



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TUOMO HENTILÄ  
ASUINKERROSTALOILLE TYYPILLISTEN SEINÄRAKENTEIDEN  
MATERIAALIVAIMENNUKSET MATALILLA 5G-TAAJUUKSILLA

Diplomityö

Tarkastajat: professori Mikko  
Valkama ja tohtorikoulutettava Ari  
Asp, aihe hyväksytty  
30. toukokuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**TUOMO HENTILÄ:** Asuinkerrostaloille tyypillisten seinärakenteiden materiaali-  
vaimennukset matalilla 5G-taajuuksilla

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 62 sivua

Lokakuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Wireless Communications

Tarkastaja: professori Mikko Valkama ja tohtorikoulutettava Ari Asp

Avainsanat: Radiosignaalin eteneminen, matkapuhelinverkot, 5G-verkot, RF-vaimennus, rakennusten kuuluvuusongelmat

Matkaviestinverkkojen käyttämien taajuuksien kasvaminen sekä asuinkerrostalojen energiatehokkuuden parantuminen ovat aiheuttaneet mobiililaitteiden kuuluvuudelle merkittäviä ongelmia rakennusten sisällä. Matkaviestinverkkojen käyttövarmuus on nyt ja tulevaisuudessa tärkeä osa yhteiskuntaa, sillä sen kautta välitetään kriittisiä toimintoja, kuten hätäkeskuspuheluita. Lähivuosina kaupallisille markkinoille tulevat 5G-verkot käyttävät nykyistä korkeampia taajuuksia, mikä saattaa hankaloittaa tilannetta vielä entisestään, mikäli kuuluvuusongelmiin ei löydetä ratkaisua.

Työn tavoitteena oli selvittää 5G-verkkoihin siirtymisen vaikutus asuinkerrostalojen kuuluvuusongelmiin. Tavoitteeseen pääsyä varten toteutettiin RF-vaimennusmittauksia yleisimmille kerrostalojen ulkoseinämaterialle sekä ulkoseinärakenteille. Yleisimpien mittaustapausten selvittämistä varten suoritettiin kirjallisuusselvitys, jonka perusteella mitattiin yhteensä 24 erilaista yleisesti Suomessa käytettyä kerrostalojen ulkoseinissä käytettyä materiaalia tai rakennetta.

RF-vaimennusmittausten perusteella asuinkerrostalojen aiheuttamat RF-vaimennukset kasvavat, kun korkeampia taajuuksia käyttävät matkaviestinverkot otetaan käyttöön. Mitattujen ulkoseinärakenteiden RF-vaimennukset ensimmäisenä 5G-verkoissa käyttöön tulevalla 3,5 GHz:n taajuuskaistalla olivat keskimäärin yli 21 desibeliä. Kyseinen RF-vaimennus on huomattavasti korkeampi kuin tällä hetkellä matkaviestinverkoissa käytössä olevien taajuuksien. Mittausten avulla saatiin myös selvitettyä, että energiatehokkaissa kerrostaloissa esiintyvät kuuluvuusongelmat johtuvat siitä, että niiden ulkoseinät sekä ikkunat vaimentavat tehokkaasti RF-signaaleja. Tästä johtuen RF-signaaleille ei ole mitään matalasti vaimentavaa reittiä kerrostalojen ulkokuoren lävitse.

## ABSTRACT

**TUOMO HENTILÄ:** Material attenuation of apartment buildings with low 5G frequencies

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 62 pages

October 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Wireless Communications

Examiner: Professor Mikko Valkama and Doctoral student Ari Asp

Keywords: Radio propagation, Cellular networks, 5G networks, RF-attenuation, Mobile network reception problems

The increasement of frequency bands used by cellular networks and improvement in energy efficiency of apartment building has caused reception problems with mobile devices inside the buildings. Dependability of the cellular networks is a vital part of society now and in the future. Cellular networks transfer critical data like emergency calls. Upcoming 5G networks utilizes higher frequency bands than current cellular network technologies, which might make reception problems even more difficult, if the problem can not be solved.

The target of this thesis is to investigate the effect that initialization of 5G network will cause to the reception problems in apartment buildings. To achieve this target, RF attenuation measurements was done with the most popular exterior wall materials and structures of the apartment buildings. Literature research helped with selecting these materials and structures for the RF attenuation measurements. Total amount of the measured objects was 24, which included single materials and whole structures of exterior walls.

Based on the results of the RF attenuation measurements, the RF attenuations will increase, when the higher frequency bands will be introduced in cellular networks. The average attenuation of measured exterior wall structures with 3,5 GHz frequency band was over 21 decibels, which is significantly higher than in current cellular network frequency bands. The 3,5 GHz frequency band will be the first frequency band of 5G networks in Finland. Based on the measurement results, the reception problems in the energy efficient apartment buildings is caused by high RF attenuation of exterior walls and windows. Therefore, there is no low attenuating path for RF signals penetrating the building's shell.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on kirjoitettu TTY:n Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan laboratoriolle osana Business Finlandin rahoittamaa LuxTurrin5G-projektia.

Haluan kiittää Ari Aspia työni ohjaamisesta sekä kaikkia LuxTurrin5G-projektin WP7-työpaketin kautta työn etenemistä edesauttaneita henkilöitä. Lisäksi erityiskiitokset rakennustekniikanlaitoksella työskenteleville henkilöille, jotka auttoivat diplomityöhön liittyvien materiaalimittausten mallikappaleiden tekemisessä.

Kiitokset myös avopuolisolleni sekä perheelleni tukemisestani tämän diplomityön sekä kaikkien muiden opintojeni aikana. Viimeisimpänä, muttei vähäisimpänä kiitän kaikkia ystäviäni tuesta sekä rankan opiskelun vastapainona toimineen vapaa-ajan miellyttävästä vietosta.

Tampereella, 15.10.2018

Tuomo Hentilä

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	MATKAPUHELINVERKOT SUOMESSA .....	4
2.1	Toisen sukupolven matkapuhelinverkot.....	4
2.2	Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot.....	5
2.3	Neljännän sukupolven matkapuhelinverkot .....	7
2.4	Viidennen sukupolven matkapuhelinverkot.....	8
2.5	Tällä hetkellä käytössä olevat matkapuhelintaajuudet Suomessa .....	9
3.	YLEISIMMÄT KERROSTALOJEN ULKOSEINÄRAKENTEET SUOMESSA	10
3.1	Kerrostalojen ulkoseinärakenteet vuosina 1950-75 .....	10
3.2	Kerrostalojen ulkoseinärakenteet vuosina 1975-2000 .....	14
3.3	Kerrostalojen ulkoseinärakenteet 2000-luvulla.....	15
3.4	Ikkunarakenteiden perusteita.....	19
3.5	Tilastoja kerrostalorakentamisesta Suomessa .....	20
4.	RF-VAIMENNUSMITTAUKSET TYYPILLISILLÄ ULKOSEINÄMATERIAALEILLA JA -RAKENTEILLA .....	22
4.1	Mittausmenetelmä .....	22
4.2	Mittauspaikat.....	24
4.2.1	Laboratoriomittaukset .....	24
4.2.2	Kenttämittaukset .....	26
4.3	Mittauskohteet.....	27
4.3.1	Yksittäiset materiaalinäytteet.....	27
4.3.2	Ulkoseinärakenteet.....	28
4.4	Mittautulokset.....	29
4.4.1	Mittaukset yksittäisillä materiaalinäytteillä .....	30
4.4.2	Mittaukset ulkoseinärakenteilla .....	35
5.	MITTAUSTULOSTEN YHTEENVETO.....	49
5.1	Yksittäiset materiaalinäytteet .....	49
5.2	Ulkoseinärakenteet .....	51
6.	RATKAISUEHDOTUKSET .....	54
6.1	RF-aukkojen suunnittelu ja simulointi .....	54
6.2	Sisäantenniverkot .....	56
7.	YHTEENVETO .....	58
	LÄHTEET.....	60

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

2G	Toisen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologioiden yleisnimitys.
3G	Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologioiden yleisnimitys.
3GPP	3rd Generation Partnership Project. Matkapuhelinverkkojen standardeja kehittävä organisaatio.
4G	Neljännän sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
5G	Viidennen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
BES	Betonielementtistandardi. Avoin elementtijärjestelmä, joka kehitettiin 1960-luvulla.
CDMA	Code-Division Multiple Access. Kanavanvaraustekniikka, johon monet matkapuhelinverkot perustuvat.
dBm	Desibel-milliwatts. Teho, joka on verrannollinen yhteen milliwattiin.
EU	Euroopan Unioni.
FDD	Frequency-Division Duplexing. Tiedonsiirtojärjestelmä, jossa lähetys- ja vastaanottolinkit toimivat eri taajuuksilla.
GHz	Gigahertsi. Taajuuden yksikkö, miljardi hertsiä.
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying. Esimerkiksi GSM:n käyttämä modulaatiotekniikka.
GSM	Global System for Mobile Communications. Käytetyin toisen sukupolven mobiiliverkkoteknologia.
IoT	Internet of Things. Esineiden internet.
LTE	Long Term Evolution. Kehittynyt 4G-verkkoteknologia.
MHz	Megahertsi. Taajuuden yksikkö, miljoona hertsiä.
MSK	Minimum Shift Keying. Modulaatiotekniikka.
O2I	Outdoor-to-indoor. Kanavamalli rakennuksen ulkokuoren läpäisevälle signaalille.
PU-eriste	Polyuretaanieriste.
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying. Digitaalinen modulaatiotekniikka.
RF	Radio Frequency. Käytetään yleisnimityksenä radiotaajuuksille.
TDD	Time-Division Duplexing. Tiedonsiirtojärjestelmät, jossa lähetys- ja vastaanottolinkit toimivat eri ajanhetkillä.
U-Arvo	Lämmönläpäisykerroin, käytetään yleisesti rakennusten osien energiatehokkuuden yksikkönä.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System. Suomessa käytetyin kolmannen sukupolven mobiiliverkkoteknologia.
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access. Kolmannen sukupolven matkaviestinverkon toteuttamiseen käytetty teknologia.
W-CDMA	Wideband Code-Division Multiple Access. UMTS-verkkojen laajalti käyttämä kanavanvaraustekniikka.

# 1. JOHDANTO

Matkapuhelinverkot ovat kriittinen osa nyky-yhteiskunnan infrastruktuuria, sillä esimerkiksi hätäkeskuspuheluiden välitys matkapuhelinverkkojen avulla vaatii niiltä merkittävää toimintavarmuutta. Vuonna 2017 arviolta 77% suomalaisista ihmisistä käytti omassa käytössään älypuhelinta, jossa on käytössä kolmannen sukupolven (3G) tai neljännen sukupolven (4G) mobiililaajakaistayhteys [1]. Tällä hetkellä kehittyneimmät kaupallisessa käytössä olevat matkapuhelinverkot ovat Long Term Evolution-teknologiaan (LTE) perustuvia. Erityisesti kaupallisissa tarkoituksissa LTE-verkkoja kutsutaan yleisesti 4G-verkoiksi, vaikka ne todellisuudessa ovat paranneltuja teknologioita 3G-verkoista. LTE-verkot ovat kuitenkin kasvattaneet erityisesti matkapuhelinverkkojen tiedonsiirtonopeuksia, minkä johdosta niitä käytetään nykyisin kotitalouksissa entistä enemmän vaihtoehtona kiinteille verkkoyhteyksille. Muilta ominaisuuksiltaan, kuten viiveen ja tuetun laitemäärän osalta LTE-verkot kuitenkin rajoittavat vieläkin suurempaa teknologista murrosta esimerkiksi Internet of Thing:sin (IoT) vaatimuksien täyttämiseksi.

Huolimatta siitä, etteivät nykyiset LTE-verkot ole vielä kaikkien kriteerien mukaisia valmiita 4G-verkkoja, matkapuhelinverkkojen tulevaisuuden osalta katseet on jo käännetty vahvasti viidennen sukupolven (5G) matkaviestinverkkoihin. 5G-verkkojen on tarkoitus nostaa matkapuhelinverkkojen nopeus, viive ja luotettavuus sellaiselle tasolle, jolla on mahdollista ohjata suuria laitemääriä lähes reaaliajassa. Myös maksimi tiedonsiirtonopeuksien on tarkoitus nousta nykyisistä muutamista sadoista megabiteistä, jopa gigabitteihin sekunnissa. Tämän muutoksen mahdollistajana on kehittyvien kanavakoodauksen ja modulaatiotekniikoiden lisäksi myös kasvavat 5G-verkon käyttämät taajuudet. Tällä hetkellä Suomessa toimivien operaattorien taajuudet vaihtelevat 450 MHz:n ja 2600 MHz:n välillä, jotka pitävät sisällään kaikki Suomessa tällä hetkellä kaupallisessa käytössä olevat verkkotekniikat ovat Global System for Mobile Communications- (GSM), Universal Mobile Telecommunications System- (UMTS) ja LTE-verkot [2]. 5G-verkkojen on puolestaan kaavailtu käyttävän jo verkkojen käyttöönottoaiheessakin huomattavasti korkeampia taajuuksia. Euroopassa 5G-verkon käyttöönottoaiheen taajuuskaista on arveltu olevan 3400 – 3800 MHz, kun kaikkialla maailmassa otetaan 5G-verkkojen myötä todennäköisesti käyttöön taajuuksia 3100 MHz:n ja 4900 MHz:n väliltä [3].

Taajuuden kasvaminen tuo lukuisien hyötyjen lisäksi mukanaan myös haasteita, erityisesti radioaaltojen etenemiselle. Radioaallot ovat sähkömagneettista säteilyä, jonka vaimentuminen yleisesti ottaen kasvaa taajuuden kasvattamisen myötä. Varsinkin vapaassa tilassa, jossa radioaallot etenevät vapaasti, vaimentuminen kasvaa taajuuden nostamisen kanssa. Vastaava ilmiö on nähtävissä myös etenemistapauksissa, joissa signaalia lähettävä ja vastaanottava laite ovat esimerkiksi rakennuksen sisä- ja ulkopuolilla. Tällöin

signaali joutuu kulkemaan vähintäänkin rakennuksen ulkokuoren läpi päästäkseen perille vastaanottavaan laitteeseen, joissain tapauksissa läpäistäviä seinärakenteita voi olla useampiakin. Kyseisille tilanteille on olemassa oma kanavamalli, jota kutsutaan Outdoor-to-Indooriksi (O2I).

Matkapuhelinverkkojen kehittymisen ja käyttämien taajuuksien kasvamisen ohella, myös asuinkerrostalot ovat muuttuneet merkittävästi viime vuosikymmenten aikana. Tällä hetkellä kerrostalorakentamisessa pyritään tuottamaan hyvin energiatehokkaita taloratkaisuja, joiden hiilijalanjälki on pieni. Muutoksen ajureina toimivat pääosin rakentamisen ja rakennuksen ylläpidon kustannustehokkuus sekä ilmanmuutos ja sen mukanaan tuomat ilmastopimukset, joiden sisällöt pyrkivät pienentämään hiilidioksidipäästöjä merkittävästi. Hiilidioksidipäästöjen pienentäminen kerrostaloasunnoissa koostuu lähinnä lämmitysenergian tarpeen pienentämisestä. Lämmitysenergian tarpeen pienentäminen saadaan toteutettua käytännössä tekemällä kerrostaloista entistä paremmin eristettyjä. Erityisesti eristys koskee talojen ulkoseiniä, joiden kerrospaksuudet ovat kasvaneet huomattavasti viimeisten vuosikymmenten aikana. Kerrostalorakentamisesta on tullut myös hyvin teollista, mikä on nopeuttanut kerrostalojen rakentamista huomattavasti. Tämä on myös saanut aikaan sen, että rakennustavat ovat pääosin standardisoituja sekä rakennustavat ja materiaalit ovat hyvin samankaltaisia kansallisessa mittakaavassa.

Matkapuhelinverkkojen käyttämien taajuuksien kasvattaminen ja energiatehokkaiden kerrostalojen yhteisvaikutus on saanut aikaan kasvavan määrän kuuluvuusongelmia kerrostaloasukkailla ympäri maan. Tämän diplomityön tarkoituksena onkin selvittää tulevien 5G-verkkojen käyttämien nykyistä korkeampien taajuuksien vaikutusta erityisesti kerrostalojen sisätiloissa. Radioverkkosuunnittelun kannalta tiheimmin asutetuissa kaupungeissa suositaan korkeampi taajuuksisia matkapuhelinverkkoja, kuin haja-asutusseuduilla. Myös tämän vuoksi kaupunkialueilla kuuluvuusongelmat saattavat korostua entisestään. On myös tärkeää huomioida, että kuuluvuusongelmalla ei tarkoiteta pelkästään puhelujen konkreettista kuuluvuutta, vaan myös matkapuhelinverkon kautta tapahtuvan tiedonsiirron ja sen nopeuden laskemista huomattavasti vaimentuneen signaalitason vuoksi.

Tässä työssä pyritään selvittämään erityisesti kerrostalojen rakennusmateriaalien aiheuttamia vaimennuksia tulevien 5G-matkapuhelinverkkojen käyttämille taajuuksille, mutta suurin huomio työssä keskittyy kuitenkin rakennusten ulkoseinien aiheuttamiin RF-vaimennuksiin. Käytettävissä olevien mittalaitteiden rajoitusten vuoksi 5G-taajuuksien osalta keskitytään lähinnä alkuvaiheessa käytettäviin taajuuksiin. Työ sisältää myös selvityksen nykyisin Suomessa käytössä olevista matkapuhelinverkoista ja tulevasta 5G-verkosta. Vastaavanlainen selvitys tehdään myös kerrostalojen ulkoseinärakenteista Suomessa 1950-luvulta nykypäivään. Mittausten ja simulaatioiden avulla pyritään selvittämään käytetyimmistä ulkoseinärakenteista suotuisimmat rakennusmateriaalit signaalin läpäisykyvyn näkökulmasta. Saatujen tulosten avulla tehdään ratkaisuehdotelmia kuuluvuusongelman parantamiseksi kerrostaloissa.

Johdannon jälkeen, luvussa 2 käsitellään yleisellä tasolla tällä hetkellä Suomessa käytössä olevia matkapuhelinverkkoja. Luvussa perehdytään lyhyesti myös lähivuosina lanseerattaviin 5G-verkkoihin ja niiden käyttämiin taajuuksiin, jotka ovat työn kannalta olennaisessa osassa. Luvussa 3 tarkastellaan Suomessa olevien kerrostalojen yleisimpiä rakennusmateriaaleja sekä rakenteita. Pääpaino keskittyy signaalin läpäisyn kannalta olennaisimpaan osaan eli kerrostalojen ulkoseiniin. Luvussa 4 käydään läpi varsinaiset RF-materiaalivaimennusmittaukset kokonaisuudessaan, sisältäen tiedot mittauksissa käytetystä järjestelmästä, mittausten suorituspaikoista, mittaushetkistä sekä tietenkin mittausten tuloksista. Luvussa 5 pyritään antamaan ratkaisuehdotuksia, joiden avulla matkapuhelinverkkojen kuuluvuutta voitaisiin parantaa kerrostalojen sisällä. Lopuksi luvussa 6 tehdään yhteenveto tämän diplomityön merkittävimmistä tuloksista ja muista havainnoista.

## 2. MATKAPUHELINVERKOT SUOMESSA

Tässä luvussa käydään läpi tällä hetkellä Suomessa käytössä olevia matkapuhelinverkkoja ja niiden teknologioita. Luvussa käydään läpi signaalin ulkokuoren läpäisykyvyn kannalta merkittävimpiä teknisiä ominaisuuksia, kuten matkapuhelinverkon käyttämiä taajuusalueita ja modulaatiotekniikoita. Matkapuhelinverkkotekniikoista on käytössä tällä hetkellä toisen, kolmannen, ja neljännen sukupolven verkkoja. Luvun tarkoituksena on esitellä kunkin matkapuhelinverkkosukupolven käytetyimmät ja edelleen matkapuhelinikäytössä olevat verkkoteknologiat. Tämän lisäksi luvussa tarkastellaan tulevia viidennen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologioita ja niiden käyttämiä taajuusalueita

Matkaviestinverkot ovat Suomessa tarkoin säädeltyjä, luvat verkkojen ylläpitämiselle myöntää Viestintävirasto. Matkapuhelinverkoille varatut taajuuskaistat ovat hyvin rajalliset, joten matkapuhelinverkkojen on käytettävä käytössä olevat taajuuskaistat tehokkaasti. Suomessa kaupallisia matkaviestinverkkopalveluita tarjoaa ja ylläpitää yhteensä viisi toimijaa; Telia Finland Oyj, DNA Oyj, Elisa Oyj, Digiset Oy ja ainoastaan Ahvenanmaan maakunnassa toimiva Ålands Telekommunikation Ab [2].

### 2.1 Toisen sukupolven matkapuhelinverkot

Global System for Mobile communications eli GSM on toisen sukupolven piirikytkentäinen ja täysin digitaalinen matkapuhelinverkkoteknologia, joka on edelleen laajalti käytössä. GSM:n kehitys alkoi jo vuonna 1982, joten se on yksi vanhimmista langattomista verkkoteknologioista, jotka ovat edelleen aktiivisessa kaupallisessa käytössä. Alun perin kyseisen teknologian oli tarkoitus tuoda kehittynyt langaton tiedonsiirtoteknologia ja tämän lisäksi GSM oli tarkoitus standardisoida Euroopan laajuisesti, jotta sen käyttö olisi mahdollista myös maiden rajojen yli [4]. GSM-verkot suunniteltiin erityisesti puheensiirtoon, eivätkä GSM-verkot tue pakettikytkentäistä tiedonsiirtoa. Ensimmäisen puhelu GSM-yhteydellä tehtiin Suomessa vuonna 1991 Radiolinjan verkon avulla [5]. GSM-verkkojen kehitystä edistämään on perustettu järjestö nimeltä GSM Association (GSMA), jossa on jäseninä useita satoja yrityksiä.

Suomessa on tällä hetkellä käytössä GSM-verkkoja kahdella eri taajuuskaistalla, jotka ovat 900 MHz:n ja 1800 MHz:n matkaviestintaajuuskaistat [6]. GSM-verkkojen kattavuus on hyvin laaja, sillä se kattaa lähes koko Suomen pinta-alan [7]. Näitä kyseisiä GSM teknologialla toimivia taajuuskaistoja kutsutaan myös nimillä GSM900 ja GSM 1800. Aluksi GSM-verkot käyttivät ainoastaan matalampaa 900 MHz:n taajuutta, mutta matkapuhelinten yleistettyä suurten käyttäjämassojen myötä GSM900-verkot alkoivat ruuhkautua, jolloin syntyi tarve myös toiselle taajuuskaistalle. Ruuhkautuneita GSM900-verkkoja

tukemaan kehitettiin GSM1800-verkko, jota kutsuttiin aluksi ”City-verkoksi”, sillä ne sijaitsivat aluksi pääosin suurissa taajamissa. Johtuen korkeammasta taajuusalueesta, GSM1800-verkkojen kantama on huomattavasti GSM900-verkkoja pienempi, mutta toisaalta korkeampi taajuusalue mahdollistaa useamman yhtäaikaisten matkapuhelinyhteyden eli verkon kapasiteetti on suurempi. [4]

Fyysisellä kerroksella GSM käyttää modulaatiotekniikkana Minimum Shift Keyingistä (MSK) matkaviestinjärjestelmien käyttöön paremmin soveltuvammaksi versioksi suunniteltua Gaussian Minimum Shift Keyingiä (GMSK). Suurimpana erona näiden kahden modulaatiotekniikan välillä on se, että GMSK:lla lähetetyt signaalit on suodatettu Gaussin suotimen läpi, jotta signaalin itseensä aiheuttama häiriö olisi pienempi. Langattoman radiotien kanavanvaraustekniikkana GSM:ssä toimii pääasiassa Time Division Multiple Access TDMA, joka tarkoittaa siirtokanavan varaamisen perustuvan tietyllä aikavälillä tehtäviin lähetyksiin. [4] Tiedonsiirtonopeudet ensimmäisillä GSM-teknikoilla olivat ainoastaan 9,6 - 14,4 kbit/s [8].

GSM-verkot luotiin alun perin pääasiassa äänipuhelua varten, joten tiedonsiirto-tarpeen kasvaessa GSM-verkot eivät pystyneet vastaamaan kasvaneeseen kysyntään. Tämän takia toisen sukupolven matkapuhelinverkkojen datansiirtoon on luotu myöhemmin uudempia tekniikoita, jotka ovat moninkertaistaneet verkkojen datansiirtonopeudet. Näitä ovat General Packet Radio Service (GPRS) sekä Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE). GPRS-verkot otettiin käyttöön vuonna 2000 ja EDGE vuonna 2003. Epävirallisesti näitä kahta teknologiaa kutsutaan 2.5G:ksi, jonka voi kuvitella tarkoittavan siltaa toisen ja kolmannen sukupolven verkkoteknologioiden välillä. GPRS ja EDGE ovat molemmat suunniteltu erityisesti palvelemaan datansiirtoa matkapuhelinverkoissa ja ne ovat myös suunniteltu pakettikytkentäisiä tiedonsiirto-ovelluksia varten. Kehittyneiden modulaatio- ja kanavakoodaustekniikoiden vuoksi GPRS:n teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus on 171 kbit/s ja EDGE:n tapauksessa maksimitiedonsiirtonopeus on 384 kbit/s. Kehittyneemmätkin versiot toisen sukupolven matkapuhelinverkoista olivat edelleen piirikytkentäisiä, mutta näissä teknologioissa ajakaottelusta oli tehty entistä nopeampaa ja tehokkaampaa. [4, 9, 10]

## 2.2 Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot

Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot tunnetaan yleisnimityksellä Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Toisin kuin GSM-verkot, kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot on suunniteltu myös datansiirtoa varten. Ensimmäinen kolmannen sukupolven matkapuhelinverkko otettiin käyttöön jo vuonna 2001 Japanissa, mutta se ollut yhdenmukainen myöhemmin vuonna 2005 Euroopassa käyttöön otettujen UMTS-verkkojen kanssa, mitkä perustuivat Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA) teknologiaan. UMTS-verkkoja kehittää 3rd Generation Partnership Project (3GPP), joka koostuu ympäri maailmaa toimivista organisaatiopartnereista. Eurooppaa kyseisessä järjestössä edustaa European Telecommunications Standards Institute.

UMTS-verkkojen suunniteltiin toimivan pääasiassa 2 GHz:n taajuuskaistalla. Tämän jälkeen verkkoja on kuitenkin otettu käyttöön myös muilla taajuuksilla. Tällä hetkellä Suomessa kolmannen sukupolven verkkoteknologioista on käytössä UMTS Terrestrial Radio Access Frequency-Division Duplexing (UTRA FDD) ja UMTS Terrestrial Radio Access Time-Division Duplexing (UTRA TDD). UTRA FDD on käytössä kaikilla operaattoreilla kolmella eri matkaviestintaajuuskaistalla; 900 MHz:n, 1800 MHz:n ja 2000 MHz:n. UTRA TDD on puolestaan käytössä ainoastaan 2 GHz:n taajuuskaistalla. [6] Vaikka kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkojen peittoalue ei ole GSM:n verkkojen laajuinen, kattavat ne silti valtaosan Suomen pinta-alasta [7]. Erityisesti matalamman 900 MHz:n taajuuden verkot luovat saatavuuden harvemmin asutuille seuduille, 1800 MHz:n ja 2000 MHz:n verkot ovat käytössä tiheämmin asutuissa alueilla, kuten kaupungeissa. Frequency-Division Duplexing (FDD) tarkoittaa käytännössä sitä, että ala- ja ylälinkille on tiedonsiirrossa varattu omat taajuuskaistansa. UMTS-verkot ovat osittain piirikytkentäisiä, joten ne soveltuvat myös äänipuheluihin [11].

Radioverkon rajapinnassa UMTS-verkoissa käytetään W-CDMA teknologiaa. Teknologian vahvuuksina verrattuna GSM-verkkoihin ovat erityisesti käytössä olevan taajuuskaistan huomattavasti tehokkaampi hyödyntäminen sekä tiedonsiirtonopeus. W-CDMA on laajakaistainen versio Code-Division Multiple Accessista (CDMA). CDMA:n ominaisuutena on, että tarvittaessa samaa taajuuskaistaa pystyvät kokonaisuudessaan käyttämään kaikki käyttäjät, jotka tunnistetaan yksilöllisillä koodeilla. Modulaatiotekniikkana UMTS-verkot käyttivät aluksi yksinkertaista QPSK-tekniikkaa, jossa jokainen symboli merkitsee kahta bittiä. Kehittyneimmissä kolmannen sukupolven verkkoteknologioissa, kuten High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) ja High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA) käytetään jopa 64-QAM:ia modulaationa, jossa yksi symboli merkitsee kuutta bittiä. Käytettävään modulaatiotekniikkaan vaikuttaa lähetetyn ja vastaanotetun signaalin teho, jota tarkkailemalla pystytään valitsemaan tehokkain mahdollinen modulaatiotekniikka. [12]

Ensimmäisten UMTS-verkkojen teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus oli 384 kbit/s [11]. Modernimmat ja vieläkin nykyisin käytössä olevat kolmannen sukupolven verkkoteknologiat kykenevät huomattavasti nopeampiin tiedonsiirtonopeuksiin. Aiemmin mainittu HSDPA, jota myös 3.5G:ksi kutsutaan, kykenee saavuttamaan teoriassa 14 Mbit/s tiedonsiirtonopeuden. Tästä edelleen kehittyneempi Evolved High Speed Packet Access (HSPA+) kykenee saavuttamaan teoreettisena maksimitiedonsiirtonopeutena 42,2 Mbit/s [12]. Huomattavasti kasvaneet mobiiliverkkojen tiedonsiirtonopeudet toivat matkapuhelinverkot varteenotettavaksi vaihtoehtoiksi kiinteille verkkoyhteyksille, minkä seurauksena useisiin kotitalouksiin hankittiin niin kutsuttu morkkula eli matkapuhelinverkkomodeemi. Tilastojen mukaan Suomessa käytetään mobiilidataa asukasta kohti eniten koko maailmassa [13].

## 2.3 Neljännen sukupolven matkapuhelinverkot

Vaikka ensimmäiset Long Term Evolution (LTE) tekniikalla toteutetut matkapuhelinverkot eivät vielä toteuttaneet ITU Radiocommunication Sectorin (ITU-R) asettamia vaatimuksia neljännen sukupolven matkapuhelinverkoille, kutsuttiin niitä kuitenkin mediassa ja markkinointitarkoituksissa hyvin yleisesti 4G-verkkoina. Todellisuudessa varhaiset LTE-verkot olivat paremmin optimoituja teknologioita kolmannen sukupolven matkapuhelinverkoissa. Ensimmäiset kaupalliset LTE-verkot otettiin käyttöön Skandinaviassa 2009 vuoden aikana. LTE-verkot ovat myös 3GPP:n kehittämä ja ylläpitämä verkkoteknologia.

LTE-verkkoja on tällä hetkellä käytössä viidessä eri matkaviestintaajuuskaistassa; 450 MHz:n, 700 MHz:n, 800 MHz:n, 1800 MHz:n ja 2600 MHz:n. Huomioitavaa on, että korkein 2600 MHz:n taajuuskaista on tällä hetkellä korkein taajuus, jota käytetään kaupallisissa matkapuhelinverkoissa. Puolestaan kaikista matalin eli 450 MHz:n taajuuskaista on ainoastaan käytössä Digiset Oy:llä, jonka avulla se kykenee tarjoamaan LTE-verkon laajemmalla yksittäisen tukiaseman peittoalueella. [6] Tämä on mielenkiintoinen taajuus, sillä todennäköisesti huomattavasti muita matkapuhelinverkkoja matalampi käyttötaajuus vaimenee myös vähemmän läpäistessään rakennusten ulkokuoren. Digiset Oy:n matkapuhelinverkot eivät kuitenkaan kata puhelin tai tekstiviestiliikennettä. Toisin kuin GSM- ja UMTS-verkot, LTE on suunniteltu pääasiallisesti vastaamaan suurta tiedonsiirtonopeutta vaativien sovellusten käyttöön, kuten korkealaatuisen videon lähetykseen ja vastaanottoon. Tämän vuoksi LTE-verkot suunniteltiin puhtaasti pakettikytkentäisiksi, joten ne eivät sovellu esimerkiksi perinteisiin äänipuheluihin. Äänipuhelut suoritetaan edelleen GSM- ja UMTS-verkkojen kautta. 4G-verkkojen kuuluvuus Suomessa laajenee edelleen jatkuvasti, mutta ainakaan toistaiseksi sen peittoalue ei ole yhtä laaja kuin 2G- ja 3G-verkoilla [7].

Fyysisellä kerroksella LTE-verkot käyttävät Orthogonal Frequency-Division Multiple Accessia (OFDMA), joka on usealle samanaikaiselle käyttäjälle mukautettu versio Orthogonal Frequency-Division Multiplexingistä (OFDM). OFDM:n avulla käytettävissä oleva taajuuskaista pystytään jakamaan lukuisiin yhtäaikaisesti siirrettäviin alikantaaltoihiin. OFDM:n käytöllä on myös useita muita hyötyjä, sen avulla signaalin itseensä aiheuttama häiriötä ei esiinny. Myös matkaviestinkäytössä oleva hyvin rajallinen taajuusalue pystytään hyödyntämään entistä tehokkaammin. Modulointitekniikoina LTE-verkoissa hyödynnetään samoja tekniikoita, joita käytettiin jo moderneissa kolmannen sukupolven teknologioissa eli jotain QPSK:n ja 64-QAM väliltä, riippuen vastaanotetun signaalin voimakkuudesta. [14, 15]

Ensimmäiset versiot käyttöön otetuista LTE-verkoista kykenivät teoreettisesti saavuttamaan alalinkille 100 MBit/s datansiirtonopeuden ja ylälinkille 50 MBit/s. Tämän jälkeen LTE-verkoista on kuitenkin luotu useita tiedonsiirtonopeudeltaan kehittyneempiä

tekniikoita ja tällä hetkellä kuluttajille tarjotaan Suomessa korkeintaan 300 Mbit/s alalinkin tiedonsiirtonopeudella toimivia matkapuhelinverkkoa käyttäviä liittymiä, joiden käyttämänä tekniikkana on LTE-Advanced. LTE-Advanced Pro on ensimmäinen versio LTE-verkoista, jonka on suunniteltu saavuttavan alun perin 4G-verkoille luodun datansiirto-vaatimuksen eli 1000 Mbit/s alalinkille. LTE-Advanced ja LTE-Advanced Pro on jo otettu käyttöön useissa maissa. LTE-Advancedin on suunniteltu myös mahdollisesti tulevan modulaatiotekniikaltaan jopa korkeatasoisempaa 256-QAM:ä, jonka avulla yksi symboli voisi kuljettaa jopa kahdeksan bittiä kerrallaan. [16,17]

## 2.4 Viidennen sukupolven matkapuhelinverkot

Vaikka neljännen sukupolven matkapuhelinverkot ovat vasta aivan viime aikoina alkaneet saavuttaa niille asetettuja vaatimuksia ja kyseisin ominaisuuksin valmistettuja matkapuhelinverkkoja on alettu vasta rakentaa, on monen operaattorin ja verkkokehittäjän osalta katseet käännetty jo tuleviin 5G-verkkoihin. 4G-verkot mullistivat matkapuhelinverkoissa tapahtuvan tiedonsiirron nopeudessa, luotettavuudessa ja viiveessä, mutta silti 4G-verkot eivät pysty vastaamaan kaikkiin tulevaisuuden langattomiin tiedonsiirtotarpeisiin. Erityisesti IoT:n vaatima huomattavasti suurempi kapasiteetti, entistä pienempi vasteaika sekä teollisuuden sovellusten vaatimat erittäin toimintavarmat verkot ovat esimerkkejä niistä ongelmista, joita neljännen sukupolven verkot eivät kykene ratkaisemaan. Standardit 5G-verkkoja varten ovat kuitenkin vielä suurimmaksi osin kehitysvaiheessa, mutta silti 5G-verkkoja kehittävät yritykset ovat luoneet omia esistandardeja, joihin perustuvia verkkoja on jo alustavasti testattu monen eri yrityksen toimesta. Telia ja Nokia aloittivat yhteistoiminnassa esikaupallisen 5G-verkon ensimmäisinä Suomessa syyskuussa 2018 [18].

Suurin muutos tulevilla 5G-verkoilla rakennusten ulkokuoren läpäisyn kannalta on lähetys- ja vastaanottotaajuuksien kasvaminen. Kaupallisten 5G-verkkojen julkistamisvaiheessa taajuuskaista tulee todennäköisesti olemaan Euroopassa 3,5 GHz:n taajuuskaista, joka tarkemmin sijoittuisi 3400 ja 3800 MHz:n välille [3]. Suomessa Viestintävirasto järjesti syksyn 2018 aikana huutokaupan kyseisen taajuuskaistan käyttöoikeuksista [19]. 3,5 GHz:n taajuuskaista on jo huomattavasti korkeampi, kuin nykyisin käytössä olevien matkaviestinverkkojen käyttämät taajuudet, mutta se on silti varsin matala taajuuskaista viidennen sukupolven matkapuhelinverkoille. Tämä johtuu siitä, että 5G-verkkojen on suunniteltu hyödyntävän yli 40 GHz:n taajuusaluetta, jolloin sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus on enää millimetrejä [3]. Huolimatta mahdollisesti käyttöön tulevista erittäin korkeista taajuusalueista, on 5G-verkkojen kaupallisen käyttäjän kattavuusalueen ja kapasiteetin luomiseksi järkevää tarjota matalammalla taajuusalueella toimivia verkkoja. Näistä korkeampia taajuuskaistoja tarvitaan erityisesti ultranopeiden yhteyksien luomiseen sekä kasvaviin matkapuhelinverkkoliikenteen kasvuun ja vaativampiin tarpeisiin.

## 2.5 Tällä hetkellä käytössä olevat matkapuhelintaajuudet Suomessa

Suomessa matkaviestinverkkojen taajuuskaistojen lupia hallitsee tällä hetkellä yhteensä kuusi yritystä; Digiset Oy, DNA Oy, Elisa Oy, Ukkoverkot Oy, Telia Finland Oy ja ainoastaan Ahvenanmaan maakunnassa toimiva Ålands Telekommunikation Ab. Joulukuun lopussa 2017, näistä kuudesta operaattorista DNA Oy, Elisa Oy ja Telia Finland Oy hallitsevat 99 prosentin markkinaosuutta kaikista liittymistä. DNA Oy:n markkinaosuuden ollessa 27%, Elisa Oy:n 38% ja Telia Finland Oy 34% [20].

**Taulukko 1:** *Matkaviestinverkkojen taajuuksien luvanhaltijat syyskuussa 2018 [6]*

<i>Taajuus [MHz]</i>	<i>Ylä- ja alaraja [MHz]</i>	<i>Käytössä oleva(t) teknologia(t)</i>	<i>Luvanhaltija(t)</i>
450	452,425 - 466,925	LTE	Digiset Oy
700	703 – 788	LTE	DNA Oy, Elisa Oy, Telia Finland Oy
800	791 – 862	LTE	DNA Oy, Elisa Oy, Telia Finland Oy
900	880,1 - 959,9	GSM, UTRA FDD	DNA Oy, Elisa Oy, Telia Finland Oy
1800	1710,1 - 1880	GSM, UTRA FDD, LTE	DNA Oy, Elisa Oy, Telia Finland Oy
2000	1900 - 2169,7	UTRA FDD, UTRA FDD	DNA Oy, Elisa Oy, Telia Finland Oy
2600	2500 - 2690	LTE	DNA Oy, Elisa Oy, Telia Finland Oy, Ukkoverkot Oy

Taulukkoon 1 on listattu kaikki matkaviestinverkkojen taajuuksien luvanhaltijat Manner-Suomessa taajuuskaistoittain. Tämän lisäksi Ahvenanmaan maakunnassa lupia hallitsee myös Ålands Telekommunikation Ab kaikilla muilla paitsi 450 MHz:n taajuuskaistalla [6].

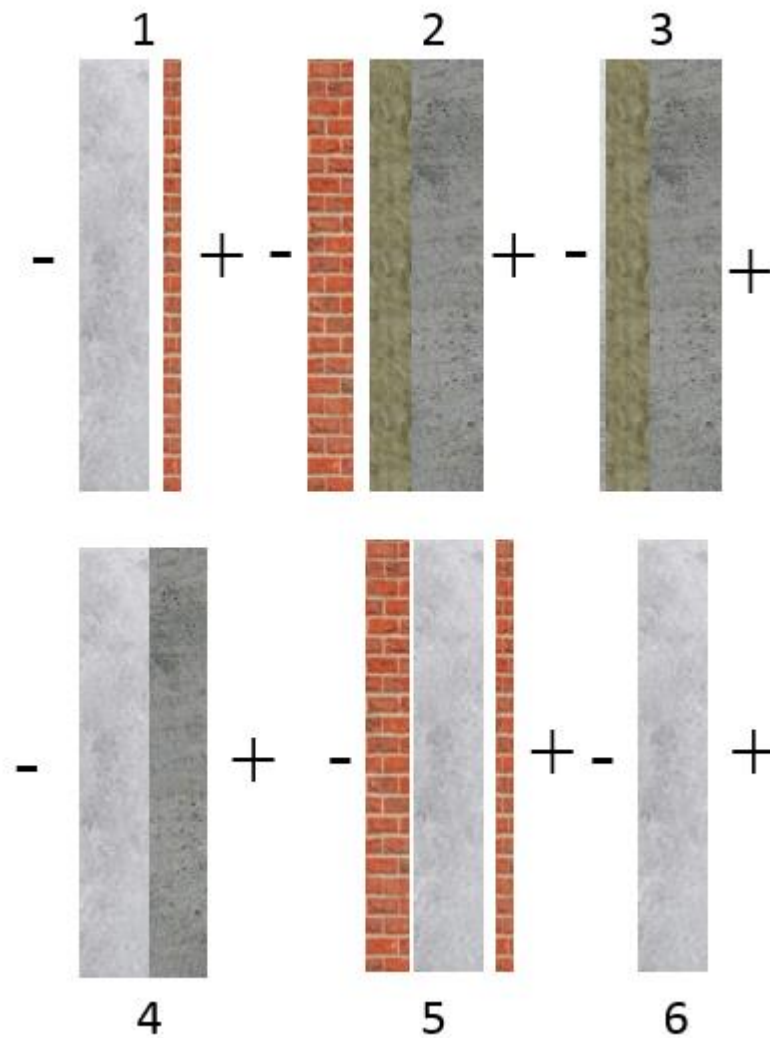
Liikenne- ja viestintäministeriö on ilmoittanut huutokaupan 3500 MHz:n taajuuskais-talle alkavan syyskuun 2018 loppupuolella. Kokonaisuudessaan huutokaupattavan taa-juuskaista kattaa taajuudet 3410 – 3800 MHz:n välillä. Huutokauppa järjestetään sähköi-sesti internetin välityksellä ja kaikki taajuuskaistan alueet huutokaupataan samanaikai-sesti [19]. Kyseisten taajuuksien on tarkoitus olla ensimmäiset taajuuskaistat, jolla 5G-tekniologiaa otetaan käyttöön kaupallisissa matkaviestinverkoissa.

### **3. YLEISIMMÄT KERROSTALOJEN ULKOSEINÄ- RAKENTEET SUOMESSA**

Tässä luvussa käydään läpi, mistä rakennusmateriaaleista kerrostalojen rakenteet koostuvat yleisimmin Suomessa. Pääpaino keskittyy matkapuhelinverkkojen signaalien läpäisyn kannalta merkittävimpään rakennuksen osaan eli sen ulkokuoreen. Yleisimpien ulkoseinärakenteiden selvityksen vanhimmat rakenteet ovat 1950-luvulta, jolloin ihmiset alkoivat muuttaa suurin joukoin maalta kaupunkeihin ja kerrostalorakentaminen kasvoi tämän seurauksena merkittävästi Suomessa. EU:n julkaiseman selvityksen mukaan rakennukset käyttävät 40% kaikesta energiasta ja tuottavat 36% kaikista päästöistä EU:n alueella [21]. Rakennusten energiatehokkuutta parantamalla koko EU-alue voisi arvion mukaan vähentää energiankulutusta ja hiilidioksidipäästöjä yhteensä jopa noin viidellä prosentilla [21].

#### **3.1 Kerrostalojen ulkoseinärakenteet vuosina 1950-75**

Kerrostalojen rakentaminen koki suuren muutoksen 1950-luvun alkupuolella, kun sotien jälkeinen väestönkasvu ja kiihtyvä maaseudulta kaupunkeihin muuttaminen sai aikaan asuntopulan Suomen kaupungeissa. Tämän vuoksi asuntojen rakentamista alettiin toteuttaa entistä suurempina kokonaisuuksina, jolloin rakennusmenetelmät ja -materiaalit alkoivat vähitellen standardisoitua. Tähän asti kerrostalot koostuivat lähes pelkästään erilaisista tiilirakenteista. 1950-luvulla betoni alkoi kuitenkin vakiinnuttaa paikkaansa kerrostalojen eri rakenteissa ja merkittävässä osin kerrostaloja alettiin rakentaa erilaisista betonista ja tiiltä sisältävistä kokonaisuuksista. Betoni syrjäytti jo 50-luvun aikana tiilen yleisimpänä runkomateriaalina uusissa kerrostaloissa. Betonirunkoisten kerrostalojen ulkoseinät ja kantavat väliseinät valettiin tyypillisesti myös betonista. Huomioitavaa kuitenkin on, että erityisesti 50-luvulla erilaisia kerrostalojen ulkoseinäratkaisuja oli lukuisia, eikä mikään yksittäinen ratkaisu ollut merkittävästi käytetyin. Betoni oli kuitenkin tässä vaiheessa useimmiten kevytbetonia eli se ei sisältänyt minkäänlaista teräskehikkoa. Seuraavassa kuvassa on havainnollistavia esimerkkejä vuosien 1950-1975 aikana rakennettujen kerrostalojen tyypillisistä ulkoseinärakenteista. 50-luvun aikana rakennettujen kerrostalojen ulkoseinävahvuudet olivat tyypillisesti 300 ja 400 millimetrin välillä. [22]



**Kuva 1:** Havainnollistavia kuvia 1950-luvun ulkoseinistä, muokattu lähteestä [22]

1960-luvun aikana maalta kaupunkeihin muutti vielä aiempaakin enemmän ihmisiä, jonka seurauksena kerrostalorakentamiselle oli vielä entistä enemmän kysyntää. Tämän seurauksena rakennusmenetelmät alkoivat muuttua teollisempaan suuntaan ja tiettyjä kerrostalotyyppisiä rakennettiin sarjatuotantona. Tiilen käyttö kerrostalojen runkomateriaalina lopetettiin lähes kokonaan kyseisen vuosikymmenen aikana, kun erilaiset betonirakenteet valtasivat niiden markkinat. Suosituin rakennustapa 60-luvun alkupuolen kerrostaloissa oli niin sanottu betoninen kirjajhylyrunko, joka valettiin rakennuspaikalla. Kasvava määrä kerrostalorakenteista kuitenkin oli tällöin valmiita elementtejä, joiden ulkoseinän eristys toteutettiin useimmiten kevytbetonin avulla. [22]

**Taulukko 2:** *Esimerkkikuvan seinärakenteet kerroksittain*

*Rakenne (Ulkokuori - Eriste - Sisäkuori)*

---

Seinä 1 (Kevytbetoni 250 mm - tiili 80 mm)

Seinä 2 (Tiili 145 mm - Mineraalivilla 50-100 mm - Teräsbetoni 150 mm)

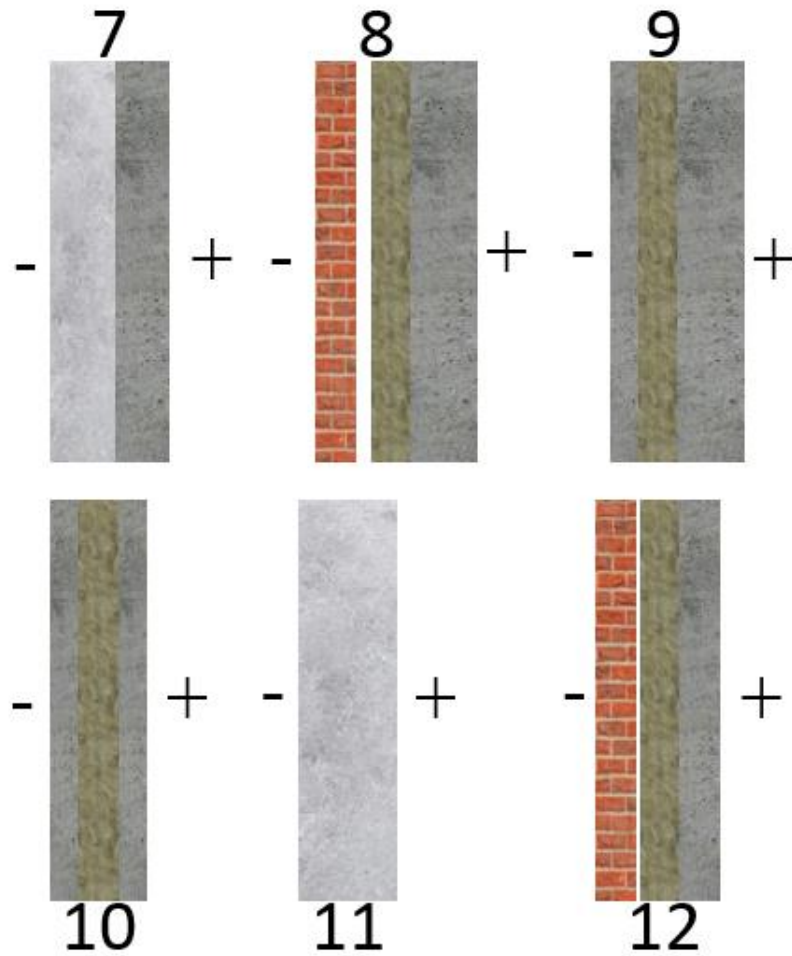
Seinä 3 (Ohut asbesti-, teräs ja alumiinipelti - mineraalivilla 75-100 mm - teräsbetoni 150 mm)

Seinä 4 (Kevytbetoni 175 mm - teräsbetoni 150 mm)

Seinä 5 (Tiili 145 mm - Kevytbetoni 100-200mm - tiili 80 mm)

Seinä 6 (Kevytbetoni 250 mm - 300 mm)

Myöhemmin 60-luvulla kerrostalojen rakenteet muuttuivat koko ajan valmiimmiksi elementeiksi, jolloin myös rakennusten julkisivut toteutettiin osin tai kokonaan elementtein. Tällöin rakentamisessa otettiin käyttöön myös ensimmäiset betonisandwich-rakenteet. Betonisandwich-elementillä tarkoitetaan kolmesta kerroksesta koostuvaa rakennuselementtiä, jonka sisin ja uloin kerros ovat betonia, joiden välissä on eristekerros. Kerrostalojen sarjatuotannon vauhdittamiseksi Suomessa kehitettiin 60- ja 70-lukujen vaihteessa BES-järjestelmä eli Betonielementtistandardi. BES-järjestelmän mukaan tehdyt kerrostalot ovat standardinmukaisia täyselementtitaloja. Kyseisen standardin mukaan rakennetut talot olivat yleisempiä 70-luvun alussa Suomessa valmistettuja kerrostaloja. Runkoratkaisuna yleisimpänä pysyi vielä kuitenkin kirjahyllyrunkoinen kerrostalo. Kerrostalorakentaminen saavutti huippuvuotensa vuonna 1974, jolloin Suomeen valmistui jopa yli 45 000 uutta kerrostaloasuntoa. [22]



**Kuva 2:** Kirjahyllyrunkotalojen ulkoseinärakenteita 70-luvulla, muokattu lähteestä [6]

Kuvassa 2 yläpuolella olevat seinärakenteet ovat kantavia ja alapuolella olevat seinärakenteet ei-kantavia, ero näiden kahden rakennetyypin välillä on niiden sisäkerroksen paksuudessa. Kaikista suosituimmat kuvan rakenteista olivat seinät 9 ja 10. Aikakauden ulkoseinärakenteiden paksuudet vaihtelivat edelleen pääsääntöisesti 300 ja 400 millimetrin välillä.

**Taulukko 3:** Esimerkkikuvan 2 seinärakenteet kerroksittain

Rakenne (Ulkokuori - Eriste - Sisäkuori)

Seinä 7 (Kevytbetoni 175 mm - Teräsbetoni 150 mm)

Seinä 8 (Tiili 145 mm - Mineraalivilla 50-100mm - Teräsbetoni 150mm)

Seinä 9 (Teräsbetoni 60 mm - Mineraalivilla 90 mm - Teräsbetoni 150 mm)

Seinä 10 (Teräsbetoni 50 mm - Mineraalivilla 90 mm - Teräsbetoni 80 mm)

Seinä 11 (Kevytbetoni 250 mm)

Seinä 12 (Tiili 145 mm - Mineraalivilla 100 mm - Teräsbetoni 80 mm)

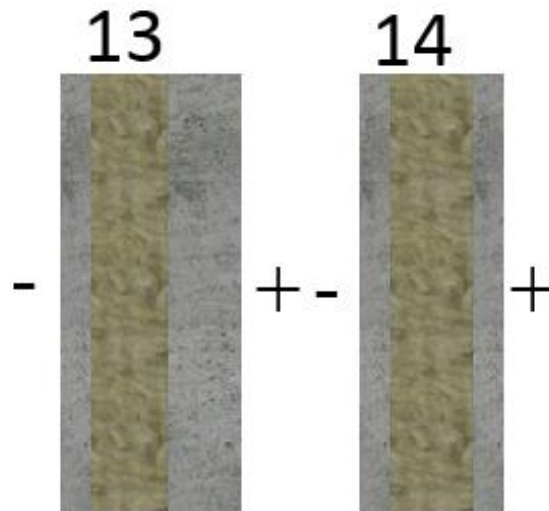
Kantavissa rakenteissa myös esiintyi hieman tätä paksumpia rakenteita. Pääosin ulkoseinärakenteet koostuivat tiilen, betonin ja mineraalivillan erilaisista yhdistelmistä.

### 3.2 Kerrostalojen ulkoseinärakenteet vuosina 1975-2000

Muutaman vuosikymmenen kestäneen kerrostalorakentamisen huipun jälkeen, uusien kerrostaloasuntojen rakentamisen määrä kääntyi selvään laskuun 70-luvun puolivälin jälkeen. Rakentaminen keskittyi kerrostalorakentamisesta enemmän matalampiin omakotipari- ja rivitaloihin. Kerrostalorakentamisessa sen sijaan haluttiin kiinnittää entistä enemmän huomiota kerrostalojen ja niiden muodostamien asuinalueiden viihtyisyyteen ja eloisuuteen. [22]

Täyselementein rakennetut BES-talot säilyttivät kuitenkin asemansa yleisimpänä kerrostalojen rakennusmallina. Niiden lisäksi rakennettiin myös jonkin verran suoraan rakennuspaikalla tehtyjä sekä osaelementein valmistettuja kerrostaloja. Yhdistävänä tekijänä kyseisen aikakauden yleisimmille kerrostalomalleille on kuitenkin niiden ulkoseinät, jotka koostuivat useimmiten pelkästään betonisandwich-elementeistä. Jossain tapauksissa kuitenkin julkisivu muurattiin rakennuspaikalla, jolloin ulkoseinän uloin sivu oli pääsääntöisesti tiiltä. [22]

Vuosien 1975 ja 2000 välillä valmistettujen betonisandwich-elementtien kerrospaksuudet pysyivät lähes vakioina, eristekerrosta lukuun ottamatta. Varsinkin sisäkuoren paksuuteen vaikuttaa seinän kannattama kuorma. Kantavien ulkoseinien sisäkuoren teräsbetonin paksuus oli tyypillisesti noin 150 millimetrin luokkaa, ei-kantavien ulkoseinien sisäkuoren ollessa normaalisti noin 80 millimetriä eli hieman yli puolet kantavan seinän sisäkuoren paksuudesta. Eristekerros toteutettiin useimmiten mineraalivillalla, jonka paksuuden vaihteluväli kyseisellä aikajaksolla oli 90 – 160 millimetriä. Varsinkin juuri eristekerroksessa tapahtui tällä aikavälillä suurempia muutoksia paksumpaan suuntaan, kerrostalojen muuntuessa entistä paremmin lämpöä eristäviksi. Uloin kuori betonisandwich-elementeissä oli tyypillisesti 70 – 80 millimetriä, riippumatta siitä oliko ulkoseinä kantava vai ei. Seuraavassa kaksi esimerkkiä yleisimmistä ulkoseinärakenteista kyseisellä aikavälillä rakennetuista kerrostaloista. [22]



**Kuva 3:** 1975-2000 suosituin ulkoseinärakenne, muokattu lähteestä [22]

Kuvasta 3 on nähtävissä aikavälillä 1975-2000 rakennettujen kerrostalojen selvästi suosituimmat ulkoseinärakenteet. Huomioitavaa kuvasta on myös mineraalivilloituksen kerrospaksuuden kasvaminen samaisella aikavälillä, mikä parantaa kerrostalojen energia-  
tehokkuutta.

**Taulukko 4:** Kuvan 3 seinärakenteet kerroksittain

*Rakenne (Ulkokuori - Eriste - Sisäkuori)*

Seinä 13 (Teräsbetoni 70 mm - Mineraalivilla 90-160 mm - Teräsbetoni 80 mm)

Seinä 14 (Teräsbetoni 70 mm - Mineraalivilla 90-160 mm - Teräsbetoni 150 mm)

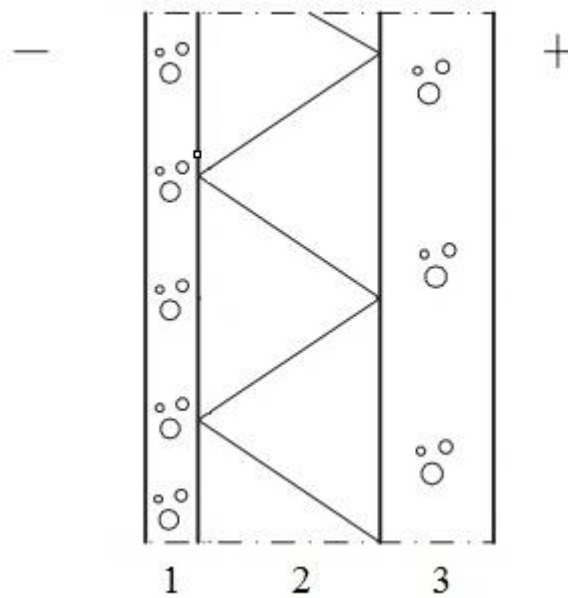
Ulkoseinärakenteiden lämmönläpäisykerroin eli U-arvo on säädelty energiamääräyksissä, jotka ovat tiukentuneet vuosien varrella. Varsinkin 2000-luvulla U-arvoa on jatkuvasti pienennetty, jotta asumisen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä saataisi pienennettyä.

### 3.3 Kerrostalojen ulkoseinärakenteet 2000-luvulla

2000-luvulla kerrostalorakentaminen on kehittynyt entistä enemmän energiatehokkuuden suuntaan, mikä on saanut aikaan erityisesti ulkoseinäelementtien kerrospaksuuden kasvamista. Energiatehokkuuden suuntaan on vienyt erityisesti entistä tiukemmat päästösopimukset, joissa kerrostaloille asetetut energiavaatimukset ovat tiukentuneet entisestään. Merkittävimmissä osassa energiatehokkuuden parantamisen kannalta ovat kerrostalojen eristekerrokset. Eristekerroksen paksuudet vaihtelevat tällä hetkellä rakennettavissa kerrostaloissa tyypillisesti 220 – 240 millimetrin välillä. Selvästi käytetyin eristemateriaali on mineraalivilla. Kerrostalojen rakennusmäärät ovat myös lähteneet taloustilanteen kohenemisen myötä jälleen kasvuun.

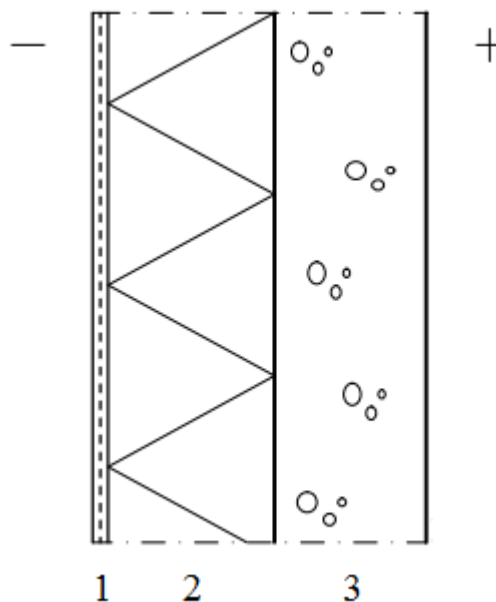
Tällä hetkellä rakennettavien kerrostalojen ulkoseinätietojen saamiseksi toteutettiin haastattelukierros neljälle suuren kokoluokan suomalaiselle rakennusyriykselle. Haastatteluista saatujen tietojen perusteella tällä hetkellä selvästi käytetyin ulkoseinärakenne on betonisandwich-elementtirakenne. Kaikki haastatteluun vastanneet rakennusalan yritykset kertoivat betonisandwich-elementtirakenteen olevan ulkoseinien suosituin rakenne-tyyppi, joissakin yrityksissä se oli lähes ainoa käytetty rakenne. Muita hyvin suosittuja ulkoseinärakenteita olivat haastatteluiden mukaan tiilillä vuoratut ja ohutrapatut julkisivut. Tiilillä vuoratut julkisivupinnat jakautuvat pääosin kahteen eri luokkaan, joista toisessa ulkokuoren materiaalina on pelkästään tiili ja toisessa teräsbetoni, jossa on vain ohut tiililaattapinnoite. Erityisesti ohutrappauksen osuus on kasvamassa, sillä se on kustannustehokas ratkaisu julkisivumateriaaliksi. Huomioitavaa kuitenkin on, että näissä kaikissa kolmessa käytetyimmässä ulkoseinärakenteessa kaksi sisimmäistä kerrosta ovat käytännössä identtiset ulkokuoren julkisivumateriaalista huolimatta. Sisimmän kuoren paksuus kantavissa ulkoseinissä on tällä hetkellä 150 – 200 millimetriä, riippuen rakennuksen korkeudesta siten, että kerrostalon korkeuden kasvaessa myös sisäkuoren paksuus kasvaa. Suositeltava minimipaksuus sisäkuorten paksuudeksi asuinkerrostaloissa on 150 millimetriä [23]. [24,25,26,27]

Ulkokuoren paksuus taas on hyvin riippuvainen siinä käytetystä materiaalista. Kaikista suosituimmassa julkisivuratkaisussa, jossa uloin kerros on teräsbetonia, paksuus vaihtelee yleisesti 70 ja 85 millimetrin välillä. Rapatuissa eli ohut- tai paksurappauksella toteutetuissa ulkokuorissa kerroksen paksuus vaihtelee 10 ja 25 millimetrin välillä, mikä saadaan aikaan muutamalla rappauserroksella. On myös tärkeä huomioida, että paksurappauksella toteutetut julkisivut sisältävät yleensä 19 millimetrin silmäkoolla olevan, varsin tiheän metalliverkon. Tiilipintaisia julkisivuja on pääasiassa kahdenlaisia. Ensimmäinen variaatioista on pelkästään tiilestä muodostuva uloin kerros, jolloin sen paksuus on yleisesti 80 – 85 millimetriä. Mikäli kerrostalo on poikkeuksellisen korkea, saattaa uloimman tiilikuoren paksuus olla jopa 130 – 135 millimetriä. Pelkän tiilistä muodostuvan uloimman kerroksen takana on ilmarako, joka on nykyisin useasti 40 millimetriä, aiemman 20 millimetrin sijaan. Toinen variaatio on ohuesta tiilikerroksesta ja teräsbetonista muodostuva ulkokerros. Tällöin tiilin paksuus on tyypillisesti 20 – 35 millimetrin välillä ja teräsbetonin osuus 60 – 80 millimetrin välillä, jolloin koko uloimman kerroksen paksuudeksi tulee yhteensä 80 – 115 millimetriä. Seuraavassa on havainnollistavat kuvat kaikista neljästä tällä hetkellä kerrostaloissa käytetyimmistä julkisivurakenteesta kerros-paksuuksineen. Huomioitavaa on, että kaikki esimerkkikuvista ovat kantavia seinä, jolloin niiden paksuus on noin 150 millimetriä eli noin 70 millimetriä enemmän, kuin eikantavissa seinissä. [24,25,26,27]



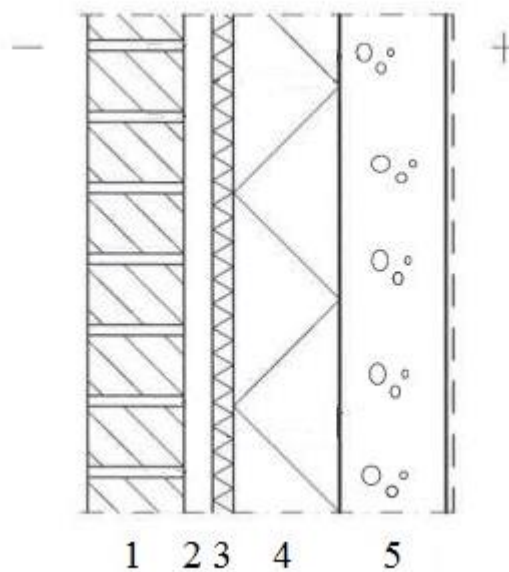
**Kuva 4:** *Betonisandwich-elementti, muokattu lähteestä [27]*

Kuvassa 4 on esimerkki tällä hetkellä käytetyistä energiatehokkaasta betonisandwich-elementistä, jonka kerros 1 on 70 millimetriä paksua teräsbetonia, kerros 2 sisältää mineraalivillaa paksuudeltaan 220 millimetriä ja kerros 3 teräsbetonia, jonka paksuus on 150 millimetriä, joka on kantavan seinärakenteen sisäkuoren vähimmäispaksuus. Kokonaispaksuudeltaan kyseinen elementti on 460 millimetriä.



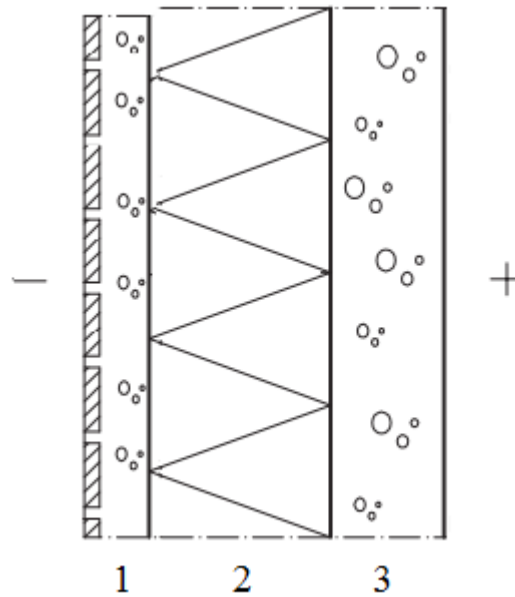
**Kuva 5:** *Ohutrapattu betonielementti, muokattu lähteestä [27]*

Kuvassa 5 on puolestaan ohutrapattu betonielementti, jonka kerros 1 sisältää pinta- sekä pohjarappauksen sekä lasikuituisen rappausverkon, kerroksen paksuus on yhteensä 20 millimetriä. Kerroksella 2 on 220 millimetrin paksuudelta mineraalivillaa ja kerros 3 on 150 millimetrinen teräsbetoni, sillä kyseessä on myös kantava seinä. Kokonaispaksuus esimerkkielementille on 390 millimetriä. Kyseinen elementtirakenne on nykyaikaisten esimerkkikuvien ohuin ulkoseinärakenne. Paksurappausta käytetään myös paljon kerrostalojen ulkokuorissa, tällöin uloimman kerroksen paksuus on hieman paksumpi ja paksurappaukseen kuuluu myös metallinen rappausverkko.



**Kuva 6:** Täystiilikuorinen elementti, muokattu lähteestä [27]

Esimerkkikuvassa 7 täystiilikuorinen elementti, jonka uloin kerros 1 on 135 millimetriä paksu kerros poltettua tiiltä laasteineen. Kerros 2 on ilmarako paksuudeltaan 40 millimetriä, jonka takana kerros 3 eli 30 millimetriä paksu tuulensuojakerros suojaamassa 150 millimetriä paksua mineraalivillakerrosta. Kyseisen elementin sisimmäisin kerros 5 on 150 millimetriä paksua teräsbetonia. Elementin kokonaispaksuus on tällöin 550 millimetriä, joka on nykyaikaisista esimerkkielementeistä kaikista paksuin ulkoseinärakenne.



**Kuva 7:** Tiilipintainen betonielementti, muokattu lähteestä [27]

Kuvassa 7 on tiililaattapintainen betonielementti. Sen uloin kerros 1 koostuu 20 millimetriä paksusta tiililaattapinnasta ja 65 millimetriä paksusta teräsbetonikuoresta, jolloin uloimman kerroksen kokonaispaksuus on yhteensä 85 millimetriä. Kerroksella 2 eristeenä 240 millimetrin paksuinen mineraalivilla ja sisimmäisin kerros 3 on 150 millimetriä paksua teräsbetonia. Elementin kokonaispaksuus 475 millimetriä.

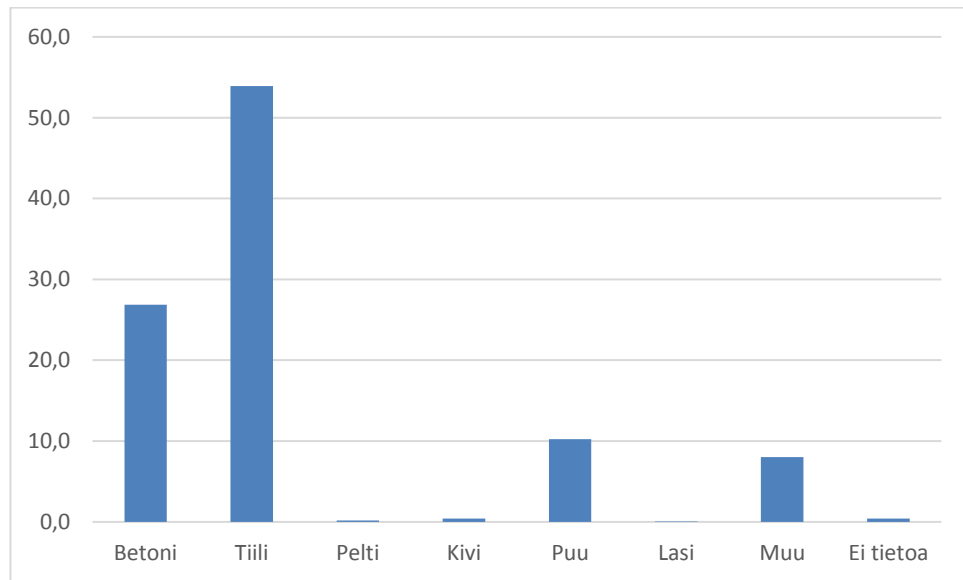
### 3.4 Ikkunarakenteiden perusteita

Kiristyneet vaatimukset rakennusten lämmöneristykselle ovat vaikuttaneet myös ikkunoiden rakenteisiin. Kerrostaloissa yleisimmin ikkunarakenteet koostuvat kaksi- tai kolmi-kerroksisista lasista. Kaikista suosituin lasirakenne asuinrakennuksissa on kolmesta lasista koostuva eristysikkuna, jota kutsutaan myös MSE-ikkunaksi. Lasit ikkunoihin valitaan käyttötarkoituksen mukaan, lasien ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi auringonsuoja tai turvalasi. [28]

Tämän diplomityön kannalta kaikista mielenkiintoisin ikkunoihin liittyvä ominaisuus on selektiivilasi. Selektiivilaseja käytetään parantamaan ikkunarakenteiden lämmöneristyskykyä. Selektiivilasi on yleisnimitys matalaemissiviteettisesti pinnoitetuille lasille [28]. Selektiivipinnoitteet ovat hyvin ohuita metallioksidikerroksia lasin pinnalla, jotka on suunniteltu siten, että ne läpäisevät näkyvän valon, lämmittävät auringonsäteet, mutta estävät pidempi aaltoisemman lämpösäteilyn karkaamisen ikkunan ulkopuolelle. Matkaviestinverkkojen käyttämät radioaallot ovat aallonpituudeltaan huomattavasti matalampi taajuuksisia kuin näkyvä valo, joten on oletettavaa, että selektiivilasit vaikuttavat myös ikkunoiden aiheuttamiin RF-vaimennuksiin. [28]

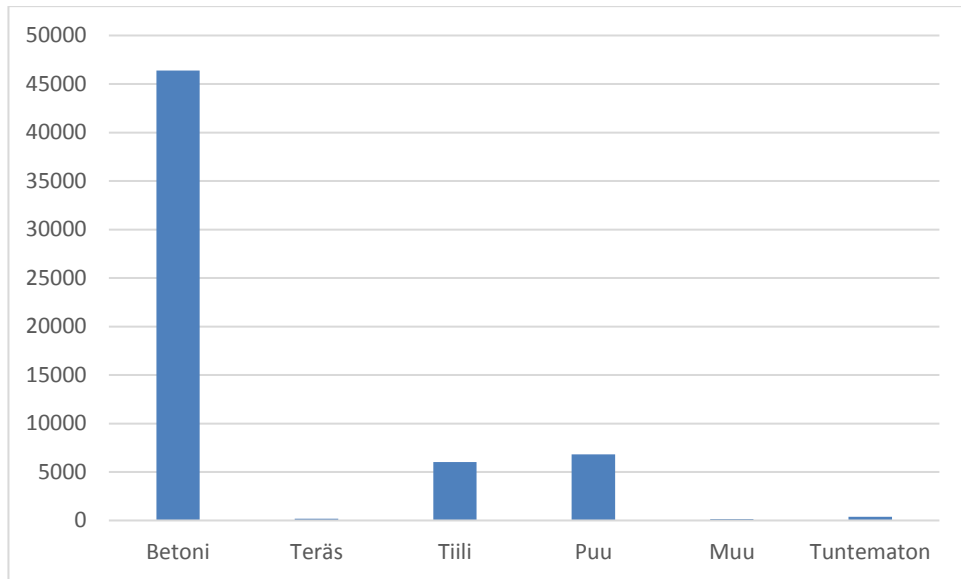
### 3.5 Tilastoja kerrostalorakentamisesta Suomessa

Tässä alaluvussa esitellään tilastotietoa Suomeen rakennetuista kerrostaloista. Tilastotiedon hankkiminen erityisesti kerrostalorakentamisesta on hankalaa, sillä ainoastaan muutama toimija Suomessa julkaisee sitä. Tilastokeskus kuitenkin kerää ja jakaa tietoa muutamasta diplomityön kannalta mielenkiintoisesta tilastosta liittyen kerrostalorakentamiseen Suomessa.



**Kuva 8:** Suomeen rakennettujen kerrostalojen julkisivumateriaalien %-jakauma [29]

Kuvassa 8 on esitetty kaikista yleisimmät julkisivumateriaalit vuosien 1984 ja 2016 välillä rakennetuissa kerrostaloissa. Betoni ja tiili ovat tilaston mukaan kaikista suosituimmat julkisivumateriaalit kyseisellä aikavälillä rakennetuissa kerrostaloissa, niiden molempien osuus kaikista kerrostaloista on yhteensä noin 80 prosenttia. Näiden lisäksi puu ja muut materiaalit kattavat lähes kokonaan jäljellä jäävän 20 prosenttia. Kokonaismäärä kyseisellä aikavälillä rakennetuille uusille kerrostaloille on 59926 kappaletta. [29]



**Kuva 9:** Kerrostalojen runkomateriaalit Suomessa vuonna 2016 [29]

Kuvassa 9 on puolestaan listattu kaikkien Suomeen 1984-2016 aikavälillä rakennettujen kerrostalojen runkomateriaalit. Runkomateriaalilla on tässä listauksessa tarkoitettu kantavien rakenteiden pääasiallista rakennusmateriaalia. Tilastosta voidaan todeta, että betonirakenteiset kerrostalot ovat selvästi yleisimpiä kyseisellä aikavälillä rakennetuista kerrostaloista. Myös tiili- ja puurunkoisia kerrostaloja on rakennettu, mutta niiden yhteenlaskettu määrä ylittää ainoastaan reiluun neljännekseen, kun verrataan betonirunkoisiin kerrostaloihin. [29]

## 4. RF-VAIMENNUSMITTAUKSET TYYPILLISILLÄ ULKOSEINÄMATERIAALEILLA JA -RAKENTEILLA

RF-vaimennusmittaukset toteutettiin todellisten rakennusmateriaalien ja tyypillisten ulkoseinärakenteiden RF-vaimennusten selvittämiseksi tyypillisissä suomalaisissa kerrostaloissa ja niiden rakentamiseen käytetyissä materiaaleissa. Luvussa on kuvattu laajasti mittausten menetelmät, -kohteet sekä -tulokset.

### 4.1 Mittausmenetelmä

Mittausmenetelmä perustuu kahteen kaukokentässä toimivaan anteeniin, joista toinen toimii lähettävänä ja toinen vastaanottavana antennina. Menetelmä on suunniteltu mahdollistamaan sekä laboratorio- ja kenttäolosuhteissa tehtävät RF-vaimennusmittaukset. Mittausjärjestelmään kuuluu kahden identtisen A-INFO:n laajakaistaisen torviantennin lisäksi spektrianalysaattori (Rohde & Schwarz FSG) sekä signaaligeneraattori (Rohde & Schwarz SMJ100A). Molemmat laitteet kytketään antenneihin noin 10 metriä pitkien koaksiaalikaapeleiden avulla. Mittauksessa lähettävään anteeniin kytketty signaaligeneraattori pyyhkäisee signaalin, joka suuntaavalla torviantennilla lähetetään mitattavan materiaalin läpi anteeniin, joka on kytketty samaa taajuutta vastaanottavaan spektrianalysaattoriin. Mittausten automatisoimiseksi laitteet liitettiin kytkimen avulla samaan lähiverkkoon kannettavan tietokoneen kanssa, mikä mahdollisti etäohjauksen tietokoneella MATLAB-ohjelmiston avulla. MATLAB-ohjelmistolla tulokset myös tallennettiin analysointia varten. Hahmotelma mittauksissa käytetystä järjestelmästä kuvassa 10.



**Kuva 10:** Hahmotelma mittausjärjestelmästä

Taajuuskaista suoritetuissa mittauksissa oli 740 – 6000 Mhz, mikä jaettiin 262:een yksittäiseen taajuuspisteeseen. Käytetty taajuusalue kattaa lähes kaikki tällä hetkellä käytössä olevista matkaviestinverkon taajuuksista. Tällä hetkellä käytössä olevien taajuuksien lisäksi mittauksissa käytetty taajuuskaista kattaa myös alkuvaiheessa lanseerattavien 5G-verkkojen käyttämät taajuudet, kuten 3,5 GHz:n kaistan. Mittauksissa molemmat antennit sijoitettiin noin 1,5 metrin päähän mitattavasta materiaalista, jotta lähikentän aiheuttamalta vääristymältä vältyttiin. Kaukokentän ja lähikentän raja  $R$  voidaan laskea kaavalla

$$R = \frac{2L^2}{\lambda}, \quad (1)$$

jossa  $L$  on antennin läpimitta ja  $\lambda$  signaalin aallonpituus [30]. Kaavan mukaan saadaan laskettua kaukokentän vaatima etäisyys, kun käytetyn antennin läpimitta oli 18,4 cm. Matalammilla mittauksissa käytetyllä 740 MHz:n taajuudella kaukokentän etäisyys on 0,17 metriä ja korkeimmalla mittauksissa käytetyllä 5980 MHz:n taajuudella se on 1,35 metriä, joten mittauksissa käytetyllä 3 metrin välimatkalla antennien välillä ei ilmene lähikentän vaikutuksia. Antennit pyrittiin kohdistamaan mittauksissa tarkasti vastakkain, mitattavan materiaalin aiheuttaman RF-vaimennuksen selvittämiseksi sekä monitieheijastumisen minimoimiseksi. Signaaligeneraattorin lähetysteho suoritetuissa mittauksissa oli 10 dBm:ää eli 0,1 wattia. Kaikissa mittauksissa antennit olivat pystyasennossa eli niiden lähettämä RF-signaali oli vaakapolarisoitua.

Vastaanotettuun signaalitehoon vaikuttaa kuitenkin mitatun materiaalin lisäksi useampi ulkoinen tekijä, kuten johtojen ja vapaan tilan aiheuttamat vaimennukset sekä torviantennien vahvasta suuntaavuudesta aiheutuva antennivahvistus. Mitattavan materiaalin todellisen RF-vaimennuksen selvittämiseksi, suoritettiin kaikkien mittauksien yhteydessä referenttimittaus vapaassa tilassa siten, että mitattava materiaali poistettiin antennien välistä. Muuten kaikki mittausjärjestelyssä pysyi materiaalmittausta vastaavana, kuten lämpötila ja etäisyys antennien välillä. Lopullinen mittaustulos saadaan selville vähentämällä varsinaisen materiaalmittauksen tuloksesta vapaassa tilassa suoritettu referenssimittaus. Referenssimittauksen ansiosta mittaustuloksesta saadaan poistettua mm. vapaan tilan ja kaapelien aiheuttama vaimennus.

Tämän mittausmetodin vahvuutena voidaan pitää sen helppoa siirrettävyyttä erilaisten mittauspaikkojen välillä. Sillä pystytään tekemään mittauksia staattisten laboratorio-olosuhteiden lisäksi myös kenttäolosuhteissa, kuten rakennustyömaalla. Tämän lisäksi mittausjärjestelmää ei tarvitse erikseen kalibroida laitteen käynnistymisen yhteydessä, toisin kuin piirianalysoijan avulla suoritettavissa mittauksissa. Toisaalta piirianalysoijalla tehtävissä mittauksissa saadaan amplitudimuutoksen lisäksi mitattua myös vaihemuutos, jonka avulla olisi mahdollista tehdä Fourier-muunnos, josta on mahdollista vähentää mahdolliset monitieheijastumat viiveiden perusteella. Kaikista merkittävimpana hyötynä piirianalysoijan käytöstä saadaan kuitenkin useista S-parametreista, joiden avulla nähtäisiin esimerkiksi materiaalin aiheuttamat heijastumat.

Johtuen kaukokentässä suoritettavista mittauksista, mittausjärjestelmän antamat tulokset saattavat olla epäselviä tilanteissa, joissa mitattava alue on epähomogeeninen. Esimerkiksi ikkunakarmin kohdalta mitattaessa antennin lähettämä sähkömagneettinen säteily jakautuu alueelle, joka sisältää myös muita ulkoseinärakenteen osia. Edellä mainituissa tilanteissa todellinen tulos saattaakin olla mitattavan karmin viereisen ulkoseinärakenteen RF-vaimennusarvo etenkin tilanteissa, joissa mitattavan materiaalin aiheuttama vaimennus on huomattavasti suurempi, kuin viereisen rakenteen. Tämän takia varsinkin kenttämittauksissa pyrittiin valitsemaan mittauskohdaksi mitattavasta materiaalista paikka, joka on mahdollisimman keskellä kyseistä materiaalia. Käytettyjen torviantennien voimakkaat suuntaavuudet vähentävät myös monitieheijastumien määrää. Jos mittaustilassa olisi väylä antennien välillä, joka vaimentaisi RF-signaaleita hyvin vähän, tällöin olisi mahdollista, että tuloksissa virhemarginaali olisi merkittävä. Tästä johtuen mittauksien aikana mahdolliset signaalille suotuisat reitit, kuten ikkunat ja ovet pyrittiin pitämään suljettuna mittausten aikana ja koaksiaalikaapeleiden läpiviennit tehtiin tarkasti.

Kenttämittauksissa antennien kohdistaminen toistensa kanssa tarkasti on varsin haastavaa. Ensinnäkin sisätilan lattia ja ulkona maan taso ovat lähes poikkeuksetta eri korkeuksilla. Tämän lisäksi umpinaisen seinän läpi suoritettava sivuttaissuuntainen kohdistaminen vaatii erityistä tarkkuutta mittauksia suorittaessa. Antennien kohdat mitattiin tarkasti sisä- ja ulkoseinistä, jotta mittaustulosten virhemarginaali olisi mahdollisimman pieni. Tämä lisäsi kenttämittausten suorittamisen kestoa merkittävästi.

## **4.2 Mittauspaikat**

Mittausmenetelmän soveltuessa erilaisiin mittausympäristöihin, pystyttiin mittauspaikkoja valitsemaan eri mittaustarpeiden mukaan. Mittaukset jakautuivat kahteen kategoriaan; laboratoriomittauksissa tutkittiin yksittäisten ulkoseinän materiaalinäytteiden aiheuttamaa RF-vaimennusta ja kenttämittauksilla tutkittiin kokonaisten ulkoseinärakenteiden RF-vaimennusta.

### **4.2.1 Laboratoriomittaukset**

Laboratoriomittaukset suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laboratoriolle kuuluvan Rakennushallin kellaritiloissa. Kyseiset kellaritilat ovat ympäröity kauttaaltaan paksulla betonikuorella, joka vaimentaa ulkopuoliset signaalilähteet tehokkaasti. Tämän lisäksi mittaustilassa vallitsevat olosuhteet, joista tärkeimpänä lämpötila pysyy tasaisena mittausten välillä.

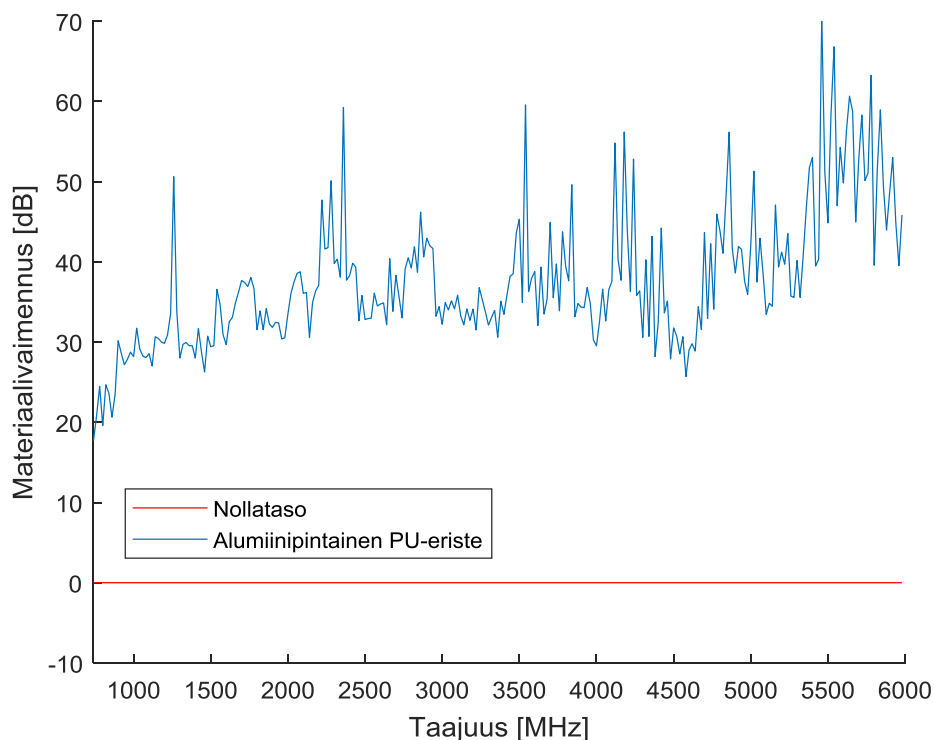
Mittaustila on jaettu paksulla betoniseinällä kahteen osaan, joka mahdollistaa antennien sijoittamisen seinän molemmille puolille siten, että väliin jäävä kulkuaukko on helposti peitettävissä kokonaisuudessaan mitattavan materiaalin ympäriltä.



**Kuva 11:** *Laboratoriomittausten suorituspaikka*

Kuvassa 11 näkyy mittaustila, jossa laboratoriomittaukset suoritettiin kokonaisuudessaan. Antennien välillä oleva 80x60 cm-kokoinen RF-aukko peitetään kulloinkin mitattavana olevalla materiaalinäytteellä. Seinät RF-aukon ympärillä ovat 30 senttimetriä paksua betonia, joka on vielä taustapuoleltakin päällystetty vahvasti RF-vaimentavalla molemmin puolin alumiinilla pinnoitetulla polyuretaanieristeellä (PU-eriste). RF-aukon alapuolelle jäävä tila on päällystetty molemminpuolisesti samalla eristeellä, jotta signaalin tehoa pääsisi vuotamaan mahdollisimman vähän mitattavan materiaalin ulkopuolelta vastaanottavaan antenniin. Mitattavana olleen materiaalinäytteen reunat eristettiin lisäksi alumiiniteipillä, mikäli materiaalinäytteen reunoihin jäi pieniäkään rakoja.

Tiettyjen erityisen painavien materiaalien, erityisesti betoninäytteiden kohdalla jouduttiin tietoisesti valitsemaan ulkoseinissä esiintyviä kerroksia ohuempia näytteitä, jotta niiden käsittely ilman koneita oli mahdollista. Ohuemmista kerrospaksuuksista huolimatta painavimmat näytekappaleet painoivat noin 40 kilogrammaa, mikä loi haasteen kappaleiden turvalliselle siirtelylle.



**Kuva 12:** Laboriomittaustilan varmennusmittaus

Kuvassa 12 on tulokset mittaustilan varmistamiseksi tehdystä mittauksesta, jossa RF-aukko peitettiin samalla alumiinipintaisella eristelevyllä, jotta voitiin varmistua siitä, ettei RF-signaali pääse kulkemaan mitään heikosti vaimentavaa vaihtoehtoista reittiä. Käytetyllä taajuuskaistalla lähetetty signaali vaimeni keskimäärin 37,56 desibeliä verrattuna vapaan tilaan referenssimittaukseen eli mittaustilan voidaan todeta olevan hyvin eristetty. Samalla voidaan myös todeta, kuinka merkittävä vaikutus metallipintaisilla materiaaleilla on RF-vaimennukseen, mikäli niitä käytetään rakennusten ulkoseinissä esimerkiksi juuri eristekerroksessa.

#### 4.2.2 Kenttämittaukset

Kenttämittaukset suoritettiin pääasiassa Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laboratorion ulkoalueella, jossa oli tehty aiemmin erilaisia kosteus- ja säänrasituskokeita yleisillä erilaisilla seinärakenteilla. Kyseiset testikopit sopivat erityisen hyvin RF-vaimennusmittauksia varten, sillä ulkopuolelta seinät olivat kokonaisuudessaan homogeenista ulkoseinärakennetta ovea lukuun ottamatta. Erilaisista ulkoseinärakenteista koostuvia testikoppeja oli yhteensä kahdeksan kappaletta. Testikoppien seinien sisällä kulki kuitenkin erilaisia kaapeleita, minkä vuoksi jokaista testikoppia mitattiin useammasta kuin yhdestä kohtaa, jotta pystyttiin varmistumaan, ettei mahdollisella kaapelilla ei ole merkittävää vaikutusta lopulliseen tulokseen. Lähetävä antenni pyrittiin sijoittamaan sisälle, jotta signaalin tehoa heijastuisi mahdollisimman vähän mittausrakennuksen ulkopuolelle.

Kenttämittauksia tehtiin myös toimistorakennuksessa Espoossa. Näissä mittauksissa keskityttiin lähinnä erilaisten ikkunalasien aiheuttamiin RF-vaimennuksiin. Erityisen haasteellisen kyseisistä mittauksista teki mittaustilan sijainti toisessa kerroksessa, minkä vuoksi ulkona ollut vastaanottava antenni täytyi saada nostettua noin kuuden metrin korkeuteen. Tämä kuitenkin onnistui käyttämällä näitä mittauksia varten suunnitellulla pitkällä antennin jalustalla. Näiden lisäksi diplomityön loppuvaiheessa aukesi mahdollisuus päästä tekemään rakennemittauksia vielä rakennusvaiheessa olevaan kerrostaloon. Tässä kohteessa oli mahdollista mitata kaksi nykyaikaisissa energiatehokkaissa kerrostaloissa käytettyä ulkoseinärakennetta.

### **4.3 Mittauskohteet**

Mittauskohteiksi pyrittiin valitsemaan saatavuuden ja muiden rajoittavien tekijöiden rajoissa rakenteita ja materiaaleja, jotka vastaavat mahdollisimman hyvin kaikista yleisimmin käytettyjä, Suomessa rakennettujen kerrostalojen ulkoseinien rakenteita ja materiaaleja. Mittauskohteet on listattu yksittäisten materiaalien ja kokonaisten rakenteiden mukaisesti. Tämän lisäksi haluttiin tutkia, minkälaisen vaikutuksen materiaalin mahdollinen kastuminen esimerkiksi sateen aikana tekee sen aiheuttamalla RF-vaimennukselle.

#### **4.3.1 Yksittäiset materiaalinäytteet**

Yksittäisiä materiaaleja valittaessa pyrittiin löytämään kaikista yleisimpiä kerrostaloissa käytettyjä ulkoseinärakenteiden yksittäisiä materiaaleja. Tällöin modernien ja energiatehokkaiden kerrostalojen kuuluvuusongelmien taustaongelmille pystyttäisiin löytämään mahdollisia syitä. Kaikkia materiaaleja ei löydetty valmiina, joten mittauksia varten jouduttiin myös valmistamaan materiaalinäytteitä, erityisesti erilaisista rappausverkoista. Pääosin mittausmateriaalin hankkimisessa onnistuttiin hyvin, mutta erilaisten tiiliseinien osalta ei kyetty löytämään tarpeeksi suuria materiaalinäytteitä, jotka olisivat peittäneet mittaustilan RF-aukon. Seuraavassa alaluvussa esiteltävien kokonaisten seinärakenteiden osalta saatiin mitattavaksi kuitenkin kaksi erilaista tiiliseinärakennetta.

**Taulukko 5:** Yksittäiset materiaalinäytteet

<i>Materiaali</i>	<i>Paksuus [mm]</i>	<i>Lisätiedot</i>
Alumiinipintainen PU-eriste	30	
Betoni	40	Mitattiin kuivana ja märkänä
EPS-eriste (Styroksi)	50	
Lasivilla	20	
Mineraalivilla	13	
Ohutrappaus 1 (kuitulaasti)	15	Sisältää lasikuituverkon, silmäkoko 10 mm
Ohutrappaus 2 (kuitulaasti)	30	Sisältää lasikuituverkon, silmäkoko 10 mm
Paksurappaus 1	30	Ilman metalliverkkoa
Paksurappaus 2	30	Sisältää metalliverkon, silmäkoko 15 mm
Rappausverkko 1 Pieni	1,5	Silmäkoko 15 mm
Rappausverkko 2 Iso	2	Silmäkoko 20 mm

Taulukossa 5 on nähtävissä kaikki yksittäiset materiaalinäytteet, jotka mitattiin RF-vaimennuksen selvittämistä varten. Huomioitavaa on, että kaikki materiaalit eivät ole yhtä paksuja, kuin ne ovat rakennuksien rakenteissa. Siitä huolimatta tulokset kuitenkin antavat suuntaa siitä, mitä materiaalien RF-vaimennukselle tapahtuu, kun matkapuhelinverkkojen taajuutta kasvatetaan.

### 4.3.2 Ulkoseinärakenteet

Varsinaisia ulkoseinärakenteita mitattiin lähinnä jo edellä mainitussa alaluvussa. Erilaisia seinärakenteita mitattiin yhteensä kahdeksaa erilaista. Tämän lisäksi myös ikkunarakenteiden mittaukset laskettiin mukaan rakennemittauksiin, niiden sisältäessä useamman erillisen lasikerroksen.

**Taulukko 6:** Mitattujen ulkoseinärakenteiden kokonaispaksuudet

<i>Rakenne</i>	<i>Kokonaispaksuus</i>	<i>Lisäkerrokset</i>
Koppi 1 (Pientalorakenne)	260 mm	Kipsilevy 13 mm
Koppi 2 (Eristetty tiilirakennus)	295 mm	Tuulensuojalevy 30mm
Koppi 3 (Eristetty hirsirakennus)	279 mm	Tuulensuojalevy 12mm
Koppi 4 (Täystiilirakenne)	510 mm	
Koppi 5 (Kevytbetonirakenne)	381 mm	
Koppi 6 (Täyshirsirakenne)	185 mm	
Koppi 7 (Betoni-sandwich-elementti)	280 mm	Ilmarako 30mm
Koppi 8 (Betoni-sandwich-elementti)	250 mm	
Uusi kerrostalo seinärakenne 1	380 mm	
Uusi kerrostalo seinärakenne 2	440 mm	
Ikkuna 1	170 mm	Selektiivilasillinen
Ikkuna 2	170 mm	

Taulukossa 6 on listattu kaikkien kenttämittauksissa mitattujen ulkoseinärakenteiden kokonaispaksuudet. Tämän lisäksi listassa on mahdolliset lisäkerrokset rakenteissa, joissa on yhteensä yli 3 eri materiaalikerrosta.

**Taulukko 7:** *Mitattujen ulkoseinärakenteiden kerrospaksuudet*

*Rakenne (Ulkokuori - Eriste - Sisäkuori)*

---

Koppi 1 (Puu 57 mm - Alumiinipintainen PU-eriste 140 mm - Puu 48 mm)
Koppi 2 (Tiili 85 mm - Mineraalivilla 125 mm - Kahiharkko 135 mm)
Koppi 3 (Puu 20 mm - Puukuitueriste 120 mm - Hirsi 113 mm)
Koppi 4 (Paksurappaus 30 mm - Reikätiili 450 mm - Paksurappaus 30 mm)
Koppi 5 (Ohutrappaus 6 mm - Kevytbetoniharkko 375 mm)
Koppi 6 (Hirsi 185 mm)
Koppi 7 (Betoni 75 mm - Mineraalivilla 100 mm - Betoni 75 mm)
Koppi 8 (Betoni 75 mm - Mineraalivilla 100 mm - Betoni 75 mm)
Seinärakenne 1 (Ohutrappaus 10 mm – Mineraalivilla 220 mm – Betoni 150 mm)
Seinärakenne 2 (Betoni 70 mm – Mineraalivilla 220 mm – Betoni 150 mm)
Ikkuna 1 (3-kerroksinen lasirakenne, joista yksi pinnoitettu selektiivilasi)
Ikkuna 2 (3-kerroksinen lasirakenne ilman selektiivilaseja)

Taulukoissa 7 on esitelty mitattujen testikoppien ulkoseinien rakenteet kerroksittain. Erityisesti testikopit 2, 4, 5, 7 ja 8 ovat hyvin samankaltaisia rakenteita, kuin mitä on käytetty suomalaisissa kerrostaloissa. Näistä kaikista viidestä on vastaavia rakenteita luvun 3 kerrostalorakenteiden kirjallisuuselityksessä. Loput testikopeista edustavat enemmän pientalorakentamista, mutta erilaisten materiaaliensa osalta ne antavat lisäinformaatio lopullisille tuloksille. Seinärakenteet 1 ja 2 ovat vasta rakenteilla olevan modernin ja energiatehokkaan kerrostalon seinärakenteita.

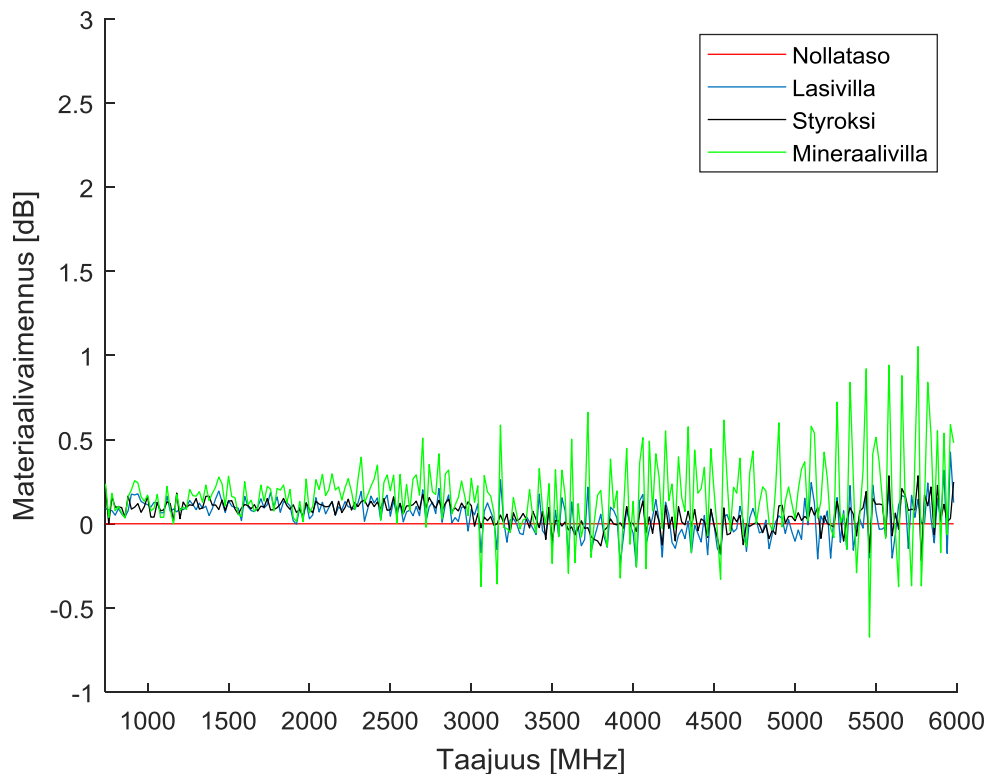
#### 4.4 Mittaustulokset

Seuraavassa on esitelty RF-mittausten varsinaiset tulokset. Kaikissa tuloksissa on huomioitu mittausten menetelmässä esitelty referenssimittausten tulos eli tuloksissa näkyvät vaimennukset kertovat materiaalin tai rakenteen aiheuttaman todellisen RF-vaimennuksen. Laboratorio-olosuhteissa tehdyille yksittäisille materiaalinäytteille ja kenttäolosuhteissa ikkunarakenteille tehdyissä mittauksissa mittaustuloksia kultakin näytteeltä on vain yksi tuloskäyrä, sillä useamman testimittauksen jälkeen oli selvää, että tuloskäyrät olivat hyvin stabiilit mittauskertojen välillä mittaolosuhteiden pysyessä vakioina. Kenttämittauksissa testikoppien kohdalla mittauksia tehtiin kuitenkin useampia jokaisen testikopin kohdalla. Syynä tähän oli se, että testikoppien seinustoilla kulki kaapelointeja, jotka saattoivat vaikuttaa mittaustuloksiin. Uuden kerrostalon seinärakenteita mitattaessa ei kuitenkaan ollut aikataulullisista syistä mahdollista suorittaa kuin yksi mittaustulos kutakin rakennetta kohti.

Tuloksissa eri mittauskerrat tai materiaalit on eroteltu eri väreillä. Tulosten havainnollistaminen helpottamiseksi luvun lopussa olevassa taulukoissa 8 ja 9 on mittausten perusteella saadut RF-vaimennukset listattu tällä hetkellä käytössä olevien ja tulevien matkapuhelinverkkojen taajuuskaistojen mukaisesti. Mittauksissa käytetyn taajuuskaistan ollessa 6 GHz:n asti, on taulukoihin 8 ja 9 lisätty myös mielenkiinnon vuoksi muita korkeampien taajuuden RF-vaimennuksia mittauskohteille.

#### 4.4.1 Mittaukset yksittäisillä materiaalinäytteillä

Yksittäisille materiaalinäytteille suoritettavat mittaukset on jaoteltu kuviin kategorioittain tai muiden informatiivisten havaintojen perusteella. Tuloskuvat sisältävät RF-vaimennukset 740 – 6000 MHz:n taajuuskaistalla kaikille taulukossa 5 listatuille materiaalinäytteille, paitsi alumiinipintaiselle PU-eristeelle, jonka vaimennuskäyrä on esitelty jo aiemmin kuvassa 12, liittyen laboratoriomittauksien varmennusmittaukseen. Mitattuja materiaalinäytteitä oli yhteensä 11 erilaista. Käytetty mittausmenetelmä esiteltiin alaluvussa 4.1 ja mittauksien RF-aukkoineen on nähtävissä kuvasta 11.



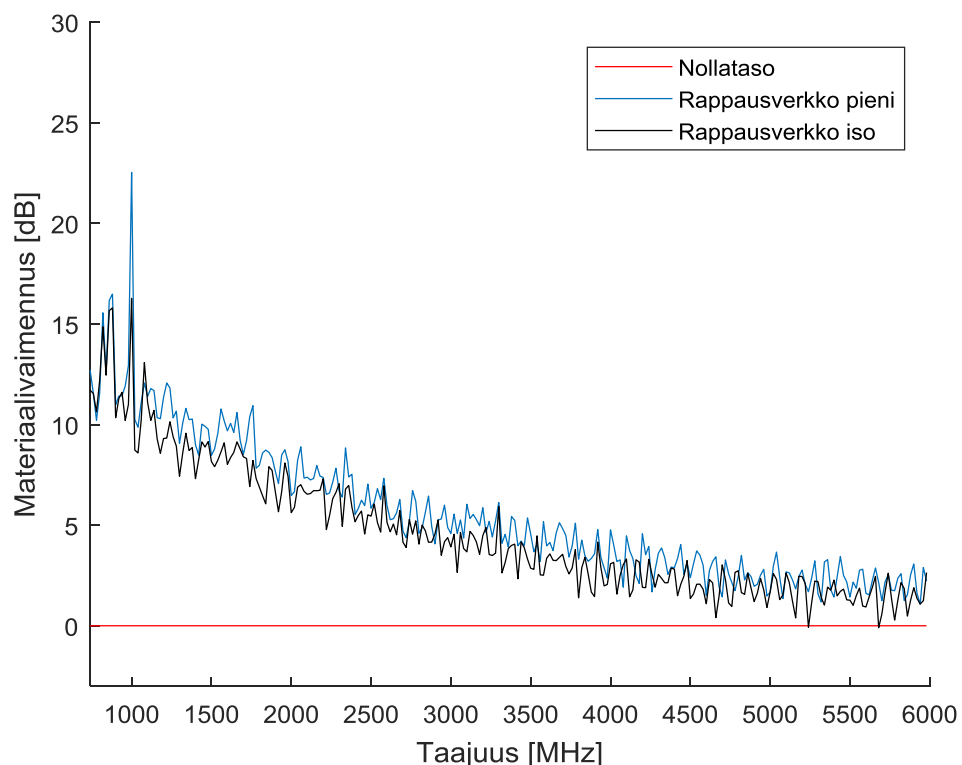
**Kuva 13:** Tyypillisten eristeiden aiheuttamia RF-vaimennuksia

Kuvassa 13 on kuvattu kerros- ja pientaloille yleisimpien materiaalien aiheuttamia RF-vaimennuksia. Huomioitavaa tässä kuvassa on mitattujen eristeiden paksuudet, jotka eivät ole yhtä suuria, kuin oikeissa asuinrakennuksissa olevat kerrospaksuudet. Tällä hetkellä rakennettavien kerrostalojen U-arvo-vaatimukset täyttävät eristepaksuudet ovat

pääosin yli 20 senttimetriä, riippuen käytetystä eristeestä sekä ulkoseinän muusta rakenteesta.

Tuloskäyrien perusteella voidaan todeta, että ohuista materiaalinäytepaksuuksista huolimatta eristeiden aiheuttama RF-vaimennus on hyvin matala. Erityisesti lasivillan ja styroksin aiheuttama vaimennus on lähes mitätön. Niiden molempien suurin vaimennus koko taajuuskaistalla on alle 0,5 desibeliä. Mineraalivilla puolestaan näyttää aiheuttavan erityisesti suuremmilla taajuuksilla selvästi suurempia heijastuksia, jotka ilmenevät terävinä piikkeinä kyseisen materiaalin tuloskäyrissä. Myöskään mineraalivillan aiheuttama vaimennus pysyy hyvin matalana, suurimman vaimennuksen ollessa noin yksi desibeli 5760 MHz:n kohdalla. Kaikkien eristeiden vaimennusarvot saavat jopa vahvistavia arvoja tuloskäyrällä, mikä johtuu materiaalin aiheuttamasta taittumisesta RF-signaalissa, mikä suuntaa monitiekomponentteja suotuisasti antennin välillä tietyillä taajuuksilla.

Kuvien 12 ja 13 eristeiden aiheuttamassa vaimennuksessa on merkittävä ero. Aluminiipintainen polyuretaanieriste vaimentaa käytetyllä taajuuskaistalla keskimäärin yli 37 desibeliä, lasi- ja mineraalivillan sekä styroksin vaimennuksen ollessa lähes mitätön. Toisin, metallipintaiset eristeet ovat harvinaisia kerrostalojen ulkoseinissä, mineraalivillan ollessa kaikista käytetyin eriste kerrostalojen ulkoseinissä.



**Kuva 14:** Metallisten rappausverkkojen RF-vaimennus

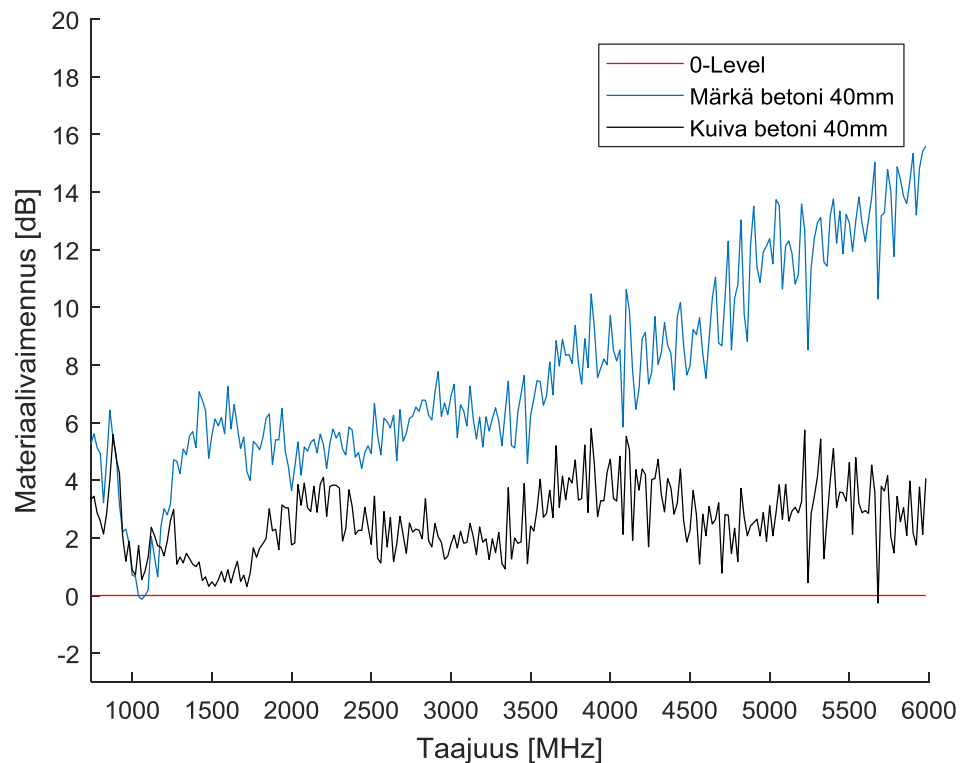
Seuraavassa kuvassa on esitelty kahden eri silmäkoolla olevan rappausverkon tulokset. Rappausverkkoja käytetään siis osana joidenkin kerrostalojen ulkokuorta tukemassa

suhteellisen ohutta rappauserrosta. Pienemmän rappauserkon silmäkoko on 15 millimetriä ja isomman verkon 20 millimetriä.

Kuvasta 14 on nähtävissä rappauserkon RF-vaimennukset. Tulosten perusteella, metalliset rappauserkot toimivat käytännössä ylipäästösuotimina. Tämä johtuu käytännössä siitä, että taajuuden kasvaessa aallonpituus pienenee, mikä puolestaan aiheuttaa pienemmän vaimennuksen suuremmilla taajuuksilla. Tämä siis poikkeaa merkittävästi yleisesti oletuksesta, että eri materiaalien taajuusvaste käyttäytyy oletusarvoisesti kasvavasti taajuuden kasvaessa. Alle 2 GHz:n taajuuksilla molempien verkkojen vaimennukset ovat pääosin yli 10 desibelin tasolla, mistä vaimennukset lähtevät pieneneeseen varsin tasaisesti taajuuden kasvaessa. Teoriassa ylipäästösuodin-efekti voisi näkyä vieläkin selvemmin, mutta fyysisillä eli analogisilla suotimilla taajuusvasteen erot eivät ole niin selviä, kuin digitaalisilla suotimilla.

Suurimmilla mittaustaajuuksilla verkkojen aiheuttama RF-vaimennus on enää muutamien desibelin tasolla. Rappauserkoon koolla ei näyttäisi olevan ainakaan näytämateriaalien kokoerolla suurta merkitystä. Suuremmalla silmäkoolla olevan rappauserkon aiheuttamat RF-vaimennukset ovat kuitenkin hieman matalammat, sillä sen suuremmat reiät läpäisevät paremmin RF-signaaleja.

Edellä mainittu rappauserkon ylipäästösuotimen kaltainen käyttäytyminen luo merkittäviä haasteita matkapuhelinverkkojen kuuluvuuden kannalta sisätiloissa, sillä muut rakennusmateriaalien aiheuttamat vaimennukset pääsääntöisesti kasvavat suurilla taajuuksilla. Tällöin rappauserkot vaimentavat matalampia taajuuksia, jotka läpäisevät muut rakenteet helpommin ja päinvastoin, lopputuloksena mahdollisesti ulkoseinän suurehko vaimentaminen kaikilla matkapuhelinverkon käyttämällä taajuuksilla nyt ja tulevaisuudessa.



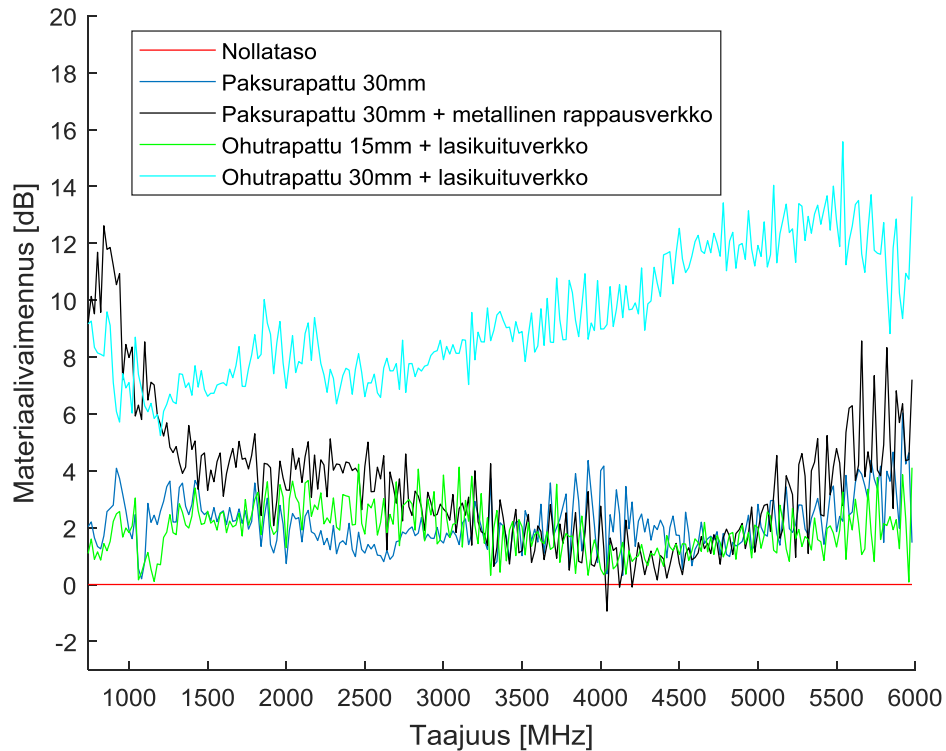
**Kuva 15:** Kastumisen vaikutus betoninäytteen RF-vaimennukseen

Kuvassa 15 on esitelty kahden samalle betoninäytteelle tehdyn mittauksen tulokset. Betoninäytteet olivat ulkoseinissä esiintyviä kerrospaksuuksia ohuempia, jotta niiden käsittely mittaustilassa oli mahdollista. Kuivana tehdyn mittauksen jälkeen betoninäyte upotettiin vuorokauden ajaksi veteen, jossa se imi vettä itseensä noin kolmen painoprosentin verran. Veteen upottamisen oli tarkoitus demonstroida ajankohtaa, jossa ulkoseinä joutuu pidempikestoisen sadekuormituksen alaiseksi ja pääsee kastumaan runsaasti.

Betonin kastumisella näyttäisi olevan suuri merkitys sen aiheuttamaan RF-vaimennukseen, erityisesti suuremmilla taajuuksilla merkitys näyttää korostuvan entisestään. Kuivalla betoninäytteellä vaimennukset vaihtelevat koko taajuuskaistalla nollan ja viiden desibelin välillä, keskiarvon ollessa noin 2,6 desibeliä. Märällä betoninäytteellä vaimennus lähentelee korkeammilla taajuuksilla jo 15:ttä desibeliä, keskiarvon ollessa noin 7,7 desibeliä. Eli keskimäärin kastunut betoni vaimensi RF-signaalia yli 5 desibeliä enemmän. Tulosten perusteella myös sääolosuhteilla voi olla merkitystä hetkittäin kuuluvuudelle rakennusten sisäpuolella. Betonille ja muillekin ulkoseinämateriaaleille voisikin olla järkevää tehdä vedenpitävä pinta, joka estäisi ulkokuoren kastumisen.

Mitatut betoninäytteet eivät olleet teräsbetonia eli niiden sisällä ei ollut betoniraudoitusta, jota löytyy käytännössä kaikista sandwich-betonielementtien sisältämistä betoni-kuorista. Teräsbetonin silmäkoko on kuitenkin huomattavasti suurempi, kuin edellä mainittujen rappausverkkojen, minkä vuoksi teräsrudoituksen merkitys RF-vaimennukselle

ei ole niin merkittävä. Myöhemmin esiteltävien kenttämittausten kohdalla mitataan kuitenkin useampaakin ulkoseinärakennetta, jossa on käytetty teräsbetoni sisä- ja ulkokuorissa.



**Kuva 16:** Erilaisten rappausnäytteiden RF-vaimennuksia

Kuvassa 16 on mittauskäyrät neljästä erilaisesta rappausnäytteestä. Kaikki näytteet valmistettiin alusta loppuun mittauksia varten, joista paksurapattu mallikappale metalliverkolla sekä ohutrapattu 15 millimetriä paksu mallikappale lasikuituverkolla edustavat hyvin yleisiä ulkoseinärakenteita suomalaisissa kerrostaloissa. Edellä mainittujen mallikappaleiden lisäksi vertailua varten valmistettiin paksurapattu mallikappale ilman metallista rappausverkkoa sekä ohutrapattu mallikappale, joka on yhtä paksu kuin paksurapatut mallikappaleet. Paksurapatut näytteet valmistettiin paksurappaukseen soveltuvasta laastista kahdessa eri kerroksessa. Toiseen näytteistä upotettiin ensimmäisen kerroksen jälkeen 15 mm silmäkoolla oleva metalliverkko. Ohutrapatut näytteet puolestaan valmistettiin ohutrappaukseen suositellulla kuitulaastilla yhdessä kerroksessa. Molempiin ohutrapattuihin mallikappaleisiin upotettiin 10 mm silmäkoolla oleva lasikuituverkko. Kuitulaastiin on myös lisätty muovikuituja vahvistamaan ohuemmaksi tarkoitettua rakennetta.

Metallisen rappausverkon sisältämän rappauskappaleen aiheuttamassa vaimennuksessa on selvästi nähtävissä sama metallisen rappausverkon aiheuttama ylipäästösuodinilmiö, kuin kuvassa 14, missä mittaus käsitti ainoastaan metallisen rappausverkon. Merkittävin metallisen rappausverkon aiheuttama vaimennus on ennen 1,5 GHz:n taajuutta, jonka jälkeen verkotonta kappaletta suurempaa vaimennusta on nähtävissä vielä 3,5

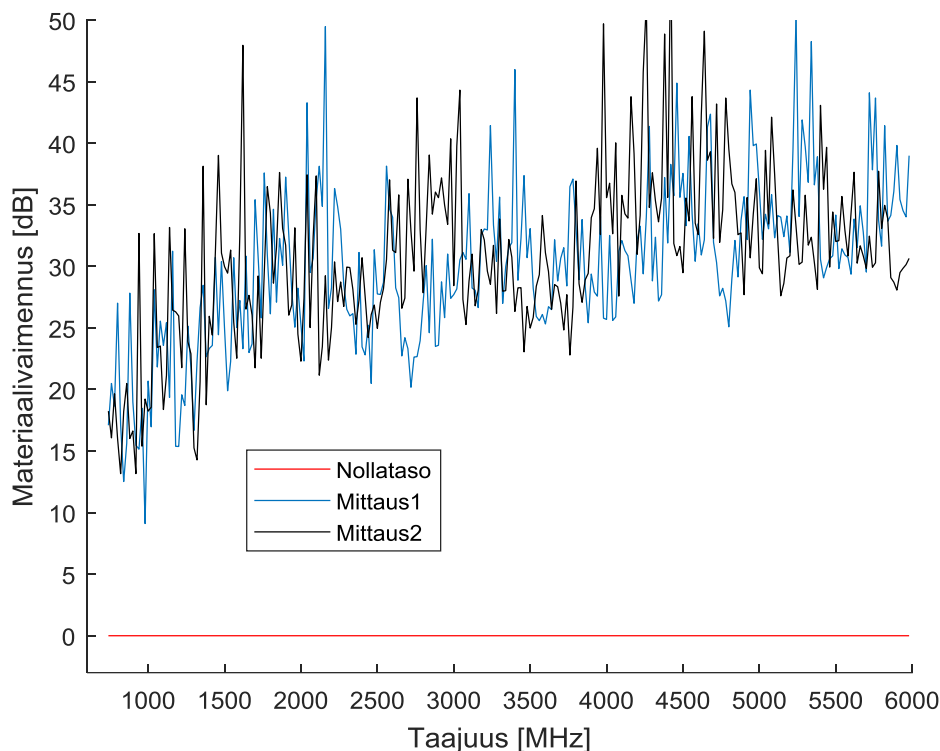
GHz:n asti. Tämän jälkeen molempien paksurapattujen mallikappaleiden vaimennukset ovat lähes yhtä suuret. Ohutrapattujen mallikappaleiden RF-vaimennukset ovat suhteessa merkittävästi suuremmat, kun otetaan huomioon mallikappaleiden paksuudet. Ohutrapattuilla mallikappaleilla ei suhteessa suuremmasta RF-vaimennuksesta huolimatta ole nähtävissä samankaltaista ylipäästösuodin-ilmiötä, kuin metalliverkkoisella näytteellä. Syynä tähän ero rappausverkkojen materiaaleissa, lasikuituiset rappausverkot vaikuttavat RF-signaaliin dramaattisesti vähemmän kuin metallinen rappausverkko.

Verrattaessa ainoastaan oikeiden kerrostalojen ulkoseinissä käytettyjä rappaustyypppejä, eli metalliverkkoista paksurappausnäytettä ja ohuempaa ohutrappausnäytettä, voidaan todeta, että niiden aiheuttamat RF-vaimennukset eroavat eniten juuri matalilla, alle 1,5 GHz:n taajuuksilla. Tästä korkeammilla taajuuksilla vaimennukset ovat melkein samaa suuruusluokkaa, pois lukien korkeimpia mittaustaajuuksia, jolloin paksurappauksella toteutettu kappale alkaa jälleen vaimentaa ohutrapattua enemmän.

#### **4.4.2 Mittaukset ulkoseinärakenteilla**

Kokonaisilla ulkoseinärakenteilla RF-vaimennusmittaukset toteutettiin samalla mittausmenetelmällä, kuin aiemmat yksittäisten materiaalien mittaukset. Mittausympäristö muuttui kuitenkin laboratorio-olosuhteista kenttäolosuhteiksi. Tästä syystä mittauksissa esiintyvät virhemarginaalit ja riskit RF-signaalin vuotamiselle haluttua kohtaa poikkeavasta paikasta, ovat suuremmat kuin laboratorio-olosuhteissa tehdyissä mittauksissa. Tämän vuoksi erityisesti testikopeissa tehdyissä mittauksissa suoritettiin samasta ulkoseinämateriaalista useampia mittauksia, jotta voitiin varmistua tulosten olevan relevantteja. Testikoppien mittaukset suoritettiin kahden päivän aikana. Kyseisten päivien aikana sääolosuhteet pysyivät lähes vakioita, eikä kumpanakaan mittauspäivänä ei ollut merkittävää sadetta, joka olisi voinut vaikuttaa mittaustuloksiin merkittävästi.

Jäljempänä esiteltyt mittaustulosten kuvat sisältävät tuloskäyrät kaikista yksittäiselle testikopeille tehdyistä mittauksista. Kaikki mittaukset on tehty eri kohdista saman testikopin ulkoseinää. Mitattujen testikoppien ulkoseinärakenteet ovat nähtävissä kerroksittain taulukoista 6 ja 7. Taajuuskaistana on sama kuin yksittäisille materiaaleille käytössä ollut 740 – 6000 MHz.

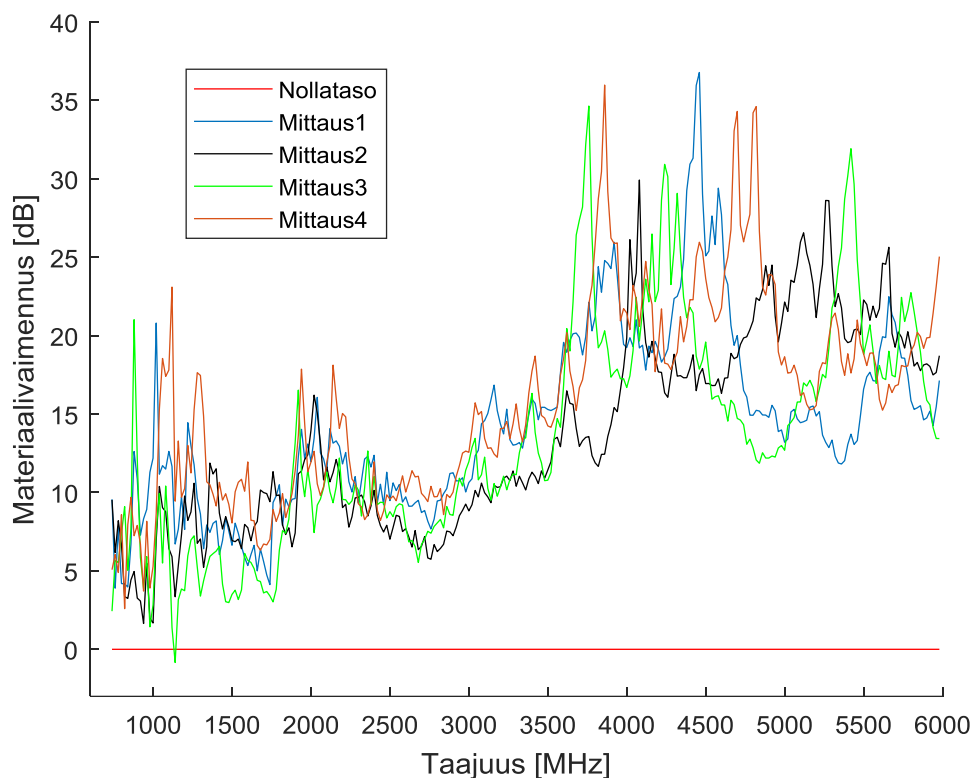


**Kuva 17:** *Testikopin 1 RF-vaimennus*

Kuvassa 17 on esitelty testikopin 1 RF-vaimennus. Kyseisen testikopin ulkoseinä rakenne vastasi enemmän pientalorakentamista kuin kerrostalorakentamista. Erityisesti eristeenä käytetty alumiinipintainen polyuretaani eriste on varsin harvinainen kerrostalojen ulkoseinissä. Testikopissa käytetty eriste vastaa kuvassa 12 mitattua materiaalia. Muilta osin kyseisen testikopin ulkoseinärakenteet ovat pääosin puuta.

Keskiarvoinen RF-vaimennus koko taajuuskaistalla on noin 30,4 desibeliä, joka on noin 7 desibeliä alhaisempi kuin laboratoriomittauksien varmennusmittaukseen käytetyn, huomattavasti ohuemman vastaavan eristelevyn vaimennus. Lisäksi mittauskäyrällä nähtävät piikit vastaanotetun signaalin tehtasossa viittaavat rakenteen aiheuttamiin voimakkaisiin heijastumiin. On myös mahdollista, että kyseisen testikopin jossakin ulkokuoren rakenteessa on RF-signaaleille huomattavasti vähemmän vaimentava reitti, joka on mahdollistanut kuvaa 12 pienemmät vaimennustasot.

Kahdesta eri kohdasta toteutettujen mittausten tulokset ovat kuitenkin hyvin toisiaan vastaavat, joten kyseisen testikopin osalta tuloksia voidaan pitää varauksella suuntaa antavina. Tässä tapauksessa nähdään myös mahdollisesti mittausmenetelmän suurin heikkous, sillä johtuen kaukokentässä tehtävistä mittauksista etäisyyden ollessa noin kolme metriä, epähomogeenisissa rakenteissa tehtävissä mittauksissa monitie-eteneminen saattaa vääristää tuloksia, huolimatta torviantennien suuntaavuudesta.



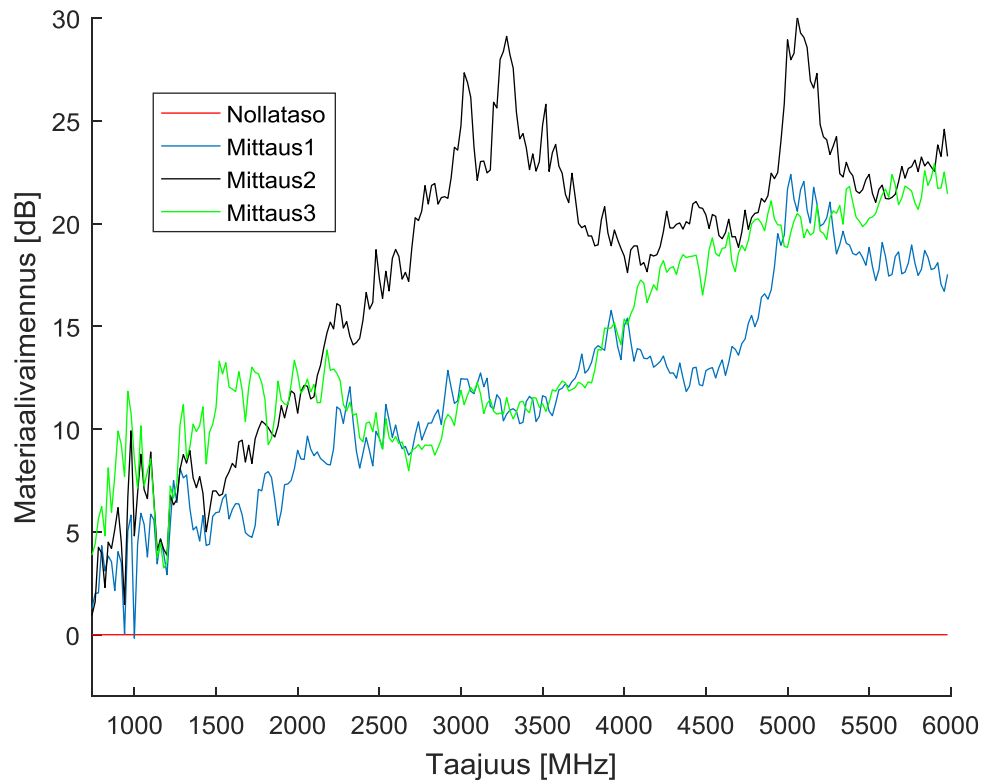
**Kuva 18:** Testikopin 2 RF-vaimennus

Kuva 18 sisältää tuloskäyrät tiilivuoratuista testikopista 2, jonka rakenne on lähellä myös yleisesti oikeissa kerrostaloissa käytettyjä ulkoseinärakenteita. Ainoat merkittävät erot moderneihin kerrostaloihin ovat ulkoseinän mineraalivillan kerrospaksuus 125 millimetriä ja sisäkuoren materiaali. Moderneissa kerrostaloissa eristekerroksen paksuus on nykyään lähes poikkeuksetta yli 200 millimetriä ja sisäkuori kerrostaloissa on teräsbetonia, kun testikopissa se on kahiharkkoa.

Mittauskertojen välillä tapahtuneet erot ovat varsin pieniä. 3,5 GHz:n jälkeen kuitenkin on nähtävissä enemmän varianssia tuloksissa, kuin tätä pienemmillä taajuuksilla. 3,5 GHz:n kohdalla on muutenkin nähtävissä huomattava kasvu ulkoseinän aiheuttamassa RF-vaimennuksessa. Koko mittauskaistanleveydellä testikopin 2 aiheuttama RF-vaimennus on kaikki mittauskerrat mukaan lukien keskimäärin 14,3 desibeliä. Ero matalien ja korkeiden taajuuksien RF-vaimennuksella on kuitenkin merkittävä, sillä alle 3,5 GHz:n taajuuksilla keskiarvo on 9,6 desibeliä, kun taas yli 3,5 GHz:n taajuuksilla 19,6 desibeliä eli ero on kymmenkertainen vastaanotetun signaalin tehotasossa.

Kyseisen testikopin kohdalla saatuja tuloksia voidaan pitää hyvänä esimerkkinä siitä, mitä matkapuhelinverkkojen käyttämien taajuuksien nostaminen voi aiheuttaa. Todellisten ulkoseinärakenteiden aiheuttama RF-vaimennus ei ole kaikkien materiaalien kohdalla lineaarinen, minkä lisäksi rakenteiden kerrospaksuuksilla on suuri merkitys rakenteen ai-

heuttamiin heijastuksiin, jotka puolestaan vaikuttavat välittömästi myös rakenteen läpäisevään signaalitehoon, mikäli suurempi osa lähetetyn RF-signaalin tehosta heijastuu materiaalista.



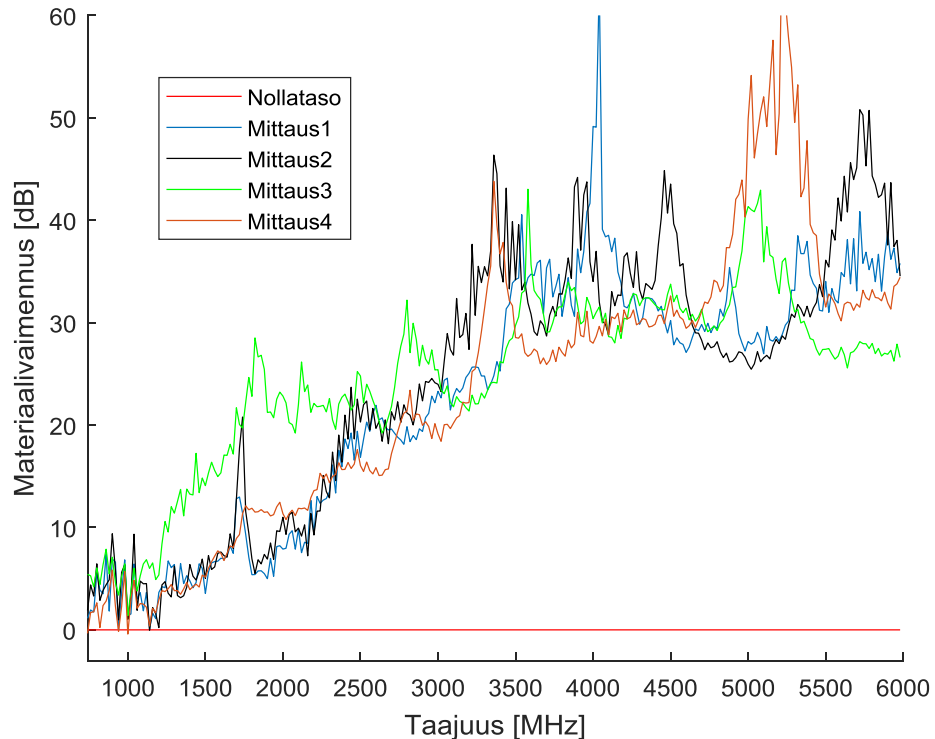
**Kuva 19:** Testikopin 3 RF-vaimennus

Testikoppi 3 puolestaan on mielenkiintoinen mittauskohde sen vuoksi, että puuta käytetään ulkosivumateriaalina Suomessa kuvan 8 mukaan jopa joka kymmenennessä kerrostalossa. Tämän lisäksi Suomeen on rakennettu viime vuosina kerrostaloja puuelementteistä, vaikkakin erilaiset betonielementti-rakenteet ovat kaikista suosituin rakenne rakennusten ulkoseinissä. Testikopin ulko- ja sisäkuori ovat puuta, joiden välissä oleva eriste-kerros on myös puukuitua. Vaikka testikopin seinärakenne ei välttämättä ole täysin samanlainen kuin kerrostaloissa käytettyjen elementtien, voidaan tuloksia kuitenkin pitää suuntaa antavina, kun mietitään puurakenteiden RF-vaimennuksia verrattuna betonirakenteisiin.

Kuvasta 19 voidaan todeta mittauskäyrän 2 olevan selvästi poikkeava mittauksista 1 ja 3. Erityisesti noin kolmen ja viiden GHz:n kohdilla on selkeät poikkeamat edellä mainittujen mittausten välillä. Syynä on todennäköisesti aiemmin mainittujen kaapelointien läpivienti mittauskohdassa, on myös mahdollista rakenteessa olevan jokin muu ero mittauskohtien välillä. Ensimmäisen ja kolmannen mittauskerran keskiarvoinen vaimennus oli 12,8 desibeliä, kun taas toisen mittauksen kohdalla ulkoseinärakenne vaimensi keskimäärin 17,7 desibeliä. Tästä eroamasta johtuen mittauskerta 2 todetaan epäonnistuneeksi

todennäköisen rakennepoikkeaman vuoksi ja se jätetään pois testikoppien tulosten vertailusta.

Testikopin 3 kohdalla vaimennuskäyrät käyttäytyvät huomattavasti lineaarisemmin verrattuna testikopin 2 tuloksiin. Suurimmat muutokset RF-vaimennuksissa näyttävät tulevan noin 1,5 ja 5 GHz:n kohdilla. Juuri alle 1,5 GHz taajuuksilla vaimennukset ovat erittäin pienet vaihdellen pääosin 3:n ja 10:n desibelin välillä.



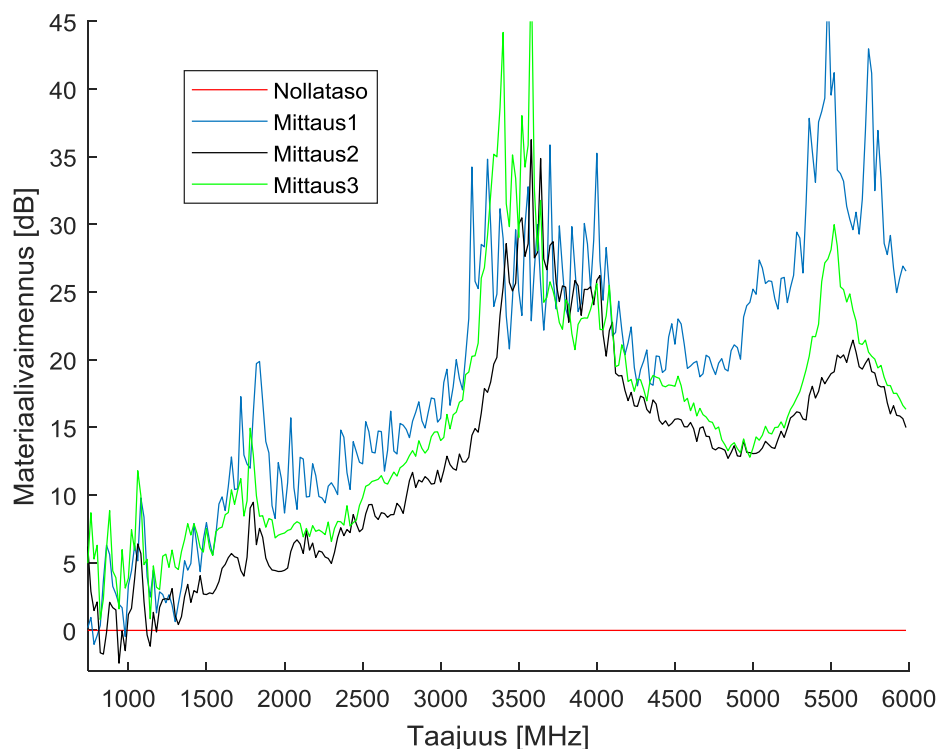
**Kuva 20:** Testikopin 4 RF-vaimennus

Testikoppi 4 on ulkoseinän osalta rakenteeltaan samankaltainen kuin kerrostaloissa, jotka rakennettiin ennen kuin betonielementtirakentaminen valtasi rakennusmarkkinat. Rakenne on siis kauttaaltaan rakennettu reikätiilestä, jonka ulkopintoihin on molemmin puolin lisätty 30 mm paksu rappauskerros. Kyseistä tiilirakennetta kutsutaan myös puolentoista kiven tiiliseinäksi, sillä se koostuu puolestatoista standardikokoisesta tiilestä. Tämä rakenne oli kaikista mitatuista seinärakenteista kaikista paksuin, kokonaispaksuuden ollessa puolen metrin luokkaa.

Tuloskäyrän perusteella voidaan kuitenkin todeta, että hyvin todennäköisesti rappauskerroksissa ei ole käytetty metallista rappausverkkoa, sillä verrattuna kuviin 14 ja 16, kyseisen tuloskäyrän kohdalla ei ole havaittavissa ollenkaan vastaavanlaista ylipäästösuodin-efektiä. Mittauksen 3 kohdalla on alemmilla taajuuksilla selvästi muita mittauskertoja suuremmat vaimennukset. Muilta osin mittauskerrat ovat varsin yhtenäiset alem-

milla taajuuksilla. Korkeammilla taajuuksilla, yli 3,5 GHz:n taajuuksilla varianssi on jälleen huomattavasti suurempaa, kuten myös testikopin 2 kohdalla oli aiemmin havaittavissa.

Keskimääräisesti testikopin 4 RF-vaimennus mittaускаistalla oli kokonaisuudessaan 23,7 desibeliä. 3,5 GHz:n kohdalla tapahtuvasta vaimennuksesta johtuen, kun mittaускаista jaetaan, saadaan tätä pienemmille taajuuksille keskimäärin RF-vaimennukseksi 15,1 desibeliä, kun taas tätä suuremmilla taajuuksilla vastaava vaimennus on yli 33 desibeliä. Tämänkin ulkoseinärakenteen kohdalla siirtymistä matalammista taajuuksista korkeampiin voidaan pitää haasteellisenä radioteknisen suunnittelun kannalta.



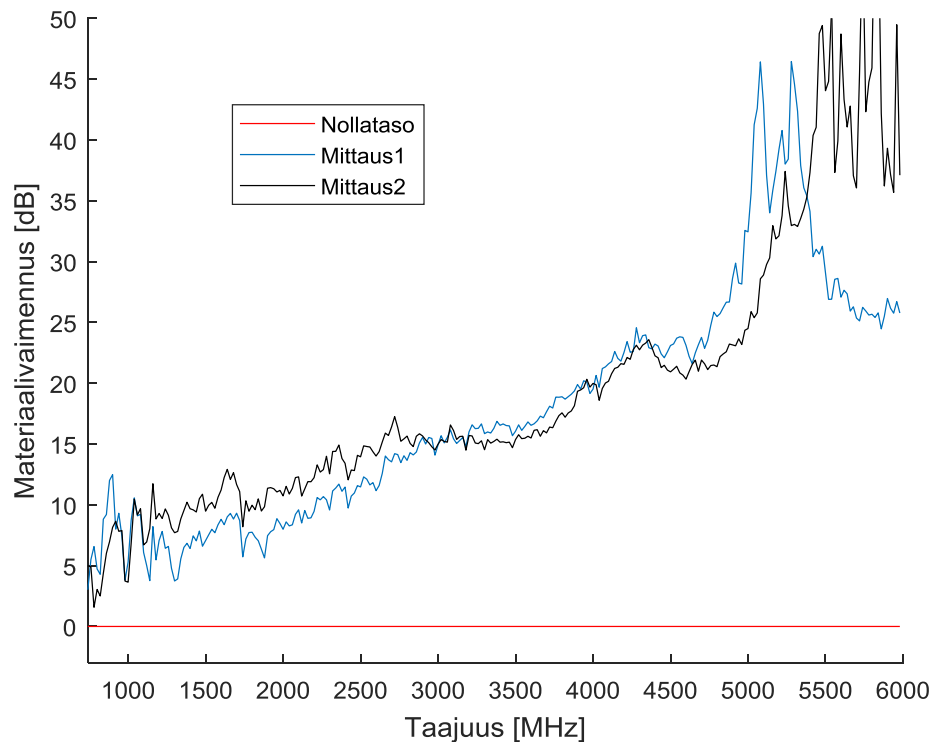
**Kuva 21:** Testikopin 5 RF-vaimennus

Testikopin 5 rakenteen kohdalla kyseessä on jälleen perinteistä kerrostalorakentamisen vanhempaa aikakautta vastaava rakenne. Tämä testikoppi on kuitenkin rakenteeltaan hyvin lähellä edellistä, sillä kumpikin rakenteista on koostunut käytännössä vain yhdestä materiaalista, pintakäsittelyä lukuun ottamatta. Erotuksena edelliseen testikoppiin on kuitenkin se, että tämä rakenne on tehty kevytbetonista. Eristekerroksen puutteen takia myös tämä rakenne on varsin paksu, pelkästään kevytbetonin osuus ulkokuoresta on 375 millimetriä.

RF-vaimennuksen käyttäytyminen on varsin poikkeava verrattuna tähän asti analysoituihin tuloksiin. Testikopin 5 seinärakenne näyttää toimivan kaistanestosuotimena mittaускаistanleveydellä, sillä se vaimentaa erityisen voimakkaasti RF-signaaleja 3,5 GHz:n

molemmin puolin. Tämä aaltomuoto näyttää toistuvan n. 2 GHz:n välein, sillä myös noin 1,5 GHz:n ja 5,5 GHz kohdilla on nähtävissä selvä pudotus RF-vaimennuksessa, mutta kahden korkeamman eli 3,5 GHz:n ja 5,5 GHz:n kohdilla pudotukset ovat selvästi merkittävämmät. Erityisesti tämän testikopin tapauksessa eri kohdista tehtyjen mittauskertojen aaltomuodot vastaavat toisiaan verrattain hyvin.

3,5 GHz:n ympärillä ulkoseinärakenteen aiheuttama RF-vaimennus vaihtelee 20 ja 40 desibelin välillä, kun varsinkin matalammilla, alle 3 GHz:n taajuuksilla vaimennukset ovat pääosin 2 ja 15 desibelin välillä. Keskimäärin koko mittauskaistalla testikopin aiheuttama RF-vaimennus on 15,8 desibeliä, joka on lähes 8 desibeliä vähemmän kuin tiilirakenteisella testikopilla 4. Huomioitavaa kuitenkin on, että testikopin 4 ulkoseinärakenne on yli 10 senttimetriä paksumpi.



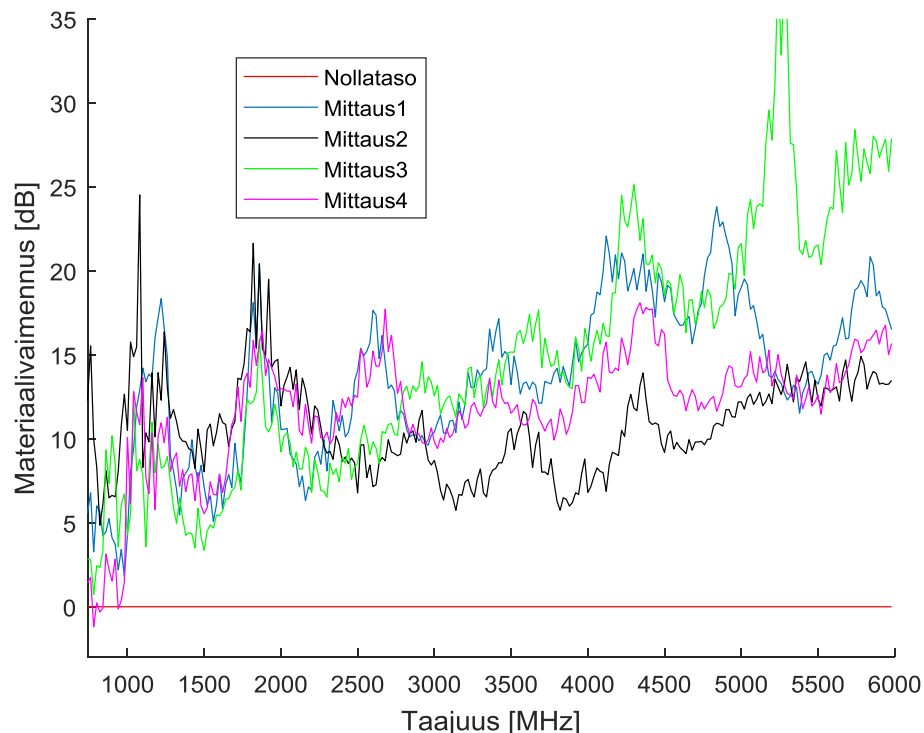
**Kuva 22:** Testikopin 6 RF-vaimennus

Kuvassa 22 on esitetty tulokset testikopin 6 mittauksista. Testikoppi 6:n ulkoseinärakenne on tehty pelkästään eristämättömästä hirrestä. Tällaisia rakenteita ei ole kerrostalojen ulkoseinissä juuri käytetty, mutta se antaa kuitenkin mittausdataa pelkän puurakenteen aiheuttamasta RF-vaimennuksesta. Puu on materiaalina varsin huokoinen, joten sääolojen muutoksella olisi todennäköisesti kuvan 15 kaltaisia muutoksia havaittavissa, mikäli mittaukset olisi toistettu esimerkiksi aurinkoisena ja sateisena päivänä.

Tulokset vastaavat erityisen hyvin toisiaan noin 4,5 GHz:iin asti. Tämän jälkeen eri mittauskertojen tulokset saavat suurimmat vaimennusarvonsa hie-

man toisistaan poikkeavilla taajuuksilla. Molempien mittauskäyrien RF-vaimennus kasvaa lähes lineaarisesti noin 4 GHz:n taajuuteen asti, jonka jälkeen vaimennus kasvaa merkittävästi. Tämän vuoksi ainakaan vielä 3,5 GHz:n taajuusalueen käyttöönotto matkaviestinverkoissa, ei aiheuta yhtä merkittäviä vaikutuksia kyseiselle ulkoseinärakenteelle, kuin useissa aiemmin analysoiduissa rakenteissa.

Keskimäärin testikopin 6 RF-vaimennus mittauksissa käytetyllä kaistanleveydellä on 18,6 desibeliä. Tämä on kuitenkin keskimäärin noin kuusi desibeliä korkeampi, kuin kuvassa 19 esitellyn testikopin 3 tulos. Ainakin tämän havainnon perusteella on nähtävissä, että erillisen eristeen käyttäminen saattaa johtaa kuuluvuusongelman kannalta parempaan lopputulokseen. Esimerkiksi tässä vertailussa testikopin 3 kohdalla on päästy vastaavaan lämmöneristävyyteen ohuilla puukerroksilla ja paksummalla eristekerroksella, kuin ainoastaan yhdellä voimakkaammin RF-signaaleja vaimentavalla materiaalilla, kuten testikopin 6 kohdalla pelkällä puulla. Kuvan 13 perusteella voidaan todeta, että yleisimmin käytettyjen eristeiden RF-vaimennukset ovat matalat verrattuna muiden rakennusmateriaalien RF-vaimennuksiin. Myös kokonaispaksuuden muutoksilla voi olla merkittäviä vaikutuksia rakenteiden aiheuttamiin RF-vaimennuksiin, vaikka rakenteiden välissä ei olisi muuta kuin pelkkää ilmaa.



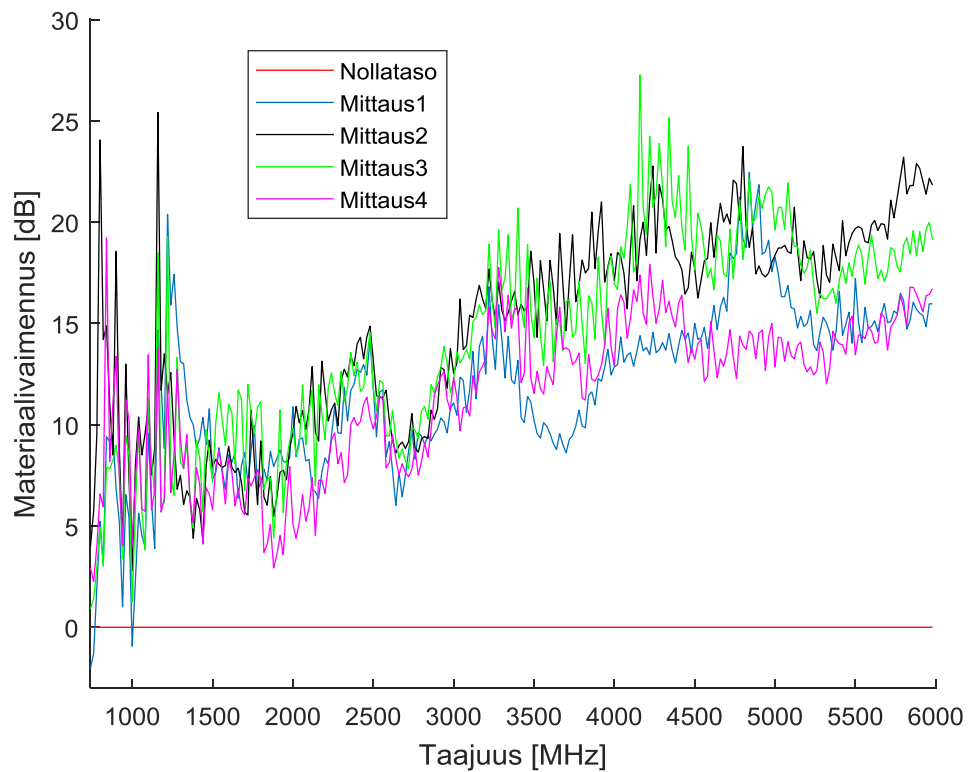
**Kuva 23:** Testikopin 7 RF-vaimennus

Testikoppi 7 vastaa rakenteeltaan kaikkein eniten suomalaisissa kerrostaloissa käytettyä ulkoseinärakennetta eli betonisandwich-elementtirakennetta. Myös tässä testikopissa

eristepaksuus (100 millimetriä) jää alle tämänhetkisten U-arvojen täyttävien seinärakenteiden eristepaksuuksista. Testikopin 7 ulko- ja sisäkuoren paksuudet ovat 75 millimetriä, jotka ovat tyypilliset kerrospaksuudet ei-kantavalle seinärakenteelle. Kantavien sisäkuorien minimipaksuudet ovat kerrostaloissa pääsääntöisesti 150 millimetriä, mikä on kaksinkertainen paksuus verrattuna testikopin 7 rakenteeseen. Tässä testikopissa poikkeavuutena on myös ulkokuoren takana oleva 30 millimetrin levyinen ilmarako. Ilmarakoa käytetään yleisemmin todellisten kerrostalojen kohdalla muurattujen tiiliseinien yhteydessä.

Mittaustuloksista on heti nähtävissä merkittävä varianssi tulostulosten välillä. Matalammilla taajuuksilla tulostulosten aaltomuodot kulkevat melko yhtenevästi, mutta noin 2,3 GHz:n taajuuden kohdalla tulostulokset alkavat saada eriäviä vaimennusarvoja toistensa kanssa. Toisin kuin monien muiden materiaalien kohdalla, tämän rakenteen kohdalla ei ole nähtävissä yhtä merkittävää yksittäistä pudotusta taajuuden kasvaessa, vaan paikallisia minimi- ja maksimivaimennuksia on jopa alle 1 GHz:n välein. Jatkossa mielenkiintoisena tutkimuskohteena voisikin olla esimerkiksi eri paksuisten kerrosrakenteiden tutkiminen siten, että rakenteet saataisiin suunniteltua radioaalloille mahdollisimman suotuisiksi läpäisyn kannalta. Myös simulaatioiden avulla voisi olla mahdollista kehittää rakenteita RF-vaimennuksen osalta haluttuun suuntaan.

Keskimäärin seinärakenteen aiheuttama RF-vaimennus mitatulla taajuuskaistalla oli 12,8 desibeliä, mikä on matalimpia kaikista mitatuista seinärakenteista. Paikalliset poikkeamat ovat kuitenkin taajuuksien välillä erityisen suuria, mikä voi tarkoittaa mahdollisesti jonkun matkaviestinverkoissa käytetyn taajuuskaistan osuvan vahvasti RF-vaimentavalle kaistalle tai toisaalta myös vähän vaimentavalle. Tämän vuoksi erilaisten kerrospaksuuksien mittaaminen, simulointi ja suunnittelu voisi auttaa rakennuksien kuuluvuusongelmiin. Paremmiin tietoihin olevat materiaali- ja rakennekohtaiset RF-vaimennukset helpottaisivat myös matkaviestinverkkojen radioteknistä suunnittelua, kun olisi tarkasti tiedossa millaisia vaimennuksia erilaiset rakenteet aiheuttavat.



**Kuva 24:** Testikopin 8 RF-vaimennus

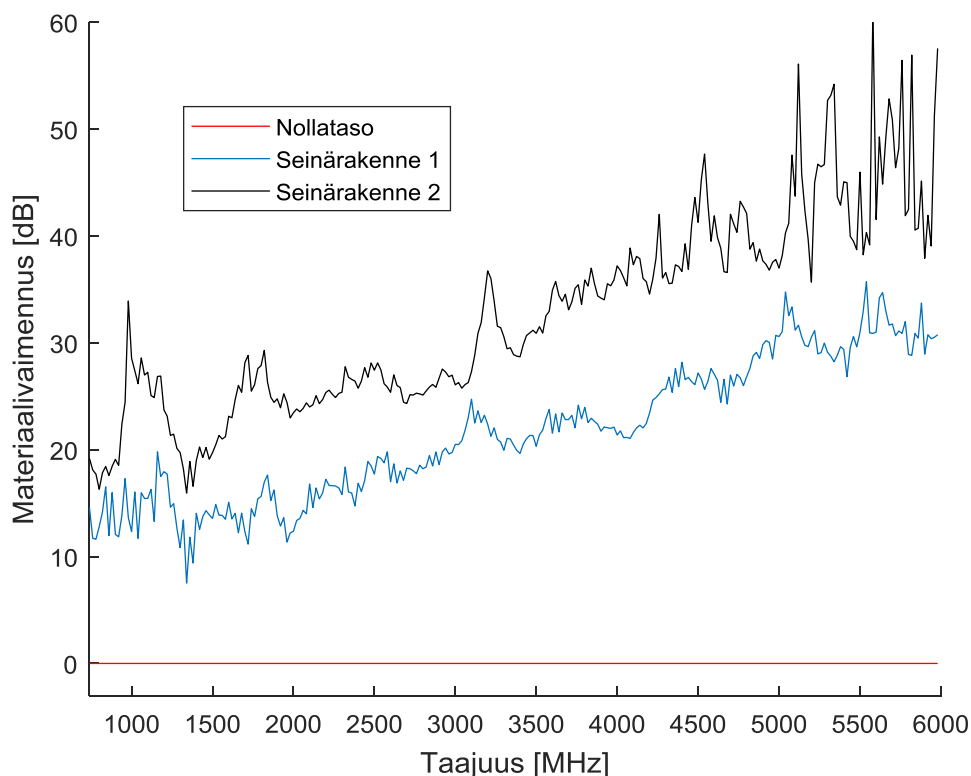
Myös testikopin 8 ulkoseinärakenne koostuu betonisandwich-elementeistä. Ulkoseinän kerrospaksuudet ovat myös yhtä suuret kuin testikopissa 7, mutta erotuksena testikoppien välillä on se, että testikopissa 8 ei ole ollenkaan ilmarakoa ulkokuoren ja eriste-kerroksen välillä. Tämän takia ulkoseinärakenteen kokonaispaksuus on 3 senttimetriä ohuempi, kokonaispaksuuden ollessa 25 senttimetriä. 75 millimetriä paksun teräsbetonisen sisäkuoren vuoksi myös testikoppi 8 vastaa ei-kantavaa seinärakennetta.

Eri mittauskertojen tuloskäyrät ovat huomattavasti yhteneväisempiä, kuin testikopin 7 tapauksessa. Erityisesti matalilla, alle 1,5 GHz:n taajuuksilla esiintyy kuitenkin erittäin voimakkaita vaihteluita RF-vaimennuksessa. Suuremmilla taajuuksilla puolestaan paikallinen vaihtelu on merkittävästi vähäisempää. Taajuuden kasvaessa on kuitenkin tämänkin rakenteen kohdalla näkyvissä selkeä trendi, jossa RF-vaimennukset keskimäärin kasvavat taajuuden kasvaessa.

Hieman ohuemmasta rakenteesta huolimatta, testikopin RF-vaimennus on kuitenkin koko mittauskaistalla keskimäärin 0,3 desibeliä suurempi, keskiarvon RF-vaimennuksen ollessa 13,1 desibeliä. Tästä voidaan päätellä, ettei ilmaraolla ole ainakaan keskimääräisesti merkittävää vaikutusta kokonaisen rakenteen RF-vaimennukselle.

Molempien betonisandwich-rakenteiden kohdalla on havaittavissa merkittäviä vaihteluita paikallisesti pienellä taajuuskaistalla RF-vaimennusten suuruusluokassa. Erityisesti pienillä taajuuksilla testikopin 8 mittaustuloksissa on nähtävissä yhden mittauspisteen eli

20 MHz:n välillä jopa yli 10 desibelin muutoksia. Esimerkiksi mittauksen 3 RF-vaimennus on 1120 MHz:n taajuudella 8,8 desibeliä, kun se on 1140 MHz:n kohdalla jo 25,4 desibeliä. Tämä voi asettaa haasteen laajakaistaista teknologiaa käyttäville verkkoteknologioille, sillä esimerkin kaltaisessa tilanteessa käytettävissä oleva koherenssi kaistanleveys on hyvin pieni. Tällaisissa tilanteissa matkaviestinverkkoa käyttävien laitteiden olisi pystyttävä poistamaan väliaikaisesti käytöstä taajuudet, joilla mahdolliset yhteysvirheet ovat todennäköisiä.



**Kuva 25:** Uusien seinärakenteiden 1 ja 2 RF-vaimennukset

Kuvassa 25 on tulokäyrät kahden erilaisen uuden kerrostalon ulkoseinärakenteiden aiheuttamista RF-vaimennuksista. Molemmat ulkoseinärakenteista ovat kantavia, niiden sisäkuorien ollessa 150 millimetriä paksua teräsbetonia. Myös eristekerros on molempien rakenteiden kohdalla samanlainen eli 220 millimetriä mineraalivillaa. Eroa kuitenkin löytyy ulkoseinärakenteiden ulkokuorista, joka seinärakenteessa 1 on toteutettu 10 millimetriä paksuna ohutrappauksena, kun taas seinärakenteessa 2 koostuu 70 millimetriä paksusta teräsbetonista. Näin ollen kyseisten ulkoseinärakenteiden kokonaispaksuudet ovat seinärakenteelle 1 380 millimetriä ja seinärakenteelle 2 440 millimetriä.

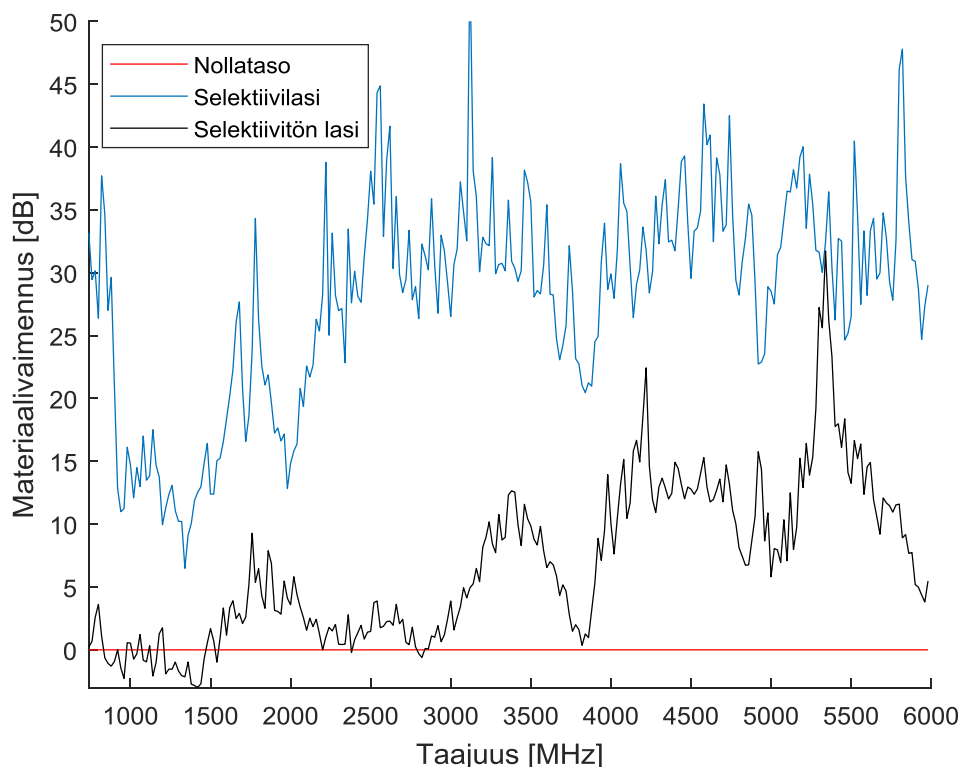
Molempien seinärakenteiden aaltomuodot ovat hyvin samankaltaiset toistensa kanssa. RF-vaimentuminen tapahtuu varsin lineaarisesti mitatulla kaistalla, muutamia isompia vaihteluita lukuun ottamatta. Nämä vaihtelut sijoittuvat lähinnä matalille, alle 1,5 GHz:n sekä korkeammille, yli 4,5 GHz:n taajuuksille. Myös noin 3 GHz:n taajuuden kohdalla on molemmilla seinärakenteille nähtävissä vaimennuspiikki, joka on kuitenkin selkeästi

voimakkaampi seinärakenteen 2 kohdalla. Seinärakenteen 2 kohdalla on myös havaittavissa voimakasta paikallista vaihtelua 5 ja 6 GHz:n välillä.

Varsin pienistä rakenteellisista eroista huolimatta, RF-vaimennuksessa on kuitenkin selvä ero kahden eri seinärakenteen välillä. Koko mittauskaistanleveydellä 740 MHz – 6 GHz, seinärakenteen 1 aiheuttama RF-vaimennus oli keskimäärin 21,6 desibeliä, kun se taas seinärakenteen 2 kohdalla oli 32,5 desibeliä. Molempien seinärakenteiden kohdalla on selvästi todettavissa kasvava vaimennus, kun käyttöön otetaan korkeampia taajuuksia käyttäviä matkaviestinverkkoja.

Seinärakenne 2 onkin kaikista mitatuista rakenteista kaikista eniten RF-vaimennusta aiheuttava. Näiden kahden rakenteen vaimentavuudessa on siis noin 11 desibelin ero käytetyllä mittauskaistalla. Rakenteiden kohdalla on myös varmasti eroavuutta rakennusteknisestä näkökulmasta, mutta pelkästään RF-vaimennuksen osalta ohutrapattu ulkokuori on selkeästi teräsbetonista ulkokuorta parempi ratkaisu.

Merkittävin ero näillä kahdella nykyaikaista rakennustapaa edustavilla seinärakenteilla verrattuna testikopeissa tehtyihin mittauksiin on se, että jo mitatun taajuuskaistan alkuvaiheessa molempien rakenteiden RF-vaimennukset ovat yli 10 desibeliä, seinärakenteen 2 kohdalla ne ovat jopa lähes 20 desibeliä. Ainoastaan kuvassa 17 esitellyn testikopin 1 tulokset ovat matalien taajuuksien kohdalla RF-vaimennuksiltaan lähellä näiden kahden rakenteen aiheuttamia vaimennuksia. Testikoppi 1 oli mukana mittauksissa äärimmäisenä esimerkkinä siitä, kuinka metallipintaiset materiaalit vaimentavat RF-signaaleja voimakkaasti.



**Kuva 26:** Selektiivikalvon vaikutus ikkunoiden RF-vaimennukseen

Kuvassa 26 on esitelty kahden erilaisen ikkunarakenteen aiheuttamat RF-vaimennukset. Molemmat kuvassa esiteltyjen tulosten ikkunarakenteista ovat kolmikerroksisia lasirakenteita. Mitattujen ikkunoiden kokonaisrakenteen koostuu ulko- ja sisäpuitteista. Ulkopuitteessa on yksinkertainen pinnoittamaton lasi. Molempien lasien sisäpuitteissa on kaksikerroksinen lasirakenne, sillä erotuksella, että toisessa lasirakenteesta toinen sisäpuitteen lasista on korvattu selektiivilasilla, joka tarkoittaa ikkunassa olevan metallipinnoite. Molempien lasirakenteiden kokonaispaksuus on 170 millimetriä.

Erityisesti matalilla taajuuksilla selektiivilasittoman ikkunarakenteen RF-vaimennukset ovat niin matalia, että sopivilla heijastuksilla sekä suuntaavuudella vastaanotettu signaali näyttää jopa vahvistuvan lasirakenteesta. Sama ilmiö oli havaittavissa kuvassa 13, jossa mittaus tuloksessa esitetään erilaisia eristemateriaaleja. Ikkunarakenteissa ei ole nähtävissä lähes ollenkaan samanlaista lineaarista vaimentumista, kuin mitä seinärakenteiden kohdalla. Todennäköisesti tämä johtuu siitä, että yksittäiset lasit ovat vain muutama millimetrin paksuisia, jolloin ne eivät suoranaisesti vaimenna RF-signaalia samalla tavoin, kuin huomattavasti paksummat ulkoseinärakenteet. Ikkunarakenteiden kohdalla suurempi vaikutus esiintyy todennäköisesti erilaisilla kerrosväleillä, jotka vaikuttavat signaalin heijastuksiin rakenteen sisällä. On kuitenkin huomioitava, että mittauskäyrien osoittamat tulokset pätevät ainoastaan mittauksissa käytetyillä ikkunarakenteilla. Tästä

johtuen esimerkiksi selektiivikalvottoman ikkunarakenteen mittauskäyrässä esiintyvä hyvin matala vaimennus noin 3,8 GHz:n kohdalla, ei välttämättä esiintyisi toisenlaisella ikkunarakenteella, jossa käytetään samanlaisia lasveja.

Kuvasta 26 on myös jälleen nähtävissä, kuinka merkittävän eron metallipinnoitteet tekevät RF-vaimennukseen. Kahden mitatun ikkunarakenteen ainoana eroavaisuutena oli ainoastaan yksi selektiivilasi yhteensä kolmesta lasista muodostuvassa rakenteessa. Selektiivilasittoman ikkunarakenteen aiheuttama RF-vaimennus oli keskimäärin ainoastaan 6,7 desibeliä koko mittauskaistalla. Vastaava lukema yhdellä selektiivilasilla varustetulla ikkunarakenteella oli puolestaan 28,2 desibeliä, mikä tarkoittaa, että ero näiden kahden ikkunarakenteen välillä on mittausten mukaan 21,5 desibeliä kyseisellä taajuuskaistalla.

Selektiivilaseja käytetään parantamaan muun muassa ikkunarakenteiden U-arvoa. Selektiivilasein varustettujen ikkunoiden käyttö yhdistettynä kuvan 25 kaltaisiin nykyaikaisiin ja energiatehokkaisiin seinärakenteisiin saa aikaan sen, että energiatehokkaiden kerrostalojen ulkokuoret eivät sisällä välttämättä mitään osaa, josta RF-signaalit pääsisivät helposti läpäisemään rakennusten ulkokuoren. Tämä saa aikaan kuuluvuusongelmia kerrostalojen sisällä, kun tukiasemat ovat rakennuksen ulkopuolella ja mobiililaitteet sisäpuolella.

## 5. MITTAUSTULOSTEN YHTEENVETO

Tässä luvussa käydään läpi edellisessä luvussa esitettyjen RF-mittausten tuloksia. RF-vaimennusmittausten tuloksia käsitellään erityisesti tällä hetkellä Suomessa käytössä olevilla matkaviestinverkkojen taajuuskaistoilla sekä nykyisiä taajuuskaistoja korkeammilla taajuuskaistoilla. Näistä nykyisiä taajuuskaistoja korkeammista taajuuskaistoista 5G-verkkoihin tulee käyttöön ainakin 3,5 GHz:n taajuuskaista, jonka huutokauppa järjestetään syyskuun 2018 aikana. Jäljempänä esitettävissä taulukoissa olevat vaimennusarvot ovat laskettu keskimääräisesti kunkin matkaviestintaajuuskaistan koko käytössä olevalla taajuusalueella, sisältäen tukiasemien lähetys- ja vastaanottoaikat. 5000 ja 6000 MHz:n taajuuskaistat ovat lisätty mielenkiinnon vuoksi ja ne saattavat olla käytössä myös 5G-verkoissa tulevaisuudessa.

Käytössä olevista matkaviestintaajuuskaistoista ainoastaan 450 MHz:n taajuuskaista on jätetty taulukoista pois, sillä se ei ollut mittauksissa käytetyllä taajuusalueella. Myös 700 MHz:n matkaviestintaajuuskaista on taulukon laskelmissa aloitettu vasta 740 MHz:stä, todellisen 700 MHz:n sijaan. Jäljempänä esitettyjen taulukoiden 8, 9 ja 10 laskelmissa käytetyt taajuuskaistat ovat seuraavat; (700 MHz = 740 – 800 MHz), (800 MHz = 800 – 840 MHz), (900 MHz = 880 – 960 MHz), (1800 MHz = 1720 – 1880 MHz), (2000 MHz = 1900 – 2160 MHz), (2600 MHz = 2500 – 2680 MHz), (3500 MHz = 3420 – 3800 MHz), (5000 MHz = 4960 – 5060 MHz), (6000 MHz = 5880 – 5980 MHz). Taulukoissa keskiarvo tarkoittaa mittauskaistan vaimennuskeskiarvoa kyseisellä mittauskohteella.

### 5.1 Yksittäiset materiaalinäytteet

Tässä alaluvussa käydään läpi yksittäisten materiaalien RF-vaimennukset edellä mainituilla taajuuskaistoilla. Yhteensä eri materiaaleilla suoritettuja mittauksia on 11, joista samaa betonikappaletta on mitattu kahdesti eli varsinaisia mittaustuloksia on yhteensä 12 kappaletta. Kaikista mittaustuloksista on otettu keskiarvot koko mittauskaistalta, jotka ovat nähtävissä taulukon oikeinpuoleisimmassa sarakkeessa. Tämän lisäksi kaikkien taajuuskaistojen keskimääräinen vaimennus on laskettu kaikista alimmaiselle riville. Kaikkien materiaalinäytteiden tarkat tiedot ovat nähtävissä taulukosta 5.

**Taulukko 8:** Yksittäisten materiaalien vaimennuksia desibeleinä eri taajuuskaistoilla

Materiaali	Taajuuskaista [MHz]									
	700	800	900	1800	2000	2600	3500	5000	6000	ka.
Alum. PU-eriste	20,1	22,6	27,5	34,7	34,3	34,5	39,3	41,2	46,0	37,6
Betoni kuiva	3,2	2,5	3,6	1,6	2,9	2,1	3,2	2,8	3,0	2,6
Betoni märkä	5,3	4,3	3,6	5,2	5,0	5,7	7,5	12,5	14,8	7,7
EPS-eriste	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
Lasivilla	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
Mineraalivilla	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2
Ohutrappaus 1	1,2	1,1	2,1	2,6	2,7	2,4	1,7	1,8	2,3	1,9
Ohutrappaus 2	8,9	8,1	7,1	8,2	8,2	7,2	9,0	11,7	11,3	9,4
Paksurappaus 1	1,8	1,3	2,7	1,7	1,5	0,9	2,1	1,7	4,7	2,0
Paksurappaus 2	9,6	11,3	10,3	4,1	3,8	3,7	1,6	2,3	5,8	3,5
Rappausverkko 1	11,5	13,2	12,4	9,0	7,7	6,1	4,2	2,5	2,2	5,6
Rappausverkko 2	11,3	13,2	11,8	7,3	6,7	5,3	3,1	1,8	1,6	4,6
Keskiarvo	6,1	6,5	6,8	6,2	6,1	5,7	6,0	6,5	7,7	6,3

Taulukosta 8 voidaan huomata samoja ilmiöitä, joita käytiin jo osittain läpi luvussa 4.4.1. Huomioitavaa kuitenkin on, että mitattujen yksittäisten materiaalien kohdalla ei ole taulukon taajuuskaistojen perusteella kovinkaan merkittävää vaikutusta, vaikka matkaviestinverkkojen taajuuksia tulnaisiin kasvattamaan tulevaisuudessa. Todennäköisesti taajuuden kasvattamisen vaikutus myös näkyisi selvemmin, mikäli näytekappaleet olisivat olleet yhtä paksuja, kuin oikeissa ulkoseinäarakenteissa esiintyvät materiaalikerrokset. Tästäkin huolimatta kaikista korkeimmin RF-vaimentava taajuuskaista on 6 GHz:n kaista. Tämä vielä siitäkkin huolimatta, että taulukossa on useampi mittaustulos materiaaleista, joissa on metallinen rappausverkko, jotka siis toimivat ylipäästösuotimina.

Yksittäisten materiaalinäytteiden kohdalla, selvästi keskimääräisesti kaikista suurimman RF-vaimennuksen aiheuttaa alumiinipintainen PU-eriste. Toiseksi suurin RF-vaimennus on puolestaan 30 millimetriä paksulla ohutrappauksella. Siitä voidaan vetää johtopäätös, että ohutrappaus on suhteessa vaimentavampaa kuin paksurappaus. Johtuen huomattavasti ohuemmista kerrospaksuuksista ja metallisen rappausverkon puutteesta, on ohutrappaus kuitenkin todellisissa kerrostalorakenteissa parempi ratkaisu RF-vaimennuksen kannalta, erityisesti matalien matkaviestintaajuuskaistojen osalta. Myös betonin kastumisella näyttää olevan merkittävä vaikutus RF-vaimennukseen. Tämä on nähtävissä

erityisesti korkeammilla taajuuksilla, joilla märän ja kuivan betonin erotus on tietyillä taulukon taajuuskaistoilla jopa yli 10 desibeliä.

## 5.2 Ulkoseinärakenteet

Kokonaisilla ulkoseinärakenteille tehtyjen mittausten tulokset ovat esitetty alla olevassa taulukossa 9 samaan tapaan, kuin aiemman alaluvun yksittäisten materiaalien kohdalla. Varsinaisia ulkoseinärakenteita mitattiin yhteensä kymmenen erilaista, joista kahdeksan olivat Tampereen teknillisen yliopiston alueella mitattuja testikoppeja sekä kaksi vasta rakennusvaiheessa olevan modernin kerrostalon ulkoseinärakenteita. Ulkoseinärakenteiden lisäksi mitattiin samalla mittauskaistalla myös kaksi erilaista ikkunarakennetta, toinen yhdellä selektiivilasilla varustettu ja toinen kokonaan ilman selektiivilaseja, molemmissa mitatuissa ikkunoissa oli yhteensä 3 lasikerrosta. Mitatut rakenteet on esitelty kerroksittain taulukoissa 6 ja 7.

**Taulukko 9:** *Ulkoseinärakenteiden RF-vaimennuksia desibeleinä eri taajuuskaistoilla*

Rakenne	Taajuuskaista [MHz]									
	700	800	900	1800	2000	2600	3500	5000	6000	ka.
Testikoppi 1	18,4	17,3	19,0	31,0	30,6	29,7	29,1	34,9	33,0	30,4
Testikoppi 2	6,2	5,5	7,4	7,9	12,2	8,9	17,0	17,0	17,4	14,3
Testikoppi 3	2,9	4,6	5,7	9,3	10,7	12,2	15,3	22,6	21,0	14,5
Testikoppi 4	2,7	4,0	4,3	13,4	12,7	19,4	31,7	35,5	33,9	23,7
Testikoppi 5	3,3	1,3	2,8	10,8	8,0	11,1	28,2	17,4	19,9	15,7
Testikoppi 6	4,4	4,6	8,9	8,4	10,0	13,5	16,5	30,1	32,7	18,6
Testikoppi 7	5,1	3,6	5,0	14,0	11,8	12,0	12,5	16,5	18,6	12,8
Testikoppi 8	2,7	9,9	8,3	7,5	8,1	9,8	13,7	17,6	18,3	13,1
Seinärakenne 1	12,6	14,5	14,2	15,2	13,9	18,3	22,3	31,3	30,8	21,6
Seinärakenne 2	18,3	17,5	20,6	26,8	24,1	26,4	33,1	38,7	45,5	32,5
Ikkuna 1	30,9	32,9	17,1	22,8	18,7	37,3	29,1	28,7	28,6	28,2
Ikkuna 2	1,2	1,4	0,7	5,7	3,3	2,5	6,7	8,1	5,3	6,7
Keskiarvo	9,1	9,8	9,5	14,4	13,7	16,8	21,3	24,9	25,4	19,3

Alaluvussa 4.4.2 esiteltyjen kuvaajien tiedot on tiivistetty taulukkoon 9 taajuuskaistojen mukaisesti. Kun ikkunarakenteet jätetään pois tarkasteluista, on taajuuden nostamisella todella selvästi nähtävissä oleva vaikutus rakenteiden aiheuttamiin RF-vaimennuksiin. Keskimääräiset vaimennukset kasvavat lähes lineaarisesti desibelitasolla. On kuitenkin huomioitava, että ainoastaan seinärakenteet 1 ja 2 vastaavat nykyaikaisia kerrostaloja, jotka täyttävät tällä hetkellä voimassa olevat U-arvon eli lämmönläpäisykertoimen vaatimukset. Tämän lisäksi seinärakenteet 1 ja 2 ovat kantavia seiniä, mikä tarkoittaa niiden sisäkuoren teräsbetonin olevan 150 millimetriä paksua, kun taas testikoppien seinät ovat

suunniteltu kantamaan huomattavasti pienempiä kuormia. Tästä johtuen kaikkien testikoppien tulokset eivät ole suoraan verrattavissa seinärakenteiden 1 ja 2 tuloksiin. Vaikka testikopit ovatkin ulkoseinien ja varsinkin eristekerroksen osalta nykyisiä kerrostaloja ohuempia, pystytään niistä saatujen tulosten perusteella kuitenkin päättelemään, millaisia vaikutuksia matkaviestinverkoissa käytettyjen taajuuksien saa aikaan rakennusten RF-vaimennuksiin.

Suurimman keskimääräisen RF-vaimennuksen aiheutti seinärakenne 2, jonka RF-vaimennus oli keskimääräisesti 32,5 desibeliä mittauksissa käytetyllä 740 – 6000 MHz:n taajuuskaistalla. Kyseinen desibeliarvo tarkoittaa, että seinän läpäisi mittauksissa hieman yli puoli tuhannesosaa seinään kohtisuorassa lähetetyn RF-signaalin tehosta. Myös seinärakenteen 2 sekä testikoppien 1 ja 4 keskimääräiset vaimennukset ylittävät 20 desibelin rajan. Kuten jo aiemmin mainittiin, ei testikoppi 1 kuitenkaan edusta tavallista kerrostalorakentamista, vaan enemmän pientalotyypistä rakentamista. Testikopin 4 ulkoseinä-rakennetta on kuitenkin käytetty jo hyvinkin vanhoissa, 50-luvulla rakennettujen kerrostalojen ulkoseinissä. Tämän vuoksi on todettava, ettei kuuluvuusongelmat korkeammilla taajuuksilla ole välttämättä pelkästään uusien energiatehokkaiden kerrostalojen ongelma. Taulukon 9 perusteella, testikopin 4 RF-vaimennus kasvaakin hyvin voimakkaasti siirryttäessä tällä hetkellä käytössä olevista matkaviestintaajuuskaistoista tulevien 5G-verkkojen taajuuskaistoihin, sillä esimerkiksi 2600 MHz:n ja 3500 MHz:n taajuuskaistojen välillä testikopin 4 RF-vaimennus kasvaa yli 12 desibeliä.

Kuten jo alaluvussa 4.4.2 todettiin, niin matalilla alle 1 GHz:n taajuuksilla testikoppien vaimennukset ovat matalat. Kaikkien muiden testikoppien, paitsi testikopin 1 RF-vaimennukset ovat alle 10 desibeliä matalilla taajuuksilla. Näillä taajuuksilla erot ovat suhteessa kaikista suurimmat seinärakenteiden 1 ja 2 sekä testikoppien välillä. Jos verrataan 3,5 GHz:n taajuuskaistan käyttöönottoa, niin erityisesti testikopeilla 4 ja 5 sekä seinärakenteella 2 erot RF-vaimennuksissa jo käytössä oleviin taajuuskaistoihin ovat suuret.

Keskimääräiset erot RF-vaimennuksissa yksittäisillä taajuuskaistoilla ovat selkeämmät, kuin yksittäisten materiaalien kohdalla. Eri taajuuskaistojen RF-vaimennuksen käyttäytyminen ulkoseinä-rakenteilla on oletetunlainen eli ulkoseinä-rakenteiden RF-vaimennukset kasvavat taajuuden kasvamisen mukana. Ainoastaan ikkunoiden kohdalla RF-vaimennukset eivät ole samalla tavalla taajuusriippuvaisia, vaan ikkunoiden kohdalla paikalliset vaihtelut vaikuttavat enemmän, eikä niiden taajuusvasteen trendi ole laskeva, kuten muiden rakenteiden kohdalla.

Ikkunarakenteiden RF-vaimennuksissa on kuitenkin havaittavissa mittauksen perusteella, kuinka merkittävä vaikutus yhdenkin metallikerroksen lisäämisellä on RF-vaimennukseen. Keskimäärin näiden kahden ikkunan keskimääräinen RF-vaimennuksen ero koko mittauskaistalla oli yli 20 desibeliä. Tämän lisäksi taulukon 9 yksittäisilläkin taajuuskaistoilla RF-vaimennuksen ero näiden kahden ikkunan välillä oli vähintäänkin yli 15 desibeliä. Selektiivilasillisten ikkunoiden kohdalla onkin huomioitavaa se, että niiden

aiheuttama RF-vaimennus vaikuttaisi olevan todella korkea jo matalillakin taajuuskais-toilla.

Kokonaisuudessaan on kuitenkin hyvin selvää, että erityisesti kokonaisten ulkoseinä-rakenteiden aiheuttama RF-vaimennus tulee todennäköisesti merkittävästi kasvamaan, kun matkaviestinverkot alkavat käyttää korkeampia taajuuksia. Tällä hetkellä Suomessa käytössä olevista matkaviestinverkon taajuuskaistan korkeimman eli 2600 MHz:n ja tu-levan 5G-verkon ensimmäisenä käyttöön tulevan 3500 MHz:n taajuuskaistan välillä oli mitatuilla ulkoseinä-rakenteilla eroa RF-vaimennuksissa lähes 5 desibeliä. Mikäli myö-hemmässä tulevaisuudessa otetaan käyttöön vielä tätäkin korkeampia taajuuskaistoja, tu-lee kuuluvuusongelmat hyvin todennäköisesti kasvamaan entisestään rakennusten, kuten kerrostalojen sisällä. Tämä on otettava tarkoin huomioon suunniteltaessa, kuinka matka- viestinverkkojen kuuluvuus rakennusten sisällä saadaan toimivaksi.

## 6. RATKAISUEHDOTUKSET

Mittaustulosten perusteella on selvää, että kerrostalojen ja todennäköisesti myös muiden rakennusten ulkokuorien aiheuttama RF-vaimennus tulee kasvamaan, kun matkaviestinverkoissa otetaan käyttöön korkeampia taajuuksia. Tästä johtuen, yksi tämän diplomityön keskeisimmistä tavoitteista on pyrkiä tarjoamaan ratkaisuehdotuksia kuuluvuusongelman pienentämiseksi, mittauksissa tehtyjen havaintojen perusteella. Ennen kaikkea olisi kuitenkin mahdollisesti järkevää, että myös tulevaisuudessa O2I-yhteydet eli rakennusten ulkokuoren läpi tapahtuvassa tiedonsiirrossa käytettäisiin mahdollisimman matalia taajuuksia.

Mikäli kuitenkin korkeampia taajuuksia otetaan käyttöön, täytyisi löytää ratkaisu, millä kasvava RF-vaimennus saataisiin paikattua. Myöhemmin tässä luvussa esiteltävissä mahdollisissa ratkaisuehdotuksissa keskitytään lähinnä diplomityössä käsiteltyihin aihealueisiin, minkä vuoksi esimerkiksi radioteknisen suunnittelun kannalta tärkeitä asioita, kuten tukiasemien tai aktiivisten toistimien verkkotopologioihin tai niiden teknisiin ominaisuuksiin, vaikka myös niillä on merkittävä rooli kuuluvuusongelmien takana.

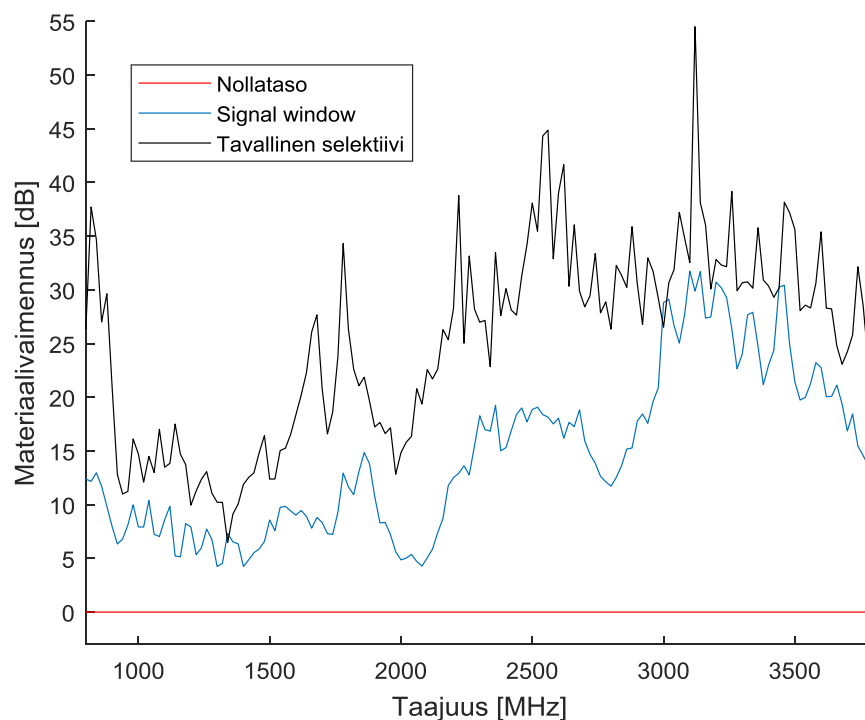
### 6.1 RF-aukkojen suunnittelu ja simulointi

Mittausten perusteella uusissa energiatehokkaissa kerrostaloissa vahvat ulkoseinärakenteet sekä selektiivilasilliset ikkunat vaimentavat molemmat voimakkaasti RF-signaaleja. Tästä johtuen RF-signaaleilla ei ole mitään helppoa reittiä läpäistä rakennusten ulkokuoria ilman, että ulkokuoren läpäisevästä signaalista vaimentuisi suurin osa tehosta pois.

Sen vuoksi olisi järkevää suunnitella rakennuksiin RF-aukot, josta signaalit pääsisivät läpäisemään helposti ulkokuoren, erityisesti mikäli tiedonsiirto kerrostalossa toteutetaan ulkoa sisälle ja toisinpäin. Kaikista luontevin paikka RF-aukkojen toteuttamiseen olisi todennäköisesti rakennusten ikkunoissa, sillä ulkoseinien kerrosrakenteisiin on todennäköisesti hankalampi tehdä suurempia muutoksia niiden kantavuuden ja muiden rakennusteknisten ominaisuuksien vuoksi. Edellä mainitun lisäksi, ikkunoiden vaihtaminen onnistuu myös varsinaisen rakennusvaiheen jälkeen.

Kuvasta 26 ja taulukosta 9 voidaan myös todeta, että ikkunoilla on potentiaalia toimia mahdollisena RF-aukkoja, sillä selektiivilasittoman ikkunarakenteen aiheuttama RF-vaimennus on merkittävästi pienempi kuin minkään muun mitatun ulkoseinärakenteen. Metalliset selektiivikalvot on lisätty ikkunalaseihin parantamaan niiden lämmöneristyskykyä, mutta samalla ne kuitenkin heijastavat tehokkaasti myös RF-signaaleja, joka aiheuttaa suurimmalta osin ikkunoiden RF-vaimennuksesta. Yhtenä ongelmana RF-aukoissa on niiden koko, joka on riippuvainen käytettyyn taajuuskaistaan aallonpituuden kautta.

Kaupallisille markkinoille onkin alkanut ilmestyä ikkunavalmistajilta tuotteita, joiden RF-vaimennusta on pyritty pienentää erilaisilla keinoilla. Tätä diplomityötä varten avautui tilaisuus päästä mittaamaan yhtä jo markkinoilla ikkunatuotetta, joka on suunniteltu läpäisemään Suomessa käytössä olevien matkaviestinverkkojen käyttämiä taajuuksia. Kyseessä on Lammin Ikkunoiden Signal Window, joka on suunniteltu toimimaan 800 – 2600 MHz:n taajuuskaistalla, jolla myös kyseisen ikkunan RF-mittaus suoritettiin. Kyseiset mittaukset suoritettiin kenttäolosuhteissa. Lammin Ikkunoiden Signal Windowissa olevan selektiivilasin pinnoitetta on muokattu siten, että se läpäisi paremmin RF-signaaleja. Siitä huolimatta, kyseisen ikkunan lämmöneristysominaisuudet ovat verrattavissa tavallisiin selektiivilasillisiin ikkunoihin. Mittauksissa käytettyjen ikkunoiden rakenteet olivat muilta, paitsi juuri lasien kohdalta täysin toisiaan vastaavat.



**Kuva 27:** Lammin Ikkunoiden Signal Windowin ja tavallisen selektiivilasillisen ikkunan RF-vaimennuksen vertailu

Kuvasta 27 on nähtävissä Signal Windowin ja tavallisen selektiivilasillisen RF-vaimennukset 800 – 3800 MHz:n taajuuskaistalla. Kyseinen taajuuskaista kattaa lähes kaikki tällä hetkellä Suomessa kaupallisessa käytössä olevien matkaviestinverkkojen taajuudet ja 5G-verkkojen ensimmäisessä vaiheessa tulevan 3,5 GHz:n taajuuskaistan. Kuvasta voidaan nähdä suoraan, että tavallisella selektiivilasilla varustetun ikkunan RF-vaimennus on korkeampi kaikilla mittauksissa käytetyillä taajuuksilla.

**Taulukko 10:** *Tavallisen selektiivilasi- ja Signal Window-ikkunan RF-vaimennukset desibeleinä matkaviestinverkon taajuuskaistoilla*

Rakenne	Taajuuskaista [MHz]						ka.
	800	900	1800	2000	2600	3500	
Ikkuna 1	32,9	17,1	22,8	18,7	37,3	29,1	25,3
Signal Window	12,5	7,8	11,2	6,5	18	20,6	14,7

Taulukossa 10 on eritelty molempien ikkunoiden RF-vaimennukset useilla tällä hetkellä käytössä olevissa matkaviestinverkkojen käyttämällä taajuuskaistalla. Vaimennukset on laskettu samalla tavalla kuin taulukoissa 8 ja 9. Vaimennusero näiden kahden ikkunarakenteen välillä on merkittävä. Keskimääräinen ero RF-vaimennuksessa koko mittauskaistalla on noin 11 desibeliä. Näiden mittausten perusteella voidaan todeta Signal Windowin olevan yksi mahdollinen ratkaisu kuuluvuusongelmaan helpottamiseksi. Huomioitavaa kuitenkin on, että tässä työssä tutkittiin ainoastaan rakenteiden aiheuttamia RF-vaimennuksia eri taajuuksilla, eikä esimerkiksi verkkoteknisiä asioita otettu huomioon.

Kaikkien diplomityössä tehtyjen mittaustulosten perusteella oli vaikea vetää johtopäätöksiä erilaisten kerrosrakenteiden aiheuttamista RF-vaimennuksista ja vaimennusten taustasyistä. Tämän takia simulaatioiden avulla voisi olla kannattavaa mallintaa, kuinka erilaiset ja eri paksuiset kerrosrakenteet aiheuttavat RF-vaimennuksen. Lähes kaikkien mitattujen rakenteiden kohdalla oli nähtävissä paikallisia minimi- ja maksimivaimennuksia. Jos esimerkiksi nämä minimikohdat saataisiin simulaatioiden avulla sovitettua matkaviestinverkkojen käyttämille taajuuskaistoille, voisi se puolestaan vähentää kerrostaloissa esiintyviä kuuluvuusongelmia.

Tämän lisäksi simulaatio- ja etenemismalleilla voisi olla mahdollista selvittää erilaisten passiiviantennien vaikutusta RF-signaalien etenemiselle ulkokuoren läpi. Passiiviantenneilla tarkoitetaan tässä yhteydessä antenniä, jotka ilman ulkoista jännitettä siirtävät RF-signaalin ulkokuoren lävitse. Käytännössä passiiviset antennit toteutetaan laittamalla rakennuksen ulko- ja sisäkuoreen antennit, jotka yhdistetään keskenään johtimella.

## 6.2 Sisäantenniverkot

Sisäantenniverkkojen asentaminen kerrostaloihin voisi olla yksi potentiaalinen ratkaisu kuuluvuusongelman ratkaisuun. Tämän diplomityön puitteissa tehdyissä mittauksissa ilmeni, että erityisesti uusien kerrostalojen ulkokuoret eli ulkoseinä- sekä ikkunarakenteet vaimentavat molemmat tehokkaasti RF-signaaleja. Tästä syystä sisäantenniverkoilla voitaisiin välttää ulkokuorien aiheuttama RF-vaimennus.

Tässä diplomityössä ei perehdytty kerrostalojen sisärakenteisiin, kuten seiniin ja oviin. Sen vuoksi on mahdollista, että myös uusien kerrostalojen sisärakenteiden aiheuttamat

RF-vaimennukset voivat myös olla merkittäviä. Tästä syystä sisäantenniverkkojen suunnittelu tulisi tehdä huolellisesti, jotta verkon peittoalueella saadaan katettua kaikki tarvittavat tilat. Sisäantenniverkkojen toteutus on kuitenkin suhteellisen kallista, mikä onkin ratkaisevassa asemassa, kun päätöstä mahdollisen sisäantenniverkon toteuttamisesta lähdetään tekemään.

## 7. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, kuinka tulevien 5G-verkkojen nykyistä korkeammat taajuudet vaikuttavat matkaviestinverkkojen kuuluvuuteen kerrostaloissa. Tällä hetkellä tiedetään, että Suomessa kaupalliseen käyttöön tulevissa 5G-verkoissa käytetään todennäköisesti ainakin 3,5 GHz:n taajuuskaistaa, jonka käyttöoikeuksista järjestettiin huutokauppa vuoden 2018 aikana. Tavoitteen saavuttamiseksi suoritettiin mittauskampanja, jossa tutkittiin yksittäisten rakennusmateriaalien sekä kokonaisten rakenteiden aiheuttamia RF-vaimennuksia. Yksittäisiä materiaaleja mitattiin yhteensä 11 kappaletta, minkä lisäksi erilaisia kerrosrakenteita mitattiin yhteensä 12 kappaletta, joista kymmenen olivat ulkoseinärakenteita ja loput kaksi olivat kolmikerroksisia ikkunarakenteita. Tois-taiseksi on julkaistu varsin niukasti tutkimustuloksia vastaavanlaista mittauksista, joissa tutkitaan erityisesti myös kokonaisia kerrosrakenteita.

Diplomityötä varten suoritettujen mittausten perusteella onkin varsin selvää, että ulkoseinärakenteiden aiheuttamat RF-vaimennukset tulevat kasvamaan, kun matkaviestin-verkoissa otetaan käyttöön korkeampia taajuuksia. Taulukossa 9 on listattu kaikkien mitattujen rakenteiden RF-vaimennukset taajuuskaistoineen. Esimerkiksi 3,5 GHz:n taajuuskaistalla kaikkien mitattujen rakenteiden keskimääräinen RF-vaimennus on yli 20 desibeliä, mikä on selvästi enemmän kuin tällä hetkellä matkaviestinverkoissa käytössä olevien taajuuskaistojen keskimääräiset RF-vaimennukset. Kasvat RF-vaimennukset täytyy ottaa ehdottomasti huomioon, kun 5G-verkkojen radioteknistä toteutusta suunnitellaan, jotta kuuluvuusongelmat eivät pahentuisi entisestään korkeampien taajuuksien myötä. Tässä diplomityössä on tutkittu pelkästään kerrostalojen rakenteiden ja materiaalien vaikutusta kuuluvuuteen, mutta vähintään yhtä tärkeää olisi myös pyrkiä selvittämään radioteknisen suunnittelun vaikutusta kuuluvuuteen kerrostalojen sisällä.

Metallisilla pinnoilla on mittausten perusteella hyvin merkittävä vaikutus RF-vaimennuksen suuruuteen. Tulosten perusteella voidaan todeta esimerkiksi, että yksittäisen 30 millimetriä paksun alumiinipintaisen polyuretaanieristelevyn RF-vaimennus on huomattavasti suurempi kuin useimpien mitattujen kokonaisten seinärakenteiden. Metallipintaisten materiaalien aiheuttama RF-vaimennus johtuu pääosin siitä, että ne heijastavat pois suuren osan materiaaliin osuvasta RF-signaalin tehosta. Tästä johtuen metallipintaisia materiaaleja kannattaisi mahdollisesti välttää käyttämästä rakennusten ulkoseinissä, erityisesti mikäli rakennukseen ei ole suunniteltu mitään RF-aukkoa, josta RF-signaalit pääsevät helposti läpäisemään rakennuksen ulkokuoren.

Mittaukset sisälsivät myös kahden erilaisen ikkunan mittauksen. Ikkunoiden RF-vaimennuksessa ei ole nähtävissä samanlaista taajuusriippuvuutta, jossa vaimennukset kasvaisivat taajuuden kasvaessa, kuten tapahtuu kaikkien mitattujen ulkoseinärakenteiden kohdalla. Tästä johtuen juuri ikkunoita voitaisiin pitää potentiaalisina RF-aukkoina, joista

signaali pääsisi vaimentumatta merkittävästi rakennusten sisätiloihin. Ikkunat on myös huomattavasti helpompi vaihtaa rakentamisen jälkeen, mikäli rakennuksessa esiintyy kuuluvuusongelmia. Ikkunoiden toimimista RF-aukkoina kuitenkin rajoittaa selektiivilasit, jotka parantavat ikkunoiden lämmöneristyskykyä. Selektiivilasit ovat pinnoitettu hyvin ohuella metallikerroksella, joka aiheuttaa suuren RF-vaimennuksen. Kaupallisilla markkinoilla on kuitenkin jo tällä hetkellä ikkunatuotteita, jotka pyrkivät parantamaan matkapuhelinverkkojen kuuluvuutta rakennusten sisätiloissa. Yhtä markkinoilla olevan tuotteen RF-vaimennusta mitattiin diplomityötä varten ja tulokset vaikuttivat lupaavilta, kyseiset tulokset ovat nähtävissä alaluvussa 6.1.

Työn päätteeksi voidaan todeta, että tulevien 5G-verkkojen käyttämät korkeammat taajuudet vaimentuvat kerrostalojen ulkokuorissa vielä nykyisin käytössä olevia taajuuksia enemmän. Tämän vuoksi kriittiset toiminnot, kuten hätäpuhelujen välitys kannattaisi ehdottomasti toteuttaa jatkossakin matalammilla taajuuksilla, varsinkin jos mitään kokonaisvaltaisesti toimivaa ratkaisua energiatehokkaiden kerrostalojen kuuluvuusongelmien korjaamiseksi ei löydetä. Tässä diplomityössä nostetaan esille muutama idea kuuluvuusongelman parantamiseksi diplomityön tuloksien pohjalta, mutta niiden toimivuutta käytännön tasolla ei testattu työn puitteissa.

## LÄHTEET

- [1] Suomen virallinen tilasto (SVT): Väestön tieto- ja viestintätekniiikan käyttö [verkkajulkaisu]. ISSN=2341-8699. 13 2017, Liitetaulukko 11. Matkapuhelimen käyttö 2017, %-osuus väestöstä. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 15.3.2018]. Saatavilla: [http://www.stat.fi/til/sutivi/2017/13/sutivi\\_2017\\_13\\_2017-11-22\\_tau\\_011\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/sutivi/2017/13/sutivi_2017_13_2017-11-22_tau_011_fi.html)
- [2] Viestintävirasto: Matkaviestinoperaattorit ja matkaviestinverkot [verkkajulkaisu]. [viitattu: 7.3.2018]. Saatavilla: <https://www.viestintavirasto.fi/taajuudet/radioluvat/matkaviestinoperaattorit.html>
- [3] Global mobile Suppliers Association: 5G Spectrum Bands [verkkajulkaisu]. [Viitattu: 7.3.2018] Saatavilla: <https://gsacom.com/5g-spectrum-bands/>
- [4] Andreas F. Molisch, GSM Global System for Mobile Communications, 2011.
- [5] The GSM Association: History [verkkajulkaisu]. [Viitattu: 17.3.2018] Saatavilla: <https://www.gsma.com/aboutus/history>
- [6] Viestintävirasto: Radiolupapäätökset [verkkajulkaisu]. [Viitattu: 18.3.2018] Saatavilla: <https://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/laitmaarayksetpaatokset/lupapaatokset/radiolupapaatokset.html>
- [7] Viestintävirasto: Matkaviestinverkon kuuluvuus [verkkajulkaisu]. [Viitattu 18.3.2018] Saatavilla: <https://www.viestintavirasto.fi/internetpuhelin/puhelin-ja-laajakaistaliittymantoimivuus/matkaviestinverkonkuuluvuus.html>
- [8] Narang N., Kasera S. 2G Mobile Networks – GSM and HSCSD, 2007.
- [9] The European Telecommunications Standards Institute: General Packet Radio Service (GPRS) [verkkajulkaisu]. [Viitattu 16.4.2018] Saatavilla: <https://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/gprs>
- [10] A. Furuskar, S. Mazur, F. Muller and H. Olofsson, “EDGE: enhanced data rates for GSM and TDMA/136 evolution”, IEEE Personal Communications, vol. 6, no. 3, pp. 56-66, 1999.
- [11] A. Samukic, "UMTS Universal Mobile Telecommunications System development of standards for the third generation”, Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio, pp. 978-984 vol.2, 1998.

- [12] The 3rd Generation Partnership Project: HSPA [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 22.5.2018] Saatavilla: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>
- [13] Tefficient: Mobile data – full year 2017, Industry analysis #1/2018 [verkkójulkaisu]. [Viitattu 3.9.2018] Saatavilla: <https://tefficient.com/wp-content/uploads/2018/07/tefficient-industry-analysis-1-2018-mobile-data-usage-and-revenue-FY-2017-per-country-18-July-2018.pdf>
- [14] S. Acharya, P. Kabiraj and D. De, "Comparative analysis of different modulation techniques of LTE network", Proceedings of the 2015 Third International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT), Hooghly, 2015, pp. 1-6.
- [15] The 3rd Generation Partnership Project: LTE [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 29.5.2018] Saatavilla: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>
- [16] The 3rd Generation Partnership Project: LTE-Advanced [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 29.5.2018] Saatavilla <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>
- [17] Rohde&Schwarz: LTE-advanced (3GPP Rel. 12) Technology Introduction White Paper [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 30.5.2018] Saatavilla: [https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma252/1MA252\\_2e\\_LTE\\_Rel12\\_technology.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma252/1MA252_2e_LTE_Rel12_technology.pdf)
- [18] Telia: "Telia avasi 5G-aikakauden Helsingissä" [Verkkójulkaisu] [Viitattu 14.9.2018] Saatavilla: <https://www.telia.fi/medialle/showArticleView?article=telia-avasi-5g-aikakauden-helsingiss&id=417d2b72-0d67-41b3-a73b-2506bfe7ec96>
- [19] Viestintävirasto: Taajuusalueen 3410 – 3800 MHz huutokauppa [verkkójulkaisu]. [Viitattu 10.10.2018] Saatavilla: <https://www.viestintavirasto.fi/taajuudet/radiotaajuuksienkaytto/taajuushuutokauppa.html>
- [20] Viestintävirasto: Matkaviestinverkon liittymien markkinaosuudet [verkkójulkaisu]. [Viitattu 2.10.2018] Saatavilla: <https://www.viestintavirasto.fi/tilastot-jatutkimukset/tilastot/2013/matkaviestinverkonliittymienmarkkinaosuudet.html>
- [21] Euroopan komissio: Energy Efficiency – Buildings [verkkójulkaisu]. [Viitattu 6.3.2018] Saatavilla: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>

- [22] Neuvonen, Petri. ”Kerrostalot 1880-2000 – arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen.” Rakennustieto. 2006. 244 s.
- [23] Betoniteollisuus: Seinien mittasuositus [Verkojulkaisu]. [Viitattu: 16.8.2018] Saatavilla: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/seinat/seinien-mittasuositus>
- [24] Janne Rutanen, Lujabetoni, henkilökohtainen tiedonanto, 3.5.2017.
- [25] Vesa Sunikka, Optiplan, henkilökohtainen tiedonanto 11.5.2017
- [26] Juha Iivonen, Pohjola Rakennus, henkilökohtainen tiedonanto 4.5.2017.
- [27] Kati Malmi, Skanska, henkilökohtainen tiedonanto 10.5.2017.
- [28] Rainamo M., Riikonen M. Lasirakentajan käsikirja. 1999. 152 s.
- [29] Marja-Liisa Hermiö, Tilastokeskus, henkilökohtainen tiedonanto 13.6.2017.
- [30] S.R. Saunders, A. Aragon-Zavala.”Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, 2nd Edition”. 2007. 546 s.