



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

TTÜ Tartu kolledž

MADALA ENERGIATARBEGA, KAUGMAA RAADIOSIDE
PROTOKOLLIDE KASUTUSVÕIMALIKKUS EESTIS 2019
AASTA KEVADE SEISUGA

USABILITY OF LPWAN PROTOCOLS IN ESTONIA IN SPRING 2019

RAKENDUSKÕRGHARIDUSETÖÖ

Üliõpilane: Joosep Henrik Sild

Üliõpilaskood: 154581NDFR

Juhendaja: Ago Rootsi, lektor

Tartu 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” mai 2019

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusetööle esitatud nõuetele

“.....” 2019

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2019 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

TTÜ Tartu kolledž
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Joosep Henrik Sild, 154581NDFR
Õppekava, peeriala: NDFR14/15, Küberfüüsikaline süsteemitehnika
Juhendaja: Lektor, Ago Rootsi, 566 29 821 (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Madala energiatarbega, kaugmaa raadioside protokollide kasutusvõimalikkus Eestis 2019 aasta kevade seisuga
(inglise keeles) Usability of LPWAN protocols in Estonia in spring 2019

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Madala energiatarbega, kaugmaa raadioside protokollide tehnoloogiline analüüs
2. Tehnoloogia teenuste ja turul pakutavate seadmete analüüs
3. Kasutusvõimalikkuse analüüs

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö eelkaitsmine	08.05.19
2.	Lõputöö esitamine	27.05.19
3.	Lõputöö kaitsmine	05.06

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "27" mai 2019.a

Üliõpilane: Joosep Henrik Sild ".....".....201....a
/alkiri/

Juhendaja: Ago Rootsi ".....".....201....a
/alkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	6
1 SISSEJUHATUS	7
2 METOODIKA	8
3 PROBLEEMIPÜSTITUS	9
4 LPWAN TRANSPORDIKIHTIDE ÜLEVAADE	13
4.1 Võrdlustabel	13
4.2 NB-IoT	14
4.3 SigFox	15
4.4 LoRa	17
4.5 LPWAN protokollide võrdlus kokkuvõtvalt	18
5 TEOREETILISE KATSE DISAIN	20
5.1 Katse määratlus	20
5.2 Hindamiskriteeriumid	21
5.3 Koolide valim	21
5.4 Sobivad seadmed	22
5.4.1 Connected AirWits CO2	23
5.4.2 Connit Air Quality Green Comfort CO2 EU868	23
5.4.3 AirQS-100NB; AirQS-100L; AirQS-100S	24
5.4.4 Elsys ERS-CO2	24
5.4.5 Polysense WxS 8800	24
5.5 Leviala valitud koolides	25
5.5.1 Sigfox	25
5.5.2 NB-IoT	26
5.5.3 LoRa	28
5.6 Analüüs	29
5.6.1 Seadmed	29
5.6.2 Leviala	31
5.6.3 Teenuse hind	32
5.6.4 Analüüsi kokkuvõte	33
6 KOKKUVÕTE	35
7 SUMMARY	37

8	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	39
---	------------------------------------	----

EESSÕNA

Antud rakenduskõrgharidusetöö on koostatud Joosep Henrik Silla initsiatiivil eelkõige autori tööalasest huvist tulenevalt. Töö teema sõnastati koostööd juhendaja Ago Rootsiga.

Töö analüüsisosas kogutud informatsioon erinevalt teenusepakkujalt on autoritega jagatud usalduses ning seetõttu pole meilivahetusi ja suhtlust kohustuslike allikatena välja toodud.

Töö eesmärk on analüüsida madala energiatarbega, kaugmaa tehnoloogiate kasutatavust Eestis 2019 aasta kevadel. Töö selgitab tehnoloogiate olemusest tulenevaid eripärasid ning selgitab, milliseid seadmeid protokollide kasutamiseks saada on ning kui kvaliteetsed on tehnoloogiatel põhinevad teenused.

Asjade internet, madala energiatarbega, kaugmaa, raadioside, rakenduskõrgharidusetöö

1 SISSEJUHATUS

Digitaliseerumisega seotud trendid on 2019 aastal aktuaalsed paljudes valdkondades, alustades meditsiinist ja lõpetades kinnisvaraga. Üks suurimaid osi digitaliseeruvast maailmast on asjade internet ehk värgvõrk ja selle erinevad rakendusvaldkonnad. Üldtunnustatud prognoos on, et lähimatel aastakümnetel suureneb internetiga ühendatud seadmete hulk märkimisväärselt ja seda mitte niivõrd personaalsete seadmete vaid just asjade interneti seadmete arvelt.

Asjade interneti laialdane rakendamine sõltub suurel määral otseselt välja töötatud tehnoloogiate ja teenuste kvaliteedist ning nende kättesaadavusest. Ühe suure asjade interneti kasutusvaldkonnana nähakse suuremahulisi andmekorje ja seadmete juhtimise rakendusi. Taolised lahendused on potentsiaalselt rakendatavad näiteks põllumajanduses, tootvas tööstuses, aga ka kinnisvaras.

Suuremahulise andmekorje valdkonnas on üheks arenenuimaks protokollide klassiks *LPWAN* (*Low Power Wide Area Network*, eesti keeles madala energiatarbega, kaugmaa võrk) tehnoloogiad. Need protokollid põhinevad raadiosidel ning on disainitud just eelkõige silmas pidades aspekte rohkete andmete kogumisel erinevatelt sensoritelt, mis ei asu üksteisele niivõrd lähedal, et nendega oleks võimalik suhelda üle kaabliprotokollide.

Üks võimalik konkreetne andmekorjeprobleem on just kinnisvarahalduses. Maailmas teadvustatakse aina enam õhukvaliteedi olulisust ja mõju inimeste tervisele ning seda mitte ainult välitingimustes vaid ka siseruumides. Eestis sätestab selleteemalisi normatiive ja määrusi Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, kes muuhulgas töötab hetkel välja Sisekliimamäärust. Määruse eesmärk on sätestada erinevad piirmäärad siseõhu kvaliteeti mõjutavatele teguritele, et määrata hoonete sisekliimaklassi.

Määrusest tulenevate parameetrite monitoorimine on traditsioonilisi vahendeid kasutades aja- ja ressursikulukas. Ühe alternatiivina tuleks kindlasti kaaluda asjade internetiga kaasnevate võimaluste ära kasutamist, et näiteks Terviseamet saaks hõlpsalt läbi viia siseõhu kvaliteedi mõõtmisi üldhariduskoolides.

Töö eesmärk on välja selgitada, kas *LPWAN* tehnoloogiad kasutades on võimalik teostada valimis Eesti üldhariduskoolides piiritletud määras siseõhu kvaliteedi mõõtmist.

2 METOODIKA

Töö eesmärgi saavutamiseks püstitas autor järgnevad ülesanded:

- Selgitada välja Eestis teenusena pakutavad *LPWAN* tehnoloogiad.
- Selgitada *LPWAN* tehnoloogiate olemust ja erinevusi.
- Disainida teoreetiline katse siseõhu kvaliteedi mõõtmiseks Eesti üldhariduskoolides.
- Testida *LPWAN* tehnoloogiate sobivust katse läbiviimiseks.
- Analüüsida katse tulemusi ja teha järeldused tehnoloogiate kasutatavusest 2019 aasta kevadel Eestis.

Edasine töö koosneb kolmest peatükist. Esimeses peatükis selgitatakse asjade interneti olemust ning sellega kaasnevaid võimalusi ja probleeme üldiselt 2019 aastal, selgitatakse täpsemalt läbiviidava katse olulisust ja väärtust. Teises osas antakse ülevaade Eestis kasutusel olevatest *LPWAN* tehnoloogiatest ja nende erinevustest teoreetiliste allikate põhjal. Kolmandas peatükis kujundatakse teoreetiline katse tehnoloogiate reaalseks kasutamiseks ning hinnatakse tehnoloogiate küpsust. Selleks kasutatakse allikatena seadmete, mis on töötavad valitud protokollidel, andmelehti.

3 PROBLEEMIPÜSTITUS

Aasta 2019 alguseks on digitaaltehnikad nii arenenud, et väga mitmete, eriti tööstus- ja kinnisvarasektoris tegutsevate, firmade strateegiates on vähemal või rohkemal määral välja toodud tähekkombinatsioon IoT (*Internet of Things*) - eesti keeles „asjade internet“ või „värkvõrk“. Samas, proovides seda terminit kuidagi üheselt defineerida, jäävad tihti ka valdkonna eksperdid hätta. Fraas “Seadmed on kõik ühendatud internetiga” ei anna päris täpselt edasi mõtet, kuidas on tehnika arenenud edasi olukorrast, kus internetti saab kasutada nii nutitelefoniga kui ka arvutiga. Asjade internet loob aluse erinevate eluvaldkondade tehnoloogiliseks edasiarenguks. [1]

Üks viis teemat vaada on, et tänapäevane asjade internet on erinevate sensor- ja täiturseadmete võimekus suhelda pilvepõhise andmebaasiga - edastada sinna andmeid ning võtta sealt vastu käsklusi. Taolisi seadmeid leiame uuematest tarkadest majadest ja ka näiteks tehasekompleksidest, kellel on olnud võimalus oma riistvara/masinaparki uuendada. Häälkäsklusega juhitud lambipirnid on paljudes kodudes igapäevane nähtus. Tehaste juhid hoiavad lisaks üldistele parameetritele, nagu tehase kogutoodang ja käive, silma peal ka töötajate ning tööpinkide efektiivsusel, vaohtudel (mis põhjustaksid tehase või tootmisliini seiskumise) ning hooldavad seadmeid vajaduspõhiselt (lisaks traditsioonilisele hooldusgraafikule). Kõike seda tänu nutikatele sensor- ja täiturseadmetele ning nendel tehnoloogiatel põhinevatele teenustele. [2] [3]

Suurimad valdkonda edasiviivad jõud on hetkel suur korporatsioonid, kes soovivad trendi ennustamise asemel seda ise luua. Lisaks väikesed (tihtipeale idu-) ettevõtted, kes töötavad välja eelkõige kindlale nišigrupile mõeldud lahendusi. Näiteks Google Home ning Eesti enda GlobalReader. Esimene on globaalse korporatsiooni divisjon, mis on mõeldud loomaks igale koduomanikule platvormi, mille abil on igaühel võimalik oma kodu nutikaks muuta - eeldusel et valitud riistvara integreerub nende platvormiga. GlobalReader see-eest on kindlale sihtrühmale suunatud lahendus, et lahendada selle grupi jaoks üks kindel ja konkreetne probleem. Üldise liikumisena on asjade internet kindlasti üle elanud „surmaoru“ (võimalusi kasutab juba kriitilise massi ületanud hulk inimesi ning suure tõenäosusega jätkab trendi kasvamist) ning leidnud ka esimesed entusiastlikud kasutajad, kuid laiemas üldsuses jõuavad hetkel siiski vaid piiratud võimalustega lahendused.

Suurim küsimus, mis valdkonna väljakujunemisel veel lahendamata on – milline või millised tehnoloogiad saavad olema kõige rohkem kasutatavad, et üles ehitada mastaapseid andmekorje-

ja seadmete juhtimise süsteeme ning mis on kasutatavad sõltumata geograafilisest asukohast, kliimast, andmepunktide rohkusest, lahendatava probleemi olemusest. Kujundina: „Milline tehnoloogia saab olema IoT USB standardiks?“. Küsimus iseenesest tundub olevat lihtne, lahendus on aga kõike muud. Selge on, et tõenäoliselt võidutseb valdkonnas mõni raadiosageduslik protokoll. Hetkel on võimalikke protokolle kokku aga enam kui 20. [4]

Erinevad andmekorje eesmärgid muutuvad olulisemaks pea igas valdkonnas, alustades põllumajandusest (näiteks mulla niiskuse monitoorimine) lõpetades hoonetega (näiteks arvestinäitude kauglugemine). Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium (MKM) oli juba aastal 2016 seisukohal, et on tarvis välja töötada sisekliimamäärus, mis sätestab täpsed normid hoonete siseõhu kvaliteedi ning selle mõõtmise meetodite kohta. Antud määrust küll veel vastu pole võetud (27.04.2019 seisuga), kuid 2018 aasta lõpus ütles MKM-i nõunik avalikul üritusel (MTÜ Cleantech Foresti korraldatav ürituste sari „*Cleantech Breeze*“) välja, et pärast hoonete energiatõhususe nõuetega lõpetamist 2019 aasta algul on see järgmine teema, millega kinnisvarasektoris tegelema hakatakse.

Antud määrus peaks endas muuhulgas sisaldama ka üheksat erinevat parameetrit sisekliima ja selle kvaliteedi kohta, mille piirmäärad sätestaksid konkreetse hoone sisekliima klassi, sarnaselt energiatõhususe klassile. [5] Justnimelt siit koorub välja võimalik üleskerkiv oluline andmekorjeprobleem, millega lähimate aastate jooksul on vaja tegeleda. Statistikaameti andmetel oli Eestis 2017 aasta seisuga ainuüksi eluruume kokku 706244. [6]

Selle probleemi varal uuesti asjade interneti maailma süvenedes on selge, et just siin välja arendatud tehnoloogiad peaksid olema põhilised, millega taolisi mõõtmisi teostatakse. Puhtalt eluruumide ca 700000 mõõtepunkti sisemäluga, siseõhu kvaliteeti mõõtvate loggeritega mõõtmine ning mõnes traditsioonilises andmetöötlustarkvaras analüüsimine on inimressursi kasutuslikult raiskamine.

Hoopiski mõistlikum on koguda andmeid otse serverisse või pilveteenusesse ning neid sealt automaatselt analüüsida ning visualiseerida. Kuna sisekliima mõõtmine oma olemuselt ei pea tarvilikult olema pidev tegevus (pideva all peab autor siinkohal silmas, et sisekliimat pole tarvilik mõõta terve hoone eluea vältel), seda võib teha mõne nädala kuni mõne kuu vältel. Oleks väga mugav kasutada seadmeid, mis on hõlpsasti mõõtekohta asetatavad ning ei vaja täiendavat paigaldamist ega konfigureerimist või varasemates mõõtepunktides sisemällu kogunenud andmete mujale transportimist.

Kuigi Eestis on internetiga varustus valdavalt hea [7], siis näiteks taolise projekti läbiviimiseks jääb puhtalt võrguühendusest väheks. Juba valmis ehitatud hoonetes hilisema montaaži tegemine on keeruline ja kulukas. Lisaks sellele on traditsioonilistel internetipõhistel tehnoloogiatel põhinevad sensor- ja täiturseadmed energiakulukad, mis tähendab, et neid patareitoitele toimima ehitada on keeruline.

Alternatiivsed tehnoloogiad võiksid olla *LPWAN* (inglise keeles *Low Power Wide Area Network*) raadioside andmeedastusprotokollid. Need protokollid on eraldi raadiosageduslike protokollide klass, mis põhineb andmete edastamisel pika maa taha (kus pikka maad mõõdetakse mitte meetrites vaid kilomeetrites). Tähendab, et süsteemi ülesseadmiseks pole andmetest huvitatud osapoolel tingimata tarvis enda andmeid koguvat baasjaama, nagu see oleks vajalik lühimaa raadioside protokollide puhul, vaid selleks on võimalik kasutada mõne teenusepakkuja baasjaamu. [2]

Taoliste tingimustele vastavad traadita andmeside protokollid, mida ka Eestis teenusena kasutada on võimalik, on järgnevad:

- NB-IoT (*Narrowband IoT*)
- LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*)
- SigFox

Tehnoloogiliselt sobivaid protokolle on loodud loomulikult rohkem, kuid need kolm on ainsad, millel on Eestis olemas ka teenusepakkuja(d), mis on oluline, kuna iga rakenduse ja projekti jaoks eraldi infrastruktuuri ülesseadmine on enamikel juhtudel kulukas. Lisaks jääb selle haldamiseks puudu ka kompetentsist. Need protokollid on kasutatavad sarnaselt mobiilsideteenusele – teenusepakkujaga on võimalik sõlmida teenusleping, kusjuures teenusepakkuja on kohustatud vastavalt lepingule tagama konkreetsetes piirkondades kokku lepitud määras levi kvaliteedi.

Käsitletavate tehnoloogiate kasutusvaldkonnad on reaalsuses palju laiemad, kui ainult siseõhu kvaliteedi monitoorimine. Näiteks toob ettevõtte Polysense Technologies, kelle peamine tegevusala on erinevate LoRa protokollipõhiste lahenduste arendamine ja turustamine, välja järgnevad võimalikud kasutusvaldkonnad: [3]

- Tööstusseadmete monitoorimine

- Targa linna lahendused
- Hoonete struktuurse tervise monitoorimine
- Täpne põllumajandus
- Targad elektrivõrgud
- Välise õhukvaliteedi monitoorimine

Need kasutusnäited on vaid ühe ettevõtte välja töötatud tehnoloogia ja lahenduste pärusmaa – seega saab eeldada, et tegelikkuses on võimalikke rakendusnäiteid kordades rohkem.

Lähtudes aga ühest konkreetsest ülesandest - näiteks CO₂ (võtame näiteks süsihappegaasi, kuna autori hinnangul seadet, mis on võimeline mõõtma kõiki üheksat sisekliimaklassi määramiseks olulist andmepunkti ühes tervikus veel välja töötatud pole, vähemalt sellises mahus, et autor saaks hinnata seadme varal *LPWAN* protokollide kasutatavust) mõõtmisest hoone sisekliimaklassi määramiseks – ei ole praegu üheselt selge, milline võimalikest kolmest protokollist kõige mõistlikum valida oleks. Igal tehnoloogial on oma spetsiifilised, protokollist tulenevad eripärad, iga protokolliga kasutamiseks on tarvis erinevaid seadmeid, iga teenusepakkuja hinnastuspoliitika on veidi erinev ning igal protokollil pole teenusena kasutatavat leviala igal pool Eestis.

Siit koorubki välja selle töö eesmärk - anda ülevaade raadioside protokollidest, nende eripäradest ning võimalustest viia läbi teoreetiline katse - koguda CO₂ andmeid kümnest suvaliselt valitud üldhariduskoolist Eestis. Katse selline määratlus just seetõttu, et taoliste mõõtmiste teostamine on ka tegelikkuses vajalik. Olulise aspektina käsitleb autor ka erinevate protokollidega kaasnevat kulusid: eelkõige seadmete ning teenuse hind.

Täpsustuseks, taoline teoreetiline disain on vaid raamistik, et testida erinevate protokollide võimekust ja kasutatavust. Pannes tehnoloogiad konkreetseesse konteksti saame hinnata nende reaalselt kasutatavust ka muudes valdkondades tänasel päeval Eestis.

4 LPWAN TRANSPORDIKIHTIDE ÜLEVAADE

Käesolevas peatükis analüüsitakse Eestis kasutusel olevaid *LPWAN* protokolle, eelkõige nende tehnoloogilistest aspektidest, tuua välja nende peamised tehnoloogilised erinevused, eelkõige aspektidest, mis on olulised läbiviidava katse kontekstis. Peatüki sisu on peamiselt pärit protokollide enda ametlikest spetsifikatsioonidest ning tehnoloogiaid teenusena pakkuvate ettevõtete blogidest ning uurimustest. Taoline võrdlev analüüs on oluline, et mõista tehnoloogiate olemuslikke erinevusi ning nende sobivust läbiviidavaks katseks.

4.1 Võrdlustabel

Tabel 4.1.1 Protokollide võrdlus

Võrreldav parameeter	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Sagedusala	Euroopas 868 MHz (mujal maailmas erinev)	Euroopas 868 MHz (mujal maailmas erinev)	Litsenseeritavad LTE sagedused (vastavalt juba kasutusel olevatele sagedusaladele)
Ribalaius	200 kHz	125 kHz või 250 kHz	200 kHz
Maksimaalne andmeedastuskiirus	100 bit/s	50 kbit/s	200 kbit/s
Maksimaalne sõnumite arv päevas	140	piiramatu (teoreetiliselt)	Piiramatu (teoreetiliselt)
Lubatud eetriaeg (suhteline aeg, mille jooksul üks seade eetrit hõivata tohib)	1 %	1 %	Piiramatu
Suurim sõnumi pikkus	12 baiti	243 baiti	1600 baiti
Standardit haldav asutus	Sigfox	LoRa-Alliance	3GPP
Hinnanguline (maksimaalne) kaugus baasjaama ja seadme vahel	10 km linnas 40 km linnast väljas	5 km linnas 20 km linnast väljas (olenevalt kasutatavast baasjaamast)	1 km linnas 10 km linnast väljas
Kiibi hulgihind	<2€	3-5€	>20€
Modulatsioon	BPSK	CSS	QPSK

Esmane mainimine	2010	2009	2016
Avalik(ud) teenusepakkuja(d) Eestis	Connected Baltics OÜ	Levikom, Levira	Telia, Elisa

[2]

4.2 NB-IoT

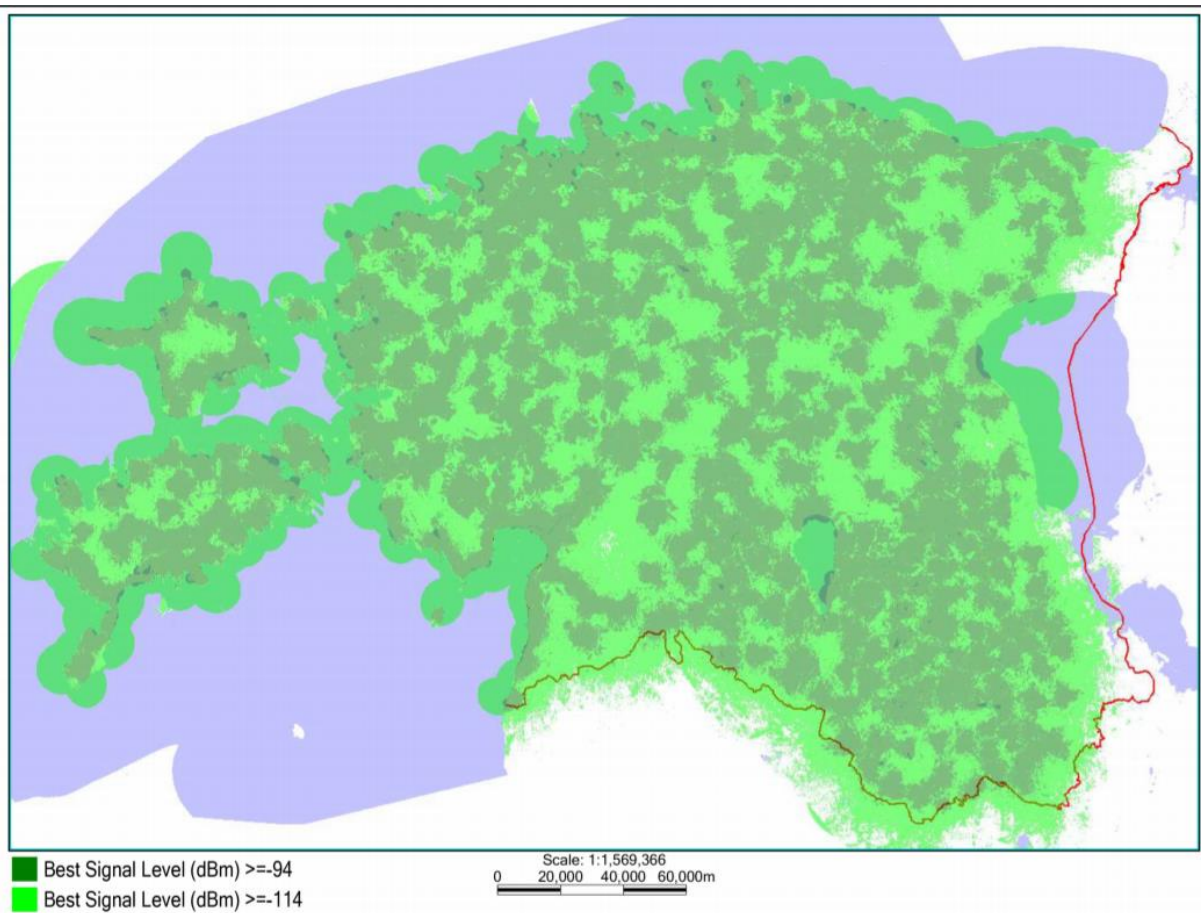
NB-IoT on 3GPP poolt välja töötatud ja standardiseeritud raadiosageduslik protokoll, mida on kirjanduses kutsutud ka 5G esimeseks sammuks. 3GPP eesmärk on esitada NB-IoT 5G standardisse sobivaks *LPWAN* protokolliks. NB-IoT arendamisel olid peamine kriteerium lihtsus, et hoida seadmete hind võimalikult madal ning saavutada võimalik pikk eluiga patareitoitel töötavatele seadmetele, seda siis eelkõige võrdluses mobiilside tehnoloogiatega, mitte teiste *LPWAN* tehnoloogiatega.

Peamine aspekt, mis eristab NB-IoT võrku SigFoxist ja LoRaWANist on sagedusala, millele võrgud üles ehitatakse. NB-IoT võrgud ehitatakse üles mobiilside sagedusalasse, mis ei ole vabalt kasutatav. See tähendab, et nende tugijaamad on võimalik paigaldada olemasolevate mobiilimastide juurde või külge. Sellest tulenevalt ongi paljud telekomiettevõtted hakanud NB-IoT infrastruktuuri üles seadma ning tõenäoliselt on ka nemad suurimad NB-IoT teenusepakkujad lähitulevikus. Lisaks sellele tasub välja tuua, et NB-IoT protokollis on teoreetiline kaugus seadmete ja baasjaama vahel kõige väiksem võrreldavatest protokollidest. See tähendab, et baasjaamu tuleb paigaldada oluliselt tihedamalt, et saavutada samaväärne levi kvaliteet.

Kuna tegemist pole avaliku sagedusalaga, siis on selles võrgus hõlpsam toime tulla müraga – selles sagedusalas ei ole kasutusel näiteks muud tüüpi tarbeelektronikat. Lisaks sellele, ei sea siin piiranguid avalikes sagedustes kehtivad töösükklite piirangud (SigFoxi ja LoRaWani puhul on Euroopas see lubatud töösükkel 1 % ajast, ehk 24 tunni jooksul võib seade eetris olla maksimaalselt 15,6 minutit).

Kuna aga NB-IoT on veel võrdlemisi uus tehnoloogia, pole veel mastaabisääst kiipide hinnas avaldunud – kiibid on teiste protokollidega võrreldes kuni 10 korda kallimad ning see avaldab seetõttu mõju ka lõpptoot hinnale. Lisaks sellele, kuigi pea iga arenenud riigi telekomiettevõtte teevad suuri pingutusi, et NB-IoT-d klientidele pakkuda, siis vähemalt Eestis pole NB-IoT kvaliteeti veel ühegi suuremahulise projekti raames testitud. [2]

Joonis 4.2.1 Telia NB-IoT leviala ilmekustav kaart



[8]

Kaardilt on selgelt näha, et levi on olemas valdavalt üle terve Eesti, välja arvatud konkreetsed alad Eesti idaosas.

4.3 SigFox

Sigfoxi tehnoloogia töötas välja samanimeline iduettevõtte Prantsusmaalt Toulouse-ist. Ettevõtte pakub üle maailma võimalust teistel ettevõtetel hakata konkreetses riigis või riikides võrguoperaatoriks. Tähendab, et emafirma ise ei paku teenust igal pool maailmas, seda teevad valitud partnerid. See annab emafirmale võimaluse keskenduda ainult tehnoloogia vastupidavuse tagamisele ja edasiarenduste välja töötamisele, teenusepakujate ülesanne on tagada teenuse kvaliteet riikides, kus teenust pakutakse.

Sigfoxi eristab teisest kahest peamiselt protokollil andmeedastuskiirus, andmepakettide suurus ja lubatud pakettide kogus ööpäevas ning seetõttu ka levikaugus. Võrreldes näiteks NB-IoT-ga võib Sigfoxi levikaugus olla kohati kuni 10 korda parem. See-eest kannatab aga andmete edastuskiirus

(kuni 100 bit/s) ning paketi suurus (kuni 12 baiti) - tähendab, et Sigfox sobib eelkõige edastama väikseid andmemahtusid – sellest lähtudes defineerib Sigfox ka protokollide peamise sihtrühma.

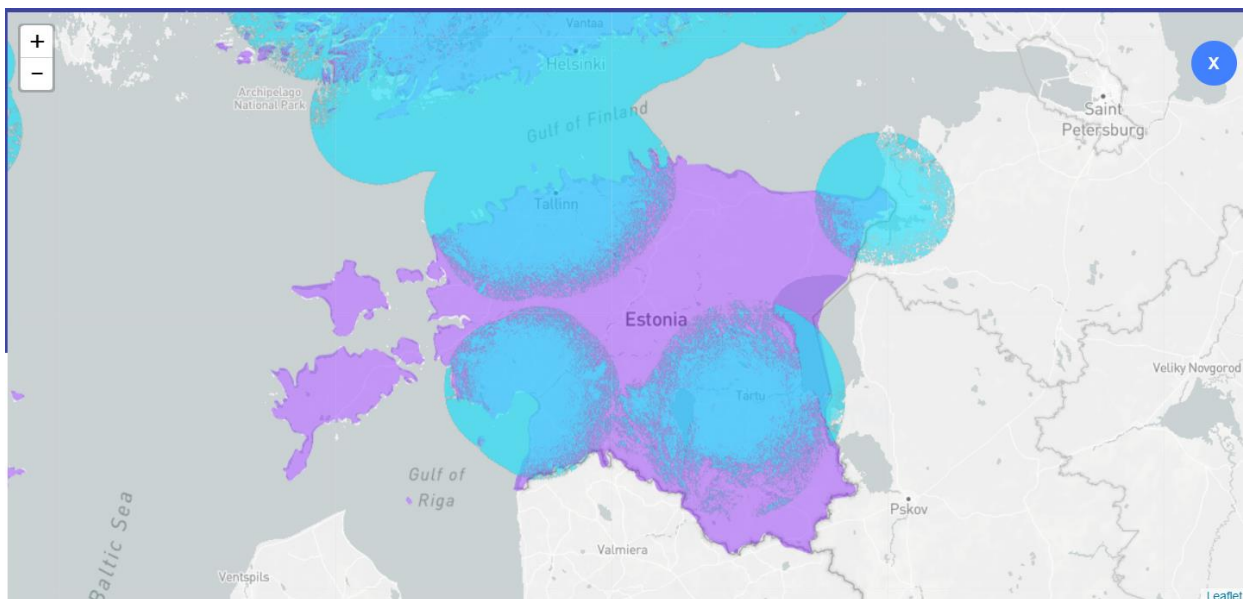
140 (maksimaalne sõnumite arv ööpäevas)*12=1,6 kB päevas; mis on oluliselt vähem kui näiteks üks keskmine laul mp3 formaadis. Küll aga on see piisav, et edastada infot näiteks siseõhu kvaliteeti mõõtvatelt anduritelt.

Sigfox töötab vabadel sagedustel ning Sigfoxi protokollist tulenevalt on võrgus olevatel seadmetel lubatud saata 24 h sees võrku kuni 140 sõnumit (1 sõnum = maksimaalselt 12 baiti) ning vastu võtta vaid 4 sõnumit (1 sõnum = 8 baiti). Sigfox on taolise struktuuri üles ehitanud, et tagada võimalikult hea levi, eetri puhtus ja pakettide vastupidavus mürale. Sellest tulenevalt on Sigfoxi võimalik kasutada eelkõige ainult andmekorjeks. 140 sõnumit ööpäevas on sobilik väga paljudeks andmekorje kasutusvõimalusteks, kaasaarvatud siin töös käsitletav katse. Küll aga, 4 käsklust ühes ööpäevas ei ole kaugeltki piisav enamike täiturseadmetega suhtlemiseks. Näiteks, 4 vastuvõetavat sõnumit tähendaks, et saame 24 tunni jooksul tuled põlema panna ja ära kustutada vaid 2 korda (2 korda paneme põlema ja 2 korda kustutame). Ka Sigfox ise näeb, et nelja käsklussõnumiga võimalikud kasutused on eelkõige sensorseadme konfiguratsiooni muutmine, mõõteskaala muutmine või lisaandmete küsimine. Kuna käsitletavas katses pole seadmete pidev ümberseadistamine oluline ning katse eesmärgiks on just andmete kogumine, siis pole pilvest seadmetele saadetavate sõnumite piirang oluline.

Sigfoxi tehnoloogiast on patenditud just võrk ja selle haldamine. Tähendab, et sobivaid kiipe saavad toota kõik, et aga võrguoperaator olla, tuleb selleks saada vastav luba Sigfoxi enda käest. [2] [9]

Sigfox monitorib oma leviala üle maailma väga täpselt, kõik teenusepakkujad peavad Sigfoxi kursis hoidma, kui palju konkreetsetest riikidest võrguga kaetud on.

Joonis 4.3.1 Sigfoxi levi Eestis illustreeriv kaart



[9]

Kaardilt on selgelt näha, et Eestis on kaetud ala peamiselt nelja suurema linna ümber (Tallinn, Tartu, Narva, Pärnu) – täpsemaks leviala hindamiseks on aga tarvis veel täpsemat tööriista, et hinnata levi kvaliteedi näiteks ühe konkreetse hoone läheduses ja sees.

4.4 LoRa

LoRa tehnoloogia, millel põhineb ka LoRaWANI suhtlusprotokoll, töötati algselt välja iduettevõtte nimega Cycleo poolt, mis 2012 aastal Semtechi poolt ära osteti. 2015 aastal standardiseeris LoRa Alliance (katuseorganisatsioon, mis reguleerib LoRa tehnoloogiale ehitatavad protokolle) esimest korda LoRa tehnoloogial põhineva LoRaWAN võrgustruktuuri ja suhtlusprotokolle, mis defineerib mil viisil seadmed võrgus suhtlema peavad.

LoRa tehnoloogia patenditud osa on kiipides - ainus ettevõtte, kellel on õigus kiipe toota või tehnoloogiat teistele litsentseerida on Semtech. See tähendab aga, et puuduvad piirangud LoRaWANI võrgu pakkumiseks teenusena, mis tähendab seda, et erinevalt Sigfoxist võib taolisi pakkujaid ühes riigis olla mitmeid – selline on olukord ka Eestis, kus teenust pakub praegu vähemalt kaks ettevõtet.

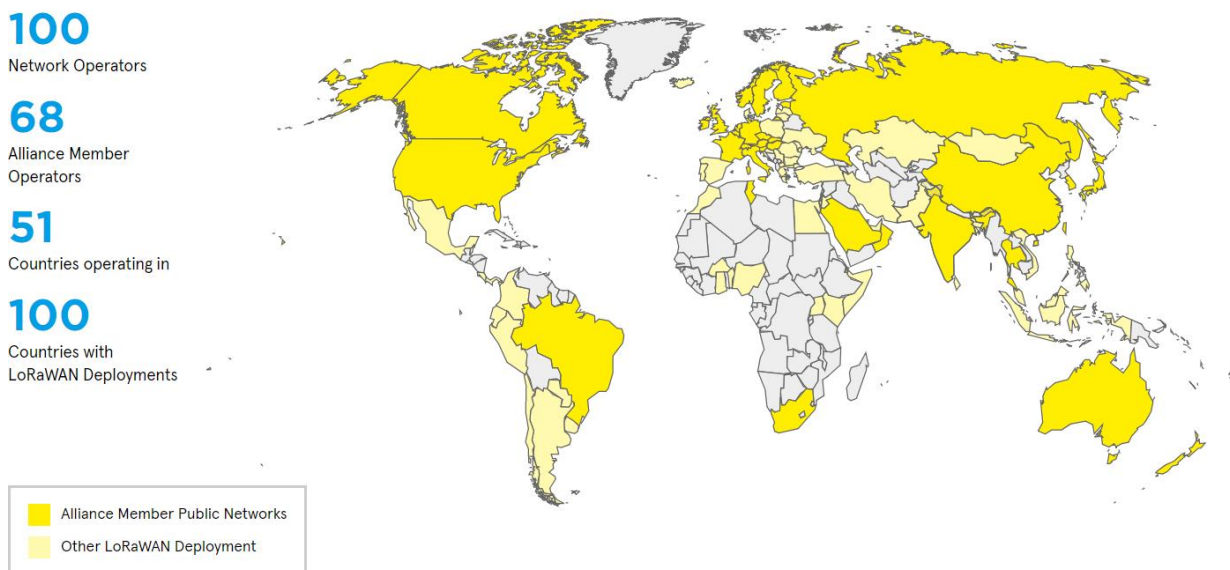
LoRaWANI eristab Sigfoxist peamiselt asjaolu, et LoRa võrku kasutades on võimalik seadmetelt vastu võtta ja ka välja saata teoreetiliselt piiramatut arv sõnumeid. Euroopas on LoRa sagedusalal lubatud 1% töötükk. Tähendab, et seade võib ühes ööpäevas eetrit hõivata 15,6 minutit (1% 24

tunnist). Täheandab, et kui sõnum on piisavalt lühike ning selle saatmiseks kulub väga vähe aega, siis on sõnumite arv teoreetiliselt piiramatut.

Tegelikkuses piiravad teenusepakkujate tugijaamad tihtipeale seadmete pakettide arvu, et tagada puhtam eeter ning vähem müra ning seeläbi ka andmete pilveteenusesse kohale jõudmine. Seega, kuigi protokoll ise ei sea piiranguid seadmete poolt saadetavatele sõnumitele, siis tihtipeale teevad seda kohalikud teenusepakkujad. Samamoodi, kui konkreetse seadme valmis arendanud ettevõtte teab, kui suuri pakette nende seade välja hakkab saatma, siis saavad nad ka ise seadme püsivaras defineerida, mis on minimaalne lubatud intervall, mille tagant seade pakette välja tohib saata.

Reaalsuses pole aga antud katse läbiviimiseks tarvis seadmetelt saada sadu või tuhandeid andmepunkte päevas. Sigfoxi puhul maksimaalselt saadetavad 140 sõnumit päevas on täiesti piisav ning kuna selge on, et LoRa lubab meil saata kindlasti vähemalt 140 sõnumit, siis on see katse läbiviimiseks kindlasti piisav. [10] [2]

4.4.1 LoRaWANI leviala maailma illustreeriv kaart



[11]

Täpsemaks leviala hindamiseks on tarvis ühendust võtta teenusepakkujatega.

4.5 LPWAN protokollide võrdlus kokkuvõtvalt

Protokollide üldisest tehnoloogilisest võrdlusest tuleb välja, et neis leidub mitmeid erinevusi: alustades andmeedastuskiirusest ning võimalike pakettide suurusest, lõpetades võimalike

vahemaadega seadmete ning baasjaamade vahel ning tehnoloogia arendusjärgu ning testitusega reaalses maailmas. Arvesse võttes kõikide eelpooltoodud protokollide omadusi ning teades katse algtingimusi, saab öelda, et kõik võrreldud protkollid sobivad katse läbiviimiseks/planeerimiseks. Lisaks tehnoloogilisele sobivusele, on oluline aspekt et protokollidele on leitavad seadmed, mis võimaldaksid katset läbi viia.

5 TEOREETILISE KATSE DISAIN

5.1 Katse määratlus

Transpordikihtide võimekuse ja kasutatavuse hindamiseks panen siin peatükis paika eeldused ja tingimused, et tulemused oleks võimalikult võrreldavad.

1. Katse on geograafiliselt piiritletud Eestiga, katseasukohad valin random.org abiga eesti.ee andmebaasist, kõikide Eesti üldhariduskoolide seast. Eesmärk on jälgendada näiteks pistelist Terviseameti kontrolli, et teha kindlaks, kas väikeses valimis koolidest on tagatud nõutav sisekliima.
2. Teoreetilise disaini peamine eesmärk on saavutada struktuur, mille läbi on võimalik andmeid koguda võimalikult lihtsalt. Andurite valikul on seega eelistatud patareil/akutoitel seadmed. Välisel toitel töötavad seadmete kasutamine muudaks seadmete paigaldamise oluliselt raskemaks ning paigalduskohas peab kindlasti olemas olema võrgutoide.
3. Mõõdetav parameeter on süsihappegaasi kontsentratsioon. Seda põhjusel, et tegemist pole kõige tavalisema mõõteparameetriga (mis oleks näiteks temperatuur või suhteline õhuniiskus), kuid selle mõõtmine koolides on sellele vaatamata oluline. Süsihappegaasi kontsentratsioon õhus on otseselt seotud inimeste tööalase produktiivsusega ja õpilaste produktiivsus on koolides kindlasti oluline.
4. Seade peab saama andmeid saata intervalliga mitte üle 30 minuti ning seejuures on oluline, et juhul, kui seade toimib patareil- või akutoitel, siis taolise intervalliga andmeid saates töötab seade vähemalt ühe kuu, mis on autori hinnangul minimaalne periood, et saada ülevaade valitud ruumide siseõhu kvaliteedi dünaamikast koolides.
5. Sobivad andurid peavad olema leitavad internetiotsingu tulemusel ning nende hind peab olema leitav või järgi küsitav tarnija või teenusepakkuja käest – katse eesmärk pole mitte analüüsida erinevatele tehnoloogiatele välja arendatud andureid vaid tehnoloogiate sobivust katse läbiviimiseks.
6. Infoedastus peab toimuma otse andurilt teenusepakkuja tugijaama - tähendab, et koolimajas peab kas juba olema konkreetse raadiovõrgu levi või teenusepakkuja peab olema valmis selle sinna (mõistliku aja jooksul) tagama. Tähendab, et hübriidlahendusi, kus näiteks perifeeriakontroller üle kaabliprotokolli andurilt andmeid kogub ja neid tugijaama edastab selle disaini koostamisel arvesse ei võta.
7. Andurite arv koolis pole oluline. Tähendab, et võimalusega, et andurite saadetavad paketid üksteist segama hakkavad ei arvesta.
8. Hoone materjali ja muid levi segavaid faktoreid arvesse ei võta – eeldame, et kui teenusepakkuja kinnitab levi olemasolu, siis hoones ka realselt on levi.

Märkusena: võttes arvesse kaht viimast punkti (punktid 8. ja 9.) saavad katse tulemused olla „võimalikult parimad“. Täheb, et katse reaalsel läbi viimisel oleksid tulemused tõenäoliselt halvemad.

5.2 Hindamiskriteeriumid

Siin peatükis toon välja aspektid, mille alusel erinevate raadioside protokollide sobivust võrreldakse.

1. Seadmete valik - kui mitme erineva seadmega on võimalik antud katset läbi viia. Seadmete valimi kogumiseks kasutan avalikke e-poode, taoliste seadmete tootjaid ning erinevate raadioside teenusepakkujaid. Taoline meetod pole ehk teaduslikult korrektne, kuid sobib katse raamidesse hästi, kuna on tõenäoline, et ka juba varem kätitledud Terviseameti näitel toimiksid nemad seadmeid otsides äärmiselt sarnaselt.
2. Seadmete hind ja kvaliteet - anduri mõõtetäpsus (juhul, kui tajuri tüüp on seadme andmelehest leitav), anduri eluiga (patarei- või akutoitel), seadme hind.
3. Andmete edastamissagedus - millised piirangud protokoll või seade ise andmete edastamiseks seab. Täheb, et kui andur saab andmeid edastada vaid kord tunnis, siis on sellest klassiruumide õhu kvaliteedi hindamisel vähe kasu.
4. Raadioside levi katsealustes koolides - kas avalike andmete ja teenusepakkujatega suheldes on teada, kas koolides on leviala või mitte.
5. Teenuse hind – ehk kui kulukas on ühte või teist teenust kasutada, kõik teenusepakkujad soovivad oma teenuse eest teenustasu. Eelkõige mängivad rolli pidevad, igakuised kulud, kuid arvestada tuleb ka teenuse kasutama hakkamisel võimalikult kaasnevaid kulusid.

5.3 Koolide valim

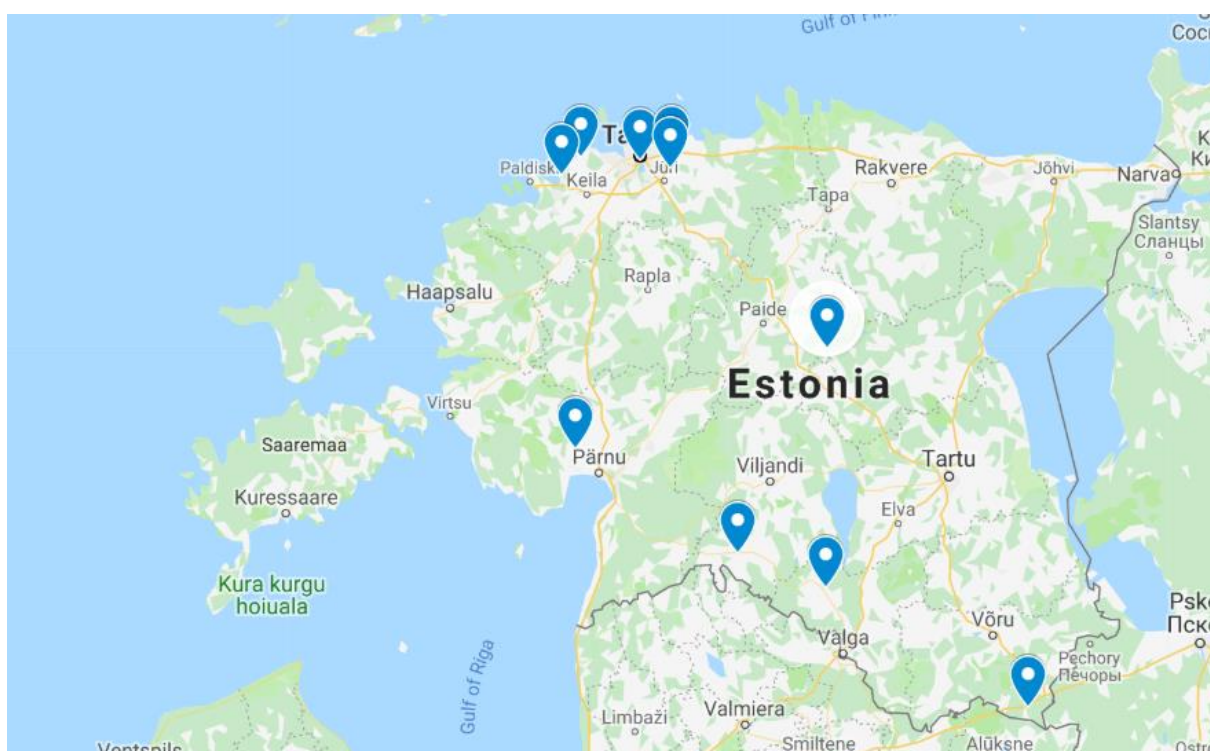
Et käsitleda võrreldavalt kolme protokolliga kättesaadavust kasutan ära eesti.ee veebilehelt leitavat nimekirja koolidest Eestis [12]. Kokku on Eestis 481 üldhariduskooli. Valisin neist välja 10 kasutades random.org veebikeskkonda. Kandsin nimekirja koolidest sisse random.org lehele ning lasin lehel need suvaliselt järjestada (Alammenüüs „Lists & More“ asuv funktsioon „List Randomizer“). Seejärel võtsin lehelt esimesed kümme kooli katse valimiks. Eesmärgiks leida võimalikult suvaliselt valik kooli, imiteerides näiteks võimalikku Terviseameti pistelist kontrolli.

Tabel 5.3.1 Valitud koolid nende aadressidega

Kool	Aadress
Tõrva gümnaasium	Puiestee 1, Tõrva, 68606 Valga maakond
Abja gümnaasium	Abja tee 15, Abja-Paluoja, 69402 Viljandi maakond

Nurme kool	72502, Päinurme, Päinurme, 72516 Järva maakond
Vääna-Jõesuu kool	Hiie tee 21, Vääna-Jõesuu, 76909 Harju maakond
Loo keskkool	Saha tee 7, Jõelähtme, 74201 Harju maakond
Misso keskkool	Misso, 65001 Võru maakond
Laulasmaa kool	Laulasmaa kool, Kloogaranna tee 20, Laulasmaa, 76702 Harju maakond
Lagedi kool	Lagedi, 75321 Harju County, Estonia
Jõõpre kool	88303, Jõõpre, Jõõpre, 88303 Pärnu maakond
Prantsuse lütseum	Hariduse 3, 10119 Tallinn

Joonis 5.3.1 Ülevaatlük kaart koolide asukohtadest



Kaardi koostamiseks on kasutatud *Google Maps*-i.

Kaardilt on selgelt näha, et viis kooli valimist asuvad Tallinnas ja selle vahetus ümbruses. Üks kool asub Pärnu lähedal ning ülejäänud neli kooli asuvad eemal suurematest Eesti linnadest.

5.4 Sobivad seadmed

Siin peatükis käsitletlen võimalikke andmete kogumiseks sobivaid seadmeid. Seadmete valim on koostatud ühe suurima IoT seadmete veebipoe market.thingpark.com tootevalikust lisaks palus autor sobivaid seadmeid soovitada ka käsitlusel olevate protokollide teenusepakkujatel Eestis. Veelkord tasub toonitada, et oluline pole mitte analüüsida millistele tehnoloogiatele on välja töötatud rohkem seadmeid, vaid saada üldine ülevaade sobivate seadmete rohkusest ning nende

hinnaerinevustest. Sobivad seadmed on toodud järgnevas nimekirjas koos seadmete üldise kirjeldusega, mis puudutab eelkõige sobivust katse läbiviimisel:

1. Connected AirWits CO2
2. Connit Air Quality Green Comfort CO2 EU868
3. AirQS-100NB
4. AirQS-100L
5. AirQS-100S
6. Elsys ERS-CO2
7. Polysense WxS 8800

5.4.1 Connected AirWits CO2

Connected AirWits CO2 on Eesti SigFoxi operaatori Connected Baltics OÜ emafirma Connected Baltics OY toodetav seade CO₂, temperatuuri ja õhuniiskuse mõõtmiseks. Seadet müüb Eestis Connected Baltics OÜ tükihinnaga 123€ + käibemaks. Seadme toiteallikaks on sisemised patareid (3*AA 3,6 V), seadme andmelehe järgi on seadme eluiga 5 aastat. Mõõdiste võrku saatmise intervall on minimaalselt 140 paketti päevas, maksimaalselt iga 30 minuti tagant. Taoline intervall on sobiv, et seadet kasutada katses. CO₂ mõõtesensori täpsus on +/- 50 ppm-i (*particles per million*, ehk üks miljondik, ehk promill, milles mõõdetakse süsihappegaasi kontsentratsiooni õhus), või 3% lugemist. Tähendab, et maksimaalne mõõteviga 500ppm-ise mõõdise korral on 50ppm-i (kuna 3% mõõtmistulemusest on väiksem kui 50ppm-i), 2000ppm-ise mõõdise korral on maksimaalne mõõteviga 60ppm-i. [13]

5.4.2 Connit Air Quality Green Comfort CO2 EU868

Connit Air Quality Green Comfort CO2 EU868 on prantsuse firma Connit toode, millel on tugi töötamiseks nii SigFox kui ka LoRa võrkudes. Seadet on võimalik tellida IoT seadmete veebipoest Thingpark, kus selle hinnaks (kogustel vähem kui 100 seadet, mis on umbes maksimaalseks seadmete koguseks katse läbiviimiseks) on 190€ + käibemaks. Seadme toiteallikaks on kas sisemised patareid (2*AA 3,6 V), või võrgutoide micro USB kaabliga. Seadet on võimalik konfigurida saatma mõõtmisi vahemikus 1-140 päevas (140 on maksimaalne lubatud pakettide hulk päevas). Seega saame Conniti seadmega andmeid korjata piisavalt tihedalt meie katse tarbeks. Veebis toodud info kohaselt on seadme tööaeg patareitoitel kuni 7 aastat, seda küll juhul, kui seade saadab välja vaid ühe mõõtmistulemuse päevas. Küll aga on turvaline eeldada, et kui seade saadab päevas välja 48 mõõtmistulemust, ehk iga 30 minuti järel, siis kestab ta patareitoitel vähemalt ühe

kuu. Kahjuks pole veebis toodud seadme tajureid, seega ei saa me hinnata selle seadme täpsust. Eraldi pole toodud ka infot seadme mõõtevea kohta. [14]

5.4.3 AirQS-100NB; AirQS-100L; AirQS-100S

AirQS-100 on ElkoEP tooteseeria. ElkoEP ise on Tšehhi seadmetootja. AirQS-100 seadmetel on 3 erinevat versiooni, mis ühilduvad kõigi meie käsitletud tehnoloogiatega, nii NB-IoT, LoRa kui ka Sigfoxiga (vastavalt AirQS-100NB, AirQS-100L, AirQS-100S). Seadmete hinnad on järgnevad:

- AirQS-100NB – 314.58€ + käibemaks
- AirQS-100S – 307.69€ + käibemaks
- AirQS-100L – 318.36€ + käibemaks

Seadmed on võimelised töötama vaid välise toiteallika abil. Sobiv pingeline on kõigil kolmel seadmel 12-240 volti, sobib nii vahelduv- kui ka alalisvool. Kuigi see tähendab, et seadmeid on võimalik paigaldada kasutades toiteallikana tavalist võrgutoidet, tähendab see siiski kaabeldus- ja paigaldustööd iga seadme kohta. Seadmed edastavad lugemid iga 10 minuti tagant, tähendab piisavalt tihedalt, et täita meie katse eesmärki. Seadme CO₂ mõõtetäpsus on +/- 5% lugemist, ehk siis 1000 ppm-i korral on viga +/- 50 ppm-i. Taolised parameetrid on sobivad, et seadet kasutada katses. [15]

5.4.4 Elsys ERS-CO2

ERS-CO2 on Rootsi ettevõtte Elsys toode, mis töötab LoRa protokollil. Sarnaselt teistele seadmetele mõõdab ERS-CO2 lisaks CO₂-le ka temperatuuri ning õhuniiskust. Seadmel on sisemine patareitoide (2*AA 3,6 V), ning 30 minutilise intervalliga sõnumeid saates on seadme tööaeg hinnanguliselt 2 aastat. Seadet müüb Eestis edasi Levira, hinnaga 200€ + km. Seadme mõõtetäpsus on +/- 3% lugemist, ehk siis 1000 ppm-i korral on seadme mõõtevea +/- 30 ppm-i. Need parameetrid on sobivad, et seadet kasutada katses. [16]

5.4.5 Polysense WxS 8800

Polysense on USA - Hiina ettevõtte, mis keskendub erinevate IoT lahenduste arendamisele ja müügile. Nende üheks tooteks on sarnaselt teistele vaadeldavatele seadmetele ja CO₂, temperatuuri ja niiskust mõõtev andur, mis töötab LoRa protokollil. Seadet on võimalik toita kas välise 5 V toiteploki, või elementidega (1-2*AA 3,6 V). Patareitoitel on seadme tööaeg kuni kümme aastat. Anduri täpsus on +/- 50 ppm-i, hinnaks 195€ + km. Kuigi seadme andmelehes pole välja toodud seadme saatmisintervalli ega võimalust seda konfigureerida, siis teades muude parameetrite sobivust arvestame seadet siiski sobivana katse läbi viimiseks. [3]

5.5 Leviala valitud koolides

5.5.1 Sigfox

Sigfoxi levi kvaliteedi hindamiseks on olemas veebipõhine tööriist. Tööriista on loonud Tšehhi Sigfoxi operaator Simplecell. Sisestades projekti aadressi on võimalik hinnata levi kvaliteeti konkreetsel aadressil välitingimustes, sisetingsimustes ning sügaval siseruumides (suhtelised, mitte absoluutsed võrdlusparameetrid). Järgnevas tabelis on toodud Sigfoxi levi kvaliteet katseks valitud koolides. Siseruumides õhukvaliteedi mõõtmiseks on oluline, et oleks vähemalt olemas levi siseruumides, hea andmete kvaliteedi ja järjepidavuse tagamiseks ning võimaluseks mõõta siseõhu kvaliteeti kusiganes punktist hoones peaks olema levi ka sügaval siseruumides. Tabelis toon välja kõik kolm levi kvaliteedi kvalifitseerivat tegurit.

Tabel 5.5.1 Sigfoxi levi koolides

Kool	Levi väljas	Levi siseruumides	Levi sügaval siseruumides
Tõrva gümnaasium	Keskpärase	Tõenäoliselt puudub	Tõenäoliselt puudub
Abja gümnaasium	Tõenäoliselt puudub	Tõenäoliselt puudub	Tõenäoliselt puudub
Nurme kool	Tõenäoliselt puudub	Tõenäoliselt puudub	Tõenäoliselt puudub
Vääna-Jõesuu kool	Suurepärase	Suurepärase	Hea
Loo keskkool	Suurepärase	Suurepärase	Suurepärase
Misso keskkool	Tõenäoliselt puudub	Tõenäoliselt puudub	Tõenäoliselt puudub
Laulasmaa kool	Suurepärase	Suurepärase	Suurepärase
Lagedi kool	Suurepärase	Suurepärase	Suurepärase
Jõõpre kool	Suurepärase	Hea	Keskpärase
Prantsuse lütseum	Suurepärase	Suurepärase	Suurepärase

[17]

Nagu tabelist selgelt näha on, puudub praegusel hetkel võimalus mõõtmisi Sigfoxi tehnoloogiaga läbi viia vähemalt neljas koolis: Tõrva ning Abja gümnaasiumis, Nurme koolis ning Misso keskkoolis. Jõõpre koolis on sügaval siseruumides levi kvaliteet keskpärase, tähendab, et tõenäoliselt tuleks mõõtmisteks valida akendega või välisseinaga piirnevad klassiruumid ning seadmeid paigaldades tuleb veenduda, et andmed ka andmebaasi jõuavad. Vääna-Jõesuu koolis on sügaval siseruumides levi hea, mis tähendab, et tõenäoliselt probleeme ei esineks, kuid sellegipoolest tuleks seadmeid paigaldades vähemalt pisteliselt nende andmete edastuskvaliteeti kontrollida. Täiesti kindlalt on Sigfoxi kasutades võimalik teostada mõõtmised neljas koolis kümnest: Laulasmaa ning Lagedi koolides, Loo keskkoolis ning Prantsuse lütseumis.

Need tulemused olid võrdlemisi prognoositavad - kõrvutades koolide paiknemise kaarti ning Sigfoxi üldist leviala kaarti võis ka sealt üldpildis välja lugeda, et kõikides valituks osutunud koolidest Sigfoxi

kasutades mõõtmise teostada ei saa. Sigfoxi operaator Eestis ei ole vastavalt otsesele nõudlusele valmis võrku laiendama, Connected Baltics on välja töötanud Eesti katmiseks kava ning seda otseselt mõjutada on keeruline. Ollakse valmis rentima baasjaama, et konkreetse projekti jaoks levi tagada, kuid selliselt toimimine ei sobi katse tingimustega. [18]

Sigfoxi hinnastusmudel põhineb seadmepõhisel teenustasul. Tähendab, iga seadme eest, mis võrku kasutab, tuleb tasuda aastast teenustasu. Erinevate pakettide hinnad on toodud järgnevas tabelis.

Tabel 5.5.2 Sigfoxi teenuse paketid

Pakett	Hind (aasta/kuu)	Pakettide kogus
Platinum	7€/0,58(3)€	140 sõnumit päevas (10 minutine intervall) + 4 vastuvõetavat sõnumit
Gold	6€/0,5€	100 sõnumit päevas (14,4 minutine intervall) + 2 vastuvõetavat sõnumit
Silver	5€/0,41(6)€	50 sõnumit päevas (28,8 minutine intervall) + 1 vastuvõetav sõnum
One	4€/0,(3)€	2 sõnumit (12 tunnine intervall) päevas

[18]

Katse eelduseks oli, et seade saadab andmeid vähemalt 30 minutilise intervalliga - tähendab, et katse läbiviimiseks on minimaalne igakuine kulu seadme kohta minimaalselt 0,42€. Lisaks tuleb arvestada, et seadmed, mille on tootnud Connected Baltics OÜ emafirma, sisaldavad müügihinnas ka viieaastast Sigfoxi teenustasu (Silver paketiga). Ehk siis, kasutased mõõtmiseks Connected AirWits CO2 seadmeid ei tule esimese viie aasta jooksul teenustasu lisaks maksta.

Connected Baltics küsib iga võrku lisatava seadme eest ühekordset liidestamistasu, mis on võrdne valitud paketi ühe aasta tasuga. Ehk, kui soovides võrku lisada seadme Gold paketti, siis tuleb lisaks igakuisele tasule arvestada ka ühekordse 6€ tasuga. Tasub ära märkida, et sarnaselt teenustasule ei tule seda tasu maksta seadmete puhul, mis on toodetud Connected Balticsi emafirma poolt.

5.5.2 NB-IoT

NB-IoT võrguteenust pakuvad Eestis kaks telekomiettevõtet: Telia ning Elisa. Võrgu kaetuse hindamiseks neil täpne tööriist puudub, seda kõige tõenäolisemalt põhjusel, et kuna nad omavahel turule sisenemisega konkureerivad, siis teades, kumb parajasti teisest „ees“ on annaks ühele või teisele märgatava konkurentsieelise.

Kaetuse hindamiseks võtsin ühendust mõlema ettevõtte IoT osakondadega. Telia hindab, et nemad suudavad pakkuda NB-IoT leviala 85-90 % Eestist. Kusjuures toovad nad välja, et kõige probleemsem on hetkel veel Venemaa piiriäärne ala, mis on välja loetav ka Telia veebilehelt

leitavast leviala iseloomustavast kaardist. Seda põhjusel, et mujal Eestis NB-IoT levi tagamiseks kasutatavad sagedused on Venemaal kasutusel muudeks otstarveteks. Seetõttu tuleb Ida-Eestis leida NB-IoT levi tagamiseks muud sagedused. Samade sageduste kasutamisel tekiks esmajärgus probleem andmete baasjaama kohalejõudmisega. Lisaks sellele tekiks nende sagedusalade kasutamisel probleem ka Venemaa poolt.

Elisa hindab, et nemad suudavad pakkuda NB-IoT levi igas Eesti maakonnas välja arvatud Ida-Virumaal – tõenäoliselt samadel põhjustel, mis Telia. Elisa on enda NB-IoT võrgu ehitanud üles LTE sagedusalasse, seega igal pool, kus levib LTE levib ka NB-IoT.

Kuna NB-IoT tehnoloogia kasutusele võtmine on Eestis veel väga algusjärgus, siis on mõlema teenust pakkuva ettevõtte hinnastuspoliitika ka väga erinev. Telia võrdsustab NB-IoT SIM kaardid kõikide M2M (inglise keeles *Machine to Machine*, masinalt masinale suhtlus) SIM kaartidega. Elisa see-eest hinnastab NB-IoT teenust antud hetkel veel projektipõhiselt, soovides sellega olla paidlikum ja pakkuda kliendile võimalikult sobivat hinda.

Telia M2M SIM kaartide baastasu on 0,99€ / kuus. Sellele lisandub andmemahu eest tasutav summa. Tasuda on võimalik kas iga kasutatud megabaidi eest 0,175€ / kuus, või kasutades 30 megabaidise mahupiiranguga paketti, fikseeritud 0,59€ / kuus. Kuna AirWS-100NB seadme kohta pole andmelehes toodud andmepaketi suurust, siis ei saa autor absoluutse täpsusega hinnata, kumb pakettidest oleks mõistlikum kasutada. Kuna aga isegi juhul, kui edastame andmeid väga tihedalt, siis on tõenäoliselt keeruline kulutada ühe seadmega kuus rohkem kui 30 MB andmemahu, seega võime Telia pakutava teenuse maksimaalseks kuluks lugeda 1,58€ / kuus iga seadme kohta juhul. [18]

Eeldusel, et AirQS-100NB paketi suurus on 2 korda suurem Connected AirWits CO2 paketist, ehk siis 12 baiti asemel 24 baiti ning seade edastab andmeid iga 10 minutilise intervalliga, siis edastab seade iga kuu jooksul:

$$24 * 6 * 24 * 30 = 103680 \text{ baiti} = 0,1 \text{ megabaiti andmeid.}$$

Seega, makstes teenuse eest iga kasutatud megabaidi eest, oleks teenuse hind ühe seadme kohta:

$$0,99€ + 0,1 \text{ MB} * 0,175€ = 0,99€ + 0,0175€ = 1,0075€ / \text{kuus.}$$

Seega katse hindamisel arvestame Telia poolt pakutava teenuse hinnaskaalaks 1€ - 1,58€ / kuus iga seadme kohta.

Kuigi Elisa hinnad NB-IoT teenusele ei ole veebist vabalt kättesaadavad, siis antud projektile pakuti välja hinnakiri, kus iga SIM kaardi (ehk iga seadme) eest küsitakse ühekordne liitumistasu 0,5€ + km ning sellele lisandub igakuine kaardipõhine teenustasu 0,8€ + km (0,96€) kuus, kus iga SIM kaardi andmemahu piiranguks on 25 megabaiti kuus, mis juba varasemat arvutuskäiku arvesse võttes on igal juhul piisav. [18]

Üldiselt on mõlema NB-IoT teenust pakkuva ettevõtte hinnastus väga sarnane, hinnastatakse iga teenust kasutava seadme põhised, kuid teadaolevatel andmetel pakub hetkel Elisa teenust ca 5 euro senti odavamalt, kuid kuna nemad soovivad ka iga SIM kaardi pealt liitumistasu, siis tasub odavam teenus ennast ära umbes 11 kuuga.

Kuna ükski valitud koolidest ei paikne piirkondades, kus puudub levi nii Elisal kui Telial, siis võib hinnata, et NB-IoT kasutades oleks võimalik teostada katse ettenähtud tingimustel kõikides kümnes koolis edukalt.

5.5.3 LoRa

LoRa sideteenust pakuvad Eestis kaks ettevõtet: Levira AS ning Levikom Eesti OÜ. Sarnaselt NB-IoT-le puudub LoRa leviala hindamiseks tööriist. Katseandmete saamiseks võtsin ühendust mõlema ettevõtte esindajatega, et saada hinnang levi kvaliteedist valitud koolides.

Levira kinnitab, et nemad suudavad levi pakkuda koheselt (27.04.19 seisuga) ainult Tallinnas. Kuigi ollakse valmis operatiivselt leviala laiendama, siis oma kuludega teevad nad seda vaid juhul, kui ettenähtud projektis on planeeritud mõõtepunkte enam kui 100. Kuna aga igast koolist saja erineva seadmega siseõhu kvaliteeti mõõta on mõttetult kulukas (just seadme hinda arvesse võttes, lisaks ei ole tõenäoliselt kõigis kümnes koolis terve hoone peale sadat klassiruumi), siis see variant ei ole kindlasti mõistlik. Kui projekti suurus jääb alla 100 punkti (mida ta käsitletaval korral jääb), tuleks projekti läbiviimisel investeerida baasjaama ja paigaldusse, kusjuures baasjaama enda hind on 400€ + km. [18] Taoliselt katse läbiviimine läheb aga sätestatud katsetingimustega vastuollu ning seda arvestada ei saa. Seega, kuna Levira kinnitab, et levi on olemas ainult Tallinnas, siis täie kindlusega on võimalik katse läbi viia vaid Prantsuse lütseumis. Neljas koolis Tallinna lähedal on tõenäoline, et levi kvaliteet pole suurepärane.

Levira hinnastuspoliitika on sarnaselt Sigfoxi ja NB-IoT teenusepakujatele punktipõhine, maksta tuleb igakuist teenustasu iga seadme eest, mis võrku kasutab. Teenuse hind varieerub vahemikus 0,5€ + km kuus kuni 2€ + km kuus, sõltuvalt andmete saatmistihedusest, kus 0,5€ + km kuus tuleb maksta seadme eest, mis kasutab võrku korra iga 12 tunni jooksul ning 2€ + km seadme eest, mis kasutab võrku tihedamini kui kord tunnis. Kuna meie eesmärk on koguda üks andmepunkt vähemalt kord poole tunni jooksul, siis tuleks Levira pakutavat LoRa võrku kasutades arvestada teenuse hinnaga 2,4€ / seade / kuus. [18]

Levikom hindab, et suudavad koheselt pakkuda levi Tallinnas, selle ümbruses ning suuremates Eesti linnades. Lisaks sellele kinnitavad, et nad on valmis võrku tihendama 2 nädalase etteteatamisajaga, kui selleks peaks vajadus tekkima. Kuna katse eeldusena on määratletud, et teenusepakkuja peab suutma kas levi koheselt tagama või siis selle võimekuse looma mõistliku aja vältel, siis hindame kahte nädalat kindlasti mõistlikuks ajaks. Selle hinnangu põhjal võib kindlalt öelda, et vajalikud mõõtmised saaks Levikomi teenust kasutades kohe läbi viia viies Tallinas ja selle ümbruses asuvates hoones ning Levikom on valmis levi laiendamise ülejäänud viie kooli juurde (mis ei asu üheski teises Eesti suuremas linnas) kahe nädala jooksul.

Ka Levikomi hinnastuspoliitika on punktipõhine. Teenuse kuutasu jääb vahemikku 0,2€ + km kuni 1€ + km kuus, kusjuures soodsaim pakett tagab andmete edastamise võrku korra nädalas, kalleima paketi tohib seade saata võrku kuni 96 sõnumit päevas. Kuna eesmärgiks on koguda andmeid minimaalselt intervalliga 30 minutit, siis sobiks kasutada ka paketti hinnaga 0,7€ + km – selle paketi saata andmeid 48 korda päevas, ehk täpselt 30 minutilise intervalliga. Lisaks igakuisele teenustasule tuleb Levikomi teenuse kasutamiseks registreerida rakendus, mille hind on olemata andmepunktide rohkusest 99€ + km. [18]

5.6 Analüüs

Siin peatükis hinnatakse kogutud andmete põhjal protokollide kasutatavust, seda eelkõige kolmest aspektist: seadmed ja nende kvaliteet, leviala ning hind. Eesmärgiks leida kõige sobivam protokoll katse läbiviimiseks praegusel hetkel.

5.6.1 Seadmed

Katse läbiviimiseks on oluline leida sobivad seadmed vastavalt määratletud hindamiskriteeriumitele. Siin peatükis leiab autor parima seadme katse läbi viimiseks ning hindab

üldist seadmete valikut. Järgnevas tabelis on toodud koondinfo seadmete ning katse edukuse jaoks oluliste parameetrite kohta.

Tabel 5.6.1 Seadmete võrdlus

Seade	Protokoll(id)	Hind (koos käibemaksuga)	Eluiga (sõnumite saatmistihedus maksimaalselt 30 minutit)	Mõõtetäpsus (1000 ppm-i juures)
Connected Airwits CO2	Sigfox	147,6€	5 aastat	50 ppm
Connit Air Quality Green Comfort CO2 EU868	SigFox/LoRa	228€	>1 kuu	Teadmata
AirQS-100NB	NB-IoT	377,5€	Puudub patareitoite võimalus	50 ppm
AirQS-100L	LoRa	369,23€	Puudub patareitoite võimalus	50 ppm
AirQS-100S	Sigfox	382,03€	Puudub patareitoite võimalus	50 ppm
Elsys ERS-CO2	LoRa	240€	2 aastat	30 ppm
Polysense WxS 8800	LoRa	234€	Teadmata	50ppm

Selgelt on näha, et hinnates seadmete hinna-kvaliteedi suhet, siis on parim võimalik seade katse läbiviimiseks Connected Airwits CO₂, kuna on märgatavat soodsama hinnaga ülejäänud võimalikest seadetest ning ka seadme eluiga on teistest märgatavalt parem. Vaid mõõtetäpsuses jääb seade veidi alla Elsys ERS-CO₂ seadmele. Lähtudes aga piiritletud teoreetilisest katsest, siis pole veel teada, kas tulevane sisekliima määrus seab piirangud ka kasutatavate seadmete täpsusele.

Märkimisväärne on, et katsetingimusteks täielikult sobivat NB-IoT seadet leida polnud võimalik. AirQS-100NB on küll konkurentsivõimelise mõõtetäpsusega, kuid seade ei ole võimeline töötama patareitoitel. Lisaks sellele on kogu AirQS-100 tooteseeria ülejäänud seadmetest märgatavalt kallim.

Välja tasub tuua ka Connit Air Quality Green Comfort CO₂ EU868 seadme võimekus töötada nii LoRa kui ka Sigfox protokollidel. See annab teoreetiliselt võimaluse olukordades, kui Sigfoxi levi on parem kasutada teda Sigfoxi võrgus ja vastupidi kui LoRa levi on parem.

Kokkuvõtlikult, hõlpsasti on võimalik leida sobilikke seadmeid katse läbiviimiseks, mis töötavad LoRa ja Sigfoxi protokollil. Kahjuks ei õnnestunud autoril leida ühtegi katsetingimustele vastavat CO2 seadet, mis töötaks NB-IoT protokollil.

5.6.2 Leviala

Katse edukuse hindamiseks on oluline hinnata, milline protokoll on parim levi kvaliteedi aspektist. Selles peatükis analüüsitakse teenuste kvaliteeti – milline protokoll oleks parim katse läbi viimiseks, milliseid protokolle üldse on võimalik kasutada katse teostamiseks. Tabelis on toodud teenusepakkujate võimekus pakkuda teenust katses valitud koolides.

Tabel 5.6.2 Protokollide kasutusvõimalikkus koolides

Teenusepakkuja	Koolide arv, kus teenust koheselt pakkuda suudetaks	Koolide arv, kus teenus ollakse valmis mõistliku ajaga tagama	Koolide arv, kus teenuse kvaliteet võib olla häiritud	Koolide arv, kus teenuse pakkumiseks võimekus puudub
Connected Baltics	4	0	2	4
Telia	10	0	0	0
Elisa	10	0	0	0
Levira	1	0	4	5
Levikom	5	5	0	0

Tabelist tuleb selgelt välja, et kõige parem teenuse kvaliteet oleks kindlasti NB-IoT protokoll kasutades, kuna nii Telia kui ka Elisa andmetel oleks mõlemad ettevõtted valmis koheselt pakkuma levi kõigis kümnes koolis, mis katse läbiviimiseks valiti.

LoRa leviala Eestis on praegusel hetkel kolmest protokollist tõenäoliselt kõige kehvem. Küll aga on Levikomi andmetel nemad võimelised koheselt pakkuma teenust viies koolis, lisaks on nad mõistliku aja jooksul valmis levi tagama ka ülejäänud viiete kooli. Levira pakutav teenus on ilmselgelt ülejäänud neljast teenusepakkujast kõige kehvem.

Connected Balticsi pakutav Sigfoxi teenus on kindlasti kasutatav neljas koolis, teenuse kvaliteet on veebipõhiseid tööriistu kasutades hinnanguliselt kaheldav kahes koolis. On aga selge, et Sigfox on ainus protokoll, mida ei saa kasutada kõigis katses valituks osutunud koolides katse läbi viimiseks – neljas koolis lihtsalt puudub levi ning pole selge, kuna see sinna tekkida võiks.

Kokkuvõtlikult, puhtalt teenuse kvaliteeti hinnates oleks NB-IoT kindlasti kõige kindlam valik katse läbi viimiseks, kuna kaks erinevat teenusepakkujat on valmis levi pakkuma kõigis kümnes koolis. LoRa ja Sigfoxi teenuse kvaliteet ei ole sellega kindlasti võrreldav.

5.6.3 Teenuse hind

Katse läbiviimiseks ja majandusliku mõistlikkuse hindamiseks on oluline võrrelda erinevate teenuste hindasid. Selles peatükis leitakse kõige paremini hinnastatud protokoll ja anda üldine ülevaade teenusepakkujate hinnapoliitikate erinevusele. Tabelis on toodud teenuse hindade võrdlus teenusepakkujate vahel.

Tabel 5.6.3 Teenuste hinnad

Teenusepakkuja	Liitumistasu (€) + km	Kuutasu (€) + km
Connected Baltics	5	0,42
Telia	0	1,008
Elisa	0,5	0,96
Levira	0	2
Levikom	99*	0,7

*Tasu on taoline olenemata seadmete arvust.

Tabelist on selgelt näha, et konkurentsilt parima hinnaga on teenust võimeline pakkuma Connected Baltics, vaatamata kõrgele liitumistasule tasub nende teenuse hind ennast ära vähem kui ühe aastaga. Samuti tasub ära märkida, et kasutades Connected Balticsi emafirma poolt toodetud seadmeid, siis on nii liitumistasu kui ka kuutasu viieks aastaks seadme hinna sisse arvestatud.

NB-IoT teenusepakkujad Telia ja Elisa on hinnastuspoliitika koha pealt suhteliselt sarnases hinnaskaalas, kus seadme põhine kuutasu on lähedal ühele eurole kuus. Autor leiab, et NB-IoT teenusepakkuja valikul peaks eelkõige lähtuma muu teenuse ja levi kvaliteedist kui marginaalsetest hinnaerinevustest. Selle hindamine subjektiivsel viisil (ilma realselt teenust tarbimata) on aga keeruline. Mainida tasub ka, et kuna NB-IoT on SIM kaardi põhine tehnoloogia (eeldusel, et seadmetele pole SIM kaarte juba sisse ehitatud), siis on võimalik SIM kaarte rikki läinud seadmetest uuesti kasutada ning liitumistasu uuesti maksta pole tarvis.

LoRa teenusepakkujate Levira ning Levikomi hinnastuspoliitika on küllaltki erinev. Kuutasu erinevus sobivatel pakettidel on enam kui kahekordne. Erinev on aga liitumistasu, kui Levira võrgu kasutamise eest liitumistasu üldse ei küsi, siis Levikomi puhul on see fikseeritud summa. Kuna aga teenustasu on Levikomil niivõrd palju madalam, siis tasub kõrge liitumistasu ennast üsna kiiresti ära.

5.6.4 Analüüsi kokkuvõte

Kogutud andmete põhjal on võimalik üheselt järeldada, et võttes arvesse teenusepakkujate hinnangulist levi kvaliteeti, siis oleks ainult selle põhjal otsustades kõige õigem valida NB-IoT protokoll raamistatud katse läbi viimiseks. Kuna aga NB-IoT tehnoloogia ise on teistest niivõrd palju noorem, seadmete tootmine ei ole veel mastaabiefekti saavutanud ning ka seadmete valik on kesine, siis antud hetkel on selle kasutamine äärmiselt raskendatud. Tuleb teha märkimisväärseid kompromisse seadmete hinnas – ainsa saadaoleva NB-IoT protokolliga toetava seadme hind on rohkem kui 200€ kõrgem kui soodsaim valimis esindatud seade. Lisaks sellele, ei vasta NB-IoT toetav seade katses sätestatud nõudmistele – seade pole võimeline töötama patareitoitel.

Hinnates sobivaimat protokolliga seadmete valiku ja teenuse hinna aspektist on vaieldamatult parim valik Sigfoxi protokoll. Soodsaim valimis esinenud Sigfoxi toetav seade on oluliselt soodsam kui hinnapoolsest järgmine seade. Lisaks sellele on Sigfoxi teenuse hind rohkem kui kaks korda soodsam kui hinna poolsest järgmise teenusepakkuja hinnastus. Peamine probleem Sigfoxi kasutamisel on, et teenust ei ole võimalik koheselt tarbida neljas koolis kümnest koheselt ning puudub ka võimalus katsetingimustele vastavalt, mõistliku aja jooksul nendesse koolidesse levi hankida.

Võttes arvesse neid aspekte, on LoRa ainus, mis vastavalt teadaolevatele andmetele on sobiv protokoll katse läbiviimiseks. LoRa protokolliga toetavaid seadmeid on võimalik turult leida kõige suuremas mahus, nende eluiga patareitoitel on vastav katsetingimustele, kõikides koolides kas juba on või on sinna mõistliku aja jooksul võimalik tekitada leviala. Peamine miinus LoRa võrgu kasutamisel on teenuse hind, mis on suurusjärgus 4 korda suurem Sigfoxi teenuse hinnast ning 2 korda suurem NB-IoT teenuse hinnast.

Autori hinnangul oleks praegusel hetkel kõige mõistlikum katse läbiviimiseks kasutada nii LoRa kui ka Sigfoxi protokolle – just juhul, kui viia katse läbi paralleelselt kümnes koolis korraga. Sigfoxi teenus on lihtsalt niivõrd palju soodsam, LoRa tuleks kasutada siis olukordades, kus Sigfoxi levi puudub. Sellest tulenevalt oleks mõistlik seade katse läbiviimiseks Conit Air Quality Green Comfort CO2 EU868, mis on küll kallim kui Connected Airwits CO2, kuid on võimeline töötama nii LoRa kui ka Sigfoxi protokollidel, võimaldades seeläbi optimeerida teenustasule kuluvat raha.

Märkida tasub ka, et kuigi Levikomi sõnad on nad valmis mõistliku aja jooksul vastavalt kliendi soovidele tagama levi kohtades, kus nad seda koheselt pakkuda ei suuda, siis taoliste teenusepakkujate üldine suundumus on, et katses määratletud projektid on nende jaoks väikese suurusega. Täheleb, et kuigi üldise suhtluse põhjal väljendas Levikom võimekust vastavalt kliendi

soovidele leviala laiendada, siis võib juhtuda, et saades teada projekti suurused (suurusjärgus 10-20 seadet ühes koolis), taganevad nad oma algsest lubadusest.

Kuigi praegustel katse tingimustel selgus, et NB-IoT kasutamine katse läbiviimiseks pole võimalik, siis on ilmselge, et lähitulevikus laieneb oluliselt NB-IoT seadmete valik ning avaneb võimalus ka näiteks sellise projekti teostamiseks NB-IoT protokolliga kasutades. Oluline on täheldada, et leviala ulatus on juba praegusel hetkel NB-IoT teenusepakujate hinnangul oluliselt parem kui teisel kahel vaatlusalusel protokollil.

6 KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärk oli uurida LPWAN tehnoloogiate kasutamise võimalikkust Eestis 2019 aasta kevadel konkreetse ja piiritletud teoreetilise katse näitel. Katse sisuks oli teoreetiliselt läbi mängida projekt, kus on tarvis mõõta siseõhu kvaliteeti kümnes Eesti üldhariduskoolis ning anda hinnang, kas ja milliste protokollidega seda teha oleks võimalik.

Töö esimene peatükk seletab pikemalt lahti asjade interneti teemavaldkonna, et anda töö edasisele sisule täpsem kontekst. Tuginedes teoreetilistele allikatele on töö esimene peatükk ülevaatlik, et selgitada töö olulisust. Muuhulgas seletab töö esimene osa lahti, miks on töö kolmandas osas läbi viidud katse piiritletud just selliselt.

Töö teises peatükis analüüsiti tehnoloogiaid nende tehnilistest aspektidest, kus on välja toodud nende üldine tööpõhimõte ning peamised sarnasused ja erinevused just disainitud katse kontekstis. Tehnoloogiaid analüüsid selgus, et puhtalt teoreetilisest aspektist sobiksid kõik tehnoloogiad disainitud katse läbi viimiseks.

Töö kolmandas osas läbi viidud katses valiti suvaliselt 10 üldhariduskooli Eestis, kus oleks tarvis läbi viia siseõhu kvaliteedi mõõtmine. Lisaks sellele viidi läbi primitiivne uuring katseks sobivate seadmete kättesaadavusest, kvaliteedist ja hinnast. Teenusepakkujatega suheldes tehti kindlaks, mitmes koolis konkreetsete tehnoloogiatega katse oleks võimalik läbi viia, kuidas erinevad erinevate protokollide teenuste hinnad ning kas katse läbiviimiseks leidub turul sobivaid seadmeid. Katse peamiste tulemustena võib välja tuua, et kõige kvaliteetselt suudetakse Eestis pakkuda NB-IoT teenust, kuid seda protokolliga toetavaid seadmeid pole turul veel piisavalt, et viia läbi katse vastavalt sätestatud katsetingimustele. Madalaima hinnaga teenus ja seadmed on üles ehitatud Sigfoxi protokollile, kuid kahjuks pole võimalik 2019 aasta kevadel kõigis kümnes valimisse sattunud koolis Sigfoxi kasutades katset läbi viia, kuna nelja koolini kümnest levi lihtsalt ei ulatu. Sellest tulenevalt on kõige sobivam protokoll LoRa, kuna seda protokolliga toetavaid seadmeid on turul piisavalt ning ka kõikides valimisse sattunud koolides on võimalik LoRa võrku teenusena tarbida kas koheselt või teenusepakkujaga suheldes mõistliku aja jooksul.

Tasub välja tuua, et juhul, kui NB-IoT protokolliga toetavate seadmete kogus turul lähimatel aastatel kasvab, siis tõenäoliselt on lähiajal mõistlik protokoll taolise katse läbiviimiseks hoopis NB-IoT. Samuti on oluline märkida, et kui koolide valim oleks sattunud eksklusiivselt suurtesse linnadesse

või nende lähedusse (Tallinn, Tartu, Pärnu, Narva), siis oleks kindlasti mõistlik kasutada katse läbi viimiseks Sigfoxi protokoll, kuna nii teenuse hind kui ka sobiliku seadme hind on Sigfoxi protokollides teistest oluliselt madalam.

Autori hinnangul annab töö tervikuna adekvaatse hinnangu LPWAN tehnoloogiatest üleüldiselt, samuti nende kasutusvõimalikkusest Eestis 2019 aasta algul. Töö põhjal on võimalik teha järeldusi nii katses välja toodud kasutusnäites kui ka muudes valdkondades. Tähele tasub panna, et kuigi töö annab adekvaatse ülevaate tehnoloogiatest ja teenustest 2019 aasta kevadel, siis kui valdkond jätkab viimastel aastatel hoogu kogunud kasvujoones, siis on tõenäoline, et katse tulemused oleks oluliselt erinevad, kui katse läbi viia näiteks aasta aega hiljem.

7 SUMMARY

The goal of the paper is to investigate the usability of LPWAN technologies in Estonia during spring 2019 by example of a specific theoretical experiment. The goal of the experiment is to measure indoor air quality in 10 schools in Estonia using LPWAN technologies.

The first part of the paper explains IoT in detail in order to provide context to the rest of the paper. Sources for this are mainly theoretical. Furthermore, the first part of the paper explains why such experiment was chosen.

The second part of the paper analyses the protocols from their technological side. It provides detail into the main working principles, similarities and differences of the technologies, especially in the context of the experiment. While looking into the technological aspects of the protocols, it was found that all three technologies would be fit for the experiment on paper.

The third part of the paper goes through the devised experiment. 10 random schools in Estonia are selected to be included in the measurements. In addition to that, a basic research of suitable devices was conducted and their availability, quality and price is analysed. The availability of the three selected technologies in the schools is assessed based on correspondence with service providers. Furthermore, prices of the services were acquired from the providers.

The main results of the experiments are, that the best quality of service available currently is provided for NB-IoT. However, there are still very few of suitable devices on the market that support NB-IoT. Sigfox technology boasts with the best priced service and devices, however, the technology is not available in all of the schools. At least 4 schools out of 10 don't have a Sigfox signal. Therefore, the only readily available technology is LoRa. There is an abundance of devices available that support LoRa technology and one service provider is able to provide connectivity in all the schools already, or is ready to provide it during a reasonable time.

It is important to mention, that should the availability of NB-IoT devices improve in the upcoming years, then it seems likely, that in the near future NB-IoT would be the reasonable technology to use for the devised experiment. Also, if the sample of schools would have been solely around the 4 larger cities (Tallin, Tartu, Narva, Pärnu), then the availability of Sigfox would have been significantly better and therefore, using Sigfox would have been much more cost efficient.

The author believes, that the paper gives an adequate overview of the usability of LPWAN technologies in Estonia in spring 2019. The paper gives insights what kind of protocols to use in the experiment devices but within other usecases as well. It is worth noting, that however the paper is relevant in spring 2019, then as the field of IoT is developing rapidly, then the outcome of the experiment will probably be much different if the experiment were to be conducted in one year.

8 KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] P. Sethi ja S. R. Sarangi, *Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications*, kd. 2017.
- [2] K. Mekki, E. Baijc, F. Chaxel ja F. Meyer, „A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,“ *ICT Express*, kd. 5, nr 1, pp. 1-7, March 2019.
- [3] Polysense Technologies, *WxS 8800 LoRaWAN wireless sensor nodes for IoT*.
- [4] „Postscapes,“ Postscapes, 1 5 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.postscapes.com/internet-of-things-protocols/>.
- [5] A. Väärtnõu, 3 5 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ekvy.ee/component/framework/event/download/22>.
- [6] Statistikaamet, „Statistika andmebaas,“ 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <http://pub.stat.ee/px-web.2001/Database/Rahvaloendus/REL2011/02Eluruumid/02Eluruumid.asp>.
- [7] Euroopa andmeportaal, „Euroopa digitaalarengu aruanne 2017, ülevaade Eesti kohta,“ 2017.
- [8] Telia AS, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.telia.ee/images/documents/ari/lotLeviala/IoT_Leviala.pdf.
- [9] Sigfox, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sigfox.com/en/coverage>.
- [10] LoRa Alliance, 11 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>.
- [11] LoRa Alliance, 22 1 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://loralliance.org/in-the-news/loralliance-passes-100-lorawantm-network-operator-milestone-coverage-100-countries>.
- [12] Riigi Infosüsteemi Amet, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eesti.ee/est/kontaktid/koolid>.
- [13] Connected Finland, Connected Finland OY, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.connectedfinland.fi/wp-content/uploads/2017/12/AirWitsCO2_brochure-1pageENG.pdf.
- [14] „Thingpark Market,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://market.thingpark.com/catalog/product/view/id/1263>.
- [15] ElkoEP, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elkoep.com/media/import/Elko/INELS_AIR/AirQS-100/AirQS-100NB_ve_vyvoji/EN/Datasheet_AirQS-100.pdf.
- [16] Elsys, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elsys.se/en/wp-content/uploads/sites/3/2018/06/ERS-data-sheet.pdf>.
- [17] Simplecell, [Võrgumaterjal]. Available: <https://coverage.simplecell.eu/>. [Kasutatud 1 5 2019].
- [18] J. H. Sild, *Autori meilivahetus teenusepakujate esindajatega*, 2019.

