väljatöötamiseks kolmes suures valdkonnas: nutikas transport, teenused ja tark linn. Konkursile esitati 222 ideed, millest populaarseimaks osutus teenuste valdkond, kuhu esitati kokku 90 ideed. Tarka linna soovis panustada 76 ja nutikasse transporti 56 ideed. 2019. aastal toimunud konkursil pääses 10 finalistit sekka ka SmartPole, et arendada oma ideed koostöös Eesti Energiaga. [3]

SmartPole eesmärk on luua eelhoitussüsteem, mis võimaldab elektrimastide küljes olevate spetsiaalsete andurite abil jälgida mastide olukorda reaajas ja reageerida potentsiaalsetele elektririketele. Rikete täpne asukoha määramine võimaldab tehnikutel vähema aja jooksul otse sündmuskohale jõuda, et elektrita jäänud majapidamised kiiremini voolu tagasi saaks. Vajadusel ka elektriposti ennetavalt välja vahetada, kui see on vertikaaltelje suhtes juba liialt kaldus. [3]

2022. aasta seisuga veel ükski Eestis tegutsev võrguettevõtte pole SmartPole sarnast lahendust kasutusele võtnud. Siiski maailmas leidub ettevõtteid, kes juba pakuvad nutika elektrivõrgu seire lahendust. 2009. aastal asutatud Rootsi iduettevõtte Exeri on hiljuti valmis saanud terviklahenduse, mis on ligilähedane SmartPole ideele. Mastide seisukorra hindamiseks ja rikete tuvastamiseks on kasutusele võetud ka tehisintellektil põhinevad algoritmid, mis annab kasutajale parema ülevaate võrgus toimuvast. Exeri lahenduse tehniline spetsifikatsioon ei ole avalikult saadaval. Alloleval joonisel (Joonis 1.1) on kujutatud Exeri üldistatud lahendus, millele sisuliselt vastab ka SmartPole kontseptsioon. [4]



Joonis 1.1. Exeri SGS (smart grid surveillance) lahendus [4]

„Energiamajanduse arengukava seab 2030. aastaks võrguettevõtetele eesmärgi, et jaotusvõrgus katkestuste keskmine kogukestus minutites ühe tarbimiskoha kohta aastas ei ületa 90 minutit ja see tuleb saavutada ilma täiendava koormuseta tarbijatariifile [19]. Järjepidevad investeeringud elektrivõrku on näiteks Tartumaal kümne aastaga vähendanud rikete arvu enam kui kaks korda. 2011. aastal oli maakonnas rikkeid 2596 ja 2019. aastal 1241. Suurem eesmärk on Elektrilevil 2023. aastaks 77 protsenti võrgust ilmastikukindlaks muuta, mis aitab keerulisemate ilmaolude korral vähendada katkestust kogevate klientide hulka. Vähendamaks ilmastikunähtuste mõju lõppklientidele, paigaldatakse maakaablit ja isoleeritakse õhuliine. Lisaks panustatakse tugevalt ka jaotusvõrgu automatiseerimisse. [5][6]

Elektrilevi on juba kasutusele võtnud innovaatilise tarkvõrgu (*smart grid*) lahenduse, mille abil on võimalik elektrikatkestusi ennetada ja võrgu toimimist veelgi efektiivsemaks muuta. Elektritarbija juures paiknev kaugloetav arvesti edastab peale elektritarbimise mõõteandmete ka informatsiooni võrgu seisukorra kohta. Kui madalpingevõrk (<0,4 kV) annab olukorra kohta detailset infot siis keskpinge (3-20 kV) seire näitab võrgu osade toimimist ainult laiemas vaates, mistõttu keskpingeliinide puhul rikke täpset asukohta näitamist antud lahendus ei toeta. [7]

17. ja 20. jaanuaril 2022 puhunud tormituuled, mis ületasid kohati 33 m/s, põhjustasid elektrikatkestusi paljudele tarbijatele. Tippajal töötas üle Eesti umbes 50 brigaadi võrguelektrikke ja operatiivtöötajaid, kes tegelesid rikete lokaliseerimise ja ümberlülitustega. Tuulepuhangud tõid kaasa rohkelt elektrikatkestusi, kõige enam Saaremaal, Hiiumaal, Harjumaal ja Lääne-Virumaal, kus katkestusi koges enam kui 85 000 klienti. Elektrilevi taastas tormi ajal 65% elektrikatkestustest kahe tunniga, kuue tunniga sai elektri tagasi 90% klientidest. Ulatuslike elektrikatkestuste ajal kaasatakse

rikete kiiremaks leidmiseks ka droone. Kui drooni pole käepärast võtta või ei saa keeruliste ilmastikuolude tõttu kasutada, tuleb võrguelektrikutel läbi jalutada kilomeetreid liinikoridore võimaliku rikkekoha leidmiseks. Automatiseerides rikete kiire ja täpse tuvastamise, saavad elektrivõrgu spetsialistid oma aega efektiivsemalt kasutada ja fokuseerida rikete kõrvaldamisele, mitte otsimisele. [5]

IoT lahenduse, nagu SmartPole, edukaks lanseerimiseks on vaja ideed kõigepealt testida ja testandmeid analüüsida, et leida parim lahendus ja tagada projekti hilisemas faasis automatiseeritud süsteemi töökindlus. Alustada tuleks testperioodi läbiviimisega, et mõista, kui hästi testitavad seadmed ettemääratud keskkonnas toime tulevad. Lisaks on igati mõistlik kasutada teenusepakkujate poolt pakutavaid IoT platvorme, mille sisse on põhilised funktsioonid juba implementeeritud.

2 LPWAN ÜLEVAADE

Eesti üks suurimaid asjade interneti (ingl. k. IoT – Internet of Things) valdkonnaga tegelev ettevõtte Levikom on öelnud asjade interneti kohta järgmiselt: „Asjade internet on võrgustik, kus omavahel on turvalises ühenduses erinevad seadmed, süsteemid ja rakendused, mis suudavad iseseisvalt sensorite abil koguda, salvestada, töödelda ja omavahel vahetada informatsiooni, mida saab kasutada mitmete protsesside mõõtmiseks, jälgimiseks ja juhtimiseks paljudes eluvaldkondades.“ [8]

Asjade interneti tähenduses peab saama füüsilist maailma vastava sensori abil mõõta ja selleks on vaja seadet, mille saab internetis identifitseerida ja selle olekut seal edastada. Suurel hulgal ühendatakse järk-järgult internetti erinevaid suuremaid, näiteks hooned ja sõidukid, ning väiksemaid seadmeid, nagu nutiseadmed ja arvestid, et lihtsustada inimeste elu ja muuta igapäevategevused tõhusamaks ja turvalisemaks. Asjade internet on kiiresti arenev tehnoloogiline trend, millega on võimalik mugavalt ja ökonoomselt digitaliseerida füüsilist maailma. [9]

Huvi IoT seadmete järele on viimaste aastate jooksul kasvanud märgatava kiirusega. See on loonud nõudluse uutele kommunikatsiooni standarditele, mille tehnoloogiliseks eripäraks on madal energiatarbimine ja lai leviulatus. Madala võimsusega laia ulatusega sidevõrk ehk LPWAN kirjeldab raadiotehnoloogiate klassi, mida kasutatakse traadita kaugside jaoks. LPWAN võimaldab anduritel kasutada oluliselt vähem energiat andmete edastamisel, lisaks võimaldab see kasutada rohkem seadmeid suurema leviala ulatuses võrreldes enamlevinud mobiilside tehnoloogiatega. [10]

Võrreldes teiste traadita sidetehnoloogiatega nagu Wi-Fi (ingl k. *Wireless Fidelity*) ja Bluetooth, mis edastavad suuri andmepakette lühikeste vahemaade tagant, edastavad LPWAN-id andmeid palju väiksema andmesidekiirusega ja kaugemale (Joonis 2.1). LPWAN tehnoloogiad on spetsiaalselt loodud kaugmaa andmeedastuseks madalatel bitikiirustel, mis annab võimaluse akutoitega seadmetel optimaalsetes tingimustes kesta rohkem kui 10 aastat ja edukalt andmeid edastada isegi kuni 30 km kaugusele [11]. Varasemalt põhiliselt kasutuses olnud mobiilsidetehnoloogiad GSM (ingl k. Global System for Mobile) ehk globaalne mobiilsidesüsteem ja GSMi järeltulijad 3G ja 4G soovitakse asendada just nende kõrgema hinna ja -energiatarbe tõttu. [12]



Joonis 2.1. Leviala ja aku eluiga seos erinevate sidetehnoloogiate klassidega [9]

LPWAN tehnoloogiad on olemas nii mobiilsidevõrgu jaoks kui ka litsentseerimata raadiosagedusaladele (*ISM radio band*), mõlemal on nii eeliseid kui ka piiranguid. Need LPWAN tehnoloogiad, mis töötavad alla 1 GHz ISM-sagedusalas ja koosnevad litsentseerimata sagedusribadest, on kaks suuremat eelist. Alla 1 GHz sagedusala on vähem koormatud kui 2,4 ja 5 GHz sagedusalad ning selle kasutamisega ei kaasne lisatasusid. Kuid ISM sagedusalade kasutamine nõuab, et seadmed kasutavad kuni 1% eetriaega päevas. Kehtib ka 1% töötüsikli piirang, kus seade peab ootama teatud aja enne järgmist sideseanssi, mis on vajalik, et sagedusala oleks kättesaadav ka paljudele teistele seadmetele LoRa võrgus. Lisaks on piiratud ka seadmete edastusvõimsus kuni 14 dBm-ni, mis limiteerib oluliselt seadmete edastava signaali kaugust ja läbilaskevõimet. Mobiilsidevõrgul põhinevad LPWAN tehnoloogiad võimaldavad seadmetel edastada töötüsikli piiranguta kuni 23 dBm edastusvõimsusega. See-eest litsentseeritud sagedusalade kasutamisega lisanduvad teenustasud, mida rakendavad kohalikud sideoperaatorid. [1]

Erinevaid IoT sidetehnoloogiaid saab eristada ka võrgu topoloogia alusel, millest suurem osa tänapäevastest tehnoloogiatest baseerub "*mesh*"-võrgu topoloogial (*mesh network*) ja tähtvõrgu topoloogial (*star network*). "*Mesh*"-võrgus on andurid omavahel ühendatud ja iga andur saab vastu võtta ja edasi saata ka teiste andurite andmeid. Paketid "hüppavad" ühelt seadmelt teiseni, kuni jõuavad sihtkohta. Antud lahendus on tuntud hea sidekvaliteedi ja töökindluse poolest, sest suudab vajadusel sideliiklust ümber suunata, kui mõni andur peaks ootamatult töötamise lõpetama. Teisest küljest on taolistel anduritel kehv leviulatus ja neid ei saa paigutada üksteisest liiga kaugemale, mistõttu ei ole mõistlik väga suurele alale "*mesh*"-võrku paigaldada. Lisaks tuleb arvestada, kui ühe anduri kaudu toimub tihedam andmeliiklus, siis võib selle seadme

aku võrreldes teiste kõrvalolevate anduritega kiiremini tühjaks saada. Tuntumad sidetehnoloogiad, mis kasutavad "mesh"-võrku on näiteks Zigbee, Z-Wave ja WirelessHART. [13]

Tähtvõrgus (*star network*) edastavad kõik andurid andmeid ainult kesksele tugijaamale ja andurite vahel andmeedastusi ei toimu. Erinevalt "mesh"-võrgust ei pea tähtvõrgus olevad andurid pidevalt võrku "kuulama", vaid saavad andmeid edastada ettemääratud ajaintervallide tagant ja ülejäänud aja veedavad unerežiimis. Tähtvõrgu topoloogiat kasutavad sellised tuntud LPWAN sidetehnoloogiad nagu LoRa, Nb-IoT ja SigFox. [13]

LPWAN võrgud on üldiselt ette nähtud seadmetele, mis vastavad järgnevatele nõuetele:

- Ühe-suunaline kommunikatsioon (anduri ja baasjaama vahel)
- Madal andmeedastus (umbes 10 baiti tunnis)
- Madal energiakasutus (aku tööiga umbes 10 aastat)
- Madalate kuludega (laiaulatuslikuks juurutamiseks) [14]

Järgnevates alapeatükkides antakse ülevaade LoRaWAN sidetehnoloogiast ja alternatiivsetest LPWAN tehnoloogiast. Lisaks võetakse kolme aktuaalseima LPWAN sidetehnoloogia (LoRa, NB-IoT ja SigFox) tehnilised parameetrid kokku tabelis X, et välja tuua olulisemaid erinevused tehnoloogiate vahel. LPWAN sidetehnoloogiate protokolle on palju rohkem, kuid siin töös välja tuuakse, aga nende tutvustamine ei ole töö eesmärki arvestades vajalik. Kõiki eelnimetatud sidetehnoloogiaid saab vabalt ka Eestis rakendada, olemas on nii vajalik infrastruktuur kui ka ametlikud teenusepakkujad. Sarnaselt Eestis laialdaselt pakutavale 4G mobiilsideteenusele on võimalik ka LPWAN sidetehnoloogiate kasutamiseks vajalikud lepingud litsentseeritud teenusepakkujatega sõlmida. Üldjuhul on teenusepakkuja kohustatud vastavalt lepingule teatud teeninduspiirkondades tagama piisava levi kvaliteedi teenuse tõrgeteta toimimiseks [15].

Viimases alapeatükis tuuakse esile mõned kasutusjuhud ja valdkonnad, kus juba praegu LPWAN tehnoloogiaid rakendatakse.

2.1 LoRaWAN

LoRa (tuletatud Long Range) on nimetus füüsilisele kihile, mis on patenteeritud USA ettevõtte Semtech poolt ja mida haldab avatud rahvusvaheline mittetulundusühendus

LoRa Alliance. Mainitud organisatsiooni liikmeteks on ettevõtted, kelle ühine eesmärk on toetada LoRa ökosüsteemis IoT lahenduste juurutamist kõikide soovijate jaoks. LoRaWAN (ingl k Long Range Wide Area Network) on sellele loodud avatud kommunikatsiooni protokoll, mis defineerib üldise võrguarhitektuuri. [16]

LoRa on võimeline moduleerima väikse võimsusega laia ala võrku, kasutades signaali edastamiseks CSS (*Chirp Spread Spectrum*) spektrilaotuse modulatsiooni. LoRa saab konfigurida kolme erineva parameetriga – laotustegur SF (*Spreading Factor*), kodeerimise kiirus CR (*Coding Rate*) ja ribalaius BW (*Bandwidth*). Antud parameetritega saab muuta näiteks andmeedastuskiirust ja edastuskaugust. [16]

Laotustegurit ehk SF-i saab iseloomustada kui sagedusnihkega sirtsmodulatsiooni, kus bitte kantakse edasi lühikeste "sirtsudega" ehk väikeste tõusude ja langustega sageduses. LoRa võimaldab seadmetel valida laotusteguri adaptiivselt, arvestades ka signaal-müra suhet (SNR), et saadetakse signaal jõuaks isegi kehvemates sideoludes võimalikult kaugemale ja seda andmekiiruse arvelt. Arvestama peab sellega, et iga SF taseme tõusuga keskmine eetriaeg peaaegu kahekordistub. [17]

LoRa puhul kasutatakse laotustegurit ehk SF-i vahemikus 7 kuni 12. SF pakub kompromissi andmeedastuskiiruse ja edastuskauguse vahel. Laotustegur määrab aja, mis kulub ühe sümboli saatmiseks ehk suurendades laotustegurit on saadetakse "sirtsud" kestavad kauem ja sellega ka andmeedastuskiirus väheneb. Teoreetiliselt suudavad LoRa seadmed dekodeerida signaale isegi -123 dBm kuni -136 dBm signaalitugevustel, aga reaalses tingimustes on see -120 dBm ja natuke peale. [1]

LoRaWAN avalik sideprotokoll on lahti kirjeldatud LoRaWANi spetsifikatsioonis, mille kohaselt on võimalik kasutada kolme erinevat töörežiimi, mis pakuvad erinevaid võimalusi volutarve ja latentsi vähendamiseks:

- A-klass on kõige energiasäästlikum töörežiim ja seadmed on tavaliselt akutoitega. Toimib ALOHA meetodil – seade teeb sideedastusi võrku ilma, et peaks kinnitust ootama ning ei sõltu allalink sõnumitest. Seadmed võtavad infot vastu ainult üleslink saatele järgnevas kitsas ajaaknas ja ülejäänud aja veedavad energiasäästlikus olekus.
- B-klass on A-klassi funktsionaalsustega, kuid võimaldab eelnevalt kokku leppida seadme kättesaadavuse ajaaknad, kulutades rohkem energiat võrgu perioodilisele kuulamisele.
- C-klass on kõige energiakulukam töörežiim, mis vajab pidevat toidet. C-klass kuulab pidevat võrku ja mõlemapoolne suhtlus anduri ja tugijaama vahel võib toimuda igal ajal.

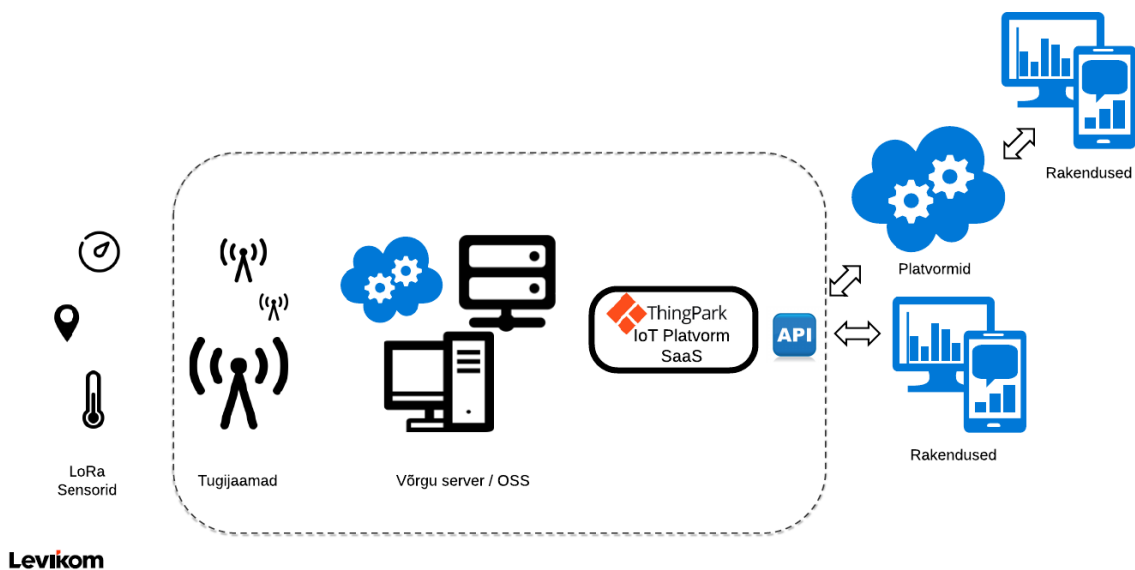
Esimene ja suurim LoRaWAN teenusvõrku Eestis pakub Levikomi NORAnet, mille tugijaamad asuvad pea kõikides maakondades. Alternatiivselt saab kasutada LoRa kogukonnal põhinevat The Things Network (TTN) võrku. The Things Network on tasuta LoRaWANi teenus mille leviala pakkujateks on LoRa entusiastid üle maailma.

LoRaWAN võrgus pole andurid seotud ühegi kindla tugijaamaga. Anduri edastatud sõnum võetakse vastu kõikide levialas asuvate tugijaamade poolt ja iga tugijaam edastab saadud paketi võrguserverile, mis filtreerib välja üleliigsed paketid. Lisaks kontrollitakse võrguserveris turvavõtmed ja kinnitatakse järgmiseks eetriaajaks optimaalseim andmesidekiirus parima sideühenduse pakkunud tugijaama järgi. Ka allalink (*downlink*) saadetakse just selle tugijaama kaudu, millel oli viimase sideseansi ajal parim ühendus anduriga. [16]

Igaüks neist edastab vastuvõetud paketi tugijaamast mõne võrguühenduse kaudu (kas Etherneti, 4G või Wi-Fi kaudu) võrgu serverisse. [9] Võrguserverid suunavad sõnumid lõppseadmetest vastavasse rakendusse ja tagasi.

LoRa võrgu arhitektuur (Joonis 2.2) koosneb neljast põhiosast:

- LoRa andurid (*end node*), mille sensorid teevad mõõtmisi ja edastavad saadud tulemused tugijaamale.
- Tugijaam (*gateway*) on ruuterid LoRa seadmete ja võrguserveri vahel, mis edastavad mõne võrguühenduse kaudu nagu Ethernet või 4G andurilt saadud andmed edasi pilvepõhisesse võrguserverisse.
- Võrguserver ehk OSS (*Operation Support System*) vastutab andmete marsruutimise eest seadmete ja rakenduste vahel. Võrguserverisse edastatakse kõik andmed, mida andurid saatsid läbi erinevate tugijaamade. Andmeid analüüsitakse ja filtreeritakse, võttes arvesse andmeedastuskiirusi ja jättes alles ainult parima sidekvaliteediga andmed. Lisaks tuvastab võrguserver, kas saadud andmed tuleb edasi saata API protokolliga kaudu rakendusserverisse.
- Rakendusserver (*application server*), võtab võrguserverist vastu andmed, mis struktureeritakse, töödeldakse ja visualiseeritakse kasutajale vajalikul viisil. [13]



Joonis 2.2. LoRa võrgu arhitektuur

Mõned LoRaWANile iseloomulikud omadused, mille abil saab eristada muudest LPWAN sidetehnoloogiatest:

- Kommunikatsioon on kahe-suunaline ja piiramatult (arvestada tuleb ISM sagedusala regulatsioone)
- GPS'ita asukoha määramine TDoA (Time Difference of Arrival) abil, mida on võimalik teha kolme või enama vastuvõtjaga. Algoritm trianguleerib seadme asukoha arvutades selle välja vastu võetud signaalide kohalejõudmisaja järgi.
- Müügil lai valik erinevate lahenduste jaoks mõeldud tugijaamasid nii välitingimustesse kui siseruumides kasutamiseks.
- Võimekus luua vastavalt vajadusele kas avalik võrk või privaatvõrk.
- ADR (Adaptive Data Rate) võimaldab lisada tugijaamasid juurde, et tõsta olemasolevate andurite andmeedastuskiirust ja luua hea ühendus ka uute anduritega, kui on vaja võrku skaleerida. ADR optimeerib laotusteguri (SF) ja seeläbi ToA, mis aitab vähendada eetriaega [16]

2.2 Tehnilised parameetrid

Tabelis (Tabel 2.1) tõstetakse esile ja võrreldakse tehniliste parameetrite järgi kolme põhilist juba eelnevalt mainitud LPWAN tehnoloogiat, mida maailmas kõige laialdasemalt kasutatakse.

Tabel 2.1. LPWAN sidetehnoloogiate tehnilised parameetrid

Parameeter	LoRaWAN	NB-IoT	Sigfox
Raadiosagedusalad	Litsentseerimata ISM sagedusalad. 868 MHz Euroopas (mujal maailmas erinev)	Litsentseeritud LTE sagedusalad	Litsentseerimata ISM sagedusalad. 868 MHz Euroopas (mujal maailmas erinev)
Ribalaius	125 kHz või 250 kHz	200 kHz	100 kHz
Modulatsioon	SS Chirp	QPSK	BPSK
Maksimaalne andmeedastuskiirus	50 kb/s	200 kb/s	100 kb/s
Maksimaalne sõnumi pikkus	243 baiti	1600 baiti	12 baiti (üleslink), 8 baiti (allalink)
Lubatud eetriaeg (aeg, mille jooksul üks seade võib ööpäevas eetris olla)	1 %	Piiramatu	1 %
Standardi organisatsioon	LoRa-Alliance	3GPP	Sigfox
Sideulatus (baasjaama ja seadme vahel)	5 km (linn), 20 km (linnaväline) *sõltub kasutatavast baasjaamast	1 km (linn), 10 km (linnaväline)	10 km (linn), 40 km (linnaväline)

Kiibi hulgihind	3-5€	>20€	<2€
-----------------	------	------	-----

[10]

2.3 Erinevad kasutusjuhud

LPWAN tehnoloogiaid kasutatakse tänapäeval laialdaselt üle maailma erinevates paikades ja keskkondades, kus on vaja erinevaid andmeid koguda. Madala voolutarbe ja laia ulatusega sidevõrgu eelis seisneb selle lihtsas ülesseadmises ja ülalhoidmises ning seadmete hooldusvabaduses. Asjade interneti tehnoloogiaid saab edukalt kasutada ettevõtte või organisatsiooni protsesside digitaliseerimiseks ning seeläbi hoida kokku kulusid, tagada paremat kvaliteeti tootmises ningi tõsta juhtimise läbipaistvust ning kiirust.

Mida aeg edasi, seda rohkem integreeritakse LPWAN tehnoloogiaid erinevatesse valdkondadesse. Tööstusprotsesside käigus on võimalik koguda vajalikke andmeid, mille analüüsimisel saab muuta protsesse efektiivsemaks. Juba praegu kasutatakse LPWANI järgmistes asjade interneti kasutusvaldkondades:

- tark linn (smart city)
- tark keskkond (smart environment)
- tark energia (smart energy)
- tark tööstus (smart industry)

3 METOODIKA

Töö eesmärk on analüüsida, kuidas mõjutab metsarohke keskkond LoRa kaldeanduri side- ja andmeedastust, võttes arvesse anduri ja tugijaama vahelist kaugust, laotustegurit (SF) ja paketikadu. Lisaks võetakse arvesse ka anduri ja tugijaama kõrgus maapinnast ning anduri ja tugijaama vahelist otsenähtavust või selle puudumist.

Töös üritatakse vastata järgmistele küsimustele:

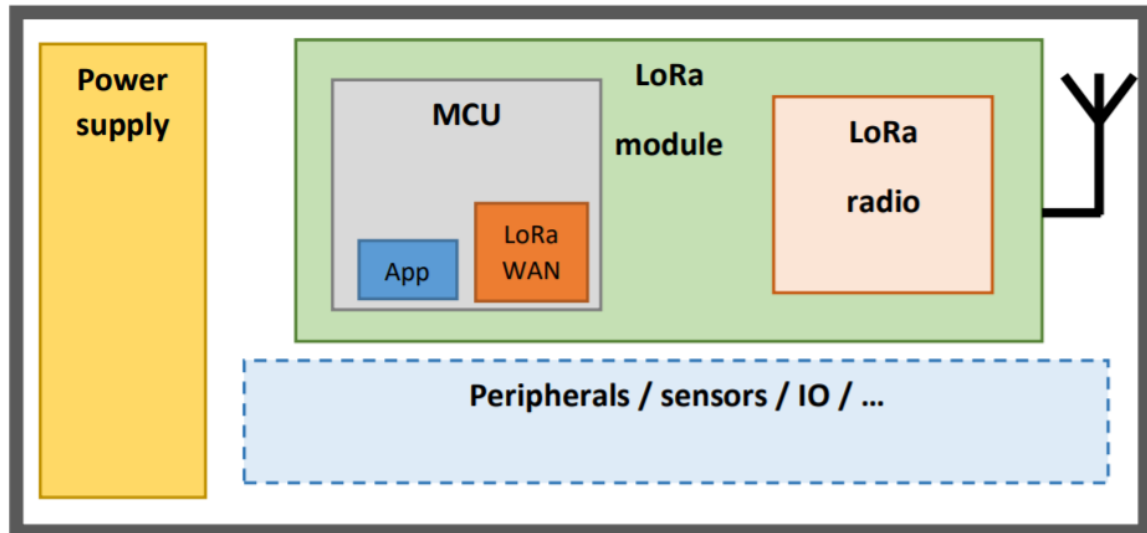
- Millised on jõudluse vaatenurgast vaadatuna praegused LoRa sidevõrgu kitsaskohad metsarohkes keskkonnas?
- Kuidas keskkond ja seadme asetus mõjutavad signaali tugevust anduri ja tugijaama vahel?
- Millised aspektid mõjutavad pakettide kadu anduri ja tugijaama vahel?

Metsarohke keskkonna all mõeldakse asulaväliseid tiheda taimestikuga alasid, kus põhilisteks side häirivateks faktoriteks on metspuud ja maapinna reljeefist tingitud künkad ja nõgusused. Lisaks saadud tulemuste põhjal avaldatakse arvamust, milliseid side optimeerimise meetodeid on mõistlik rakendada, et LoRa tehnoloogiat metsastes

LoRa kaldeandurite sideandmete analüüsimiseks ja järeltöötamiseks eksporditi ajavahemikus 23.12.2020 kuni 28.09.2021 ThingPark võrguserverisse edastanud seadmete sideandmed ühte CSV faili, mille uurimiseks ja töötlemiseks kasutati Microsoft Excel tabelitöötlusprogrammi. ThingPark on IoT SaaS platvorm, mille abil on võimalik hallata LPWAN sidevõrgus olevaid seadmeid. Saadud metaandmete tõlgendamiseks kasutati ThingPark Wireless ekspordifaili dokumentatsiooni [18]. Lisaks eksporditi WithTheGrid IoT platvormilt [20] andurite mõõteandmed.

3.1 Andurite ülevaade

LoRa andur koosneb kolmest põhilisest komponendist: toiteallikas (*power supply*), välisseade/sensor (*peripheral/sensor*) ja LoRa sidemoodul (*LoRa module*) (Joonis 3.1). Seadme ülimadala voolutarbe tõttu saab toiteallikana kasutada ka jaekaubandusest saadavaid AA tüüpi patareisid või laetavaid akusid. Välisseade või sensor kogub füüsilisest keskkonnast andmeid, teisendab need arvulisteks väärtusteks ja edastab LoRa sidemoodulile. LoRa moodul on üks seadme komponentidest, mis sisaldab endas mikrokontrollerit (MCU), LoRa mikrokiipi (*LoRa radio*) ja antenni. Mikrokontrolleris on seadme tarkvara seadistatud töötama LoRaWAN raadioside protokollile kohaselt, mis tagab mikrokontrolleri ja LoRa kiibi vahelise ühenduse. [21]



Joonis 3.1. LoRa anduri arhitektuur [21]

Järgnevalt tuuakse välja töös analüüsitud kaldeandurite tehnilised parameetrid.

3.1.1 SolidusTech

SolidusTech MiniUNI-ACC andur kasutab seadme kaldenurga arvutamiseks kiirendussensorit ja mõõdab kallet kolmel teljel (X, Y ja Z). Mainitud seade mõõdab iga telje kaldenurka vahemikus 0-90 kraadi. Seadme algoritmid arvutavad anduri telgede asendid läbi kiirenduse muutuse. Antud seade suudab tänu kiirendussensori kiirele reageerimisvõimele edukalt tuvastada ka järsku liikumist (*motion*) ja vibratsiooni. Seadmes kasutatakse RHF76-052 LoRaWAN sidemoodulit, millesse on integreeritud Semtech SX1276 LoRa kiip ja STM32L051/052 mikroprotsessor.

Solidustechi andurid on varustatud kahe SAFT LS-14500 3.6V 2.6Ah AA (LI-SOCI2) patareiga, mis on laialdaselt levinud sarnastes IoT andurites. Antud patareisid eristab teistest patareidest suurem energiatihedus, madal isetühjenemise määr (<1%/aastas) ja väga lai töötemperatuuri vahemik (-60 kuni 85 kraadi). Patareidega on rööbiti ühendatud ka superkondensaator, mille andmeid pole anduri dokumentatsioonis kajastatud. Superkondensaatori põhimõte on võtta ülekandesignaali edastamisega seotud koorumus enda peale, mis teoreetiliselt pikemas perspektiivis kulutab vähem patareisid ja seeläbi tõuseb ka anduri enda eluiga. Antud töös superkondensaatori mõjust üldisele energiakulule ei keskenduta. Andurites kasutatakse mitmesuunalist (*omnidirectional*) spiraalantenni, mis asetseb korpuse sees. SolidusTech kaldeanduri dokumentatsioon ei ole avalikult kättesaadav.



Joonis 3.2. SolidusTech kolmeteljeline LoRa kaldeandur

3.1.2 RadioBridge

RadioBridge RBS306-TILT-HP-EU on üheteljeline kaldeandur, mis kasutab kiirendussensorit kaldenurga arvutamiseks. RadioBridge kaldeandur mõõdab kaldenurka 0-180 kraadi vahel ja 0,1 kraadise täpsusega. Kaldenurga nullimine ja lävendite seadistamine on üle-õhu allalingi (*downlink*) kaudu konfigureeritav. Lisaks on seadme sisse integreeritud temperatuurisensor. Anduris kasutatakse Molex 105262 mitmesuunalist (*omnidirectional*) juhtmega painduvat antenni, mis on liimitud korpuse sisse. Seade suudab tehnilise kirjelduse järgi töötada -40 kuni 70 kraadises temperatuurivahemikus ja korpuse kaitseastmeks on märgitud IP65. RadioBridge andurid on varustatud kahe Panasonic CR123A 3V 1,55Ah CR Lithium patareiga. [22]



Joonis 3.3. RadioBridge üheteljeline LoRa kaldeandur

3.1.3 NetOP

NetOP 2 PLANE TILT SENSOR-LR on kaheteljeline (X ja Y) kaldeandur, mis kasutab kaldenurga arvutamiseks kaldesensorit. NetOP kaldeandur mõõdab kaldenurka +/-90 kraadi vahemikus ja 0,1 kraadise täpsusega. Anduris on kasutatud trükiplaadi sisest antenni. Leviulatuseks on märgitud kuni 15 km, aga ei ole täpsustatud, millise konfiguratsiooniga on selline leviulatus saavutatud. Seadmele on lisatud indikatsiooniks LED-tuli, mis annab märku sidevõrgu ühendavusest. Seadme korpus talub tehnilise kirjelduse järgi -40 kuni 85 kraadist temperatuurivahemikku ja kaitseastmeks on märgitud IP54. NetOP andurid on varustatud kahe SAFT LS-14500 3.6V AA (LI-SOCI2) patareiga. [23]



Joonis 3.4. NetOP kaheteljeline LoRa kaldeandur

Teatud IoT seadmete tootjad, nagu NetOP, disainivad lihtsuse ja skaleeritavuse huvides võimalikult universaalselt kasutatava anduri, mida saab mistahes sama tootesarja sensoriga ühendada. Spetsiifilise kasutusjuhtumi korral võib see oluliselt piirata seadme seadistusvõimalusi ja muuta saadetava sõnumi pikkuse (payloadi) otstarbetult suureks.

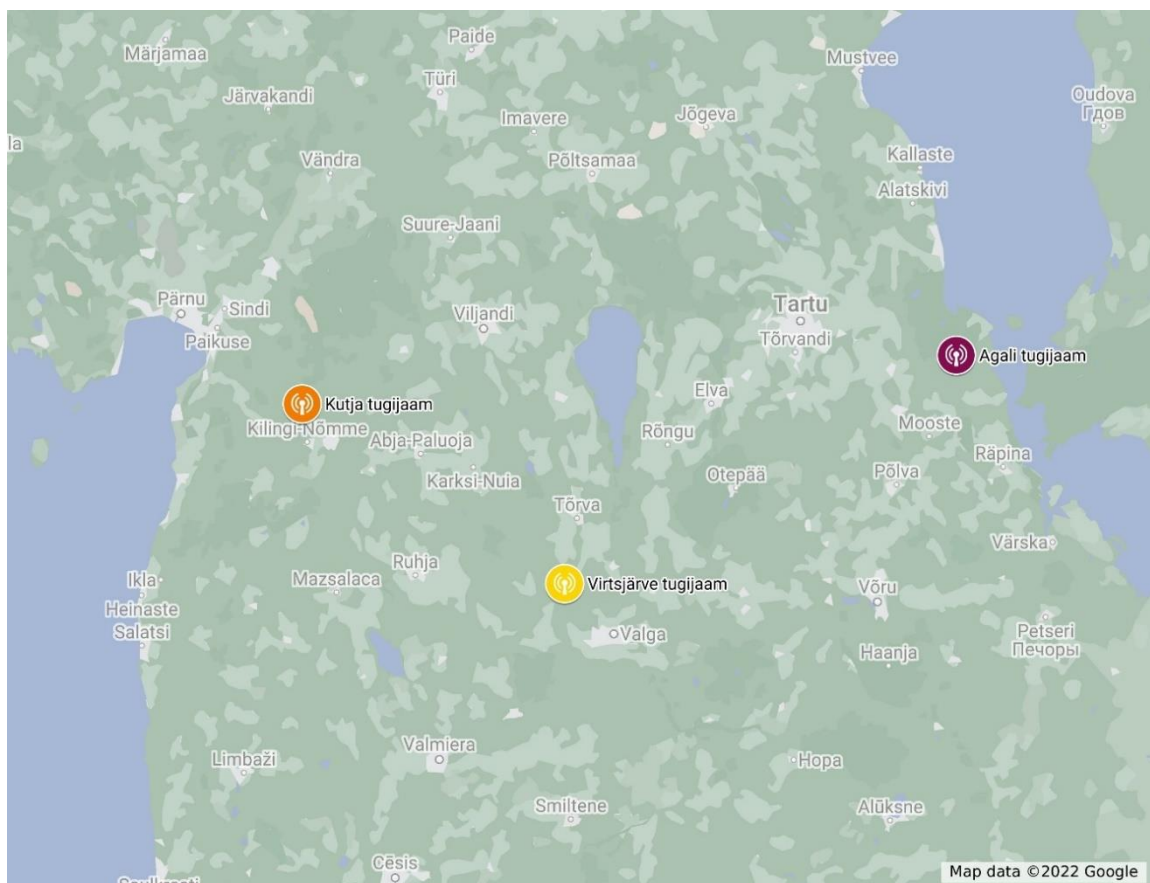
Järgnevates peatükkides näidatakse kaldeandurite ja tugijaamade asukohti koos saavutatud mõõtmistulemustega.

3.2 Asukohad

Kõik uuritavad elektriliini lõigud, kuhu kaldeandurid ja nende lokaalsed tugijaamad paigaldati, valiti SmartPole projekti käigus välja Elektrilevi rikkestatistika põhjal, mis ei kuulu avalikustamisele. Antud kohtades on viimaste aastate lõikes täheldatud rohkem rikkeid, kui ümberkaudsetel liinilõikudel. 8-kuulise testperioodi jooksul anduritega kaetud liinilõikudes suuremaid torme ei täheldatud ja olulisi rikkeid ei tuvastatud.

Liinilõikude valikukriteeriumiteks olid metsased alad, ligipääsuteede puudumine ning õhuliinide mastide vanus vähemalt 10 aastat ja rohkem. Lisaks oli andurite paigaldamise tingimuseks tugijaamale püsiva toite tekitamine liinilõigu läheduses, et tekitada lokaalne LoRa tugivõrk. Kõikidele lokaalsetele tugijaamadele on tagatud püsiv toide kohaolevatest alajaamadest.

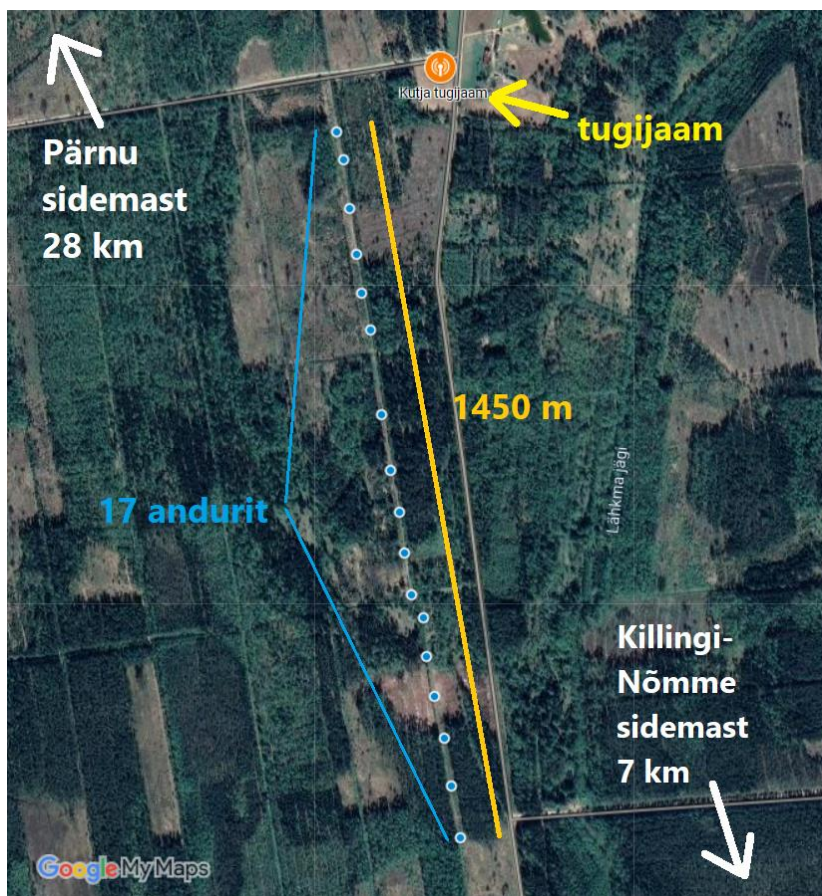
Asukohtade lähemaks uurimiseks kasutati Google MyMaps kaardirakendust ja kõikide asjakohaste andurite ja tugijaamade asukohad lisati kaardikihile kasutades ThingParki ja WithTheGrid andmestikus olevaid koordinaate. Alloleval kaardil (Joonis 3.5) on näidatud kõikide uuritavate liinilõikude asukohad suures plaanis.



Joonis 3.5. LoRa andurite ja lokaalsete tugijaamade asukohad kaardil.

3.2.1 Kutja

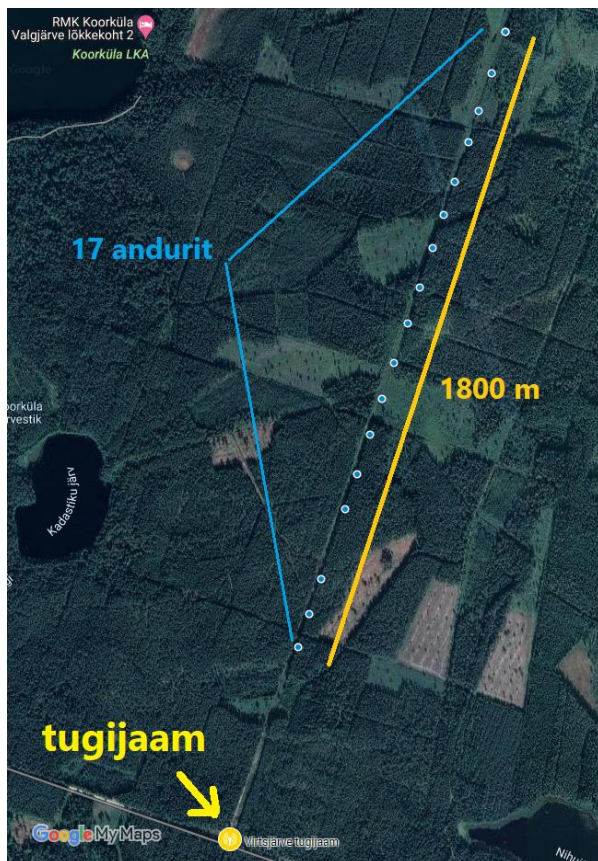
Joonisel 3.6 oleval satelliitkaardil on välja toodud Kutja liinilõigu andurite ja tugijaama asetus. Kutja lokaalne tugijaam on ainus tugijaam, mis uuritavatest paikadest ei asu sama sirge peal anduritega. Kaardi peal on näha, et ühelgi anduril pole tugijaamaga otsenähtavust, sest nende vahele jääb kohati tihe metsaala. 17 anduriga kaetud liinilõigu pikkus on Google MyMaps kaardirakenduselt mõõdetuna 1450m. Tugijaamast vaadatuna on lähima anduri kaugus 240m edela suunas ja kaugem 1550m lõunasuunas.



Joonis 3.6. Kutja lokaalse tugijaama ja Solidustech andurite asukohad kaardil.

3.2.2 Virtsjärve

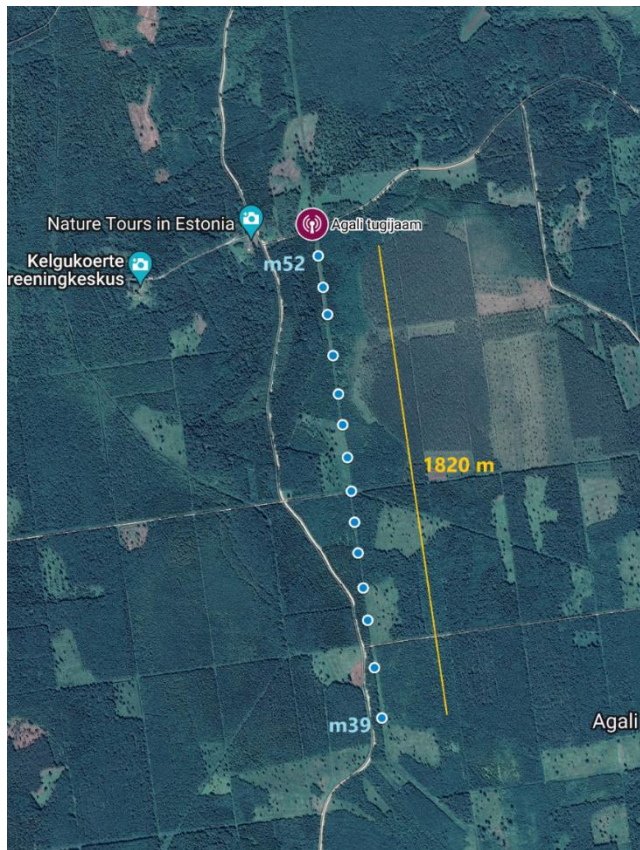
Joonisel 3.7 oleval satelliitkaardil on välja toodud Virtsjärve liinilõigu andurite ja lokaalse tugijaama asetus. Virtsjärve tugijaam asub sama metsasihi peal koos anduritega. 17 anduriga kaetud liinilõigu pikkus on Google MyMaps kaardirakenduselt mõõdetuna 1800 m. Üks andur, mis oli tugijaamast 900 m kaugusel, ei hakanud korralikult tööle ja võeti hiljem mastilt maha. Tugijaamale lähima anduri kaugus on 550m ja kaugeim 2350m. Kuigi tugijaam on anduritega ühe sirge peal, siis tiheda metsa ja kohati ka kitsa metsasihi tõttu on tugijaamast kaugematel anduritel otsene nähtavus tugijaamaga osaliselt häiritud. 10 andurit on kinnitatud raudbetoonmasti külge, mis on käigus alates 1986. aastast. Ülejäänud 5 andurit on kinnitatud puitmasti külge, millest üks on käigus alates 2004. aastast, kaks 2008. aastast ja kaks 2015. aastast.



Joonis 3.7. Virtsjärve lokaalse tugijaama ja RadioBridge andurite asukohad kaardil.

3.2.3 Agali

Joonisel 3.8 oleval satelliitkaardil on välja toodud Agali liinilõigu andurite ja lokaalse tugijaama asetus. Agali tugijaam asub sarnaselt Virtsjärve tugijaamaga sama metsasihi peal anduritega. 12 anduriga kaetud liinilõigu pikkus on Google MyMaps kaardirakenduselt mõõdetuna 1820 m ja ilmakaarte suhtes. Tugijaamale lähima anduri kaugus on 127 m ja kaugeim 1950 m. Kuigi tugijaam on anduritega sama sihi peal, siis ümberkaudse tiheda metsa ja kitsa metsasihi tõttu on kaugematel anduritel tugijaamaga otsene nähtavus puudulik. Kõik andurid on paigaldatud raudbetoonmasti külge, mis on käigus alates 1971.aastast.

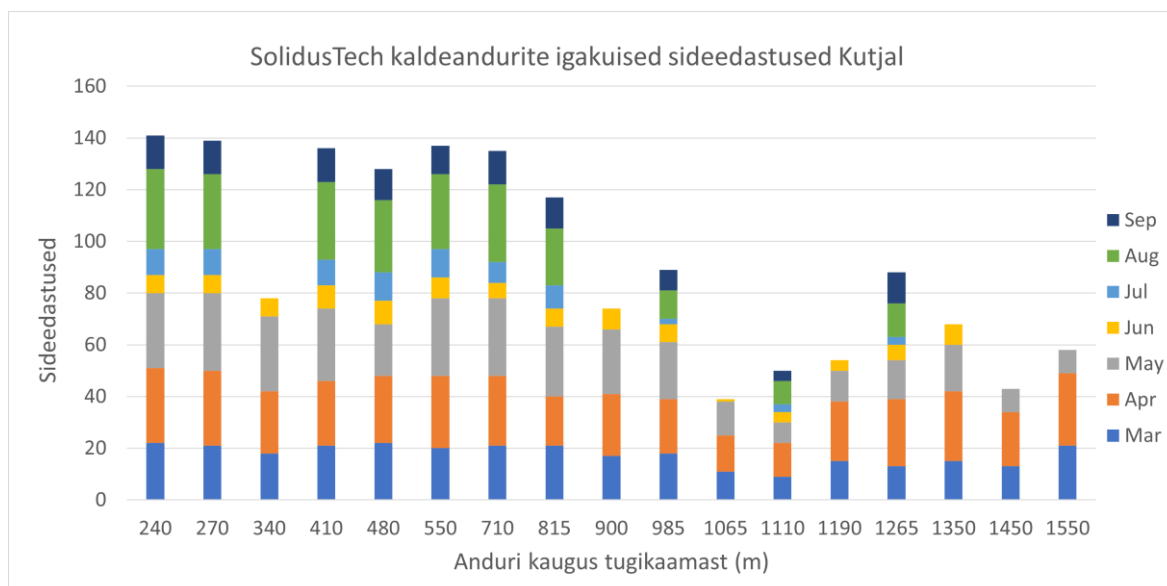


Joonis 3.8. Agali lokaalse tugijaama ja NetOP kaldeandurite asukohad kaardil.

4 TULEMUSED

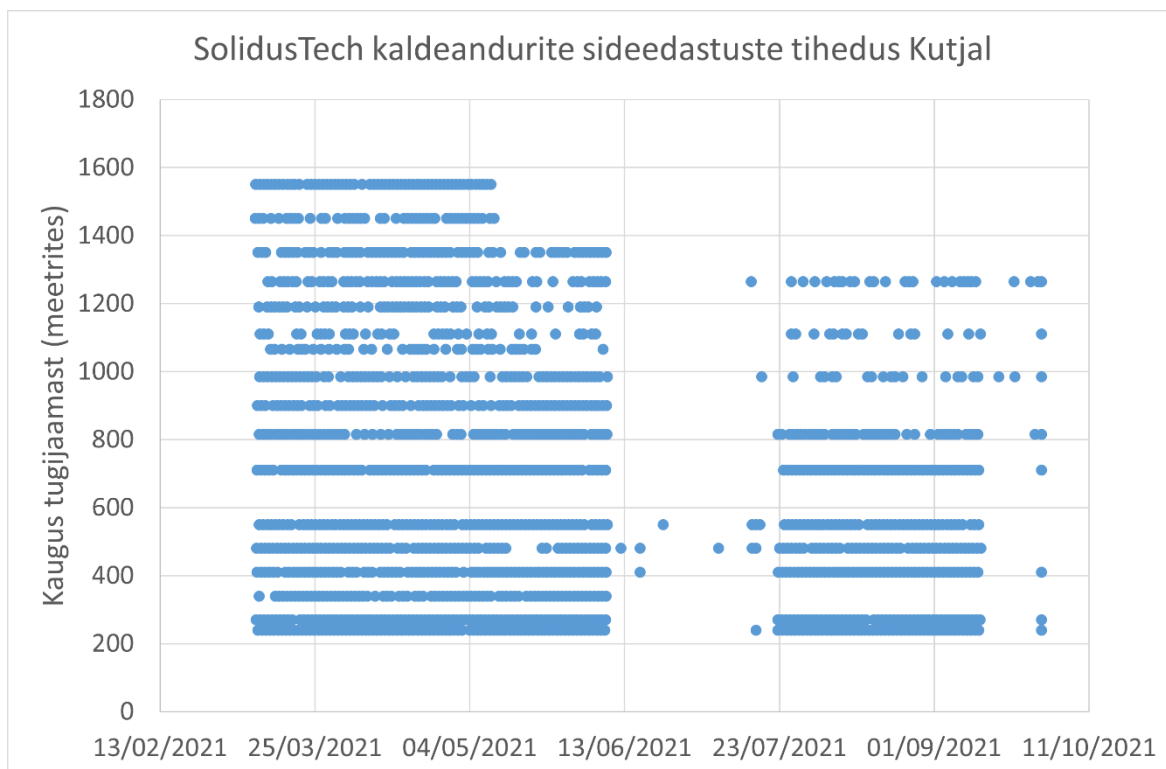
4.1 Sideedastused

SolidusTech andurite saadetud andmeid uuriti Kutjal, Killingi-Nõmme-Kutja liinilõigult 173 päeva (umbes 6 kuud) vahemikus 09.03.2021 kuni 28.09.2021. Selles ajavahemikus tegid andurid sideedastusi kokku 1574 korda. Elektrimasti vibratsioonist tingitud anduri kiirendussensori mõõtevea lahendamise tulenevalt, lühenes antud liinilõigu testperiood 2 kuu võrra. Allolevalt tulpdiaagrammilt (Joonis 4.1) saab näha, kuidas on jagunenud andmete saatmised kuude lõikes. Esimesed 2 kuud edastasid enamik seadmeid üsna võrdselt andmeid, kuid alates maikuust hakkasid tugijaamast olevad kaugemad andurid harvemini sideedastusi tegema.



Joonis 4.1. SolidusTech kaldeandurite sideedastused iga kuu põhjal

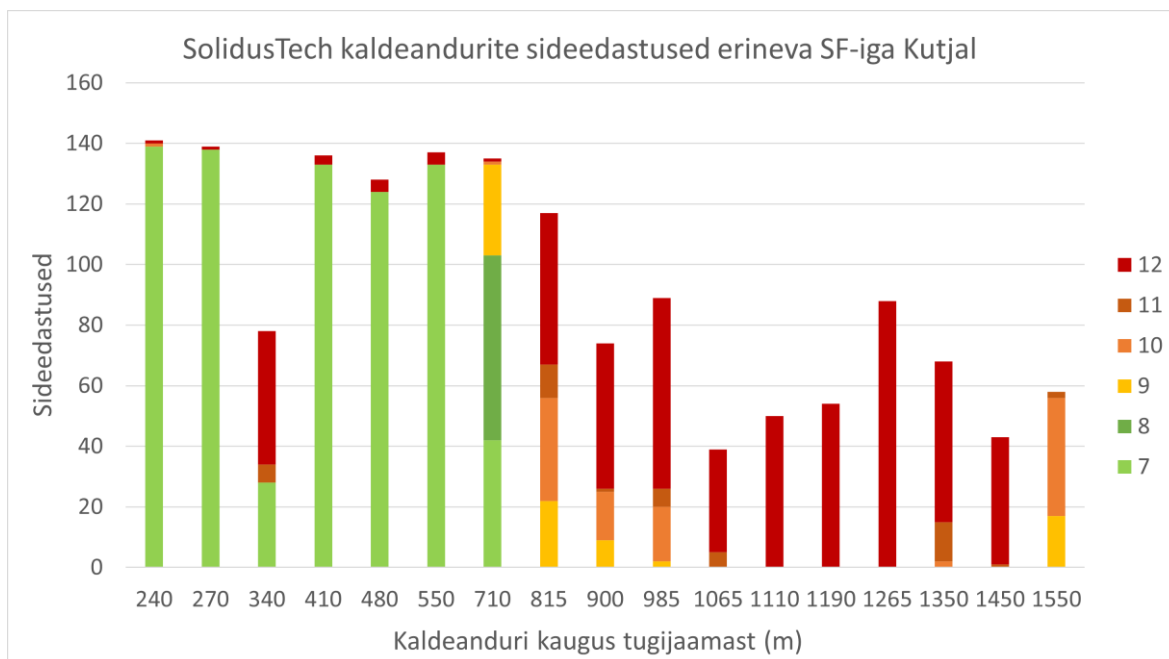
Järgneval graafikul (Joonis 4.2) on näha, kui tihedalt on andurid edastanud aja jooksul andmeid võrguserverile sõltuvalt anduri kaugusest tugijaamast. Kutja tugijaamale lähemal olnud seadmed saatsid järjepidevamalt andmeid kui kaugemal olevad seadmed, mis jätsid sideedastamisi rohkem vahele. Kaks kõige kaugemat andurit lõpetasid sideedastused 2 kuud pärast ülesseadmist. Ülejäänud andurid jätkasid edastamist kuni 8. juunini, kus lõppesid järsku kõik sideedastused ning alles 23. juulil, hakkasid andurid tavapäraselt andmeid saatma, välja arvatud 4 andurit, mis tagasi ei tulnudki. Teist korda juhtus sarnane sündmus 12. augustil ning kestis kuni 28. augustini, kui 8 andurit tegid oma viimased sideülekanDED. Ajavahemikus 08. juuni - 22. juuli 2021 oli lokaalsel tugijaamal toiterike, vea põhjuseks määrati defektne toiteplokk, mis asendati uue vastu.



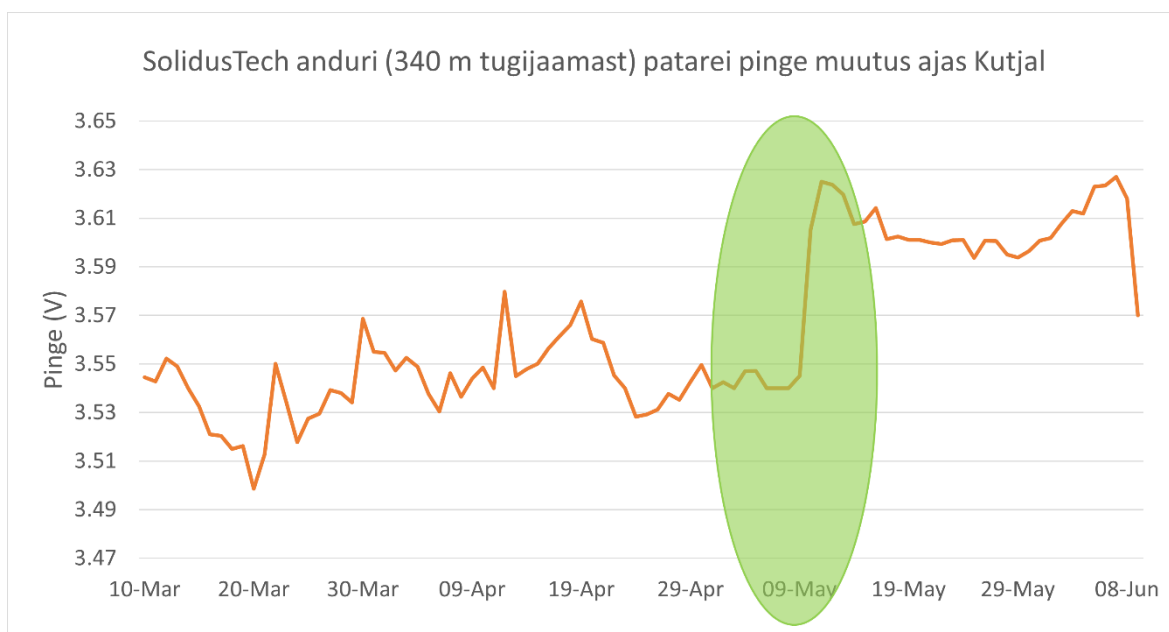
Joonis 4.2. SolidusTech andurite sideedastuste tihedus

Üks oluline näitaja, millega järgi saab LoRa seadme energiasäästlikkust ja sidekvaliteedi hinnata on laotustegur (SF). Allpool toodud joonisel on välja toodud, millise laotusteguriga ehk SF-iga, iga kaldeanduri sideedastused Kutjalt võrguserverisse kohale jõudsid (Joonis 4.3). Kutja lokaalsest tugijaamast kõige lähemal asuvad andurid on tabelis vasakul ja kõige kaugemad asuvad paremal. Joonisel olevate andmete põhjal on näha, et tugijaamast alates 710 m kaugusel olevast kaldeandurist, muutub sidekvaliteet kehvapoolseks ja sellest kaugematel anduritel on juba raskusi tugijaamale andmeid kohale saata.

Suurima erandina saab välja tuua tugijaamast 340 m kaugusel oleva kaldeanduri, mis lõpetas sideedastused juba juunis, kuigi asus tugijaamale üsnagi lähedal. Põhjuseks saab välja tuua asjaolu, et kuni 11. maini liikusid andmed läbi Killingi-Nõmme sidemasti otsas asuva LoRa tugijaama, mis asub andurist 7,6 km kaugusel ja alles hiljem sai andur sobiva ühenduse Kutja tugijaamaga, configureerides ADR-i (*adaptive data rate*) vastavalt paremale laotustegurile. Esimese 2 kuu jooksul kasutas andur kõige energiakulukamat laotustegurit SF12 ja tõenäoliselt sai seetõttu juuni alguses ka patarei tühjaks (Joonis 4.4).



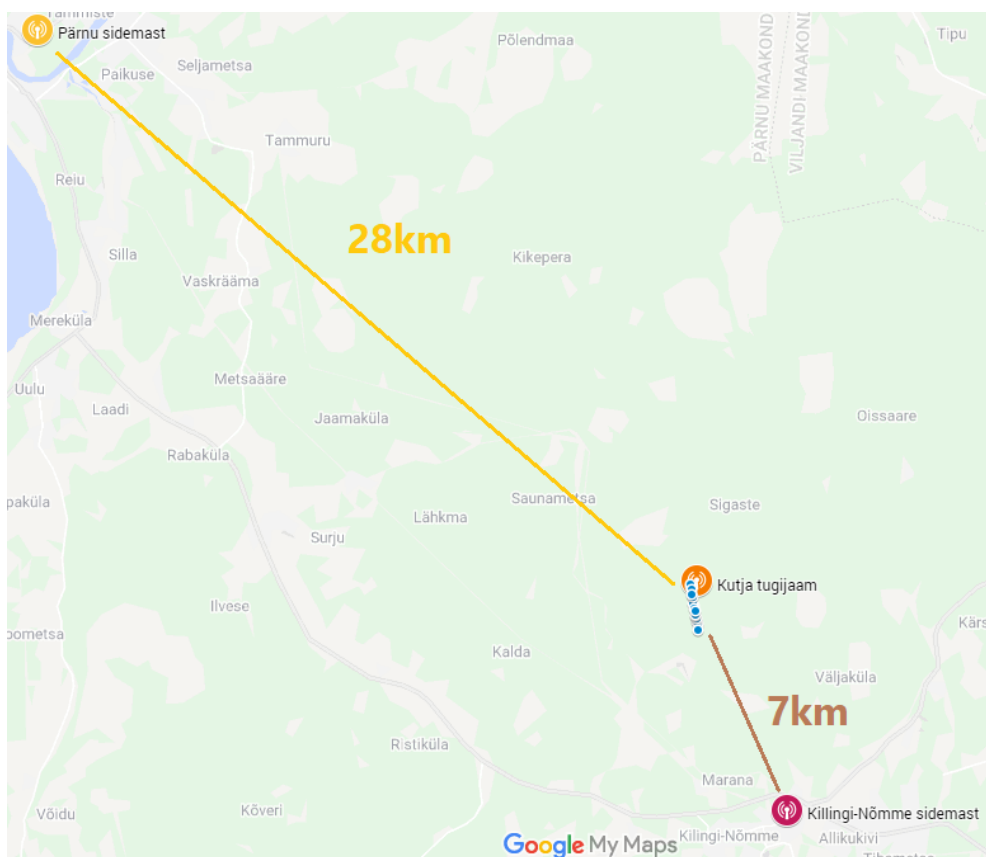
Joonis 4.3. SolidusTech kaldeandurite sideedastused erineva SF-iga



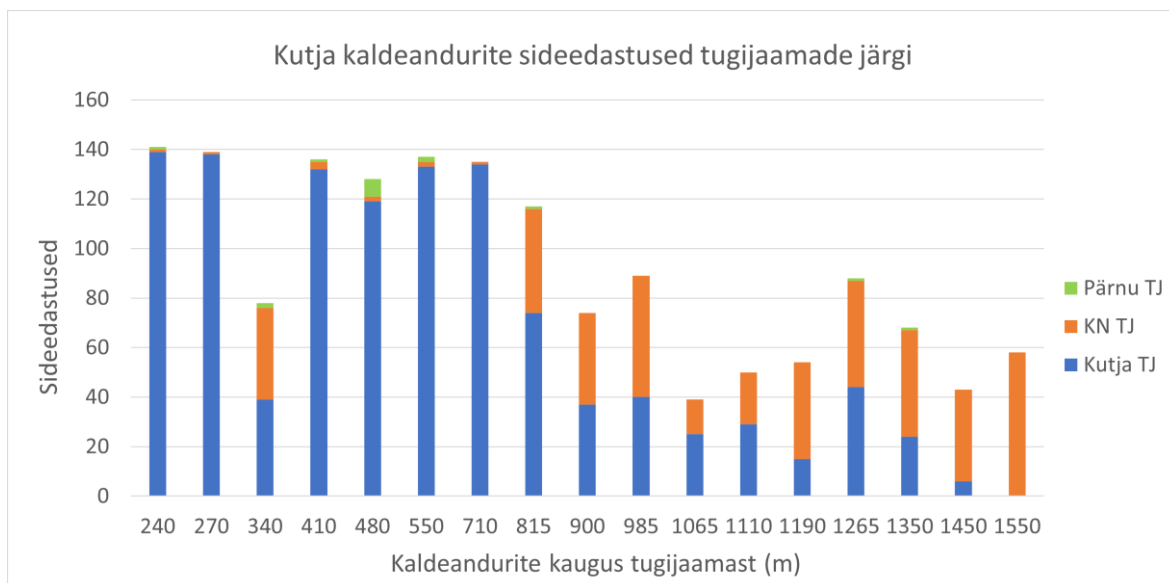
Joonis 4.4. Anduri patarei pinge muutus peale laotusteguri vahetust 9. mail

Uurides lähemalt ThingParki andmestikku, selgus huvitav asjaolu, et SolidusTech anduritelt jõudsid võrguserverisse andmed lisaks Kutja lokaalsele tugijaamale veel Killingi-Nõmme ja Pärnu sidemastide otsas olnud LoRa tugijaamade kaudu (Joonis 4.5). Alloleval tulpdiaagrammil (Joonis 4.6) on näidatud, kuidas on mastidel olnud kaldeandurite andmed jaotatud kolme erineva tugijaama vahel. Läbi Kutja tugijaama (TJ) edastati 1128 korda ehk 71,66% andmetest, Killingi-Nõmme (KN) sidemasti tugijaama kaudu saadeti 430 korda ehk 27,32% andmetest ja Pärnu sidemasti tugijaama kaudu 16 korda ehk 1.02% andmetest.

Tulpdiagrammi põhjal saab oletada, et Kutja tugijaamast 900 m kaugemal olnud andurite signaali jäi niivõrd nõrgaks, et edasi oli mõtekam andmeid edastada 7 km kaugusel oleva Killingi-Nõmme tugijaama kaudu. LoRa vastuvõtjate kõrge signaalitugevuse vajaduse tõi ka Tali välja oma lõputöös, kelle arvates võib juba ühe kilomeetri kauguselt tugijaamaga ühendus nurjuda, kui signaali trajektoorile jääb metsasest maastikust tulenevalt takistusi [24]. 8 anduri paketid suutsid mõnel üksikul korral ka 28km kaugusele Pärnu tugijaamani jõuda. Kutja liinilõigu satelliitkaardilt (Joonis X) on näha, et tegemist oli anduritega, mille vahetus läheduses on väiksemad legendikud just Pärnu sidemasti poole. Selle põhjal saab öelda, et tugijaamade ja andurite vaheline otsene nähtavus parandab oluliselt LoRa leviulatust.

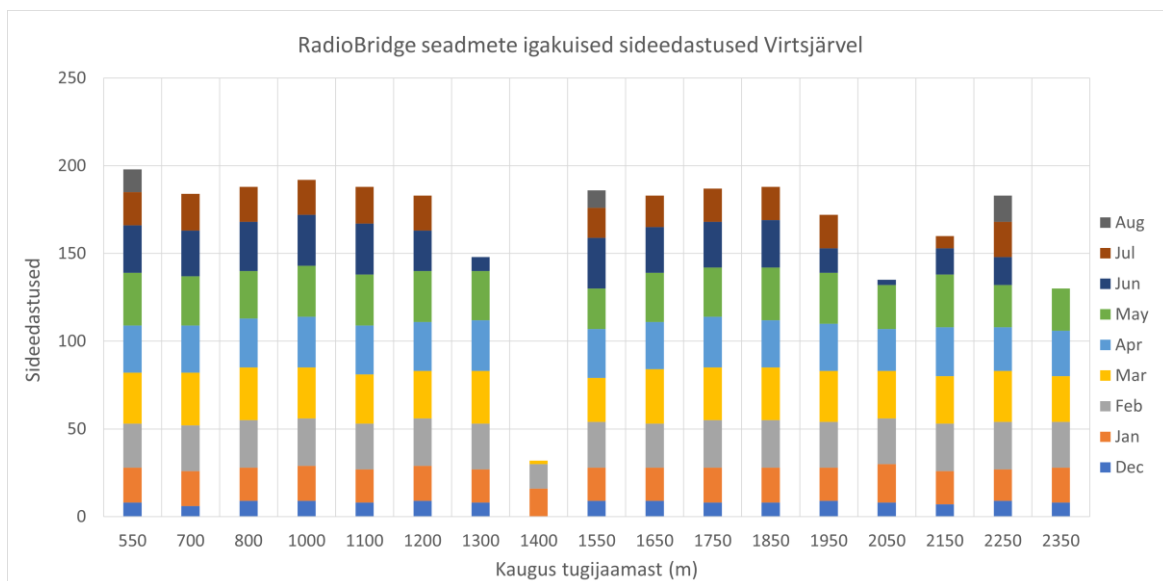


Joonis 4.5. Killingi-Nõmme ja Pärnu sidemastid ja nende kaugused kaardil



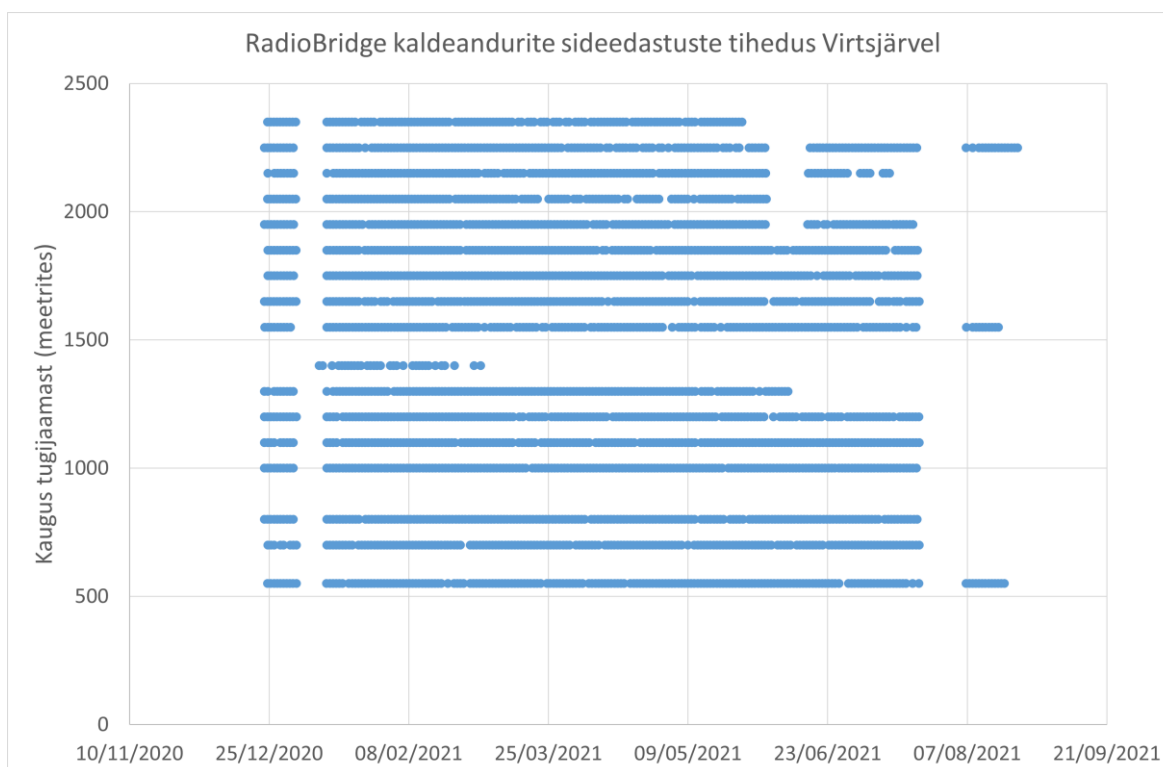
Joonis 4.6. SolidusTech andurite sideedastused erinevate tugijaamade järgi

RadioBridge kaldeandurid edastasid Virtsjärvel, Tõrva-Koorküla liinilõigult sideandmeid 244 päeva (8 kuud) vältel kokku 2837 korda vahemikus 23.12.2020 kuni 23.08.2021. Allolevalt tulpdiagrammilt (Joonis 4.7) saab näha, kuidas on jagunenud andmete saatmised iga kuu lõikes. Virtsjärve tugijaamale kõige lähemal andurid on graafikul vasakul ja kõige kaugemad andurid asuvad paremal. Kõik andurid, välja arvatud tugijaamast 1400m kaugusel olev andur, edastasid andmeid esimesed 6 kuud üsna võrdsel tasemel. Juunis kadusid sidest kaks kaugemat (>2 km) andurit ja tugijaamast 1300 m kaugusel asuv seade. Augustis jäid viimastena sideedastusi tegema 3 seadet, milles üks oli tugijaamale kõige lähemal, teine 1550 m kaugusel ja kolmas 2350 m kaugusel.



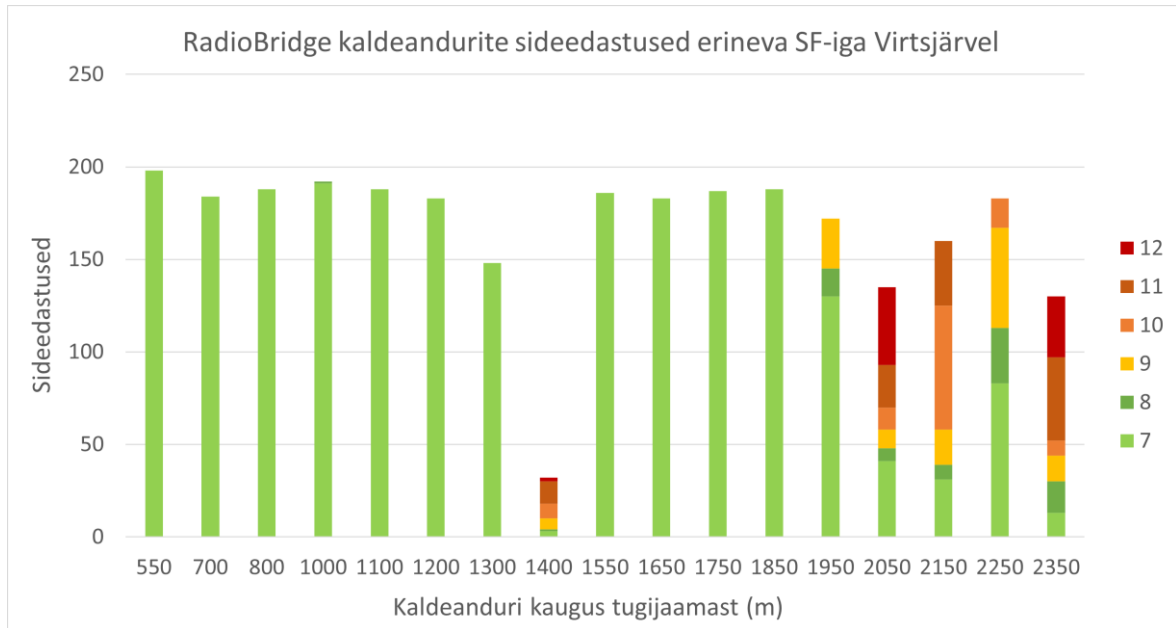
Joonis 4.7. RadioBridge kaldeandurite sideedastused iga kuu põhjal

Alloleval graafikul (Joonis 4.8) on välja toodud, kuidas RadioBridge kaldeandurid on edastanud aja jooksul andmeid võrguserverile sõltuvalt anduri kaugusest tugijaamast. Ajavahemikus 2.-10. jaanuar 2021 ei edastanud ükski andur võrguserverile andmeid, põhjuseks oli LoRa tugijaama siderike. Rike kõrvaldati – kohapeal kontrolliti toite olemasolu ja viga tulenes PoE-kaabli ühenduse katkemisest.



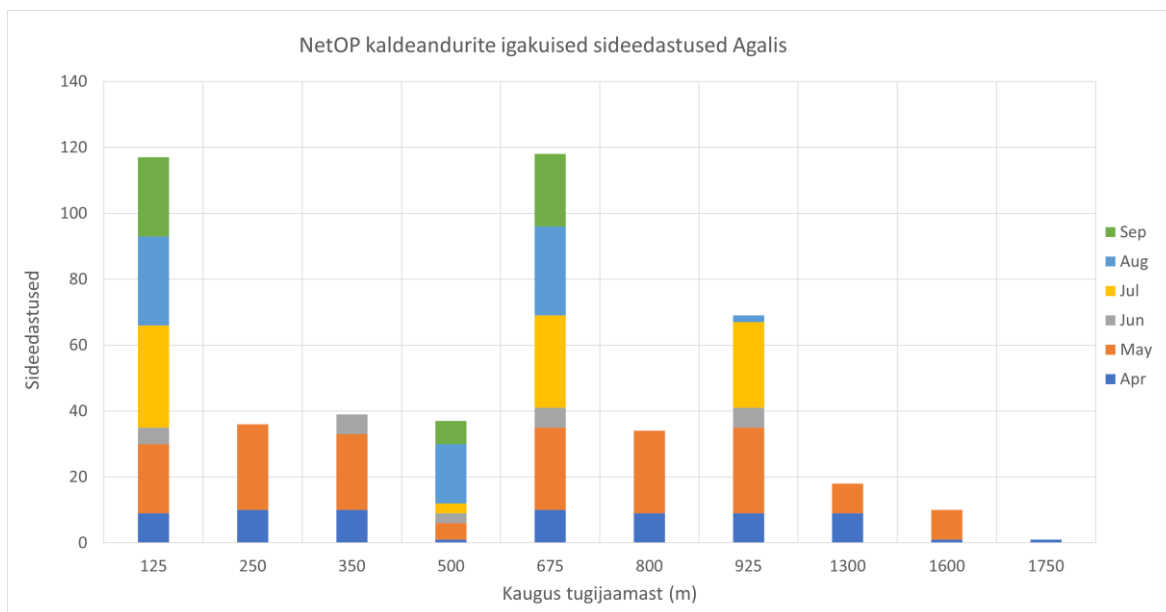
Joonis 4.8. RadioBridge andurite sideedastuste tihedus

Allpool toodud joonisel (Joonis 4.9) on välja toodud, kui palju ja millise laotusteguriga(SF) iga kaldeanduri sideedastused Virtsjärvelt võrguserverisse kohale jõudsid. Joonisel olevate andurite andmete põhjal on näha, et kuni 2 km kaugusele on sidekvaliteet olnud stabiilselt hea (va 1400m kaugusel olev andur) ja tehti samas suurusjärgus sideedastusi. Kaugemal kui 2 km olevatest anduritest muutub sidekvaliteet kehvemaks ja sideedastusi tugijaamaga on toimunud vähem kui lähemal olevatel seadmetel.



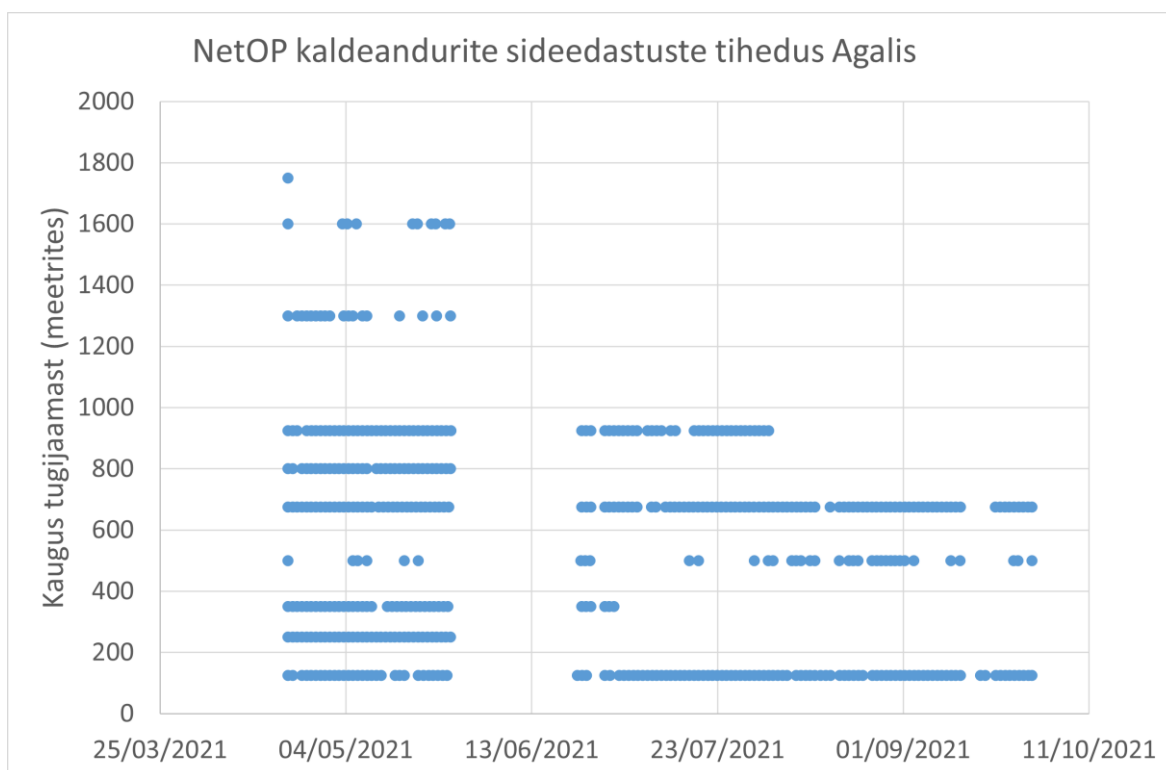
Joonis 4.9. RadioBridge kaldeandurite sideedastused Virtsjärvel

Rasina-Meeksi liinilõigule paigaldatud NetOP kaldeandurid tegid vahemikus 21.04.2020 kuni 28.09.2021 ehk 130 päeva (u 5 kuud) 479 sideedastust. IoT platvormi jaoks anduri payload'i lahti kodeerimise probleemidest tulenevalt lühenes liinilõigu testperiood 3 kuu võrra. Allolevalt tulpdiaagrammilt (Joonis 4.10) saab näha, kuidas on jagunenud andmete saatmised iga kuu lõikes.



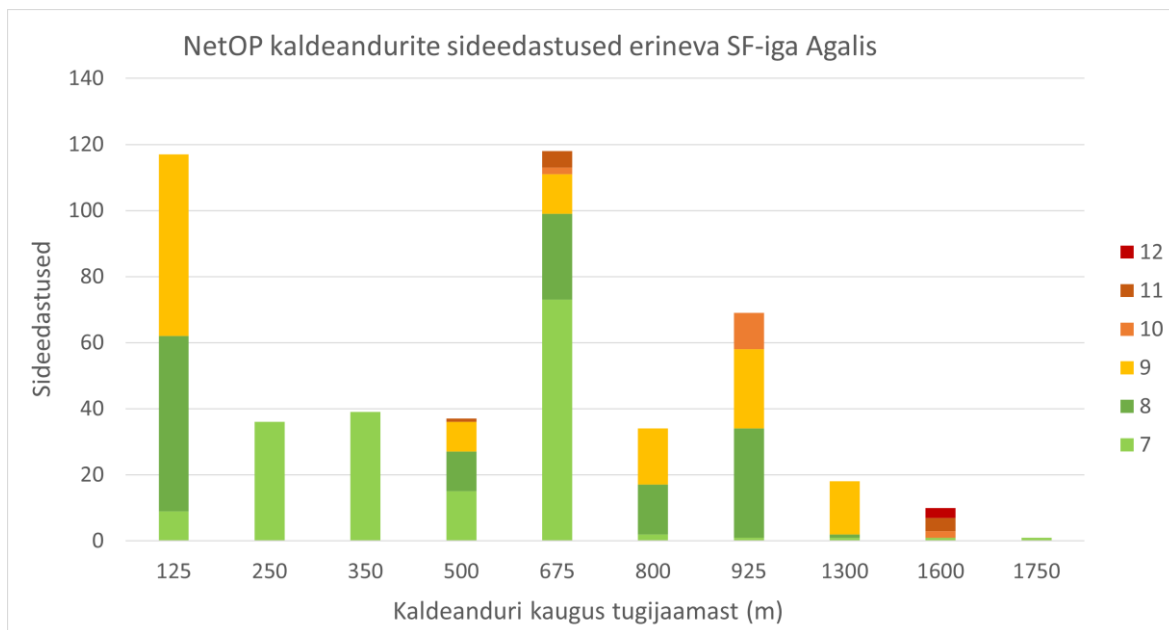
Joonis 4.10. NetOP kaldeandurite sideedastused iga kuu põhjal

Alloleval graafikul (Joonis 4.11) on välja toodud, kuidas Agali kaldeandurid on edastanud aja jooksul andmeid võrguserverile sõltuvalt anduri kaugusest tugijaamast. 08. juuni - 22. Juuli 2021 toimus tugijaamaga sidekatkestus



Joonis 4.11. NetOP andurite sideedastuste tihedus

Allpool toodud joonisel on välja toodud, kui palju ja millise laotusteguriga (SF) iga kaldeanduri sideedastused Agalist võrguserverisse kohale jõudsid (Joonis 4.12). Agali tugijaamast kõige lähemal asuvad andurid on tabelis vasakul ja kõige kaugemal asuvad andurid paremal. Kaks kaldeandurit, (m39 ja m42), ei suutnud testperioodi jooksul kordagi Agali tugijaamaga ühendust luua. Nende andurite, mis löid tugijaamaga ühenduse ja mille andmed kajastusid andmestikus, saab joonise põhjal oletada, et tugijaamast alates 675m, muutub sidekvaliteet kehvapoolseks ja kaugemal asuvatel anduritel on raskusi tugijaamale andmeid kohale saata.



Joonis 4.12. NetOP kaldeandurite sideedastused Agalis

4.2 Mõõtmiste sõnumid

Allpool toodud tabelis (Tabel 4.1) on välja toodud, mis kuupäeval lõpetasid SolidusTech andurid Kutjal sõnumite saatmise. Andmestikust puudusid mastide 3 ja 10 sõnumiedastused, mistõttu neid ei saa siin sisse arvestada. Punasega on märgitud need andurid, mis lõpetasid töötamise tunduvalt varem kui ülejäänud seadmed. SolidusTech andurid olid seadistatud tavaolekus mõõtmisi tegema iga tunni tagant. Kui aga kaldenurga väärtus ületas ettekirjutatud piirmäära, siis mõõdeti iga 10 min tagant kuni kaldenurk on jälle piiride sees. Kuna seadmete telgede piirid oli seadistatud väga tundlikult, siis jäid paljud andurid pikaks ajaks 10 minutilise intervalliga mõõtmisi tegema. Selline tihe mõõtmine ei ole energiasäästlikust silmas pidades mõistlik, sest sideedastuse ajal peab saatma palju suurema paketi, mis tähendab pikemat eetriaega. Tabelis kollasega on märgitud need andurid, mis olid kõige rohkem häires.

Tabel 4.1. SolidusTech kaldeandurite sõnumite edastused

Mast	Anduri kaugus tugijaamast (m)	Viimase kohale jõudnud sõnumi kuupäev	Kohale jõudnud sõnumid	Häiresõnumi osakaal
1	240	01.09.2021	6202	59%
2	270	01.09.2021	3552	2%
3	340	PUUDUB	PUUDUB	PUUDUB
4	410	01.09.2021	7775	66%
5	480	01.09.2021	6375	11%
6	550	01.09.2021	12524	43%
7	710	01.09.2021	3362	4%
8	815	01.09.2021	12134	62%
9	900	08.06.2021	2384	10%
10	985	PUUDUB	PUUDUB	PUUDUB
11	1065	09.06.2021	30998	16%
12	1110	01.09.2021	3277	6%
13	1190	15.06.2021	6315	1%
14	1265	01.09.2021	6426	69%
15	1350	22.06.2021	10876	98%
16	1450	11.06.2021	9423	70%
17	1550	10.05.2021	5765	91%
			Kokku: 127388	Avg: 41%

Tabelis 4.2 on välja toodud, mis kuupäeval lõpetasid RadioBridge andurid Virtsjärvel sõnumite saatmise. Rohelisega on märgitud need andurid, mis kestsid kõige kauem ja punasega need, mis lõpetasid töötamise tunduvalt varem kui ülejäänud seadmed. Lisaks on teada, palju terveid sõnumeid tervel kujul kohale jõudis ning kui suur osa neist läks kaduma. Tugijaamast kõige kaugemale jäävad 5 andurit eristuvad ülejäänud seadmetest suurima kaduma läinud sõnumite osakaaluga, mis on tabelis X märgitud kollasega. Selle põhjal saab öelda, et metsasihil on RadioBridge andurite jaoks mõistlik kaugus tugijaamast kuni 2 km.

Tabel 4.2. RadioBridge kaldeandurite sõnumite edastused

Mast	Anduri kaugus tugijaamast (m)	Viimase kohale jõudnud sõnumi kuupäev	Kohale jõudnud sõnumid	Kaduma läinud sõnumite osakaal
1	550	19.08.2021	6478	5,4%
2	700	22.07.2021	6104	5,3%
3	800	22.07.2021	6051	6,1%
4	1000	22.07.2021	4569	5,6%
5	1100	22.07.2021	3804	5,5%
6	1200	22.07.2021	3791	5,9%
7	1300	11.06.2021	3051	4,6%
8	1400	21.07.2021	6850	5,3%
9	1550	17.08.2021	4008	5,7%
10	1650	22.07.2021	3833	4,8%
11	1750	22.07.2021	3798	5,6%
12	1850	22.07.2021	3846	4,5%
13	1950	22.07.2021	3757	6,7%
14	2050	07.06.2021	8440	10,2%
15	2150	13.07.2021	3596	6,6%
16	2250	23.08.2021	4031	7,8%
17	2350	26.05.2021	7977	8,1%
			Kokku: 83984	Avg: 6.1%

RadioBridge anduritel on seadistatud eraldi sõnumitesse toiteallika pingeväärtust ning mõõdetud kaldenurga (*tilt*) väärtust koos õhutemperatuuri ($t^{\circ}\text{C}$) väärtusega. Andurite testimise jaoks oli osadel seadmetel määratud teistest erinev mõõtmise intervall. Mastid 8, 14 ja 17 küljes olevad andurid mõõtsid patarei pingeväärtuse iga poole tunni tagant ja ülejäänud seadmed iga 3 tunni tagant. Kaldenurga ja temperatuuri väärtuse mõõtmise intervall oli mastidel 1-3 iga tunni tagant ja ülejäänud anduritel iga 2 tunni tagant.

4.3 Järeldused

Virtsjärvele, Tõrva – Koorküla elektriliini lõigule paigaldatud RadioBridge kaldeandurite tulemuste põhjal saab öelda, et metsasihile, kus 6 m kõrgusele masti külge paigaldatud anduri ja tugijaama vahel on hea nähtavus, saab kuni 2 km piires luua kvaliteetse ja energiasäästliku sideühenduse (SF7). Need andurid, mis jäävad kaugemale kui 2 km suudavad vajalikud andmed kohale edastada energiakulukama laotusteguriga, aga sellisel juhul esineb rohkem sõnumikadu ja planeeritud sideedastuste vahele jätmist.

Kutjale, Kutja – Killingi-Nõmme elektriliini lõigule paigaldatud SolidusTech kaldeandurite tulemused näitasid, et 6 m kõrgusele metsasihile paigaldatud andurid, millel puudub otsene nähtavus samal kõrgusel oleva tugijaamaga on sidekvaliteeti arvestades mõistlik kaugus anduri ja tugijaama vahel kuni 700 m. Arvestades, et Killingi-Nõmme sidemasti otsas oleva tugijaama kaudu, mis asus 7 km kaugusel, saadeti koguni 27,32% kõikidest andmetest näitab, et tugijaama kõrgus mängib olulist rolli leviulatuses.

Kutja tugijaamast kõige kaugemal olnud andur ei võtnud kordagi lokaalse tugijaamaga ühendust, sest otsenähtavuse tõttu Killingi-Nõmme sidemasti otsas oleva tugijaamani jõudis andurilt parem signaal. Metsa vahel olevate anduritega ainult sidemastides paiknevate tugijaamadega ühenduse loomine on tulemusi arvestades jätkusuutlik lahendus, kui sidemast asub anduritele piisavalt lähedal ehk kõikidel anduritel on vähemalt osaline nähtavus sidemastiga. Seda kaugust on aga keeruline hinnata, sest sõltub paljuski, kui kõrgel maapinnast asuvad andurid ja kui tihe on ümberkaudne mets.

Üleliigsete sõnumite saatmine vähendab oluliselt andurite akude eluiga. Madala voolutarbega anduri sisemine loogika on koostatud põhimõttel, et anduri väljastatavad sõnumid oleksid võimalikult lühikesed ja lihtsad. Jaemüügis pakutavate valmiskujul anduri puhul peab eelnevalt selgeks tegema, kuidas on anduri sõnumite saatmise loogika üles ehitatud ja kas konkreetne seade sobib kokku arendatava IoT projektiga. Oluline on enne skaleerimist testida erinevate tootjate seadmeid, sest iga tootja on enda andurite *payloadid* ja seadistamise protseduurid erinevalt üles ehitanud. RadioBridge andurite tulemuste põhjal saab öelda, et need on väga läbimõeldud seadmed.

RadioBridge andurite sõnumite edastusi analüüsidest saab Tabel 4.1 põhjal väita, et mida tihedamalt andurid teostavad mõõtmisi, seda suuremat andmepaketti peavad andurid iga sideedastuse ajal saatma ja esineb ka rohkem sõnumikadu. Leiti, et liiga suure infomahuga sõnumite saatmine põhjustab sõnumite kadumist ja suurendab oluliselt energiatarvet halva sideühenduse kvaliteedi korral.

Saab ka välja tuua, et andmete järgi on RadioBridge andurid stabiilsemate mõõtmistulemustega kui SolidusTech andurid.

SmartPole taolise lahenduse elluviimiseks tuleks testida rohkem erinevate tootjate andureid ja võrrelda neid pikema aja jooksul sama testliini peal. Lisaks tuleks teha ka iga anduriga puu liinile kukkumise teste. Arvestades Eesti kliimat, tuleks sensorid mastile paigaldada vähemalt 12 kuuks, et saada veel rohkem andmepunkte ja uurida näiteks aastaaegade vaheldumisest tingitud temperatuuri sõltuvuse mõju anduritele.

KOKKUVÕTE

Uurimistöö eesmärk oli analüüsida, kuidas mõjutab metsarohke keskkond erinevate LoRa kaldeandurite side- ja andmeedastust ning hinnata, kuidas erinevad keskkonnamuutujad mõjutavad LoRa sidevõrgu toimimist.

Lõputöökasutati SmartPole projekti käigus elektrimastide külge kinnitatud LoRa kaldeanduritelt kogutud andmeid.

Töö esimeses peatükis räägitakse lähemalt arendatavast SmartPole ideest ja kuidas selline asjade interneti lahendus aitab võrguettevõtetel lühendada elektrikatkestuste kuluvat aega. Kuna antud lõputöö tugineb suuresti SmartPole projekti jooksul kogutud side- ja mõõteandmetest, siis aitab esimene peatükk paremini aru saada töö sisust tervikuna.

Teoreetilises osas kirjeldati LPWAN sidevõrku toimimist ja anti ülevaade LoRaWAN sidetehnoloogiast ja selle tehnilistest aspektidest. Tehniliste parameetrite erinevusi võrreldi ka teiste LPWAN tehnoloogiatega. Välja toodi ka mõned LPWAN kasutusjuhud erinevates valdkondades.

Signaali levimise kaugus sõltub erinevatest keskkonnateguritest, põhiliseks segajateks on näiteks hooned ja puud, millest signaal peab mööda ja tihtipeale ka läbi pääsema. Kõiksugused takistused peegeldavad signaali ja vähendavad seetõttu leviulatust. See on ka üks põhjustest, miks SmartPole anduritel oli raskusi tugijaamaga ühendust saada. Tugijaama paigaldades on oluline, et see asetseks võimalikult kõrgel, mis suurendab võimalust, et vähem takistusi blokeerivad signaali.

SUMMARY

The aim of the research was to analyze how to monitor communication and data transmission in forest environment in different LoRa tilt sensors and to assess how different environmental changes affect the operation of the LoRa communication network.

The data collected from LoRa tilt sensors attached to the electric grid masts during the SmartPole project were used for the final project.

The first chapter discusses the SmartPole idea being developed and how Internet of Things solution can help electric grid companies reduce the time spent on power outages. As this dissertation largely measures the communication and data collected during the SmartPole project, the first chapter will help to better understand the content of the work.

The theoretical part describes the operation of LPWAN communication network and gives an overview of LoRaWAN communication technology and its technical aspects. Differences in technical parameters were also compared with other LPWAN technologies. Some use cases for LPWAN from different areas were also highlighted.

The distance between the signal depends mainly on various environmental factors, such as buildings and trees, through which the signal must pass over and even pass through obstacles. All kinds of obstacles deflect the signal and reduce the range. This is also one of the reasons why SmartPole sensors had difficulty communicating with the base station. In base stations, it is important that it is located at a height of application, installed to allow less interference blocking signals.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] T. G. Durand, L. Visagie ja M. J. Booysen. „Evaluation of next-generation low-power communication technology to replace GSM in IoT-applications“, 2019 [Võrgumaterjal]
https://www.researchgate.net/publication/333974345_Evaluation_of_next-generation_low-power_communication_technology_to_replace_GSM_in_IoT-applications
- [2] Elektrilevi koduleht. „Elektrilevi 2022. aasta investeeringud“, 2022 [Võrgumaterjal]
<https://www.elektrilevi.ee/et/uudised/avaleht/-/newsv2/2022/03/30/elektrilevi-2022-aasta-investeeringud>
- [3] Eesti Energia koduleht. „Eesti Energia ideekonkursi The Pitch võitis tark peakaitse“, 2020 [Võrgumaterjal]
<https://www.energia.ee/uudised/avaleht/-/newsv2/2020/01/22/eesti-energia-ideekonkursi-the-pitch-voitis-tark-peakaitse>
- [4] Exeri koduleht. Smart Grid Surveillance. [Võrgumaterjal]
<https://www.exeri.se/smart-grid-surveillance>
- [5] Elektrilevi koduleht. „Elektrilevi taastas tormi ajal 65% elektrikatkestustest kahe tunniga“, 2022 [Võrgumaterjal]
<https://www.elektrilevi.ee/et/uudised/avaleht/-/newsv2/2022/01/25/elektrilevi-taastas-tormi-ajal-65-elektrikatkestustest-kahe-tunniga>
- [6] Tartu Postimees. „Elektrilevi tegi suure osa Tartu elektrivõrgust töökindlamaks“, 2021 [Võrgumaterjal]
<https://tartu.postimees.ee/7158101/elektrilevi-tegi-suure-osa-tartu-elektrivorgust-tookindlamaks>
- [7] Elektrilevi koduleht. „Elektrilevi innovatsiooniline tarkvõrgu lahendus aitab rikkeid ennetada“, 2018 [Võrgumaterjal]
<https://www.elektrilevi.ee/et/uudised/avaleht/-/newsv2/2018/03/26/elektrilevi-innovatsiooniline-targa-vorgu-lahendus-aitab-rikkeid-ennetada>
- [8] Levikom esitlus. [Võrgumaterjal]
<https://itklubi.ee/wp-content/uploads/2017/01/2017-01-10-Levikom-IoT.pdf>
- [9] NORAnet koduleht. „Asjade internet aitab vähendada arvestite kauglugemise kulusid“ [Võrumaterjal]
<http://noranet.ee/asjade-internet-aitab-vahendada-arvestite-kauglugemise-kulusid/>
- [10] K. Mekki, E. Baijc, F. Chaxel ja F. Meyer, „A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,“ ICT Express, kd. 5, nr 1, pp. 1-7, 2019 [Võrgumaterjal]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>

- [11] Petäjäjärvi J., Mikhaylov K., Pettissalo M., Janhunen J. ja Iinatti J. „Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. *International Journal of Distributed Sensor Networks*”, 2017. [Võrgumaterjal] <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1550147717699412>
- [12] R. Franksson ja A. Liljegren. “Measuring a LoRa Network: Performance, Possibilities and Limitations”, 2018 [Võrgumaterjal] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1219450/fulltext01.pdf>
- [13] S. Devalal and A. Karthikeyan, "LoRa Technology - An Overview," 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 2018, pp. 284-290, doi: 10.1109/ICECA.2018.8474715. [Võrgumaterjal] <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8474715>
- [14] Durand, Thomas & Visagie, Lourens & Booysen, M.J. (Thinus). (2019). Evaluation of next-generation low-power communication technology to replace GSM in IoT-applications. *IET Communications*. 1. 10.1049/iet-com.2019.0168. [Võrgumaterjal] https://www.researchgate.net/publication/333974345_Evaluation_of_next-generation_low-power_communication_technology_to_replace_GSM_in_IoT-applications
- [15] J. H. Sild. “Madala energiatarbega, kaugmaa raadioside protokollide kasutusvõimalikkus Eestis 2019 aasta kevade seisuga. Usability of Ipv6 protocols in Estonia in spring 2019”, 2019, Tartu. [Võrgumaterjal] <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/53ac1d6a-dd0d-465a-87de-f2e4da816df8>
- [16] LoRa Documentation. LoRa and LoRaWAN. [Võrgumaterjal] <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
- [17] L. Vangelista. „Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation.” *IEEE Signal Processing Letters*, 24(12):1818–1821, 2017 [Võrgumaterjal] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8067462>
- [18] Actility Documentation. ThingPark Wireless LoRaWAN export file. [Võrgumaterjal] <https://docs.thingpark.com/thingpark-wireless/6.1/Content/WLUG/LoRaWAN-Export-file.htm>
- [19] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. Energiamaajanduse arengukava. [Võrgumaterjal] <https://www.mkm.ee/energeetika-ja-maavarad/energiamaajandus/energiamaajanduse-arengukava>
- [20] WithTheGrid koduleht. [Võrgumaterjal] <https://withthegrid.com/>
- [21] LoRa Device Development Guide. Orange Connected Objects & Partnerships, 2016 [Võrgumaterjal] <https://developer.orange.com/od-uploads/LoRa-Device-Developer-Guide-Orange.pdf>
- [22] RadioBridge koduleht. [Võrgumaterjal] <https://radiobridge.com/products/wireless-high-precision-tilt-sensor>

[23] NetOP kaldeanduri dokumentatsioon. [Võrgumaterjal] https://www.iot-shops.com/wp-content/uploads/2019/01/SN-LR-2_Plane_Tilt_Sensor_V2.0.pdf

[24] K.Tali. "LPWAN raadiovõrkude võrdlus ja kasutusjuhud Tartu näitel", 2020, Tartu [Võrgumaterjal]

https://comserv.cs.ut.ee/home/files/tali_informaatika_2020.pdf?study=ATILoputoo&reference=E674ABA35E1A327B2E7FDE6F41B7D86A35D32821