

Opinnäytetyö (AMK)

Tietojenkäsittely

2020

Tiina Tuupanen

# LANGATTOMAN TIEDONSIIRRON HISTORIA JA 5G

Tiina Tuupanen

## 5G JA LANGATTOMAN TIEDONSIIRRON HISTORIA

Langaton tiedonsiirto on kehittynyt vuosien myötä alkuasukkaiden rummuista ja merkkitulista sähköisiin lennättimiin, tiiliskiven kokoisista radiopuhelimista edelleen nykyajan mukavana kulkeviin älypuhelimisiin. Kehityksen tahti on ollut viimeisen 30 vuoden aikana päätä huimaava, ja olemmekin sen aikana ennättäneet jo viidennen sukupolven tiedonsiirtoteknologioihin. Nimen G-kirjain tulee englannin kielen sanasta generation – sukupolvi.

5G:tä edeltävät teknologiat sisälsivät muun muassa 1G-tekniikan analogiset verkot, kuten Pohjoismaissa käytetyn NTM:n, 2G:n myötä Eurooppaan tulleen, digitaalisen GSM-verkon ja sitä seuranneen 2,5G:n Packed datan, jossa GSM:ään lisättiin GPRS. 3G-tekniikan osalta työssä kerrotaan UMTS-verkon kilpailijasta WiMAXista, sekä WLAN:nista ja LTE:stä/LTE-A:sta, jotka sijoittuvat 3G:n ja 4G:n välimaastoon, mutta kuuluvat virallisesti 4G-määritelmän alle.

Nykytilanteen osalta tarkastellaan ensin 4G:tä ja sitten 5G:n kehityksen etenemistä niin maailmalla kuin Suomessakin sekä esitellään kehityksen avaintekijät. Tällä hetkellä 5G-tekniikka on käytössä suurimmissa kaupungeissa ja sitä tukevia laitteita on jo laskettu markkinoille. Tulevaisuuden osalta 5G-tekniikan on povattu tehostavan ja mahdollistavan paljon niin teollisuuden, terveydenhuollon kuin ihmisen jokapäiväisen elämän osalta. Nähtäväksi jää, kuinka älykkääksi teknologiayhteiskuntamme lopulta kehittyy.

Lopputulokseksi saatiin kokonaisuus, joka sisältää langattoman tiedonsiirron vaiheet historiasta nykypäivän 5G-tekniikkaan, esitellen samalla sen tekniset vaatimukset ja ominaisuudet. Lisäksi työ antaa näkemyksen siitä, mihin suuntaan langattoman tiedonsiirron kehitys on tulevaisuudessa menossa ja millaisia innovaatioita sen kehityskulku mahdollistaa.

### ASIASANAT:

Langaton tiedonsiirto, 3G, 4G, 5G, LTE, WLAN

BACHELOR'S / MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

ICT Business

Fall 2020 | 34 pages

Tiina Tuupanen

## 5G AND THE HISTORY OF WIRELESS NETWORKS

Wireless communication has evolved fiercely during the years, from aboriginal drums and beacons to electrical telegraphs and further from walkie-talkies to modern smart phones. The development has been rapid during the last 30 years and our society has reached the 5<sup>th</sup> generation wireless communications technologies.

The main purpose of this thesis is to give a literature review of the history and technologies leading 5G. It also describes the present state of 5G, globally and locally, and views its journey leading to the future.

Pre-5G technologies include, for example, analogic networks that fall under the 1G-category, such as NMT, which was used in Nordic countries and in Europe. 1G was followed by 2G technologies, one of the meaningful ones being the digital GSM-network, and the subsequent 2,5G technology, in which GRPS was added to the GSM. Regarding the following generation, 3G, this thesis will cover WiMAX, a competitor for the UMTS-network, as well as WLAN, LTE/LTE-A which took place between the 3G and 4G technologies, but officially belong under the 4G.

This thesis examines the progress of developing 5G, around the world and in Finland, mentioning the key principles for the development. Currently, 5G-network is available in big cities and brands have launched 5G supported devices. It has been foretold that 5G-technologies will enhance and allow many new innovations in different fields, such as industry and health care. It will also revolutionize our-day to-day lives with its many possibilities for smart devices. It remains to be seen how smart our society will evolve.

The result is a comprehensive ensemble, which includes the different phases of developing wireless communication technologies, from the history to 5G and its technical requirements and different features. This thesis also gives a direction of where the development of wireless communications is currently going and what kind of innovations its rapid evolution will allow in the future.

### KEYWORDS:

Wireless communication, 3G, 4G, 5G, LTE, WLAN

# SISÄLTÖ

## KÄYTETYT LYHENTEET

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>8</b>
<b>2 LANGATTOMAN TIEDONSIIRRON HISTORIA</b>	<b>10</b>
2.1 Tiedonsiirto nykypäivänä	10
2.2 Kolmannen sukupolven tiedonsiirtotekniikat	12
2.2.1 WiMAX-teknologia	12
2.2.2 WLAN	13
2.2.3 3G	14
2.2.4 LTE ja LTE-A-teknologiat	15
2.3 Neljännen sukupolven tavoitteet	15
<b>3 4G-TEKNOLOGIAN NYKYTILANNE</b>	<b>17</b>
3.1 Maailman 4G-verkosto	17
3.1.1 Kattavuus	17
3.1.2 Nopeus	18
3.2 Suomen 4G	19
3.2.1 Kattavuus	19
3.2.2 Nopeus	20
3.2.3 Kohti 5G:tä	21
<b>4 5G-TEKNOLOGIA</b>	<b>23</b>
4.1 Vaatimukset	24
4.1.1 ITU-R M.2083	24
4.1.2 NGMN (Next Generation Mobile Networks)	25
4.2 Kehitys	25
4.2.1 Eurooppa ja 5G	26
4.2.2 Aasia ja 5G	26
4.2.3 Suomi ja 5G	27
4.3 Avaintekijät	28
4.3.1 Radioliityntäteknologioiden (RAT) kehitys	29
4.3.2 SON – Self Organizing Network	29
4.3.3 MTC – Machine Type Communication	30

4.3.4 EE – Energy Efficiency	30
4.3.5 Verkkotoimintojen virtualisointi	31
4.4 Mahdollisuudet	31
4.4.1 5G Kotiin	31
4.4.2 Liikennevälineet	32
4.4.3 Hot Spots	32
4.4.4 Terveysthuolto	33
4.4.5 Teollisuus	33
4.5 Tulevaisuus	34
<b>5 LOPUKSI</b>	<b>35</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>36</b>

## **KUVAT**

Kuva 1. 4G-verkon kattavuus maailmanlaajuisesti.	18
Kuva 2. Langattomien tiedonsiirtoteknologioiden keskimääräinen yhteysnopeus verrattuna toisiinsa.	19
Kuva 3. Verkkojen siirtonopeudet Suomessa, vuosina 2018 ja 2019.	21
Kuva 4. Tie kohti 5G:tä.	25
Kuva 5. 5G-verkon kattavuus Suomessa, verrattuna 4G-verkon (sininen) kattavuuteen.	28
Kuva 6. 5G:n kymmenen peruspilaria.	28
Kuva 7. Verkkotoimintojen virtualisointi.	30

## KÄYTETYT LYHENTEET

1G	ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkko
2G	toisen sukupolven matkapuhelinverkko
3G	kolmannen sukupolven matkapuhelinverkko
3GPP	standardijärjestöjen yhteistyöorganisaatio, The 3rd Generation Partnership Project
4G	neljännen sukupolven matkapuhelinverkko
5G	viidennen sukupolven matkapuhelinverkko
6G	mahdollinen kuudennen sukupolven matkapuhelinverkko
CDMA	koodijakokanavointi, Code Division Multiple Access
EDGE	GSM-verkkojen tiedonsiirtostandardi, Enhanced Data rates for GSM Evolution
EE	energiatehokkuus, Energy Efficiency
FDMA	taajuusjakokanavointi, Frequency Division Multiple Access
Gbp/s	gigabittiä per sekunti
GRPS	GSM-verkkojen tiedonsiirtostandardi, General Packet Radio Service
GSM	digitaalinen matkapuhelinjärjestelmä, Global System for Mobile communications
IMT-2020	International Mobile Telecommunications 2020 -standardi
IoT	esineiden Internet, Internet of Things
ITU-R	Kansainvälisen Telekommunikaation Unioni – Langattoman Tietoliikenteen Sektori, International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector
ITU-T	Kansainvälisen Telekommunikaation Unioni – Standardisoinnin Sektori, ITU – Telecommunication Standardization Sector

LTE	neljännen sukupolven tiedonsiirtotekniikka, Long Term Evolution
LTE-A	paranneltu neljännen sukupolven tiedonsiirtotekniikka, Long Term Evolution Advanced
M2M	matkaviestinliittymät, jotka on tarkoitettu koneiden väliseen viestimiseen, Machine to Machine
Mbp/s	megabittiä per sekunti
MIMO	tietoliikennetekniikka, jossa lähetykseen ja vastaanottoon käytetään samanaikaisesti useampaa kuin yhtä antennia, Multiple Input Multiple Output
NGMN	matkapuhelintoimijoiden liittouma, Next Generation Mobile Network
NMT	ensimmäinen täysautomaattinen matkapuhelinverkko, Nordic Mobile Telephone
QoE	laadunvalvontaa ja testausta, Quality of Experience
RAT	radioliityntäteknologia, Radio Access Technology
SON	itsestäänohjautuva verkko, Self Organizing Network
TDMA	aikajakokanavointi, Time Division Multiple Access
UHD	ultrateräväpiirto, Ultra-High Definition
UMTS	maailmanlaajuinen liikkuvan televiestinnän järjestelmä, Universal Mobile Telecommunications System
VoIP	puheensiiro IP-verkoissa, Voice over IP
WAP	langattomien sovellusten protokolla, Wireless Application Protocol
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	langaton lähiverkko, Wireless Local Area Network

# 1 JOHDANTO

Kiihtyvää tahtia kehittyvässä teknologiayhteiskunnassamme tiedonsiirron merkitys on korostumassa entisestään, myös IT-alan ulkopuolella. Siirrettävän tiedon määrän ja koon kasvaessa käyttäjät vaativat verkkojen nopeuden ja luotettavuuden kehittyvän samaa tahtia. Älylaitteiden myötä suurta kapasiteettia vaativien palveluiden, kuten HD-videokuvaa tuottavien suoratoistopalveluiden käyttö on yleistynyt huomattavasti. Langattomalta tiedonsiirrolta vaaditaankin nyt samanlaista suorituskykyä kuin kiinteältä yhteydeltä.

Tämä opinnäytetyö kokoaa kirjallisuuskatsauksen muotoon langattoman tiedonsiirron elämänkaaren vaiheet, käy läpi aikaisempien sukupolvien aikana tapahtunutta kehitystä, suuntaa kohti nykypäivää ja siitä eteenpäin kohti tulevaisuutta. Työ tuo siis esille aikaisempaa tutkimusta liittyen langattomien tiedonsiirtoteknologioiden kehitykseen, rakentaen yhden tiiviin kokonaisuuden ja lopuksi esittää niihin perustuvia, kokoavia johtopäätöksiä älykkäästä tulevaisuudesta, jonka nykypäivän 5G-teknologia mahdollistaa.

Aihetta pohjustetaan esittelemällä ensin neljän aikaisemman sukupolven tiedonsiirtotekniikoita. Näiden osalta keskitytään erityisesti Suomen kannalta merkittäviin teknologioihin ja niiden historiaan. Ensimmäisen sukupolven teknologioista käydään läpi analogiset verkot, kuten Pohjoismaissa ja Euroopassa käytetyt NTM450 ja NTM900. 1G:n aikakauteen kuuluvat myös ensimmäiset satelliittiverkot. Toisen sukupolven myötä Eurooppaan saapui digitaalinen GSM-verkko ja sitä seurasi 2,5G:hen kuuluvan GPRS-teknologia, joka mahdollisti internettiin yhdistämisen GSM-laitteen avulla. Ennen 3G:tä GPRS:tä julkaistiin vielä pidemmälle kehitetty versio, EDGE, joka on nykyään standardina jokaisessa uudessa matkapuhelimessa. Kolmannen sukupolven teknologioiden osalta opinnäytetyössä kerrotaan WiMAXista, jonka ajateltiin kykenevän haastamaan WLAN-verkon ja GPRS:n. Erityisesti Euroopassa sen kuitenkin syrjäytti suosiollaan UMTS-verkko, joka suunniteltiin GSM-verkon seuraajaksi.

Ennen siirtymistä neljännen sukupolven teknologioihin, käsitellään 3G:n ja 4G:n väliin jäävät LTE ja LTE-A-teknologiat, joiden katsottiin kuuluvan 3,5G:n alle, mutta ovat virallisesti neljännen sukupolven tekniikkaa. Nämä olivat ensiaskeleita kohti 4G:tä, sillä niiden tekniikka oli edelleen yhteensopiva 3G:n kanssa, mutta nopeuden ja tehokkuuden osalta oli siirrytty jo seuraavan sukupolven puolelle. 4G:n oli tarkoitus tarjota entistä



suurempaa nopeutta ja kapasiteettia tiedonsiirrolle, tehden siitä entistä joustavampaa ja liikuteltavampaa, samalla säilyttäen sen kustannustehokkuuden.

Opinnäytetyössä keskitytään langattoman tiedonsiirron historian lisäksi erityisesti sen kirjoittamisen aikaan globaalisti kehitteillä olevaan 5G-tekнологiaan. Työssä käydään läpi 5G:lle asetetut vaatimukset, sen tekнологian arkkitehtuurin ja tekniikan takana olevat peruspilarit, tämän hetkisen tilanteen Suomessa ja maailmalla, sekä mitä tämän tekнологian odotetaan saavuttavan tästä eteenpäin. Onko aikaisempien sukupolvien kehitysaikatauluun luottaminen ja seuraavan kymmenen vuoden päästä vuorossa 6G? Tämä opinnäytetyö on suunnattu lukijalle, joka haluaa tiiviin katsauksen langattoman tiedonsiirron matkaan historiasta nykypäivän 5G-tekнологiaan ja sen erilaisiin mahdollisuuksiin. Vaikka 5G mullistaakin näillä näkymin langattoman tiedonsiirtotekнологian kehityksen, aikaisempien sukupolvien tekniikoiden ydintekнологioita ja standardeja hyödynnetään vielä pitkään.

## 2 LANGATTOMAN TIEDONSIIRRON HISTORIA

5G-tekniikan edeltäjiin kuuluvat aiempien sukupolvien teknologiat, kuten 4G ja 3G, NMT sekä GSM. Langaton tiedonsiirto on pitkän historian omaava tapa siirtää tietoa ja jonka ihminen on hallinnut jo pitkään muinaisten merkinantotulien ja alkuasukkaiden rummutuksien muodossa. Tässä osiossa käsitellään langatonta tiedonsiirtoa sen aikaisimmista muodoista alkaen, aina 4G:n ja 5G:n murrokseen saakka.

Aluksi langaton tiedonsiirto oli viestimistä kahden tai useamman ”päätelaitteen” välillä, ”päätelaitte”-käsitteen määritelmän ollessa hyvin venyvä. Päätelaitteena saattoi toimia visuaalista viestiä toimittavat nuotit tai ääniaaltoja pitkin korviin viestivät soittimet. Sotarummut ja -torvet ovat lukuisten sotien myötä tulleet tutuiksi, samoin kuin intiaanien savumerkit.

### 2.1 Tiedonsiirto nykypäivänä

Nykyajan ensimmäiset sähköiset tiedonsiirtomenetelmät tulivat 1800-luvulla, kun teollistumisen aikakausi oli lähtenyt voimakkaasti käyntiin. Alan pioneereina toimivat fyysikot Michael Faraday (1791–1867) ja James Clerk Maxwell (1831–1879).

Saksalainen fyysikko Heinrich Hertz (1857-1894) onnistui vuonna 1887 synnyttämään kipinäpurkauksen avulla säteilyä, nykynimeltään mikroaalloja. Näin syntyi värähtelyn mittayksikkö hertsi, Hz. Hertzin ura fyysikkona jäi kuitenkin lyhyeksi hänen kuoltuaan vain 43-vuotiaana, minkä jälkeen hänen työtään jatkoi venäläistutija Aleksander Popov (1859–1905). Popov onnistui luomaan kahden pisteen välille ensimmäisen radioyhteyden Kotkassa ja tästä muistuttaakin Popovin patsas Kotkan Isopuiston laidalla. Lopulta kuitenkin maailman ensimmäisen onnistuneen radioyhteyden myötä italialainen Guglielmo Macroni (1874–1937) sai patentin sähköiselle lennättimelle. (Connor & Robertson 2007., Nobelprize.org 2020.)

1900-luvun alkupuolella kokeiluun pääsi maailman ensimmäinen matkapuhelin ja seitsemänkymmentä vuotta myöhemmin ensimmäinen autoradioverkko (ARP) avattiin Suomeen. 1980-luvun alussa siirryttiin analogisen NMT-tekniikan (Nordic Mobile Telephone) aikakaudelle, kun vuonna 1982 otettiin käyttöön automaattivälitteinen NMT450-verkko ja vain vuotta myöhemmin Nokia esitteli maailmalle ensimmäisen NMT-autopuhelimensa Mobira Talkmanin, tuttavallisemmin ”Talkkarin”. Vuosikymmenen

loppupuolella alkoi kuitenkin olla tarvetta entistä tehokkaammalle puhelinverkolle, erityisesti tiheästi asutuilla alueilla, joten vuonna 1987 NMT-450 päivitettiin NMT900-verkoksi. Samana vuonna Nokia julkaisi ensimmäisen yksiosaisen ja kännykkä - käsitteen ihmisten huulille tuoneen, Mobira Cityman 900-puhelimensa. (Yle 2008.)

Ennen vuosituhaten taitetta verkkoteknologiat kehittyivät vauhdilla. Digitaaliset GSM-verkot (Global Service for Mobile Communications) avattiin vuonna 1990 ja matkapuhelimiin internetin tuonut WAP-standardi (Wireless Application Protocol) kehitettiin vielä samalla vuosikymmenellä. Samoihin aikoihin esiteltiin uusi mobiilitekniikka GPRS (General Packet Radio Service) jonka avulla matkapuhelimilla pystyttiin muodostamaan entistä helpommin ja edullisemmin yhteys internetiin, joten NMT-900-verkko suljettiin lopullisesti. GSM-tekniikka oli osana toisen sukupolven langatonta tiedonsiirtoa ja GPRS puolestaan sijoitetaan 2,5G-käsitteen alle – sen siis ajatellaan kuuluvan toisen ja kolmannen sukupolven tekniikoiden välimaastoon, sillä se oli käytännössä lisäominaisuus jo olemassa olevalle GSM-tekniikalle. Vuosituhaten vaihteessa ensimmäiset 2,5G-puhelimet saapuivat Suomen markkinoille, mutta ovat nyt väistyneet seuraavien sukupolvien tieltä. GPRS oli kuitenkin pitkään perusominaisuutena kaikissa uusissakin puhelimissa, ennen kuin EDGE korvasi sen. (Rodriguez 2015a.)

GPRS:tä julkaistiin kehittyneempi muoto EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution), jonka katsotaan olevan kahden sukupolven välissä, eli muotoa 2,5G. Se kulkee myös nimellä EGPRS (Enhanced GPRS.), joka on nimensä mukaisesti hieman paranneltu versio. Suomeen EDGE saapui vuonna 2003 ja se on nykyään standardina kaikissa uusissa matkapuhelimissa. (3GPP 2020.)

Vuonna 2002 kotimaan markkinoille esiteltiin uusi langaton tekniikka lyhyiden etäisyyksien tiedonsiirtoon, nimeltään Bluetooth. Nykyään Bluetooth-yhteys on suosituimpi kuin koskaan; lähes kaikki lyhyiden etäisyyksien audiolaitteet, kuten kuulokkeet ja kaiuttimet, yhdistyvät päätelaitteeseen sen välityksellä, AUX-liitännän sijaan. Matkapuhelinten ja tietokoneiden älyllistymisen myötä myös lisälaitteet, esimerkiksi älykellot, hiiret, näppäimistöt ja jopa ulkoiset kovalevyt toimivat Bluetoothin välityksellä.

Kolmannen sukupolven UMTS-verkon (Universal Mode Telecommunication System) testaaminen aloitettiin Suomen puolella vuonna 2002 ja Nokia julkaisi ensimmäisen 3G-

puhelimensa jo samana vuonna. Virallisesti UMTS-verkko otettiin käyttöön vuonna 2004 ja sen päätavoitteena oli luoda yksi, koko maailman kattava verkko. (Yle 2004.)

## 2.2 Kolmannen sukupolven tiedonsiirtoteknologiat

Tässä luvussa vertaillaan kolmea langatonta tiedonsiirtotekniikkaa, jotka olivat vahvimpina ehdokkaina muodostamaan tulevalle 4G:lle perusrakenteen ja näin ollen sopimaan myöhemmin myös 5G:n perustaksi. Luvussa käsiteltävät tekniikat ovat WiMAX, 3G ja WLAN. Lisäksi käydään läpi LTE-verkon perusominaisuudet.

### 2.2.1 WiMAX-teknologia

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) on langaton laajakaistateknikka. Sen perustana on IEEE 802 -sarjan avoin 802.16-standardi, joka valmistui syksyllä 2001 ja julkaistiin virallisesti 8.4.2002. (WiMAX Forum 2020a.)

Tarkoituksena WiMAX-teknologiassa oli tarjota verkkoliikennenopeuksiltaan televisioverkon välitteisesti toimivaa kaapeliyhteyttä- ja lankapuhelinverkon kautta toimivaa DSL-liittymää vastaava, kaapeliton yhteys, jonka käyttö ei ole esimerkiksi rakennuskohtaista. WiMAXin toiminta-alue on huomattavasti WLAN-verkkoa suurempi, mutta yli 20 kilometrin etäisyyttä vaativat yhteydet tarvitsivat kuitenkin suoran näköyhteyden tukiasemaan. (Poole, 2010.)

WiMAXin käytöllä oli monia etuja, joista tärkeimmät olivat joustavuus ja edullinen hinta. Verkko voitiin pystyttää nopealla aikataululla ja pienellä budjetilla asentamalla tietyille katealueelle vain muutamia tukiasemia. Tällaiseen laajakaistaverkkoon oli mahdollista liittää laajoja toimintoja, kuten puhelinpalveluja, äänen ja datan siirtomahdollisuus, erilaisia videosovelluksia sekä tärkeimpänä nopea internetyhteys. Verkkoyhteys toimii niin tiheään kuin harvaankin asutuilla alueilla, eivätkä sääolosuhteet vaikuttaneet sen toimivuuteen. (WiMAX Forum 2020b.)

WiMAX-tuotteet olivat erityisen joustavia omaa infrastruktuuriaan hyödyntäville palveluntarjoajille, sillä WiMAX oli yhteensopiva monien eri verkkotyyppeiden kanssa. Sen avulla pystytään kasvattamaan jo olemassa olevaa infrastruktuuria, pitämään kulut

alhaisina ja vastaamaan samalla järjestelmän tukemista vaativaa siirtonopeutta. (WiMAX Forum 2020b.)

Suuren kantoalueensa ja langattomuutensa vuoksi WiMAX katsottiin sopivan hyvin yhteyksien tarjoamiseen harvaan asutuille seuduille, joille muiden yhteyksien rakennuttaminen olisi kallista ja vaikeaa. Kaupunkialueita kattavien verkkojen toteutus vaatii kuitenkin operaattoreilta erittäin paljon resursseja; samaa teknologiaa käyttäen käyttäjän pitäisi pystyä liikkumaan yhdestä solusta toiseen yhteyden katkeamatta. WiMAXin ajateltiin olevan varteenotettava kilpailija Wi-Fi-yhteydelle. Verkon rajoitettu nopeus ja tukiasemien vähyys on lopulta ollut syynä verkon alasajoon muun muassa Yhdysvalloissa. (Poole 2010.)

Etelä-Savon ja Pohjois-Karjalan alueilla ollut WiMAX-verkko ajettiin alas tekniikan vanhenemisen takia. Sen ylläpito kävi lopulta kannattamattomaksi, sillä verkolla oli Suomessa vain noin 200 tukiasemaa, eikä sen huoltamista varten saatu enää varaosia. Ylläpitokustannukset nousivat ja loppukäyttäjän päätelaitteiden hinta jäi korkeaksi. Laitetoimittajien määrän kuihtuessa ja kilpailijoiden suorituskyvyn rakettimaisen kehityksen vuoksi WiMAX-verkon elinkaari on Suomessa ja koko maailmassa tullut tiensä päähän. Vuonna 2015 yhdysvaltalainen operaattori Sprint alkoi sulkemaan WiMAX-verkkojaan ja Suomessakin haja-asutusalueilla tilalle tuli ensin LTE-verkko ja edelleen myöhemmin 4G-verkko. (Poole 2010.)

### 2.2.2 WLAN

WLAN (Wireless Local Area Network) tarkoittaa paikallista langatonta lähiverkkoa, jossa verkkolaitteet pystytään liittämään toisiinsa ilman kaapeleita. Langaton lähiverkko tunnetaan myös yleisesti nimellä Wi-Fi, joka ei itsessään tarkoita mitään. Tällainen yhteys on pääasiassa käytössä kotitalouksissa, ravintoloissa, ostoskeskuksissa ja jopa liikennevälineissä. (Escobar 2015.)

Langattoman verkon suurin heikkous on kuitenkin sen suhteellisen lyhyt kantama, joka on enimmillään vain 100-200 metriä ilman esteitä. Tämän vuoksi se toimii parhaiten kotitalouksien käytössä, jolloin yhden lähetinaseman kantavuuden ei tarvitse olla kovin suuri, eikä sen kuormitus kasva mahdottomaksi. Suuremmissa rakennuksissa, kuten

toimistoissa tai muilla vilkkailla paikoilla kaupungeissa, lähetinasemia on yleensä useampia, jolloin käyttäjä on kantaman sisällä ollessaan missä päin rakennusta tahansa. Useampi lähetinasema varmistaa myös, että verkon käyttökapasiteetti vastaa käyttömäärää. (Escobar 2015.)

Langattomat lähiverkot ovat yleistyneet Suomessa, mutta sen ja matkapuhelinjärjestelmien integroitumisen myötä langattoman verkon käyttö kotitalouksien ja työpaikkojen ulkopuolella on suhteellisen vähäistä. Puhelinten tarjoamat ominaisuudet, kuten oman yhteyspisteen jakaminen, ovat syrjäyttäneet käyttäjien tarpeen maksaa erikseen puhelinliittymän lisäksi langattomasta yhteydestä. Kuitenkin esimerkiksi Yhdysvalloissa ollaan vielä melko riippuvaisia Wi-Fi-yhteyksistä, sillä maassa ei ole kattavaa 4G-verkkoa, mikä puolestaan nostaa sitä tarjoavien puhelinliittymien kustannuksia käyttäjien maksukyvyn ulottumattomiin.

### 2.2.3 3G

3G on kansainvälinen lyhenne kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologioille. Kansainvälinen viestintäliitto ITU-T loi aikanaan yleiset määritelmät uudelle, kolmannen sukupolven tiedonsiirtotekniikalle. Päävaatimukset yhteydelle olivat joustavuus, edullisuus, yhteensopivuus ja muokattavuus. 3G-verkon on oltava erittäin saumaton liikuteltavuudeltaan ja tuettava isoa määrää erilaisia palveluita ja sovelluksia. Se tulisi olla myös edullista hankkia, mikä rohkaisisi käyttäjiä ja operaattoreita uuden 3G-järjestelmän käyttöönotossa. 3G:n sisältävien järjestelmien tulisi olla myös yhteensopivia aikaisempien, jo olemassa olevien matkapuhelinstandardien kanssa, sillä tukeakseen suurenevia käyttäjämääriä ja kattavuutta sen tuli olla helposti laajennettavissa. (International Telecommunication Union 2003.)

3G antoi mahdollisuuden arvoa tuottaville palveluille ja sovelluksille ainoastaan yhden standardin avulla. Se tarjosi joustavaa liikkuvuutta eri verkkojen ja jopa maiden välillä. 3G loi alustan, jolla voisi jakaa kasvavin määrin erilaisia multimedialpalveluita. Kolmannen sukupolven teknologian odotettiin myös kykenevän entistä nopeampien yhteyksien tukemiseen; paikalla olevaan kohteeseen miniminopeuden tulisi olla noin 2 Mbit/s ja liikkuvaan kohteeseen puolestaan noin 384 bit/s. (International Telecommunication Union 2003.)

#### 2.2.4 LTE ja LTE-A-teknologiat

LTE (Long-Term Evolution) on 3GPP:n lanseeraama verkkostandardi. Teknologia oli GSM-, EDGE- ja UMTS-standardien seuraaja ja sen katsottiin olevan iso harppaus neljännen sukupolven mobiiliverkkojen kehityksessä. LTE:n määriteltiin aluksi 3,5G:n alle, sillä se ei sopinut ITU-T:n antamiin suuntaviivoihin koskien 4G-teknologiaa. Myöhemmin se kuitenkin lisättiin virallisesti 4G -käsitteen alle. (Khan 2011.)

LTE oli kokonaan uusi standardi; sen päätavoitteita olivat 3G-tekniikoihin verrattuna entistä nopeammat datayhteydet, taajuuksien skaalautuvuus, kyky toimia kokonaan IP-pohjaisena verkkona ja rajapintana, joka tukee laajaa käyttäjätyyppikirjoa. (Khan 2011.)

LTE-A (LTE Advanced) on puolestaan 3GPP:n ehostama versio LTE:stä ja sen tarkoituksena oli kasvattaa jo olemassa olevaa kapasiteettia, sekä lisäksi nostaa verkon nopeutta kustannustehokkaasti. Samalla LTE-A täytti 4G:lle asetetut vaatimukset. LTE:hen verrattuna LTE-A nosti tiedonsiirtonopeuksia, lisäsi samanaikaisten käyttäjien määrää ja paransi verkon toimivuutta aivan sen kantoalueen äärioloihin. Suomessa LTE-A tarkoittaa käytännössä kahden 20 MHz:n taajuusalueen samanaikaista käyttöä, mutta nykyään tekniikka mahdollistaa erikokoisten taajuusalueiden yhdistelyä. (Wannstrom 2013.)

#### 2.3 Neljännen sukupolven tavoitteet

Odotukset ennen 4G-yhteyksien julkaisua olivat valtavat. 4G:n uskottiin sallivan aivan uudenlaisen tavan siirtää dataa langattomasti. Tässä tiedonsiirtometodissa synkroniset yhteydet useisiin tehokkaisiin verkkoihin mahdollistavat entistä joustavamman, langattoman tiedonvälityksen, missä tahansa maailmankolkassa. Verkoja ylläpitävät operaattorit voisivat käyttää langattomia yhteyksiä, joissa jokainen verkkoon kytketty laite toimii solmukohtana, liittääkseen yhteen useita eri verkoja ja jakaakseen tehokkaasti sen sisäistä liikennettä.

Tavoitteena oli saavuttaa jopa 100 Mbit/s:n yhteys langattomasti kahden yhteispisteen välille, missä tahansa. Sen tuli myös toimia nykyisten langattomien verkkojen kanssa ja erilaisten verkkojen välisen siirtymisen tuli tapahtua saumattomasti. Myös tietoturvan

täytyi olla vahva, sillä 4G oli edeltäjänsä kanssa kokonaan IP-pohjainen teknologia. Kokonaisuudessaan tarkoitus oli tarjota käyttäjille korkeatasoinen ja tehokas yhteys seuraavan sukupolven multimediasovelluksia varten. (Nigam & Siljerud 2006.)



## 3 4G-TEKNOLOGIAN NYKYTILANNE

Tässä käsitellään 4G-tekniikan nykytilanne Suomessa ja maailmalla, sekä lähitulevaisuuden toimenpiteitä kehitteillä olevaan 5G-tekniikkaan.

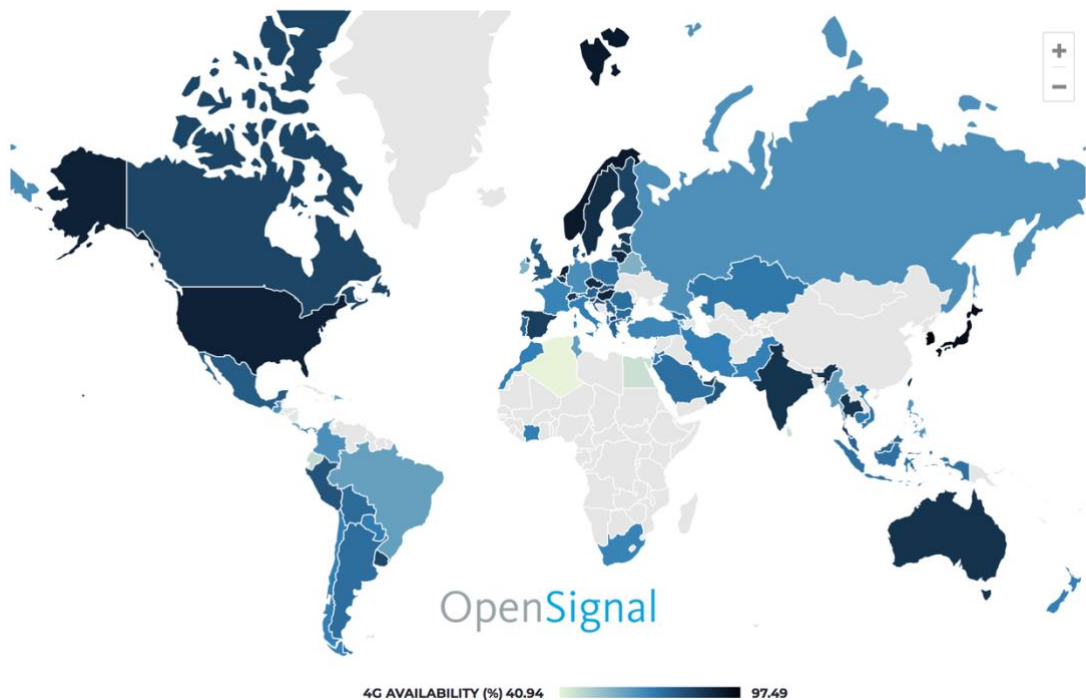
4G:n etuina oli 3G:hen verrattuna erityisesti nopeus: suuretkin tiedostot oli mahdollista ladata nopeasti, videokuvaa voitiin toistaa viiveettömästi ja raskaidenkin sovellusten käyttö oli nyt sujuvaa lähes missä tahansa. Käyttökokemus 4G-mobiiliverkossa oli vastaava kuin kiinteässä laajakaistayhteydessä, mikä on yhdessä matkapuhelinten kehityksen kanssa saanut pidemmällä aikavälillä kiinteän laajakaistayhteyden suosion hiipumaan.

### 3.1 Maailman 4G-verkosto

#### 3.1.1 Kattavuus

Euroopan sisällä ensimmäiset 4G-verkot otettiin käyttöön Norjassa ja Ruotsissa vuoden 2009 lopussa ja Suomi seurasi perässä vuonna 2010. Ensimmäinen operaattori, joka tarjosi 4G-yhteyttä näihin maihin, oli TeliaSonera. (Yle 2010.) Tällä hetkellä 4G verkko on saatavilla lähes jokaisessa maassa, Afrikkaa ja joitain Kaakkois-Aasian alueita lukuun ottamatta (Kuva 1).

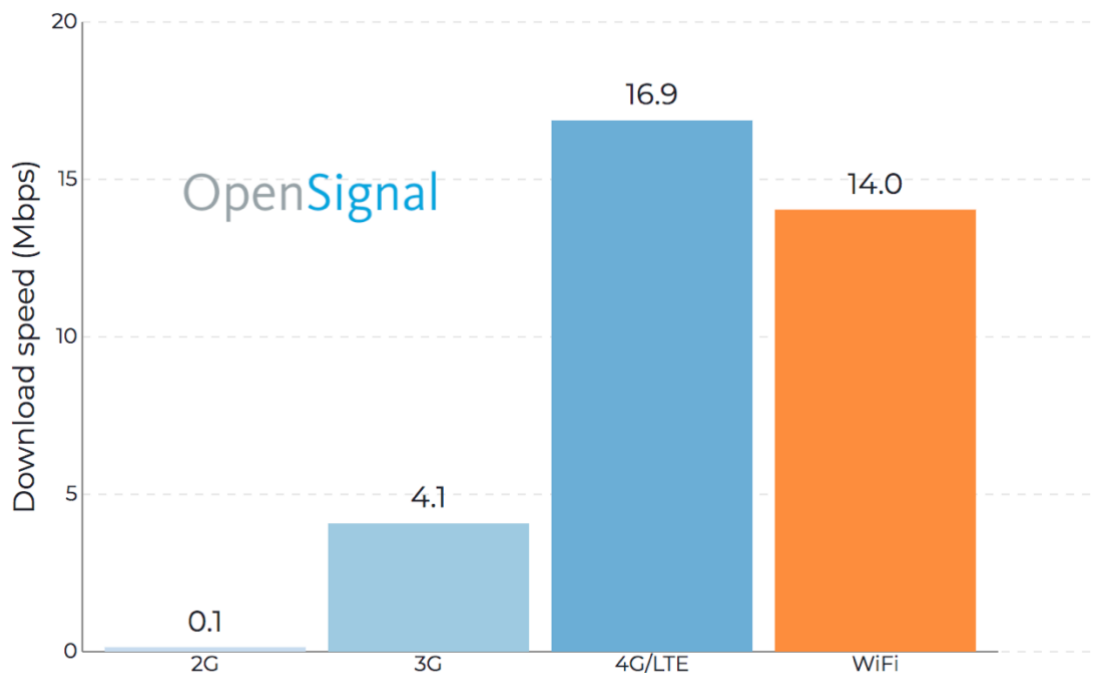
Googlen emoyhtiö Alphabetiin kuuluva Loon suunnitteli vuonna 2018 rakentavansa kaasupalloilla toimivan langattoman verkon Keniaan yhteistyössä kenialaisen operaattorin Telkom Kenyan kanssa. Kyseessä olisi Loonin ensimmäinen kaupallinen sopimus Afrikassa. Kesällä 2020 internetiä tarjoavat kaasupallot nousivat taivaalle. Aiemmin vastaavia kaasupallo-tekniikkaa on käytetty kesällä 2017 Puerto Ricossa hurrikaani Marian jälkeen.



Kuva 1. 4G-verkon kattavuus maailmanlaajuisesti. (OpenSignal 2018.)

### 3.1.2 Nopeus

Globaali matkapuhelinteollisuus on jatkuvasti venyttänyt 4G-tekniikan rajoja luodakseen niin nopeita verkkoja kuin on mahdollista. Kehittynyt matkapuhelintekniikka ja uusi, valtava operaattorien kirjo ovat nostaneet 4G-verkon keskinopeuden ensin 20 Mbp/s, siitä 30 Mbp/s ja vuoden 2018 aikoihin nopeus oli saatu nostettua jo 40 Mbp/s. Matkapuhelinteollisuus odotti ja odottaa edelleen suurta läpimurtoa, joka saisi siirtonopeudet nostettua yli 50 Mbp/s kansallisella tasolla. Edes nopeimman 4G-verkon tittelin omaavat maatkin voivat vielä vain haaveilla tuon rajan ylittämisestä; maailman nopein 4G-yhteys sijaitsee Singaporessa ja sielläkin verkon nopeus jää alle 45 Mbp/s, toisena tulee Alankomaat, joissa nopeus ylittää juuri ja juuri 40 Mbp/s. 4G-yhteyden nopeuskeskiarvo oli vuonna 2018 yli nelinkertainen verrattuna edellisen sukupolven 3G-yhteyteen (Kuva 2).



Kuva 2. Langattomien tiedonsiirtoteknologioiden keskimääräinen yhteysnopeus verrattuna toisiinsa. (OpenSignal 2018.)

## 3.2 Suomen 4G

### 3.2.1 Kattavuus

Suomessa 4G-verkko kattaa suurimman osan maasta. Vuosien 2014-2017 aikana operaattorit laajensivat verkkojaan nopeaan tahtiin ja jo vuonna 2015 operaattorien 4G-kattavuuden katsottiin vaihtelevan vajaasta 90 prosentista yli 95 prosenttiin väestöstä. DNA ja Sonera yhdistivät taajuuskapasiteettinsa ja rakensivat yhdessä 4G-verkkoa koko Lapin alueelle ja Itä-Suomeen. Verkot valmistuivat 2016 ja sen myötä katveeseen jää enää alle prosentti lappilaisista. (Yle 2016.)

Itärajalta jää pitkä, lähes 40 kilometrin levyinen kaistale, jossa 4G toimii ainoastaan kaupunkien kohdalla. Nopean verkon rakentamisen kaupunkien ulkopuolelle estää Venäjän kanssa tehty sopimus, jossa käyttämän 800 MHz taajuusalueen käyttöä rajoitetaan itärajan tuntumassa. Taajuusalue on varattu Venäjällä sotilaskäyttöön ja näin ollen vaarana on, että suomalainen matkapuhelinverkko häiritsee ilmailututkia. Rajan tuntumassa olevissa taajamissa voidaan kuitenkin käyttää 1800 MHz taajuusaluetta,

mutta tukiasemia tarvitaan niin tiuhaan, ettei verkkoa ole kannattavaa rakentaa maaseuduille. (Yle 2020.)

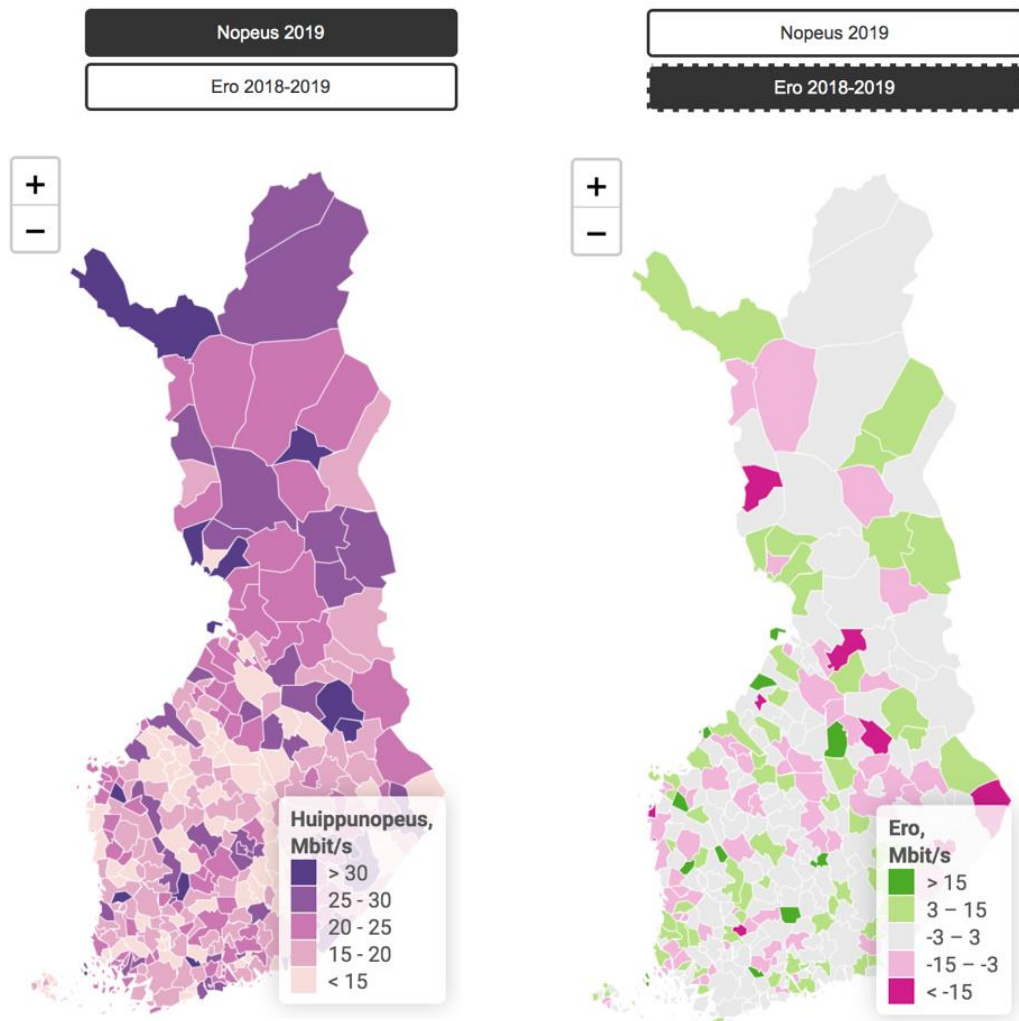
### 3.2.2 Nopeus

Mobiilidatan käyttö Suomessa ja maailmalla on lisääntynyt jatkuvasti 2010-luvun aikana. Liikenteen kasvu on näkynyt suurina haasteina erityisesti operaattoreilla, sillä tiedonsiirtonopeuksiin vaikuttavat verkon käyttäjien lukumäärän lisäksi se, kuinka paljon dataa verkossa liikkuu samanaikaisesti. Samalla kun operaattorit taistelevat asiakkaista, on jatkuvasti keskiössä se, miten saada yhteyksien laatu pysymään samana käyttäjäkunnan kasvaessa. Mikäli vain muutaman tukiaseman kantoalueella on paljon aktiivisia laitteita, yksittäisen käyttäjän verkko voi katkeilla ylikuormituksen vuoksi. Tämän seurauksena operaattorien tulee rakentaa lisää tukiasemia ja kasvattaa verkon kapasiteettia kysynnän mukaan, jotta yhteyksien laatu ei kärsisi. (Yle 2020.)

Koko Suomen tasolla 4G yhteyksien keskimääräinen huippunopeus on pysynyt lähes sama vuosina 2018 ja 2019 (Kuva 3). Kun nopeuksia tarkastellaan pidemmällä aikavälillä, huomataan, että lasku on ollut merkittävää. Vuonna 2015 nopeudet olivat vielä keskimäärin yli 30 Mbp/s, kun taas neljä vuotta myöhemmin, vuonna 2019 nopeus oli laskenut seitsemän yksikön verran noin 23 Mbp/s:iin. Tiedonsiirtonopeudet ovat siis olleet jatkuvassa laskussa näiden kuluneiden neljän vuoden aikana ja tippuneet yhteensä jopa neljänneksen. Toisaalta, kuluttajan teleoperaattorin kanssa tekemästä sopimuksesta ilmenee, että käyttäjän saama todellinen nopeus voi vaihdella luvatusuuresti. (Yle 2020.)

Todellinen huippunopeus voi olla vain 5 tai 10 Mbp/s luokkaa, vaikka sopimuksessa maksiminopeuden voidaan luvata olevan jopa 600 Mbp/s. Myös erot kuntien välillä ovat suuria. (Yle 2020.)

Seuraavan viiden vuoden aikana Euroopan Unionin alueen sisällä kaikilla kotitalouksilla tulisi olla mahdollisuus nettiliittymään, jonka nopeus on vähintään 100 Mbp/s. Euroopan komissio vaatii myös, että nopeus pitäisi pystyä tulevaisuudessa kasvattamaan jopa 1000 megabittiin, eli yhteen gigabittiin, sekunnissa. (Yle 2020.)



Kuva 3. Verkkojen siirtonopeudet Suomessa, vuosina 2018 ja 2019. (Yle 2020.)

### 3.2.3 Kohti 5G:tä

Olemme todistaneet mobiiliverkkoja käyttävän tietoliikenteen eksponentiaalista kasvua jo useiden vuosien ajan. Cison visuaalisen tietoliikenneindeksin mukaan mobiilidataliikenteen määrä on tuplaantunut vuosien 2010 ja 2011 aikana, ja kasvu on edelleen jatkunut kiihtyvänä vuosikymmenen loppua kohden. Tämä piikki mobiilidatan käytössä johtuu pääasiassa dataa kuluttavien mobiililaitteiden määrän kasvusta ja niiden yleistymisestä ihmisten arjessa; suurimpana syynä älypuhelimet. Sosiaalinen media on vuosi vuodelta kasvattanut merkitystään käyttäjien keskuudessa, paljastaen kokonaan uuden kulutuskäyttäytymisen mallin ja mobiilidatan käytön kasvavan määrän. (Rodriguez 2015a.)

Mobiililaitteiden yleistymisen ja käytön kasvun lisäksi toinen tärkeä tekijä mobiilidatan räjähdysmäisessä kasvussa on edistyneiden multimediasovellusten, kuten UHD:n (Ultra-High Definition) ja 3D-kuvan, kasvava kysyntä. Tänä päivänä liikkuva kuva vie yli 50 prosenttia maailmanlaajuisesta mobiilidataliikenteestä, jolloin entistä nopeammille ja tehokkaammille verkoille on jatkuvasti suurempi tarve. (Rodriguez 2015a.)

Teleoperaattorit rakentavatkin parhaillaan kiivaalla tahdilla tulevaa, viidennen sukupolven matkapuhelinverkkoa. 5G-verkko mahdollistaisi nopeuksien kasvattamisen langattomasti, jolloin maahan ei välttämättä tarvitsisi kaivaa yhtä paljon valokuitukaapelia. Kotitaloudet, joilla on jo hyvä 3G- ja kohtalainen 4G-kattavuus ovat vahvoja kandidaatteja 5G-ratkaisulle. 5G-verkolla on kuitenkin aiempia sukupolvia lyhyempi kantama, joten se tarvitsee enemmän tukiasemia, eikä näin ollen 5G-verkko tule peittämään esimerkiksi Suomessa koko maata vielä useaan vuoteen. Siksi 4G:llä tuleekin pitämään tärkeän roolinsa vielä tulevien vuosien 5G:n kehityksen aikana. (Yle 2020.)

## 4 5G-TEKNOLOGIA

Kuluneiden vuosien aikana on huomattu, että tulevaisuuden internetin, 5G:n kulmakivet tulisivat ovat erilaiset palvelut ja applikaatiot, matalamman suoritustehon vaativista IoT-laitteista ja sosiaalisen median sovelluksista korkeampaa suoritustehoa vaativaan HD-videokuvaan ja tehdaslaitteisiin. Näin ollen erilaisten palveluiden ja applikaatioiden tulisi tukea yhä useampia laitteita ja yhdessä verkon kanssa madaltaa viiveitä. Esimerkiksi VoIP-sovelluksissa (Voice over IP) viive saa olla enintään 150ms (millisekuntia), värinää 30ms ja alle 1 prosentti datahävikkiä, jotta käyttäjälle voidaan tuottaa optimaalinen käyttäjäkokemus (QoE, Quality of Experience). Tämä vaatii paljon suoritustehoa niin laitteelta, kuin käytössä olevalta verkoltakin. (Rodriguez 2015a.)

Motiivina vauhdikkaassa mobiiliverkkojen kehityksessä onkin tarve saada tarpeeksi kaistatilaa kasvavassa määrin videoiden toistamiseen, viestintäsovelluksille, internetin selaamiselle ja nopealle tiedonsiirrolle, jotta ne ovat käyttäjän saatavilla missä vain ja milloin vain. Keskiössä tässä ovat olleet älypuhelimet. Käyttäjien vaatimuksien ja tarpeiden kasvaessa myös verkon on kestävä entistä suurempaa kuormaa. Suurimman eron 5G:n ja aikaisempien sukupolvien teknologioihin tekeekin juuri se, miten suurta sovellusten kirjoa 5G-verkon tulee tukea. Tämän kirjon laitteiden äly ja niiden takana piilevä teknologia kehittyy jatkuvasti, ja niiden täytyy oppia täyttämään ihmisen tarpeet automaattisesti seuraamalla esimerkiksi käyttäjän käyttäytymistä, ympäristöä tai liiketoiminnan prosesseja. (Chandramouli, et al. 2019a.)

5G on konsepti, jossa personointi yhdessä yhdisteltävyyden kanssa kohtaa verkkotyöskentelyn uudet innovaatiot kokoamalla ne yhden suuren, markkinoita johtavien teknologioiden muodostaman katon alle. Tällaisen katon vuonna 2020 muodostaisivat M2M-liittymät, kognitiiviset radio- ja verkkoteknologiat, datan louhinta, erilaiset päätöksenteko- ja tietoturvateknologiat sekä pilvipalvelut. 5G punoo yhteen laitteet, jotka käyttävät useampaa langatonta liitäntää sekä laitteet, jotka käyttävät useampaa kuin yhtä taajuusaluetta. Näin voidaan tukea laitteiden liikuteltavuutta, tarjoten samalla koko ajan parempaa tiedonsiirtonopeutta. (Prasad 2014.)

Euroopan Unioni esittikin Public Private Partnership-ohjelman, tavoitteena tuottaa seuraavan vuosikymmenen aikana ratkaisuja, arkkitehtuureja, teknologioita ja standardeja ympäröivää 5G-verkon infrastruktuuria varten. Oletettiin, että vuonna 2020 5G-verkko kykenisi yhdistämään kaiken monimuotoisten sovelluskohtaisten vaatimusten

mukaan: ihmiset, asiat, prosessit, sisällön, tietämyksen, tiedon ja hyödykkeet. Kaikki nämä olisi yhdistetty joustavalla, liikuteltavalla ja tehokkaalla tavalla. (Rodriguez 2015b.)

5G tulisi olemaan alusta, joka mahdollistaa kasvun monen eri teollisuuden saralla; tietotekniikan, autojen, viihteen, maatalouden, turismin ja tehdasteollisuuden. 5G yhdistäisi tehtaot tulevaisuuteen ja auttaisi luomaan täysin automatisoidun ja joustavan tuotantojärjestelmän. Se toimisi myös entistä tehokkaamman infrastruktuurin vauhdittajana ja auttaisi säästämään resursseja. (Chandramouli, et al. 2019a.)

5G:n tähtäimessä olisikin mullistaa nykyisten tiedonsiirtoteknologioiden kehitys tuomalla markkinoille yksi, maailmanlaajuinen ydinverkko, johon muut teknologiat voisivat tulevaisuudessa integroitua. (Prasad 2014.)

#### 4.1 Vaatimukset

##### 4.1.1 ITU-R M.2083

Kansainvälisen televiestintäliiton (The International Telecommunication Union) radioviestintäsektori (ITU-R) hallitsee kansainvälistä radiotaajuusspektriä ja satelliittien kiertoratojen resursseja. Syyskuussa 2015 ITU-R julkaisi suosituksen M.2083, asettaen alustavan vision IMT-2020 standardille. Kyseisessä dokumentissa ITU-R kuvailee käyttäjä- ja sovellustrendejä, tietoliikenteen kasvua, erilaisia teknologiatrendejä ja antaa suuntaviivat IMT-2020:n rungolle ja kapasiteetille. Seuraavien trendien tunnistaminen johti myöhemmässä vaiheessa 3GPP:n (3rd Generation Partnership Project) määrittämiin perustavanlaatuisiin edellytyksiin 5G-verkkoa varten:

- Erittäin alhainen latenssi ja luotettavat yhteydet
- Tukee suurta käyttäjämäärää, esimerkiksi yhden alueen sisällä
- Tukee tarkkoja paikantamistekniikoita
- Tukee IoT:tä (Internet of Things)
- Korkealaatuiset ja nopeat yhteydet
- Tukee tehostettuja multimediapalveluita ja äänen, kuvan sekä tiedon välittämistä.

(Chandramouli, et al. 2019b.)

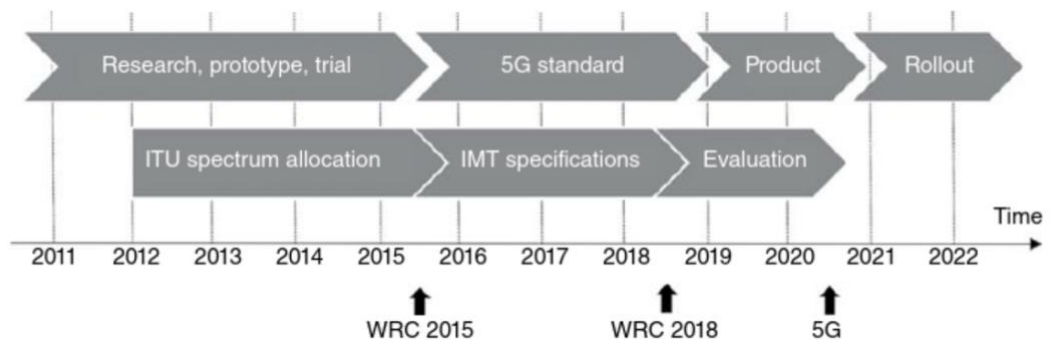


#### 4.1.2 NGMN (Next Generation Mobile Networks)

Next Generation Mobile Networks on useiden eri toimijoiden yhdistys, johon kuuluu esimerkiksi operaattoreita, laitevalmistajia ja tutkimuslaitoksia. Se perustettiin vuonna 2006 avoimeksi foorumiksi, jossa arvioitiin uusia ehdokasteknologioita yhtenevien ratkaisujen tueksi langattomien verkkojen kehityksessä. NGMN:n tavoitteena on varmistaa tulevien mobiililaajakaistaverkkojen onnistunut kaupallinen lähtölaukaus, käyttäen apuna etenemissuunnitelmaa ja onnistuneita käyttäjäkokemuksia.

Helmikuussa 2015 NGMN julkaisi 5G White Paper -nimisen julkaisun, joka sisälsi 5G:tä koskevia keskeisiä vaatimuksia, koskien käyttäjäkokemusta, suorituskykyä, laitemahdollisuuksia, uusia liiketoimintamalleja, sekä verkon toimintoja ja käyttöönottoa. 5G White paperia pidetään mallina 5G-tekniikan määrittelyille, sen arkkitehtuurille ja suunnittelutyölle. Näissä huomioidaan myös kuluttajien, yritysten, palveluntarjoajien ja teollisuuden tarve sekä kysyntä vuonna 2020 ja siitä eteenpäin. Julkaisun ensisijainen tavoite on sallia ja tukea 5G:tä maailmanlaajuisena standardina. (Chandramouli, et al. 2019c.)

#### 4.2 Kehitys



Kuva 4. Tie kohti 5G:tä (Rodriguez 2018c.)

Tällä hetkellä, vuonna 2020, on ylitetty odotukset 5G:n kehittämisessä, että tuotekehitys (Product Development) on jo takana päin ja ensimmäiset 5G-verkot ovat jo toiminnassa ympäri maailman.

#### 4.2.1 Eurooppa ja 5G

Viimeisimmät Euroopassa tehdyt tutkimukset ovat tuoneet esiin monia hyötyjä mobiiliteknologioiden saralla, monia näistä pidämme tänä päivänä itsestäänselvyyksinä. Näitä ovat esimerkiksi 2G GSM-standardi ja teknologiat, joita käytettiin 3G UMTS:ssä (Universal Telecommunications System), sekä 4G LTE-standardit. Oikeaan aikaan tapahtuva 5G:n kehitys on erittäin tärkeää Euroopan talouden nostattamisen, alan kilpailukyvyn kasvattamisen ja uusien työmahdollisuuksien kannalta. 5G:n kehityksessä johtaminen on Euroopan Unionille kriittistä, pääasiassa kehityksen esittäessä elintärkeää roolia maanosan taloudellisessa kasvussa. 5G:n pioneerina toimiminen edistää myös Euroopan johtoaseman turvaamista globaalissa teknologiateollisuudessa. Näyttäisi kuitenkin, että itäiset kilpailijat Kiina ja Etelä-Korea haastavat tätä johtoasemaa. (Rodriguez 2015b.)

Historian osalta Euroopan matkapuhelinteollisuus on aina ollut maailmanlaajuisen kilpailun eturintamassa GSM-teknologian alkuaajoista aina UMTS ja LTE-teknologioihin saakka. Se edustaa edelleen noin 40 prosenttia maailmanlaajuisista matkapuhelinmarkkinoista, mutta on jäämässä pahasti jälkeen kilpailijoistaan ja haluaa kuroa välimatkaa kiinni johtamalla 5G-teknologian saralla. (Rodriguez 2015b.)

Euroopan Unionin tavoitteet 5G:n suhteen olivat, että vuoteen 2020 mennessä jokaisessa jäsenmaassa olisi vähintään yksi kaupunki, jossa olisi täysin kaupallinen 5G-verkko. Tavoitteena vuoteen 2025 mennessä jäsenmaiden kaikki kaupunkialueet ja niiden väliset liikennöintiväylät olisivat katettu katkeamattomalla 5G-peitolla. (Trafi.com 2019.)

#### 4.2.2 Aasia ja 5G

Aasia seuraa Euroopan jälkiä 5G:n kehityksessä. Etelä-Koreassa luotiin 5G foorumi, samalla kun Kiina on vastuussa IMT-2020-ohjelmasta. Yleisesti Aasiassa esiintyy monia erilaisia variaatioita edellä mainituista, ja samalla kun osa saa rahoitusta valtiolta, toiset ovat vain suuntaa antavia, alueellisen tai kansallisen tason yrityksiä yleisen 5G-tietämyksen lisäämiseksi. (Rodriguez 2015d.)

Kiina, Japani ja Etelä-Korea ovat tarkemmin sanottuna pääroolissa 5G:n kehityksessä Aasian alueella. Kiinassa hallituksen aloitteesta käynnistetty kehitys ja tutkimus oli vuonna 2015 suhteellisen alkutekijöissään, kun taas Japanissa ja Etelä-Koreassa saatiin

tuloksia, kuten NTT:n (Nippon Telegraph & Telephone) ja Salmsug Electronicsin luoma testimuotoinen yhteysverkko 5G:lle. (Rodriguez 2015d.)

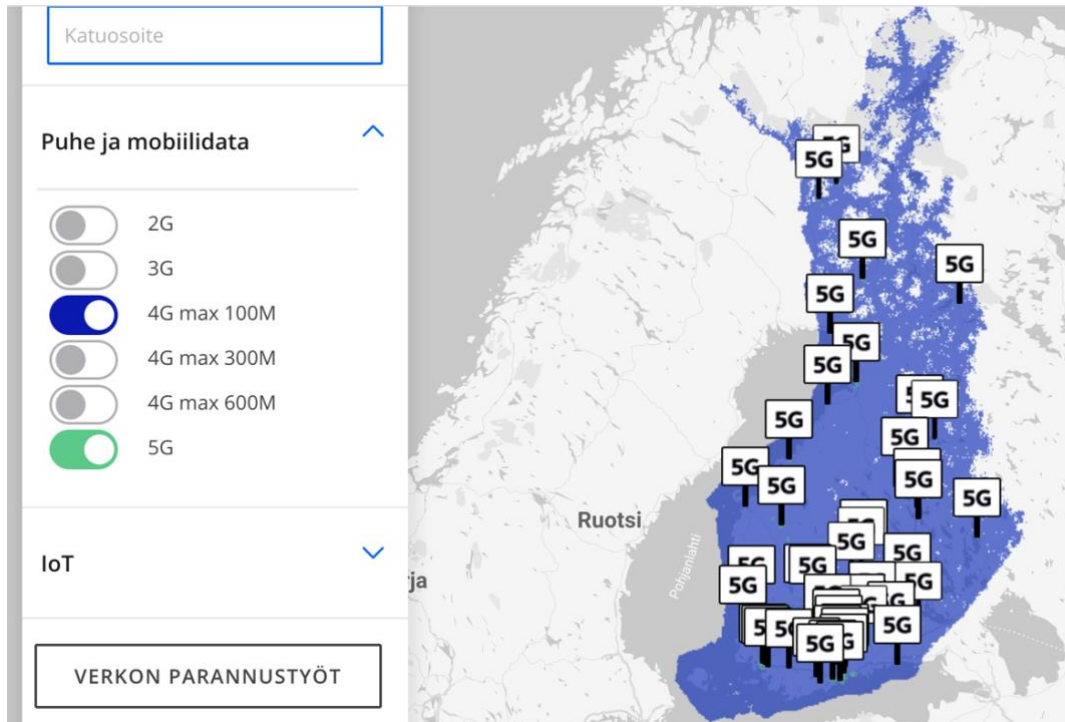
#### 4.2.3 Suomi ja 5G

Suomessa ensimmäinen 5G:tä testannut tukiasema asennettiin toukokuussa 2018 Kirkkonummen Jorvakessa sijaitsevan Ericssonin toimipisteen katolle. Sen avulla testattiin esimerkiksi beam tracking-tekniikkaa, jossa tukiasema seuraa liikkuvaa vastaanotinta niin kutsutulla radiokeilalla. (TiVi 2018.)

Maailman ensimmäiset kaupalliset tukiasemat pystytettiin puolestaan saman vuoden kesäkuussa Tampereen rautatieasemalle sekä Tampereen keskusvirastotalon ja Elisan konttorin katoille. Syksyllä alettiin lähettää 3,4–3,8GHz mikroaaltosäteilyä koeluontoisesti Espoon Otaniemessä, Helsingin keskustassa, Helsinki-Vantaan lentoasemalla, Oulun Ruskossa ja Vantaan Tikkurilassa (Traficom 2019.)

Tammikuussa 2019 DNA avasi 5G-verkon Helsingin ydinkeskustaan. Verkkoa tullaan vielä laajentamaan, kun 5G:tä tukevia päätelaitteita tulee laajemmin markkinoille ja DNA testaakin tällä hetkellä myös kiinteän 5G:n käyttöä. Turun kaupungin ja Elisan yhteishankkeen myötä Turun Kupittaaan ja yliopiston alueelle rakennettiin kevään 2019 aikana pohjoismaiden laajin 5G-verkko, jonka kantoalue on noin kolmannes turkulaisista, näin aluksi. Hankkeen tarkoituksena on myös kokeilla muun muassa etäohjattavia robottibusseja ja integroida 5G osaksi Turun kaupungin tietohallintoa. (Yle 2019.)

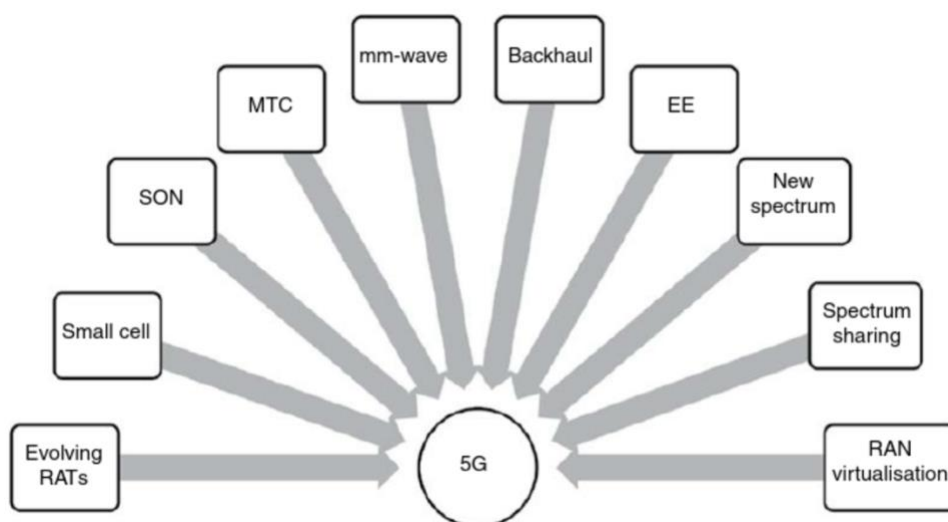
Syyskuussa 2020 Elisa ja DNA ilmoittivat molemmat 5G-verkkonsa kattavan yli miljoona suomalaista (Kuva 5).



Kuva 5. 5G-verkon kattavuus Suomessa, verrattuna 4G-verkon (sininen) kattavuuteen. (Elisa 2020.)

#### 4.3 Avaintekijät

Kuvassa 6 esitellään 5G:n kehityksen kymmenen avaintekijää. Seuraavaksi käsitellään lyhyesti näistä viiden mielestäni tärkeimmän tekijän peruseriaatteet.



Kuva 6. 5G:n kymmenen peruspilaria. (Rodriguez 2015e.)

#### 4.3.1 Radioliityntäteknologioiden (RAT) kehitys

5G ei tule olemaan vain yksi uusi radioliityntäteknologia (RAT, Radio Access Technology), vaan se on usean eri RAT:in muodostama kokonaisuus, joka sisältää myös jo olemassa olevien teknologioiden kehittämistä edelleen. Näin ollen, ensimmäinen ja taloudellisin kehitysaskel radioliityntäteknologioiden suhteen olisi kapasiteetin nostaminen. Erityisesti LTE-verkon tuli kehittyä tukemaan MIMO-muotoista (Multiple Input, Multiple Output) tekniikkaa. (Rodriguez 2015e.)

#### 4.3.2 SON – Self Organizing Network

Itseorganisoituva verkko (SON) on automaatioteknologia, joka on kehitetty tekemään radioliityntäverkkojen suunnittelusta, asentamisesta, hallinnoimisesta, optimoisesta ja korjaamisesta helpompaa ja nopeampaa.

- Itseasentuvat toiminnot; uudet tukiasemat integroituvat ja asentuvat automaattisesti verkkoon. Tällöin kaikki osat ovat sovelluksia, eivät kiinteitä osia. Kun uusi tukikohta ilmestyy verkkoon ja käynnistetään, se tunnistetaan ja rekisteröidään automaattisesti osaksi verkkoa.
- Itseoptimoituvat toiminnot; tukiasemat voidaan konfiguroida sammumaan automaattisesti yöajaksi verkkoliikennemäärän laskiessa. Määrän jälleen noustessa, "nukkumassa" olleet tukiasemat heräävät.
- Itsekorjautuvat toiminnot; kun verkon solmut lakkaavat toimimasta, itsekorjaavat mekanismit keskittyvät ehkäisemään häiriön vaikutuksia, esimerkiksi säätämällä parametreja ja algoritmeja läheisissä soluissa niin, että muut solmut voivat tukea käyttäjiä, joiden solmut lakkasivat toimimasta.

SON:in toiminnallisuus on määritelty ja yksilöity yleisesti hyväksytyissä matkapuhelinteollisuuden suosituksissa, jotka on laadittu 3GPP:N ja NGMN:n kaltaisten organisaatioiden toimesta. (Rodriguez 2015e.)

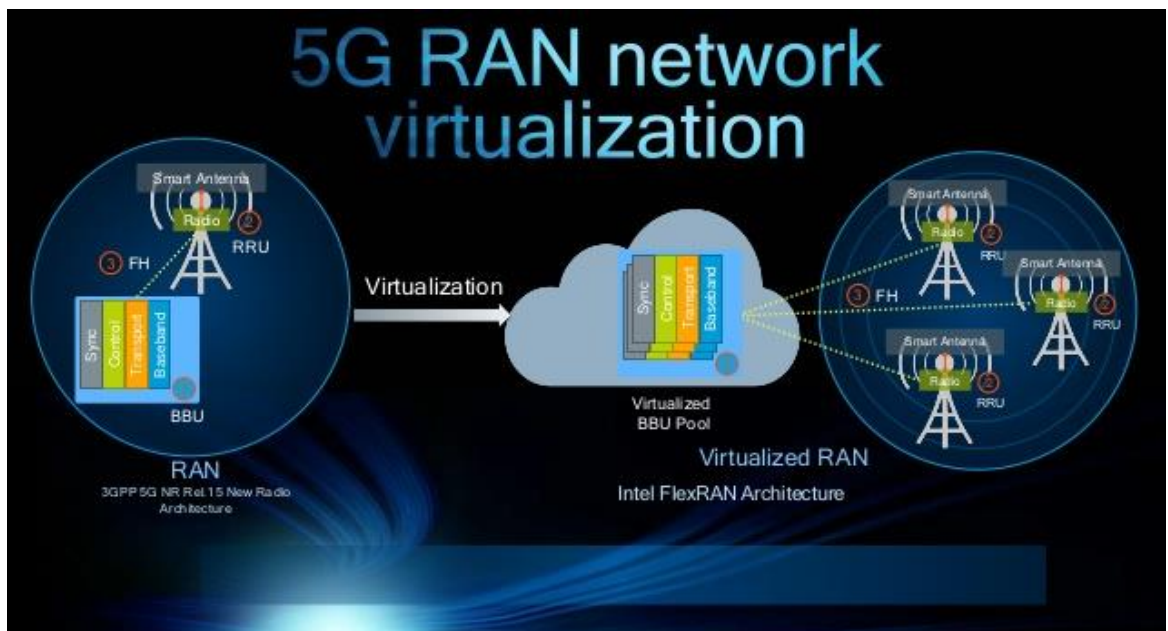
#### 4.3.3 MTC – Machine Type Communication

MTC (Machine Type Communication) tai toiselta nimeltään M2M, on automaattista tietoliikennettä kahden päätelaitteen välillä. Se helpottaa verkon kahta päähaastetta: verkkoon liitettävien laitteiden valtavaa määrää, sekä kasvavaa tarvetta reaaliaikaisille ja kauko-ohjattaville, verkkovälitteisille mobiililaitteille, kuten kulkuvälineille. Näissä latenssin on oltava erittäin alhainen, vähemmän kuin yhden millisekuntin. (Rodriguez 2015e.)

#### 4.3.4 EE – Energy Efficiency

Energiätehokkuus (EE), pysyy jatkuvasti tärkeänä suunnitteluongelmana 5G:n kehityksessä. Vuonna 2015 tieto- ja kommunikaatioteknologia (ICT) käytti noin 5 prosenttia koko maailman energiantuotannosta ja oli vastuussa noin kahdesta prosentista maailman kasvihuonekaasujen päästöistä ja sen oli laskettu tuplaantuvan vuoteen 2020 mennessä, ellei asiaa huomioida tulevaisuuden teknologioiden kehityksessä.

Energiätehokkaan järjestelmän suunnittelussa on useita etuja. Ensimmäinen, sillä on äärimmäisen tärkeä rooli kestävässä kehityksessä pienentämällä mobiiliteollisuuden hiilijalanjälkeä. Toiseksi, ICT ydinteknologiana tulevaisuuden älykaupungeissa voi pienentää myös muiden sektorien hiilijalanjälkeä. Kolmanneksi, se voi kasvattaa älypuhelin



Kuva 7. Verkkotoimintojen virtualisointi. (Lumina Networks 2019.)

akunkesto, mikä on tutkimuksen mukaan kuluttajien pääkriteeri matkapuhelinta ostaessa. (Rodriguez 2015e.)

#### 4.3.5 Verkkotoimintojen virtualisointi

Verkkotoimintojen virtualisointi mahdollistaa langattoman infrastruktuurin jakamisen usean operaattorin kesken. Verkon virtualisoinnissa sen toiminta siirretään pois kiinteistä laajakaistateknologioista, kuten reitittimistä. Tätä varten verkkolaitteen varsinainen äly täytyy poistaa, ja keskittää ohjelmiston muotoon, ikään kuin aivoiksi, jotka voidaan sijoittaa usealle verkkotasolle. Näin verkkoa ja sen eri tasoja voidaan hallita yhdestä, keskitetystä yksiköstä, parantaen sen tehokkuutta (Kuva 7). (Rodriguez 2015e.)

#### 4.4 Mahdollisuudet

5G on lupaava moniin käyttötarkoituksiin tänä päivänä ja tulevaisuudessa. Se tuo todennäköisesti ensimmäiset hyödyt operaattoreille heidän asiakkailleen kolmella eri osa-alueella:

- interaktiivinen; 5G luo mullistavia kokemuksia käyttäjille heidän kodeissaan, ulkomaailmassa ja kulkuvälineissä.
- elävä; 5G tarjoaa uusia kokemuksia isoissa tapahtumissa ja vastaa tietoliikennekapasiteetiltaan kysyntää piikkialueilla.
- teollinen; 5G:stä tulee neljännen teollisen vallankumouksen yhteysstandardi. (Chandramouli, et al. 2019d.)

##### 4.4.1 5G Kotiin

Käyttäjät, jotka asuvat asunnoissa ilman valokuitumahdollisuutta, voivat hyötyä 5G:n tuomasta valokuidun kaltaisesta nopeudesta; hekin saavat laajakaistan hyödyt, mukaan lukien lisätyn ja virtuaalisen todellisuuden maailman. 5G antaa operattoreille mahdollisuuden tarjota isoja laajakaistakokonaisuuksia koteihin, jotka ovat

valokuitukaapelin ulottumattomissa, tai sen toteutus on kallista. (Chandramouli, et al. 2019d.)

#### 4.4.2 Liikennevälineet

Julkisten kulkuvälineiden käyttäjät, joilla on mobiililaajakaistayhteys käsissään, voivat käyttää myös matkustusajajat hyväkseen, kuten katselemalla videoluentoja tai hoitamalla työpuheluita videovälitteisesti. Tässä tapauksessa 5G tarjoaa operaattoreille voittoa toimittamalla tietoa ja viihdettä matkustaville asiakkaille, erityisesti kiireisillä kaupunkialueilla. Erilaisten sovellusten, nettipelien, ja HD-videopalveluiden myötä verkon tulee pystyä toimittamaan palveluita jatkuvasti sijainnista riippumatta, ja hyvillä nopeuksilla.

Korkean suorituskyvyn vaativia palveluita voidaan myös tarjota käyttäjille, joilla 5G ei ole käytössä lähettämällä 5G-verkkoa liikennöintivälineessä Wi-Fi:n välityksellä, kuten monissa junissa ja busseissa. (Chandramouli, et al. 2019d.)

#### 4.4.3 Hot Spots

5G mahdollistaa suurissa tapahtumissa katsojan pääsyn lähelle tapahtumien keskiötä käyttäen reaaliaikaista virtuaalitodellisuutta. Katsoja voi näin kokea intensiivisen hetken radan sivusta tai takahuoneesta. 5G:n mahdollistama korkea suoritusteho ja matala latenssi on erittäin tehokas keino tarjota tuhansille katsojalle erilaisia näkökulmia suurissa tapahtumissa.

Katsoja voi halutessaan olla tapahtumien keskellä reaaliaikaisen videon avulla tai valita haluamansa kameran katsoakseen mitä juuri siitä kuvakulmasta katsottuna tapahtuu. Videopalveluiden yhteyteen voidaan myös integroida muita palveluita, kuten oheistuotteiden myyntiä, etukäteistilauksia esimerkiksi ruualle ja juomille tai mahdollisuus jakaa kokemus muissa sosiaalisen median kanavissa nappia painamalla. (Chandramouli, et al. 2019d.)



#### 4.4.4 Terveydenhuolto

Terveydenhuoltojärjestelmät maailmanlaajuisesti ovat kovan paineen alla, kun suuret ikäryhmät vanhenevat ja taloudelliset rajoitteet ovat kovat. 5G:n avulla voidaan osoittaa terveydenhuollon epäkohtia monin tavoin, esimerkiksi antamalla kirurgien työskennellä etänä ja käyttää älykkäitä robotteja apuna tarjoamaan perushoitoa. Pääideana on saada rajalliset resurssit tehokkaasti käyttöön, jotta voidaan parantaa terveydenhuollon saatavuutta, missä ikinä sitä tarvitaankaan.

Langaton kirurgia tuo matkapuhelinteknologian terveydenhuollon maailmaan. Kirurgit hoitaisivat leikkaukset etänä robottien avustuksella. Tarkoituksena on tarjota etäkirurgi, joka voi hoitaa leikkauksen satojen kilometrien päästä, samalla kosketusherkkyydellä, mutta ihmiskäsien tilalla olisivat robotin anturit. Jotta tällainen kokemus voitaisiin saavuttaa, viiveen ja stabiliteetin hallitseminen kuvan ja äänen toistamisessa ovat välttämättömiä.

Robotit voisivat toimia myös potilaiden ja vanhusten henkilökohtaisina avustajina tai hoitajina. Näin palveluntaso pysyy korkealla, mutta kustannuksia saataisiin laskettua. Robottien avulla voitaisiin myös hoitaa nykyiseltä henkilökunnalta aikaa vieviä työtehtäviä, kuten siivoamista, valvomista ja muita ylläpitotehtäviä. (Chandramouli, et al. 2019d.)

#### 4.4.5 Teollisuus

Osana neljättä teollista vallankumousta, älykkäät digitaaliset tehtaot ottavat käyttöön entistä laajemman automaation, yhdistäen kaikki osa-alueensa ja toimintonsa kehittäkseen tuottavuutta, lisätäkseen henkilökunnan turvallisuutta ja tullakseen yhä joustavimmiksi saavuttaakseen markkinoiden kovaa tahtia kasvavat tarpeet.

Yksi tärkeimmistä älykkäiden tehtaiden mahdollistajista on yhdistettävyyden, mikä linkittää koneet, prosessit, robotit ja ihmiset luodakseen entistä joustavampia ja dynaamisempia tuotantomahdollisuuksia. Noin 90 prosenttia teollisuuden yhteyksistä tänä päivänä käyttää langattomia yhteyksiä, jotka tuottavat tehdasautomaation tarvitse korkean suoritustehon ja luotettavuuden, mutta joilta puuttuu joustavuus vastata nopeasti muuttuviin tuotantovaatimuksiin. 5G olisi ensimmäinen langaton teknologia korkealla suorituskvyyllä, matalalla latenssilla ja äärimmäisellä luotettavuudella, joka voisi korvata kiinteän yhteyden tehtaissa. Langaton yhteys mahdollistaa lisälaitteiden yhdistämisen

vain varustamalla ne langattomilla sensoreilla ja suhteuttaa verkon kapasiteetin vastaamaan uutta tietoliikennettä. (Chandramouli, et al. 2019d.)

#### 4.5 Tulevaisuus

Tuleeko 5G olemaan viimeinen G, vai onko mobiiliverkkojen kuudes sukupolvi jo tulossa?

Uuden sukupolven tekniikoiden ja muotojen kehittäminen on jo alkanut; Suomen akatemia on valinnut Oulun Yliopiston ehdotuksen 6G:tä tukevan Wireless Smart Society & Ecosystem-projektin osallistumaan uuteen kansainvälisesti rahoitettuun ohjelmaan. Japanilainen DoCoMo ilmoitti juuri onnistuneesta testauksestaan saavuttaen langattomalla tiedonsiirrolla 100Gbp/s nopeuden käyttämällä uutta periaatetta, OAM:ia (Orbital Angular Momentum. Siinä tarkoituksena on saavuttaa terabittitasoinen langaton tiedonsiirtomenetelmä vuoteen 2030 mennessä. (Chandramouli, et al. 2019e.)

Nämä voivat olla 6G:n lähtölaukauksia, voivat myös määrittää 6G-tekniikan peruseriaatteet, mikäli kuudes sukupolvi ei vain seuraa Wi-Fi-verkon arkkitehtuuria. Toisaalta kuitenkin, 5G lupaa kattaa kaikki käyttötarpeet, kuten eMBB, mMTC ja URLLC. Eli vaikka uusi tekniikka saavuttaisi tulevaisuudessa korkeammat tiedonsiirtonopeudet ja pienemmät latenssit, onko se edes siinä tapauksessa 6G? Kehittyminen tekniikoiden suhteen ei tule koskaan pysähtymään, mutta 5G sen nykyisessä muodossa voisi toimia kattona järjestelmälle ja arkkitehtuurille, olemalla kuitenkin tarpeeksi joustava integroidakseen mahdollisia uusia tekniikoita.

5G antaa operaattoreille oikeat työkalut kerätä uusia liiketoimintatietoja, kun samanaikaisesti se sekoittuu ihmisten arkipäiväiseen elämään. Se tulee vaikuttamaan jokaisella alalla, muuttamaan meidän elämämme taloudellisesti, kuin yhteisönä ja yksilöinä. (Chandramouli, et al. 2019e.)

## 5 LOPUKSI

Opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda yleispätevä katsaus langattoman tiedonsiirron historiaan, tutkien tarkemmin muutamiin, Suomen kannalta merkittäviin ja 5G:tä edeltäviin teknologioihin, jotka ovat luoneet langattoman tiedonsiirron nykytilanteelle ja tulevaisuudelle vakaan perustan. Aiheeseen perehtyessäni huomasin, että 5G:stä ja sen edeltäjistä riittäisi tutkittavaa ja kirjoitettavaa, joten raja oli vedettävä johonkin. Työssäni käsitellään 5G:n keskeisimpiä tekniikoita, ja kosketetaan muita, vähemmän tärkeitä ominaispiirteitä vain pintaraapaisulta. Tarkoituksena oli esitellä hieman myös 5G-tekniikan tulevaisuuden näkymiä: millaisia mahdollisuuksia se tarjoaa esimerkiksi teollisuuden ja terveydenhuollon saralla.

Langattomien mobiiliteknologioiden toimijoiden ja standardien määrä kasvoi nopeaa tahtia kysynnän myötä. Kolmanteen sukupolven mennessä määrät olivat kasvaneet niin suuriksi, että neljänteen sukupolven siirryttäessä jatkettiin vain muutaman valitun standardin kehitystä. Työni myötä minulle on muodostunut kuva, että 5G:n kohdalla alan toimijat ovat ymmärtäneet, että kilpailuaseman sijaista on järkevämpää kehittää yhdessä yhtä, toimivaa standardia. Näin 5G-verkot on pystytty toteuttamaan edellisiin verrattuna huomattavasti kustannustehokkaammin, saavuttaen kuitenkin nopean, tehokkaan ja kilpailukykyisen mobiiliverkon.

Erityisesti itseäni kiinnostaa nähdä, minne 5G-verkon mahdollisuudet vievät teknologiayhteiskuntaamme. Sen eri ominaisuuksien avulla voidaan tehostaa teollisuutta ja terveydenhuoltoa, luoda älykoteja ja jopa älykaupunkeja. Tällä hetkellä 5G-verkkoja ja -laitteita on jo saatavilla, mutta verkot toimivat vain suurimmissa kaupungeissa. Kuinka nopealla aikataululla verkko on saatavilla esimerkiksi Suomessa maanlaajuisesti? Millaisiin nopeuksiin verkon tehokkuus saadaan nostettua, kun käyttäjäkunta kasvaa jatkuvasti? Siinä muutamia mietteitä, joille odotan vielä vastausta.

## LÄHTEET

**3GPP 2020.** GPRS & GSM [Online]

[Viitattu

23.10.2020]

<https://www.3gpp.org/component/itpgooglesearch/search?gsquery=gprs>

**Chandramouli, et al. 2019a.** Drivers for 5G. *5G for the Connected World*.

[Viitattu 1.10.2020] John Wiley & Sons, ProQuest Ebook Central 2019a.

—. **2019b.** ITU-R and IMT 2020 Vision. *5G for the Connected World*.

[Viitattu 5.10.2020] John Wiley & Sons, ProQuest Ebook Central 2019b.

—. **2019c.** NGMN (Next Generation Mobile Networks). *5G for the Connected World*.

[Viitattu 5.10.2020] John Wiley & Sons, ProQuest Ebook Central 2019c.

—. **2019d.** Use Cases. *5G for the Connected World*.

[Viitattu 6.10.2020] John Wiley & Sons, ProQuest Ebook Central 2019d.

—. **2019e.** Outlook. *5G for the Connected World*.

[Viitattu 6.10.2020] John Wiley & Sons, ProQuest Ebook Central 2019e.

**Connor & Robertson, 2007.** Heinrich Robert Hertz. [Online] 6/2007

[Viitattu 23.10.2020] [https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Hertz\\_Heinrich/](https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Hertz_Heinrich/)

**Elisa 2020.** Kuuluvuus alueellasi. [Online]

[Viitattu 30.9.2020] <https://elisa.fi/kuuluvuus/>

**Escobar 2015.** How does Wi-Fi Work? *Scientific American*. [Online] 15.7.2015

[Viitattu 28.9.2020] <https://www.scientificamerican.com/article/how-does-wi-fi-work/>

**International Telecommunication Union 2003.** The Development of 3G Systems. *The Evolution To 3g Mobile — Status Report*. [Online] 29.7.2003

[Viitattu 30.9.2020] <https://www.itu.int/itu-news/issue/2003/06/thirdgeneration.html>

**Khan 2011.** LTE Encyclopedia. [Online] 8.2.2011

[Viitattu 29.9.2020] <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/home>

**Lumina Networks 2019.** 5G FlexRan Solution. [Online] 13.2.2019

[Viitattu 30.9.2020] <https://www.slideshare.net/LuminaNetworks/osn-bay-area-feb-2019-meetup-intel-5g-flexran-solution-131647692>

**Nigam & Siljerud 2006.** 4G (Fourth-generation wireless). *Tech Target*. [Online] 12/2010  
[Viitattu 29.9.2020]  
[http://searchmobilecomputing.techtarget.com/sDefinition/0,,sid40\\_gci749934,00.html](http://searchmobilecomputing.techtarget.com/sDefinition/0,,sid40_gci749934,00.html)

**Nobelprize.org 2020.** Guglielmo Macroni. [Online] 23.10.2020  
[Viitattu 23.10.2020]  
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1909/marconi/biographical/>

**OpenSignal 2018.** The State of LTE (February 2018) [Online] 2/2018

[Viitattu 30.10.2020] <https://www.opensignal.com/reports/2018/02/state-of-lte#>

**Prasad 2014.** Beyond 2020. *5G: 2020 and Beyond*.

[Viitattu 1.10.2020] River Publishers, ProQuest Ebook Central 2014.

**Poole 2010.** What Is WiMAX Technology? – basics. *WiMAX IEEE 802.16 technology tutorial*. [Online]

[Viitattu 29.9.2020] <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wimax/wimax.php>

**Rodriguez 2015a.** Drivers for 5G: The 'Pervasive Connective World': Introduction. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*.

[Viitattu 2.10.2020] John Wiley & Sons, Incorporated, ProQuest Ebook Central 2015a.  
 —. **2015b.** Drivers for 5G: The 'Pervasive Connective World': 5G in Europe. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*.

[Viitattu 2.10.2020] John Wiley & Sons, Incorporated, ProQuest Ebook Central 2015b.  
 —. **2015c.** Drivers for 5G: The 'Pervasive Connective World': Road to 5G. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*.

[Viitattu 2.10.2020] John Wiley & Sons, Incorporated, ProQuest Ebook Central 2015c.  
 —. **2015d.** Drivers for 5G: The 'Pervasive Connective World': 5G in Asia. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*.

[Viitattu 3.10.2020] John Wiley & Sons, Incorporated, ProQuest Ebook Central 2015d.  
 —. **2015e.** Drivers for 5G: The 'Pervasive Connective World': Pillars of 5G. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*.

[Viitattu 3.10.2020] John Wiley & Sons, Incorporated, ProQuest Ebook Central 2015e.

**TiVi 2018.** Näin toimii Suomen ensimmäinen 5G-tukiasema. [Online] 25.8.2018

[Viitattu 1.10.2020] <https://www.tivi.fi/uutiset/nain-toimii-suomen-ensimmainen-5g-tukiasema/75873a0a-3b7a-3d8e-b6af-f2d172295a92>

**Traficom 2020.** Selvitys 5G:n kyberturvallisuudesta. [Online] 14.5.2019

[Viitattu 2.10.2020] <https://www.kyberturvallisuuskeskus.fi/sites/default/files/media/file/Selvitys%205Gn%20kyberturvallisuudesta%20yhteenveto.pdf>

**Wannstrom 2013.** LTE-Advanced. 3GPP. [Online] 6/2013

[Viitattu 29.9.2020] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>

**WiMAX 2020a.** What is WiMAX Technology? *WiMAX Forum*. [Online]

[Viitattu 1.10.2020] [https://wimaxforum.org/Page/Resources/FAQ#wimax\\_technology](https://wimaxforum.org/Page/Resources/FAQ#wimax_technology)

**-2020b.** What are the advantages of WiMAX? *WiMAX Forum*. [Online]

[Viitattu 1.10.2020] [https://wimaxforum.org/Page/Resources/FAQ#wimax\\_advantage](https://wimaxforum.org/Page/Resources/FAQ#wimax_advantage)

**Yle 2004.** Ensimmäinen kännykkä: NMT [Online] 7.2.2020

[Viitattu 3.10.2020] <https://yle.fi/aihe/artikkeli/2008/11/20/ensimmainen-kannykka-nmt>

**Yle 2010.** Suomen ensimmäiset 4G-verkot avattiin. [Online] 11.4.2012

[Viitattu 3.10.2020] <https://yle.fi/uutiset/3-5573341>

**Yle 2019.** Turussa kunnianhimoiset suunnitelmat: Tulossa maailman ensimmäinen 5G-kahvila ja robottibussikokeilu. [Online] 11.4.2019

[Viitattu 3.10.2020] <https://yle.fi/uutiset/3-10733227>

**Yle 2016.** Soneran ja DNA:n yhteinen 4G-verkko valmistui Lappiin – kuuluvuus paranee ja tiedonsiirto nopeutuu. [Online] 26.4.2016

[Viitattu 3.10.2020] <https://yle.fi/uutiset/3-8838418>

**Yle 2015.** Operaattorit laajentavat 4G-verkkojaan vauhdilla – nopea netti mökeille todennäköisesti ensi kesäksi. [Online] 10.7.2015

[Viitattu 3.10.2020] <https://yle.fi/uutiset/3-8145558>

**Yle 2020.** 4G-yhteydet ovat hitaampia kuin muutama vuosi sitten ja paikalliset erot ovat valtavia – Katso, kuinka nopea nettiyhteys on kotikunnassasi. [Online] 27.1.2020

[Viitattu 4.10.2020] <https://yle.fi/uutiset/3-11174191>