

TARTU ÜLIKOOL
Arvutiteaduse instituut
Informaatika õppekava

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:

Sigfox, LoRaWAN and NB-IoT are the best known LPWAN (Low Power Wide Area Network) technologies, which allow for large scale deployments of IoT applications. This survey assesses the suitability of those technologies to known IoT use cases by testing the available services in challenging environments near and within Tartu, Estonia. The resulting analysis gives insight about the best services to use for static sensor, mobile tracking or remotely operated device based applications. Testing is conducted on the FiPy development board by Pycom. In addition to the services, a self-made LoRaWAN gateway is also built and tested in parallel.

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:

Sigfox, LoRaWAN ja NB-IoT on hetkel aktuaalseimad LPWANid ehk madala voolutarbe ja laia ulatusega raadiovõrgud, mis võimaldavad mastapsete asjade interneti rakenduste juurutamist. Käesolev töö analüüsib tehnoloogiate sobivust levinud IoT kasutusjuhtudele, katsetades selleks Tartus kättesaadavaid teenuseid reaalses oludes linnas ja lähialadel. Levi analüüsi tulemustes kajastuvad parimad teenused staatilise sensorvõrgu, liikuvate jälgimisseadmete või kaugjuhitavate aktuaatorite rakenduses kasutamiseks. Katseteks kasutatakse arendusplaati Pycom FiPy ning lisaks teenusvõrkudele luuakse ja katsetatakse ise tehtud LoRaWANi tugijaama.

Võtmesõnad:

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

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

Sisukord

Sissejuhatus	4
1 Madala voolutarbe ja laia ulatusega võrgud	6
1.1 Kasutusjuhud	7
1.2 Side optimeerimise meetodid	8
1.3 Tehnoloogiate ülevaade	10
1.3.1 Sigfox	10
1.3.2 LoRaWAN	11
1.3.3 NB-IoT	13
1.3.4 Alternatiivsed tehnoloogiad	14
1.4 Sarnased uurimused	16
2 Võrdlusmetoodika	18
2.1 Arendusplaat FiPy	20
2.2 LoRaWANi tugijaam	23
2.3 Katsete tingimused	25
2.3.1 Maapiirkond	25
2.3.2 Linnapiirkond	26
2.3.3 Liikuv tugijaam	26
3 Tulemused	27
4 Diskussioon	34
5 Kokkuvõte	37
Viidatud kirjandus	39
Lisad	46
I. Testskriptid	46
II. Litsents	49

Sissejuhatus

Asjade internet (*Internet of Things* ehk IoT) on omandamas üha mastaapsemaid mõõtmeid ning pidevalt on juurde tekkimas uusi ettepanekuid erinevate eluvaldkondade probleemide lahendamiseks nutikate seadmetega. Uuenduslikud ideed seisavad sageli vastamisi tehnoloogiliste ja füüsiliste piirangutega. Üks sellistest pudelikaeladest hõlmab seadmetevahelist suhtlust (*Machine-to-Machine* ehk M2M), mille puhul tuleb riistvara arendajal valida olemasolevate sidetehnoloogiate seast oma rakendusele sobivaim. Traadita andmeside tehnoloogiate seas on populaarsust kogumas uus klass madala voolutarbe ja laia ulatusega võrgutehnoloogiaid ehk LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Konkureerivad tehnoloogiad – Sigfox, LoRa, NB-IoT, LTE-M lubavad võrgu lõppseadmetele suurusjärgus kümneaastast aku eluiga ja kümnekilomeetrist efektiivset leviulatust.

Kuigi tehnoloogiad täidavad ühist nišši pakkuda laiahaardelist ja usaldusväärset ühenduvust ressursidest piiratud seadmetele, erinevad need oma võimekuse poolest märkimisväärselt. Uurimistöö eesmärk on hinnata Tartus kättesaadavate teenuste sobivust erinevatele asjade interneti kasutusjuhtudele, milleks võib olla näiteks tark arvesti kortermaja keldris või turvasüsteem maakodule. Ülevaade on väärtuslik lähtekoht väiksematele teenusepakkujatele, kes kaaluvad kaugloetavate seadmete kasutuselevõttu, kuid soovivad tugineda kasutatava võrgu valiku tegemisel teiste kogemustele ja testidele.

Uurimuse meetod on riistvara katsetamine, mille käigus mängitakse läbi LPWANi lõppseadme käitumine erinevates raskendatud leviga paikades. Katseid viiakse läbi kolme Tartus kättesaadava LPWAN tehnoloogial põhineva teenuse peal: Levikomi NORAnet, Connected Balticsi Sigfox ja Telia NB-IoT. Nendele lisaks demonstreeritakse ka oma LoRaWANi võrgu loomist ning seda katsetatakse paralleelselt valmisvõrkudega. Eelkõige jälgitakse lõppseadme võimekust saata sõnumeid erinevates oludes, võttes arvesse ka selleks kuluvat latentsi. Kasutusjuhtude võimalikkuse hindamisel võetakse arvesse katseid maa- ja linnakeskkonnas, kus valitud olustikud kirjeldavad reaalseid töötingimusi lõppseadmetele. Katsed ei puuduta võrkude koormustaluvuse ega tehnoloogiate voolutarbe võrdlemist. Samuti ei kaardistata täpset teenuste leviala, vaid piirduakse sellise valimiga asukohtadest, mis annaks ettekujutuse kõige keerulistest töötingimustest seadmetele.

Esimeses peatükis antakse ülevaade teoreetilistest taustateadmistest, mis puudutavad asjade interneti, LPWANI tehnoloogiaid ja näiteid potentsiaalsetest kasutusalaadest, mida teadusartiklites on seni kajastatud. Teine peatükk hõlmab töö lahenduskäiku, alates kasutatava riistvara kirjeldusega ning lõpetades metoodika ja testimiste asukohavalikute põhjendustega. Kolmandas peatükis koondatakse kokku ja visualiseeritakse olulisemaid katsetulemusi. Neljandas peatükis arutletakse teenuste sobilikkuse ja mitesobilikkuse üle erinevatele kasutusjuhtudele, tuginedes eelkõige katsetulemustele, kuid arvestades ka esimeses peatükis välja toodud omadusi, mis katsetamisele ei kuulunud.

1 Madala volutarbe ja laia ulatusega võrgud

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

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

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

Käesolevas peatükis antakse põgus ülevaade LPWANide olemusest üldiselt. Esimeses alapeatükis tuuakse näiteid nende erinevatest kasutusjuhtudest. Teises alapeatükis kirjeldatakse levinud tehnilisi võtteid, mida rakendatakse selliste tehnoloogiate puhul, et

saavutada LPWANidele omased eesmärgid. Kolmas alapeatükk käsitleb kõiki bakalaureusetöös katsetatavaid tehnoloogiaid eraldi. Viimaks võetakse seotud tööde alapeatükis kokku sarnased teadustööd, mis kõrvutavad mitut tehnoloogiat.

1.1 Kasutusjuhud

Vajadus autonoomsete mõõtmisseadmete järele on paljudel eluvaldkondadel. Enim paistavad silma LPWANi jaoks soodsa tegevuspiirkonnaga põllumajandusrakendused, mis tingivad andmete kogumist suurel pindalal ning suurelt arvult sensoritelt, milleni pole otstarbekas vedada kaableid. Jawad jt [8] toovad välja põhilised rakendusala, 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 instruksioone. Seda omadust on uuritud põllumajanduses näiteks tarkade niisutussüsteemide või kasvuhoonetes tuulutussüsteemide rakendamisel [9].

Suurel maa-alal kasutatakse IoT sensoreid veel 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 loodusesse paigutatud sensorvõrkudel potentsiaal kaardistada ja ennustada looduskatastroofe, nagu maastikupõlengud [14].

Sarker jt [15] sõnastavad targa linna (*smart-city*) kui ühe IoTga tihedalt seotud kontseptsiooni: rakendada suurel hulgal erinevaid mõõtmissüsteeme linnaplaneerimise hõlbustamiseks. 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 liiklustiheduse, helireostuse ja parklate ning prügikonteinerite täituvuse raporteerimiseks [16]. GPRS baasil kaugloetavad elektriarvestid on Eesti kodudes kohustuslikud alates 2017. aastast [17] ning 2021. aastaks peavad välja vahetatud olema ka küttegaasi arvestid [18]. Sealjuures on raskendatud leviga

kortermajade või keldrite arvestid enamasti ühendatud kontsentraatoritega, mis kannavad andmed traadita andmesideks sobivasse keskkonda. Alternatiivina kontsentraatoritele saaks usaldusväärse LPWANi levi olemasolul jätta 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 tervisenäitajaid loomapidamises [19, 20] või tervishoius [21, 22]. Samuti on mis tahes objektide koordinaatide raporteerimine GPS mooduli abil potentsiaalne kasutusala LPWANi põhiseks positsioneerimiseks, mille potentsiaali on demonstreeritud jalgrattaringluse kontekstis [23] või dementse inimese leidmiseks [24]. 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 kattuvusega.

Kusuda jt [25] esitavad idee liigutada hoopis tugijaamu paiksete lõppseadmete suhtes. Potentsiaalsete otstarvetena pakuvad autorid välja erinevaid lahendusi: prügiauto ja prügikastide vahelist suhtlust, et optimeerida korjeteekonda, drooniga pestitsiidide kasutuse tuvastamine ülisuurelt alalt ning kulleri ja majapidamise vaheline eelhoiatu, kui kullerauto jõuab naabruskonda. Sellise süsteemi eelis on levi valikuline kindlustamine ka ülikeerulistes oludes, samaaegselt lõppseadmetele pikka eluiga garanteerides.

1.2 Side optimeerimise meetodid

Lai leviulatus koos akusäästlikusega on vasturääkivus, sest eeldab justkui võimsa ja kuluka raadiosignaali genereerimist. Selleks, et tehnoloogia täidaks LPWANi tingimusi, on eelkõige oluline, et sidekanal 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 2017. aasta ülevaatest LPWAN tehnoloogiatest [26].

Signaali levi- ja läbistavusomaduse põhiline tegur on kasutatav sagedus — madalamad sagedused 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 [27]. Teine viis levivõimekuse suurendamiseks hõlmab signaali kodeerimise- ja modulatsioonitehnikat, ehk OSI mudeli mõistes võrgu esimest (ehk füüsilist) kihti. Selleks, et suurendada seadme võimalust demoduleerida ka väga nõrka signaali, luuakse sageli spetsialiseeritud modulatsiooniskeemid, mis on piisavalt vähe mõjutatud raadiohäiretest ja signaali hajumisest [28]. Selline üle raadioside kantav bitijada peab piltlikult olema selge ja robustne, omades väikest andmeedastuskiirust.

Voolutarbes saavutatakse võit enamasti tänu lõppseadme suurele passiivses olekus veedetud aja osakaalule, kui andmeid ei saadeta ega võeta vastu. Anastasi jt [29] uurimuses 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 [30]. Selle tõttu on LPWANidel palju vabam süvaune planeerimine, sest iga seade hoolitseb vaid enda andmevahetuse eest. Goursaud ja Gorce [31] kohaselt peaks LPWAN seadme tarbitava voolu tugevus süvaunes olema suurusjärgus 1 μ A.

Levinud voolusäästmise meetod on ALOHA meediumipöördus, mille puhul ei kasutata meetmeid, et vältida naaberseadmega konfliktimist, vaid minnakse eetrisse esimesel ettejuhtuval ajal [26]. Ühelt poolt on see käitumine odav, kuid suurendab pakettide põrkumise tõenäosust ja seetõttu on tarvis lisameetmeid side usaldusväärsuse tagamiseks, nagu pakettide kordamine suvalistel kanalitel Sigfoxi näitel [26].

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 kasutatavale 868 MHz sagedusele seadusega sätestatult 1% maksimaalne päevane täitetegur ja 25 mW kiirgusvõimet seadme kohta [32]. See tähendab, et transsiiver võib olla eetris kokku kuni ühe sajandiku ööpäevast, sealhulgas mitte ületada sätestatud võimsust. LPWANi kasutusala on orienteeritud väiksemale eetrihõivele ning voolusäästlikkusele, mistõttu on ISM ribad

neis kasutuseks sobilikud.

Mainitud meetodid on vaid üldised orientiirid, mis senistes tehnoloogiates korduvalt esinevad. Tehnoloogia disainivalikud nendes küsimustes defineerivad selle eelised ja puudused levi ja voolusäästlikkuse osas ning sageli hoitakse neid teadmisi ka saladuses.

1.3 Tehnoloogiate ülevaade

Käesolevas peatükis antakse üksikasjalik ülevaade hetkel aktuaalsetest LPWANi perekonda kuuluvatest tehnoloogiatest, nende eelistest ja puudustest. Peatüki lõpus võetakse tehnilised parameetrid kokku tabelis 1.

1.3.1 Sigfox

Sigfox on 2010. aastal Prantsusmaa iduettevõtte loodud tehnoloogia, mis loojate visiooni kohaselt tagab ühenduse miljarditele IoT seadmetele, luues minimaalse telekommunikatsioonistandardi pisikeste sõnumite edastamiseks [33]. Ettevõtte pakub tehnoloogiat ja pilvekeskkonda komplektse teenusena.

Sigfox töötab Euroopas 868,0–868,2 MHz mittelitsentseeritud sagedusalas ning kasutab ül kitsaribalist (*Ultra-Narrow Band* ehk UNB) side, milles iga üleslink ülekanne kasutab vaid 100-hertsi laiust riba [34]. Kalfus'i ja Hegr'i [35] 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). Sõnumid laiusega 100 Hz 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 [34].

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 [34].

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 [36]. Rakendusliidesega on võimalik korraldada suhtlust füüsiliste seadmetega, suunates kuulnud paketid oma rakendustesse ning saata lõppseadmetele sõnumeid tagasi.

1.3.2 LoRaWAN

LoRa (tuletatud *Long Range*) on nimetus füüsilisele kihile, mille on välja arendanud USA ettevõtte Semtech [37]. LoRaWAN (*Wide Area Network*) on sellele loodud protokoll, mis defineerib võrgu arhitektuuri ning võrgu- ja transpordikihi [38]. Protokollide 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 [39].

LoRa modulatsioon on firmaomane ning kuigi selle spetsifikatsiooni pole ametlikult avaldatud, on signaali analüüsitud mitmetes teadustöodes, sh Vangelista [40] poolt. Vangelista iseloomustab seda kui sagedusnihkega sirtsmodulatsiooni, sest bitivoogu kantakse üle sirtsudega ehk lühikeste tõusude ja langustega sageduses, mis on sümboliteks kodeeritud sagedushüpetega. LoRa võimaldab saatjatel vabalt valida laotustegurit (ingl *spreading factor*), saavutamaks paremat signaali robustsust andmekiiruse arvelt [41]. 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. Spetsifikatsiooni kohaselt on LoRa seadmed võimelised suhtlema laotusteguri suurenedes -123 dBm kuni -136 dBm signaalitugevustel, kuid reaalses tingimustes leitakse minimaalseks signaalitugevuseks vaid -124 dBm [3].

Laotustegurid on täisarvud vahemikus 7 – 12 ning vastavad tavapärasel 125 kHz kanalis 27 – 0,3 kbps andmekiirustele [42].

LoRaWAN rõhub lihtsusele ja paindlikkusele, kasutades tähekujulist võrgutopoloogiat ning sümmeetrilist signaali üles- ja allalink suhtluseks, mis võimaldab sama riistvara kasutada nii pääsupunkti kui lõppseadme rollis [38]. Protokoll on üksikasjalikult kirjeldatud avalikus LoRaWANi spetsifikatsioonis [43], 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 protokoll loob LoRaWAN unikaalse maastiku LPWAN teenustele. Eesti esimene ja suurim LoRaWAN teenusvõrk on Levikomi NORAnet, mille tugijaamad asuvad kõigis maakonnakeskustes [44]. Alternatiivselt võib kasutada kogukonnale tuginevat *The Things Network*¹ (TTN) võrku, või hostida avaliku lähtekoodiga rakendusserverit nagu ChirpStack² koos isiklike tugijaamadega. TTN on tasuta LoRaWANi teenus mille leviala pakujateks on vabatahtlikud üle maailma.

¹<https://www.thethingsnetwork.org/> (07.05.2020)

²<https://www.chirpstack.io/> (07.05.2020)

1.3.3 NB-IoT

Mobiilsidestandardite looja 3GPP avaldas 13. väljaandes spetsifikatsiooni mitmele IoT rakendustele suunatud tehnoloogiatele: LTE-M, NB-IoT ja EC-GSM-IoT [45]. Xu jt [46] hinnangul on tegemist mobiilside ettevõtete vastusega vaba sagedusala põhiste LPWAN tehnoloogiatele, pakkudes sobilikku lahendust ka mobiilsidespektrisse. Nimetatud tehnoloogiatest on selle töö kontekstis märkimisväärseim NB-IoT (*Narrow-Band IoT*), mis on disainitud töötama sügaval sisetingimustes ja maapiirkonna nurgatagustes [47].

NB-IoT võtab disainilt eeskujuna ning on sisuliselt vähendatud kuju LTEst, kuid sellegipoolest pole tegemist omavahel ühilduvate standarditega [48]. 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 kitsendamise ja tsükkelkoodikontrolli suurendamine, millega saavutatakse 20 dB efektiivne signaalivõimendus üle LTE [46]. Nagu LTE, tugineb suhtlus internetiprotokollile (IP), mis tähendab seadme eksplitsiitset võrguga liitumist ja otse rakendusserveriga suhtlemist, suurendades üldkulu, kuid samas päritakse ennast tõestanud LTE turvamehhanismid [49]. Mitu uurimust [50, 51] soovivad siiski NB-IoT puhul kasutada UDP-põhiseid sideprotokolle nagu CoAP (*Constrained Application Protocol*), mis sobivad paremini piiratud ressursidega seadmetele ja kannatavad väiksema paketikao all.

Tehnoloogia pakub konkurentsi ka Sigfoxi ja LoRa robustsetele protokollidele. Modem otsustab side kvaliteedile vastavalt ise, kui suure energia ja koodikontrolliga eetrise minna, parandades signaali levi raskestipäasetavates kohtades, kusjuures koodikontroll sarnaneb funktsionaalselt LoRa laotusteguriga, pikendades latentsi robustsema side arvelt [47]. Mozny jt [52] katsetustest tuleb välja, et tavapärastes oludes võib 500-baidise sõnumi latents küündida kuni seitsme sekundini, samas näitavad Martinez jt [47], 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 ebasümmeetrilise side tõttu igast küljest parem ja litsenseeritud mobiilside spektri tõttu ei toimu sidekanalil üldjuhul suuremaid raadiohäireid ega pörkumisi [48]. Analoožilisel

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 [48].

Wang jt [48] toovad välja, et sarnasused kahe standardi vahel on sihilikud kiirendamiseks tehnoloogia kasutuselevõttu telekomiettevõtete ja kiibistike tootjate poolt. Esiteks on leviala juurutamine võimalik rakendades ühe standardse 200 kHz laiuse vahemiku olemasolevas LTE rakus teenindama NB-IoT, 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 protokollid lihtsustatud, et alandada kiibistike keerukust ja omakorda riistvara maksumust [46]. Eestis pakub NB-IoT teenust Elisa ja Telia, lubades katta kogu Eesti [53].

1.3.4 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 õnnestunud ning teised 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 jääb tavalise LTE ja NB-IoT vahele [54]. Lauridseni jt [55] 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 vähem optimeeritud sügavates siseruumides töötamisele kui NB-IoT, aga on sobilik harvade, kuid suuremate andmete ülekandeks, kui leviala seadmeni ulatub. Erinevus kahe tehnoloogia vahel avaldub ka seadmete mobiilsuses. Täpsemini on NB-IoT optimeerimiste seas välja jäetud seadme üleandmine tugijaamade vahel, kuid LTE-M spetsifikatsiooni jäeti see sisse, mis tähendab rohkem võimalusi liikuvaid seadmeid jälgivates rakendustes [46].

Litsentseerimata sagedusvahemikele on loodud hulganisti standardeid, millest annavad

hea ülevaate Raza jt [26], kuid mille põhjalik käsitus jääb käesoleva töö skoobist välja. Huvitavam ja teiste seas laiemat kasutuselevõttu kogunud tehnoloogia on Ingenu RPMA, mis erineb teistest 2,4 GHz sagedusala kasutamise tõttu, mis ühtlasi võimaldab võrdlemisi regulatsioonivaba kasutust kõikides maailma piirkondades [56]. Kõrgem sagedus peaks vähendama signaali läbistuvõimet, kuid distantse osas lubatakse võrdväärseid kauguseid LoRa ja Sigfoxiga, suutes samaaegselt teenindada rohkem seadmeid [26]. Sellegi poolest on tehnoloogiat juurutatud üksikutes riikides ning reaalsetes tingimustes katseid, mis eelnevalt loetletud omadusi kontrolliks, autorile teadaolevalt ei leidu.

Tabel 1. Üldtabel tehnoloogiate tehniliste parameetrite kohta.

	Sigfox [34]	LoRaWAN [43]	NB-IoT ¹	LTE-M ¹	RPMA ²
sagedusala	868 MHz (Euroopas)		Telia – LTE riba 20 (~ 800 MHz)		2,4 GHz
ribalaius	100 Hz	125 kHz	180 kHz	1,08 MHz	1 MHz
andmekiirus	100 bps	0,3 – 27 kbps	20 kbps	1 Mbps	80 kbps
maksimaalne kiirusvõime	25 mW/14 dBm		200 mW/23 dBm		100 mW/20 dBm
ressiiveri sensitiivsus	–142 dBm	–122 dBm	20 dB üle LTE	12 dB üle LTE	–142 dBm [26]
üleslink paketi suurus	12 baiti	kuni 243 baiti	ei kehti		10 kb
allalink	ainult vastusena üleslingile, 8 baiti	jah	jah	jah	jah
päevane kvoot	olenevalt teenuspaketist, kuid mitte rohkem kui 140 üleslink ja 4 allalink	teenusepakkuja sätestatud	ei kehti		-
krüpteeritud andmevahetus	ei	jah, seadmepõhise võtmega (ABP) või käepigistusega kokkulepitud võtmega (OTAA)	LTE turvamehhanismid		jah
lõppseadme maksumus [57]	< 2€	3 – 5€	> 20€	-	-

¹ <https://www.3gpp.org/release-13> (04.05.2020)

² <https://www.ingenu.com/technology/> (04.05.2020)

1.4 Sarnased uurimused

LPWAN on uus ja kiiresti arenev võrkude klass ning iga järjekordse tehnoloogia tulekuga põhjendab tihenev konkurents vajadust neid võrrelda ja verifitseerida. Võrdlevate uurimuste hulka kuuluvad enamjaolt erinevaid tehnoloogiaid kõrvutavad kirjandusülevaated ning simulatsioonimudeli analüüsid. Käesolevaga analoogilisi töid, milles kõrvutatakse mitut tehnoloogiat katselisel meetodil, luues tulemuste alusel seoseid ka tehnoloogiate ja nende eelistatud kasutusjuhtudega on vähe publitseeritud.

Eeskujulikumat empiirilised tööd on need, mis annavad ettekujutuse tehnoloogia piirjuhtudest saavutatava levi osas. Selliseid töid tehakse üldiselt ühele tehnoloogiale keskendudes – LoRaWANi puhul näiteks Petäjärvi jt välis- [58] ja sisetingimuste [22] levianalüüsid ning analoogiliselt Kalfus'i ja Hégr'i [35] Sigfoxi võrgu testimine. Igas näites on põhiline küsimus signaali levimine reaalses oludes, mõõtes selleks signaalitugevust (RSSI), signaali ja müra suhet (SNR) ning kaotatud pakettide osakaalu, kusjuures mõõtmisagedus on väga tihe. Ka käesolev töö arvestab neid parameetreid hinnangute tegemisel, kuid teeb seda korraga mitmel tehnoloogial ja suuremal alal, millest tulenevalt on töö mastaabi tõttu mõõtmised harvemad ja hajutatumad.

Erinevaid tehnoloogiaid korraga on kirjanduses katsetatud mitmel põhjusel. Del Campo jt [59] 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 [60], kelle töö hõlmab nii laboratoorseid kui ka maastikukatsetusi LoRaWANi, Sigfoxi, NB-IoT ja MIOTYga. Kokkuvõtvalt on näidatud iga tehnoloogia paketikadu erinevatelt kaugustelt tugijaamast, kuid katsekeskkond jääb neis suures osas kirjeldamata.

Laiemalt arutleb Sigfoxi, LoRaWANi ja NB-IoT kasutusjuhtude sobivuse ja mittesobivuse üle Sjöström oma magistritöös [61]. Tema diskussioon kaardistab hästi eeliseid ja puuduseid tehnoloogiate vahel ning toob välja kasutused, kus need nüansid kõige olulisemad on, tehes siiski järeldusi vaid kirjanduse analüüsi põhjal. Erinevalt Sjöströmist toetub käesolev töö kasutusjuhtude analüüsil katsetulemustele, moodustades terviku, aitamaks lugejal luua aimdus konkureerivate tehnoloogiate reaalsest potentsiaalist. Tsa-

valose ja Hashemi [62] magistritöö Lundi Ülikoolis hindamaks LPWAN tehnoloogiate sobivust tööstussektori kasutusalaadele algab kõikide samade tehnoloogiate üksikasjaliku kirjeldusega, kuid katsetustes valitakse neist välja vaid Sigfox. Kuigi võrkude 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.

Eestis on lähiajal uuritud siinseid teenuseid vaid üksikutel juhtudel. Üheks neist on eestikeelne turuuuringu stiilis diplomitöö, mis hindab levivate teenuste sobilikkust õhukvaliteedi mõõtmiseks siseruumides kümnes Eesti koolis, mis ei kuulu avalikustamisele [63]. Teiseks on käesoleva tööga paralleelselt valminud magistritöö [64], mis hindab Sigfoxi ning Elisa ja Telia NB-IoT võrke sise- ja välitingimustes, keskendudes väikesele asukohavalimile, kuid suurele ülekannete hulga igas asukohas. Viimase töö katsed toimuvad pooltunniste vahedega ning näitavad arvestatavat paketikadu kõige raskemates sisetingimustes, mis ei väljenduks üksikute katsetega ning on seetõttu oluline meeles pidada ka käesoleva töö tulemusi tõlgendades.

Kokkuvõttes on hulganisti teadustöid, mis käsitlevad LPWANide kasutusmalle või võrdlavad mingil viisil üksikuid tehnoloogiaid või teenusvõrke. Käesolevas töös kombineeritakse nimetatud punktid – võetakse empiiriliste andmete kogumisel eesküju teistest raadioside kvaliteeti hindavatest töödest ning tehakse järeldused, mis määral on teenused rakendatavad teaduslikus kirjanduses välja pakutud kasutusjuhtudel. Vaadeldakse korraga suuremat hulka teenuseid ning katsetatakse rohkem stsenaariumeid kui enamikus seni tehtud võrdlustes, andes ainulaadse ülevaate LPWANide võimalustest Tartus.

2 Võrdlusmetoodika

Erinevate kasutusjuhtude teostatavuse hindamiseks on plaanitud katseliselt hinnata tehnoloogiaid nende levimaduste poolest. Teisisõnu taandatakse küsimus, „Milleks tehnoloogia sobib?“, katsetele reaalsete tingimustega asukohtadest ühenduse loomisele. Tingimuste planeerimise eelduseks on, et need osutuvad väljakutseks mõnele katsetavatest 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 kasutatakse teenuseid, mis omavad Tartu piirkonnas infrastruktuuri:

- Sigfoxi ühenduvus tagatud Connected Balticsi poolt,
- NB-IoT ühenduvus tagatud Telia poolt,
- LoRaWANi puhul nii Levikomi NORAnet võrk kui ka ise tehtud tugijaam, mis on ühendatud TTN võrku.

Mõõdetavad parameetrid erinevad tehnoloogiate lõikes. Iga katse puhul on peamine kontrollitavus, kas üleslink ülekanne on võimalik. Side loomise korral ühel kanalil jäädvustatakse sellele tehnoloogiale asjakohased ülekande parameetrid. Pilvepõhiste teenuste puhul (NORAnet, Sigfox ja oma tugijaam) on ülekannete metaandmed varieeruva täielikkusega kättesaadavad teenuste rakendusliidestest abil, mis on seadistatud tegema tagasikutseid autori isiku serveri otspunktide vastu, mis võimaldavad andmeid hiljem analüüsida. Nimetatud teenused võimaldavad pärida ülekande kohta järgmiseid metaandmeid:

- sõnumit kuulnud tugijaamade identifikaatorid,
- sõnumit teenindava tugijaama RSSI (*received signal strength indicator*) ja SNR (*signal-to-noise ratio*) indikaatorid (NORAneti puhul ka teiste, sõnumit kuulnud jaamade omad),
- LoRaWANi põhiste teenuste puhul ka kasutatud laotustegur ning sagedus.

Ühegi teenusepakkujaga pole tehtud täiendavaid kokkuleppeid täpsematele parameetritele ligi pääsemiseks ning kõik katsetel mõõdetavad väärtused on kättesaadavad või tuletatavad ainult selle info põhjal, mida peetakse vajalikuks teenuse tarbijale avaldada. Eriti avaldub see NB-IoT puhul, mille andmevahetus marsruuditakse otse IP aadressidele ning madala taseme sidekvaliteedi näitajaid teenusepakkuja ei avalda. Sellest tulenevalt hinnatakse NB-IoT sidekvaliteeti järgnevate parameetrite alusel:

- latents, saates rakendusserverile hetke ajatemplit sisaldava paketi, mille kätte saamisel saab leida kulunud aja,
- RSRP (*reference signal received power*), mis sarnaneb RSSile, kuid on kohandatud LTE signaalitugevuse jaoks ning on kättesaadav modemist,
- ühendatud tugijaama identifikaator, mis on samuti kättesaadav modemist.

NB-IoT latentsi on teiste tehnoloogiate kõrval olulisem jälgida, sest dünaamilise koodi-kontrolli tõttu see varieerub vastavalt side kvaliteedile. Ülejäänud tehnoloogiate latents on ennustatav ja eraldi mõõtmist ei vaja.

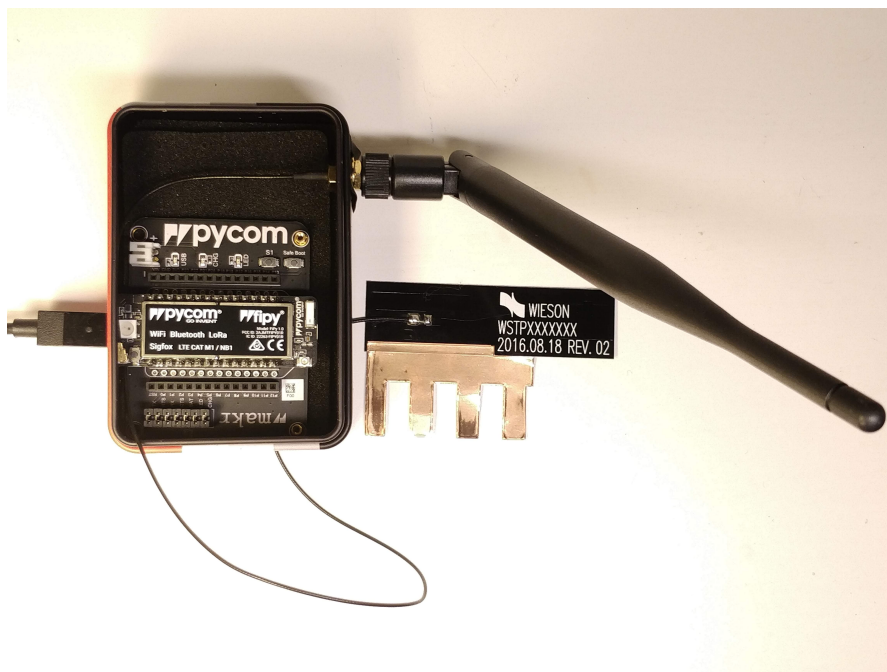
Valmisvõrke ja vaba sagedusala peab sealjuures heaperemehelikult kasutama. See tähendab katsete ajalist hajutamist, et mitte hõivata eetrit reaalsete rakenduste eest mõjualas. Omakorda kogu protsessi kulukuse tõttu ei saa kokkuvõttes teha niivõrd palju katseid, millega oleks võimalik ammendavalt analüüsida paketikadu või teenuste täpset leviala. Katsete skoobist jääb välja kõik, mis puudutab tehnoloogiate levivõimekusega mitte-seonduvat: unetsükli planeerimine, sidekanali koormusvõimekuse testimine ja seadme volutarve. Lisaks ei rõhuda allalink suhtlusele, sest see on kasutatavatel tehnoloogiatel võimekam või võrdväärne üleslingiga.

Edasistes alapeatükkides tutvustatakse kasutatavat riistvara ja katsete läbi viimise keskkondi. Esimeses alapeatükis keskendutakse kasutatavale arendusplaadile, mis simuleerib lõppseadet IoT kontekstis. Seejärel kirjeldatakse alternatiivset lahendust LPWANi leviala tagamiseks, luues oma LoRaWANi tugijaam. Kolmandas alapeatükis kirjeldatakse katsealuseid tingimusi ja tuuakse välja tähtsamad side häirivad tegurid iga katsekeskkonna puhul.

2.1 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 teke 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. FiPy on uuendatud Micropythoni versioonile 1.20 ja koodi käitatakse Pycomi oma pistikprogrammi abil Atomi programmeerimiskeskonnast. Lisaks kuuluvad komplekti veel isotroopiline 868 MHz antenn Sigfoxi ja LoRa jaoks ning mobiilsideantenn NB-IoT jaoks. Testimiseks kasutatav komplekt on kujutatud joonisel 1.



Joonis 1. FiPy lõppseade mitme võrgu testimiseks.

FiPy on katsetes lõppseadme rollis, ehk simuleerib üksikut IoT seadet suhtlemas iga

uuritava LPWANi võrgu tugijaamadega. Selleks kantakse seadet katsete jooksul kaasas, ülesseatuna seljakotti või kinnitatud autosse (joonis 2). Lõppseadme vaatepunktist loob kirjeldatud kõik-ühes süsteem igati võrdsed tingimused katsete teostamiseks igale tehnoloogiale, arvestades järgmiseid asjaolusid:

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



Joonis 2. Lõppseade katsete läbiviimisel.

Testimiseks valmistati ette komplekt skripte, mille käitamine saadab üle iga katsetatava sidekanali mingi sisuga andmepaketi, seejärel vajadusel tugijaamalt vastust ootama jäänud. Sigfoxi puhul oli testkeskkonna ette valmistamine kõige lihtsam. Lisaks joonisel 3 kujutatud lühikesele koodijupile, tuli Sigfoxi veebirakenduses registreerida oma kasutatav modem selle identifikaatori järgi ja aktiveerida Pycomi poolt võimaldatud aastane

```

class SigfoxNode:
    def __init__(self):
        self.sigfox = Sigfox(mode=Sigfox.SIGFOX, rcz=Sigfox.RCZ1)
        self.s = socket.socket(socket.AF_SIGFOX, socket.SOCK_RAW)
        self.s.setblocking(True)

    def send(self, receive=False):
        self.s.setsockopt(socket.SOL_SIGFOX, socket.SO_RX, receive)
        self.s.send(str(time.time()).encode()) # ajatempli saatmine aitab
        print('Data sent!')                  # hiljem sõnumeid tuvastada
        if receive:                           # ja latentsi kontrollida
            print(self.s.recv(32))

```

Joonis 3. Micropython klass Sigfoxi katsetamiseks.

prooviperiood. Modem lisab igale sõnumile automaatselt oma identifikaatori, mistõttu pole koodis vaja isikustamisega ja autentimisega vaeva näha.

LoRaWAN protokollile keskkonna ülesseadmine Pycomi raamistikus nõuab seevastu rohkem parameetreid. Eelnevalt tuleb kasutatavale seadmele hankida identifikaatorid ja vajalikud võtmed valitud teenusepakkuja veebikeskkonnast. Spetsifikatsioon võimaldab võrku ühendamist kahe autentimisviisiga: käepigistusega (OTAA ehk *Over The Air Authentication*) või eelnevalt isikustatud (ABP ehk *Authentication By Personalisation*) viisidel. NORAneti puhul kasutati OTAA varianti (joonis 4), mille puhul lepatakse side krüpteerimiseks kasutatav sessioonivõti kokku ühendamisel. Oma tugijaamaga ühendamiseks ABP meetodit (joonis 11), milles krüprovõti sisaldub koodis, sest tugijaama lähtekood ei võimaldanud töökindlalt keeruka käepigistusprotseduuri ajastamist.

NB-IoT ühenduse loomiseks on tarvis teenusepakkujalt SIM-kaarti, millel on vastav teenus aktiveeritud. Arendusplaadi rakendusliideseega on vaja määrata vaid operaatorile spetsiifilised andmed ning luua ühendus. Kasutatud skript (joonis 10) kasutab erinevalt teistest skriptidest otsesuhtlust modemiga meetrika omandamiseks ning UDP ühenduse loomist COAP protokolliga näol.

```

class NORAnetNode:
    # OTAA tarvilikud identifikaator ja võti
    APP_ID = ubinascii.unhexlify('0123456789ABCDEF')
    APP_KEY = ubinascii.unhexlify('0123456789ABCDEF0123456789ABCDEF')

    def __init__(self, sf=12):
        self.sf = sf
        self.lora = LoRa()
        self.lora.init(mode=LoRa.LORAWAN, region=LoRa.EU868,
                       tx_power=14, tx_retries=1, adr=False,
                       power_mode=LoRa.ALWAYS_ON, device_class=LoRa.CLASS_A)
        self.lora.callback(trigger=(LoRa.RX_PACKET_EVENT | LoRa.TX_PACKET_EVENT),
                           handler=self.callback)
        self.join()

    def join(self):
        chrono = machine.Timer.Chrono()
        chrono.start() # meetrika OTAA ajakulu hindamiseks
        print("waiting for NORAnet to join", end="")
        self.lora.join(activation=LoRa.OTAA,
                      auth=(NORAnetNode.APP_ID, NORAnetNode.APP_KEY),
                      timeout=0, dr=self.data_rate())
        timeoutcount = 0
        while not self.lora.has_joined(): # kontrollib asünkroonse
            timeoutcount += 1             # käepigistuse toimumist
            if (timeoutcount > 200):
                print("Handshake failed with NORAnet")
                return
            time.sleep(0.1)
        print(".", end="")
        print("\n joined in %f seconds" % chrono.read())
        self.s = socket.socket(socket.AF_LORA, socket.SOCK_RAW)
        self.s.setsockopt(socket.SOL_LORA, socket.SO_DR, self.data_rate())
        self.s.setsockopt(socket.SOL_LORA, socket.SO_CONFIRMED, False)

    def data_rate(self):
        # raamistik soovib parameetrina data rate'i,
        return 5 - (self.sf - 7) # mis on laotustegurist (sf) tuletatav kuju

    def callback(self):
        events = self.lora.events()
        if events & LoRa.RX_PACKET_EVENT:
            print('NORAnet packet received')
            print(self.s.recv(64)) # allalink paketi saabumisel kuva see ekraanile
        if events & LoRa.TX_PACKET_EVENT:
            print('NORAnet packet sent')

    def send(self):
        self.s.send(str(time.time()).encode())

```

Joonis 4. Micropython klass NORAneti katsetamiseks.

2.2 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 LoRaWANi serveri implementatsioon. Oma levialaks on vajalik tugijaam, mis on ühelt poolt LoRaWANi sagedustel pidevalt kuulav LoRa seade ning teiselt poolt paketedastaja, mis suhtleb rakendusserveriga ning edastab kuulnud pakette. Sellise paketedastaja 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 koodirepositoorium, millega LoRaWANi spetsifikatsioonile vastav tugijaam üles seada.

Töö raames kasutatav seade on WiFi toega ESP32 mikrokontrolleri põhine arendusplaat TTGO v1, millel on Semtechi SX1276 LoRa transsiiver. Tugijaam on lisaks varustatud lühikese isotroopilise LoRa antenniga ja ekraaniga ning on koos akutoitega ilmastiku-kindlas karbis, et seda oleks lihtne välioludes rakendada (joonis 5). Mikrokontroller on programmeeritud avalikust repositooriumist pärineva koodiga³, mis võimaldab tööajal kaudset configureerimist ja monitoorimist üle veebi. Rakendusserverina kasutab seade TTN avalikku võrku. Katsetugijaam on lihtsasti teisaldatav erinevatesse kohtadesse ning pääseb võrku läbi kaasasoleva WiFi pääsupunkti, mis on omakorda ühendatud LTE modemiga.



ESP Gateway Config

Version: V6.2.0-EUR068; 2001206
 ESP alive since Friday 14-2-2020 09:49:41; Uptime: 1:06:35:49
 Current time: Saturday 15-2-2020 16:25:08

Documentation Log Files Expert Mode Hide Monitor Hide Seen

Package Statistics

Counter	C 0	C 1	C 2	Pkgs	Pkgs/hr
Packages Downlink	0	0	0	0	
Packages Uplink Total	21	0	0	21	0
Packages Uplink OK	21	0	0	21	0
SF7 rcvcd	2	0	0	2	9 %
SF8 rcvcd	0	0	0	0	0 %
SF9 rcvcd	15	0	0	15	71 %
SF10 rcvcd	0	0	0	0	0 %
SF11 rcvcd	0	0	0	0	0 %
SF12 rcvcd	4	0	0	4	19 %

Message History

Time	Node	C	Freq	SF	pRSSI
Friday 14-2-2020 15:48:09	26 01 12 c7	0	868100000	12	-118
Friday 14-2-2020 14:19:59	1d ea 89 e5	0	868100000	12	-118
Friday 14-2-2020 14:17:00	26 01 12 c7	0	868100000	12	-119
Friday 14-2-2020 14:08:28	26 01 12 c7	0	868100000	12	-119
Friday 14-2-2020 13:25:42	97 90 4f 61	0	868100000	7	-119
Friday 14-2-2020 13:20:55	da 39 f6 44	0	868100000	7	-117
Friday 14-2-2020 13:09:02	26 01 12 c7	0	868100000	9	-84
Friday 14-2-2020 13:08:04	26 01 12 c7	0	868100000	9	-90
Friday 14-2-2020 13:07:10	26 01 12 c7	0	868100000	9	-90
Friday 14-2-2020 10:12:18	26 01 12 c7	0	868100000	9	-25
Friday 14-2-2020 10:10:41	26 01 12 c7	0	868100000	9	-46
Friday 14-2-2020 10:09:22	26 01 12 c7	0	868100000	9	-53
Friday 14-2-2020 10:07:50	26 01 12 c7	0	868100000	9	-55
Friday 14-2-2020 10:07:23	26 01 12 c7	0	868100000	9	-62
Friday 14-2-2020 10:05:42	26 01 12 c7	0	868100000	9	-62
Friday 14-2-2020 10:05:25	26 01 12 c7	0	868100000	9	-63
Friday 14-2-2020 10:05:06	26 01 12 c7	0	868100000	9	-60
Friday 14-2-2020 10:04:00	26 01 12 c7	0	868100000	9	-51
Friday 14-2-2020 10:03:31	26 01 12 c7	0	868100000	9	-51
Friday 14-2-2020 10:03:12	26 01 12 c7	0	868100000	9	-52

Joonis 5. Isiklik LoRaWANi tugijaam ja selle veebiliides.

Oluline on märkida, et tugijaam pole riistvarast tingitud piirangute tõttu täielikult LoRaWANi spetsifikatsioonile vastav ning on seetõttu sobiv vaid prototüüpimiseks. Erinevus täisväärtusliku tugijaamaga tuleneb transsiivermoodulist, mis on töökindel korraga teenindama vaid ühel kanalil ja laotusteguril. Sellise lahenduse mastaapne kasutamine

³<https://github.com/things4u/ESP-1ch-Gateway>

võib liigselt koormata kitsast vahemikku 868 MHz sagedusest ning tekitada ebaproportsionaalselt häireid teiste sama piirkonna LoRa rakenduste töös. Erinevus kajastub ka hinnaklassis — täisvõimekusega LoRa modemi maksumus algab 120 eurost⁴, kuid töös kasutatava tugijaama SX1276 mooduli hind on umbes viis eurot.

2.3 Katsete tingimused

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

2.3.1 Maapiirkond

Maapiirkonna all mõeldakse väiksema hoonestusega alasid, kus peamiseks side häirivateks faktoriteks on pinnamood ja mets. Asukoha valikul keskendutakse eelkõige keskkonna- ja põllumajandusrakenduste 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 Sigfoxi ülikitsasriba modulatsioonile on välja toonud Kalfus ja Hégr [35].

⁴<https://shop.imst.de/wireless-modules/lora-products/8/ic880a-spi-lorawan-concentrator-868-mhz> (10.04.2020)

2.3.2 Linnapiirkond

Linnapiirkonna puhul peetakse silmas tihedat asustust. Kontrollitakse targa linna keskeid 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 varieeruvates sügavustest kortermajade varjust, hoonete sisemustes ja keldrites. LoRaWANI tugijaam on nendeks katseteks asetatud Tartu Tasku keskuse Plasku hoone katusele.

2.3.3 Liikuv tugijaam

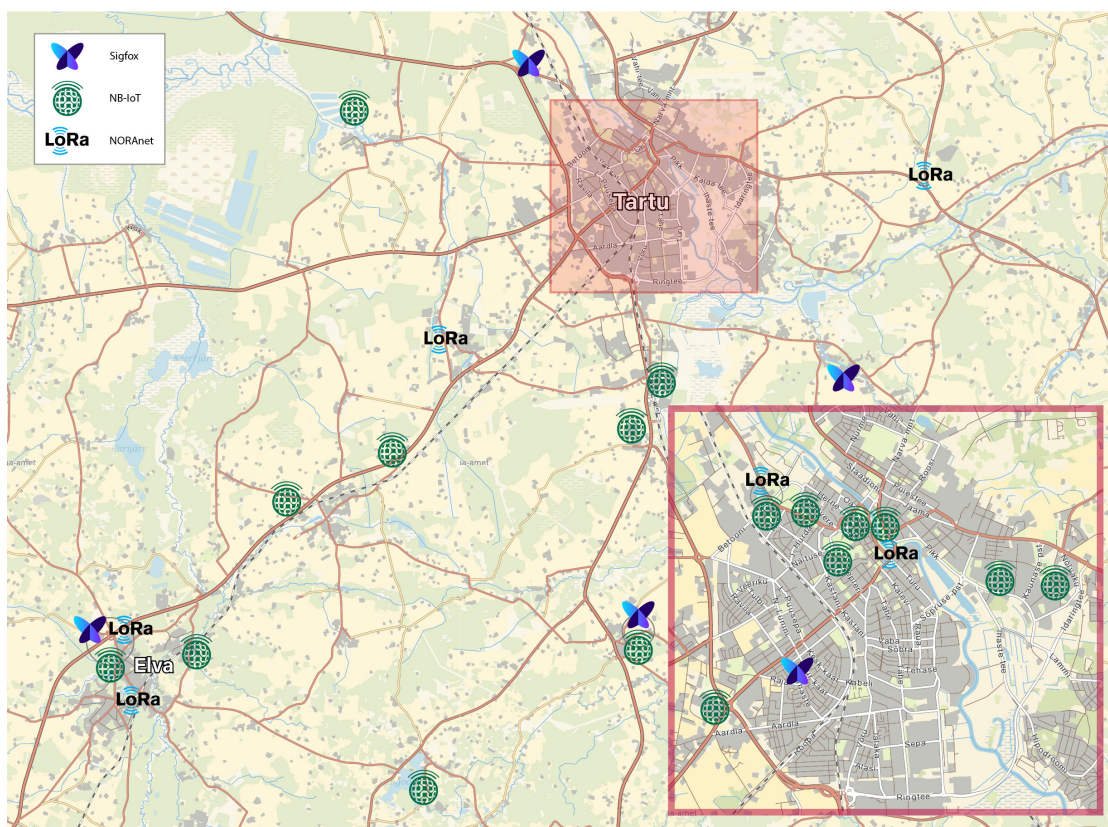
Eraldiseisvalt uuritakse veel andmete kogumist transporditavalt tugijaamalt. Testide puhul näeb see ette nii tugijaama kui lõppseadme asetsemist maapinna ligidal või muudes ebasoodsates oludes. Kõnealuseid katseid saab läbi viia vaid tehnoloogiaga, mille saatjad ja vastuvõtjad on üldsusele kättesaadavad – käesolevas töös tähendab see loodud LoRaWANI tugijaama ja FiPy lõppseadet.

Plaanitud katsemetoodika sarnaneb linna- ja maapiirkonnakatsetele, mille puhul tehakse mõõtmisi statsionaarse tugijaama suhtes erinevatelt kaugustelt. Katsetatavaid stsenaariumeid on kokku kaks: tugijaam korteri tualettruumi valamukapis veearvestil ning kortermaja prügikonteinerite läheduses. Raskendavad asjaolud vastavalt asukohale on ekstreemne läbistavus ja levi maapinnalt maapinnale erinevate takistustega. Selliste stsenaariumidega jäljendatakse väiksema piirkonna sensoritelt info kogumist näiteks autos asetseva LoRa seadme abil.

Kolm kirjeldatud keskkonda on valitud selliselt, et need kataks ära suure osa peatükis 1.1 käsitletud stsenaariume. Järgnevas peatükis näidatakse täpsemalt oma tugijaama ja lõppseadme asetsemist nendes keskkondades koos saavutatud mõõtmistulemustega.

3 Tulemused

Katsete käigus on oluline meeles pidada erisusi teenuste teeninduspiirkondades. Erinevate meetodite abil on võimalik saada ettekujutus tugijaamade tegelikest asukohtadest, mis aitab edasisi mõõtmisi sisukamalt tõlgendada. NB-IoT puhul aitas ühendatud sidemaste lokaliseerida *Cellmapper*⁵ keskkond, NORAnet veebiliides avaldab kätte saadud tugijaamade täpsed koordinaadid oma veebiliideses. Sigfoxi jaamade asukohad pole avalikult leitavad, kuid on ligilähedaselt tuletatavad veebiliidesest kättesaadava levi kaardi abil. Joonisel 6 on kujutatud tugijaamade umbkaudsed asukohad, millega saavutati ühendus üle kõikide katsete.



Joonis 6. Leitud tugijaamad.










Mastaapseimat kattuvust pakub Telia, mille infrastruktuur tugineb suuresti olemasole-

⁵<https://www.cellmapper.net/map> (22.03.2020)

vatele LTE jaamadele, mis on seadistatud serverima ka NB-IoTd. NORAnetil on kuus ning Sigfoxil viis tugijaama Tartu piirkonnas, mis on palju hõredam kui NB-IoTl.

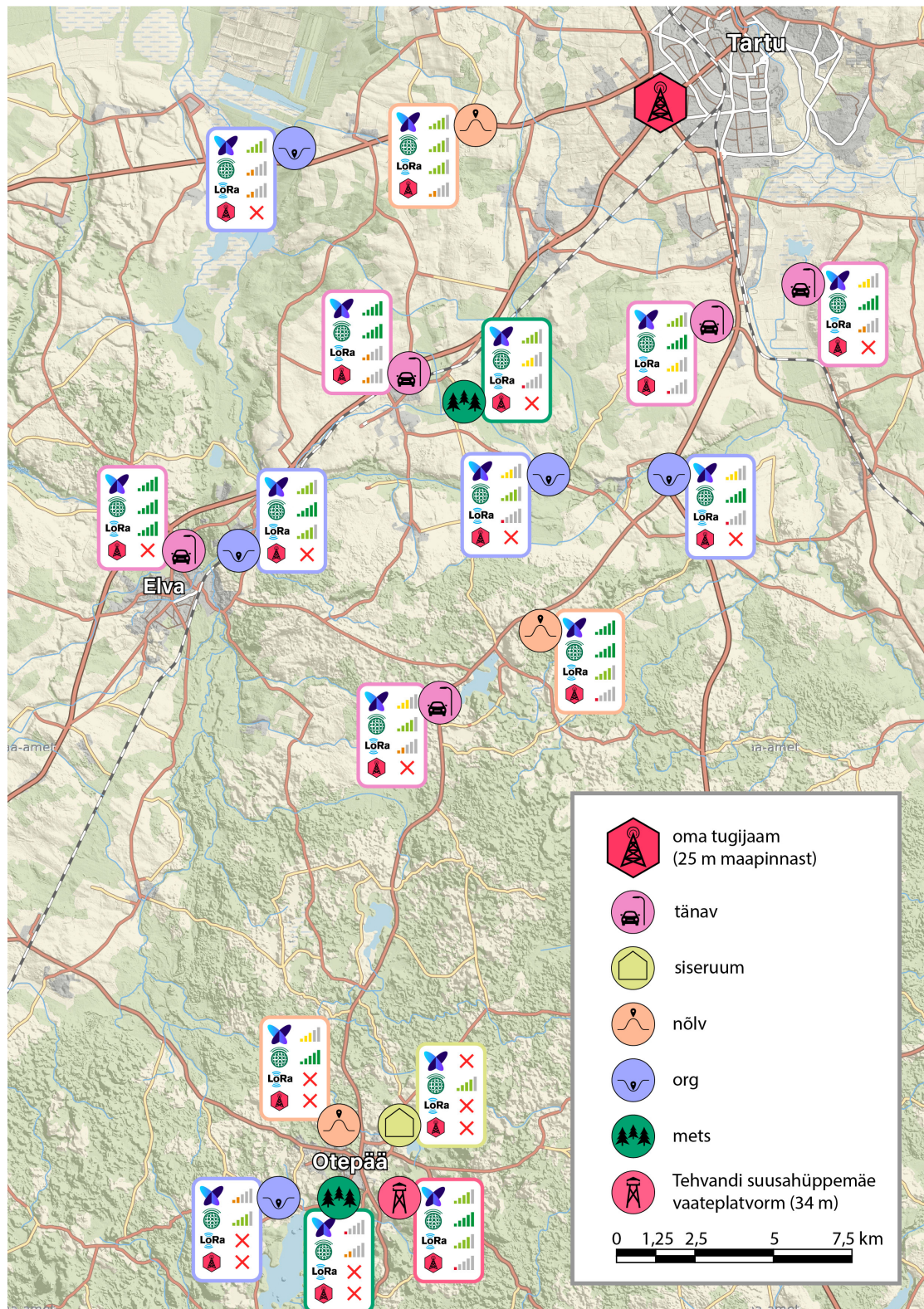
Järgnevatel joonistel on side kvaliteeti tähistatud viie palli skaalal, mis on välja kujundatud vastavalt ülekande kohta üles märgitud näitajate alusel. Skaala määramisel on juhitud võimalusel varasematest töödest ja ametlikest allikatest. Sigfoxi puhul on täpne juhised välja toodud dokumentatsioonis⁶, NB-IoT signaali tugevust hindamiseks on sobiva skaala välja toonud Poddar [64]. LoRa signaali hindamisel puudub kokkulepeline skaala, kuid määratakse testide käigus kujunenud mustrite põhjal, arvestades eelkõige, et nõrgeim edukalt vastu võetud sõnum oli tugevusega -122 dBm. Skaala on üksikasjalikult välja toodud tabelis 2.

Tabel 2. Teoreetilise side kvaliteedi tingmärgid võrkude lõikes.

side kvaliteet	võrk			
 (väga hea)		$RSSI > -115$ dBm	$RSSI > -98$ dBm	$RSRQ > -84$ dBm
 (hea)		-115 dBm \geq $RSSI >$ -129 dBm	-98 dBm \geq $RSSI >$ -110 dBm	-84 dBm \geq $RSRQ >$ -97 dBm
 (rahuldav)		-129 dBm \geq $RSSI >$ -135 dBm või madalam, kuid kuulnud vähemalt kolme tugijaama poolt	-110 dBm \geq $RSSI >$ -116 dBm või madalam, kuid kuulnud vähemalt kolme tugijaama poolt	-97 dBm \geq $RSRQ >$ -107 dBm
 (nõrk)		-135 dBm \geq $RSSI >$ -140 dBm	-116 dBm \geq $RSSI >$ -120 dBm	-107 dBm \geq $RSRQ >$ -114 dBm
 (limiit)		-140 dBm \geq $RSSI$ või paketikadu	-120 dBm \geq $RSSI$ või paketikadu	-114 dBm \geq $RSRQ$ või paketikadu
		ülekanne nurjumine peale kolme katset		

Maapiirkonnas tehti katseid 17 erinevast asukohast (joonis 7). Pelgalt ühenduse loomisega 25 kilomeetri raadiuses Tartu kesklinnast lõuna poole saavad eranditult hakkama NB-IoT

⁶<https://support.sigfox.com/docs/link-quality:-general-knowledge>



Joonis 7. Maapiirkonna katsete tulemused.

ja Sigfox. Võttes arvesse NB-IoT jaamade hulka, on tagantjärele selge, et levialast välja sattumine on tugijaamade liiasuse ja teeninduspiirkondade kattuvuse tõttu väga keeruline. Ainus koht, kus NB-IoT signaal oli nõrk ning latents küündis 1,3 sekundini, asus Tartust läände suunduval Viljandi maantee madalamal lõigul, kus kaugus lähima sidemastini oli seitse kilomeetrit.

Selgemini saab võrrelda Sigfoxi ja NORAneti. Sügavamates nõgudes ja metsades esi-nes NORAneti võrgus paketikadu ning mitmel korduskatsel oli näha, et side töötas oma võimekuse piiril, raporteerides -122 dBm vastuvõetud signaalitugevust ning SNR väärtusega -17 ehk raadiomüra tasemest 17-kordselt nõrgemat signaali. Sigfoxi puhul asetseb lävi palju kõrgemal – kõige nõrgem saavutatud ülekanne selles raadiuses oli -132 dBm ning paketikadu ei täheldatud. Kaugemad katsed Otepäält näitasid paremini Sigfoxi piire, kus kuppelmaastiku vahel metsas töötas side paketikaoga ning siseruumis katkes ühendus täielikult.

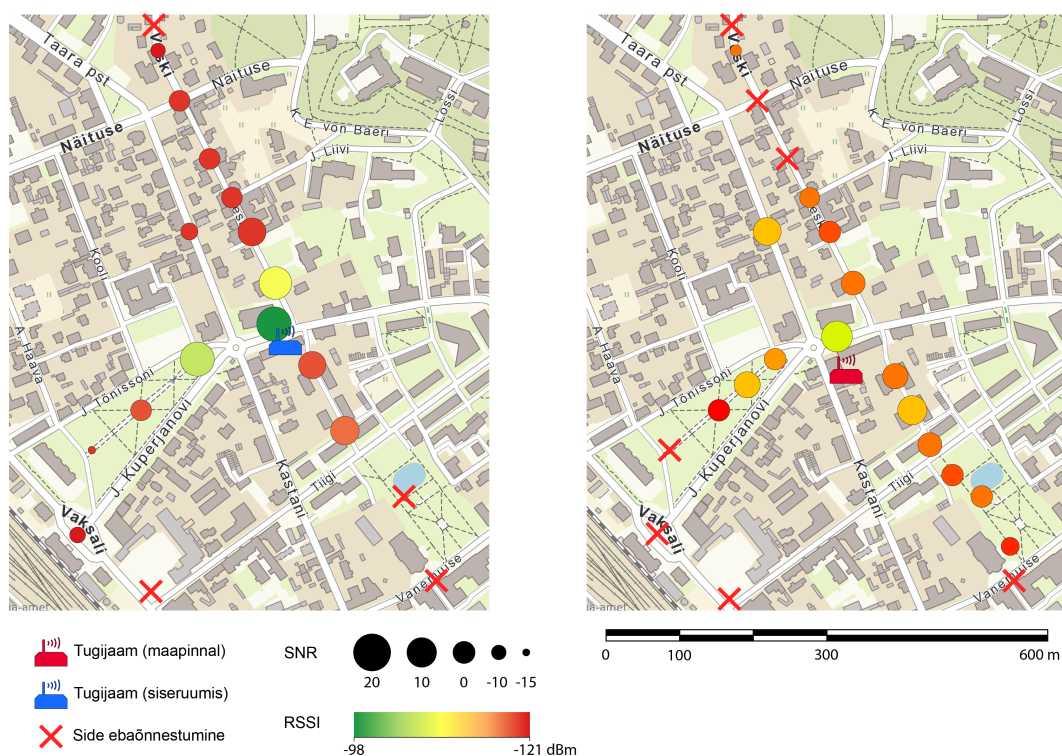
Erinevalt kolmest teenusvõrgust, on oma tugijaama lahendusel vaid üks keskne pääsupunkt, mistõttu sai kontrollitumalt kombata levikauguse piire, ilma et seade mõne muu jaamaga haakuks. Silmsidega katsetel saavutati suurim distant 35 kilomeetri kaugusel asuvast Tehvandi suusahüppetornist ning ka nõlval,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

Maanteekiirusel testides iga teenuse kindla leviala piires ei täheldatud 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 8). LoRa puhul võis Annelinna majade vahel leida leviauke nii NORAneti kui oma tugijaamaga, kusjuures oma tugijaam kaotas side juba vähimagi hoonestuse varjega pooleteise kilomeetriselt distantilt. Sigfoxi jaoks oli Annelinn tugijaamadega varustatavust arvestades keerulistes tingimustes, kuid sellegipoolest ei tuvastatud välitingimustes paketikadu, isegi kui ühes asukohas vai-

bus vastuvõetud signaal tugevuseni -141 dBm. NB-IoT välitingimustel probleeme ei tekitanud ning üleslink latents püsis kindlalt $0,3$ – $0,5$ sekundi vahemikus.

Katseid siseruumides tehti neljas linnasiseses asukohas. Tartu Ülikooli Delta hoone keldrikorrusel kaotasid täielikult signaali Sigfox ja kumbki LoRaWANi teenus. Samas kohas oli NB-IoT-i 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 korrusest. Oma tugijaamaga kommunikeerida ei õnnestunud, isegi kui see asus Plasku hoone katusel koos NORAneti tugijaamaga, millega omakorda side saavutati. Viimane viitab tõenäoliselt erisustele kasutatava riistvara kvaliteedis, nagu antenn, milles Levikomi seadmetel on eelis. Kahes katsealuses paneelmaja keldris töötas NB-IoT tõrgeteta ja alla sekundilise latentsiga, Sigfoxi läbistuvõime oli samuti väga hea. Keslinna kortermaja keldris olid NORAnet ja oma tugijaam ainsad, mis ühendust ei loonud.



Joonis 9. Lähikatsete tulemused kahe tugijaama asetuse suhtes.

LoRaWANi ja oma tugijaama lühikesel distansil proovides katsetati läbistavust nii hoones sees kui ka vabas õhus maapinnalt. Joonisel 9 on kujutatud katseid kummagi tugijaama asetusega. Piki tänavat põhjapoolle liikudes võimaldas veemõõtjat imiteeriv LoRa seade minna 415 meetri kaugusele, kuni esimese kurvini teel. Lõuna pool ehk kaugemast küljest oli distantssi 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 majataguses suunas distantss 300 meetrini ning hoolimata vahetust takistusest kortermaja näol jäi põhjasuunal tulemus samaks. Külgsuunas, mis nüüd kannatas suurima varje ees ei levinud üle 200 meetri.

Kõiki tulemusi kokku võttes on usaldusväärseima sidega NB-IoT, mis levis laitmatult kõikides valitud asukohtades. Hea tugijaamade ülekatte tõttu levib tehnoloogia peaaegu kõikjale ning paketikadu ei täheldatud kusagil mujal kui Delta hoone keldrikorrusel. Sigfox toimib teenusena oma kodulehel reklaamitavas levialas⁷ hästi ning edestab tehnoloogiana kõiki teisi oma võimekusega võtta vastu tugevalt hääbunud signaali. LoRa vajab Sigfoxiga võrreldes niivõrd palju tugevamat signaali, et pikemalt distantssilt muutub side ebastabiilseks isegi väiksemate takistuste sattumisel tugijaama ja lõppseadme vahele. NORAnet on isikliku leviala lahendusest parem tugijaamade hulga, kuid ka võimekama riistvara tõttu, mistõttu asetub see paremuselt Sigfoxi järele.

⁷<https://www.sigfox.com/en/coverage>

4 Diskussioon

Kõik kolm kõnealust tehnoloogiat omavad potentsiaali enamike IoT lahenduse juurutamisel. Tartus leviala omavad ja katsetatud tehnoloogiad on neid potentsiaale ka katsetel tõestanud. Järgnevalt lahatakse tulemusi teenuste kasutusvalade vaatenurgast ning autor annab oma hinnangu nende sobivuse kohta.

Paiksete sensorvõrkude tarbeks, milles lõppseadmed perioodiliselt üleslink ülekandeid teevad, sobib üldjoontes iga vaadeldud teenus. Tulemuste põhjal edestasid Sigfox ja NB-IoT rasketes tingimustes NORAneti, millest tingitult on nendes võrkudes sensorite asukoha valik palju vabam. See tähendab, et seadmeid saab viia mõõtmisallikale võimalikult lähedale, ilma et peaks palju rõhku panema antenni paigutusele või seadme asetsemisele tugijaamade suhtes. Linnakeskkonnas võib lõppseadmeid integreerida enamikes keldrites ja siseruumides kasutatavatesse elektri-, gaasi- või veearvestitesse, raporteerida häireid raskesti ligipääsetavates kohtades paiknevate seadmete töös, näiteks tööstusautomaatika, kütte- ja ventilatsioonisüsteemid või hoopis eluruumide õhukvaliteedi näitajate saatmiseks. Tänavapildis võib probleemideta neid teenuseid integreerida liiklusloendurite, mürasensorite, jäätmekonteinerite ja muude vabas õhus IoT rakenduste info vahenduseks. Potentsiaali põllumajandus- ja looduskeskkonnast andmete kogumiseks tõestab samuti hea teenuse kvaliteet linnapiirist väljaspool.

Samadele kasutusjuhtudele rakendust üles ehitades NORAneti võrgus võib tekkida probleeme. LoRa vastuvõtjate võrdlemisi kõrge signaalitugevuse vajadus näitab, et juba ühe kilomeetri kauguselt võib hea asetusega tugijaamaga ühendus nurjuda, kui side trajektoorile jäävad kõrgemad hooned või maastik. Nõlvadel või linnatänavatel maapinnast kõrgemal, näiteks tänavavalgustitel, tõenäoliselt probleeme ei teki, kuid madalikele, veekogudesse, metsadesse või kõrghoonestuse keskele sensoreid paigaldades tuleks seadmete plaanitavates asukohtades levi olemasolu eelnevalt kontrollida.

LoRaWANi protokoll paistab silma enim paindlikkuse ja kättesaadavuse poolest. Avatud spetsifikatsioon, aktiivne arenduskogukond ja võimalus hallata ise tugijaamu võimaldab luua erinevaid *ad hoc* lahendusi. Näiteks droonil või sõidukil tugijaam, mis kogub ettemääratud ajal ümbruskonna seadmetelt infot, olgu selleks kaugloetav arvesti või

karjamaal loomale kinnitatud tervisesensor.

LoRaWANI ja NB-IoT teenused toetavad erinevaid meetodeid allalink sõnumeerimiseks. Kummagil on seetõttu potentsiaalne rakendus ka kaugjuhitavate seadmete näol. Rakendused, mis kasutaks allalink suhtlust oleks näiteks tänavavalgustuse reguleerimine, põllumajanduses kasvuhoonete kastmis- ja tuulutussüsteemid, aga ka igasugune sensorite kaughaldus. Sigfoxi puhul on allalink sõnumite arv piiratud neljale ülekandele päevas ning selle puhul pole võimalik seadistada vastuvõtuaknaid, mistõttu pole see selliseks otstarbeks ideaalne.

Latentsi osas ei esinenud katsetamisel suuri üllatusi. Sigfoxi puhul oli see pidevalt 2,08 s, LoRa puhul laotustegurist sõltuvalt 0,06–1,5 s ning NB-IoT puhul paketi suurusest ja signaali tugevusest sõltuvalt 0,25–1,5 s. Viimased kaks sobivad paremini latentsitundlikesse rakendustesse, milleks võivad olla erinevad häiresüsteemid nii turvasüsteemi kui õnnetusjuhtumite kontekstis või looduskatastroofe ennustavad sensorid.

Juhul, kui lõppseade on mobiilne, peab kasutatav teenus võimaldama tugijaamade vahel liikumist ja vajadustele vastavat leviala. LoRaWANI ja Sigfoxil pole probleeme ühe tugijaama mõjupiirkonnast teise minekuga, sest lõppseade ja tugijaam ei lepi kokku eksklusiivset sidekanalit, nagu teevad mobiilsidetehnoloogiad. Seetõttu, kui kasutusjuhu eeldatav piirkond jääb reklaamitava leviala sisse, siis on need tehnoloogiad ideaalsed asukoha või tervisenäitajate monitoorimiseks. GPS mooduliga lõppseadme võib kinnitada masinapargi masinatele, tähtsatele tarnitavale kaupadele, dementsuspõdejale või koduloomale, et jälgida nende asukohta. Sealjuures on NORAnet tõenäoliselt parem jälgima Eesti-siseseid liikumisi ja Sigfox Euroopa-siseseid vedusid, sest kumbki ei oma nendes piirkondades rändlusprobleeme, kuid arvestada tuleb hõreda infrastruktuuriga ja leviaukudega mõlemal juhul. Tarku tervisesensoreid saab rakendada nii inimestel kui kariloomadel, juhul kui on veendunud teenuse levialas inimese koduruumides või loomadel kogu nende karjamaa ulatuses. Kusjuures ühe karjamaa piires kõlbaks kasutuseks ka ise tehtud LoRaWANI tugijaama lahendus.

Väga kriitiliste tervisehäirete jaoks ei ole soovitatav kasutada kumbagi vaba sagedusala põhiseisuga LPWANI, sest hetkeseisuga pole nende infrastruktuurid ja teenuse kvaliteet nii usaldusväärsed kui mobiilsideteenustel. Katsetamisel liikumiselt tuli aga ilmsiks, et

NB-IoT ei suuda peale esmast ühendamist sidemastiga end teise külge ümber ühendada juhul kui nimetatud masti levialast väljutakse, vaid vajab manuaalset taasühendumist võrku. Võrku ühendumine võttis katsetel aega suurusjärgus 20 sekundit, mille jooksul ei saa seade olulisi sõnumeid üle kanda. Potentsiaalset lahendust sellele probleemile pakub LTE-M tehnoloogia, mis võimaldab traditsioonilise mobiilside kombel mastide üle andmist, kuid selle leviala Tartus veel puudub. Eelmises lõigus kirjeldatud vähemkriitilistele rakendustele sobib ka NB-IoT, mis pakub tulemuste põhjal ka paremat katvust, kuid arvestada tuleb suure latentsilisaga.

Nagu eelnevalt mainitud, sobivad etteplaneeritud allalink side jaoks LoRaWAN ja NB-IoT ning nagu just kinnitatud, saab NB-IoT korraga ühendatud olla vaid ühe tugijaamaga. Kummagis protokollis võib problemaatiliseks osutada planeeritud allalink sõnumeerimine liikuvale lõppseadmele, sest ajavahemikus, mil seade jõuab viimase tugijaama levialast välja, pole sellele võimalik enam saata. Täpsemalt tähendab see seda, et seade, mis ühtlasi liigub ja kuulab perioodiliselt instruksioone oma sidekanalil, peab sellise süsteemi toimimiseks tegema regulaarselt üleslink ülekandeid, et võrk oleks teadlik selle asukohast. Kokkuvõttes pole soovitatav kasutada kõnealuseid LPWANi tehnoloogiaid näiteks autonoomsete liikurite kaugjuhtimiseks või muude liikuvate lõppseadmete madalalatsiliseks haldamiseks. Soovituslik on sellises olukorras kasutada vaid perioodilist küsimus-vastus suhtlust lõppseadme poolt.

5 Kokkuvõte

Tartu piirkonnas pakutakse 2020. aasta kevade seisuga kolmel erineval LPWANi tehnoloogial põhinevaid teenuseid. Töö eesmärk oli hinnata nende sobivust ja mitesobivust IoT kasutusjuhtudele, viies selleks läbi hulk katseid erinevates keskkondades side kvaliteedi mõõtmiseks. Lisaks avalikkusele kättesaadavatele teenustele loodi omaenda algeline LoRaWANi tugijaam ning katsetati seda paralleelselt teiste teenustega.

Mikrokontrolleri ja modemi abil saab hõlpsasti luua prototüüpimiseks vajaliku seadme. Eksperimentaalse tugijaama näitel leiab keerulisele LoRaWANi spetsifikatsioonile vastava aluskoodi sageli kogukonna poolt valmis kirjutatuna Internetist. Lõppseadmena kasutatud FiPy seade juba sisaldas vajalikke raamistikke võrkudega ühendumiseks ning vajas üldjuhul vaid minimaalset seadistust ja meetodite välja kutsumist.

Katsetatud teenustest parimaid tulemusi saadi Telia NB-IoT võrgus, mille tugijaamade hulk oli teistega võrreldes kõige suurem, ning seetõttu saavutati usaldusväärne teenuse kvaliteet pea kõikides tingimustes. Kõige väikseima tugijaamade arvuga Sigfox näitas suurepäraseid tulemusi läbistatusvõimel ja distantsil, mis kinnitab tehnoloogia kõrgetasemelist optimeeritust laiale leviulatusele. Seevastu NORAnet teenusvõrgu katsetel oli keerulistemas tingimustes signaali tugevus limiidilähedane ning kannatas sealjuures sagedaseima paketikao all, mis näitab selgelt LoRa tehnoloogia vajakajäämisi hääbunud signaali vastuvõtmisel. Oma üksiku tugijaamaga olid tulemused alates paarikilomeetrisele distantsile kasutuskõlbmatud, kui kahe jaama vahele jäi suuremaid takistusi, kuid lühimaakatsed näitasid potentsiaalseid rakendusi hoopis alternatiivsetele kasutusjuhtudele.

Tüüpiliseks staatiliste sensoritega kasutusjuhtudeks sobib iga katsetatud valmisvõrk, kuid NORAneti puhul oleks kindlasti vajalik eelnev side kvaliteedi kontroll ekstreemsemates oludes. Latentsitundlikud ning kaugjuhitavad seadmed pole ideaalsed Sigfoxile selle jääkade allalink reeglite ja suurema latentsi tõttu. Liikuva seadme jälgimiseks leiti peamiseks probleemiks NB-IoT võimetus liikuda tugijaamade vahel, mistõttu on paremad valikud NORAnet või Sigfox. Väiksemateks IoT projektideks ja prototüüpimiseks on sobib enim LoRaWAN, sest protokoll on hästi dokumenteeritud, seadmed on võrdlemisi odavad ja kättesaadavad ning selle taga on suur IoT kogukond. LoRaWAN on kolmest

kõige paindlikum ning sobilik ka eksperimentaalseteks kasutusjuhtudeks, mis vajavad liikuvat tugijaama, madalat latentsi või nii üles- kui allalink kommunikatsiooni.

Edasisteks uurimusteks sobivad hästi aspektid, mida käesoleva töö katsetes ei vaadeldud. Suurte sensorvõrkude tarbeks oleks oluline analüüsida tehnoloogiate võimet skaleeruda või seda, kuidas tehnoloogiad on mõjutatud teiste tehnoloogiate tekitatud raadiohäiretest samas sagedusalas. Eraldi võib keskenduda ühele kasutuslale kitsamalt, hinnata võrkude turvalisust või seadmete unetsüklite planeerimise võimalusi voolu säästmiseks. Kui tulevikus ka LTE-M või muu LPWAN Eestis laialdaselt kasutusele võetakse, oleks võimalik analoogilisi katseid läbi viia ka nendel.

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] Aloÿs 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 *2017 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [15] Victor Kathan Sarker, Jorge Peña Queralta, Tuan Nguyen Gia, Hannu Tenhunen, and Tomi Westerlund. A survey on LoRa for IoT: Integrating edge computing. In *2019 Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, pages 295–300. IEEE, 2019.

- [16] Andrea Zanella, Nicola Bui, Angelo Castellani, Lorenzo Vangelista, and Michele Zorzi. Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, 1(1):22–32, 2014.
- [17] Sten Laurit. Eesti madalpingevõrgu analüüs kaugloetavate arvestite baasil, 2017. Magistritöö. TalTech.
- [18] Tulevaks aastaks tuleb gaasiarvestid välja vahetada. <https://www.err.ee/1002491/tulevaks-aastaks-tuleb-gaasiarvestid-valja-vahetada>, 2019. (07.03.2020).
- [19] Lorenzo Germani, Vanni Mecarelli, Giuseppe Baruffa, Luca Rugini, and Fabrizio Frescura. An IoT Architecture for Continuous Livestock Monitoring Using LoRa LPWAN. *Electronics*, 8(12):1435, 2019.
- [20] Qi Li, Zhanghua Liu, and Junsheng Xiao. A data collection collar for vital signs of cows on the grassland based on LoRa. In *2018 IEEE 15th International Conference on e-Business Engineering (ICEBE)*, pages 213–217. IEEE, 2018.
- [21] Damilola D Olatinwo, Adnan Abu-Mahfouz, and Gerhard Hancke. A Survey on LPWAN Technologies in WBAN for Remote Health-Care Monitoring. volume 19, page 5268. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019.
- [22] Juha Petäjäjärvi, Konstantin Mikhaylov, Rumana Yasmin, Matti Hämäläinen, and Jari Iinatti. Evaluation of LoRa LPWAN technology for indoor remote health and wellbeing monitoring. *International Journal of Wireless Information Networks*, 24(2):153–165, 2017.
- [23] Dong Hyun Kim, Jung Bin Park, Jae Ho Shin, and Jong Deok Kim. Design and implementation of object tracking system based on LoRa. In *2017 International conference on information networking (ICOIN)*, pages 463–467. IEEE, 2017.
- [24] Tim Hadwen, Vanessa Smallbon, Qing Zhang, and Matthew 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. IEEE, 2017.

- [25] Kenta Kusuda and Makoto Iwata. Application-Oriented LPWA Network with A Moving Gateway and Stationary End-Nodes. In *TENCON 2019-2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pages 2351–2356. IEEE, 2019.
- [26] Usman Raza, Parag Kulkarni, and Mahesh Sooriyabandara. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2):855–873, 2017.
- [27] Jean-Paul Bardyn, Thierry Melly, Olivier Seller, and Nicolas Sornin. IoT: The era of LPWAN is starting now. In *ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference*, pages 25–30. IEEE, 2016.
- [28] Brecht Reynders, Wannes Meert, and Sofie Pollin. Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication. In *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [29] 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.
- [30] Marco Centenaro, Lorenzo Vangelista, Andrea Zanella, and Michele Zorzi. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5):60–67, 2016.
- [31] 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.
- [32] Short Range Devices (SRD) operating in 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).
- [33] Sigfox. <https://www.sigfox.com/>. (10.03.2020).
- [34] Sigfox technical overview. <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>. (10.03.2020).

- [35] 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.
- [36] Sigfox. <https://www.sigfox.com/en/coverage>. (07.03.2020).
- [37] What is LoRa. <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. (07.03.2020).
- [38] What is LoRaWAN. <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>. (07.03.2020).
- [39] LoRa Alliance. <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>. (07.03.2020).
- [40] Lorenzo Vangelista. Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(12):1818–1821, 2017.
- [41] LoRa modulation basics. <http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf>. (07.03.2020).
- [42] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melia-Segui, and Thomas Watteyne. Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications magazine*, 55(9):34–40, 2017.
- [43] LoRaWAN 1.1 Specification. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_v1.1.pdf. (07.03.2020).
- [44] Asjade interneti võrk sai uue tehnoloogia. <https://www.logistikauudised.ee/uudised/2019/04/01/asjade-interneti-vork-sai-ue-tehnoloogia>. (07.03.2020).
- [45] 3GPP Standards for the Internet-of-Things. https://www.3gpp.org/images/presentations/3GPP_Standards_for_IoT.pdf. (07.03.2020).
- [46] Jun Xu, Junmei Yao, Lu Wang, Zhong Ming, Kaishun Wu, and Lei Chen. Narrowband internet of things: Evolutions, technologies, and open issues. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(3):1449–1462, 2017.

- [47] Borja Martinez, Ferran Adelantado, Andrea Bartoli, and Xavier Vilajosana. Exploring the performance boundaries of NB-IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3):5702–5712, 2019.
- [48] Y-P Eric Wang, Xingqin Lin, Ansuman Adhikary, Asbjorn Grovlen, Yutao Sui, Yufei Blankenship, Johan Bergman, and Hazhir S Razaghi. A primer on 3GPP narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 55(3):117–123, 2017.
- [49] Subho Shankar Basu, Ashish Kumar Sultania, Jeroen Famaey, and Jeroen Hoebeke. Experimental Performance Evaluation of NB-IoT. In *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [50] Joschka Wirges and Uwe 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 (IoT&IS)*, pages 5–11. IEEE, 2019.
- [51] Anna Larmo, Antti Ratilainen, and Juha Saarinen. Impact of coap and mqtt on nb-iot system performance. *Sensors*, 19(1):7, 2019.
- [52] Radek Mozny, Pavel Masek, Martin Stusek, Krystof Zeman, Aleksandr Ometov, and Jiri 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. IEEE, 2019.
- [53] Telia avas Eestit katva asjade interneti võrgu. <https://www.telia.ee/uudised/telia-avas-eestit-katva-asjade-interneti-vorgu>. (07.03.2020).
- [54] 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.
- [55] Mads Lauridsen, István Z 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.
- [56] Jorge Peña Queraltá, Tuan Nguyen Gia, Zhuo Zou, Hannu Tenhunen, and Tomi Westerlund. Comparative study of LPWAN technologies on unlicensed bands for M2M communication in the IoT: Beyond LoRa and LoRaWAN. *Procedia Computer Science*, 155:343–350, 2019.
- [57] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand Meyer. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT express*, 5(1):1–7, 2019.
- [58] Juha Petäjäjärvi, 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Daniel Sjöström. Unlicensed and licensed low-power wide area networks: Exploring the candidates for massive IoT, 2017.
- [62] Nikolaos Tsavalos and Ahmad Abu Hashem. Low Power Wide Area Network (LPWAN) Technologies for Industrial IoT Applications. 2018.
- [63] Joosep Henrik Sild. Madala energiatarbega, kaugmaa raadioside protokollide kasutusvõimalikkus Eestis 2019 aasta kevade seisuga, 2019. Diplomitöö. TalTech.
- [64] Nishant Poddar. Coverage Analysis of LPWAN in Estonia: Sigfox and NB-IoT Case study in Tallinn and Tartu, 2020. Master’s thesis. University of Tartu.

Lisad

I. Testskriptid

```
class NBioTNode:
    TELIA_BAND = 20
    TELIA_APN = "internet.emt.ee"
    REMOTE_COAP_SERVER = ("88.196.41.XYZ", "monitor", 5683) # COAP paketi kuulaja
                                                            # 88.196.41.XYZ:5783/
                                                            # monitor/

    def __init__(self):
        self.lte = LTE()
        self.chrono = machine.Timer.Chrono()
        self.ip_addr = "0.0.0.0"

    def reset(self):
        print("Resetting LTE modem --- ", end="\t")
        self.lte.send_at_cmd('AT+RESET') # peenema kontrolli saavutamiseks
        print("OK") # modemi üle kasutatakse AT-käsk

    def attach(self):
        if not self.lte.isattached():
            print("Attaching to network --- ", end="\t")
            self.lte.attach(band=NBioTNode.TELIA_BAND, apn=NBioTNode.TELIA_APN)
            while not self.lte.isattached():
                time.sleep(0.2)
            print("OK")
        else:
            print("Already attached")
        if not self.lte.isdisconnected():
            self.ip_addr = self.get_ip_addr()
            print("Attached to tower eNB = `%s` (hex)"
                  % self.get_connected_cell_eNBid(), end=" ")
            print("with signal strength %s" % self.get_signal_strength())

    def connect(self):
        try:
            print("Connecting to network --- ", end="\t")
            if not self.lte.isdisconnected():
                self.lte.connect()
                while not self.lte.isdisconnected():
                    time.sleep(0.2)
            else:
                print("Already connected")
        except Exception as ex:
            print("Connection failed: %s" % ex.args[0])
        print("OK")

    def detach(self):
        print("Detaching network --- ", end="\t")
        if self.lte.isattached():
            self.lte.detach()
            while self.lte.isattached():
                time.sleep(0.2)
        else:
            print("Already detached")
        print("OK")

    def disconnect(self):
        print("Disconnecting network --- ", end="\t")
        if self.lte.isdisconnected():
            self.lte.disconnect()
            while self.lte.isdisconnected():
                time.sleep(0.2)
            print("OK")
        else:
            print("Already disconnected")

    def get_signal_strength(self): # signaalitugevus (RSRQ) ühendatud tugijaamaga
        modem_response = self.lte.send_at_cmd("AT+CESQ")
```

```

    if "ERROR" not in modem_response:
        return "-" + str(
            140 - int(modem_response.split("\r\n")[1].split(",")[-1])
        ) + " dBm"
    return "Could not execute `AT+CESQ`"

def get_connected_cell_eNBid(self): # ühendatud tugijaama identifikaator
    modem_response = self.lte.send_at_cmd('AT+CEREG?')
    if "ERROR" not in modem_response:
        return modem_response.split("\r\n")[1].replace("\", \"").split(",")[3][:-2]
    return "Could not execute `AT+CEREG?`"

def get_ip_addr(self):
    modem_response = self.lte.send_at_cmd("AT+CGCONTRDP")
    if "ERROR" not in modem_response:
        return ".".join(modem_response.split("\r\n")[1].replace("\", \"")
            .split(",")[3].split(".")[4])
    return "Could not execute `AT+CGCONTRDP`"

def nbiot_callback(self, code, id_param, type_param, token, payload):
    self.chrono.stop()
    print("Response payload: %s" % payload)
    print("Round trip latency: %f s" % self.chrono.read_ms() / 1000.0)

def init_coap(self):
    try:
        Coap.init(self.ip_addr, service_discovery=True)
    except:
        print("COAP initialization failed")
    Coap.register_response_handler(self.nbiot_callback)

def nbiot_send(self):
    # paketi sisu on latentsuse mõõtmiseks
    # millisekundi täpsusega ajatempel
    payload = (str(time.time()) + str(rtc.now()[6])).encode()
    self.chrono.reset()
    self.chrono.start()
    id = Coap.send_request(
        NBIoTNode.REMOTE_COAP_SERVER[0],
        Coap.REQUEST_PUT,
        uri_port=NBIoTNode.REMOTE_COAP_SERVER[2],
        uri_path=NBIoTNode.REMOTE_COAP_SERVER[1],
        payload=payload,
        include_options=True
    )
    print("request sent in %f seconds" % self.chrono.read_ms() / 1000.0)
    print("Waiting for response...")
    Coap.read()

```

Joonis 10. Micropython klass NB-IoT katsetamiseks.

```

class TTNode:
    # ABP tarvilikud identifikaatorid ja krüptovõtmed, saadud TTnist
    DEV_ADDR = struct.unpack(">1", ubinascii.unhexlify('AABBCCDD'))[0]
    NWK_KEY = ubinascii.unhexlify('0123456789ABCDEF0123456789ABCDEF')
    APP_KEY = ubinascii.unhexlify('FEDCBA9876543210FEDCBA9876543210')

    def __init__(self, freq=868300000, sf=12):
        self.freq = freq
        self.sf = sf
        self.lora = LoRa()
        self.lora.init(mode=LoRa.LORAWAN, region=LoRa.EU868,
                       power_mode=LoRa.ALWAYS_ON, device_class=LoRa.CLASS_A,
                       tx_power=14, tx_retries=2, adr=False)
        self.lora.callback(trigger=(LoRa.RX_PACKET_EVENT | LoRa.TX_PACKET_EVENT),
                           handler=self.callback)
        self.lora.join(activation=LoRa.ABP,
                      auth=(TTNode.DEV_ADDR, TTNode.NWK_KEY, TTNode.APP_KEY),
                      timeout=0, dr=self.data_rate())
        self.s = socket.socket(socket.AF_LORA, socket.SOCK_RAW)
        self.s.setsockopt(socket.SOL_LORA, socket.SO_DR, self.data_rate())
        self.s.setsockopt(socket.SOL_LORA, socket.SO_CONFIRMED, False)

    def data_rate(self):
        return 5 - (self.sf - 7)

    def callback(self):
        events = self.lora.events()
        if events & LoRa.RX_PACKET_EVENT:
            print('TTNode packet received')
            print(self.s.recv(64))
        if events & LoRa.TX_PACKET_EVENT:
            print('TTNode packet sent')

    def send(self):
        self.s.setblocking(True)
        pkt = str(time.time()).encode()
        print('Sending to own gateway:', pkt)
        # raamistiku piirangu tõttu pole võimalik ise määrata
        # soovitud kanalit - saadame seni, kuni satume õigele sagedusele
        while True:
            self.s.send(pkt)
            if self.lora.stats()[9] == self.freq:
                print('Got frequency, waiting for downlink...')
                break
            else:
                print(self.lora.stats()[9]) # viimase sõnumi sagedus
        self.s.setblocking(False)

```

Joonis 11. Micropython klass oma tugijaama katsetamiseks.

II. Litsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks 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, reprodutseerimiseks 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 Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kert Tali

08.05.2020