

Tampereen teknillinen yliopisto. Tietoliikennetekniikan laitos.
Tutkimusraportti 2012:1
Tampere University of Technology. Department of Communications Engineering.
Research Report 2012:1

Jarno Niemelä, Ari Asp & Yaroslav Sydorov

**Radiosignaalin vaimennusmittauksia nykyaikaisissa
asuintaloissa**

Loppuraportti



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Tampereen teknillinen yliopisto. Tietoliikennetekniikan laitos.
Tutkimusraportti 2012:1
Tampere University of Technology. Department of Communications Engineering.
Research Report 2012:1

Jarno Niemelä, Ari Asp & Yaroslav Sydorov

**Radiosignaalin vaimennusmittauksia nykyaikaisissa
asuintaloissa**
Loppuraportti

Tampereen teknillinen yliopisto. Tietoliikennetekniikan laitos
Tampere 2012

ISBN 978-952-15-2885-9
ISSN 1459-4617

Radionsignaalin vaimennusmittauksia nykyaikaisissa asuintaloissa

Loppuraportti
2012

Tutkimuslaitos:



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rahoittajat:



Digita



Sonera



Sisällysluettelo

Esipuhe	4
Lyhenteet ja kuvaukset.....	5
Tiivistelmä	6
1 Johdanto.....	7
2 Taustaa.....	9
2.1 Radiosignaalin eteneminen rakennuksiin.....	9
2.2 Langattomien radioverkkojen kuuluvuus.....	10
2.3 Tiukentuvat rakennusmääräykset	10
2.3.1 Ikkunat	11
2.3.2 Seinien eristeet.....	12
3 Mittaukset.....	14
3.1 Mittausmenetelmät ja -laitteet	14
3.2 Rakennusmateriaalimittaukset.....	17
3.2.1 Ikkuna	17
3.2.2 Eristelevyt	18
3.3 Referenssitilo 90-luvulta	18
3.4 Asuintalomittaukset	19
3.4.1 Lämpösiivaimennusmittaukset taloissa.....	21
3.4.2 Lämpösiivaimennusmittaukset kerrostaloissa	22
3.4.3 Tasoeromittaukset omakotitaloissa.....	23
3.4.4 Tasoeromittaukset kerrostaloissa.....	24
4 Muutokset radioverkkojen mitoituksessa	26
4.1 Linkkibudjetti	26
4.2 Lisävaimennuksen aiheuttama tuska	27
5 Tekniset ratkaisumallit.....	30
6 Havainnot mittauksista ja johtopäätökset	33
Lähteet	35
Liite 1: Talo- ja kerrostalomittaukset.....	37
Talo 1.....	37
Talo 2.....	39
Talo 3.....	40



Talo 4.....	41
Talo 5.....	42
Talo 6.....	43
Talo 7.....	44
Talo 8.....	46
Talo 9.....	47
Talo 10.....	48
Talo 11.....	50
Talo 12.....	51
Talo 13.....	53
Talo 14.....	55
Talo 15.....	56
Kerrostalo 1	57
Kerrostalo 2	58
Kerrostalo 3	59
Kerrostalo 4	61



Esipuhe

Tutkimuksen suoritti Tampereen Teknillisen Yliopiston (TTY) tietoliikennetekniikan laitos, ja rahoittajina toimivat Digita, DNA Oy, Elisa Oyj sekä Sonera. Tekijät haluavat kiittää rahoittajia tutkimuksen mahdollistamisesta. Tekijät haluavat ilmaista erityiskiitokset Fenestra Oy:lle ikkunoiden lainasta, TTY elektroniikan laitokselle antennien lainaamisesta ensimmäisiin mittauksiin ja Rohde & Schwarts:lle signaaligeneraattoreiden sekä spektrianalysointilaitteiden lainasta.

Tekijät haluavat kiittää Visura Oy:ä ja erityisesti Juha Anttilaa mittausten mahdollistamisesta kerrostaloissa, ja Tampereen kaupunkia yhteistyöstä. Kiitokset kuuluvat myös asunomessuorganisaation puolella erityisesti aluevalvoja Tiina Rantalalle sekä Arto Vuorijärvelle ja Reetta Hynyselle. Erityismaininnan ansaitsevat myös kaikki Vuoreksen pientaloalueen rakentajat, jotka ovat antaneet meidän häiritä kiireistä työntekoaan. Heille kaikille erityinen kiitos.

Jarno Niemelä, Ari Asp ja Yaroslav Sydorov

Yhteystiedot:

Jarno Niemelä
Tampereen Teknillinen Yliopisto (TTY)
Tietoliikennetekniikan laitos
PL 553, FI-33101 Tampere
Email: jarno.niemela@tut.fi
Tel: +358407342401

Ari Asp
Tampereen Teknillinen Yliopisto (TTY)
Tietoliikennetekniikan laitos
PL 553, FI-33101 Tampere
Email: ari.asp@tut.fi
Tel: +358408490791



Lyhenteet ja kuvaukset

2G	Second generation. Toisen sukupolven matkaviestinjärjestelmien yleinen nimitys. Euroopassa GSM.
3G	Third generation. Kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmien yleinen nimitys. Euroopassa UMTS.
3GPP	Third Generation Partnership Project. Matkaviestinjärjestelmien standardointi yhdistys.
4G	Fourth generation. Neljännen sukupolven matkaviestinjärjestelmien yleinen nimitys. Euroopassa LTE.
CPICH	Common pilot channel. UMTS-verkossa vakiotehotasolla lähetettävä signaali jokaiselta tukiasemalta.
dB	Desibel. Tehojen suhde logaritmisella asteikolla.
dBm	Tehon desibeleinä verrattuna yhden milliwatin tehoon.
FCC	Federal Communications Commission.
GSM	Global System for Mobile communications.
HSPA	High Speed Packet Access. 3G/UMTS-verkossa toimiva mobiililaajakaistapalvelu.
LTE	Long Term Evolution. 3GPP:n standardin mukainen järjestelmä (Release 8).
LTE-A	Long Term Evolution. 3GPP:n standardin mukainen mukainen järjestelmä (Release 10).
MHz	Megahertzi. Taajuuden mittayksikkö (10^6).
NIST	National Institute of Science and Technology.
RF	Radio Frequency. Radiotaajuus tai radiotaajuinen.
RSCP	Received signal code power. CPICH-kanavan teho päätelaitteessa.
RX level	Received (RX) level. GSM-verkossa yleislähetyskanavan vastaanotettu tehotaso.
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System.
VIRVE	Suomen viranomaisverkko.

Tiivistelmä

Tässä teknisessä raportissa käsitellään radiotaajuussignaalien etenemisvaimennuksia nykyaikaisissa asuintaloissa. Raportissa esitettävien mittatulosten perusteella nykyaikainen rakentaminen vaimentaa radiotaajuussignaaleja enemmän kuin vanhoihin standardeihin perustunut rakentaminen.

Rakennusten energiankulutuksen hillitseminen on tällä hetkellä varsinkin Suomessa merkittävässä yhteiskunnallisessa roolissa johtuen siihen käytettävän kokonaisenergian merkittävästä osuudesta. Energiankulutuksen hillitsemistä ohjaavat myös ilmastonmuutoksen aiheuttamat paineet ja alati kasvava pelko energian loppumisesta. Kasvavien energiatehokkuusvaateiden vuoksi rakennusten eristyskykyä on pyritty ja pyritään edelleen kasvattamaan myös tulevaisuudessa. Nämä tekijät ovat vieneet asuintalojen kehitystä kohti energiatehokkaampia ratkaisuja, jotka perustuvat pitkälti metallikerroksien sekä erilaisten metalliseoksien käyttöön. Tämä on kuitenkin langattomassa viestinnässä käytettävien radiotaajuisten signaalien kannalta ongelmallista, koska ne eivät pysty läpäisemään metallikerrosta hyvin. Tämän seurauksena langattomien palvelujen saatavuus heikkenee erittäin tiiviisti rakennetuissa asuintaloissa. Ongelmat korostuvat entuudestaan mikäli rakentamisessa on käytetty jotain metallipohjaisia rakennusmateriaaleja.

Raportissa esitettyjen mittaustulosten perusteella uusien rakennusmateriaalien kuten energiatehokkaiden ikkunoiden (selektiivilasit) ja alumiinipohjaisten polyuretaanilevyjen vaimennukset materiaaleina ovat merkittäviä, varsinkin yleisesti käytettävillä matkaviestintaajuuksilla (900MHz, 2100 MHz). Esimerkiksi 2100 MHz taajuudella eristelevyjen sekä ikkunoiden RF-vaimennukset voivat olla jopa 40 dB. Toisien sanoen, signaalitaso vaimenee 10 000 osaan alkuperäisestä. Asuintaloissa taloissa tehtyjen mittausten perusteella havaittiin noin 10 - 20 dB (eli 10 - 100 -kertaisesti) enemmän vaimennusta 2100 MHz taajuuksilla verrattuna vanhojen standardien perusteella rakennettuun tiilivuorattuun pientaloon. Näiden lisävaimennusten myötä operaattorit joutuvatkin vaikeuksiin asiakkaidensa kanssa kuuluvuusongelmien vuoksi.

Langattomien järjestelmien tukiasemaverkosto tulee tulevaisuudessa kasvamaan ja osittain parantamaan kuuluvuutta vaikka rakennusten RF-vaimennukset kasvavatkin. Esimerkiksi käsillä olevan mobiilidatan räjähdysmäinen kasvu ajaa operaattoreita keskittymään erityisratkaisuihin kuuluvuuden ja verkon kapasiteetin suhteen. Käytännössä tämä tarkoittaa erilaisen kotitukiasemien ja sisäverkkoratkaisujen lukumääräistä kasvua. Tämä ei valitettavasti yksin riitä ratkaisemaan ongelmaa, varsinkaan yleiskuuluvuuden osalta. Yhtenä keskeisenä ratkaisuna nähdäänkin rakenteisiin tehtävät muutokset; joko rakennusmateriaalien valmistusvaiheessa tai sitten jälkiasennuksena. Tämä puolestaan vaatii muutoksia rakennussäädöksiin ja lainsäädäntöön, jota kautta pystyttäisiin vaikuttamaan rakennuselementtien valmistusprosesseihin.

1 Johdanto

Yksi nyky-yhteiskuntamme perustarpeista on langattomien viestintäjärjestelmien mahdollistama yhteyden pito. Matkapuhelimet ja muut langattomat viestijärjestelmät ovat nousseet keskeisiksi yhteydenpidon välineiksi työhön ja vapaa-aikaan. Menneiden vuosikymmenien aikana rakennetut langattomat matkaviestintäjärjestelmät ovatkin mahdollistaneet ihmisten tavoitettavuuden melkein mistä päin ja milloin tahansa. Lisäksi tulevaisuudessa erilaisten tietojärjestelmien välinen datatiedonsiirto ja mobiilit laajakaistayhteydet tulevat olemaan entistä keskeisemmässä roolissa, josta esimerkkinä on tällä hetkellä mobiililaajakaistan kautta räjähdysmäisesti kasvava tiedonsiirto. Tästä tiedonsiirrosta on arvioitu jopa 80 % tapahtuvan sisätiloista [1]. Nykyaikainen rakentaminen ei kuitenkaan ota huomioon RF-signaalin etenemistä rakennuksiin tai niiden sisällä [2]. Radioverkon kuuluvuuden yhtenä suunnitteluparametrina onkin rakennusten aiheuttama vaimennus, minkä seurauksena tukiasemaverkko on huomattavasti tiiviimpi kuin ilman rakennusvaimennuksen huomioon ottamista.

Energiatohokkuusvaatimukset tulevat kasvamaan entuudestaan tulevaisuudessa [3]. Rakennusteknisistä syistä johtuen energiatohokkuus voidaan yleisesti saavuttaa jonkin metalli tai metalliseoksen avulla johtuen sen hyvistä lämmönjohto-ominaisuuksista. Tämä puolestaan aiheuttaa suuria ongelmia langattomissa verkoissa käytettäville radiosignaaleille, mikä heijastuu suoraan langattomien palvelujen kuuluvuuteen. Langattomien verkkojen mitoituksessa on perinteisesti otettu huomioon rakennusten aiheuttamat vaimennukset, mutta niissä ei ole varauduttu sellaisiin vaimennuksiin, joita nykyaikainen asuintalorakentaminen mahdollisesti aiheuttaa. Toisen sukupolven (2G) GSM-verkkojen osalta rakennusvaimennusten huomioiminen on melko yksinkertaista, koska GSM-puhe-signaali joko saadaan kuulumaan rakennuksessa tai sitten ei. Datatiedonsiirtoon perustuvien kolmannen sukupolven (3G) UMTS/HSPA- ja neljännen sukupolven (4G) LTE-verkkojen aikakaudella on edelleenkin tärkeää saada signaali kuulumaan rakennusten sisällä, mutta näiden teknologioiden osalta heikentynyt signaalitaso vaikuttaa suoraan myös yksittäisten yhteyksien tiedonsiirtonopeuksiin ja siten keskiarvostettuna koko verkon kapasiteettiin.

Tässä teknisessä raportissa näytetään erilaisten mittausmenetelmien avulla nykyaikaisten asuinrakennusten radiosignaalien vaimennuksia sekä käsitellään niiden mahdollisia seurauksia ja käsillä olevia ratkaisumalleja. Kevään 2012 aikana suoritettiin Tampereen alueella mittauksia kaiken kaikkiaan 15 talossa ja 4 kerrostalossa. Kaikissa kohteissa tehtiin tasoeromittaukset ulkona ja sisällä vallitsevien signaalitasojen välillä kaupallisia matkapuhelinverkkoja hyväksikäyttäen kahdella eri taajuudella (900 ja 2100 MHz). Lisäksi viidessä kohteessa suoritettiin rakennusmateriaalimittaukset taajuuden funktiona 100 MHz ja 4500 MHz:n välillä.

Raportti koostuu kuudesta kappaleesta. Kappaleessa 2 valotetaan taustaa radiosignaalien etenemisen teorian ja siihen pitkälti perustuvan langattomien radioverkkojen mitoituksen osalta. Tämän jälkeen käsitellään rakentamisen nykyaikaiset trendit ja muutokset rakennusmateriaaleissa. Kappaleessa 3 esitellään projektissa käytetty mittauskalusto sekä itse



mittaukset. Ensin esitellään rakennusmateriaalimittauksia erilaisten eristelevyjen sekä uuden, energiatehokkaan nelikerrosikkunan osalta. Asuintalojen osalta käsitellään läpäisyvaimennusmittaukset sekä tasoeromittaukset. Tarkemmat selosteet eri mittauskohteista on esitetty Liitteessä 1, jossa esitetään yksityiskohtaisemmin mitatut kohteet ja ulko- ja sisätilamittausten perusteella havaittujen tasoerojen jakaumat. Mikäli kohteessa suoritettiin läpäisyvaimennusmittauksia, ovat myös niiden tulokset nähtävillä yksityiskohtaisemmin kunkin talon osalta. Kappaleessa 4 havainnollistetaan mittaustulosten perusteella havaittujen lisävaimennusten vaikutusta radioverkkojen alustavaan mitoitukseen, sekä hahmotetaan sen taloudellisia vaikutuksia radioverkkojen kustannuksiin. Kappaleessa 5 käydään läpi teknisiä ratkaisuja ongelman pienentämiseksi tai poistamiseksi. Kappaleessa 6 tehdään keskeiset johtopäätökset mittausten osalta sekä käydään läpi mahdollisia toimenpiteitä erilaisten teknisten ratkaisujen saavuttamiseksi.

2 Taustaa

2.1 Radiosignaalin eteneminen rakennuksiin

Radiotaajuussignaalin kohtaamien esteiden sähkömagneettiset ominaisuudet vaikuttavat sen kykyyn läpäistä este [4], [5]. Niiden etenemistä erilaisten materiaalien läpi on tutkittu kattavasti (esim. [6]), ja yksittäisen materiaalien vaimennuksia pystytään määrittelemään niiden sähkömagneettisten ominaisuuksien avulla [7], [8].

Taulukossa 1 on koostettuna rakentamisessa yleisesti käytettävien materiaalien läpäisyvaimennuksia (dB) eri taajuuksille NIST-instituutin tekemien mittausten perusteella [6]. Ikkunoiden ja puun osalta vaimennukset ovat verrattain pieniä, tiilellä vaimennukset jonkin verran suurempia, mutta betoni- ja kivivalmisteisilla rakennusmateriaaleilla vaimennukset ovat merkittäviä. Vaimennukset kasvavat lähes poikkeuksetta kaikilla materiaaleilla taajuuden funktiona. Puhtaat materiaalmittaukset eivät kuitenkaan kerro koko totuutta rakennusten RF-vaimennuksista, vaan ovat enemmänkin suuntaa-antavia. Radiosignaalit pääsevät erilaisten radiosignaalin etenemiseen liittyvien ilmiöiden kuten heijastus, läpäisy, sironta ja taittuminen avulla joka puolelle rakennusta, ja sitä kautta etenemään sisätiloihin. Tilastollisesti signaalitasot rakennusten sisällä vaimenevat siirryttäessä signaalin läpäisykohdasta kohti talon keskiosaa. Tämä johtuu matkasta niihin paikkoihin, joista voimakkain signaali rakennukseen etenee. Rakennusmateriaalien lisäksi RF-vaimennukset riippuvat tukiaseman suhteellisesta sijainnista rakennukseen nähden ja signaalin pääsääntöisestä tulokulmasta, sisällä olevista väliseinistä ja muista esteistä. [10]-[14]

Taajuus [MHz]/ Läpäisyvaimennus [dB]	500	1000	2000	3500	5000
Tiili (180 mm)	4	5.5	8	20	32
Tiili (180 mm) ja betonielementti (203 mm)	21	25	33	60	67
Tiili (180 mm) ja kevytlekaharkko	8	11	10	29	33
Betonielementti (208 mm)	20	23	29	47	49
Kevytlekaharkko (2 x 203 mm)	13	17	18	25	28
Raudoitettu betonielementti (203mm) 140 x 140 mm	22	28	31	50	53
Raudoitettu betonielementti (203 mm) 70 x 70 mm	26	30	37	53	58
Ikkunalasi (13 mm)	1	2	3	0.5	0.5
Kuiva puu (38 mm)	2	3	3	3	3
Kuiva puu (152 mm)	5	6	9	19	20

Taulukko 1: Eri materiaalien läpäisyvaimennuksia (dB) NIST:in mittausten perusteella eri taajuuksille. Koostettu referenssin [6] mittaustulosten perusteella.

Taulukon perusteella voidaan todeta asia, joka on radioinsinöörien piireissä tiedetty jo kauan: radiosignaalit pääsevät rakennuksiin tyypillisesti ikkunoiden kautta, ja seinärakenteista huolimatta signaalitasot ovat kuitenkin olleet verrattain hyvät.

2.2 Langattomien radioverkkojen kuuluvuus

Radioverkon suorituskyvyn määrittelee kolme ominaisuutta: kuuluvuus (puhutaan myös peitosta tai kattavuudesta), kapasiteetti sekä toimintakyky. Radioverkon kuuluvuus määräytyy pääsääntöisesti tukiasematiheyden sekä käytettävän taajuuden funktiona. Yleisradiolähetykset tapahtuvat hyvin matalilla taajuuksilla (100 MHz) ja viranomaisverkkojen kuten VIRVE lähetykset 400 MHz taajuudella. Kapasiteettitarpeista johtuen matkapuhelinverkoissa käytettävät taajuudet ovat korkeammat: tällä hetkellä yleisesti 900 MHz:n ja 2600 MHz:n välillä.

Tukiasematiheyteen vaikuttaa vahvasti radiosignaalin etenemisympäristö ja edelleen etenemistiellä olevat esteet kuten rakennukset. Taajuuden kaksinkertaistamisen (esim. 900 MHz:ltä 1800 MHz:iin) voidaan karkeasti ajatella vähintään nelinkertaistavan tukiasematarpeen. Radioverkkojen suunnitteluprosessissa pyritään aina saavuttamaan tietty kuuluvuustodennäköisyys tietylle maantieteelliselle alueelle. Mitä enemmän suunnittelualueella on rakennuksia ja mitä korkeammat keskimääräiset vaimennukset niissä ovat, sitä tiiviimmäksi radioverkko pitää suunnitella ja rakentaa. Ja vastaavasti mitä tiiviimmäksi yksittäiset rakennukset rakennetaan, sitä enemmän tarvitaan tukiasemia saman kuuluvuustodennäköisyyden saavuttamiseksi. [15],[16]

Metallin käyttö erilaisissa rakennuselementeissä on langattomissa viestintäjärjestelmissä käytettävien radiosignaalien kannalta erittäin haitallista, koska ne läpäisevät metallin todella huonosti. Tyypillisesti metallikehikon sisällä matkapuhelin verkolla ei saavuteta minkäänlaista kuuluvuutta tai sitten erittäin huono kuuluvuus. Joka tapauksessa tiiviissä tai rakennuksessa, jonka materiaalina käytetään jotain metallipohjaista rakennusmateriaalia, saman kuuluvuustodennäköisyyden saavuttamiseksi tarvitaan huomattavasti enemmän tukiasemia. Kuuluvuuden suunnittelussa käytetään usein linkkibudjettianalyysiä, jota käsitellään tarkemmin Kappaleessa 4.1.

2.3 Tiukentuvat rakennusmääräykset

Alati kasvava energiankulutus ja fossiilisten raaka-aineiden käytön kautta mahdollisesti kiihtyvä ilmastonmuutos ovat aiheuttaneet suurta tarvetta erilaisille energiansäästötoimenpiteille – yksi näistä toimenpiteistä on rakennusten energiatehokkuuden parantaminen. Motivan arvion perusteella kotien energiankäytöstä jopa 50 % kuluu lämmitykseen, ja tästä noin 2/3 arvellaan menevän rakenteiden johtumishäviöihin sekä ilmanvaihdon tarpeisiin [17]. Tyypillisesti energiatehokkuuden kasvattaminen koskee uudisrakentamista, mutta kasvava energian hinta ajaa myös korjausrakentamista kohti energiatehokkaampia ratkaisuja. EU edellyttääkin, että vuosien 2019 ja 2021 välisenä aikana siirryttäisiin kohti energiatehokkaampia rakenneratkaisuja [18]. Suomi, energiatehokkuuden kärkimaana, aikoo toteuttaa EU:n asettamat vaatimukset jo 2017 mennessä [3]. Eräs keino tähän on rakennusten ikkunoiden tiivistäminen käyttämällä esimerkiksi useampaa kerrosta tai hyvin ohutta metallipinnoitetta ikkunarakenteissa. Tästä esimerkkinä markkinoita tällä

hetkellä dominoivat energiatiiviit selektiivilasit. Lisäksi energiatehokkuutta voidaan parantaa myös paksuimmilla seinä-, katto sekä ala- ja yläpohjarakenteilla. Eristepaksuuden hillitsemiseksi markkinoille on tullut polyuretaanilevyjä, jotka rakennusteknisistä syistä pitävät sillään metallikerroksia.

2.3.1 Ikkunat

Energiatehokkaiden selektiivilasien lämmönjohto-ominaisuuksien parantamiseen käytetään yleisesti metallipinnoitteita. Radiotaajuisen signaalin tiedetään läpäisevän huonosti metallipinta, mikä on heikentänyt kaikkien langattomien viestintäjärjestelmien kuuluvuutta sisätiloissa. Kuuluvuusongelmia on havaittu jo kauan erilaisissa julkisissa rakennuksissa, toimistotaloissa ja yrityskeskittymien rakennuskomplekseissa, joissa selektiivilaseja on käytetty jo 90-luvulta asti. Näissä kohteissa langattomien verkkojen operaattoreilla on kuitenkin huomattavasti suuremmat taloudelliset insentiivit rakentaa sisäverkko.

Asuintaloissa (omakoti- ja kerrostalot) radiosignaalien kannalta rakennuksissa olevat ikkunat ovat olleet keskeisin ja helpoin etenemistie rakennuksen sisälle. Vielä 1990-luvulla ikkunoiden puitteet olivat yleisesti puuta, ja pelkkä lasipinta on RF-taajuuksilla verraten helposti läpäistävässä. Viimeaikainen rakennustrendi on suosinut suuria ikkunapintoja, joten signaalien vaimennukset ovat jääneet pieniksi, vaikka tukiasemasignaalin tulokulma olisikin ollut epäedullinen. Ikkunalasien kehitys on tähän asti suosinut ulkopuolisen pintalasin osalta ohutta rakennetta, ja vastaavasti sisäpuolisen lasielementin osalta kahta kiinteästi toisiinsa liitettyä lasia. Tällöin ikkunoissa on ollut kolme lasikerrosta. Tänä päivänä asuintaloissa käytettävien selektiivilasien rakenne on sellainen, että niiden pinnalle on muodostetut metalli- tai metallioksidipinnoite. Eristyskyvyn lisäämiseksi eristyslasien välit on mahdollisesti täytetty jollain jalokaasulla. Viimeisen viiden vuoden aikana on markkinoille tullut entistä energiatehokkaampia ikkunatyyppejä, joissa molemmat lasielementit ovat kaksilasisia. Tällaisen nelilasisen ikkunan (ks. Kuva 1) tyypillinen rakenne on sellainen, että kiinteästi toisiinsa liitettyjen ikkunalasien sisäpinnalla on ohut lämpösäteilyyn vaikuttava kalvorakenne.

Energiatehokkuuden kasvaneet vaatimukset lämmönläpäisyn näkökulmasta on helpompi täyttää seinärakenteiden kuin ikkunoiden osalta. Laskennallisesti nyrkkisääntönä nykyisin pidetään lukuja 15/15 %, joka tarkoittaa sitä, että 15 % energiasta vuotaa ikkunoista ja 15 % seinäpinnoista. Verrattaessa suhteellisia pinta-aloja havaitaan helposti, että ikkunoiden suhteellinen lämpövuoto on moninkertainen samaan seinäpinta-alaan verrattuna. Tällä perusteella voisi kuvitella suuntauksen kääntyvän taas kohti maltillisempia ikkunakokoja. Tämäntapainen kehitys ei kuitenkaan ainakaan vielä näy arkkitehtien piirustuspöydillä, ikkunoiden koko ei ainakaan vielä ole muuttunut ainakaan pienempään. Jos ikkunapinnat kuitenkin ovat jatkossakin suuria, muodostuu radioverkkojen suunnittelun näkökulmasta jossain määrin merkitykselliseksi se absorboivatko ikkunan metallipinta RF-signaalit vai heijastuvatko ne lähes täydellisesti tulokulmaan verrannollisesti. Jos signaali heijastuu, se voi tulla viereisen rakennuksen ikkunoihin hyvin suotuisessa kulmassa. Myös RF-signaalien peittoa ajatellen on hyvin merkityksellistä, missä ilmansuunnassa tukiasemien mastot ovat. Ikkunat sijoitetaan tavallisesti suurina pintoina etelä-länsisuuntaan ja siinä suunnassa olevien tukiasemien signaalit ovat luultavasti huomattavasti voimakkaampia kuin pohjoisen puolelta taloihin saapuvat.



Kuva 1. Esimerkki nelikerrosikkunasta (Fenestra).

2.3.2 Seinien eristeet

Energiatehokkaiden rakennusten seinien lämmöneristävyys on energian kulutuksen kannalta myös keskeistä. Lämmöneristävyteen on lukuisia erilaisia rakenteellisia ratkaisuja ja energiatehokkaat talot voidaan toteuttaa millä tahansa eristemateriaalilla. Lämmöneristävyys on vain yksi asia, mikä täytyy huomioida lämmöneristeitä valittaessa. Mitä pienempi lämmöneristeen lämmönjohtavuus on, sen ohuempiin rakenteisiin päästään. Muita keskeisiä asioita ovat esimerkiksi paloturvallisuus, rakenteen ääneneristävyys, asennettavuus, kosteustekninen toimivuus sekä rakennuskustannukset. Polyuretaanieristeillä voidaan niin haluttaessa toteuttaa jonkin verran ohuempia rakenteita kuin mineraalivillalla. Karkeasti voidaan todeta 200 mm diffuusiotiiviillä pinnoitteella pinnoitettu polyuretaanin (lämmönjohtavuus 0.023 W/mK) vastaavan lämmöneristyskyvyltään 287 mm lasivillaa (lämmönjohtavuus 0.033 W/mK).

Polyuretaani sinällään ei ole radiosignaalien näkökulmasta erityisen vaikea materiaali. Radiosignaalin kannalta ongelmalliseksi muodostuvat nykyisin markkinoilla olevat polyuretaanilevyjen alumiinikerrokset. Tyypillisesti energiatehokkuuden kasvattamiseksi käytetään levyä, jossa molemmilla puolilla on alumiinikalvo. Lisäksi levyn paksuudesta riippuen niiden sisällä on rakennusteknisistä syistä johtuen vielä useampi alumiinikalvo lisää. Rakennuksessa itsessään näitä levyjä voidaankin sitten asentaa useamman kuin yhden

kerroksen verran (ks. Kuva 2). Näin muodostuu sähkömagneettisten aaltojen kannalta rakenne, joissa on monta metallikerrosta kerrosta kasvattamassa läpäisyvaimennusta.



Kuva 2. Seinärakenteiden havainnekuva.

3 Mittaukset

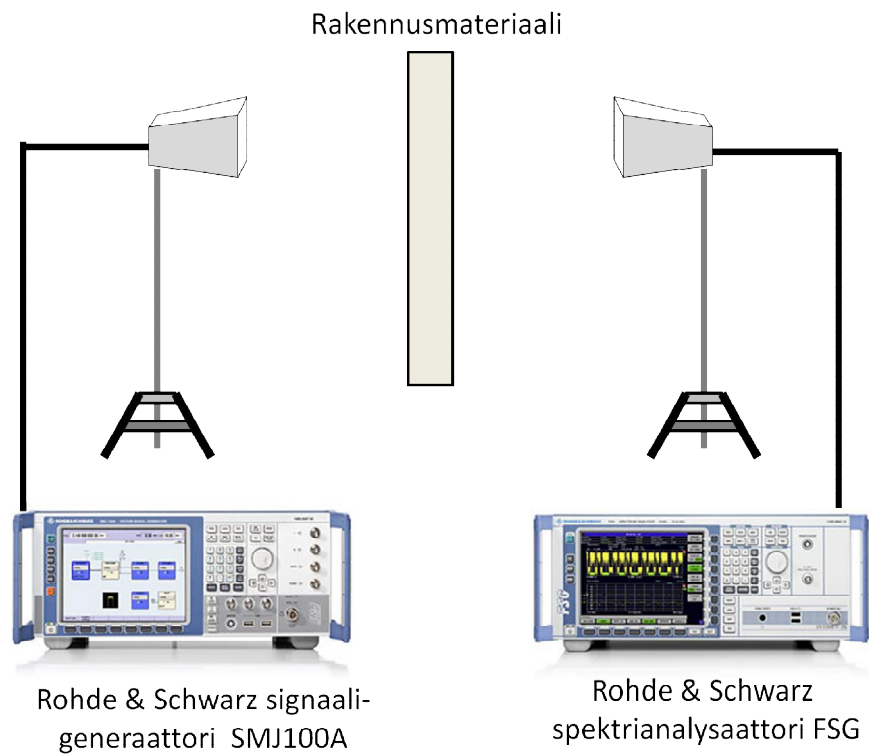
Nykyaikaisen rakentamisen aiheuttamiin kuuluvuusongelmien havainnollistamiseen käytettiin erityyppisiä mittauksia. Tässä kappaleessa esitellään mittausmenetelmät ja -laitteet sekä näytetään mittaustuloksia rakennusmateriaalimittauksista että todellisissa taloissa tehdyistä läpäisyvaimennus- ja tasoeromittauksista. Rakennusmateriaalimittaukset suoritettiin kesän 2011 aikana ja talomittaukset kevään 2012 aikana. Lukuun ottamatta kahta kerrostalokohdetta kaikki talot ja kerrostalot sijaitsivat Tampereen Vuoreksen asuatomessualueella. Alla on kooste kaikista tehdyistä mittauksista:

- Rakennusmateriaalimittaukset (eristelevyt ja nelikerrosikkuna)
- Läpäisyvaimennusmittaukset seinistä ja ikkunoista taloissa
- Asuintalojen tasoeromittaukset ulko- ja sisätilojen välillä omakoti- ja kerrostaloissa

3.1 Mittausmenetelmät ja -laitteet

Rakennusmateriaalimittauksissa oli tarkoituksena selvittää yksittäisten valittujen rakennusmateriaalien RF-vaimennukset eri taajuusalueilla. Kuva 3 havainnollistaa mittausjärjestelyä, joka koostui signaaligeneraattorista, lähetys- ja vastaanottoantenneista, sekä spektrianalysointilaitteesta. Vaimennuksen selvittämistä varten suoritettiin ns. referenssimittaus ilman mitään materiaalia antennien välissä. Tämän jälkeen antennien väliin asetettiin mitattava materiaali ja suoritettiin mittaus uudelleen. Näiden kahden mittauksen erotuksena saadaan ns. läpäisyvaimennus. Antennit asetettiin kaikilla taajuuksilla kaukokenttään. Asuintalojen läpäisyvaimennusmittauksissa mittausmenetelmä oli sama. Kuva 4 esittää todellista tilannetta rakennusmateriaalimittauksissa, jossa vastaanottavan antennin ympärille on asetettu metallivuorattu laatikko. Tämän tarkoituksena oli pienentää heijastusten vaikutusta mittaustuloksiin. Mitattavia materiaaleja olivat 4-kerrosikkuna (Fenestra), 100 mm lasivilla (Isover), paperipintainen polyuretaanilevy sekä alumiinipintainen polyuretaanilevy.

Mittaukset automatisoitiin käyttäen Matlab-ohjelmistoa mittaamaan kokotaajuusalueen yli 50 MHz:n resoluutiolla. Kullakin taajuudella tehtiin 25 mittausta, joiden mittaustulokset keskiarvoistettiin. Rakennusmateriaalimittauksissa käytettävä taajuusalue oli 1000 MHz ja 5000 MHz ja antennina ETS Lindgren 3115. Asuntojen läpäisyvaimennusmittauksissa käytettiin osittain kahta eri antennijärjestelyä kahdelle eri taajuusalueelle. Taajuusalueen 100–700 MHz mittauksissa käytettiin ulkoantennina 32-elementtistä log-periodista antennia. Sisäantenneina käytettiin 10-elementtistä DiGi 10W yagi-antennia ja Iskra P3235 mini-tyyppistä antennia. Taajuusalueen 700–4500 MHz mittaamiseen käytettiin torviantenneja (A-INFOMW mallia JXTXLB-880-NF). Sekä rakennusmateriaali että asuntojen läpäisyvaimennusmittauksissa signaaligeneraattori oli Rohde & Schwarzs -valmistajan SMJ100A ja spektrianalysointilaitteiden valmistajan FSG mallia.



Kuva 3. Periaatekuva mittajärjestelmästä.



Kuva 4. Mittausjärjestely rakennusmateriaalimittauksissa. Metallivuoratun kopin avulla pyrittiin vaimentamaan mahdollisia monitiekomponentteja vastaanotossa.

Asuintalomittauksissa oli tarkoituksena selvittää kuinka matkaviestinverkkojen signaalitasot muuttuvat rakennuksen sisätiloissa, ja millaisia eroja ulkona ja sisällä mitattujen signaalien välillä oli. Mittausten osalta käytettiin menetelmään, jossa keskimääräistä signaalien tasoeroa arvioitiin tasaisesti talon ulkopuolella tehtyjen referenssimittausten sekä tasaisesti sisätiloissa tehtyjen mittausten erotuksena. Ulkona tehdyt mittaukset suoritettiin kävelemällä tasaisesti talon joka puolella. Myös sisätiloissa pyrittiin kattamaan kaikki asuintilat tasaisesti. Kerrostaloissa mittaukset suoritettiin huoneistoissa ja ulkomittaukset pääsääntöisesti parvekkeilla tai sitten asettamalla mittauspuhelin tarkoitusta varten kehitetyn jatkovarren avulla ikkunasta noin metrin verran ulospäin. Kuva 5 havainnollistaa mittausjärjestelyä talomittauksissa. Matkapuhelin oli kiinnitettynä noin 50 cm kannettavan tason yläpuolelle ammattimaisesti erillisellä kiinnitysmekanismilla. Kannettavalla tasolla oli tietokone, johon matkapuhelin oli kiinnitettynä. Mitattavat signaalit olivat kaupallista verkoista lähetettyjä referenssisignaaleja, joiden tasoa mitattiin radiorajapinta-analysaattorihjelmistolla (Nemo Outdoor). GSM-verkossa 900 MHz taajuudella mitattiin yleislähetyskanavan vastaanotettua signaalitasoa RX LEV (full). UMTS-verkossa 2100 MHz taajuudella mitattiin RSCP-tehotasoa CPICH-kanavalla. Näytteiden maksimoimisen vuoksi mittaukset suoritettiin ottamalla puheyhteys, jolloin mittaustuloksia saadaan GSM-verkossa 500 ms:n ja UMTS-verkossa yhden sekunnin välein. Mitattavien näytteiden määrät vaihtelivat noin 300 ja 600 näytteen välillä riippuen talon koosta ja liikkumismahdollisuuksista ulkona.

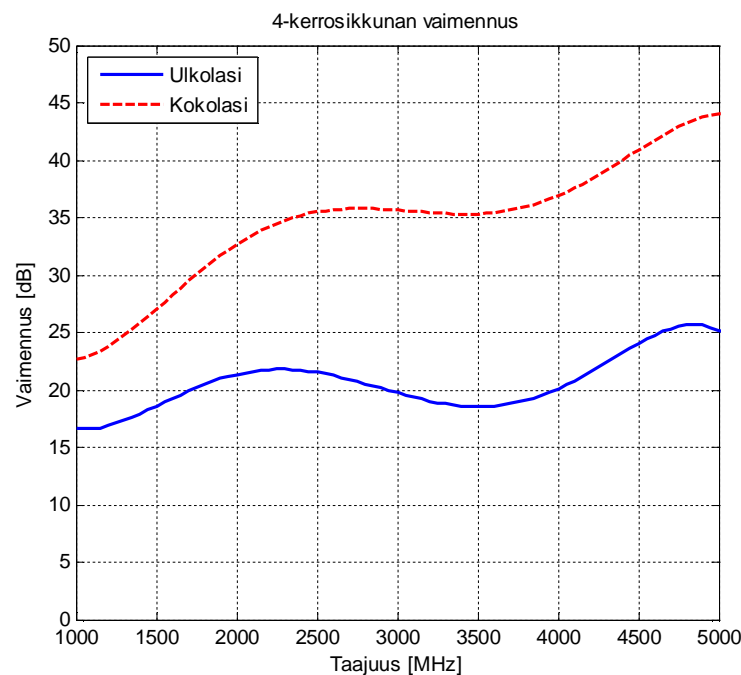


Kuva 5. Mittausjärjestely talomittauksissa.

3.2 Rakennusmateriaalimittaukset

3.2.1 Ikkuna

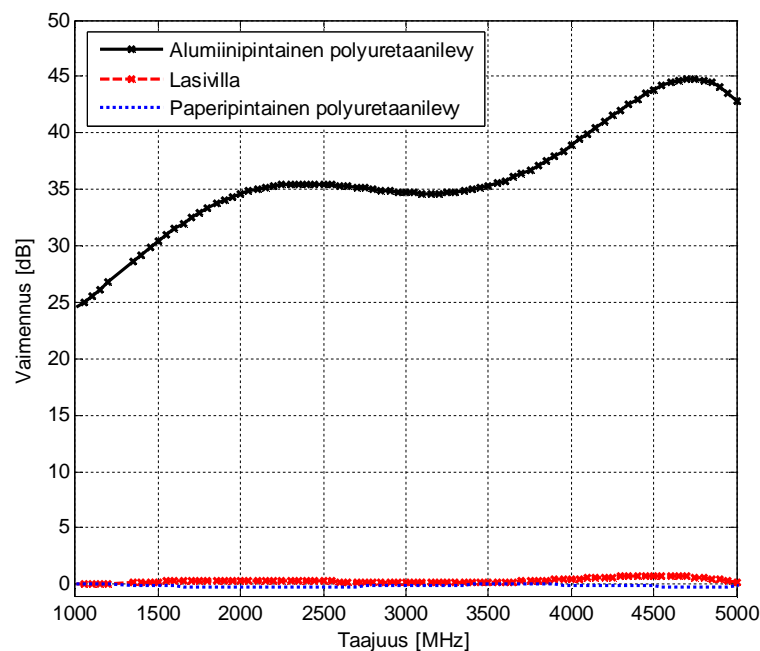
Ikkunoiden osalta olemassa olevat mittaukset ([6], [19]) ovat näyttäneet, että niiden vaimennus on muutama desibeli, joten tämän raportin puitteissa ei mitattu normaalia ikkunaa lainkaan. Kuvassa 6 on esitetty mittaustulokset 4-kerrosikkunan osalta kokolasin (kaksi ikkunaa) ja ulkolasin (yksi ikkuna) osalta taajuuksille 1000 ja 5000 MHz. Molemmat vaimennuskäyrät ovat sovitettu viidennen asteen polynomifunktiolla. Kuten kuvasta käy ilmi, vaimennus kasvaa taajuuden funktiona koko ikkunan osalta noin 20 dB:n tasosta kohoten lähes 45 dB:n tasolle korkeimmilla taajuuksilla. Ikkunan molemmissa lasipareissa on käytetty metallioksidikerrosta lämpösäteilyn estämiseksi. Esimerkiksi 2100 MHz taajuudella kokoikkunan vaimennus on yli 30 dB:ä eli signaalin teho vaimenee tuhannesosaan edetessään ikkunan läpi. Mitatut vaimennukset ovat samaa luokkaa yhden lasin osalta mitä on aiemminkin havaittu [19]. Tulosten perusteella voidaankin olettaa, että mikäli rakennusmateriaalina käytetään jotain luonnostaan vaimentavaa materiaalia (kuten betoni tai lekaharkko), ja ikkunat ovat energiatiiiviit, niin rakennuksessa on odotettavissa ongelmia RF-kuuluvuuden suhteen. Mikäli kyseessä on puurakenteinen talo, jossa ei ole mitään metallipitoista eristekerrosta, niin energiatehokkaiden ikkunoiden käyttäminen ei niin paljon vaikuta RF-vaimennukseen, koska signaalit etenevät seinien läpi rakennukseen.



Kuva 6. Mittaustulokset nelikerrosikkunasta.

3.2.2 Eristelevyt

Eristelevyjen osalta mittaustulokset on esitetty Kuvassa 7. Perinteinen paperiuretaanilevy ja lasivilla eivät aiheuta vaimennusta radiosignaalille millään taajuudella. Sitä vastoin metallirakenteinen polyuretaanilevyn aiheuttama vaimennus on merkittävä, ja on itse asiassa samaa luokkaa kuin nelikerrosikkunan aiheuttama vaimennus. Matalammilla taajuuksilla 1000 MHz:n tuntumassa vaimennus on jo 25 dB:ä nouden siitä tasaisesti kohti 45 dB:iä, ja esimerkiksi 2100 MHz:n taajuudella vaimennus on jo 35 dB:ä. Näiden mittausten perusteella onkin odotettavissa suuria kokonaisvaimennuksia talojen osalta, joissa eristeinä käytetään metallipohjaisia eristemateriaaleja ja uudenlaisia energiatehokkaita ikkunoita, vaikka pääsääntöisenä rakennusmateriaalina olisikin puu.



Kuva 7. Eri eristelevyjen absoluuttinen vaimennus.

3.3 Referenssitilo 90-luvulta

Varsinaisia taloissa tehtäviä mittauksia varten valittiin vanhojen, 1990-luvun standardien mukaan rakennettu referenssitilo. Rakennukseksi valittiin 1990-luvun lopussa valmistunut tiilivuorattu talo (Kuva 8), joka edustaa hyvin tavanomaista rakentamisstandardia tuolle ajalle. Ulkoverhouksena on tiilivuoraus, jonka jälkeen on tuulensuojalevy ja lopuksi yhteensä 200 mm lasivillaa. Lasivillaeristeen sisäpuolella on höyrynsulkuna rakennusmuovi ja sisäverhouksena kipsilevy. Ikkunat ovat kolmilasiset, ja niissä on selektiivikalvo. Niiden pinnoite on kuitenkin 10 vuotta vanhaa tasoa, joten ne eivät vastaa tämän hetken kolmilasisia ikkunoita.

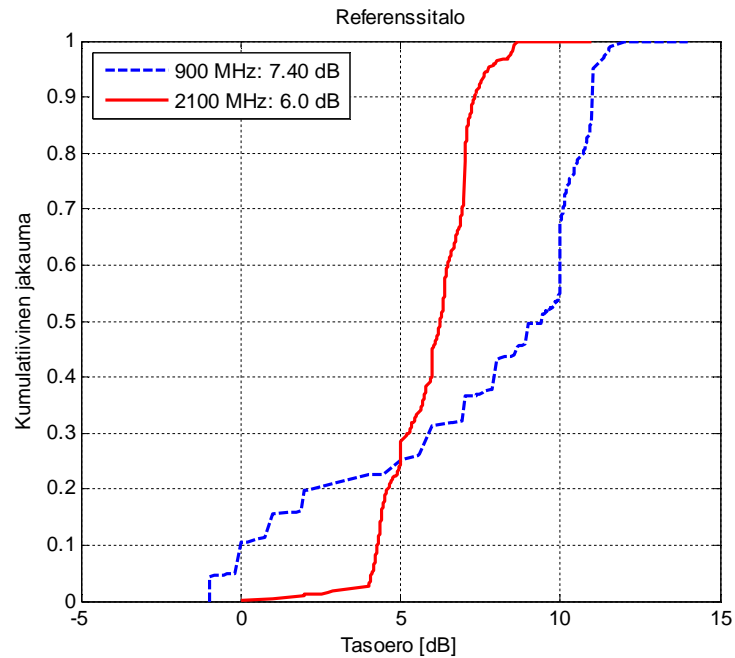


Kuva 8: Tiilivuorattu referenssitalo 1990-luvun lopulta.

Kuva 9 esitetään lasketut ulko- ja sisätilamittausten välisten tasoerojen jakaumafunktion kahdelle eri taajuudelle (900 ja 2100 MHz). Vasemmassa yläkulmassa taajuuden jälkeinen suluissa oleva arvo näyttää mittaustulosten keskiarvon. Referenssitalon tapauksessa 900 MHz:n taajuudella mittaustulosten keskiarvo oli 7.4 dB ja 2100 MHz:n taajuudella 6.0 dB. Jakaumafunktioon on laskettu mukaan kaikkien mitattujen operaattoreiden signaalitasojen erot mahdollisimman kattavan ja luotettavan mittaustuloksen saavuttamiseksi. Tässä tapauksessa 900 MHz taajuudella tehtyjen mittausten keskiarvo on itse asiassa suurempi kuin 2100 MHz:n tapauksessa. Tässä korostuu juurikin signaalin tulokulman vaikutus havaittaviin vaimennusarvoihin. Tässä kyseenomaisessa kohteessa ne tulevat mitä luultavimmin erisuunnista (eli eri tukiasemista), koska mittausreitti talon ulkona ja sisäpuolella olivat samat. Lisäksi 900 MHz:n mittauksissa on nähtävissä negatiivisia tasoeroarvoja. Nämä johtuvat valitusta mittausmenetelmästä, jossa mittauksia suoritetaan kaikissa kerroksissa. Ulkomittaukset suoritetaan aina maatasossa, joten yläkerrasta, jossa on mahdollisesti parempi signaalitaso myös ulkopuolella, saadaan ikään kuin negatiivisia tasoeroarvoja.

3.4 Asuintalomittaukset

Asuintalomittaukset suoritettiin 15 omakoti- ja neljässä kerrostalokohteessa. Taulukossa 2 on esitetty lyhyt yhteenveto kaikista omakotitalokohteista, niiden pääsääntöisestä rakennusmateriaalista, eristemateriaaleista sekä ikkunoista. Kaikissa kohteissa oli energiatehokkaat ikkunat. Talossa 5 ei ollut varsinaisia ikkunoita mittausten aikana. Lisäksi Taloissa 9 ja 14 ei rakennusteknisistä syistä ollut erillistä eristemateriaalia. Liitteessä 1 on esitetty yksityiskohtaisemmat selostukset eri kohteista havainnekuvien ja tasoerojakaumien kera. Polyuretaanilevy viittaa kaikissa tapauksissa nimenomaan alumiinipintaiseen polyuretaanilevyyn.



Kuva 9: Ulko- ja sisätilamittausten tasoerojen kumulatiivinen jakauma 900 MHz ja 2100 MHz taajuuksilla referenssitilassa. Suluissa on ilmoitettu tasoerojen keskiarvo.

Talo #	Tyyppi	Eristemateriaali	Ikkunat
Talo 1	Puutalo	Polyuretaanilevy	3-kerros
Talo 2	Puutalo	Puhallusvilla	3-kerros
Talo 3	Kivitalo	Styrox-eriste	3-kerros
Talo 4	Puutalo	2 x Polyuretaanilevy	4-kerros
Talo 5	Puutalo	Polyuretaanilevy	Väliaikaiset
Talo 6	Puutalo	Puhallusvilla	3-kerros
Talo 7	Puutalo	Lasivilla	4-kerros
Talo 8	Puutalo	Lasivilla	3-kerros
Talo 9	Kevytteharkko	-	3-kerros
Talo 10	Tiilimuuraus	Polyuretaanilevy	3-kerros
Talo 11	Tiilivuoraus	Styroxielementti	3-kerros
Talo 12	Puutalo	Lasivilla ja polyuretaanilevy	3-kerros
Talo 13	Puutalo	Polyuretaanilevy	3-kerros
Talo 14	Kivitalo	-	3-kerros
Talo 15	Puutalo	Lasivilla	3-kerros

Taulukko 2: Talomittauskohteet ja niiden pääsääntöiset rakennusmateriaalit.

Kerrostalojen osalta kohteet on listattu Taulukossa 3. Kerrostalo 1 edusti vanhempaa, saneeraamatonta tyyliä ja Kerrostalo 2 puolestaan vanhempaa, mutta osittain saneerattua rakennuskantaa. Tässä kohteessa ikkunat oli vaihdettu noin 10 vuotta sitten uudempiin. Kerrostalot 3 ja 4 puolestaan edustavat uutta rakennuskantaa betonielementti- sekä kivitaloratkaisuineen.

	Tyyppi	Ikkunat	Rakennusvuosi
Kerrostalo 1	Betonielementti	3-kerros	1976
Kerrostalo 2	Betonielementti	3-kerros (uusittu 2002)	1966
Kerrostalo 3	Betonielementti	3-kerros	2012
Kerrostalo 4	Kivitalo	3-kerros	2012

Taulukko 3: Kerrostalokohteet ja niiden pääsääntöiset rakennusmateriaalit.

3.4.1 Lämpäisyvaimennusmittaukset taloissa

Lämpäisyvaimennusmittauksia suoritettiin viidessä eri omakotitalossa, joissa matalammat taajuudet pystyttiin antennin verrattain suuren koon vuoksi mittaamaan vain kolmessa kohteessa (Talot 1, 7 ja 13). Taulukoissa 4 on koostettu seinien ja ikkunoiden läpäisyvaimennusarvot pistetaajuuksille 100, 400, 600 ja 900 MHz ja Taulukossa 5 taajuuksille 2100, 2600, 3500 ja 4500 MHz. Liitteessä 1 on kunkin talon kohdalla esitetty viidennen asteen polynomifunktiolla käsitelty vaimennusarvot taajuuden funktiona.

Taulukon 4 mittaustulosten perusteella matalilla 100 MHz:n taajuuksilla vaimennukset vaihtelevat muutaman desibelin ja reilun 10 dB:n välillä. Hieman korkeammilla 400 MHz taajuuksilla vaimennukset ovat pääsääntöisesti 10 dB:n yläpuolella yltäen jopa 25 dB:n tasolle. Ylemmillä 600 ja 900 MHz taajuuksilla vaimennukset ovat pääsääntöisesti vieläkin tätä suurempia. Tulosten perusteella ei voi sanoa onko vaimennukset korkeampia seinissä vai ikkunoissa, koska se riippuu täysin itse rakennusmateriaalin valmistusprosessista. Radiosignaalien kannalta vaimennukset ovat kuitenkin korkeampia mitä enemmän rakenteessa on käytetty metallia. Esimerkki Talon 7 osalta seinävaimennukset ovat matalat, koska rakennusmateriaalina on puu ja eristeenä lasivilla.

Taajuus [MHz]/ Lämpäisyvaimennus [dB]	100		400		600		900	
	<i>Seinä</i>	<i>Ikkuna</i>	<i>Seinä</i>	<i>Ikkuna</i>	<i>Seinä</i>	<i>Ikkuna</i>	<i>Seinä</i>	<i>Ikkuna</i>
Talo 1	8.4	5.8	19.5	19.7	23.6	23.8	30.6	19.8
Talo 7	1.4	1.5	4.2	8.9	9.5	6.7	2.5	13.7
Talo 10	-	-	-	-	-	-	28.4	27.8
Talo 12	-	-	-	-	-	-	34.6	22.0
Talo 13	8.4	12.3	26.7	16.8	25.7	23.5	30.0	23.8

Taulukko 4: Seinien ja ikkunoiden läpäisyvaimennukset (dB) alle 1000 MHz:n taajuuksilla.

Taulukon 5 perusteella läpäisyvaimennukset kasvavat merkittävästi lähes kaikkien mittausten ja molempien materiaalien osalta siirryttäessä ylemmille taajuuksille. Rakenteiden vaimennus esimerkiksi 2100 MHz:n taajuuksilla sekä polyuretaanilevyseinille että energiatehokkaille ikkunoilla yltää melkein 50 dB:iin asti. Vaimennukset kasvavat vielä siirryttäessä 2600 MHz:n taajuuksille, mutta saturoituvat joidenkin mittausten osalta siirryttäessä 3500 tai 4500 MHz:n taajuusalueelle. Tämän arvellaan johtuvan radiosignaalin aallonpituuden suhteesta rakenteissa olevat metallikerrosten rakenteellisiin mittoihin.

Taajuus [MHz]/ Läpäisyvaimennus [dB]	2100		2600		3500		4500	
	<i>Seinä</i>	<i>Ikkuna</i>	<i>Seinä</i>	<i>Ikkuna</i>	<i>Seinä</i>	<i>Ikkuna</i>	<i>Seinä</i>	<i>Ikkuna</i>
Talo 1	46.5	36.7	48.1	39.8	47.1	41.0	53.0	50.4
Talo 7	10.8	25.7	11.0	29.9	9.2	34.0	18.5	36.1
Talo 10	43.3	39.2	48.1	45.3	48.2	49.8	42.9	37.0
Talo 12	48.1	28.4	52.7	33.9	54.5	39.1	45.0	45.4
Talo 13	46.7	41.1	48.3	46.1	38.6	44.6	26.4	34.0

Taulukko 5: Seinien ja ikkunoiden läpäisyvaimennukset (dB) yli 1000 MHz:n taajuuksilla.

3.4.2 Läpäisyvaimennusmittaukset kerrostaloissa

Taulukossa 6 on esitetty Kerrostalo 3:sen kahden eri asunnon sekä liikehuoneiston ikkunoiden ja seinien läpäisyvaimennukset pistetaajuuksille (kuvaajat Liitteessä 1). Tuloksista huomataan kaikkien rakennusmateriaalien osalta melko merkittäviä vaimennuksia. Lisäksi ikkunoiden vaimennuksien havaitaan olevan järjestelmällisesti suurempia kuin betoni- ja tiiliseinien.

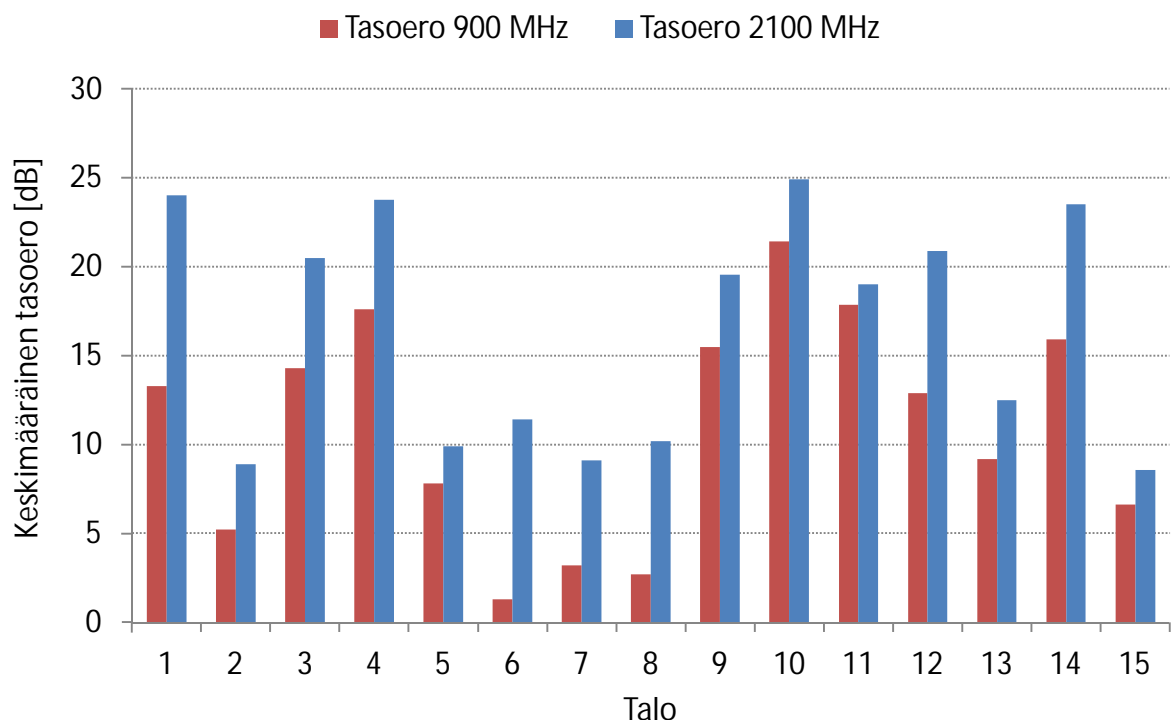
Taajuus [MHz]/ Läpäisyvaimennus [dB]	900	2100	2600	3500	4500
<i>Asunto 1</i>					
Ikkuna	25.2	29.4	32.4	31.7	32.1
Seinä	23.4	32.7	35.6	35.1	40.3
<i>Asunto 2</i>					
Ikkuna	22.6	30.2	33.0	33.7	24.7
Seinä	20.7	25.7	28.5	31.3	30.5
<i>Liikehuoneisto</i>					
Ikkuna 1	27.6	34.0	39.8	43.4	35.3
Ikkuna 2	26.1	31.8	37.7	45.1	41.1
Seinä (betoni)	17.1	24.5	28.3	33.0	38.8
Seinä (tiili 1)	12.7	18.6	22.4	27.3	27.3
Seinä (tiili 2)	9.4	18.0	24.2	33.0	27.0

Taulukko 6: Kerrostalo 3:sen kahden eri asunnon sekä liikehuoneiston läpäisyvaimennukset (dB).

3.4.3 Tasoeromittaukset omakotitaloissa

Mittaukset suoritettiin kaikkien kulloinkin kuuluvuutta tarjoavien matkaviestinoperaattoreiden verkossa. Kuuluvuusongelmien vuoksi kaikissa kohteissa ei voitu suorittaa luotettavia mittauksia kaikkien matkaviestin operaattoreiden verkoissa. Tuloksissa esitetyt tasoerot ovat keskiarvostettu kaikkien operaattoreiden mittausten osalta kunkin mitattavan kohteen osalta.

Kaavio 1 esittää keskiarvotulokset ulko- ja sisämittausten osalta 900 ja 2100 MHz:n taajuuksilla. Kaikkien viidentoista kohteen keskiarvovaimennukset olivat 11.0 dB ja 16.4 dB taajuuksille 900 ja 2100 MHz. Mittaustulosten perusteella on selkeästi havaittavissa suuriakin talokohtaisia vaimennuksia, mutta joukkoon mahtuu myös pienemmän vaimennuksen omaavia taloja. Kaaviosta voidaan selvästi erottaa talot 1, 3, 4, 9, 10, 12 ja 14, joissa 2100 MHz:n taajuudella on keskiarvoisestikin ylitetty 20 dB:ä. Näissä kohteissa myös 900 MHz:n mittaustulokset ovat melko lähellä 15 dB tasoeroja. Nämä talot ovat valmistettu betoni- tai kivielementeistä, tai niissä on polyuretaanilevy eristeenä. Koska näissä kohteissa on myös energiatehokkaat ikkunat, signaaleilla ei ole käytännössä ”helppoa” reittiä taloon sisälle. Huomattavaa on, joissakin tämäntyylisissä taloissa vaimennukset olivat 2100 MHz taajuudella kuitenkin alhaisemmat (kuten talot 11 ja 13). Kaikissa mitatuissa kohteissa 2100 MHz:n taajuuden tasoerot ovat korkeammat kuin 900 MHz.



Kaavio 1: Keskimääräiset tasoerot ulko- ja sisätilamittausten välillä kaikkien talojen osalta 900 MHz ja 2100 MHz taajuuksille.

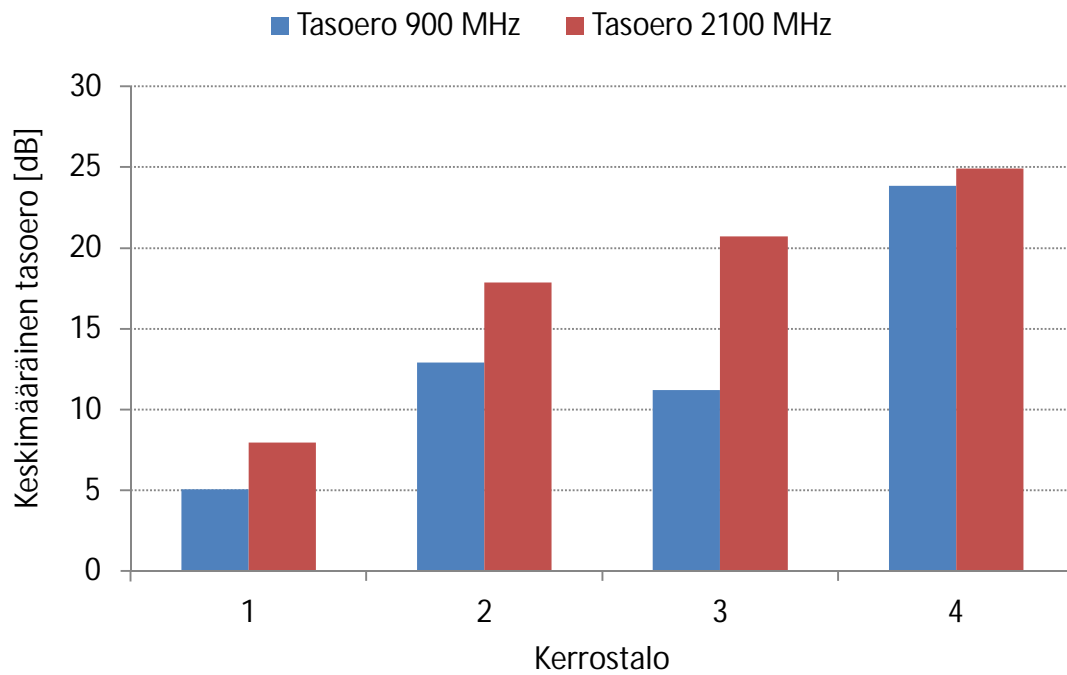
Vastaavasti talojen 2, 5, 6, 7, 8 ja 15 osalta vaimennukset ovat 10 dB tai alle 2100 MHz:n taajuudella. Nämä talot käyttävät rakennusmateriaalina puuta ja eristeenä puhallus- tai lasivillaa. Lisäksi ne ovat keskiarvoltaan lähempänä esimerkin omaisesti mitattua referenssitaloa. Poikkeuksena sarjassa on talo 5, jossa oli eristeenä polyuretaanilevyt, mutta ikkunoilla rakennusaikaisena asennuksena vanerilevyt. Tässä tapauksessa vaimennukset olivat alle 10 dB molemmilla taajuuksilla, koska signaali pääsi etenemään ikkuna-aukoissa olevien puulevyjen läpi lähes vaimentumatta. Tilanne oli päin vastainen talon 7 osalta. Tässä kohteessa ikkunat olivat energiatehokkaat, mutta seinärakenteissa oli käytetty puuta ja eristeenä lasivillaa. Seinien suhteellisen matalat vaimennukset ovat havaittavissa myös läpäisyvaimennusmittauksissa (ks. sivu 44), jolloin myös tasoerot jäävät melko pieniksi.

Talojen 2, 5, 6, 7, 8 ja 15 osalta havaittiin keskiarvoiset vaimennukset 4.7 dB 900 MHz:lle ja 9.7 dB 2100 MHz:lle. Vastaavasti talojen 1, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 13 ja 14 osalta keskiarvostetut tulokset olivat 15.3 dB 900 MHz:lle ja 21.0 dB 2100 MHz:lle. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että järeämmistä materiaaleista rakennetut kohteet ovat pääsääntöisesti 10-15 dB vaimennukseltaan korkeampia 2100 MHz taajuudella ja matalammalla 900 MHz taajuudella erot ovat luokkaa 5-10 dB korkeammat. Lisäksi absoluuttiset vaimennukset ovat huomattavasti suurempia kuin referenssitalon osalta.

3.4.4 Tasoeromittaukset kerrostaloissa

Kerrostaloissa suoritettujen tasoeromittausten perusteella on selvästi havaittavissa suurempia vaimennuksia uudemmille kerrostaloille. Kerrostalo 1:ssä keskiarvoisen vaimennukset ovat 5 dB:n tasolla (hieman suuremmat 2100 MHz:n taajuudella), kun puolestaan ikkunaremontin kokeneella Kerrostalo 2:lla vaimennukset ovat 15 dB:n molemmin puolin. Täten onkin nähtävissä, että vanhempien kerrostalojen energiaremontit ikkunoiden osalta tulevat mahdollisesti aiheuttamaan kuuluvuusongelmia. Mikäli energiaremonteissa tullaan lisäämään eristepaksuutta jollain metallia sisältävällä eristeellä energiatehokkaiden ikkunoiden lisäksi, niin onkin odotettavissa melko mahdollisesti melko pahoja kuuluvuusongelmia.

Uudemmissa kerrostaloissa (Kerrostalo 3 ja 4) vaimennukset olivatkin sitten hieman korkeampia (paitsi Kerrostalo 3:sen 900 MHz taajuus) ulottuen jopa 25 dB:iin. Energiatiiviit ikkunat yhdessä paksimpien betoni- tai tiilirakenteiden kanssa aiheuttavat odotetusti ongelmia RF-kuuluvuuteen. Kerrostalo 3:ssa signaalien tasoerot ovat 900 MHz taajuudella vain hieman yli 10 dB ja 2100 MHz taajuudella hieman yli 20 dB. Kohteessa suoritettujen läpäisyvaimennusmittausten perusteella on nähtävissä kerrostalojen osalta trendi, jossa ikkunoiden RF-vaimennukset ovat järjestelmällisesti suurempia kuin itse seinien (ks. Sivun 59). Tulevaisuudessa seinien paksuuden odotettaankin kasvavan entuudestaan, joten kokonaisvaimennuksien tulisi siinä vaiheessa kasvaa myös. Mitatussa kohteessa on myös havaittavissa tiiliseinän hieman alhaisempi vaimennus ja sekä liikehuoneiston ikkunoiden korkeammat vaimennukset verrattuna asuinhuoneistojen ikkunoihin. Molemmissa laseissa niiden karmit olivat nykyaikaisesti metallia. Kerrostalo 4 edustaa nykyaikaista energiatiivistä kerrostalorakentamista ja siellä molempien taajuuksien tasoerot ylsivät lähes 25 dB:n tasolle.



Kaavio 2: Keskimääräiset tasoerot ulko- ja sisätilamittausten välillä kaikkien kerrostalojen osalta 900 MHz ja 2100 MHz taajuuksille.

4 Muutokset radioverkkojen mitoituksessa

Tässä kappaleessa havainnollistetaan energiatehokkaiden rakennusten kasvavien RF-vaimennusten vaikutusta tarvittavan verkkoinfrastruktuurin määrään ns. linkkibudjettianalyysin avulla. Tulosten perusteella pystytään samalla havainnollistamaan ongelman potentiaalista kustannusvaikutusta, mikäli ongelmasta pyritään pääsemään eroon tukiasemaverkkoa tiivistämällä.

4.1 Linkkibudjetti

Linkkibudjetti on radiotietoliikenneinsinöörien perustyökalu radioverkkojen mitoituksessa. Sen peruseriaatteena on ensinnäkin arvioida suurin sallittu vaimennus radiotiellä lähettimen ja vastaanottimen välillä. Tämän vaimennusarvon perusteella pystytään arvioimaan yhden tukiaseman kantama, ja sitä kautta vaadittava tukiasemamäärä tietylle suunnittelualueelle. Matkaviestinverkoissa joudutaan arvioimaan sekä tukiaseman ja matkaviestimen (alalinkki) että matkaviestimen ja tukiaseman (ylälinkki) väliset maksimi vaimennukset. Yleislähetysverkoissa riittää alalinkin mitoittaminen, koska liikennettä ylälinkin suuntaan ei ole. Maksimivaimennuksesta joudutaan tyypillisesti vähentämään vielä erilaisia ja erisuuruisia suunnittelumarginaaleja, joiden avulla pystytään ottamaan huomioon mm. päätelaitteiden liikkuvuus verkkojen palvelualueella. Tässä vaiheessa otetaan myös huomioon keskimääräinen rakennusvaimennus ja sen suuruuteen liittyvät epävarmuudet. Suunnittelumarginaalien huomioon ottamisen jälkeen pystytään arvioimaan radiosignaalin kantama käyttämällä kuhunkin ympäristöön ja tilanteeseen sopivaa etenemismallia. Tästä voidaan edelleen arvioida kullekin suunnittelualueelle tarvittavien lähettimien tai tukiasemien määrät, joiden avulla tavoiteltu kuuluvuustodennäköisyys tullaan saavuttamaan. Johtuen menetelmän epätarkkuuksista sekä radioverkkosuunnitelman kannalta ideaalisten tukiasemapaikkojen rajallisuudesta, kuuluvuustodennäköisyys saavutetaan vain keskiarvoisesti, ja usein siinä havaitaan paikallisesti suuria vaihteluja.

Taulukossa 7 on esitetty esimerkkilinkkibudjetti 3G/UMTS-järestelmän pakettipohjaiselle palvelulle (HSPA), jota käytetään tällä hetkellä hyvin yleisesti mobiilien laajakaistayhteyksien tarjontaan. Alla olevassa linkkibudjettiesimerkissä tätä on havainnollistettu varsinkin Suomessa tähän tarkoitukseen käytettyjen taajuuksien avulla (900 ja 2100 MHz). Peruseriaatteena on linkin maksimivaimennuksen selvittäminen maksimilähetystehojen ja minimivastanottotasojen mukaisesti. Alla olevan linkkibudjetin yksityiskohtiin voi perehtyä esimerkiksi lähteiden [15] ja [16] avulla. Tässä on kuitenkin keskeistä ymmärtää maksimivaimennus, ja kuinka sitä käytetään arvioimaan vaadittavia tukiasemamääriä.

Järjestelmä Palveluparametrit	Yksikkö	HSPA 900		HSPA 2100	
		Ylälinkki	Alalinkki	Ylälinkki	Alalinkki
Kuorma	%	0.75	0.75	0.75	0.75
Bittinopeus	kbps	128	1000	128	1000

Vastaanotto	Yksikkö	Ylälinkki	Alalinkki	Ylälinkki	Alalinkki
Kohinatehotiheys	dBm/Hz	-173.93	-173.93	-173.93	-173.93
Vastaanottimen kohinaluku	dB	2.50	11.00	2.50	8.00
Kohinatehotiheys vastaanottimessa	dBm/Hz	-171.43	-162.93	-171.43	-165.93
Kohinateho vastaanottimessa	dBm	-105.59	-97.09	-105.59	-100.09
Häiriömarginaali	dB	6.02	6.02	6.02	6.02
Häiriöteho vastaanottimessa	dBm	-100.82	-92.32	-100.82	-95.32
Kokonaiskohinateho	dBm	-99.57	-91.07	-99.57	-94.07
Vaadittava signaali-kohina-suhde	dB	-7.00	-2.00	-7.00	-2.00
Vastaanottimen herkkyyusraja	dBm	-106.57	-93.07	-106.57	-96.07
Vastaanottoantennin vahvistus	dBi	15	0	18	0
Kaapelihäviöt	dB	0.5	0	0.5	0
Antennidiversiteetti vahvistus	dB	3	0	3	0
Pehmeän solunvaihdon hyöty	dB	2	0	2	0
Tehonsäädön marginaali	dB	3	0	3	0
Vaadittava signaalitaso	dBm	-123.07	-93.07	-126.07	-96.07
Lähetys		Ylälinkki	Alalinkki	Ylälinkki	Alalinkki
Lähetysteho	dBm	24	43	24	43
Kaapelihäviöt	dB	0	0.5	0	0.5
Lähetysantennin vahvistus	dBi	0	15	0	18
Maksimi lähetystehotaso	dBm	24	57.5	24	60.5
Maksimi linkkihäviö	dB	147.07	150.57	150.07	156.57

Taulukko 7: Esimerkkilinkkibudjetti 900 ja 2100 MHz:n taajuuksille HSPA-palvelulle.

4.2 Lisävaimennuksen aiheuttama tuska

Taulukko 8 havainnollistaa solun koon määrittämiseen vaikuttavia parametreja Taulukossa 7 olevien maksimilinkkihäviöiden avulla tarkasteltuna. Etenemiseen vaikuttaa tukiasemien antennien ja päätelaitteiden antennien keskimääräinen korkeus, etenemisympäristö ja käytettävä taajuus. Esimerkissä kokonaismarginaalin laskemiseen on käytetty **rakennusvaimennusten keskihajontaa, kuuluvuuden aluetodennäköisyyttä (90 %)** sekä **keskimääräistä rakennusvaimennusta** [16]. Vähentämällä kokonaismarginaali maksimilinkkihäviöstä voidaan solun kokoa arvioida empiirisesti (tässä tapauksessa ns. Okumura-Hata mallin avulla, ks. esim. [15]). Solun koon avulla pystytään arvioimaan yhden 3-sektorisen tukiaseman peittoaluetta (tässä esimerkissä $1.95 \times \text{solun koko}^2$) rajoittavan linkin mukaisesti, josta edelleen vaadittavien tukiasemien määrää suunnittelualueelle. Keskimääräinen tukiasemien välimatka on tässä esimerkissä $3/2 \times \text{rajoittava solun koko}$. Esimerkin tapauksessa kuvitteelliselle suunnittelualueelle tarvitaan siis 110 HSPA 900 - tukiasemaa ja 66 HSPA 2100 tukiasemaa.

Solun koko	Yksikkö	HSPA 900		HSPA2100	
Mobiilin antennikorkeus	m	1.5		1.5	
Tukiasema-antennin korkeus	m	50		25	
Keskimääräinen rakennusvaimennus	dB	10		10	
Rakennusvaimennuksen keskihajonta	dB	5		5	
Peiton aluetodennäköisyys	%	90		90	
Kokonaismarginaali	dB	12.4		12.4	
Solun koko	km	Ylälinkki 2.16	Alalinkki 2.74	Ylälinkki 0.88	Alalinkki 1.34

Solun määrät	Yksikkö	HSPA 900		HSPA 2100	
Tukiaseman palvelualue	km ²	9.1		1.5	
Keskimääräinen tukiasemien välimatka	km	3.2		1.3	
Suunnittelualueen koko	km ²	1000		100	
Tukiasematarve	kpl	110		66	

Taulukko 8: Tukiasematarve HSPA900- ja HSPA2100 –palveluille kuvitteellisella alueella 10 dB:n suunnitellulla, keskimääräisellä rakennusvaimennuksella.

Solun koko	Yksikkö	HSPA 900		HSPA2100	
Mobiilin antennikorkeus	m	1.5		1.5	
Tukiasema-antennin korkeus	m	50		25	
Keskimääräinen rakennusvaimennus	dB	20/30		20/30	
Rakennusvaimennuksen keskihajonta	dB	5		5	
Peiton aluetodennäköisyys	%	90		90	
Kokonaismarginaali	dB	22.4/32.4		22.4/32.4	
Solun koko	km	Ylälinkki 1.09/ 0.55	Alalinkki 1.39/ 0.7	Ylälinkki 0.46/ 0.24	Alalinkki 0.71/ 0.37

Solun määrät	Yksikkö	HSPA 900		HSPA 2100	
Tukiaseman palvelualue	km ²	2.3/0.6		0.4/0.1	
Keskimääräinen tukiasemien välimatka	km	1.6/0.8		0.7/0.4	
Suunnittelualueen koko	km ²	1000		100	
Tukiasematarve	kpl	430/1678		238/863	

Taulukko 9: Tukiasematarve HSPA900- ja HSPA2100 –palveluille kuvitteellisella alueella 20 ja 30 dB:n suunnitellulla, keskimääräisellä rakennusvaimennuksella.

Taulukko 9 havainnollistaa 10 ja 20 dB:n lisävaimennuksien aiheuttamaa tukiasemamäärän tarvetta. Kuten taulukosta havaitaan, vaadittavien tukiasemien määrä kasvaa huomattavasti alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Jo 10 dB:n (eli keskimääräinen rakennusvaimennus 20 dB) lisävaimennus aiheuttaa HSPA 900-tukiasematarpeeksi 430 ja HSPA 2100-tukiasematarpeeksi 238, eli yhteensä lähes nelinkertaistaa tarpeen. Vastaavasti 20 dB:n lisävaimennuksella tukiasematarve moninkertaistuu alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna.

Ongelmaa voidaan tarkastella myös suunnitellun kuuluvuustodennäköisyyden heikentymisen kautta rakennusvaimennuksen funktiona. Alkuperäinen 90 % kuuluvuustodennäköisyys laskisi noin 43 %:n ja 12 %:n tasolle mikäli rakennuksiin kohdistuvia lisävaimennuksia ei kompensoitaisi lisäämällä tukiasemamääriä. Eli jos alkuperäisessä tilanteessa vain noin joka kymmenennessä talossa olisi jonkin asteisia kuuluvuusongelmia, 10 dB:n lisävaimennuksen tapauksessa niitä olisi jo joka toisessa ja 20 dB:n rakennusvaimennuksen tapauksessa vain joka kymmenennellä olisi tilastollisesti kattava sisätilakuuluvuus.

Alla olevassa taulukossa on esitetty esimerkkisuunnittelualueelle kohdistuvat kustannukset rakennusvaimennuksien kasvamisen vuoksi. Tukiaseman yksikönkustannukseksi on oletettu 20 t€ ja tässä ei siis ole otettu huomioon tukiasemien muita kulukomponentteja kuten liityntäyhteyttä tai operatiivisia kuluja. Esimerkkitapauksessa 10 dB:n lisävaimennuksen huomioiminen tukiasemamäärissä aiheuttaisi vähintään melkein 4-kertaisen nousun radioverkkoon kohdistuviin kustannuksiin, ja 20 dB:n huomioiminen lähes 15-kertaisen. Tämä on todella suuri kasvu, ja on lähes sanomattakin selvää, että ongelman ratkaisemiseksi tarvitaan tukiasematiheyden kasvattamisen lisäksi myös muita malleja.

Järjestelmä	Normaali suunnittelumarginaali		10/20 dB lisävaimennus	
	HSPA900	HSPA2100	HSPA900	HSPA2100
Tukiasematarve [kpl]	110	66	430/1678	238/863
Kustannus [M€]	2.2	1.3	8.6/33.6	4.8/17.3
Yhteiskustannus radioverkosta [M€]	3.52		13.36/50.9	
Muutos - %			+ 380 % / + 1440 %	

Taulukko 10: Yhteenveto 10/20 dB:n lisävaimennuksien taloudellisesta vaikutuksesta ainoastaan radioverkkoon kohdistuvista kustannuksista.

5 Tekniset ratkaisumallit

Käsillä on siis yhteiskunnallisesti merkittävä ja ilman ratkaisuja myös kasvava ongelma, joka heijastuu paikallisesti merkittävänä ja haitallisina kuuluvuusongelmina, mutta mahdollisesti myös kohtalokkaana hätäpuhelujen osalta. Ongelma ei myöskään ratkea pelkästään menemällä ulos puhumaan päätelaiteella, koska silloin puhelimeen saapuvat puhelut jäävät vastaanottamatta. Tässä kappaleessa on koottu erilaisia radio- ja rakennusteknisiä ratkaisuja ongelman kitkemiseksi.

Uudet radioverkkoteknologiat (LTE tai LTE-A) eivät tule ratkaisemaan ongelmaa, koska radiosignaalien vaimennus ei lähtökohtaisesti riipu teknologiasta vaan käytettävästä taajuudesta: korkeammat taajuudet vaimentuvat voimakkaammin kuin matalammat. Pääsääntöisesti GSM-, UMTS- ja LTE-teknologioiden sallitut vaimennusarvot eli ns. linkkibudjetti-arvot ovat samalla tasolla [20]. Tämän lisäksi LTE-teknologia tulee ainakin alkuvaiheessa olemaan käytettävissä pelkästään datayhteyksiin, joten GSM- ja UMTS-teknologiat mahdollistavat puheyhteydet ainakin toistaiseksi.

Yksi oleellinen ratkaisumalli on olemassa olevan *tukiasemaverkoston tiivistäminen* ja *sisäverkkoratkaisujen tekeminen*. Molempia toimenpiteitä tehdään tänä päivänä, ja tullaan tekemään myös tulevaisuudessa. Tukiasemaverkoston rakentaminen on kuitenkin verrattain hidasta, ja sitä säätelee markkinatalous. Verkkoinfrastruktuurin rakentaminen ja sen ylläpitäminen ovat verkko-operaattorin yksi keskeinen kulukomponentti, ja verkon suuruuden tiedetäänkin olevan suoraan verrannollinen verkkoon kohdistuviin operatiivisiin kuluihin [21]. Tukiasemaverkon rakentaminen vaatii aina yhteyden runkoverkkoon (tänä päivänä usein ADSL-, kuitu- tai mikroaaltolinkkiyhteys), joka sekin on merkittävä kulukohde (Huom! tätä ei otettu huomioon edellisen kappaleen linkkibudjettiesimerkin kustannusanalyysissä). Tämän lisäksi kasvavaan tukiasemaverkoston liittyy aina operatiivisia kustannuksia kuten sähkönkulutus ja tukiasemapaikkojen vuokrat. Tulevaisuudessa esim. datapalvelujen osalta tapahtuva liikevaihdon kasvu ei ole yhtä paljon sidoksissa verkon liikennemääriin kuin puhepalvelujen osalta on totuttu, minkä vuoksi verkko-operaattoreilla on vähenemässä määrin tuloja käytettävissä verkkoinvestointeihin, eli uusien tukiasemapaikkojen ja sitä tukevan infrastruktuurin rakentamiseen. Lisäksi monilla kaupunkialueilla tukiasemapaikkojen saaminen on jo vuosia ollut äärimmäisen ongelmallista kunnallisten ja yksityisten maanomistajien vastustuksen vuoksi (esim. säteilyongelmat), joten tältäkin näkökannalta verkon tiivistäminen on haasteellista.

Monissa julkisissa kiinteistöissä sekä yrityskeskitymissä on operaattoreiden rakentamia sisäverkkoratkaisuja, ja nämä ovatkin melko keskeisessä roolissa tulevaisuudessa – oletettavasti myös asuinkerrostalojen osalta. Operaattorin itse rakentamat pienet ns. piko-tukiasemat suoraan joko rakennusten sisätiloihin tai kattamaan suurempien talonyhtiöiden sisätilat ovat edellä mainittujen reunaehtojen puitteissa aikaavievä ratkaisumalli. Yksittäisten kotien tapauksessa operaattorien tekemät sisäverkkoratkaisut ovat kuitenkin vielä toistaiseksi ulottumattomissa. Tällä hetkellä suosiota on kuitenkin kasvattamassa ns. femto-soluratkaisu eli kotitukiasema (ks. esim. [22]), jossa operaattori tarjoaa asiakkaalle matalalähetystehoista

tukiasemaa. Kotitukiasemassa keskeisenä komponenttina on sen käyttämä kiinteä yhteysverkkoon päin (usein asiakkaan oma kiinteälaajakaistayhteys). Tällöin yksi merkittävä kulukomponentti ei kohdistu operaattorille itselleen. Lisäksi muut pienemmän kulukomponentit kuten tilavuokra ja sähkönkulutus eivät kohdistu operaattorille. Kotitukiasemakonsepti tulee kuitenkin olemaan vain osa kokonaisratkaisua, koska ne ovat usein kohdistettu suljetulle asiakaspiirille (kuten perhe) tai ratkaisevat ongelmat ainoastaan yhden operaattorin osalta. Lisäksi kotitukiasemateknologian arvellaan olevan ongelmallista massatuotantoa varten, koska sitä ei ole ”sisäänrakennettuna” tällä hetkellä dataliikennettä dominoivaan 3G/HSPA-teknologiaan (ongelmat esim. häiriönhallinnan, integroitavuuden ja tietoturvan suhteen). On kuitenkin nähtävissä, että 4G/LTE -teknologian yleistymisen myötä kotitukiasemaratkaisut tulevat olemaan merkittävä osa operaattorin verkkoinfrastruktuuria.

Yllä esitettyjen ratkaisujen lisäksi monet operaattorit ovat käyttäneet ns. aktiivisia toistinratkaisuja verkon kuuluvuusongelmapauksia - Suomessa hyvänä esimerkkinä metallirakenteiset konepajat. Tässä ratkaisussa kuuluvuusongelmapaikalle suunnitellaan ja asennetaan vastaanotinantenni (usein suunnattuna operaattorin tukiasemaa kohti), vahvistinyksikkö sekä palveluantenni suunnattuna kohti ongelmakohdetta. Vahvistinyksikön sekä rakenteiden läpivientien ansioista matkapuhelinverkon kuuluvuus on tällaisessa ratkaisussa paikallisesti erinomainen eikä käyttäjä huomaa ratkaisua juuri ollenkaan. Tämä on myös taloudellinen ratkaisu, koska toistinyksikkö ei tarvitse kiinteää yhteyttä tukiasemalle, vaan käyttää siihen radiorajapintaa. Monet operaattorit ovat myös vältelleet toistinratkaisun massatuotantoa, koska ne ovat usein kolmannen osapuolten valmistamia ja siten ongelmallisia mm. verkohallinnan suhteen. Aktiivisten toistinratkaisujen tekeminen muun kuin operaattorin toimesta on EU:n alueella tällä hetkellä kiellettyä. Operaattorit maksavat taajuusmaksuja, joiden varjolla heille on luvattu yksityisoikeus maksamiinsa taajuuksien käyttöön. Jokaisella aktiivisella laitteella voi potentiaalisesti tehdä haittaa koko verkolle aiheuttamalla häiriötä (nimenomaan tukiaseman vastaanottopäässä eli ylälinkissä), ja tämä ylimääräinen häiriö voi olla haitallista muille verkkoa normaalisti käyttäville käyttäjille. Kuitenkin esim. Yhdysvaltain taajuusviranomaisen FCC hyväksyy käyttäjien itsensä rakentamat aktiiviset toistinratkaisut kuuluvuusongelmien ratkaisemiseksi, kunhan toistin itse on FCC:n hyväksymä. Uuden LTE-A -teknologian myötä on kuitenkin odotettavissa uudenlaisia toistinratkaisuja, joiden toiminnallisuus on lähempänä tämän päivän tukiasemia. LTE-A -teknologian markkinoille tuleminen ja varsinkin maanlaajuisen kuuluvuuden saavuttaminen sen avulla tulee kuitenkin kestäväksi vuosia, ellei jopa vuosikymmentä.

Yllä olevien ratkaisujen lisäksi on mahdollista käyttää ns. passiivisia antenniratkaisuja (eli toistinratkaisuja ilman aktiivisia komponentteja). Yksinkertaisimmillaan passiivinen antenniratkaisu koostuu kahdesta antennista (rakenteen molemmin puolin) sekä niiden välille tehtävästä/järjestettävästä yhteydestä, esimerkiksi RF-kaapelista [23]. Tällaiset ratkaisut ovat tällä hetkellä kuluttajien saatavilla, mutta niiden asentaminen vaatii erikoisosaamista mm. antennilinjan mitoittamisen ja ulkoantennin suuntaamisen suhteen. Lisäksi niiden ongelmana on tyypillisesti melko heikko suorituskyky eli hyvän sisätilakuuluvuuden saavuttamiseksi ulkoa tuleva signaali pitää jakaa kaikkiin huoneisiin.

RF-signaalin eteneminen rakenteen sisälle voidaan tehdä myös käyttämällä rakenteissa RF-signaalin läpäiseviä rakenteita (ns. taajuusselektiiviset rakenteet), jolloin rakenne päästäisi tietyn taajuuksisen RF-signaalin läpi ja kuuluvuusongelmaa ei pääse niin helposti syntymään.



Tällainen taajuusselektiivisyys pitää kuitenkin tehdä jo rakennemateriaalia tehtäessä ja/tai sitä valmistettaessa, joten se ei sovi jo olemassa oleman rakennuskannan ratkaisuksi [24]. Ikkunoiden osalta tutkimusta on tehty melko kattavasti ja taustalla vallitsevaa teoriaa voidaan melko helposti soveltaa mm. ikkunoiden suunnittelussa [25]-[27]. Passiivisen antenniratkaisun (oli se sitten jälkiasenteinen tai taajuusselektiivinen ratkaisu) etuna on sen yksinkertaisuus. Se ei tarvitse sähköä toimiakseen eli on holistisesti ajateltuna äärimäisen energiatehokas. Keskeiset ongelmat ovat kuitenkin niiden rajoitettu suorituskyky (tarvitaan mahdollisesti paljon), jolloin niiden integroitavuus varsinkin jo rakennettuihin rakennuksiin tulee olemaan haasteellista.

6 Havainnot mittauksista ja johtopäätökset

Tässä raportissa on esitetty RF-signaalin vaimennuksia eristemateriaalien ja nelikerrosikkunan osalta, läpäisyvaimennusmittauksia erilaisista asuintaloista seinien ja ikkunoiden osalta sekä tasoeromittauksia ulkona ja sisällä havaittavien signaalitasojen välillä.

Rakennusmateriaali- ja läpäisyvaimennusmittausten perusteella voidaan havaita selkeästi energiatehokkaiden ikkunoiden, betoni- ja kivelementtien ja alumiinipohjaisen polyuretaanilevyjen merkittävät RF-vaimennukset. Matalilla 100 MHz:n taajuuksilla vaimennukset vaihtelevat muutaman desibelin ja 10 dB:n välillä. Hieman korkeammilla 400 MHz taajuuksilla vaimennukset ovat pääsääntöisesti 10 dB:n yläpuolella yltäen jopa 30 dB:n tasolle. Ylemmillä 1000 ja 2000 MHz taajuuksilla vaimennukset ovat vieläkin suurempia, ja riippuen materiaalista ne joko nousivat koko mitatun taajuusalueen osalta tai sitten kääntyivät laskuun noin 3000–3500 MHz taajuuksien jälkeen. Tämän arvellaan johtuvan yksityiskohtaisista rakenneratkaisuista varsinkin metallin käytön osalta. Puhtaiden mittaustulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta energiatehokkaiden rakennusmateriaalien aiheuttavan merkittäviä vaimennuksia sekä matalammilla taajuuksilla (<1000 MHz) että korkeammilla taajuuksilla.

Asuintaloissa tehdyissä tasoeromittauksissa havaittiin hyvin tiedossa olevien betoni- ja kivivalmisteisten rakenteiden aiheuttamat korkeat RF-vaimennukset. Ennen energiatiiivien ikkunoiden markkinoille tulemistä, signaalien pääsääntöinen kulkureitti rakennuksiin tapahtui juuri ikkunoiden kautta. Tällä hetkellä uudisrakentamisessa käytetään kuitenkin pääsääntöisesti energiatiiviä selektiivi-ikkunoita, joiden vuoksi RF-vaimennukset betoni- ja kivirakenteisissa taloissa ovat merkittävästi suurempia kuin ennen. Lisäksi nykyaikaiset eristemateriaalit kuten alumiinipohjainen polyuretaanieriste aiheuttavat merkittäviä vaimennuksia RF-signaaleille. Taloissa, joissa seinärakenne koostuu puusta ja puhallus- tai lasivillasta, ei havaittu niin merkittäviä vaimennuksia, vaikka ikkunat olivatkin energiatehokkaat. Mittaustulosten perusteella voidaankin todeta, että tietyissä rakenneratkaisuissa RF-signaalin läpäisyä pitäisi parantaa jollain ratkaisulla – joko rakenteisiin integroitavilla ratkaisulla tai erillisillä passiivisilla antenniratkaisuilla.

Energiatehokas rakentaminen on selvästi kasvattamassa myös kerrostalojen RF-vaimennuksia. Matalataajuuksien yleislähetysverkkojen ja matalammalla toimivien langattomien verkkojen (kuten viranomaisverkko VIRVE) osalta kerrostalojen kasvavat vaimennukset ovat merkittävä haitta, koska näissä verkoissa lähetykset tapahtuvat yleisesti verrattain harvassa olevia ja korkeita mastoja hyväksi käyttäen. Vaimennukset ovat kuitenkin pienempiä matalammilla taajuuksilla, joten ongelmat eivät välttämättä pääse samoihin mittakaavoihin kuin korkeammilla taajuuksilla. Matkaviestinoperaattoreiden osalta kerrostalojen kasvavat RF-vaimennukset ovat tietenkin lyhyellä aikavälillä ongelmallisia, mutta taloudelliset insentiivit erillisten sisäverkkoratkaisujen tekemiseen ovat kerrostalojen osalta kuitenkin suuremmat kuin pientalojen osalta. Lisäksi matkaviestinoperaattorit ovat ratkaisseet kuuluvuusongelmia kerrostalojen osalta joko kerrostalojen katolle tai välittömään läheisyyteen sijoitetulla tukiasemalla.



Ongelman ratkaisemiseksi tarvitaan siis paljon erilaisia toimenpiteitä. Verkko-operaattoreiden pitää rakentaa lisää tukiasemia, aloittaa kotitukiasemien tarjoaminen ja tehdä erilaisia innovatiivisia kuuluvuusratkaisuja (kuten erilaiset toistimet). Tämä ei kuitenkaan yksistään riitä. Tämän lisäksi tarvitaan innovatiivisia passiivia antenniratkaisuja – sekä olemassa olevan rakennuskannan että tulevan rakennuskannan osalta. Ongelman todelliseen ratkaisuun saatetaan tarvita myös muutoksia rakennussäädöksiin tai lainsäädäntöön. Yksi konkreettinen lainsäädännöllinen velvoite voisi olla radiosignaalin vaimennuksen ilmoittaminen eri rakennuselementtien osalta. Kuten mittauksista havaittiin, radiosignaalin kokonaisvaimennus riippuu kaikista käytetyistä rakennuskomponenteista sekä radiosignaalien tulokulmista ja etenemisympäristöstä, mutta tällöin voitaisiin kuitenkin jo rakennusvaiheessa varautua mahdollisiin kuuluvuusongelmiin. Ideaalisessa tapauksessa tässä vaiheessa voitaisiin välttää kuuluvuusongelmat integroimalla antennit rakenteisiin (esim. passiivisten antenniratkaisujen avulla). Julkisten rakennusten osalta käytäntö voitaisiin viedä vielä pidemmälle, eli määriteltäisiin jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa tarvitseeko rakennuksessa kuulua operaattoreiden verkot vai pitääkö sinne suunnitella sisäverkko. Jälkimmäisessä tapauksessa sisäverkon tekeminen olisi huomattavasti taloudellisempaa.



Lähteet

- [1] Analysys Mason, "The message from MWC 2010: indoor coverage and subscriber management are the keys to dealing with exponential growth in wireless traffic".
- [2] ERA Technology, "Application of FSS Structures to Selectively Control the Propagation of signals into and out of buildings – Executive summary", 2004.
- [3] ERA17 –raportti, "Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika 2017", Kirsi Martinkauppi (toim.), 2010.
- [4] A. Räisänen ja A. Lehto, *Radio engineering for wireless communications and sensor applications*, Artech House, 2003.
- [5] S. Saunders, A. Aragon-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication system*, Wiley & Sons, toinen painos, 2007.
- [6] NIST Construction Automation Program Report No. 3, "Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials", 1997.
- [7] S. Stavrou, S.R. Saunders, "Factors influencing outdoor to indoor radio wave propagation", 12th ICAP International Conference on Antennas and Propagation, 2003.
- [8] S. Stavrou, S. R. Saunders, "Review of constitutive parameters of building materials", ICAP International Conference on Antennas and Propagation, 2003.
- [9] S. Aguirre, L. H. Loew, Y. Leo, "Radio Propagation Into Buildings at 912,1920, and 5990 MHz Using Microcells", 3rd Annual Universal Personal Communications, 1994.
- [10] A. M. D. Turkmani, A. F. de Toledo, "Modelling of radio transmissions into and within multistorey buildings at 900,1800 and 2300 MHz", IEE Communications, Speech and Vision Proceedings, 1993.
- [11] R. Hoppe, G. Wölfle, and F. M. Landstorfer, "Measurement of Building Penetration Loss and Propagation Models for Radio Transmission into Buildings", IEEE 50th Vehicular Technology Conference, 1999.
- [12] A. M. D. Turkmani, J. D. Parson, D. G. Lewis, "Measurement of building penetration loss on radio signals at 441, 900 and 1400MHz", Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineer, 1988.
- [13] A. Aragón-Zavala, C. Arredondo-Luna, K. Moranes-Sánchez, J. L. Cuevas-Ruiz, "Measurement-based in-building cellular coverage analysis for GSM1900", 17th International Conference on Electronics, Communications and Computers, 2007.
- [14] L. Ferreira, M. Kuipers, C. Rodrigues, L. M. Correira, "Characterisation of Signal Penetration into Buildings for GSM and UMTS", 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems, 2006.

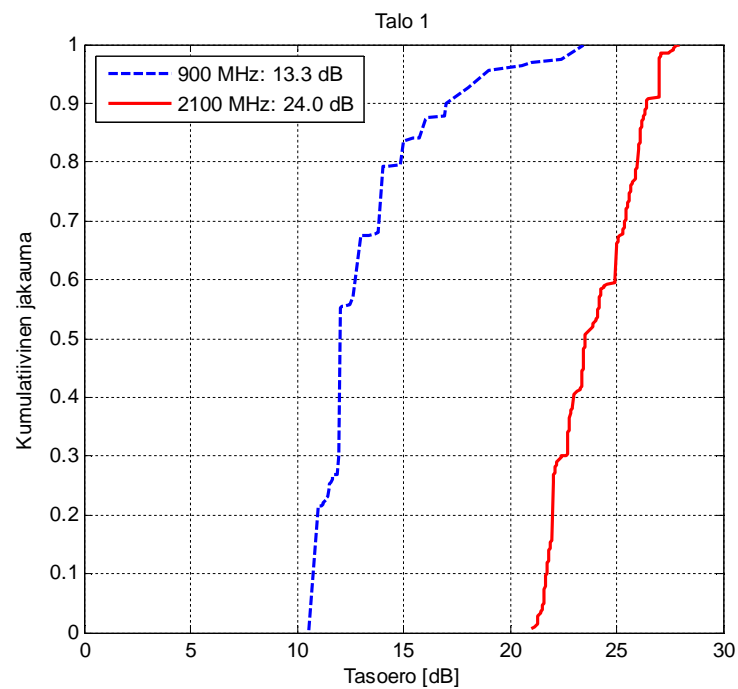


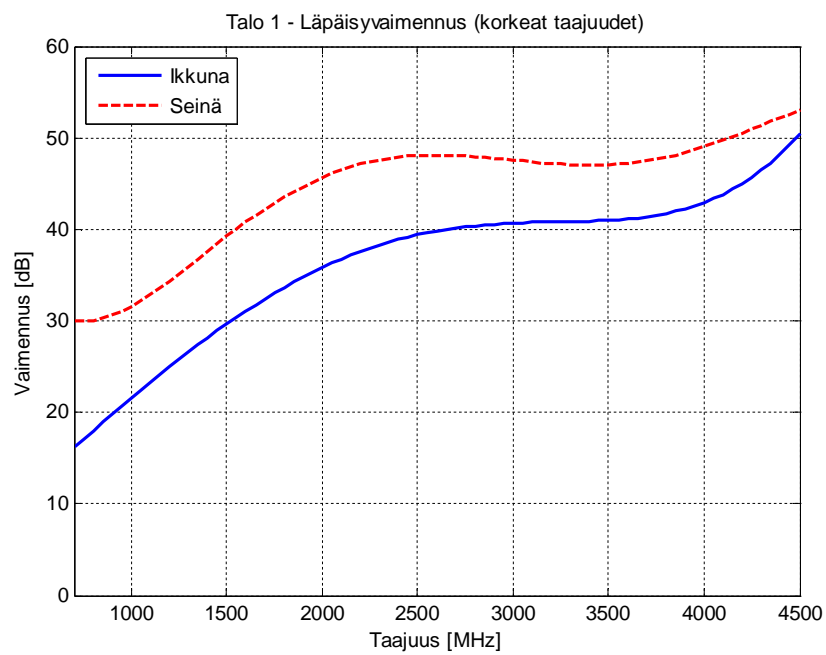
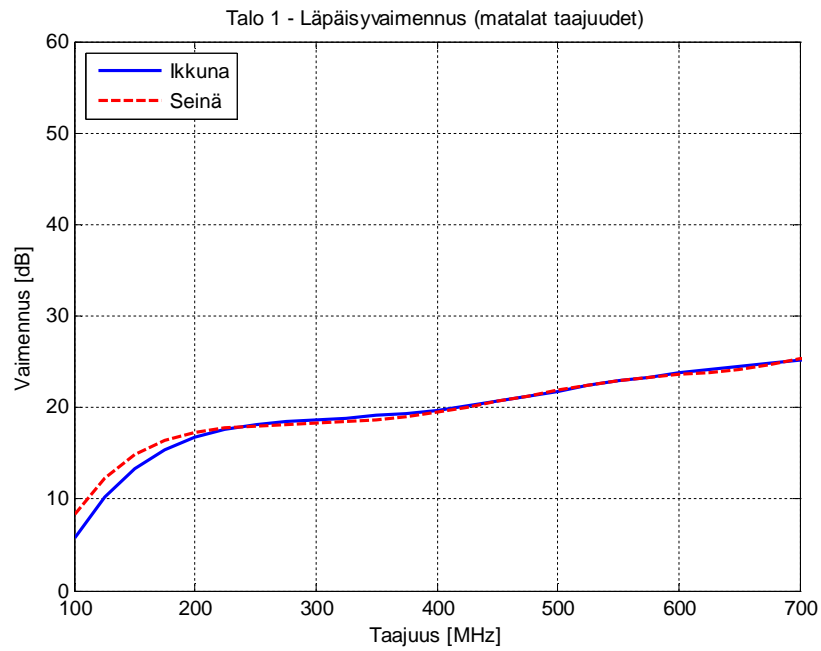
-
- [15] J. Lempiäinen, M. Manninen (ed.), *Radio Interface System Planning for GSM/GPRS/UMTS*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [16] J. Laiho, A. Wacker, T. Novosad, *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*, Wiley & Sons, 2nd ed., 2006.
- [17] Motiva, *Lämmönkulutus*,
http://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/mihin_energiaa_kuluu/lammonkulutus,
viitattu 15.5.2012.
- [18] EU legislation, Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/buildings_en.htm, viitattu 15.5.2012.
- [19] N. Knauer, H. Doecke, P.O'Leary, "Outdoor-indoor wireless sensor communications in a modern building management system", 2008.
- [20] H. Holma, A. Toskala, "LTE for UMTS – Evolution to LTE-Advanced" 2nd ed., Wiley, 2011.
- [21] K. Johansson, "Cost effective deployment strategies for heterogeneous wireless networks", väitöskirja, KTH, 2007.
- [22] Small cell forum, <http://www.smallcellforum.org/>, viitattu 17.5.2012.
- [23] A. Ali, A. Coustou, H. Albert, "Wide band passive repeaters: Design and measurements", IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 2009.
- [24] G.H.H. Sung, K. W. Sowerby, A. G. Williamson, "The impact of frequency selective surfaces applied to standard wall construction materials", International Symposium on Antennas and Propagation, 2004.
- [25] M. Raspopoulos, S. Stavrou, "Frequency Selective Buildings through Frequency Selective Surfaces" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011.
- [26] B. Widenberg, J. V. R. Rodríguez, "Design of Energy Saving Windows with High Transmission at 900 MHz and 1800 MHz", Technical Report, Lund University, 2002.
- [27] G. I. Kiani, A. Karlsson, L. Olsson, K. P. Esselle, "Glass Characterization for Designing Frequency Selective Surfaces to Improve Transmission through Energy Saving Glass Windows", APMC Microwave Conference, 2007.

Liite 1: Talo- ja kerrostalomittaukset

Talo 1

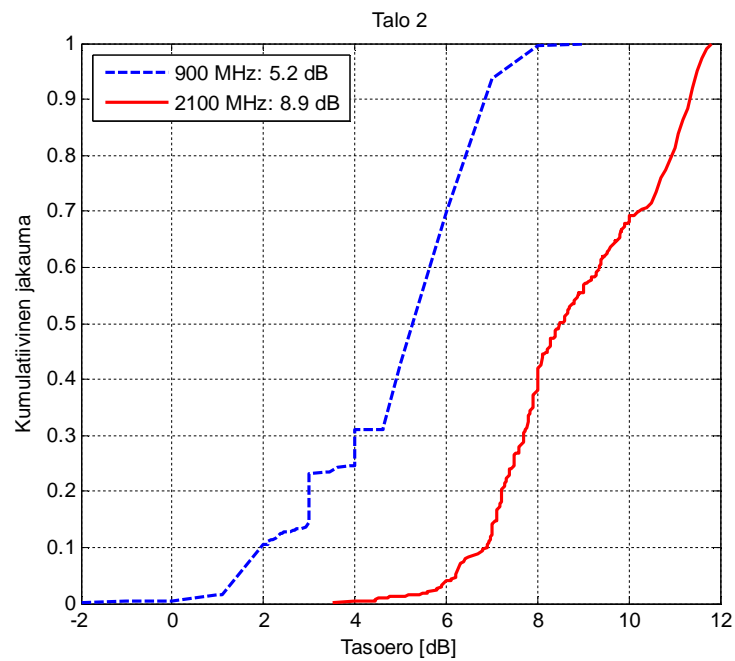
Talo 1 on puutalo, jossa eristemateriaalina on käytetty polyuretaanilevyjä. Ikkunat ovat avattavat ja 3-kerroksiset.





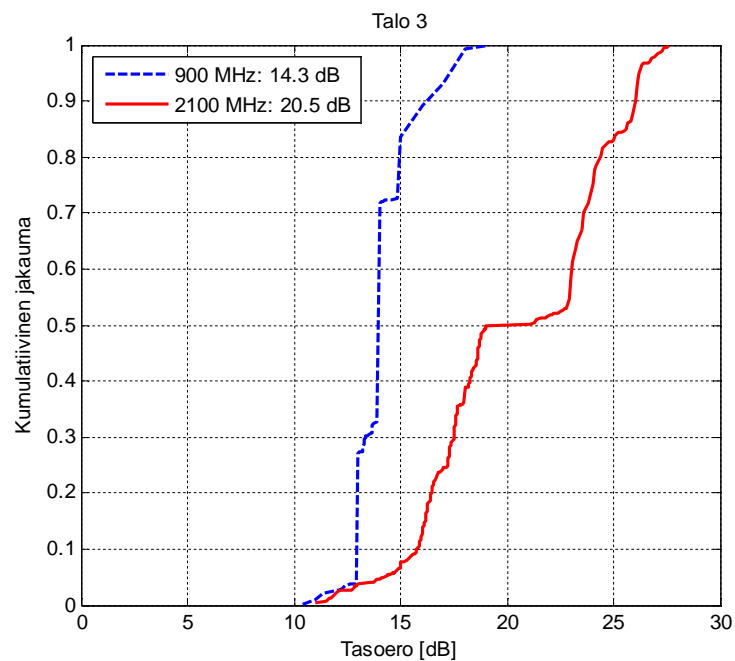
Talo 2

Talo 2 on puutalo, jonka eristeenä käytetty puhallusvillaa. Ikkunat ovat kiinteät 3- kerroksiset.



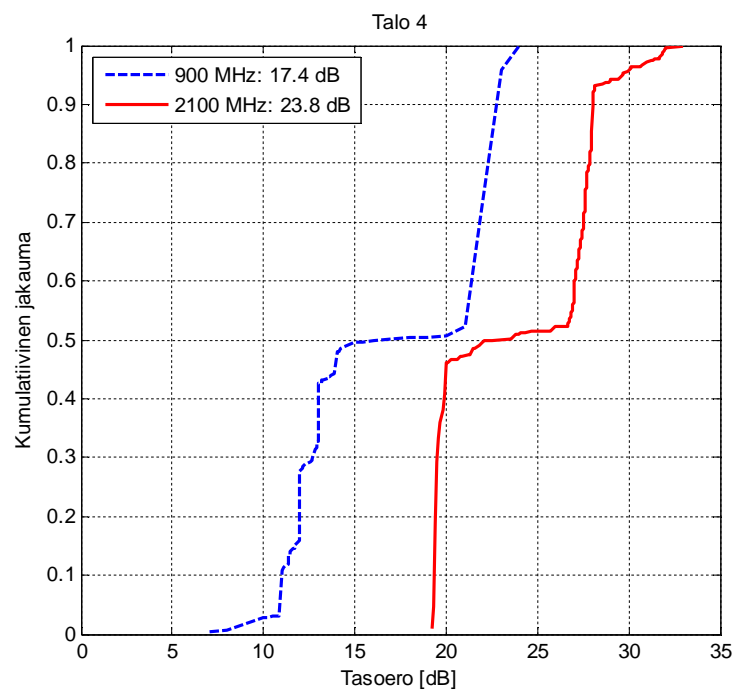
Talo 3

Talo 3 on kivitalo, jonka ulkoseinän rakenne näkyy hyvin kuvassa. Mittausten suorituksen aikana ulkopuolelle oli kuvasta poiketen tehty vielä rappaus. Ikkunat ovat kiinteät 3-kerroksiset.



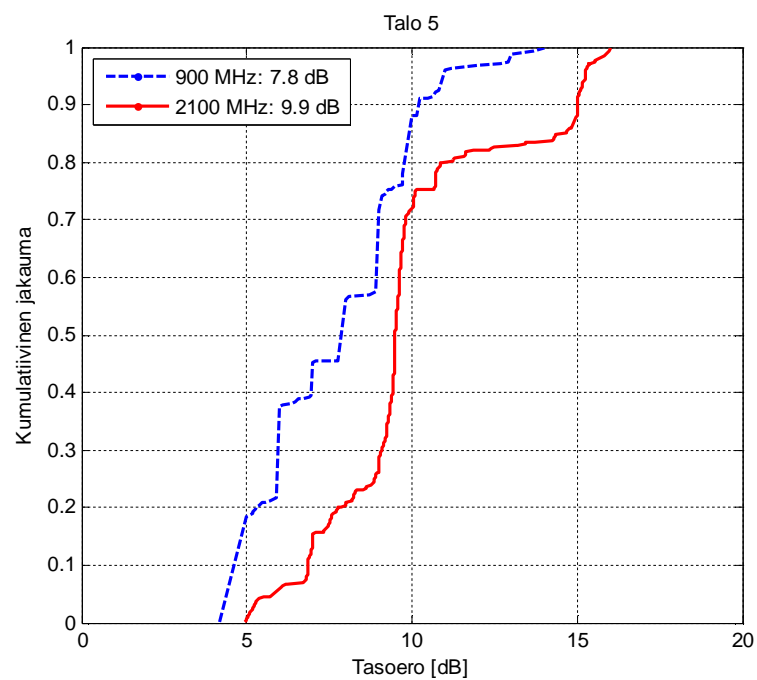
Talo 4

Talo 4 on puurakenteinen talo, jossa kaksi kerrosta polyuretaanilevyä ja ikkunat kiinteät 4-kerroksiset.



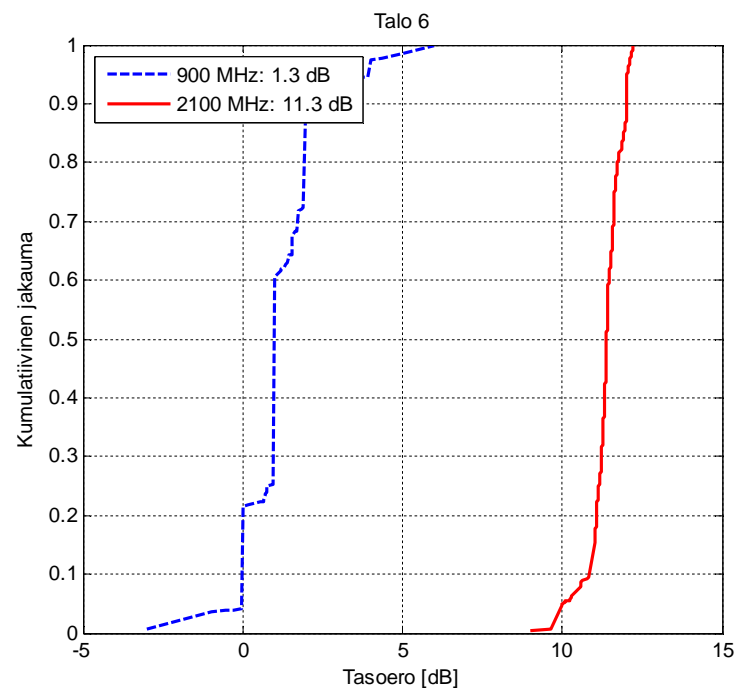
Talo 5

Talo 5 oli mitattaessa puolivalmis puutalo, jossa eristeenä polyuretaanilevy. Kohteessa ei mitattaessa ollut ikkunoita, vaan ne oli korvattu vanerilevyillä.



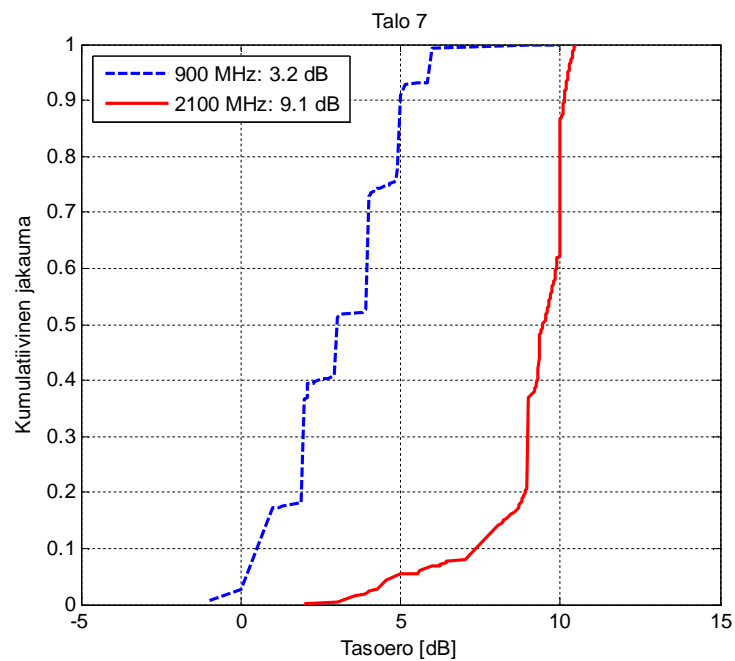
Talo 6

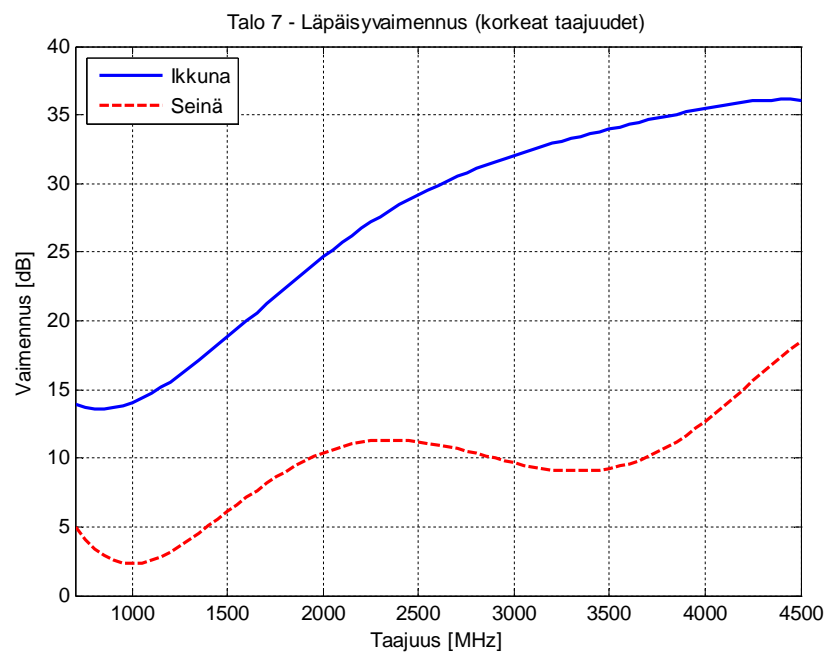
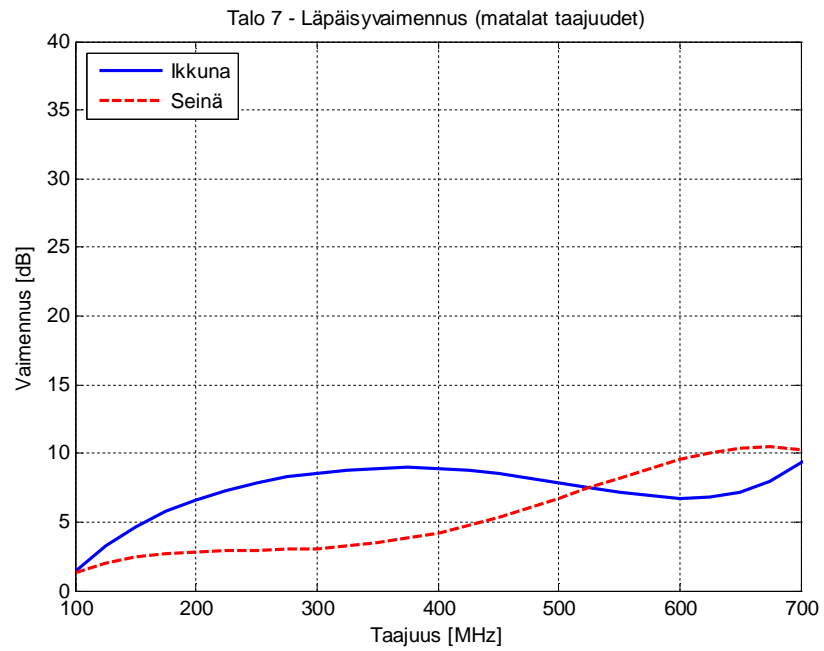
Talo 6 on puutalo, jossa eristeenä puhallusvilla. Ikkunat ovat avattavat 3-kerroksiset.



Talo 7

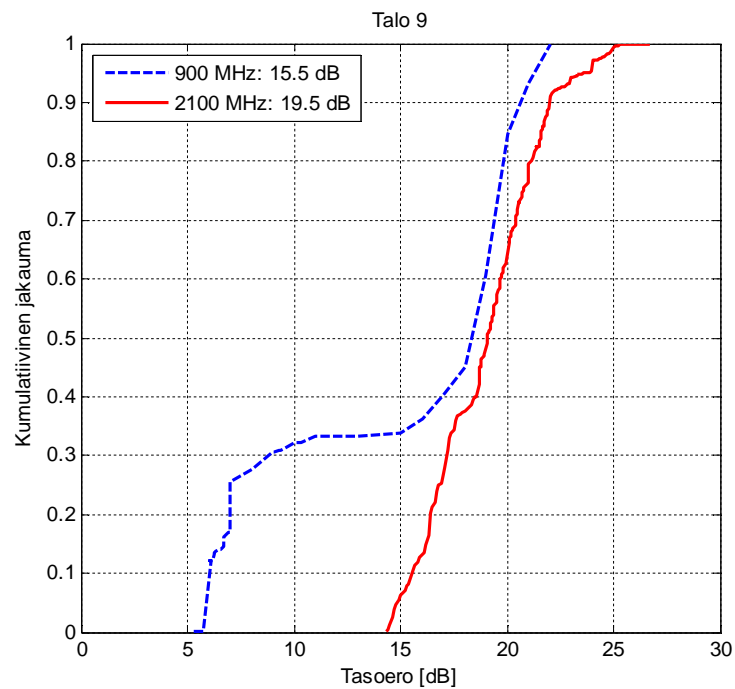
Talo 7 on toteutettu perinteisellä lasivillaeristyksellä. Ulkopuolella on lautaverhous ja sisäseinissä kipsilevy. Ikkunat olivat 4-kerroksiset.





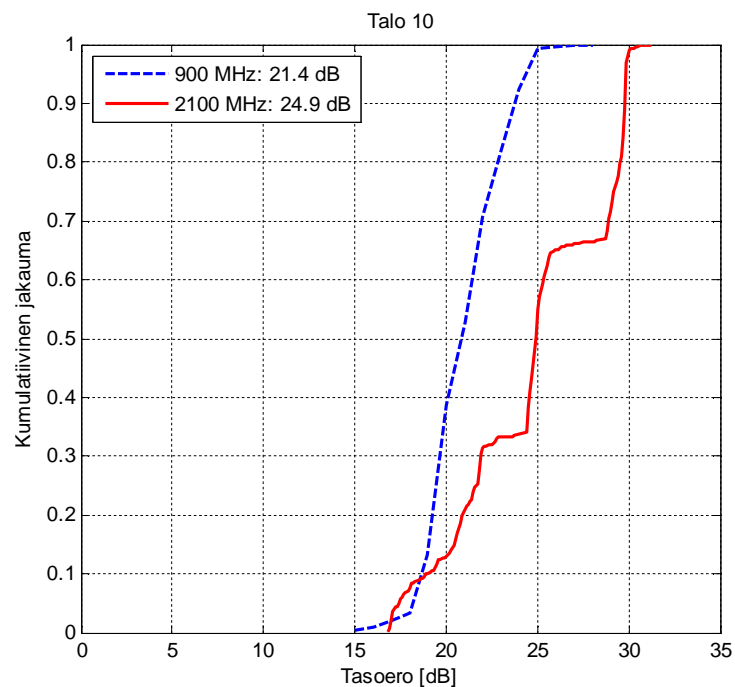
Talo 9

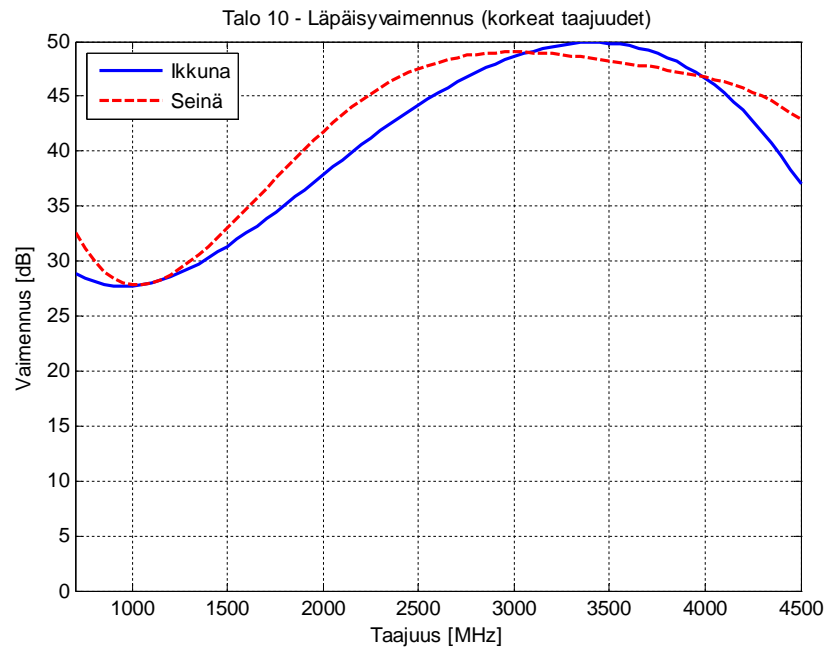
Talo 9 on toteutukseltaan kevytharkkoratkaisu, jossa reiät on täytetty betonilla. Talon ikkunat ovat kiinteitä 3-kerroksisia.



Talo 10

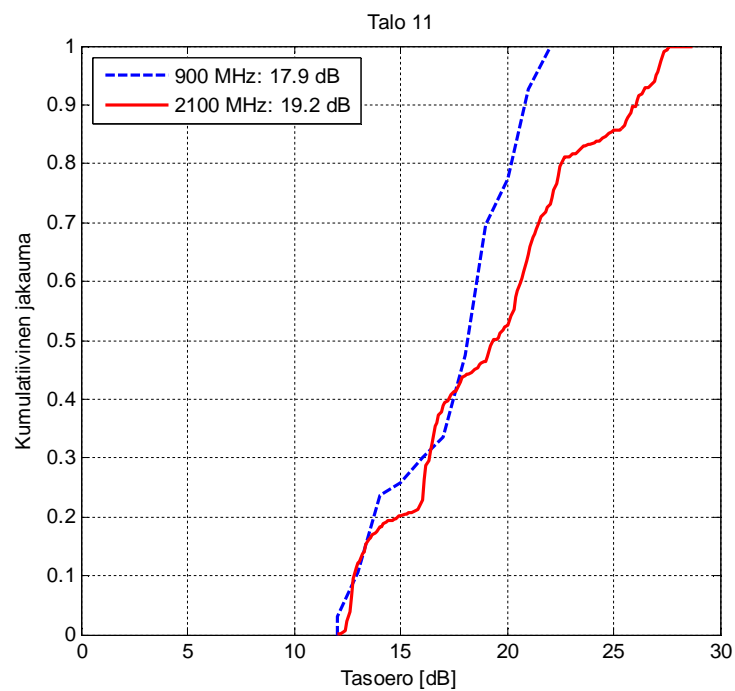
Talo 10 on tiilimuurattu talo. Sisäpuoli on muurattu 130 mm paksuista tiilistä. Ulkoverhous on pääsääntöisesti tummanpunaiseksi poltettua tiiltä. Näiden tiilikuorien välissä on 180mm paksu polyuretaanilevy. Ikkunat ovat avattavat 3-kerroksiset.





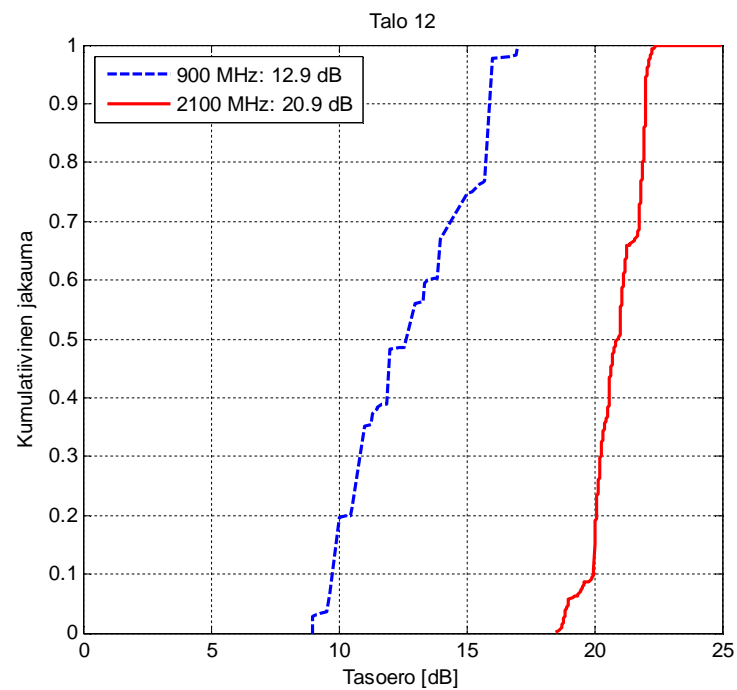
Talo 11

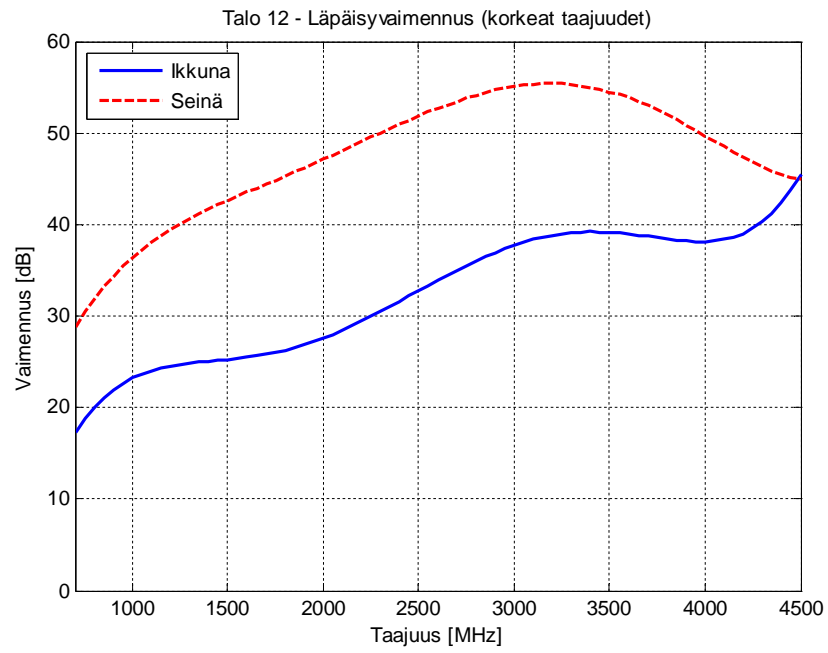
Talo 11 on toteutettu styroksielementtiratkaisuna, jonka aukkoihin on valettu betonia. Julkisivut ovat tehty hyvin ohuella tiilikuorella. Ikkunat ovat kiinteät ja 3-kerroksiset.



Talo 12

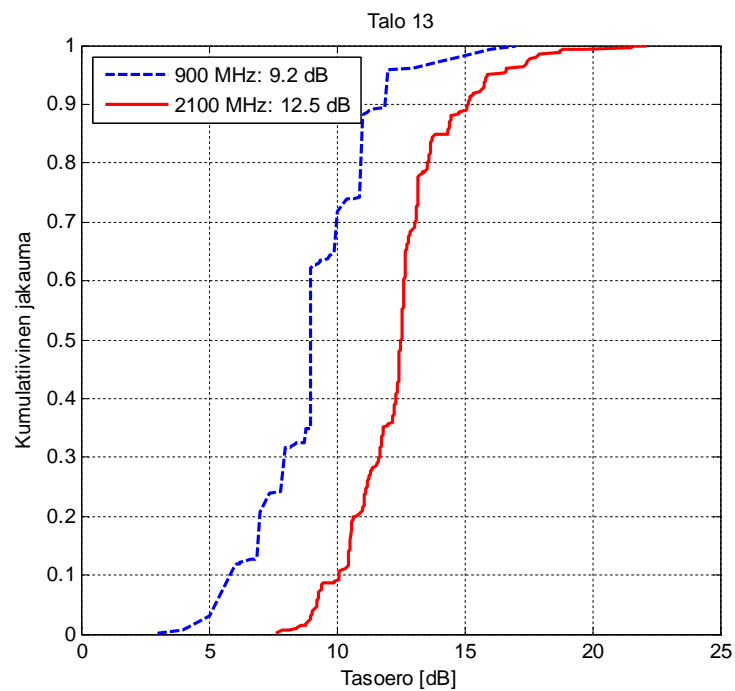
Talo 12 on puurakenteinen paritalo, jossa eristemateriaalina polyuretaanilevy. Ikkunat ovat kiinteät ja 3-kerroksiset.

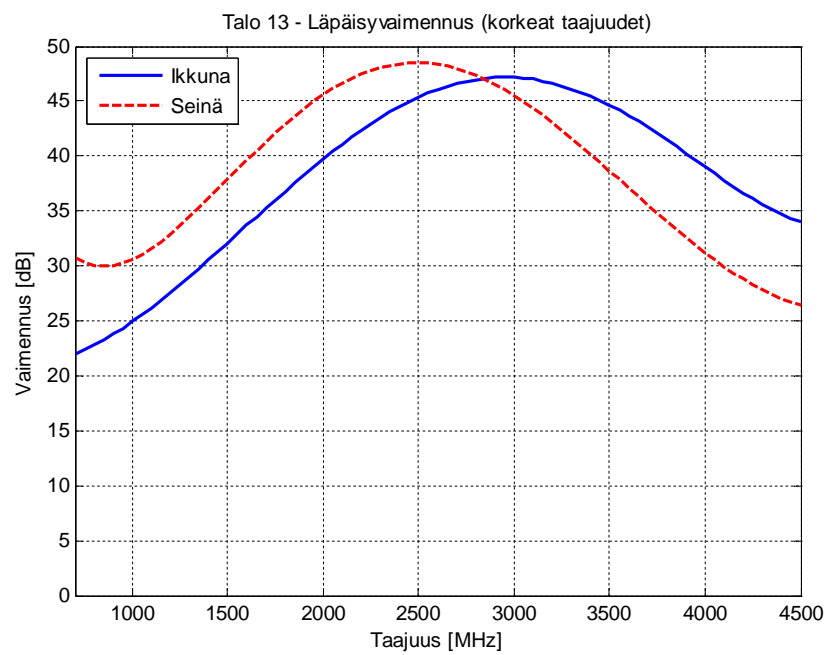
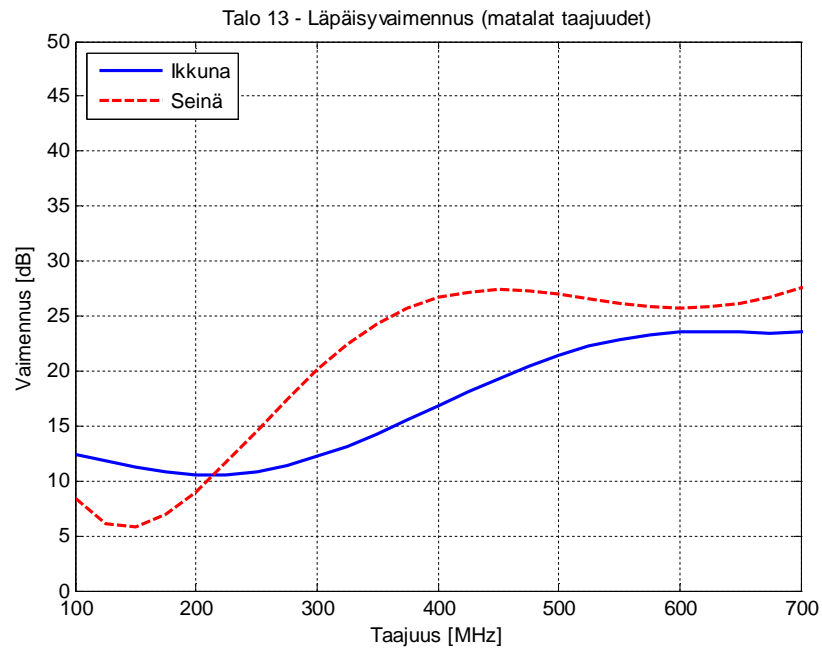




Talo 13

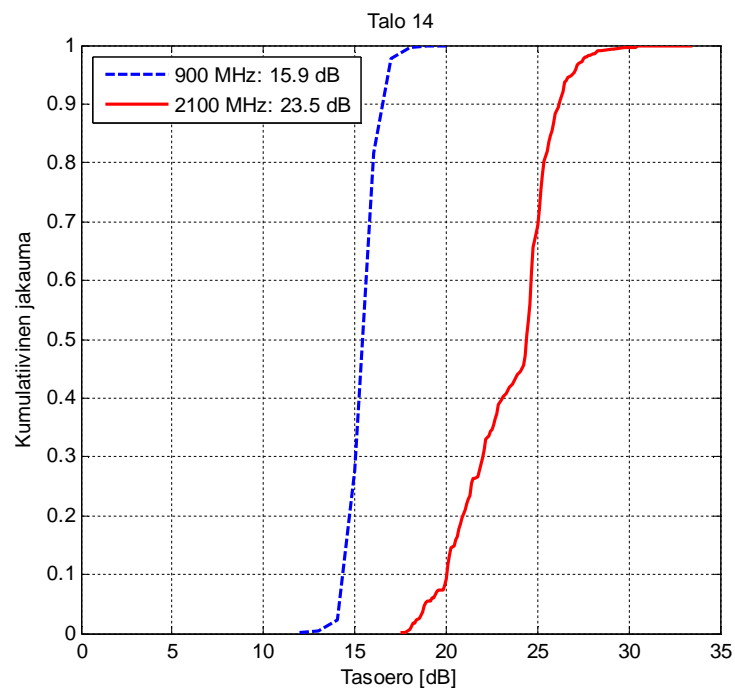
Talo 13 on rakenteeltaan puutalo, jossa eristys on toteutettu polyuretaanilevyillä. Ikkunat ovat osittain avattavat, mutta pääosin kiinteät 3-kerroksiset.





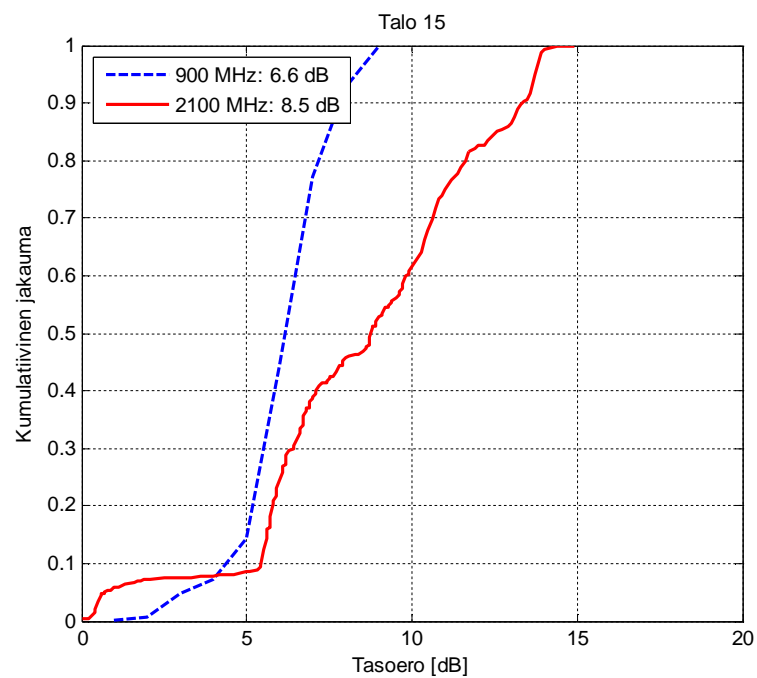
Talo 14

Talo 14 on vahvarakenteinen kivitalo, jonka ikkunat ovat kiinteät 3-kerroksiset.



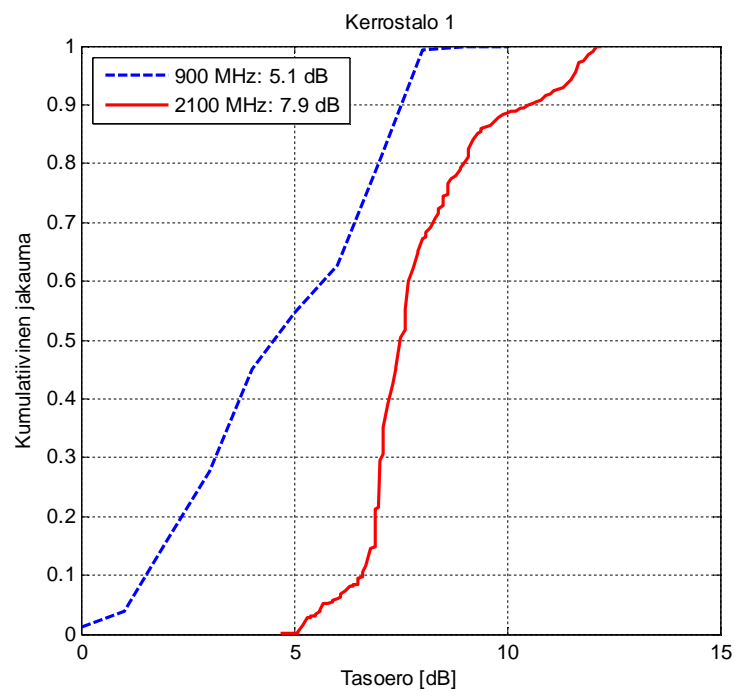
Talo 15

Talo 15 on puu- ja tiilirakenteinen talo, jossa eristemateriaalina lasivilla. Ikkunat ovat avattavat 3-kerroksiset.



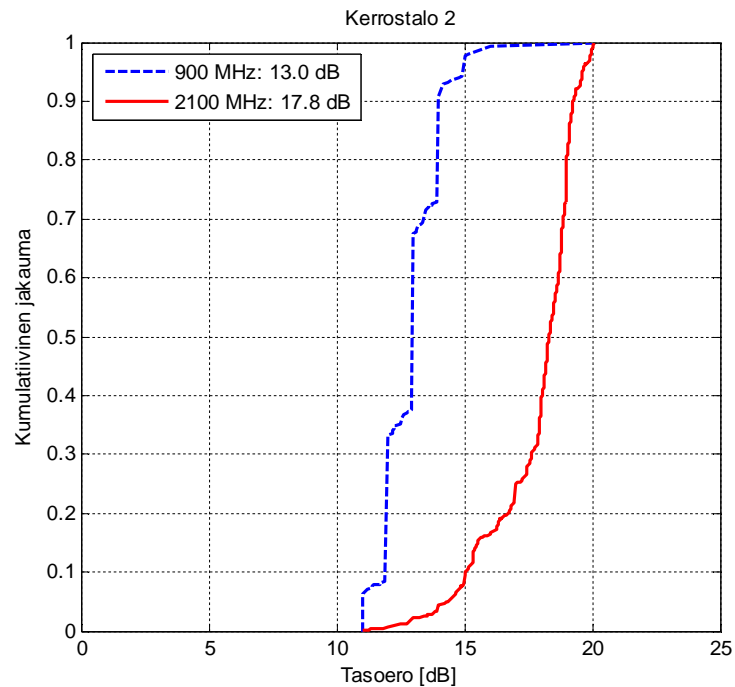
Kerrostalo 1

Kerrostalo 1 edustaa vanhaa betonielementtikerrostalokantaa. Kohde on valmistunut 1976.



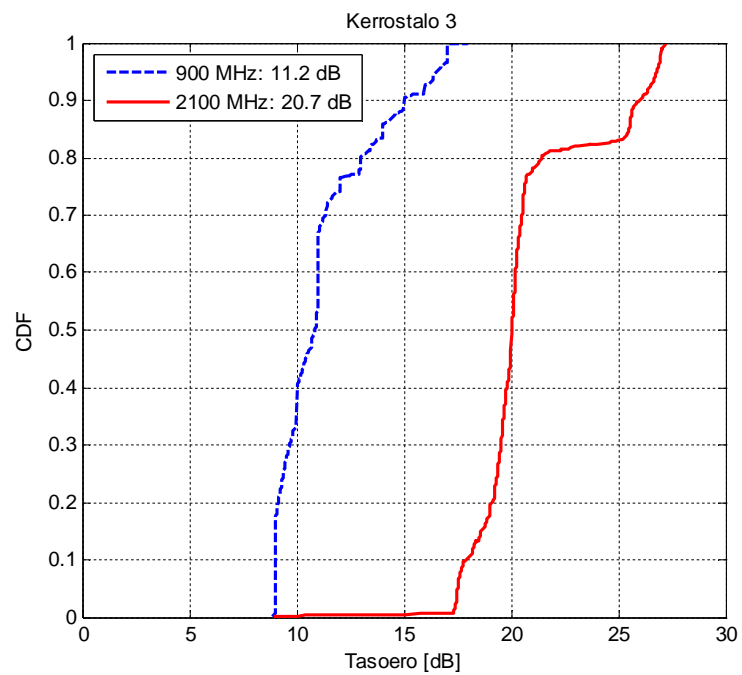
Kerrostalo 2

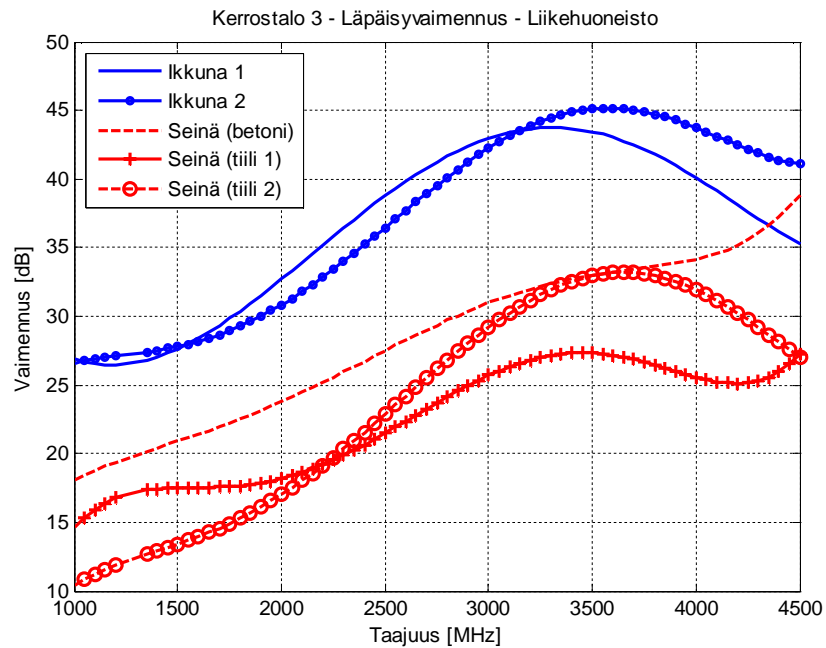
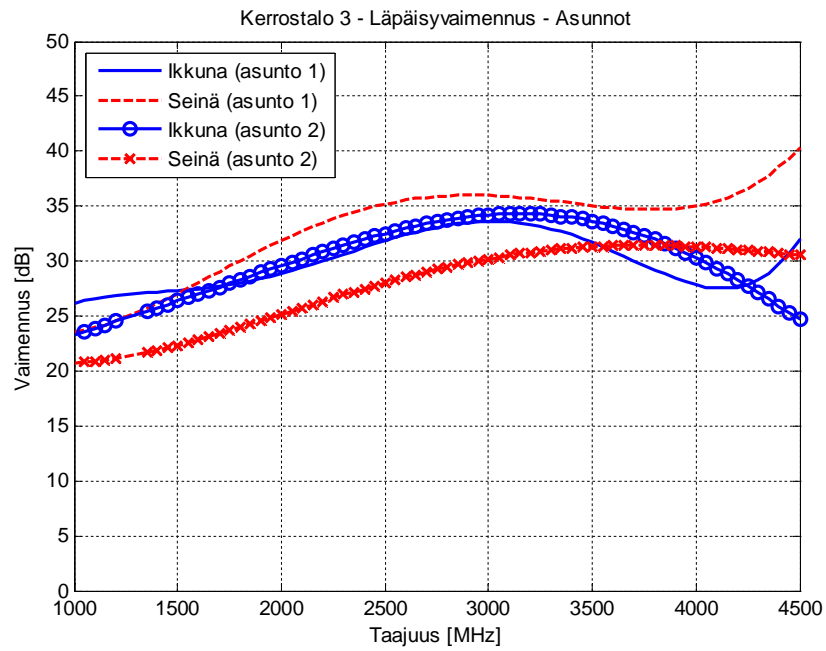
Kerrostalo 2 on valmistunut vuonna 1966. Se on valmistettu betonielementeistä, mutta ikkunat on muutettu moderneimmiksi vuonna 2002. Lasipintojen yleinen rakenne on sellainen, että siinä on yksilasinen ulkopuute ja kaksilasinen sisäpuite.



Kerrostalo 3

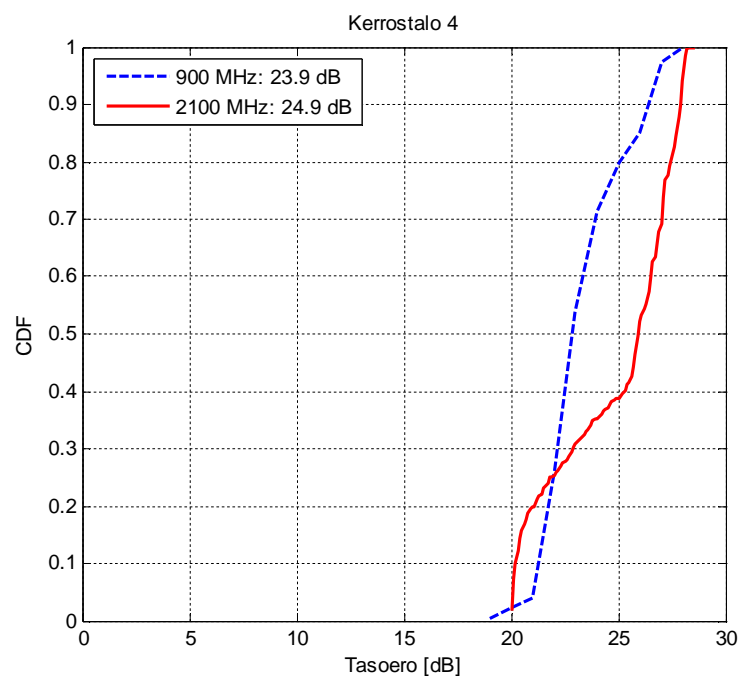
Kerrostalo 3 edustaa uutta betonielementtirakennuskantaa (2012). Ikkunat ovat 3-kerroksiset.





Kerrostalo 4

Kerrostalo 4 on vahvarakenteinen kivitalo, jonka ikkunat ovat 3-kerroksiset.





Tampereen teknillinen yliopisto
PL 527
33101 Tampere

Tampere University of Technology
P.O.B. 527
FI-33101 Tampere, Finland