

VERKKOTEKNOLOGIOIDEN KÄYTTÖ AUTONOMISIEN
ALUSTOJEN TIETOLIIKENTEESSÄ

Myllymäki Jesse

Opinnäytetyö

Tieto- ja viestintätekniikka
Insinööri (AMK)

2022

Tieto- ja viestintäteknikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Jesse Myllymäki	Vuosi	2022
Ohjaaja	Tauno Tepsa		
Toimeksiantaja	Lapland Robotics		
Työn nimi	Verkkoteknologioiden käyttö autonomisten alustojen tietoliikenteessä		
Sivumäärä	28		

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan verkkoteknologioiden toimivuutta, kantavuutta ja vakautta itseohjautuvan alustan kanssa.

Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Lapland Roboticsin kanssa ja idea opinnäytetyöhön on saatu Lapland Roboticsilta. Kirjoittaja innostui tästä aiheesta työskennellessään Teliällä ja tutustuessaan siellä mobiiliverkon toimintaan Suomessa.

Lapland Roboticsin yhteyshenkilö kertoi suunnittelemaansa itseohjautuvasta alustasta ja siitä, minkälaisessa käytössä se on. Näin ollen Lapland Robotics halusi tarkemman tiedon siitä, mikä verkkoteknologia on kaikista kannattavin alustan käytössä.

Tutkimuksessa käydään läpi mobiiliverkkoteknologioiden ja Suomessa käytössä olevien IoT-verkkoteknologioiden piirteitä ja toimivuutta. Lisäksi pintapiirteisesti käydään läpi pienempikäyttöisiä verkkoteknologioita, joita löytyy suurimmasta osasta käytössä olevista laitteista.

Tutkimuksessa saatiin rajattua pois teknologioita, jotka eivät sovellu Lapland Roboticsin haluttuun käyttötarkoitukseen. Tämän myötä IoT-käyttöön tarkoitetut verkkoteknologiat ja muutama mobiiliverkkoteknologioista sopivat haluttuihin spesifikaatioihin. Nämä spesifikaatiot ovat teknologian kantama, siirtonopeus, vakaus ja tietoturva.

Avainsanat

esineiden internet, itseohjautuva alusta, verkkoteknologia

Degree Programme in Information
and Communications Technology
Bachelor of Engineering

Author	Jesse Myllymäki	Year	2022
Supervisor	Tauno Tepsa		
Commissioned by	Lapland Robotics		
Subject of thesis	Use of Network Technologies in the Communication of Autonomous Platforms		
Number of pages	28		

The aim of this thesis study was to investigate the usage of network technologies in the communication of autonomous platforms. The idea for this study came from Lapland Robotics and the study was made in collaboration with them.

In this study the different available mobile networking technologies from 2G to 5G were compared. The variation of their specifications was compared with the more modern technology. Also, their range and functionality in the specific usage of the platform were compared. IoT-network technologies were researched as well, for the purpose of them being a potential choice for the usage. These technologies were firstly compared with each other and lastly compared with mobile networking technologies.

Potential candidates were as well short-range technologies which can be found in most electronic devices. These technologies were examined just briefly due to the short-range of the technologies.

Key words

Network Technology, Telecommunication, Internet of Things, Autonomous Platform

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	6
2	MOBIILIVERKKOTEKNOLOGIAT	7
2.1	Yleistä tietoa mobiiliverkosta	7
2.2	2G-verkko	11
2.3	3G-verkko	11
2.4	4G-verkko	12
2.5	5G-verkko	13
3	LPWAN	16
3.1	Yleistä LPWAN verkoista	16
3.2	NB-IOT	17
3.3	LoRaWAN	18
4	MUITA KÄYTÖSSÄ OLEVIA VERKKOTEKNOLOGIOITA	20
4.1	Sigfox	20
4.2	ZigBee & Z-Wave	20
5	LAPLAND ROBOTICSIN PROJEKTI	22
5.1	Projektin käyttötarkoitus	22
5.2	Verkkoteknologiat	22
6	POHDINTA	25
	LÄHTEET	26

KÄYTETYT LYHENTEET

5G NSA	5G Non-Standalone
5G SA	5G Standalone
EDGE	Enhanced Data GSM Environment
EGPRS	Enhanced GPRS
FOTA	Firmware Over-The-Air
GSM	Global System for Mobile Communication
GPRS	General Packet Radio Service
HSPA	High Speed Packet data Access
HSDPA	High Speed Download Link Packet data Access
HSUPA	High Speed Upload Link Packet data Access
IoT	Internet of Things, esineiden internet
LPWA	Low Power Wide Area
LTE	Long Term Evolution
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
XG	numerolla merkityn sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia, miten nykyään standardisoidut kuluttajaverkkoteknologiat ja mahdollisesti yrityksille suunnatut verkkoteknologiat toimivat Lapland Roboticsin kehittämän itseohjautuvan alustan kanssa. Opinnäytetyö tehtiin Lapland Roboticsille, joka toimii myös opinnäytetyön toimeksiantajana.

Opinnäytetyön aiheesta olin yhteydessä opinnäytetöiden koordinaattoriin, ja hänellä oli muutama aihe tarjolla. Tämä aihe sai oman kiinnostukseni heräämään, koska olin opinnäytetyön aloitushetkellä töissä Teliällä. Teliältä sain myös hyvää tietoa liittyen kuluttajille suunnattuihin verkkoteknologioihin.

Lapland Robotics on Lapin ammattikorkeakoulun ja Lapin yliopiston yhdessä toteuttama hanke, jonka tavoitteena on tuoda teknillistä kehitystä Lappiin. Tavoite opinnäytetyölle oli hankkia tietoa, mikä tai mitkä käytössä olevista verkkoteknologioista on kattavin ja luotettavin Lapland Roboticsin itseohjautuvalle alustalle käytettäväksi (Lapland Robotics 2022).

Itseohjautuva alustan käyttö datan lähettämisessä ja vastaanottamisessa ovat tärkeimmät tiedot, koska alustan tulee saada lähetettyä tarvittava data ja mahdollisesti vastaanottaa data, jos alusta joutuu tilanteeseen missä sitä tulee manuaalisesti liikuttaa. Verkkoteknologian kantama ja signaalin vahvuus ovat tärkeitä, että alusta saa hyvän yhteyden datan lähettämiseksi ja vastaanottamiseksi.

Tutkittavia verkkoteknologioita ovat ainakin mobiiliverkkoteknologiat 2G, 3G, 4G ja 5G, LoRaWAN, NB-IoT ja LTE-M. Näiden lisäksi käydään pintapiirteisesti ZigBee, Z-Wave ja Sigfoxin 0G-teknologioita. Tarkoituksena on selvittää mikä tai mitkä näistä teknologioista on luotettavin Lapland Roboticsin käyttökohteeseen.

2 MOBIILIVERKKOTEKNOLOGIAT

2.1 Yleistä tietoa mobiiliverkosta

Matkapuhelinverkoista käytetään yleisesti nimityksiä sukupolven mukaan. Näiden yleisten merkintöjen alle jää silti useita lyhenteitä, jotka kertovat tarkemmin käytetystä tekniikasta. Jokaisen uuden teknologian myötä luotettavuus ja siirtonopeudet siirtyvät uudelle tasolle. Vaikka luotettavuus ja siirtonopeus on saatu nykystandardien mukaiselle sopivalle tasolle, uudemmissa verkkoteknologioissa taajuutta on jouduttu kasvattamaan ja tämän vuoksi kantama ei ole pysynyt samana. Lyhyt kantama tässä tapauksessa tarkoittaa, että tukiasemien määrää on lisätty peittoalueen laajentamisen vuoksi viimeisen vuosikymmenen aikana (Linna 2010).

Suomessa mobiiliverkkoteknologioilla on käytössä taajuudet 450 Megahertsistä 26 Gigahertsin saakka, ja tarkempaa luettelo taajuuksista ja luvanhaltijoista löytyy Traficom sivuilta. Traficom on Suomen Liikenne- ja viestintävirasto, joka huolehtii, että Suomessa on käytössä laadukkaat ja turvalliset viestintäyhteydet ja -palvelut (Traficom 2022b).

Manner-Suomessa on kolme isoa operaattoria, jotka ylläpitävät omaa mobiiliverkkoaan. DNA Oyj, Elisa Oyj ja Telia Finland Oyj toimivat Manner-Suomessa ja Ahvenanmaalla mobiiliverkon toimintaa ylläpitää operaattori Ålcom, eli Ålands Telekommunikation Ab (Traficom 2022b; Ålcom 2022).

Mobiiliverkkoteknologioiden nopeuksiin ja kantamaan vaikuttavat teknologia, taajuusaste ja kaistanleveys (Taulukko 1). 2G:llä ja 3G:llä on sama kaistanleveys, mutta datansiirtonopeuteen vaikuttaa teknologian toimintataajuus. 2G toimii pienemmällä, 450:n ja 900 Megahertsin taajuuksilla, jotka antavat hyödyn pidemmälle kantamalle verrattuna korkeammalla taajuusasteella toimiva 3G, joka toimii 900:n ja 2100 Megahertsin taajuuksilla. 4G:n yleisimmät taajuudet Suomessa ovat 700, 800, 900, 1800, 2100 ja 2600 Megahertsia, mutta esimerkiksi DNA:lla on joillakin alueilla myös 1200:n ja 1600 Megahertsin taajuudet käytettävissä. 5G

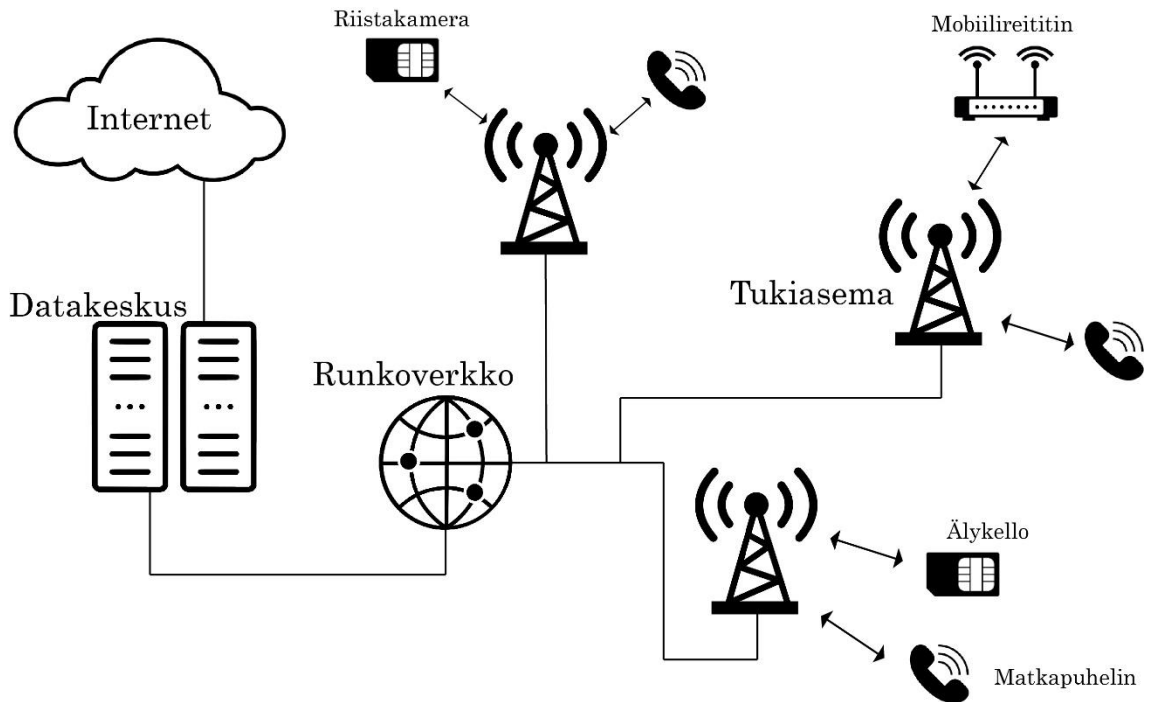
vaatii korkean datansiirtonopeuksien myötä korkeamman taajuuden ja sen vuoksi Suomessa on pääsääntöisesti julkisessa käytössä 700:n ja 3500 Megahertsin taajuudet, mutta korkeammillekin taajuuksille on Traficomien listauksessa luvanhaltijoita. (Traficom 2022b.)

Taulukko 1. Vertailu mobiiliverkkojen välillä (RantCell 2022)

Comparison	2G	3G	4G	5G
Introduced in year	1993	2001	2009	2018
Technology	GSM	WCDMA	LTE, WiMAX	MIMO, mm Waves
Access system	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	OFDM, BDMA
Switching type	Circuit switching for voice and packet switching for data	Packet switching except for air interference	Packet switching	Packet switching
Internet service	Narrowband	Broadband	Ultra broadband	Wireless World Wide Web
Bandwidth	25 MHz	25 MHz	100 MHz	30 GHz to 300 GHz
Advantage	Multimedia features (SMS, MMS), internet access and SIM introduced	High security, international roaming	Speed, high speed handoffs, global mobility	Extremely high speeds, low latency
Applications	Voice calls, short messages	Video conferencing, mobile TV, GPS	High speed applications, mobile TV, wearable devices	High resolution video streaming, remote control of vehicles, robots, and medical procedures

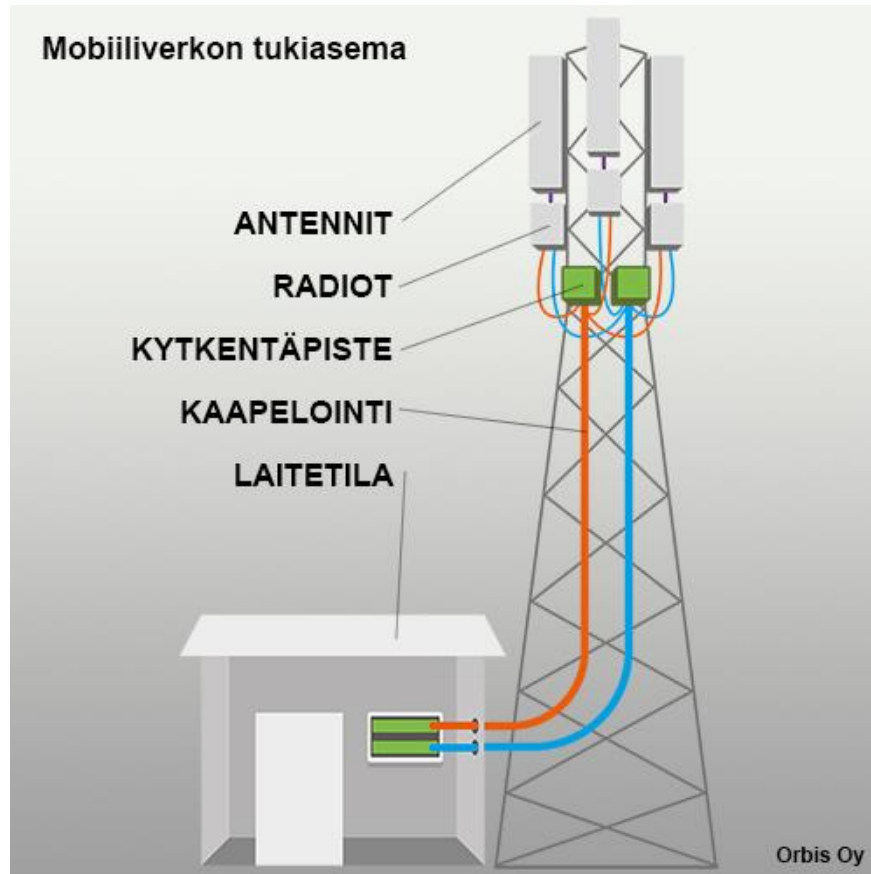
Dan Robitzskin artikkelissa Finland Is the Mobile Data Capital of the World kerrotaan, että Suomen mobiiliverkon kattavuus on sataprosenttia väestöstä (Robitzski 2018). Operaattoreilla on omilta sivuiltaan löydettävissä matkapuhelinverkon kuuluvuuskartta, jotka näyttävät jokaisen mobiiliverkkoteknologian teoreettisen käyttöalueen. Robitzskin artikkelissa myös kerrotaan keskiarvoinen mobiilidatan käytön olleen 2017 vuoden alkupuolella noin 20 Gigatavuuta (Gt) kuukaudessa (Robitzski 2018) ja Traficomien keräämien tilastojen mukaan 2020 vuoteen tämä on tuplaantunut noin 48 Gigatavuun (Traficom 2021).

Mobiiliverkon toimivuus vaatii palveluntarjoajalta toimivan yhteyden tukiaseman sekä ylläpitämisen datakeskuksen välillä (Kuvio 1). Itse datakeskus on käyttäjän ja internetin välillä, jossa palveluntarjoaja ylläpitää mobiiliverkon ja käyttäjien turvallisuutta. Datakeskuksen ja tukiasemien välinen yhteys muodostetaan pääsääntöisesti valokuitukaapeloinnin avulla latenssin pienentämiseksi ja mahdollisimman tasaisen datansiirtonopeuksien saavuttamiseksi. (Wang ym. 2012.)



Kuvio 1. Mobiiliverkko yksinkertaistettuna (mukaillen Wang, Vasilakos, Chen, Liu & Kwon 2012, 6).

Suuremmissa kaupungeissa tukiasemat sijaitsevat rakennusten katoilla tai ulkoseinässä, jotta ne eivät vaikuta negatiivisesti kaupungin ulkonäköön. Taajama-alueiden ulkopuolella tukiasemat ovat 30–150 metrin korkuisia. Useimmissa tapauksissa tukiaseman rakenteisiin on sisällytetty tila tai kaappi kytkennöille, nykyään käytetään harvemmin erillistä laiterakennusta tukiaseman juurella. Tukiasemamaston huipussa sijaitsee eri teknologian vaatimat radiot ja antennit, ja kytkentäpisteeltä on ajettu jokaiselle laitteelle omat kaapeloinnit (Kuvio 2). (Meuronen 2022.)



Kuvio 2. Mobiiliverkkotukiaseman yleiskuva (Meuronen 2022).

Suomessa on käytössä kolme erilaista tukiasematyyppeä, joita kutsutaan soluiksi. Ne ovat makro-, mikro- ja pikosolu, joilla on kaikilla erilainen käyttötarkoitus. Makrosolulla on suurin kantama, joka ylittää useisiin kilometreihin, ja jolla on jopa satakertainen virrankulutus seuraavaan solutyyppiin verrattuna. Makrosoluja käytetään pääsääntöisesti suurimmissa tukiasemamastoissa tai rakennusten katoilla. Mikrosolujen teoreettinen maksimikantama on noin kilometrin luokkaa ja niillä on huomattavasti pienempi virrankulutus kuin makrosoluilla. Yleisimmät sijainnit ovat rakennusten katoilla ja seinillä. Pikosolujen kantama on pienin, teoreettisesti alle sadan metrin ja virrankulutus alle watin luokkaa. Nämä ovat hyödyllisiä käytettäväksi esimerkiksi signaalin vahventamiseksi rakennusten sisätiloihin. (STUK 2022.)

2.2 2G-verkko

2G-verkkoteknologia, ensimmäiseltä nimitykseltään GSM-teknologia (Global System for Mobile Communication) on toisen generaation mobiiliverkkoteknologia. Suomalainen Radiolinjan julkaisi käytettäväksi 2G-verkon 1.7.1991 (Churi, Surendran, Tigdi & Yewale 2012, 9).

2G-verkko toimii Traficomien tietojen mukaisesti 900:n ja 1800 Megahertsin taajuuksilla (Traficom 2022b). GSM-teknologia toimi tavallisessa käytössä puheluiden ja SMS-viestien lähettämisessä, mutta korkeamman datasiirron määrän tarve kasvoi. Vuonna 2000 julkaistiin GPRS (General Packet Radio Service), jonka avulla saatiin siirtonopeudet nostettua GSM:n 14,4 Kilobittiä sekunnissa latausnopeudesta ja 40 Kilobittiä sekunnissa lähetysnopeudesta teoreettiseen 171 Kilobittiin sekunnissa (3GPP 2021b).

The 3rd Generation Partnership eli 3GPP vastasi seuraavista vaiheista 2G-verkon päivityksessä: 2G-verkko sai päivitykset datan siirtonopeuksiin EDGE- (Enhanced Data rates for Global Evolution) ja EGPRS-teknologiapäivityksillä (Enhanced GPRS), joiden myötä nopeudet nousivat teoreettiseen 384 Kilobittiä sekunnissa. Churin, Surendranin, Tigdin & Yewalen artikkelissa Evolution of Networks (2G-5G) mainitaan, että GPRS- ja EDGE-teknologiat ovat virallisten 2G:n ja 3G:n välillä, minkä vuoksi GPRS-teknologiaa kutsutaan 2.5G ja EDGE-teknologiaa 2.75G:ksi (Churi ym. 2012, 9–10).

Nykystandardien mukaan 2G, 2.5G ja 2.75G eivät ole tarpeeksi nopeita isojen datamäärien siirtämiseen, minkä vuoksi 2G-verkko ei ole Lapland Roboticsin projektissa ensimmäinen vaihtoehto, jos itseohjautuva alusta tulee tarvitsemaan suurien datamäärien siirtoa.

2.3 3G-verkko

3G-verkkoteknologia on kolmannen generaation mobiiliverkkoteknologia, joka tunnetaan myös nimellä UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Japanilainen NTT Docomo julkaisi virallisesti 3G:n lokakuun alussa vuonna 2001 (Dulcey 2022).

GSMAn ja Traficomien tietojen mukaisesti 3G-verkko (UMTS) käyttää 900 ja 2100 Megahertsin taajuuksia. Vaikka matalampi taajuus on sama kuin 2G-verkon kanssa, teknologian ja laitteiden päivityttyä nopeudet ovat päässeet UMTS-tekniikalla jopa kahteen Megabittiin sekunnissa. Tämä oli suuri harppaus 2G:stä. (GSM Arena 2022; Traficom 2022b.)

3G sai päivityksiä datanopeuksiin 2008, kun 3GPP julkaisi HSPA (High Speed Packet data Access) -perheeseen kuuluvat HSPDA (High Speed Download Link (DL) Packet data Access) ja hieman myöhemmin HSUPA (High Speed Upload Link (UL) Packet data Access). Näiden päivitysten myötä datasiirtonopeudet pääsivät jälleen uudelle tasolle, kun HSDPA:n latausnopeus ylsi teoreettiseen 14,4 Megabittiä sekunnissa ja HSUPA:n nosti lähetysnopeuden teoreettiseen 11 Megabittiä sekunnissa. (3GPP 2022b.)

3G on mobiiliverkon yli käytettävässä IoT-laitteessa täydellinen vaihtoehto, koska kantama riittää pitkälle ja datanopeudet ovat sitä luokkaa, että tarvittavaa dataa voitaisiin liikuttaa laitteiden välillä. 5G-uudistuksien myötä suomalaiset teleoperaattorit tulevat sulkemaan 3G-verkkonsa 2023 vuoden loppuun mennessä, joten 3G:tä ei voi pitää pitkän linjan vaihtoehtona (Telia 2022a).

2.4 4G-verkko

4G on neljännen sukupolven mobiiliverkkoteknologia, jonka toinen nimitys on LTE (Long Term Evolution). TeliaSonera oli ensimmäinen teleoperaattori, joka toi 4G:n julkiseen käyttöön vuoden 2009 lopussa (Jansson 2022). Suomessa yleisimmät 4G-verkon taajuudet ovat 700, 800, 900, 1800, 2100 ja 2600 Megahertsiä, ja Traficomien tiedoista näkee millä operaattorilla on lupa kyseiselle taajuudelle. Operaattorista vaihdellen taajuudet vaihtelevat alueittain. (Traficom 2022b.)

4G:n julkistushetken aikoihin teoreettinen latausnopeus oli 100 Megabittiä sekunnissa ja lähetysnopeus 50 Megabittiä sekunnissa. 4G sai myös päivityksen hieman myöhemmin ja sitä kutsutaan joko 4G+:ksi, LTE+:ksi tai LTE-Advancediksi ja sen myötä 4G:n teoreettiset maksimit nousivat 300 Megabittiin sekunnissa ja

100 Megabittiin sekunnissa ja latenssi pieneni noin 36 millisekuntiin. (Rogerson & Kavanagh 2022.)

Suomessa on kaksi suurta syytä datanopeuksien heikkouteen: väestötiheys ja maasto. Telian asiakaspalvelussa nämä asiat tulivat useita kertoja vastaan. Väestötiheyden vaikutuksen voi tiivistää yhteen lauseeseen: tukiasemien kapasiteetti jaetaan kaikkien käyttäjien kesken tasavertaisesti. Kapasiteetilla tarkoitetaan tukiaseman teoreettista maksimiarvoa, jolla se pystyy palvelemaan asiakkaita sopimusten mukaisilla nopeuksilla (West, Fagerström & Siironen 2020). Suomessa on yksi maailman parhaista mobiiliverkoista, mutta Suomen metsät ovat suuri heikkous mobiiliverkolle. (Peden, Bradbury, Lamb & Hedley 2021.)

Koska 4G-verkko on nykyään kaikista käytetyin julkisessa käytössä oleva verkotekniikka, DNA ja Telia päättivät vuonna 2014 perustaa yhteisen erillisen verkko-yhtiön, jonka avulla saadaan kunnollinen mobiiliverkko suurimpaan osaan Suomea. Tästä syntyi Suomen Yhteisverkko (SYV), joka toimii Pohjois- ja Itä-Suomen alueella. SYV-verkko käyttää DNA:n ja Telian tukiasemia yhdessä, ja tämän vuoksi mobiiliverkon toiminta on huomattavasti parempaa esimerkiksi haja-asutetuilla alueilla. (Suomen Yhteisverkko 2022.)

Manner-Suomen teleoperaattoreilta löytyy liittymän tuotetiedoista liittymien vaihteluvälit. Esimerkiksi Teliällä yli 50 Megabittiä sekunnissa liittymissä nopeuden vaihteluväli on 10 Megabittiä sekunnissa – datapaketin koko. Elisalla taas 4G-verkon vaihteluväli alkaa 5 Megabittiä sekunnissa – datapaketin koko (Elisa 2021; Telia 2022).

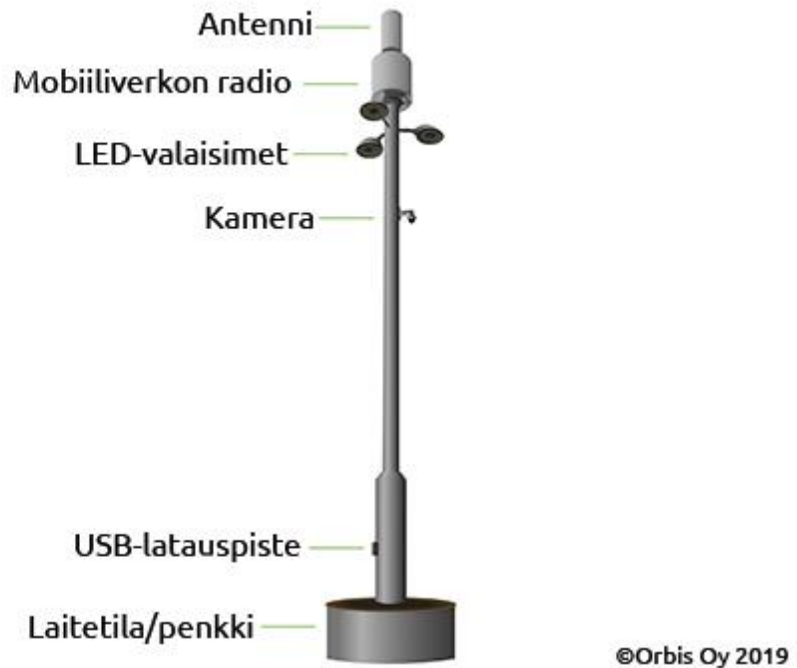
2.5 5G-verkko

5G-verkko on viidennen generaation verkko, joka on tuorein mobiiliverkkoteknologia. Vuonna 2015 Verizon loi 5GTF:n (5G Technology Forum), joka oli 5G:n kehityksen kynnyksivi. 5GTF auttoi nopeuttamaan 3GPP:tä 5G (NR) New Radio-standardin kehittämisessä (Verizon 2022). Elisa oli Suomessa ensimmäinen operaattori, joka otti 5G-verkko käyttöön Tampereella elokuussa 2017 ja tammi-kuussa 2019 5G:n julkaisu kaupalliseen käyttöön (Elisa 2021).

Suomessa 5G-verkko toimii 700 Megahertsin sekä 2:n, 2.6:n, 3.5:n ja 26 Gigahertsin taajuuksilla, joista 700 Megahertsin ja 3,5 Gigahertsin taajuudet ovat yleisimmät. (Traficom 2022b.) 5G-verkko toimii Suomessa pääsääntöisesti 5G NSA-standardilla (Non-Standalone), mutta kehitys jatkuu 5G SA-standardisoiduille (Standalone) verkolle. 5G NSA käyttää 4G:tä ankkurina yhteyden muodostamiselle ja ohjaamiselle. (Telia 2021.) Uudistuneen teknologian myötä 5G:n datasiirtonopeudet ovat siirtyneet seuraavalle tasolle verrattuna saavuttaen jopa teoreettisen 10–50 Gbps latausnopeuden ja latenssi on laskenut jopa teoreettiseen 1 millisekuntiin. (Rogerson & Kavanagh 2022.)

Koska 5G on uusi teknologia ja sitä ollaan vielä rakentamassa, ympäri Suomea operaattorit tekevät tukiasemissa muutoksia 3G-verkon laitteiden poistamiselle ja 5G-verkon laitteiden lisäämiselle. Manner-Suomen operaattorit ovat julkaisseet tietoa 3G-verkon päättymisestä joko omilla sivuillaan tai tukisivuillaan. (Telia 2022a.)

3GPP johtaa 5G-teknologian kehitystä ja yritys julkaisee joka toinen vuosi uuden julkaisun. Julkaisuissa on paljon muutoksia aina 3G:stä 5G:hen. Julkaisu 16 saatiin valmiiksi kesällä 2020. Julkaisu 17 neuvottelut ja suunnittelut aloitettiin loppuvuodesta 2019 jossa tulee huomattavia muutoksia 5G:hen. Julkaisu 18 suunnittelut aloitettiin loppuvuodesta 2021. (3GPP 2022c.)



Kuvio 3. Orbis Oy:n älypylväs (Meuronen 2022).

Koska 5G:n 3500 Megahertsin taajuus ei ole järjin kantava, Orbis Oy alkoi vuonna 2019 suunnittelemaan ja toteuttamaan Nokian vetämänä älykaupunkiin sopivia älypylväitä (Kuvio 3). Älypylvästä löytyy 5G-tukiasema, joka soveltuu henkilökohtaiseen ja IoT-käyttöön. Tämä hanke liikkuu nimellä LuxTurrim5G, ja Orbis Oy on rakentaneet pilottiympäristön Nokian kampukselle Espooseen. Pilottiympäristöstä löytyy yli 250 erilaista IoT-laitetta, kuten kameroita, tutkia ja sääasemia. (LuxTurrim5G 2022.)

3 LPWAN

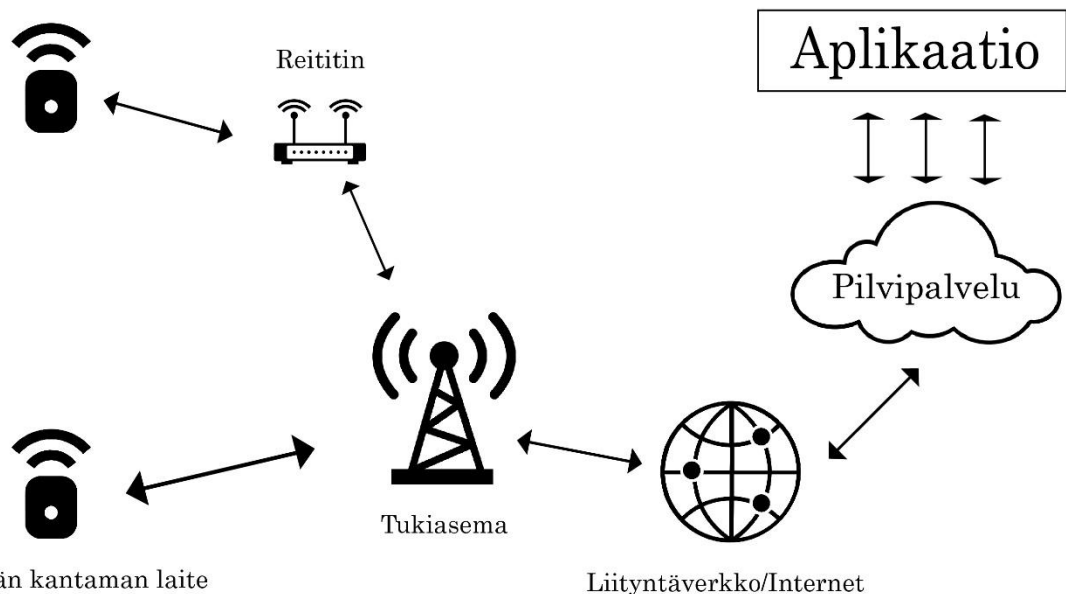
3.1 Yleistä LPWAN verkoista

LPWAN eli Low Power Wide-Area Network on vuonna 2013 kehitetty verkkoteknologialuokka. LPWAN-teknologia on käytössä IoT (Internet of Things) ja M2M (machine-to-machine) soveltuvilla laitteilla. Näitä teknologioita ovat muun muassa NB-IoT sekä LoRa Alliancen ylläpitämä LoRaWAN (Thales 2022).

LPWAN eroaa GSM-verkoista nopeudeltaan ja kaistanleveydeltään, koska IoT-laitteet vaativat vain datan pääsevän perille. Tämä myös vaikuttaa laitteiden hintaan, virrankulutukseen sekä datan tietoturvaan positiivisella tavalla ja tämän vuoksi LPWAN-verkko on suuressa käytössä erilaisissa IoT-laitteissa. (Thales 2022.)

LPWAN-verkkoyhteyksillä datansiirtonopeus ei ole päätähuimaava, koska datapakettien koko voi olla 10–1000 tavun välillä. Pakettien koon vuoksi datan nopeus vaihtelee kolme Kilobittiä sekunnissa ja 375 Kilobittiä sekunnissa välillä. Näiden syiden vuoksi kaistanleveyden optimisoinnin kannalta on tärkeää, että kantama on suuri ja laitteet ovat pienivirtaisia. (Thales 2022.)

Lyhyen kantaman laite



Kuvio 4. Yleiskuva LPWAN teknologian toiminnasta (mukaan RF Wireless World 2022).

LPWAN-verkossa toimivia laitteita on useilta eri LPWAN-verkkoteknologiaa käyttäviltä valmistajilta. LPWAN-verkko on toteutettu tähtitopologialla, jonka avulla verkko välttää monimutkaisten välitysalgoritmien käytön ja sen myötä saadaan tavoiteltu pieni virrankulutus (Kuvio 4). LPWAN-reititin myös mahdollistaa lyhyen kantaman verkkojen, kuten ZigBeen, Z-Waven ja WiFi:n toimivuuden LPWAN-verkon ylitse ja pidentää sen myötä kantamaa. (RF Wireless World 2022.)

Tietoturva LPWAN-teknologioissa on toteutettu jokaisen verkon ylläpitäjän kehittämällä tavalla. Pitkä kantama on tässä heikkoutena, tämän vuoksi jokainen laite on mahdollinen tietoruariski. NB-IoT-verkko hyödyntää mobiiliverkkoteknologian todennusta ja salausta tietoliikenteessä. (Chacko & Job 2022.)

LoRaWAN-verkossa on käytössä AES-128-salausmenetelmä, joka generoi kaksi istuntoavainta, Network session keyn ja Application session keyn. Istunnon alussa myös luodaan eheyskoodi, jonka tarkoitus on varmistaa datapakettien eheys. Eheyskoodi luodaan ja varmistetaan käyttämällä Network session keytä, minkä jälkeen se jaetaan halutuille laitteille ja palvelimelle. Application session keytä käytetään itse datapakettien salaukseen ja salauksen purkamiseen. (Chacko & Job 2022.)

3.2 NB-IOT

NB-IoT eli Narrowband IoT (Internet of Things) on kehitetty juuri IoT, esineiden internetin tarkoituksiin. NB-IoT tunnetaan myös nimellä LTE Cat-NB, LTE Cat-NB1 ja Cat NB1, jotka olivat 3GPP:n julkaisussa 13 ilmoitettuja. Julkaisu 14 toi myös parannuksia NB-IoT-teknologialle ja nimitykset LTE Cat NB2 ja Cat NB2. (AVSystem 2022.) Vuoden 2016 kesällä GSMA ja 3GPP julkaisivat yhdessä kehittämä verkkoteknologian, jonka tavoitteena oli yhdistää matkapuhelinverkot ja laitteet (Mohan 2022;3GPP 2016).

Koska NB-IoT-verkko on rakennettu hyödyntämään matkapuhelinverkkoa, NB-IoT-verkossa on matkapuhelinverkkoteknologioiden edut, kuten yksityisyys ja turvallisuus. NB-IoT on suunniteltu toimimaan kolmella eri tavalla, käyttäen GSM-verkkoa, käyttäen 4G-verkkoa samalla sitä jakaen tai käyttäen GSM:n ja 4G:n välillä olevia taajuuksia maksimoidakseen yhteyden. (AVSystem 2022.) Huono

puoli NB-LoT-laitteessa on, että se pitää yhteyden tukiasemaan/tukiasemiin koko ajan, kun NB-LoT-sensori on päällä. Tämän vuoksi se käyttää enemmän akkua ja tarvitsee useimmin latauksen, akun vaihdon tai suuremman akun/akut. (Mohan 2022.)

NB-LoT:n hyötynä on kyky hyödyntää matkapuhelinverkkoa. Koska Suomen kattavuus 3G-, 4G- ja 5G-verkoilla on yli 90 prosenttia, niin missä tahansa matkapuhelinverkkoyhteys toimii, silloin toimii myös NB-LoT-verkko. NB-LoT:n kantama ylittää jopa 50 kilometriä päähän, mutta tämä matka vaatii tietyn maaston toimiakseen. (AVSystem 2022.) Suomen maasto on erittäin vaihtelevaa ja pinta-alasta iso osa on metsää, mikä heikentää kantamaa (Peden, Bradbury, Lamb & Hendley 2021).

3.3 LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) on laajoihin IoT-tarkoituksiin kehitetty verkkoteknologia. NB-LoT ja LoRaWAN ovat hyvin samankaltaisia, mutta LoRaWAN-teknologiaa ei ole rakennettu mobiiliverkon päälle, vaan se käyttää LoRa Alliancen kehittämää ja ylläpitämää verkkoa. (LoRa Alliance 2022.) Suomessa LoRaWAN-teknologiaa ylläpitää Digita. (Kuukka 2022.)

LoRaWAN-verkossa on kolme luokkaa, luokat A, B ja C. Luokka A on oletusluokka, jota kaikki LoRaWAN-laitteet tukevat. Luokan A laitteet toimivat asynkronisesti, eli paketin lähetyksen jälkeen vastaanottavalla laitteella on kaksi mahdollisuutta vastata. Tämä tekee yhteydestä kaksisuuntaisen. A-luokan laitteella on myös mahdollisuus vaipua unitilaan niin pitkään kuin sovellus vaatii, mikä tekee A-luokan laitteista kaikista pienivirtaisimpia. (LoRa Alliance 2022.)

Luokan B laitteet toimivat synkronoidusti, joten sovelluksessa on määritelty kellonajat pakettien vastaanottamiselle. Tällä tavalla saadaan yhteyden latenssi määriteltyä itse jopa 128 sekunnin mittaiseksi, mutta haittapuolena on hieman suurempi virrankulutus. (LoRa Alliance 2022.)

Luokan C laitteissa on kaikista pienin latenssi, koska vastaanotin pidetään aktiivisena kaiken aikaa, kun laite ei lähetä paketteja. Tämän myötä laitteelle voidaan

alkaa lähettämään paketteja mihin aikaan vain, mutta tässä haittapuolena on vielä suurempi virrankulutus kuin luokan B laitteilla. LoRaWAN-päätelaitteissa on tuki FOTA:lle (Firmware Over-The-Air), joten vaihtelu luokkien A ja C välillä on täysin mahdollista ja hyödyllistä myös akkukäyttöisille laitteille. (LoRa Alliance 2022.)

4 MUITA KÄYTÖSSÄ OLEVIA VERKKOTEKNOLOGIOITA

4.1 Sigfox

Yksi vielä vähemmän tunnettu, mutta maailmanlaajuisesti toimiva Sigfox-niminen yritys ylläpitää 0G-nimistä verkkoa. 0G on hyvin samantyyppinen kuin NB-LoT ja LoRaWAN, eli se toimii vähäisellä virralla ja pitkällä kantamalla. Sigfoxin pidempi suunnitelma on luoda ympäri maailmaa ulottuva verkko, jonka yli onnistuu pienten viestien lähettäminen, että kaikilla on saatavuus pienimpään mahdolliseen yhteyteen. (Sigfox 2022.)

0G-verkkoyhteys toimii jo Sigfoxin mukaan 75 maassa ja verkon yli lähetetään 76 miljoonaa viestiä päivittäin. Suomestakin löytyy 0G-verkkoyhteyttä pääsääntöisesti Etelä- ja Länsi-Suomesta. (Sigfox 2022.)

4.2 ZigBee & Z-Wave

Laajempien verkkoteknologioiden kanssa on pienempimuotoisia IoT-käyttöön soveltuvia teknologioita. Näistä yleisimpiä ovat Bluetooth, WiFi sekä hieman vähemmän arkikäytössä tavattavat ZigBee ja Z-Wave.

ZigBeellä ja Z-Wavella on hyvät ja huonot puolet. Ensinnäkin verkot toimivat eri taajuuksilla: ZigBee 2,4 Gigahertsin ja Z-Wave 900 Megahertsin. 2,4 Gigahertsin taajuudella häiriöksi tulevat samalla taajuudella toimivat WiFi-verkot, mutta korkeammalla taajuudella on positiivisena puolena paremmat siirtonopeudet. Myös 900 Megahertsin taajuudella toimivia laitteita, jotka aiheuttavat häiriötä laitteisiin. (Bradford 2022.)

Samanaikaisesti yhtä aikaa toimivia laitteita ZigBeellä on 65 000 ja Z-Wavella vain 232. ZigBee tai Z-Wave ei toimi laitteiden välillä kuten WiFi, vaan siirtää datan "hyppimällä" laitteelta toiselle. Tässäkin on eriyävaihtoehtoja, koska ZigBeellä näitä hyppyjä on loputtomasti ja Z-Wavella maksimissaan 4. (Bradford, A. 2022.)

Kolme yleistä kotikäyttöistä IoT-laitetta ovat älyvalaistus, lämpöpumput ja robotti-imurit. Lämpöpumput ja robotti-imurit yhdistetään yleisimmin kodin langattomaan

verkkoon ja niitä voi sitten kontrolloida joko WIFI:n ylitse tai jopa toiselta puolelta Suomea. Älyvaloista yleisin on Philips Hue-sarja, joka toimii valmistajan mukaan ZigBee-verkkoa hyödyntäen. ZigBee-verkon toiminta vaatii Philips Hue Bridge-laitteen, mutta ilman Hue Bridgeä erillisten älyvalojen käyttö toimii myös Bluetoothin kautta, jolloin valaisimien määrä on rajoitettu maksimissaan 10 kappaleeseen. (Philips 2022.)

5 LAPLAND ROBOTICSIN PROJEKTI

5.1 Projektin käyttötarkoitus

Ensimmäisessä keskustelussa Lapland Roboticsin kanssa käytiin läpi, minkälaisessa käytössä itseohjautuva alusta mahdollisesti on. Esimerkkeinä oli maastossa toimiva dataa keräävä alusta tai kotipihalla toimiva automatisoitu lumiaura, joka pitää pihatien lumettomana. Kummassakin käytössä on omat heikkoutensa, jos alustan käyttöä vaihdeltaisiin, koska yksi verkkoteknologia voi olla täydellinen yhdenlaisessa käytössä, mutta heikko toisessa. Tässä vaiheessa saatiin jo poistettua ZigBee, Z-Wave, Bluetooth ja WiFi pois mahdollisista vaihtoehdoista suuren kantaman tarpeen vuoksi.

5.2 Verkkoteknologiat

Mobiiliverkkoteknologioissa, kuten muissakin radioaalloilla toimivissa yhteyksissä, tulee huomioida radiosignaalin vaimeneminen. Radiosignaalien vaimeneminen mitataan desibeleinä ja jokaisella esineellä tai asialla on jokin vaimenemisen arvo. Vapaassa tilassa vaimeneminen lasketaan laitteiden etäisyyden ja käytettävän taajuuden avulla (kaava 1). Kaavaa voidaan hyödyntää mobiiliverkon signaalin kantaman laskemiselle.

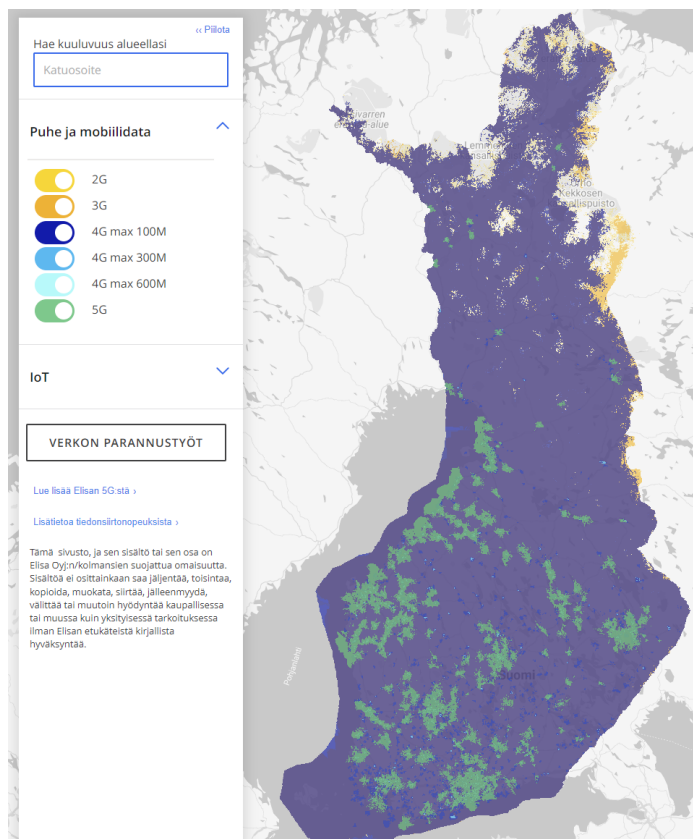
$$L = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32,45 \quad (1)$$

L	on	vapaan tilan vaimennus (dB)
d	on	etäisyys
f	on	taajuus

Ensimmäisenä verkkoteknologian valitsemisessa tulee myös huomioida, että mobiiliverkoista 3G ja 5G ovat nykyhetkellä huonot vaihtoehdot. 3G tullaan purkamaan suurimmaksi osaksi käytöstä vuoden 2023 loppuun mennessä ja 5G siksi, koska nykyhetkellä suurin osa 5G-tukiasemista käyttää korkeampaa taajuutta (3,5 Gigahertsin), jonka kantama ei ole suuri (Telia 2022a). Mobiiliverkkoteknologioista vaihtoehdot ovat siis pidemmällä aikavälillä 2G tai 4G, mutta tässäkin on

vaihtoehtona käyttää kumpaakin verkoista, koska mobiiliverkon laitteilla on mahdollisuus vaihdella pienellä virrankulutuksella eri verkkojen välillä. On hyvä miettiä myös, tarvitseeko alustalta lähettää dataa ulospäin, koska 2G-verkon datasiirtonopeudet ovat alhaiset. Pieniä paketteja onnistuu kyllä lähettää, kuten GPS-koordinaatteja tai yksittäisiä kuvia. 4G-verkon kohdalla ei tarvitse miettiä kuin signaalin vahvuutta ja sitä, saako alusta yhteyden ja onnistuuko se lähettämään tarvittavan datapaketin.

Suomessa mobiiliverkkojen kattavuus on erinomaisella tasolla, kuten Elisan kuuluvuuskartastakin näkee (Kuvio 5). Suurimmalla osalla asutusalueesta on vähintään 3G:n kantama. Edelleen on alueita, joissa mobiiliverkko ei toimi lainkaan, kuten Lapin harva-asutukset ja kansallispuistot. Näille alueille on joko hyödytöntä rakentaa tukiasemia, koska alueella ei ole käyttäjiä, tai alueelle ei saa tehdä mitään rakennelmia, esimerkkinä kansallispuistot.



Kuvio 5. Elisan mobiiliverkon kuuluvuuskartta. (Elisa 2022b.)

Toisena tekijän päätöksessä tulee olla tietoturva. NB-IoT ja LoRaWAN ovat IoT-käytössä paljon turvallisempia oman tietosuojansa kanssa, mutta vaativat spesifioitua laitteita toimiakseen. Jos alustan käyttökohde on maastossa liikkuvana alustana anturidatan lähettämiskäytössä, turvallisuus on tärkeää, ettei data pääse väärin käsiin. Mobiiliverkkoteknologioilla on teleoperaattoreiden omat suojaukset, mutta ne eivät ole yhtä tehokkaita kuin NB-IoT:n tai LoRaWAN:n.

Kolmantena tekijänä on käyttötarkoitus. Jos alustan käyttökohde on kotipihassa, käyttöön riittää varmasti 4G-verkko, riippuen miten muilla laitteilla samainen verkko toimii. Jos alustan käyttökohde on pääsääntöisesti maastossa toimivana, valinta ei välttämättä ole niin helppo. Jos alustan käyttöalue on esimerkiksi lähellä Rovaniemeä, niin käyttöön riittää mikä vain 2G:n, 4G:n, NB-IoT:n ja LoRaWAN:n välillä. Mutta jos alustaa tullaan käyttämään kauempana ihmisasutuksesta, kuten Suomen pohjoisosissa (kuvio 5). Valinta on joissain määrin helpompi, koska 4G-verkolla ei välttämättä ole kantamaa alueella, kuten ei NB-IoT:lläkään.

6 POHDINTA

Verkkoteknologioita löytyy mistä valita ja jokaista näistä voi käyttää erilaisiin tarkoituksiin. Toinen on parempia liikuttamaan dataa kuin kolmas, mutta kolmannella saattaa olla huomattavasti suurempi kantama. Toivon näiden tulosten olevan hyödyllisiä Lapland Roboticsille ja sen myötä pääsevät tekemään tarkempia testauksia.

Automatisoinnin myötä IoT-laitteita ja kokonaisia verkkoteknologioita on kehitetty liikuttamaan dataa jopa toiselle puolelle maapalloa mahdollisimman pienellä viiveellä. Tämä tarkoittaa, että henkilö voi hallita esimerkiksi omaa ilmalämpöpumpua kotonaan, vaikka on lomamatkalla toisella mantereella. Tai että henkilö on kipeänä ollessaan sammuttaa asunnon valot ilman ylimääräistä räsistystä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää, tasaisin ja luotettavin verkkoteknologia Lapland Roboticsin projektille. Aiemmin käytyjen tietojen perusteella Suomessa ylivertaisesti käytettävissä olevin verkkoteknologia on 4G ja varsinkin 2024 vuoden puolella, kun 3G ollaan ajamassa pois käytöstä.

Internetistä löydettyjen tietoihin ei aina voi luottaa, koska Teliällä työskennellessäni käytössä oli erilainen järjestelmä mobiiliverkon tilan seuraamiselle tai oikeastaan näitä järjestelmiä oli 3, mutta usein käytössä oli vain uusin ja tehokkain. Tämän järjestelmän kautta nähtiin tukiaseman solujen tiedot, liikkuvan datan määrä kuukausitasolla ja mahdolliset ongelmat. Nämä tiedot eivät usein vastanneet Telian asiakassivujen kuuluvuuskarttaan ja erittäin usein tuli vastaan henkilöitä, joiden puheluissa oli ongelmia tai mobiilidata oli hitaampi, kuin mitä sopimuksessa oli lukuun. Vaikka kuuluvuuskarttatietojen perusteella paikassa olisi erinomainen 4G kuuluvuus, niin hyvällä tuurilla voit saada 3G:n ja kymmeneksen ilmoitetusta latausnopeudesta.

LÄHTEET

3GPP 2016. Standardization of NB-IOT completed. Viitattu 4.3.2022
https://www.3gpp.org/news-events/1785-nb_iot_complete

3GPP 2021a. About 3GPP Home. Viitattu 11.2.2022
<https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>

3GPP 2021b. GPRS & EDGE. Viitattu 3.3.2022 .<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/102-gprs-edge>

3GPP 2022c. Release 17. Viitattu 5.2.2022 <https://www.3gpp.org/release-17>

AVSystem 2019. What is Narrowband IoT? NB-IoT overview. Viitattu 7.1.2022.
<https://www.avsystem.com/blog/narrowband-iot/>

Bradford, A. 2021. What's the Difference between Zigbee and Z-Wave? Viitattu 20.4.2022 <https://www.safewise.com/blog/zigbee-vs-zwave-review/>

Chacko, S., & Job, M. D. (2018). Security mechanisms and Vulnerabilities in LPWAN. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 396, No. 1). IOP Publishing. Viitattu 13.3.2022

Churi, J. R., Surendran, T. S., Tigdi, S. A., & Yewale, S. (2012). Evolution of networks (2G-5G). In International Conference on Advances in Communication and Computing Technologies (ICACACT) (Vol. 51, No. 4, pp. 8-13). Viitattu 16.1.2022

Dulcey, R. 2020. A Concise History of the 3G Technology. Viitattu 31.1.2022
<https://www.intraway.com/blog/a-concise-history-of-the-3g-technology/>

Elisa 2021. Elisa 5G. Viitattu 8.3.2022 <https://elisa.fi/5g/>

Elisa 2022a. Viitattu 7.4.2022 <https://elisa.fi/>

Elisa 2022b. Kuuluvuuskartta. Viitattu 17.1.2022 <https://elisa.fi/kuuluvuus/>

GSMarena 2022. Network coverage in Finland. Viitattu 24.5.2022
<https://www.gsmarena.com/network-bands.php3?sCountry=Finland>

Jansson, K. 2022. First in the World with 4G. Viitattu 24.4.2022 <https://www.teliacompany.com/en/about-the-company/history/first-in-the-world-with-4g/>

Kuukka, A. 2022. LoRaWAN Teknologia. Viitattu 21.2.2022 <https://www.digita.fi/etusivu/palvelut-yrityksille/digitan-iot-palvelut/lorawan-teknologia/>

Lapland Robotics 2022. Projekti. Viitattu 25.5.2022 <https://laplandrobotics.com/fi/projekti/>

Linnake, T. 2010. Sonera: 4G on tulevaisuuden tekniikkaa. Viitattu 25.5.2022
<https://www.is.fi/digitoday/mobiili/art-2000001663360.html>

LoRa Alliance 2022. What is LoRaWAN® Specification. Viitattu 14.3.2022 <https://loro-alliance.org/about-lorawan/>

LuxTurrin5G 2022. LuxTurrin5G pilot environment and piloted smart city solutions. Viitattu 6.5.2022 <https://www.luxturrin5g.com/pilot-environment>

Meuronen, P. 2019. Älypylväiden ja tukiasemamastojen perusteita. Viitattu 1.5.2022 <https://www.orbis.fi/blogi/%C3%A4lypylv%C3%A4iden-ja-tukiasemamastojen-perusteita>

Mohan, V. 2018. 10 Things About LoRaWAN & NB-IoT. Viitattu 6.3.2022 <https://blog.semtech.com/title-10-things-about-lorawan-nb-iot>

Nohrborg, M. 2022. LTE. Viitattu 2.2.2022 <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>

Philips 2022. Miten Philips Hue toimii? Viitattu 4.4.2022 <https://www.philips-hue.com/fi-fi/explore-hue/how-it-works#bridge-controlled>

RantCell 2021. What are the differences between 2G, 3G, 4G LTE, and 5G networks? Viitattu 4.2.2022 <https://rantcell.com/comparison-of-2g-3g-4g-5g.html>

Peden, S., Bradbury, R. C., Lamb, D. W., & Hedley, M. 2021. RF Loss Model for Tree Canopies with Varying Water Content. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. Viitattu 25.5.2022

RF Wireless World 2012. LPWAN Gateway Features. Viitattu 19.1.2022 <https://www.rfwireless-world.com/ApplicationNotes/LPWAN-Gateway.html>

Robitzski, D. 2018. Finland Is the Mobile Data Capital of the World. Viitattu 29.4.2022 <https://spectrum.ieee.org/what-the-finnish-obsession-with-mobile-data-says-about-5g>

Rogerson, J. & Kavanagh, S. 2022. 5G vs 4G: No Contest. Viitattu 1.5.2022 <https://5g.co.uk/guides/4g-versus-5g-what-will-the-next-generation-bring/>

Sigfox 2022. Our Story. Viitattu 13.3.2022 <https://www.sigfox.com/en/sigfox-story>

STUK 2019. Matkapuhelinverkon toiminta ja tukiasemat. Viitattu 7.2.2022 <https://www.stuk.fi/aiheet/matkapuhelimet-ja-tukiasemat/matkapuhelinverkko/matkapuhelinverkon-toiminta-ja-tukiasemat>

Suomen Yhteisverkko 2022. Viitattu 25.1.2022 <https://yhteisverkko.fi/suomen-yhteisverkko/>

Telia 2021. Te kysyitte – me vastaamme: Seitsemän kovaa faktaa 5G:n teknologiasta. Viitattu 10.2.2022 <https://yhteiso.telia.fi/t5/5G-artikkelit-ja-uutiset/Te-kysyitte-me-vastaamme-Seitseman-kovaa-faktaa-5G-n/ba-p/223514>

Telia 2022a. 3G-verkko on siirtymässä historiaan. Viitattu 26.5.2022 <https://www.telia.fi/3g>

Telia 2022b. Viitattu 20.1.2022 <https://www.telia.fi/>

Thales 2022. Low Power Wide Area Network. Viitattu 30.4.2022 <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/iot/resources/innovation-technology/low-power-wide-area-technology>

Traficom 2021. Suomi edelleen pohjolan ykkönen mobiilidatan käytössä, muut Pohjoismaat kirivät edelleen kiinteän verkon rakentamisessa. Viitattu 24.5.2022 <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/suomi-edelleen-pohjolan-ykkonen-mobiilidatan-kaytossa-muut-pohjoismaat-kirivat-edella>

Traficom 2022a. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Viitattu 15.1.2022 <https://www.traficom.fi/fi/liikenne-ja-viestintavirasto-traficom>

Traficom 2022b. Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat. Viitattu 14.1.2022 <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/matkaviestinverkkojen-taajuudet-ja-luvanhaltijat>

Verizon 2019. When was 5G introduced? Viitattu 27.2.2022 <https://www.verizon.com/about/our-company/5g/when-was-5g-introduced>

Wang, Xiaofei & Vasilakos, Athanasios & Chen, Min & Liu, Yunhao & Kwon, Ted. (2012). A Survey of Green Mobile Networks: Opportunities and Challenges. *Mobile Netw Appl.* 17. 4-20. Viitattu 7.5.2022

Wannstrom, J. 2022. HSPA. Viitattu 9.3.2022 <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>

West, P., Fagerström, N. & Siironen, S. 2020. Viitattu 26.5.2022 <https://yle.fi/uutiset/3-11174191>

Ålcom 2022. Viitattu 26.5.2022 <https://www.alcom.ax/english>