

TARTU ÜLIKOOL
Arvutiteaduse instituut
Informaatika õpperekava

Kert Tali

LPWAN raadiovõrkude võrdlus ja kasutusjuhud Tartu näitel

Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendaja: Alo Peets

Tartu 2020

Comparison and use cases of LPWAN networks in Tartu

Abstract:

Valmib lõpus

Keywords:

IoT, LPWAN, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, service comparison, use cases

CERCS: T180 Telecommunication engineering; P170 Computer science, numerical analysis, systems, control

LPWAN raadiovõrkude võrdlus ja kasutusjuhud Tartu näitel

Lühikokkuvõte:

Valmib lõpus

Võtmesõnad:

IoT, LPWAN, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, teenusvõrkude võrdlus, kasutusjuhud

CERCS: T180 Telekommunikatsioonitehnoloogia; P170 Arvutiteadus, arvutusmeetodid, süsteemid, juhtimine (automaatjuhtimisteeooria)

Sisukord

1 Sissejuhatus	4
2 Madala voolutarbe ja laia ulatusega võrgud	6
2.1 Kasutusjuhud	7
2.2 Side optimeerimise meetodid	8
2.3 Tehnoloogiate ülevaade	10
2.3.1 Sigfox	10
2.3.2 LoRaWAN	11
2.3.3 NB-IoT	12
2.3.4 Alternatiivsed tehnoloogiad	14
2.4 Sarnased uurimused	14
3 Võrdlusmetoodika	16
3.1 Arendusplaat FiPy	17
3.2 LoRaWANi tugijaam	18
3.3 Katsete tingimused	20
3.3.1 Maapiirkond	20
3.3.2 Linnapiirkond	20
3.3.3 Liikuv tugijaam	21
4 Tulemused	22
5 Diskussioon	27
6 Kokkuvõte	28
Viidatud kirjandus	35
Lisad	36
I. Lõppseadme testskriptid	36
II. Litsents	37

1 Sissejuhatus

Suurenev vajadus nutistul põhinevate äri- ja mugavusrakenduste järele põhjustab ühest küljest võidujoosku uute IoT-lahenduste leitamisele, mis on teisest küljest tagasi hoitud tehnoloogiliste ja füüsiliste piirangutega. Üks sellistest pudelikaeladest hõlmab seadmetevahelist suhtlust (*Machine-to-Machine* ehk M2M), mille puhul tuleb arendajal valida olemasolevate sidetehnoloogiate seast oma rakendusele sobivaim. Traadita andmeside tehnoloogiate seas on populaarsust kogumas uus klass — LPWAN (*Low Power Wide Area Network* ehk madala voolutarbe ja laia ulatusega võrk), mis on mõeldud rakendustele, mis eeldavad nii madalat voolutarvet kui laia leviala. Konkureerivad tehnoloogiad – Sigfox, LoRa, NB-IoT, LTE-M, Ingenu ja Weightless reklamivad seadmetele suurusjärgus kümneaastast aku eluiga ja kümnekilomeetrist levikaugust.

Kuigi tehnoloogiad täidavad ühist nišši pakkuda laiahaardelist ja usaldusväärset ühen-duvust ressursidest piiratud seadmetele, erinevad need oma võimekuse poolest märki-misväärtselt. Uurimistöö eesmärk on hinnata Tartus kätesaadavate teenuste sobivust erinevatele asjade interneti kasutusuhtudele, milleks võib olla näiteks tark arvesti kor-termaja keldris või turvasüsteem maakodule. Selline ülevaade on väärtslik lähtekoht väiksematele teenusepakkujatele, kes kaaluvad kaugloetavate seadmete kasutuselevõttu, kuid ei saa lubada eeltööd erinevate võrkude testimiseks oma vajaduste põhiselt.

Uuringu meetod on riistvara katsetamine, mille käigus mängitakse läbi lõppseadme käitumine erinevates raskendatud leviga paikades. Katseid viakse läbi kolme Tartus kätesaadava LPWAN-tehnoloogial põhineva teenuse peal: Levikomi NORAnet, Connected Balticsi Sigfox ja Telia NB-IoT. Nendele lisaks demonstreeritakse ka oma LoRaWAN võrgu loomist ning seda katsetatakse paralleelselt valmisvõrkudega. Eelkõige jälgitakse sidekanali võimekust kanda üle sõnumeid mittetäiuslikes oludes, võttes arvesse ka selleks kuluvat latentsi. Kasutusuhtude omistamisel võetakse arvesse katseid maa- ja linna-keskkonnas, kus valitud olustikud kirjeldavad reaalseid tööttingimusi lõppseadmetele. Katsed ei puuduta võrkude koormustaluvuse ega tehnoloogiate voolutarbe võrdlemist, samuti ei kaardistata täpset teenuste leviala, vaid piirdutakse piisava valimiga, mis annaks ettekujutuse halvimast juhust üksikule seadmele.

Teises peatükis antakse ülevaade teoreetilistest taustateadmistest, mis puudutavad asja-de internetti, LPWAN tehnoloogiaid ja näiteid nende potentsiaalsetest kasutusaladest. Kolmas peatükk hõlmab töö lahenduskäiku, alates kasutatava riistvara kirjeldusega ning lõpetades metoodika ja testimiste asukohavalikute põhjendustega. Neljandas peatükis koondatakse kokku ja visualiseeritakse olulisemaid katsetulemusi. Viindas peatükis arutletakse teenuste sobilikkuse ja mittesobilikkuse üle erinevatele kasutusjuhtudele.

2 Madala voolutarbe ja laia ulatusega võrgud

Gaddami ja Rai väitel on LPWANi võrgud loodud, pidades silmas neid vörku ühendatavaid seadmeid ja nende kasutusuhte, millele ei sobi traditsioonilised traadita andmeside tehnoloogiad nagu 802.11 (WiFi) perekond, Bluetooth või senised 3GPP mobiilside standardid [1]. Tuuakse välja, et uute sidelahenduste välja töötamine on tingitud eelkäijate võtmeomadustest, keskendudes eelkõige suuremale andmeedastuskiirusele ja minimaalsele latentsile.

Gubbi jt visioonis asjade interneti (*Internet of Things* ehk IoT) tuleviku kohta defineeritakse seda kui võrgustikku omavahel ühenduses olevaid seadmeid — sensorid, mis koguvad oma keskkonna kohta infot ning aktuaatorid interaktsioniks teise seadmega, kusjuures suhtlus toimub üle olemasolevate interneti standardite [2]. Augustin jt. eristavad Internetti ja asjade internetti arutledes, et IoT seadmetel on palju vähem ressursse, kui Internetti seadmetel [3]. Ressurssidena tuuakse välja eelkõige jõudlus ja mälu, kuid eraldiseisvate üksuste puhul ka vooluallikas, milleks on sageli akud või näiteks päikesepatareid [4].

Chang jt esitavad pilvepõhise IoT süsteemide disainis viis väljakutset: kitsas ribalaius, kõrge latents, side ebastabiilsus, ressursside piiratus ja turvalisus [5]. Kolm esimest on otsestelt seotud kasutatava võrgu omadustega, ehk võrgu tehnoloogia valik on välimatu osa uute süsteemide loomisel. Nilsson ja Svensson, kes keskenduvad oma artiklis raadiotranssiiverite voolutarbe optimeerimisele, omistavad eelnevalt mainitud probleemid just IoT seadmete vooluallikatele, mis ei suuda ära toita võimsat ja keerukat raadiokommunikatsiooni [6]. Sama väidet toetavad Chen jt, kes tödevad, et värkvõrgu minimaalne riistvara on kujundanud sellise olustiku, kus väga erinevate parameetrite ja piirangutega IoT tüüplahendustele disainitakse uusi, võimalikult optimeeritud sidetehnoloogiaid [7]. Näiteks tuuakse energiasäästlikud LPWAN tehnoloogiad, mis on suunatud IoT lahendustele, mis koosnevad suurest hulgast akutoitega seadmetest, laialjaotatuna suurele maa-alale.

Selles peatükis antakse põodus ülevaade LPWANide olemusest üldiselt. Esimeses alapeatükis tuuakse teaduslikust kirjandusest näiteid erinevatele kasutusuhtudele. Teises alapeatükis kirjeldatakse levinud tehnilisi võtteid, mida rakendatakse selliste tehnolo-

giate puhul, et saavutada seatud eesmärgid. Viimaks võetakse seotud tööde alapeatükis kokku sarnased teadustööd, mis kõrvutavad mitut tehnoloogiat.

2.1 Kasutusjuhud

Vajadus autonoomsete mõõtmisseadmete järele on paljudel eluvaldkondadel. Enim paisavad silma LPWANi jaoks soodsa tegevuspiirkonnaga põllumajandusrakendused, mis tingivad andmete kogumist suurel pindalal ning suurelt arvult sensoriteilt, milleni pole otstarbekas vedada kaableid. Jawad jt. [8] toovad välja põhilised rakendusalad, mis aitavad planeerida täppispõllumajandust ning on saavutatavad suurel mastaabil vaid traadita seadmetega: pinnase ja õhu niiskuse, temperatuuri ja mulla viljakuse mõõtmine. Lisaks vajaliku info üleslink saatmisele tuleb teatud põllumajanduslikele rakendustele kasuks, kui seadmed on võimelised ka allalink suhtluseks ehk kuulama instruktsioone. Seda oma-dust on uuritud põllumajanduses näiteks tarkade niisutussüsteemide või kasvuhoonetes tuulutussüsteemide rakendamisel [9].

Samasugustes mastaapsetes tingimustes kasutatakse IoT sensoreid keskkonnanäitajate kogumiseks. Selleks paigaldatakse looduskeskkonda — näiteks jõgedesse, veekogudesse, metsadesse, lagendikele või linnade äärealadele sensoreid, mis raporteerivad jõe voolu [10], vee kvaliteeti [11], vee taset [12], õhukvaliteeti [13] ja muud. Samuti on sellistel sensorvõrkudel potentsiaal kaardistada ja ennustada looduskatastroofe, nagu maaistikupõlengud [14].

Sarker jt. sõnastavad Smart-city kui ühe IoTga tihedalt seotud kontseptsiooni — rakendada suurel hulgal erinevaid mõõtmmissüsteeme linnaplaneerimise hõlbustamiseks [14]. Viidatakse sellele, et see pole küll uus idee, kuid LPWAN tehnoloogiate tulekuga on tekkimas üha enam uusi ettepanekuid targa linna süsteemidele. Staatilisi sensoreid saab linnapildis rakendada näiteks prügikonteinerite täituvuse, liiklustiheduse, helireostuse ja parklate täituvuse raporteerimiseks [15]. GPRS baasil kaugloetavad elektriarvestid on Eesti kodudes kohustuslikud alates 2017. aastast [16] ning 2021. aastaks peavad välja vahetatud olema ka küttegaasi arvestid [17]. Sealjuures on raskendatud leviga kortermajade või keldrite arvestid enamasti ühendatud kontsentratoritega, mis kannavad

andmed traadita andmesideks sobivamasse keskkonda. Alternatiivina kontsentraatoritele saaks usaldusväärse LPWANi levi olemasolul jäätta kommunikeeriv lõppseade mõõtmise asukohta, vähendades vajamineva riistvara hulka.

Staatiliste seadmete kõrval on olulisel kohal ka mobiilsed rakendused, mis eelnevale sarnaselt monitoorivad ennast kandvat sõidukit või looma. Väikseid akutoitega seadmeid on kerge kinnitada loomale või inimesele, et saada automaatseid tervisenäitäjaid loomapidamises [18, 19] või tervishoius [20, 21]. Samuti on mis tahes objektide koordinaatide raporteerimine GPS mooduli abil potentsiaalne kasutusala LPWANi põhiseks positsioneerimiseks, mille potentsiaali on demonstreeritud jalgrattaringluse kontekstis [22] või dementse inimese leidmiseks [23]. Liikuvate lõppseadmete probleemid väljenduvad enim siis, kui seadmed liiguvad levialast välja või satuvad läbistamatute takistuste taha ja andmeside katkeb, mistõttu kasutatav tehnoloogia peab olema piisavalt robustne ja laia katvusega.

Kusuda jt esitavad idee liigitada hoopis tugijaamu paiksete lõppseadmete suhtes [24]. Potentsiaalsete otstarvetena pakuvad autorid välja: prügiauto ja prügikastide vahelist suhlust, et optimeerida korjeteekonda, drooniga pestitsiidide kasutuse tuvastamine ülisuurelt alalt ning kulleri ja majapidamise vaheline eelhoiatus, kui kullerauto jõuab naabruskonda. Sellise süsteemi eelis on levi valikuline kindlustamine ka ülikeerulistest oludes, samaaegselt lõppseadmetele pikka eluiga garanteerides.

2.2 Side optimeerimise meetodid

Lai leviulatus korraga akusäästlikusega on vasturääkivus, sest eeldab justkui võimsa ja kuluka raadiosignaali genereerimist. Selleks, et tehnoloogia täidaks LPWANi tingimusi, on eelkõige oluline, et sideprotokoll võimaldaks lõppseadmele pikka eluiga. Sealjuures on oluline küll distants, kuid muude tegurite osas võib teha olulisi kärpimisi. Selles alapeatükis käsitletakse tehnilisi iseärasusi ehk võtteid, mida kasutatakse LPWAN tehnoloogiate disainis. Järjestuse aluseks on analoogiline loetelu Raza jt [25] 2017. aasta ülevaatest LPWAN tehnoloogiatest.

Signaali levi- ja läbistavusomaduse põhiline tegur on kasutatav sagedus — madalamad sa-

gedused on vähem mõjutatud takistustest ja õhus hajumisest, mistõttu on mitmed LPWAN tehnoloogiad loodud töötama alla 1 GHz sagedustel, mitte enamlevinud 2,4 GHz spektris, mida kasutavad WiFi ja Bluetooth ning ka mõned IoT võrgud nagu Zigbee [26]. Teine viis levivõimekuse suurendamiseks hõlmab signaali kodeerimise- ja modulatsioonitehnikat, ehk OSI mudeli mõistes võrgu esimest (e. füüsolist) kihti. Selleks, et suurendada seadme võimalust demoduleerida ka väga nõrka signaali, luuakse sageli spetsialiseeritud modulatsiooniskeemid, mis on piisavalt vastupanelikud raadiohäiretele ja signaali haju-misele [27]. Selline üle raadioside kantav bitijada peab piltlikult olema selge ja robustne, omades väikest andmeedastuskiirust.

Voolutarbes saavutatakse võit enamasti tänu lõppseadme suurele passiivses olekus vee-ditud aja osakaalule, kui andmeid ei saadeta ega võeta vastu. Anastasi jt [28] uurimus esitab IoT silmusvõrkude voolutarbest tõdetakse, et raadio on eranditult suurim tarbija lõppseadmes, mille ärkvelolekut tuleb võimalikult palju piirata. Kui silmusvõrkudes kulub suur osa lõppseadme ressursist naaberseadme retransleerimisele, siis LPWAN võrgud töötavad üldiselt vaid tähtvõrguna, milles lõppseade suhtleb ainult tugijaamadega [29]. Selle tõttu on LPWANidel palju vabam süvaune planeerimine, sest iga seade hoolitseb vaid enda andmevahetuse eest. Voolutugevus, kui seade on süvaunes, peaks olema suurusjärgus $1 \mu\text{A}$ [30].

Levinud voolusäästmise meetod on ALOHA meediumipöördus, mille puhul ei kasutata meetmeid, et vältida naaberseadmega konfliktimist, vaid minnakse eetrissesse esimesel ette-juhuval ajal [25]. Ühelt poolt on see käitumine odav, kuid suureneb pakettide põrkumise tõenäosust ja seetõttu on tarvis lisameetmeid side usaldusväärse tagamiseks, nagu pakettide kordamine suvalistel kanalitel Sigfoxi näitel [25].

Detsimeeterlainealas (UHF) sobilikud litsentseerimata sagedusvahemikud on enamasti ISM (*Industrial-Scientific-Medical*) ribad, mis on reguleeritud seadmete eetrihõive ja kiirgusvõimsuse osas — Euroopas kehtib näiteks Sigfoxi ja LoRa poolt kasutatavalale 868 MHz sagedusele seadusega sätestatult 1% maksimaalne päevane täitetegur ja 25 mW kiirgusvõimet seadme kohta [31]. See tähendab, et transsiiver võib olla eetris kokku kuni ühe sajandiku ööpäevast, sealhulgas mitte ületada sätestatud võimsust. LPWAN kasutusalad suurest eetrihõivest ei võida, vastupidi on piirangud kooskõlas madala voolutarbe nõudega.

2.3 Tehnoloogiate ülevaade

Käesolevas peatükis antakse üksikasjalik ülevaade hetkel aktuaalsetest LPWANi perekonda kuuluvatest tehnoloogiatest, nende eelistest ja puudustest.

2.3.1 Sigfox

Sigfox on 2010. aastal Prantsusmaa start-upi poolt loodud tehnoloogia, mis loojate visiooni kohaselt tagab ühenduse miljarditele IoT seadmetele, luues minimaalne telekommunikatsionistandardi pisikeste sõnumite edastamiseks [15]. Ettevõte pakub tehnoloogiat ja pilvekeskkonda komplektse teenusena.

Sigfox töötab Euroopas 868,0–868,2 MHz mittelitsentseeritud sagedusalas ning kasutab ülikitsaribalist (Ultra-Narrow-Band ehk UNB) side, milles iga üleslink ülekanne kasutab vaid 100-hertsi laiust riba [32]. Kalfusi ja Hegri [33] hinnangul võimaldab UNB Sigfoxil teiste tehnoloogiate seas esile tõusta mürataluvuse ja saavutatava distantsi osas. Põhjuseks on, et kitsale vahemikule satub harvemini raadiohäireid, mis omakorda alandab üldist ülekande nurjumise tõenäosust ja laseb edukalt vastu võtta kuni -142 dBm hääbunud signaali (RSSI). 100 Hz laiused sõnumid jaotatuna 0,2 MHz ribale tähendab, et pääsupunkt kuulab samaaegselt ligi 2000 teoreetilisel vahemikul, pakkudes küllaldaselt ribalaiust samaaegseteks ülekanneteks ka kasutataval ALOHA mehhanismil.

Teenus lubab maksimaalselt 12 baidi pikkuseid sõnumeid, seadme kohta kuni 140 üleslink ja nelja kaheksabaidist allalink paketti päevas, kusjuures allalink suhtlus on võimalik ainult vastuvõtuaknas, mis avaneb lühidalt peale üleslink sõnumi saatmist. Piirangutega vähendatakse seadmete eetriaega, sõnumite põrkumise tõenäosust ning kokkuvõttes tagatakse võrgu töökindlus ka suurema liikluse puhul. Ühe 12 baidise paketi saatmine võtab aega 2,08 sekundit, mida korratakse kolmel erineval sagedusel, mis tähendab halvimal juhul kuni 6,24 sekundilist latentsi.

Sigfoxi tehnoloogia kasutamine on võimalik ainult läbi ettenähtud ökosüsteemi. Kasutaja peab registreerima end, oma seadmed ning tasuma seadmepõhist ühendustasu. Leviala eest vastutavad Sigfoxi partnerid erinevates riikides, kes haldavad tugijaamu — Eestis

Connected Baltics [34]. Rakendusliidesega on võimalik korraldada suhtlust füüsiliste seadmetega, suunates kuuldud paketid oma rakendustesse ning saata lõppseadmetele sõnumeid tagasi.

2.3.2 LoRaWAN

LoRa (tuletatud *Long Range*) on nimetus füüsilisele kihile, mille on välja arendanud USA ettevõte Semtech [35]. LoRaWAN (Wide Area Network) on sellele loodud protokoll, mis defineerib võrgu arhitektuuri ning võrgu- ja transpordikihi [36]. Protokolli edendaja on ülemaailmne mittetulundusühendus LoRa Alliance – grupp ettevõtteid, kelle ühine eesmärk on luua üldine LPWAN digitaalne ökosüsteem, mis toetaks mastaapsete IoT lahenduste juurutamist litsenseerimata raadiosagedusvahemikes [37].

LoRa modulatsioon on firmaomane ning kuigi selle spetsifikatsiooni pole ametlikult avaldatud, on signaali analüüsitud mitmetes teadustöödes, sh Vangelista [38] poolt. Vangelista iseloomustab seda kui sagedusnihkega sirtsmodulatsiooni, sest bitivoogu kantakse üle sirtsudega (lühikeste tōusude ja langustega sageduses), mis on sümboliteks kodeeritud sagedushüpetega. LoRa võimaldab saatjatel vabalt valida laotustegurit (ingl spreading factor), saavutamaks paremat signaali robustsust andmekiiruse arvelt [39]. Laotustegur on parameeter signaali bitikiiruse arvutamisel ehk teisisõnu määrab see aja, mis kulub ühe sümboli saatmiseks — suurendades laotustegurit on saadetavad sirtsud venitatud pikema aja peale ning kaotatakse kiiruses, seevastu piisab andmete edukaks demoduleerimiseks nõrgemast signaalist. Oulu ülikoolilinnakus läbi viidud katsete kohaselt on LoRa seadmed võimelised suhtlema laotusteguri suurenedes –116 dBm kuni –137 dBm signaalitugevustel [21]. Laotustegur on täisarv vahemikus 7–12 ning vastavad tavapärases 125 kHz kanalis 27–0,3 kbps andmekiirustele [40].

LoRaWAN röhbar lihtsusele ja paindlikkusele, kasutades tähekujulist topoloogiat ning sümmeetrilist signaali üles- ja allalink suhtluseks, mis võimaldab sama riistvara kasutada nii pääsupunkti kui lõppseadme rollis [36]. Protokoll on üksikasjalikult kirjeldatud avalikus LoRaWANi spetsifikatsioonis [41], mistõttu on kõigil võimalik luua universaalselt ühilduvaid seadmed või koguni omaenda võrk. Spetsifikatsiooni kohaselt on seadmetel kolm töörežiimi, mis pakuvad erinevaid võimalusi latentsi või voolutarbe vähendamiseks:

- “A”-klass seadmetele ALOHA meetodil sõnumeerimiseks, mis ei sõltu latentsitundlikutest allalink sõnumitest ehk võtavad infot vastu ainult üleslink saatele järgnevas ajaaknas, veetes muu aja energiasäästlikus olekus,
- “B”-klass sisaldab “A”-klassi funktsionaalsusi, kuid võimaldab eelnevalt kokku leppida seadme kättesaadavuse ajaaknad, kulutades rohkem energiat sidekanali perioodilisele kuulamisele,
- “C”-klass tähendab pidevat kuulamist ehk kahepoolne sõnumeerimine võib toimuda igal ajal.

Avatud protokolli tõttu loob LoRaWAN unikaalse maaстiku LPWAN teenustele. Eesti esimene ja suurim LoRaWAN teenusvõrk on Levikomi NORAnet, mille tugijaamat asuvad kõigis maakonnakeskustes [42]. Alternatiivselt võib kasutada kogukonnale tuginevat The Things Network (TTN) võrku, või hostida avaliku lähtekoodiga rakendusserverit nagu ChirpStack koos isiklike tugijaamadega. TTN on tasuta LoRaWAN teenus mille leviala pakkujateks on vabatahtlikud üle maailma.

2.3.3 NB-IoT

Mobiilsidesandardite loaja 3GPP avaldas 13. väljaandes spetsifikatsiooni mitmele IoT rakendustele suunatud tehnoloogiatele: LTE-M, NB-IoT ja EC-GSM-IoT [43]. Xu jt [44] hinnangul on tegemist mobiilside ettevõtete vastusega vaba sagedusala põhistele LPWAN tehnoloogiatele, pakkudes sobilikku lahendust ka mobiilsidespektrisse. Nimetatud tehnoloogiatest on antud töö kontekstis märkimisväärseim NB-IoT, mis on disainitud töötama sügaval sisetingimustes ja maapiirkonna nurgatagustes [45].

NB-IoT võtab disainilt eeskuju LTEst, kuid sellegipoolest pole tegemist omavahel ühilduvate standarditega [46]. Tehnoloogia eristub oma eelkäijatest voolutarbe ja levi optimeerimiseks tehtud muudatuste poolest, mille hulka kuuluvad uus energiat säästev olek (PSM) ja seadme allalink kättesaadavuse planeerimine (eDRX), lisaks ribalaiuse kitsendamine ja tsükkkelkoodikontrolli suurendamine, millega saavutatakse 20 dB efektiivne signaalivoimendus üle LTE [44]. Nagu LTE, tugineb suhtlus internetiprotokollile, mis

tähendab seadme eksplitsiitset võrguga liitumist ja otse rakendusserveriga suhtlemist, suurendades üldkulu, kuid samas päritakse ennast tõestanud LTE turvamehhanismid [47]. Mitu uurimust [48, 49] soovitab siiski NB-IoT puhul kasutada UDP-põhiseid sideprotokolle nagu CoAP (Constrained Application Protocol), mis sobivad paremini piiratud ressurssidega seadmetele ja kannatavad väiksema paketikao all.

Tehnoloogia pakub konkurentsi ka Sigfoxi ja LoRa robustsetele protokollidele. Analooligiliselt LoRaWANi “B”-klassile saab eDRX abil allalink valmidust ka ette planeerida, hoides muul ajal PSM režiimiga kordades kokku transsiiveri tööaega ja saavutada 10 aastast aku eluiga, kui saata päevas keskmiselt 200 baiti [46]. Modem otsustab side kvaliteedile vastavalt ise, kui suure energia ja koodikontrolliga eetrisse minna, parandades signaali levi raskestipääsetavates kohtades, kusjuures koodikontrolli funktsionaalsus sarnaneb LoRa laotusteguriga, pikendades latentsi robustsema side eest [45]. Mozny jt [50] katsetustest tuleb välja, et tavapäraistes oludes võib 500 baidise sõnumi latents küündida kuni seitsme sekundini, samas näitavad Martinez jt [45], et kõige halvema levi korral pole välistatud kuni 270 sekundiline viivitus, mis võib osutuda probleemiks latentsitundlikele rakendustele. NB-IoT üleslink andmekiirus on keskmiselt 20 kbps mis on LPWAN rakendusteks piisav, samas on allalink andmevahetus ebäsummeetrilise side tõttu igast küljest parem ja litsenseeritud mobiilside spektri tõttu ei toimu sidekanalil üldjuhul suuremaid raadiohäireid ega põrkumisi [46].

Wang jt [46] toovad välja, et sarnasused kahe standardi vahel on sihilikud kiirendamaks tehnoloogia kasutuselevõttu telekomiettevõtete ja kiibistike tootjate poolt. Esiteks on leviala juurutamine võimalik omistades ühe standardse 200kHz laiuse vahemiku olemasolevas LTE rakus teenindama NB-IoTd, mis tähendab, et tehnoloogia on lihtsasti integreeritav olemasolevatesse tugijaamadesse ja töötab paralleelselt LTEga. Teiseks ennustatakse, et riistvara ja tarkvara tarnimine on olemasolevatele LTE moodulite tootjatele lihtsam. Üleüldiselt on protokolli lihtsustatud, et alandada kiibistike keerukust ja omakorda riistvara maksumust [44]. Eestis pakub NB-IoT leviala ainsana Telia, lubades katta kogu Eesti [51].

2.3.4 Alternatiivsed tehnoloogiad

Kirjeldatud tehnoloogiad on töö kirjutamise hetkel kõige suurema mõju ja kajastusega LPWANid. Küll aga leidub sellesse võrguklassi pretendeerivaid tehnoloogiaid rohkem, osa neist mitte nii õnnestunuid ning osa alles populaarsust kogumas.

Litsentseeritud sagedusalas leidub NB-IoTga samaaegselt loodud LTE-M, mille puhul on sarnaselt tegemist LTE vähendatud kujuga. Voolu säästmiseks kasutab tehnoloogia samu meetodeid, mis NB-IoT, kuid levivõimekus jäab tavalise LTE ja NB-IoT vahele [52]. Lauridseni jt [53] võrdlusest avaldub, et efektiivne signaalitugevus on 8 dB nõrgem, kuid seevastu saavutatakse kuni 1 Mbps andmeedastuskiirus, utiliseerides tervelt 1,4 MHz laiust riba. LTE-M on seetõttu vähemoptimeeritud sügavates siseruumides töötamisele kui NB-IoT, kuid sobilik harvade kuid suuremate andmete ülekandeks, kui leviala seadmeni ulatab.

Litsentseerimata sagedusalas...

2.4 Sarnased uurimused

LPWAN on uus ja kiiresti arenev võrkude klass ning iga järjekordse tehnoloogia tulekuga põhjendab tihenev konkurents vajadust neid vörrelda ja verifitseerida. Võrdlevate tulemuste hulka kuuluvad enamjaolt erinevaid tehnoloogiaid kõrvutavad kirjandusülevaated ning simulatsioonimudeli analüüs. Käesolevaga analoogilisi töid, kus kõrvutatakse mitut tehnoloogiat katselisel meetodil, on vähe publitseeritud. Sealhulgas ei leidu autorile teadaolevalt analüüse, mis looks seoseid väljakatsete tulemuste ja erinevate kasutusjuhtude vahel.

Eeskujulikuimad katsed on need, mis annavad ettekujutuse tehnoloogia piirjuhtudest saavutatava levi osas. Selliseid töid tehakse üldiselt ühele tehnoloogiale keskendudes – LoRaWANi puhul näiteks Petäjärvi jt välis- [54] ja sisetingimuste [21] levianalüüs. ning analoogiliselt Kalfuse ja Hégr [33] Sigfoxi võrgu testimine. Igas näites on põhiline küsimus signaali levimine reaalsetes oludes, mõõtes selleks signaalitugevust (RSSI),

signaali ja müra suhet (SNR) ning kaotatud pakettide osakaalu. Ka käesolev töö arvestab neid parameetreid hinnangute tegemisel, kuid asetab vähem röhku katsete hulgale.

Erinevaid tehnoloogiaid korraga on kirjanduses katsetatud mitmel põhjusel. Del Campo jt [55] monitoorivad LoRaWANi ja Sigfoxi sensoreid paralleelselt ühes targa elektrivõrgu rakenduses, võrreldes peamiselt RSSI ja SNRi muutumist ajas, kusjuures LoRaWANi leviala loodi omal käel ning Sigfoxi puhul katsetati olemasolevat teenusvõrku. Palju mitmekülgsema testimise teevad Sikora jt [56], kelle töö hõlmab nii laboratoorseid kui ka maaistikukatsetusi LoRaWANi, Sigfoxi, NB-IoT ja MIOTYga. Kokkuvõtvalt on näidatud iga tehnoloogia paketikadu erinevatelt kaugustelt tugijaamast, kuid katsekeskkond jäab suures osas kirjeldamata.

Laiemalt arutleb valitud tehnoloogiate kasutusuhtude sobivuse ja mittesobivuse üle Sjöström [57] oma magistritöös. Diskussioon kaardistab hästi eeliseid ja puuduseid tehnoloogiate vahel ning toob välja kasutused, kus need nüansid kõige olulisemad on, tehes järedusi vaid kirjanduse analüüsiga põhjal. Käesolev töö on uudne, sest viib kokku kaks olulist poolt tehnoloogiate võrdlusel – teenuste katsetamise ja tulemuste põhjal kasutustele sobivuse järedamise, moodustades terviku aitamaks lugejal luua aimdus konkureerivate tehnoloogiate reaalset potentsiaalist.

Tsavalose ja Hashemi [58] magistritöö Lundi Ülikoolis hindamaks LPWAN tehnoloogiate sobivust tööstussektori kasutusaladele algab kõikide samade tehnoloogiate üksikasjaliku kirjeldusega, mida käsitteb ka käesolev töö, kuid katsetustes valitakse neist välja vaid Sigfox. Kuigi autorite võrdlemise idee sarnaneb tugevalt käesoleva töö metoodikaga, jäi LoRaWAN ja NB-IoT nende skoobist välja, sest puudus valmis infrastruktuur ning enda oma loomine osutus liiga keeruliseks.

3 Võrdlusmetoodika

Erinevate kasutusmallide teostatavuse hindamiseks on plaanitud katseliselt hinnata tehnoloogiaid nende leviomaduste poolest. Teisisõnu taandatakse küsimus, „Milleks tehnoloogia sobib?“, katsetele reaalsete tingimustega asukohtadest ühenduse loomisele. Tingimuste planeerimise eelduseks on, et need osutavad väljakutseks mõnele katsetavate tehnoloogiatest ning pakuks võrdlusmomenti teistega.

Paratamatult ei ole võimalik luua oma tugijaamu mitmele tehnoloogiale, näiteks Sigfoxi puhul selle suletud ökosüsteemi tõttu või NB-IoT puhul reguleeritud sagedusala tõttu. Seetõttu kasututatakse teenuseid, mis omavad Tartu piirkonnas infrastruktuuri:

- Sigfoxi ühenduvus tagatud Connected Balticsi poolt,
- NB-IoT ühenduvus tagatud Telia poolt,
- LoRaWANi puhul nii Levikomi NORAneti nimeline võrk kui ka ise tehtud tugijaam.

Valmisvõrke ja vaba sagedusala peab sealjuures heaperemehelikult kasutama. See täihendab katsete ajalist hajutamist, et mitte hõivata eetrat reaalsete rakenduste eest mõjulasi. Omakorda kogu protsessi kulukuse tõttu ei saa kokkuvõttes teha niivõrd palju katseid, millega oleks võimalik ammendavalt analüüsida paketikadu või teenuste täpset leviala.

Mõõdetavad parameetrid erinevad tehnoloogiate lõikes. Iga katse puhul on peamine, kas edukas üleslink ülekanne üldse toimub. Toimumise korral märgitakse üles iga ülekande RSSI ja selle vastu võtnud tugijaam. Sigfoxi ja LoRaWANi teenused võimaldavad veel lisaks saada ülekande SNR suhte, kuid Telia seda ei avalda. Seevastu on NB-IoT ainuke tehnoloogia, mille latentsi mõõtmise on põhjendatud, tulenevalt eDRXst, mis põhjustab varieeruvat latentsi. Ülejäänud tehnoloogiate latents on ennustatav ja mõõtmist ei vaja.

Katsete skoobist jäab välja kõik, mis puudutab tehnoloogiate levivõimekusega mitte-seonduvat: unetsüklite planeerimine, sidekanali koormusvõimekuse testimine ja seadme voolutarve. Lisaks ei röhuda allalink suhtlusele, sest see on kasutatavatel tehnoloogiatel alati võimekam või võrdväärne üleslingile.

Edasistes alampeatükkides tutvustatakse kasutatavat riistvara ja katsete läbi viimise keskkondi. Esimeses alampeatükis keskendutakse kasutatavalare arendusplaadile, mis simuleerib lõppseadet IoT kontekstis. Seejärel kirjeldatakse alternatiivset lahendust LPWANi leviala tagamiseks, luues oma LoRaWANi tugijaam. Kolmandas alampeatükis kirjeldatakse katsealuseid tingimusi ja põhjendatakse tähtsamad häirivad tegurid iga keskkonna puhul.

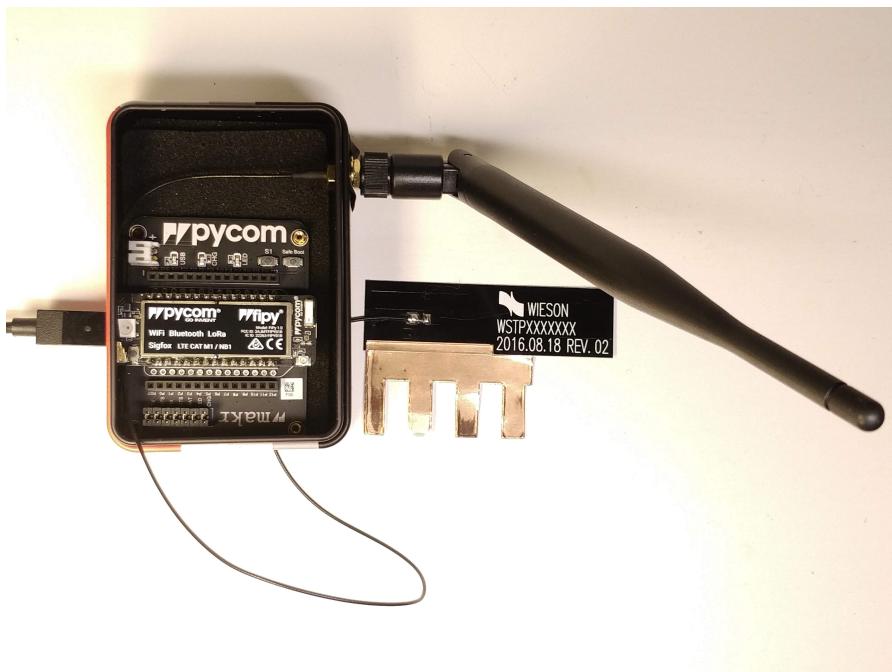
3.1 Arendusplaat FiPy

Pycom toodab IoT arenduskomplekte, mis võimaldavad arendajatel hõlpsalt prototüüpida oma IoT lahendusi ning katsetada sealjuures erinevaid sidetehnoloogiaid. FiPy on ESP32 mikrokontrolleri põhine arendusplaat, mis on programmeeritav MicroPythonis ning on integreeritud mitme erineva LPWANi tehnoloogiaga: LoRa, Sigfox, NB-IoT ja LTE-M. Tootja tarnib IoT arendusplaate oma MicroPythoni implementatsiooniga, mis sisaldab teeke tehnoloogiate mugavaks käitamiseks.

Seadme programmeerimiseks, koodi käitamiseks ja toiteks kasutatakse laiendusplaati Expansion Board v3.1, mis võimaldab REPL (*read-eval-print loop*) keskkonna käitamist üle USB. Lisaks kuuluvad komplekti veel isotroopiline 868 MHz antenn Sigfoxi ja LoRa jaoks ning mobiilsideantenn NB-IoT jaoks. Testimiseks kasutatav seade on kujutatud joonisel 1.

FiPy on katsetes lõppseadme rollis, ehk simuleerib üksikut IoT seadet suhtlemas iga uuritava LPWANi võrgu tugijaamadega. Lõppseadme vaatepunktist loob kirjeldatud kõik-ühes süsteem igati võrdsed tingimused katsete teostamiseks igale tehnoloogiale, arvestades järgmisi asjaolusid:

- arendusplaat kasutab usaldusväärseid OEM modemeid,
- kõik modemid jagavad ühte mikrokontrollerit,
- arendusplaat ei ületa sätestatud signaalivõimsusi,
- antennid on seadmele kalibreeritud.



Joonis 1. FiPy lõppseade mitme võrgu testimiseks.

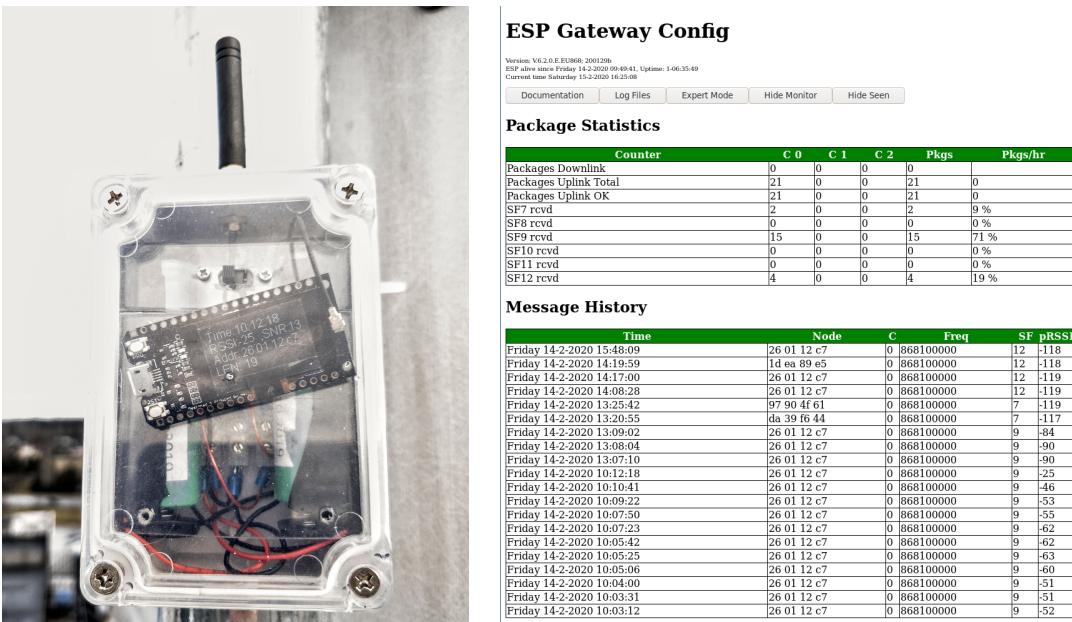
Kasutatud testskript välja toodud lisades (Lisa 1).

3.2 LoRaWANi tugijaam

Juhul kui ükski valmisvõrk ei ole rakenduseks sobilik, on võimalik luua isiklik LoRaWANi võrk või leviala. Esimese eelduseks on rakendusserver, milleks võib olla avalik võrk, nagu TTN või isiklikult hostitud LoRaWAN serveri implementatsioon. Oma levialaks on vajalik tugijaam, mis on ühelt poolt LoRaWANi sagedustel pidevalt kuulav LoRa seade ning teiselt poolt paketiedastaja, mis suhtleb rakendusserveriga ning edastab kuulduid pakette. Sellise paketiedastaja lihtsaimal kujul ehitamiseks on vaja LoRa transsiivermoodulit ning Internetivõimekusega mikrokontrollerit või Raspberry Pi-d. Sõltuvalt valitud konfiguratsiooni populaarsusest on võrdlemisi lihtne oma riistvarale leida avalik koodirepositorium, millega LoRaWANi spetsifikatsioonile vastav tugijaam üles seada.

Töö raames kasutatav seade on WiFi toega ESP32 mikrokontrolleri põhine arendusplaat

TTGO v1, millel on Semtech SX1276 LoRa transsiiver. Tugijaam on lisaks varustatud lühikese isotroopilise LoRa antenniga ja displeiga ning on koos akutoitega ilmastukindlas karbis, et seda oleks lihtne välioludes rakendada (joonis 2). Mikrokontroller on programmeeritud avalikust repositoariumist laenatud koodiga, mis võimaldab tööajal kaudset konfigureerimist ja monitoorimist üle veebi. Rakendusserverina kasutab seade TTN avalikku võrku.



Joonis 2. Isiklik LoRaWANi tugijaam ja selle veebiliides.

Katsetugijaam on lihtsasti teisaldatav erinevatesse kohtadesse ning pääseb võrku läbi kaasasoleva WiFi pääsupunkti, mis on omakorda ühendatud LTE modemiga. Oluline on märkida, et tugijaam pole riistvarast tingitud piirangute tõttu täielikult LoRaWAN spetsifikatsioonile vastav ning on seetõttu sobiv vaid prototüüpimiseks. Erinevus täisväärtsusliku tugijaamaga tuleneb transsiivermoodulist, mis on töökindel korraga teenindama vaid ühel kanalil ja laotusteguril. Sellise lahenduse mastaapne kasutamine võib liigset koormata kitsast vahemikku 868 MHz sagedusest ning tekitada ebaproportsionaalselt häireid teiste sama piirkonna LoRa rakenduste töös. Erinevus kajastub ka hinnaklassis — täisvõimekusega LoRa modemi maksumus on 50-300€, käesoleva hind umbes 5€.

3.3 Katsete tingimused

Järgnevalt kirjeldatakse, millised on vaadeldavad tingimused, kus katseid läbi viiakse, ning mida on asukohtade valikul silmas peetud nii kasutusujuhte kui raskendavaid tegureid arvestades. Huvi pakkuvaid kriteeriume kontrollitakse kolmes keskkonnas, mis on omakorda käsitletud eraldi alapeatükkides: maapiirkond, linnapiirkond ja liikuv tugijaam.

3.3.1 Maapiirkond

Maapiirkonna all mõeldakse väiksema hoonestusega alasid, kus peamiseks side häirivateks faktoriteks on pinnamood ja mets. Asukoha valikul keskendutakse eelkõige keskkonna- ja pöllumajandusrakenduste kriteeriumidele: levikaugus ja teenuse kvaliteet nii tugijaama silmsidega kui -sideta seadmetel.

Vaadeldav piirkond on marsruudil Tartu-Elva-Otepää, mis pakub mitmekesist maastikku testideks nõgudes ja küngastel. Suurimateks väljakutseteks on levi ulatumine pinnavormide taha ja maksimaalne distants. Katseteks on LoRaWANi tugijaam kinnitatud Tartu Lõunakeskuse seitsmekorruselise hoone katusele.

Kõrvalepõikena tehakse valik katseid lõppseadme liikumiselt maanteekiirusel, et kontrollida tehnoloogiate vastupanu Doppleri efektile, ehk lainesageduse moondumist vastuvõtja poole liikudes, mille olulisust eriti Sigfox ülikitsasriba modulatsioonile on välja toonud Kalfus ja Hégr [33].

3.3.2 Linnapiirkond

Linnapiirkonna puhul peetakse silmas tihedat asustust. Kontrollitakse targa linna keskseid rakendusi, kus lõppseadmed asetsevad kohtades nagu korterid, keldrid või tänavad, varjatud hoonete ja muude takistustega. Olulisemad kriteeriumid, mis annavad tehnoloogiale eelise on läbistavus ja peegeldumine.

Piirkond hõlmab peamiselt Tartu Annelinna ja kesklinna linnaosi. Side luuakse variee-

ruvates sügavustest kortermajade varjust, hoonete sisemustes ja keldrites. LoRaWANi tugijaam on nendeks katseteks asetatud Tartu Tasku keskuse Plasku hoone katusele.

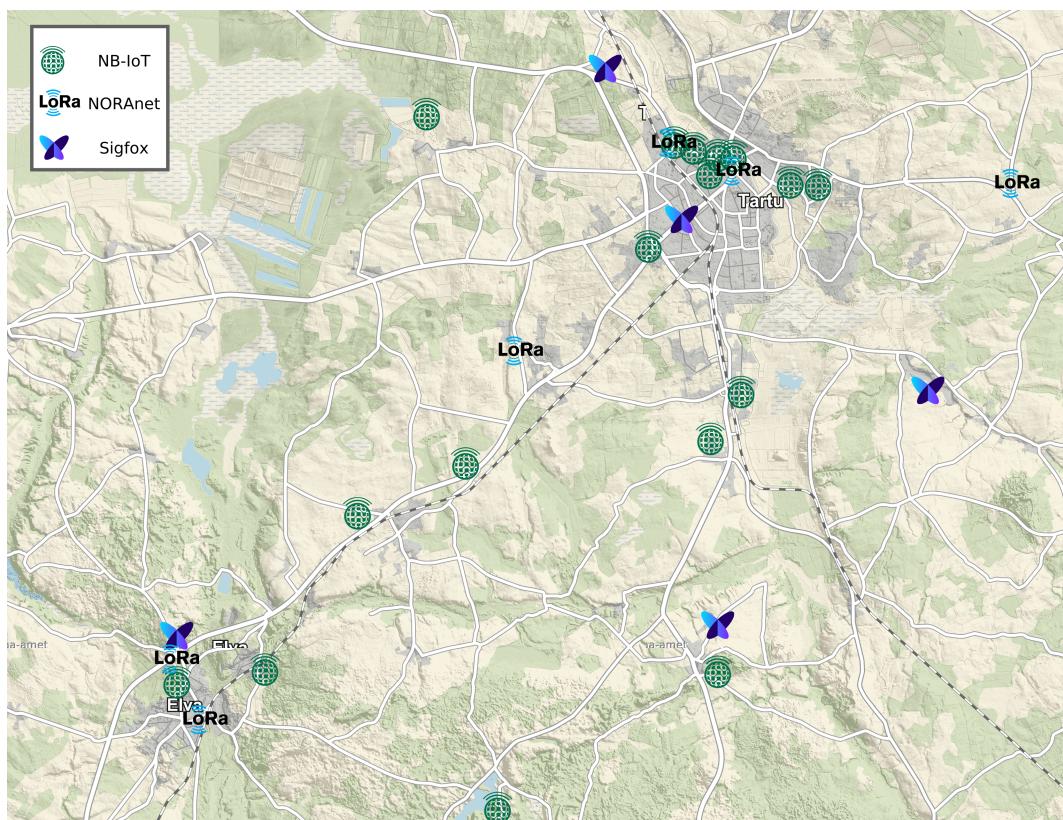
3.3.3 Liikuv tugijaam

Eraldiseisvalt uuritakse veel andmete kogumist transporditavalta tugijaamalt. Testide puhul näeb see ette nii tugijaama kui lõppseadme asetsemist maapinna ligidal või hoones. Selliste stsenaariumidega jälgendatakse väiksema piirkonna sensoriteilt info kogumist näiteks autos asetseva tugijaama abil.

Katses rakendatakse loodud LoRaWANi tugijaama kahes asukohas: korteri tualettruumi valamukapis veearvestil ja kortermaja prügikonteinerite läheduses. Raskendavad asjaolud vastavalt asukohale on ekstreemne läbistavus ja levi maapinnalt maapinnale erinevate takistustega.

4 Tulemused

Katsete käigus on oluline meeles pidada erisusi teenuste teeninduspiirkondades. Erinevate meetodite abil on võimalik saada ettekujutus tugijaamade tegelikest asukohtadest, mis aitab edasisi mõõtmisi targemini tölgendada. NB-IoT puhul aitas ühendatud sidemaste lokaliseerida *Cellmapper*¹ keskkond, NORAnet veebiliides avaldab kätte saadud tugijaamade täpsed koordinaadid oma veebiliideses. Sigfox jaamade asukohad pole avalikult leitavad, kuid on umbkaudselt tuletatavad veebiliidesest kättesaadava levi kaardi abil. Joonisel 3 on kujutatud tugijaamat, millega saavutati ühendus üle kõikide katsete.



Joonis 3. Leitud tugijaamat.

Mastaapseimat kattuvust pakub Telia, mille infrastruktuur tugineb suuresti olemasolevatele LTE jaamadele, mis on seadistatud serveerima ka NB-IoTd. NORAnetil on kuus

¹<https://www.cellmapper.net/map> (22.03.2020)

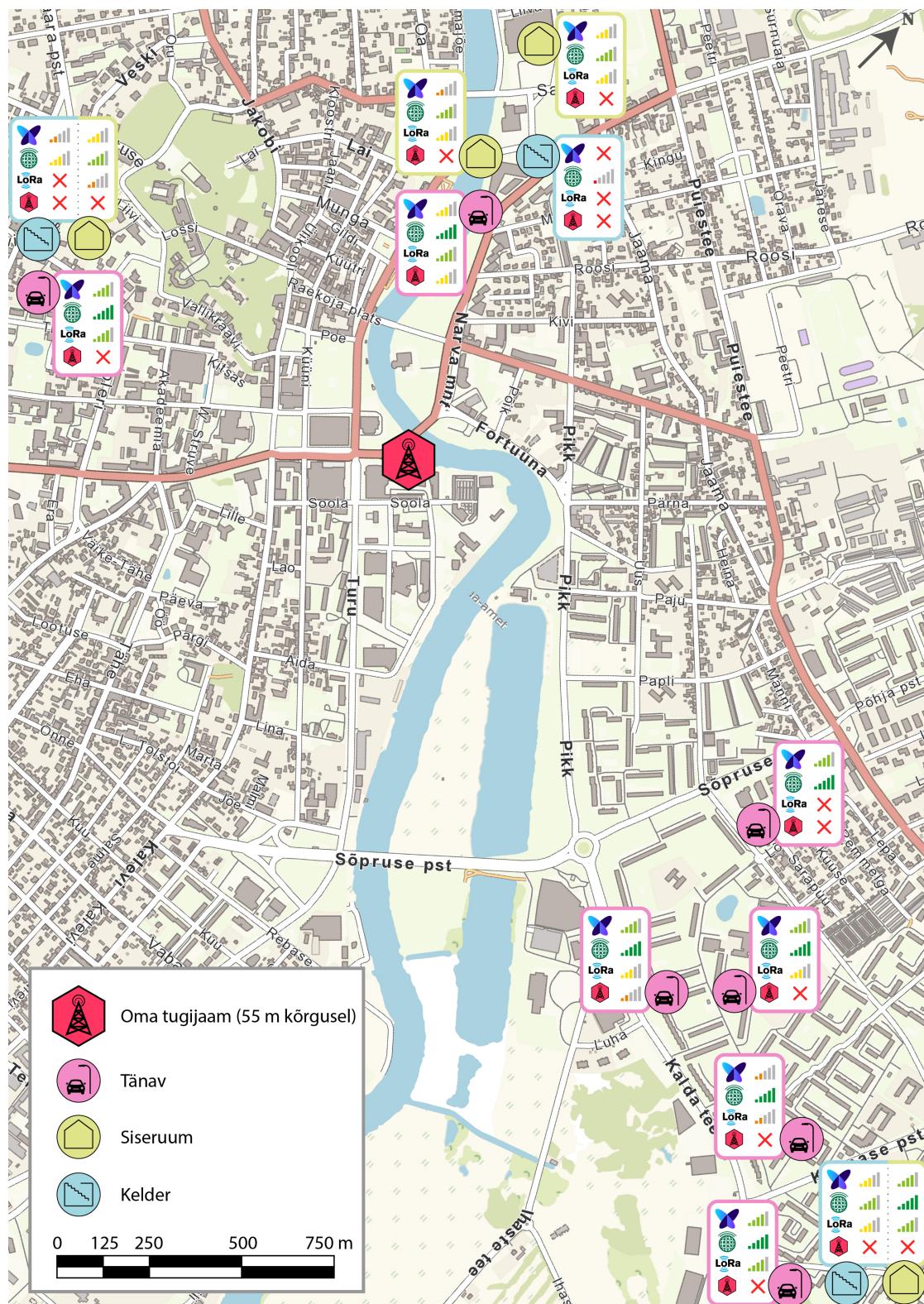
ning Sigfoxil viis tugijaama Tartu piirkonnas, mis on palju hõredam kui NB-IoTl.

Maapiirkonnas tehti katseid 14 erinevast asukohast (joonis 5). Pelgalt ühenduse loomisega viieteistkümne kilomeetri raadiuses Tartu kesklinnast lõuna poole saavad eranditult hakkama NB-IoT ja Sigfox. Võttes arvesse NB-IoT jaamade hulka, on tagantjärele selge, et levialast välja sattumine on tugijaamade liiasuse ja teeninduspiirkondade kattuvuse tõttu väga keeruline. Selgemini saab võrrelda Sigfoxi ja NORAneti. Sügavamates nõgudes ja metsades esines NORAneti võrgus paketikadu ning mitmel korduskatsel oli näha, et side töötas oma võimekuse piiril, raporterides -122 dBm vastuvõetud signaalitugevust ning SNR väärtsusega -17 ehk raadiomüra tasemest 17-kordsest nõrgemat signaali. Sigfoxi puhul asetseb lävi palju kõrgemal – kõige nõrgem saavutatud ülekanne antud raadiuses oli -132 dBm ning paketikadu ei tähdeldatud.

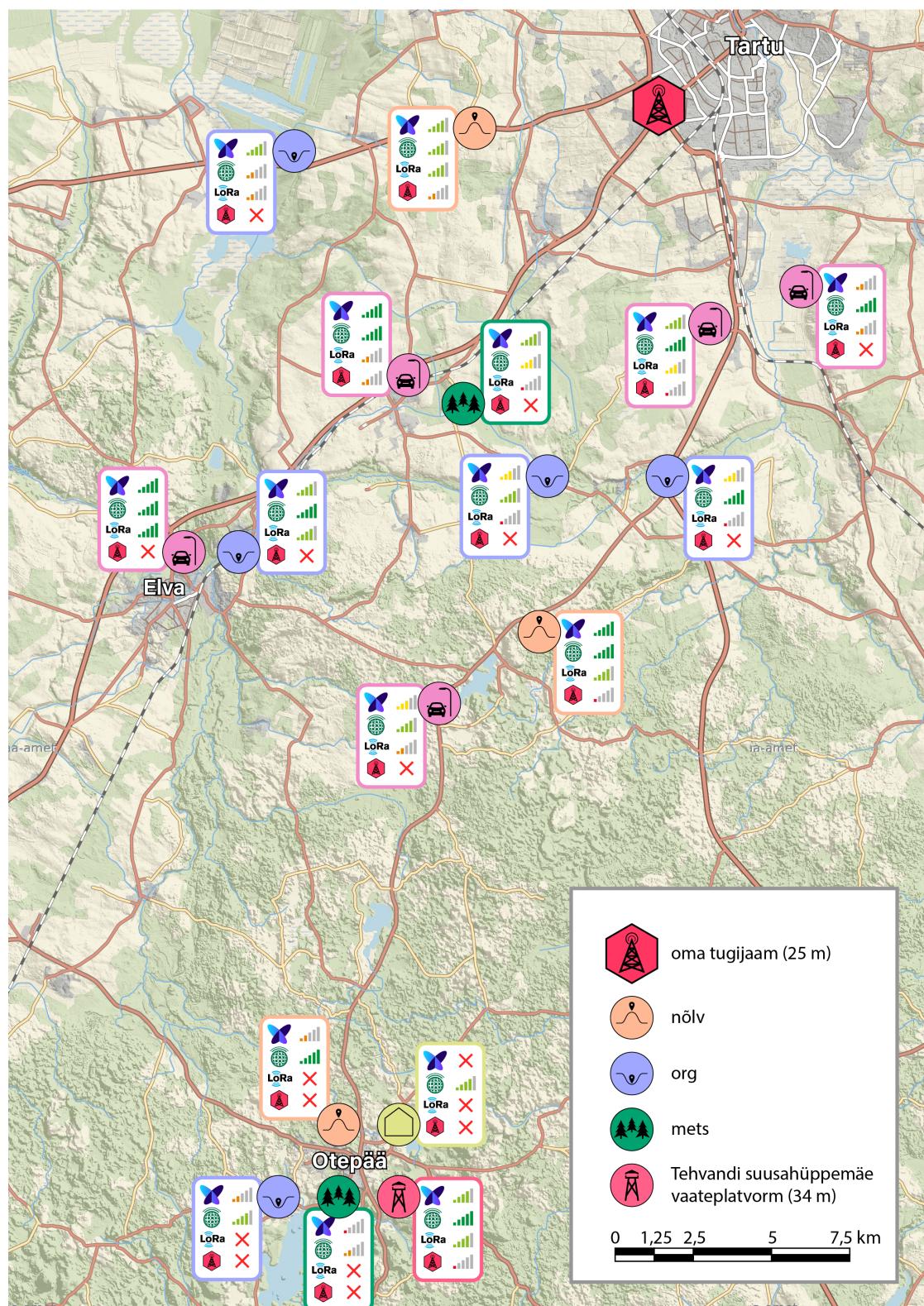
Erinevalt kolmest teenusvõrgust, on oma tugijaama lahendusel vaid üks keskne pääsuspunkt, mistõttu sai kontrollitumalt kombata levikauguse piire, ilma et seade mõne muu jaamaga haakuks. Silmsidega katsetel saavutati suurim distants 35 kilomeetri kaugusel asuvast Tehvandi suusahüppetornist ning ka nõlval, poole tee peal Pangodis. Samas vähegi realsemates oludes – väiksemates metsatukkades, nõlvade varjus või majade vahel kadus side täielikult isegi seitsme kilomeetri raadiuses.

Maanteekiirusel testides iga teenuse kindla leviala piires ei tähdeldatud liikumisest tingitud paketikadu. NB-IoT puhul avaldus probleem hoopis selle võimetusest haakida end implitsiitselt uue sidemasti külge, jõudes selle masti levialast välja, millega esmalt ühendati. Probleem väljendub enim selles, et haakimisprotseduur võttis üle kõikide katsete aega keskmiselt 20 sekundit, mis kergitab latentsi ning sellele eelnevalt puudub võimalus allalink sõnumiteks.

Linnatänavatel oli paiku kokku seitse (joonis 4). LoRa puhul võis ka Annelinna majade vahel leida leviauke nii NORAneti kui oma tugijaamaga, kusjuures oma tugijaam kaotas side juba vähimagi hoonestuse varjega poolteise kilomeetriselt distantsilt. Sigfoxi jaoks oli Annelinn tugijaamadega varustatavust arvestades keerulistes tingimustes, kuid sellegipoolest ei tuvastatud välitingimustes paketikadu isegi kui ühes asukohas küündis vastuvõetud signaalitugevus -141 dBm-ni. NB-IoT välitingimustel probleeme ei tekitanud ning üleslink latents püsisis pidevalt 0,3–0,5 sekundi vahemikus.



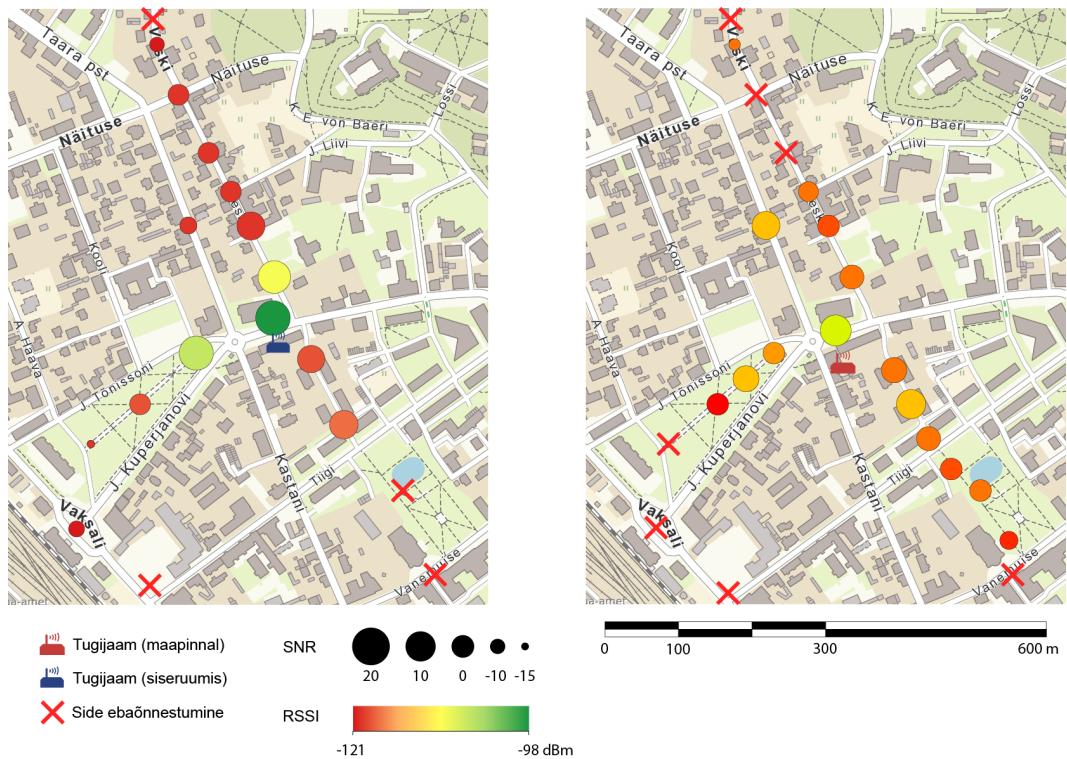
Joonis 4. Linnakatsete tulemused.



Joonis 5. Maapiirkonna katsete tulemused.

Katseid siseruumides tehti neljas linnasiseses asukohas. Tartu Ülikooli Delta hoone keldrikorrusel kaotasid täielikult signaali Sigfox ja kumbki LoRaWAN teenus. Samas kohas oli NB-IoT raskusi võrku ühendumise protseduuriga, ning õnnestumisel küündis 16 baidise COAP paketi latents 1,17 sekundini. Deltas said Sigfox ja NORAnet oma levi tagasi alates esimesest korrukest. Oma tugijaamaga kommunikeerida ei õnnestunud, isegi kui see asus Plasku hoone katusel koos NORAneti tugijaamaga, millega omakorda side saavutati. Viimane viitab tõenäoliselt antenni erinevustele, milles Levikomi seadmetel on eelis. Kahes katsealuses paneelmaja keldris töötas NB-IoT tõrgeteta ja alla sekundilise latentsiga, Sigfox läbistusvõime oli samuti väga hea. Keskkonna kortermaja keldris oli NORAnet ainuke, mis ühendust ei loonud.

LoRaWANi ja oma tugijaama lühikesel distansil proovides katsetati läbistavust nii hoones sees kui ka vabas õhus maapinnalt. Joonisel 6 on kujutatud katseid kummagi tugijaama asetusega. Piki tänavat põhjapoole liikudes võimaldas veemõõtjat imiteeriv LoRa seade minna 415 meetri kaugusele, kuni esimese kurvini teel. Lõuna pool ehk kaugemast küljest oli distantsi võimalik suurendada vaid 100 meetrini, kuni ükski pakett isegi suurima laotusteguriga kohale ei jõudnud. Külgsuunas jõuti võimekuse piirini 350. meetril. Asetades seadme maja taha maapinnale, pikenes lõuna- ehk majatagus suunas distants 300 meetrini ning hoolimata vahetust takistusest kortermaja näol jäi põhjasuunal tulemus samaks. Külgsuunas, mis nüüd kannatas kannatas suurima varje ees ei levinud üle 200 meetri.



Joonis 6. Lähikatsete tulemused kahe tugijaama asetuse suhtes.

5 Diskussioon

Siiia ilmub arutlus/analüüs, mis tehnoloogia on sobiv erinevatele kasutusjuhtudele, milline ei sobi üldse jne. Ühtlasi ilmutatakse siin vastus uurimisküsimusele

6 Kokkuvõte

Viidatud kirjandus

- [1] Sarath Chandu Gaddam and Mritunjay Kumar Rai. A comparative study on various lpwan and cellular communication technologies for iot based smart applications. In *2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research (ICETIETR)*, pages 1–8. IEEE, 2018.
- [2] Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, and Marimuthu Palaniswami. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7):1645–1660, 2013.
- [3] Alojs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, and William Mark Townsley. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16(9):1466, 2016.
- [4] Malo Mabon, Matthieu Gautier, Baptiste Vrigneau, Mickaël Le Gentil, and Olivier Berder. The smaller the better: Designing solar energy harvesting sensor nodes for long-range monitoring. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019, 2019.
- [5] Chii Chang, Satish Narayana Srirama, and Rajkumar Buyya. Internet of things (iot) and new computing paradigms. *Fog and edge computing: principles and paradigms*, pages 1–23, 2019.
- [6] Emil Nilsson and Christer Svensson. Power consumption of integrated low-power receivers. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 4(3):273–283, 2014.
- [7] Min Chen, Yiming Miao, Xin Jian, Xiaofei Wang, and Iztok Humar. Cognitive-lpwan: Towards intelligent wireless services in hybrid low power wide area networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 3(2):409–417, 2018.
- [8] Haider Mahmood Jawad, Rosdiadee Nordin, Sadik Kamel Gharghan, Aqeel Mahmood Jawad, and Mahamod Ismail. Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors*, 17(8):1781, 2017.

- [9] Sani Abba, Jonah Wadumi Namkusong, Jeong-A Lee, and Maria Liz Crespo. Design and performance evaluation of a low-cost autonomous sensor interface for a smart iot-based irrigation monitoring and control system. *Sensors*, 19(17):3643, 2019.
- [10] Wael Guibene, Johannes Nowack, Nikolaos Chalikias, Kevin Fitzgibbon, Mark Kelly, and David Prendergast. Evaluation of lpwan technologies for smart cities: River monitoring use-case. In *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pages 1–5. IEEE, 2017.
- [11] Yan-Ting Liu, Bo-Yi Lin, Xiao-Feng Yue, Zong-Xuan Cai, Zi-Xian Yang, Wei-Hong Liu, Song-Yi Huang, Jun-Lin Lu, Jing-Wen Peng, and Jen-Yeu Chen. A solar powered long range real-time water quality monitoring system by lorawan. In *2018 27th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC)*, pages 1–2. IEEE, 2018.
- [12] Carlos Moreno, Raúl Aquino, José Ibarreche, Ismael Pérez, Esli Castellanos, Elisa Álvarez, Raúl Rentería, Luis Anguiano, Arthur Edwards, Paul Lepper, et al. Rivercore: Iot device for river water level monitoring over cellular communications. *Sensors*, 19(1):127, 2019.
- [13] Markus Knoll, Philipp Breitegger, and Alexander Bergmann. Low-power wide-area technologies as building block for smart sensors in air quality measurements. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 135(6):416–422, 2018.
- [14] James Jin Kang, Iryna Khodasevych, and Sasan Adibi. A disaster recovery system for location identification-based low power wide area networks (lpwan). In *27th International Telecommunication Networks and Applications Conference*, pages 1–6, Melbourne, 2017. VIC.
- [15] Andrea Zanella, Nicola Bui, Angelo Castellani, Lorenzo Vangelista, and Michele Zorzi. Internet of things for smart cities. In *IEEE Internet of Things Journal*, volume 1, pages 22–32. IEEE, 2017.
- [16] Sten Laurit. Eesti madalpingevõrgu analüüs kaugloetavate arvestite baasil, 2017.

- [17] Tulevaks aastaks tuleb gaasiarvestid välja vahetada. <https://www.err.ee/1002491/tulevaks-aastaks-tuleb-gaasiarvestid-valja-vahetada>, 2019. (07.03.2020).
- [18] Lorenzo Germani, Vanni Mecarelli, Giuseppe Baruffa, Luca Rugini, and Fabrizio Frescura. An iot architecture for continuous livestock monitoring using lora lpwan. *Electronics*, 8(12), 2019.
- [19] Q. Li, Z. Liu, and J. Xiao. A data collection collar for vital signs of cows on the grassland based on lora. In *IEEE 15th International Conference on e-Business Engineering*, pages 213–217, Oct 2018.
- [20] Damilola D. Olatinwo, Adnan Abu-Mahfouz, and Gerhard Hancke. A survey on lpwan technologies in wban for remote health-care monitoring. In *Sensors*, volume 19, 2019.
- [21] Juha Petäjäjärvi, Konstantin Mikhaylov, Rumana Yasmin, Matti Hämäläinen, and Jari Iinatti. Evaluation of lora lpwan technology for indoor remote health and wellbeing monitoring. In *10th Int. Symp. Med. Inf. Commun. Technol. (ISMICT)*, pages 1–5, 2017.
- [22] D. H. Kim, J. B. Park, J. H. Shin, and J. D. Kim. Design and implementation of object tracking system based on lora. In *2017 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pages 463–467, Jan 2017.
- [23] T. Hadwen, V. Smallbon, Q. Zhang, and M. D’Souza. Energy efficient lora gps tracker for dementia patients. In *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pages 771–774, July 2017.
- [24] K. Kusuda and M. Iwata. Application-oriented lpwa network with a moving gateway and stationary end-nodes. In *2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pages 2351–2356, Oct 2019.
- [25] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2):855–873, Secondquarter 2017.

- [26] J. Bardyn, T. Melly, O. Seller, and N. Sornin. Iot: The era of lpwan is starting now. In *ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference*, pages 25–30, Sep. 2016.
- [27] B. Reynders, W. Meert, and S. Pollin. Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication. In *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, pages 1–6, May 2016.
- [28] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, and Andrea Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 7(3):537–568, 2009.
- [29] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5):60–67, October 2016.
- [30] Claire Goursaud and Jean-Marie Gorce. Dedicated networks for iot: Phy / mac state of the art and challenges. *EAI endorsed transactions on Internet of Things, European Alliance for Innovation*, 2015.
- [31] Short Range Devices (SRD) operatingin the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz; Part 2: Harmonised Standard for access to radio spectrum for non specific radio equipment. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/03.02.01_30/en_30022002v030201v.pdf. (07.03.2020).
- [32] Sigfox technical overview. <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>. (10.03.2020).
- [33] Radim Kalfus and Tomáš Hégr. Ultra narrow band radio technology in high-density built-up areas. In *International Conference on Information and Software Technologies*, pages 663–676. Springer, 2016.
- [34] Sigfox. <https://www.sigfox.com/en/coverage>. (07.03.2020).
- [35] What is LoRa. <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. (07.03.2020).
- [36] What is LoRaWAN. <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>. (07.03.2020).

- [37] LoRa Alliance. <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>. (07.03.2020).
- [38] L. Vangelista. Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(12):1818–1821, Dec 2017.
- [39] LoRa modulation basics. <http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf>. (07.03.2020).
- [40] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, 55(9):34–40, Sep. 2017.
- [41] LoRaWAN 1.1 Specification. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_-v1.1.pdf. 07.03.2020.
- [42] Asjade interneti võrk sai uue tehnoloogia. <https://www.logistikauudised.ee/uudised/2019/04/01/asjade-interneti-vork-sai-uue-tehnoloogia>. 07.03.2020.
- [43] 3GPP Standards for the Internet-of-Things. https://www.3gpp.org/images/presentations/3GPP_Standards_for_IoT.pdf. 07.03.2020.
- [44] J. Xu, J. Yao, L. Wang, Z. Ming, K. Wu, and L. Chen. Narrowband internet of things: Evolutions, technologies, and open issues. 5(3):1449–1462, June 2018.
- [45] B. Martinez, F. Adelantado, A. Bartoli, and X. Vilajosana. Exploring the performance boundaries of nb-iot. 6(3):5702–5712, June 2019.
- [46] Y. . E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, and H.Š. Razaghi. A primer on 3gpp narrowband internet of things. 55(3):117–123, March 2017.
- [47] S.Š. Basu, A. K. Sultania, J. Famaey, and J. Hoebeke. Experimental performance evaluation of nb-iot. In *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pages 1–6, Oct 2019.

- [48] J. Wirges and U. Dettmar. Performance of tcp and udp over narrowband internet of things (nb-iot). In *2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTaIS)*, pages 5–11, Nov 2019.
- [49] Anna Larmo, Antti Raitilainen, and Juha Saarinen. Impact of coap and mqtt on nb-iot system performance. 19(1):7, March 2019.
- [50] R. Mozny, P. Masek, M. Stusek, K. Zeman, A. Ometov, and J. Hosek. On the performance of narrow-band internet of things (nb-iot) for delay-tolerant services. In *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pages 637–642, July 2019.
- [51] Telia avas eestit katva asjade interneti võrgu. <https://www.telia.ee/uudised/telia-avas-eestit-katva-asjade-internetti-vorgu>. 07.03.2020.
- [52] Badr Eddine Benhiba, Abdessalam Ait Madi, and Adnane Addaim. Comparative study of the various new cellular iot technologies. In *2018 International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)*, pages 1–4. IEEE, 2018.
- [53] Mads Lauridsen, István Kovács, Preben Mogensen, Mads Sorensen, and Steffen Holst. Coverage and capacity analysis of lte-m and nb-iot in a rural area. In *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [54] Juha Petajajarvi, Konstantin Mikhaylov, Antti Roivainen, Tuomo Hanninen, and Marko Pettissalo. On the coverage of lpwans: range evaluation and channel attenuation model for lora technology. In *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, pages 55–59. IEEE, 2015.
- [55] Guillermo del Campo, Igor Gomez, Guillermo Cañada, and Asuncion Santamaria. Hybrid lpwan communication architecture for real-time monitoring in power distribution grids. In *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 920–924. IEEE, 2019.
- [56] Axel Sikora, Manuel Schappacher, Zubair Amjad, et al. Test and measurement of lpwan and cellular iot networks in a unified testbed. In *2019 IEEE 17th International*

Conference on Industrial Informatics (INDIN), volume 1, pages 1521–1527. IEEE, 2019.

- [57] Daniel Sjöström. Unlicensed and licensed low-power wide area networks: Exploring the candidates for massive iot, 2017.
- [58] Nikolaos Tsavalos and Ahmad Abu Hashem. Low power wide area network (lpwan) technologies for industrial iot applications. 2018.

Viidete formaat. Osad viited veel käsitsi pandud, mistõttu on numbrid valed

Lisad

I. Testskriptid

II. Litsents

Lihtlitsents lõputöö reproduutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, **Kert Tali**,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose **LPWAN raadiovõrkude võrdlus ja kasutusjuhud Tartu näitel**, mille juhendaja on Alo Peets, reproduutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reproduutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tületatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäädvad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kert Tali

pp.kk.aaaa