

Juho Matilainen

# **Rakenne- ja materiaalivalintojen vaikutus sisäkuuluvuuteen 5G-näkökulmasta**

Kirjallisuuskatsaus

Opinnäytetyö

Kevät 2019

SeAMK Tekniikka

Rakennusalan työnjohdon tutkinto-ohjelma

**SeAMK** 

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU  
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Tutkinto-ohjelma: Rakennusalan työnjohto

Suuntautumisvaihtoehto: Talonrakennustekniikka

Tekijä: Juho Matilainen

Työn nimi: Rakenne- ja materiaalivalintojen vaikutus sisäkuuluvuuteen 5G-näkökulmasta

Ohjaaja: Pekka Lähdesmäki

Vuosi: 2019

Sivumäärä: 66

Liitteiden lukumäärä: 0

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kirjallisuuskatsauksen keinoin 3500 MHz:n (3,5 GHz) taajuudella toimivan 5G-verkon yleistyessä mahdollisesti ilmeneviä haasteita sisäkuuluvuudessa sekä etsiä ja esitellä olemassa olevia ratkaisumalleja sisäkuuluvuuden parantamiseksi.

3,5 GHz 5G:n käyttöönoton myötä ilmenevät haasteet liittyvät paljolti taajuuden johdosta kasvavaan läpäisyvaimennukseen sekä toisaalta rakennuskannan uusiutumiseen ja vanhan rakennuskannan korjaamiseen, jolloin vähemmän vaimentavien rakennusten osuus rakennuskannasta pienenee ja yhä suurempi osa rakennuksista aiheuttaa merkittäviä läpäisyvaimennuksia. Jatkossa olisi entistä tärkeämpää, että myös rakentamisessa kiinnitetään huomiota sisäkuuluvuuteen jo suunnitteluvaiheesta alkaen.

Sisäkuuluvuutta voidaan parantaa niin rakentamisen kuin teleteknisin ratkaisuin, ja kuhunkin tilanteeseen parhaiten sopiva vaihtoehto on vahvasti tilannesidonnainen. Yhteistä kaikille kuuluvuutta parantaville ratkaisuille on, että ne tulevat edullisemmiksi, kun kuuluvuus huomioidaan jo suunnitteluvaiheessa ja kuuluvuudelle rakennetaan edellytykset muun rakentamisen yhteydessä, osana kokonaishanketta.

5G:n täysimääräinen hyödyntäminen edellyttää sisäkuuluvuushaasteiden ratkaisemista, mikä tulee vaatimaan rakentajilta, operaattoreilta ja viranomaisilta yhteistyötä yhteisten toimintamallien luomiseksi ja tiedon lisäämiseksi.

Avainsanat: kuuluvuus, sisäkuuluvuus, sisätilakuuluvuus, 5G, 5G-tekniikka, vaimennus, läpäisyvaimennus, materiaalivaimennus, rakentaminen, sisäverkko

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Construction Management

Specialisation: Building Construction

Author: Juho Matilainen

Title of thesis: Building materials and indoor coverage – 5G-perspective

Supervisor: Pekka Lähdesmäki

Year: 2019

Number of pages: 66

Number of appendices: 0

---

The goal of the thesis was to determine possible challenges with indoor coverage in 3500 MHz (3.5 GHz) 5G network and to look for methods to increase indoor coverage.

Expected challenges with 3.5 GHz 5G indoor coverage are apparently associated with higher outdoor-to-indoor penetration loss due to higher transmit frequency and simultaneously with the modernization of the housing stock, which also causes more buildings with higher outdoor-to-indoor penetration loss if indoor coverage is not considered properly during the building process.

Technological development related to 5G innovations may provide better coverage and ease the challenges of indoor coverage, notwithstanding it being necessary for the building industry to take notice of indoor coverage.

Better indoor coverage can be provided with various methods, by using appropriate building materials, for example, or by using methods of telecommunication and radio technology. All indoor coverage solutions are more cost-effective, when coverage planning is integrated as a part of construction planning and taken into consideration straight from the beginning of the construction project.

It is necessary to resolve the challenges of indoor coverage to fully utilize capabilities of 5G networks, which will require co-operation with building industry, teleoperators and authorities to establish common processes.

Keywords: coverage, indoor coverage, propagation loss, 5G, building materials

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	1
Thesis abstract.....	2
SISÄLTÖ.....	3
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo.....	5
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	7
1 JOHDANTO.....	9
2 OPINNÄYTETYÖN TAVOITTEET JA RAJAUS.....	11
2.1 Tavoitteet.....	11
2.2 Rajaus.....	11
2.3 Työn tilaaja.....	12
3 MOBIILIVERKOT.....	13
3.1 Mobiiliverkkojen käyttö.....	14
3.2 Mobiilipeitto Suomessa.....	15
3.3 Signaali.....	16
4 5G-VERKOT.....	17
4.1 5G suhteessa edeltäjiinsä.....	17
4.2 Mikä 5G on?.....	19
4.3 5G:n käyttötapauksia.....	21
4.4 5G:n käyttöönotto.....	24
5 VASTUUT JA MÄÄRÄYKSET.....	26
5.1 Energiatehokkuus.....	26
5.2 Maankäyttö- ja rakennuslaki.....	27
5.3 Aktiiviset toistimet.....	28
5.4 Määräys yleispalvelusta.....	29
6 SISÄKUULUVUUS.....	30
7 RAKENTAMISEN RATKAISUT SISÄKUULUVUUTEEN.....	33
7.1 RF-aukot.....	34
7.2 Rakennusmateriaalien vaikutus ja materiaalivaihtoehdot.....	36
7.2.1 Passiiviset signaalia vahvistavat rakenteet.....	39
7.2.2 Metallikalvottomat eristeet.....	41

7.2.3 Ikkunaratkaisut.....	41
7.2.4 Metallisen rappauserkon korvaaminen lasikuituisella.....	44
7.2.5 Katemateriaalin vaihto metallittomaan .....	44
<b>8 TELETEKNISET RATKAISUT SISÄKUULUVUUTEEN.....</b>	<b>45</b>
8.1 Sisääntenniverkot.....	45
8.2 Passiiviset toistimet.....	47
8.3 Aktiiviset toistimet.....	48
8.4 Kotitukiasemat.....	48
8.5 Voice over Wifi (VoWiFi) .....	49
8.6 Tukiasemaverkon tiivistäminen .....	50
<b>9 SISÄKUULUVUUS RAKENNUSHANKKEISSA .....</b>	<b>51</b>
9.1 Uudisrakentaminen .....	51
9.2 Korjausrakentaminen .....	53
<b>10 YHTEENVETO JA POHDINTA .....</b>	<b>56</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>58</b>

## Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Taajuusselektiivinen kuviointi lasissa.....	43
Kuvio 1. Mobiiliverkon tiedonsiirtonopeudet eri kellonaikoina .....	15
Kuvio 2. Muutoksia siirryttäessä 2,6 GHz:n 4G:stä 3,5 GHz:n 5G:hen .....	18
Kuvio 3. Viiveen pieneneminen 4G:stä 5G:hen siirryttäessä .....	18
Kuvio 4. 5G:n peruspalvelut.....	19
Kuvio 5. Jyrki Penttisen näkemys 5G:n tärkeimmistä elementeistä .....	20
Kuvio 6. LuxTurrim5G-hankkeessa pilotoitava älykäs katuvalopylväs .....	23
Kuvio 7. RF-aukko on mahdollista sijoittaa ikkunan viereen .....	34
Kuvio 8. Radiosignaalin vaimeneminen ulkoa sisälle tultaessa RF-aukottomassa seinässä.....	35
Kuvio 9. Radiosignaalin vaimeneminen ulkoa sisälle tultaessa RF-aukotetussa seinässä.....	35
Kuvio 10. Seinärakenteiden ja materiaalien aiheuttamia vaimennuksia.....	37
Kuvio 11. FF-SIGNAL asennusesimerkki.....	39
Kuvio 12. FF-SIGNAL läpileikkaus.....	40
Kuvio 13. Selektiivikalvojen määrän vaikutus vaimennukseen.....	42
Kuvio 14. Periaatekuva sisäantenniverkosta .....	46
Taulukko 1. Erilaisten tukiasematyyppien ominaisuuksia .....	13
Taulukko 2. Matkapuhelinverkkojen ominaisuuksia .....	17

Taulukko 3. Ericssonin testi 3.5 GHz 5G:n ja 2.1 GHz LTE:n välillä .....	25
Taulukko 4. Suomen rakentamismääräyskokoelman energiamääräysten vaatimuksia vuosina 1976 - 2010.....	27
Taulukko 5. Mitattuja läpäisyvaimennuksia vanhoilla ja uusilla seinärakenteilla ...	31
Taulukko 6. Kuuluvuusmuutosten suuruusarviot.....	33
Taulukko 7. Eri materiaalien läpäisyvaimennuksia 2000 MHz:n ja 3500 MHz:n taajuuksilla .....	38
Taulukko 8. Esimerkkejä FF-SIGNAL-signaalinvahvistinten menekistä.....	40

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>5G</b>	Viidennen sukupolven matkaviestinverkko.
<b>Beamforming</b>	Signaalinkäsittelytekniikka signaalin laadun parantamiseksi.
<b>dB</b>	Desibeli. Vertailee tehojen suhteita logaritmisella asteikolla.
<b>dBm</b>	Desibelimilliwatti. Kentänvoimakkuuksien vertailuun käytetty yksikkö.
<b>Heijastuminen</b>	Lähes kaikista materiaaleista osa materiaaliin osuneesta säteilystä heijastuu takaisin. Heijastumiseen vaikuttaa säteilyn tulokulma ja materiaaliominaisuudet.
<b>MHz</b>	Megahertsi. Taajuuden mittayksikkö. Miljoona hertsiä.
<b>GHz</b>	Gigahertsi. Taajuuden mittayksikkö. Miljardi hertsiä.
<b>Kaistanleveys</b>	Taajuusalueen ala- ja ylärajataajuuksien erotus.
<b>Kentänvoimakkuus</b>	Radioverkon signaalin voimakkuudesta kertova arvo, jonka yksikkö on dBm ja arvo negatiivinen. Suurempi arvo merkitsee parempaa voimakkuutta.
<b>Kohina</b>	Signaalin vastaanottamista häiritsevä sähkömagneettinen säteily. Kohinan voimakkuus ilmoitetaan yksikössä dBm.
<b>Selektiivilasi</b>	Metalli- tai metallioksidipinnoitteella päällystetty lasi, joka päästää lävitseen valoa, muttei lämpöä.
<b>Signaali-kohinasuhde</b>	Hyötysignaalin tehon suhde kohinasignaalin tehoon. Kerroo signaalin laadusta.
<b>Signaalin teho</b>	Signaalinvoimakkuus, ilmoitetaan yksikössä dBm. Arkikielessä puhutaan usein kentänvoimakkuudesta.



<b>Taajuus</b>	Värähtelyn nopeus [1/s], yksikkö hertsi (Hz), tässä opinnäytetyössä taajuus tarkoittaa taajuusaluetta, jolla radiosignaaleja lähetetään.
<b>Vaimenema</b>	Radiotaajuussignaalin vaimeneminen, jota voi aiheuttaa esimerkiksi materiaalin läpäisy.

# 1 JOHDANTO

Mobiililaitteet ja niiden käyttämät langattomat yhteydet ovat yhä suurempi osa aramme, vapaa-aikaa vietetään paljon käyttäen musiikin ja videoiden suoratoistopalveluita. Vuonna 2018 lopulla matkaviestinliittymien kokonaismäärä Suomessa oli yli 9,5 miljoonaa liittymää ja yhtä suomalaista kohti mobiilidataa kulutettiin 32 gigatavua kuukaudessa. Matkapuhelinliittymien kautta dataa siirrettiin noin 13 gigatavua kuukaudessa, kun taas mobiililaajakaistaliittymien kautta siirretty määrä oli yli kolminkertainen, noin 43 gigatavua kuukaudessa. (Traficom 2019b.)

Verkoissa liikenteen ja laitteiden määrän sekä kapasiteetin tarpeen odotetaan kasvavan tulevaisuudessa entistä nopeammin esimerkiksi videoiden katselun yleistymisen ja erilaisten lisätyn todellisuuden AR-sovellusten myötä. Samalla, kun liikenne lisääntyy, siirtyy se yhä enenevässä määrin kiinteistä yhteyksistä mobiiliyhteyksiin teknologisen muutoksen myötä. Kiinteissä yhteyksissä käytettävissä oleva kaista on ajanhetkestä riippumatta lähes vakio, kun taas mobiiliyhteyksissä verkon ruuhkaisuus vaikuttaa oleellisesti käytettävissä oleviin nopeuteen. Kasvavaan kysyntään pystytään vastaamaan jopa neljänntenä teollisena vallankumouksena nimitetyn (Ilme 2018; Telia 2018b) 5G:n avulla.

Jo käytössä olevilla 3G- ja 4G-taajuuksilla on ollut haasteita sisäkuuluvuuden osalta, sillä tiukentuvista energiatehokkuusmääräyksistä johtuen yhä energiatehokkaammiksi rakennettavat rakennukset vaimentavat radiosignaaleja merkittävässä määrin (Asp ym. 2013, 8; Karjalainen 2019; Tuominen 2019). Kuitenkin peräti 80 % kaikesta mobiililiikenteestä (puhe- ja dataliikenne) tapahtuu sisätiloissa, ja jatkossa mobiililaajakaistojen sekä yhä monimuotoisempien mobiilipalvelujen (esim. IoT-laitteet) yleistyessä sisätiloista tapahtuvan liikenteen osuuden odotetaan kasvavan jopa 85 prosenttiin (Huawei 2017, 2). Samalla on esitetty arvioita, että esimerkiksi älypuhelinien tuottaman dataliikenteen määrä kymmenkertaistuu vuodesta 2016 vuoteen 2022 mennessä (Ericsson, [viitattu 26.3.2019]).

Odotettavissa on, että haasteet sisäkuuluvuudessa korostuvat, sillä 5G-verkko (tässä tapauksessa erityisesti paranneltu mobiililaajakaista, eMBB, enhanced mobile broadband) tulee toimimaan korkeammalla 3500 MHz:n taajuusalueella. Esimerkiksi 4G-verkko on Suomessa toiminut 900 MHz:n, 1800 MHz:n ja 2600 MHz:n

taajuuksilla. Korkeammat taajuudet läpäisevät materiaaleja, rakenteita ja muita esteitä huonommin, mistä syystä signaali vaimenee enemmän sen tullessa ulkoa sisälle, joten 3500 MHz (3,5 GHz) taajuuden käyttöönoton myötä läpäisyvaimennus kasvaa entisestä. Signaalin vaimentuessa signaalinlaadusta kertova signaali-kohinasuhde (SNR, signal-to-noise ratio) huononee, mikä tarkoittaa hyötysignaalin erottuvan huonommin kohinasta.

5G-verkon käyttöönotto Suomessa tulee jatkumaan todennäköisesti yhä kiihtyvällä vauhdilla vuoden 2019 aikana. Ensimmäiset julkiset 5G-testit Suomessa ja maailmalla on tehty vuoden 2018 aikana, ja kesällä 2018 otettiin Suomessa käyttöön jo ensimmäiset kaupalliseen käyttöön tarkoitetut 5G-tukiasemat. Vielä keväällä 2019 olemassa olevat 5G-verkot rajautuvat maantieteellisesti hyvin pienille alueille esimerkiksi Helsingin (Kailio 2018; Uusiteknologia.fi 2018a) ja Tampereen (Lehto 2018) keskustoihin. Selvää on kuitenkin, että operaattorit tulevat laajentamaan 5G-verkkojaan lähitulevaisuudessa tarjotakseen laadukkaampia tietoliikennepalveluita yhä suuremmalle asiakaskunnalle. Myös ensimmäiset kuluttajakäyttöön tarkoitetut 5G-yhteensopivat matkapuhelimet julkaistiin lopputalvesta 2019 (Laitila 2019).

5G-tekniikan myötä käyttöönotettavat korkeammat lähetystaajuudet läpäisevät rakenteita heikommin, jolloin oletetut läpäisyvaimennukset tulevat kasvamaan. Sisäkuuluvuuden varmistaminen tulevaisuudessa on haaste, joka rakentajien, operaattorien ja viranomaisten on ratkaistava, jotta 5G:n potentiaali saadaan hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti.

## 2 OPINNÄYTETYÖN TAVOITTEET JA RAJAUS

### 2.1 Tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää 3500 MHz:n (3,5 GHz) taajuudella toimivan 5G-verkon yleistyessä mahdollisesti ilmeneviä haasteita sisäkuuluvuudessa sekä etsiä ja esitellä olemassa olevia ratkaisumalleja sisäkuuluvuuden parantamiseksi. Koska tällä hetkellä käytössä olevat tekniikat eivät toimi 3,5 GHz:n taajuudella, on tarkoituksena arvioida myös ratkaisujen soveltuvuutta 3,5 GHz 5G:n tapauksessa. Konkreettisesti tarkoituksena on tuottaa tekstimuotoinen raportti 3,5 GHz 5G:n sisäkuuluvuuteen vaikuttavista seikoista ja eroista tällä hetkellä käytettyihin radioverkoihin sekä erilaisista keinoista parantaa kuuluvuutta.

### 2.2 Rajaus

Opinnäytetyössä keskitytään sisäkuuluvuuteen lähinnä toimisto- ja asuinrakennusten näkökulmasta, tarkoitus on käsitellä vaimenemaa tultaessa ulkoa sisälle sekä olemassa olevia, muilla taajuuksilla toimiviksi todettuja, ratkaisuja vaimeneman hallintaan. Opinnäytetyössä keskitytään 3,5 GHz taajuusalueeseen. 5G:n yhteydessä kolmeksi peruspalveluksi (ITU-R 2015, 11-12; Murara 2017; Tabbane 2018, 40) on usein nostettu:

- parannettu liikkuva laajakaista (eMBB, Enhanced Mobile Broadband)
- massiivinen konetyyppinen kommunikaatio (mMTC, Massive Machine Type Communications)
- äärimmäisen luotettavat yhteydet (URLLC, Ultra-Reliable and Low Latency Communications).

Näistä ainoastaan ensimmäinen, parannettu liikkuva laajakaista, sisältyy opinnäytetyön rajaukseen muiden toimiessa matalammilla taajuusalueilla.

### **2.3 Työn tilaaja**

Toimeksiantajana opinnäytetyölle on Telia Finland Oyj, joka on yhdeksässä eri maassa toimivan Telia Company -konsernin suomalainen maayhtiö. Telia tarjoaa asiakkailleen puhe- ja tietoliikennepalveluita, vuoden 2017 lopussa asiakkaita oli noin 4,2 miljoonaa. Telia avasi vuoden 2018 syksyllä 5G-verkon alueille Helsingissä, Oulussa sekä Vantaalla. (Telia 2019.)

### 3 MOBIILIVERKOT

Tässä luvussa käsitellään mobiiliverkkojen ominaispiirteitä sekä niiden käyttöä.

Mobiiliverkolla tarkoitetaan tiedonsiirtoon käytettävää viestintäverkkoa, jossa yhteys päätelaitteen ja verkon välillä on toteutettu vapaasti etenevien radioaaltojen välityksellä.

Mobiiliverkko muodostuu tukiasemista ja kiinteästä verkosta. Tukiasemat lähettävät ja vastaanottavat signaaleja tukiaseman muodostaman maantieteellisen alueen (sektorin), eli solun, sisällä olevien langattomien laitteiden kanssa. Solun kokoa, muotoa ja suuntaa määrittävät tukiaseman sijainti, maaston muodot, antennien sijainti ja suuntaus sekä lähetysteho. Tiheästi asutuilla aluilla samalla maantieteellisellä alueella voi olla useita tukiasemia, sillä yksi tukiasema voi käsitellä vain tietyn määrän puheluita ja dataa kerralla. Solut jaetaan makro-, mikro- ja pikosoluihin, jotka kukin palvelevat erikokoisia alueita. (Tilastokeskus 2015).

Taulukko 1. Erialaisten tukiasematyypin ominaisuuksia (Tilastokeskus 2015).

Tukiasematyypin	Makrosolu	Mikrosolu	Pikosolu
<b>Toimintasäde</b>	Useita kilometrejä	100–1000 m	Alle 100 m
<b>Lähetysteho</b>	Enimmillään muutama sata wattia	Muutamia watteja	Alle 1 W
<b>Käyttöalue</b>	Taajama, maaseutu, kaupunki	Kaupunki	Tiivis kaupunkirakentaminen, rakennusten sisätilat
<b>Antennin sijainti</b>	Katoilla, mastoissa	Katoilla, seinillä	Sisäkatoissa, seinillä
<b>Etäisyys, jolla altistuminen saattaa ylittää raja-arvot</b>	Noin 10 m (antennin edessä)	Alle 30 cm (antennin edessä)	Ei edes kosketusetäisyydellä

### 3.1 Mobiiliverkkojen käyttö

Mobiiliverkkoja käytetään koko ajan ja joka paikassa. Verkon ruuhkaisimmat paikat eivät kuitenkaan ole kaupunkien keskustoissa, vaan kuntien keskustaajamissa ja kaupunkien esikaupunkialueilla, joissa mobiililaajakaistojen käyttö on hyvin yleistä, toteaa DNA:n Jarkko Laari Mikrobotin artikkelissa (Laaksonen 2018).

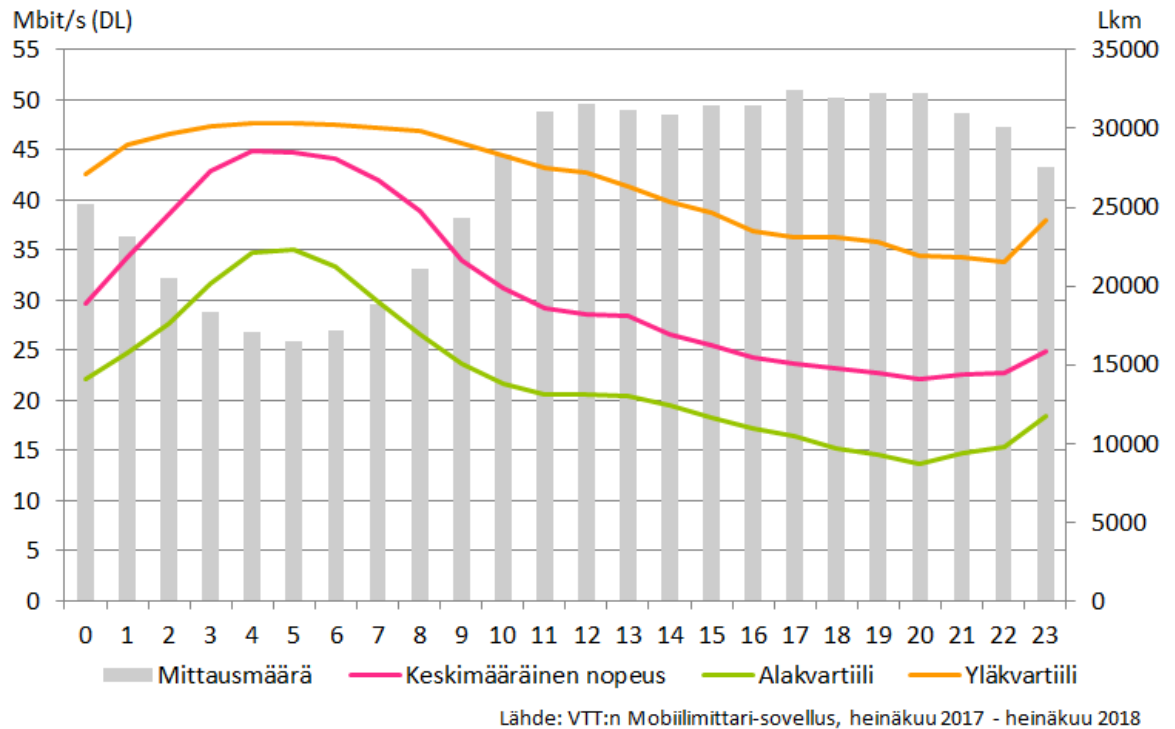
Mobiiliverkkojen käyttöä voidaan jaotella eri tavoin, esimerkiksi matkapuhelinliittymiin, jotka sisältävät puhe- ja datapalvelut, ja mobiililaajakaistaliittymiin, jotka sisältävät vain datapalvelun. Mobiililaajakaistaliittymien tyypillisiä käyttökohteita esimerkiksi makkulat, langattomat reitittimet, tabletit ja kannettavat tietokoneet. Lisäksi tulevaisuudessa on odotettavissa, että erilaiset koneliittymät (M2M, machine-to-machine) tulevat yleistymään.

3,5 GHz:n taajuusalueella toimivan 5G:n ensimmäisiä käyttökohteita tuleekin olemaan nopeat mobiililaajakaistaliittymät, jotka tarjoavat vertailukelpoisen vaihtoehdon esimerkiksi kuituliittymille (Laaksonen 2018; Uusiteknologia.fi 2019b). Ison osan käytetystä datasta muodostaa esimerkiksi erilaiset suoratoistopalvelut, kuten Netflix tai YouTube.

Tilastojen mukaan peräti 80 % käytetystä mobiilidatasta käytetään sisätiloissa (Huawei 2017). 56 % käytetystä matkaviestinverkon siirtokuormasta on mobiililaajakaistaliittymistä ja noin 44 % matkapuhelinliittymistä (Traficom 2019b). Vuoden 2017 lopussa lähes 110 000 mobiililiittymää oli myyty vähintään 300 Mbit/s tiedon siirtonopeudella. Sekä puhelujen että tekstiviestien käyttö on vähentynyt edelleen. (Traficom 2018.)

Vuoden 2018 lopulla Suomessa oli yhteensä 9,5 miljoonaa matkaviestinverkon liittymää, joista 6,9 miljoonaa oli yksityiskäytössä ja 2,6 miljoonaa yrityskäytössä. Liittymistä 6,4 miljoonaa oli puhe- ja datakäytössä olevia liittymiä, 0,9 miljoonaa puhekäytössä olevia liittymiä. (Traficom 2019b.)

Mobiiliverkkojen nopeuksiin vaikuttaa oleellisesti verkon ruuhkaisuus, tätä havainnollistaa hyvin VTT:n mobiilimittari-sovelluksella mitatut nopeudet, joita havainnollistaa kuvio 1.



Kuvio 1. Mobiiliverkon tiedonsiirtonopeudet eri kellonaikoina (Heinonen 2018).

### 3.2 Mobiilipeitto Suomessa

Vuonna 2018 30 Mbit/s:n mobiililaajakaistanopeus kattoi maantieteellisesti yli 50 % Suomesta ja kattoi 99 % kotitalouksista. 100 Mbit/s:n peittoalue oli maantieteellisesti noin 16 %, mutta kattoi 92 % kotitalouksista. 300 Mbit/s:n peittoalue kattoi muutamia promilleja Suomen pinta-alasta ja noin 13 % kotitalouksista. Esitetyt luvut kertovat nopeuden ideaaliolosuhteissa, ilman ruuhkaa verkossa tai vaimentavia rakenteita. (Traficom 2019b). Kuten edellä esitetyistä luvuista voi nähdä, on peittoa rakennettu väestöpeitto edeltä, maantieteellisen peiton jäädessä toissijaiseksi.

Uusiin verkkotoimilupiin on liitetty operaattoreille peittovelvoite, jonka mukaan esimerkiksi 2G-teknologialla tarjottavien puhe- ja datapalveluiden tulee kattaa 99 % Manner-Suomen väestöstä (Liikenne- ja viestintäministeriö 2018b).

Myös 5G on huomioitu verkkotoimiluvissa, esimerkiksi 3,5 GHz taajuusalueen toimilupiin on asetettu ehdoksi, että ”esimerkiksi teollisuuslaitokset ja satamat saavat tarvitsemansa erityiset käyttötarpeet huomioivan räätälöidyn verkkopalvelun tai



vaihtoehtoisesti voivat vuokrata toimiluvan haltijalta taajuuden käyttöoikeuden kohtuullisin ja syrjimättömin ehdoin.” (Liikenne- ja viestintäministeriö 2018a.)

### 3.3 Signaali

Signaalilla tarkoitetaan sähkömagneettista säteilyä, jolla tietoa kuljetetaan kahden pisteen välillä (Granlund 2007, 19). Mobiiliverkoissa käytettävät signaalit ovat radio-signaaleja. Radiosignaalit etenevät hyvin esteettömässä tilassa, mutta pystyvät läpäisemään myös esteitä, riippuen muun muassa signaalin taajuudesta, läpäistävän esteen vaimennusominaisuuksista ja signaalin tulokulmasta. Signaaleista puhuttaessa keskeisiä termejä ovat esimerkiksi taajuus, kaistanleveys, signaalin teho, vaimenema ja signaali-kohinasuhde, jotka ovat avattu tarkemmin luvussa käytetyt termit ja lyhenteet.

Signaalinlaadusta puhuttaessa käytetty yksikkö on dBm, eli desibeli suhteessa milliwattiin. Rakennusmateriaalien, rakenteiden tai muiden kuuluuushaittojen aiheuttamat vaimennukset ilmoitetaan desibeleinä (dB), joka kuvaa tehon suhdetta logaritmisella asteikolla.

## 4 5G-VERKOT

Tässä luvussa kerrotaan 5G-verkkojen ominaispiirteistä, eroista aiempien sukupolvien matkapuhelinverkkoihin, 5G:n arvioiduista ja ennustetuista käyttötapauksista sekä 5G-verkon käyttöönoton myötä mahdollisesti ilmenevistä haasteista sekä käyttöönoton aikataulusta.

### 4.1 5G suhteessa edeltäjiinsä

Nimensä mukaisesti 5G on viidennen sukupolven matkapuhelinverkko. Sen edeltäjiä ovat olleet 1G, 2G, 3G ja 4G, joiden ominaispiirteitä on kuvattu taulukossa 2 alla. Teknologian kehittyessä ovat käytettävissä olevat nopeudet kasvaneet jatkuvasti, samalla kun lähetystaajuuudet ovat nousseet. Myös matalammat taajuuudet ovat säilyneet rinnalla käytössä, ja esimerkiksi 2G-sukupolven teknologiaa käytetään edelleen laajemman maantieteellisen peiton saavuttamiseen. Alla olevan taulukon 2 perusteella nähdään, että 5G:n myötä käyttöönotettavaa 3500 MHz:n taajuusalueita ei ole ollut aiemmin käytössä ja se on selvästi aiemmin käytössä olleita lähetystaajuuksia korkeampi.

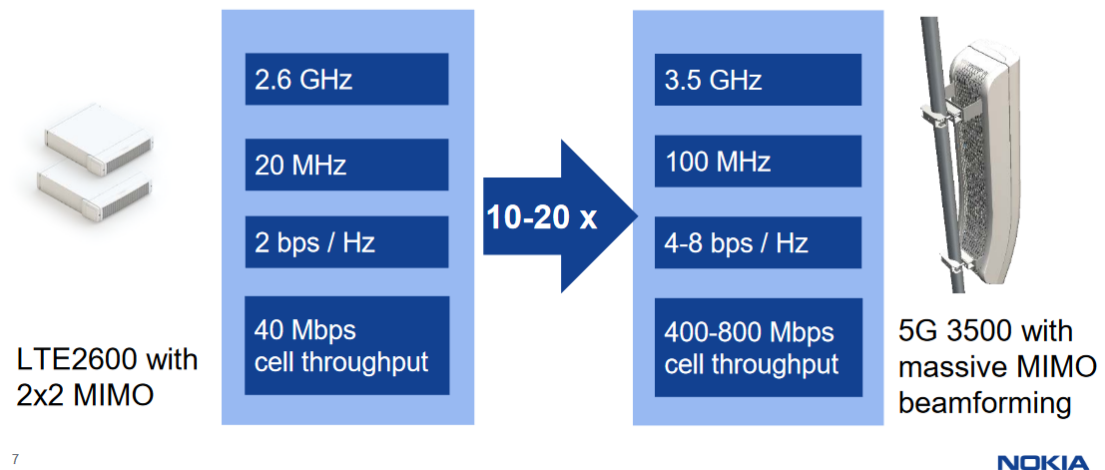
Taulukko 2. Matkapuhelinverkkojen ominaisuuksia (Fendelman 2019; Heinonen 2018; Laine-Lassila 2018; Sarvanko 2015, 7).

Sukupolvi	Teknologia	Tärkeimmät taajuuudet	Vuodet käytössä	Muuta
1G	NMT	450 MHz, 900 MHz	1981-2003	Analoginen matkapuhelinteknologia
2G	GSM	900 MHz, 1800 MHz	1991-	Ensimmäinen digitaalinen teknologia, mahdollisti tekstiviestit
3G	UMTS	900 MHz, 2100 MHz	2001-	Oleellisesti nopeampi tiedonsiirto, älypuhelisten yleistymisen
4G	LTE	800 MHz, 1800 MHz, 2600 MHz	2010-	Siirtonopeuksien nousu, esimerkiksi laadukkaiden videoiden katselu mahdollistui

5G:llä saavutetaan oleellisesti korkeampia nopeuksia, kuin aiemmillä teknologioilla. Harri Holman diaesityksessä (2017, 7) on havainnollistettu 4G:n ja 5G:n oleellisia eroja, joita ovat muun muassa taajuuden nousu, kaistanleveyden nousu sekä käytettävissä olevan tiedonsiirtonopeuden nousu, joita on esitetty kuviossa 2.

### 10 – 20x Capacity with 5G

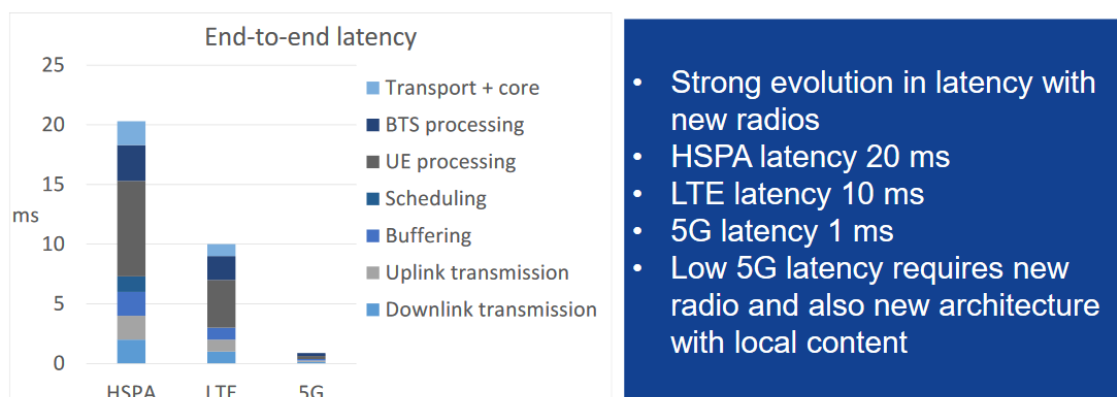
5x More Spectrum with 2 – 4x More Efficiency



Kuvio 2. Muutoksia siirryttäessä 2,6 GHz:n 4G:stä 3,5 GHz:n 5G:hen (Holma 2017, 7).

Holman diaesityksessä (2017, 8) on havainnollistettu myös viiveen pienenemistä (Kuvio 3) siirryttäessä 4G:stä 5G:hen, joka on yksi suurimpia muutoksia, mahdollistaen esimerkiksi tehokkaan etäohjauksen ja erilaiset viiveherkät ohjaussovellukset.

### Latency Evolution – New Radio and New Architecture Required



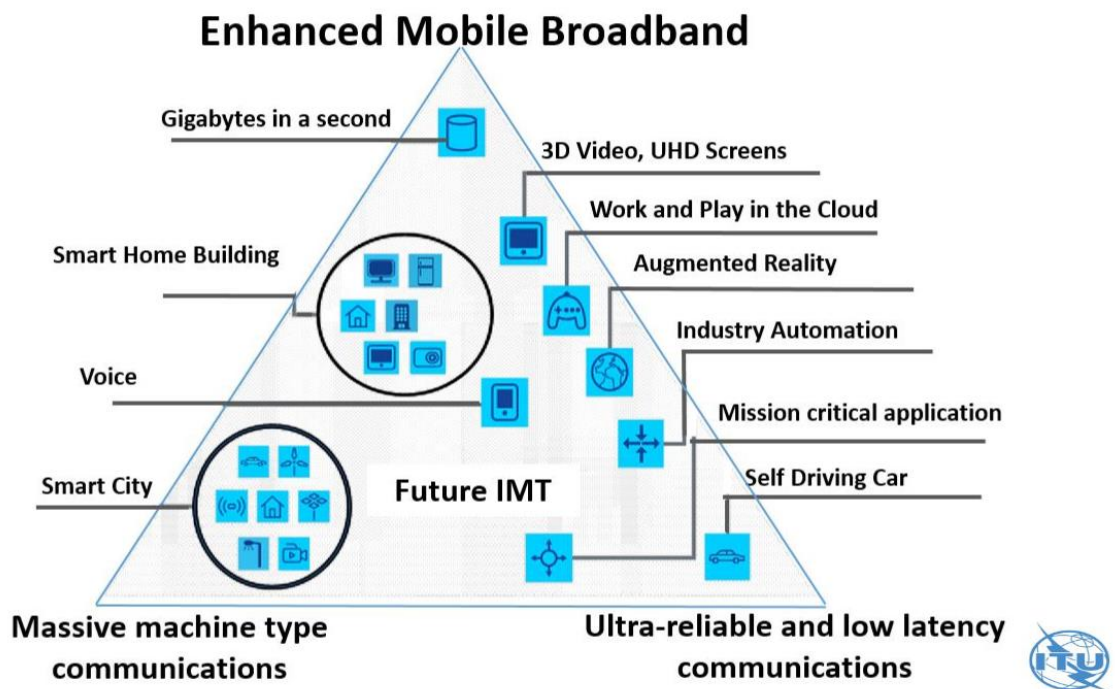
Kuvio 3. Viiveen pieneneminen 4G:stä 5G:hen siirryttäessä (Holma 2017, 8).

## 4.2 Mikä 5G on?

Kansainvälisen televiestintäliiton radioviestintäsektori ITU-R on määrittänyt 5G:n standardisointiin liittyen kolme peruspalvelua, jotka ovat

- parannettu liikkuva laajakaista (eMBB, Enhanced Mobile Broadband)
- massiivinen konetyyppinen kommunikaatio (mMTC, Massive Machine Type Communications)
- äärimmäisen luotettavat yhteydet (URLLC, Ultra-Reliable and Low Latency Communications).

Näiden kolmen peruspalvelun muodostama kolmio on esitetty kuvassa (kuvio 4) alla. Äärimmäisten luotettavien yhteyksien standardit ovat vasta kehittymässä 3GPP:ssä työstettävän Release 16:n myötä, jota odotetaan valmistuvaksi ja julkaistavaksi vuonna 2020. 3GPP sai parannellun mobiililaajakaistan sisältävän Release 15 -spesifikaation valmiiksi vuonna 2018. Esimerkiksi Telia on yhteistyössä Nokian kanssa tuomassa 5G-mobiililaajakaistaa asiakaskäyttöön jo vuoden 2019 aikana. (ITU-R 2015, 11-12; Uusiteknologia.fi 2018a; Telia 2019.)



Kuvio 4. 5G:n peruspalvelut (Murara 2017).

Tekniikan tohtori Jyrki Penttinen nostaa Uusiteknologia.fi -lehden artikkelissaan kolmen peruspalvelun rinnalle tärkeiksi elementeiksi myös kehittyneen verkon ohjauksen ja valvonnan sekä ajoneuvoliikennöinnin (Kuvio 5). Myös Penttisen kuvaamasta viidestä peruselementistä Release 15:n myötä käyttöön saatiin ainoastaan kehittynyt mobiililaajakaista, muut tullaan ottamaan käyttöön Release 16:n valmistuessa. (Uusiteknologia.fi 2018a.)



Kuvio 5. Jyrki Penttisen näkemys 5G:n tärkeimmistä elementeistä (Uusiteknologia.fi 2018a).

Oleellisimmat erot aiempiin teknologioihin 5G:ssä ja erityisesti parannellussa mobiililaajakaistassa käyttäjän kannalta ovat pienempi viive ja suurempi maksimikapasiteetti ja mahdollisuus verkon viipalointiin (englanniksi slicing). Viipalointitekniikalla voidaan tukiaseman ja verkon kapasiteetista taata tietty määrä tietylle asiakkaalle, jolloin yhteyden laatu ja nopeus säilyvät riippumatta alueen muiden käyttäjien määrästä ja verkkokäyttäjämäärästä. Viipalointi tekee langattomasta dataliikenteestä entistä luotettavampaa ja mahdollistaa siten myös kriittisten sovellusten käytön langattomien yhteyksien yli. Viipalointi mahdollistaa myös esimerkiksi organisaatioille

erilaisten verkkojen luomisen eri käyttötarkoituksiin optimoiden verkon ominaisuudet kuhunkin tarkoitukseen parhaiten sopiviksi. (Honkanen 2018; Lindström 2018; Rokka 2018; Telia 2018b.)

Koska langattomat 5G-mobiililaajakaistat tulevat ainakin alkuvaiheessa toimimaan 3,5 GHz:n taajuudella, joka on nykyään käytössä olevia 0,8 GHz – 2,6 GHz taajuusalueita korkeampi ja läpäisee siten huonommin rakenteita, sisäkuuluvuuden parantamiseksi täytyy keksiä ratkaisuja. Yhtenä vaihtoehtona on esitetty esimerkiksi, että langattomien mobiililaajakaistojen vastaanottimet olisivat ulkoasennettavia, jotta seinärakenteet eivät pääse haittaamaan signaalin kulkua, kertoo Pekka Väisänen DNA:n verkkosivuilla (DNA 2018).

### 4.3 5G:n käyttötapauksia

5G:tä on markkinoitu mitä erilaisemmilla käyttötarkoituksilla, joista muutamia tyypillisimmin esitettyjä ovat

- itseohjautuvat ajoneuvot
- etäohjattavat kulkuneuvot
- etäkirurgia
- virtuaalitodellisuus (VR)
- lisätty todellisuus (AR).

Tyypillistä 5G:n visioituille käyttötarkoituksille on viivekriittisyys ja luotettavuus, sillä aiemmin mobiiliyhteyksien pullonkaulana moneen käyttötarkoitukseen on ollut nimenomaan viive ja yhteyksien laatu. Kun viive saadaan laskettua jopa yhteen millisekuntiin, ei ihminen pysty havaitsemaan viivettä esimerkiksi kulkuneuvon, laitteen tai välineen etäohjauksessa. 5G-tekniikan myötä myös yhteyksien luotettavuuteen on odotettavissa parannusta.

Nokian Lauri Oksanen kertoo Telian videolla (2018a), että viiveen pieneneminen mahdollistaa sen, ettei esimerkiksi VR-laseja käytettäessä tarvitse käyttäjän nopeiden liikkeiden varalta kuvata varmuuden vuoksi koko 360 asteen keilaa (kuten suuremmalla viiveellä), vaan pienen viiveen ansiosta kuva ehtii reagoimaan käyttäjän liikkeisiin ja voidaan kuvata vain sitä suuntaa, johon käyttäjä katsoo. Käytännössä

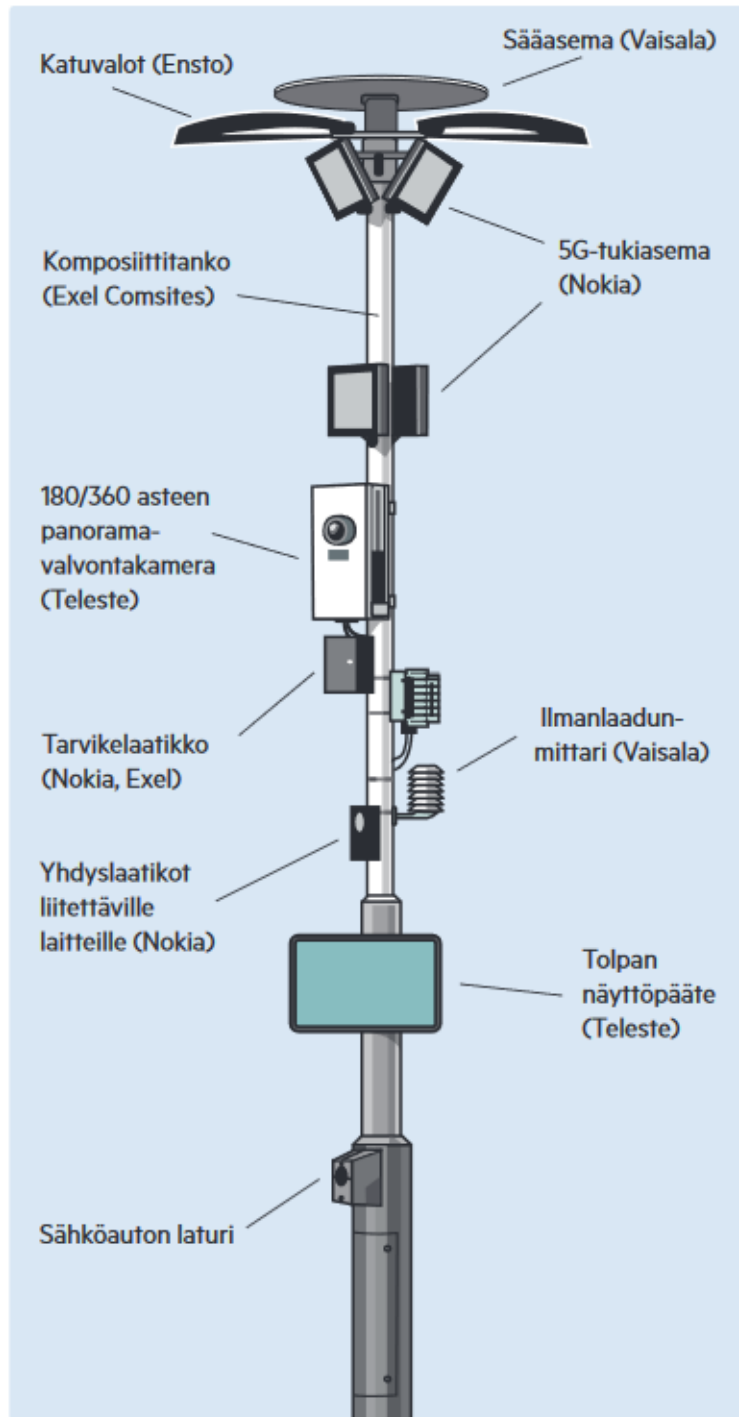
esimerkiksi Stora Enso on jo testannut ja kehittänyt lisätyn todellisuuden (AR) ratkaisuja yhdessä Telia kanssa: lisätyn todellisuuden sovelluksessa koneen virtuaaliin ja tietopisteisiin liitettyä reaaliaikaista dataa voidaan hyödyntää kunnossapidon yhteydessä. Jatkossa pienemmät viiveet sekä virtuaalitodellisuuden ja lisätyn todellisuuden teknologiat tulevat mahdollistamaan esimerkiksi asiantuntijoiden reaaliaikaisen hyödyntämisen maantieteellisestä sijainnista riippumatta. (Stora Enso 2018). Lauri Oksanen nostaa Telian artikkelissa (2018b) esimerkiksi viiveen pienemisen mahdollisuuksista myös itseohjautuvat autot, joiden on mahdollista ajaa lähempänä toisiaan ja kuluttaa näin vähemmän polttoainetta, kun viive on pienempi. Hän kertoo myös turvallisuuden paranevan, kun autoon voidaan välittää tietoa tien tapahtumista reaaliaikaisesti.

Oksanen kertoo myös, että verkon kasvava kapasiteetti mahdollistaa useampien mittalaitteiden tai sensorien liittämisen verkkoon (Telia 2018a). Toisaalta 5G-standardoinnin myötä IoT-laitteiden sähkönkulutus on määritelty niin pieneksi, että ne voivat toimia AAA-paristolla jopa vuosikymmenen, kertoo Jarkko Laari (Laaksonen 2018). Tämä mahdollistaa suurien kokonaisuuksien älykkään, viiveettömän ja reaaliaikaiseen tietoon ja sen pohjalta päätöksentekoon perustuvan ohjaamisen.

5G on synnyttänyt myös täysin uudenlaisia innovaatioita, kuten Telesten *Connected Zone* 5g-bussipysäkit (Keränen 2018), joita yhtiö on kehittänyt LuxTurrim5G-hankkeen (LuxTurrim 2018) yhteydessä. Bussipysäkit on varustettu näytöllä, kameralla, tilannekuvaohjelmistolla ja lisäksi käyttäjillä tulisi olla mobiilisovellus hälytysten tekemiseen. Telesten Ilkka Ritakallio perustelee Keräsen artikkelissa (2018) tuotteen paremmuutta perinteiseen kameravalvontaan nähden esimerkiksi valvonnan vuorovaikutteisella vanhan passiivisen mallin sijaan.

5G:n yhteydessä lähetystaajuus nousee 3,5 GHz:iin, jolloin signaalin kantama on suhteellisen lyhyt. Kun tulevaisuudessa siirrytään yhä korkeammille taajuuksille, kantama tulee lyhenemään entisestään, kertoo Ilkka Ritakallio Turun Sanomissa julkaistussa artikkelissa (Anttila 2018). LuxTurrim5G-hankkeessa on pilotoitu älykkäitä katuvalopylväitä (Kuvio 6), joita esimerkiksi itseajavat autot voisivat tulevaisuudessa hyödyntää. Idea on lähtenyt siitä, että katuvalopylväät vaativat joka tapauksessa sähköä, jolloin ne ovat luonteva paikka myös muulle teknologialle (Anttila 2018). Pylväs kerää tietoa ympäristöstään ja siihen voitaisiin sijoittaa tukiasemia,

jolloin tukiasemaverkostosta saataisiin riittävän tiheä. Esimerkiksi Inkooseen on viireillä projekti älytiestä, jossa noin 31 kilometrin matkalle tulee yli 600 5G-tukiasemalla varustettua valaisinpylvästä (Uusiteknologia.fi 2019a; Inko 2018).



Kuvio 6. LuxTurrim5G-hankkeessa pilotoitava älykäs katuvalopylväs (Anttila 2018).



Kekseliäistä innovaatioista ja monimuotoisista ideoista huolimatta alkuvaiheessa tyypillisimmät käyttötapaukset kuluttajilla tulevat luultavasti olemaan 5G-mobiililaa-  
jakaistaliittymät sekä 5G-matkapuhelinliittymät. Näiden sisätilatoimivuudessa on  
odotettavissa haasteita suurempien läpäisyvaimennuksien johdosta, mutta haastei-  
den ratketessa käyttäjien on mahdollista katsella esimerkiksi 4K- ja 8K-videoita suo-  
ratoistona mobiiliyhteyksien yli. Myös toimistotiloissa tullaan testaamaan perinteis-  
ten WLAN-verkkojen korvaamista 5G-verkoilla.

#### **4.4 5G:n käyttöönotto**

Yleensä lähtökohtana uuden verkon, todennäköisesti myös 5G:n, rakentamiselle on, että uudet tukiasemat sijoitetaan samoille paikoille kuin nykyiset tukiasemat (Heikkilä 2019). Tämä on yleensä kustannustehokkain vaihtoehto, ja myös lupien kannalta yksinkertaisinta. Koska käytettävä, aiempaa korkeampi lähetystaajuus läpäisee rakenteita huonommin, voi nykyisten tukiasemapaikkojen käyttäminen aiheuttaa kuuluvuuskatveja esimerkiksi korkeiden rakennusten vaimentaessa signaaleja aiempaa enemmän. Taajuuden kasvaessa myös signaalin kantama piene-  
nee, mutta tätä tullaan todennäköisesti kompensoimaan lähetystehoa kasvatta-  
malla.

Korkeamman lähetystaajuuden vaikutusta sisätilakuuluvuuteen ja 3,5 GHz:n 5G-  
verkon rakentamista nykyisiä tukiasemapaikkoja hyväksikäyttäen on jo testattu  
myös käytännössä, esimerkiksi Halvarssonin ym. testiraportin (2018) mukaan 3,5  
GHz:n 5G:n kuuluvuus voisi beamforming-tekniikan ansiosta saavutettavan sig-  
naalinvoimakkuuden parannuksen ansiosta olla ulkona jopa parempi kuin käytössä  
olevalla 2,1 GHz:n LTE-tekniikalla ja sisätiloissakin samalla tasolla 2,1 GHz:n  
LTE-tekniikkaan verrattuna. Tätä on havainnollistettu seuraavalta sivulta löyty-  
vässä taulukossa 3.

Taulukko 3. Ericssonin testi 3.5 GHz 5G:n ja 2.1 GHz LTE:n välillä (Halvarsson ym. 2018).

<b>Coverage difference beamformed 3.5 GHz vs non-beamformed 2.1 GHz</b>	
Beamforming gain test-bed GoB	11,0 dB
Outdoor link budget difference	-5,1 dB
Outdoor coverage difference (= 11,0 – 5,1)	5,9 dB
Indoor old building link budget difference	-7,1 dB
Indoor coverage difference old building (= 11,0 – 7,1)	3,9 dB
Indoor new building link budget difference	-10,1 dB
Indoor coverage difference new building (= 11,0 – 10,1)	0,9 dB

Ensimmäiset julkiset 5G-testit Suomessa ja maailmalla on tehty vuoden 2018 aikana ja kesällä 2018 käyttöön otettiin Suomessa jo ensimmäiset kaupalliseen käyttöön tarkoitetut 5G-tukiasemat. Vielä keväällä 2019 olemassa olevat 5G-verkot rajoituvat maantieteellisesti hyvin pienille alueille esimerkiksi Helsingin (Kailio 2018; Uusiteknologia.fi 2018b) ja Tampereen (Lehto 2018) keskustoihin.

Tällä hetkellä rakennettu 5G-verkko on pitkälti testi- ja markkinointimielessä rakennettua ja sijoittuu maantieteellisesti hyvin pienille alueille. Vuoden 2019 aikana operaattorit tulevat laajentamaan 5G-verkkojaan maantieteellisesti suuremmalle alueelle ja kaupallisia palveluita tullaan tarjoamaan yhä enenevässä määrin. Myöhemmissä vaiheissa on todennäköistä, että tukiasemaverkosta tullaan tiuhentamaan paremman peiton saavuttamiseksi ja käytettävissä olevan kapasiteetin kasvattamiseksi. Oletus on, että ensimmäisenä 5G-verkot leviäisivät kampusalueille ja teollisuuden käyttöön, esimerkiksi satamiin ja suuriin tehdaskomplekseihin, joissa sekä käyttäjämäärät että tilat ovat suuria ja tukiasemia voitaisiin sijoittaa myös sisätiloihin (Sarajisto 2019).

## 5 VASTUUT JA MÄÄRÄYKSET

Suomi sai keväällä 2019 Barcelonan mobiilimessuilla GSMA Government Leadership Award -palkinnon edistyksellisen viestintäpolitiikan ja lainsäädännön toteuttajana (GSMA 2019). Samassa yhteydessä tunnustusta annettiin myös edistyksellisestä 5G-taajuuspolitiikasta, jolla on haluttu varmistaa 5G-yhteensopivien taajuuksien saatavuus.

Sisäkuuluvuuden heikkenemiseen ovat yleisen mielipiteen mukaan vaikuttaneet tiukentuneet energiatehokkuusmääräykset sekä yhä korkeampien taajuusalueiden käyttö matkaviestinteknologiassa (Asp ym. 2013, 8; Karjalainen 2019; Tuominen 2019).

Tämän kappaleen alaluvuissa on esitetty rakentamismääräyskokoelman muutosten myötä tapahtunutta U-arvovaatimusten tiukentumisesta, maankäyttö- ja rakennuslain määräystä sisäkuuluvuuden huomioimisesta, radiolakia aktiivisten toistimien rajoittamisesta vain operaattoreiden käyttöön sekä määräystä yleispalvelusta, jonka perusteella jokaisella on oikeus puhe- ja tietoliikenneliittymään.

### 5.1 Energiatehokkuus

Rakentamiseen liittyvät lämmöneristysmääräykset ovat kiristyneet jatkuvasti materiaalien ja rakennustapojen kehittyessä. Ensimmäiset suositukset rakenteiden lämmöneristävyydestä Suomessa on annettu vuonna 1962, jolloin Lämmöneristysnormit RIY A43 on julkaistu. Jo tätä ennen oli julkaistu ohje Asuinrakennusten seinämien lämmönläpäisyluvut ja niiden suositeltavat enimmäisarvot, jonka ensimmäinen painos on ilmestynyt 1949. (Kouhia, Nieminen & Pulakka 2010, 2-3). Rakentamiseen liittyviä energiatehokkuusmääräyksiä on Suomessa tiukennettu viimeksi vuosina 2003, 2008, 2010 ja 2012 (Rakennusteollisuus [viitattu 28.3.2019]), joista 2010 voimaan tullut määräys rakennusten lämmöneristyksestä (RakMk C3), on viimeisin, jossa U-arvovaatimuksia on tiukennettu.

Taulukossa 4 on havainnollistettu rakentamismääräyskokoelmassa esitettyjä vaatimuksia asuinrakennuksille (lämpimille, erityisen lämpimille tai jäähdytettäville kylmän tilan rakennusosille) eri aikakausina. Esitetyt luvut ovat enimmäisarvoja.

Taulukko 4. Suomen rakentamismääräyskokoelman energiamääräysten vaatimuksia vuosina 1976 – 2010 (Kouhia ym. 2010, 9).

	1976	1978	1985	2003	2007	2010
Ulkoseinä U [W/m <sup>2</sup> K]	0,4	0,29	0,28	0,25	0,24	0,17
Yläpohja U [W/m <sup>2</sup> K]	0,35	0,23	0,22	0,16	0,15	0,09
Alapohja U [W/m <sup>2</sup> K]	0,4	0,4	0,36	0,25	0,24	0,16
Ikkuna U [W/m <sup>2</sup> K]	2,1	2,1	2,1	1,4	1,4	1
Ilmavuotoluku n <sub>50</sub> [1/h]	6	6	6	4	4	2

U-arvovaatimukseen on lievennyksiä esimerkiksi hirsirakennuksille ja korjausrakentamisessa. U-arvovaatimukseen korjausrakentamiskohteissa voi hakea joustoa teknisen, toiminnallisen tai taloudellisen syyn perusteella, ja toisaalta maankäyttö- ja rakennuslain pykälässä 117 j (L 1.12.2017/812) veloitetaan huomioimaan sisäkuuluvuus osana rakennuksen soveltuvuutta käyttötarkoitukseensa.

Vuoden 2010 jälkeen tulleet muutokset ovat asettaneet vaatimuksia rakennuksen kokonaisenergiankulutukselle (E-luku), mikä ei ohjaa rakentamista sisäkuuluvuutta heikentävään suuntaan yhtä voimakkaasti kuin rakennusten tiiveyteen (ilmavuotoluku) ja eristävyteen (U-arvo) liittyvät määräykset. Kuitenkin määräysten yhä tiukentuessa esimerkiksi rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD, Energy Performance of Buildings) edellyttäessä kaikkien uusien rakennusten olevan lähes nollaenergiarakennuksia on mahdollista, että rakenteiden eristävyys kasvaa entisestään ja ne läpäisevät radiosignaaleja yhä huonommin.

## 5.2 Maankäyttö- ja rakennuslaki

Maankäyttö- ja rakennuslaissa (L 1.12.2017/812) määrätään sisäkuuluvuudesta:

Asuin-, majoitus- tai työtiloja sisältävän rakennuksen teknisten ratkaisujen on kustannustehokkuus huomioon ottaen mahdollistettava edellytykset matkaviestinten kuuluvuudelle sisätiloissa, ellei kysymyksessä ole rakennus, jonka sisätilakuuluvuutta on vaimennettava.

Ympäristöministeriön asetuksella voidaan antaa uuden rakennuksen rakentamista, rakennuksen korjaus- ja muutostyötä sekä rakennuksen käyttötarkoituksen muutosta varten tarvittavia tarkempia säännöksiä:

- 1) asuin-, majoitus- tai työtiloja sisältävän rakennuksen suhteesta ympäristöönsä;
- 2) asuin-, majoitus- tai työtilan koosta, tiloista, varustuksesta ja valaistuksesta;
- 3) asuin-, majoitus- tai työtilan ovista, kulkuaukoista ja kulkuyhteyksistä;
- 4) teknisistä ratkaisuista, joilla voidaan luoda edellytykset matkaviestinten sisätilakuuluvuudelle.

Laki koskee niin uudis- kuin korjausrakentamisprojekteja, joille on myönnetty rakennuslupa 1.12.2017 jälkeen.

Sisäkuuluvuuden edellytyksistä huolehtiminen on rakennushankkeeseen ryhtyvän vastuulla, ja rakennuslupaviranomaisten tulee varmistaa sisätilakuuluvuuden huomiointi rakennushankkeessa (Suurnäkki 2019). Laki ei sisällä todentamismenettelyä, eli rakennushankkeeseen ryhtyvän ei tarvitse osoittaa lain vaatimusten sisäkuuluvuuden suhteen täyttyvän. Käytännössä rakentaja kuitenkin on vastuussa mahdollisten ongelmien ilmetessä. Vastuu on mahdollista siirtää sopimuksella esimerkiksi suunnittelijalle. (Keskinen, 2018.)

### **5.3 Aktiiviset toistimet**

Signaalia vahvistava toistin luetaan aktiiviseksi verkon osaksi, jollaisia saavat asentaa vain verkko-operaattorit niiden luoman korkean häiriöriskin vuoksi (Suurnäkki 2019; Viestintävirasto 2013). Pahimmillaan toistinta lähellä olevien tukiasemien toiminta häiriintyy, häiriten tai jopa estäen data- ja puhelinliikenteen (Viestintävirasto

2013). Kuuluvuuden parantaminen itse asennettavilla aktiivisilla toistimilla ei siis nykyisellä lainsäädännöllä tule kysymykseen. Toistinten käytöstä on määrätty Radio-laissa (L 1015/2001).

#### **5.4 Määräys yleispalvelusta**

Viestintävirasto on antanut marraskuussa 2014 määräyksen (M 58 B/2014) viestintäverkkojen ja -palvelujen laadusta ja yleispalvelusta tarkoituksenaan varmistaa viestintäverkkojen ja -palvelujen toimintavarmuus, suorituskyky, viestintäverkkojen ja palveluiden toimintavarmuus, suorituskyky, luotettavuus ja laatu normaalioloissa. Yleispalvelusta annettu määräys turvaa kuluttajien ja yritysten oikeuden saada kotiin tai yrityksen sijaintipaikkaan viestinnän peruspalvelut, vähintään kahden megabitin nopeudella toimiva internet-yhteys ja kiinteä tai langaton puhepalvelu (Telia 2018c; Traficom 2019a).

Millään verkko-operaattorilla ei ole koko maata kattavaa väestöpeittovelvoitetta (Suurnäkki 2019). Käytännössä siis yleispalvelun näkökulmasta riittää, että yhden operaattorin internet- tai puheliittymä toimii sijainnin (koti tai yrityksen toimipiste) yhdessä pisteessä. Mikäli näin ei ole, voi Traficom nimetä jonkin operaattorin toimimaan alueella niin kutsuttuna yleispalveluyrityksenä. Käyttäjän näkökulmasta siis yleispalveluliittymän tilaaminen voi tulla kysymykseen, mikäli yleisiä kaupallisia ratkaisuja ei sijaintiin ole tarjolla.

Traficom (2019) kertoo internet-sivuillaan, että yleispalvelun kannalta riittää, mikäli puhelin- tai internet-liittymä toimii yhdessä pisteessä kotona tai yrityksen toimipisteessä. Tästä seuraa, että heikon kuuluvuuden sijainnissa käyttäjän voi olla tarpeen parantaa kuuluvuutta sisätiloissa omakustanteisesti esimerkiksi ulkoisella lisäantennilla tai pöytä-GSM-laitteella.

## 6 SISÄKUULUVUUS

Luvussa 6 käsitellään sisäkuuluvuutta yleisesti.

Viime vuosina, jo ennen 3,5 GHz:n taajuusalueen käyttöönottoa, ongelmat sisäkuuluvuudessa ovat yleistyneet voimakkaasti. Samalla langattomien tietoliikenneyhteyksien käyttö on yleistynyt huomattavasti, ja toimivasta langattomasta tiedonsiirrosta on tullut osa käyttäjien perustarpeita siinä missä lämpö, vesi tai sähkö. Sisäkuuluvuusongelmien aiheuttajana pidetään usein tiukentuneita energiatehokkuusmääräyksiä (Asp ym. 2013; Karjalainen 2019; Pihonen 2016; Tuominen 2019), joiden johdosta rakentamisessa käytetään yhä enemmän radiosignaaleja voimakkaasti vaimentavia metallikalvoja (esimerkiksi eristeiden pinnassa), metalliverkkoja (esimerkiksi rappausverkot) ja entistä paksumpia eristekerroksia. Radiosignaalit läpäisevät entistä huonommin energiatehokkaammiksi suunniteltuja rakenteita, ja toisaalta samalla ollaan siirrytty käyttämään yhä korkeampia taajuuksia, ja yhteisvaikutuksesta kuuluvuusongelmat ovat yleistyneet huomattavasti (Rakennusteollisuus 2013, 4-5).

Matkaviestinverkon peittoalueen suunnittelukriteerinä on toteuttaa sisätilakuuluvuus kohtuullisesti vaimentaviin asuinrakennuksiin (Heikkilä 2018), mikä onkin ollut aiemmin poikkeustapauksia lukuun ottamatta toimiva ja pääsääntöisesti ongelmaton tapa (Asp ym. 2013, 8). Ennen tiukentuneita energiatehokkuusmääräyksiä rakennukset vaimensivat signaalia oleellisesti vähemmän kuin nykymääräysten mukaisesti rakennetut energiatehokkaan rakennukset.

Esimerkiksi Aspin ym. raportissa (2013, 99) on mitattu ulkoseinärakenteen vaimenuseroksi uusien ja vanhojen kerros- ja rivitalorakennusten välillä noin 13 dB, eli signaalin teho vaimenee noin 20 kertaa enemmän tullessaan uuden kuin vanhan seinärakenteen läpi. Tanskassa Rodriguez Larrad ym. (2017, 4) tutkivat vanhojen ja uusien rakennusten ulkoseinien aiheuttaman vaimennuksen eroa. Tutkimuksessa saatiin taulukon 5 mukaisia tuloksia, jotka ovat keskihajonta huomioiden kohtalaisen samankaltaisia Aspin ym. tutkimuksessa (2013, 99) saatujen tulosten kanssa.

Taulukko 5. Mitattuja läpäisyvaimennuksia vanhoilla ja uusilla seinärakenteilla (Rodriguez Larrad ym. 2017, 4).

Taajuus (GHz)	Vanha rakennus	Uusi rakennus
	Läpäisyvaimennus (dB) ja keskihajonta ( $\sigma$ )	Läpäisyvaimennus (dB) ja keskihajonta ( $\sigma$ )
0,8	6.5±1.0	20.2±5.9
2,0	4.4±2.4	24.6±6.3
3,5	8.4±1.4	23.5±4.2

Nykyajan voimakkaasti vaimentaviin rakennuksiin saattaa olla lähes mahdotonta tuoda kuuluvuutta ulkopuolelta. Esimerkiksi Niemelän, Aspin & Sydorovin tutkimuksen (2012, 22) mukaan vuonna 2012 rakennetun kerrostalon aiheuttama läpäisyvaimennus 3500 MHz:n signaalille oli ikkunoiden ja ulkoseinien kohdalta asunnoille 30-35 dB ja liiketilalle jopa 45 dB. Mikäli läpäisyvaimennus on 30 dB, signaalista 1/1000 läpäisee rakenteen, ja mikäli läpäisyvaimennus on 40 dB, läpäisee rakenteen enää noin 1/10 000 signaalista. Esimerkiksi oppaassa *Rakenteellinen energia- tehokkuus korjausrakentamisessa* (Ojanen, Nykänen & Hemmilä 2017, 63) eritellään radiosignaalin kuuluvuuteen rakennuksen sisätiloissa vaikuttaviksi tekijöiksi muun muassa linkkiasemien sijainti suhteessa rakennuksen muotoihin ja aukkoihin, radiosignaalin taajuus, ympäröivät rakennukset ja maaston muodot sekä rakenteiden materiaalit.

Rakennuksen vaippa vaimentaa radiosignaalia niin sisältä ulos kuin ulkoa sisälle (Ojanen ym. 2017, 64). Matalat taajuudet läpäisevät rakenteita korkeampi taajuuksia paremmin, mistä syystä kuuluvuus sisätiloissa ei muodostu yleensä ongelmaksi matalilla taajuuksilla. Myös rakennuksen muodoilla on vaikutusta sisäkuuluvuuteen, ongelmallisimpia ovat runkosyvyydeltään laajat rakennukset. Lisäksi ongelmia voi aiheuttaa jakavien rakenteiden suuri määrä, vähäinen aukotus tai aukkojen (lasien) päällystäminen selektiivikalvoin. Kuuluvuusongelmat ovat mahdollisia kaikissa talo-tyypeissä, mikäli radiosignaalit eivät läpäise niiden ulkovaippaa riittävän hyvin, etäisyys lähimpään tukiasemaan on pitkä tai alueella on vain yksi tukiasema, jonka sijainti ei ole optimaalinen rakennukseen tai sen osaan nähden. (Ojanen ym. 2017, 64.)

Operaattorien kanta on, ettei operaattorien luoma ulkopeitto tule enää olemaan koskaan olemaan niin hyvä, että se korvaisi rakennusten aiheuttamat vaimennukset.



Tämän on tuonut esille esimerkiksi Elisan taajuushallintapäällikkö Pekka T. Pussinen (Häkkinen 2016). Olemassa olevat ja nykyisen rakennustavan mukaiset rakenteet aiheuttavat jatkossa käytössä oleville korkeammille taajuuksille, mukaan lukien 3,5 GHz, entistä suurempia vaimennuksia, mistä syystä sisäkuuluvuuden merkityksen huomioiminen rakentamisessa tulee korostumaan.

## 7 RAKENTAMISEN RATKAISUT SISÄKUULUVUUTEEN

Luvussa 7 on esitelty erilaisia rakentamisen ratkaisuja sisäkuuluvuuden mahdollistamiseksi ja parantamiseksi.

Sisäkuuluvuutta parantavat ratkaisut voidaan jakaa karkeasti rakentamisen ratkaisuihin sekä teleteknisiin ratkaisuihin. Käytännössä kyse on kuitenkin kokonaisuudesta: ilman hyvää ulkokuuluvuutta ei voida rakentamisen ratkaisuilla luoda sisäkuuluvuutta, eikä toisaalta hyvän ulkokuuluvuuden alueilla välttämättä ole järkevää rakentaa kuuluvuutta teleteknisin ratkaisuin tuomalla lisää aktiivilaitteita, joten asiaa ei voida tarkastella vain yhdestä näkökulmasta.

Rakentamisen keinoin toteutettaville sisäkuuluvuuden parannusratkaisuille on useita puolesta puhuvia seikkoja. Radiosignaalit läpipäästävät rakenteet ovat esimerkiksi operaattori- ja teknologiariippumattomia, eivät ajoissa suunnittelussa huomioituna kasvata oleellisesti rakennushankkeen, eivätkä aiheuta myöhemmin ylläpitokustannuksia. Taulukossa 6 on havainnollistettu eri tekijöiden kuuluvuusmuutoksien suuruutta desibeleinä ja kertoimina. Esimerkiksi muutoskerroin -20 (-13 dB) tarkoittaa, että jatkossa signaalista vain 1/20 (5 %) läpäisee rakenteen.

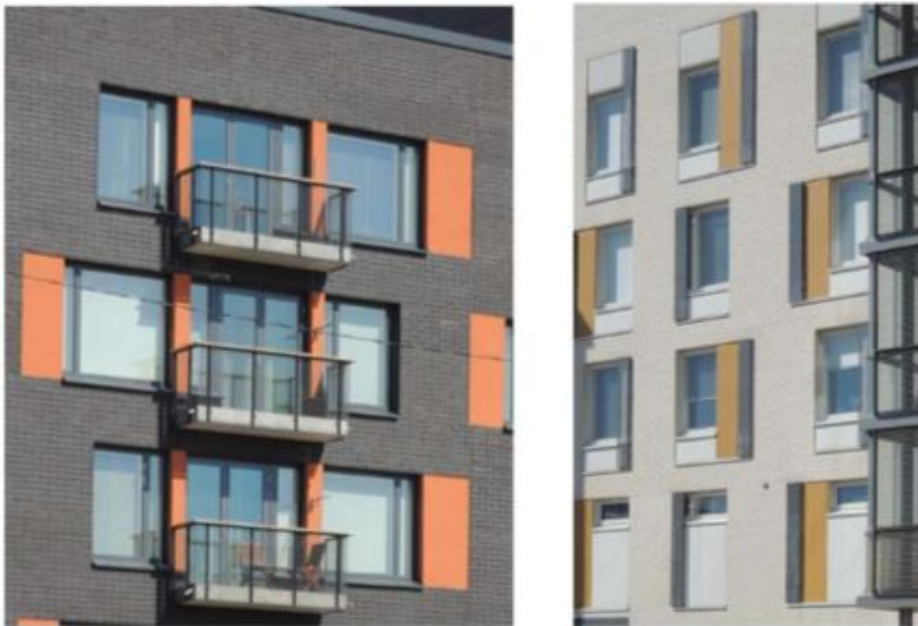
Taulukko 6. Kuuluvuusmuutosten suuruusarviot (Liikenne- ja viestintäministeriö 2013).

Vaikutustapa	Muutos (kerroin)	Muutos (dB)
Matkapuhelinteknologian vaikutus	-2	-3
Uusi talo verrattuna vanhaan (keskiarvo)	-20	-13
Uusi talo verrattuna vanhaan (pahimmillaan)	-100	-20
Ikkunoiden korvaaminen selektiivikalvoilla	-316	-25
Tukiasematiheyden nelinkertaistaminen	4	6
Betonielementin korvaaminen kevytlekaharkolla (RF-aukko)	13	11
Ikkunan selektiivikalvon poistaminen osittain (RF-aukko)	100	20
Ikkunan selektiivikalvon poistaminen kokonaan (RF-aukko)	200	23
Alumiinipintaisen eristelevyn korvaaminen lasivillalla puutalossa (RF-aukko)	316	25

## 7.1 RF-aukot

Yleinen rakenteellinen tapa luoda edellytykset kuuluvuudelle ovat niin kutsutut RF-aukot, joiden kohdalta läpäisyvaimennus on oleellisesti muuta rakennuksen vaippaa matalampi (Rakennusteollisuus 2013, 14). Oleellista on, että RF-aukot toimivat vain paikoissa, jossa ulkokenttä on voimakas (Liikenne- ja viestintäministeriö 2013).

Mahdollisia tapoja luoda RF-aukko ovat esimerkiksi metallikalvollisen eristeen korvaaminen kalvottomalla tai esimerkiksi puusta tai muusta matalan läpäisyvaimennuksen materiaalista toteutettu, paremmin signaaleja läpipäästävä rakenne voimakkaasti vaimentavassa seinässä (RT 80-11252 2017, 3). Rakennusteollisuuden suunnitteluohjeessa (2013, 15) esitetään, että luontevin paikka RF-aukolle olisi ikkunan vieressä, johon nykyään usein suunnitellaan erilaisia tehoste- ja koristepaneeleja muista kuin radioteknisistä syistä (Kuvio 7).

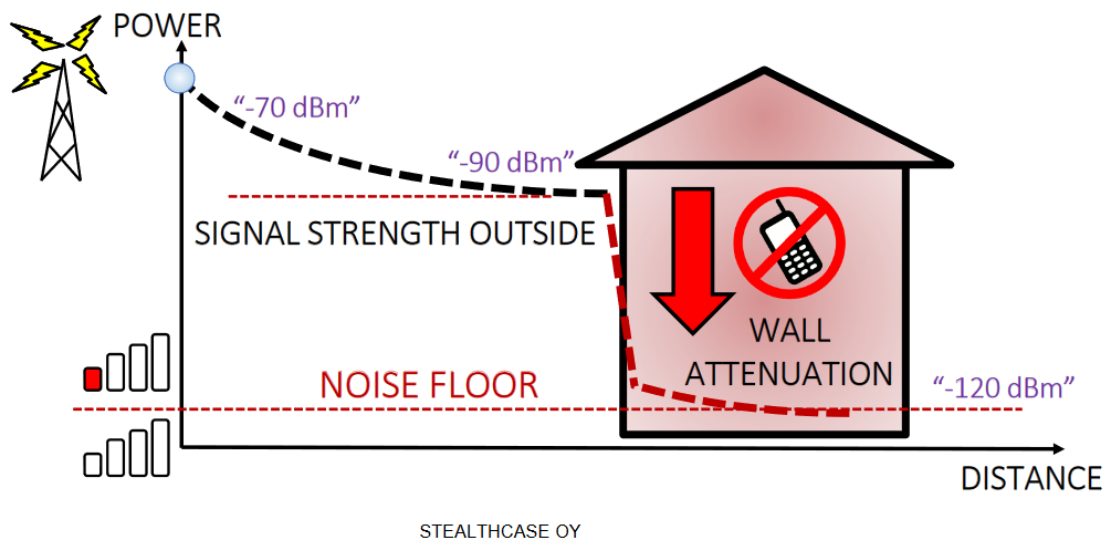


Kuvio 7. RF-aukko on mahdollista sijoittaa ikkunan viereen (Rakennusteollisuus 2013).

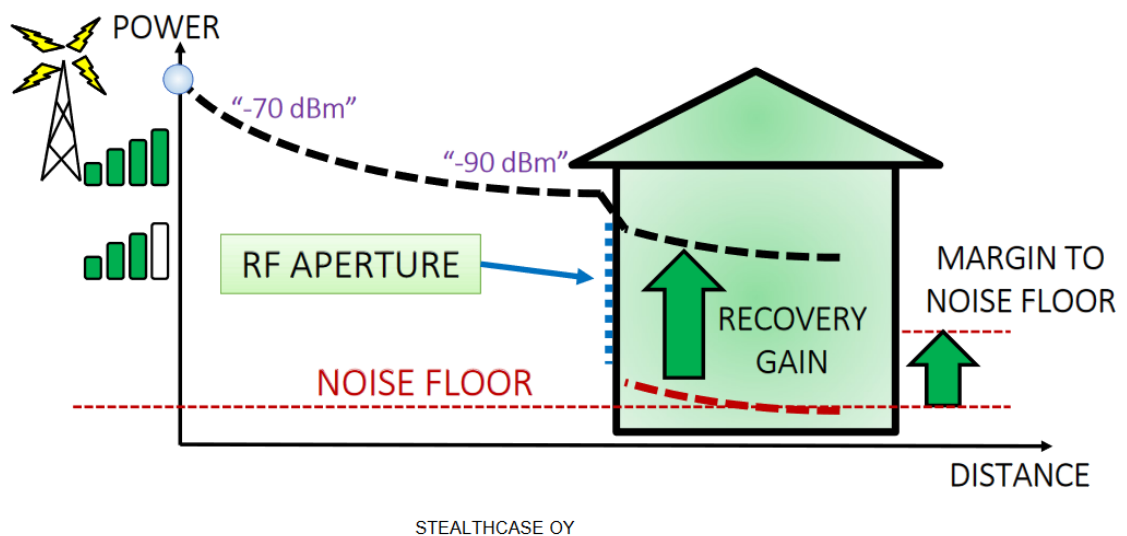
Esimerkiksi Aspin ym. (2013, 72) raportissa arvioitiin suuren (2000 mm x 800 mm) RF-aukon keskimääräiseksi hyödyksi noin 5 dB. Kuitenkin joka viidennessä tapauksessa aukko paransi signaalinvoimakkuutta jopa 10 dB tai enemmän, mitä perusteltiin raportissa signaalin tulosuunnan vaikutuksella aukosta saatavaan hyötyyn. Rakennusteollisuuden ohjeessa (2013) suositellaan, että jokainen huonetila varustet-

taisiin omalla RF-aukolla, sillä eri operaattorien tukiasemat eivät välttämättä ole samoissa paikoissa ja paikat saattavat muuttua, mistä syystä signaalit voivat myöhemmin tulla eri suunnasta kuin rakennushetkellä.

Sisäkuuluvuusratkaisuihin keskittyvä StealthCase Oy (2019) havainnollistaa diassaan (Kuvio 8), miten normaali, RF-aukoton seinärakenne vaimentaa sisään tulevaa radiosignaalia voimakkaasti, laskien signaalin voimakkuuden lähelle häiriötasoa tai jopa sen alle. Kuviossa 9 StealthCase Oy (2019) puolestaan esittää, miten seinän aiheuttamaa läpäisyvaimennusta voidaan pienentää RF-aukotuksella, jolloin hyötysignaali pysyy selvästi häiriötason yläpuolella ja käyttökokemus ei häiriinny.



Kuvio 8. Radiosignaalin vaimeneminen ulkoa sisälle tultaessa RF-aukottomassa seinässä (StealthCase 2019).



Kuvio 9. Radiosignaalin vaimeneminen ulkoa sisälle tultaessa RF-aukotetussa seinässä (StealthCase 2019).

RF-aukko Rakennusteollisuuden oppaassa (2013) kerrotaan, että RF-aukon muoto ja mitoitus määrittyvät muun muassa sen perusteella, minkä taajuusalueen aalloille aukko halutaan optimoida ja mikä on signaalin tulokulma. Nykyisin käytössä olevat radiotaajuudet tulevat todennäköisesti olemaan valtaosin käytössä myös tulevaisuudessa uusien taajuuksien rinnalla teknologioiden päivittyessä, joten RF-aukkojen optimointi nykyisille taajuusalueille ei automaattisesti tarkoita niiden vanhenevista teknologian kehittyessä.

## **7.2 Rakennusmateriaalien vaikutus ja materiaaliveitohdot**

Radiosignaalin kohdatessa esteitä vaikuttaa esteiden (materiaalin) läpäisyominaisuudet radiosignaalin kykyyn läpäistä este, eli toisin sanoen materiaalin aiheuttama läpäisyvaimennus riippuu materiaalista ja sen ominaisuuksista (Asp ym. 2013). Signaalin vaimeneminen on voimakkaasti riippuvaista niin materiaalin paksuudesta kuin sen muista läpäisyominaisuuksista. (Keskikastari 2014, 7). Esimerkiksi metallit heijastavat radiosignaaleja voimakkaasti, joten myös metalleja sisältävät sekä metallipintaiset rakennusmateriaalit päästävät radiosignaaleja lävitseen huonosti (Hentilä 2018, 58).

Kuuluvuutta voidaan parantaa erilaisilla tuotteilla, joista osa on kehitetty nimenomaan sisäkuuluvuuden parantamiseksi ja osan taas on havaittu mahdollistavan kuuluvuuden muita käytössä olevia vaihtoehtoja paremmin. Jatkuvasti on käynnissä myös kehitystyötä kuuluvuutta parantavien materiaalien kehittämiseksi, esimerkiksi RT-kortissa 80-11252 (2017, 6) kerrotaan, että kokeilussa on ollut erikoisbetonilaatu, jossa betonimassaan on sijoitettu signaalia välittävää materiaalia läpäisyvaimennuksen vähentämiseksi.

Joidenkin yleisten rakennusmateriaalien aiheuttamia läpäisyvaimennuksia on pyritty arvioimaan RT-kortissa Matkaviestinkuuluvuus rakennuksissa (80-11252, 2017), josta leikattu kuvio 10.

betoniseinä	•••
tiiliseinä	••
ikkuna (ei selektiivipinnoitteita)	•
ikkuna 1 selektiivipinta	•••
ikkuna 2 selektiivipintaa	••••
ikkuna 3 selektiivipintaa	•••••
puurakenne	•
metallirakenne ikkunakarmissa tai -puitteissa	•••
eriste metallikalvoilla	•••
eriste ilman metallikalvoja	•
metalliverhoilu (katto tai seinä)	•••••
rappausverkko, metallia	•••
rappausverkko, ei-metallia	•

Kuvio 10. Seinärakenteiden ja materiaalien aiheuttamia vaimennuksia (RT-kortti 80-11252, 4).

Käytännössä RT-kortissa 80-11252 (2017) on havainnollistettu, että erilaiset betoni- ja kiviseinät sekä metalliset tai metallia sisältävät materiaalit (myös metallikalvolla tai -kerroksella päällystetyt eristeet) heikentävät kuuluvuutta voimakkaasti. Metallisten pintojen merkittävä vaikutus RF-vaimennuksen suuruuteen johtuu siitä, että metallipinnat heijastavat hyvin suuren osan signaalista takaisin (Hentilä 2018, 58). Tyypillisiä metallipintoja rakennusmateriaaleissa ovat esimerkiksi erilaisista eristeistä löytyvät metallikalvot, kattopellit ja ikkunoiden alumiinikarmit.

RT-kortin 80-11252 (2017) mukaan sisäkuuluvuutta puolestaan edesauttavat tai sen mahdollistavat pinnoittamattomat (kalvottomat) ikkunat ja puiset, rakennuksen ulkovaipan läpäisevät, rakenneosat. Tätä tukee myös Rakentaja.fi:n artikkeli (2012), jonka mukaan betonirunkoisissa rakennuksissa betonikerros vaimentaa kuuluvuutta voimakkaasti, mistä johtuen seinän muiden rakennekerrosten muuttaminen ei juuri vaikuta sisätilakuuluvuuteen. Tästä syystä betoniseinissä kuuluvuus tulisi luoda esimerkiksi RF-aukkoja, passiivisia signaalinvahvistimia tai sisäantenniverkkoja käyttäen.

Pelkkä materiaalivaimennus ei kerro täyttä totuutta kuuluvuudesta, sillä radiokuuluvuuteen rakennuksen sisällä vaikuttavat useat radiotekniset ilmiöt, läpäisyyn ohella

muun muassa heijastus, sironta ja taittuminen, joiden avulla signaalit voivat edetä (Niemelä ym. 2012, 9). Ilmiön monimuotoisuutta havainnollistavat esimerkiksi eri asiantuntijoiden (Asp 2019; Lilja 2019) kuvaukset siitä, että esimerkiksi signaalin tulokulmalla ja muilla signaalin ominaisuuksilla sekä betonirakenteen iällä ja kosteudella on merkittävää vaikutusta läpäisyvaimennuksen suuruuteen.

Niemelä ym. (2012, 9) ovat taulukoineet eri materiaalien läpäisyvaimennuksia eri taajuuksilla NIST:n mittauksien (Stone 1997) perusteella. Taulukko ja tulokset ovat hyvin linjassa RT-kortissa 80-11252 esitetyt graafisen luokittelun kanssa. Taulukossa 7 on vertailtu eri materiaalien mitattuja läpäisyvaimennuksia 2000 MHz:n ja 3500 MHz:n taajuuksilla. Myös kansainvälisen televiestintäliiton radiosektori ITU-R on julkaissut raportin, josta löytyy useiden eri taajuuksien, myös 3,5 GHz:n, läpäisyvaimennuksia kattavasti eri rakennusmateriaaleille (ITU-R 2017, 157-158).

Taulukko 7. Eri materiaalien läpäisyvaimennuksia 2000 MHz:n ja 3500 MHz:n taajuuksilla (Niemelä ym. 2012).

Taajuus [MHz]/ Läpäisyvaimennus [dB]	2000 MHz	3500 MHz
Tiili (180 mm)	8	20
Tiili (180 mm) ja betonielementti (203 mm)	33	60
Tiili 180 mm ja kevytlekaharkko	10	29
Betonielementti (208 mm)	29	47
Kevytlekaharkko (2 x 203 mm)	18	25
Raudoitettu betonielementti (203 mm) 140 x 140 mm	31	50
Raudoitettu betonielementti (203 mm) 70 x 70 mm	37	53
Ikkunalasi (13 mm, ei selektiivikalvoa)	3	0,5
Kuiva puu (13 mm)	3	3
Kuiva puu (152 mm)	9	19

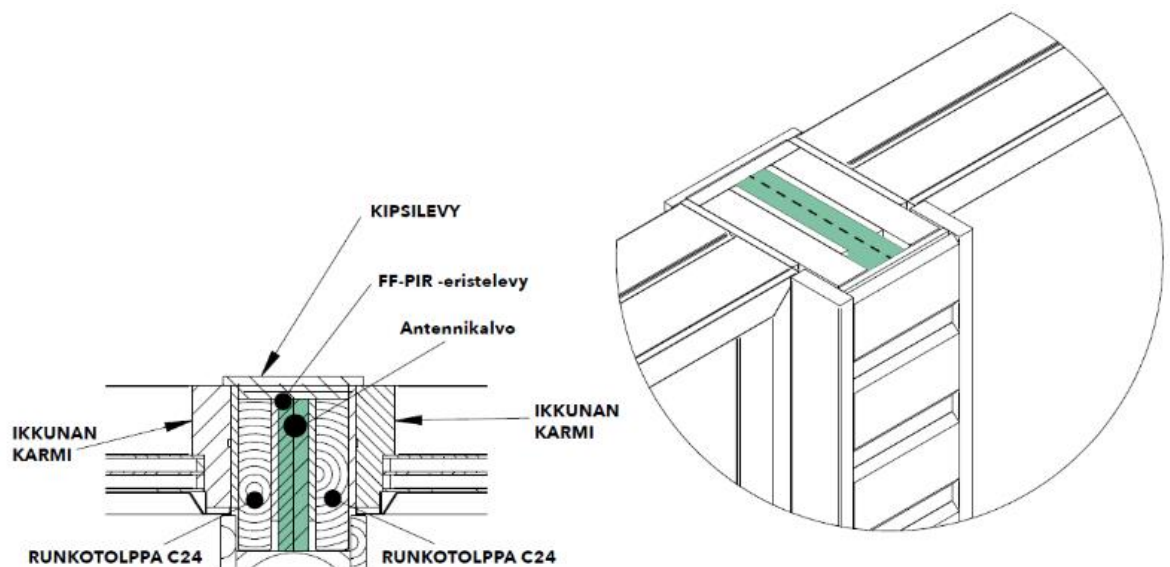
Yleisesti ottaen rakennusmateriaalien läpäisyvaimennuksista voidaan sanoa, että sekä rakennekerroksen paksuuden (matka jonka läpi radiosignaalin täytyy kulkea materiaalin läpäistäkseen) kasvu että käytettävän taajuuden nousu lisäävät läpäisyvaimennusta. Materiaaleista voidaan todeta, että esimerkiksi pinnoittamattomien ikkunoiden ja puun aiheuttamat vaimennukset ovat verraten pieniä, tiilellä huomattavia, betonilla ja kivimateriaaleilla merkittäviä tai suuria ja metallia sisältävillä raken-

nusmateriaaleilla erittäin suuria. Tästä johtuen rakennusmateriaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa merkittävästi sisäkuuluvuusedellytyksiin ja rakenteiden läpäisyvaimennuksiin.

Seuraavissa alaluvuissa on esitelty joitakin tapoja vähentää rakenteiden aiheuttamaa vaimenemaa ja luoda näin paremmat edellytykset hyvälle sisäkuuluvuudelle.

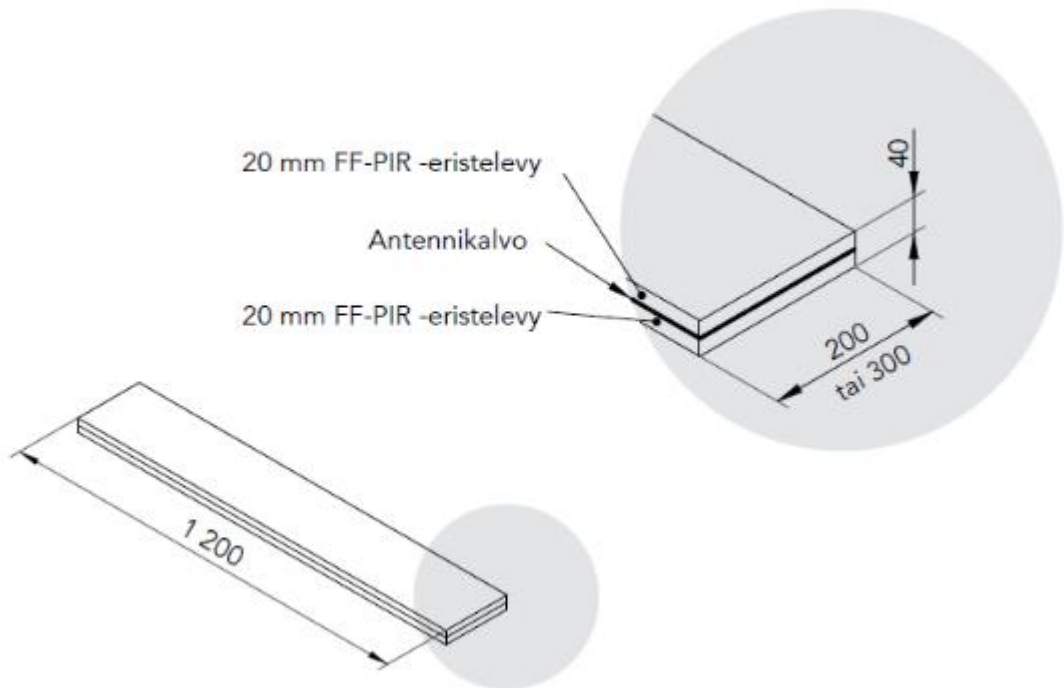
### 7.2.1 Passiiviset signaalia vahvistavat rakenteet

RT-kortissa 80-11252 (2017) kerrotaan, että passiivisesti signaalia välittäviä osia on kokeiltu betonielementeissä. Kaupallinen toteutus ajatuksesta on esimerkiksi FF-SIGNAL, joka on Finnfoam Oy:n valmistama, pystysuuntaan seinän läpäiseväksi rakenteeksi asennettava passiivinen signaalivahvistin, joka koostuu kahdesta 20 mm paksusta PIR-eristelevystä (polyisosyanuraatti), joiden väliin antennielementti on sijoitettu. FF-SIGNAL voidaan asentaa esimerkiksi ikkunoiden väliin (kuvio 11), runkotolppien väliin metallipintaisilla eristelevyillä eristetyssä puutalossa tai betoni-seinään pielilevyn, smyygin tai ohutrappauksen alle. FF-SIGNAL-signaalivahvistimen rakennetta on havainnollistettu kuviossa 12.



Kuvio 11. FF-SIGNAL asennusesimerkki (Asennusesimerkki, [viitattu 22.3.2019]).





Kuvio 12. FF-SIGNAL läpileikkaus (Toiminta ja tekniset tiedot, [viitattu 22.3.2019]).

Finnfoam lupaa, että FF-SIGNALin läpäisyvaimennus olisi aina alle 15 dB. Signaalinvahvistinten tarvittavista minimimääristä Finnfoam ilmoittaa taulukon 8 mukaisesti. (Toiminta ja tekniset tiedot, [viitattu 22.3.2019]; Rakentaja.fi 2018.)

Taulukko 8. Esimerkkejä FF-SIGNAL-signaalinvahvistinten menekistä (Rakentaja.fi 2018)

Kohde	Esimerkki FF-SIGNAL signaalinvahvistinten minimimäärästä
Pieni yksiö tai kaksio	1 kpl, parvekkeen oven tai ikkunan vieressä
Läpitalon kerrostalo-asunto	2 kpl, kummallekin puolelle asuntoa
Moderni iso kivitalo	3-4 kpl per kerros, oltava 2-3 eri sivulla
Toimistotalon julkisivu	Asennusväli 3-5 metriä

## 7.2.2 Metallikalvottomat eristeet

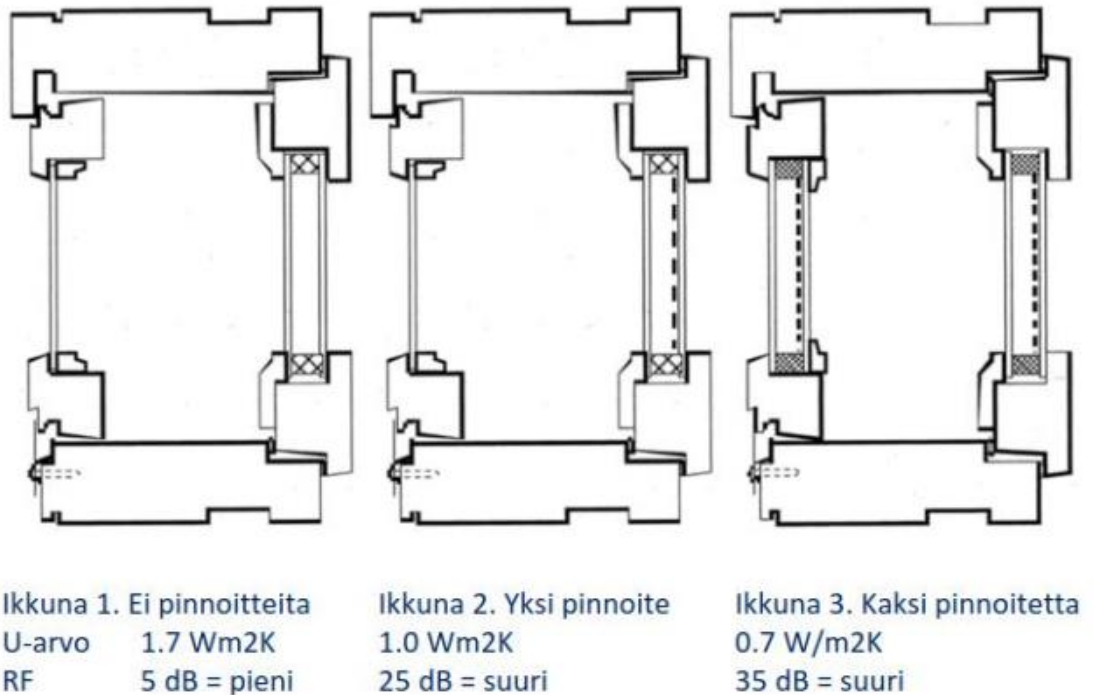
Perinteisesti käytetyt mineraalivillat mahdollistavat kuuluvuuden metallipintaisia muovieristeitä paremmin. Nykyisin käytetyissä PIR-eristeissä on usein diffuusiotiivis alumiinikalvo energiatehokkuuden maksimoimiseksi ja kosteuden siirtymisen hallitsemiseksi. Kuten aiemmin on tullut esille, nimenomaan eristeissä käytetyt alumiinikalvot ovat usein osa kuuluvuusongelmaa. Tämän vuoksi esimerkiksi on Kingspan myy myös PIR-eristelevyä (Kingspan Therma TW55 R), jossa alumiinikalvo on korvattu diffuusiotiiviillä laminaatilla, joka ei sisällä metallia eikä vaimenna radiosignaalia (Kingspan 2016).

Kingspanin ohjeen (2016) mukaan metallikalvoton eristelevy tulee sijoittaa sille seinälle, josta signaalit tulevat, ja ellei tulosuunnasta ole varmuutta, tulisi kuuluvuuden mahdollistava eristelevy sijoittaa jokaiselle rakennuksen sivuista. Kingspan suosittelee ohjeessaan sijoittamaan Therma TW55 R -eristelevyn niiden tilojen ulkoseinille, jossa matkapuhelinta tullaan pääasiallisesti käyttämään, kuitenkin niin, ettei esimerkiksi jääkaappi, pakastin, muu metallinen kaluste tai kiintokaluste ole juuri Therma TW55 R -eristelevyn kohdalla.

## 7.2.3 Ikkunaratkaisut

Hentilän tutkimuksen (2018, 52) mukaan ikkunoiden (riippumatta siitä, onko ikkunassa selektiivikalvo tai -kalvoja vai ei) RF-vaimennuksessa ei ole näkyvissä taajuusriippuvuutta, jonka johdosta vaimennukset kasvaisivat taajuuden kasvaessa, vaan ikkunoiden aiheuttama vaimennus pysyy samassa suuruusluokassa käytettävästä taajuusalueesta riippumatta, vaihtelun selittyessä enemmän paikallisilla tekijöillä. Myös NIST:n tutkimus vuodelta 1997 (Stone) tukee tätä havaintoa.

Rakennusteollisuuden suunnitteluohjeessa (2013) esitetään nyrkkisääntö, jonka mukaan yksi selektiivikalvo tuo noin 10 dB lisää vaimennusta. Tosin vaimennuseroksi selektiivikalvottoman ja yhden selektiivikalvon sisältävän ikkunan välillä on esimerkissä ilmoitettu 20 dB. Nyrkkisääntöä ja selektiivikalvojen vaikutusta vaimennukseen on havainnollistettu kuviossa 13.



Kuvio 13. Selektiivikalvojen määrän vaikutus vaimennukseen (Rakennusteollisuus 2013).

Sisäkuuluvuutta parantavia ikkunaratkaisuja on tällä hetkellä markkinoilla kolmenlaisia:

1. taajuusselektiiviset ikkunat
2. ikkunoita, joissa karmiin on integroitu passiivinen säteilyelementti, antenni.
3. tavalliset, selektiivikalvottomat ikkunat.

Perusajatus taajuusselektiivisissä ikkunoissa on tietyn taajuusalueen sähkömagneettisen säteilyn läpi päästäminen tai suodattaminen tekemällä selektiivilasin pintaan taajuusselektiivinen kuviointi poistamalla pieni osa (alle 5 %) selektiivikalvosta. Esimerkki taajuusselektiivisestä kuvioinnista on nähtävissä kuvassa 1. Hytösen (2018, 82-83) mukaan tutkimuksissa ei ole havaittu, että selektiivikalvon poistamisella olisi merkittävää vaikutusta ikkunan U-arvoon, mikäli poistettava osuus pysyy riittävän pienenä. Taajuusselektiivisistä ikkunoista kaupallisena vaihtoehtona on tällä hetkellä ainakin Lammin Signal Window, josta yhtiö kertoo optimoineensa rakenteet ja lasituksen niin, että se läpäisee 800–2,6 MHz:n taajuudet (Lammin Ikkuna 2017).



Kuva 1. Taajuusselektiivinen kuviointi lasissa (Hytönen 2018, 84).

Esimerkiksi Tiivin Connect-tuotepereeseen kuuluva Tiivi Connect Antenni on hyvä esimerkki vaihtoehdosta, jossa kuuluvutta parannetaan karmiin integroidulla passiivisella säteilyelementillä (Mainio 2018). Antennin voi valita tiettyihin ikkunamalleihin. Mainion artikkelissa kerrotaan, että ikkunan sivukarmin saranapuolelle kiinnitettävä antennielementti on 13-21 senttimetriä leveä ja pystypokan pituinen. Tiivi kertoo antennilla varustetun ikkunalla saavutettavan signaalin voimakkuuden olevan 10-15 dB parempi kuin vastaavalla ikkunalla ilman antennia (Tiivi 2018).

Myös tavallinen ikkuna, josta on jätetty selektiivikalvot pois, on nykyisin pääasiassa käytettyihin selektiivikalvollisiin ikkunoihin verrattuna kuuluvuutta parantava ratkaisu. Esimerkiksi Rakennusteollisuuden (2013) mukaan selektiivikalvottoman ikkunan läpäisyvaimennus on jopa 20 dB pienempi kuin vastaavan ikkunan, jossa on yksi selektiivikalvo. 20 dB:n ero läpäisyvaimennuksessa vastaa noin 100 kertaa parempaa signaalivoimakkuutta. Selektiivikalvottoman ikkunan valitsemista pohdittaessa tulee tietysti huomioida rakennuksille asetetut energiatehokkuusvaatimukset ja selektiivikalvottoman ikkunan heikompi U-arvo verrattuna selektiivikalvolliseen.

#### **7.2.4 Metallisen rappausverkon korvaaminen lasikuituisella**

Paksurappauksissa käytettävä teräsverkko vaimentaa radiosignaalia erittäin voimakkaasti muodostaen rakennuksen julkisivusta sähkömagneettiselta säteilyltä eristävän Faradayn häkin. Sen sijaan ohutrappauksissa käytettävä lasikuituverkko on radiosignaaleille oleellisesti suojeampi päästäten ne hyvin lävitse. (RT 80-11252 2017, 6.)

#### **7.2.5 Katemateriaalin vaihto metallittomaan**

Kuuluvuutta voidaan parantamalla myös vaihtamalla seinässä tai katossa käytetty katemateriaali paremmin radiosignaaleja läpäiseväksi. Käytännössä tämä tarkoittaa metallisen katemateriaalin vaihtamista ainakin osittain tai jopa kokonaan metallittomaan materiaaliin (RT 80-11252 2017, 6.)

Koska tukiasemat ovat yleensä verraten kaukana kiinteistöstä, kohtaavat radiosignaalit pääsääntöisesti tasaiset ja loivat kattorakenteet melko loivassa kulmassa, jolloin esimerkiksi kerrostalossa katemateriaalin vaihdolla ei saavuteta järkevästi merkittävää hyötyä efektiivisen pinta-alan jäädessä pieneksi. Lisäksi kerrostaloissa radiosignaalit etenevät alempiin kerroksiin usein voimakkaasti vaimentavien teräsbetonisten välipohjarakenteiden läpi, jolloin kattomateriaalin vaikutus kokonaiskuuluvuuteen jää pieneksi. (Rakennusteollisuus 2013, 8.)

Toisaalta esimerkiksi harja- tai pulpettikattoisessa omakotitalossa peltikatteen vaihtaminen huopakatteeseen voi vaikuttaa kuuluvuuteen huomattavasti. Lisäksi radiosignaalit kohtaavat seinät enemmän kohtisuorasti, mistä syystä seinien läpi pääsevä säteily vaikuttaa suurempaan osaan pinta-alasta.

## 8 TELETEKNISET RATKAISUT SISÄKUULUVUUTEEN

Luvussa 8 on esitelty yleisimpiä teleteknisiä ratkaisuja kuuluvuuden parantamiseksi.

Teleteknisiin ratkaisuihin kuuluvuuden parantamisessa voidaan päätyä useista syistä. Mikäli kuuluvuusasioita ei huomioida ajoissa suunnitteluvaiheessa, ei välttämättä ole enää mahdollista tehdä kuuluvuutta parantavia rakenne- tai materiaalivaihtoja, jolloin vaihtoehtoisiksi kuuluvuuden mahdollistamiseksi jäävät käytännössä vain teletekniset ratkaisut. Jos taas ulkokuuluvuus alueella on heikko, eikä siihen ole luvassa parannusta, on sisääntenniverkon rakentaminen käytännössä ainoa mahdollisuus.

Käytännössä sisäkuuluvuutta parantavat teletekniset ratkaisut voidaan luokitella yksittäisiin kuuluvuusongelmakohteisiin (asunto, tila tai huone) soveltuviin ratkaisuihin, joita ovat esimerkiksi lisääntennit, passiiviset toistimet ja vastaavat, sekä kokonaisia kiinteistöjä tai alueita auttaviin ratkaisuihin, joita ovat esimerkiksi sisääntenniverkko tai uuden tukiaseman rakentaminen.

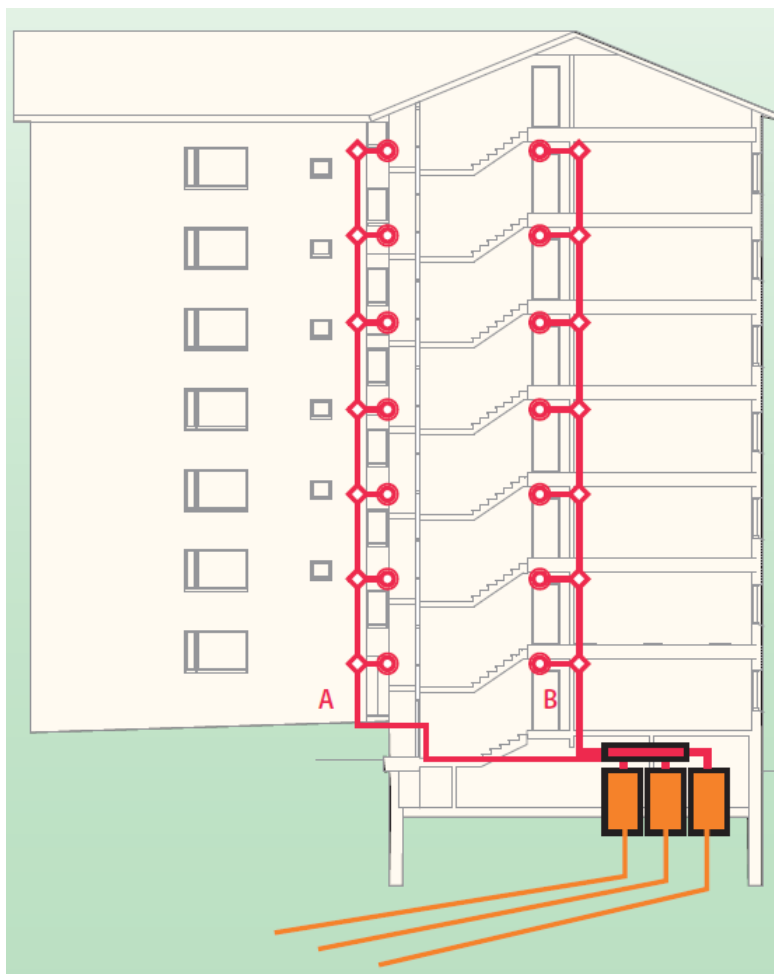
### 8.1 Sisääntenniverkot

Sisäkuuluvuuden parantaminen tai kapasiteetin lisääminen sisääntenniverkolla on tyypillisempää käyttäjämäärältään suuremmissa kohteissa, kuten toimisto- ja liikerakennuksissa, joissa aktiivilaitteiden tuominen on operaattoreille liiketoiminnallisesti helpommin perusteltavissa. Pien- ja rivitaloista voidaan yleisesti ottaen sanoa, ettei sisääntenniverkko ole kustannustehokkuudeltaan järkevä ratkaisu. Asuinkerrostalojen kohdalta kannattavuus riippuu paljon muun muassa talon koosta. (RT 80-11252, 7). Pienemmissä kiinteistöissä operaattoreiden ei välttämättä ole järkevää lisätä käytössä olevaa radiokapasiteettia, jolloin sopivampi ratkaisu voi olla toistin, joka sieppaa signaalin ulkoa antennin avulla ja siirtää sen vahvistimen kautta sisääntenniverkkoon (ST 625.10, 8).

Sisääntenniverkon toteuttaminen vaatii aina rakentajan ja teleoperaattorin yhteistyötä, kiinteistö vastaa sisääntenniverkon rakentamisesta ja kustannuksista, tele-

operaattorin taas täytyy tuoda palvelunsa sisäantenniverkkoon. Uudiskohteissa sisäantenniverkolle olisi suositeltavaa tehdä aina tarvittavat tilavaraukset sisäantenniverkon laitteita ja kaapelointia ajatellen. Rakennusvaiheessa varautuminen suunniteltuna ja linkitettyinä kiinteistön rakennushankkeeseen on yleensä edullista, mutta myöhemmin valmiuksien tekeminen voi olla työlästä ja hintavaa. (RT 80-11252, 7; RT 93-10965, 8; ST 625.10, 4.)

Kuvio on periaatekuva sisäantenniverkosta, jossa näkyy, kuinka operaattoreiden tukiasemat on sijoitettu erilliseen teletilaan, josta ne on yhdistetty edelleen valokuidulla operaattoreiden runkoverkkoon. Antennit sijoitetaan yleensä porrastasanteiden kattoihin, josta saavutetaan paras kattavuus ja toisaalta hyvä säteilyturvallisuus. (RT 80-11252, 7). Tarkemmin sisäantenniverkkojen suunnittelua ohjeistetaan esimerkiksi ST-kortissa 625.10 (2015). ST-kortissa ei kuitenkaan vielä ole huomioitu 3,5 GHz:n taajuusalueen käyttöönottoa.



Kuvio 14. Periaatekuva sisäantenniverkosta (RT 80-11252, 7).

Sisäantenniverkon haasteiksi voidaan lukea teknologian vanheneminen, mikä voi aiheuttaa tulevaisuudessa tarpeen päivittää sisäantenniverkon kaapelointi vähemmän vaimentavaan tai antennit uudelle taajuusalueelle soveltuviksi. Toisaalta sisäantenniverkon edellyttämät aktiivilaitteet edellyttävät myös teleoperaattoreiden puolelta ylläpitoa ja aiheuttavat kustannuksia.

Tulevaisuudessa sisäantenniverkoissa on mahdollisesti luvassa haasteita myös 3,5 GHz:n 5G:n käyttöönoton myötä, esimerkiksi Sitowisen Jukka Viinikainen (2019) arvelee, että vaimennukset nykyisissä antenniverkoissa käytettävissä kaapeleissa tulevat olemaan suuria. Lisäksi sisäantenniverkot on usein rakennettu niin, että yhtä tilaa palvelee yksi antenni, kun taas 5G:ssä saavutetaan merkittävä hyöty siitä, että laite vastaanottaa signaaleja monesta eri lähteestä, yhdistäen näitä digitaalisesti parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Nykyisellä tavalla rakentaa sisäverkkoja 5G:n moniantenniteknologian hyödyt jäävät hyödyntämättä sisäantenniverkkoja käytettäessä. (Viinikainen 2019.)

## 8.2 Passiiviset toistimet

Passiivinen toistinjärjestelmä sisältää kaksi antennia, yhden sisälle ja yhden ulos. Kaapelit kytketään toisiinsa vähän vaimentavalla antennikaapelilla. Ulkoantennina voidaan käyttää esimerkiksi ympärisäteilevää mallia tai voimakkaammin suuntaavaa mallia, yleistettynä ympärisäteilevän etuna on parempi toimintavarmuus ja suuntaavan etuna vahvempi signaali. Ulkoantennin tulee luonnollisesti oltava säänkestävä. Kaapelin mitoituksessa tulee huomioida, että pidempi kaapeli lisää vaimennusta, ja näin vähentää ulkoantennista saatavaa hyötyä. Mikäli kaapelin häviötä halutaan minimoida, on paksummissa kaapeleissa pienempi vaimennus, mutta niiden taivutussäde on rajoitetumpi ja ne ovat ulkonäöllisesti ohuempia kaapeleita haasteellisempia. (Asp ym. 2013, 73; Notesco [viitattu 30.03.2019], 2.)

Passiivinen toistinjärjestelmä voi tulla kysymykseen esimerkiksi pien- ja rivitaloissa sekä pienehköissä asuinkerrostaloissa, joissa operaattorin kannalta ei ole järkevää kasvattaa alueen radiokapasiteettia uusilla tukiasemilla. Passiivinen toistinjärjes-



telmä edellyttää hyvää ulkokuuluvuutta ja 3,5 GHz:n 5G:n näkökulmasta haasteellista on esimerkiksi sisällä olevien väliseinien läpäisy. Myös moniantennitekniikan hyödyt menetetään normaalissa passiivisessa toistinratkaisussa.

### 8.3 Aktiiviset toistimet

Aktiivisen toistimen toimintaperiaate vastaa passiivista toistinta, mutta antennien välille asennetaan sähköinen vahvistin ja antennikaapelointi on mahdollista haaroittaa useaan eri huoneeseen, joihin jokaiseen voi asentaa oman sisäantennin. Signaalia vahvistava toistin luetaan aktiiviseksi verkon osaksi, jollaisia saavat asentaa vain verkko-operaattorit niiden luoman korkean häiriöriskin vuoksi. Etenkin vikaantuesaan yksityisten tai yritysten asentamat laittomat toistimet voivat aiheuttaa häiriöitä ja toimimattomuutta myös teleoperaattoreiden ylläpitämille verkoille. (Suurnäkki 2019; Viestintävirasto 2013.)

Viestintävirasto kertoo artikkelissaan (2013), ettei myönnä radiolupaa yksityishenkilön tai yrityksen toistimelle niiden aiheuttaman korkean häiriöriskin vuoksi. Laitteita on mahdollista ostaa kaupoista, mutta yksityishenkilö tai yritys toimii vastoin radio- taajuuksista ja telelaitteista annettua lakia (L 1015/2001), mikäli ottaa toistimen käyttöön.

Kuitenkin esimerkiksi Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisussa (2013, 23) pohditaan mahdollisuutta tulevaisuudessa tehtäviin lakimuutoksiin, joiden tarkoituksena voisi olla edesauttaa ratkaisujen löytämistä kuuluvuusongelmiin luvanvaraisilla kulluttajakäyttöön tarkoitetuilla laitteilla. Samassa julkaisussa (2013, 18) epäillään myös luvattomien aktiivisten toistimien yleistymisen estämisen olevan vaikeaa, mikäli sisäkuuluvuusongelmat pahenevat, kuten todennäköisesti tulee käymään 3,5 GHz:n 5G:n yleistyessä.

### 8.4 Kotitukiasemat

Kotitukiasema tai femto-tukiasema on operaattorikohtainen kuuluvuusratkaisu, jolla voidaan laajakaistayhteyttä hyödyntämällä luoda sisätiloihin mobiilipeitto. Femto-tukiasemat ovat maailmalla verraten yleisiä, esimerkiksi Japanissa, Yhdysvalloissa ja

joissakin Euroopan maissa. Vielä vuonna 2013 niiden arveltiin yleistyvän myös Suomessa jo 4G/LTE-tekniikan myötä, mitä ei kuitenkaan vielä ole tapahtunut. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2013, 17.)

Femto-tukiasemien heikoiksi puoliksi on nostettu nimenomaan operaattorikohtaisuus ja esimerkiksi kerrostaloissa useiden lähekkäisten tukiasemien aiheuttamat häiriöt. Hyvinä puolina taas pidetään muuan muassa edullista hintaa ja soveltuvuutta pieniinkin ratkaisuihin. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2013, 17.)

Operaattorien näkökulmasta kotitukiasemaverkot vaativat investointeja uusiin hallinta- ja keskitinratkaisuihin. Toisaalta kotitukiasemat vaativat myös aina taustalle kiinteän yhteyden, jolloin operaattoreiden tavoittelemat hyödyt tiedonsiirron langattomuuden lisääntymisestä eivät toteudu kotitukiasemien tapauksessa. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2013, 17.)

5G-näkökulmasta on mielenkiintoista, että siinä missä kotitukiasemat kuulostavat hyvältä ratkaisulta rakennuksen ulkovaipan aiheuttamaan läpäisyvaimennusongelmaan, on toisaalta erääksi 5G-liittymien yleisimmistä käyttötapauksista arvioitu nimenomaan nopeammat mobiililaajakaista-yhteydet, joilla voitaisiin vähentää tarvetta kiinteälle yhteydelle.

## **8.5 Voice over Wifi (VoWiFi)**

Useilla operaattoreilla on käytössä Voice over Wifi -palveluita, jonka avulla puhelimen ja SMS-viestit voidaan välittää minkä tahansa riittävän laadukkaan WLAN-verkon yli (Telia [viitattu 2.4.2019]; Elisa [viitattu 2.4.2019]). Etuna kotitukiasemiin on operaattoririippumattomuus, eli siinä missä femtosoluratkaisu vaatisi oman femtosolun jokaiselle operaattorille, sopii VoWiFi-palveluun minkä tahansa operaattorin liittymän kautta tarjottava WLAN-yhteys. Voice over Wifi -palvelun käyttäminen vaatii sitä tukevan päätelaitteen. Käytännössä kaikista uudemmissa älypuhelimista löytyy tuki Voice over Wifi -ominaisuudelle.

## 8.6 Tukiasemaverkon tiivistäminen

Operaattorit rakentavat sisätilapeittoa lähinnä ulkopeiton kautta (Heikkilä 2018) luottaen siihen, että rakennukset suunnitellaan ja rakennetaan siten, että läpäisyvaimennus pysyy kohtuullisissa rajoissa. Liikenne- ja viestintäministeriön (2013, 16) julkaisussa kerrotaan, että operaattorit tiivistävät jatkuvasti tukiasemaverkkojaan muun muassa kapasiteetin kasvattamiseksi. Julkaisussa havainnollistetaan myös, miten esimerkiksi etäisyyden puolittaminen tukiasemaan (rakentamalla uusi tukiasema lähemmäksi) parantaa signaalinvoimakkuutta ulkona 6 dB, mikä vastaa signaalinvoimakkuuden nelinkertaistumista. Energiatehokkaiden rakennusten aiheuttama vaimenema 3,5 GHz:n radiosignaaliin voi taas mittausten mukaan olla 30–50 dB (Asp ym. 2012, 22), mikä vastaa signaalinvoimakkuuden heikkenemistä sadasosaan (30 dB), tuhannesosaan (40 dB) tai kymmenestuhannesosaan (50 dB). Jo näistä numeroista on helppo havaita, ettei sisäkuuluvuusongelmaa voida ratkaista pelkästään tukiasemaverkkoa tiivistämällä, vaan myös rakennusten läpäisyvaimennusten hallintaan täytyy panostaa.

## 9 SISÄKUULUVUUS RAKENNUSHANKKEISSA

Sisäkuuluvuus rakennushankkeessa on MRL 117 j § perusteella rakennushankkeeseen ryhtyvän vastuulla (L 1.12.2017/812), lisäksi rakennuslupaviranomaisten tulee varmistaa, että sisätilakuuluvuus on huomioitu rakennushankkeessa (Suurnäkki 2019). Eri asiantuntijoiden (Luhanka 2019; Savisalo 2019; Tuominen 2019) mukaan rakennushankkeissa on viime vuosien aikana alettu kiinnittämään enemmän huomiota sisäkuuluvuuteen ja sen varmistamiseen – osin varmasti lakimuutosten, osin lisääntyneiden haasteiden myötä. Kuitenkin esimerkiksi NCC:n Tero Tuominen (2019) ja Sitowisen Jukka Viinikainen (2019) kertovat, ettei rakennushankkeissa ole vielä varsinaisesti varauduttu 3,5 GHz:n taajuusalueen käyttöönottoon. Viinikainen (2019) tosin kertoo, että nykyisin myytävät komponentit tukevat usein myös 3,5 GHz:n taajuutta.

Jatkossa 3,5 GHz:n taajuusalueen käytön yleistyessä voi olla tarpeen pohtia, olisiko tarpeen tehdä mobiiliverkkojen kuuluvuussuunnittelua samaan tapaan kuin toimistorakennuksien WLAN-suunnittelua nykyään. Kuuluvuussuunnittelua edesauttaisivat suuresti 3D-mallit, joita on jo merkittävästä osasta rakennuksia ja alueita. 3D-malleihin tarvittaisiin lisäksi tiedot suunnitelluista tai olemassa olevista materiaaleista. (Sarajisto 2019).

Langattomasta tiedonsiirrosta on tullut osa arkea ja tilojen toimivuutta, joten sisätilakuuluvuuden huomioimisen tulisi olla osa jokaista rakennushanketta, niin asunto- kuin toimitilarakentamisessa. Toimivat tietoliikenneyhteydet alkavat olla oletus ja perusedellytys yhtäläillä kuin esimerkiksi juokseva vesi tai sähkö.

### 9.1 Uudisrakentaminen

Aiemmin, ennen tiukentuneita energiatehokkuusmääräyksiä ja varhaisempien, matalammilla lähetystaajuuksilla toimivien, matkaviestinteknologioiden ollessa yleisemmässä käytössä, ei rakenteiden aiheuttamaa läpäisyvaimennusta tarvinnut huomioida rakentamisessa vastaavasti kuin nykyään. Uudisrakentamista koskevat energiatehokkuusmääräykset ovat tiukentuneet jatkuvasti ja toisaalta lähetystaajuu-

det nousseet, joten sisäkuuluvuudesta on tullut todellinen haaste rakentajille ja siihen kiinnitetään aiempaa enemmän huomiota (Savisalo 2019; Tuominen 2019; Karjalainen 2019; Kivisilta 2019). RT-kortissa 80-11252 (2017, 4) on kuvattu rakennushankkeen menettelytapasuositukset uudiskohteissa seuraavasti:

Uudiskohteissa kuuluvuusongelmien ennakoinniseksi suositellaan seuraavaa menettelyä:

1. Ilmoitetaan operaattoreille rakennuskohteesta.
2. Mitataan eri operaattoreiden kentänvoimakkuudet rakennuspaikalla.
3. Arvioidaan missä tiloissa eri järjestelmien tulee toimia; missä tiloissa tyypillisesti ovat käyttäjät ja yhteyttä tarvitsevat laitteet; selvitetään mahdolliset erityisvaatimukset (esim. vanhusten palvelutalo).
4. Arvioidaan kohteen oman rakennusmassan vaimennusvaikutus huomioiden mm. seinien sijoitus.
5. Selvitetään ympärille tulevien rakennusmassojen määrä, laatu ja vaimennusominaisuudet.
6. Tehdään edellisten pohjalta arvio matkaviestinverkon kuuluvuusongelmien todennäköisyydestä.

Esimerkiksi NCC:n Tero Tuominen (2019) ja Technopoliksen Risto Kivisilta (2019) kertovat yhtiöiden kartoittavan ennen uudiskohteen rakentamisen aloittamista ulko-kuuluvuuden rakennuspaikalla, arvioivan kuinka paljon suunnitellut seinärakenteet tulevat heikentämään kuuluvuutta ja tekevän näiden tietojen pohjalta arvion sisätilakuuluvuudesta sekä mahdollisesti tarvittavista toimista. Mikäli kuuluvuus alueella ulkona on hyvä tai melko hyvä, pienehköt kuuluvuutta parantavat ratkaisut, kuten signaali-ikkunat (esimerkiksi Lammin Signal Window, Tiivi Connect), voivat luoda kuuluvuudelle edellytykset myös sisätiloihin. Jos taas kenttä on heikko myös ulkona, tilanne vaatinee yhteydenottoa operaattoriin ja mahdollisesti sisäantenniverkon rakentamista sekä operaattorin aktiivilaitteita.

Sisäantenniverkon hyviä puolia ovat toimintavarmuus läpi rakennuksen, lisäkapasiteetti (käyttäjät eivät kuormita alueen lähellä olevia tukiasemia) ja ratkaisun kestävyys, sillä sisäantenniverkko omilla tukiasemilla ei ole altis myöhemmin alueelle tuleville kuuluvuushaitoille kuten uusille rakennuksille tai puille (Tuominen 2019; Viinikainen 2019).

Tuominen (2019) näkee sisääntenniverkon ongelmalliseksi etenkin pienissä rakennuksissa, joissa operaattorit eivät välttämättä ole innokkaita tuomaan aktiivilaitteita paikalle heikosta kustannustehokkuudesta johtuen. Toinen ääripää on toimitilarakennukset, joissa asiakasmäärä ja usein myös kapasiteetin tarve on suuri, jolloin sisääntenniverkot ovat looginen ratkaisu. Toimitilarakennuksissa sisäkuuluvuus on myös ehdoton edellytys asiakastarpeisiin vastaamisen ja siten tilojen vuokrattavuuden kannalta: asiakkaat ovat valveutuneita ja kiinnostuneita sisätilakuuluvuudesta ja uusien teknologioiden, kun 5G:n, toimivuudesta (Kivisilta 2019).

Uusiin rakennuksiin suositellaan tehtäväksi telelaitteille ja sisääntenniverkolle tarvittavat tila- ja johtotievaraukset (RT 80-11252), sillä kuuluvuus rakennuksessa saadaan luotettavasti todennettua vasta rakennuksen valmistuttua ja lisäksi myöhemmin teknologioiden kehittyessä ja tukiasemapaikkojen muuttuessa tilanne sisäkuuluvuuden suhteen voi muuttua, jolloin varauksille voi tulla käyttöä. Käytännössä tarvitaan vähintään tilavaraus telejakamolle, johon mahtuu operaattoreiden aktiivilaitteet, nousukuilu telejakamosta rakennuksen katolle mahdollista antennia varten sekä varaukset antennikaapeloinnille. Ohjeistusta aiheeseen liittyen tarjoavat muun muassa RT-kortit 80-11252 ja 93-10965 sekä ST-kortti 625.10.

3,5 GHz:n 5G-verkon käyttöönoton myötä olisi tärkeää saada selvyyttä, millä signaalitasoilla 5G-päätelaitteet toimivat vielä järkevästi, jotta pystytään arvioimaan myös 5G-sisäkuuluvuutta ulkona tehtyjen kartoitusten ja rakenteiden arvioidun vaimennuksen perusteella. Myös varausten tekeminen uudisrakentamisessa on yhä tärkeämpää teknologian kehittyessä ja mahdollisten tukiasemasijaintien muuttuessa tulevaisuudessa.

## 9.2 Korjausrakentaminen

Mikäli kiinteistöön tehdään ikkuna- ja/tai julkisivuremontti, sisäkuuluvuus voi heikentyä oleellisesti verrattuna tilanteeseen ennen remonttia, mikäli rakennusmateriaalien vaimennusominaisuuksiin ei kiinnitetä huomiota. Esimerkiksi RT-kortissa 80-11252 esille nostettavat tyypilliset sisäkuuluvuusongelmia aiheuttavat korjausrakentamisessa toimenpiteet ovat

- ikkunoiden vaihto selektiivilaseihin

- puupuitteisten/-karmisten ikkunoiden korvaaminen alumiinisilla (yhdessä selektiivilasien kanssa)
- teräksisen rappausverkon käyttö
- alumiini-/metallipintaisten eristeiden käyttö seinärakenteissa
- katon tai seinän pintamateriaalin vaihtaminen metalliseen.

RT-kortissa 80-11252 (2017, 4) on kuvattu rakennushankkeen menettelytapasuositukset korjausrakentamiskohteissa seuraavasti:

Korjauskohteissa kuuluvuusongelmien ennakointi on helpompaa, koska muuttuvia tekijöitä on vähemmän. Signaaliwoimakkuudet voidaan mitata sisätiloissa ja rakennusosien tulevat muutokset ovat hyvin karotettavissa. Menettelytavaksi suositellaan:

1. Mitataan eri operaattoreiden kentänwoimakkuudet rakennuksen eri huonetiloissa.
2. Arvioidaan voidaanko jotain tiloja jättää heikomman signaaliwoimakkuuden piiriin ja onko joissain tiloissa erityisvaatimuksia.
3. Selvitetään lisättävien rakennusmateriaalien vaimennusvaikutus.
4. Tehdään edellisten pohjalta arvio matkaviestinverkon kuuluvuusongelmien todennäköisyydestä.

Kuuluvuuden heikentyminen korjausrakentamisen yhteydessä on erityisen ongelmallista, sillä esimerkiksi uusille tukiasemille ei yleensä ole liiketoiminnallisia perusteita tällaisissa kohteissa, joissa kapasiteetin tarve ei lisääny. Toisaalta myös sisäantenniverkon rakentaminen voi olla jälkikäteen kallista. Mikäli rakennuksen energiatehokkuutta parannetaan korjauksen yhteydessä, kuten usein edellytetään, olisi siitä todennäköisesti seuraavaa läpäisyvaimennuksen kasvua hyvä kompensoida kuuluvuutta parantaville ratkaisuille, joita korjausrakentamisessa voisivat olla esimerkiksi taajuusselektiiviset tai antenniratkaisulla varustetut ikkunat. Toisaalta mahdollisuuksien mukaan olisi hyvä välttää metallisia, koko vaipan kattavia rakenteita, kuten kalvollisia eristeitä tai teräksisiä rappausverkkoja.

Kun 3,5 GHz:n 5G yleistyy, tulevat korjausrakentamisessa esiintyvät kuuluvuusongelmat todennäköisesti pysymään samoina, mutta voimistumaan. Myös korjausra-

kentämisen kannalta olisi tärkeää, että saataisiin ensi tilassa käsitys siitä, minkälainen kentänvoimakkuus ulkoalueilla tulee suunnilleen olemaan ja millaisilla signaalivoimakkuuksilla 5G-päätelaitteet jouhevasti, jotta voidaan luotettavasti arvioida korjausrakennushankkeiden vaikutuksia sisätilakuuluvuuteen ja ryhtyä toimiin arvioiden perusteella.



## 10 YHTEENVETO JA POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää 3500 MHz:n (3,5 GHz) taajuudella toimivan 5G-verkon yleistyessä mahdollisesti ilmeneviä haasteita sisäkuuluvuudessa sekä etsiä ja esitellä olemassa olevia ratkaisumalleja sisäkuuluvuuden parantamiseksi.

3,5 GHz 5G:n käyttöönoton myötä ilmenevät haasteet liittyvät paljolti taajuuden johdosta kasvavaan läpäisyvaimennukseen sekä toisaalta rakennuskannan uusiutumiseen ja vanhan rakennuskannan korjaamiseen, jolloin vähemmän vaimentavien rakennusten osuus rakennuskannasta pienenee ja yhä suurempi osa rakennuksista aiheuttaa merkittäviä läpäisyvaimennuksia. Sisäkuuluvuushaasteisiin helpotusta voi tuoda esimerkiksi 5G:n moniantenni- ja beamforming-teknologiat, joilla saadaan aikaan kuuluvuusparannuksia aiempiin teknologioihin nähden. Käytännön tutkimusta sisäkuuluvuudesta 5G-ympäristössä ei vielä juurikaan ole, vaan tehdyt ja viitatu tutkimukset ovat valtaosin yleisesti läpäisyvaimennuksiin 3500 MHz:n lähetystaajuudella keskittyviä, eivätkä ne näin ota huomioon mahdollisia 5G:n myötä tulevia teknologisia parannuksia.

Joka tapauksessa on tärkeää, että rakentamisessa kiinnitetään jatkossa yhä enenevässä määrin huomiota sisäkuuluvuuteen jo suunnitteluvaiheesta alkaen, sillä 5G:n teknologian myötä mahdollisesti tulevista kuuluvuusparannuksista huolimatta sisäkuuluvuus olisi tämän hetkisen tiedon valossa parhaimmillaankin vain samalla tasolla kuin aiempien sukupolvien matkaviestinteknologioilla, joilla niilläkin on esiintynyt sisäkuuluvuusongelmia.

Sisäkuuluvuutta voidaan parantaa niin rakentamisen kuin teleteknisin ratkaisuin, kuhunkin tilanteeseen parhaiten sopiva vaihtoehto on vahvasti tilannesidonnainen. Kuuluvuuden parannusratkaisuun vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi ulkokuuluvuus alueella, käyttäjämäärä, johon heikoksi arvioitu sisäkuuluvuus tulisi vaikuttamaan, alueelle mahdollisesti myöhemmän tulevat rakennukset ja niin edelleen. Yhteistä kaikille kuuluvuutta parantaville ratkaisuille on, että ne tulevat edullisemmiksi, kun kuuluvuus huomioidaan jo suunnitteluvaiheessa ja kuuluvuudelle rakennetaan edellytykset muun rakentamisen yhteydessä, osana kokonaishanketta.

Toimivat tietoliikenneyhteydet ja sisätalakuuluvuus ovat nykyisin tilojen käyttäjille perusvaatimus kuten lämpö, vesi tai sähkö, joten rakentajien on oleellista huomioida kuuluvuusnäkökohdat suunnitellessaan ja rakentaessaan. Kuuluvuuden huomioimisen helpottamiseksi olisi tärkeää, että tulevaisuudessa luotaisiin rakennusmateriaaleille läpäisyvaimennusta kuvaava arvo, jonka perusteella suunnittelijat voivat huomioida sisäkuuluvuuden rakenneratkaisuja suunnitellessaan (Viinikainen 2019). Ari Asp on esittänyt erääksi keinoksi rakennusmateriaalien kuuluvuusvaikutuksien arviointiin RF-lukua, joka olisi lähinnä rakennesuunnittelijoille tarkoitettu työkalu (2013, 11).

Muita pohdittavia keinoja voisivat olla selkeiden, taajuuskohtaisten arvojen määrittäminen, joilla määrättäisiin millainen kentänvoimakkuus ulkona tulee olla ja paljonko seinärakenteen aiheuttama läpäisyvaimennus saa olla, joita esimerkiksi Suomen Kiinteistöliitto ry on esittänyt (Martinkauppi 2017, 3). Yhteinen linja kuuluvuuden raja-arvoissa helpottaisi vastuunjakoja operaattoreiden ja rakentajien välillä tapauksissa, joissa uusille tukiasemille ei ole liiketoiminnallisia perusteita.

Myös tehokkaammalle yhteistyölle ja yhtenäisemmille prosesseille esimerkiksi uusien kaavoitus- ja rakennushankkeiden yhteydessä lienee tilausta, jotta yhteistoimin operaattoreiden ja rakentajien kesken voitaisiin arvioida kuhunkin hankkeeseen parhaiten sopivat ratkaisut jo varhaisessa vaiheessa. Tällöin rakentajat ehtisivät huomioida kuuluvuusasiat suunnittelussaan alusta saakka ja operaattoreilla riittävät tiedot sekä aikaa reagoida niin kuuluvuussuunnittelussa kuin verkonrakentamisessaan. Viime kädessä tästä hyötyisivät myös käyttäjät.

5G:n tarjoamien mahdollisuuksien täysimääräinen hyödyntäminen edellyttää sisäkuuluvuushaasteiden ratkaisemista, mikä tulee vaatimaan yhteistyötä rakentajilta, operaattoreilta ja viranomaisilta yhteisten toimintamallien luomiseksi. Kuuluvuustietoisuuden lisääminen yleisesti niin rakentajien kuin materiaalivalmistajien keskuudessa on tärkeää haasteiden tiedostamiseksi ja ratkaisujen löytämiseksi. Päättäjien rooli sisäkuuluvuuden kokonaisratkaisun löytämisessä lienee vastuunjaosta linjaaminen, operaattoreiden olisi ensiarvoisen tärkeää levittää tietoisuutta ja rakennusalalla olisi oleellista antaa asialle riittävästi huomiota sekä saada materiaaleille läpäisyvaimennusta kuvaava arvo, jotta kuuluvuusasiat voidaan riittävällä tasolla ottaa huomioon suunnittelussa.

## LÄHTEET

- Anttila, T. 2018. Teleste näkee mahdollisuuksia uusissa verkkoteknologioiden. [Verkkolehtiartikkeli]. Turun Sanomat 22.11.2018. [Viitattu 24.3.2019]. Saatavana: [https://static1.squarespace.com/static/5a8aabc751a5840b490cefc3/t/5bfba0f58a922de88ef20476/1543217418719/Teleste\\_TS\\_22112018.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5a8aabc751a5840b490cefc3/t/5bfba0f58a922de88ef20476/1543217418719/Teleste_TS_22112018.pdf)
- Asp, A. 2013. RF-luvun käyttömahdollisuudet rakennusten signaalinvaimennusten arvioinnissa. Esiselvitys. [Verkkajulkaisu]. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 27/2013. [Viitattu 9.4.2019]. Saatavana: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-361-9>
- Asp, A. 2019. Tohtorikoulutettava. Tampereen teknillinen yliopisto. Haastattelu. 15.1.2019.
- Asp, A., Sydorov, Y., Keskkikastari, M. & Niemelä, J. 2013. Rakennusten sisätiloissa esiintyvien matkapuhelinten kuuluvuusongelmien ratkaisuvaihtoehtojen kartoitus. [Verkkajulkaisu]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Loppuraportti. [Viitattu 13.3.2019]. Saatavana: [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/matkapuhelinten\\_kuuluvuusongelmat\\_raportti.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/matkapuhelinten_kuuluvuusongelmat_raportti.pdf)
- DNA. 17.7.2018. Oma 5G-tukiasema selittää pian pientaloasukkaan verkkohaasteet. [Blogi-kirjoitus]. DNA Oy. [Viitattu 22.3.2019]. Saatavana: <https://www.dna.fi/yrietyksille/blogi/-/blogs/seinaan-kiinnitettava-5g-tukiasema-selattaa-pian-pientaloasukkaan-verkkoasteet>
- Elisa. Ei päiväystä. Wifi- ja 4G-puhelut. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.4.2019]. Saatavana: <https://elisa.fi/wifipuhelu/>
- Ericsson. Ei päiväystä. Future mobile data usage and traffic growth. [Verkkosivu]. [Viitattu 26.3.2019]. Saatavana: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>
- Fendelman, A. 10.2.2019. 1G, 2G, 3G, 4G, & 5G Explained. [Verkkosivu]. [Viitattu 22.3.2019]. Saatavana: <https://www.lifewire.com/1g-vs-2g-vs-3g-vs-4g-vs-5g-578681>
- Asennusesimerkki. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. Salo: Finnfoam Oy. [Viitattu 22.3.2019]. Saatavana: <http://www.ff-signal.com/fi/asennusesimerkki>
- Toiminta ja tekniset tiedot. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. Salo: Finnfoam Oy. [Viitattu 22.3.2019]. Saatavana: <http://www.ff-signal.com/fi/tekniset-tiedot>
- Granlund, K. 2007. Tietoliikenne. Jyväskylä: WSOYpro/Docenco-tuotteet.

- GSMA. 26.2.2019. GSMA announces winners of the 2019 GLOMO Awards. [Verkkosivu]. [Viitattu 8.3.2019]. Saatavana: <https://www.gsma.com/newsroom/press-release/gsma-announces-winners-of-the-2019-glomo-awards/>
- Halvarsson, B., Simonsson, A. Elgcrona, A. Chana, R., Machado, P. & Asplund, H. 2018. 5G NR Testbed 3.5 GHz Coverage Results. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 25.3.2019]. Saatavana: [https://www.ericsson.com/assets/local/publications/conference-papers/5g\\_nr\\_sub6\\_coverage.pdf](https://www.ericsson.com/assets/local/publications/conference-papers/5g_nr_sub6_coverage.pdf)
- Heikkilä, T. 2018. Senior Development Manager. Telia Finland Oyj. Sisäkuuluvuus, operaattorin näkökulma. [Ppt-tiedosto]. 16.11.2018.
- Heikkilä, T. 2019. Senior Development Manager. Telia Finland Oyj. Haastattelu. 15.3.2019.
- Heinonen, M. 2018. Mobiiliverkosta eniten iloa pienessä porukassa. [Blogi-kirjoitus]. Traficom: Signaali-blogi. [Viitattu 15.3.2019]. Saatavana: <https://legacy.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/blogit/2018/mobiiliverkostaeniteniloa-pienessaporukassa.html>
- Hentilä, T. 2018. Asuinkerrostaloille tyypillisten seinärakenteiden materiaalivaimennukset matalilla 5G-taajuuksilla. [Verkkójulkaisu]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 16.3.2019]. Saatavana: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201811262759>
- Holma, H. 2017. 5G Networks –Technologies, Capabilities and Deployments. [Ppt-tiedosto]. Nokia Bell Labs. Saatavana: [https://www.finnet.fi/app/uploads/2017/05/Harri-Holma\\_5G\\_for\\_Finnet\\_170524.pdf](https://www.finnet.fi/app/uploads/2017/05/Harri-Holma_5G_for_Finnet_170524.pdf)
- Honkanen, J. 2018. Tähän 5g-yhteyksiä tarvitaan: ensimmäiseksi pelastetaan tukkoiset 4g-yhteydet. [Verkkolehtiartikkeli]. Mikrobitti 28.12.2018. [Viitattu 24.3.2019]. Saatavana: <https://www.mikrobitti.fi/uutiset/tahan-5g-yhteyksia-tarvitaan-ensimmaiseksi-pelastetaan-tukkoiset-4g-yhteydet/db97b146-1246-4344-8c2a-cfa0a8e4758d>
- Huawei. 2017. 5G-Oriented Indoor Digitalization Solution White Paper. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 17.3.2019]. Saatavana: [https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/mbb/5g\\_oriented\\_indoor\\_digitalization\\_solution\\_white\\_paper\\_en.pdf?la=en](https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/mbb/5g_oriented_indoor_digitalization_solution_white_paper_en.pdf?la=en)
- Hytönen, O. 2018. Radiosignaalin läpäisyn optimointi lasirakenteissa. [Verkkójulkaisu]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2.4.2019]. Saatavana: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201811212637>
- Häkkinen, A. 2016. Eduskunnan valiokunta vaatii lakiin säännöstä matkapuhelien kuuluvuuden varmistamisesta rakennusvaiheessa. [Verkkolehtiartikkeli].

- Rakennuslehti 18.11.2016. [Viitattu 22.3.2019]. Saatavana: <https://www.rakennuslehti.fi/2016/11/eduskunnan-valiokunta-vaatii-lakiin-saannosta-matkapuhelien-kuuluvuuden-varmistamisesta-rakennusvaiheessa/>
- Ilme, J. 27.8.2018. Mitä yhteistä on Karl Benzin vaimolla ja 5G:llä? [Blogi-kirjoitus]. Traficom. [Viitattu 14.3.2019]. Saatavana: <https://legacy.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/blogit/2018/mitayhteistaonkarlbenzinvaimollaja5glla.html>
- Inkoo. 2019. Route 51 -hanke mahdollistaa tievalaistuksen ja 5G-verkon kantatie 51 varrelle. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 23.3.2019]. Saatavana: [https://www.inkoo.fi/inkoo\\_tiedottaa/ajankohtaista/route\\_51\\_hanke\\_mahdollistaa\\_tievalaistuksen\\_ja\\_5g-verkon\\_kantatie\\_51\\_varrelle.9123.news](https://www.inkoo.fi/inkoo_tiedottaa/ajankohtaista/route_51_hanke_mahdollistaa_tievalaistuksen_ja_5g-verkon_kantatie_51_varrelle.9123.news)
- ITU-R. 2015. Recommendation ITU-R M.2083-0. [Verkkajulkaisu]. Geneve: International Telecommunication Union. [Viitattu 3.3.2019]. Saatavana: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf)
- ITU-R. 2017. Compilation of measurement data relating to building entry loss. [Verkkajulkaisu]. Geneve: International Telecommunication Union. [Viitattu 23.3.2019]. Saatavana: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.2346-2-2017-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.2346-2-2017-PDF-E.pdf)
- Kailio, A. 2018. Telia toi 5g-verkon Helsingin keskustaan – ”Kuluttaja ei vielä tarvitse lyhyttä latenssia, eikä varmasti vielä lähitulevaisuudessaakaan”. [Verkkolehtiartikkeli]. Kauppalehti 5.9.2018. [Viitattu 11.3.2019]. Saatavana: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/telia-toi-5g-verkon-helsingin-keskustaan-kuluttaja-ei-viela-tarvitse-lyhytta-latenssia-eika-varmasti-viela-lahitulevaisuudessaakaan/8150c8bf-33d4-329b-a700-29cbdc033ee9>
- Karjalainen, J. 2019. Asiantuntija. Orbion Consulting Oy. Haastattelu. 15.3.2019.
- Keränen, H. 2018. 5g-bussipysäkki turvaa levotonta lähiötä - Kuvaa videota suoraan valvojille, jotka voivat kutsua poliisin. [Verkkolehtiartikkeli]. Tekniikka&talous 23.11.2018. [Viitattu 25.3.2019]. Saatavana: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/ict/5g-bussipysakki-turvaa-levotonta-lahiota-kuvaa-videota-suoraan-valvojille-jotka-voivat-kutsua-poliisin-6750346>
- Keskikastari, M. 2014. Matkapuhelinverkkojen kuuluvuusmittaukset energiatehokkaissa rakennuksissa. [Verkkajulkaisu]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Signaalinkäsittelyn ja tietoliikennetekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. [Viitattu 21.3.2019]. Saatavana: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-201410011466>
- Keskinen, J. 2018. Maankäyttö- ja rakennuslaki vaatii kännykälle kuuluvuutta myös sisätiloissa. [Verkkolehtiartikkeli]. Aamuset 18.6.2018. [Viitattu 5.3.2019]. Saatavana: <https://www.aamuset.fi/teemat/3987023/Maankaytto+ja+rakennuslaki+vaatii+kannykalle+kuuluvuutta+myos+sisatiloissa>

- Kingspan. 2016. Kännykkäkuuluvuuden varmistava ratkaisu - Suunnitteluohje. [Verkkajulkaisu]. Kingspan. [Viitattu 29.3.2019]. Saatavana: <https://www.kingspan.com/fi/fi-fi/tuotteet/eristeet/aineistot/suunnittelu-ja-tyoohjeet/kannykkakuuluvuuden-varmistava-ratkaisu-suunnite>
- Kivisilta, R. Chief Information Officer. Technopolis Plc. Haastattelu 4.4.2019.
- Kouhia, I., Nieminen, J. & Pulakka, S. 2010. Rakennuksen ulkovaipan energiakorjaukset. [Verkkajulkaisu]. Espoo: VTT. [Viitattu 20.3.2019]. Saatavana: <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2010/VTT-R-04017-10.pdf>
- L 1015/2001. Radiolaki.
- L 1.12.2017/812. Maankäyttö- ja rakennuslaki.
- Laaksonen, K. 2018. 5g tulee - mutta miksi? [Verkkolehtiartikkeli]. Mikrobitti 17.5.2018. [Viitattu 13.3.2019]. Saatavana: <https://www.mikrobitti.fi/uutiset/5g-tulee-mutta-miksi/24fca345-102d-37ef-922f-5e5fbd1ffceb>
- Laine-Lassila, S. 15.6.2018. Langattomat sukupolvet 1G, 2G, 3G, 4G, 5G... [Verkkosivu]. [Viitattu 22.3.2019]. Saatavana: <https://www.ficom.fi/ajankohtaista/uutiset/langattomat-sukupolvet-1g-2g-3g-4g-5g...>
- Laitila, T. 2019. Huawei julkaisi ensimmäisen 5g-puhelimen: Hintalappu 2299 € – taittuva näyttö ja nippu muita ominaisuuksia. [Verkkolehtiartikkeli]. Talouselämä 25.2.2019. [Viitattu 9.4.2019]. Saatavana: <https://www.talouselama.fi/uutiset/huawei-julkaisi-ensimmaisen-5g-puhelimen-hintalappu-2299-taittuva-naytto-ja-nippu-muita-ominaisuuksia/5c13885a-4436-39d7-b0ad-413bbb1cdbc3>
- Lammin Ikkuna 2017. Lammin Signal Window. [Verkkajulkaisu]. Lammin Ikkuna Oy. [Viitattu 26.3.2019]. Saatavana: <https://www.ikkunastudio.fi/tuotekortit/Lammin%20Signal%20Window.pdf>
- Lehto, E. 2018. Tampereelle avattiin maailman ensimmäinen kaupallinen 5G-verkko – Ensimmäinen puhelu soitettiin tänään Suomesta Viroon. [Verkkolehtiartikkeli]. Aamulehti 27.6.2018. [Viitattu 11.3.2019]. Saatavana: <https://www.aamulehti.fi/uutiset/tampereelle-avattiin-maailman-ensimmainen-kaupallinen-5g-verkko-ensimmainen-puhelu-soitettiin-tanaan-suomesta-viroon-201036336>
- Liikenne- ja viestintäministeriö. 2013. Matkaviestinverkon kuuluvuusongelmat matalaenergiarakennuksissa – työryhmän raportti. [Verkkajulkaisu]. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 26/2013. [Viitattu 8.3.2019]. Saatavana: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-359-6>

- Liikenne- ja viestintäministeriö. 2018a. Valtioneuvosto myönsi 5G-verkkotoimiluvat. [Verkkosivu]. [Viitattu 18.3.2019]. Saatavana: <https://www.lvm.fi/sv/-/valtio-neuvosto-myonsi-5g-verkkotoimiluvat-987074>
- Liikenne- ja viestintäministeriö. 2018b. DNA, Elisa ja Telia saivat uudet verkkotoimiluvat 900, 1800 ja 2100 megahertsin taajuusalueille. [Verkkosivu]. [Viitattu 16.3.2019]. Saatavana: <https://www.lvm.fi/-/dna-elisa-ja-telia-saivat-uudet-verkkotoimiluvat-900-1800-ja-2100-megahertsin-taajuusalueille-990437>
- Lilja, J. 2019. Chief Technology Officer. StealthCase Oy. Haastattelu 19.2.2019.
- Lindström, S. 2018. 5G mahdollistaa verkon viipaloinnin ja räätälöidyt yritysverkot. [Blogi-kirjoitus]. Itewiki. [Viitattu 24.3.2019]. Saatavana: <https://www.itewiki.fi/blog/2018/10/5g-mahdollistaa-verkon-viipaloinnin-ja-raataloidyt-yritysverkot/>
- Luhanka, J. 2019. Tuoteteollisuustoimialan toimialajohtaja. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Haastattelu 5.3.2019.
- LuxTurrim5G. 22.11.2018. Smart and safe bus stop by Teleste extends LuxTurrim5G pilot ecosystem in Espoo. [Blogi-kirjoitus]. LuxTurrim5G. [Viitattu 23.3.2019]. Saatavana: <https://www.luxturrim5g.com/new-blog/2018/11/26/smart-and-safe-bus-stop-by-teleste-extends-luxturrim5g-pilot-ecosystem-in-espoo>
- M 58 B/2014. Viestintäviraston määräys viestintäverkkojen ja -palvelujen laadusta ja yleispalvelusta. [Verkkojulkaisu]. Viestintävirasto. [Viitattu 13.3.2019]. Saatavana: <https://www.finlex.fi/data/normit/42162/M58B2014.pdf>
- Mainio, T. 2018. Nokian ex-insinööri kyllästyi huonoon kuuluvuuteen: kehitti uudenlaisen antenni-ikkunan. [Verkkolehtiartikkeli]. Kauppalehti 3.4.2018. [Viitattu 26.3.2019]. Saatavana: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/nokian-ex-insinööri-kyllastyi-huonoon-kuuluvuuteen-kehitti-uudenlaisen-antenni-ikkunan/b4a6698a-7794-32e4-a092-2eabe2d8d4c9>
- Martinkauppi, K. 2017. Ympäristöministeriön vastine ympäristövaliokunnan saamiin asiantuntijalausuntoihin liittyen hallituksen esitykseen eduskunnalle laiksi maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta (HE 85/2017 vp). [Verkkojulkaisu]. Ympäristöministeriö. [Viitattu 9.4.2019]. Saatavana: <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EDK-2017-AK-146998.pdf>
- Murara, B. IMT-2020 NETWORK HIGH LEVEL REQUIREMENTS, HOW AFRICAN COUNTRIES CAN COPE. [Ppt-tiedosto]. ITU Telecommunication Standardization Sector. [Viitattu 13.3.2019]. Saatavana: [https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/standardization/20170402/Documents/S2\\_4.%20Presentation\\_IMT%202020%20Requirements-how%20developing%20countries%20can%20cope.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/standardization/20170402/Documents/S2_4.%20Presentation_IMT%202020%20Requirements-how%20developing%20countries%20can%20cope.pdf)



- Niemelä, J., Asp, A. & Sydorov, Y. 2012. Radiosignaalin vaimennusmittauksia nykyaikaisissa asuintaloissa. [Verkkojulkaisu]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Tietoliikennetekniikan laitos. Tutkimusraportti 2012:1. [Viitattu 15.3.2019]. Saatavana: [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/niemela\\_radiosignaalin\\_vaimennusmittauksia.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/niemela_radiosignaalin_vaimennusmittauksia.pdf)
- Notesco. Ei päivystä. Passiivinen toistinantenni. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Notesco Oy. [Viitattu 30.03.2019]. Saatavana: [https://www.notesco.net/download/Passiivinen\\_toistinantenni.pdf](https://www.notesco.net/download/Passiivinen_toistinantenni.pdf)
- Ojanen, T., Nykänen, E. & Hemmilä, K. 2017. Rakenteellinen energiatehokkuus korjausrakentamisessa -opas. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 10.3.2019]. Saatavana: [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/opaat-ohjeet/rek\\_27042017.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/opaat-ohjeet/rek_27042017.pdf)
- Pihonen, J. 2016. Viestintäviraston näkemys sisäkuuluvuusasioihin. [Ppt-tiedosto]. Viestintävirasto. [Viitattu 14.3.2019]. Saatavana: [https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5oJ5FjIGF/zSkoOSciT/Pihonen\\_DOHA\\_4516868\\_v1\\_Viestintavirasto\\_Taajuusvalvonta\\_esitys\\_Rakennusfoorumi.pdf](https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5oJ5FjIGF/zSkoOSciT/Pihonen_DOHA_4516868_v1_Viestintavirasto_Taajuusvalvonta_esitys_Rakennusfoorumi.pdf)
- Rakennusteollisuus. 2013. Suunnitteluohje: Matkapuhelimien kuuluvuus sisätiloissa – Energiatehokas uudis- ja korjausrakentaminen. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 18.3.2019]. Saatavana: [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/suunnitteluohje\\_matkapuhelimien\\_kuuluvuus.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/suunnitteluohje_matkapuhelimien_kuuluvuus.pdf)
- Rakennusteollisuus. Ei päivystä. Energiatehokkuuden parantaminen vähentää päästöjä. [Verkkosivu]. Helsinki: Rakennusteollisuus RT ry. [Viitattu 28.3.2019]. Saatavana: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Ilmasto--ja-energiapolitiikka/>
- Rakentaja.fi. 2012. Uudella lämmöneristeellä ja hyvällä suunnittelulla voidaan ehkäistä kännykän kuuluvuusongelmia. [Verkkolehtiartikkeli]. Rakentaja.fi 18.10.2012. [Viitattu 28.3.2019]. Saatavana: [https://www.rakentaja.fi/artikkelit/9505/spu\\_ratkaisu\\_matkapuhelinkuuluvuuden\\_haasteisiin.htm](https://www.rakentaja.fi/artikkelit/9505/spu_ratkaisu_matkapuhelinkuuluvuuden_haasteisiin.htm)
- Rakentaja.fi. 2018. FF-SIGNALin asennus, mitä tulee ottaa huomioon? [Verkkolehtiartikkeli]. Rakentaja.fi 17.08.2018. [Viitattu 22.3.2019]. Saatavana: [https://www.rakentaja.fi/artikkelit/15507/ffsignalin\\_asennus\\_.htm](https://www.rakentaja.fi/artikkelit/15507/ffsignalin_asennus_.htm)
- RakMk C3. 2010. Rakennusten lämmöneristys. Määräykset. [Verkkojulkaisu]. Ympäristöministeriö. [Viitattu 29.3.2019]. Saatavana: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B7BF051A7-6436-4724-A1FD-7688A56FB09B%7D/102966>
- Rodriguez Larrad, I., Nguyen, H. C., Kovács, I. Z., Sørensen, T. B., & Mogensen, P. E. 2017. An Empirical Outdoor-to-Indoor Path Loss Model from below 6 GHz to cm-Wave Frequency Bands. [Verkkojulkaisu]. Aalborg University. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16, 1329 - 1332. [Viitattu 14.3.2019]. Saatavana: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2633787>



- Rokka, H. 2018. 5G viipaloi yritysverkon ja mahdollistaa uudet innovaatiot. [Blogikirjoitus]. Kauppalehti. [Viitattu 24.3.2019]. Saatavana: <https://blog.kauppalehti.fi/uuden-tyon-dna/5g-viipaloi-yritysverkon-ja-mahdollistaa-uudet-innovaatiot>
- RT 80-11252. 2017. Matkaviestinkuuluvuus rakennuksissa. Helsinki: Rakennustieto.
- RT 93-10965. 2009. Asuntosuunnittelu – Talotekniikka. Helsinki: Rakennustieto.
- Sarvanko, T. 2015. Viidennen sukupolven langattoman tietoliikenneverkon tavoitteet ja mahdolliset toteutustekniikat. [Verkkojulkaisu]. Oulu: Oulun yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Kandidaatintyö. [Viitattu 22.3.2019]. Saatavana: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201510312101>
- Savisalo, A. 2019. Palvelupäällikkö. Sitowise Oy. Haastattelu 13.3.2019.
- Sarajisto, T. 2019. Development Manager. Telia Finland Oyj. Haastattelu 7.3.2019.
- ST 625.10. 2015. Matkaviestinjärjestelmien sisäantenniverkot – suunnitteluohje. Espoo: Sähkötieto.
- StealthCase. 2019. 5G Field Tests – Measurements in a non-standalone TDD 5G network @ 3.5 GHz / January 2019. [Ppt-tiedosto]. [Viitattu 26.02.2019]. StealthCase Oy. Julkaisematon.
- Stone, W. 1997. Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials. [Verkkojulkaisu]. Gaithersburg, Maryland. United States Department of Commerce. Technology Administration. National Institute of Standards and Technology. NIST Construction Automation Program Report No. 3. [Viitattu 14.3.2019]. Saatavana: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6055.pdf>
- Stora Enso. 2018. Stora Enso hyödyntää ensimmäisenä metsäteollisuudessa lisättyä todellisuutta ja 5G-teknologiaa tehtaiden kunnossapidossa. [Verkkoartikkeli]. Stora Enso. Lehdistötiedote 12.9.2018. [Viitattu 23.3.2019]. Saatavana: <https://www.storaenso.com/en/newsroom/regulatory-and-investor-releases/2018/9/stora-enso-hyodyntaa-ensimmaisena-metsateollisuudessa-lisatty-todellisuutta-ja-5g-teknologiaa-tehtaiden-kunnossapidossa>
- Suurnäkki, R. 7.3.2019. Erityisasiantuntija, projektipäällikkö. Traficom. [Henkilökohtainen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Juho Matilainen. [Viitattu 17.3.2019]
- Tabbane, S. 2018. Session 2: 4G to 5G networks and standard releases. [Ppt-tiedosto]. International Telecommunication Union. [Viitattu 3.3.2019]. Saatavana:

[https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/ITU-ASP-CoE-Training-on-/Session2\\_4G%20to%205G%20networks%20and%20standard%20releases.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/ITU-ASP-CoE-Training-on-/Session2_4G%20to%205G%20networks%20and%20standard%20releases.pdf)

Telia. 2018a. 5G on täällä 21.11.2018. [Video]. Helsinki: Telia. [Viitattu 24.3.2019]. Saatavana: <https://www.youtube.com/watch?v=3HMQzxJfyJ4>

Telia. 2018b. Ei pelkkiä kissavideoita – 5G:n kapasiteetti ja nopeus mahdollistavat uudenlaiset palvelut. [Verkkootikkeli]. [Viitattu 25.3.2019]. Saatavana: <https://www.telia.fi/yrityksille/artikkelit/artikkeli/5gn-kapasiteetti-ja-nopeus-mahdollistavat-uudenlaiset-palvelut>

Telia. 2018c. Yleispalveluvelvoite. [Verkkosivu]. [Viitattu 14.3.2019]. Saatavana: <https://www.telia.fi/asiakastuki/nettilyhteydet/yleista-laajakaistayhteyksista/yleispalveluvelvoite>

Telia. 2019. Telia and Nokia introduce 5G gateway to Finland. [Verkkosivu]. [Viitattu 22.3.2019]. Saatavana: <https://www.teliacompany.com/en/news/news-articles/2019/telia-and-nokia-introduce-5g-gateway-to-finland/>

Telia. Ei päiväystä. 4G-puhe ja Wifi-puhelut. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.4.2019]. Saatavana: <https://www.telia.fi/asiakastuki/liittymat/puhelimen-kaytto/4G-puhe-ja-Wifi-puhelut>

Tilastokeskus. 28.9.2015. Matkapuhelinverkon toiminta ja tukiasemat. [Verkkosivu]. [Viitattu 11.3.2019]. Saatavana: <https://www.stuk.fi/aiheet/matkapuhelimet-ja-tukiasemat/matkapuhelinverkko/matkapuhelinverkon-toiminta-ja-tukiasemat>

Tiivi. 2018. Tiivi Connect Antenni -tuotekortti. [Verkkajulkaisu]. Tiivi. [Viitattu 26.3.2019]. Saatavana: [https://www.tiivi.fi/files/3115/2223/2671/Tiivi\\_Connect\\_Antenni\\_Whitepaper\\_A4\\_Lowres.pdf](https://www.tiivi.fi/files/3115/2223/2671/Tiivi_Connect_Antenni_Whitepaper_A4_Lowres.pdf)

Traficom. 6.3.2018. Mobiililaajakaistaliittymien tiedonsiirtokäyttö moninkertaista puhelinliittymiin verrattuna. [Verkkosivu]. [Viitattu 14.3.2019]. Saatavana: <https://legacy.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/ajankohtaista/2018/mobiililaajakaistaliittymientiedonsiirtokayttomoninkertaistapuhelinliittymiinverrattuna.html>

Traficom. 2019a. Oikeutesi viestinnän peruspalveluihin. [Verkkosivu]. [Viitattu 15.3.2019]. Saatavana: <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/laajakaista-ja-puhelin/oikeutesi-viestinnan-peruspalveluihin>

Traficom. 2019b. Datan kulutus kasvoi voimakkaasti erityisesti matkapuhelinkäytössä. [Verkkosivu]. [Viitattu 18.3.2019]. Saatavana: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/datan-kulutus-kasvoi-voimakkaasti-erityisesti-matkapuhelinkaytossa>

Tuominen, T. 2019. Sähköasiantuntija. NCC AB. Haastattelu. 5.3.2019.

Uusiteknologia.fi. 2018a. Asiantuntija-artikkeli: 5G-standardi valmistui – mitä tarkoittaa? [Verkkolehtiartikkeli]. Uusiteknologia.fi 29.6.2018. [Viitattu 24.3.2019]. Saatavana: <https://www.uusiteknologia.fi/2018/06/29/ensimmainen-5g-standardi-valmistui-mita-tarkoittaa/>

Uusiteknologia.fi. 2018b. DNA avaa 5G-verkon Helsingin ydinkeskustaan. [Verkkolehtiartikkeli]. Uusiteknologia.fi 28.12.2018. [Viitattu 12.3.2019]. Saatavana: <https://www.uusiteknologia.fi/2018/12/28/dna-avaa-5g-verkon-helsingin-ydinkeskustaan/>

Uusiteknologia.fi. 2019a. Uusi 5G-älytie ledipylväiden voimin [Verkkolehtiartikkeli]. Uusiteknologia.fi 4.2.2019. [Viitattu 17.3.2019]. Saatavana: <https://www.uusiteknologia.fi/2019/02/04/uusi-5g-alytie-ledipylvaiden-voimin/>

Uusiteknologia.fi. 2019b. Nokian 5G-reititin netin kotijakeluun tai toimistoon. [Verkkolehtiartikkeli]. Uusiteknologia.fi 5.3.2019. [Viitattu 17.3.2019]. Saatavana: <https://www.uusiteknologia.fi/2019/03/05/nokian-5g-reititin-netin-kotijakeluun/>

Viestintävirasto. 12.11.2013. Viestintävirasto ilmoittaa matkaviestinverkon toistimien luvattomasta käytöstä poliisille. [Verkkosivu]. [Viitattu 13.3.2019]. Saatavana: <https://legacy.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/ajankohtaista/2013/viestintavirastoilmoittaamatkaviestinverkon-toistimien-luvattomasta-kaytosta-poliisille.html>

Viinikainen, J. 2019. Tekninen asiantuntija. Sitowise Oy. Haastattelu 29.3.2019.