

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 (automaatjuhtimisteeoria)

# Sisukord

<b>1 Sissejuhatus</b>	<b>4</b>
<b>2 Madala voolutarbe ja laia ulatusega võrgud</b>	<b>6</b>
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
<b>3 Võrdlusmetoodika</b>	<b>17</b>
3.1 Arendusplaat FiPy . . . . .	19
3.2 LoRaWANi tugijaam . . . . .	22
3.3 Katsete tingimused . . . . .	24
3.3.1 Maapiirkond . . . . .	24
3.3.2 Linnapiirkond . . . . .	25
3.3.3 Liikuv tugijaam . . . . .	25
<b>4 Tulemused</b>	<b>26</b>
<b>5 Diskussioon</b>	<b>33</b>
<b>6 Kokkuvõte</b>	<b>36</b>
<b>Viidatud kirjandus</b>	<b>43</b>
<b>Lisad</b>	<b>44</b>
I. Testskriptid . . . . .	44
II. Litsents . . . . .	47

# 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 füüsилiste 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 vooltarvet kui laia leviala. Konkureerivad tehnoloogiad – Sigfox, LoRa, NB-IoT, LTE-M reklaamivad seadmetele suurusjärgus kümneaastastaku eluiga ja kümnekilomeetrist efektiivset leviulatust.

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

Uurimuse meetod on riistvara katsetamine, mille käigus mängitakse läbi LPWANi lõpp-seadme käitumine erinevates raskendatud leviga paikades. Katseid viiakse 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 lõppseadme võimekust saata sõnumeid mittetäiuslikes oludes, võttes arvesse ka selleks kuluvat latentsi. Kasutusuhtude omistamisel 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 piirdutakse piisava valimiga, mis annaks ettekujutuse halvimast juhust üksikule seadmele.

Teises peatükis antakse ülevaade teoreetilistest taustateadmistest, mis puudutavad asjade internetti, LPWANi tehnoloogiaid ja näiteid nende potentsiaalsetest kasutusaladest, mida teadusartiklites on seni kajastatud. Kolmas peatükk hõlmab töö lahenduskäiku, alates kasutatava riistvara kirjeldusega ning lõpetades metoodika ja testimiste asukohavalikute põhjendustega. Neljandas peatükis koondatakse kokku ja visualiseeritakse olulisemaid katsetulemusi. Viendas peatükis arutletakse teenuste sobilikkuse ja mittesobilikkuse üle erinevatele kasutusuhtudele, tuginedes eelkõige katsetulemustele, kuid arvestades ka teises peatükis välja toodud omadusi, mis katsetamisele ei kuulunud.

## 2 Madala voolutarbe ja laia ulatusega võrgud

Gaddami ja Rai väitel on LPWANi võrgud loodud, pidades silmas neid võrku ühendatavaid seadmeid ja nende kasutusujuhte, 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 Internetti 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 otsetselt 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 LPWANi 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 näiteid erinevatest kasutusuhtudest. Teises alapeatükis kirjeldatakse levinud tehnilisi võtteid, mida rakendatakse selliste tehnoloogiate puhul, et saavutada sea-

tud eesmärgid. Viimaks võetakse seotud tööde alampeatükis 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 [?]. Viidatakse sellele, et see pole küll uus idee, kuid LPWAN tehnoloogiate tulekuga on tekkimas üha enam uusi ettepanekuid targa linna süsteemidele. Staatalisi 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 modulatsioonitehnika, ehk OSI mudeli mõistes võrgu esimest (ehk 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] uurimuses IoT silmusvõrkude voolutarbest tõdetakse, et raadio on eranditult suurim tarbija lõpp-seadmes, mille ärkvelolekut tuleb võimalikult palju piirata. Kui silmusvõrkudes kulub suur osa lõppseadme ressursist naaberseadme retransleerimisele, siis LPWAN võrgud töötavad üldiselt vaid tähtvõrguna, milles lõppseade suhteb ainult tugijaamadega [29]. Selle tõttu on LPWANidel palju vabam süvaune planeerimine, sest iga seade hoolitseb vaid enda andmevahetuse eest. Tarbitava voolu tugevus, 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 töenäosust 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.

Mainitud meetodid on vaid üldised orientiirid, mis seniste tehnoloogiate seas on korduvalt kasutusele võetud. Tehnoloogia disainivalikud nendes küsimustes defineerivad selle eelised ja puudused levi ja voolusäästlikkuse osas ning sageli hoitakse neid teadmisi ka saladuses, luues firmaomast

## 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 [?]. 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. Põhjuks on, et kitsale vahemikule satub harvemini raadiohäireid, mis omakorda alandab üldist ülekande nurjumise tõenäosust ja laseb edukalt vastu võtta kuni  $-142 \text{ dBm}$  hääbunud signaali (RSSI). 100 Hz laiused sõnumid jaotatuna 0,2 MHz ribale tähendab, et päaspunkt kuulab samaaegselt ligi 2000 teoreetilisel vahemikul, pakkudes küllaldaselt ribalaiust samaaegseteks ülekanneteks ka kasutataval ALOHA mehanismil.

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 [32]. 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 [32].

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 füüsилiste seadmetega, suunates kuuldu d paketid oma rakendustesse ning saata lõppseadmetele sõnumeid tagasi.

### 2.3.2 LoRaWAN

LoRa (tuletatud *Long Range*) on nimetus füüsilele 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 mastapärase 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 ehk lühikeste tõusude ja langustega sageduses, mis on sümboliteks kodeeritud sagedushüpeteega. LoRa võimaldab saatjatel vabalt valida laotustegurit (*ingl spreading factor*), saavutamaks paremat signaali robustsusit 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. Spetsifikatsiooni kohaselt on LoRa seadmed võimelised suhtlema laotusteguri suurenedes  $-123 \text{ dBm}$  kuni  $-136 \text{ dBm}$  signaalitugevustel, kuid reaalsetes tingimustes leitakse minimaalseks signaalitugevuseks vaid  $-124 \text{ dBm}$  [3]. Laotustegurid on täisarvud vahemikus 7–12 ning vastavad tavapärases 125 kHz kanalis 27–0,3 kbps andmekiirustele [40].

LoRaWAN röhub 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 vörk. Spetsifikatsiooni kohaselt on seadmetel kolm töorežiimi, 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 saattele järgnevas ajaaknas, veetes muu aja energiasäästlikus olekus,
- “B”-klass sisaldab “A”-klassi funktsionaalsusi, kuid võimaldab eelnevalt kokku leppida seadme kätesaadavuse ajaaknad, kulutades rohkem energiat sidekanali perioodiliselle 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 tchinevat *The Things Network* (TTN) vörku, või hostida avaliku lähtekoodiga rakendusserverit nagu ChirpStack koos isiklike tugijaamadega. TTN on tasuta LoRaWANi teenus mille leviala pakkujateks on vabatahtlikud üle maailma.

### 2.3.3 NB-IoT

Mobiilsidestandardite 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 tsükkelkoodikontrolli suurendamine, millega saavutatakse 20 dB efektiivne signaalivõimendus 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 turvamehanismid [47]. Mitu uurimust [48, 49] soovitab siiski NB-IoT puhul kasutada UDP-põhiseid sideprotolle 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 arvelt [45]. Mozny jt [50] katsetustest tuleb välja, et tavapärastes 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 latentsitudlikele 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 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 toot-

jatele lihtsam. Üleüldiselt on protokolli lihtsustatud, et alandada kiibistike keerukust ja omakorda riistvara maksumust [44]. Eestis pakub NB-IoT teenust Elisa ja 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 vahel [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 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.

Litsentseerimata sagedusvahemikele on loodud hulganisti standardeid, millega annavad hea ülevaate Raza jt [25], kuid mille põhjalik käsitlus jäab käesoleva töö skoobist välja. Huvitavam ja teiste seas laiemat kasutuselevõttu kogenud tehnoloogia on Ingenu RPMA, mis erineb teistest 2,4 GHz sagedusala kasutamise tõttu, mis ühtlasi võimaldas võrdlemisi regulatsioonivaba kasutust kõikides maailma piirkondades [?]. Kõrgem sagedus peaks vähendama signaali läbistusvõimet, kuid distantsi osas lubatakse võrdväärseid kauguseid LoRa ja Sigfoxiga, suutes samaaegselt teenindada rohkem seadmeid [25]. Sellegi poolest on tehnoloogiat juurutatud üksikutes riikides ning reaalsetes tingimustes katseid, mis eelnevalt loetletud omadusi kontrolliks, autori teada ei leidu.

## 2.4 Sarnased uurimused

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

Eeskujulikuimad 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- [54] ja sisetingimustele [21] levianalüüsidi ning analoogiliselt Kalfuse ja Hégri [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, kusjuures mõõtmissagedus on väga tihe. Ka käesolev töö arvestab neid parameetreid hinnangute tegemisel, kuid teeb seda korraga mitmel tehnoloogial ja suuremal alal, millega tulenevalt on töö mastaabi tõttu mõõtmised harvemad ja hajutatumad.

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 SNR 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 neis suures osas kirjeldamata.

Laiemalt arutleb Sigfoxi, LoRaWANi ja NB-IoT kasutusjuhtude sobivuse ja mittesoobivuse üle Sjöström [57] oma magistritöös. Tema diskussioon kaardistab hästi eeliseid ja puuduseid tehnoloogiate vahel ning toob välja kasutused, kus need nüansid kõige olulisemad on, tehes siiski järeldisi vaid kirjanduse analüüsiga põhjal. Erinevalt Sjöströmist toetub käesolev töö kasutusjuhtude analüüsile katsetulemustele, moodustades terviku, aitamaks lugejal luua aimdu konkureerivate tehnoloogiate reaalsest potentsiaalist. Tsa-

valose ja Hashemi [58] magistritöö Lundi Ülikoolis hindamaks LPWAN tehnoloogiate sobivust tööstussektori kasutusaladele algab kõikide samade tehnoloogiate üksikasjaliku kirjeldusega, 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.

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, kahjuks ei kuulu see töö avalikustamisele [59]. Teiseks on käesoleva töö tegemise ajal kirjutatud magistritöö , mis hindab Sigfoxi ning Elisa ja Telia NB-IoT vörke sise- ja välitingimustes, keskendudes väikesele asukohavalimile, kuid suurele ülekanne hulgale igas asukohas. Viimase töö katsed toimuvad pooletunniste vahedega ning näitavad arvestatavat paketikadu kõige raskemates sisetingimustes, mis ei väljenda üksikute katsetega ning on seetõttu oluline meeles pidada ka käesoleva töö tulemusi tõlgendades.

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

### 3 Võrdlusmetoodika

Erinevate kasutusjuhtude 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, 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 vahieruva täielikkusega kättesaadavad teenuste rakendusliidestest abil, mis on seadistatud tegema tagasikutseid autori isiku serveri otspunktide vastu, mis võimaldavad andmeid hiljem analüüsida. Nimetatud teenused võimaldavad pärinda ülekande kohta järgmisiid metaandmeid:

- sõnumit kuulnud tugijaamade identifikaatorid,
- sõnumit teenindava tugijaama RSSI ja SNR indikaatorid (NORAneti puhul ka teiste, sõnumit kuulnud jaamade omad),
- LoRaWANi põhiste teenuste puhul ka kasutatud laotustegur ning sagedus.

Ühegi teenusepakkujaga pole tehtud täiendavaid kokkuleppeid täpsamatele parameetritele ligi päsemiseks ning kõik katsetel mõõdetavad väärtsused on kätesaadavad 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 teenusepakkija ei avalda. Sellest tulenevalt hinnatakse NB-IoT sidekvaliteeti järgnevate parameetrite alusel:

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

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

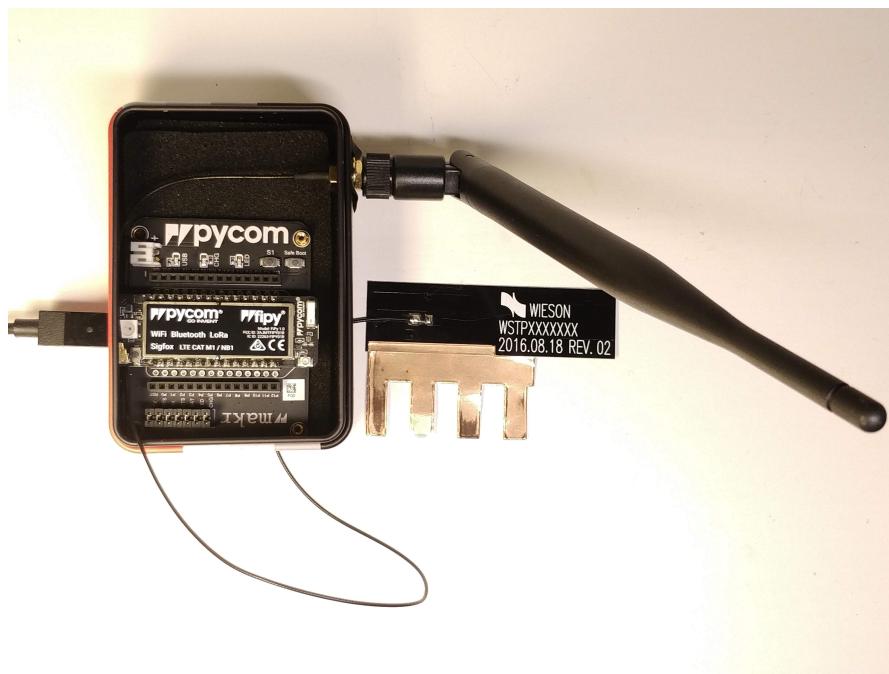
Valmisvõrke ja vaba sagedusala peab sealjuures heaperemehelikult kasutama. See täihendab katsete ajalist hajutamist, et mitte hõivata eetrit reaalsete rakenduste eest mõjuvas. Omakorda kogu protsessi kulukuse tõttu ei saa kokkuvõttes teha niivõrd palju katseid, millega oleks võimalik ammendavalt analüüsida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

Edasistes alampeatükkides tutvustatakse kasutatavat riistvara ja katsete läbi viimise keskkondi. Esimeses alampeatükis keskendutakse kasutatavale arendusplaadile, mis simuleerib lõppseadet IoT kontekstis. Seejärel kirjeldatakse alternatiivset lahendust LPWANI leviala tagamiseks, luues oma LoRaWANI tugijaam. Kolmandas alampeatükis kirjeldatakse katsealuseid tingimusi ja tuuakse välja tähtsamad häirivad tegurid iga katsekeskkonna 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. FiPy on uuendatud Micropythoni versioonile v1.20 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.

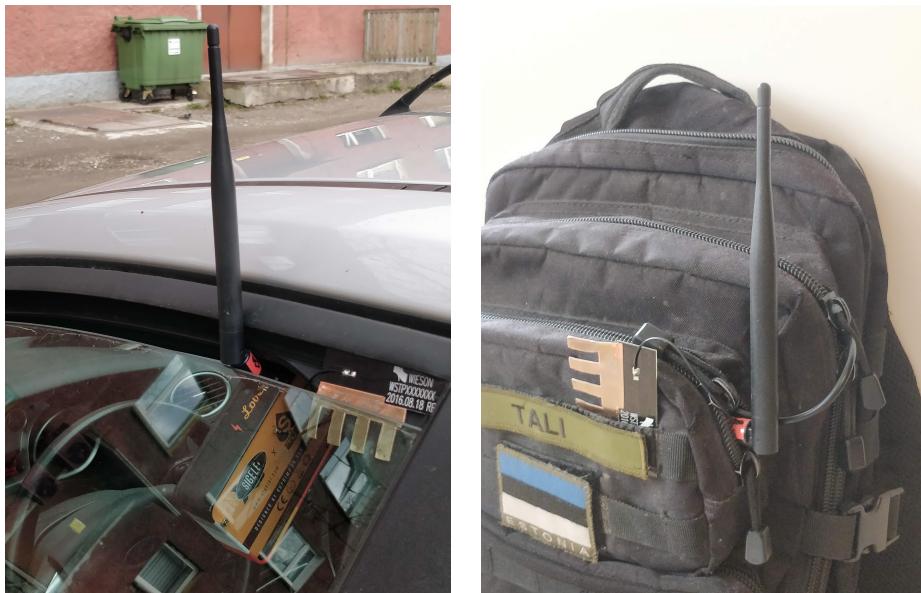


Joonis 1. FiPy lõppseade mitme võrgu testimiseks.

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 järgmisiid 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 kogumik skripte, mille käitamine saabab üle iga katsetatava sidekanali mingi sisuga andmepaketi, seejärel vajadusel tugijaamalt vastust ootama jäädvades. 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())
        print('Data sent!')
        if receive:
            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 liidesega nõuab seevastu rohkem parameetreid. Eelnevalt tuleb kasutatavale seadmele hankida identifikaatorid ja vajalikud võtmed valitud teenusepakkija veebikeskonnast. 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 lepitakse 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 rakendusliidesega on vaja määrata vaid operaatorile spetsiifilised andmed ning luua ühendus. Kasutatud skript (joonis 10) kasutab erinevalt teistest skriptidest otsesuhtlust modemiga meetrika omadamiseks ning UDP ühenduse loomist COAP protokolli näol.

---

```

class NORAnetNode:
    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()
        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():
            timeoutcount += 1
            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):
        return 5 - (self.sf - 7)

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

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

```

---

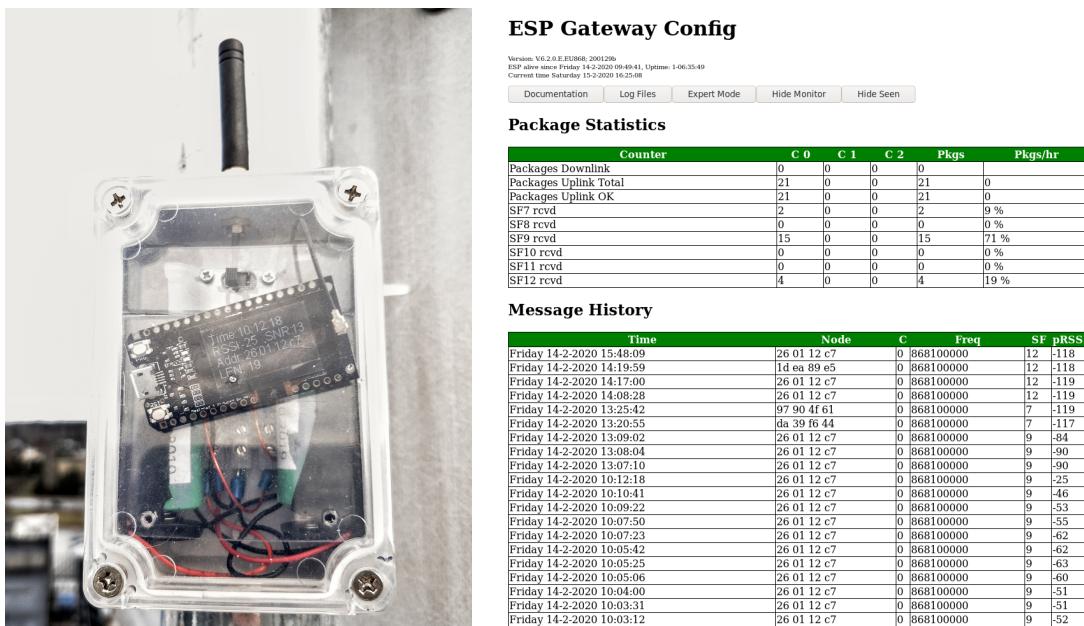
Joonis 4. Micropython klass NORAneti katsetamiseks.

## 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 kuulduud pakette. Sellise paketiedastaja lihtsaimal kujul ehitamiseks on vaja LoRa transsiiveri moodulit 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 lühikesse isotroopilise LoRa antenniga ja displeiga ning on koos akutoitega ilmastikukindlas karbis, et seda oleks lihtne välioludes rakendada (joonis 5). Mikrokontroller on programmeeritud avalikust repositoriumist laenatud koodiga<sup>1</sup>, mis võimaldab tööajal kaudset konfigureerimist ja monitoorimist üle veebi. Rakendusserverina kasutab seade TTN avalikku võrku.



Joonis 5. 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 täisväärtusliku tugijaamaga tuleneb transsiivermoodulist, mis on töökindel korraga teenindama vaid ühel kanalil ja laotusteguril. Sellise lahenduse mastaapne kasutamine võib liigelt

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

koormata kitsast vahemikku 868 MHz sagedusest ning tekitada ebaproportionaalselt häireid teiste sama piirkonna LoRa rakenduste töös. Erinevus kajastub ka hinnaklassis — täisvõimekusega LoRa modemi maksumus algab 120 eurost<sup>2</sup>, käesoleva hind umbes viis eurot.

### 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].

---

<sup>2</sup><https://shop.imst.de/wireless-modules/lora-products/8/ic880a-spi-lorawan-concentrator-868-mhz> (10.04.2020)

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

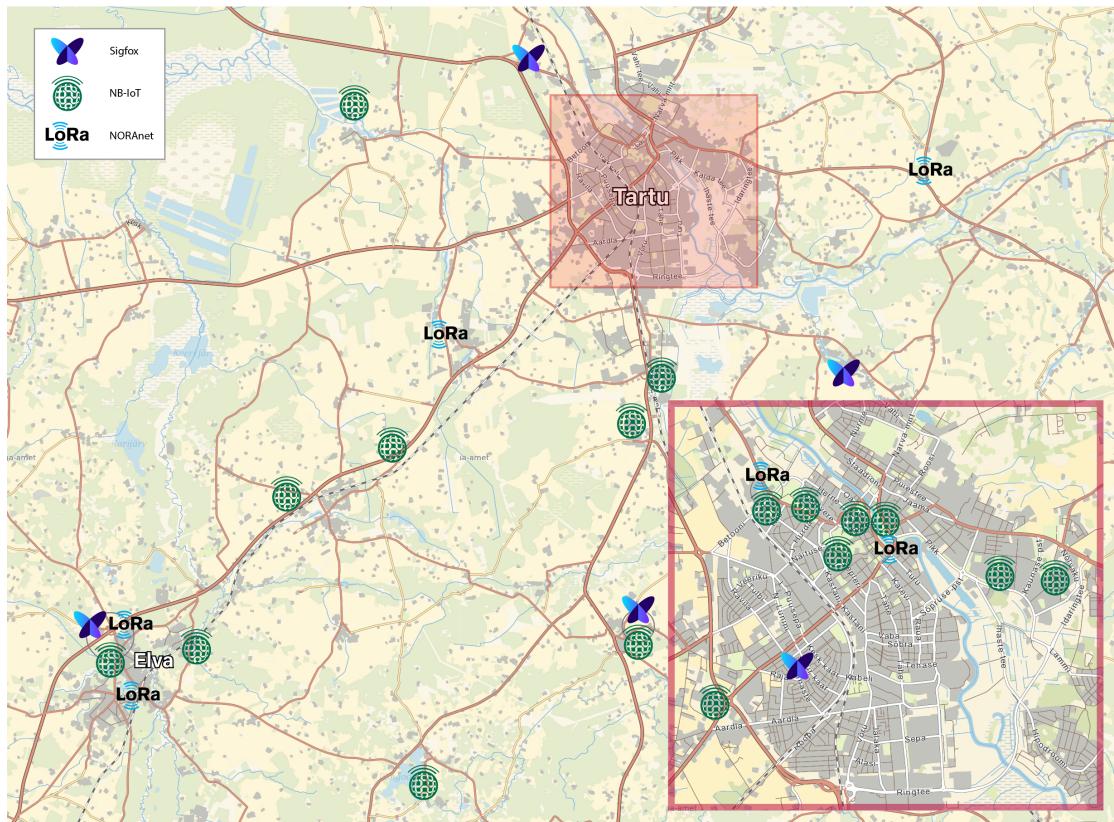
### **3.3.3 Liikuv tugijaam**

Eraldiseisvalt uuritakse veel andmete kogumist transporditavalta tugijaamalt. Testide puhul näeb see ette nii tugijaama kui lõppseadme asetsemist maapinna ligidal või muudes ebasoodsates oludes. Antud 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 stseenariumidega jälgjendatakse väiksema piirkonna sensoritel info kogumist näiteks autos asetseva LoRa seadme abil.

## 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*<sup>3</sup> 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 6 on kujutatud tugijaamade umbkaudsed asukohad, millega saavutati ühendus üle kõikide katsete.



Joonis 6. Leitud tugijaamat.

Mastaapseimat kattuvust pakub Telia, mille infrastruktuur tugineb suuresti olemasole-

<sup>3</sup><https://www.cellmapper.net/map> (22.03.2020)

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

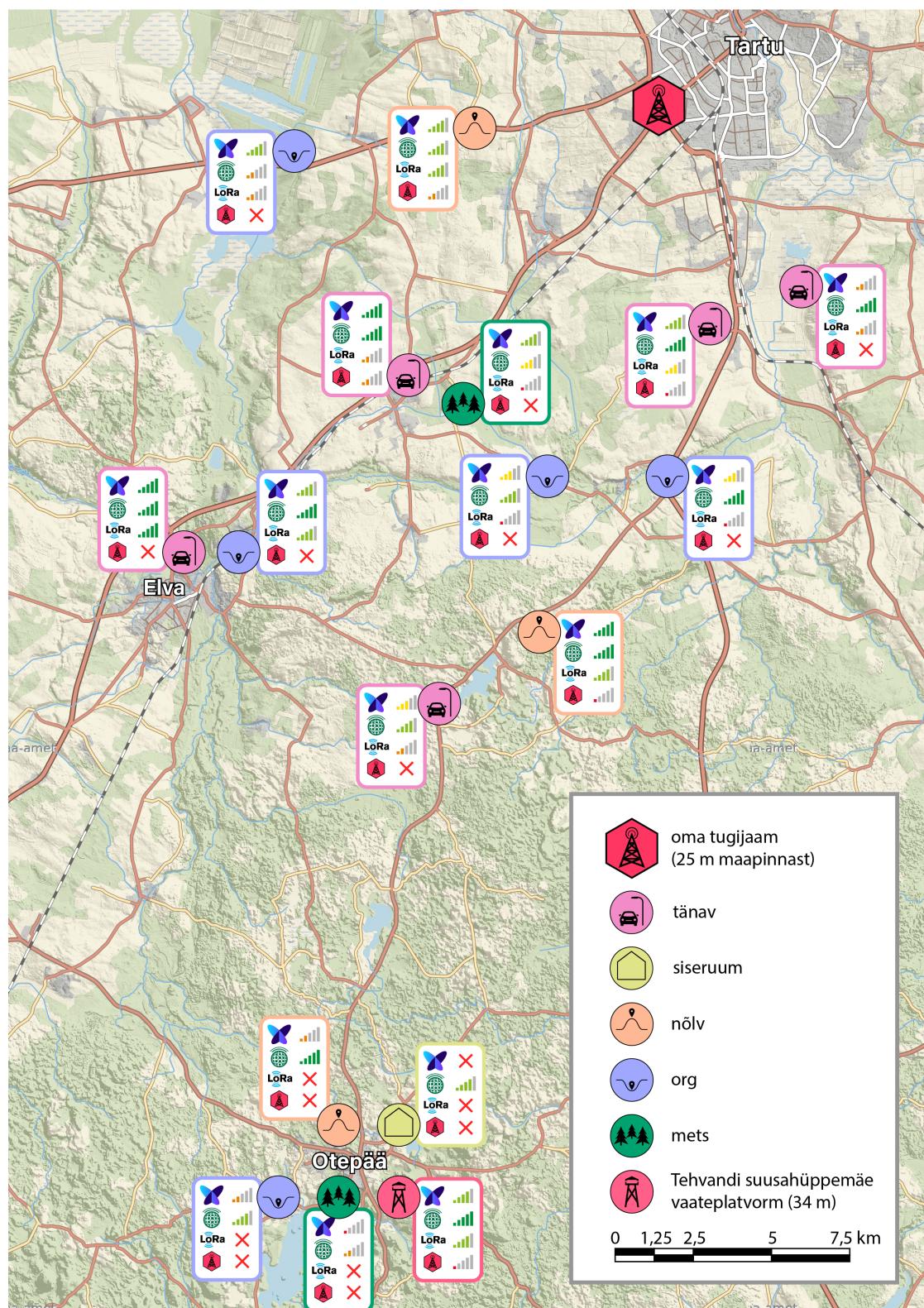
Järgnevatel joonistel on side kvaliteeti tähistatud viie palli skaalal, mis on välja kujundatud vastavalt ülekande kohta üles märgitud näitajate alusel. Skaala määramisel on juhindutud võimalusel varasematest töödest ja ametlikest allikatest. Sigfoxi puhul on täpne juhis välja toodud dokumentatsioonis<sup>4</sup>, NB-IoT signaali tugevust hindamaks on sobiv skaala välja toodud Poddari poolt [60]. LoRa signaali hindamisel puudub kokkuleppeline skaala, kuid määräatakse testide käigus kujunenud mustrite põhjal, arvestades eelkõige, et minimaalne edukalt demoduleeritud sõnum oli tugevusega  $-122 \text{ dBm}$ . Skaala on üksikasjalikult välja toodud tabelis 1.

Tabel 1. Hinnangulise side kvaliteedi tingmärgid võrkude lõikes.

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

Maapiirkonnas tehti katseid 14 erinevast asukohast (joonis 7). Pelgalt ühenduse loomisega 25 kilomeetri raadiuses Tartu kesklinnast lõuna poole saavad eranditult hakkama NB-IoT

<sup>4</sup><https://support.sigfox.com/docs/link-quality:-general-knowledge>



Joonis 7. Maapiirkonna katsete tulemused.

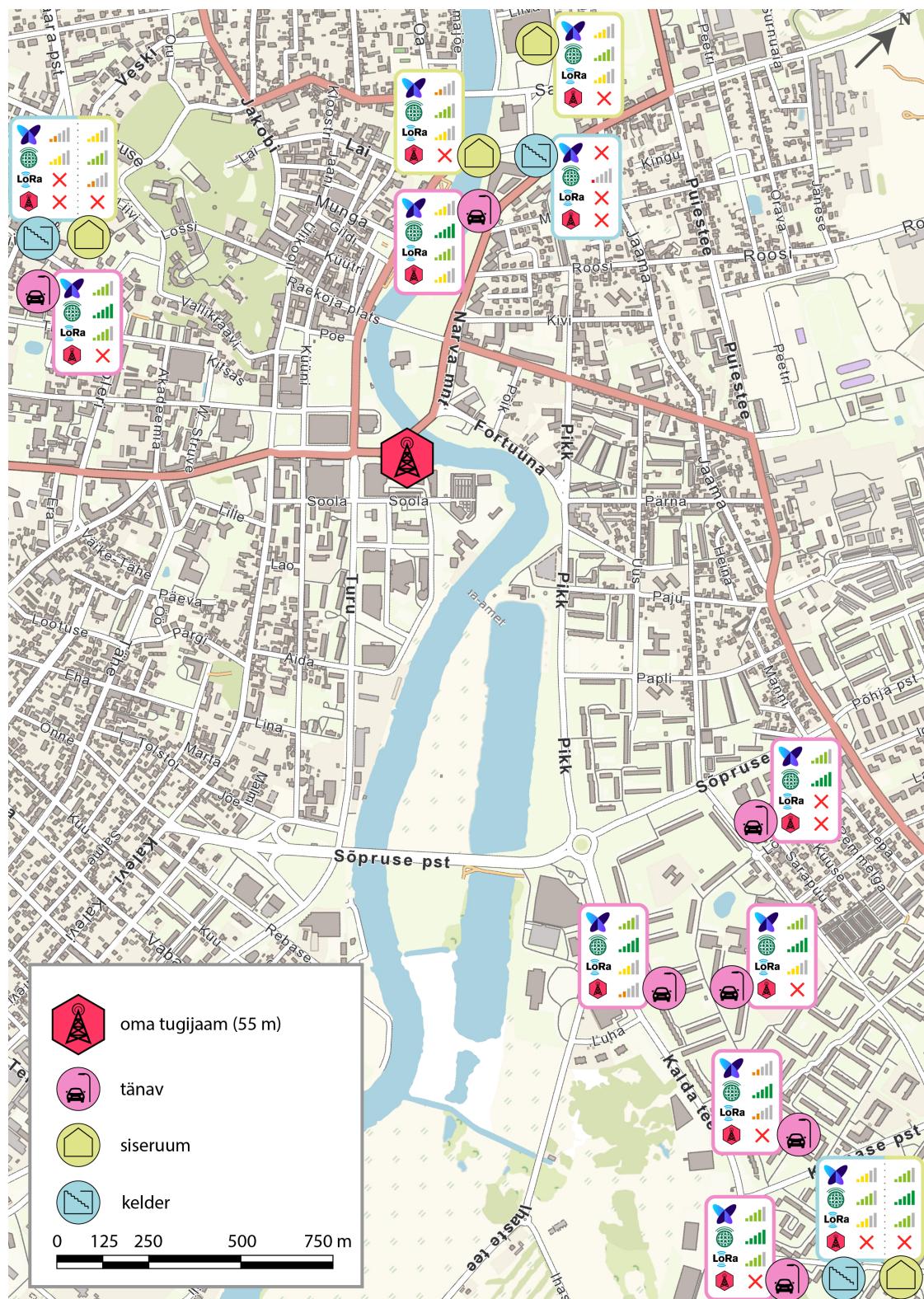
ja Sigfox. Võttes arvesse NB-IoT jaamade hulka, on tagantjärele selge, et levialast välja sattumine on tugijaamade liiasuse ja teeninduspiirkondade kattuvuse tõttu väga keeruline. Ainus koht, kus NB-IoT signaal oli nõrk ning latents küündis 1,3 sekundini, asus Tartust läände suunduval Viljandi maantee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

Selgemini saab võrrelda Sigfoxi ja NORAneti. Sügavamates nõgudes ja metsades esines NORAneti võrgus paketikadu ning mitmel korduskatsel oli näha, et side töötas oma võimekuse piiril, raporteerides  $-122 \text{ dBm}$  vastuvõetud signaalitugevust ning SNR väärvtusega  $-17$  ehk raadiomüra tasemest 17-kordselt nõrgemat signaali. Sigfoxi puhul asetseb lävi palju kõrgemal – kõige nõrgem saavutatud ülekanne antud raadiuses oli  $-132 \text{ dBm}$  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 pääsuspunkt, mistõttu sai kontrollitumalt kombata leviauguse 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 vähigi realsemates 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.

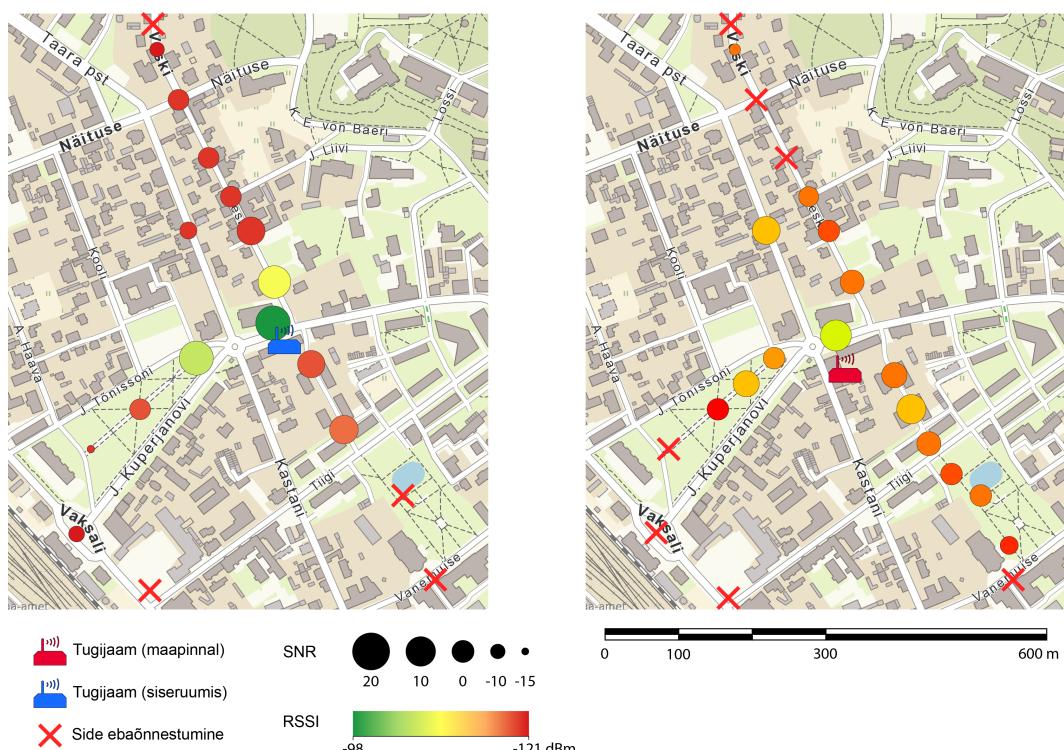
Linnatänavatel oli paiku kokku seitse (joonis 8). LoRa puhul võis ka Annelinna majade vahel leida leviauke nii NORAneti kui oma tugijaamaga, kusjuures oma tugijaam kaotas side juba vähimagi hoonestuse varjega poolteise kilomeetriselt distantsilt. Sigfoxi jaoks oli Annelinn tugijaamadega varustatavust arvestades keerulistes tingimustes, kuid sellegipoolest ei tuvastatud välitingimustes paketikadu isegi kui ühes asukohas küündis



Joonis 8. Linnakatsete tulemused.

vastuvõetud signaalitugevus -141 dBm-ni. 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 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 korrustest. Oma tugijaamaga kommunikeerida ei õnnestunud, isegi kui see asus Plasku hoone katusel koos NORAneti tugijaamaga, millega omakorda side saavutati. Viimane viatab 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. Kesklinna kortermaja keldris oli NORAnet ainuke, 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 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 majataguses 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.

Kõiki tulemusi kokku võttes on selge eelis levilise katvuse osas NB-IoT, mis levis laitmatult kõikides juhuslikult valitud asukohtades. Hea tugijaamade katvuse tõttu levib tehnoloogia peaaegu kõikjale ning paketikadu ei tähdeldatud kusagil mujal kui Delta hoone keldrikorrusel. Sigfox toimib teenusena oma kodulehel reklaamitavas levialas<sup>5</sup> hästi ning edestab tehnoloogiana kõiki teisi oma võimekusega võtta vastu tugevalt hääbunud signaali. LoRa vajab Sigfoxiga vörreldes niivõrd palju tugevamat signaali, et pikemalt distantsilt muutub side ebastiiliseks isegi väiksemate takistuste sattumisel tugijaama ja lõppseadme vahele. NORAnetil on isikliku leviala ees tugijaamade hulga eelis, kuid ka teatud riistvaraline eelis, mis asetab selle võimekuselt Sigfoxi ja oma LoRaWANi vahele.

---

<sup>5</sup><https://www.sigfox.com/en/coverage>

## 5 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 kasutusalade 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 röhku 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 pöllumajandus- ja looduskeskkonnast andmete kogumiseks tõestab samuti hea teenuse kvaliteet linnapiirist väljaspool.

Samadele kasutusuhtudele 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 madalikelle, 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 üleslink 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 latentsitudlikesse 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. LoRaWANil 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 jäääb 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, kuigi arvestada tuleb hõreda infrastruktuuriga ja leviaukudega mölemal juhul. Tarku tervisesensoreid saab rakendada nii inimestel kui kariloomadel, juhul kui on veendutud teenuse levialas inimese koduruumides või loomadel kogu nende karjamaa ulatuses, kusjuures ühe karjamaa piires kõlbaks kasutuseks ka ise tehtud LoRaWAN lahendus.

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

NB-IoT ei suuda peale esmasti ühendamist sidemastiga end 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 Eestis 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 sõnumeeri-mine liikuvalle 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 instruktsioone 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 mada-lalatentsiliseks haldamiseks. Soovituslik on sellises olukorras kasutada vaid perioodilist küsimus-vastus suhtlust lõppseadme poolt.

## **6 Kokkuvõte**

Valmimisel...

## **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 *2017 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [15] 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.
- [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):1435, 2019.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Usman Raza, Parag Kulkarni, and Mahesh Sooriyabandara. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2):855–873, 2017.

- [26] 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.
- [27] 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.
- [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] 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.
- [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) 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](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] Lorenzo Vangelista. Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(12):1818–1821, 2017.
- [39] LoRa modulation basics. <http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf>. (07.03.2020).
- [40] 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.
- [41] LoRaWAN 1.1 Specification. [https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm\\_specification\\_-v1.1.pdf](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](https://www.3gpp.org/images/presentations/3GPP_Standards_for_IoT.pdf). 07.03.2020.
- [44] 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.
- [45] Borja Martinez, Ferran Adelantado, Andrea Bartoli, and Xavier Vilajosana. Exploiting the performance boundaries of NB-IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3):5702–5712, 2019.
- [46] Y-P Eric Wang, Xingqin Lin, Ansuman Adhikary, Asbjorn Grovlen, Yutao Sui, Yufei Blankenship, Johan Bergman, and Hazhir Razaghi. A primer on 3GPP narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 55(3):117–123, 2017.
- [47] SubhoŠankar 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.

- [48] 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 (IoTaIS)*, pages 5–11. IEEE, 2019.
- [49] Anna Larmo, Antti Ratilainen, and Juha Saarinen. Impact of coap and mqtt on nb-iot system performance. *Sensors*, 19(1):7, 2019.
- [50] 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.
- [51] Telia avas Eestit katva asjade interneti võrgu. <https://www.telia.ee/uudised/telia-avas-eestit-katva-asjade-interneti-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.
- [59] Joosep Henrik Sild. Madala energiatarbega, kaugmaa raadioside protokollide kasutusvõimalikkus Eestis 2019 aasta kevade seisuga, 2019.
- [60] Nishant Poddar. Coverage Analysis of LPWAN in Estonia: Sigfox and NB-IoT Case study in Tallinn and Tartu, 2020.

# Lisad

## I. Testskriptid

---

```
class NBIIoTNode:
    TELIA_BAND = 20
    TELIA_APN = "internet.emt.ee"
    REMOTE_COAP_SERVER = ("88.196.41.189", "monitor", 5683)

    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')
        print("OK")

    def attach(self):
        if not self.lte.isattached():
            print("Attaching to network --- ", end="\t")
            self.lte.attach(band=NBIIoTNode.TELIA_BAND, apn=NBIIoTNode.TELIA_APN)
            while not self.lte.isattached():
                time.sleep(0.2)
            print("OK")
        else:
            print("Already attached")
        if not self.lte.isconnected():
            self.ip_addr = self.get_ip_addr()
            print("Attached to tower eNB = `%" + 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.isconnected():
                self.lte.connect()
                while not self.lte.isconnected():
                    time.sleep(0.2)
            else:
                print("Already connected")
        except Exception as ex:
            print("Connection failed: \\" + 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.isconnected():
            self.lte.disconnect()
            while self.lte.isconnected():
                time.sleep(0.2)
            print("OK")
        else:
            print("Already disconnected")

    def get_signal_strength(self):
        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):
    modem_response = self.lte.send_at_cmd('AT+CEREG?')
    if "ERROR" not in modem_response:
        return modem_response.split("\r\n")[1].replace("``", "").split(",")[-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:
        None
    Coap.register_response_handler(self.nbiot_callback)

def nbiot_send(self):
    payload = (str(time.time()) + str(rtc.now()[6])).encode()
    self.chrono.reset()
    self.chrono.start()
    id = Coap.send_request(
        NB_IoTNode.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 TTNNode:
    DEV_ADDR = struct.unpack(">I", 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=(TTNNode.DEV_ADDR, TTNNode.NWK_KEY, TTNNode.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('TTNNode packet received')
            print(self.s.recv(64))
        if events & LoRa.TX_PACKET_EVENT:
            print('TTNNode packet sent')

    def send(self):
        self.s.setblocking(True)
        pkt = str(time.time()).encode()
        print('Sending to own gateway:', pkt)
        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])
        self.s.setblocking(False)

```

---

Joonis 11. Micropython klass oma tugijaama katsetamiseks.

## **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***